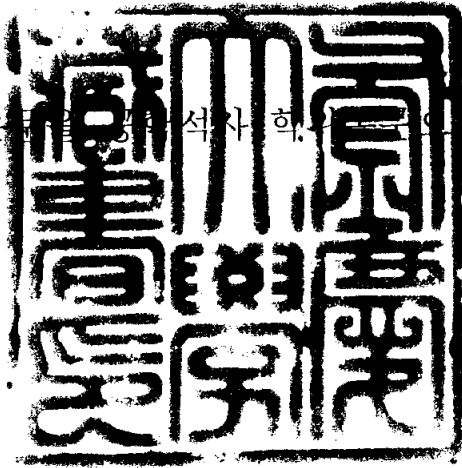


공학석사 학위논문

ILM 상부구조와 변단면 압출 추진코의
상호작용에 관한 매개변수 해석

지도교수 이 환 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2004년 8월

부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

김 영 조

이 논문을 김영조의 공학석사
학위논문으로 인준함

2004년 6월 19일

주 심 공 학 석 사 김 종 수



위 원 공 학 박 사 김 명 식



위 원 공 학 박 사 이 환 우



목 차

1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구범위	1
2. ILM교량 공법	3
2.1 ILM공법의 개요	3
2.2 ILM공법의 특징	6
2.2.1 장점	6
2.2.2 단점	6
3. 상호작용의 해석모델	8
3.1 압출진행에 따른 상부 단면력의 변화	8
3.2 매개변수(parameter) 및 기본가정	12
3.3 해석 식	14
3.3.1 1단계 압출	14
3.3.2 2단계 압출	15
4. 매개변수 해석	21
4.1 압출추진코의 길이가 긴 경우	21
4.2 압출추진코의 길이가 짧은 경우	24
4.3 중량비에 따른 영향	26
4.4 최적길이비 및 최소강성비	27
4.5 탄성계수비의 변화에 따른 영향	33

5. 설계 단면력의 발생위치	34
5.1 지점 C에서의 부모멘트	34
5.1.1 해석식의 유도	34
5.1.2 등단면 압출추진코의 경우	37
5.1.3 변단면 압출추진코의 경우	39
5.2 첫 번째 경간에서의 정 모멘트	41
5.2.1 등단면 압출추진코에 대한 해석식 유도	41
5.2.2 첫 번째 경간 정 모멘트 변화(등단면 압출추진코)	43
5.2.3 변단면 압출추진코에 대한 해석식 유도	46
5.2.4 첫 번째 경간 정 모멘트 변화(변단면 압출추진코)	48
5.3 두 번째 경간에서의 정 모멘트	51
5.3.1 해석식 유도	51
5.3.2 등단면 압출추진코의 경우	53
5.3.3 변단면 압출추진코의 경우	55
6. 결 론	57
부 록	
A. 중량비와 최적 길이비	59
참고문헌	70
감사의 글	72

그 립 목 차

그림 2.1 A, B고속도로 구간의 교량 형식별 분류	4
그림 2.2 PSC교량의 점유율	4
그림 3.1 압출되는 동안의 대표적인 단면위치	8
그림 3.2 압출 종료직전의 휨모멘트도 및 전단력도	9
그림 3.3 압출시의 Nose-Deck 구조계	13
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	22
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	24
그림 4.3 $L_2/I=0.045, I_1/I=0.02, l_n/l=0.65$ 인 경우의 중량비 변화에 따른 모멘트 변화	26
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	28
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	28
그림 4.6 $q_2/q=0.06$ 인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한 B점의 모멘트	30
그림 4.7 $q_2/q=0.08$ 인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한 B점의 모멘트	31
그림 4.8 $q_2/q=0.1$ 인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한 B점의 모멘트	32

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	33
그림 5.1 중첩법의 적용(1단계 압출)	35
그림 5.2 길이비의 변화에 따른 C지점의 모멘트 변화	
(등단면 압출추진코)	37
그림 5.3 길이비의 변화에 따른 C지점의 모멘트 변화	
(변단면 압출추진코)	39
그림 5.4 첫 번째 경간 분리(등단면 압출추진코)	41
그림 5.5 $l_n/l=0.8, q_n/q=0.1$ 일때의 강성비에 따른 첫 번째 경간의	
최대 정 모멘트의 변화	43
그림 5.6 $l_n/l=0.5, q_n/q=0.1$ 일때의 강성비에 따른 첫 번째 경간의	
최대 정 모멘트의 변화	44
그림 5.7 첫 번째 경간 분리(변단면 압출추진코)	46
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	48
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	49
그림 5.10 단순보로 분리	51
그림 5.11 $l_n/l=0.8, q_n/q=0.1$ 일 때 두 번째 경간의 최대	
정모멘트 변화	53
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	55

표 목 차

표 4.1 길이버 변화에 따른 최적중량비 변화($q_2/q=0.06$)	29
표 4.2 길이버 변화에 따른 최적중량비 변화($q_2/q=0.08$)	30
표 4.3 길이버 변화에 따른 최적중량비 변화($q_2/q=0.1$)	31

**Parametric Analysis on the Interaction Behavior
Between Superstructure and Launching Nose of Tapered Section**

Young-Jo Kim

*Department of Civil Engineering, Graduate School of Industry,
Pukyong National University*

Abstract

ILM (incremental launching method) bridge construction method, which has been acknowledged as an effective method for achieving high quality and widely adopted in construction sites in Korea, has the structural characteristic that each section of the superstructure passes through mid span and support during launching and, as a result, all sections experience all of the maximum positive moment, the maximum negative moment and the maximum shear force caused by dead load.

However, there have been few researches and materials on the behavior of the superstructure of ILM bridges resulting from the use of launching noses in Korea, so design and construction have repeated previous cases. In addition, previous researches carried out analysis assuming that the shape of launching noses is equivalent section different from their actual shape.

Thus, aiming at optimum section design through effective control of sectional force occurring on superstructure during launching ILM bridges, this study numerically analyzed interaction behavior according to each of parameters such as length ratio, weight ratio and stiffness ratio based on a theoretical formula [Ahn, 2004] for 'Nose-Deck Interaction of ILM Bridge Proceeding with Tapered Sectional

Launching Nose' that is used in actual construction sites.

Key words : incremental launching method, length ratio, weight ratio, stiffness ratio, optimum section

1. 서 론

1.1 연구배경

높은 품질을 확보하는데 있어 효과적인 공법으로 인정받아 국내의 여러 현장에서 널리 채택되고 있는 ILM(incremental launching method)교량 공법은 압출되는 동안 상부의 각 단면이 중앙 지간과 지점을 통과하게 됨으로 모든 단면이 사하중에 의한 최대 정 모멘트 및 최대 부 모멘트 그리고 최대 전단력을 모두 경험하게 되는 구조적 특성을 가지고 있다.

그러나 국내에서는 이와 같은 압출 추진코의 사용으로 인한 ILM교량 상부구조의 거동특성을 고려한 연구와 기술 자료들이 제공되지 못해, 설계와 시공 실무에서 과거의 전례를 반복적으로 답습하는 것이 현실이고, 선행 연구결과들은 압출 추진코의 형상을 실제형상과는 달리 등단면으로 가정하여 분석하였다.

이에따라 본 연구에서는 ILM교량 압출 중 상부구조에 발생하는 단면력의 효과적인 제어를 통한 최적화된 단면 설계를 목표로, 실제 시공현장에서 사용되고 있는 변단면 압출 추진코와 교량 상부구조와의 상호작용에 대해 도출된 이론식[안태욱, 2004]을 바탕으로 길이비, 중량비, 강성비의 각 매개변수에 따른 상호작용을 수치적으로 분석하여 교량 상부구조를 최적화 할 수 있는 매개변수를 도출하고자 한다.

1.2 연구범위

본 연구에서는 ILM 교량의 변단면 압출 추진코(launching nose)와 상

부구조와의 상호작용을 분석하기 위해 도입된 해석식[안태욱, 2004]을 이용하여 상부구조를 최적화 할 수 있는 설계자료를 제시하고자 한다.

이를 위해 실제 압출 추진코의 단면형상을 고려한 변단면 압출 추진코와 상부구조와의 경간 길이비, 중량비 그리고 강성비를 매개변수로 고려하여 각 매개변수에 따른 상부구조의 영향을 분석하여, 교량 상부구조의 단면력 변화를 최소화 할 수 있는 최적의 매개변수를 획득하고자 하였다.

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.

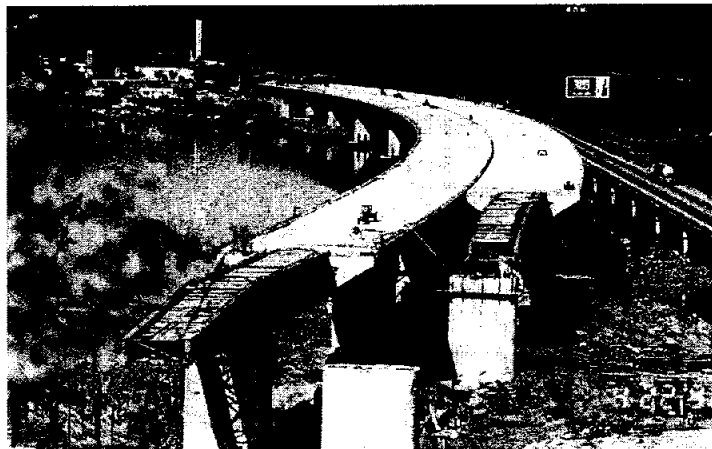


사진 2.1 ILM공법 교량

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.

