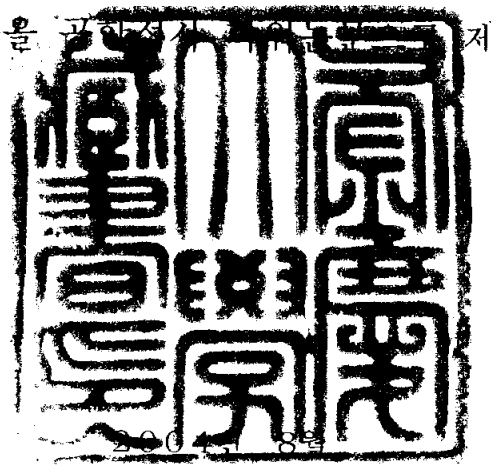
공학석사 학위논문

변단면 압출 추진코와 교량 상부구조와의 상호작용

지도교수 이 환 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2004년 8월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

안 태 욱

안태욱의 공학석사 학위논문을 인준함

2004년 6월 24일

주 심 공학석사 김 종 수

위 원 공학박사 장 희 석

위 원 공학박사 이 환 우

목 차

1. 서론 ····· 1

1.1 연구배경 및 목표 ····· 1

1.2 연구범위 ····· 3

2. ILM교량 공법 ····· 4

2.1 ILM공법의 개요 ····· 4

2.2 ILM공법의 특징 ····· 7

2.2.1 장점 ····· 7

2.2.2 단점 ····· 7

3. 상호작용의 해석모델 ····· 9

3.1 압출진행에 따른 상부 단면력의 변화 ····· 9

3.2 매개변수(parameter) 및 기본가정 ····· 13

3.3 해석 식 ····· 15

3.3.1 1단계 압출 ····· 15

3.3.2 2단계 압출 ····· 17

3.4 해석식의 검증 ····· 41

3.4.1 수치해석적 정확성과 효용성 ····· 41

3.4.2 압출추진코 단면형상의 영향 ····· 44

3.4.3 다이아플램의 영향 ····· 47

3.4.4 지점 D 위치의 경계조건에 대한 검토 ····· 50

4. 매개변수 해석 ····· 54

4.1 압출추진코의 길이가 긴 경우 ····· 54
4.2 압출추진코의 길이가 짧은 경우 ····· 57
4.3 중량비에 따른 영향 ····· 59
4.4 최적길이비 및 최소강성비 ····· 60
4.5 탄성계수비의 변화에 따른 영향 ····· 66

5. 설계 단면력의 발생위치 ····· 67
5.1 지점 C에서의 부모멘트 ····· 67
5.1.1 해석식 유도 ····· 67
5.1.2 등단면 압출추진코의 경우 ····· 70
5.1.3 변단면 압출추진코의 경우 ····· 72
5.2 첫 번째 경간에서의 정 모멘트 ····· 74
5.2.1 등단면 압출추진코에 대한 해석식 유도 ····· 74
5.2.2 첫 번째 경간 정 모멘트 변화(등단면 압출추진코) ····· 76
5.2.3 변단면 압출추진코에 대한 해석식 유도 ····· 79
5.2.4 첫 번째 경간 정 모멘트 변화(변단면 압출추진코) ····· 81
5.3 두 번째 경간에서의 정 모멘트 ····· 84
5.3.1 해석식 유도 ····· 84
5.3.2 등단면 압출추진코의 경우 ····· 86
5.3.3 변단면 압출추진코의 경우 ····· 88

6. 사례연구 ····· 90
6.1 상호작용을 고려한 설계식 ····· 90
6.1.1 중량비와 최적 길이비 ····· 90
6.1.2 설계 단면력과 최적 중량비 ····· 95
6.1.3 설계 단면력과 최적 길이비 ····· 100

6.2 사례교량 압출추진코의 설계현황 분석 ····· 105
6.2.1 사례교량 ····· 105
6.2.2 중량비와 길이비에 대한 검토 ····· 106
6.2.3 설계 단면력과 중량비에 대한 검토 ····· 109
6.2.4 설계 단면력과 길이비에 대한 검토 ····· 112
6.3 상호작용을 고려한 최적설계 ····· 115
6.3.1 단면력 궤적의 분석 ····· 115
6.3.2 최적설계 ····· 121
6.4 강성비와 중량비 변화에 따른 영향 ····· 129

7. 결 론 ····· 131

부 록

A. 해석식과 MIDAS 결과와의 비교 ····· 135
B. 중량비와 최적 길이비 ····· 137

참고문헌 ····· 148

감사의 글 ····· 150

그 림 목 차

그림 2.1 A, B고속도로 구간의 교량 형식별 분류 ····· 5
그림 2.2 PSC교량의 점유율 ····· 5
그림 3.1 압출되는 동안의 대표적인 단면위치 ····· 9
그림 3.2 압출 종료직전의 휨모멘트도 및 전단력도 ····· 10
그림 3.3 압출시의 Nose-Deck 구조계 ····· 14
그림 3.4 3경간 연속보 ····· 17
그림 3.5 압출추진코의 선형변화 ····· 24
그림 3.6 해석식(I형단면)과 MIDAS 결과와의 비교 ····· 41
그림 3.7 해석식(직사각형 단면)과 MIDAS 결과와의 비교 ····· 42
그림 3.8 단면형상에 따른 단면력 변화 ····· 46
그림 3.9 A교량의 단면력 변화 ····· 48
그림 3.10 A교량의 다이아플램 영향 ····· 49
그림 3.11 압출추진코가 맞은 편 교각에 도달하기 직전 ····· 50
그림 3.12 각 경간의 상부구조 압출이 완료된 직 후 ····· 51
그림 4.1 $l_n/l=0.8, q_2/q=0.15, q_1/q=0.05$인 경우 압출하는 동안
강성비에 따른 B점의 모멘트 ····· 55
그림 4.2 $l_n/l=0.5, q_2/q=0.15, q_1/q=0.05$인 경우 압출하는 동안
강성비에 따른 B점의 모멘트 ····· 57
그림 4.3 $I_2/I=0.045, I_1/I=0.02, l_n/l=0.65$인 경우의 중량비 변화에
따른 모멘트 변화 ····· 59
그림 4.4 $q_2/q=0.08, q_1/q=0.05, l_n/l=0.61$인 경우 압출하는 동안
강성비에 따른 B점의 모멘트 ····· 61

그림 4.5 $q_2/q=0.15, q_1/q=0.05, l_n/l=0.65$인 경우 압출하는 동안
강성비 따른 B점의 모멘트 ····· 61
그림 4.6 $q_2/q=0.06$인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한
B점의 모멘트 ····· 63
그림 4.7 $q_2/q=0.08$인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한
B점의 모멘트 ····· 64
그림 4.8 $q_2/q=0.1$인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한
B점의 모멘트 ····· 65
그림 4.9 $l_n/l=0.65, q_2/q=0.15, q_1/q=0.05, I_2/I=0.045, I_1/I=0.02$인
경우 압출하는 동안 탄성계수비에 따른 B점의 모멘트 ····· 66
그림 5.1 중첩법의 적용(1단계 압출) ····· 68
그림 5.2 길이비의 변화에 따른 C지점의 모멘트 변화
(등단면 압출추진코) ····· 70
그림 5.3 길이비의 변화에 따른 C지점의 모멘트 변화
(변단면 압출추진코) ····· 72
그림 5.4 첫 번째 경간 분리(등단면 압출추진코) ····· 74
그림 5.5 $l_n/l=0.8$, $q_n/q=0.1$일때의 강성비에 따른 첫 번째 경간의
최대 정 모멘트의 변화 ····· 76
그림 5.6 $l_n/l=0.5$, $q_n/q=0.1$일때의 강성비에 따른 첫 번째 경간의
최대 정 모멘트의 변화 ····· 77
그림 5.7 첫 번째 경간 분리(변단면 압출추진코) ····· 79
그림 5.8 $l_n/l=0.8$, $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$일때 첫 번째 경간의
최대 정 모멘트 변화 ····· 81
그림 5.9 $l_n/l=0.5$, $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$일때 첫 번째 경간의
최대 정 모멘트 변화 ····· 82

그림 5.10 단순보로 분리 ····· 84
그림 5.11 $l_n/l=0.8$, $q_n/q=0.1$일 때 두 번째 경간의 최대 정모멘트 변화 ····· 86
그림 5.12 $l_n/l=0.8$, $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$일때 두 번째 경간의 최대 정 모멘트 변화 ····· 88
그림 6.1 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.04$) ····· 90
그림 6.2 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.06$) ····· 91
그림 6.3 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.07$) ····· 91
그림 6.4 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.08$) ····· 92
그림 6.5 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.09$) ····· 92
그림 6.6 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.10$) ····· 93
그림 6.7 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.12$) ····· 93
그림 6.8 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.14$) ····· 94
그림 6.9 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.04$) ····· 95
그림 6.10 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.06$) ····· 96
그림 6.11 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.07$) ····· 96
그림 6.12 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.08$) ····· 97
그림 6.13 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.09$) ····· 97
그림 6.14 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.10$) ····· 98
그림 6.15 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.12$) ····· 98
그림 6.16 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.14$) ····· 99
그림 6.17 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.04$) ····· 100
그림 6.18 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.06$) ····· 101

그림 6.19 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.07$) ····· 101
그림 6.20 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.08$) ····· 102
그림 6.21 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.09$) ····· 102
그림 6.22 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.10$) ····· 103
그림 6.23 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.12$) ····· 103
그림 6.24 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.14$) ····· 104
그림 6.25 조사교량과 설계식과의 비교 ····· 107
그림 6.26 조사교량과 설계식과의 비교 ····· 110
그림 6.27 조사교량과 설계식과의 비교 ····· 113
그림 6.28 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(A교량) ····· 116
그림 6.29 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(B교량) ····· 116
그림 6.30 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(C교량) ····· 117
그림 6.31 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(D교량) ····· 117
그림 6.32 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(E교량) ····· 118
그림 6.33 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(F교량) ····· 118
그림 6.34 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(G교량) ····· 119
그림 6.35 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(H교량) ····· 119
그림 6.36 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(I교량) ····· 120
그림 6.37 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(A교량) ····· 122
그림 6.38 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(B교량) ····· 122
그림 6.39 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(C교량) ····· 123
그림 6.40 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(D교량) ····· 123
그림 6.41 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(E교량) ····· 124
그림 6.42 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(F교량) ····· 124
그림 6.43 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(G교량) ····· 125

그림 6.44 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(H교량) ····· 125
그림 6.45 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(I교량) ····· 126
그림 6.46 조사교량의 강성비 변화에 따른 M_B 분포 ····· 129
그림 6.47 조사교량의 중량비 변화에 따른 M_B 분포 ····· 130

표 목 차

표 3.1 최소일의 방법 ····· 19
표 3.2 단면특성 ····· 45
표 3.3 A교량의 단면특성(I형 압출추진코) ····· 47
표 3.4 압출추진코가 맞은 편 교각에 도달하기 직전 ····· 52
표 3.5 각 경간의 상부구조 압출이 완료된 직 후 ····· 52
표 4.1 길이비 변화에 따른 최적중량비 변화($q_2/q=0.06$) ····· 62
표 4.2 길이비 변화에 따른 최적중량비 변화($q_2/q=0.08$) ····· 63
표 4.3 길이비 변화에 따른 최적중량비 변화($q_2/q=0.1$) ····· 64
표 6.1 조사된 교량들의 제원(지간장=50m) ····· 105
표 6.2 최대모멘트와 길이비 ····· 126

Nose-Deck Interaction of ILM Bridge Proceeding with Tapered Sectional Launching Nose

Tae-Wook Ahn

Department of Civil Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

In constructing ILM(Incremental Launching Method) bridges, a launching nose is generally used in order to absorb temporary stress occurring during launching. The sectional force of superstructure of ILM bridges, which occurs during launching, varies significantly according to the length, weight and stiffness of the launching nose. Thus in order to secure the safety of section in design and construction of ILM bridges, the change of stress according to interaction behavior between launching nose and superstructure must be considered.

In designing ILM bridges in Korea, span division and span length are often decided based on previous cases. Accordingly, the sections of launching noses do not vary among projects. Thus people do not recognize the necessity of the optimum design of launching noses considering interaction behavior during launching, which affects the optimum design of the section of superstructure.

The height of the launching nose varies in linear along longitudinal direction of the section. However, previous researches on interaction behavior between launching noses and superstructure assumed that the sectional shape of launching noses is a equivalent section different from the actual shape. In this case accuracy may be lowered in interpreting the sectional force of superstructure during launching according to the degree of change in the section of launching noses.

The present study examined 'Nose-Deck Interaction of ILM Bridge Proceeding with Tapered Sectional Launching Nose' as a part of research on the structural behavior of prestressed concrete bridges, which are constructed using ILM construction method, during the process of construction. Parameters were considered span length ratio, weight ratio, stiff ratio and elastic modular ratio between the launching nose and the superstructure. From to the result were derived an analytical formula for interaction behavior that consider both cases where the sectional height of the launching nose is uniform within the entire length and cases of tapered section where it changes linearly. In addition, a design formula was proposed by analyzing the effect of each parameter using the derived analytical formula, and using the proposed analytical formula and design formula, the design level of ILM bridges constructed on 00 Expressway was examined.

According to th result of this study, the proposed formulas are expected to make a significant contribution to section design that is economically efficient and at the same time guarantees the safety of the superstructure and launching noses of ILM bridges regardless of span length.

Key words : incremental launching method, nose-deck interaction, tapered sectional launching nose, analytical formula, design formula, optimum design

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목표

높은 품질을 확보하는데 있어 효과적인 공법으로 인정받아 널리 채택되고 있는 ILM(incremental launching method)교량 공법은 압출되는 동안 상부의 단면이 지간의 중앙부와 지점부를 모두 통과한다. 따라서, 단면들은 사하중에 의한 최대 정 모멘트 및 최대 부 모멘트 그리고 최대 전단력을 모두 경험하게 되는 구조적 특성을 가지고 있다. 결국, ILM 교량의 상부단면들은 교량 공용상태와는 다른 응력들을 압출 중에 경험하게 된다.

ILM 교량의 상부단면들이 압출 중에 경험하게 되는 응력들은 시공 중에만 발생되는 일시적인 응력들이지만, 그 크기는 단면의 안전성에 영향을 줄 수 있다. 이 일시적인 응력을 흡수하고, 효과적으로 제어하기 위해서는 임시교각을 설치하는 방법, 압출추진코(launching nose)를 이용하여 캔틸레버 부분의 중량을 감소시키는 방법 등이 적용될 수 있으나, 일반적으로는 압출추진코(launching nose)가 이용되고 있다[Rosignoli, 1998].

압출추진코의 최적설계는, 압출이 진행되는 동안에 발생되는 상부단면에 발생되는 응력들의 크기와 변화 폭이 최소화되게 하는 데에 있다. 그리고, 이 응력들의 크기와 변화폭에 영향을 주는 주요 설계변수들은 압출추진코의 길이(length), 강성(stiffness), 및 중량(weight) 등이다. 따라서, ILM 교량에서는 이들 설계변수들과의 상호작용에 따른 상부단면에서의 응력변화를 고려하여 최적의 압출추진코를 설계하는 것이 상부단면의 설계를 최적화하는 목표달성에 중요한 요인이 될 것이다.

그러나 국내에서는 ILM 교량의 설계에서도 경간분할 및 지간길이 등이 전례의 설계결과에 따라 결정되는 경우가 많다. 따라서, 상부구조와 압

출추진코의 단면들이 현장에 따라 크게 달라지지 않는다. 그러므로 상부단면의 최적설계에 영향을 주는 압출 중 상호작용을 고려한 압출추진코의 최적설계에 관한 필요성도 크게 인식되지 못하고 있는 실정이다. 이에따라, 단순히 전례의 설계결과를 정리하여 보관하는 정도의 기술축적이외의 기술개발에 대한 절실한 필요성도 크게 제기되지 못하는 실정이다. 결국, 위와 같은 설계관행의 지속은 설계업무의 효율성 측면에서는 장점이 있으나 창의적인 설계결과를 기대하거나 이를 바탕으로 우리나라의 관련 기술분야의 발전을 기대하기는 어려운 것이다.

한편, 압출추진코의 단면형상을 전체 길이 내에서 동일한 단면으로 가정한 상태에서 압출추진코와 상부단면과의 상호작용에 따른 부재력 변화를 연구한 결과들이 있다[Rosignoli, 1998; 문영철, 2002]. Rosignoli(1998)의 연구는 상호작용을 고려한 압출 중에 변화하는 상부단면의 휨모멘트를 계산하는 해석식과 압출추진코의 길이와 중량변화에 따른 영향을 분석하였다. 문영철의 연구는 상호작용을 고려할 수 있는 압출추진코의 설계식을 개발하였다. 그러나, 실제의 압출추진코는 전체 길이 내에서 단면의 높이가 선형으로 변화하는 단면으로 설계되는 것이 일반적이다. 따라서, 압출추진코의 단면이 전체 길이 내에서 동일하다고 가정한 조건에서 개발된 해석식이나 설계식을 적용하는 것은 정확성이 부족할 수 있다.

본 연구에서는 압출 중인 ILM 교량의 상부단면에 발생하는 단면력을 효과적으로 제어하여 최적화된 단면 설계를 이루고자 하는 목적으로 변단면 압출추진코와 교량 상부단면과의 상호작용에 관하여 수행하고자 한다.

1.2 연구범위

본 연구에서는 ILM 교량의 변단면 압출추진코(launching nose)와 상부구조와의 상호작용에 따른 거동을 분석하여, 상부단면의 최적설계 및 고품질의 시공을 목표로 실무 기술자들이 보다 간편하게 이용할 수 있는 기술자료를 제시하고자 한다.

압출추진코의 단면의 높이가 전체 길이 내에서 균일한 경우와 선형으로 변화하는 변단면인 경우 모두를 고려하는 상호작용에 대한 해석식을 도출할 것이다. 이때, 매개변수로는 압출추진코와 상부구조와의 지간 길이비, 중량비, 강성비, 그리고 탄성계수비를 고려 할 것이다. 그리고 도출된 해석식을 이용하여 각 매개변수의 변화에 따른 상호작용의 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 설계식을 제시하고자 한다. 또한, 00 고속도로 상에 건설된 ILM 교량들을 대상으로 제안된 해석식과 설계식을 적용하여 설계결과를 분석하고, 그 설계수준을 검토하고자 한다.

2. ILM 교량공법

2.1 ILM 공법의 개요

ILM 공법은 1960년대 초에 서독의 Stuttgart시에 있는 Leonhardt & Andr사의 Fritz Leonhardt, Willi Baur 및 Andr 3인에 의하여 개발된 공법으로서 그 후 점차적으로 발전되어 현재에 이르고 있다.

이 공법은 사진 1에서와 같이 상부구조물을 교대 후방에 미리 설치한 제작장에서 1 개의 세그먼트(segment)씩 제작하여, 교량의 지간을 통과할 수 있는 평형 압축력을 포스트텐션 방법에 의해 미리 제작된 상부 구조물에 프리스트레스를 도입시킨 후 교량의 교축방향으로 특수 압출장비를 이용하여 밀어내는 공법이다.

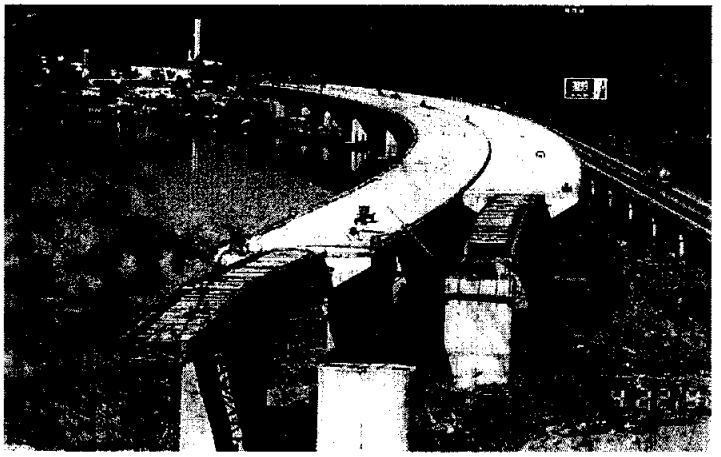


사진 2.1 ILM공법 교량

국가 경제의 발전을 위해서 사회간접 시설에 대한 투자는 필수불가결한 요소이다. 우리나라의 경우에도, 국가 경쟁력을 좌우하는 물류비용을

최소화하기 위해서 고속도로의 신설이나, 차량의 통과속도를 일정수준 이상 확보하기 위한 고속도로의 선형 개량사업이 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 국토의 70%를 차지하는 산악지역 및 하천을 통과하기 위한 장지간의 교량 건설이 불가피해졌다.

참고로, A고속도로 구간과 B고속도로 구간의 50m이상 지간장을 확보한 교량 현황을 조사한 결과, 그림 2.1과 같이 총 연장 47,836m 중 ILM, FCM, 그리고 MSS공법으로 건설되는 PSC교량은 총 21,888m로 약 50% 정도의 점유율을 가지는 것으로 나타났다.

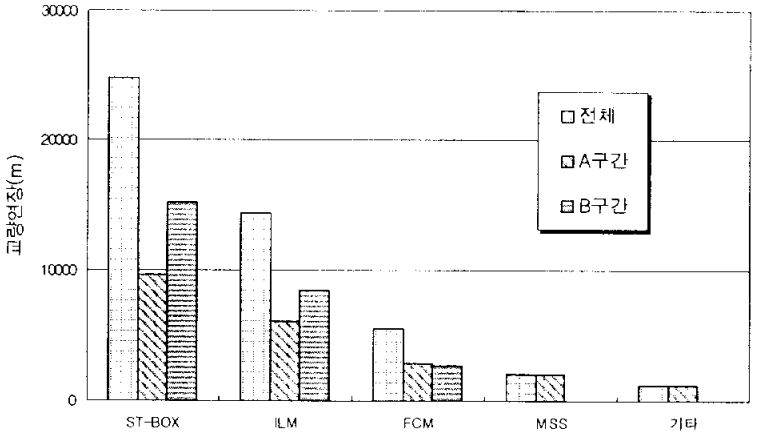
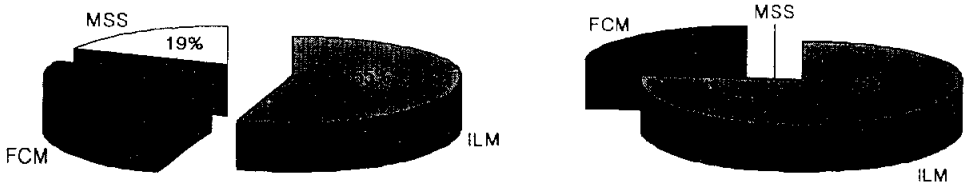


그림 2.1 A, B고속도로 구간의 교량 형식별 분류



a) A고속도로 구간 **b) B고속도로 구간**

그림 2.2 PSC교량의 점유율

그림 2.2는 A, B고속도로 구간의 PSC교량 공법별 점유율을 나타내고

있다. A고속도로 구간의 경우 총 10857m의 PSC교량 중 ILM 공법으로 건설된 교량은 6,007m로 약 55%의 점유율을 가지는 것으로 조사되었고, B고속도로 구간의 경우는 총 11,030m의 PSC교량 중 8,390m가 ILM 공법을 채택하여 76%의 점유율을 가지는 것으로 조사되어, 국내 지형적인 특징으로 인해 ILM 공법이 장지간 교량을 건설하기 위한 공법으로 널리 채택되고 있음을 알 수 있었다.

그러나 국내에 건설되고 있는 ILM 교량은 교량의 구조적 거동과 현장여건을 고려하여 교량 상부구조의 경제성을 확보할 수 있음에도 불구하고, 관행적으로 지간장이 모두 50m 이하로 제한되어 건설되고 있는 것이 현실이다. 그러므로 국내 장지간 교량건설을 위한 공법으로 널리 채택되고 있는 ILM 교량 공법에 관한 연구는 기술발전과 함께 경제적 가치 측면에서도 크게 필요할 것으로 본다.

2.2 ILM 공법의 특징

2.2.1 장점

1) 기술적인 측면

(1) 제작장은 공장생산이 갖는 모든 장점을 갖는다. 즉, 반복작업으로 수행될 뿐만 아니라 전천후 제작이 가능하다.

(2) 거푸집의 반복되는 가설 및 해체작업으로 인한 시간 낭비가 없고, 계곡, 하천, 교통 장애물의 통과 지역에 적합하다.

(3) 연속교로 시공되므로 신축이음장치의 설치개소가 줄어 차량의 주행성이 양호하다.

2) 경제적인 측면

(1) 동일한 작업 공정의 반복이므로 노무비가 절감된다.

(2) 거푸집 및 가시설물의 재사용과 조립해체작업이 간편하다.

(3) 일정한 장소에서 철근가공조립 및 긴장작업이 용이하다.

(4) 자재 운반거리가 단축된다.

(5) 콘크리트 품질관리가 우수하다.

(6) 작업장에 보온설비를 함으로써 외부 기후조건과 상관없이 공사를 진행할 수 있으므로 공사 기간이 단축된다.

(7) 가설 구조물(강재 거푸집, 압출추진코) 및 장비의 타공사에 전용이 가능하다.

(8) 시공중에 안전도가 높고, 현장의 청결성으로 건설공해를 줄일 수 있다.

2.2.2 단점

1) 적용 대상교량은 직선구간 혹은 단일 원곡선 구간(Val Restel 교량의 경우 $R=150m$)이어야 한다.

2) 교대 배면에 일정한 작업 공간을 확보할 수 있어야 한다.

3) 구조물 제작시에 엄격한 규격관리가 필요하다. 제작 규격오차가 발생되면 일정량만큼 압출 후에는 교정 및 수정이 매우 어려우며 그 비용도 많이 소요된다.

4) 상부구조물의 단면높이가 일정하여야 하므로, 지간이 긴 교량의 경우에 단면 변화에 의한 재료절감을 기대할 수 없다.

5) 압출하는 동안 발생하는 일시적인 모멘트를 지지시키기 위해서는 별도의 축방향 프리스트레싱이 필요하므로 긴장재의 소요량이 많다.

6) 교장이 짧은 경우, 가설구조물 및 제작장 등에 대한 비용의 부담이 크다.

3. 상호작용의 해석모델

3.1 압출진행에 따른 상부 단면력의 변화

ILM 교량은 압출이 진행되는 동안, 상부의 각 단면이 지간 중앙부와 지점부를 모두 지난다. 그러므로 모든 단면이 사하중에 의한 최대 정 모멘트 및 최대 부 모멘트 그리고 최대 전단력을 모두 경험하게 된다.

그림 3.1은 압출되는 동안의 발생되는 상부구조의 대표적인 위치를 나타내고 있다. 먼저, 그림 3.1(a)는 완성될 교량구조계에서의 단면 위치와 압출 중의 단면 위치가 일치하는 경우이고, 그림 3.1(b)는 완성될 교량 구조계에서 지점부에 놓이게 될 단면이 지간 중앙부에 위치하는 경우이다.

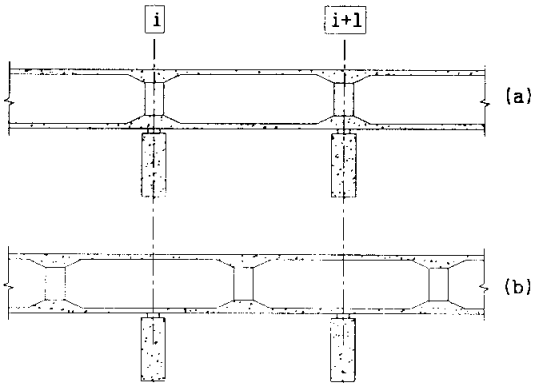


그림 3.1 압출되는 동안의 대표적인 단면위치

그림 3.1(a)와 그림 3.1(b)의 2 가지 경우 모두 지간 중앙부에 위치하고 있는 단면은 완성 구조계에 비하여 안전할 것이다. 압출되는 동안은 사하중만 작용하므로 사용하중이 작용되는 완성 구조계 때보다는 작은 휨 모멘트와 전단력을 가지기 때문이다. 또한, 압출과정의 안전을 위해 작용시

킨 적당한 긴장력 때문에 이들 전단력과 휨 모멘트의 영향은 더욱 감소될 것이다.

한편, 지점부에 위치하는 단면은, 그림 3.1(a)인 경우, 압출되는 동안의 응력은 완성 구조계때의 응력보다는 작고, 단면의 설계가 일반적으로 사용하중에 적합하게 설계되기 때문에 안전성을 확보하고 있다. 그러나, 그림 3.1(b)의 현재의 지점부 단면은 교량 완성 구조계에서 지간 중앙부에 위치할 단면으로서 정 모멘트와 낮은 전단력에 저항할 수 있게 설계되어 져 있다. 그런데, 현재 상태에서는 단면의 저항능력보다 큰 크기의 부 모멘트와 전단력을 받고 있다. 이러한 일시적인 응력에 저항할 수 있기 위해서는 사용상태를 위한 저항능력보다 큰 저항력을 갖는 단면으로 설계되어져야 할 것이다.

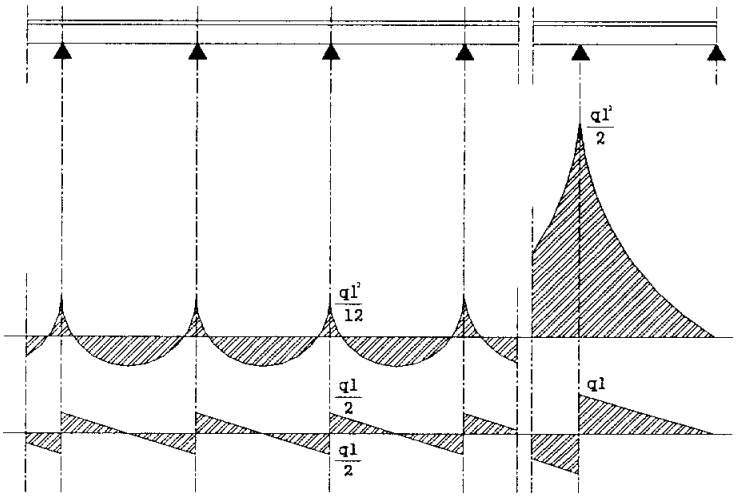


그림 3.2 압출 종료직전의 휨모멘트도 및 전단력도

그림 3.2는 ILM 교량 상부구조계의 맨 첫 번째 지간의 선단이 마지막 지점부에 도달하기 직전의 상태에서의 휨모멘트와 전단력을 나타내고 있다. 맨 앞쪽의 캔틸레버 부분의 길이를 지간의 길이와 같은 l이라 할 때,

첫 번째 지점에서의 부모멘트는 $ql^2/2$으로 나머지 배면지점의 $ql^2/12$보다 무려 6배나 높고, 전단력은 ql로 배면에서의 $ql/2$보다 2배 높게 나타난다.

배면(rear zone)지점의 모멘트와 같은 크기의 단면력이 발생되는 순간의 캔틸레버의 길이 l_{cr}을 구해보면 식 (3.1)로 부터 $l_{cr}=0.4l$이 된다.

$$\frac{ql_{cr}^{\ 2}}{2} = \frac{ql^2}{12} \tag{3.1}$$

이러한 일시적으로 높은 응력을 해결하기 위한 방법은 크게 2 가지 범주로 분류할 수 있다.

1) 지점수를 늘려서 지간길이 l을 작게하여 압출시의 응력을 줄이는 방법.
2) 캔틸레버 부분의 중량을 감소시켜 응력을 줄이는 방법.

1)의 해결방안에 대한 적용은 각 지간에 임시교각을 설치하여 지간 길이 l을 줄이는 방법이다. 한 지간에 여러 개의 임시교각을 설치하여 더욱 응력을 줄일 수도 있지만, 실질적으로 임시교각의 지점이동, 시공오차, 상부 단면의 휨 강성 등의 이유로 1 개를 설치하였을 때처럼 두드러진 응력 감소는 나타나지 않는다. 따라서 일반적으로 1 지간에 1 개의 임시교각을 설치한다.

2)의 해결방안은 맨 첫 번째 지간부의 끝단의 상부단면에 콘크리트 중량보다 더 가벼운 구조체(압출추진코)를 연결시켜 전방의 교각지점에 상부구조보다 먼저 도달시키는 방법이다. 이러한 압출추진코를 이용한 방법은 임시교각을 설치하는 방법보다 비교적 간단하다는 이점이 있다. 또한, 이 방법은 안전하고, 빠르며, 경제적인 편이다. 따라서 압출추진코를 이용한

방법이 대부분의 ILM 공법에서 압출 중 상부단면에 발생되는 일시적으로 큰 크기의 응력을 제어하기 위한 기본적인 방법으로 채택되고 있다. 압출 추진코는 강재 트러스나 플래이트 거더(plate girder)로 제작하여 사용되고 있다. 일반적으로는 두 개의 강재 플래이트 거더(steel plate girder)를 콘크리트 상부끝에 연결시키며, 이때 콘크리트 상부단면의 하부와 플래이트 거더의 하부 플랜지가 일치되게 연결시킨다.

3.2 매개변수(parameter) 및 기본가정

압출 중 상부단면의 부재력 변화에 영향을 줄 수 있는 압출추진코와 교량 상부단면의 기하학적, 역학적인 특성을 고려할 수 있는 아래의 4가지 매개변수를 선정한다.

1) 교량구조(l)의 지간길이에 대한 압출추진코(l_n)의 길이비 ; $\frac{l_n}{l}$

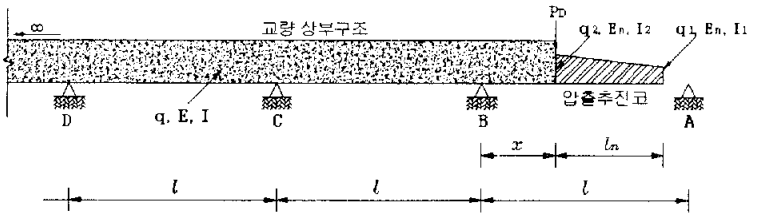
2) 교량구조(q)와 압출추진코(q_1, q_2)의 단위 길이당 중량비 ; $\frac{q_1}{q}$, $\frac{q_2}{q}$

3) 교량구조(I)와 압출추진코(I_1, I_2)의 강성비 ; $\frac{I_1}{I}$, $\frac{I_2}{I}$

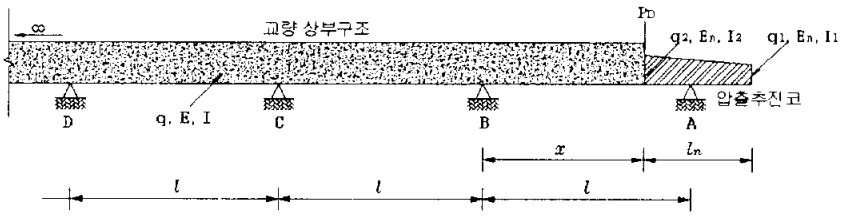
4) 교량구조(E)와 압출추진코(E_n)의 탄성계수비 : $\frac{E_n}{E}$

여기서, q_1, I_1은 압출추진코 끝단에서의 단위 중량과 단면2차모멘트를 의미하고, q_2, I_2는 각각 압출추진코와 콘크리트 상부구조 연결부에서의 압출추진코의 단위 중량과 단면2차모멘트를 의미한다.

상부단면과 압출추진코로 이루어진 구조체가 압출이 진행되는 동안 가질 수 있는 대표적인 구조계는 그림 3.3과 같을 것이다. 따라서, 상호작용의 해석모델도 2 단계로 정의한다. 압출추진코가 지점 A에 도달하기 직전까지의 캔틸레버 상태(그림 3.3.a 참조)를 1 단계 압출이라 명칭하고, 압출추진코가 지점 A에 도달한 후부터 콘크리트 상부가 지점 A에 도달 할 때까지(그림 3.3.b 참조)를 2 단계 압출이라 명칭한다. 그림 3.3.a와 그림 3.3.b에서 정의된 P_D는 교량 상부단면과 압출추진코와의 연결부 다이아플램을 집중하중으로 나타낸 것이다.



(a) 1단계 압출



(b) 2단계 압출

그림 3.3 압출시의 Nose-Deck 구조계

한편, 본 연구에서는 압출추진코와 교량 상부구조와의 상호작용의 해석 모델에 다음과 같은 가정들을 적용한다.

1) 콘크리트 상부구조는 일정한 강성 및 중량을 가진다.
2) 압출추진코의 높이는 단면의 길이방향으로 선형적으로 변화하고, 단면의 폭 방향으로는 일정하다.
3) 그림 3.3의 D점 이후의 지점은 지간길이가 l인 무한개의 연속보로 되어 있다고 가정한다.
4) 미지수를 추가적으로 도입하지 않기 위해서 압출 긴장력은 도심축을 지난다고 가정한다.

3.3 해석 식

3.3.1 1단계 압출 $\left(\frac{M_B^1}{ql^2}\right)$

압출중인 ILM 교량 상부단면의 설계단면력은 그림 3.3.a의 지점 B와 지점 C에서의 부(-)모멘트, 그리고 A-B경간과 B-C경간에서 발생하는 정(+)모멘트 중에서 결정 될 수 있다. 일반적으로는 지점 B에서의 부모멘트가 압출 중의 설계단면력으로 결정된다[Rosignoli, 1998; 문영철, 2002].

그림 3.3.a의 지점 B에서부터 압출추진코와 상부의 연결부분이 거리 x 만큼 압출되었을 때, 지간길이와 압출된 길이의 비를 α라고 하면 α는 식 (3.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{x}{l} \tag{3.2}$$

여기서, 1단계 압출의 정의가 압출추진코의 끝이 지점 A에 도달하기 직전인 $x = l - l_n$까지 이므로 α의 범위는 $0 \leq \alpha < 1 - \frac{l_n}{l}$이 된다.

1단계 압출에서 지점 B에 발생되는 상부단면의 휨모멘트를 M_B^1라 정의한다. 먼저, 압출이 시작되기 직전 즉, $\alpha = 0$인 경우에 휨모멘트 M_B^1는 다음 식 (3.3)과 식 (3.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_B^1 = -\frac{1}{2} \cdot q_1 \cdot l_n^2 - \frac{1}{6}(q_2 - q_1) \cdot l_n^2 \tag{3.3}$$

$$\frac{{M_B}^1}{ql^2} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{q_1}{q} \cdot \frac{l_n^2}{l^2} - \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q}\right) \cdot \frac{l_n^2}{l^2} \tag{3.4}$$

다음으로, 압출이 진행되는 동안 즉, 압출추진코의 끝단이 지점 A에 도달하기 직전까지의 지점 B의 휨모멘트 M_B^1는 다음 식 (3.5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 P_D는 압출추진코와 상부구조 연결부의 다이아플램 집중하중을 의미한다.

$$M_B^1 = -\frac{1}{2}\cdot q\cdot x^2 - q\cdot l_n\left(x+\frac{l_n}{2}\right) - \frac{1}{2}\cdot(q_2-q_1)\cdot l_n\cdot\left(x+\frac{l_n}{3}\right) - P_D\cdot x \qquad (3.5)$$

식 (3.5)에서 x를 αl로 치환한 후, ql^2로 나누면 식 (3.6)이 된다.

$$\frac{M_B^1}{ql^2} = -\frac{1}{2}\cdot\alpha^2 - \frac{q_1}{q}\cdot\alpha\cdot\frac{l_n}{l} - \frac{1}{2}\cdot\frac{q_1}{q}\cdot\frac{l_n^2}{l^2} - \frac{1}{2}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(\alpha\frac{l_n}{l}+\frac{1}{3}\frac{l_n^2}{l^2}\right) - \frac{P_D}{ql}\cdot\alpha \qquad (3.6)$$

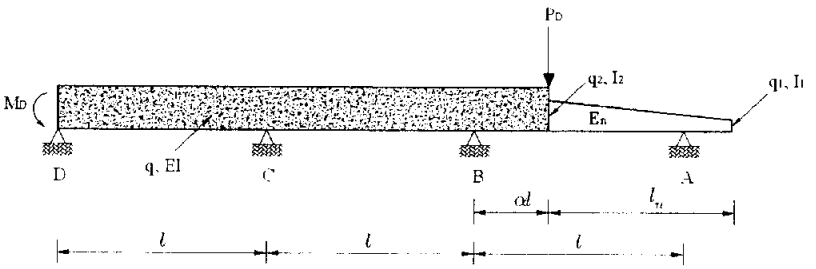
식 (3.6)에서 보는 바와 같이 1단계 압출에서, 지점 B의 휨모멘트 M_B^1는 압출추진코와 교량 상부단면과의 길이비($\frac{l_n}{l}$)와 중량비($\frac{q_1}{q}$,$\frac{q_2}{q}$)만의 함수이고, 강성비($\frac{I_1}{I}$,$\frac{I_2}{I}$)와 탄성계수비($\frac{E_n}{E}$)와는 무관함을 알 수 있다.

3.3.2 2단계 압출$\left(\frac{M_B^2}{ql^2}\right)$

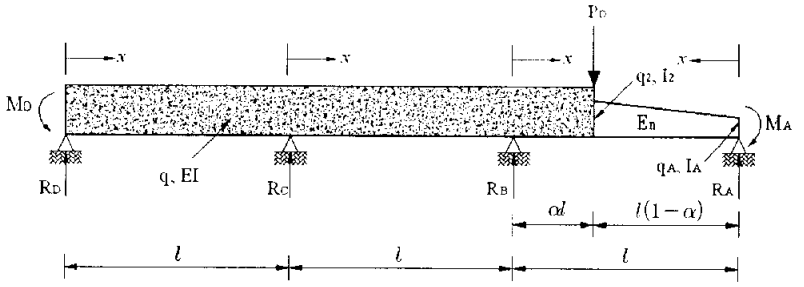
1) 기본 해석식

2단계 압출(그림 3.3.b)은 압출추진코가 지점 A에 도달한 때부터 시작된다. 압출추진코가 지점 A에 도달하게 되면 압출추진코의 끝은 교각의 지점반력에 의해 처짐이 회복된다. 이러한 탄성처짐의 회복으로 정 모멘트가 발생하게 되어 지점 B의 휨모멘트는 감소하게 된다. 2단계 압출은 지점 A에 콘크리트 상부가 도달할 때까지이다. 따라서, 2단계 압출에서 α의 범위는 $1-l_n/l \le \alpha \le 1$이다.

2단계 압출이 진행되는 동안에 지점 B에 발생되는 상부단면의 휨모멘트를 M_B^2라 정의하고, 휨모멘트 M_B^2의 산정을 위해서 그림 3.3.b의 D지점 이후는 무한연속보로 가정한 것에 근거하여 교량 전체 구조계에서 그림 3.4(a)와 같은 3경간 연속보를 해석영역으로 선정하였다.



