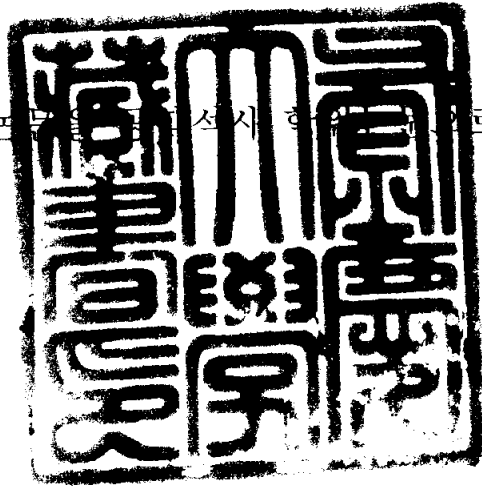


공학석사 학위논문

ILM 상부구조와 변단면 압출 추진코의
상호작용에 관한 사례분석

지도교수 이 환 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2004년 8월

부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

주 철 의

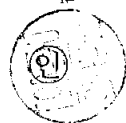
이 논문을 주철의의 공학석사
학위논문으로 인준함

2004년 6월 19일

주 심 공 학 박 사 김 명 식



위 원 공 학 박 사 국 승 규



위 원 공 학 박 사 이 환 우



목 차

1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구범위	2
2. ILM교량 공법	3
2.1 ILM공법의 개요	3
2.2 ILM공법의 특징	6
2.2.1 장점	6
2.2.2 장점	6
3. 상호작용 분석을 위한 해석 모델	8
3.1 압출진행에 따른 상부구조 단면력 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. 사례연구	21
4.1 상호작용을 고려한 설계식	22
4.1.1 중량비와 최적 길이비	22
4.1.2 설계 단면력과 최적 중량비	27
4.1.3 설계 단면력과 최적 길이비	32
4.2 사례교량 압출추진코의 설계현황 분석	37

4.2.1 사례교량	37
4.2.2 중량비와 길이비에 대한 검토	38
4.2.3 설계 단면력과 중량비에 대한 검토	41
4.2.4 설계 단면력과 길이비에 대한 검토	44
4.3 상호작용을 고려한 최적설계	47
4.3.1 단면력 궤적의 분석	47
4.3.2 최적설계	53
4.4 강성비와 중량비 변화에 따른 영향	61
 5. 결 론	 63
 참고문헌	 65
 감사의 글	 67

그림 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 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.04$)	22
그림 4.2 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.06$)	23
그림 4.3 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.07$)	23
그림 4.4 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.08$)	24
그림 4.5 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.09$)	24
그림 4.6 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.10$)	25
그림 4.7 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.12$)	25
그림 4.8 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q=0.14$)	26
그림 4.9 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.04$)	27
그림 4.10 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.06$)	28
그림 4.11 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.07$)	28
그림 4.12 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.08$)	29
그림 4.13 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.09$)	29
그림 4.14 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.10$)	30
그림 4.15 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.12$)	30
그림 4.16 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q=0.14$)	31

그림 4.17 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.04$)	32
그림 4.18 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.06$)	33
그림 4.19 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.07$)	33
그림 4.20 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.08$)	34
그림 4.21 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.09$)	34
그림 4.22 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.10$)	35
그림 4.23 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.12$)	35
그림 4.24 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q=0.14$)	36
그림 4.25 조사교량과 설계식과의 비교	38
그림 4.26 조사교량과 설계식과의 비교	41
그림 4.27 조사교량과 설계식과의 비교	44
그림 4.28 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(A교량)	48
그림 4.29 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(B교량)	48
그림 4.30 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(C교량)	49
그림 4.31 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(D교량)	49
그림 4.32 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(E교량)	50
그림 4.33 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(F교량)	50
그림 4.34 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(G교량)	51
그림 4.35 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(H교량)	51
그림 4.36 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(I교량)	52
그림 4.37 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(A교량)	54
그림 4.38 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(B교량)	54
그림 4.39 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(C교량)	55
그림 4.40 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(D교량)	55
그림 4.41 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(E교량)	56

그림 4.42 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(F교량)	56
그림 4.43 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(G교량)	57
그림 4.44 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(H교량)	57
그림 4.45 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(I교량)	58
그림 4.46 조사교량의 강성비 변화에 따른 M_B 분포	61
그림 4.47 조사교량의 중량비 변화에 따른 M_B 분포	62

표 목 차

표 4.1 조사된 교량들의 제원(지간장=50m)	37
표 4.2 최대모멘트와 길이비	58

**Case Study on the Interaction Behavior
between Superstructure and Launching Nose of Tapered Section**

Chel-Eui Ju

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

Abstract

In case of prestressed concrete bridges, the change of structural behavior is frequent according to construction method and procedure. Thus bridge engineers are required not only to interpret construction process precisely and but also to understand and apply the results practically, and there have been many relevant researches.

The ILM(Incremental Launching Method) bridge, which is one of the PS concrete bridge is widely adopted in construction sites in Korea owing to its effectiveness for quality control. But most of researches in Korea are limited in specific construction methods such as FCM(Free Cantilever Method) and MSS(Movable Scaffolding System). As a result, there is few research materials available for most technicians engaged in planning and conducting construction in the field of ILM bridge.

In reality the design and construction of ILM bridges are usually following previous cases repeatedly instead of making efforts to find optimal results through comparing alternatives in span division and the like.

Thus this study proposed a design formula that bridge engineers can apply handily using the interpretation formula(Ahn, 2004) derived for the characteristics of behavior considering the construction process of ILM bridges compared to other

construction methods and for the characteristic of ILM construction method 'Nose-Deck Interaction of ILM Bridge Proceeding with Tapered Sectional Launching Nose' and optimal parameters(Kim, 2004) obtained from parameter interpretation.

In addition, this study collected data on the design of bridges constructed using ILM construction method on OO Expressway, and examined the design level of ILM bridges using an interpretation formula that can predict the change of the sectional force of superstructure under the process of launching.

key words : incremental launching method, structural behavior, design formula,
optimal parameters, design level

1. 서 론

1.1 연구배경

프리스트레스트 콘크리트 교량의 경우, 시공방법과 절차에 따라 교량의 구조적 거동변화가 빈번하다. 따라서, 시공과정을 고려한 정밀 해석은 물론 그 결과의 실용적인 이해와 활용이 교량실무자들에게 요구되는바 이에 필요한 많은 연구들이 수행되었다.

프리스트레스트 콘크리트 교량공법 중의 하나인 ILM(incremental launching method)교량의 경우도 높은 품질을 확보하는데 있어 효과적인 공법으로 인정받아 국내의 여러 현장에서 널리 채택되고 있다. 그러나, 프리스트레스트 콘크리트 교량에 관한 국내의 대부분 기존 연구결과들이 범용의 프리스트레스트 콘크리트 구조해석을 위한 이론적 연구이거나 응용결과가 FCM(free cantilever method)등의 공법에 국한되어 있어, ILM 교량의 설계와 시공 실무에서 다수의 기술자들이 간편하게 이용할 수 있는 연구자료들이 제공되지 못하고 있는 실정이다. 이에 따라 ILM 교량의 설계와 시공은 경간분할 등에 있어 대안 비교를 통한 최적의 결과를 찾는 노력을 기울이기보다, 과거의 전례를 반복적으로 답습하는 것이 현실이다.

따라서 타 공법과 비교되는 ILM 교량의 시공과정을 고려한 거동 특성과 ILM공법의 특징인 변단면 압출 추진코의 사용에 따른 상부구조와의 상호작용에 관하여 유도된 해석식[안태욱, 2004]과 시행착오의 과정을 통해 얻어진 최적의 매개변수[김영조, 2004]을 이용하여 교량 실무 기술자들이 손쉽게 이용할 수 있는 설계식을 제시하고자 한다.

1.2 연구범위

본 연구에서는 ILM 교량의 변단면 압출 추진코(launching nose)와 상부구조와의 상호작용의 분석을 분석하기 위해 도입된 해석식[안태욱, 2004]과 교량 상부구조를 최적화 시킬 수 있는 매개변수[김영조, 2004]를 이용하여 설계 실무자들이 손쉽게 이용할 수 있는 설계식을 제시하고자 한다.

그리고, 국내의 00고속도로에서 ILM공법으로 건설된 교량들의 설계자료를 수집하고 압출진행 중의 상부구조 단면력 변화를 예측할 수 있는 해석식[안태욱, 2004]을 이용하여, 현재 공용중인 ILM교량의 설계수준을 검토하였으며, 본 연구에서 제안된 매개변수 별 설계식의 결과와 비교하여 제안된 설계식의 유용성과 적절성을 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.

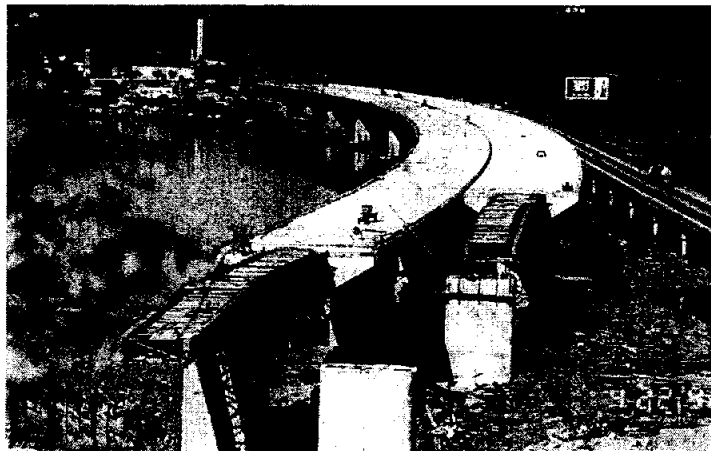


사진 2.1 ILM공법 교량

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.

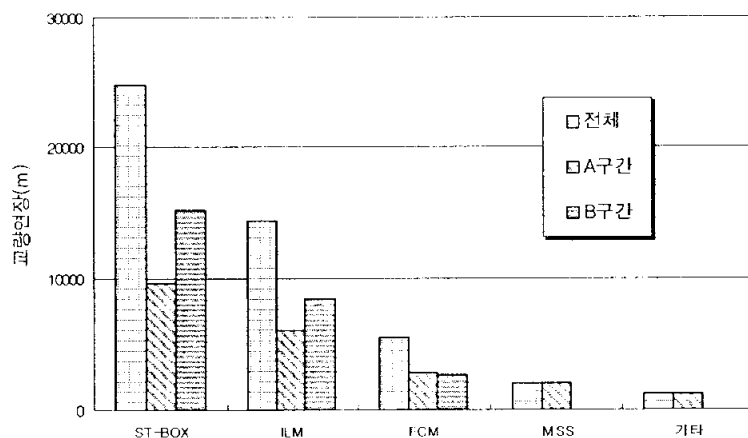


그림 2.1 A, B고속도로 구간의 교량 형식별 분류

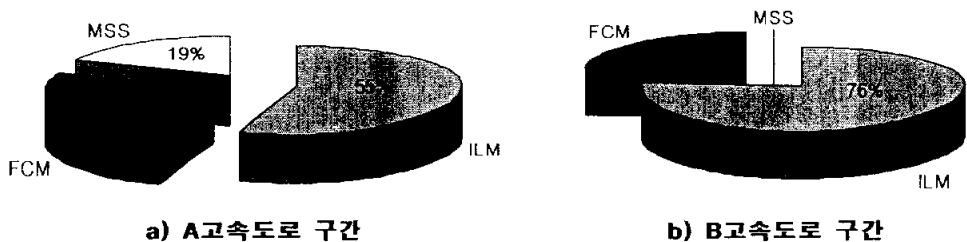


그림 2.2 PSC교량의 점유율

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 Restcl 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.

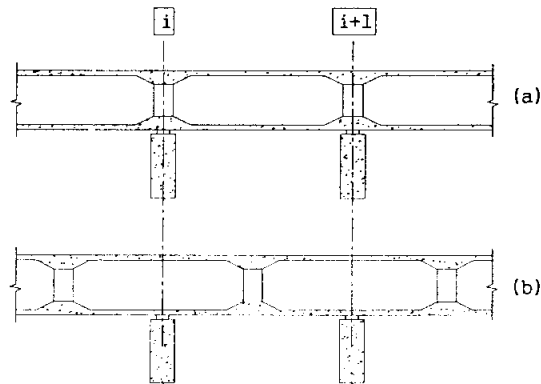


그림 3.1 압출되는 동안의 대표적인 단면위치

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 위치 할 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.

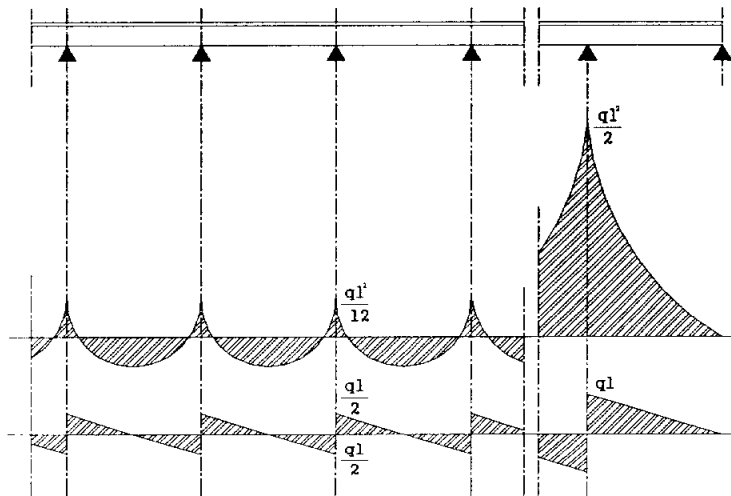


그림 3.2 압출 종료직전의 휨모멘트도 및 전단력도

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 트러스나 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.