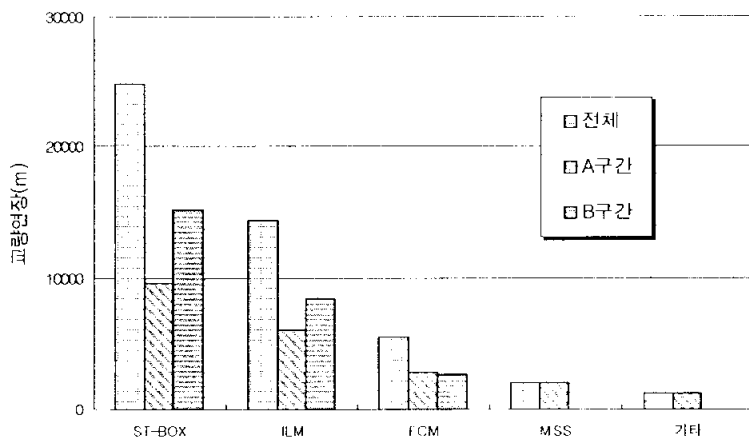


그림 2.1 A, B고속도로 구간의 교량 형식별 분류

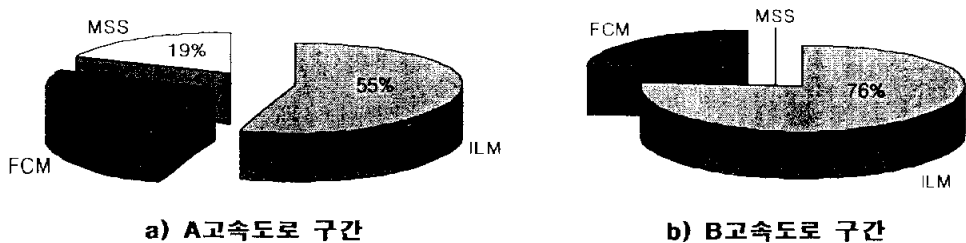


그림 2.2 PSC교량의 점유율

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 현장 여건을 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 발생하는 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.

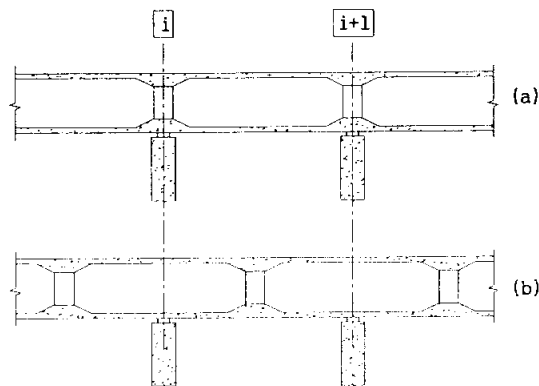


그림 3.1 압출되는 동안의 대표적인 단면위치

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 사용 하중에 적합하게 설계되기 때문에 안전성을 확보하고 있다. 그러나, 그림 3.1(b)의 현재의 지점부 단면은 교량 완성 구조계에서 지간 중앙부에 위치한 단면으로서 정 모멘트와 낮은 전단력에 저항할 수 있게 설계되어져 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.

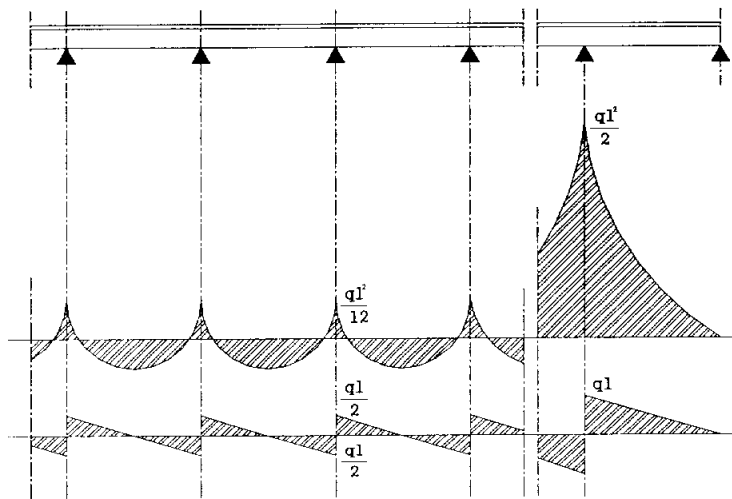


그림 3.2 압출 종료직전의 휨모멘트도 및 전단력도

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 l 이라 할 때,

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

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

$$\frac{ql_{cr}^2}{2} = \frac{ql^2}{12} \quad (3.1)$$

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

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

1)의 해결방안에 대한 적용은 각 지간에 임시교각을 설치하여 지간 길이 l 을 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 응력감소는 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 상부 구조보다 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 발생하는 일시적으로 큰 크기의 응력을 제어하기 위한 기본적인 방법으로 채택되고 있다. 압출 추진코는 강재 트리스나 플레이트 거더(plate girder)로 제작하여 사용되고 있다. 일반적으로는 두 개의 강재 플레이트 거더(steel plate girder)를 콘크리트 상부끝에 연결시키며, 이때 콘크리트 상부단면의 하부와 플레이트 거더의 하부 플랜지가 일치되게 연결시킨다.

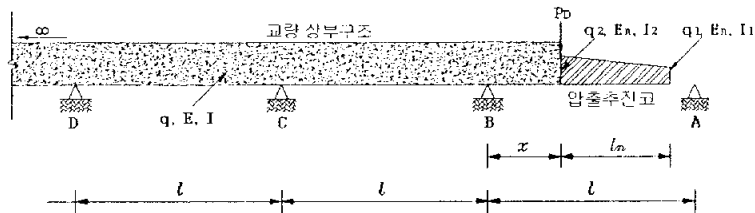
3.2 매개변수(parameter) 및 기본가정

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

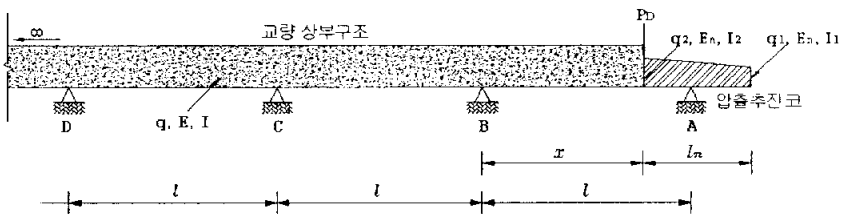
- 1) 교량구조(l)의 지간길이에 대한 압출추진코(l_n)의 길이비 ; $\frac{l_n}{l}$
- 2) 교량구조(q)와 압출추진코(q_1, q_2)의 단위 길이당 중량비 ; $\frac{q_1}{q}, \frac{q_2}{q}$
- 3) 교량구조(I)와 압출추진코(I_1, I_2)의 강성비 ; $\frac{I_1}{I}, \frac{I_2}{I}$
- 4) 교량구조(E)와 압출추진코(E_n)의 탄성계수비 : $\frac{E_n}{E}$

여기서, q_1, I_1 은 압출추진코 끝단에서의 단위 중량과 단면2차모멘트를 의미하고, q_2, I_2 는 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_D 는 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 l 인 무한개의 연속보로 되어 있다고 가정한다.
- 4) 미지수를 추가적으로 도입하지 않기 위해서 압출 긴장력은 도심축을 지난다고 가정한다.

3.3 해석식

3.3.1 1단계 압출(M_B^I/ql^2)

ILM 교량의 시공 중 설계 단면력은 첫 번째 지점과 두 번째 지점 즉, 그림 3.4의 B점과 C점에서의 부(-)모멘트, 그리고 A-B경간과 B-C경간에서 발생하는 정(+)모멘트 중에서 결정 될 수 있다. 이 중 B점에서의 부모멘트가 일반적으로 시공 중 설계단면력으로 결정된다[Rosignoli, 1998, 문영철, 2002].

먼저 압출 1단계는 그림 3.3과 같이 지점 B에서부터 압출 추진코와 상부의 교점부분이 거리 x 만큼 압출되었을 때, 압출 추진코의 끝은 지점 A에 도달하기 직전으로 가정하면 그림 3.3으로부터 경간길이에 대한 압출된 상부길이비를 $\alpha = x/l$ 로 나타낼 수 있고, α 의 범위는 $0 \leq \alpha \leq 1 - l_n/l$ 이다.

1단계 압출과정 중에, 즉, 지점 A에 도달하기 직전까지에서 설계 단면력으로 결정되는 지점 B의 휨모멘트 M_B^I 는 식 (3.2)와 같이 나타낼 수 있다[안태욱, 2004]. 여기서, P_D 는 압출 추진코와 상부구조 연결부의 다이아플램 집중하중을 의미한다.

$$\frac{M_B^I}{ql^2} = -\frac{1}{2} \alpha^2 - \frac{q_1}{q} \alpha \frac{l_n}{l} - \frac{1}{2} \frac{q_1}{q} \left(\frac{l_n}{l}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q}\right) \left(\alpha \frac{l_n}{l} + \frac{1}{3} \frac{l_n^2}{l^2}\right) - \frac{P_D}{ql} \alpha \quad (3.2)$$

3.3.2 2단계 압출(M_B^2/ql^2)

압출 추진코가 지점 A에 도달하게 되면 압출 추진코의 끝은 교각의 지점반력에 의해 치짐이 회복된다. 이러한 탄성치짐의 회복으로 정 모멘트가 발생하게 되어 지점 B의 휨 모멘트는 감소하게 되고, 그림 3.4와 같이 압출 2단계가 시작된다.