(a) 해석 영역



(b) 해석 구조계

그림 3.4 3경간 연속보

그림 3.4(b)에서 $M_D = \frac{ql^2}{12}$임을 감안할 때, 휨모멘트 M_B^2는 식 (3.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_B^2 = R_D 2l + R_C l - \frac{ql^2}{12} - 2ql^2 = R_D 2l + R_C l - \frac{25}{12}ql^2 \tag{3.7}$$

그림 3.4(b)의 구조계는 4개의 지점 A, B, C, D에서의 각각의 수직반력 R_A, R_B, R_C 그리고 R_D를 갖는 2차 부정정 구조계이다. 본 연구에서는 식 (3.7)을 완전한 해석식으로 만들기 위해서, 2개의 지점반력은 평형조건식으로부터, 그리고 나머지 2개의 지점반력은 최소일의 방법을 이용한 추가의 조건식으로부터 산정한다.

먼저, 그림 3.4(b)의 해석 구조계에서 지점반력 R_A는 지점 A에서 모멘트 총합 $\sum M_D = 0$, R_D는 지점 A에서 모멘트 총합 $\sum M_A = 0$을 취하는 평형조건식으로부터 식 (3.8)와 (3.9)와 같이 산정한다.

$$\begin{aligned} R_A = &-\frac{1}{3}R_C - \frac{2}{3}R_B - \frac{M_D}{3l} + \frac{M_A}{3l} + \frac{2}{3}ql + \frac{2}{3}q\alpha l + \frac{1}{6}q\alpha^2 l + \frac{2}{3}q_A l(1-\alpha) \\ &+ \frac{1}{3}q_A \alpha l(1-\alpha) + \frac{1}{6}q_A l(1-\alpha)^2 + \frac{1}{3}(q_2 - q_A)l(1-\alpha) + \frac{1}{6}\alpha l(q_2 - q_A)(1-\alpha) \\ &+ \frac{1}{18}(q_2 - q_A)l(1-\alpha)^2 + \frac{P_D}{3}(2+\alpha) \end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned} R_D = &-\frac{2}{3}R_C - \frac{1}{3}R_B + \frac{4}{3}ql + \frac{1}{3}q\alpha l(1-\alpha) + \frac{q}{6}\alpha^2 l + \frac{1}{6}q_A l(1-\alpha)^2 \\ &+ \frac{1}{9}(q_2 - q_A)l(1-\alpha)^2 + \frac{M_D}{3l} - \frac{M_A}{3l} + \frac{P_D}{3}(1-\alpha) \end{aligned} \tag{3.9}$$

다음으로 지점반력 R_B와 R_C는 식 (3.10)과 (3.11)의 최소일의 방법을 적용하여 산정하고자 한다.

$$\sum \int \frac{1}{EI} M \left(\frac{\partial M}{\partial R_B} \right) dx = 0 \tag{3.10}$$

$$\sum \int \frac{1}{EI} M \left(\frac{\partial M}{\partial R_C} \right) dx = 0 \tag{3.11}$$

여기서 M은 해석구간에서의 휨모멘트식을 의미한다.

표 3.1은 휨모멘트(M)와 지점반력 R_B와 R_C의 편도함수 $\partial M/\partial R_B$와 $\partial M/\partial R_C$를 정리한 것이다. 이때, Ⅰ구간은 그림 3.4(b)에서 DC경간을 , Ⅱ구간은 CB경간을, Ⅲ구간은 지점 B에서 콘크리트와 압출추진코 연결부까지를, Ⅳ구간은 지점 A에서 콘크리트 상부와 압출추진코 연결부까지를 말한다.

표 3.1 최소일의 방법

구간	x원점	적분구간	M	$\partial M/\partial R_B$	$\partial M/\partial R_C$
Ⅰ	D	$0 \sim l$	$R_D x - M_D - \frac{1}{2} q x^2$	$-\frac{1}{3} x$	$-\frac{2}{3} x$
Ⅱ	C	$0 \sim l$	$R_D(l+x) + R_C x - M_D - \frac{q(l+x)^2}{2}$	$-\frac{1}{3} l - \frac{1}{3} x$	$-\frac{2}{3} l + \frac{1}{3} x$
Ⅲ	B	$0 \sim \alpha l$	$R_D(2l+x) + R_C(l+x) + R_B x - M_D - \frac{q(2l+x)^2}{2}$	$-\frac{2}{3} l + \frac{2}{3} x$	$-\frac{1}{3} l + \frac{1}{3} x$
Ⅳ	A	$0 \sim l(1-\alpha)$	$R_A x - M_A - \frac{q_A x^2}{2} - \frac{x^2}{6}(q_x - q_A)$	$-\frac{2}{3} x$	$-\frac{1}{3} x$

표 3.1의 내용으로부터 식 (3.10)과 (3.11)의 조건식을 식 (3.12)와 같이 수정하므로써, Ⅲ, Ⅳ구간의 방정식을 소거할 수 있어 보다 간단한 조건을 만들 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 식 (3.10)과 (3.11)의 조건식을 식 (3.12)와 (3.13)의 조건식으로 수정하여 적용시킨다.

$$\sum\int \frac{1}{EI} M\left(\frac{\partial M}{\partial R_B}\right)dx - 2\times\sum\int \frac{1}{EI} M\left(\frac{\partial M}{\partial R_C}\right)dx = 0 \tag{3.12}$$

$$\sum\int \frac{1}{EI} M\left(\frac{\partial M}{\partial R_C}\right)dx = 0 \tag{3.13}$$

먼저, 식 (3.12)를 풀이하면 식 (3.14)와 같이 정리되고, 이어서 식 (3.15)가 된다.

$$\frac{1}{3}R_D l^3 - \frac{1}{6}ql^4 + \frac{2}{3}R_D l^3 + \frac{1}{6}R_C l^3 - \frac{1}{2}ql^4 = 0 \tag{3.14}$$

$$R_D = -\frac{1}{6}R_C + \frac{2}{3}ql \tag{3.15}$$

한편, 마지막 조건식인 식 (3.13)의 좌변을 표 3.1에서 정의한 각 구간별로 정리하면 각 각 식 (3.16), (3.17), (3.18) 그리고 식 (3.19)와 같이 된다.

Ⅰ구간 :

$$\int_0^l \frac{1}{EI}(R_D x - \frac{1}{2}qx^2 - M_D)(-\frac{2}{3}x)dx = \frac{1}{EI}\left(-\frac{2}{9}R_D l^3 + \frac{1}{3}M_D l^2 + \frac{1}{12}l^4 q\right) \tag{3.16}$$

Ⅱ구간 :

$$\int_0^l \frac{1}{EI}\left\{R_D(l+x)+R_C x - M_D - \frac{q(l+x)^2}{2}\right\}\left(\frac{1}{3}x-\frac{2}{3}l\right)dx$$

$$= \frac{1}{EI}\left(-\frac{13}{18}R_D l^3 - \frac{2}{9}R_C l^3 + \frac{1}{2}M_D l^2 + \frac{13}{24}ql^4\right) \tag{3.17}$$

Ⅲ구간 :

$$\int_0^{\alpha l} \frac{1}{EI}\left\{R_D(2l+x)+R_C(l+x)+R_B x - M_D - \frac{q(2l+x)^2}{2}\right\}\left(\frac{1}{3}x-\frac{1}{3}l\right)dx$$

$$=+\frac{1}{EI}\left\{\frac{1}{3}R_D\alpha^2 l^3 + \frac{1}{9}R_D\alpha^3 l^3 + \frac{1}{6}R_C\alpha^2 l^3 + \frac{1}{9}R_C\alpha^3 l^3 + \frac{1}{9}R_B\alpha^3 l^3 - \frac{1}{6}M_D\alpha^2 l^2\right.$$

$$-\frac{1}{3}q\alpha^2 l^4 - \frac{2}{9}q\alpha^3 l^4 - \frac{1}{24}q\alpha^4 l^4 - \frac{2}{3}R_D\alpha l^3 - \frac{1}{3}R_C\alpha l^3 - \frac{1}{6}R_C\alpha^2 l^3 - \frac{1}{6}R_B\alpha^2 l^3$$

$$\left.+\frac{1}{3}M_D\alpha l^2 + \frac{2}{3}q\alpha l^2 + \frac{1}{3}q\alpha^2 l^4 + \frac{1}{18}q\alpha^3 l^4\right\} \tag{3.18}$$

Ⅳ구간 :

$$\int_0^{l(1-\alpha)} \frac{1}{E_n I_x}\left\{R_A x - M_A - \frac{q_A}{2}x^2 - \frac{1}{6}(q_x - q_A)x^2\right\}\left(-\frac{1}{3}x\right)dx$$

$$= \frac{1}{E_n}\left(-\frac{1}{3}R_A\int_0^{l(1-\alpha)}\frac{x^2}{I_x}dx + \frac{M_A}{3}\int_0^{l(1-\alpha)}\frac{x}{I_x}dx + \frac{q_A}{6}\int_0^{l(1-\alpha)}\frac{x^3}{I_x}dx\right.$$

$$\left.+\frac{1}{18}\frac{1}{l_n}(q_2-q_1)\int_0^{l(1-\alpha)}\frac{x^4}{I_x}dx\right) \tag{3.19}$$

다음으로 식 (3.16)에서부터 식 (3.19)에 있는 지점반력 R_A, R_B, R_D를 지금까지 얻어진 지점반력에 관한 3개의 관계식들인 식 (3.8), (3.9)와 식 (3.15)를 이용하여 모두 R_C의 함수로 치환시킨 후에 식 (3.13)을 적용한다. 먼저, 식 (3.9)와 식(3.15)로부터,

$$R_B = -\frac{3}{2}R_C + 2ql + q\alpha l(1-\alpha) + \frac{1}{2}q\alpha^2 l + \frac{1}{2}q_A l(1-\alpha)^2$$
$$+\frac{1}{3}(q_2 - q_A)l(1-\alpha)^2 + \frac{M_D}{l} - \frac{M_A}{l} + P_D(1-\alpha) \qquad (3.20)$$

가 얻어지고, 식 (3.8)과 식 (3.20)으로부터,

$$R_A = +\frac{2}{3}R_C - \frac{3}{4}ql + \frac{M_A}{l} + q\alpha l\left\{-\frac{2}{3}(1-\alpha) + \frac{2}{3}\right\} - \frac{1}{6}q\alpha^2 l + q_A l(1-\alpha)(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}\alpha)$$
$$-\frac{1}{6}q_A l(1-\alpha)^2 + l(q_2 - q_A)(1-\alpha)(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\alpha) + l(q_2 - q_A)(1-\alpha)^2(-\frac{2}{9} + \frac{1}{18})$$
$$-\frac{2}{3}P_D(1-\alpha) + \frac{P_D}{3}(2+\alpha) \qquad (3.21)$$

를 얻을 수 있다. 결국, 식 (3.15), (3.20) 그리고 식 (3.21)을 식 (3.16)에서부터 식(3.19)에 대입한 후에, 식 (3.13)을 정리하면 식 (3.22)를 얻을 수 있다.

$$\sum\int \frac{1}{EI}M\left(\frac{\partial M}{\partial R_C}\right)dx =$$
$$+\frac{1}{EI}\left| R_C\left(-\frac{7}{108}l^3 - \frac{2}{9}\alpha l^3 + \frac{2}{9}\alpha^2 l^3 - \frac{2}{27}\alpha^3 l^3\right)\right.$$
$$+ql^4\left(\frac{7}{108} + \frac{1}{4}\alpha - \frac{1}{4}\alpha^2 + \frac{45}{324}\alpha^3 - \frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha) - \frac{1}{8}\alpha^4 + \frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha) + \frac{1}{18}\alpha^5\right)$$
$$+q_A l^4(1-\alpha)^2(-\frac{1}{12}\alpha^2 + \frac{1}{18}\alpha^3) + M_A l^2(\frac{1}{6}\alpha^2 - \frac{1}{9}\alpha^3) + P_D(1-\alpha)l^3(-\frac{1}{6}\alpha^2 + \frac{1}{9}\alpha^3)$$
$$\left.+l^4(q_2 - q_A)(1-\alpha)^2(-\frac{1}{18}\alpha^2 + \frac{1}{27}\alpha^3)\right|$$
$$+\frac{1}{E_n}\left[-\frac{1}{3}\left\{+\frac{2}{3}R_C - \frac{3}{4}ql + \frac{M_A}{l} + q\alpha l\left(-\frac{2}{3}(1-\alpha) + \frac{2}{3}\right) - \frac{1}{6}q\alpha^2 l\right.\right.$$
$$\left.+q_A l(1-\alpha)(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}\alpha) - \frac{1}{6}q_A l(1-\alpha)^2 + l(q_2 - q_A)(1-\alpha)(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\alpha)\right.$$

$$+ l(q_2 - q_A)(1-\alpha)^2(-\frac{2}{9}+\frac{1}{18}) - \frac{2}{3}P_D(1-\alpha) + \frac{P_D}{3}(2+\alpha)\Big\}\int_0^{l(1-\alpha)}\frac{x^2}{I_x}dx$$

$$+ \frac{M_A}{3}\int_0^{l(1-\alpha)}\frac{x}{I_x}dx + \frac{q_A}{6}\int_0^{l(1-\alpha)}\frac{x^3}{I_x}dx + \frac{1}{18}\frac{1}{l_n}(q_2 - q_1)\int_0^{l(1-\alpha)}\frac{x^4}{I_x}dx\Big| = 0 \tag{3.22}$$

위의 식 (3.22)는 4개의 지점반력들 중에서 R_C만을 포함한 관계식이다. 한편, 식 (3.15)의 R_D를 식 (3.7)에 대입하면 식 (3.23)과 같이 R_C만의 함수인 2단계 압출과정 중 지점 B의 위치에서 휨 모멘트 M_B^2가 산정된다.

$$M_B^2 = \frac{2}{3}R_C l - \frac{3}{4}ql^2 \tag{3.23}$$

그러므로 식 (3.22)에서 R_C를 구한 후에, 그 값을 식 (3.23)에 대입하면 M_B^2를 산정할 수 있다. 다만, 식 (3.22)내에 있는 적분식의 해를 얻기 위해서는 압출추진코의 단면형상에 따라 변화하는 함수인 I_x가 정의되어야 한다.

2) 압출추진코의 단면특성

본 연구에서 압출추진코는 그림 3.5와 같이 길이방향으로 단면의 높이가 선형적으로 변화하고 단면의 폭 방향은 일정하다고 가정하였다.

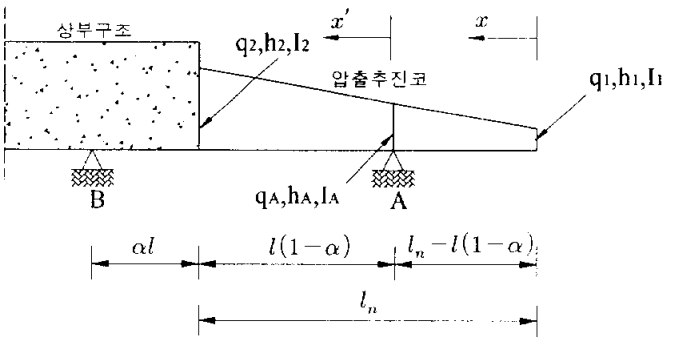


그림 3.5 압출추진코의 선형변화

그림 3.5에서와 같이 압출추진코와 콘크리트 상부구조물 연결부에서의 압출추진코 단위 길이당 중량과 높이, 그리고 압출추진코의 단면 2차 모멘트를 각각 q_2, h_2, I_2, 지점 A에서는 q_A, h_A, I_A 그리고 압출추진코 끝단에서 q_1, h_1, I_1이라고 정의한다. 그러면, 압출추진코의 끝단을 기준으로 압출추진코 중량과 높이의 선형변화는 식 (3.24)과 (3.25)로 표현 할 수 있다.

$$q_x = \frac{q_2 - q_1}{l_n} x + q_1 \tag{3.24}$$

$$h_x = \frac{h_2 - h_1}{l_n} x + h_1 \tag{3.25}$$

그러므로 지점 A에서 압출추진코의 중량과 높이는 식 (3.24)와 (3.25)의 x에 압출추진코의 끝단에서 지점 A까지의 거리 $l_n - l(1-\alpha)$를 대입하

여 식 (3.26)과 (3.27)과 같이 구할 수 있다.

$$q_A = \frac{q_2 - q_1}{l_n}(l_n + \alpha l - l) + q_1 \tag{3.26}$$

$$h_A = \frac{h_2 - h_1}{l_n}(l_n + \alpha l - l) + h_1 \tag{3.27}$$

그리고 지점 A를 기준으로 임의의 x'위치에서의 압출추진코의 중량과 높이는 식 (3.28)과 (3.29)와 같다.

$$q_{x'} = \frac{q_2 - q_1}{l_n}x' + q_A \tag{3.28}$$

$$h_{x'} = \frac{h_2 - h_1}{l_n}x' + h_A \tag{3.29}$$

한편, 그림 3.5와 같이 압출추진코의 높이는 길이방향으로 선형적으로 변화하므로, 압출추진코 끝단을 기준으로 임의의 위치 x에서의 단면 2차 모멘트를 식 (3.30)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_x = C \cdot h_x^{\gamma} \tag{3.30}$$

식 (3.30)에서 C와 γ는 압출추진코 단면형상에 따라 주어지는 상수값이다. 예를 들어, 압출추진코의 단면이 직사각형 단면일 경우 식 (3.31)에서와 같이 $C = \frac{B}{12}$ 와 $\gamma = 3.0$이 되고, I형 단면일 경우 근사적으로 식 (3.32)에 의해 $C = \frac{1}{2}B_f \cdot t_f$와 $\gamma = 2.0$가 된다.

직사각형 단면 : $$I_x = \frac{B}{12} \cdot h_x^3 \tag{3.31}$$

I형단면 : $$I_x \fallingdotseq \frac{1}{2} B_f \cdot t_f \cdot h_x^2 \tag{3.32}$$

여기서, B는 직사각형 단면의 폭을 B_f와 t_f는 I형 단면의 플랜지 폭과 두께를 h_x는 단면 전체 높이를 의미한다.

식 (3.30)을 이용하여 압출추진코의 끝단, 지점 A, 그리고 상부구조와 압출추진코 교점에서의 압출추진코 단면 2차 모멘트는 각각 식 (3.33), 식 (3.34), 그리고 식 (3.35)로 나타낼 수 있다.

$$I_1 = C \cdot h_1^\gamma \tag{3.33}$$

$$I_A = C \cdot h_A^\gamma \tag{3.34}$$

$$I_2 = C \cdot h_2^\gamma \tag{3.35}$$

압출추진코 끝단을 기준으로 임의의 위치 x에서의 압출추진코의 단면 2차 모멘트는 식 (3.30)에 식 (3.25)의 h_x를 대입하면

$$I_x = C\left(\frac{h_2 - h_1}{l_n} x + h_1\right)^\gamma \tag{3.36}$$

가 된다. 식 (3.36)에서 h_2와 h_1은 식 (3.33)과 (3.35)에 의해 $h_2 = \left(\frac{I_2}{C}\right)^{1/\gamma}$, $h_1 = \left(\frac{I_1}{C}\right)^{1/\gamma}$이 되므로, 압출추진코 끝단을 기준으로 임의의 위치 x에서의

압출추진코 단면 2차 모멘트는 식 (3.37)이 된다.

$$I_x = C \cdot \left\{ \frac{\left(\frac{I_2}{C}\right)^{1/\gamma} - \left(\frac{I_1}{C}\right)^{1/\gamma}}{l_n} x + \left(\frac{I_1}{C}\right)^{1/\gamma} \right\}^{\gamma}$$

$$= \left(\frac{(I_2)^{1/\gamma} - (I_1)^{1/\gamma}}{l_n} x + (I_1)^{1/\gamma} \right)^{\gamma} \tag{3.37}$$

한편, 그림 3.5의 지점 A에서의 압출추진코의 단면 2차 모멘트는 식 (3.37)의 x에 압출추진코의 끝단에서 지점 A까지 거리 $l_n - l(1-\alpha)$를 대입하여 식 (3.38)과 같이 구할 수 있다.

$$I_A = \left(\frac{(I_2)^{1/\gamma} - (I_1)^{1/\gamma}}{l_n} (l_n - l(1-\alpha)) + (I_1)^{1/\gamma} \right)^{\gamma} \tag{3.38}$$

그리고, 그림 3.5의 지점 A로부터 임의의 거리 x'에서의 압출추진코의 단면 2차 모멘트는 식 (3.39)와 같이 구해진다.

$$I_{x'} = \left(\frac{(I_2)^{1/\gamma} - (I_1)^{1/\gamma}}{l_n} x' + (I_A)^{1/\gamma} \right)^{\gamma} \tag{3.39}$$

3) I형 단면의 압출추진코($\gamma = 2.0$)

압출추진코 형상에 따라 식 (3.30)과 같이 단면 2차 모멘트 변화에 대한 함수 I_x가 다르므로, 식 (3.22) 내의 적분식의 결과도 다르다. 먼저 국내 현장에서 압출추진코 제원으로 가장 많이 사용되고 있는 I형 단면을 대상으로 설계모멘트 M_B^2를 결정하는 해석식을 도출한다.

압출추진코가 I형 플레이트 거더로 제작된 경우 식 (3.30)의 $\gamma = 2.0$을 식 (3.38)와 (3.39)에 대입하면 그림 3.5의 지점 A에서 단면 2차모멘트 I_A와 A점 이후의 임의의 위치에서 단면 2차 모멘트 I_x는 식 (3.40)과 식 (3.41)과 같다.

$$I_A = \left(\frac{(I_2)^{1/2} - (I_1)^{1/2}}{l_n} (l_n + \alpha l - l) + (I_1)^{1/2} \right)^2 \tag{3.40}$$

$$I_x = \left(\frac{(I_2)^{1/2} - (I_1)^{1/2}}{l_n} x + (I_A)^{1/2} \right)^2 \tag{3.41}$$

식 (3.22)에 포함된 적분식들에 식 (3.41)을 대입하여 풀이하면 각 적분식은 식 (3.42), (3.43), (3.44) 그리고 식 (3.45)와 같다.

$$\int_0^{l(1-\alpha)} \frac{x}{I_x} dx = \frac{1}{\left\{ \frac{(I_2)^{1/2} - (I_1)^{1/2}}{l_n} \right\}^2} \left[\ln \left\{ \left(\frac{I_2}{I_A} \right)^{1/2} \right\} + \frac{I_A^{1/2}}{I_2^{1/2}} - 1 \right] \tag{3.42}$$

$$\int_0^{l(1-\alpha)} \frac{x^2}{I_x} dx = \frac{1}{\left\{ \frac{(I_2)^{1/2} - (I_1)^{1/2}}{l_n} \right\}^3} \left[(I_2)^{1/2} + 2(I_A)^{1/2} \ln \left\{ \left(\frac{I_A}{I_2} \right)^{1/2} \right\} - \frac{I_A}{I_2^{1/2}} \right] \tag{3.43}$$

$$\int_0^{l(1-\alpha)} \frac{x^3}{I_x} dx = \frac{1}{\left\{ \frac{(I_2)^{1/2} - (I_1)^{1/2}}{l_n} \right\}^4} \times$$

$$\left[3(I_A) \ln \left\{ \left(\frac{I_2}{I_A} \right)^{1/2} \right\} + \frac{1}{2} I_2 - 3 I_A^{1/2} I_2^{1/2} + \frac{I_A^{3/2}}{I_2^{1/2}} + \frac{3}{2} I_A \right] \tag{3.44}$$

$$\int_0^{l(1-\alpha)} \frac{x^4}{I_x} dx = \frac{1}{\left\{ \frac{(I_2)^{1/2} - (I_1)^{1/2}}{l_n} \right\}^5} \times$$

$$\left[4(I_A)^{3/2} \ln \left\{ \left(\frac{I_A}{I_2} \right)^{1/2} \right\} + \frac{1}{3} I_2^{3/2} - 2 I_A^{1/2} I_2 + 6 I_A I_2^{1/2} - \frac{I_A^2}{I_2^{1/2}} - \frac{10}{3} I_A^{3/2} \right] \tag{3.45}$$

다음으로, 식 (3.42)에서부터 식 (3.45)까지를 식 (3.22)에 대입한 후, 정리하면 식 (3.46)과 같이 지점반력 R_C를 구할 수 있다.

$$R_C = \frac{A+B}{C} \tag{3.46}$$

여기서 A, B, C는 식 (3.47), 식 (3.48) 그리고 식 (3.49)와 같다.

$$A = -\frac{1}{EI} \left[q l^4 \left(\frac{7}{108} + \frac{1}{4}\alpha - \frac{1}{4}\alpha^2 + \frac{45}{324}\alpha - \frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha) - \frac{1}{8}\alpha^4 + \frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha) + \frac{1}{18}\alpha^5 \right) \right.$$
$$+ q_A l^4 (1-\alpha)^2 \left(-\frac{1}{12}\alpha^2 + \frac{1}{18}\alpha^3\right) + M_A l^2 \left(\frac{1}{6}\alpha^2 - \frac{1}{9}\alpha^3\right) + P_D (1-\alpha) l^3 \left(-\frac{1}{6}\alpha^2 + \frac{1}{9}\alpha^3\right)$$
$$\left. + l^4 (q_2 - q_A)(1-\alpha)^2 \left(-\frac{1}{18}\alpha^2 + \frac{1}{27}\alpha^3\right) \right] \tag{3.47}$$

$$B = -\frac{1}{E_n} \left[-\frac{1}{3} \cdot ① \cdot ② + \frac{M_A}{3} \cdot ③ + \frac{q_A}{6} \cdot ④ + \frac{1}{18 l_n} (q_2 - q_1) \cdot ⑤ \right] \tag{3.48}$$

$$C=\frac{1}{EI}\left(-\frac{7}{108}l^3-\frac{2}{9}\alpha l^3+\frac{2}{9}\alpha^2 l^3-\frac{2}{27}\alpha^3 l^3\right)-\frac{1}{E_n}\cdot\frac{2}{9}\cdot②\tag{3.49}$$

그리고 식 (3.48)와 (3.49)에서 ①, ②, ③, ④, ⑤는 식 (3.50)~(3.54)와 같다.

$$①=-\frac{3}{4}ql+\frac{M_A}{l}+q\alpha l\left(\frac{2}{3}-\frac{2}{3}(1-\alpha)\right)-\frac{1}{6}q\alpha^2 l+q_A l(1-\alpha)\left(\frac{2}{3}+\frac{1}{3}\alpha\right)-\frac{1}{6}q_A l(1-\alpha)^2$$
$$+l(q_2-q_A)(1-\alpha)\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{6}\alpha\right)-\frac{1}{9}(q_2-q_A)l(1-\alpha)^2+\frac{P_D}{3}(2+\alpha)-\frac{2}{3}P_D(1-\alpha)\tag{3.50}$$

$$②=\frac{1}{\left\{\dfrac{(I_2)^{1/2}-(I_1)^{1/2}}{l_n}\right\}^3}\left[(I_2)^{1/2}+2(I_A)^{1/2}\ln\left\{\left(\frac{I_A}{I_2}\right)^{1/2}\right\}-\frac{I_A}{I_2^{1/2}}\right]\tag{3.51}$$

$$③=\frac{1}{\left\{\dfrac{(I_2)^{1/2}-(I_1)^{1/2}}{l_n}\right\}^2}\left[\ln\left\{\left(\frac{I_2}{I_A}\right)^{1/2}\right\}+\frac{I_A^{1/2}}{I_2^{1/2}}-1\right]\tag{3.52}$$

$$④=\frac{1}{\left\{\dfrac{(I_2)^{1/2}-(I_1)^{1/2}}{l_n}\right\}^4}\times\left[3(I_A)\ln\left\{\left(\frac{I_2}{I_A}\right)^{1/2}\right\}+\frac{1}{2}I_2-3I_A^{1/2}I_2^{1/2}+\frac{I_A^{3/2}}{I_2^{1/2}}+\frac{3}{2}I_A\right]\tag{3.53}$$

$$⑤=\frac{1}{\left\{\dfrac{(I_2)^{1/2}-(I_1)^{1/2}}{l_n}\right\}^5}\times\left[4(I_A)^{3/2}\ln\left\{\left(\frac{I_A}{I_2}\right)^{1/2}\right\}+\frac{1}{3}I_2^{3/2}-2I_A^{1/2}I_2+6I_AI_2^{1/2}-\frac{I_A^2}{I_2^{1/2}}-\frac{10}{3}I_A^{3/2}\right]$$

(3.54)

한편, 식 (3.47)에서 식(3.50)까지에서 지점 A에서 압출추진코의 단위길이당 중량을 의미하는 q_A는 식 (3.26)을 대입하면 되고, M_A는 지점 A 이후의 압출추진코 자중에 의해 발생하는 모멘트로서 식 (3.55)를 대입하면 된다.

$$M_A = \frac{q_1}{2}\{l_n - l(1-\alpha)\}^2 + \frac{1}{6}(q_2 - q_1)\left(1 + \alpha\frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n}\right)\{l_n - l(1-\alpha)\}^2 \qquad (3.55)$$

결국, 식 (3.46)의 지점반력 R_C를 2단계 압출의 지점 B에서의 휨모멘트를 나타내는 식 (3.23)에 대입하고 정리하면 M_B^2/ql^2는 식 (3.56)과 같다.

$$\frac{M_B^2}{ql^2} = \frac{2}{3}\left(\frac{ⓐ}{ⓕ} + \frac{E}{E_n}\frac{ⓑ+ⓒ+ⓓ+ⓔ}{ⓕ}\right) - \frac{3}{4} \qquad (3.56)$$

여기서 ⓐ, ⓑ, ⓒ, ⓓ, ⓔ, ⓕ는 식 (3.57)~(3.62)와 같다.

$$\begin{aligned}
ⓐ = &-\left[\left\{\frac{7}{108} + \frac{1}{4}\alpha - \frac{1}{4}\alpha^2 + \frac{45}{324}\alpha^3 - \frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha) - \frac{1}{8}\alpha^4 + \frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha) + \frac{1}{18}\alpha^5\right\}\right. \\
&+\left\{\frac{q_1}{q} + (\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q})(1 + \alpha\frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n})\right\}(1-\alpha)^2(-\frac{1}{12}\alpha^2 + \frac{1}{18}\alpha^3) + \left\{\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}(\frac{l_n^2}{l^2}\right. \\
&-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha) + (1-\alpha)^2) + \frac{1}{6}(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q})\left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2\frac{l_n}{l}(1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \alpha\frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha)\right. \\
&\left.\left.+\alpha\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l} + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\right)\right\}(\frac{1}{6}\alpha^2 - \frac{1}{9}\alpha^3) \\
&\left.+\frac{P_D(1-\alpha)}{ql}(-\frac{1}{6}\alpha^2 + \frac{1}{9}\alpha^3) + (\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q})(-\alpha\frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n})(1-\alpha)^2(-\frac{1}{18}\alpha^2 + \frac{1}{27}\alpha^3)\right|
\end{aligned} \qquad (3.57)$$

$$\begin{aligned}
ⓑ = &-\frac{1}{3}\left\{\frac{3}{4}\frac{l_n^3}{l^3} + \frac{l_n^3}{l^3}\left(\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2\frac{l_n}{l}(1-\alpha) + (1-\alpha)^2\right)\right.\right. \\
&+\frac{1}{6}(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q})\left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2\frac{l_n}{l}(1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \alpha\frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) + \alpha\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l}\right. \\
&\left.\left.\left.+2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\right)\right) + \alpha\frac{l_n^3}{l^3}\left(-\frac{2}{3}(1-\alpha) + \frac{2}{3}\right)\right. \\
&\left.-\frac{1}{6}\alpha^2\frac{l_n^3}{l^3} + \frac{l_n^3}{l^3}\left(\frac{q_1}{q} + (\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q})(1 + \alpha\frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n})\right)(1-\alpha)(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}\alpha)\right.
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&-\frac{1}{6}\frac{l_n^3}{l^3}\left(\frac{q_1}{q}+(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})\right)(1-\alpha)^2\\
&+\frac{l_n^3}{l^3}(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})(-\alpha\frac{l}{l_n}+\frac{l}{l_n})(1-\alpha)(\frac{1}{3}+\frac{1}{6}\alpha)\\
&-\frac{1}{6}\frac{l_n^3}{l^3}(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})(-\alpha\frac{l}{l_n}+\frac{l}{l_n})(1-\alpha)^2-\frac{2}{3}P_D(1-\alpha)\frac{l_n^3}{ql^4}+\frac{P_D}{3}(2+\alpha)\frac{l_n^3}{ql^4}\Bigg\}\\
&\times\frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^3}\left[\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-2\left\{(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}\right.\\
&\left.\times ln\left\{(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}\right\}
\end{aligned}
\tag{3.58}
$$

$$
\begin{aligned}
\text{ⓒ}=&+\frac{1}{3}\frac{l_n^2}{l^2}\left\{\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\left(\frac{l_n^2}{l^2}-2\cdot\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2\right)\right.\\
&+\frac{1}{6}(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})\left(\frac{l_n^2}{l^2}-2\cdot\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2+\alpha\cdot\frac{l_n}{l}-2\alpha(1-\alpha)+\alpha\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\right.\\
&\left.\left.-\frac{l_n}{l}+2(1-\alpha)-\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\right)\right\}\times\frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^2}\left[ln\left\{\frac{1}{(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}}\right\}\right.\\
&\left.+\left\{(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}-1\right]
\end{aligned}
\tag{3.59}
$$

$$
\begin{aligned}
\text{ⓓ}=&+\frac{1}{6}\frac{l_n^4}{l^4}\left\{\frac{q_1}{q}+(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})\right\}\\
&\times\frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^4}\left[0.5\frac{I_2}{I}-3\left\{(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}\frac{I_2}{I}\right.\\
&\left.+3\left\{(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}^2\right\}\\
&\times ln\left\{\frac{1}{(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}}\right\}+\left\{(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}^3\frac{I_2}{I}
\end{aligned}
$$

$$+\frac{3}{2}\left\{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}^2\Bigg] \tag{3.60}$$

$$\text{ⓔ}=+\frac{1}{18}\frac{l_n^4}{l^4}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\times\frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^5}\Bigg[4\left\{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}^3$$

$$\times ln\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}+\frac{1}{3}\frac{I_2^{1.5}}{I^{1.5}}-2\frac{I_2^{1.5}}{I^{1.5}}\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}$$

$$+6\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}^2\frac{I_2^{1.5}}{I^{1.5}}-\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}^4\frac{I_2^{1.5}}{I^{1.5}}$$

$$-\frac{10}{3}\left\{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}^3\Bigg] \tag{3.61}$$

$$\text{ⓕ}=\left(-\frac{7}{108}-\frac{2}{9}\alpha+\frac{2}{9}\alpha^2-\frac{2}{27}\alpha^3\right)$$

$$-\frac{l_n^3}{l^3}\frac{2}{9}\frac{E}{E_n}\frac{1}{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)^3}\Bigg[\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-2\left\{\left(\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}-\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I^{0.5}}\right\}$$

$$\times ln\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}-\left\{\left(1-\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{0.5}}{I_2^{0.5}}\right\}^2\frac{I_2^{0.5}}{I^{0.5}}\Bigg] \tag{3.62}$$

식 (3.56)은 압출이 진행되는 동안에는 그림 3.4의 지점 B 위치의 상부단면에 발생하는 휨모멘트의 크기는 상부단면과 압출추진코와의 휨강성비에 종속되는 것을 알 수 있다. 그러나, 압출이 종료($\alpha=1$)될 때는 강성비에 관계없이 식 (3.63)의 M_B^E에 수렴한다.

$$M_B^E=(0.045q_2+0.089q_1)l_n^2-0.107ql^2 \tag{3.63}$$

식 (3.63)은 식 (3.56)에 압출 종료를 의미하는 $\alpha = 1$을 대입하여 얻을 수 있다.

4) 직사각형 단면의 압출추진코($\gamma=3.0$)

압출추진코가 직사각형 단면으로 제작된 경우 식 (3.30)의 $\gamma=3.0$을 식 (3.38)과 (3.39)에 대입하면 그림 3.5의 지점 A에서 단면 2차모멘트 I_A와 A점 이후의 임의의 위치에서 단면 2차 모멘트 I_x는 식 (3.64)와 (3.65)와 같다.

$$I_A=\left(\frac{(I_2)^{1/3}-(I_1)^{1/3}}{l_n}(l_n+\alpha l-l)+(I_1)^{1/3}\right)^3 \tag{3.64}$$

$$I_x=\left(\frac{(I_2)^{1/3}-(I_1)^{1/3}}{l_n}x+(I_A)^{1/3}\right)^3 \tag{3.65}$$

식 (3.22)에 포함된 적분식들에 식 (3.65)를 대입하여 풀이하면 각 적분식은 식 (3.66), (3.67), (3.68) 그리고 식 (3.69)와 같다.

$$\int_0^{l(1-\alpha)}\frac{x}{I_x}dx=\frac{1}{\left\{\dfrac{(I_2)^{1/3}-(I_1)^{1/3}}{l_n}\right\}^2}\left[-\frac{1}{I_2^{1/3}}+\frac{1}{2}\frac{I_A^{1/3}}{I_2^{2/3}}+\frac{1}{2}\frac{1}{I_A^{1/3}}\right] \tag{3.66}$$

$$\int_0^{l(1-\alpha)}\frac{x^2}{I_x}dx=\frac{1}{\left\{\dfrac{(I_2)^{1/3}-(I_1)^{1/3}}{l_n}\right\}^3}\left[\ln\left\{\left(\frac{I_2}{I_A}\right)^{1/3}\right\}+2\frac{I_A^{1/3}}{I_2^{1/3}}-\frac{1}{2}\frac{I_A^{2/3}}{I_2^{2/3}}-\frac{3}{2}\right] \tag{3.67}$$

$$\int_0^{l(1-\alpha)}\frac{x^3}{I_x}dx=\frac{1}{\left\{\dfrac{(I_2)^{1/3}-(I_1)^{1/3}}{l_n}\right\}^4}\times$$

$$\left[3(I_A)^{1/3}\ln\left\{\left(\frac{I_A}{I_2}\right)^{1/3}\right\}+I_2^{1/3}-3\frac{I_A^{2/3}}{I_2^{1/3}}+\frac{I_A}{2I_2^{2/3}}+\frac{3}{2}I_A^{1/3}\right] \tag{3.68}$$

$$\int_0^{l(1-\alpha)} \frac{x^4}{I_x} dx = \frac{1}{\left\{\frac{(I_2)^{1/3} - (I_1)^{1/3}}{l_n}\right\}^5} \times$$

$$\left[6(I_A)^{2/3} \ln\left\{\left(\frac{I_2}{I_A}\right)^{1/3}\right\} + \frac{1}{2} I_2^{2/3} - 4 I_A^{1/3} I_2^{1/3} + 4 I_A I_2^{-1/3} - \frac{1}{2} I_A^{4/3} I_2^{-2/3}\right] \tag{3.69}$$

다음으로, 식 (3.66)에서부터 식 (3.69)까지를 식 (3.22)에 대입한 후, 정리하면 식 (3.70)과 같이 지점반력 R_C를 구할 수 있다.

$$R_C = \frac{A+B}{C} \tag{3.70}$$

여기서 A, B, C는 식 (3.71), 식 (3.72) 그리고 식 (3.73)과 같다.

$$A = -\frac{1}{EI}\left[ql^4\left(\frac{7}{108} + \frac{1}{4}\alpha - \frac{1}{4}\alpha^2 + \frac{45}{324}\alpha - \frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha) - \frac{1}{8}\alpha^4 + \frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha) + \frac{1}{18}\alpha^5\right)\right.$$
$$+ q_A l^4 (1-\alpha)^2 \left(-\frac{1}{12}\alpha^2 + \frac{1}{18}\alpha^3\right) + M_A l^2 \left(\frac{1}{6}\alpha^2 - \frac{1}{9}\alpha^3\right) + P_D(1-\alpha) l^3 \left(-\frac{1}{6}\alpha^2 + \frac{1}{9}\alpha^3\right)$$
$$\left. + l^4 (q_2 - q_A)(1-\alpha)^2 \left(-\frac{1}{18}\alpha^2 + \frac{1}{27}\alpha^3\right)\right] \tag{3.71}$$

$$B = -\frac{1}{E_n}\left[-\frac{1}{3} \cdot ① \cdot ② + \frac{M_A}{3} \cdot ③ + \frac{q_A}{6} \cdot ④ + \frac{1}{18 l_n}(q_2 - q_1) \cdot ⑤\right] \tag{3.72}$$

$$C = \frac{1}{EI}\left(-\frac{7}{108} l^3 - \frac{2}{9}\alpha l^3 + \frac{2}{9}\alpha^2 l^3 - \frac{2}{27}\alpha^3 l^3\right) - \frac{1}{E_n} \cdot \frac{2}{9} \cdot ② \tag{3.73}$$

그리고 식 (3.72)와 (3.73)에서 ①, ②, ③, ④, ⑤는 식 (3.74)~(3.78)와 같다.

$$① = -\frac{3}{4}ql + \frac{M_A}{l} + q\alpha l\left(\frac{2}{3} - \frac{2}{3}(1-\alpha)\right) - \frac{1}{6}q\alpha^2 l + q_A l(1-\alpha)\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}\alpha\right) - \frac{1}{6}q_A l(1-\alpha)^2$$

$$+ l(q_2 - q_A)(1-\alpha)\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}\alpha\right) - \frac{1}{9}(q_2 - q_A)l(1-\alpha)^2 + \frac{P_D}{3}(2+\alpha) - \frac{2}{3}P_D(1-\alpha) \quad (3.74)$$

$$② = \frac{1}{\left\{\dfrac{(I_2)^{1/3} - (I_1)^{1/3}}{l_n}\right\}^3}\left[\ln\left\{\left(\frac{I_2}{I_A}\right)^{1/3}\right\} + 2\frac{I_A^{1/3}}{I_2^{1/3}} - \frac{1}{2}\frac{I_A^{2/3}}{I_2^{2/3}} - \frac{3}{2}\right] \quad (3.75)$$

$$③ = \frac{1}{\left\{\dfrac{(I_2)^{1/3} - (I_1)^{1/3}}{l_n}\right\}^2}\left[-\frac{1}{I_2^{1/3}} + \frac{1}{2}\frac{I_A^{1/3}}{I_2^{2/3}} + \frac{1}{2}\frac{1}{I_A^{1/3}}\right] \quad (3.76)$$

$$④ = \frac{1}{\left\{\dfrac{(I_2)^{1/3} - (I_1)^{1/3}}{l_n}\right\}^4} \times \left[3(I_A)^{1/3}\ln\left\{\left(\frac{I_A}{I_2}\right)^{1/3}\right\} + I_2^{1/3} - 3\frac{I_A^{2/3}}{I_2^{1/3}} + \frac{I_A}{2I_2^{2/3}} + \frac{3}{2}I_A^{1/3}\right] \quad (3.77)$$

$$⑤ = \frac{1}{\left\{\dfrac{(I_2)^{1/3} - (I_1)^{1/3}}{l_n}\right\}^5} \times \left[6(I_A)^{2/3}\ln\left\{\left(\frac{I_2}{I_A}\right)^{1/3}\right\} + \frac{1}{2}I_2^{2/3} - 4I_A^{1/3}I_2^{1/3} + 4I_A I_2^{-1/3} - \frac{1}{2}I_A^{1/3}I_2^{-2/3}\right]$$

(3.78)

한편, 식 (3.71)에서 식(3.74)까지에서 지점 A에서 압출추진코의 단위길이당 중량을 의미하는 q_A는 식 (3.26)을 대입하면 되고, M_A는 지점 A 이후의 압출추진코 자중에 의해 발생하는 모멘트로서 식 (3.55)를 대입하면 된다.