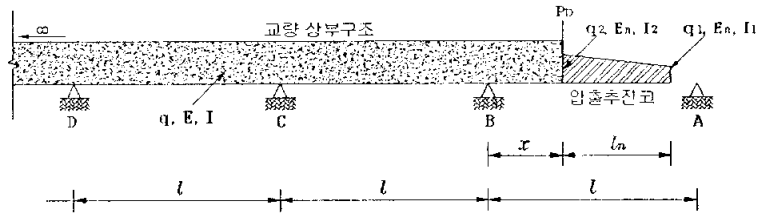
3.2 매개변수(parameter) 및 기본가정

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

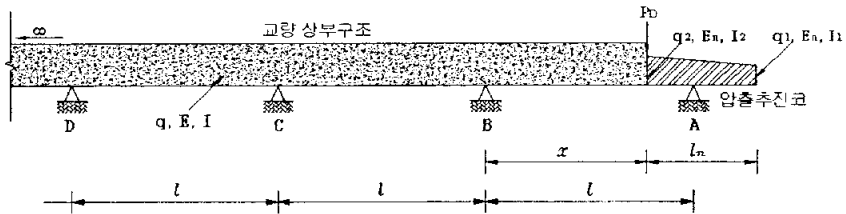
- 1) 교량구조(l)의 지간길이에 대한 압출추진코(l_n)의 길이비 ; $\frac{l_n}{l}$
- 2) 교량구조(q)와 압출추진코(q_1, q_2)의 단위 길이당 중량비 ; $\frac{q_1}{q}, \frac{q_2}{q}$
- 3) 교량구조(I)와 압출추진코(I_1, I_2)의 강성비 ; $\frac{I_1}{I}, \frac{I_2}{I}$
- 4) 교량구조(E)와 압출추진코(E_n)의 탄성계수비 : $\frac{E_n}{E}$

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.

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

3.3.2 2단계 압출(M_B^2/ql^2)

압출 추진코가 지점 A에 도달하게 되면 압출 추진코의 끝은 교각의 지점반력에 의해 처짐이 회복된다. 이러한 탄성처짐의 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.

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
\textcircled{d} = & + \frac{1}{6} \frac{l_n^4}{l^4} \left\{ \frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right\} \\
& \times \frac{1}{\left(\frac{l_2^{0.5}}{l^{0.5}} - \frac{l_1^{0.5}}{l^{0.5}} \right)^4} \left[0.5 \frac{I_2}{I} - 3 \left\{ \left(1 - \frac{l_1^{0.5}}{l_2^{0.5}} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{l_1^{0.5}}{l_2^{0.5}} \right\} \frac{I_2}{I} \right]
\end{aligned}$$

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

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

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

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 $\textcircled{a}$, $\textcircled{b}$, $\textcircled{c}$, $\textcircled{d}$, $\textcircled{e}$, $\textcircled{f}$ 는 식 (3.12)~(3.17)과 같다.

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

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

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \alpha \frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) + \alpha \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 - \frac{l_n}{l} \right. \\
& \left. + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \right) + \alpha \frac{l_n^3}{l^3} \left(-\frac{2}{3} (1-\alpha) + \frac{2}{3} \right) \\
& - \frac{1}{6} \alpha^2 \frac{l_n^3}{l^3} + \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right) (1-\alpha) \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \alpha \right) \\
& - \frac{1}{6} \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_1}{q} + \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(1 + \alpha \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) \right) (1-\alpha)^2 \\
& + \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(-\alpha \frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n} \right) (1-\alpha) \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6} \alpha \right) \\
& - \frac{1}{6} \frac{l_n^3}{l^3} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(-\alpha \frac{l}{l_n} + \frac{l}{l_n} \right) (1-\alpha)^2 - \frac{2}{3} P_D (1-\alpha) \frac{l_n^3}{ql^4} + \frac{P_D}{3} (2+\alpha) \frac{l_n^3}{ql^4} \Big\} \\
& \times \frac{(I^{1/3})^3}{\{I_2^{1/3} - I_1^{1/3}\}^3} \left[\ln \left\{ \frac{1}{\left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}}} \right\} \right. \\
& \left. + 2 \cdot \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right\} - \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I_2^{1/3}} \right\}^2 - \frac{3}{2} \right]
\end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
\textcircled{c} = & + \frac{1}{3} \frac{l_n^2}{l^2} \left\{ \frac{1}{2} \frac{q_1}{q} \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \cdot \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 \right) \right. \\
& + \frac{1}{6} \left(\frac{q_2}{q} - \frac{q_1}{q} \right) \left(\frac{l_n^2}{l^2} - 2 \cdot \frac{l_n}{l} (1-\alpha) + (1-\alpha)^2 + \alpha \cdot \frac{l_n}{l} - 2\alpha(1-\alpha) + \alpha \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \right. \\
& \left. \left. - \frac{l_n}{l} + 2(1-\alpha) - \frac{l}{l_n} (1-\alpha)^2 \right) \right\} \\
& \times \frac{(I^{1/3})^2}{\{I_2^{1/3} - I_1^{1/3}\}^2} \left[-\frac{I^{1/3}}{I_2^{1/3}} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{I^{1/3}}{I_2^{1/3}} - \frac{I_1^{2/3}}{I_2^{2/3}} \cdot \frac{I^{1/3}}{I_1^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{2/3}}{I_2^{2/3}} \cdot \frac{I^{1/3}}{I_1^{1/3}} \right\} \right. \\
& \left. + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\left\{ \left(\frac{I_2^{1/3}}{I^{1/3}} - \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right) \left(1 + \alpha \cdot \frac{l}{l_n} - \frac{l}{l_n} \right) + \frac{I_1^{1/3}}{I^{1/3}} \right\}} \right]
\end{aligned} \tag{3.14}$$

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

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

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

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

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

4. 사례연구

압출 추진코와 교량 상부구조의 상호작용 분석을 위해 그림 3.3과 3.4와 같은 해석모델이 도입되었으며, 이 과정에서 매개변수로 q_2/q , q_1/q , I_2/I , I_1/I , 그리고 l_n/l 을 고려하여 압출 과정 중 지점 B에 발생하는 단면력 M_B 의 변화를 효과적으로 예측할 수 있는 해석식 (3.2), 식 (3.3), 그리고 식 (3.11)이 유도되었다.

그리고, I형 단면의 압출추진코에 대한 해석식인 식 (3.2), 식 (3.3)을 바탕으로 각 매개변수에 따른 상부구조의 단면력 변화를 분석하였으며, 그 결과 강성비 변화는 압출 2단계시 단면력 변화에만 영향을 미치고, 압출 완료 후의 지점 B에 발생하는 M_B 는 강성비에 관계없이 항상 일정한 것으로 나타났다. 또한, 압출 2단계시 단면력이 압출 완료후의 단면력을 초과하지 않게 하는 최소강성비는 $I_2/I = 0.045$, $I_1/I = 0.002$ 로 분석되었으며, 상부구조의 단면력 변화를 가장 효과적으로 제어할 수 있는 중량비에 따른 최적 길이비는 김영조(2004) 논문을 통해 제시되었다.

4.1 상호작용을 고려한 설계식

4.1.1 중량비와 최적길이비

김영조(2004) 논문을 통해 제시된 중량비 q_2/q , q_1/q 에 따른 최적 길이비 데이터를 이용하여 그림 4.1~그림 4.8과 같이 회귀분석을 실시하였다. 그 결과 상호작용에 대한 설계식을 식 (4.1)~식 (4.8)과 같이 제안하였다. 여기서 제안된 설계식들은 모두 압축 추진코와 상부구조의 탄성계수비 E_n/E 가 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 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 26.293\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 - 0.597\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.614\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.557 \quad (4.1)$$

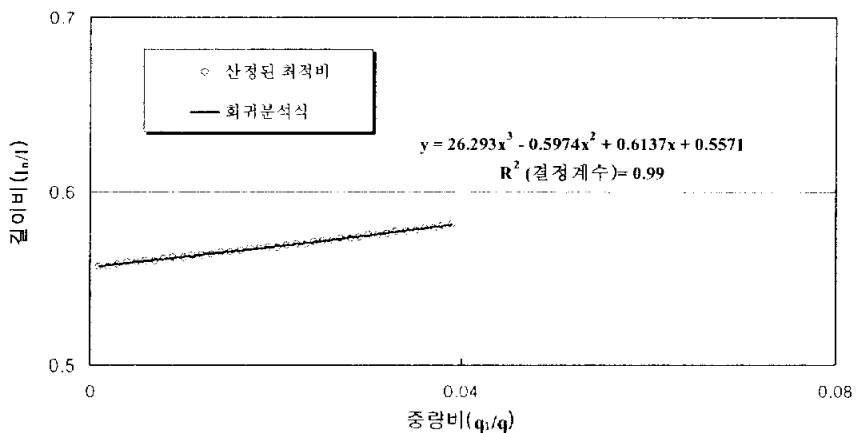


그림 4.1 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.04$)

$q_2/q=0.06$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = -4.696\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 1.734\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.589\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.566 \quad (4.2)$$

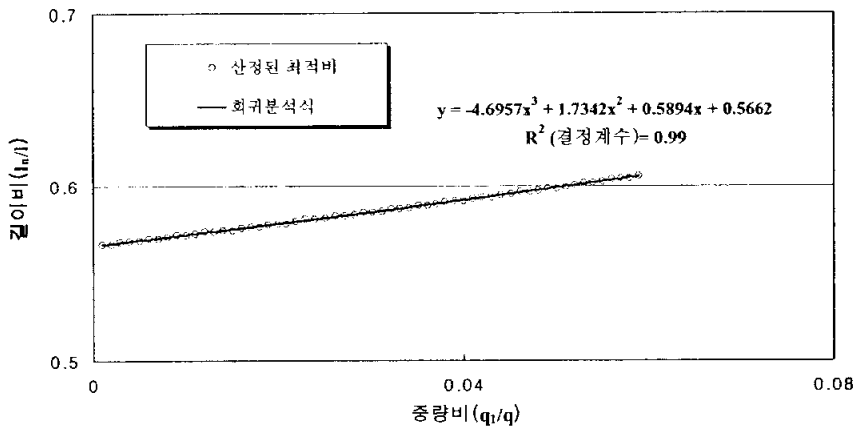


그림 4.2 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.06$)

$q_2/q=0.07$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 7.059\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.633\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.634\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.571 \quad (4.3)$$

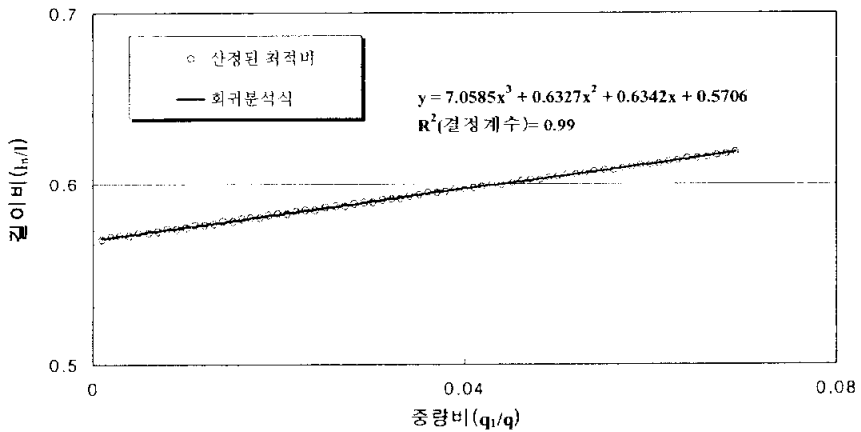


그림 4.3 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.07$)

$q_2/q=0.08$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 1.238\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 1.347\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.631\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.575 \quad (4.4)$$

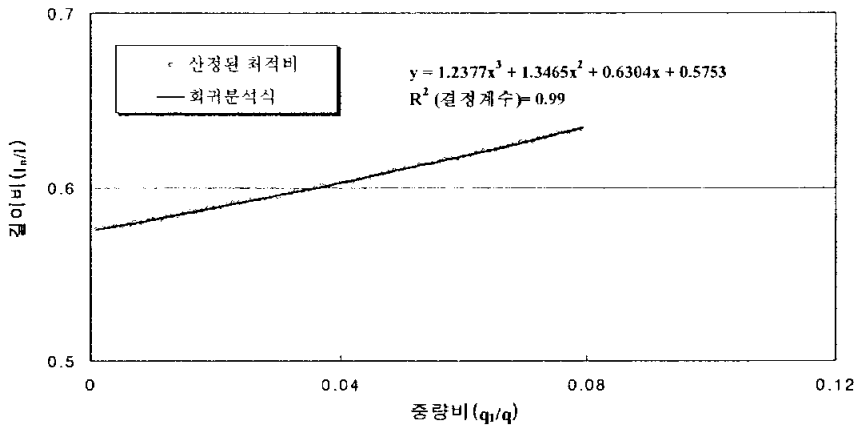


그림 4.4 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.08$)

$q_2/q=0.09$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 5.949\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.952\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.653\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.58 \quad (4.5)$$

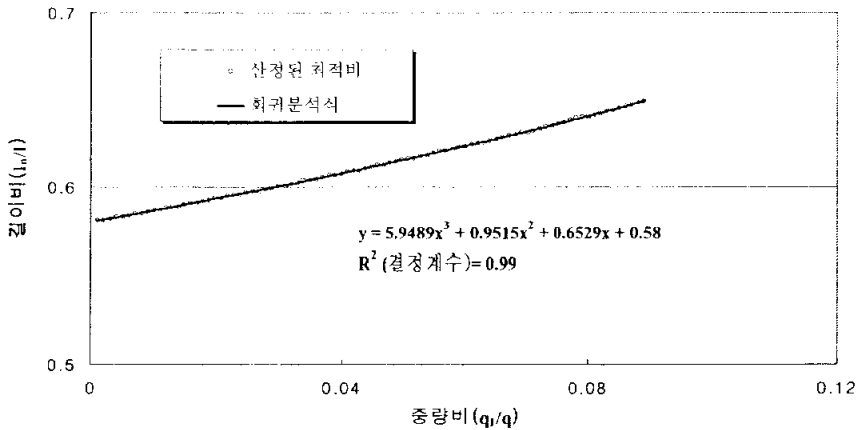


그림 4.5 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.09$)