그림 3.4의 2단계 압출과정에서는 α 의 범위를 $1-l_n/l \leq \alpha \leq 1$ 로 나타낼 수 있다. 이 단계에서의 지점 B의 모멘트 M_B^2 는 I형 플레이트 거더로 제작된 압출 추진코 단면의 길이방향 선형변화를 고려하여 식 (3.3)과 같이 유도되었다[안태욱, 2004].

$$\frac{M_B^2}{ql^2} = \frac{2}{3} \left(\frac{\textcircled{a}}{\textcircled{f}} + \frac{E}{E_n} \frac{\textcircled{b} + \textcircled{c} + \textcircled{d} + \textcircled{e}}{\textcircled{f}} \right) - \frac{3}{4} \quad (3.3)$$

여기서 A, B, C, D, E, F는 식 (3.4)~(3.9)와 같다.

$$\begin{aligned} \textcircled{a} = & - \left\{ \frac{7}{108} + \frac{1}{4}\alpha - \frac{1}{4}\alpha^2 + \frac{45}{324}\alpha^3 - \frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha) - \frac{1}{8}\alpha^4 + \frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha) + \frac{1}{18}\alpha^5 \right\} \\ & + \left\{ \frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right\} (1-\alpha)^2 \left(-\frac{1}{12}\alpha^2 + \frac{1}{18}\alpha^3 \right) + \left\{ \frac{1}{2} \frac{q_1}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} \right. \right. \\ & - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 \Big) + \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \alpha \frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) \right. \\ & \left. \left. + \alpha \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l} + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \right) \right\} \left(\frac{1}{6}\alpha^2 - \frac{1}{9}\alpha^3 \right) \\ & + \frac{P_D(1-\alpha)}{ql} \left(-\frac{1}{6}\alpha^2 + \frac{1}{9}\alpha^3 \right) + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(-\alpha \frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n} \right) (1-\alpha)^2 \left(-\frac{1}{18}\alpha^2 + \frac{1}{27}\alpha^3 \right) \Big\} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\textcircled{b} = -\frac{1}{3} \left\{ \frac{3}{4} \frac{l_n^3}{l^3} + \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{1}{2} \frac{q_1}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 \right) \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \alpha \frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) + \alpha \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l} \right. \\
& + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \left. \right) + \alpha \frac{l_n^3}{l^3} \left(-\frac{2}{3} (1-\alpha) + \frac{2}{3} \right) \\
& - \frac{1}{6} \alpha^2 \frac{l_n^3}{l^3} + \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right) (1-\alpha) \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \alpha \right) \\
& - \frac{1}{6} \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right) (1-\alpha)^2 \\
& + \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(-\alpha \frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n} \right) (1-\alpha) \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6} \alpha \right) \\
& - \frac{1}{6} \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(-\alpha \frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n} \right) (1-\alpha)^2 - \frac{2}{3} P_D (1-\alpha) \frac{l_n^3}{ql^4} + \frac{P_D}{3} (2+\alpha) \frac{l_n^3}{ql^4} \Big\} \\
& \times \frac{1}{\left(\frac{l_2^{0.5}}{l^{0.5}} - \frac{l_1^{0.5}}{l^{0.5}} \right)^3} \left\{ \frac{l_2^{0.5}}{l^{0.5}} - 2 \left(\frac{l_2^{0.5}}{l^{0.5}} - \frac{l_1^{0.5}}{l^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{l_1^{0.5}}{l^{0.5}} \right\} \\
& \times \ln \left\{ \left(1 - \frac{l_1^{0.5}}{l_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{l_1^{0.5}}{l_2^{0.5}} \right\} \Big\}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
\textcircled{c} = & + \frac{1}{3} \frac{l_n^2}{l^2} \left\{ \frac{1}{2} \frac{q_1}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \cdot \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 \right) \right. \\
& + \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \cdot \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \alpha \cdot \frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) + \alpha \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \right. \\
& - \frac{l_n}{l} + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \left. \right) \Big\} \times \frac{1}{\left(\frac{l_2^{0.5}}{l^{0.5}} - \frac{l_1^{0.5}}{l^{0.5}} \right)^2} \left[\ln \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{l_1^{0.5}}{l_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{l_1^{0.5}}{l_2^{0.5}}} \right\} \right. \\
& + \left. \left\{ \left(1 - \frac{l_1^{0.5}}{l_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{l_1^{0.5}}{l_2^{0.5}} \right\} - 1 \right]
\end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
\textcircled{d} = & + \frac{1}{6} \frac{l_n^4}{l^4} \left\{ \frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right\} \\
& \times \frac{1}{\left(\frac{l_2^{0.5}}{l^{0.5}} - \frac{l_1^{0.5}}{l^{0.5}} \right)^4} \left[0.5 \frac{l_2}{l} - 3 \left\{ \left(1 - \frac{l_1^{0.5}}{l_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{l_1^{0.5}}{l_2^{0.5}} \right\} \frac{l_2}{l} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 3 \left\{ \left(\frac{f_2^{0.5}}{f^{0.5}} - \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right\}^2 \Bigg\} \\
& \times l n \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}}} \right\} + \left\{ \left(1 - \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right\}^3 \frac{f_2}{f} \\
& + \frac{3}{2} \left\{ \left(\frac{f_2^{0.5}}{f^{0.5}} - \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right\}^2 \Bigg\} \\
\end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
\textcircled{e} = & \frac{1}{18} \frac{f_n^4}{f^4} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \times \frac{1}{\left(\frac{f_2^{0.5}}{f^{0.5}} - \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right)^5} \left[4 \left\{ \left(\frac{f_2^{0.5}}{f^{0.5}} - \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right\}^3 \right. \\
& \times l n \left\{ \left(1 - \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right\} + \frac{1}{3} \frac{f_2^{1.5}}{f^{1.5}} - 2 \frac{f_2^{1.5}}{f^{1.5}} \left\{ \left(1 - \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right\} \\
& + 6 \left\{ \left(1 - \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right\}^2 \frac{f_2^{1.5}}{f^{1.5}} - \left\{ \left(1 - \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right\}^4 \frac{f_2^{1.5}}{f^{1.5}} \\
& \left. - \frac{10}{3} \left\{ \left(\frac{f_2^{0.5}}{f^{0.5}} - \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right\}^3 \right] \\
\end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}
\textcircled{f} = & \left(-\frac{7}{108} - \frac{2}{9} \alpha + \frac{2}{9} \alpha^2 - \frac{2}{27} \alpha^3 \right) \\
& - \frac{f_n^3}{f^3} \frac{2}{9} \frac{E}{f_n} \frac{1}{\left(\frac{f_2^{0.5}}{f^{0.5}} - \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right)^3} \left[\frac{f_2^{0.5}}{f^{0.5}} - 2 \left\{ \left(\frac{f_2^{0.5}}{f^{0.5}} - \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f^{0.5}} \right\} \right. \\
& \times l n \left\{ \left(1 - \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right\} - \left\{ \left(1 - \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{f_1^{0.5}}{f_2^{0.5}} \right\}^2 \frac{f_2^{0.5}}{f^{0.5}} \Bigg] \\
\end{aligned} \tag{3.9}$$

식 (3.3)은 압출이 진행되는 동안에는 그림 3.3.b의 지점 B 위치의 상부 단면에 발생하는 휨모멘트의 크기는 상부단면과 압출추진코와의 휨강성비에 종속되는 것을 알 수 있다. 그러나, 압출이 종료($\alpha=1$)될 때는 강성비에 관계없이 식 (3.10)의 M_B^E 에 수렴한다[안태욱, 2004].

$$M_B^E = (0.045q_2 + 0.089q_1)l_n^2 - 0.107ql^2 \quad (3.10)$$

또한 직사각형 단면으로 제작된 압출추진코의 2단계 압출과정 중 지점 B의 모멘트 M_B^2 를 식 (3.11)과 같이 유도하였다[안태욱, 2004].

$$\frac{M_B^2}{ql^2} = \frac{2}{3} \left(\frac{\textcircled{a}}{\textcircled{f}} + \frac{E}{E_n} \frac{\textcircled{b} + \textcircled{c} + \textcircled{d} + \textcircled{e}}{\textcircled{f}} \right) - \frac{3}{4} \quad (3.11)$$

여기서 ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥는 식 (3.12)~(3.17)과 같다.

$$\begin{aligned} \textcircled{a} = & - \left[\left\{ \frac{7}{108} + \frac{1}{4}\alpha - \frac{1}{4}\alpha^2 + \frac{45}{324}\alpha^3 - \frac{1}{6}\alpha^3(1-\alpha) - \frac{1}{8}\alpha^4 + \frac{1}{9}\alpha^4(1-\alpha) + \frac{1}{18}\alpha^5 \right\} \right. \\ & + \left\{ \frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right\} (1-\alpha)^2 \left(-\frac{1}{12}\alpha^2 + \frac{1}{18}\alpha^3 \right) + \left\{ \frac{1}{2} \frac{q_1}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} \right. \right. \\ & + \left. \left. 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \alpha \frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) \right. \right. \\ & + \left. \left. \alpha \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l} + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \right) \right\} \left(\frac{1}{6}\alpha^2 - \frac{1}{9}\alpha^3 \right) \\ & + \left. \frac{P_D(1-\alpha)}{ql} \left(-\frac{1}{6}\alpha^2 + \frac{1}{9}\alpha^3 \right) + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(-\alpha \frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n} \right) (1-\alpha)^2 \left(-\frac{1}{18}\alpha^2 + \frac{1}{27}\alpha^3 \right) \right] \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\textcircled{b} = -\frac{1}{3} \left\{ \frac{3}{4} \frac{l_n^3}{l^3} + \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{1}{2} \frac{q_1}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 \right) \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \alpha \frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) + \alpha \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l} \right. \\
& + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \left. \right) + \alpha \frac{l_n^3}{l^3} \left(-\frac{2}{3} (1-\alpha) + \frac{2}{3} \right) \\
& - \frac{1}{6} \alpha^2 \frac{l_n^3}{l^3} + \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right) (1-\alpha) \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \alpha \right) \\
& - \frac{1}{6} \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right) (1-\alpha)^2 \\
& + \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(-\alpha \frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n} \right) (1-\alpha) \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6} \alpha \right) \\
& - \frac{1}{6} \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(-\alpha \frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n} \right) (1-\alpha)^2 - \frac{2}{3} P_D (1-\alpha) \frac{l_n^3}{ql^4} + \frac{P_D}{3} (2+\alpha) \frac{l_n^3}{ql^4} \left. \right\} \\
& \times \frac{(l^{1/3})^3}{\{l_2^{1/3} - l_1^{1/3}\}^3} \left[\ln \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{l_1^{1/3}}{l_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{l_1^{1/3}}{l_2^{1/3}}} \right\} \right. \\
& + 2 \cdot \left. \left\{ \left(1 - \frac{l_1^{1/3}}{l_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{l_1^{1/3}}{l_2^{1/3}} \right\} - \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{l_1^{1/3}}{l_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{l_1^{1/3}}{l_2^{1/3}} \right\}^2 - \frac{3}{2} \right]
\end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
\textcircled{c} = & + \frac{1}{3} \frac{l_n^2}{l^2} \left(\frac{1}{2} \frac{q_1}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \cdot \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 \right) \right. \\
& + \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \cdot \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \alpha \cdot \frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) + \alpha \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \right. \\
& - \frac{l_n}{l} + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \left. \right) \left. \right\} \\
& \times \frac{(l^{1/3})^2}{\{l_2^{1/3} - l_1^{1/3}\}^2} \left[-\frac{l^{1/3}}{l_2^{1/3}} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{l^{1/3}}{l_2^{1/3}} - \frac{l_1^{2/3}}{l_2^{2/3}} \cdot \frac{l^{1/3}}{l_1^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{l_1^{2/3}}{l_2^{2/3}} \cdot \frac{l^{1/3}}{l_1^{1/3}} \right\} \right. \\
& + \frac{1}{2} \cdot \left. \frac{1}{\left\{ \left(\frac{l_2^{1/3}}{l_1^{1/3}} - \frac{l_1^{1/3}}{l^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{l_1^{1/3}}{l^{1/3}} \right\}} \right]
\end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\textcircled{d} = + \frac{1}{6} \frac{l_n^4}{l^4} \left\{ \frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right\}$$