결국, 식 (3.70)의 지점반력 R_C를 2단계 압출의 지점 B에서의 휨모멘트를 나타내는 식 (3.23)에 대입하고 정리하면 M_B^2/ql^2는 식 (3.79)와 같다.

$$\frac{M_B^2}{ql^2}=\frac{2}{3}\left(\frac{ⓐ}{ⓕ}+\frac{E}{E_n}\frac{ⓑ+ⓒ+ⓓ+ⓔ}{ⓕ}\right)-\frac{3}{4} \tag{3.79}$$

여기서 ⓐ, ⓑ, ⓒ, ⓓ, ⓔ, ⓕ는 식 (3.80)~(3.85)와 같다.

$$\begin{aligned}ⓐ=&-\left[\left\{\frac{7}{108}+\frac{1}{4}\alpha-\frac{1}{4}\alpha^2+\frac{45}{324}\alpha^3-\frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha)-\frac{1}{8}\alpha^4+\frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha)+\frac{1}{18}\alpha^5\right\}\right.\\&+\left\{\frac{q_1}{q}+(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})\right\}(1-\alpha)^2(-\frac{1}{12}\alpha^2+\frac{1}{18}\alpha^3)+\left\{\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}(\frac{l_n^2}{l^2}\right.\\&-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2)+\frac{1}{6}(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})\left\{\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2+\alpha\frac{l_n}{l}-2\alpha(1-\alpha)\right.\\&\left.\left.+\alpha\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2-\frac{l_n}{l}+2(1-\alpha)-\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\right\}\right\}(\frac{1}{6}\alpha^2-\frac{1}{9}\alpha^3)\\&\left.+\frac{P_D(1-\alpha)}{ql}(-\frac{1}{6}\alpha^2+\frac{1}{9}\alpha^3)+(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})(-\alpha\frac{l}{l_n}+\frac{l}{l_n})(1-\alpha)^2(-\frac{1}{18}\alpha^2+\frac{1}{27}\alpha^3)\right]\end{aligned} \tag{3.80}$$

$$\begin{aligned}ⓑ=&-\frac{1}{3}\left\{\frac{3}{4}\frac{l_n^3}{l^3}+\frac{l_n^3}{l^3}\left\{\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\left(\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2\right)\right.\right.\\&+\frac{1}{6}(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})\left\{\frac{l_n^2}{l^2}-2\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2+\alpha\frac{l_n}{l}-2\alpha(1-\alpha)+\alpha\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2-\frac{l_n}{l}\right.\\&\left.\left.+2(1-\alpha)-\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\right\}\right\}+\alpha\frac{l_n^3}{l^3}\left(-\frac{2}{3}(1-\alpha)+\frac{2}{3}\right)\\&-\frac{1}{6}\alpha^2\frac{l_n^3}{l^3}+\frac{l_n^3}{l^3}\left\{\frac{q_1}{q}+(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})\right\}(1-\alpha)(\frac{2}{3}+\frac{1}{3}\alpha)\\&-\frac{1}{6}\frac{l_n^3}{l^3}\left\{\frac{q_1}{q}+(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n})\right\}(1-\alpha)^2\\&+\frac{l_n^3}{l^3}(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})(-\alpha\frac{l}{l_n}+\frac{l}{l_n})(1-\alpha)(\frac{1}{3}+\frac{1}{6}\alpha)\\&-\frac{1}{6}\frac{l_n^3}{l^3}(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q})(-\alpha\frac{l}{l_n}+\frac{l}{l_n})(1-\alpha)^2-\frac{2}{3}P_D(1-\alpha)\frac{l_n^3}{ql^4}+\frac{P_D}{3}(2+\alpha)\frac{l_n^3}{ql^4}\Bigg\}\\&\times\frac{(I^{1/3})^3}{\left\{I_2^{1/3}-I_1^{1/3}\right\}^3}\left|\ln\left\{\frac{1}{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}}\right\}\right.\end{aligned}$$

$$+2\cdot\left\{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right\}-\frac{1}{2}\cdot\left\{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right\}^2-\frac{3}{2}\Bigg] \tag{3.81}$$

$$\begin{aligned}
\text{ⓒ}=&+\frac{1}{3}\frac{l_n^2}{l^2}\left\{\frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\left(\frac{l_n^2}{l^2}-2\cdot\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2\right)\right.\\
&+\frac{1}{6}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(\frac{l_n^2}{l^2}-2\cdot\frac{l_n}{l}(1-\alpha)+(1-\alpha)^2+\alpha\cdot\frac{l_n}{l}-2\alpha(1-\alpha)+\alpha\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\right.\\
&\left.\left.-\frac{l_n}{l}+2(1-\alpha)-\frac{l}{l_n}(1-\alpha)^2\right)\right\}\\
&\times\frac{(I^{1/3})^2}{\left\{I_2^{1/3}-I_1^{1/3}\right\}^2}\left[-\frac{I^{1/3}}{I_2^{1/3}}+\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{I^{1/3}}{I_2^{1/3}}-\frac{I_1^{2/3}}{I_2^{2/3}}\cdot\frac{I^{1/3}}{I_1^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{2/3}}{I_2^{2/3}}\cdot\frac{I^{1/3}}{I_1^{1/3}}\right\}\right.\\
&\left.+\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{\left\{\left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}-\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right\}}\right]
\end{aligned} \tag{3.82}$$

$$\begin{aligned}
\text{ⓓ}=&+\frac{1}{6}\frac{l_n^4}{l^4}\left\{\frac{q_1}{q}+\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(1+\alpha\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)\right\}\\
&\times\frac{(I^{1/3})^4}{\left\{I_2^{1/3}-I_1^{1/3}\right\}^4}\left[3\cdot\left\{\left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}-\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right\}\right.\\
&\times\ln\left\{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right\}+\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}-3\cdot\left\{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right\}^2\cdot\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}\\
&+\frac{1}{2}\cdot\left\{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right\}^3\cdot\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}+\frac{3}{2}\cdot\left\{\left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}-\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right\}\Bigg]\\
&\left.+\frac{3}{2}\cdot\left\{\left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}-\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right\}\right]
\end{aligned} \tag{3.83}$$

$$\begin{aligned}
\text{ⓔ}=&+\frac{1}{18}\frac{l_n^4}{l^4}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\times\frac{(I^{1/3})^5}{\left\{I_2^{1/3}-I_1^{1/3}\right\}^5}\cdot\left[6\cdot\left\{\left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}-\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right\}^2\right.\\
&\left.\times\ln\left\{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right\}+\frac{1}{2}\cdot\frac{I_2^{2/3}}{I^{2/3}}-4\cdot\left\{\left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}-\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right\}\cdot\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}
\end{aligned}$$

$$+4\cdot\left\{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right\}\times\left\{\left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}-\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right\}^2$$

$$-\frac{1}{2}\cdot\left\{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right\}^2\times\left\{\left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}}-\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}}\right\}^2\Bigg] \tag{3.84}$$

$$\text{ⓕ}=\left(-\frac{7}{108}-\frac{2}{9}\alpha+\frac{2}{9}\alpha^2-\frac{2}{27}\alpha^3\right)$$

$$-\frac{l_n^3}{l^3}\cdot\frac{2}{9}\frac{E}{E_n}\cdot\frac{(I^{1/3})^3}{\left\{I_2^{1/3}-I_1^{1/3}\right\}^3}\left[\ln\left\{\frac{1}{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}}\right\}\right.$$

$$\left.+2\cdot\left\{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right\}-\frac{1}{2}\cdot\left\{\left(1-\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right)\left(1+\alpha\cdot\frac{l}{l_n}-\frac{l}{l_n}\right)+\frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}\right\}^2-\frac{3}{2}\right] \tag{3.85}$$

한편, 식 (3.79)도 압출이 종료($\alpha=1$)될 때는 강성비에 관계없이 식 (3.63)의 M_B^E에 수렴한다

3.4 해석 식의 검증

3.4.1 수치해석적 정확성과 효용성

변단면의 압출추진코를 사용하는 ILM 교량에 대하여 그림 3.3.a(1단계 압출) 또는 그림 3.3.b(2단계 압출)의 지점 B에서의 휨모멘트를 산정할 수 있는 해석식이 식 (3.6)과 식(3.56) 그리고 식 (3.79)와 같이 유도되었다.

그림 3.6과 그림 3.7은 유도된 해석식의 정확성을 검증할 목적으로 범용 구조해석 프로그램 MIDAS의 해석결과와의 비교를 나타낸 것이다.

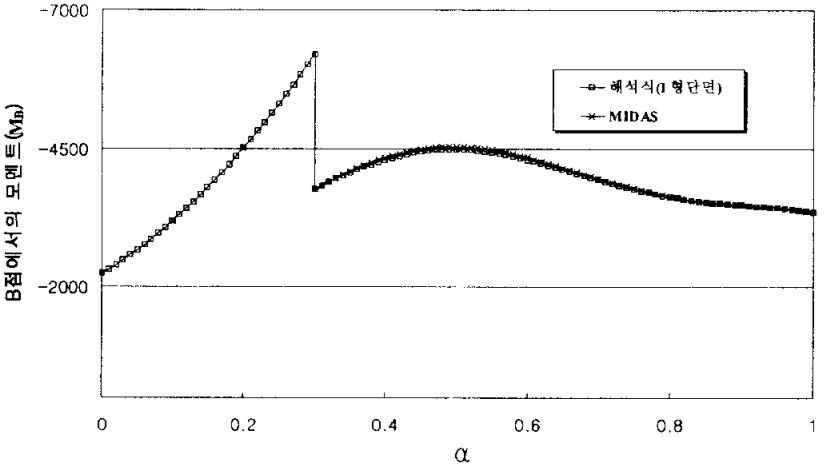


그림 3.6 해석식(I형단면)과 MIDAS 결과와의 비교

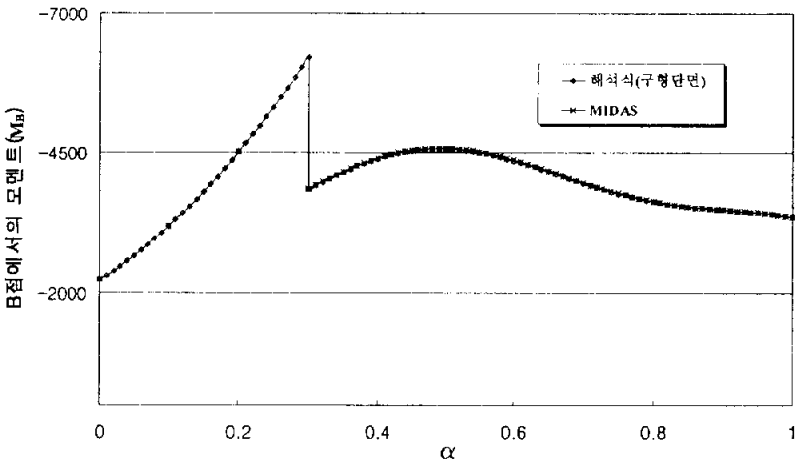


그림 3.7 해석식(직사각형 단면)과 MIDAS 결과와의 비교

해석모델은 지간장이 50m이고, 압출추진코의 길이가 35m인 교량을 가정하였다. 이때 중량비는 $\frac{q_2}{q}=0.42$, $\frac{q_1}{q}=0.16$으로, 강성비는 $\frac{I_2}{I}=0.0215$, $\frac{I_1}{I}=0.0012$으로 그리고 탄성계수비는 $\frac{E_n}{E}=7.78$으로 하였다. 그리고 MIDAS의 해석을 위해 압출은 50cm씩 진행되는 것으로 가정하였다.

그림 3.6은 압출추진코의 단면이 I형인 경우로서 $0 \leq \alpha \leq 0.3$까지는 1단계 압출의 해석식인 식 (3.6)과 MIDAS를 비교한 결과이고, $0.3 \leq \alpha \leq 1.0$의 구간은 2단계 압출의 해석식인 식 (3.56)과 MIDAS를 비교한 결과이다. 그 결과는 그림 3.6에서 보는 바와 같이 유도된 해석식은 매우 정확한 결과를 줄 수 있음을 알 수 있다.

그림 3.7은 압출추진코의 단면이 직사각형인 경우로서 $0 \leq \alpha \leq 0.3$까지는 1단계 압출의 해석식인 식 (3.6)과 MIDAS를 비교한 결과이고, $0.3 \leq \alpha \leq 1.0$의 구간은 2단계 압출의 해석식인 식 (3.79)와 MIDAS를 비교한 결과이다. 그림 3.7의 비교결과도 그림 3.6과 같이 유도된 해석식은 매우 정확한 결과를 줄 수 있음을 알 수 있다.

한편, MIDAS 등을 포함한 범용구조해석 프로그램의 경우 압출 중인 ILM 교량의 설계단면력을 해석하기 위해서는 일일이 압출단계를 가정해야 하고, 압출단계를 세밀히 나누어야만 정확한 설계단면력과 그 시기를 알 수가 있다. 그러나, 제안된 해석식을 이용하는 경우는 설계자가 아주 쉽게 설계 단면력의 크기와 그 압출시기를 알 수 있다. 따라서, 유도된 해석식의 이용은 설계시 효율적일 뿐만 아니라, 정확한 결과를 예측할 수 있어 매우 실용적으로 유용할 것으로 기대된다.

3.4.2 압출추진코 단면형상의 영향

Rosignoli(1998)는 압출추진코의 단면형상을 등단면이라 가정하고 ILM 교량의 압출 중 상호작용에 관한 해석식을 식 (3.86)과 식 (3.87)와 같이 도출하였다.

1단계 압출 :

$$\frac{M_B^1}{ql^2} = -\frac{\alpha^2}{2} - \frac{q_n}{q}\frac{l_n}{l}\left(\alpha + \frac{1}{2}\frac{l_n}{l}\right) \tag{3.86}$$

2단계 압출 :

$$\frac{M_B^2}{ql^2} = \frac{①}{②} \tag{3.87}$$

$$\begin{aligned}
① = &-\left[\left\{\frac{1}{2}\frac{q_n}{q}\left(\left(\frac{l_n}{l}\right)^2+\alpha^2+1\right)+\frac{q_n}{q}\left(\alpha\left(\frac{l_n}{l}-1\right)-\frac{l_n}{l}\right)\right\}\left\{\alpha^2\left(\frac{1}{3}\alpha-\frac{1}{2}\right)\right\}\right] \\
&-\left[\frac{EI}{E_nI_n}\left\{\frac{1}{2}\frac{q_n}{q}\left(\left(\frac{l_n}{l}\right)^2+\alpha^2+1\right)+\frac{q_n}{q}\left(\alpha\left(\frac{l_n}{l}-1\right)-\frac{l_n}{l}\right)\right\}\left\{(1-\alpha^2)\left(\frac{1}{3}(1-\alpha)-\frac{1}{2}\right)\right\}\right] \\
&-\left[\left\{\frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha)-\frac{1}{6}\alpha^5+\frac{3}{8}\alpha^4-\frac{1}{6}\alpha^3\right\}+\left\{\frac{q_n}{q}\alpha^2(1-\alpha)^2\left(\frac{1}{4}-\frac{1}{6}\alpha\right)\right\}\right] \\
&-\frac{EI}{E_nI_n}\left[\left\{\frac{1}{6}\alpha^2(1-\alpha)^3\right\}+\frac{q_n}{q}\left\{\left(\frac{1}{3}\alpha+\frac{1}{6}(1-\alpha)-\frac{1}{8}\right)(1-\alpha)^4\right\}\right]-\frac{7}{288} \\
② = &\left(\frac{1}{3}\alpha^3-\alpha^2+\alpha+\frac{7}{24}+\frac{EI}{E_nI_n}\frac{(1-\alpha)^3}{3}\right)
\end{aligned}$$

해석식 (3.86)과 (3.87)은 그림 3.3에서 압출 중 지점 B의 휨모멘트를 계산하는 식이다.

변단면의 압출추진코를 등단면으로 환산하여 해석하였을 경우에 대하여 검토해 본다. 해석 예제는 지간장이 50m이고, 압출추진코의 길이가 35m인 교량을 가정한다. 그리고, 상부단면과 압출추진코 사이의 다이아프램의 영향은 고려하지 않는다.

해석 교량에 적용된 각 계수값들이 표 3.2에 나타나 있다. 표 3.2에서 q_n, I_n 값은 변단면 압출추진코에 대한 중량과 휨강성에 계수값들을 Rosignoli(1998)의 해석식에 적용하기 위하여 변단면에 관한 계수값들을 등단면으로 환산한 것이다. 이때, 도심위치값은 압출추진코의 길이방향 도심위치에서의 변단면의 계수값들이다. 따라서, 압출추진코의 단면형상에 따라 결정된다. 예를들어, I형 플레이트 거더의 강성변화가 2차 포물선이므로 도심 위치인 압출추진코 끝단에서 $\frac{3}{4}l_n$위치에서 산정한다. 한편, 산술평균값은 변단면 압출추진코의 시작과 끝 단면에 해당되는 계수값들을 산술평균한 값을 말한다.

표 3.2 단면특성

적용 해석식	압추추진코 단 면	길이비	중량비	강성비	탄 성 계수비	다이아플램 $P_D(t)$
본연구	변단면	0.7	$q_2/q=0.08$, $q_1/q=0.04$	$I_2/I=0.03$, $I_1/I=0.004$	6.8359	적용안함
Rosignoli	등단면 (도심위치값)	0.7	$q_n/q=0.067$	$I_n/I=0.0195$	6.8359	적용못함
Rosignoli	등단면 (산술평균값)	0.7	$q_n/q=0.06$	$I_n/I=0.017$	6.8359	적용못함

그림 3.8은 압출추진코의 단면이 I형 변단면일 경우에 대하여 본 연구에서 도출한 해석식 (3.6), (3.56)과 Rosignoli(1998)의 해석식 (3.86), (3.87)과 비교한 결과를 보여주고 있다.

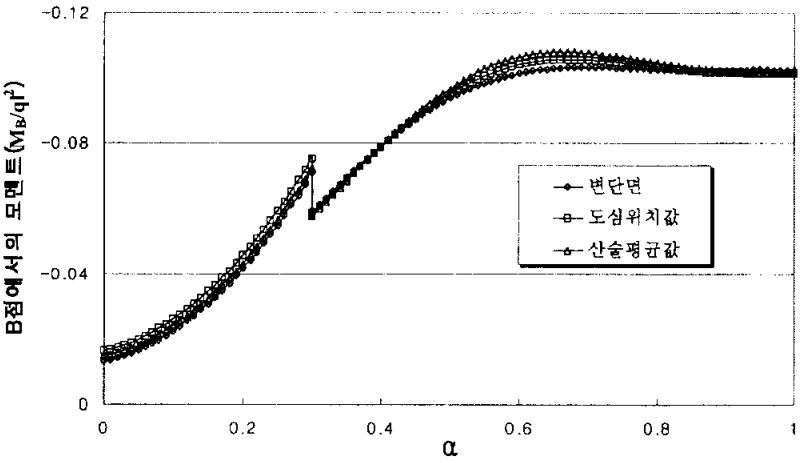


그림 3.8 단면형상에 따른 단면력 변화

그림 3.8의 결과에서 알 수 있듯이, 해석 예제는 최대 휨모멘트는 2단계 압출($\alpha \geq 0.3$)에서 발생되었다. 이때, 압출추진코의 변단면 형상을 고려하여 산정한 본 연구의 해석 값보다 Rosignoli(1998)의 해석 값이 도심위치 값을 기준으로 한 것은 3%, 산술평균 값을 기준으로 한 것은 5% 정도 크게 나타났다. 그러므로, 해석 예제의 경우, 변단면의 압출추진코를 등단면으로 환산하여 해석한다면 교량 상부단면을 비 경제적으로 설계하는 원인이 될 것이다.

한편, 변단면 압출추진코의 강성비 경사 등이 해석 예제와 다를 경우에는 그림 3.8과는 반대의 결과가 나올 수 도 있다. 즉 등단면으로 환산하여 산정된 단면력이 실제 변단면 압출추진코를 고려한 단면력 보다 작게 나타나는 경우이다. 이 경우는 비록 오차들의 절대적인 크기는 작더라도, 교량 상부단면의 안전성에 유해한 영향을 줄 수 있을 것이다.

그러므로 실제 변단면 압출추진코의 형상을 등단면으로 환산하여 해석하는 것은 부적절한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서 제시된 변단면 압출추진코를 고려할 수 있는 해석식을 이용하여 상부구조의 단면력 변화를 정확히 예측한 후 설계에 반영하는 것이 반드시 필요할 것이다.

3.4.3 다이아플램의 영향

이번 예제에서는 압출추진코와 교량 상부단면 사이의 연결부에 설치되는 다이아플램을 고려하여 해석한다. 해석 예제는 지간장이 50m이고, 압출추진코의 길이가 35m인 실제 ILM 교량($q=19.0525 tonf/m$)의 설계자료로부터 표 3.3과 같이 해석자료를 만들었다. 해석 예제교량이 I형 변단면 압출추진코를 사용하고 있어, 본 연구의 해석 식으로는 식 (3.6)과 (3.56)을 이용하고, Rosignoli(1998)의 해석 식으로는 식(3.86)과 (3.87)을 이용하였다. Rosignoli(1998)의 해석 식에는 표 3.3에 나타낸 등단면으로 환산된 계수 값을 적용하였으며, 다이아플램은 고려할 수 없다.

표 3.3 A교량의 단면특성(I형 압출추진코)

적용 해석식	압출추진코 단 면	길이비	중량비	강성비	탄 성 계수비	다이아플램 $P_D(t)$
본연구	변단면	0.7	$q_2/q=0.082$ $q_1/q=0.043$	$I_2/I=0.0266$ $I_1/I=0.0040$	6.8359	40.615
Rosignoli	등단면 (도심위치값)	0.7	$q_n/q=0.072$	$I_n/I=0.0210$	6.8359	적용못함
Rosignoli	등단면 (산술평균값)	0.7	$q_n/q=0.063$	$I_n/I=0.0153$	6.8359	적용못함

그림 3.9와 그림 3.10은 해석 예제교량의 압출 과정 중에 그림 3.5의 지점 B위치의 교량 상부단면에 발생하는 휨모멘트의 변화를 보여주고 있다.

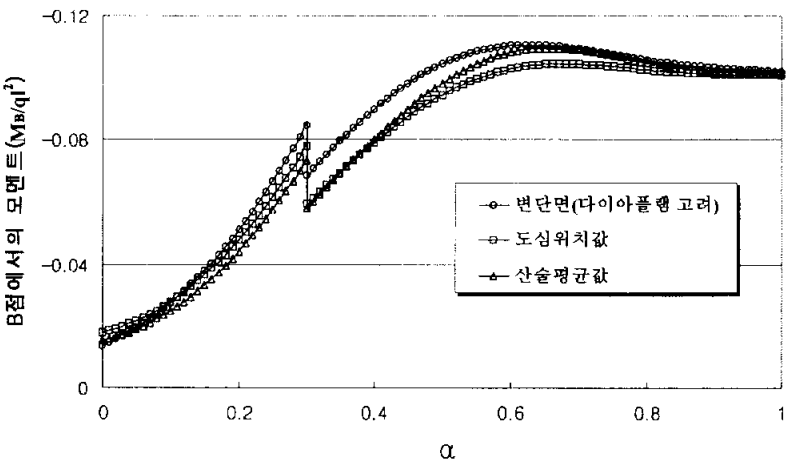


그림 3.9 A교량의 단면력 변화

그림 3.9는 다이아플램을 고려하지 않은 그림 3.8의 단면력 궤적들보다 본 연구의 해석 식과 Rosignoli(1998)의 해석 식의 궤적간 차이가 훨씬 큰 것을 보여주고 있다. 가장 큰 차이는 압출추진코 선단이 교각에 막 도달했을 때($\alpha=0.3$)로 그 크기는 최대 13% 이다. 그리고, 2단계 압출, 즉 $\alpha=0.3$ 이후에서는 본 연구에서 유도된 변단면 압출추진코에 대한 해석식의 결과가 도심위치 값과 산술평균 값의 등단면으로 치환된 Rosignoli(1998)의 해석 식 결과보다 절대적으로 약 6% 크게 나타났다. 이는 그림 3.8과는 반대의 결과이다. 그리고 2단계 압출 과정 중 변단면 압출추진코에 대한 해석식의 경우 최대 단면력의 발생위치는 $\alpha=0.63$에서 나타나는데 반해, 산술평균 위치와 도심위치를 치환된 경우는 각각 $\alpha=0.66$, $\alpha=0.68$로 나타나 서로 상이한 것으로 분석되었다.

따라서, 압출추진코와 교량 상부구조 연결부에 설치되는 다이아플램에 의한 집중하중의 영향을 무시한 압출 중의 상부단면의 단면력을 해석은 경제적인 측면이나 안전성 측면 모두에서 적절하지 못하다고 판단할 수 있다. 그러므로, 본 연구에서 제시한 해석 식은 변단면 압출추진코와 교량 상부구조의 상호작용으로 인한 상부단면의 휨모멘트 단면력 변화를 정확

하고 효율적으로 예측할 수 있게 함으로써, 실무에서 최적설계를 위한 목표를 보다 용이하게 달성하는 데에 기여 할 수 있을 것으로 판단된다.

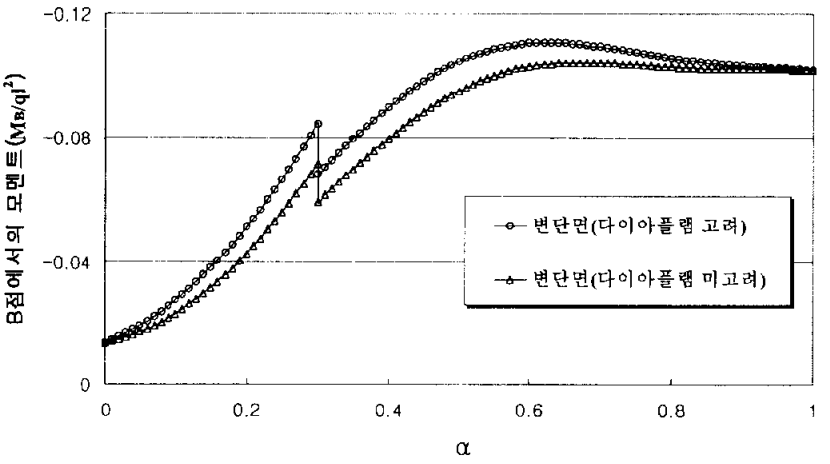


그림 3.10 A교량의 다이아플램 영향

그림 3.10은 그림 3.9의 해석 예제를 가지고 식 (3.6)과 (3.56)에서 집중하중을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우를 비교한 그림이다. 그림 3.10에서 다이아플램을 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우 모두 압출완료 후의 모멘트 M_B^E를 초과하는 단면력이 2단계 압출과정에서 발생하므로 시공과정 중 설계단면력은 2단계 압출과정 중의 최대 모멘트로 결정된다. 그러나 다이아플램을 고려했을 경우 2단계 압출 중 최대 단면력은 M_B^E보다 7.9% 정도 크게 나타나고, 다이아플램을 고려하지 않았을 경우 최대 단면력은 M_B^E 2.4% 정도 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

결국 압출추진코와 상부구조 연결부의 다이아플램을 고려하지 않게 되면 설계 단면력이 과소평가되어 상부구조 안전성에 유해한 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다. 그러므로 ILM 교량 시공단계 중 다이아플램의 하중은 상부구조 안전성에 큰 영향을 미치므로 반드시 고려해야 한다.

3.4.4 지점 D 위치의 경계조건에 대한 검토

본 연구에서는 그림 3.3의 지점 D 이후의 지점을 지간 길이가 l인 무한개의 연속보로 가정하였다. 따라서, D지점 위치에서의 상부단면은 $M_D = \frac{ql^2}{12}$의 휨모멘트가 발생되는 고정단으로 설정하여 해석식을 유도하였다. 그러나 실제 ILM 공법이 적용되는 현장의 지간 수는 보통 10~15개의 지간으로 구성되므로 지간 구성에 따라 해석식의 적용 범위가 제한될 것이다.

이에 ILM 교량 지간 구성에 따른 해석식의 적용범위를 판단하기 위해 그림 3.11과 그림 3.12와 같이 압출추진코가 맞은편 교각에 도달하기 직전의 상태와 압출이 완료된 후의 2가지 해석 예제를 선정하였다.

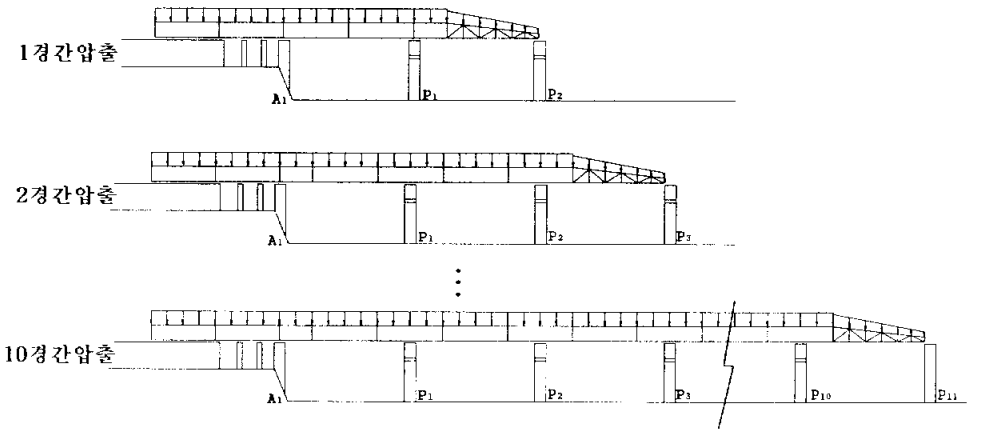


그림 3.11 압출추진코가 맞은 편 교각에 도달하기 직전

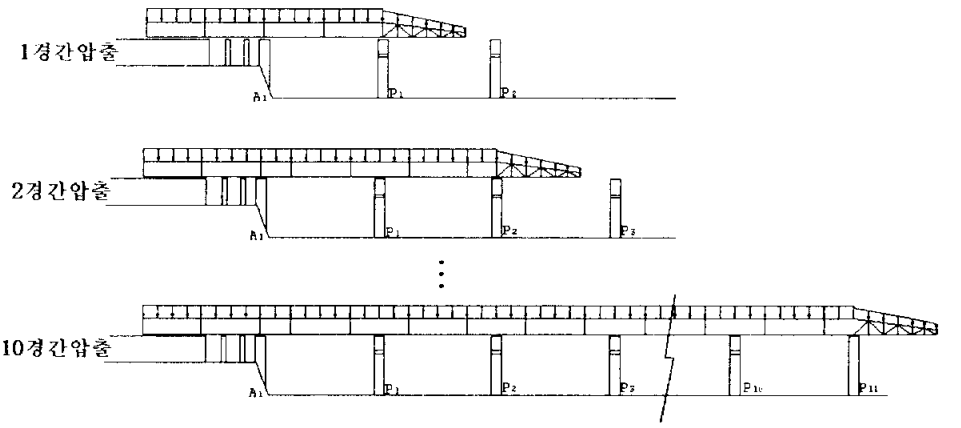


그림 3.12 각 경간의 상부구조 압출이 완료된 직 후

표 3.4와 표 3.5에 범용구조해석 프로그램인 MIDAS를 이용하여 해석한 결과인 각 지점위치의 상부단면에서 발생하는 휨모멘트를 나타내었다. 이때 교량 상부구조의 단면제원은 $l=50m$, $E=3.072\times10^5 kgf/cm^2$, $I=18.592m^4$, $q=19.05tonf/m^3$이고, 압출추진코 단면제원은 $l_n=35m$, $E_n=2.1\times10^6 kgf/cm^2$, $I_2=0.2474m^4$, $I_1=0.0374m^4$, $q_2=1.56tonf/m^3$, $q_1=0.82tonf/m^3$을 그리고 $P_D=40tonf$이다. 이 경우에 지점 D위치의 단면을 고정단으로 보았을 때의 휨모멘트인 $M_D=\frac{ql^2}{12}$은 $3968.75tonf\cdot m$이 된다.

표 3.4 압출추진코가 맞은 편 교각에 도달하기 직전(t · m)

	A1	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
1단계	0	-4020.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2단계	0	-4948.79	-4020.51	-	-	-	-	-	-	-	-
3단계	0	-5031.16	-3690.99	-4020.51	-	-	-	-	-	-	-
4단계	0	-5031.55	-3689.41	-4026.43	-4020.51	-	-	-	-	-	-
5단계	0	-5033.05	-3683.41	-4048.92 (지점D)	-3936.55	-4020.51	-	-	-	-	-
6단계	0	-5032.76	-3684.56	-4044.62	-3952.59 (지점D)	-3960.63	-4020.51	-	-	-	-
7단계	0	-5032.85	-3684.22	-4045.89	-3947.83	-3978.4 (지점D)	-3954.18	-4020.51	-	-	-
8단계	0	-5032.83	-3684.31	-4045.56	-3949.07	-3973.77	-3971.49 (지점D)	-3955.91	-4020.51	-	-
9단계	0	-5032.83	-3684.28	-4045.65	-3948.74	-3975.02	-3966.82	-3973.34 (지점D)	-3955.44	-4020.51	-
10단계	0	-5032.83	-3684.29	-4045.63	-3948.83	-3974.68	-3968.01	-3968.68	-3972.84 (지점D)	-3955.57	-4020.51

표 3.5 각 경간의 상부구조 압출이 완료된 직 후(t · m)

	A1	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
1단계	0	-5790.67	-652.94	-	-	-	-	-	-	-	-	
2단계	0	-4806.65	-4589.01	-652.94	-	-	-	-	-	-	-	
3단계	0	-5091.69	-3448.87	-4928.45	-652.94	-	-	-	-	-	-	
4단계	0	-5016.94	-3747.86	-3807.22	-4838.86	-652.94	-	-	-	-		
5단계	0	-5037.08	-3667.29	-4109.38 (지점D)	-3710.82	-4862.97	-652.94	-	-	-	-	
6단계	0	-5031.69	-3688.85	-4028.54	-4012.62 (지점D)	-3736.62	-4856.51	-652.94		-	-	
7단계	0	-5033.14	-3683.07	-4050.21	-3931.72	-4038.55 (지점D)	-3729.71	-4858.24	-652.94	-	-	
8단계	0	-5032.75	-3684.62	-4040.40	-3953.39	-3957.66	-4031.60 (지점D)	-3731.56	-4857.78	-652.94	-	
9단계	0	-5032.86	-3684.20	-4045.96	-3947.58	-3979.33	-3950.71	-4033.46 (지점D)	-3731.06	-4857.90	-652.94	
10단계	0	-5032.83	-3684.31	-4045.54	-3949.14	-3973.52	-3972.38	-3952.57	-4032.96 (지점D)	-3731.20	-4857.87	-652.94

표 3.4에서 보는 바와 같이 해석 예제의 경우, 압출추진코가 맞은편 교각에 도달하기 직전에서 6경간 이후부터 D점의 모멘트는 MIDAS의 해석 결과 $3952.59tonf \cdot m \sim 3978.4tonf \cdot m$ 범위 내에 있다. 이 값은 본 연구에서 가정한 지점 D의 고정단 휨모멘트인 $M_D = \frac{ql^2}{12} = 3968.75tonf \cdot m$와 비교할 때 0.2%~0.4%의 오차범위에 있는 값이다. 그리고, 표 3.5의 각 경간의 상부구조 압출이 완료된 직 후의 지점 D에 발생하는 모멘트는 $4012.62tonf \cdot m \sim 4038.55tonf \cdot m$의 범위에 있는 이는 가정된 고정단 모멘트인 $3968.75tonf \cdot m$와는 1.1%~1.8%의 오차에 해당된다.

다른 해석 예제에서는 표 3.4와 표 3.5의 값과는 상이한 값들을 가질 수 있으나 그 오차의 차이로 볼 때 본 연구에서 제시된 해석 식인 식 (3.56), 식 (3.79)은 6경간 압출 이후부터는 아주 정확하게 적용될 수 있을 것으로 본다. 그리고, 6경간 이내의 단계에서도 단면력에 관한 해석 값의 정확도에서는 차이가 있을 수 있으나 지배 설계단면력이 발생하는 압출 위치에 대한 초기치를 빠른 시간내에 찾아 낼 수 있어 설계자에게 유용한 정보를 제공 할 것이다.

4. 매개변수 해석

4.1 압출추진코의 길이가 긴 경우

이번 장에서는 압출 중인 ILM 교량의 설계 단면력으로 결정되는 지점 B 위치(그림 3.3참조)에서의 휨 모멘트 해석 식인, 식 (3.6), 식 (3.56)과 식 (3.79)에 포함된 변수들의 영향을 분석하고자 한다. 식 (3.56)과 식 (3.79)는 압출추진코의 단면형상이 각 각 I형, 직사각형인 경우에 적용되는 식들이다. 일반적으로 대부분의 ILM교량 압출추진코 단면이 I형으로 채택되므로 본 연구에서는 식 (3.6)과 (3.56)을 매개변수 해석에 이용하였다.

그리고, 설계시 콘크리트의 설계강도는 $f_{ck}=400kgf/cm^2$, 콘크리트 단위중량은 $W_C=2.5tonf/m^3$, 압출추진코의 탄성계수는 $E_n=2.1\times10^6kgf/cm^2$을 대부분 적용하므로, 콘크리트 구조설계기준[한국콘크리트학회, 2004]에서 제시하고 있는 식 (4.1)을 이용하여 콘크리트 탄성계수를 산정한 후 콘크리트 상부구조와 압출추진코의 탄성계수비 E_n/E를 식 (4.2)에 의해 6.8359로 고정하여 매개변수에 따른 상호작용을 분석하였다.

$f_{ck}>300kfg/cm^2$인 콘크리트의 탄성계수

$$E_c=3000w_c^{1.5}\sqrt{f_{ck}}+70{,}000(kgf/cm^2) \tag{4.1}$$

$$\frac{E_n}{E}=\frac{2.1\times10^6}{3000\times2.5^{1.5}\sqrt{400}+70000}=6.8359 \tag{4.2}$$

압출추진코의 길이가 상대적으로 긴 경우의 해석 예제로서 압출추진코

와 콘크리트 상부의 길이비가 $l_n/l=0.8$이고, 중량비가 각각 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$인 경우를 가정한다. 단, 다이아플램은 고려하지 않았다.

그림 4.1은 강성비의 변화에 따른 상부단면의 휨모멘트(M_B) 궤적을 나타내고 있다. 이때, 각 강성비의 경사는 모두 $\frac{I_2}{I_1}=2.25$로 일정하다. 그림 4.1에서 1단계 압출($\alpha \leq 0.2$)은 식 (3.6)으로, 2단계 압출($0.2<\alpha \leq 1.0$)은 (3.56)을 이용하여 얻을 수 있다.

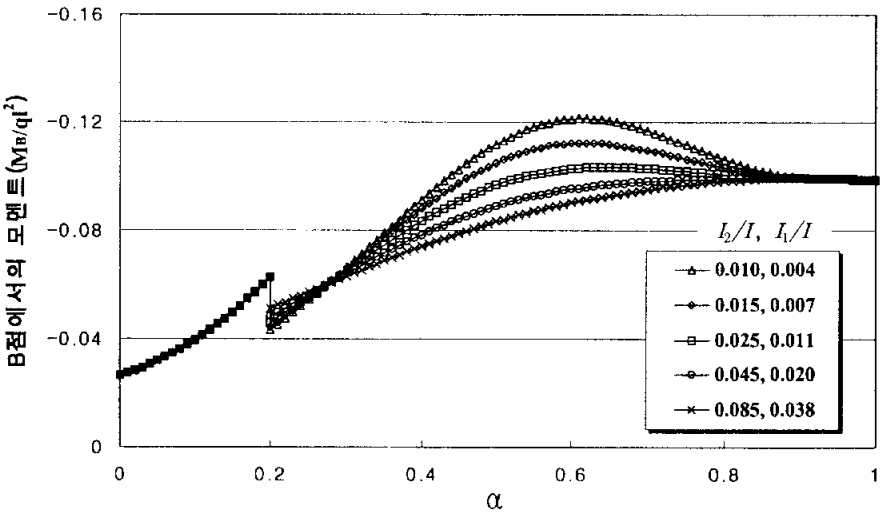


그림 4.1 $l_n/l=0.8, q_2/q=0.15, q_1/q=0.05$**인 경우 압출하는 동안 강성비에 따른 B점의 모멘트**

그림 4.1에서 보는 바와 같이 교량이 최초로 캔틸레버 상태로 압출되어 가는 동안에 지점 B에서는 부 모멘트가 점점 증가하다가, 압출추진코가 지점 A(그림 3.3 참조)에 도달하게 되면($\alpha=0.2$) 지점반력에 의한 탄성처짐의 회복으로 정 모멘트가 발생한다. 따라서, 지점 B의 휨 모멘트(부 모멘트) M_B는 지점 A의 반력에 의한 정 모멘트의 영향으로 일시적으로 감

소한다. 그러나 상부구조가 압출됨에 따라 상부구조의 자중 증가에 의해 M_B는 다시 증가하기 시작한다.