$q_2/q=0.10$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 8.555\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.675\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.683\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.585 \quad (4.6)$$

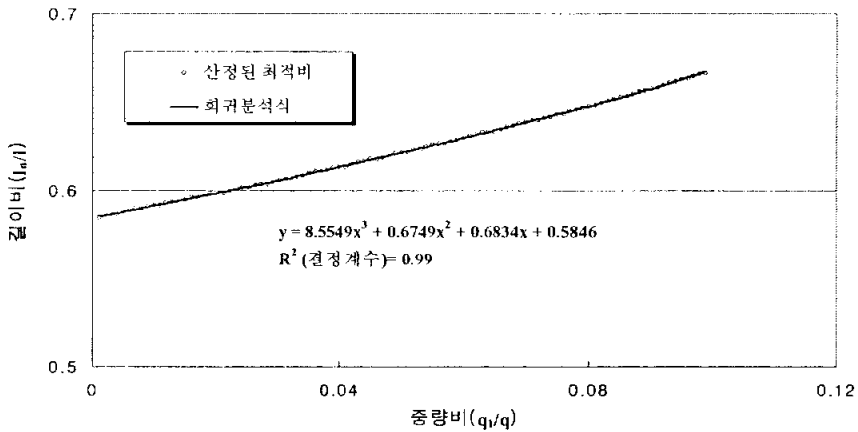


그림 4.6 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.10$)

$q_2/q=0.12$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 10.256\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.649\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.718\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.595 \quad (4.7)$$

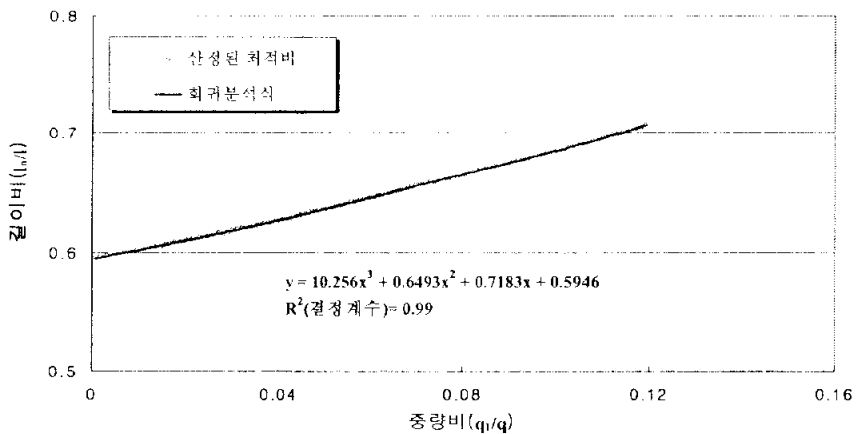


그림 4.7 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.12$)

$q_2/q = 0.14$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 16.293\left(\frac{q_1}{q}\right)^3 + 0.003\left(\frac{q_1}{q}\right)^2 + 0.784\left(\frac{q_1}{q}\right) + 0.605 \quad (4.8)$$

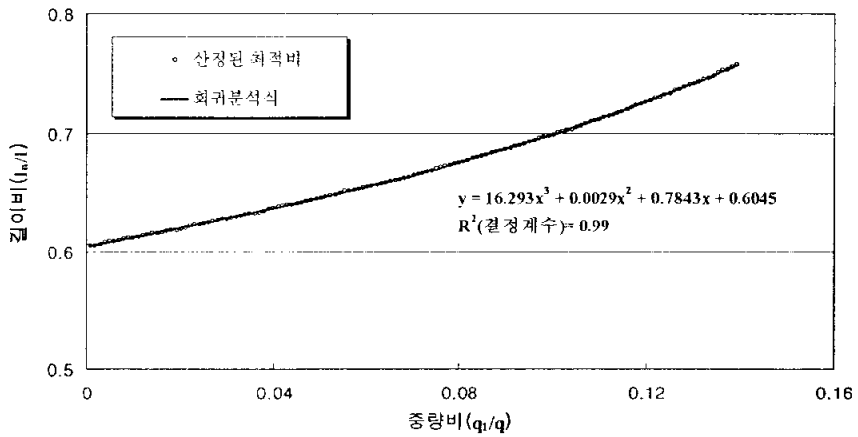


그림 4.8 중량비와 최적길이비와의 관계($q_2/q = 0.14$)

4.1.2 설계 단면력과 최적 중량비

김영조(2004) 논문을 통해 제시된 최적 중량비와 지점 B의 모멘트와의 관계를 나타내는 결과를 이용하여 그림 4.9~그림 4.16와 같이 회귀분석을 실시한 후, 설계식 식 (4.9)~식 (4.16)을 제안하였다. 여기서 제안된 설계식의 이용은 압출 추진코와 상부구조의 탄성계수비 E_n/E 가 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 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = -3 \times 10^6 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 - 961129 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 - 100256 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right) - 3484.9 \quad (4.9)$$

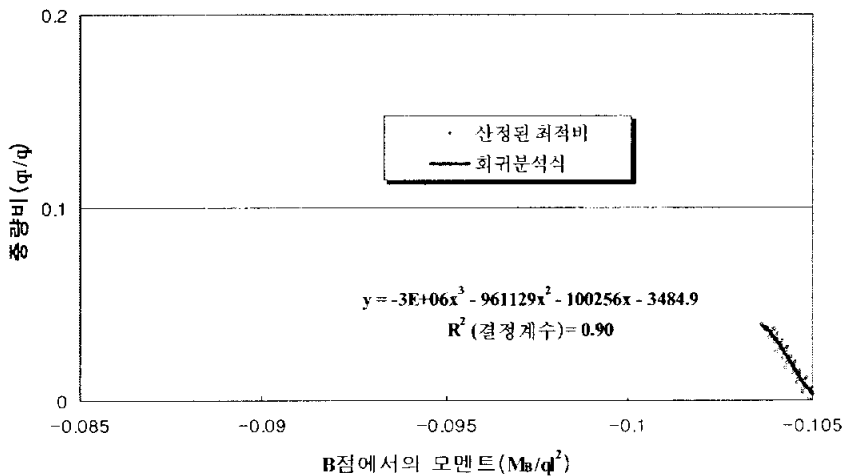


그림 4.9 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.04$)

$q_2/q = 0.06$ 일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = -3 \times 10^6 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 - 944322 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 - 98041 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right) - 3391.9 \quad (4.10)$$

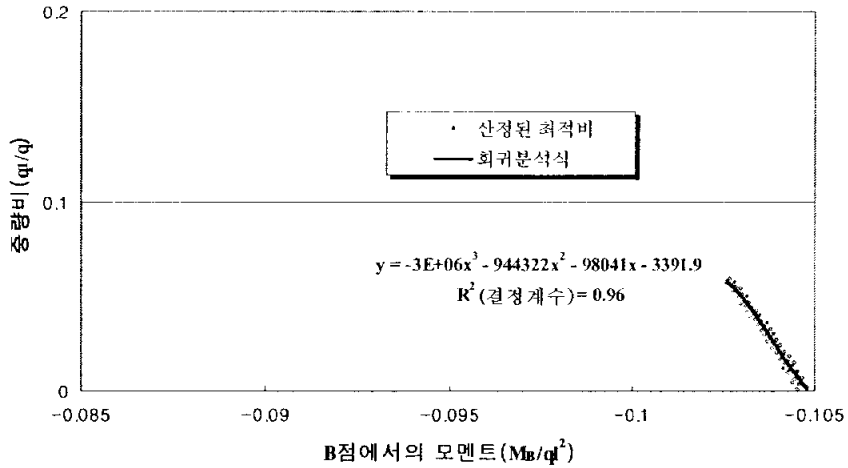


그림 4.10 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.06$)

$q_2/q = 0.07$ 일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = -2 \times 10^6 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 - 573654 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 - 59342 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right) - 2045.2 \quad (4.11)$$

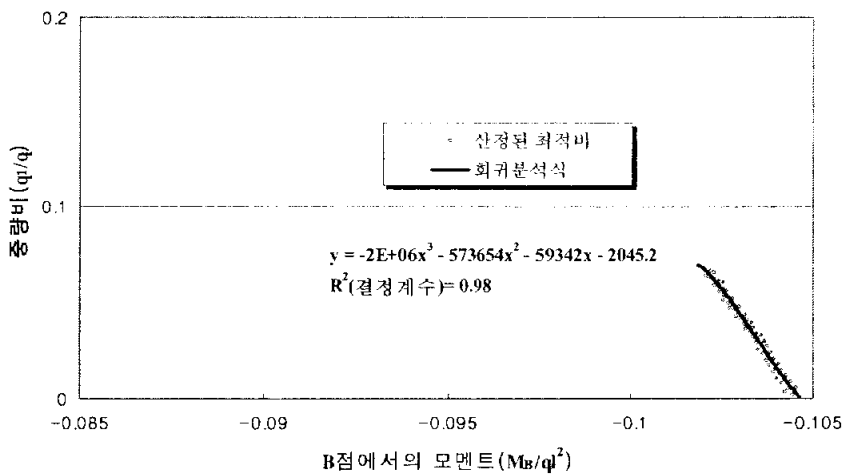


그림 4.11 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.07$)

$q_2/q = 0.08$ 일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = -492728\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 - 153116\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 - 15834\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) - 544.85 \quad (4.12)$$

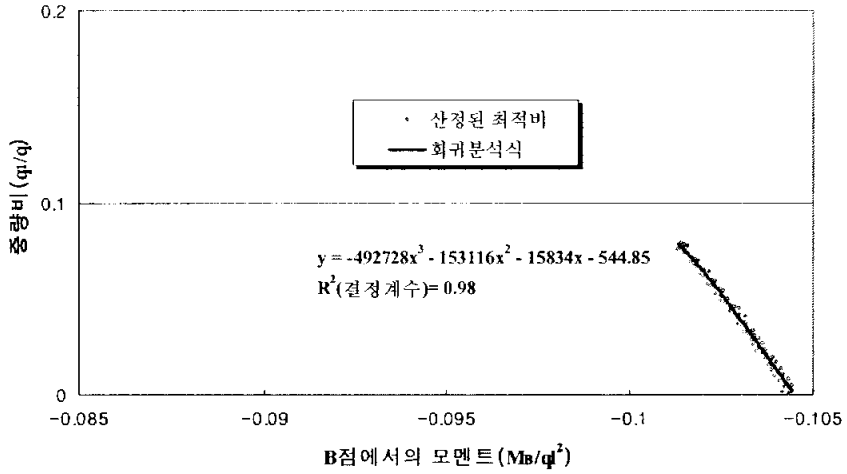


그림 4.12 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.08$)

$q_2/q = 0.09$ 일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = -286963\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 - 89690\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 - 9316.8\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) - 321.65 \quad (4.13)$$

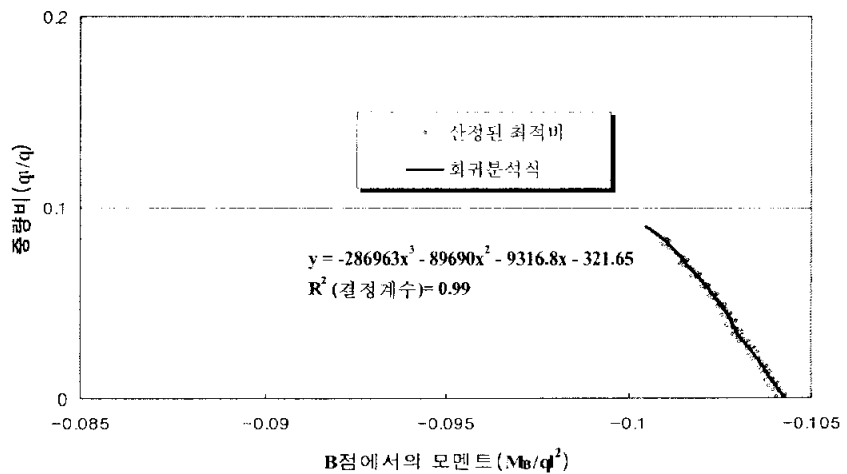


그림 4.13 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.09$)

$q_2/q = 0.10$ 일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = -197065\left(\frac{M_B}{qt^2}\right)^3 - 61522\left(\frac{M_B}{qt^2}\right)^2 - 6376.7\left(\frac{M_B}{qt^2}\right) - 219.42 \quad (4.14)$$

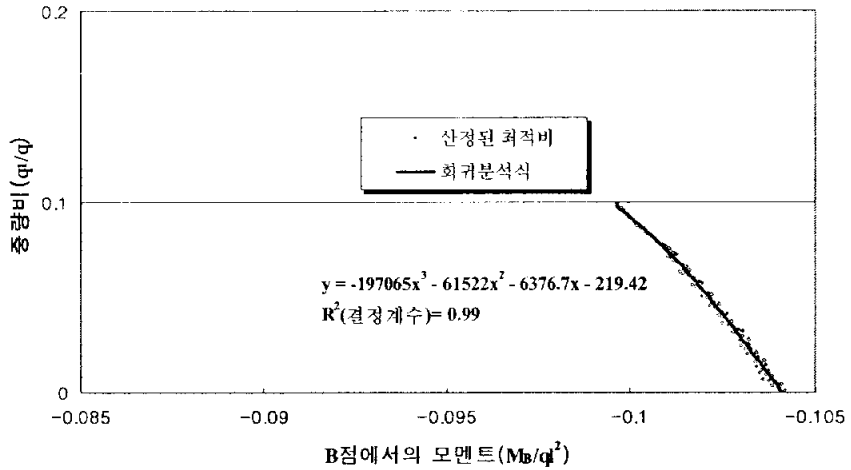


그림 4.14 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.10$)