$$\begin{aligned}
& \times \frac{(I^{1/3})^4}{\{I_2^{1/3} - I_1^{1/3}\}^4} \left[3 \cdot \left\{ \left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} - \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right\} \right. \\
& \times \ln \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right\} + \frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} - 3 \cdot \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right\}^2 \cdot \frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} \\
& + \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right\}^3 \cdot \frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} + \frac{3}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} - \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right\} \\
& \left. + \frac{3}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} - \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right\} \right] \\
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
\textcircled{e} = & + \frac{1}{18} \frac{I_n^4}{I^4} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \times \frac{(I^{1/3})^5}{\{I_2^{1/3} - I_1^{1/3}\}^5} \cdot \left[6 \cdot \left\{ \left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} - \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right\}^2 \right. \\
& \times \ln \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right\} + \frac{1}{2} \cdot \frac{I_2^{2/3}}{I^{2/3}} - 4 \cdot \left\{ \left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} - \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right\} \cdot \frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} \\
& + 4 \cdot \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right\} \times \left\{ \left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} - \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right\}^2 \\
& \left. - \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right\}^2 \times \left\{ \left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} - \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right\}^2 \right] \\
\end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
\textcircled{f} = & \left(-\frac{7}{108} - \frac{2}{9}\alpha + \frac{2}{9}\alpha^2 - \frac{2}{27}\alpha^3 \right) \\
& \cdot \frac{I_n^3}{I^3} \cdot \frac{2}{9} \frac{E'}{E_n} \cdot \frac{(I^{1/3})^3}{\{I_2^{1/3} - I_1^{1/3}\}^3} \left[\ln \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}} \right\} \right. \\
& \left. + 2 \cdot \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right\} - \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right\}^2 - \frac{3}{2} \right] \\
\end{aligned} \tag{3.17}$$

한편, 식 (3.11)도 압축이 종료($\alpha=1$)될 때는 강성비에 관계없이 식 (3.10)의 M_B^E 에 수렴한다

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 (3.2), 식 (3.3)과 식 (3.11)에 포함된 변수들의 영향을 분석하고자 한다. 식 (3.3)과 식 (3.11)는 압출추진코의 단면형상이 각 각 I형, 직사각형인 경우에 적용되는 식들이다. 일반적으로 대부분의 ILM교량 압출추진코 단면이 I형으로 채택되므로 본 연구에서는 식 (3.2)과 (3.3)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/E 를 식 (4.2)에 의해 6.8359로 고정하여 매개변수에 따른 상호작용을 분석하였다.

$f_{ck} > 300kgf/cm^2$ 인 콘크리트의 탄성계수

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

$$\frac{E_n}{E} = \frac{2.1 \times 10^6}{3000 \times 2.5^{1.5} \sqrt{400} + 70000} = 6.8359 \quad (4.2)$$

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 (3.2)으로, 2단계 압출($0.2 < \alpha \leq 1.0$)은 (3.3)을 이용하여 얻을 수 있다.

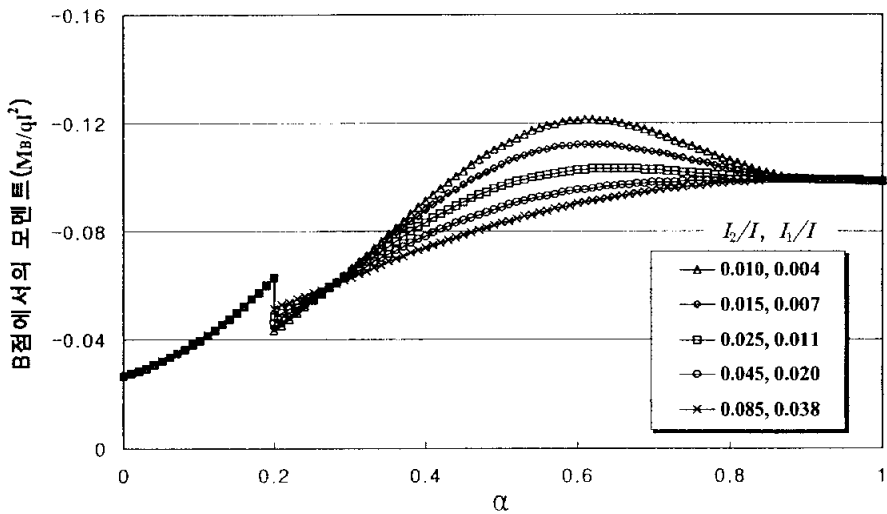


그림 4.1 $l_n/l=0.8$, $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$ 인 경우 압출하는 동안 강성비에 따른 B점의 모멘트

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 탄성점점의 회복으로 정 모멘트가 발생한다. 따라서, 지점 B의 휨 모멘트(부 모멘트) M_B 는 지점 A의 반력에 의한 정 모멘트의 영향으로 일시적으로 감

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

캔틸레버 상태인 $\alpha < 0.2$ 일때는 강성비에 의존하지 않고 압출추진코가 지점 A에 도달한 이후인 2단계 압출과정에서 M_B 는 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 (3.10)의 M_B^E 에 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_B 가 더 크게 나타난다. 따라서, 2단계 압출과정에서의 상부단면력 M_B^2 가 M_B^E 를 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^E 보다 매우 낮다. 이는 상부구조를 압출추진코 없이도 안전하게 캔틸레버 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 캔틸레버 상태일 때의 모멘트가 압출이 끝난 후의 모멘트 즉, M_B^E 보다 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 (3.2)으로, 2단계 압출($0.5 < \alpha \leq 1.0$)은 (3.3)을 이용하여 얻을 수 있다.

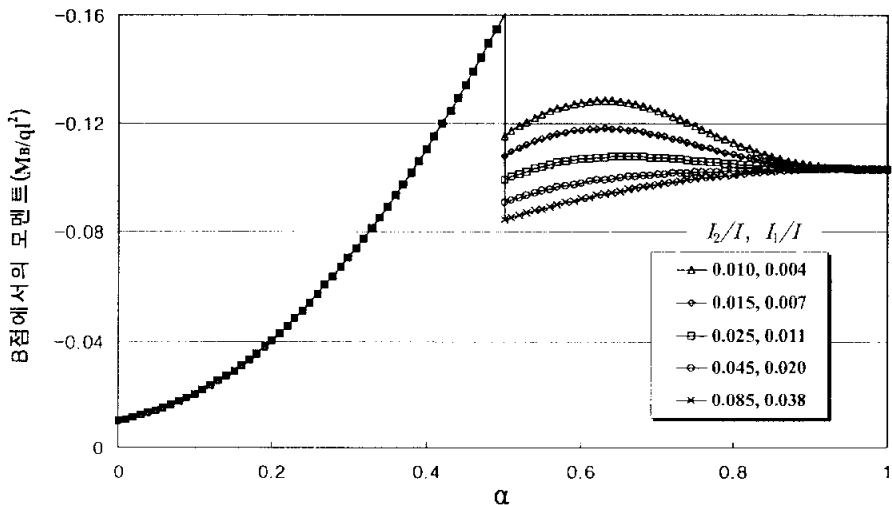


그림 4.2 $l_n/l = 0.5$, $q_2/q = 0.15$, $q_1/q = 0.05$ 인 경우 압출하는 동안 강성비에 따른 B점의 모멘트

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 발생하는 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^2 가 M_B^E 를 초과하지 않도록 하는 압출추진코의 최소 강성비는 시산의 과정을 통해 압출추진코의 길이가 긴 경우의 해석 예제와 일치하는 $L_2/I = 0.045$, $L_1/I = 0.020$ 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(캔틸레버 상태)에서 발생하는 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 발생하는 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.

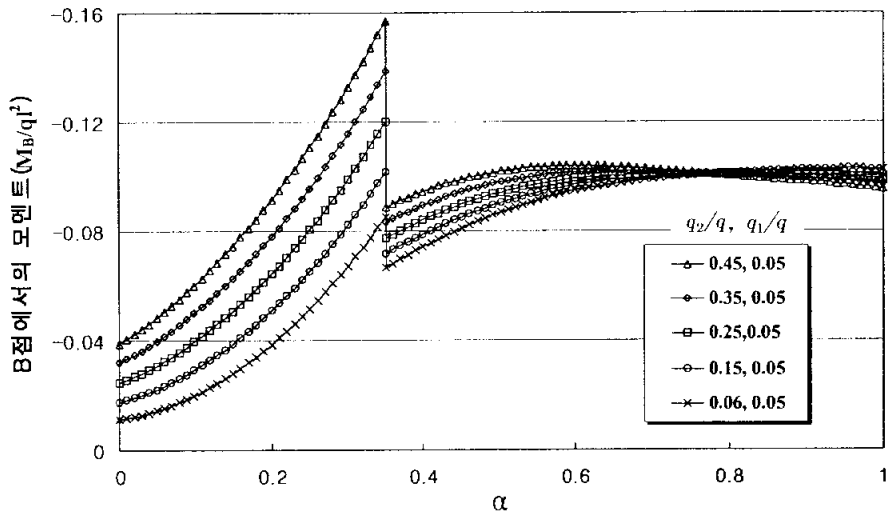


그림 4.3 $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$, $l_n/l=0.65$ 인 경우의 중량비 변화에 따른 모멘트 변화

1단계 압출시, 즉 지점 A에 도달할 때까지인 캔틸레버 상태에서의 M_B 는 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 (3.2)의 M_B^I 의 최대 값과 압축이 완료된 후의 휨 모멘트인 식 (3.10)의 M_B^E 값과의 차이를 가능한 줄일 수 있는 적절한 길이의 압출추진코를 사용하여야 한다. 이 압출추진코의 길이를 최적길이라 정의한다.