켄틸레버 상태인 $\alpha < 0.2$ 일때는 강성비에 의존하지 않고 압출추진코가 지점 A에 도달한 이후인 2단계 압출과정에서 M_B는 상부단면과 압출추진코의 휨 강성비에 종속되는 것을 알 수 있다. 그러나, $\alpha > 0.9$일때는 강성비의 영향이 지극히 미소하다. 그리고, 압출이 종료($\alpha = 1$)될 때는 강성비에 관계없이 식 (3.63)의 M_B^E에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

$0.2 < \alpha < 0.9$에서는 압출추진코의 강성보다 콘크리트 상부의 강성이 일반적으로 더 크므로 강성비가 적을수록 상대적으로 강성이 큰 B지점에 위치한 M_B가 더 크게 나타난다. 따라서, 2단계 압출과정에서의 상부단면력 M_B^2가 M_B^E를 초과하지 않도록 하는 압출추진코의 강성비를 결정한다면, 그 강성비는 최소 강성비라 정의할 수 있을 것이다. 이 예제의 경우는 시산의 방법으로 최소 강성비를 산정한 결과, $I_2/I = 0.045$, $I_1/I = 0.020$ 으로 나타났다.

한편, 그림 4.1에서 알 수 있듯이 $l_n/l = 0.8$인 경우와 같이 압출추진코의 길이가 지간 길이에 비해 상대적으로 긴 경우는, 캔틸레버 상태일 때의 모멘트가 압출이 끝난 후의 모멘트 즉, M_B^E보다 매우 낮다. 이는 상부구조를 압출추진코 없이도 안전하게 캔킬레버 상태로 압출할 수 있는 단면저항력을 충분히 활용하지 못하게 되므로 상부단면이 비 경제적으로 설계될 수 있는 것을 의미한다. 따라서 $l_n/l = 0.8$인 경우와 같이 압출추진코의 길이가 긴 경우는 켄틸레버 상태일 때의 모멘트가 압출이 끝난 후의 모멘트 즉, M_B^E보다 매우 낮으므로 적당하지 않다.

4.2 압출추진코의 길이가 짧은 경우

상대적으로 압출추진코의 길이비가 짧은 경우의 해석 예제로서, I형 단면의 압출추진코와 콘크리트 상부의 길이비가 $l_n/l=0.5$, 중량비가 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$이고, 탄성계수비 $E_n/E=6.8359$인 경우를 가정한다. 이 예제에서도 다이아플램은 고려하지 않았다.

그림 4.2는 강성비의 변화에 따른 상부단면의 휨모멘트(M_B) 궤적을 나타내고 있다. 이때, 각 강성비의 경사는 모두 $\frac{I_2}{I_1}=2.25$로 일정하다. 그림 4.2에서 1단계 압출($\alpha \leq 0.5$)은 식 (3.6)으로, 2단계 압출($0.5<\alpha \leq 1.0$)은 (3.56)을 이용하여 얻을 수 있다.

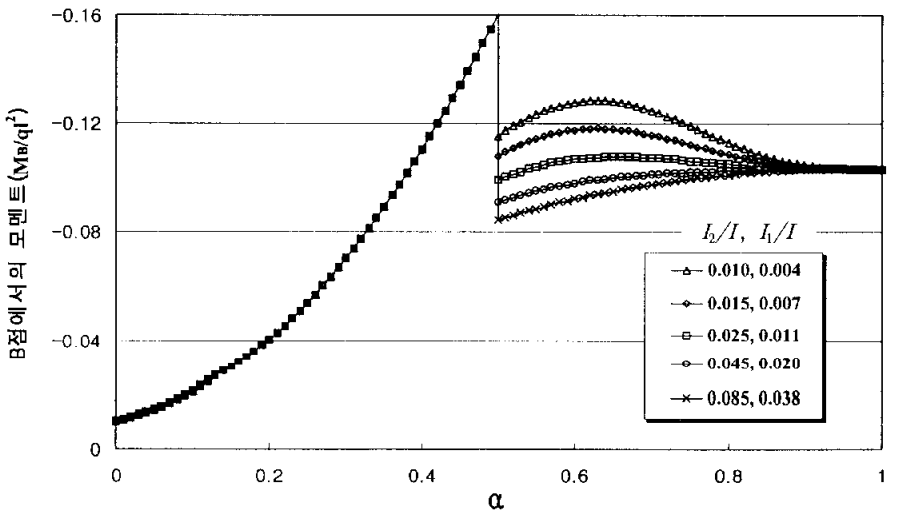


그림 4.2 $l_n/l=0.5, q_2/q=0.15, q_1/q=0.05$인 경우 압출하는 동안 강성비에 따른 B점의 모멘트

그림 4.2에서 보는바와 같이 압출추진코가 짧은 경우는 압출이 시작되는 초기에는 길이가 짧아서 전체적으로 작은 중량의 압출추진코에 의한

작은 크기의 캔틸레버 휨 모멘트가 발생된다. 그러나, 점점 중량이 큰 콘크리트의 길이가 늘어남에 따라 캔틸레버 상태의 휨 모멘트는 급속히 증가하게 된다. 특히, 캔틸레버 상태($\alpha \leq 0.5$)에서 발생되는 최대 휨모멘트가 2단계 압출이 진행되는 동안($0.5 < \alpha \leq 1.0$)과 압출이 끝난 상태($\alpha = 1.0$)의 휨 모멘트(M_B^E)보다 크다. 이 최대 휨모멘트를 저항하기 위해서는 교량의 상부단면이 크게 설계되어야 하고 압출추진코를 설치하는 의미가 없어진다. 따라서, 압출추진코의 길이가 너무 짧아서도 적당하지가 않음을 알 수 있다.

한편, 이 해석 예제에서도 2단계 압출과정에서의 상부단면력 M_B^2가 M_B^E를 초과하지 않도록 하는 압출추진코의 최소 강성비는 시산의 과정을 통해 압출추진코의 길이가 긴 경우의 해석 예제와 일치하는 $I_2/I = 0.045$, $I_1/I = 0.020$ 정도인 것을 알 수 있었다.

압출추진코의 길이가 긴 경우와 짧은 경우의 해석 예제를 통하여 다음과 같은 2가지 결론을 얻을 수 있다. 첫째로, 최적의 압출추진코 길이는 중량비와 강성비가 주어졌을 때, 1 단계 압출과정(캔킬레버 상태)에서 발생되는 최대 휨모멘트($M_{B_{max}}^1$)와 압출이 종료될 때($\alpha = 1.0$)의 휨모멘트(M_B^E)의 크기의 오차를 가장 적게 하는 것이다. 이는 상부단면의 저항력의 활용을 극대화하면서 압출추진코의 길이를 최대한 줄이는 것이 되기 때문이다. 둘째로, 압출추진코의 강성을 최소 강성비보다 크게만 하면 2단계 압출과정에서의 교량 상부단면에 발생되는 휨 모멘트는 M_B^E 를 넘지않는다.

4.3 중량비에 따른 영향

그림 4.3은 강성비가 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$이고 길이비가 $l_n/l=0.65$일 때 중량비의 변화에 따른 지점 B의 휨모멘트 궤적들을 보여주고 있다.

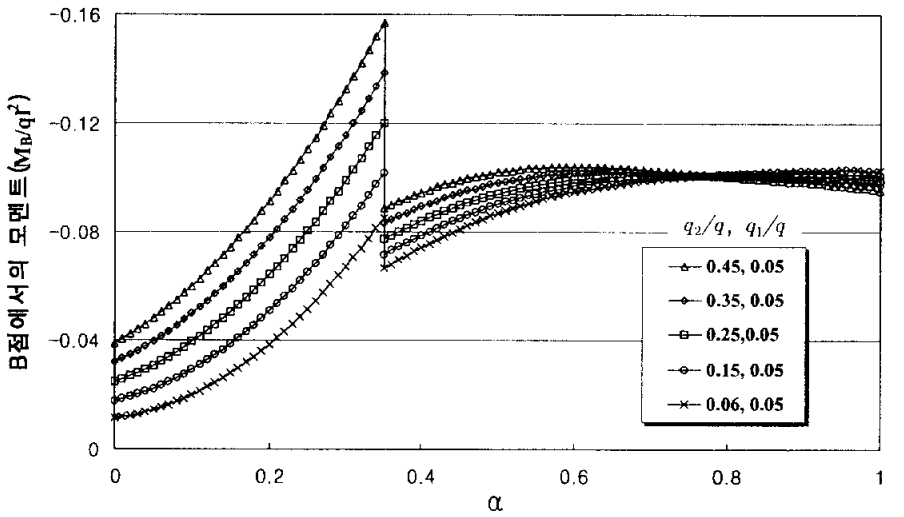


그림 4.3 $I_2/I=0.045, I_1/I=0.02, l_n/l=0.65$인 경우의 중량비 변화에 따른 모멘트 변화

1단계 압출시, 즉 지점 A에 도달할 때까지인 켄틸레버 상태에서의 M_B는 압출추진코와 콘크리트 상부의 중량비에 크게 의존하고, 2단계 압출시, 즉 지점 A에 도달한 후부터는 압출추진코와 콘크리트 상부의 중량비에 따른 모멘트의 변화는 압출 종료시($\alpha=1$)에서의 모멘트 값의 15%~20% 내외 폭에서 변화함을 알 수 있다. 그리고, 중량비가 증가 할수록, 그림 4.2의 압출추진코가 짧은 경우와 같은 형상이 되고, 중량비가 감소 할수록, 그림 4.1의 압출추진코의 길이가 긴 경우와 같은 형상으로 나타남도 알 수 있다.

4.4 최적길이비 및 최소강성비

그림 4.1과 그림 4.2에서 알 수 있었던 것과 같이 상부단면을 가장 경제적으로 설계하기 위해서는 캔틸레버 상태의 휨모멘트인 식 (3.6)의 M_B^L의 최대 값과 압출이 완료된 후의 휨 모멘트인 식 (3.63)의 M_B^E 값과의 차이를 가능한 줄일 수 있는 적절한 길이의 압출추진코를 사용하여야 한다. 이 압출추진코의 길이를 최적길이라 정의한다.

식 (3.6)과 식 (3.63)이 강성비와 관계가 없는 식들이므로 중량비만을 변화시키면서 시행착오의 방법에 의해 최적의 압출추진코 길이를 결정할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 중량비의 변화 폭은 실제 설계사례들을 조사한 결과를 바탕으로 q_2/q을 0.17에서 0.03까지 0.01씩 변화시켰고, 이때 q_1/q는 주어진 q_2/q의 값에서 0.001까지 0.001씩 감소시키면서 최적길이를 결정하였다. 예를 들어, 맨 첫 번째 경우는 q_2/q=0.17, q_1/q=0.169이고 맨 마지막은 q_2/q=0.03, q_1/q=0.001이다. 본 연구에서는 압출추진코의 최적길이 산정에 다이아플램은 고려하지 않았다.

압출추진코의 최적길이를 산정한 후에는 중량비와 최적길이에 대한 압출추진코와 교량 상부단면과의 최소강성비를 산정한다. 강성비의 변화 폭은 I_2/I를 0.085에서 0.010까지 0.005씩 변화시키고, I_1/I의 값은 주어진 I_2/I의 값에서 0.001까지 0.001씩 감소시키면서 분석하였다. 예를 들어, 맨 첫 번째 경우는 I_2/I=0.085, I_1/I=0.080이고 맨 마지막은 I_2/I=0.010, I_1/I=0.001이다.

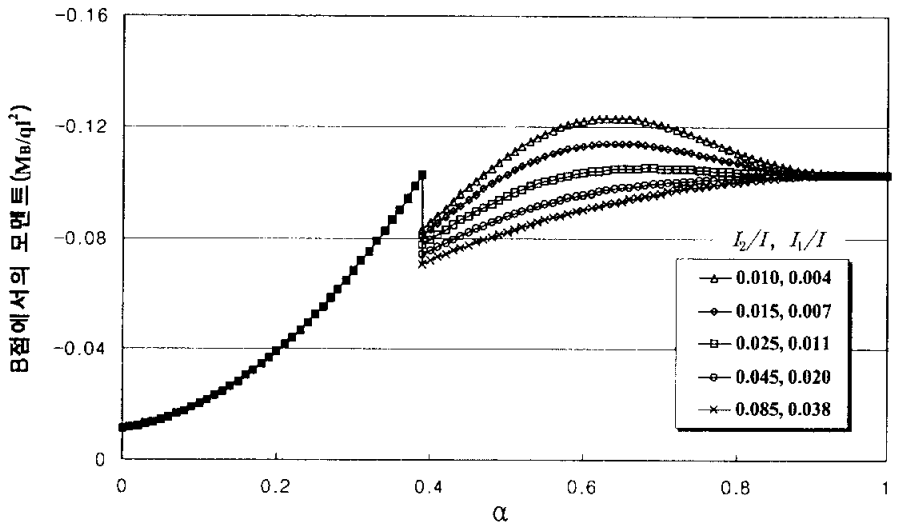


그림 4.4 $q_2/q = 0.08, q_1/q = 0.05, l_n/l = 0.61$**인 경우 압출하는 동안 강성비에 따른 B점의 모멘트**

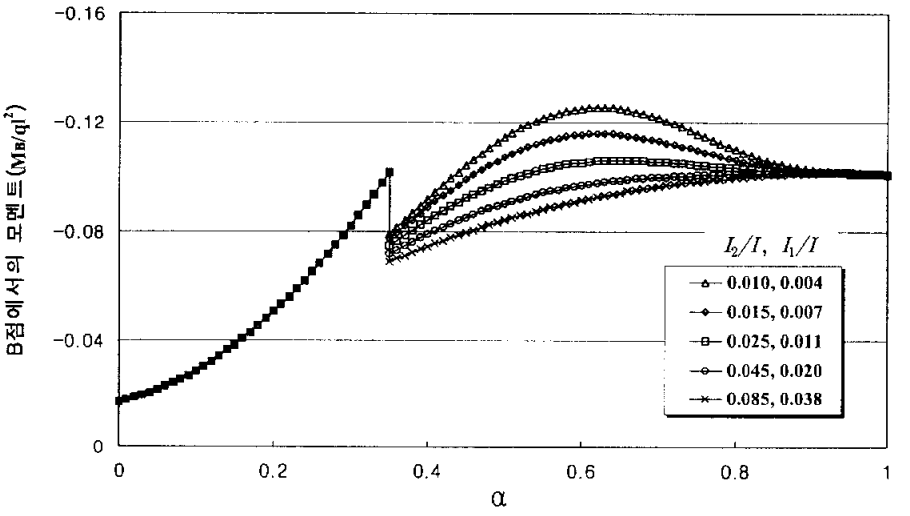


그림 4.5 $q_2/q = 0.15, q_1/q = 0.05, l_n/l = 0.65$**인 경우 압출하는 동안 강성비 따른 B점의 모멘트**

본 연구에서 산정한 각 중량비 경우별 최적길이들은 부록 표 B.1~ 표 B.8에 수록하였으며, 그림 4.4와 그림 4.5에서는 일부 예를 보여주고 있다.

그림 4.4에서 보는 바와 같이 $q_2/q=0.08$, $q_1/q=0.05$의 경우에는 $l_n/l=0.61$이, 그림 4.5와 같이 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$의 경우에서는 $l_n/l=0.65$가 얻어졌다.

그림 4.4와 그림 4.5의 경우 모두에서 2단계 압출시 M_B^E을 초과하지 않게 하는 최소강성비는 중량비 변화에 관계없이 모두 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$로 나타났다. 이는 매개변수를 고려할 때 강성비는 중량비의 영향을 고려하여 결정된 것이 아니라, 서로 각각의 독립된 매개변수로 고려되었으므로 중량비에 관계없이 최소강성비는 일정하게 분석되는 것으로 판단된다. 그러므로 강성비가 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$ 이상으로만 설계된다면 중량비와 길이비의 조절만으로 캔틸레버 상태와 압출 완료시 최대 부모멘트의 차이가 최소가 되도록 하는 최적의 압출추진코를 설계할 수 있을 것이다.

그림 4.4와 그림 4.5의 과정을 거쳐 얻어진 각 중량비에 대한 최적길이비의 예를 표 4.1~표 4.3과 그림 4.6~그림 4.8에서 보여주고 있다. 그림 4.6~그림4.8에서의 강성비는 모두 최소강성비인 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$을 적용한 것이다.

표 4.1 중량비 변화에 따른 최적 길이비 변화($q_2/q=0.06$)

q_2/q	q_1/q	l_n/l
0.06	0.05	0.599
0.06	0.04	0.592
0.06	0.03	0.585
0.06	0.02	0.579
0.06	0.01	0.572

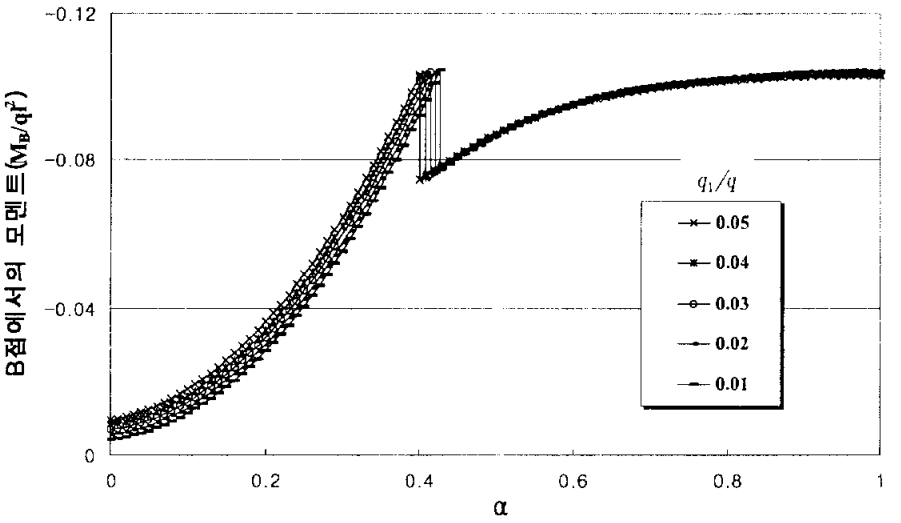


그림 4.6 $q_2/q = 0.06$인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한 B점의 모멘트

표 4.2 중량비 변화에 따른 최적 길이비 변화($q_2/q = 0.08$)

q_2/q	q_1/q	l_n/l
0.08	0.07	0.626
0.08	0.06	0.618
0.08	0.05	0.610
0.08	0.04	0.603
0.08	0.03	0.595
0.08	0.02	0.588
0.08	0.01	0.582

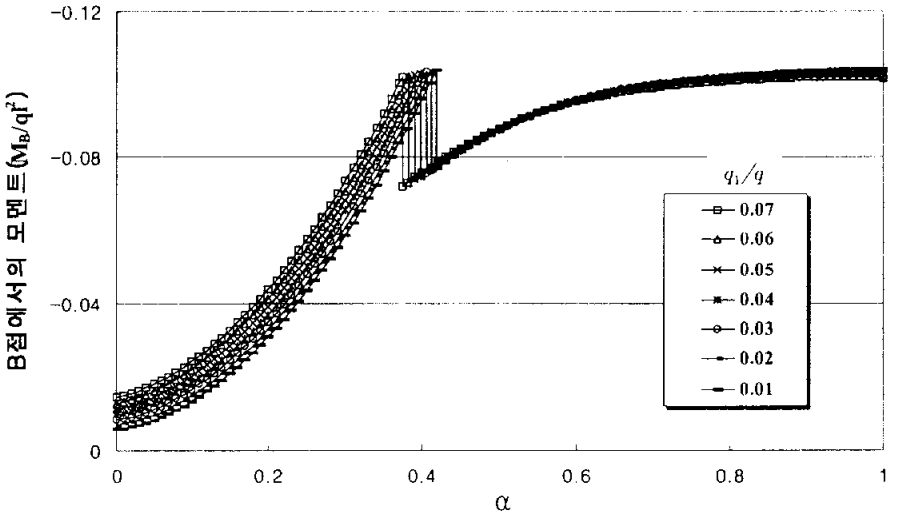


그림 4.7 $q_2/q = 0.08$인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한 B점의 모멘트

표 4.3 중량비 변화에 따른 최적 길이비 변화($q_2/q = 0.1$)

q_2/q	q_1/q	l_n/l
0.1	0.09	0.658
0.1	0.08	0.648
0.1	0.07	0.639
0.1	0.06	0.63
0.1	0.05	0.622
0.1	0.04	0.614
0.1	0.03	0.606
0.1	0.02	0.604
0.1	0.01	0.592

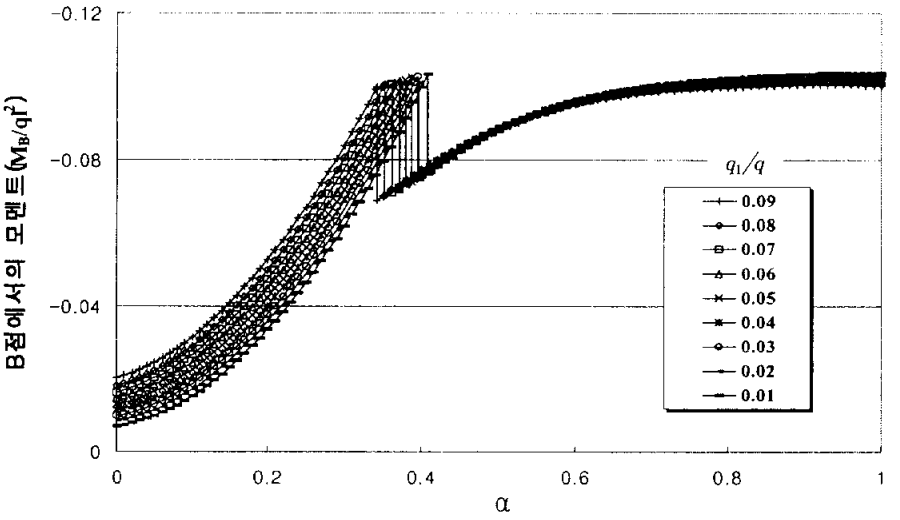


그림 4.8 $q_2/q = 0.1$**인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한 B점의 모멘트**

4.5 탄성계수비의 변화에 따른 영향

그림 4.9는 길이비 $l_n/l=0.65$, 중량비 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$, 강성비 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$인 경우 탄성계수비(E_n/E)의 변화에 따른 지점 B의 휨모멘트 변화를 나타내고 있다.

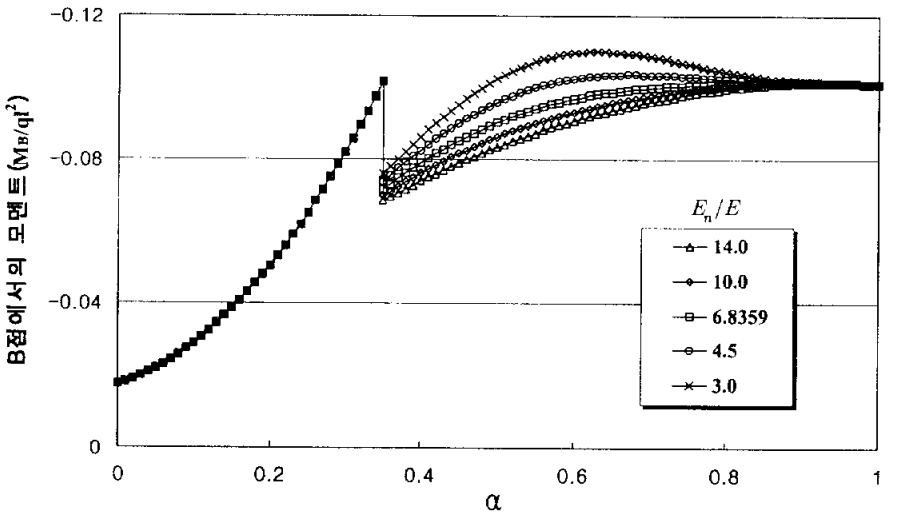


그림 4.9 $l_n/l=0.65, q_2/q=0.15, q_1/q=0.05, I_2/I=0.045, I_1/I=0.02$**인 경우 압출하는 동안 탄성계수비에 따른 B점의 모멘트**

그림 4.9에서 알 수 있듯이 탄성계수비는 강성비의 효과와 마찬가지로 2단계 압출시 단면력 궤적에만 영향을 미치고, 탄성계수비가 다르더라도 압출 완료후의 휨모멘트는 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. 그리고, 그림 4.9에서 탄성계수비 $E_n/E=6.8359$는 중량비 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$, 길이비 $l_n/l=0.65$일 때, 2단계 압출과정 중 발생하는 단면력이 압출 완료후의 단면력을 초과하지 않게 하는 최소 탄성계수비로서 정의될 수 있다.

5. 설계 단면력의 발생위치

지금까지 압출이 진행됨에 따라 그림 3.3의 B지점에서 압출추진코와의 상호작용에 의해 변화되는 휨모멘트에 대하여 알아보았다. 일반적으로 B지점에서의 휨모멘트가 설계 단면력(휨 모멘트)로 결정되기 때문이다 [Rosignoli, 1998; 문영철, 2002]. 그러나 Rosignoli(1998)와 문영철(2002)의 분석은 등단면의 압출추진코를 대상으로 수행된 것이다. 따라서, 변단면의 압출추진코를 대상으로 한 분석이 요구된다.

이번 장에서는 그림 3.3의 C 지점에서의 부 모멘트와 A-B경간과 B-C경간에서 발생되는 정 모멘트의 변화를 분석한다.

5.1 지점 C에서의 부모멘트

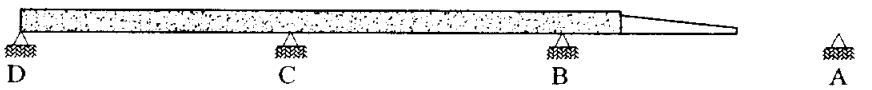
5.1.1 해석식의 유도

1단계 압출에서 지점 C에 발생되는 상부단면의 휨모멘트를 M_C^1라 정의하고, M_C^1를 산정하기 위해 중첩의 원리를 이용한다. 먼저, 그림 5.1(a)와 같은 연속보 구조계의 각 지점에 휨모멘트 M_B, M_C^1, M_D를 작용시켜, 그림 5.1(b)와 같이 콘크리트 상부의 단위 길이당 자중에 의한 q와 각 단부에 작용하는 모멘트를 받는 두 개의 단순보로 분리시킨다. 여기서, M_D는 D지점 이후는 지간길이 l인 무한개의 연속보로 연결된 것으로 한 기본 가정에 따라 $M_D = -\frac{ql^2}{12}$이 된다.

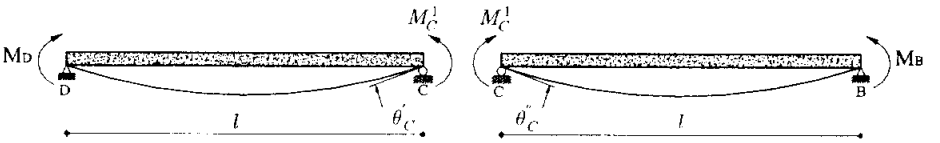
그림 5.1(b)와 같은 구조계에서 DC지간의 지점 C의 처짐각을 θ_C'으로 하고, CB지간의 지점 C의 처짐각을 θ_C''이라고 할 때, 실제로 두 단순보는

지점 C에서 연속이므로 두 보의 처짐각은 식 (5.1)과 같은 적합방정식이 성립된다.

$$\theta_C^{'} = -\theta_C^{''} \tag{5.1}$$



(a) 연속보



(b) 두 개의 단순보로 분리

그림 5.1 중첩법의 적용(1단계 압출)

그림 5.1(b)에서 M_B, M_C^1, M_D 그리고 q에 의한 지점 C의 처짐각을 각각 $(\theta_C)M_B$, $(\theta_C)M_C^1$, $(\theta_C)M_D$, $(\theta_C)M_q$라고 정의한다. 그러면, 모멘트 면적법에 의해 $(\theta_C)M_B = \frac{M_B l}{6EI}$, $(\theta_C)M_C^1 = \frac{M_C^1 l}{3EI}$, $(\theta_C)M_D = \frac{M_D l}{6EI}$, $(\theta_C)q = \frac{ql^3}{24EI}$로 각 각의 처짐각이 산정된다. 그리고, 중첩의 원리에 의해 $\theta_C^{'}$과 $\theta_C^{''}$는 식 (5.2), (5.3)과 같이 산정된다.

$$\begin{aligned}\theta_C^{'} &= (\theta_C)M_D + (\theta_C)M_C^1 + (\theta_C)q \\ &= \frac{M_D l}{6EI} + \frac{M_C^1 l}{3EI} + \frac{ql^3}{24EI}\end{aligned} \tag{5.2}$$

$$\theta''_C = (\theta_C)M_C^1 + (\theta_C)M_B + (\theta_C)q \qquad (5.3)$$
$$= \frac{M_C^1 l}{3EI} + \frac{M_B l}{6EI} + \frac{ql^3}{24EI}$$

식 (5.2)와 식 (5.3)를 식 (5.1)의 적합방정식에 대입하면, 식 (5.4)가 성립된다.

$$\frac{M_D l}{6EI} + \frac{M_C^1 l}{3EI} + \frac{ql^3}{24EI} + \frac{M_C^1 l}{3EI} + \frac{M_B l}{6EI} + \frac{ql^3}{24EI} = 0 \qquad (5.4)$$

여기서 $C_1 = \frac{l}{3EI}$, $C_2 = \frac{l}{6EI}$, $C_3 = \frac{ql^3}{24EI}$라 변환하면

$$M_D \times C_2 + 2M_C^1 \times C_1 + 2C_3 + M_B \times C_2 = 0 \qquad (5.5)$$

$$M_C^1 = -\frac{C_2}{2C_1} M_D - \frac{C_3}{2C_1} - \frac{C_2}{2C_1} M_B \qquad (5.6)$$

이 된다. 그리고, 식 (5.6)에 $C_1 = \frac{l}{3EI}$, $C_2 = \frac{l}{6EI}$, $C_3 = \frac{ql^3}{24EI}$ 및 $M_D = -\frac{ql^2}{12}$를 대입하여 정리하면 M_C^1는 식 (5.7)과 같이 된다.

$$\frac{M_C^1}{ql^2} = -\frac{5}{48} - \frac{1}{4}\frac{M_B^1}{ql^2} \qquad (5.7)$$

5.1.2 등단면 압출추진코의 경우

그림 5.2는 압출추진코의 형상이 등단면 일 경우 식 (5.7)에 의해 해석한 압출추진코의 길이별 압출에 따른 두 번째 지점인 지점 C(그림 5.1.a 참조)에서 모멘트 M_C 값의 변화를 보여주고 있다. 이 경우 식 (5.7)의 M_B^1은 Rosignoli(1998)에 의해 제안된 식 (3.86)과 (3.87)을 사용하였으며, 이때 중량비는 $q_n/q=0.1$, 강성비 $E_nI_n/EI=0.2$를 대입하였다. 예제해석을 위해 적용된 중량비는 Rosignoli(1998)와 문영철(2002)의 연구에서 적용한 중량비이고, 강성비는 그 들이 얻은 최적(최소) 강성비이다.

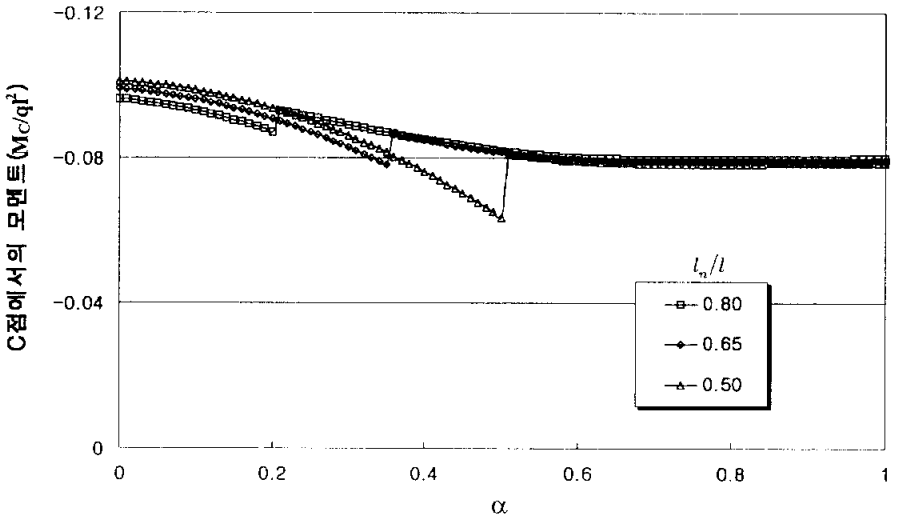


그림 5.2 길이비의 변화에 따른 C지점의 모멘트 변화(등단면 압출추진코)

그림 5.2에서 보는바와 같이 지점 C의 휨모멘트는 압출이 시작될 때 가장 크고, 압출이 진행됨에 따라 감소한다. 그러다가 지점 A에 압출추진코가 도달하여 탄성처짐의 회복이 일어날 때 일시적으로 증가한다. 이후 다시 지점 C의 휨모멘트 크기는 감소하다가 $\alpha=0.6$ 이후부터는 압출추진코와 상부구조와의 길이비에 관계없이 일정한 크기를 갖는 것을 알 수 있

다. 이는 콘크리트 상부구조가 C 지점을 기준으로 약 $1.6l$ 이상 압출된 후부터는 압출진행에 따른 부재력의 변화가 없다는 것을 의미한다.

한편, 그림 5.2의 $\alpha=0$일 때의 지점 C에서 발생된 휨모멘트의 크기는 이미 압출이 끝난 경간의 압출시에 해석된 $\alpha=1$일 때의 M_B값과 같다. 그리고, 압출이 시작될 때인 $\alpha=0$일 때의 지점 C에서 발생된 휨모멘트의 크기는 최대가 된다. 그러나, 4장에서 살펴본 바와 같이 지점 B의 휨모멘트인 M_B값은 $\alpha=0$일 때가 최소이다. 따라서, $M_C \leq M_B$의 조건이 되므로 압출 중 M_B값에 대한 단면의 안전성이 검토되었으면 M_C값에 대하여는 고려할 필요가 없다.

5.1.3 변단면 압출추진코의 경우

그림 5.3은 압출추진코의 형상이 변단면 일 경우 식 (5.7)에 의해 해석한 압출추진코의 길이별 압출에 따른 두 번째 지점인 지점 C(그림 5.1.a 참조)에서 모멘트 M_C 값의 변화를 보여주고 있다. 이 경우 식 (5.7)의 M_B^1의 계산은 I형단면의 압출추진코에 대하여 본 논문에서 유도된 해석식 (3.6)과 (3.56)을 이용하였다. 이때 중량비는 Rosignoli(1998)와 문영철(2002)이 적용하였던 $q_n/q=0.1$에 맞추어 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$를 적용하였다. 그리고, 탄성계수비는 $E_n/E=6.8359$를, 강성비는 본 논문에서 제안된 최소 강성비인 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.020$을 적용하였다.

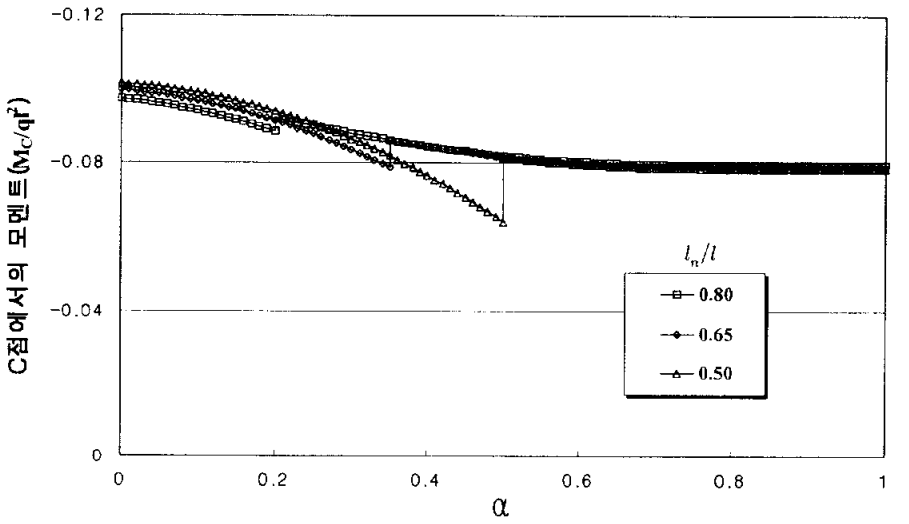


그림 5.3 길이비의 변화에 따른 C지점의 모멘트 변화(변단면 압출추진코)

그림 5.3에서 보는바와 같이 변단면 압출추진코인 경우에도 지점 C의 휨모멘트는 압출이 시작될 때 가장 크고, 압출이 진행됨에 따라 감소한다. 그러다가 그림 5.1.a의 지점 A에 압출추진코가 도달하여 탄성처짐의 회복이 일어날 때 일시적으로 증가한다. 이후 다시 지점 C의 휨모멘트 크기는

감소하다가 $\alpha=0.6$ 이후부터는 압출추진코와 상부구조와의 길이비에 관계없이 일정한 크기를 갖는 것을 알 수 있다. 이는 콘크리트 상부구조가 C 지점을 기준으로 약 $1.6l$ 이상 압출된 후부터는 압출진행에 따른 부재력의 변화가 없다는 것을 의미한다.

한편, 그림 5.3의 $\alpha=0$일 때의 지점 C에서 발생된 휨모멘트의 크기는 이미 압출이 끝난 경간의 압출시에 해석된 $\alpha=1$일 때의 M_B값과 같다. 그리고, 압출이 시작될 때인 $\alpha=0$일 때의 지점 C에서 발생된 휨모멘트의 크기는 최대가 된다. 그러나, 4장에서 살펴본 바와 같이 지점 B의 휨모멘트인 M_B값은 $\alpha=0$일 때가 최소이다. 따라서, $M_C \leq M_B$의 조건이 되므로 압출 중 M_B값에 대한 단면의 안전성이 검토되었으면 M_C값에 대하여는 고려할 필요가 없다.

5.2 첫 번째 경간에서의 정 모멘트

5.2.1 등단면 압출추진코에 대한 해석식 유도

첫 번째 경간, 즉 그림 5.1.a의 A-B경간의 최대 정모멘트를 결정하기 위해 그림 5.4와 같은 구조계를 도입하였다. 그림 5.4에서 교량 상부구조와 압출추진코의 단위 길이당 중량을 각각 q, q_n이라 하고, 지점 A와 B의 반력을 각각 R_A, R_B 또한 2단계 압출과정 중 지점 B에 발생하는 휨모멘트를 M_B^2라 하였다.

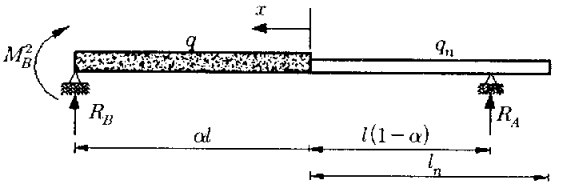


그림 5.4 첫 번째 경간 분리(등단면 압출추진코)

그림 5.4에서 지점 A의 반력 R_A/ql는 평형조건식 $\sum M_B = 0$을 이용하여 식 (5.8)과 같이 산정하였다. 그리고 압출추진코와 교량 상부구조 연결부를 기준으로 한 임의의 위치 x에서 전단력 V_x와 휨 모멘트 M_x는 식 (5.9)과 식 (5.10)과 같다.

$$\frac{R_A}{ql} = \frac{M_B^2}{ql^2} + \frac{\alpha^2}{2} + \frac{q_n}{q}\frac{l_n}{l}\left(\alpha + \frac{l_n}{2l}\right) \tag{5.8}$$

$$V_x = -R_A + q_n l_n + qx \tag{5.9}$$

$$M_x = R_A(x + l(1-\alpha)) - q_n l_n\left(x + \frac{l_n}{2}\right) - \frac{qx^2}{2} \tag{5.10}$$

A-B경간에서 발생하는 최대 정 모멘트는 식 (5.9)의 전단력 V_x가 0이 되는 위치에서 발생할 것이다. 따라서 전단력 V_x가 0이 되는 위치는 식 (5.9)에 의해 식 (5.11)과 같이 구해지고

$$x = \frac{R_A}{q} - \frac{q_n}{q} l_n \tag{5.11}$$

식 (5.11)을 식 (5.10)에 대입하여 식 (5.12)와 같이 압출 중 첫 번째 경간 A-B에 발생하는 최대 정모멘트를 산정할 수 있는 해석식을 유도하였다.

$$\frac{M_{a-b}^{\max}}{ql^2} = \frac{R_A}{ql}(1 - \alpha - \frac{q_n}{q}\frac{l_n}{l}) + \frac{1}{2}(\frac{R_A}{ql})^2 + \frac{1}{2}\frac{q_n}{q}(\frac{l_n}{l})^2(\frac{q_n}{q} - 1) \tag{5.12}$$

5.2.2 첫 번째 경간 정모멘트 변화(등단면 압출추진코)

그림 5.5는 압출추진코의 길이가 상대적으로 긴 경우의 해석예제로서 압출추진코와 상부구조의 길이비가 $l_n/l=0.8$이고, 중량비 $q_n/q=0.1$인 경우의 강성비 E_nI_n/EI 변화에 따른 첫 번째 경간의 최대 정모멘트 변화를 나타내고 있다. 이때, 예제해석을 위해 적용된 길이비와 중량비는 Rosignoli(1998)와 문영철(2002)의 논문에서 적용된 값이다. 그리고 M_B^2는 Rosignoli(1998)가 등단면 압출추진코에 대해 제안한 해석식인 식 (3.87)을 이용하였고, A-B경간의 최대 정 모멘트를 결정하기 위해서는 해석식 식 (5.8)과 (5.12)를 이용하였다.

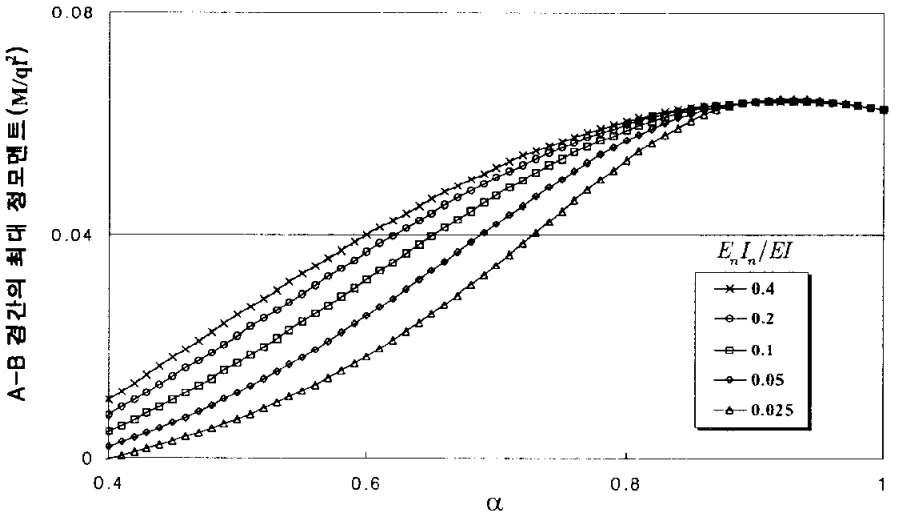


그림 5.5 $l_n/l=0.8$, $q_n/q=0.1$일때의 강성비에 따른 첫 번째 경간의 최대 정모멘트의 변화

그림 5.5에서 알 수 있듯이 압출추진코의 강성변화는 최대 정 모멘트를 향한 진행궤적에만 영향을 미치고, 대략 $\alpha=0.9$에서부터는 강성비 변화에 관계없이 모두 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다. 또한 $\alpha=0.9$ 이후

부터는 압출추진코의 캔틸레버 부 모멘트인 M_A의 효과로 오히려 감소하기 시작한다.