$q_2/q = 0.12$ 일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = 16851\left(\frac{M_B}{qt^2}\right)^3 + 3933.1\left(\frac{M_B}{qt^2}\right)^2 + 298.88\left(\frac{M_B}{qt^2}\right) + 7.4895 \quad (4.15)$$

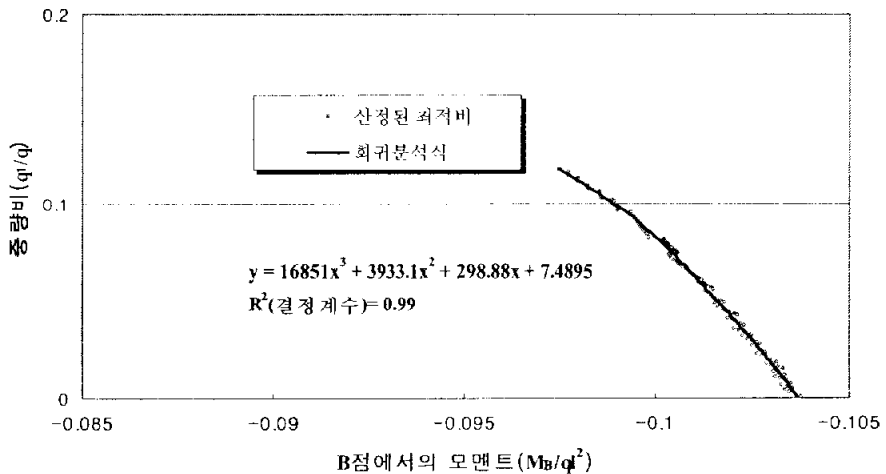


그림 4.15 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.12$)

$q_2/q = 0.14$ 일 경우 :

$$\left(\frac{q_1}{q}\right) = 42789\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^3 + 11784\left(\frac{M_B}{ql^2}\right)^2 + 1090.7\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 34.087 \quad (4.16)$$

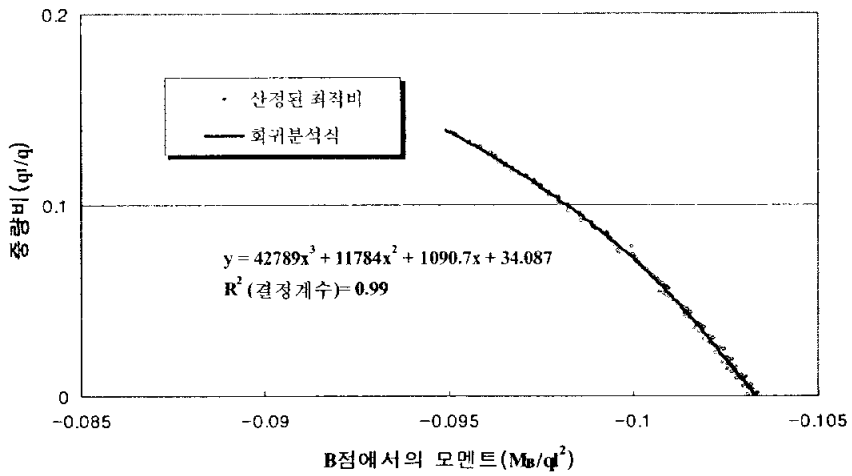


그림 4.16 B점의 모멘트와 최적중량비의 관계($q_2/q = 0.14$)

4.1.3 설계 단면력과 최적 길이비

김영조(2004) 논문을 통해 제시된 지점 B의 모멘트와 최적 길이비의 관계를 나타내는 결과를 이용하여 그림 4.17~그림 4.24와 같이 회귀분석을 실시한 후, 설계식을 제시하였다. 제안된 설계식의 이용은 압축 추진코와 상부구조의 탄성계수비 E_n/E 가 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 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 17.743 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.422 \quad (4.17)$$

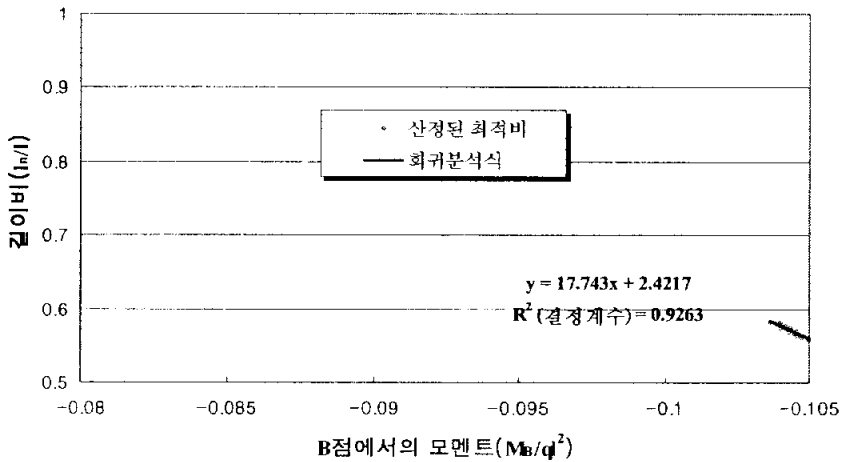


그림 4.17 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.04$)

$q_2/q = 0.06$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 19.084 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.565 \quad (4.18)$$

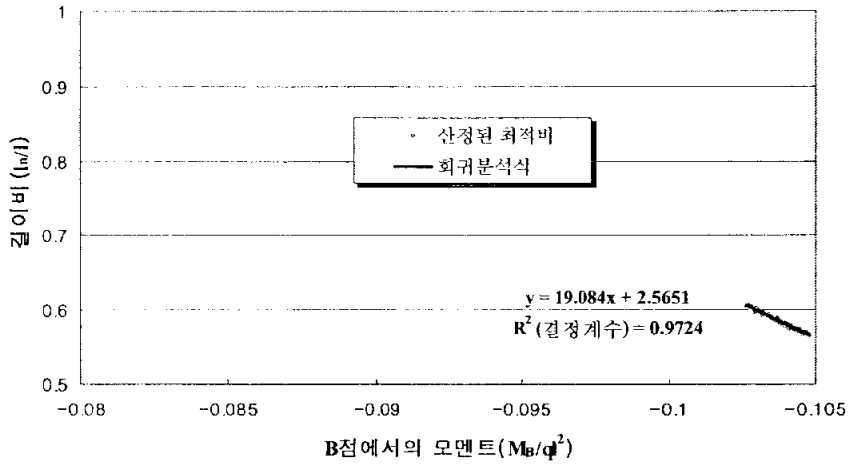


그림 4.18 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.06$)

$q_2/q = 0.07$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 19.102 \left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.5681 \quad (4.19)$$

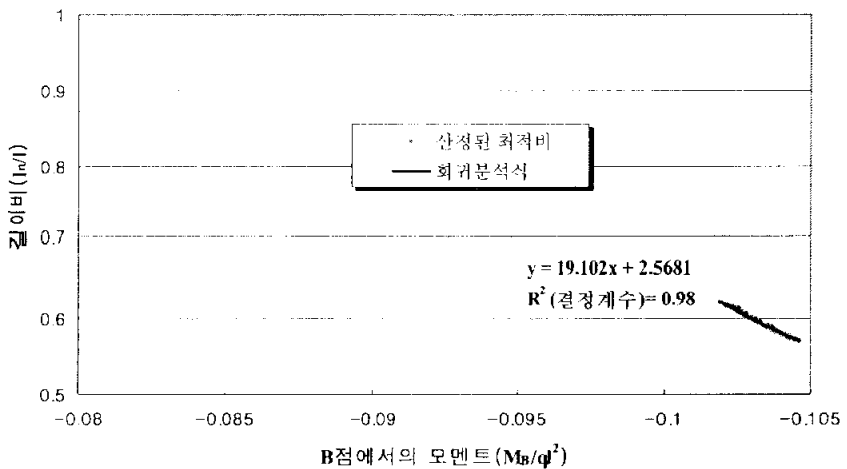


그림 4.19 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.07$)

$q_2/q = 0.08$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 18.782\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.5368 \quad (4.20)$$

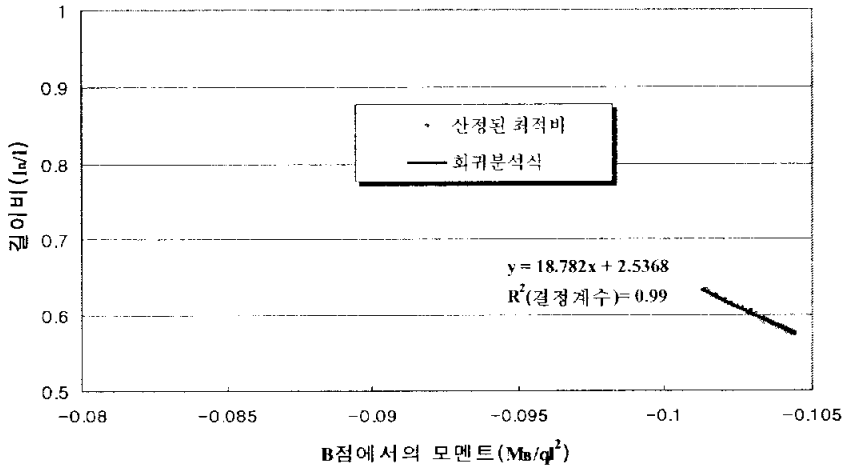


그림 4.20 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.08$)

$q_2/q = 0.09$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 18.911\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.5513 \quad (4.21)$$

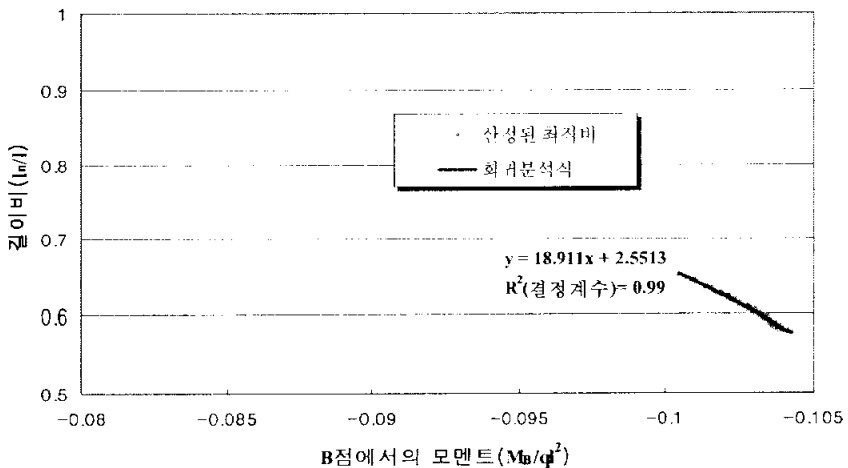


그림 4.21 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.09$)

$q_2/q = 0.10$ 인 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 18.382\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.4983 \quad (4.22)$$

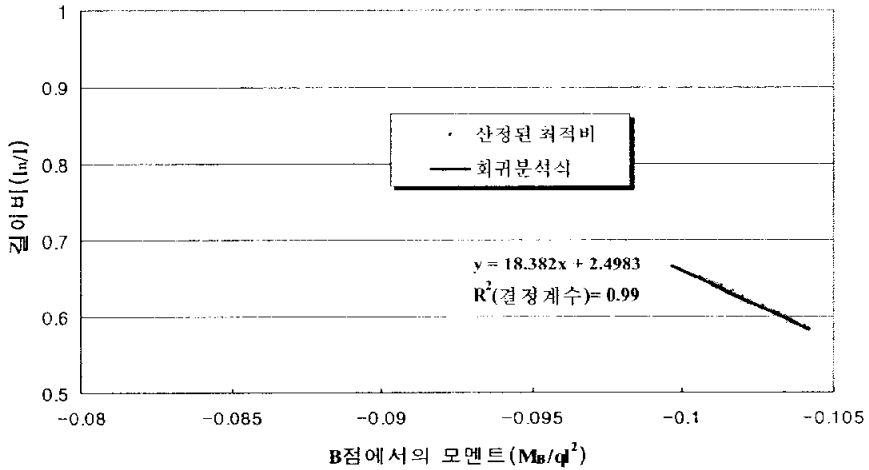


그림 4.22 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.10$)

$q_2/q = 0.12$ 인 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 18.348\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.4979 \quad (4.23)$$

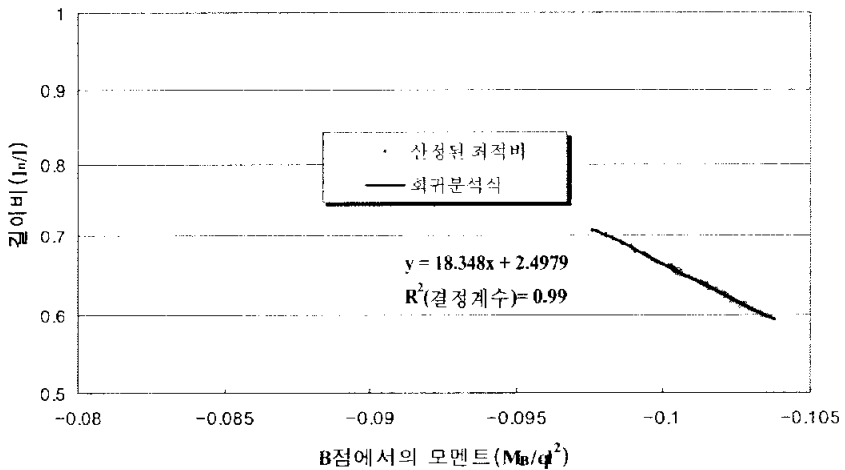


그림 4.23 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.12$)

$q_2/q = 0.14$ 일 경우 :

$$\left(\frac{l_n}{l}\right) = 18.097\left(\frac{M_B}{ql^2}\right) + 2.4757 \tag{4.24}$$

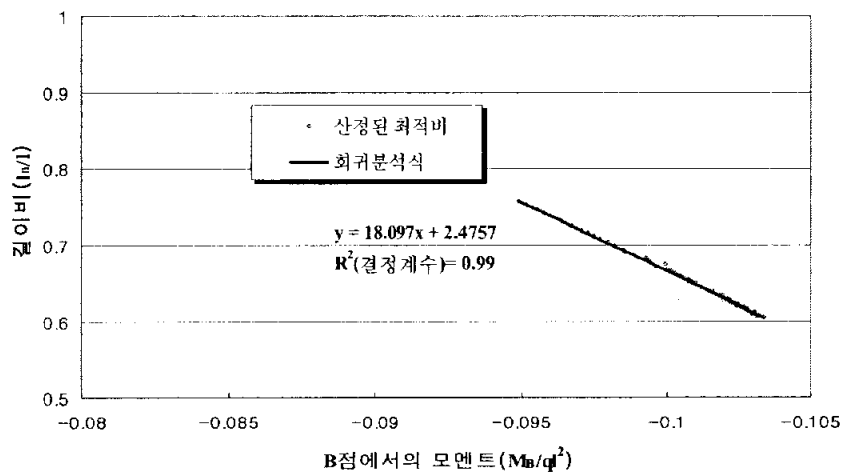


그림 4.24 B점의 모멘트와 최적길이비의 관계($q_2/q = 0.14$)

4.2 사례교량 압축추진코의 설계현황 분석

4.2.1 사례교량

표 4.1에서 보는바와 같이, 우리나라의 고속도로 교량 중에서 ILM 공법으로 건설된 9개의 교량들을 대상으로 본 연구에서 제시한 설계식을 통하여 설계의 적정성에 대하여 분석하고자 한다.