식 (3.2)과 식 (3.10)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/q 을 0.17에서 0.03까지 0.01씩 변화시켰고, 이때 q_1/q 는 주어진 q_2/q 의 값에서 0.001까지 0.001씩 감소시키면서 최적길이를 결정하였다. 예를 들어, 맨 첫 번째 경우는 $q_2/q=0.17$, $q_1/q=0.169$ 이고 맨 마지막은 $q_2/q=0.03$, $q_1/q=0.001$ 이다. 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/I 를 0.085에서 0.010까지 0.005씩 변화시키고, I_1/I 의 값은 주어진 I_2/I 의 값에서 0.001까지 0.001씩 감소시키면서 분석하였다. 예를 들어, 맨 첫 번째 경우는 $I_2/I=0.085$, $I_1/I=0.080$ 이고 맨 마지막은 $I_2/I=0.010$, $I_1/I=0.001$ 이다.

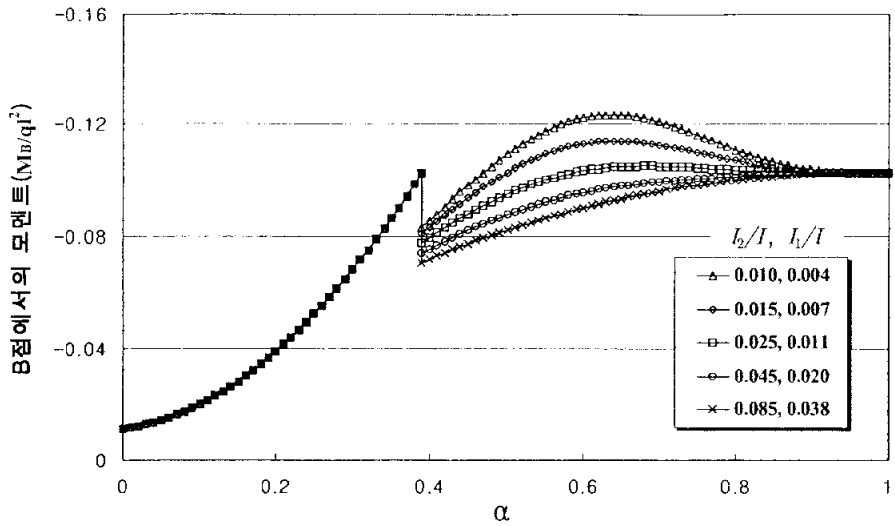


그림 4.4 $q_2/q = 0.08, q_1/q = 0.05, l_n/l = 0.61$ 인 경우 압출하는 동안 강성비에 따른 B점의 모멘트

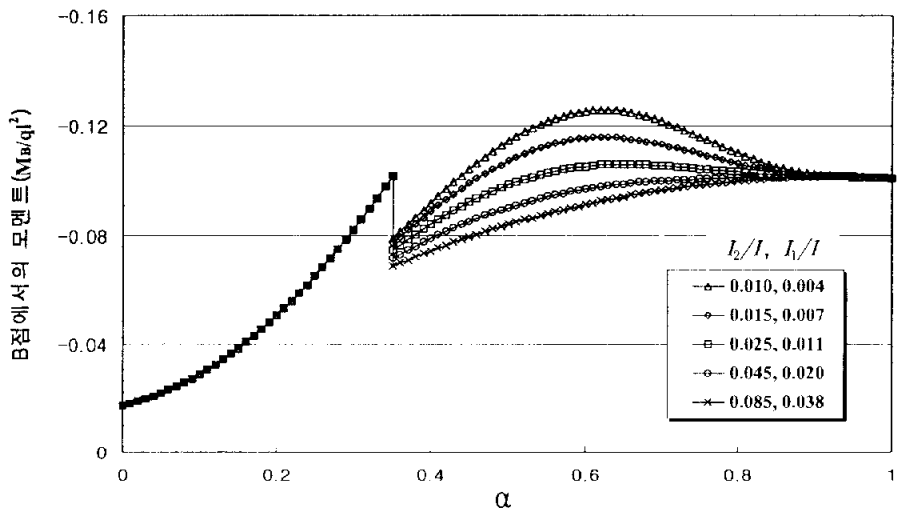


그림 4.5 $q_2/q = 0.15, q_1/q = 0.05, l_n/l = 0.65$ 인 경우 압출하는 동안 강성비에 따른 B점의 모멘트

본 연구에서 산정한 각 중량비 경우별 최적길이들은 부록 표 A.1~ 표 A.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 경우에는 $l_n/l=0.65$ 가 얻어졌다.

그림 4.4와 그림 4.5의 경우 모두에서 2단계 압출시 M_B^E 을 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 고려 되었으므로 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 부 모멘트의 차이가 최소가 되도록 하는 최적의 압출추진코를 설계할 수 있을 것이다.

표 4.1~표 4.3과 그림 4.6~그림 4.8은 그림 4.4와 그림 4.5의 과정을 거쳐 얻어진 각 중량비에 대한 최적길이비의 예를 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 길이비 변화에 따른 최적중량비 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

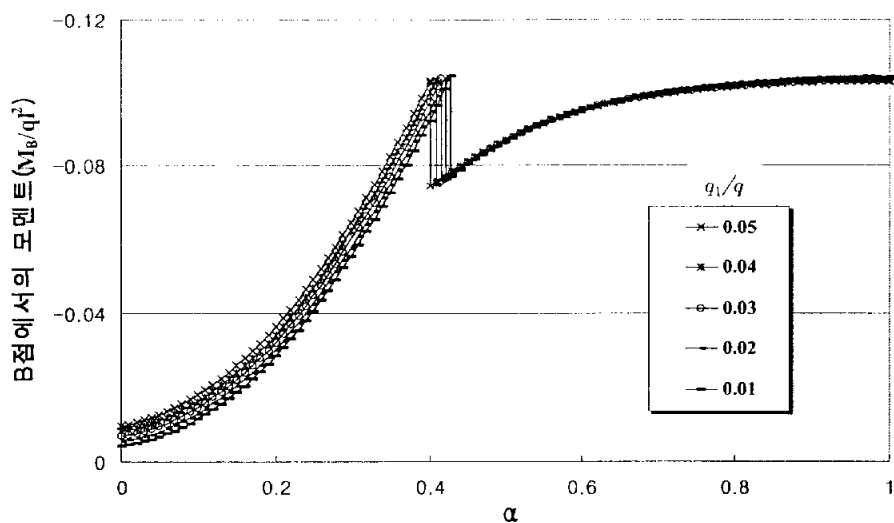


그림 4.6 $q_2/q = 0.06$ 인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한 B점의 모멘트

표 4.2 길이비 변화에 따른 최적중량비 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

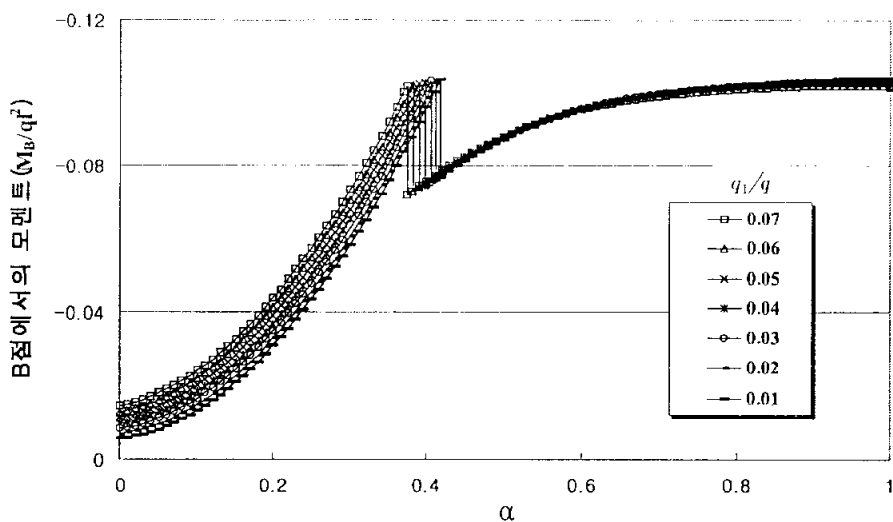


그림 4.7 $q_2/q = 0.08$ 인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한 B점의 모멘트

표 4.3 길이비 변화에 따른 최적중량비 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

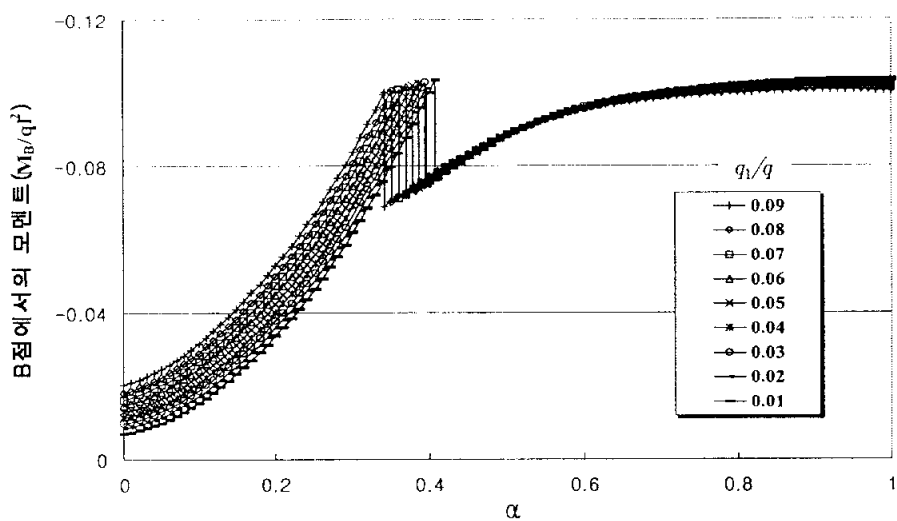


그림 4.8 $q_2/q = 0.1$ 인 경우 최적중량비와 최적길이비에 대한 B점의 모멘트

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.