그림 5.6은 압출추진코의 길이가 상대적으로 짧은 경우의 해석예제로서 Rosignoli(1998)와 문영철(2002)의 논문에서 적용된 상부의 길이비가 $l_n/l=0.5$이고, 중량비 $q_n/q=0.1$인 경우의 강성비 E_nI_n/EI 변화에 따른 첫 번째 경간의 최대 정모멘트 변화를 나타내고 있다. 이때, M_B^2의 계산은 Rosignoli(1998)가 제안한 등단면 압출추진코에 대한 해석식 (3.87)를 이용하였고, A-B경간의 최대 정 모멘트를 결정하기 위해서는 해석식 식 (5.8)과 식(5.12)를 이용하였다.

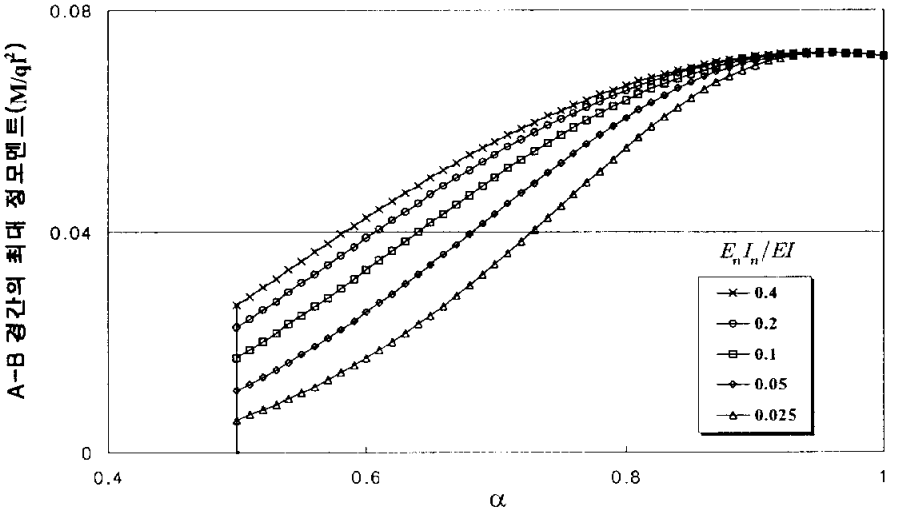


그림 5.6 $l_n/l=0.5$, $q_n/q=0.1$**일때의 강성비에 따른 첫 번째 경간의 최대 정모멘트의 변화**

그림 5.6에서 알 수 있듯이 압출추진코의 길이가 짧은 경우에도 압출추진코의 휨 강성은 최대 모멘트를 향한 진행궤적에 영향을 미친다. 그리고, 이 경우 대략 $\alpha=0.95$에서 휨 강성비에 관계없이 모두 일정한 값에 수렴

하는 것으로 나타났다. $\alpha=0.95$ 이후부터는 압출추진코의 캔틸레버 부 모멘트인 M_A의 효과로 오히려 감소하기 시작한다. 한편, 상대적으로 압출추진코의 길이가 짧은 경우의 최대 정 모멘트가 압출추진코가 긴 경우보다 약간 더 높게 나타나는데 이것은 M_A가 작게 나타나기 때문이다.

그림 5.5와 그림 5.6으로부터 A-B경간의 최대 정 모멘트는 M_B와 마찬가지로 압출추진코와 상부구조와의 휨강성비에 따라 그 궤적이 달라지는 것을 알 수 있었다. 그러나, M_B의 경우는 휨강성비가 최소강성비보다 적을 경우에는 압출 중간에 $M_B^E(\alpha=1.0$일 경우)보다 큰 휨모멘트가 발생되지만 A-B 경간의 최대휨모멘트는 휨강성비에 관계없이 $\alpha<1.0$일 경우는 항상 $\alpha=1.0$일 때 보다 적다. 또한 그림 5.5를 Rosignoli(1998)의 FIG. 8과 문영철(2002)의 그림 5.3과 비교하여 보면, 같은 조건의 길이비, 강성비, 중량비에서 M_B의 절대값은 A-B경간의 최대 정모멘트보다 항상 큰 것을 알 수 있다. 따라서, ILM 교량의 상부단면을 압출 중 발생하는 부모멘트와 정모멘트의 최대 절대값에 대하여 안전하도록 설계하고, 그 설계 모멘트로서 M_B을 사용하였다면, A-B경간에 발생하는 최대 정모멘트에 대하여는 항상 안전성이 확보된다고 할 수 있다.

5.2.3 변단면 압출추진코에 대한 해석식 유도

그림 5.7과 같이 변단면 압출추진코의 경우 A-B경간 최대 정모멘트를 결정하기 위해 그림 5.1.a의 A-B경간을 분리하여 단순보를 도입하였다. 그림 5.7에서 교량 상부구조의 단위길이당 중량을 q, 그리고 압출추진코 큰 쪽 단면과 작은 쪽 단면의 단위길이당 중량를 각 각 q_2, q_1이라 하고, 지점 A와 B의 반력을 각각 R_A, R_B 2단계 압출과정 중 지점 B의 휨모멘트를 M_B^2라 하였다.

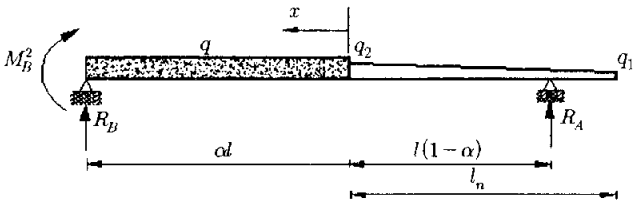


그림 5.7 첫 번째 경간 분리(변단면 압출추진코)

그림 5.7에서 지점 A의 반력 R_A/ql는 평형조건식 $\sum M_B = 0$을 이용하여 식 (5.13)과 같이 산정하였다. 그리고 압출추진코와 교량 상부구조 연결부를 기준으로 한 임의의 위치 x에서 전단력 V_x와 휨 모멘트 M_x는 식 (5.14), (5.15)와 같다.

$$\frac{R_A}{ql} = \frac{\alpha^2}{2} + \frac{q_1}{q}\alpha\frac{l_n}{l} + \frac{1}{2}\frac{q_1}{q}\frac{l_n^2}{l^2} + \frac{1}{2}\left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q}\right)\frac{l_n}{l}\alpha + \frac{1}{6}\left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q}\right)\frac{l_n^2}{l^2}\frac{M_B^2}{ql^2} \tag{5.13}$$

$$V_x = -R_A + \frac{1}{2}(q_1 + q_2)l_n + qx \tag{5.14}$$

$$M_x = R_A(x + l(1-\alpha)) - q_1 l_n\left(x + \frac{l_n}{2}\right) - \frac{1}{2}(q_2 - q_1)l_n\left(x + \frac{l_n}{3}\right) - \frac{qx^2}{2} \tag{5.15}$$

A-B경간에서 발생하는 최대 정 모멘트는 식 (5.14)의 전단력 V_x가 0이 되는 위치에서 발생할 것이다. 따라서 전단력 V_x가 0이 되는 위치는 식 (5.14)에 의해 식 (5.16)과 같이 구해지고

$$x = \frac{R_A}{q} - \frac{1}{2}\left(\frac{q_1}{q} + \frac{q_2}{q}\right) l_n \tag{5.16}$$

식 (5.16)을 식 (5.15)에 대입하여 식 (5.17)과 같이 압출 중 첫 번째 경간 A-B에 발생하는 최대 정모멘트를 산정할 수 있는 해석식을 유도하였다.

$$\begin{aligned}\frac{M_{a-b}^{\max}}{ql^2} = {} & \frac{1}{2}\left\{\frac{R_A}{ql}\right\}^2 + \frac{R_A}{ql}\left\{1-\alpha-\frac{q_1}{q}\cdot\frac{l_n}{l}-\frac{1}{2}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\cdot\frac{l_n}{l}\right\} \\ & + \frac{1}{2}\cdot\frac{q_1}{q}\left(\frac{q_1}{q}+\frac{q_2}{q}\right)\frac{l_n^2}{l^2} - \frac{1}{2}\cdot\frac{q_1}{q}\cdot\frac{l_n^2}{l^2} + \frac{1}{4}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\left(\frac{q_1}{q}+\frac{q_2}{q}\right)\cdot\frac{l_n^2}{l^2} \\ & - \frac{1}{6}\left(\frac{q_2}{q}-\frac{q_1}{q}\right)\cdot\frac{l_n^2}{l^2} - \frac{1}{8}\left(\frac{q_1}{q}+\frac{q_2}{q}\right)^2\cdot\frac{l_n^2}{l^2}\end{aligned} \tag{5.17}$$

5.2.4 첫 번째 경간 정모멘트 변화(변단면 압출추진코)

그림 5.8은 압출추진코의 길이가 상대적으로 긴 경우의 해석예제로서 변단면 압출추진코와 상부구조의 길이비가 $l_n/l=0.8$인 경우의 강성비 I_2/I, I_1/I의 변화에 따른 첫 번째 경간의 최대 정모멘트 변화를 나타내는 그림이다. 이때 중량비는 Rosignoli(1998)와 문영철(2002)에서 적용한 등단면의 경우인 $q_n/q=0.1$에 맞추어 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$를 적용하였고, 탄성계수비는 $E_n/E=6.8359$를 대입하였다. 그리고 M_B^2는 I형단면의 압출추진코에 대하여 본 논문에서 유도된 해석식인 식 (3.56)을 이용하였고, A-B경간의 최대 정모멘트를 결정하기 위해서는 식 (5.13)과 (5.17)을 이용하였다.

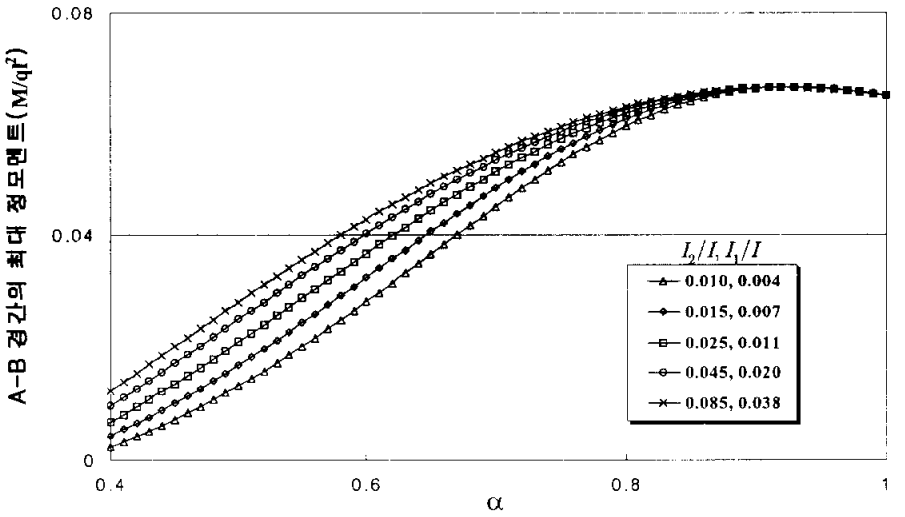


그림 5.8 $l_n/l=0.8$, $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$일때 첫 번째 경간의 최대 정 모멘트 변화

그림 5.8에서 알 수 있듯이 변단면 압출추진코의 강성변화는 최대 정모멘트를 향한 진행궤적에만 영향을 미치고, 대략 $\alpha=0.92$에서부터 강성비 변화에 관계없이 모두 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다. 또한

$\alpha = 0.92$ 이후부터는 압출추진코의 캔틸레버 부 모멘트인 M_A의 효과로 오히려 감소하기 시작한다.

그림 5.9는 압출추진코의 길이가 상대적으로 짧은 $l_n/l = 0.5$인 경우의 해석예제로서 강성비 I_2/I, I_1/I의 변화에 따른 첫 번째 경간의 최대 정 모멘트 변화를 나타내고 있다. 이때, 중량비는 등단면의 경우인 $q_n/q = 0.1$에 맞추어 $q_2/q = 0.15$, $q_1/q = 0.05$를 적용하였고, 탄성계수비는 $E_n/E = 6.8359$를 대입하였다. 이때 M_B^2의 계산은 I형단면의 압출추진코에 대하여 본 논문에서 유도된 해석식 (3.56)을 이용하였고, A-B경간의 최대 정모멘트를 결정하기 위해서는 해석식 식 (5.13)과 (5.17)을 이용하였다.

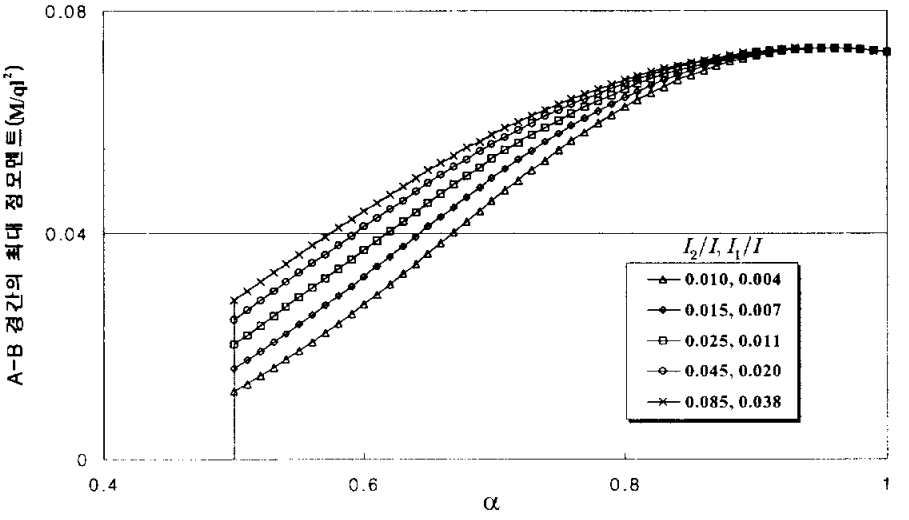


그림 5.9 $l_n/l = 0.5$, $q_2/q = 0.15$, $q_1/q = 0.05$**일때 첫 번째 경간의 최대 정 모멘트 변화**

그림 5.9에서 알 수 있듯이 압출추진코의 길이가 짧은 경우에도 압출추진코의 휨 강성은 최대 모멘트를 향한 진행궤적에 영향을 미치고 이 경우 대략 $\alpha = 0.95$에서 휨 강성비에 관계없이 모두 일정한 값에 수렴하는 것으

로 나타났다. $\alpha=0.95$ 이후부터는 압출추진코의 캔틸레버 부 모멘트인 M_A의 효과로 오히려 감소하기 시작한다. 한편, 상대적으로 압출추진코의 길이가 짧은 경우 최대 정 모멘트가 압출추진코가 긴 경우보다 약간 더 높게 나타나는데 이것은 M_A가 작게 나타나기 때문이다.

그림 5.8과 그림 5.9로부터 A-B경간의 최대 정 모멘트는 M_B와 마찬가지로 압출추진코와 상부구조와의 휨강성비에 따라 그 궤적이 달라지는 것을 알 수 있었다. 그러나, M_B의 경우는 휨강성비가 최소강성비보다 적을 경우에는 압출 중간에 $M_B^E(\alpha=1.0$일 경우)보다 큰 휨모멘트가 발생되지만 A-B 경간의 최대휨모멘트는 휨강성비에 관계없이 $\alpha<1.0$일 경우는 항상 $\alpha=1.0$일 때 보다 적다. 또한 그림 5.8을 그림 4.1과 비교하여 보면, 같은 조건의 길이비, 강성비, 중량비, 탄성계수비에서 M_B의 절대값은 A-B경간의 최대 정모멘트보다 항상 큰 것을 알 수 있다. 따라서, ILM 교량의 상부단면을 압출 중 발생하는 부모멘트와 정모멘트의 최대 절대값에 대하여 안전하도록 설계하고, 그 설계 모멘트로서 M_B을 사용하였다면, A-B경간에 발생하는 최대 정모멘트에 대하여는 항상 안전성이 확보된다고 할 수 있다.

5.3 두번째 경간에서의 정 모멘트

5.3.1 해석식 유도

그림 5.1.a의 B-C 경간에서 발생하는 최대 정모멘트를 결정하기 위해 그림 5.10과 같은 단순보를 도입하였다.

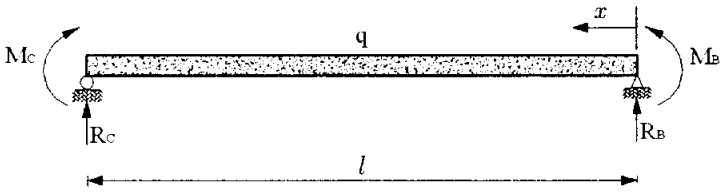


그림 5.10 단순보로 분리

그림 5.10과 같이 분리된 단순보에서 교량 상부구조의 단위길이당 중량을 q, 지점 B와 지점 C에서 발생하는 모멘트를 각각 M_B와 M_C라 두고, 지점 B에서 반력 R_B를 평형조건식 $\sum M_C = 0$를 이용하여 식 (5.18)과 같이 산정하였다. 그리고 지점 B를 기준으로 임의의 위치에서의 전단력 V_x와 휨모멘트 M_x를 식 (5.19)와 (5.20)과 같이 구하였다.

$$R_B = \frac{M_C}{l} + \frac{ql}{2} - \frac{M_B}{l} \tag{5.18}$$

$$V_x = -R_B + qx \tag{5.19}$$

$$M_x = R_B \cdot x + M_B - \frac{qx^2}{2} \tag{5.20}$$

B-C경간에서 발생하는 최대 정 모멘트는 식 (5.19)의 전단력 V_x가 0이 되는 위치에서 발생할 것이다. 따라서 전단력 V_x가 0이 되는 위치는 식 (5.19)에 의해 식 (5.21)과 같이 구해지고

$$x = \frac{R_B}{q} \tag{5.21}$$

식 (5.21)을 식 (5.20)에 대입하여 식 (5.22)와 같이 압출 중 B-C 경간에 발생하는 최대 정모멘트를 산정할 수 있는 해석식을 유도하였다.

$$\frac{M_{B-C}^{\max}}{ql^2} = \frac{1}{2}\left(\frac{M_C}{ql^2} - \frac{M_B}{ql^2} + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{M_B}{ql^2} \tag{5.22}$$

5.3.2 등단면 압출추진코의 경우

그림 5.11은 등단면 압출추진코인 경우 식 (5.22)를 이용하여 Rosignoli(1998)와 문영철(2002)의 논문에서 적용된 값인 길이비 $l_n/l=0.8$ 중량비 $q_n/q=0.1$인 경우의 강성비 E_nI_n/EI에 대한 두 번째 경간 B-C의 최대 정 모멘트를 보여 주고 있다. 이때 식 (5.22)의 M_B는 Rosignoli(1998)가 제안한 등단면 압출추진코에 대한 해석식인 식 (3.86), (3.87)을 그리고 M_C는 식 (5.9)를 대입하였다.

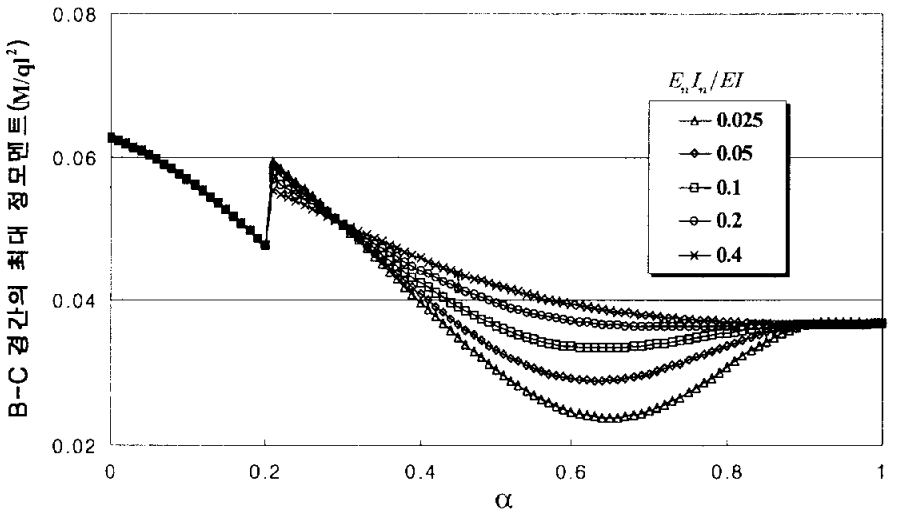


그림 5.11 $l_n/l=0.8$, $q_n/q=0.1$일 때 두 번째 경간의 최대 정모멘트 변화

그림 5.11에서와 같이 B-C경간의 최대 정모멘트는 $\alpha=0$일 때 가장 큰 값을 나타내고 압출이 진행됨에 따라 감소한다. 그리고 B-C 경간의 최대 정모멘트 값 그림 5.5의 $\alpha=1$일 때의 A-B 경간의 모멘트 값과 일치한다. 그러나, A-B 경간의 최대 정모멘트는 5.1.2절에서 설명한 바와 같이 $\alpha=0.9$근처에서 발생하므로 B-C 경간의 최대 정모멘트는 A-B 경간의 최대 정모멘트보다 항상 작다.

따라서 A-B 경간에서의 최대 정 모멘트에 대한 설계 정 모멘트가 결정되면 B-C 경간에서의 최대 정 모멘트를 고려할 필요가 없을 것이다. 그리고 ILM 교량의 상부단면을 압출 중 발생하는 부모멘트와 정모멘트의 최대 절대값에 대하여 안전하도록 설계하고, 그 설계 모멘트로서 M_B을 사용하였다면, B-C 경간에 발생하는 최대 정모멘트에 대하여는 항상 안전성이 확보된다고 할 수 있다.

5.3.3 변단면 압출추진코의 경우

그림 5.12는 변단면 압출추진코와 상부구조의 길이비가 $l_n/l=0.8$인 경우의 강성비 I_2/I, I_1/I의 변화에 따른 B-C 경간에 발생하는 최대 정모멘트 변화를 나타내는 그림이다. 이때 중량비는 Rosignoli(1998)와 문영철(2002)에서 적용한 등단면의 경우인 $q_n/q=0.1$에 맞추어 $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$를 적용하였고, 탄성계수비는 $E_n/E=6.8359$를 대입하였다. 그리고 식 (5.22)의 M_B는 I형 압출추진코 단면에 대해 본 논문에서 제안한 해석식 (3.6), (3.56)을 대입하였고, M_C는 식 (5.9)를 대입하였다.

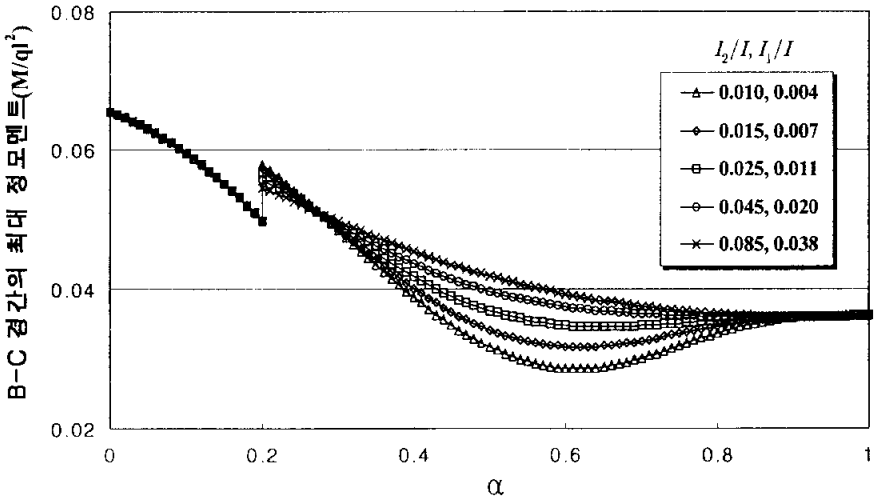


그림 5.12 $l_n/l=0.8$, $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$**일때 두 번째 경간의 최대 정모멘트 변화**

그림 5.12에서와 같이 변단면 압출추진코를 사용한 경우 B-C경간의 최대 정모멘트는 $\alpha=0$일 때 가장 큰 값을 나타내고 압출이 진행됨에 따라 감소한다. 그리고, B-C 경간의 최대 정모멘트 값은 그림 5.8의 $\alpha=1$일 때의 A-B 경간의 모멘트 값과 일치한다. 그러나, A-B 경간의 최대 정모멘

트는 5.1.2절에서 설명한 바와 같이 $\alpha = 0.93$근처에서 발생하므로 B-C 경간의 최대 정모멘트는 A-B 경간의 최대 정모멘트보다 항상 작다.

따라서 A-B 경간에서의 최대 정 모멘트에 대한 설계 정 모멘트가 결정되면 B-C 경간에서의 최대 정 모멘트를 고려할 필요가 없을 것이다. 그리고, ILM 교량의 상부단면을 압출 중 발생하는 부모멘트와 정모멘트의 최대 절대값에 대하여 안전하도록 설계하고, 그 설계 모멘트로서 M_B을 사용하였다면, B-C 경간에 발생하는 최대 정모멘트에 대하여는 항상 안전성이 확보된다고 할 수 있다.

6. 사례연구

6.1 상호작용을 고려한 설계식

6.1.1 중량비와 최적길이비

부록 표 B.1~표 B.8에 제시된 중량비 q_2/q, q_1/q에 따른 최적 길이비 데이타를 이용하여 그림 6.1~그림 6.8과 같이 회귀분석을 실시하였다. 그 결과 상호작용에 대한 설계식을 식 (6.1)~식 (6.8)과 같이 제안하였다. 여기서 제안된 설계식들은 모두 압출 추진코와 상부구조의 탄성계수비 E_n/E가 6.8359이고, 강성비는 최소 강성비 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$ 이상의 경우로 그 사용이 제한된다.

$q_2/q=0.04$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right)=26.293\left(\frac{q_1}{q}\right)^3-0.597\left(\frac{q_1}{q}\right)^2+0.614\left(\frac{q_1}{q}\right)+0.557 \qquad (6.1)$$

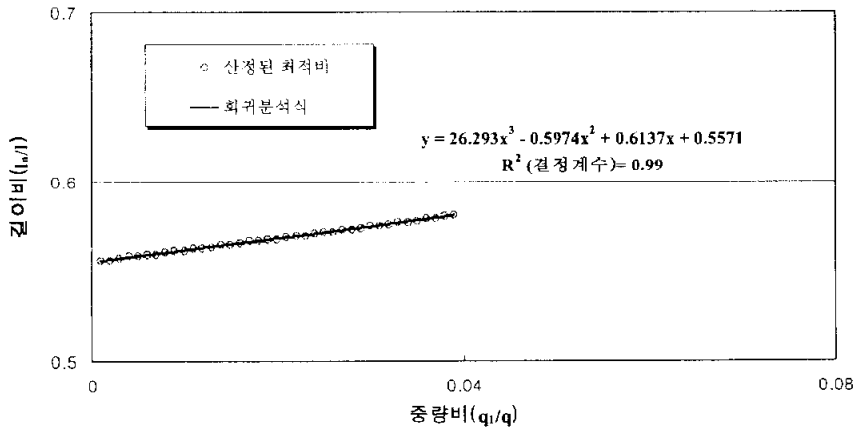


그림 6.1 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.04$)

$q_2/q = 0.06$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = -4.696\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 1.734\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.589\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.566 \qquad (6.2)$$

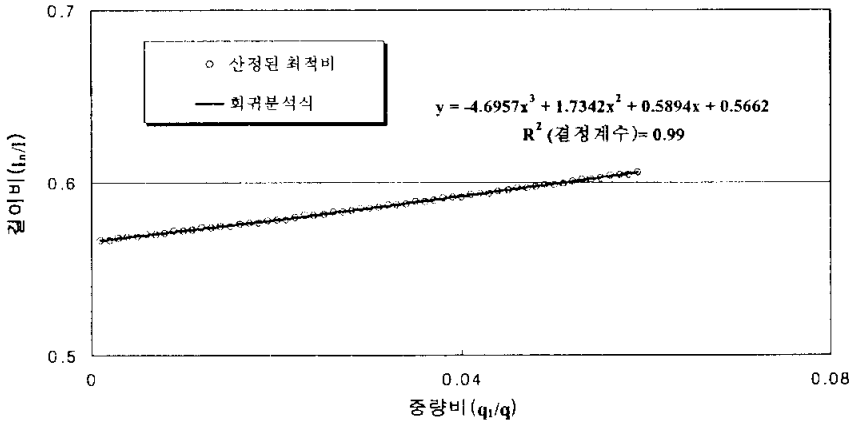


그림 6.2 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.06$)

$q_2/q = 0.07$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 7.059\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.633\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.634\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.571 \qquad (6.3)$$

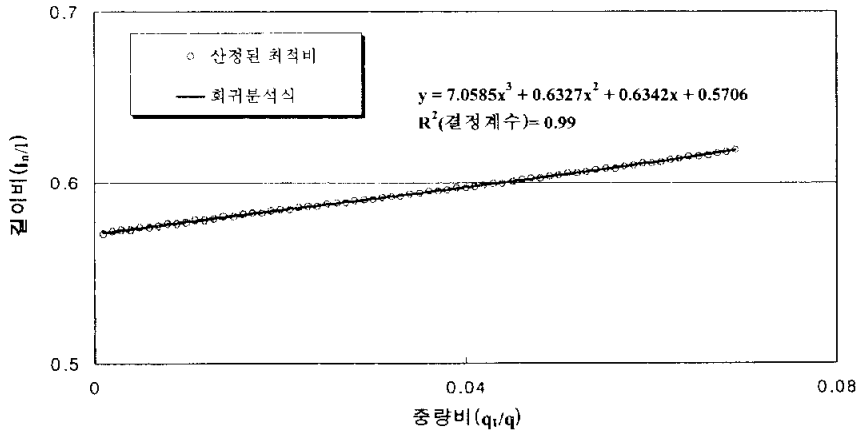


그림 6.3 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.07$)

$q_2/q = 0.08$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 1.238\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 1.347\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.631\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.575 \qquad (6.4)$$

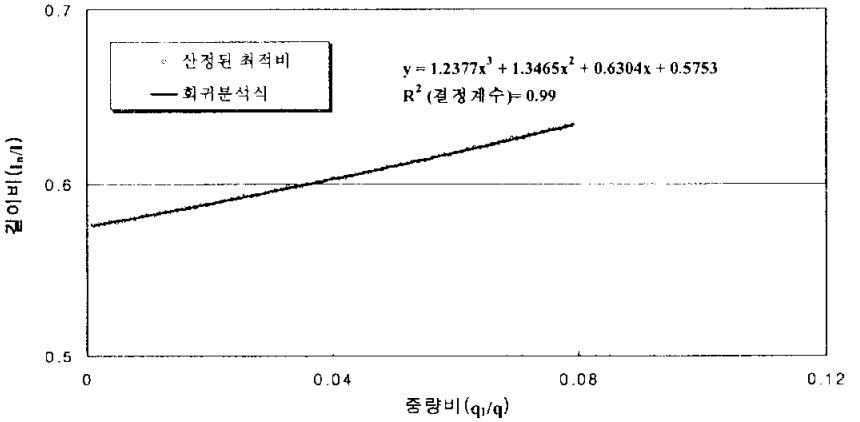


그림 6.4 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.08$)

$q_2/q = 0.09$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 5.949\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.952\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.653\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.58 \qquad (6.5)$$

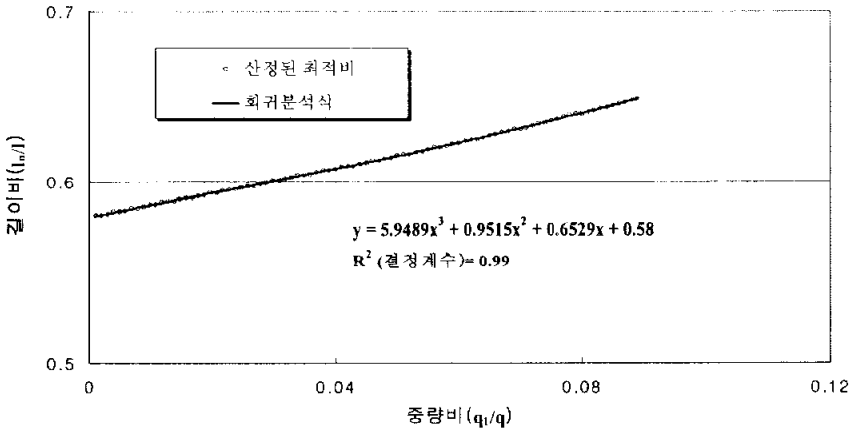


그림 6.5 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.09$)

$q_2/q = 0.10$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 8.555\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.675\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.683\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.585 \qquad (6.6)$$

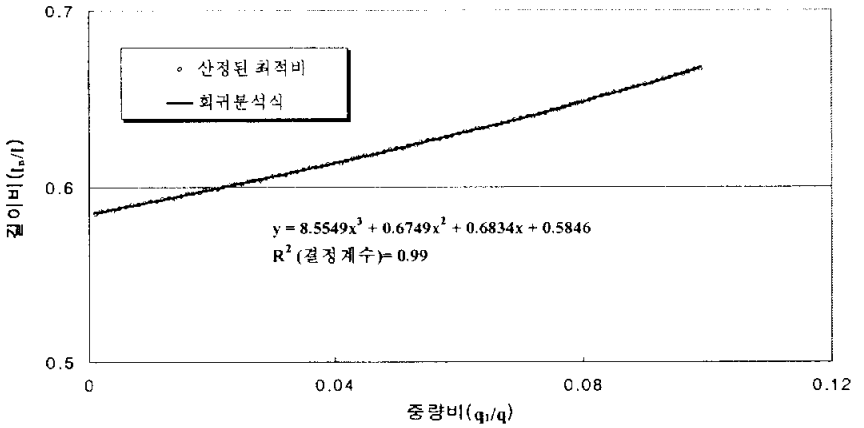


그림 6.6 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.10$)

$q_2/q = 0.12$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 10.256\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.649\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.718\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.595 \qquad (6.7)$$

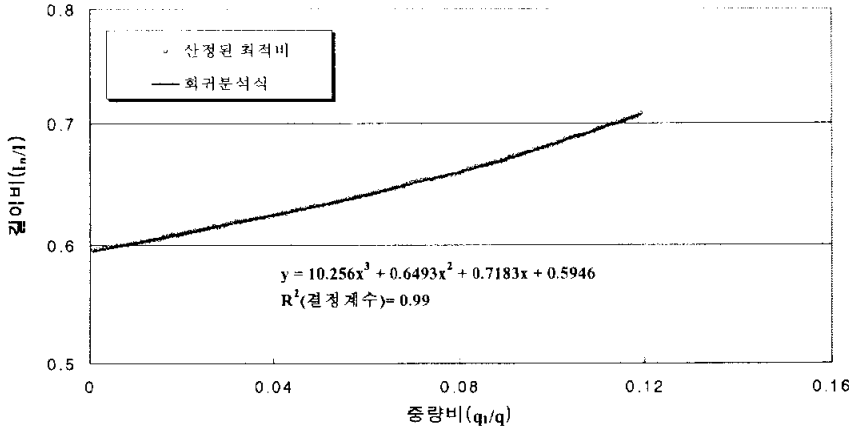


그림 6.7 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.12$)

$q_2/q = 0.14$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 16.293\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.003\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.784\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.605 \qquad (6.8)$$

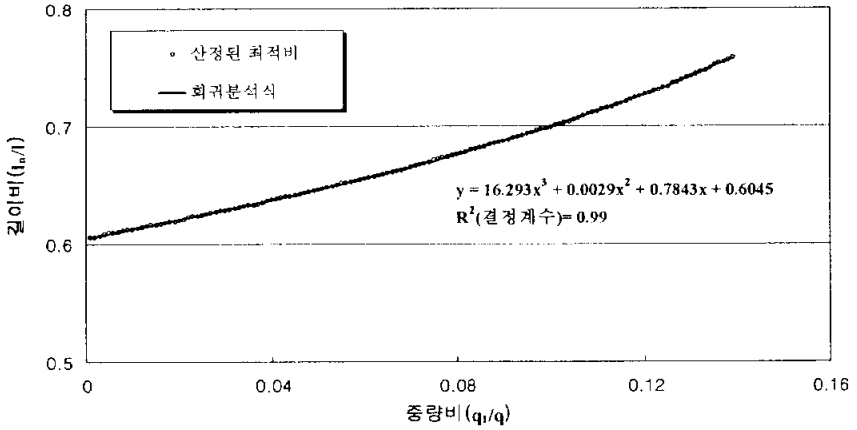


그림 6.8 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.14$)

6.1.2 설계 단면력과 최적 중량비

부록 표 B.1~표 B.8에 제시된 최적 중량비와 지점 B의 모멘트와의 관계를 나타내는 결과를 이용하여 그림 6.9~그림 6.16와 같이 회귀분석을 실시한 후, 설계식 식 (6.9)~식 (6.16)을 제안하였다. 여기서 제안된 설계식의 이용은 압출 추진코와 상부구조의 탄성계수비 E_n/E가 6.8359이고, 강성비는 최소 강성비 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$ 이상의 경우로 제한된다.