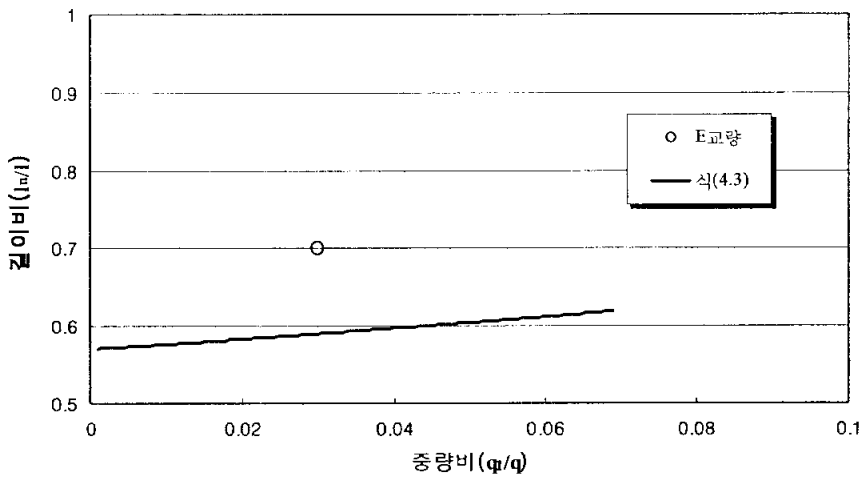
조사된 교량들의 압축 추진코의 단면 형식은 모두 I형 플레이트 거더로 제작되었고, 교량 상부구조와 압축 추진코의 탄성계수비 E_n/E 은 6.8359, 지간장은 50m로 동일하였다. 그리고 압축 추진코와 교량 상부구조 연결부 집중하중 P_D 는 교량 상부구조의 단면적에 따라 차이가 있었다. 즉, 표 6.1의 F, G, H, I교량과 같이 상대적으로 상부구조의 단면적이 더 큰 교량일수록 다이아플램 면적이 증가하여 집중하중 P_D 가 더 크게 나타나는 것으로 조사되었다.

표 4.1 조사된 교량들의 제원(지간장=50m)

교량명	M_B/q_l^2 (2단계 최대값 기준)	l_n/l	상부구조 단면적(m^2)	중량비		강성비		$P_D(\text{tonf})$
				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

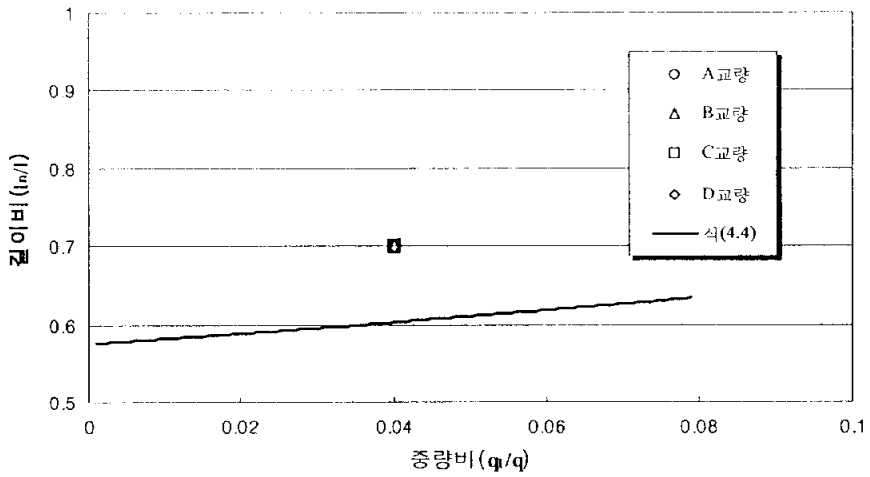
4.2.2 중량비와 길이비에 대한 검토

표 4.1에서 보는바와 같이 조사된 교량들의 q_2/q 는 대략 0.07에서부터 0.09에 해당된다. 그러므로 q_2/q 이 각 각 0.07, 0.08, 0.09일 경우에 대하여 q_1/q 의 변화에 따른 최적 길이비를 산정할 수 있는 식 (4.3), 식 (4.4) 그리고 (4.5)과 비교하여 그림 4.25에 나타내었다.

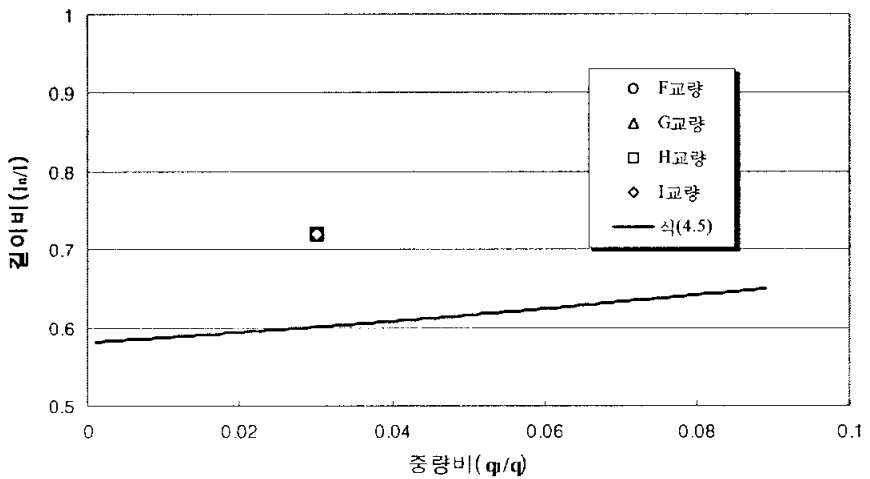


(a) $q_2/q = 0.07$ 의 경우

그림 4.25 조사교량과 설계식과의 비교(계속)



b) $q_2/q = 0.08$ 의 경우



c) $q_2/q = 0.09$ 의 경우

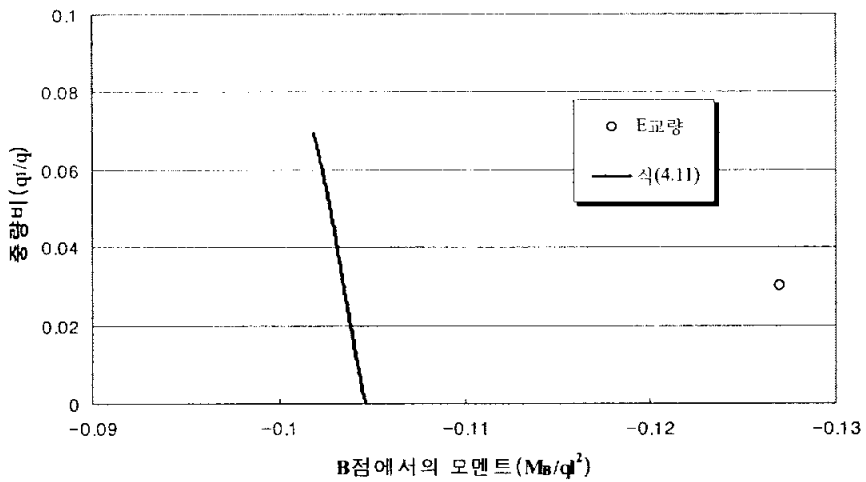
그림 4.25 조사교량과 설계식과의 비교

그림 4.25에서는 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 구조개산서에 의하면, 조사 교량들은 압출 추진코가 맞은 편 교각을 통과한 이후에 연속보 상태에서 최대 모멘트가 발생하였고, 이 결과가 설계 단면력으로 적용되었다.

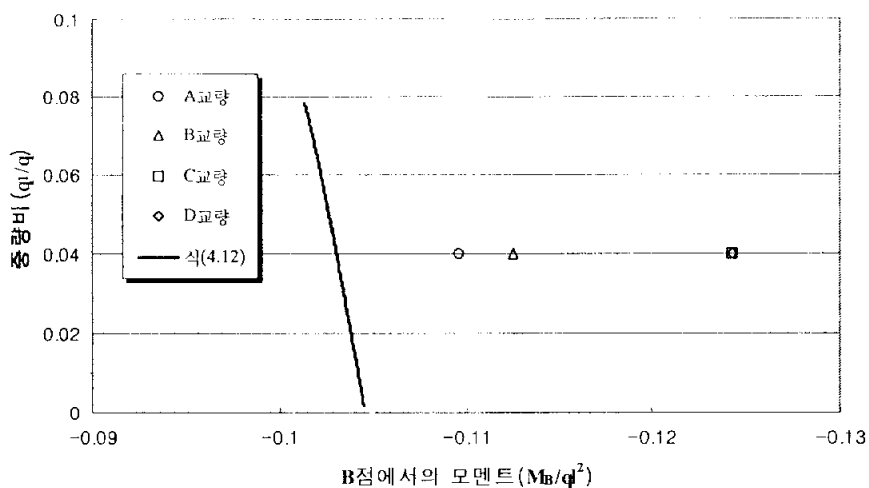
4.2.3 설계 단면력과 중량비에 대한 검토

표 4.1의 조사된 교량의 중량비와 설계단면력(M_B/ql^2) 데이터를 q_2/q 가 각각 0.07, 0.08, 0.09일 경우에 대하여 최적중량비(q_1/q)와 지점 B의 모멘트와의 관계를 나타내고 있는 식 (4.11), 식 (4.12) 그리고 식 (4.13)에 적용하여 그림 4.26에 나타내었다.

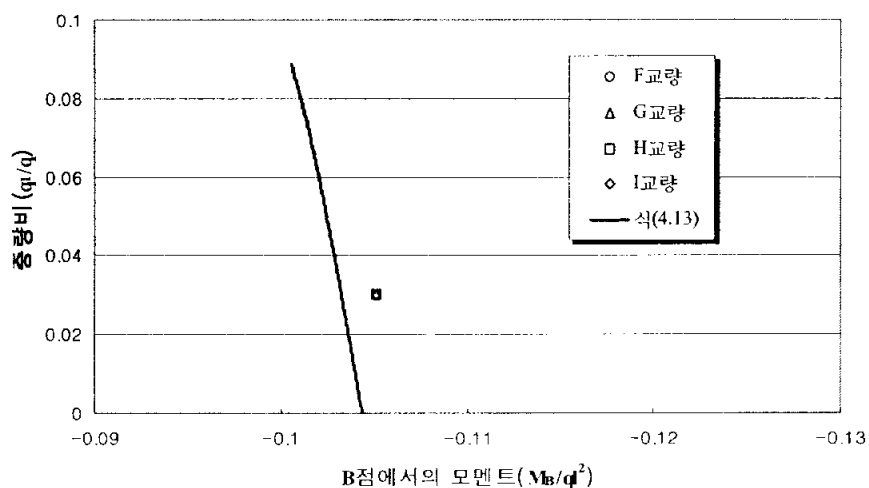


(a) $q_2/q = 0.07$ 의 경우

그림 4.26 조사교량과 설계식과의 비교(계속)



(b) $q_2/q = 0.08$ 의 경우



(c) $q_2/q = 0.09$ 의 경우

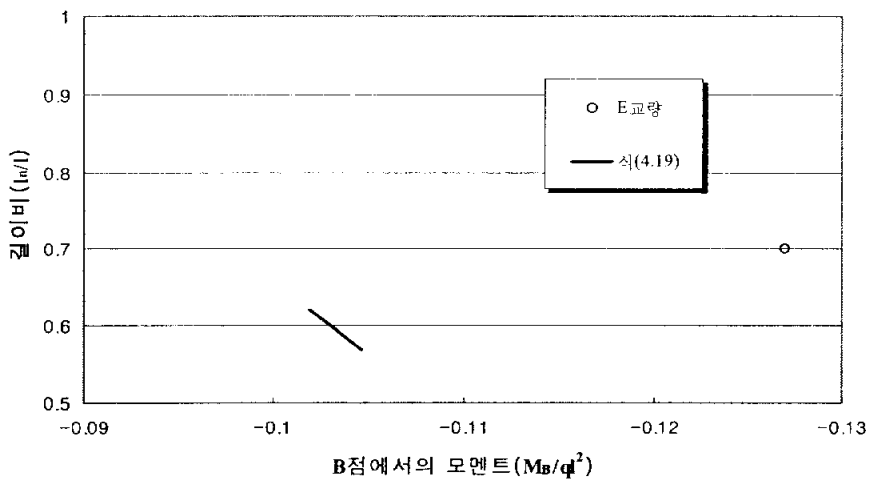
그림 4.26 조사교량과 설계식과의 비교

그림 4.26에서 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 4.25에 알 수 있었듯이 조사된 모든 교량은 중량비에 비하여 상대적으로 긴 길이비로 설계되었고, 이와같이 길이비가 큰 교량들의 경우는 김영조(2004) 논문의 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^E 를 초과하게 됨으로써 나타나는 현상으로 판단된다.