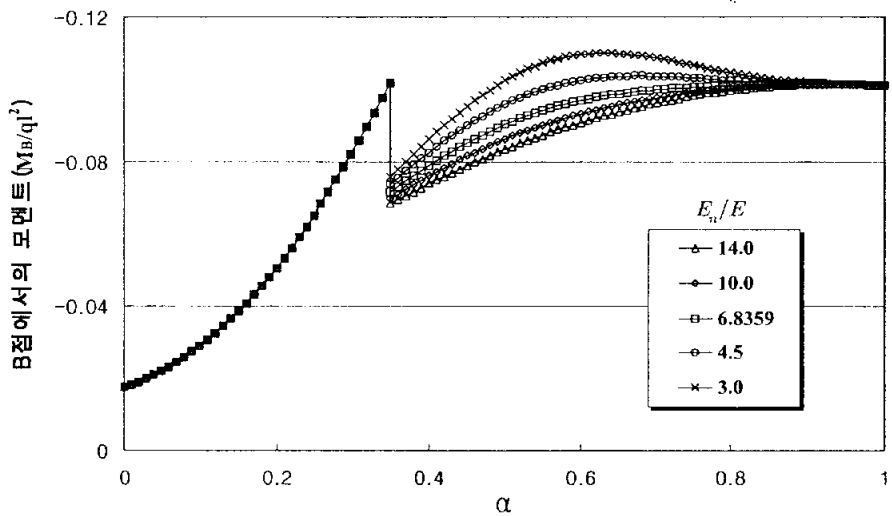


그림 4.9 $l_n/l=0.65$, $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$, $I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.02$ 인
경우 압출하는 동안 탄성계수비에 따른 B점의 모멘트

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 B 지점에서의 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-C 경간에서 발생하는 정 모멘트의 변화를 분석한다.

5.1 지점 C에서의 부모멘트

5.1.1 해석식의 유도

1단계 압출에서 지점 C에 발생하는 상부단면의 휨모멘트를 M_C^I 라 정의하고, M_C^I 를 산정하기 위해 중첩의 원리를 이용한다. 먼저, 그림 5.1(a)와 같은 연속보 구조계의 각 지점에 휨모멘트 M_B , M_C^I , M_D 를 작용시켜, 그림 5.1(b)와 같이 콘크리트 상부의 단위 길이당 자중에 의한 q 와 각 단부에 작용하는 모멘트를 받는 두 개의 단순보로 분리시킨다. 여기서, M_D 는 D지점 이후는 지간길이 l 인 무한개의 연속보로 연결된 것으로 한 기본가정에 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.

$$\theta'_C = -\theta''_C \quad (5.1)$$

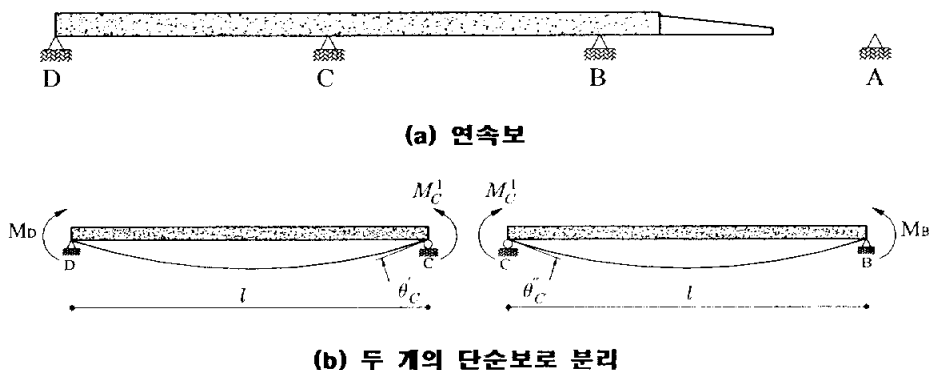


그림 5.1 중첩법의 적용(1단계 압출)

그림 5.1(b)에서 M_B , M_C^1 , M_D 그리고 q 에 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 θ'_C 과 θ''_C 는 식 (5.2), (5.3)과 같이 산정된다.

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

$$\begin{aligned}\theta_C'' &= (\theta_C)M_C^1 + (\theta_C)M_B + (\theta_C)q \\ &= \frac{M_C^1 l}{3EI} + \frac{M_B l}{6EI} + \frac{ql^3}{24EI}\end{aligned}\quad (5.3)$$

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

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

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

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

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

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^1 는 식 (5.7)과 같이 된다.

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

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^I 은 Rosignoli(1998)에 의해 제안된 해석식을 사용하였으며, 이때 중량비는 $q_n/q=0.1$, 강성비 $E_n I_n/EI=0.2$ 를 대입하였다. 예제해석을 위해 적용된 중량비는 Rosignoli(1998)와 문영철(2002)의 연구에서 적용한 중량비이고, 강성비는 그 들이 얻은 최적(최소) 강성비이다.

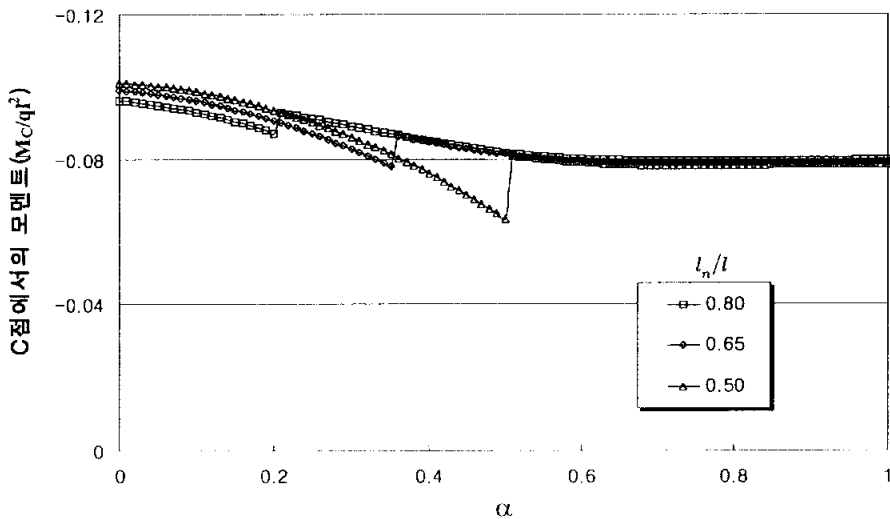


그림 5.2 길이비의 변화에 따른 C지점의 모멘트 변화(등단면 압출추진코)

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. 이 후 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 후 부터는 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_B 값과 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_B 값은 $\alpha=0$ 일 때가 최소이다. 따라서, $M_C \leq M_B$ 의 조건이 되므로 압출 중 M_B 값에 대한 단면의 안전성이 검토되었으면 M_C 값에 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^1 의 계산은 I형단면의 압출추진코에 대하여 본 논문에서 유도된 해석식 (3.2)과 (3.3)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.

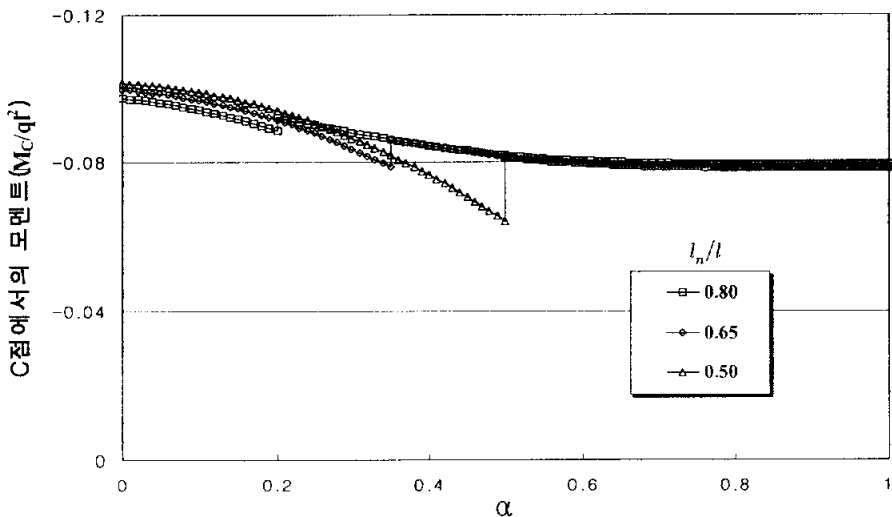


그림 5.3 길이비의 변화에 따른 C지점의 모멘트 변화(변단면 압출추진코)

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 관계 없이 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_B 값과 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_B 값은 $\alpha=0$ 일 때가 최소이다. 따라서, $M_C \leq M_B$ 의 조건이 되므로 압출 중 M_B 값에 대한 단면의 안전성이 검토되었으면 M_C 값에 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_n 이라 하고, 지점 A와 B의 반력을 각각 R_A , R_B 또한 2단계 압출과정 중 지점 B에 발생하는 휨모멘트를 M_B^2 라 하였다.