$q_2/q=0.04$일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right)=-3\times10^6\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3-961129\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2-100256\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)-3484.9 \qquad (6.9)$$

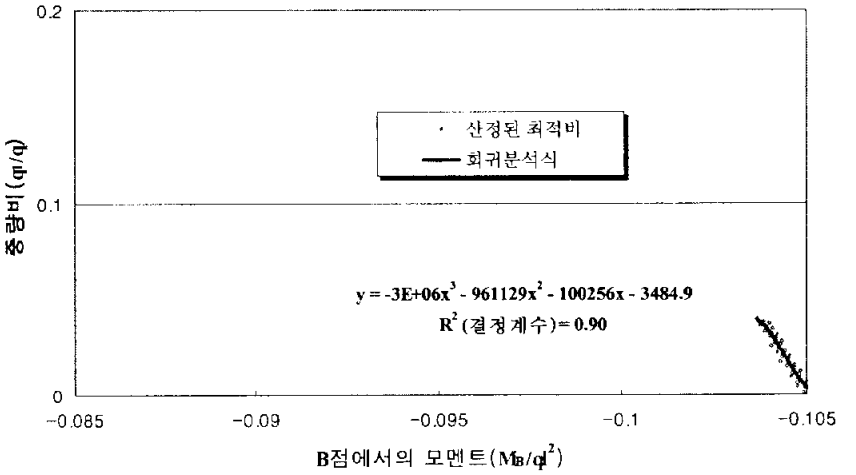


그림 6.9 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.04$)

$q_2/q = 0.06$일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = -3\times10^6\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 - 944322\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 - 98041\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) - 3391.9 \qquad (6.10)$$

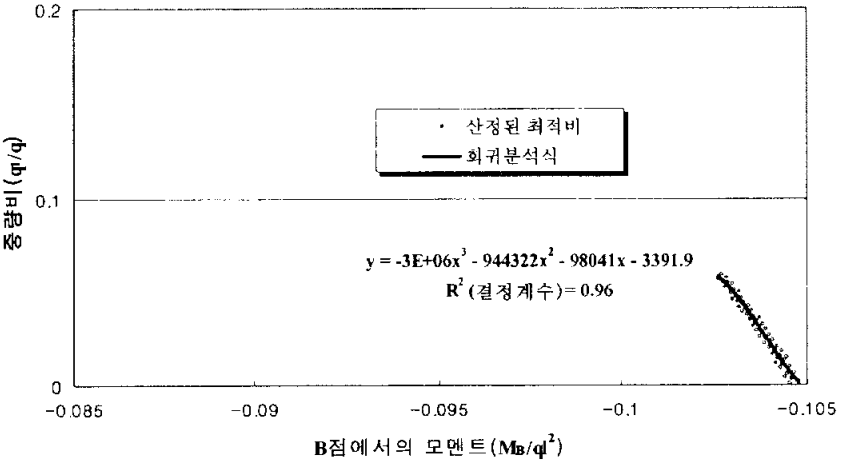


그림 6.10 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.06$)

$q_2/q = 0.07$일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = -2\times10^6\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 - 573654\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 - 59342\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) - 2045.2 \qquad (6.11)$$

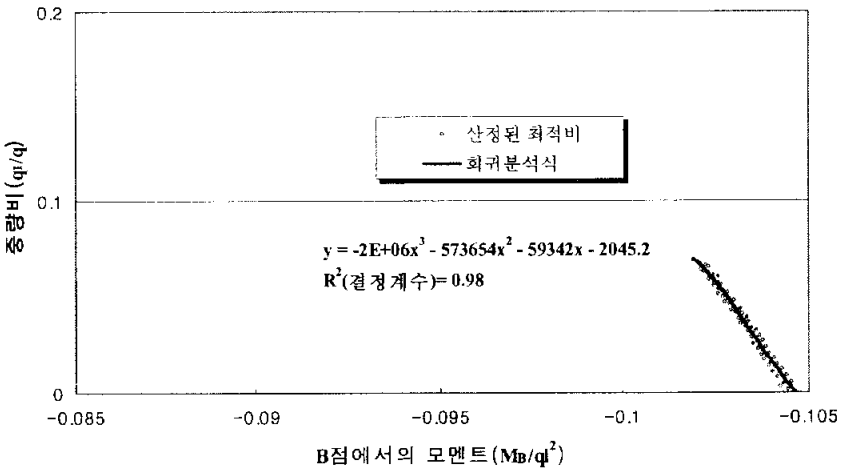


그림 6.11 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.07$)

$q_2/q = 0.08$일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = -492728\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 - 153116\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 - 15834\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) - 544.85 \quad (6.12)$$

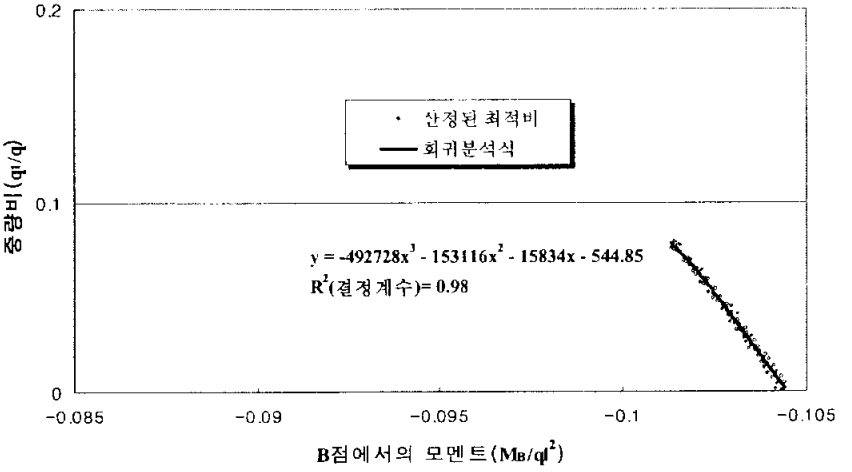


그림 6.12 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.08$)

$q_2/q = 0.09$일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = -286963\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 - 89690\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 - 9316.8\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) - 321.65 \quad (6.13)$$

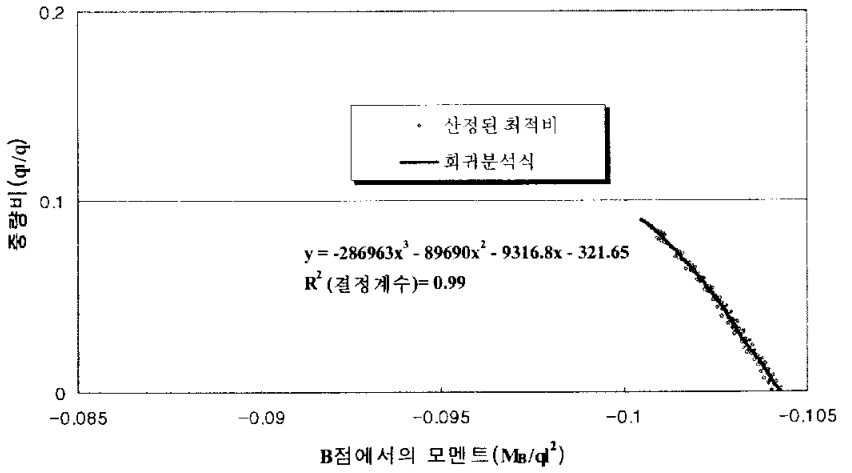


그림 6.13 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.09$)

$q_2/q = 0.10$일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = -197065\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 - 61522\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 - 6376.7\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) - 219.42 \quad (6.14)$$

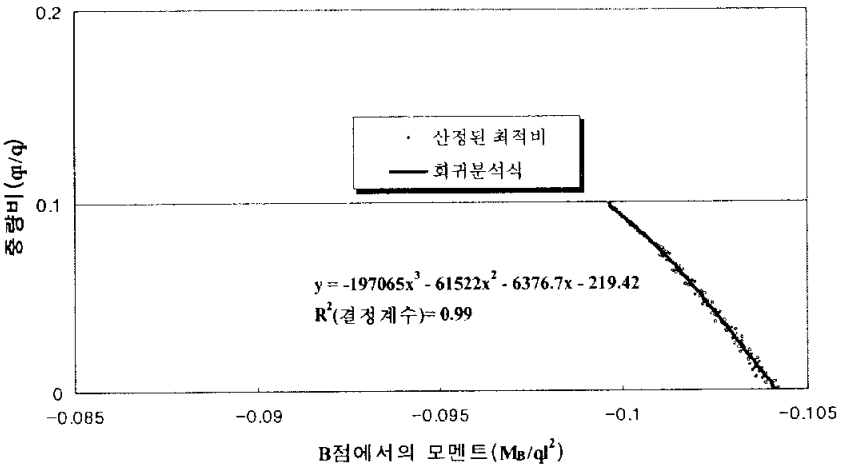


그림 6.14 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.10$)

$q_2/q = 0.12$일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = 16851\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 + 3933.1\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 + 298.88\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 7.4895 \quad (6.15)$$

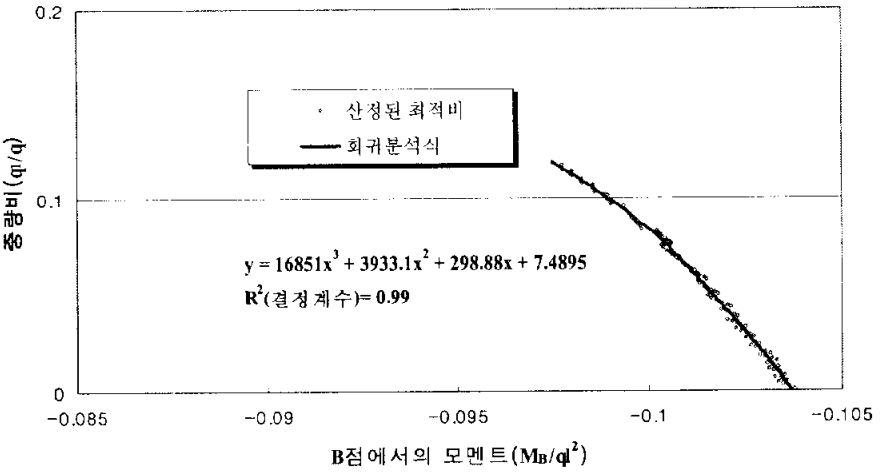


그림 6.15 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.12$)

$q_2/q = 0.14$일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = 42789\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 + 11784\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 + 1090.7\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 34.087 \quad (6.16)$$

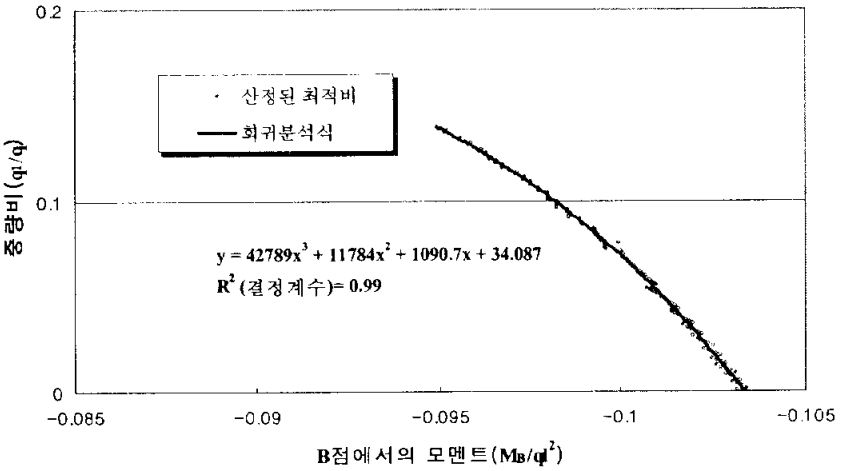


그림 6.16 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.14$)

6.1.3 설계 단면력과 최적 길이비

부록 표 B.1~표 B.8의 지점 B의 모멘트와 최적 길이비의 관계를 나타내는 결과를 이용하여 그림 6.17~그림 6.24와 같이 회귀분석을 실시한 후, 설계식을 제시하였다. 제안된 설계식의 이용은 압출 추진코와 상부구조의 탄성계수비 E_n/E가 6.8359이고, 강성비는 최소 강성비 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$ 이상의 경우로 제한된다.

$q_2/q=0.04$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right)=17.743\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)+2.422 \tag{6.17}$$

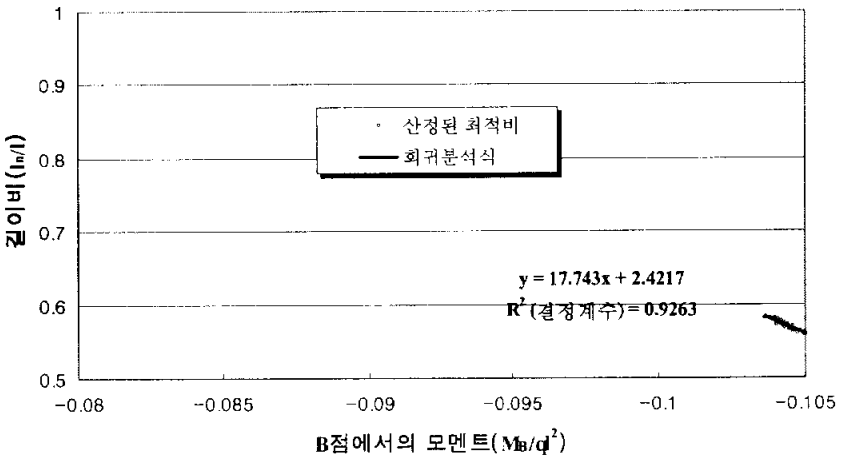


그림 6.17 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.04$)

$q_2/q = 0.06$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 19.084\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.565 \tag{6.18}$$

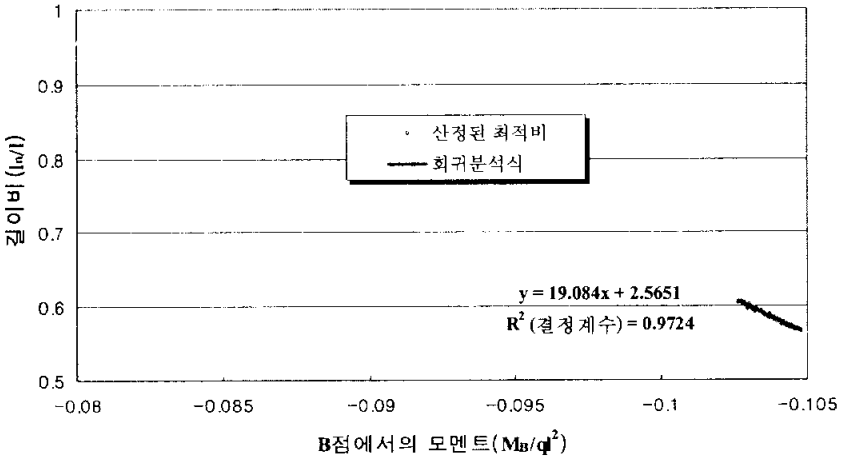


그림 6.18 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.06$)

$q_2/q = 0.07$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 19.102\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.5681 \tag{6.19}$$

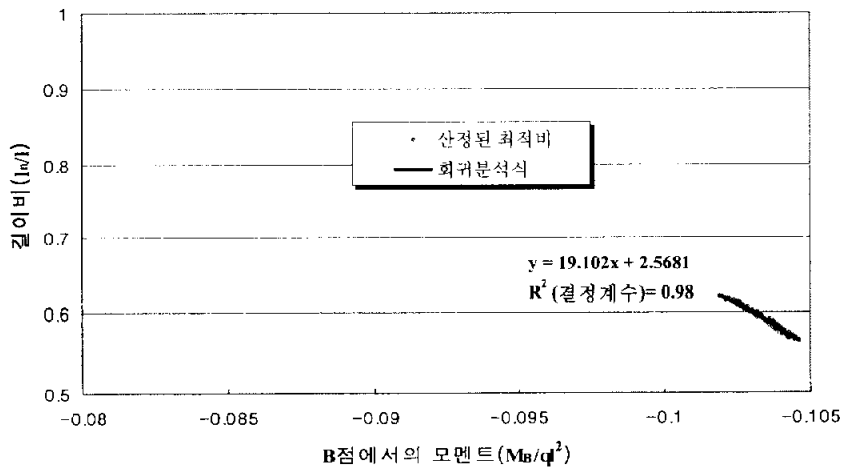


그림 6.19 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.07$)

$q_2/q = 0.08$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 18.782\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.5368 \tag{6.20}$$

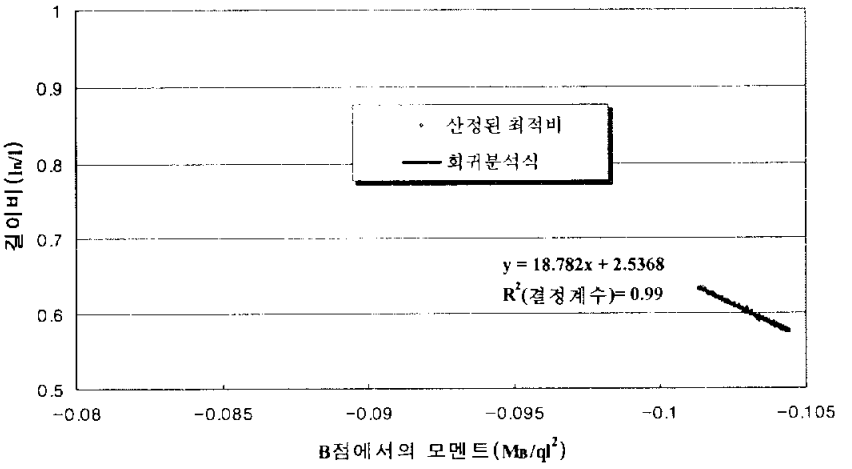


그림 6.20 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.08$)

$q_2/q = 0.09$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 18.911\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.5513 \tag{6.21}$$

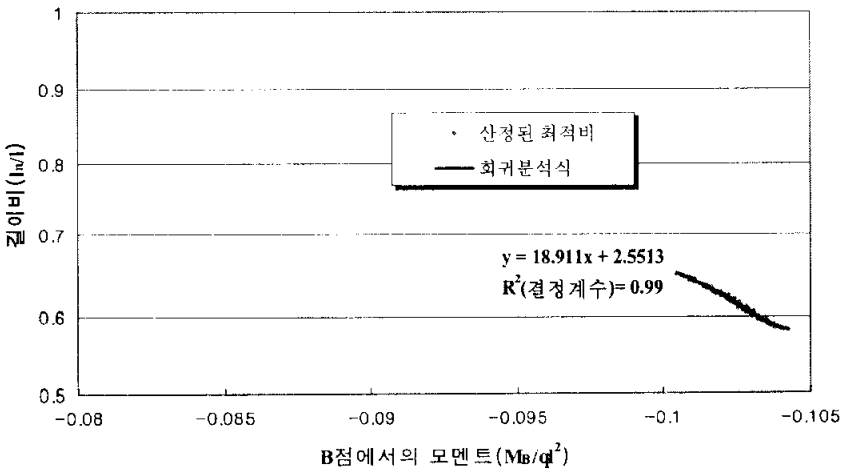


그림 6.21 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.09$)

$q_2/q = 0.10$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 18.382\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.4983 \tag{6.22}$$

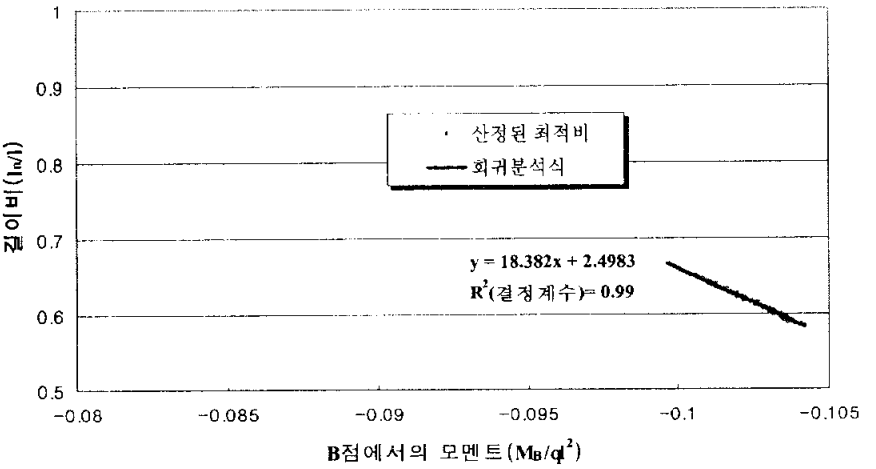


그림 6.22 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.10$)

$q_2/q = 0.12$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 18.348\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.4979 \tag{6.23}$$

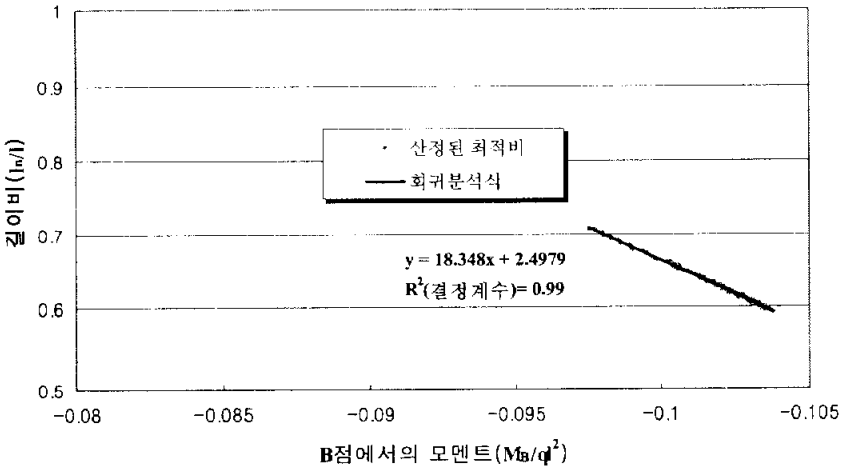


그림 6.23 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.12$)

$q_2/q = 0.14$일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 18.097\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.4757 \tag{6.24}$$

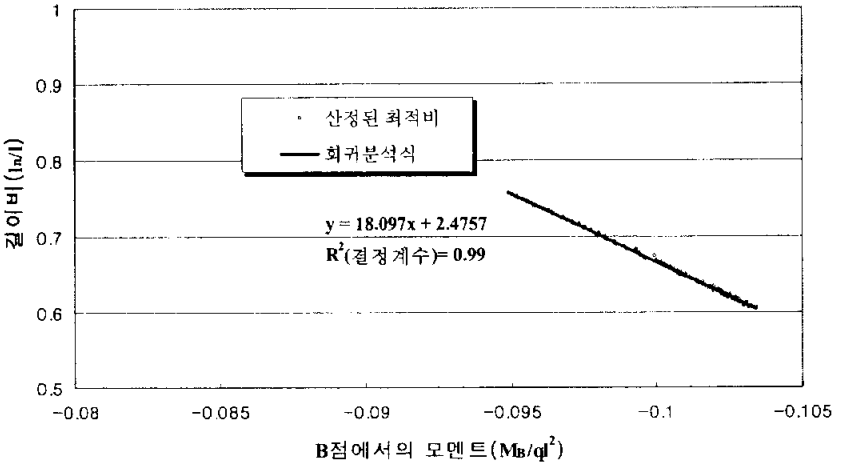


그림 6.24 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.14$)

6.2 사례교량 압출추진코의 설계현황 분석

6.2.1 사례교량

표 6.1에서 보는바와 같이, 우리나라의 고속도로 교량중에서 ILM 공법으로 건설된 9개의 교량들을 대상으로 본 연구에서 제시한 설계식을 통하여 설계의 적정성에 대하여 분석하고자 한다.

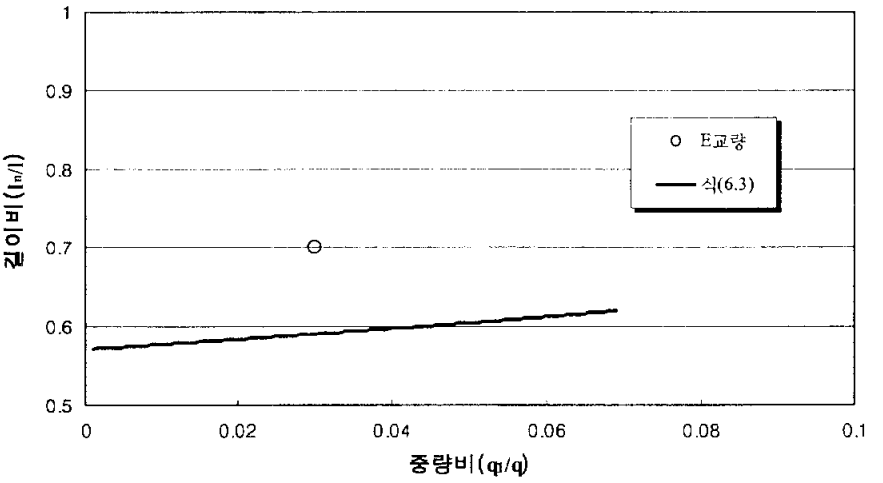
조사된 교량들의 압출 추진코의 단면 형식은 모두 I형 플레이트 거더로 제작되었고, 교량 상부구조와 압출 추진코의 탄성계수비 E_n/E은 6.8359, 지간장은 50m로 동일하였다. 그리고 압출 추진코와 교량 상부구조 연결부 집중하중 P_D는 교량 상부구조의 단면적에 따라 차이가 있었다. 즉, 표 6.1의 F, G, H, I교량과 같이 상대적으로 상부구조의 단면적이 더 큰 교량일수록 다이아플램 면적이 증가하여 집중하중 P_D가 더 크게 나타나는 것으로 조사되었다.

표 6.1 조사된 교량들의 제원(지간장=50m)

교량명	M_B/ql^2 (2단계 최대값 기준)	l_n/l	상부구조 단면적(m^2)	중량비		강성비		P_D(tonf)
				q_2/q	q_1/q	I_2/I	I_1/I	
A교량	-0.1096	0.7	7.621	0.082	0.043	0.0266	0.0040	40.615
B교량	-0.1125	0.7	7.621	0.082	0.043	0.0266	0.0040	40.615
C교량	-0.1242	0.7	7.785	0.080	0.042	0.0252	0.0038	71.625
D교량	-0.1242	0.7	7.785	0.080	0.042	0.0252	0.0038	71.625
E교량	-0.1269	0.7	8.133	0.074	0.026	0.0235	0.0025	71.625
F교량	-0.1050	0.72	8.462	0.085	0.030	0.0303	0.0017	81.608
G교량	-0.1050	0.72	8.462	0.085	0.030	0.0303	0.0017	81.608
H교량	-0.1050	0.72	8.462	0.085	0.030	0.0303	0.0017	81.608
I교량	-0.1050	0.72	8.462	0.085	0.030	0.0303	0.0017	81.608

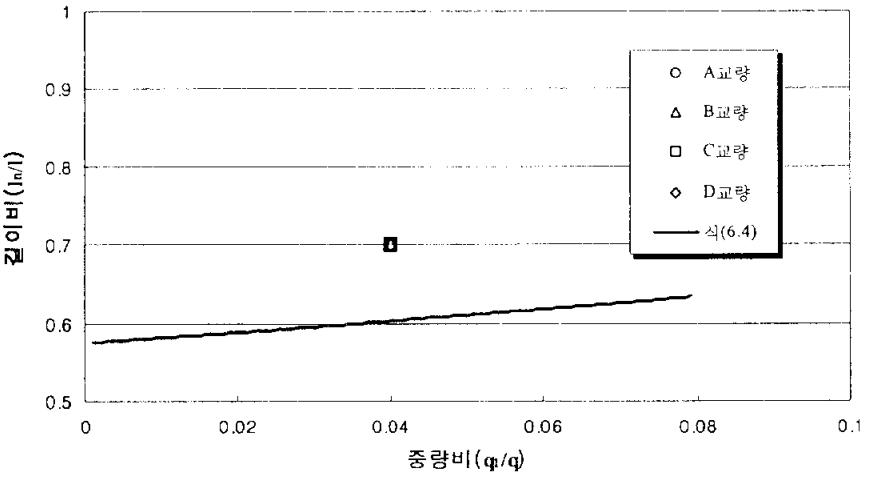
6.2.2 중량비와 길이비에 대한 검토

표 6.1에서 보는바와 같이 조사된 교량들의 q_2/q는 대략 0.07에서부터 0.09에 해당된다. 그러므로 q_2/q이 각 각 0.07, 0.08, 0.09일 경우에 대하여 q_1/q의 변화에 따른 최적 길이비를 산정할 수 있는 식 (6.3), 식 (6.4) 그리고 (6.5)과 비교하여 그림 6.25에 나타내었다.

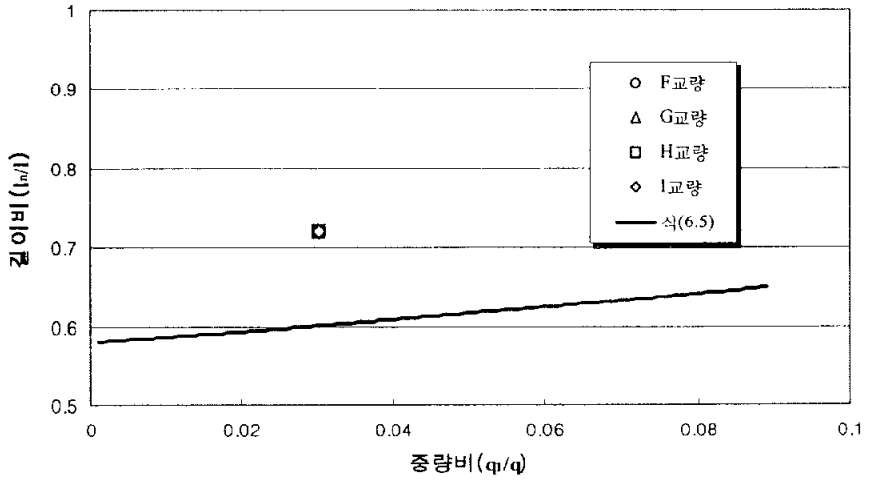


(a) $q_2/q = 0.07$**의 경우**

그림 6.25 조사교량과 설계식과의 비교(계속)



(b) $q_2/q = 0.08$**의 경우**



(c) $q_2/q = 0.09$**의 경우**

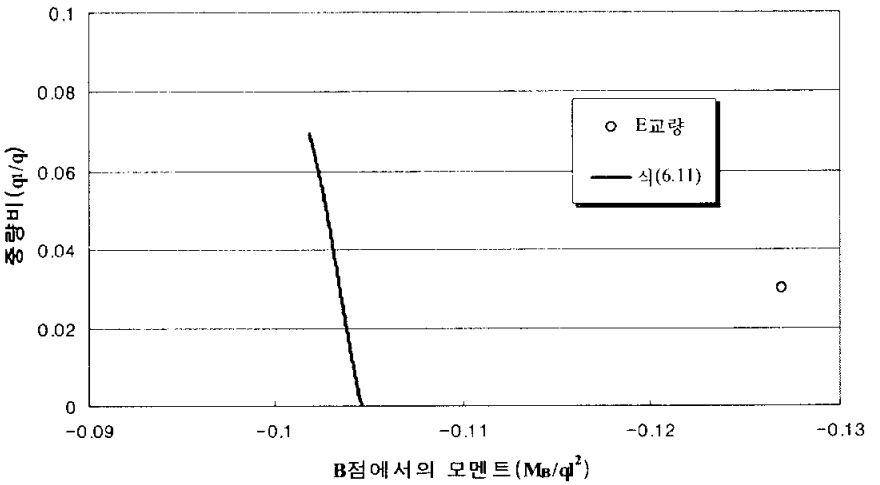
그림 6.25 조사교량과 설계식과의 비교

그림 6.25에서는 사례 교량들의 경우, 압출 추진코와 상부구조의 중량비에 비하여 비교적 긴 길이비로 설계되어 있음을 알 수 있다. 이러한 경우는 강성비의 변화에 따라 단면력의 궤적변화가 크고, 경우에 따라서는

압출 추진코가 맞은 편 교각을 통과한 후에 캔틸레버 상태보다 큰 단면력에 의해 설계력이 결정될 수 있는 것을 의미한다. 즉, 비 경제적인 설계결과를 가져올 수도 있다는 것을 의미하기도 한다. 실제로, 조사 교량들의 구조계산서에 의하면, 조사 교량들은 압출 추진코가 맞은 편 교각을 통과한 이후에 연속보 상태에서 최대 모멘트가 발생하였고, 이 결과가 설계 단면력으로 적용되었다.

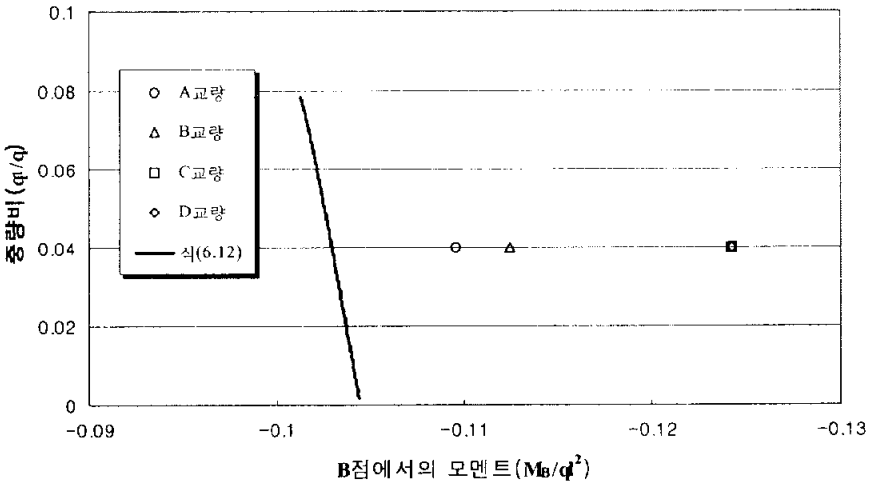
6.2.3 설계 단면력과 중량비에 대한 검토

표 6.1의 조사된 교량의 중량비와 설계단면력(M_B/ql^2) 데이타를 q_2/q가 각 각 0.07, 0.08, 0.09일 경우에 대하여 최적중량비(q_1/q)와 지점 B의 모멘트와의 관계를 나타내고 있는 식 (6.11), 식 (6.12) 그리고 식 (6.13)에 적용하여 그림 6.26에 나타내었다.

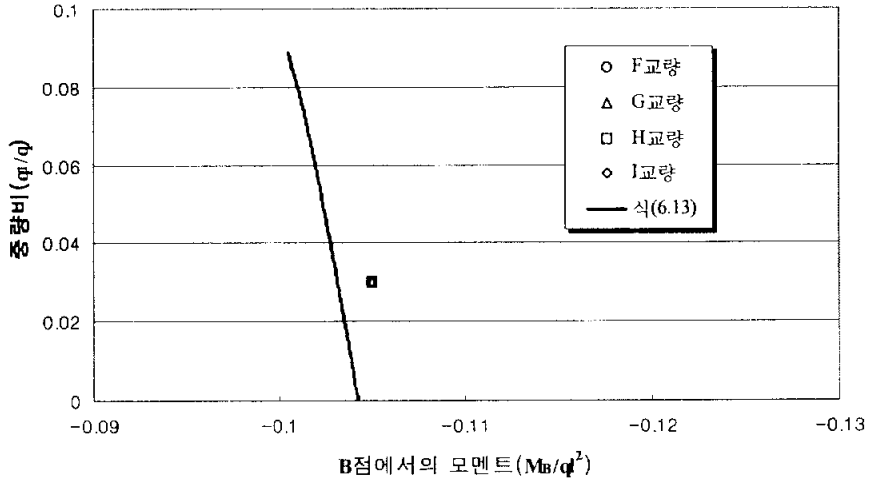


(a) $q_2/q = 0.07$**의 경우**

그림 6.26 조사교량과 설계식과의 비교(계속)



(b) $q_2/q = 0.08$**의 경우**



(c) $q_2/q = 0.09$**의 경우**

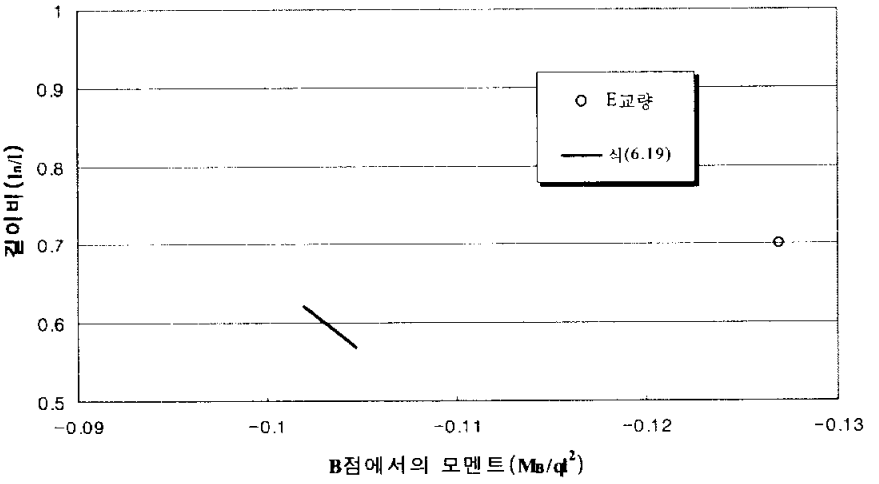
그림 6.26 조사교량과 설계식과의 비교

그림 6.26에서 보는 바와 같이 대부분의 조사된 교량의 설계결과가 본 연구에서 제안된 설계식의 결과와는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 조사된 교량의 설계단면력이 중량비에 대하여 과도하게 큰 것을 알 수

있다. 이것은 압출추진코의 길이비가 최적의 값으로 설계되지 않았기 때문에 발생한 것이다. 그림 6.25에 알 수 있었듯이 조사된 모든 교량은 중량비에 비하여 상대적으로 긴 길이비로 설계되었고, 이와같이 길이비가 큰 교량들의 경우는 4.1절에서 설명된바와 같이 2단계 압출과정에서 1단계 압출과정의 캔틸레버 모멘트보다 큰 설계 단면력으로 결정된다. 그리고, 조사된 모든 교량에서 최소 강성비 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.002$ 이하로 설계되었다. 이 영향은 강성비가 단면력 궤적에 영향을 미치는 2단계 압출 중에서 단면력이 M_B^E을 초과하게 됨으로써 나타나는 현상으로 판단된다.

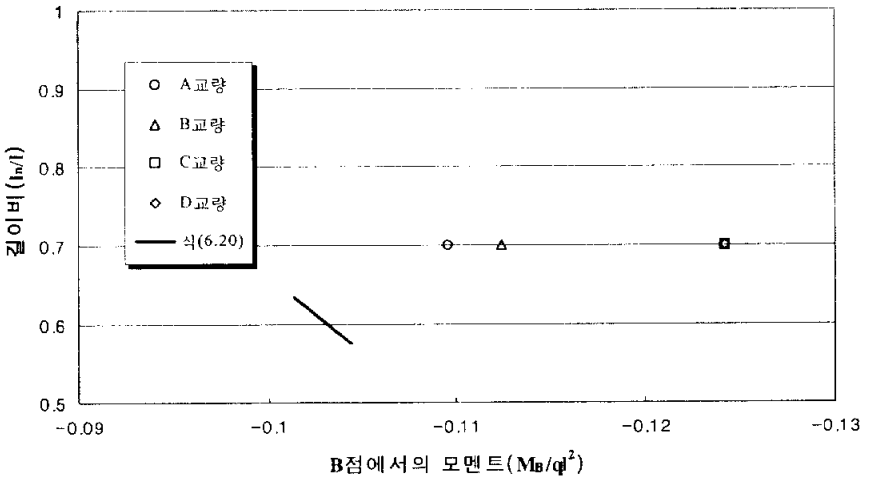
6.2.4 설계 단면력과 길이비에 대한 검토

표 6.1의 조사된 교량의 길이비와 설계단면력(M_B/ql^2) 데이타를 q_2/q가 각각 0.07, 0.08, 0.09일 경우에 대하여 최적 길이비(l_n/l)와 지점 B의 모멘트와의 관계를 나타내고 있는 식 (6.19), 식 (6.20) 그리고 식 (6.21)에 적용하여 그림 6.27에 나타내었다.

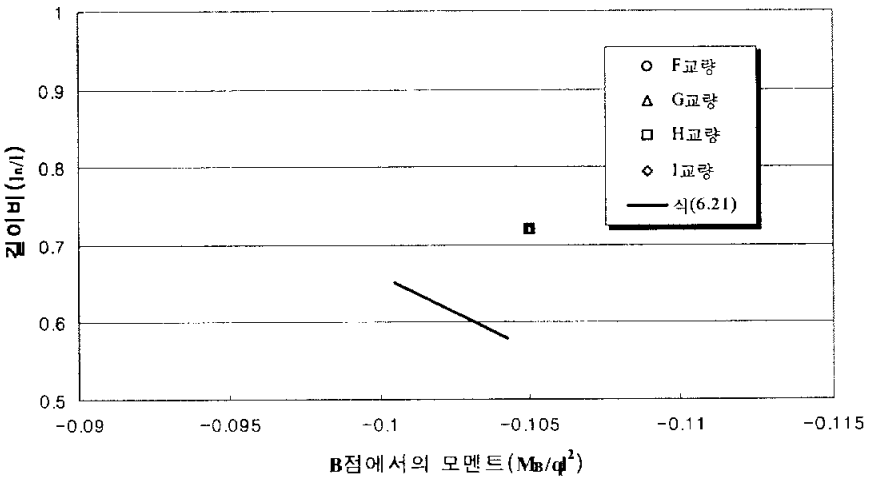


(a) $q_2/q = 0.07$**의 경우**

그림 6.27 조사교량과 설계식과의 비교(계속)



(b) $q_2/q = 0.08$**의 경우**



(c) $q_2/q = 0.09$**의 경우**

그림 6.27 조사교량과 설계식과의 비교

그림 6.27에서 대부분의 조사된 교량의 설계결과가 본 연구에서 제안된 최적 길이비 관계식과는 상당한 차이를 가지고 있음을 알 수 있다. 이것은 그림 6.26과 마찬가지로 조사된 교량의 압출추진코의 길이비가 적당하지

않은 관계로 설계단면력이 크게 발생되는 것으로 예상된다.

6.3 상호작용을 고려한 최적설계

6.3.1 단면력 궤적의 분석

조사된 교량들의 설계 결과를 보다 면밀하게 분석하기 위해 본 논문에서 유도된 해석식 (3.6)과 (3.56)을 이용하여 압출 진행에 따른 단면력 궤적을 그림 6.28~그림 6.36에 나타내었다.

그림 6.28~그림 6.36에서 굵은 실선은 표 6.1에 나타낸 해당 교량의 설계변수 l_n/l, q_2/q, q_1/q, I_2/I, I_1/I, P_D, l을 해석식 (3.6)과 식 (3.56)에 대입하여 발생되는 단면력 M_B/ql^2의 궤적을 보여주고 있다.

또한 실제 조사교량의 각 중량비와 강성비를 고정시킨 상태에서 압출 1단계 캔틸레버 모멘트와 압출 완료 후($\alpha=1$)의 모멘트 차이를 가능한 최소화 시킬 수 있는 길이비를 시행착오의 과정을 통하여 산정하였다. 그 결과, A, B교량은 0.65, C, D교량은 0.67, E교량은 0.66 그리고 F, G, H, I교량은 0.67로 산정되었으며, 이때의 단면력 궤적은 그림 6.28~6.36의 가는 실선으로 나타내었다.

2 경우 모두 다이아플램 하중이 고려되었으며, 식 (3.6)과 식 (3.56)에서 다이아플램 하중을 고려할 때 필요한 상부구조의 중량은 A, B교량의 경우 $q=19.0525 tonf/m$를 C, D교량은 $q=19.4625 tonf/m$를 E교량은 $q=20.3325 tonf/m$를 F, G, H, I교량은 $q=21.1550 tonf/m$을 대입하였다.