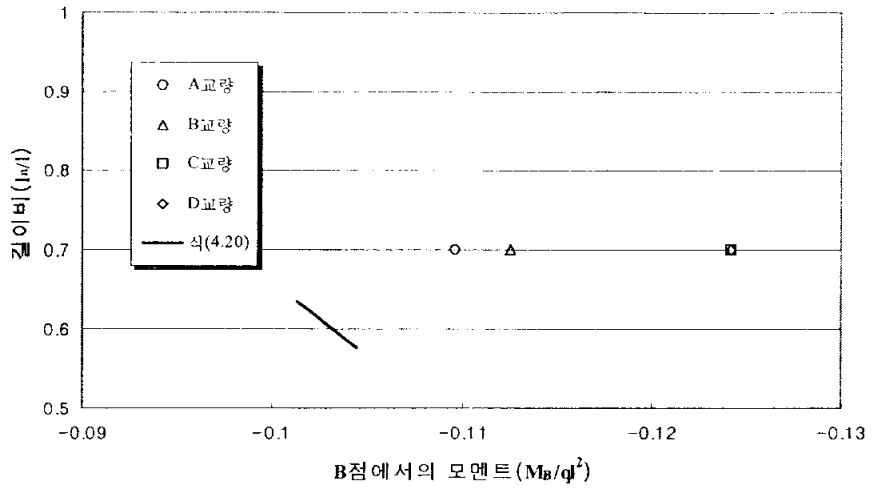
4.2.4 설계 단면력과 길이비에 대한 검토

표 4.1의 조사된 교량의 길이비와 설계단면력(M_B/ql^2) 데이터를 q_2/q 가 각각 0.07, 0.08, 0.09일 경우에 대하여 최적 길이비(l_n/l)와 지점 B의 모멘트와의 관계를 나타내고 있는 식 (4.19), 식 (4.20) 그리고 식 (4.21)에 적용하여 그림 4.27에 나타내었다.

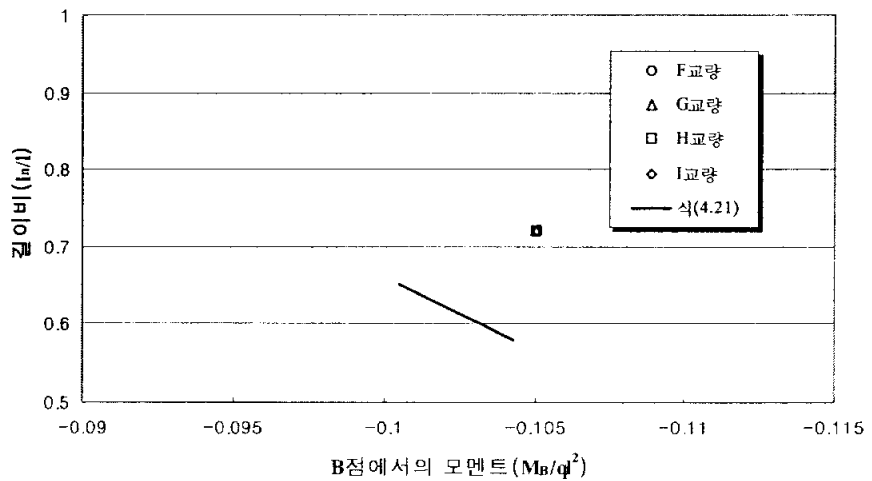


(a) $q_2/q = 0.07$ 의 경우

그림 4.27 조사교량과 설계식과의 비교(계속)



(b) $q_2/q = 0.08$ 의 경우



(c) $q_2/q = 0.09$ 의 경우

그림 4.27 조사교량과 설계식과의 비교

그림 4.27에서 대부분의 조사된 교량의 설계결과가 본 연구에서 제안된 최적 길이비 관계식과는 상당한 차이를 가지고 있음을 알 수 있다. 이것은 그림 4.26과 마찬가지로 조사된 교량의 압축추진코의 길이비가 적당하지

않은 관계로 설계단면력이 크게 발생하는 것으로 예상된다.

4.3 상호작용을 고려한 최적설계

4.3.1 단면력 궤적의 분석

조사된 교량들의 설계 결과를 보다 면밀하게 분석하기 위해 본 논문에서 유도된 해석식 (3.2)와 (3.3)을 이용하여 압출 진행에 따른 단면력 궤적을 그림 4.28~그림 4.36에 나타내었다.

그림 4.28~그림 4.36에서 붉은 실선은 표 4.1에 나타낸 해당 교량의 설계변수 l_n/l , q_2/q , q_1/q , I_2/I , I_1/I , P_D , l 을 해석식 (3.2)와 식 (3.3)에 대입하여 발생하는 단면력 M_D/ql^2 의 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 (3.2)와 식 (3.3)에서 다이아플램 하중을 고려할 때 필요한 상부구조의 중량은 A, B교량의 경우 $q=19.0525\text{tonf/m}$ 를 C, D교량은 $q=19.4625\text{tonf/m}$ 를 E교량은 $q=20.3325\text{tonf/m}$ 를 F, G, H, I교량은 $q=21.1550\text{tonf/m}$ 을 대입하였다.

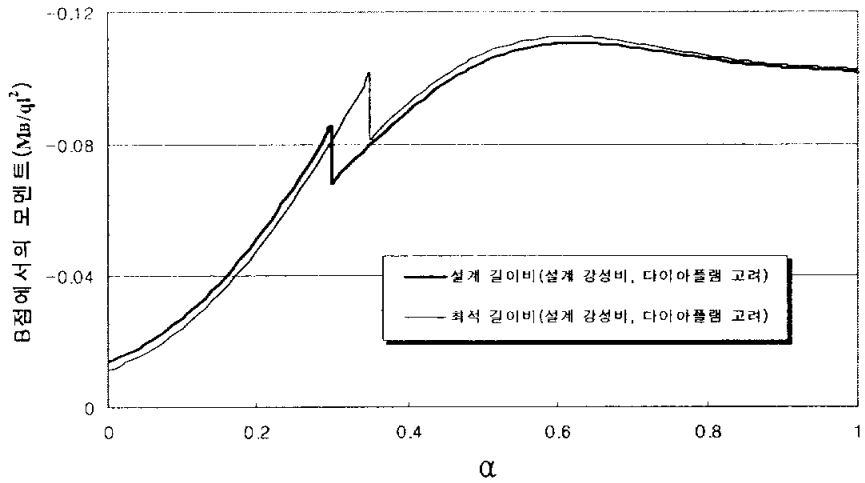


그림 4.28 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(A교량)

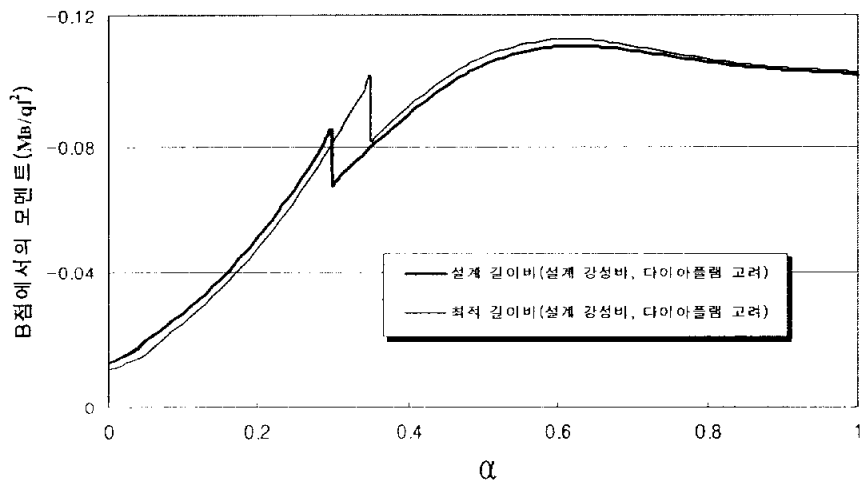


그림 4.29 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(B교량)

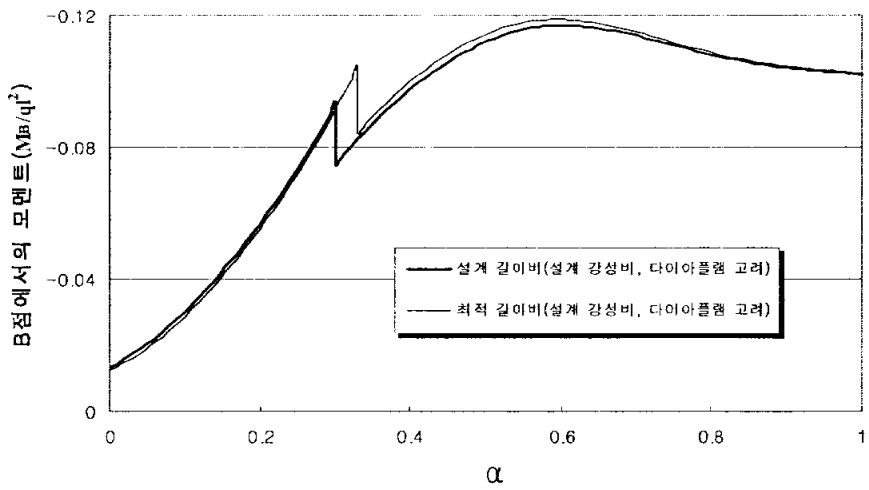


그림 4.30 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(C교량)

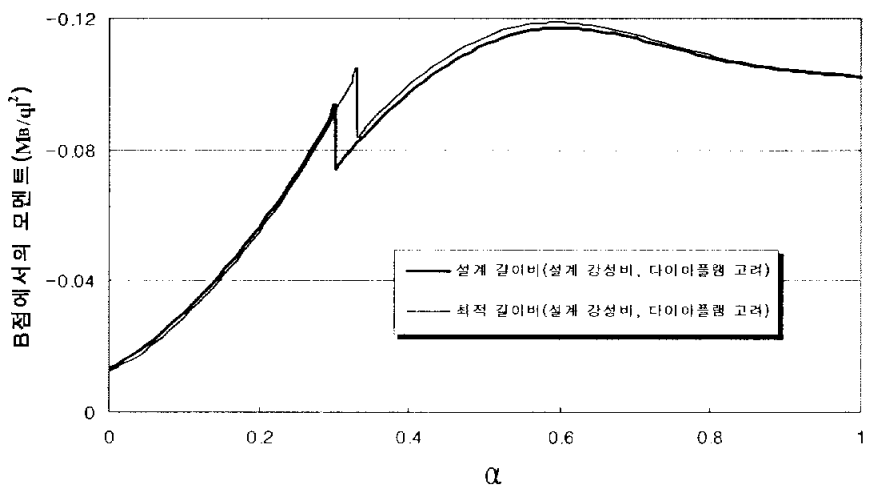


그림 4.31 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(D교량)

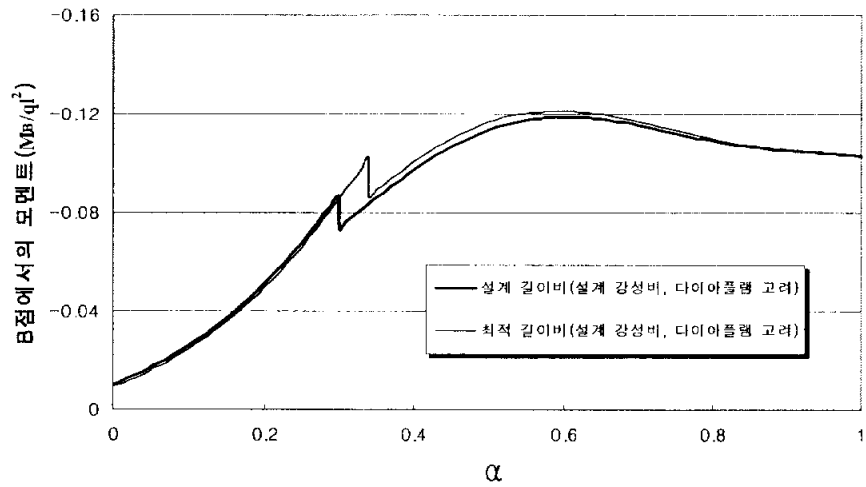


그림 4.32 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(E교량)