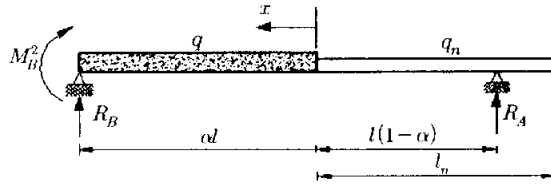


그림 5.4 첫 번째 경간 분리(등단면 압출추진코)

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

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

$$V_x = -R_A + q_n l_n + qx \quad (5.9)$$

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

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

$$x = \frac{R_A}{q} - \frac{q_n}{q} l_n \quad (5.11)$$

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.

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

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 $E_n I_n/EI$ 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^2 는 Rosignoli(1998)가 등단면 압출추진코에 대해 제안한 해석식을 이용하였고, A-B경간의 최대 정 모멘트를 결정하기 위해서는 해석식 식 (5.8)과 (5.12)를 이용하였다.

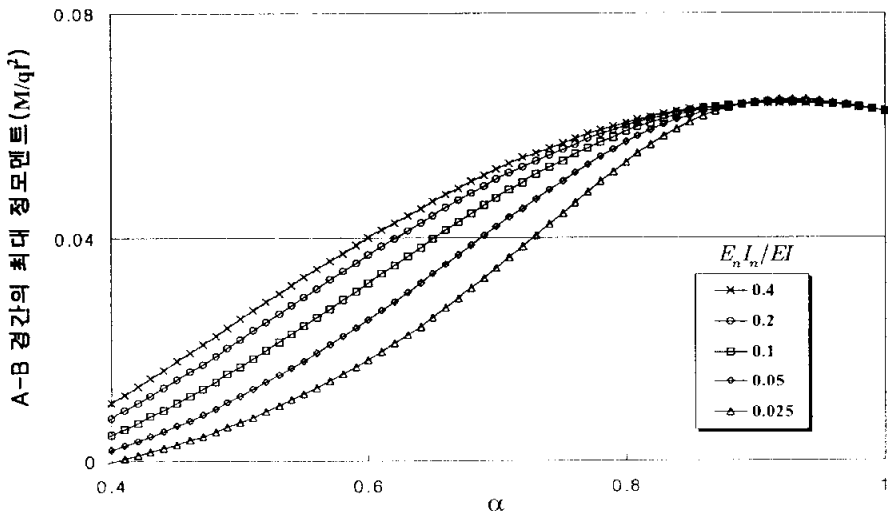


그림 5.5 $l_n/l=0.8$, $q_n/q=0.1$ 일때의 강성비에 따른 첫 번째 경간의 최대 정모멘트의 변화

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_A 의 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 $E_n I_n/EI$ 변화에 따른 첫 번째 경간의 최대 정모멘트 변화를 나타내고 있다. 이때, M_B^2 의 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.

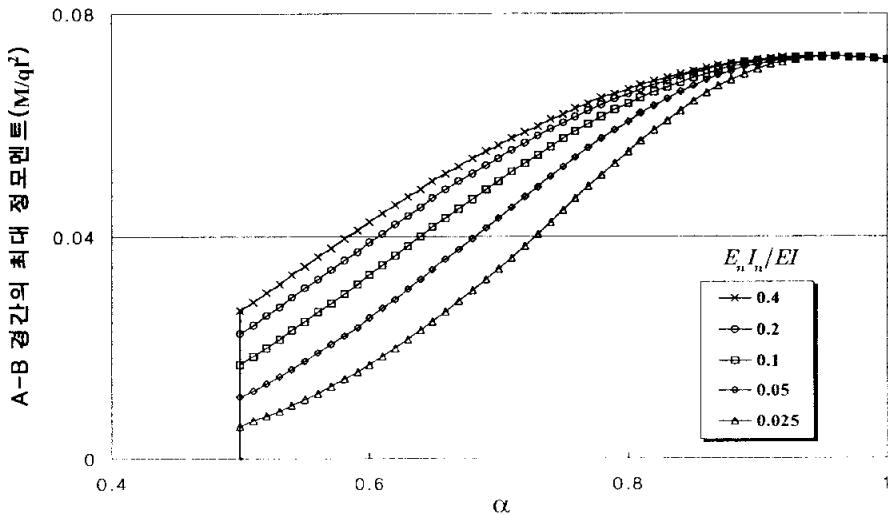


그림 5.6 $l_n/l=0.5$, $q_n/q=0.1$ 일때의 강성비에 따른 첫 번째 경간의 최대 정모멘트의 변화

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_A 의 효과로 오히려 감소하기 시작한다. 한편, 상대적으로 압출추진코의 길이가 짧은 경우의 최대 정 모멘트가 압출추진코가 긴 경우보다 약간 더 높게 나타나는데 이것은 M_A 가 작게 나타나기 때문이다.

그림 5.5와 그림 5.6으로부터 A-B경간의 최대 정 모멘트는 M_B 와 마찬가지로 압출추진코와 상부구조와의 휨강성비에 따라 그 궤적이 달라지는 것을 알 수 있었다. 그러나, M_B 의 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_B 의 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 모멘트로써 M_B 를 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 중량을 각각 q_2 , q_1 이라 하고, 지점 A와 B의 반력을 각각 R_A , R_B 2단계 압출과정 중 지점 B의 휨모멘트를 M_B^2 라 하였다.

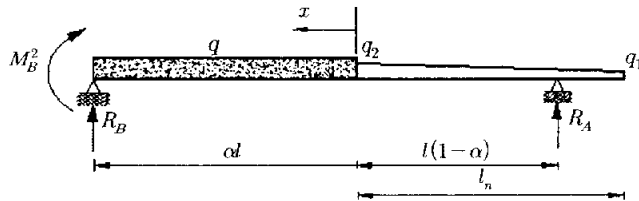


그림 5.7 첫 번째 경간 분리(변단면 압출추진코)

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

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

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

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

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

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

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.

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

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/I 의 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^2 는 I형단면의 압출추진코에 대하여 본 논문에서 유도된 해석식인 식 (3.3)을 이용하였고, A-B경간의 최대 정모멘트를 결정하기 위해서는 식 (5.13)과 (5.17)을 이용하였다.

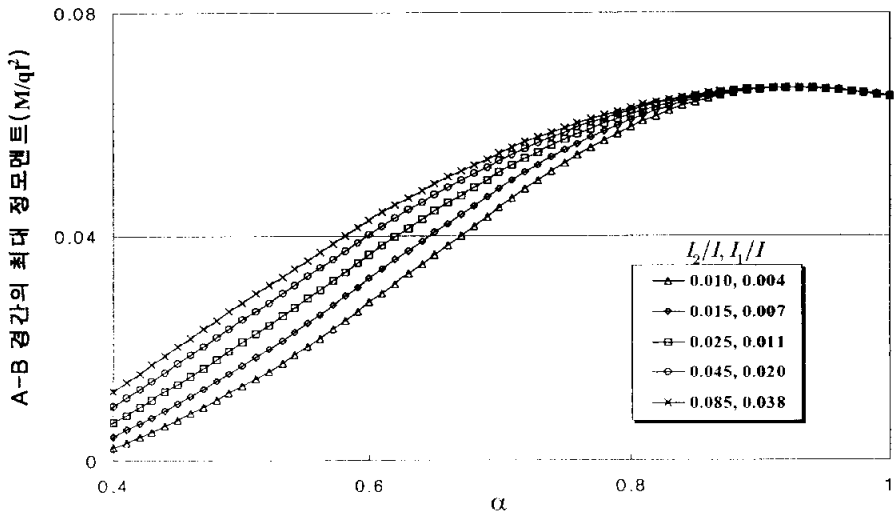


그림 5.8 $l_n/l = 0.8$, $q_2/q = 0.15$, $q_1/q = 0.05$ 일때 첫 번째 경간의 최대 정 모멘트 변화

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_A 의 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/I 의 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^2 의 계산은 I형단면의 압출추진코에 대하여 본 논문에서 유도된 해석식 (3.3)을 이용하였고, A-B경간의 최대 정모멘트를 결정하기 위해서는 해석식 식 (5.13)과 (5.17)을 이용하였다.

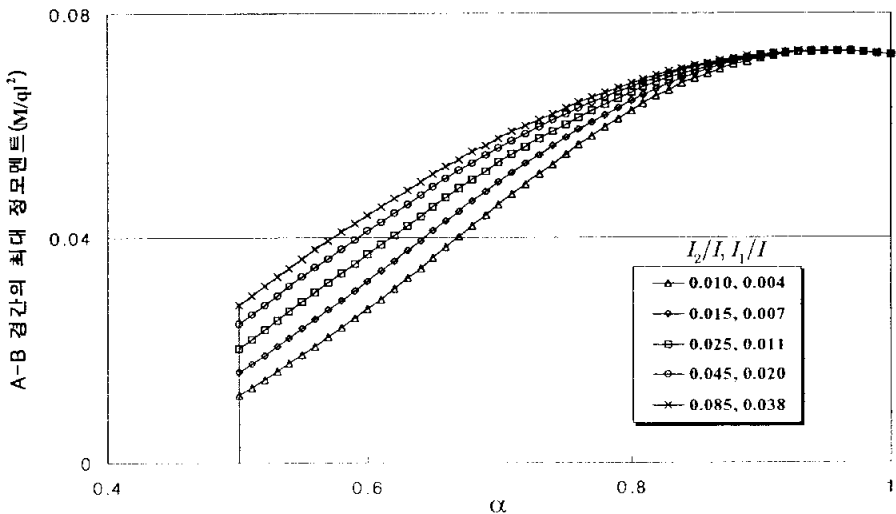


그림 5.9 $l_n/l=0.5$, $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$ 일때 첫 번째 경간의 최대 정 모멘트 변화

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_A 의 효과로 오히려 감소하기 시작한다. 한편, 상대적으로 압출추진코의 길이가 짧은 경우 최대 정 모멘트가 압출추진코가 긴 경우보다 약간 더 높게 나타나는데 이것은 M_A 가 작게 나타나기 때문이다.

그림 5.8과 그림 5.9로부터 A-B경간의 최대 정 모멘트는 M_B 와 마찬가지로 압출추진코와 상부구조와의 휨강성비에 따라 그 궤적이 달라지는 것을 알 수 있었다. 그러나, M_B 의 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_B 의 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_B 을 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.