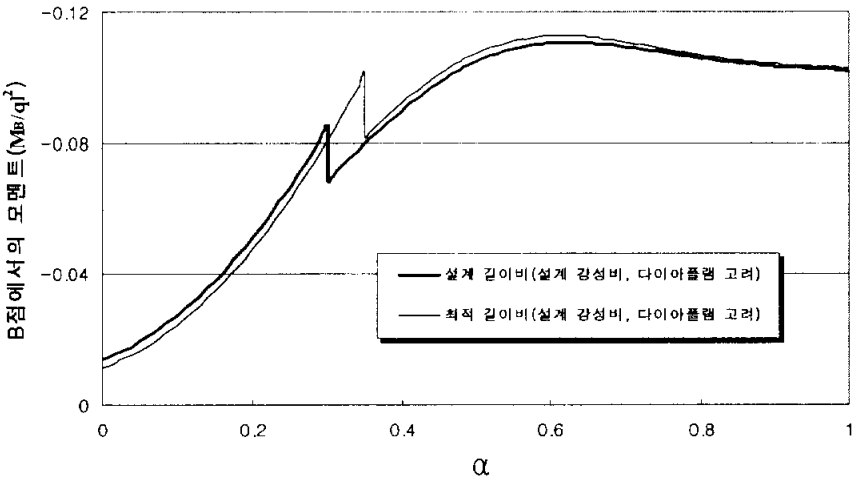


그림 6.28 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(A교량)

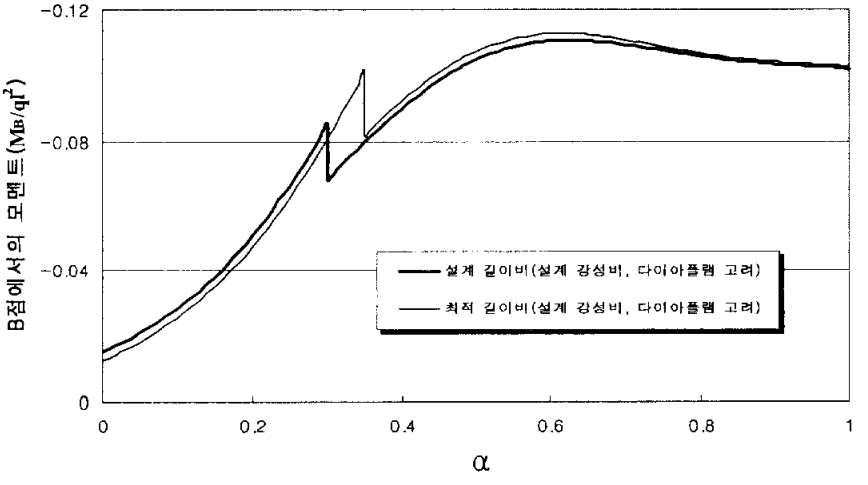


그림 6.29 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(B교량)

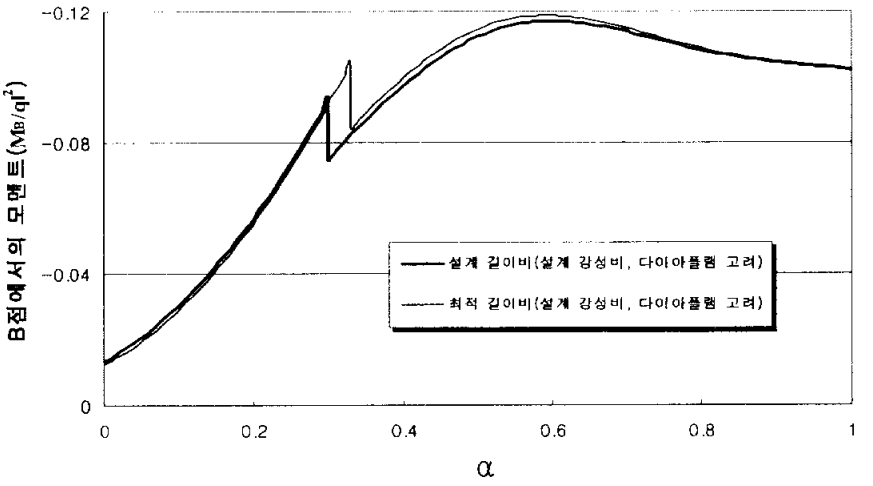


그림 6.30 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(C교량)

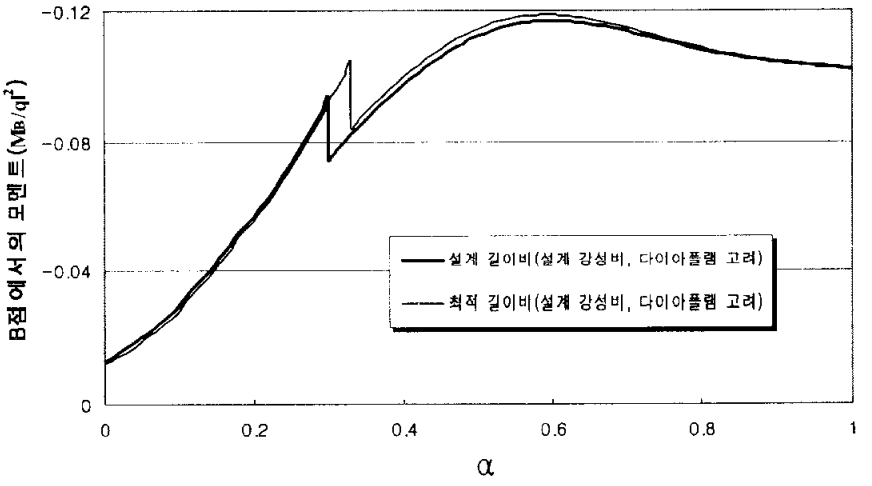


그림 6.31 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(D교량)

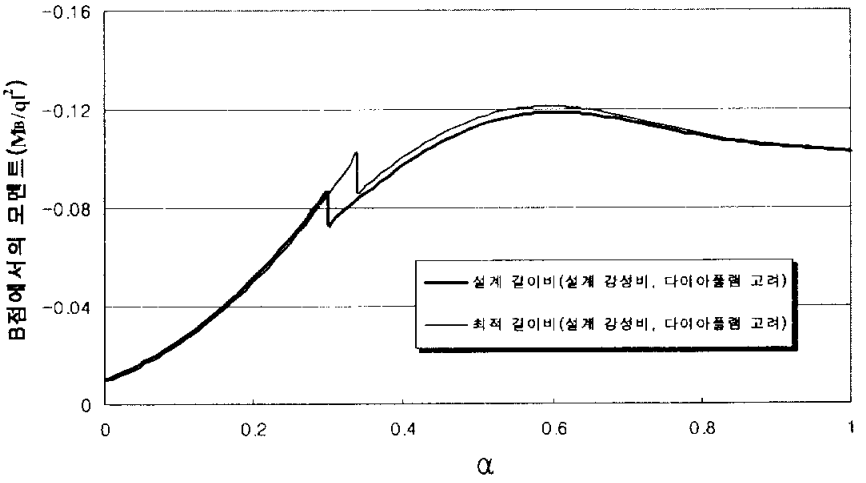


그림 6.32 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(E교량)

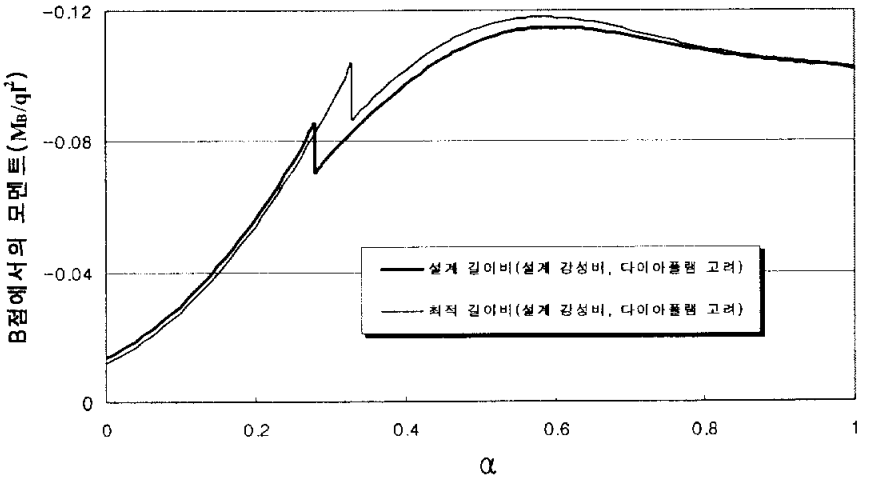


그림 6.33 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(F교량)

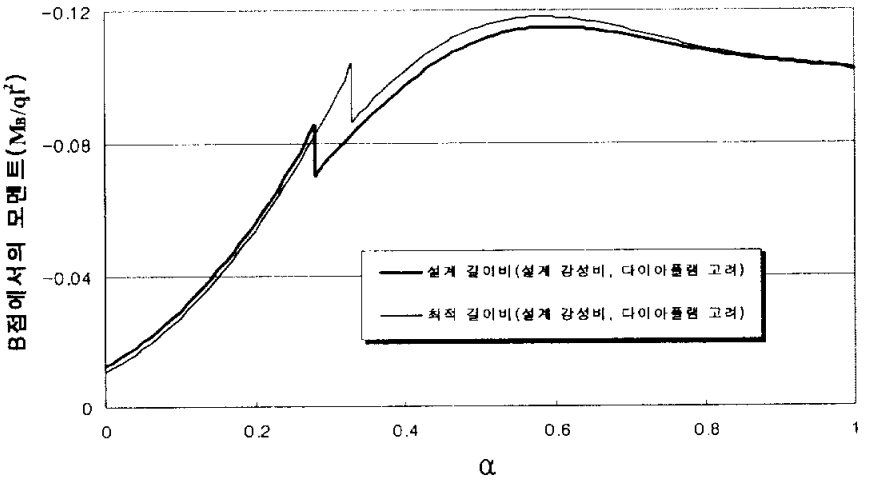


그림 6.34 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(G교량)

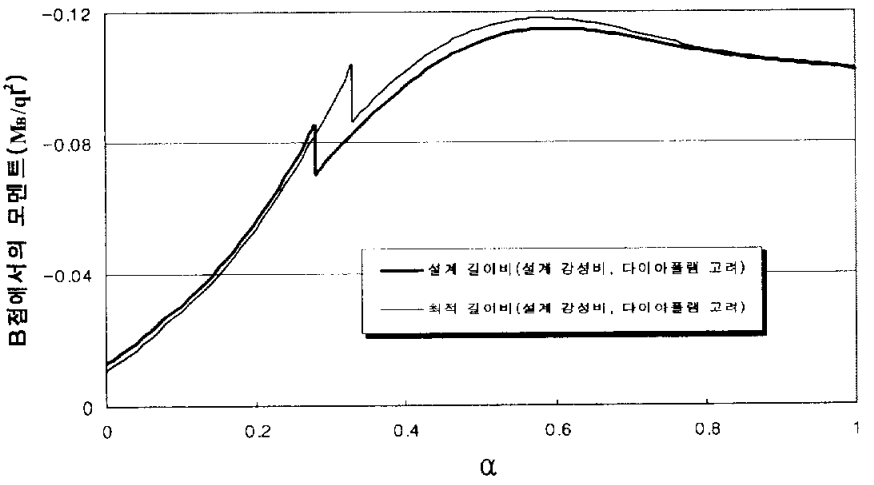


그림 6.35 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(H교량)

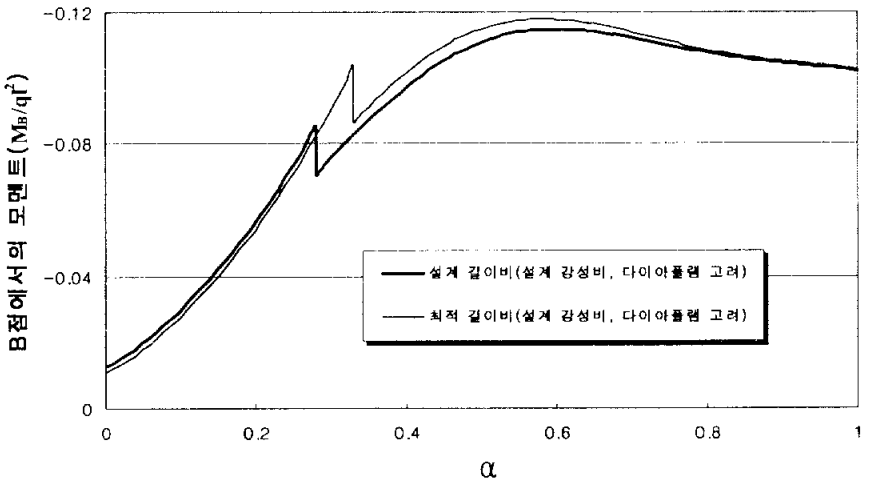


그림 6.36 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(I교량)

그림 6.28~그림 6.36에서 알 수 있는 바와같이 실제 설계자료를 그대로 적용한 굵은실선의 경우, 1단계 압출이 종료되었을 때의 단면력 보다 2단계 압출이 종료되었을 때(M_B^E)가 크다. 이것은 4.1절에서 설명하였듯이 압출추진코와 상부구조간의 길이비가 큰 경우를 의미한다.

그리고, 1단계 압출 종료때의 단면력과 2단계 압출 종료 때의 단면력이 같아지도록 시행착오의 과정을 통하여 길이비를 조정한 결과인 가는 실선의 경우에서도 굵은실선의 경우와 같이 최대 단면력이 2단계 압출과정 중간에 발생되었다. 즉, 모든 교량의 경우에서 굵은 실선의 경우 최대 단면력은 압출 완료후의 단면력(M_B^E) 보다 8%~11% 크게 나타났고, 가는 실선의 경우는 9%~13% 크게 발생하였다. 이것은 4.4절에서 설명하였듯이 조사 교량들의 강성비가 본 연구에서 제안한 최소강성비($I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.002$)보다 작기 때문으로 판단된다.

6.3.2 최적설계

상부구조에 비하여 긴 길이비를 갖는 압출추진코로 설계된 사례 교량들을 본 논문에서 제안한 해석식과 설계식을 이용하여 최적화하고자 한다.

먼저, 그림 6.28~그림 6.36에서와 같이 표 6.1에 나타낸 해당 교량의 설계변수인 l_n/l, q_2/q, q_1/q, I_2/I, I_1/I, P_D, q, l을 해석식 (3.6)과 식 (3.56)에 대입하여 발생되는 단면력 M_B/ql^2의 궤적을 그림 6.37~그림 6.45에 굵은 실선으로 나타내었다. 이때 A, B교량은 $q=19.0525tonf/m$를 C, D교량은 $q=19.4625tonf/m$를 E교량은 $q=20.3325tonf/m$를 F, G, H, I교량은 $q=21.1550tonf/m$을 대입하였다.

그리고, 표 6.1의 조사된 교량의 각 설계 중량비 q_2/q, q_1/q를 설계식 (6.3), (6.4) 그리고 (6.5)에 대입하여 산정한 최적의 l_n/l비와 본 연구에서 얻은 최소 강성비 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.002$를 식 (3.6)와 (3.56)에 대입하여 얻어진 단면력 M_B/ql^2의 최적경로를 그림 6.37~그림 6.45에 굵은 점선으로 나타내었다. 이때는 다이아플램이 고려되지 않은 상태에서 최적 길이비를 산출한 것이므로 실제로 최적의 단면력 궤적을 갖는 압출추진코로 설계한 것이라 할 수 없다.

다음으로 강성비를 본 연구에서 제안한 최소 강성비인 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.002$로 고정하고 중량비는 실제 중량비인 표 6.1의 q_2/q, q_1/q를 적용한 상태에서 해석식 (3.6)과 (3.56)을 이용하여 시행착오 과정을 통하여 최적의 길이비를 찾았다. 최적의 길이비를 찾기 위한 시행착오의 과정에서 앞선 굵은 점선의 결과가 없었다면 원칙적으로 $0<\alpha<1$의 모든 범위에서의 길이비를 검토해 보아야 할 것이다. 그러나, 본 연구에서는 굵은 점선의 결과를 이용하여 쉽게 최적 값을 찾을 수 있었다. 즉, 최적 길이비는 굵은 실선과 굵은 점선 사이의 범위에서만 찾았다. 결과적으로 최적의 단면력 궤적은 그림 6.37~6.45에 가는 점선으로 나타내었다. 이때는 다이

아플랩 하중이 고려되었다. 따라서, 가는 점선의 결과는 실제의 조건들이 고려된 최적화된 단면력 궤적을 갖는 압출추진코의 설계결과라 할 수 있다. 그러므로, 그림 6.37~그림 6.45에서 알 수 있듯이 최소 강성비를 만족하는 강성비를 갖는 상태에서 압출추진코의 길이를 줄임으로서 오히려 상부구조의 단면력을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

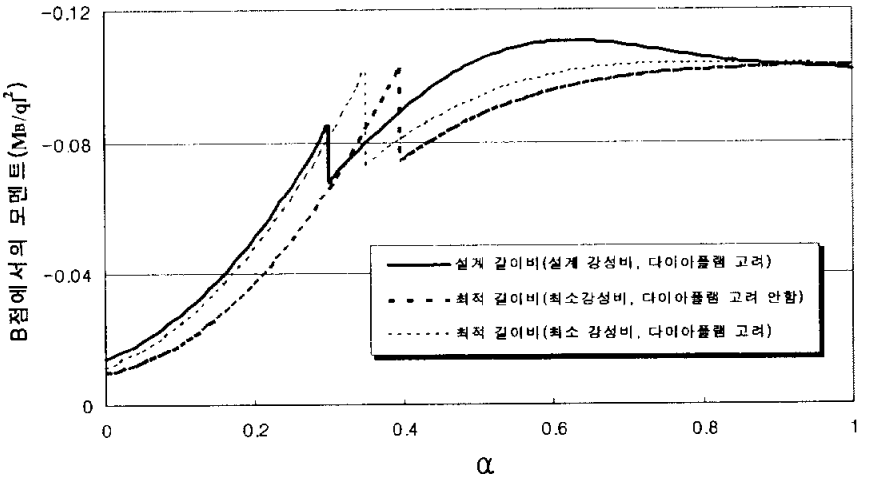


그림 6.37 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(A교량)

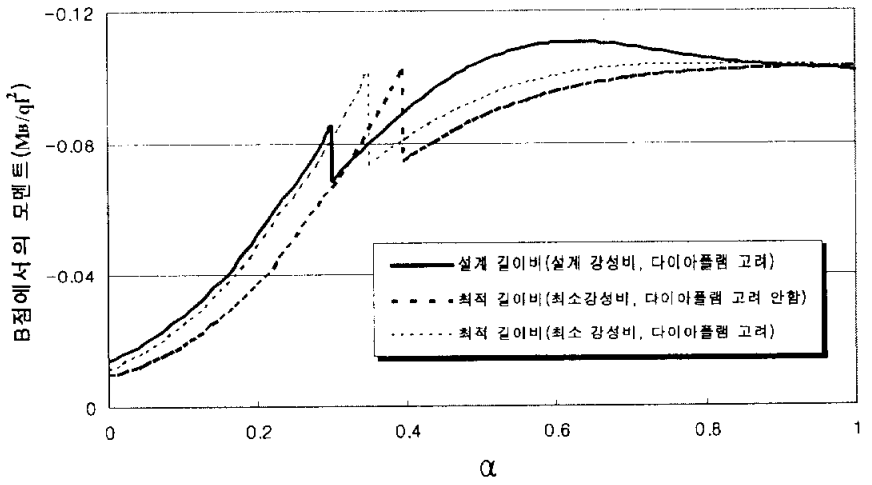


그림 6.38 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(B교량)

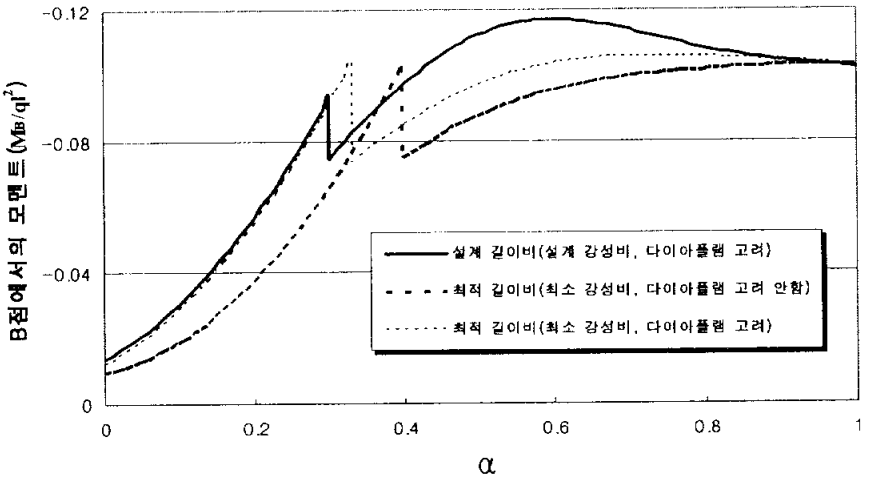


그림 6.39 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(C교량)

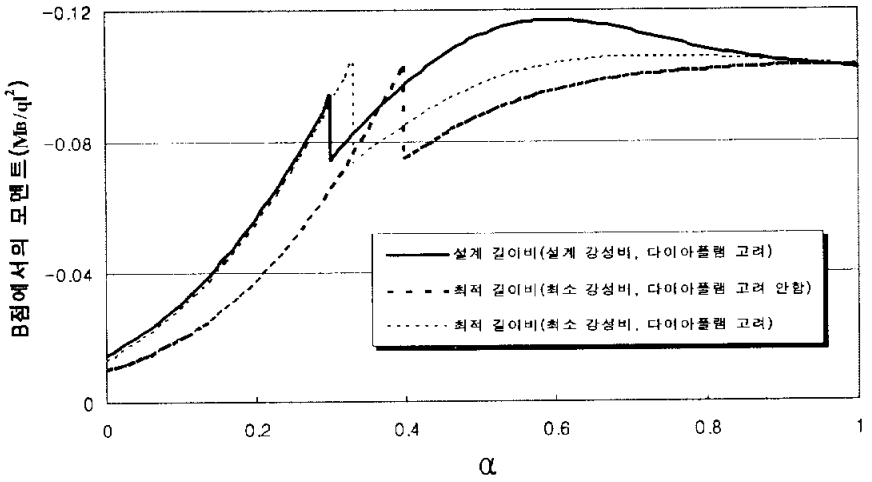


그림 6.40 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(D교량)

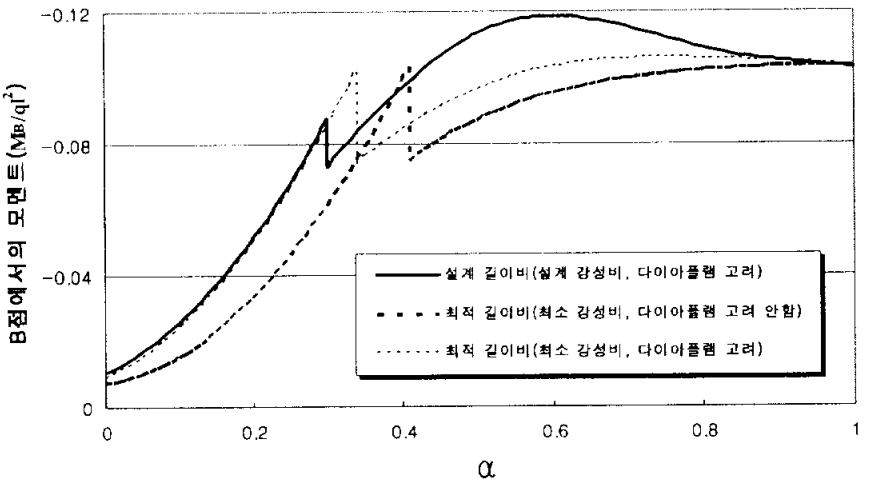


그림 6.41 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(E교량)

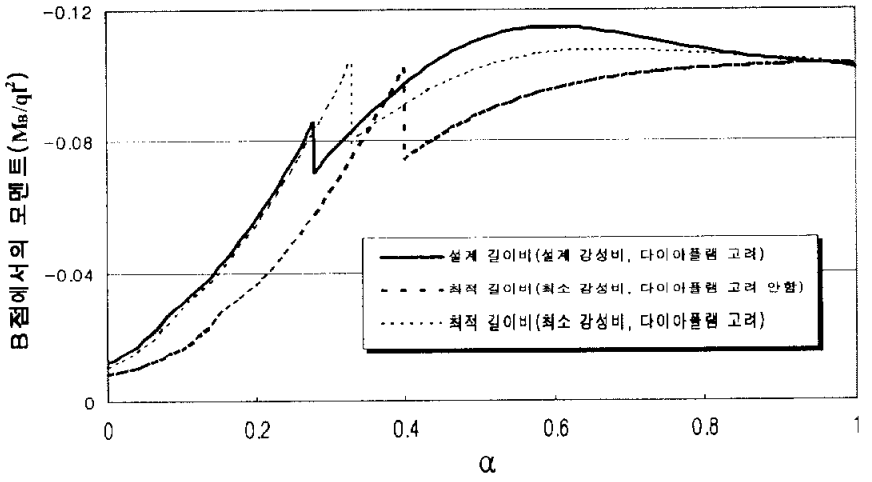


그림 6.42 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(F교량)

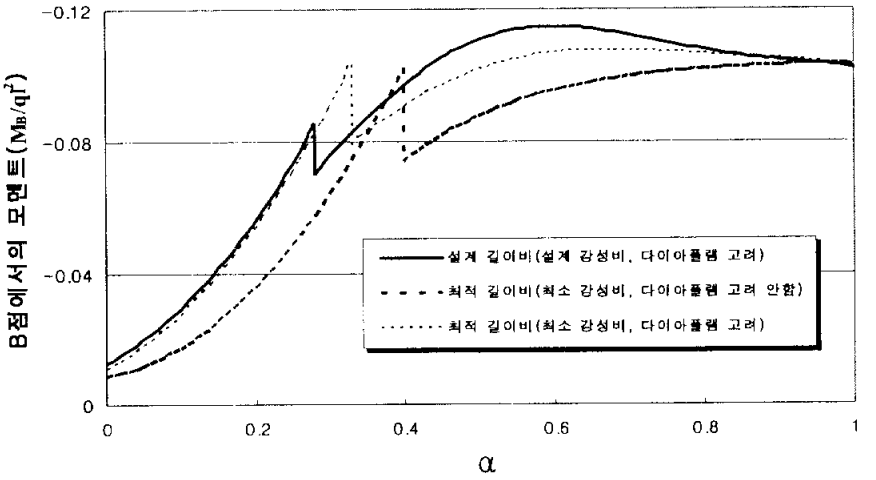


그림 6.43 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(G교량)

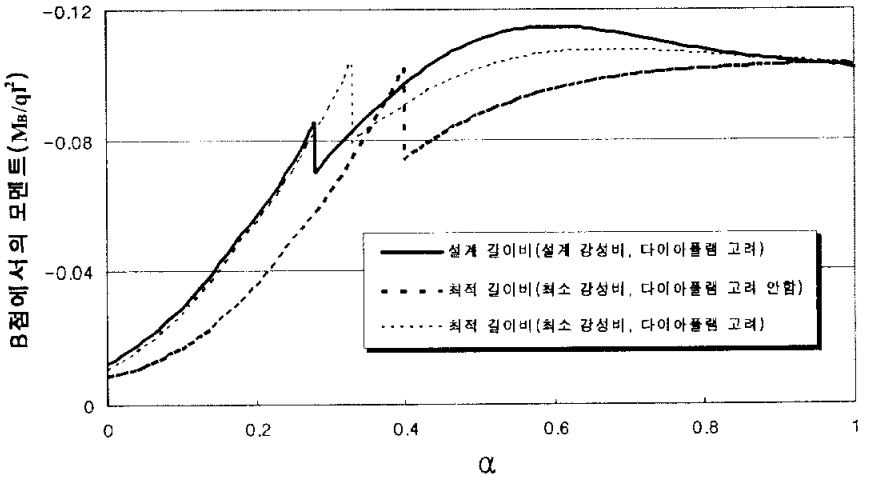


그림 6.44 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(H교량)

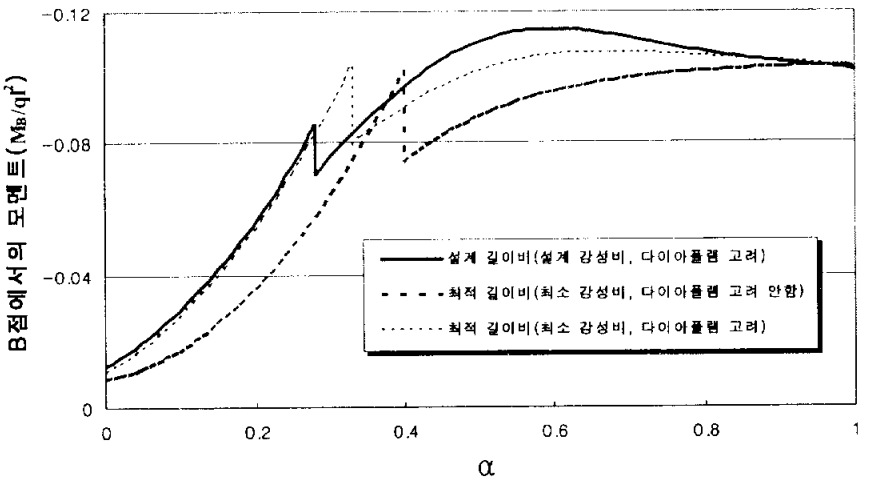


그림 6.45 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(I교량)

표 6.2 최대모멘트와 길이비

구 분	A, B교량		C, D교량		E교량		F,G,H,I교량	
	M_B/ql^2	l_n/l	M_B/ql^2	l_n/l	M_B/ql^2	l_n/l	M_B/ql^2	l_n/l
설계 강성비, 설계 길이비, 다이아플램 고려	-0.1107	0.70	-0.1170	0.70	-0.1187	0.70	-0.1149	0.70
설계 강성비, 최적 길이비, 다이아플램 고려	-0.1126	0.65	-0.1188	0.67	-0.1212	0.66	-0.1179	0.67
최소 강성비, 최적 길이비, 다이아플램 고려안함	-0.0972	0.60	-0.0096	0.60	-0.0873	0.59	-0.0958	0.60
최소 강성비, 최적 길이비, 다이아플램 고려	-0.1015	0.65	-0.1035	0.67	-0.1033	0.66	-0.1068	0.67

그림 6.28~그림 6.45의 결과에서 최대 단면력과 길이비를 정리하여 표 6.2에 나타내었다. 표 6.2에서 첫 번째 줄(설계 강성비, 설계 길이비, 다이아플램 고려)는 그림 6.28~그림 6.45의 굵은 실선에 해당되고, 두 번째 줄(설계 강성비, 최적 길이비, 다이아플램 고려)은 그림 6.28~그림 6.36의 가

는 실선에 해당된다. 표 6.2의 세 번째 줄(최소 강성비, 최적 길이비, 다이아플램 고려안함)은 그림 6.37~그림 6.45의 굵은 점선, 표 6.2의 네 번째 줄(최소 강성비, 최적 길이비, 다이아플램 고려)은 가는 점선에 해당된다.

표 6.2에서 보는 바와같이 세 번째 줄에 해당되는 그림 6.37~그림 6.45의 굵은 점선은 최적길이비를 산정하기 위하여 다이아플램의 영향을 고려하지 않고, 단순히 설계식 (6.3), (6.4), (6.5)에 조사교량의 중량비를 입력하여 얻어진 값으로 최적 길이비는 A, B, C, D교량의 경우 0.60, E교량은 0.59, F, G, H, I교량은 0.6으로 나타났다. 이 경우 실제 조사교량의 설계자료를 그대로 입력하여 얻어진 표 6.2의 첫 번째 줄 즉, 그림 6.28~6.45의 굵은실선의 최대값을 나타내는 위치에서 A, B교량의 경우 단면력이 12% 정도, C, D교량의 경우는 18%, E교량은 26%, F, G, H, I교량은 17% 정도의 단면력을 줄일 수 있는 것으로 분석되었다.

그러나 그림 6.37~그림 6.45의 굵은 점선에 해당되는 단면력 궤적은 다이아플램이 고려되지 않았으므로 실제 교량 상부구조에 발생하는 단면력을 정확히 예측한 값이 아니다. 만약 다이아플램의 영향을 고려하면 그림 3.10과 같이 1단계 압출에서 설계모멘트가 증가하게 될 것이다. 그러므로 상부단면을 최적화하기 위해서는 제안된 설계식에 의해 산정된 압출추진코 길이 이상으로 압출추진코 길이를 증가시켜야 할 것이다.

표 6.2의 네 번째 줄에 해당되는 값들은 그림 6.37~6.45의 가는 점선은 다이아플램과 본 연구의 최소 강성비가 고려된 최적 길이비에 따른 것이다. 그 결과, A, B교량은 0.65, C, D교량은 0.67, E교량은 0.66, F, G, H, I교량은 0.67로 산정되었다. 이 경우 실제 조사교량의 설계자료를 그대로 입력하여 얻어진 표 6.2의 첫 번째 줄 즉, 그림 6.28~6.45의 굵은실선의 최대값을 나타내는 위치에서 현재 설계된 실제 교량의 단면력보다 8%~12% 정도 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

결론적으로 사례 교량들의 설계자료를 검토한 결과 압출추진코 길이를

현재보다 짧게 조정하고, 압출추진코의 강성을 현재보다 크게하면 교량 상부구조에 발생하는 단면력이 효과적으로 제어되어 상부구조가 압출 중에 일정한 응력상태를 유지할 수 있게 할 수 있을 것이다. 이는 교량 상부단면의 설계 최적화를 이룰 수 있게 되는 것이다.

또한 제안된 설계식은 기술자들에게 최적화된 교량 상부단면을 설계할 수 있도록 상부구조와의 상호작용이 고려된 압출추진코의 설계변수를 제공하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

6.4 강성비와 중량비의 변화에 따른 영향

그림 6.46은 조사된 A교량의 강성비 변화에 따른 단면력 변화추이를 분석한 그림이다. 강성비의 영향을 검토하기 위하여 실제 설계자료에서 얻은 길이비 $l_n/l=0.7$와 중량비 $q_2/q=0.08$, $q_1/q=0.04$를 고정시키고 강성비를 변화시켰다. 그 결과, 현재 A교량의 휨 강성비인 $I_2/I=0.0266$, $I_1/I=0.004$를 제안된 최소강성비 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$로 조정하면 M_B를 약 6% 정도 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

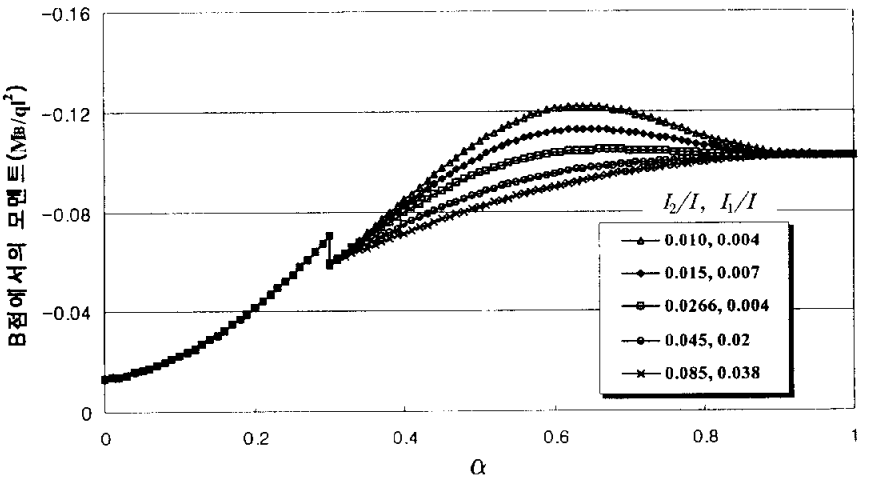


그림 6.46 조사교량의 강성비 변화에 따른 M_B 분포

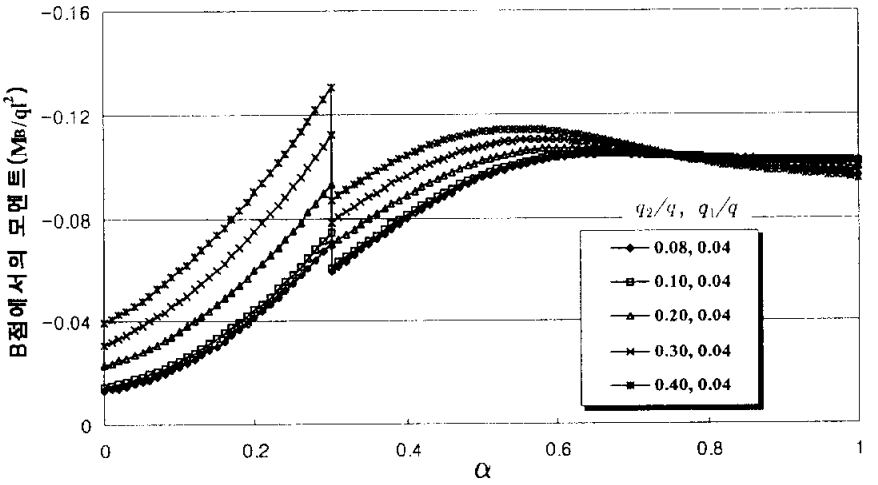


그림 6.47 조사교량의 중량비 변화에 따른 M_B 분포

또한, 중량비의 영향을 검토하기 위하여 실제 설계자료에서 얻은 길이비 $l_n/l=0.7$과 강성비 $I_2/I=0.0266$, $I_1/I=0.004$를 고정시킨 상태에서 중량비를 변화시켜 그림 6.47에 나타내었다.

그 결과 그림 6.47에서 알 수 있듯이 중량비가 어느 일정 값 이상의 경우가 되면 1단계 압출시 발생하는 단면력이 압출 완료후의 단면력(M_B^E)을 초과하게 되는 것을 알 수 있다. 그림 6.47에서와 같이 A교량의 경우는 중량비가 $q_2/q=0.20$, $q_1/q=0.04$ 보다 큰 경우에 1단계 압출 과정에서 최대 단면력이 압출 완료후의 단면력(M_B^E)을 초과하였다. 따라서, 다른 설계조건을 고정시킨 상태에서 A교량의 경우 중량비가 $q_2/q=0.20$, $q_1/q=0.04$ 이하의 범위에서 결정되어야만, 압출과정 중에 단면력이 2단계 압출 완료 후의 크기를 넘지 않을 것이다. 한편 A교량의 설계 중량비는 $q_2/q=0.08$, $q_1/q=0.04$ 이므로 중량비에 대해서는 타당한 설계가 이루어진 것으로 판단된다.

7. 결 론

ILM 교량의 경우 압출 중에 발생하는 일시적 응력을 흡수하기 위해 일반적으로 압출추진코가 이용된다. 압출 중에 발생되는 ILM 교량의 상부 단면력은 압출 추진코의 길이, 중량, 강성에 따라 크게 달라진다. 따라서, 설계와 시공시에 단면의 안전성 확보를 위해서는 상부구조와 압출추진코와의 상호작용에 따른 응력변화를 반드시 고려해야 한다.

국내에서는 ILM 교량의 설계시에 경간분할 및 지간길이 등을 전례의 설계결과에 따라 결정하는 경우가 많다. 따라서, 상부구조와 압출추진코의 단면들이 프로젝트에 따라 크게 달라지지 않는다. 그러므로 상부단면의 최적설계에 영향을 주는 압출 중 상호작용을 고려한 압출추진코의 최적설계에 관한 필요성도 크게 인식되지 못하고 있는 실정이다.

압출추진코의 단면 형상은 일반적으로 길이를 따라서 단면의 높이가 선형으로 변화한다. 그러나, 교량 상부구조와 압출추진코와의 상호작용에 관한 기존의 연구들은 압출추진코의 단면 형상을 실제와는 다른 등단면으로 가정하였다. 이 경우, 압출추진코의 단면 변화의 정도에 따라 압출 중 상부구조의 단면력 해석에 관한 정확도가 떨어질 수 있다.

본 연구에서는 ILM 공법에 의한 PS콘크리트 교량의 시공과정에 따른 구조적 거동에 관한 연구의 일환으로서 실제 압출추진코의 형상을 고려한 변단면 압출추진코와 교량 상부구조와의 상호작용에 관한 연구를 수행하였고 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 변단면 압출추진코와 교량 상부구조의 상호작용을 고려한 해석식을 개발하였다. 제안된 해석은 기존의 등단면으로 가정된 압출추진코에 대한 해석식[Rosignoli, 1998]보다 정확도가 개선되었다. 특히, 압출

추진코와 교량 상부구조 연결부 다이아플램의 영향을 고려할 수 있어 해석의 정확도가 더욱 높아졌다.

2) 범용구조해석 프로그램을 이용하여 압출 중의 상부단면력을 해석하기 위해서는 무수히 많은 경우의 해석모델링이 필요하다. 그러나, 제안된 해석식은 준비된 설계변수 값의 단순 대입으로 전체 압출과정 중의 상부단면력 변화를 간편하게 해석할 수 있다. 따라서, 대안설계시에 다양한 지간길이의 ILM 교량을 간편하게 검토할 수 있다.

3) 압출추진코와 상부구조와의 길이비, 휨 강성비, 중량비, 탄성계수비 등을 매개변수로 한 상부구조의 단면력 변화에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과, 압출추진코의 길이가 상대적으로 긴 경우는 2단계 압출(연속보 상태) 과정 중에 최대 단면력이 발생된다. 이때의 단면력의 크기는 휨 강성비에 좌우된다. 짧은 경우는 1단계 압출(캔틸레버 상태) 종료시에 최대 단면력이 발생한다. 이때의 단면력의 크기는 중량비에 좌우된다.

4) 2단계 압출과정에서의 단면력은 강성비의 영향을 받는다. 그리고, 일정 강성비(최소 강성비)보다 적은 강성비를 갖는 압출추진코를 이용할 경우에는 2단계 압출과정 중간에 2단계 압출 완료시의 단면력(M_B^E)보다 큰 크기를 갖는 단면력이 발생된다. 이렇게 되면 범용의 구조해석 프로그램을 사용하는 설계자와 시공자는 단면의 안전성을 확인하기 위하여 많은 수의 압출단계를 반드시 해석하여야 한다. 본 연구에서는 최소 강성비를 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$로 제안하였다.

5) 압출 추진코의 강성을 본 연구에서 제안한 최소 강성비보다 큰 단면이 되도록 한 상태에서 1 단계 압출 완료시와 2단계 압출 종료 후의 단면력(M_B^E) 차이를 가능한 가장 적게 하는 길이비가 되도록 압출추진코 길이를 결정하는 경우를 압출추진코가 최적으로 설계되어 졌다고 할 수 있다. 이와 같은 경우가 최대 단면력의 크기와 압출 과정에서의 단면력 변화폭을 동시에 최소로 할 수 있기 때문이다.

6) 설계실무자가 상부구조와 압출 추진코의 상호작용을 고려할 수 있는 설계식들을 제시하였다. 제안된 설계식들을 이용하여 기본 설계시에 최적화된 교량 상부단면을 신속하게 결정할 수 있을 것이다.

7) 국내의 고속도로 상에 건설된 9개의 ILM 교량을 대상으로 현재의 설계결과가 상부구조와 압출추진코와의 상호작용에 비추어 최적으로 설계되었는지 등에 대하여 분석하였다. 그 결과, 모든 사례교량들은 비교적 긴 길이비로 설계되었다. 그리고 본 연구에서 제안한 최소 강성비 보다 작은 강성비로 설계되어 2단계 압출과정 중의 최대 단면력이 설계 단면력으로 결정된 것으로 분석되었다.

8) 조사교량들을 대상으로 본 연구에서 제안한 변단면 압출추진코에 대한 해석식과 설계식을 이용하여 중량비, 길이비, 강성비의 각 매개변수를 최적화 시켜 보았다. 그 결과 교량 상부구조에 발생하는 단면력을 현재보다 8%~12% 정도 감소시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.

9) 본 연구에서 개발된 해석식과 설계식들은 ILM 교량의 상부단면의

단면력과 최적의 설계값들을 압출추진코와 상호작용을 고려하여 간편하게 결정할 수 있다. 따라서, 본 연구결과는 지간장에 관계없이 ILM 교량의 상부단면과 압출추진코를 안전성이 충분히 보장되면서 경제적인 단면으로 설계하는데 크게 기여할 것으로 본다.

10) 본 연구에서 검토된 매개변수 해석과 설계식들은 탄성계수비가 6.8359로 가정한 상태에서 수행되었다. 이것은 국내 대부분 현장에서 적용되고 있는 콘크리트의 설계강도 $f_{ck}=400kgf/cm^2$인 점을 고려하였기 때문이다. 따라서, 콘크리트 재료기술의 발달에 맞추어 다양한 탄성계수비에 따른 매개변수 해석과 설계식들의 제시가 요구된다.