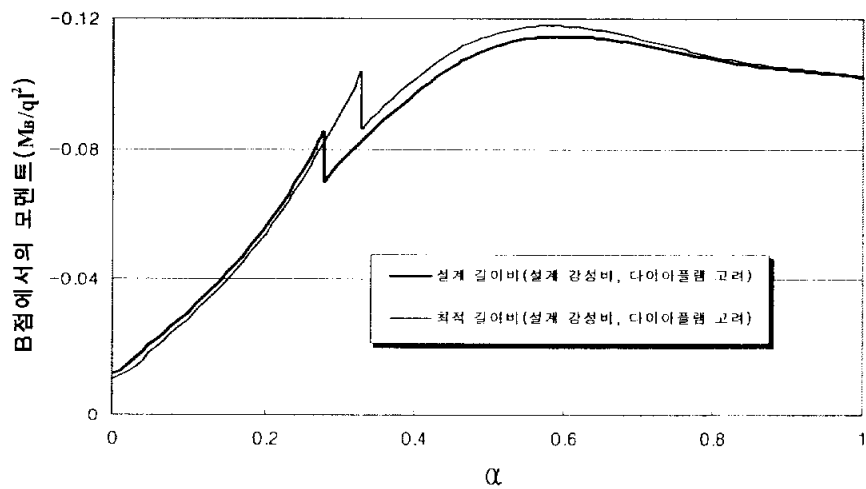


그림 4.33 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(F교량)

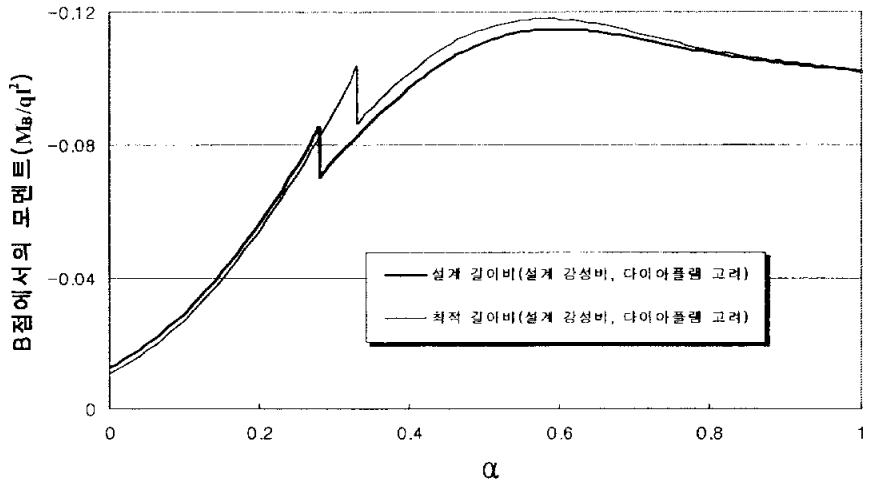


그림 4.34 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(G교량)

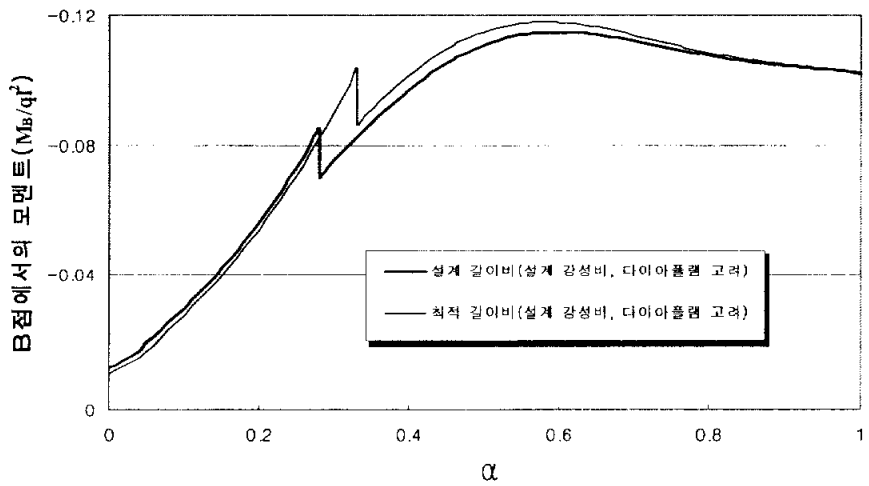


그림 4.35 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(H교량)

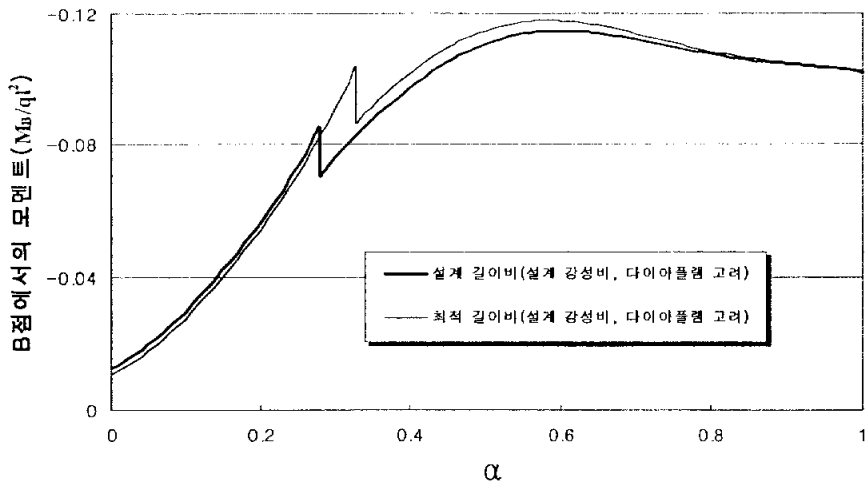


그림 4.36 실제 자료의 해석식에 의한 단면력 궤적(교량)

그림 4.28~그림 4.36에서 알 수 있는 바와같이 실제 설계자료를 그대로 적용한 굽은실선의 경우, 1단계 압출이 종료되었을 때의 단면력 보다 2단계 압출이 종료되었을 때(M_B^E)가 크다. 이것은 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 굽은실선의 경우와 같이 최대 단면력이 2단계 압출과정 중간에 발생되었다. 즉, 모든 교량의 경우에서 굽은 실선의 경우 최대 단면력은 압출 완료후의 단면력(M_B^E) 보다 8%~11% 크게 나타났고, 가는 실선의 경우는 9%~13% 크게 발생하였다. 이것은 조사 교량들의 강성비가 본 연구에서 제안한 최소강성비($I_2/I=0.045$, $I_1/I=0.002$)보다 작기 때문으로 판단된다.

4.3.2 최적설계

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

먼저, 그림 4.28~그림 4.36에서와 같이 표 4.1에 나타낸 해당 교량의 설계변수인 l_n/l , q_2/q , q_1/q , I_2/I , I_1/I , P_D , q , l 을 해석식 (3.2)와 식 (3.3)에 대입하여 발생하는 단면력 M_B/ql^2 의 궤적을 그림 4.37~그림 4.45에 굵은 실선으로 나타내었다. 이때 A, B교량은 $q = 19.0525 \text{ tonf/m}$ 를 C, D교량은 $q = 19.4625 \text{ tonf/m}$ 를 E교량은 $q = 20.3325 \text{ tonf/m}$ 를 F, G, H, I교량은 $q = 21.1550 \text{ tonf/m}$ 을 대입하였다.

그리고, 표 4.1의 조사된 교량의 각 설계 중량비 q_2/q , q_1/q 를 설계식 (4.3), (4.4) 그리고 (4.5)에 대입하여 산정한 최적의 l_n/l 비와 본 연구에서 얻은 최소 강성비 $I_2/I = 0.045$, $I_1/I = 0.002$ 를 식 (3.2)와 (3.3)에 대입하여 얻어진 단면력 M_B/ql^2 의 최적경로를 그림 4.37~그림 4.45에 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/q 를 적용한 상태에서 해석식 (3.2)와 (3.3)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 4.37~4.45에 가는 점선으로 나타내었다. 이때는 다이아

플랜 하중이 고려되었다. 따라서, 가는 점선의 결과는 실제의 조건들이 고려된 최적화된 단면력 궤적을 갖는 압출추진코의 설계결과라 할 수 있다. 그러므로, 그림 4.37~그림 4.45에서 알 수 있듯이 최소 강성비를 만족하는 강성비를 갖는 상태에서 압출추진코의 길이를 줄임으로서 오히려 상부구조의 단면력을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

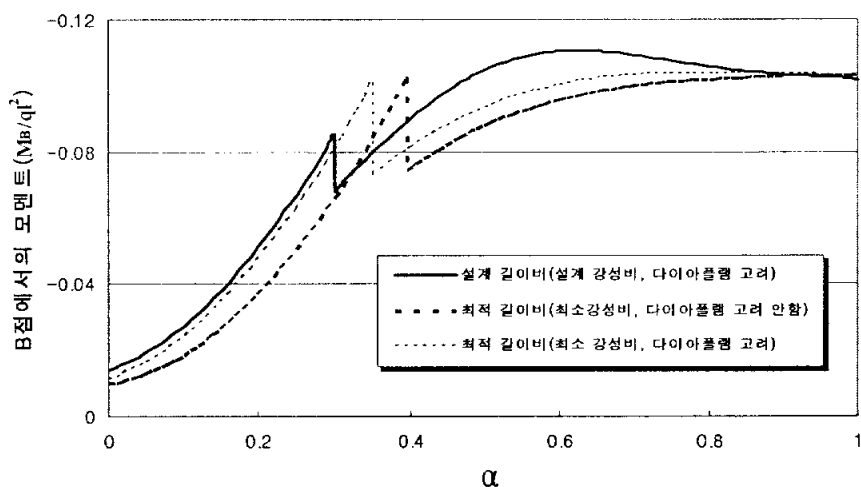


그림 4.37 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(A교량)

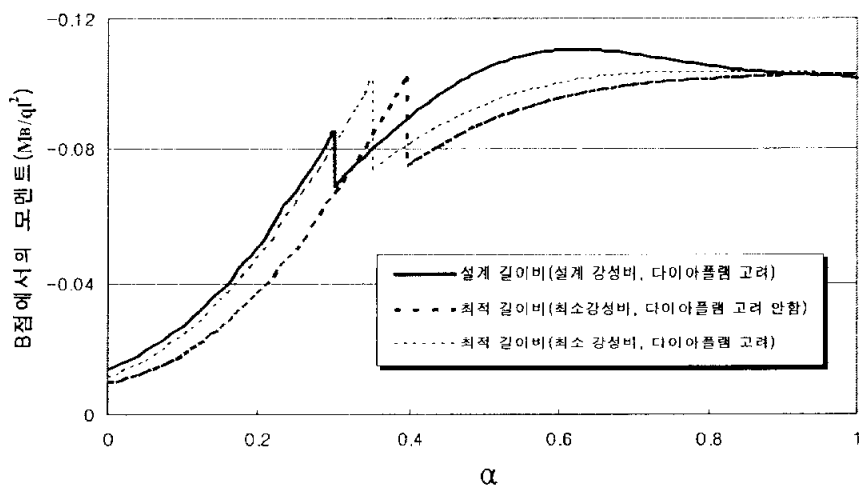


그림 4.38 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(B교량)

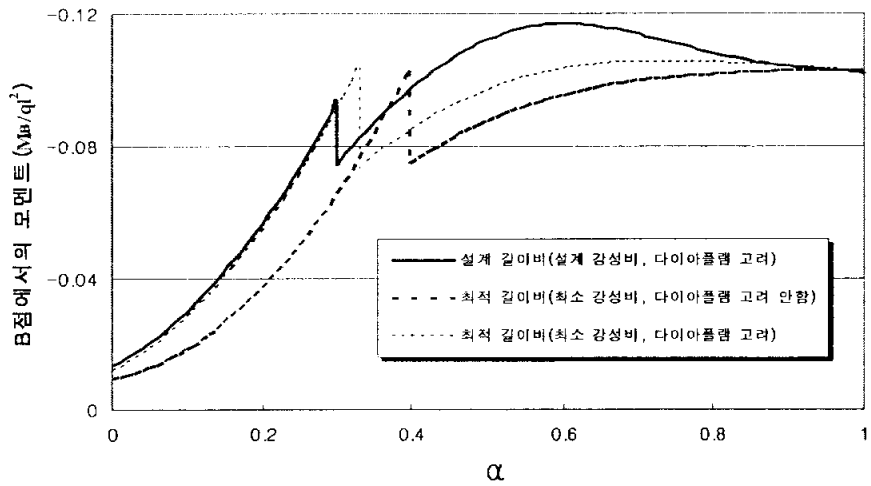


그림 4.39 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(C교량)

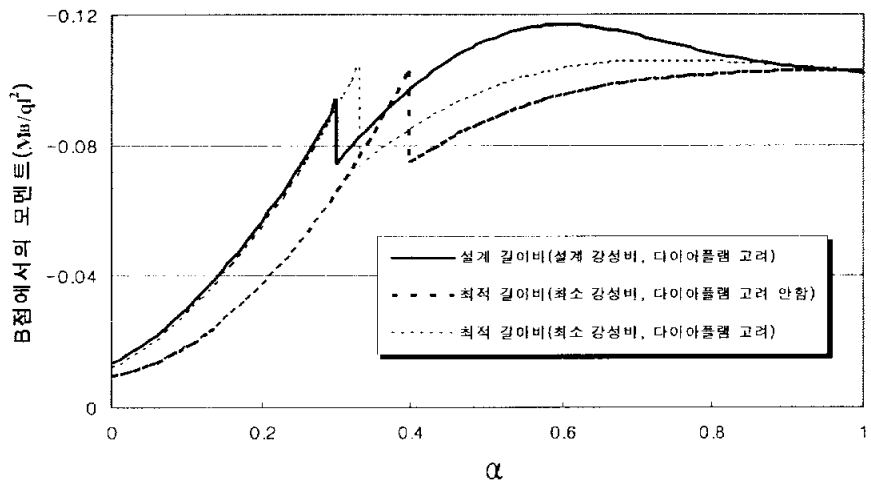


그림 4.40 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(D교량)