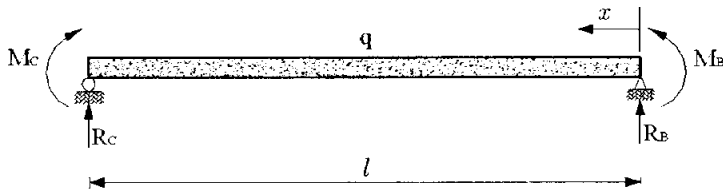


그림 5.10 단순보로 분리

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

$$R_B = -\frac{M_C}{l} + \frac{ql}{2} - \frac{M_B}{l} \quad (5.18)$$

$$V_x = -R_B + qx \quad (5.19)$$

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

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

$$x = \frac{R_B}{q} \quad (5.21)$$

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.

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

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 $E_n I_n/EI$ 에 대한 두 번째 구간 B-C의 최대 정 모멘트를 보여 주고 있다. 이때 식 (5.22)의 M_B 는 Rosignoli(1998)가 제안한 등단면 압출추진코에 대한 해석식을 그리고 M_C 는 식 (5.9)를 대입하였다.

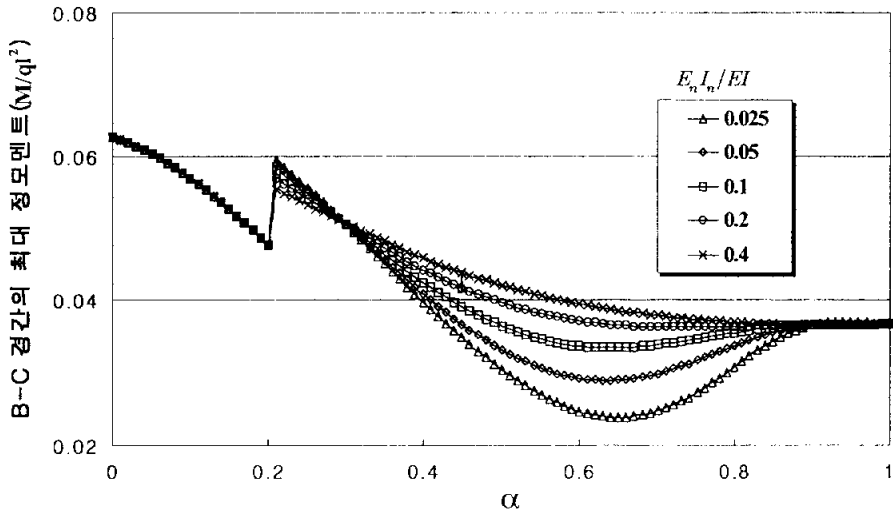


그림 5.11 $l_n/l=0.8$, $q_n/q=0.1$ 일 때 두 번째 구간의 최대 정모멘트 변화

그림 5.11에서와 같이 B-C구간의 최대 정모멘트는 $\alpha=0$ 일 때 가장 큰 값을 나타내고 압출이 진행됨에 따라 감소한다. 그리고 B-C 구간의 최대 정모멘트 값 그림 5.5의 $\alpha=1$ 일 때의 A B 구간의 모멘트 값과 일치한다. 그러나, A-B 구간의 최대 정모멘트는 5.1.2절에서 설명한 바와 같이 $\alpha=0.9$ 근처에서 발생하므로 B-C 구간의 최대 정모멘트는 A-B 구간의 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 압축 중 발생하는 부모멘트와 정모멘트의 최대 절대값에 대하여 안전하도록 설계하고, 그 설계 모멘트로서 M_B 을 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/I 의 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_B 는 I형 압출추진코 단면에 대해 본 논문에서 제안한 해석식 (3.2), (3.3)을 대입하였고, M_C 는 식 (5.9)를 대입하였다.

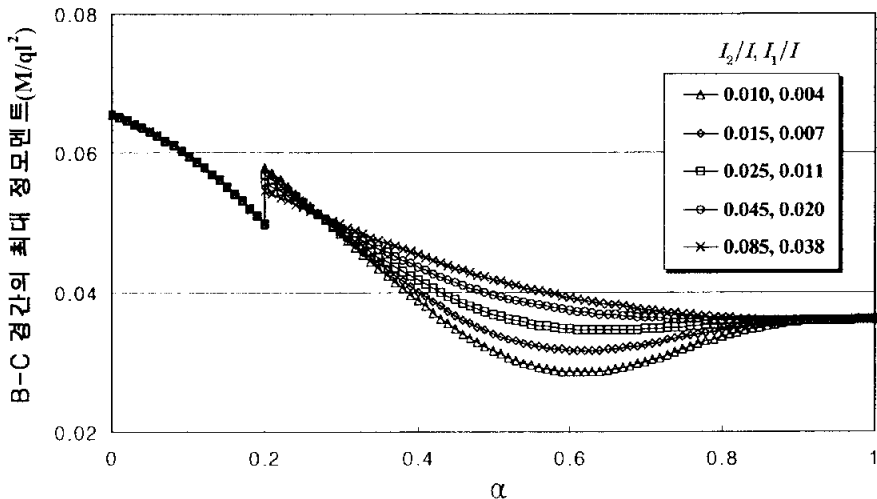


그림 5.12 $l_n/l=0.8$, $q_2/q=0.15$, $q_1/q=0.05$ 일때 두 번째 경간의 최대 정모멘트 변화

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 압축 중 발생하는 부모멘트와 정모멘트의 최대 절대값에 대하여 안전하도록 설계하고, 그 설계 모멘트로서 M_B 을 사용하였다면, B-C 경간에 발생하는 최대 정모멘트에 대하여는 항상 안전성이 확보된다고 할 수 있다.

6. 결 론

프리스트레스트 콘크리트 교량은 그 재료적 특성으로 인하여 공법에 따른 거동변화가 다양하다. 특히 높은 품질을 확보하는데 있어 효과적인 공법으로 인정받아 국내의 여러 현장에서 널리 채택되고 있는 ILM교량의 경우, 시공과정 중 발생하는 일시적 응력을 흡수하기 위해 압출 추진코가 이용되고 있으나, 압출 추진코의 길이, 중량, 강성에 따라 시공과정 중의 부재력 거동이 크게 달라질 수 있으므로, 상부구조와 압출 추진코와의 상호작용에 따른 응력변화를 반드시 고려해야 한다. 본 연구에서는 교량 상부구조와 변단면 압출 추진코의 상호작용을 분석할 수 있도록 유도된 해석식을 바탕으로 각 매개변수에 따른 상부구조의 단면력 변화를 분석하였고 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 기존 연구에서 수행된 교량 상부구조와 압출 추진코의 상호작용을 효율적으로 분석할 수 있는 해석식[안태욱, 2004]을 바탕으로 길이비, 중량비 그리고 강성비 등 각 각의 매개변수들에 따른 상호작용을 수치적으로 분석하였다.
- 2) 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.

3) 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.

4) 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.

부록 A. 중량비와 최적길이비

표 A.1 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.14$) (계속)

q_2/q	q_1/q	l_n/λ	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/λ	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 A.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 A.2 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.12$) (계속)

q_2/q	q_1/q	l_n/λ	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/λ	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 A.2 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.12$)

q_2/q	q_1/q	l_v/λ	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_v/λ	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 A.3 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.10$) (계속)

q_2/q	q_1/q	l_n/λ	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/λ	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 A.3 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.10$)

q_2/q	q_1/q	l_n/λ	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/λ	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 A.4 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.09$) (계속)

q_2/q	q_1/q	l_n/λ	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/λ	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 A.4 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.09$)

q_2/q	q_1/q	l_w/l	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_w/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 A.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 A.6 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.07$)

q_2/q	q_1/q	l_n/λ	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/λ	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 A.7 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.06$)

q_2/q	q_1/q	l_n/λ	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/λ	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 A.8 중량비와 최적길이비($q_2/q = 0.04$)

q_2/q	q_1/q	l_n/λ	M_B/ql^2	q_2/q	q_1/q	l_n/λ	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

- 문영철 (2002). “ILM 공법에 의해 건설되는 PS콘크리트 교량의 거동”, 부경대학교 대학원, 석사학위논문.
- 신현묵 (2003). 프리스트레스트 콘크리트, 동명사.
- 안태욱 (2004). “ 변단면 압출추진코와 교량 상부구조와의 상호작용”, 부경대학교 대학원, 석사학위논문.
- 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.
- 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 Prestressed 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

항상 과거는 "벌써" 또는 "이미"라는 수식어를 가져야만 하는가 봅니다. 대학원 진학한지가 벌써 몇 년, 이렇게 되새겨 봅니다. 직장과 가정, 이 두 가지 명제 속에서 항상 부족한 저를 이끌어 주시고 지도해 주신 지도교수 이환우 교수님과 논문지도를 위해 많은 충고와 관심을 주신 김종수 교수님, 김명식 교수님께 깊이 감사드립니다. 또한 항상 많은 관심으로 지켜봐 주신 김상용 교수님, 장희석 교수님, 손인식 교수님, 이종섭 교수님, 이동욱 교수님, 이종출 교수님, 이영대 교수님, 정진호 교수님, 김수용 교수님, 정두희 교수님, 국승규 교수님, 이상호 교수님께 진심으로 감사드립니다.

또한 항상 바쁜 업무중에서도 논문의 처음에서 끝까지 동반자가 되어주신 구조설계 연구실의 김광양 선배와 후배 안태욱, 강의실에서 만나면 항상 반갑고 힘이 되어준 주철의, 손수진, 배성한님께 감사드립니다.

그리고 학업을 계속할 수 있도록 많은 배려와 도움을 주신 부산지방국토관리청 및 진주국도거창출장소의 선·후배, 동료 여러분께 감사드립니다.

늘 저를 뒷바라지해주신 부모님, 장인·장모님과 집안에 부족하고 소홀함에도 든든한 내조로 지원해주신 아내 지은, 아들 태우에게 이 한편의 논문이 기쁨으로 보답되기를 바랍니다.