부록 A. 해석식과 MIDAS 결과와의 비교

표 A.1 해석식(I형 단면)과 MIDAS 결과와의 비교

α	해석식 (t · m)	MIDAS (t · m)	α	해석식 (t · m)	MIDAS (t · m)	α	해석식 (t · m)	MIDAS (t · m)
0	-2243.79	-2243.79	0.36	-4129.85	-4149.82	0.73	-3840.90	-3851.27
0.01	-2321.72	-2321.72	0.37	-4179.11	-4201.71	0.74	-3807.54	-3816.5
0.02	-2403.40	-2403.40	0.38	-4225.20	-4250.31	0.75	-3775.55	-3783.22
0.03	-2488.83	-2488.83	0.39	-4267.98	-4295.44	0.76	-3745.05	-3751.56
0.04	-2578.01	-2578.01	0.40	-4307.29	-4336.96	0.77	-3716.13	-3721.61
0.05	-2670.94	-2670.94	0.41	-4343.00	-4374.73	0.78	-3688.87	-3693.44
0.06	-2767.62	-2767.62	0.42	-4375.01	-4408.64	0.79	-3663.32	-3667.11
0.07	-2868.06	-2868.06	0.43	-4403.22	-4438.56	0.8	-3639.50	-3642.62
0.08	-2972.24	-2972.24	0.44	-4427.54	-4464.43	0.81	-3617.40	-3619.99
0.09	-3080.17	-3080.17	0.45	-4447.93	-4486.17	0.82	-3597.02	-3599.17
0.1	-3191.85	-3191.85	0.46	-4464.34	-4503.74	0.83	-3578.28	-3580.11
0.11	-3307.28	-3307.28	0.47	-4476.77	-4517.12	0.84	-3561.14	-3562.72
0.12	-3426.46	-3426.46	0.48	-4485.21	-4526.31	0.85	-3545.49	-3546.91
0.13	-3549.39	-3549.39	0.49	-4489.71	-4531.34	0.86	-3531.21	-3532.54
0.14	-3676.07	-3676.07	0.5	-4490.32	-4532.27	0.87	-3518.17	-3519.46
0.15	-3806.51	-3806.51	0.51	-4487.11	-4529.16	0.88	-3506.20	-3507.5
0.16	-3940.69	-3940.69	0.52	-4480.19	-4522.12	0.89	-3495.12	-3496.47
0.17	-4078.62	-4078.62	0.53	-4469.69	-4511.29	0.9	-3484.73	-3486.14
0.18	-4220.30	-4220.30	0.54	-4455.76	-4496.82	0.91	-3474.80	-3476.29
0.19	-4365.73	-4365.73	0.55	-4438.55	-4478.87	0.92	-3465.10	-3466.67
0.2	-4514.91	-4514.91	0.56	-4418.28	-4457.65	0.93	-3455.35	-3456.99
0.21	-4667.84	-4667.84	0.57	-4395.13	-4433.39	0.94	-3445.28	-3446.97
0.22	-4824.52	-4824.52	0.58	-4369.34	-4406.31	0.95	-3434.58	-3436.31
0.23	-4984.96	-4984.96	0.59	-4341.14	-4376.68	0.96	-3422.94	-3424.68
0.24	-5149.14	-5149.14	0.6	-4310.79	-4344.75	0.97	-3410.03	-3411.74
0.25	-5317.07	-5317.07	0.61	-4278.55	-4310.82	0.98	-3395.48	-3397.14
0.26	-5488.75	-5488.75	0.62	-4244.68	-4275.16	0.99	-3378.93	-3380.5
0.27	-5664.18	-5664.18	0.63	-4209.45	-4238.07	1	-3359.98	-3361.45
0.28	-5843.36	-5843.36	0.64	-4173.15	-4199.86			
0.29	-6026.29	-6026.29	0.65	-4136.05	-4160.8			
0.3	-6212.97	-6212.97	0.66	-4098.41	-4121.21			
0.3	-3777.80	-3779.19	0.67	-4060.50	-4081.35			
0.31	-3842.25	-3847.06	0.68	-4022.58	-4041.51			
0.32	-3904.65	-3912.76	0.69	-3984.89	-4001.95			
0.33	-3964.80	-3976.07	0.7	-3947.67	-3962.92			
0.34	-4022.51	-4036.81	0.71	-3911.13	-3924.66			
0.35	-4077.59	-4094.79	0.72	-3875.48	-3887.38			

표 A.2 해석식(직사각형 단면)과 MIDAS 결과와의 비교

α	해석식 (t · m)	MIDAS (t · m)	α	해석식 (t · m)	MIDAS (t · m)	α	해석식 (t · m)	MIDAS (t · m)
0	-2243.79	-2243.79	0.36	-4211.31	-4214.41	0.73	-3849.31	-3853.79
0.01	-2321.72	-2321.72	0.37	-4261.73	-4265.12	0.74	-3814.23	-3818.49
0.02	-2403.40	-2403.40	0.38	-4308.77	-4312.45	0.75	-3780.72	-3784.76
0.03	-2488.84	-2488.84	0.39	-4352.26	-4356.24	0.76	-3748.89	-3752.72
0.04	-2578.02	-2578.02	0.40	-4392.05	-4396.33	0.77	-3718.83	-3722.46
0.05	-2670.95	-2670.95	0.41	-4428.01	-4432.58	0.78	-3690.60	-3694.04
0.06	-2767.63	-2767.63	0.42	-4460.01	-4464.87	0.79	-3664.25	-3667.51
0.07	-2868.06	-2868.06	0.43	-4487.96	-4493.1	0.8	-3639.77	-3642.88
0.08	-2972.24	-2972.24	0.44	-4511.77	-4517.18	0.81	-3617.18	-3620.12
0.09	-3080.17	-3080.17	0.45	-4531.38	-4537.05	0.82	-3596.41	-3599.22
0.1	-3191.85	-3191.85	0.46	-4546.76	-4552.67	0.83	-3577.42	-3580.1
0.11	-3307.29	-3307.29	0.47	-4557.89	-4564.03	0.84	-3560.11	-3562.68
0.12	-3426.47	-3426.47	0.48	-4564.79	-4571.14	0.85	-3544.38	-3546.85
0.13	-3549.40	-3549.40	0.49	-4567.49	-4574.03	0.86	-3530.09	-3532.47
0.14	-3676.08	-3676.08	0.5	-4566.05	-4572.77	0.87	-3517.09	-3519.39
0.15	-3806.51	-3806.51	0.51	-4560.58	-4567.44	0.88	-3505.21	-3507.44
0.16	-3940.69	-3940.69	0.52	-4551.18	-4558.17	0.89	-3494.24	-3496.42
0.17	-4078.62	-4078.62	0.53	-4537.99	-4545.08	0.9	-3483.98	-3486.1
0.18	-4220.30	-4220.30	0.54	-4521.19	-4528.35	0.91	-3474.19	-3476.26
0.19	-4365.74	-4365.74	0.55	-4500.97	-4508.17	0.92	-3464.62	-3466.64
0.2	-4514.92	-4514.92	0.56	-4477.53	-4484.75	0.93	-3455.00	-3456.97
0.21	-4667.85	-4667.85	0.57	-4451.11	-4458.32	0.94	-3445.04	-3446.96
0.22	-4824.53	-4824.53	0.58	-4421.95	-4429.13	0.95	-3434.43	-3436.31
0.23	-4984.96	-4984.96	0.59	-4390.33	-4397.45	0.96	-3422.87	-3424.68
0.24	-5149.14	-5149.14	0.6	-4356.52	-4363.56	0.97	-3410.00	-3411.74
0.25	-5317.07	-5317.07	0.61	-4320.81	-4327.74	0.98	-3395.48	-3394.14
0.26	-5488.75	-5488.75	0.62	-4283.50	-4290.29	0.99	-3378.94	-3380.5
0.27	-5664.19	-5664.19	0.63	-4244.87	-4251.51	1	-3359.99	-3361.45
0.28	-5843.37	-5843.37	0.64	-4205.24	-4211.71			
0.29	-6026.30	-6026.30	0.65	-4164.90	-4171.18			
0.3	-6212.98	-6212.98	0.66	-4124.14	-4130.22			
0.3	-3848.23	-3849.7	0.67	-4083.24	-4089.11			
0.31	-3914.97	-3916.69	0.68	-4042.48	-4048.13			
0.32	-3979.49	-3981.47	0.69	-4002.13	-4007.54			
0.33	-4041.58	-4043.83	0.7	-3962.41	-3967.6			
0.34	-4101.05	-4103.58	0.71	-3923.57	-3928.52			
0.35	-4157.69	-4160.5	0.72	-3885.81	-3890.53			

부록 B. 중량비와 최적길이비

표 B.1 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.14$) (계속)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.14	0.139	0.758	-0.09490	0.14	0.099	0.698	-0.09824
0.14	0.138	0.756	-0.09503	0.14	0.098	0.697	-0.09824
0.14	0.137	0.754	-0.09518	0.14	0.097	0.696	-0.09825
0.14	0.136	0.753	-0.09511	0.14	0.096	0.694	-0.09853
0.14	0.135	0.751	-0.09525	0.14	0.095	0.693	-0.09854
0.14	0.134	0.749	-0.0954	0.14	0.094	0.692	-0.09855
0.14	0.133	0.747	-0.09556	0.14	0.093	0.691	-0.09856
0.14	0.132	0.746	-0.0955	0.14	0.092	0.69	-0.09857
0.14	0.131	0.744	-0.09566	0.14	0.091	0.688	-0.09887
0.14	0.13	0.742	-0.09583	0.14	0.09	0.687	-0.09888
0.14	0.129	0.741	-0.09578	0.14	0.089	0.686	-0.0989
0.14	0.128	0.739	-0.09595	0.14	0.088	0.685	-0.09892
0.14	0.127	0.737	-0.09613	0.14	0.087	0.684	-0.09894
0.14	0.126	0.736	-0.09608	0.14	0.086	0.682	-0.099269
0.14	0.125	0.734	-0.09627	0.14	0.085	0.681	-0.09928
0.14	0.124	0.733	-0.09622	0.14	0.084	0.68	-0.09931
0.14	0.123	0.731	-0.09642	0.14	0.083	0.679	-0.09934
0.14	0.122	0.73	-0.09638	0.14	0.082	0.678	-0.09937
0.14	0.121	0.728	-0.09658	0.14	0.081	0.677	-0.0994
0.14	0.12	0.727	-0.09654	0.14	0.08	0.676	-0.09943
0.14	0.119	0.725	-0.09675	0.14	0.079	0.675	-0.09946
0.14	0.118	0.724	-0.09671	0.14	0.078	0.674	-0.09995
0.14	0.117	0.722	-0.09693	0.14	0.077	0.673	-0.09954
0.14	0.116	0.721	-0.0969	0.14	0.076	0.672	-0.09954
0.14	0.115	0.719	-0.09712	0.14	0.075	0.671	-0.09961
0.14	0.114	0.718	-0.0971	0.14	0.074	0.669	-0.09996
0.14	0.113	0.716	-0.09732	0.14	0.073	0.668	-0.1
0.14	0.112	0.715	-0.0973	0.14	0.072	0.667	-0.10005
0.14	0.111	0.714	-0.09728	0.14	0.071	0.666	-0.10009
0.14	0.110	0.712	-0.09752	0.14	0.07	0.665	-0.10014
0.14	0.109	0.711	-0.09751	0.14	0.069	0.664	-0.10019
0.14	0.108	0.71	-0.09749	0.14	0.068	0.663	-0.10024
0.14	0.107	0.708	-0.09774	0.14	0.067	0.662	-0.10029
0.14	0.106	0.707	-0.09773	0.14	0.066	0.661	-0.10035
0.14	0.105	0.706	-0.09772	0.14	0.065	0.66	-0.1004
0.14	0.104	0.704	-0.09798	0.14	0.064	0.659	-0.10046
0.14	0.103	0.703	-0.09797	0.14	0.063	0.658	-0.10052
0.14	0.102	0.702	-0.09797	0.14	0.062	0.657	-0.10058
0.14	0.101	0.701	-0.09797	0.14	0.061	0.656	-0.10064
0.14	0.1	0.699	-0.09824	0.14	0.06	0.655	-0.1007

표 B.1 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.14$)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.14	0.059	0.654	-0.10077	0.14	0.029	0.628	-0.10195
0.14	0.058	0.653	-0.10083	0.14	0.028	0.627	-0.10205
0.14	0.057	0.652	-0.1009	0.14	0.027	0.626	-0.10216
0.14	0.056	0.651	-0.10097	0.14	0.026	0.625	-0.10227
0.14	0.055	0.651	-0.10071	0.14	0.025	0.624	-0.10237
0.14	0.054	0.65	-0.10078	0.14	0.024	0.623	-0.10249
0.14	0.053	0.649	-0.10085	0.14	0.023	0.623	-0.10224
0.14	0.052	0.648	-0.10093	0.14	0.022	0.622	-0.10235
0.14	0.051	0.647	-0.101	0.14	0.021	0.621	-0.10246
0.14	0.05	0.646	-0.10108	0.14	0.02	0.62	-0.10258
0.14	0.049	0.645	-0.10115	0.14	0.019	0.619	-0.1027
0.14	0.048	0.644	-0.10123	0.14	0.018	0.619	-0.10245
0.14	0.047	0.643	-0.10131	0.14	0.017	0.618	-0.10257
0.14	0.046	0.642	-0.10139	0.14	0.016	0.617	-0.10269
0.14	0.045	0.641	-0.10148	0.14	0.015	0.616	-0.10281
0.14	0.044	0.64	-0.10156	0.14	0.014	0.616	-0.10257
0.14	0.043	0.64	-0.10138	0.14	0.013	0.615	-0.10269
0.14	0.042	0.639	-0.1014	0.14	0.012	0.614	-0.10281
0.14	0.041	0.638	-0.10148	0.14	0.011	0.613	-0.10294
0.14	0.04	0.637	-0.10157	0.14	0.01	0.612	-0.10307
0.14	0.039	0.636	-0.10166	0.14	0.009	0.612	-0.10283
0.14	0.038	0.635	-0.10176	0.14	0.008	0.611	-0.10296
0.14	0.037	0.634	-0.10185	0.14	0.007	0.61	-0.10309
0.14	0.036	0.633	-0.10195	0.14	0.006	0.609	-0.10322
0.14	0.035	0.633	-0.1017	0.14	0.005	0.609	-0.10298
0.14	0.034	0.632	-0.10179	0.14	0.004	0.608	-0.10311
0.14	0.033	0.631	-0.10189	0.14	0.003	0.607	-0.10325
0.14	0.032	0.63	-0.10199	0.14	0.002	0.606	-0.10338
0.14	0.031	0.629	-0.10209	0.14	0.001	0.606	-0.10314
0.14	0.03	0.628	-0.1022				

표 B.2 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.12$) (계속)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.12	0.119	0.707	-0.0975	0.12	0.079	0.66	-0.10031
0.12	0.118	0.705	-0.09775	0.12	0.078	0.659	-0.10036
0.12	0.117	0.704	-0.09774	0.12	0.077	0.658	-0.10042
0.12	0.116	0.703	-0.09774	0.12	0.076	0.657	-0.10048
0.12	0.115	0.701	-0.09799	0.12	0.075	0.656	-0.10054
0.12	0.114	0.7	-0.09799	0.12	0.074	0.655	-0.1006
0.12	0.113	0.699	-0.09799	0.12	0.073	0.655	-0.10034
0.12	0.112	0.698	-0.09799	0.12	0.072	0.654	-0.1004
0.12	0.111	0.696	-0.09826	0.12	0.071	0.653	-0.10046
0.12	0.11	0.695	-0.09826	0.12	0.07	0.652	-0.10053
0.12	0.109	0.694	-0.09827	0.12	0.069	0.651	-0.10059
0.12	0.108	0.693	-0.09827	0.12	0.068	0.65	-0.10066
0.12	0.107	0.691	-0.09855	0.12	0.067	0.649	-0.10073
0.12	0.106	0.69	-0.09856	0.12	0.066	0.648	-0.1008
0.12	0.105	0.689	-0.09858	0.12	0.065	0.647	-0.10087
0.12	0.104	0.688	-0.09859	0.12	0.064	0.646	-0.10095
0.12	0.103	0.687	-0.0986	0.12	0.063	0.645	-0.10102
0.12	0.102	0.685	-0.0989	0.12	0.062	0.644	-0.1011
0.12	0.101	0.684	-0.09892	0.12	0.061	0.643	-0.10117
0.12	0.1	0.683	-0.09894	0.12	0.06	0.642	-0.10125
0.12	0.099	0.682	-0.09896	0.12	0.059	0.641	-0.10133
0.12	0.098	0.681	-0.09898	0.12	0.058	0.64	-0.10142
0.12	0.097	0.68	-0.09901	0.12	0.057	0.639	-0.1015
0.12	0.096	0.679	-0.09903	0.12	0.056	0.639	-0.10125
0.12	0.095	0.677	-0.09935	0.12	0.055	0.638	-0.10133
0.12	0.094	0.676	-0.09938	0.12	0.054	0.637	-0.10142
0.12	0.093	0.675	-0.09941	0.12	0.053	0.636	-0.10151
0.12	0.092	0.674	-0.09945	0.12	0.052	0.635	-0.1016
0.12	0.091	0.673	-0.09948	0.12	0.051	0.634	-0.10169
0.12	0.09	0.672	-0.09951	0.12	0.05	0.633	-0.10178
0.12	0.089	0.671	-0.09955	0.12	0.049	0.633	-0.10153
0.12	0.088	0.67	-0.09959	0.12	0.048	0.632	-0.10163
0.12	0.087	0.669	-0.09963	0.12	0.047	0.631	-0.10172
0.12	0.086	0.668	-0.09967	0.12	0.046	0.63	-0.10182
0.12	0.085	0.667	-0.09971	0.12	0.045	0.629	-0.10192
0.12	0.084	0.666	-0.09976	0.12	0.044	0.628	-0.10202
0.12	0.083	0.665	-0.0998	0.12	0.043	0.627	-0.10212
0.12	0.082	0.664	-0.09985	0.12	0.042	0.627	-0.10187
0.12	0.081	0.662	-0.10021	0.12	0.041	0.626	-0.10198
0.12	0.08	0.661	-0.10026	0.12	0.04	0.625	-0.10208

표 B.2 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.12$)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.12	0.039	0.624	-0.10219	0.12	0.019	0.608	-0.10313
0.12	0.038	0.623	-0.1023	0.12	0.018	0.608	-0.10289
0.12	0.037	0.623	-0.10205	0.12	0.017	0.607	-0.10302
0.12	0.036	0.622	-0.10216	0.12	0.016	0.606	-0.10316
0.12	0.035	0.621	-0.10227	0.12	0.015	0.605	-0.10329
0.12	0.034	0.62	-0.10239	0.12	0.014	0.605	-0.10305
0.12	0.033	0.619	-0.1025	0.12	0.013	0.604	-0.10319
0.12	0.032	0.619	-0.10225	0.12	0.012	0.603	-0.10333
0.12	0.031	0.618	-0.10237	0.12	0.011	0.603	-0.10309
0.12	0.03	0.617	-0.10249	0.12	0.01	0.602	-0.10323
0.12	0.029	0.616	-0.10261	0.12	0.009	0.601	-0.10338
0.12	0.028	0.615	-0.10273	0.12	0.008	0.6	-0.10352
0.12	0.027	0.6158	-0.10248	0.12	0.007	0.6	-0.10328
0.12	0.026	0.614	-0.10261	0.12	0.006	0.599	-0.10343
0.12	0.025	0.613	-0.10273	0.12	0.005	0.598	-0.10357
0.12	0.024	0.612	-0.10286	0.12	0.004	0.598	-0.10334
0.12	0.023	0.612	-0.10261	0.12	0.003	0.597	-0.10349
0.12	0.022	0.611	-0.10274	0.12	0.002	0.596	-0.10364
0.12	0.021	0.61	-0.10287	0.12	0.001	0.595	-0.10379
0.12	0.02	0.609	-0.103				

표 B.3 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.10$) (계속)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.1	0.099	0.667	-0.09964	0.1	0.059	0.629	-0.10175
0.1	0.098	0.666	-0.09968	0.1	0.058	0.628	-0.10185
0.1	0.097	0.665	-0.09972	0.1	0.057	0.627	-0.10194
0.1	0.096	0.664	-0.09977	0.1	0.056	0.627	-0.1017
0.1	0.095	0.663	-0.09981	0.1	0.055	0.626	-0.1018
0.1	0.094	0.662	-0.09986	0.1	0.054	0.625	-0.1019
0.1	0.093	0.661	-0.09991	0.1	0.053	0.624	-0.10201
0.1	0.092	0.66	-0.09996	0.1	0.052	0.623	-0.10211
0.1	0.091	0.659	-0.10001	0.1	0.051	0.622	-0.10222
0.1	0.09	0.658	-0.10007	0.1	0.05	0.622	-0.10197
0.1	0.089	0.657	-0.10012	0.1	0.049	0.621	-0.10208
0.1	0.088	0.656	-0.10018	0.1	0.048	0.62	-0.10219
0.1	0.087	0.655	-0.10023	0.1	0.047	0.619	-0.1023
0.1	0.086	0.654	-0.10029	0.1	0.046	0.618	-0.10242
0.1	0.085	0.653	-0.10035	0.1	0.045	0.618	-0.10217
0.1	0.084	0.652	-0.10041	0.1	0.044	0.617	-0.10229
0.1	0.083	0.651	-0.10048	0.1	0.043	0.616	-0.1024
0.1	0.082	0.65	-0.10054	0.1	0.042	0.615	-0.10252
0.1	0.081	0.649	-0.10061	0.1	0.041	0.614	-0.10264
0.1	0.08	0.648	-0.10068	0.1	0.04	0.614	-0.1024
0.1	0.079	0.647	-0.10075	0.1	0.039	0.613	-0.10252
0.1	0.078	0.646	-0.10082	0.1	0.038	0.612	-0.10264
0.1	0.077	0.645	-0.10089	0.1	0.037	0.611	-0.10277
0.1	0.076	0.644	-0.10096	0.1	0.036	0.611	-0.10252
0.1	0.075	0.643	-0.10104	0.1	0.035	0.61	-0.10265
0.1	0.074	0.642	-0.10111	0.1	0.034	0.609	-0.10278
0.1	0.073	0.641	-0.10119	0.1	0.033	0.608	-0.10291
0.1	0.072	0.64	-0.10127	0.1	0.032	0.607	-0.10304
0.1	0.071	0.64	-0.10102	0.1	0.031	0.607	-0.1028
0.1	0.07	0.639	-0.1011	0.1	0.03	0.606	-0.10293
0.1	0.069	0.638	-0.10118	0.1	0.029	0.605	-0.10307
0.1	0.068	0.637	-0.10127	0.1	0.028	0.604	-0.1032
0.1	0.067	0.636	-0.10135	0.1	0.027	0.604	-0.10296
0.1	0.066	0.635	-0.10144	0.1	0.026	0.603	-0.1031
0.1	0.065	0.634	-0.10153	0.1	0.025	0.602	-0.10324
0.1	0.064	0.633	-0.10162	0.1	0.024	0.602	-0.103
0.1	0.063	0.633	-0.10137	0.1	0.023	0.601	-0.10314
0.1	0.062	0.632	-0.10146	0.1	0.022	0.6	-0.10328
0.1	0.061	0.631	-0.10156	0.1	0.021	0.599	-0.10342
0.1	0.06	0.63	-0.10165	0.1	0.02	0.599	-0.10318

표 B.3 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.10$)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.1	0.019	0.598	-0.10333	0.1	0.009	0.591	-0.10368
0.1	0.018	0.597	-0.10348	0.1	0.008	0.59	-0.10384
0.1	0.017	0.596	-0.10363	0.1	0.007	0.59	-0.10361
0.1	0.016	0.596	-0.10339	0.1	0.006	0.589	-0.10377
0.1	0.015	0.595	-0.10354	0.1	0.005	0.588	-0.10393
0.1	0.014	0.594	-0.10369	0.1	0.004	0.587	-0.10409
0.1	0.013	0.594	-0.10345	0.1	0.003	0.587	-0.10386
0.1	0.012	0.593	-0.10361	0.1	0.002	0.586	-0.10402
0.1	0.011	0.592	-0.10376	0.1	0.001	0.585	-0.10419
0.1	0.01	0.592	-0.10353				

표 B.4 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.09$) (계속)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.09	0.089	0.65	-0.10048	0.09	0.069	0.632	-0.10138
0.09	0.088	0.649	-0.10055	0.09	0.068	0.631	-0.10147
0.09	0.087	0.648	-0.10061	0.09	0.067	0.63	-0.10157
0.09	0.086	0.647	-0.10068	0.09	0.066	0.629	-0.10166
0.09	0.085	0.646	-0.10075	0.09	0.065	0.628	-0.10176
0.09	0.084	0.645	-0.10082	0.09	0.064	0.627	-0.10186
0.09	0.083	0.644	-0.10089	0.09	0.063	0.626	-0.10196
0.09	0.082	0.643	-0.10097	0.09	0.062	0.626	-0.10171
0.09	0.081	0.642	-0.10104	0.09	0.061	0.625	-0.10181
0.09	0.08	0.641	-0.10112	0.09	0.06	0.624	-0.10191
0.09	0.079	0.641	-0.10087	0.09	0.059	0.623	-0.10202
0.09	0.078	0.64	-0.10095	0.09	0.058	0.622	-0.10212
0.09	0.077	0.639	-0.10103	0.09	0.057	0.621	-0.10222
0.09	0.076	0.638	-0.10111	0.09	0.056	0.621	-0.10198
0.09	0.075	0.637	-0.10119	0.09	0.055	0.62	-0.10209
0.09	0.074	0.636	-0.10128	0.09	0.054	0.619	-0.10221
0.09	0.073	0.635	-0.10136	0.09	0.053	0.618	-0.10232
0.09	0.072	0.634	-0.10145	0.09	0.052	0.617	-0.10243
0.09	0.071	0.633	-0.10154	0.09	0.051	0.617	-0.10219
0.09	0.07	0.632	-0.10163	0.09	0.05	0.616	-0.1023

표 B.4 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.09$)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.09	0.049	0.615	-0.10242	0.09	0.024	0.596	-0.1035
0.09	0.048	0.614	-0.10251	0.09	0.023	0.596	-0.10326
0.09	0.047	0.613	-0.10261	0.09	0.022	0.595	-0.10341
0.09	0.046	0.613	-0.1024	0.09	0.021	0.594	-0.10356
0.09	0.045	0.612	-0.10254	0.09	0.02	0.594	-0.10333
0.09	0.044	0.611	-0.10266	0.09	0.019	0.593	-0.10348
0.09	0.043	0.61	-0.10279	0.09	0.018	0.592	-0.10363
0.09	0.042	0.61	-0.10254	0.09	0.017	0.591	-0.10379
0.09	0.041	0.609	-0.10267	0.09	0.016	0.591	-0.10355
0.09	0.04	0.608	-0.1028	0.09	0.015	0.59	-0.10371
0.09	0.039	0.607	-0.10293	0.09	0.014	0.589	-0.10387
0.09	0.038	0.607	-0.10269	0.09	0.013	0.589	-0.10363
0.09	0.037	0.606	-0.10282	0.09	0.012	0.588	-0.1038
0.09	0.036	0.605	-0.10295	0.09	0.011	0.587	-0.10396
0.09	0.035	0.604	-0.10309	0.09	0.01	0.587	-0.10372
0.09	0.034	0.604	-0.10284	0.09	0.009	0.586	-0.10389
0.09	0.033	0.603	-0.10298	0.09	0.008	0.585	-0.10405
0.09	0.032	0.602	-0.10312	0.09	0.007	0.585	-0.10382
0.09	0.031	0.601	-0.10326	0.09	0.006	0.584	-0.10399
0.09	0.03	0.601	-0.10302	0.09	0.005	0.583	-0.10416
0.09	0.029	0.6	-0.103169	0.09	0.004	0.583	-0.10392
0.09	0.028	0.599	-0.1033	0.09	0.003	0.582	-0.10409
0.09	0.027	0.598	-0.10345	0.09	0.002	0.581	-0.10427
0.09	0.026	0.598	-0.10321	0.09	0.001	0.581	-0.10403
0.09	0.025	0.597	-0.10335				

표 B.5 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.08$)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.08	0.079	0.634	-0.10137	0.08	0.039	0.602	-0.103
0.08	0.078	0.633	-0.10146	0.08	0.038	0.601	-0.10314
0.08	0.077	0.632	-0.10155	0.08	0.037	0.601	-0.1029
0.08	0.076	0.632	-0.1013	0.08	0.036	0.6	-0.10304
0.08	0.075	0.631	-0.10139	0.08	0.035	0.599	-0.10318
0.08	0.074	0.63	-0.10148	0.08	0.034	0.598	-0.10333
0.08	0.073	0.629	-0.10157	0.08	0.033	0.598	-0.10309
0.08	0.072	0.628	-0.10167	0.08	0.032	0.597	-0.10323
0.08	0.071	0.627	-0.10177	0.08	0.031	0.596	-0.10338
0.08	0.07	0.626	-0.10187	0.08	0.03	0.595	-0.10353
0.08	0.069	0.626	-0.10162	0.08	0.029	0.595	-0.10329
0.08	0.068	0.625	-0.10172	0.08	0.028	0.594	-0.10344
0.08	0.067	0.624	-0.10182	0.08	0.027	0.593	-0.10359
0.08	0.066	0.623	-0.10192	0.08	0.026	0.593	-0.10335
0.08	0.065	0.622	-0.10203	0.08	0.025	0.592	-0.10351
0.08	0.064	0.621	-0.10214	0.08	0.024	0.591	-0.10366
0.08	0.063	0.621	-0.10189	0.08	0.023	0.591	-0.10342
0.08	0.062	0.62	-0.102	0.08	0.022	0.59	-0.10358
0.08	0.061	0.619	-0.10211	0.08	0.021	0.589	-0.10374
0.08	0.06	0.618	-0.10222	0.08	0.02	0.588	-0.1039
0.08	0.059	0.617	-0.10233	0.08	0.019	0.588	-0.10366
0.08	0.058	0.617	-0.10209	0.08	0.018	0.587	-0.10383
0.08	0.057	0.616	-0.1022	0.08	0.017	0.586	-0.10399
0.08	0.056	0.615	-0.10232	0.08	0.016	0.586	-0.10375
0.08	0.055	0.614	-0.10243	0.08	0.015	0.585	-0.10392
0.08	0.054	0.613	-0.10255	0.08	0.014	0.584	-0.10409
0.08	0.053	0.613	-0.10231	0.08	0.013	0.584	-0.10385
0.08	0.052	0.612	-0.10243	0.08	0.012	0.583	-0.10402
0.08	0.051	0.611	-0.10255	0.08	0.011	0.582	-0.10419
0.08	0.05	0.61	-0.10268	0.08	0.01	0.582	-0.10395
0.08	0.049	0.61	-0.10243	0.08	0.009	0.581	-0.10413
0.08	0.048	0.609	-0.10256	0.08	0.008	0.58	-0.1043
0.08	0.047	0.608	-0.10269	0.08	0.007	0.58	-0.10407
0.08	0.046	0.607	-0.10282	0.08	0.006	0.579	-0.10424
0.08	0.045	0.606	-0.10295	0.08	0.005	0.578	-0.10442
0.08	0.044	0.606	-0.1027	0.08	0.004	0.578	-0.10419
0.08	0.043	0.605	-0.10284	0.08	0.003	0.577	-0.10437
0.08	0.042	0.604	-0.10297	0.08	0.002	0.577	-0.10413
0.08	0.041	0.603	-0.10311	0.08	0.001	0.576	-0.10431
0.08	0.04	0.603	-0.10286				

표 B.6 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.07$)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.07	0.069	0.62	-0.1019	0.07	0.034	0.593	-0.10346
0.07	0.068	0.619	-0.10201	0.07	0.033	0.592	-0.10361
0.07	0.067	0.618	-0.10212	0.07	0.032	0.592	-0.10338
0.07	0.066	0.617	-0.10223	0.07	0.031	0.591	-0.10353
0.07	0.065	0.616	-0.10234	0.07	0.03	0.59	-0.10369
0.07	0.064	0.616	-0.1021	0.07	0.029	0.59	-0.10345
0.07	0.063	0.615	-0.10221	0.07	0.028	0.589	-0.10361
0.07	0.062	0.614	-0.10233	0.07	0.027	0.588	-0.10377
0.07	0.061	0.613	-0.10245	0.07	0.026	0.588	-0.10353
0.07	0.06	0.612	-0.10257	0.07	0.025	0.587	-0.10369
0.07	0.059	0.612	-0.10232	0.07	0.024	0.586	-0.10385
0.07	0.058	0.611	-0.10244	0.07	0.023	0.586	-0.10362
0.07	0.057	0.61	-0.10257	0.07	0.022	0.585	-0.10378
0.07	0.056	0.609	-0.10267	0.07	0.021	0.584	-0.10395
0.07	0.055	0.609	-0.10245	0.07	0.02	0.584	-0.10371
0.07	0.054	0.608	-0.10258	0.07	0.019	0.583	-0.10388
0.07	0.053	0.607	-0.1027	0.07	0.018	0.582	-0.10405
0.07	0.052	0.606	-0.10283	0.07	0.017	0.582	-0.10382
0.07	0.051	0.606	-0.10259	0.07	0.016	0.581	-0.10399
0.07	0.05	0.605	-0.10272	0.07	0.015	0.58	-0.10416
0.07	0.049	0.604	-0.10285	0.07	0.014	0.58	-0.10393
0.07	0.048	0.603	-0.10299	0.07	0.013	0.579	-0.1041
0.07	0.047	0.603	-0.10275	0.07	0.012	0.578	-0.10428
0.07	0.046	0.602	-0.10288	0.07	0.011	0.578	-0.10404
0.07	0.045	0.601	-0.10302	0.07	0.01	0.577	-0.10422
0.07	0.044	0.6	-0.10316	0.07	0.009	0.576	-0.1044
0.07	0.043	0.6	-0.10292	0.07	0.008	0.576	-0.10417
0.07	0.042	0.599	-0.10306	0.07	0.007	0.575	-0.10435
0.07	0.041	0.598	-0.1032	0.07	0.006	0.574	-0.10453
0.07	0.04	0.597	-0.10335	0.07	0.005	0.574	-0.1043
0.07	0.039	0.597	-0.10311	0.07	0.004	0.573	-0.10449
0.07	0.038	0.596	-0.10325	0.07	0.003	0.573	-0.10425
0.07	0.037	0.595	-0.1034	0.07	0.002	0.572	-0.10444
0.07	0.036	0.595	-0.10316	0.07	0.001	0.571	-0.10463
0.07	0.035	0.594	-0.10331				

표 B.7 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.06$)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.06	0.059	0.606	-0.10272	0.06	0.029	0.585	-0.10365
0.06	0.058	0.605	-0.10285	0.06	0.028	0.584	-0.10381
0.06	0.057	0.605	-0.10261	0.06	0.027	0.583	-0.10398
0.06	0.056	0.604	-0.10274	0.06	0.026	0.583	-0.10374
0.06	0.055	0.603	-0.10287	0.06	0.025	0.582	-0.10391
0.06	0.054	0.602	-0.10301	0.06	0.024	0.581	-0.10408
0.06	0.053	0.602	-0.10277	0.06	0.023	0.581	-0.10385
0.06	0.052	0.3601	-0.1029	0.06	0.022	0.58	-0.10402
0.06	0.051	0.6	-0.103047	0.06	0.021	0.579	-0.10419
0.06	0.05	0.599	-0.10318	0.06	0.02	0.579	-0.10396
0.06	0.049	0.599	-0.10294	0.06	0.019	0.578	-0.10413
0.06	0.048	0.598	-0.10308	0.06	0.018	0.577	-0.10431
0.06	0.047	0.597	-0.10322	0.06	0.017	0.577	-0.10408
0.06	0.046	0.597	-0.10298	0.06	0.016	0.576	-0.10426
0.06	0.045	0.596	-0.10313	0.06	0.015	0.575	-0.10444
0.06	0.044	0.595	-0.10328	0.06	0.014	0.575	-0.1042
0.06	0.043	0.594	-0.10342	0.06	0.013	0.574	-0.10439
0.06	0.042	0.594	-0.10319	0.06	0.012	0.574	-0.10415
0.06	0.041	0.593	-0.10334	0.06	0.011	0.573	-0.10434
0.06	0.04	0.592	-0.10349	0.06	0.01	0.572	-0.10452
0.06	0.039	0.592	-0.10325	0.06	0.009	0.572	-0.10429
0.06	0.038	0.591	-0.1034	0.06	0.008	0.571	-0.10448
0.06	0.037	0.59	-0.10356	0.06	0.007	0.57	-0.10467
0.06	0.036	0.589	-0.10371	0.06	0.006	0.57	-0.10444
0.06	0.035	0.589	-0.10348	0.06	0.005	0.569	-0.10463
0.06	0.034	0.588	-0.10363	0.06	0.004	0.569	-0.1044
0.06	0.033	0.587	-0.10379	0.06	0.003	0.568	-0.10459
0.06	0.032	0.587	-0.10356	0.06	0.002	0.567	-0.10478
0.06	0.031	0.586	-0.10372	0.06	0.001	0.567	-0.10455
0.06	0.03	0.585	-0.10388				

표 B.8 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.04$)

q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/l	M_B/ql^2
0.04	0.039	0.582	-0.10363	0.04	0.009	0.563	-0.10458
0.04	0.038	0.581	-0.1038	0.04	0.008	0.562	-0.10478
0.04	0.037	0.58	-0.10397	0.04	0.007	0.561	-0.10498
0.04	0.036	0.58	-0.10374	0.04	0.006	0.561	-0.10475
0.04	0.035	0.579	-0.10391	0.04	0.005	0.56	-0.10496
0.04	0.034	0.578	-0.10408	0.04	0.004	0.56	-0.10473
0.04	0.033	0.578	-0.10385	0.04	0.003	0.559	-0.10494
0.04	0.032	0.577	-0.10402	0.04	0.002	0.558	-0.10514
0.04	0.031	0.576	-0.1042	0.04	0.001	0.558	-0.10492
0.04	0.03	0.576	-0.10397				
0.04	0.029	0.575	-0.10414				
0.04	0.028	0.574	-0.10432				
0.04	0.027	0.574	-0.10409				
0.04	0.026	0.573	-0.10427				
0.04	0.025	0.573	-0.10404				
0.04	0.024	0.572	-0.10422				
0.04	0.023	0.571	-0.107441				
0.04	0.022	0.571	-0.10418				
0.04	0.021	0.57	-0.10437				
0.04	0.02	0.569	-0.10455				
0.04	0.019	0.569	-0.10432				
0.04	0.018	0.568	-0.10451				
0.04	0.017	0.568	-0.10428				
0.04	0.016	0.567	-0.10448				
0.04	0.015	0.566	-0.10467				
0.04	0.014	0.566	-0.10444				
0.04	0.013	0.565	-0.10464				
0.04	0.012	0.564	-0.10483				
0.04	0.011	0.564	-0.10461				
0.04	0.01	0.563	-0.1048				

참 고 문 헌

마아다스아이티 (2003). *MIDAS/CIVIL*, 마이다스아이티.

문영철 (2002). "ILM 공법에 의해 건설되는 PS콘크리트 교량의 거동", *부경대학교 대학원, 석사학위논문.*

신현묵 (2003). *프리스트레스트 콘크리트*, 동명사.

안태욱, 김광양, 이환우 (2004). "변단면 압출 추진코와 ILM교량 상부구조와의 상호작용", *한국전산구조공학회, 학술발표회 논문집*, 제 17권 32호, pp. 455-462.

안태욱, 양성운, 이환우 (2003). "ILM교량의 압출 추진코와 교량 상부구조의 상호작용", *대한토목학회 2003년도 정기 학술대회 논문집*, pp. 709-714.

이광민 (1992). "LM공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 설계", *콘크리트 학회지*, 제 4권 3호, pp. 19-25.

한국도로공사 (1996). *도로설계실무편람*, 한국도로공사.

한국콘크리트학회 (2004). *콘크리트구조설계기준 해설*, 기문당.

Breen, J. E., and Naaman, A. E. (1990). *External prestressing in bridges*, American Concrete Institute, Detroit, Mich.

Gere, J. M., and Timoshenko, S. P. (1990). *Mechanics of Materials (3th)*, PWS Company.

Gohler, B., and Pearson, B. (2000). *Incrementally Launched Bridge*, Ernst & Sohn.

Grant, A. (1975). "Incremental launching of concrete structures", *ACI Journal*, pp. 395-402.

Rosignoli, M. (1997a). "Incremental bridge launching", *Concrete Int*, 19(2), pp. 36-40.

Rosignoli, M. (1997b). "Influences of the Incremental Launching Construction Method on the Sizing of Prestressed Concrete Bridge Decks", *Proc. Instn Civ. Engrs. Structs & Bldges.*, 122(3), pp. 316-325.

Rosignoli, M. (1998). *Launched Bridges*, ASCE Press.

Rosignoli, M. (1998). "Nose-Deck Interaction In Launched Presstres sed Concrete Bridge", *Bridge Engineering*, pp. 21-27.

Rosignoli, M. (1999). "Presizing of Prestressed Concrete Launched Bridge", *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 5, pp. 705-710.

감사의 글

구조설계연구실에서 지난 3년간 느꼈던 모든 추억들을 가슴에 담은 채 이제 연구실 울타리를 벗어나 새로운 사회로 진출하려고 합니다. 그 동안 저의 곁에서 힘이 되고, 도움을 주신 모든 분들께 감사의 마음을 전합니다.

지난 3년 동안 부족한 제가 더욱 성숙한 인격을 가질 수 있도록 항상 따뜻하고, 끊임없는 사랑을 베풀어 주시고, 학문의 길을 열어주신 우리 교수님, 이환우 지도교수님께 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다. 바쁘신 와중에서도 세밀하게 논문을 심사해 주시고, 조언과 충고를 아끼지 않으신 김종수 교수님, 장희석 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그 동안의 학교 생활을 통하여 인성과 지성을 일깨워 주신 김상용 교수님, 손인식 교수님, 이종섭 교수님, 이동욱 교수님, 이종출 교수님, 이영대 교수님, 김명식 교수님, 정진호 교수님, 정두희 교수님, 국승규 교수님, 이상호 교수님께 진심으로 감사드립니다.

항상 웃음으로 격려해주신 박익태 형님, 논문이 완성되기까지 항상 옆에서 많은 도움을 주신 연구실의 실세 김광양 형님, 관심과 사랑으로 대하여 주신 송영용 형님, 언제나 열심인 모습을 보여 주신 이현동 형님, 언제나 관심을 잊지 않으신 박성갑 형님, 부지런한 양성운 형님, 항상 듬직한 나무가 되어주시고 끊임없이 관심을 가져주신 이동환 형님, 연구실의 살림꾼 조은래 형님, 언제나 우직한 옥재성 형님, 곧 결혼하게 될 문영철 형님, 멀리 청도면에 근무하는 박순호 형님, 그리고 한상준 차장님, 주철의 형님, 손수진 형님, 김영조 형님, 배성한 형님, 성영재 형님, 강덕용에게도 감사의 마음을 전합니다. 그리고, 끝까지 학업을 마치지 못해서 아쉽지만 그래도 항상 친구로 남아 옆에서 힘이 되어준 이동준, 연구실의 궂은일 마다하지 않고 따뜻한 커피로 마음을 전한 김관수, 장국진, 최용준, 고동원에게도 감사드립니다. 항상 곁에서 대학원 생활에 힘이 되어준 친구들과 즐겁게 대학원 생활을 할 수 있게 도와준 최성민, 대학원 선후배, 동기들에게도 감사의 마음을 전합니다.

항상 못난 동생을 말없이 지켜봐준 형과 동생에게 감사드리고, 늘 자식들을 위해 당신의 건강보다는 자식들 뒷바라지에 평생을 바치신 우리 아버지, 어머님께 깊은 감사를 드리며 이 논문을 바칩니다.