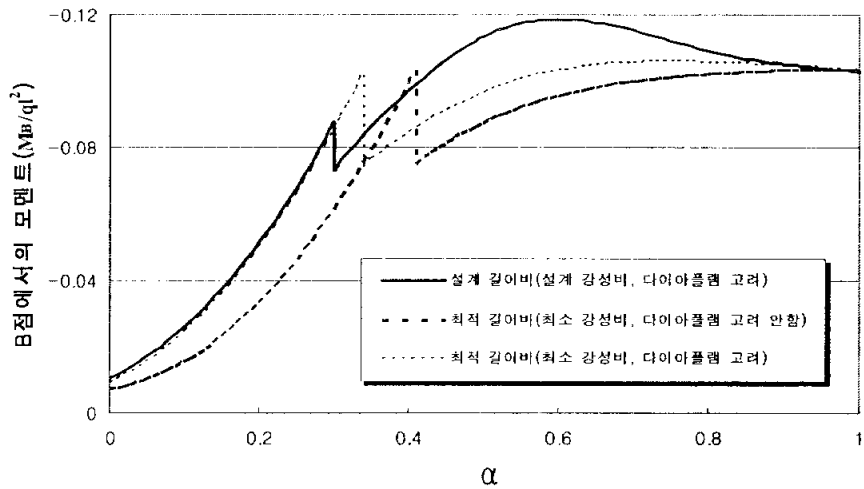


그림 4.41 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(E교량)

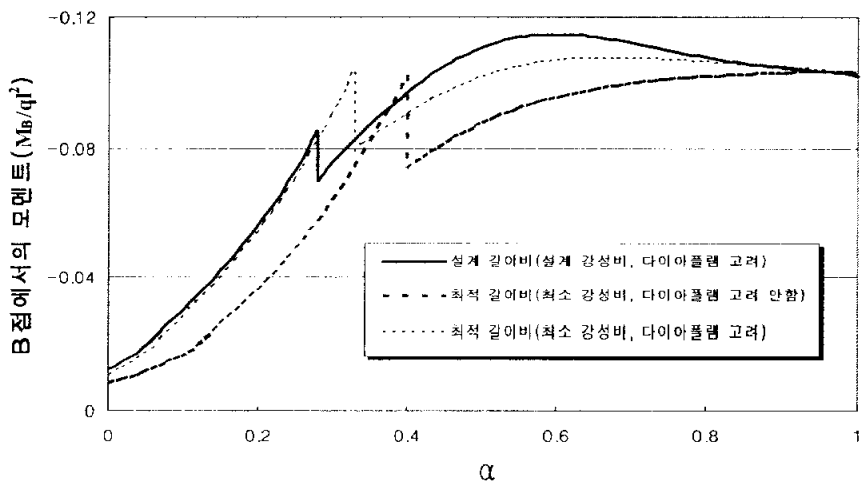


그림 4.42 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(F교량)

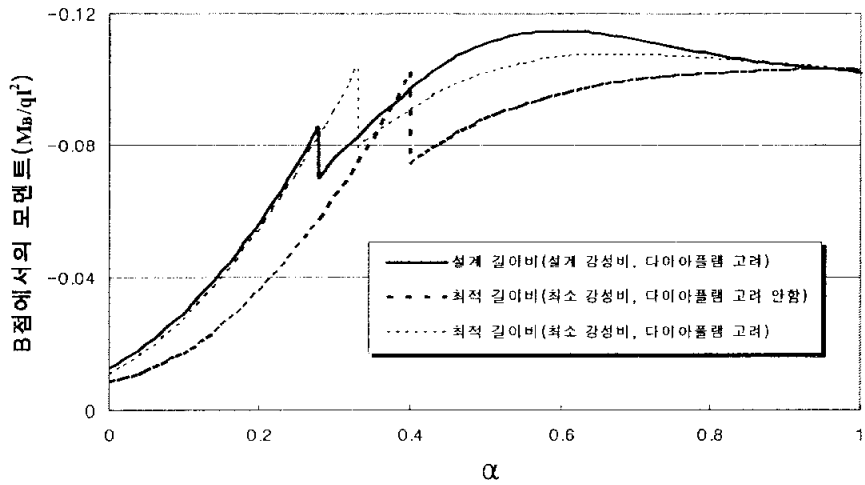


그림 4.43 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(G교량)

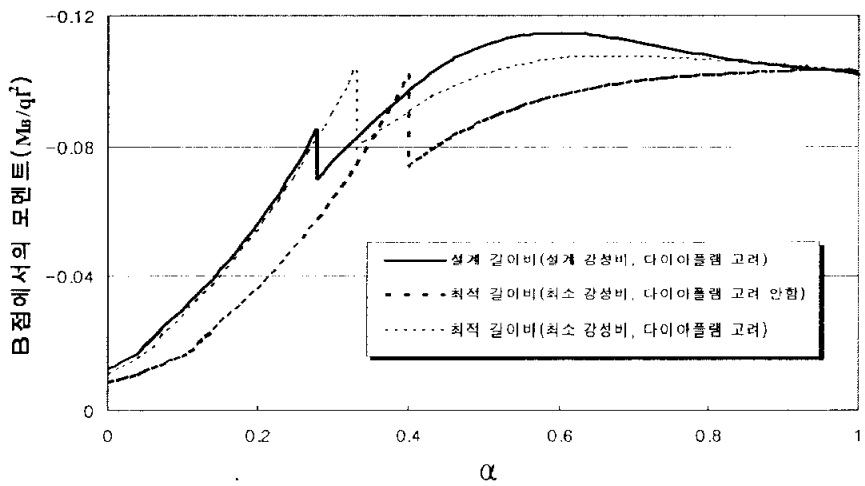


그림 4.44 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(H교량)

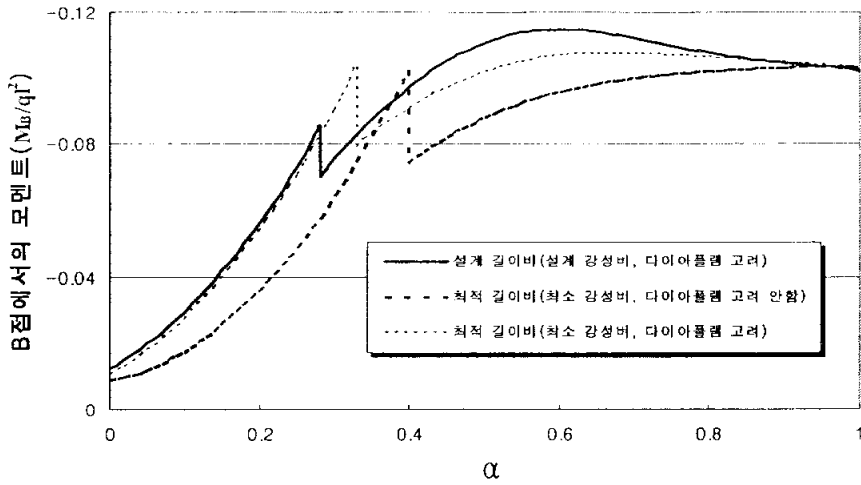


그림 4.45 상호작용이 고려된 상부구조의 단면력 궤적(1교량)

표 4.2 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 4.28~그림 4.45의 결과에서 최대 단면력과 길이비를 정리하여 표 4.2에 나타내었다. 표 4.2에서 첫 번째 줄(설계 강성비, 설계 길이비, 다이아플램 고려)는 그림 4.28~그림 4.45의 굵은 실선에 해당되고, 두 번째 줄(설계 강성비, 최적 길이비, 다이아플램 고려)은 그림 4.28~그림 4.36의 가

는 실선에 해당된다. 표 4.2의 세 번째 줄(최소 강성비, 최적 길이비, 다이아플램 고려안함)은 그림 4.37~그림 4.45의 굵은 점선, 표 4.2의 네 번째 줄(최소 강성비, 최적 길이비, 다이아플램 고려)은 가는 점선에 해당된다.

표 4.2에서 보는 바와같이 세 번째 줄에 해당되는 그림 4.37~그림 4.45의 굵은 점선은 최적길이비를 산정하기 위하여 다이아플램의 영향을 고려하지 않고, 단순히 설계식 (4.3), (4.4), (4.5)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 4.2의 첫 번째 줄 즉, 그림 4.28~4.45의 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 4.37~그림 4.45의 굵은 점선에 해당되는 단면력 궤적은 다이아플램이 고려되지 않았으므로 실제 교량 상부구조에 발생하는 단면력을 정확히 예측한 값이 아니다. 만약 다이아플램의 영향을 고려하면 1단계 압출에서 설계모멘트가 증가하게 될 것이다. 그러므로 상부단면을 최적화하기 위해서는 제안된 설계식에 의해 산정된 압출추진코 길이 이상으로 압출추진코 길이를 증가시켜야 할 것이다.

표 4.2의 네 번째 줄에 해당되는 값들은 그림 4.37~4.45의 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 4.28~4.45의 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.

4.4 강성비와 중량비의 변화에 따른 영향

그림 4.46은 조사된 A교량의 강성비 변화에 따른 단면력 변화추이를 분석한 그림이다. 강성비의 영향을 검토하기 위하여 실제 설계자료에서 얻은 길이비 $l_u/l=0.7$ 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_B 를 약 6% 정도 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

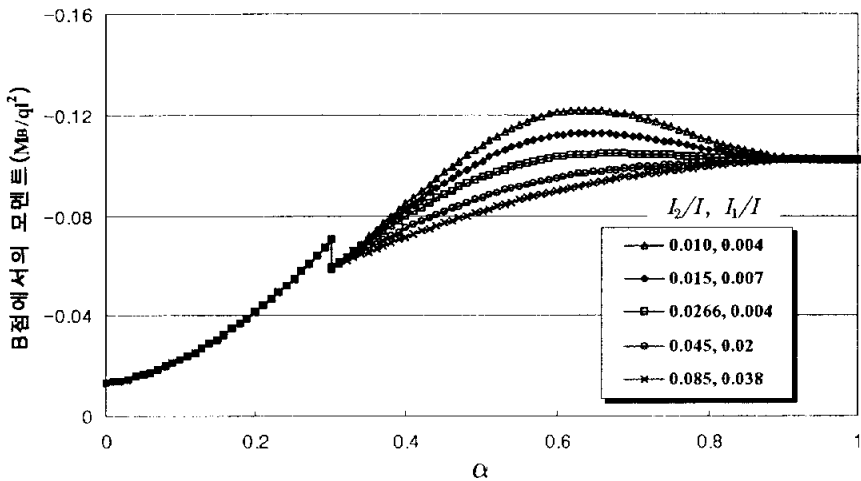


그림 4.46 조사교량의 강성비 변화에 따른 M_B 분포

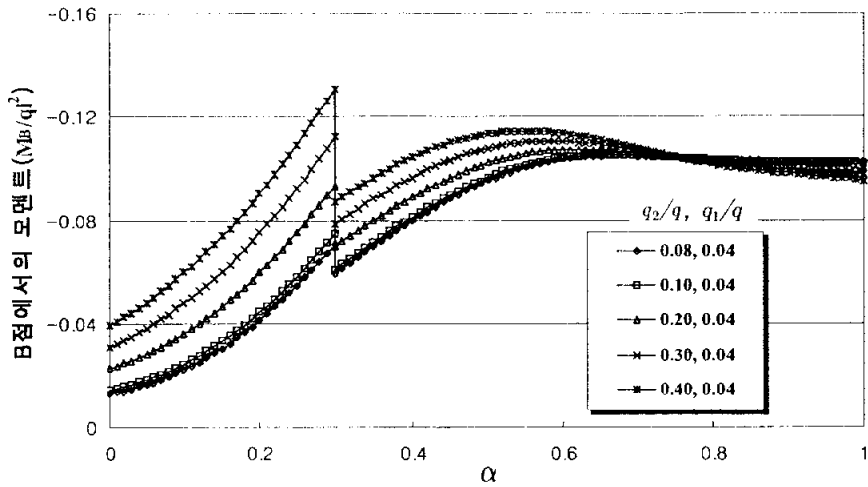


그림 4.47 조사교량의 중량비 변화에 따른 M_B 분포

또한, 중량비의 영향을 검토하기 위하여 실제 설계자료에서 얻은 길이 비 $l_n/l=0.7$ 과 강성비 $I_2/I=0.0266$, $I_1/I=0.004$ 를 고정시킨 상태에서 중량비를 변화시켜 그림 4.47에 나타내었다.

그 결과 그림 4.47에서 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 4.47에서와 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.

5. 결 론

프리스트레스트 콘크리트 교량은 그 재료적 특성으로 인하여 공법에 따른 거동변화가 다양하다. 따라서, 설계시는 물론이고 시공 중에도 현장 여건에 따라 수정되는 공정변화에 따라 시공단계별 거동추적이 반드시 요구된다. 본 연구에서는 그동안 타 공법에 비하여 상대적으로 연구가 미흡하였던, ILM 공법에 의한 PS콘크리트 교량의 시공과정에 따른 구조적 거동에 관한 연구의 일환으로서 교량 상부구조와 압출 추진코의 상호작용에 관하여 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 설계실무자가 상부구조와 압출 추진코의 상호작용을 고려할 수 있는 설계식들을 제시하였다. 제안된 설계식들을 이용하여 기본 설계시에 최적화된 교량 상부단면을 신속하게 결정할 수 있을 것이다.
- 2) 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.
- 3) 조사교량들을 대상으로 본 연구에서 제안한 변단면 압출추진코에 대한 해석식과 설계식을 이용하여 중량비, 길이비, 강성비의 각 매개변수를 최적화 시켜 보았다. 그 결과 교량 상부구조에 발생하는 단

면력을 현재보다 8%~12% 정도 감소시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.

- 4) 본 연구에서 개발된 해석식과 설계식들은 ILM 교량의 상부단면의 단면력과 최적의 설계값들을 압축추진코와 상호작용을 고려하여 간편하게 결정할 수 있다. 따라서, 본 연구결과는 지간장애 관계없이 ILM 교량의 상부단면과 압축추진코를 안전성이 충분히 보장되면서 경제적인 단면으로 설계하는데 크게 기여할 것으로 본다.

참 고 문 헌

- 김영조 (2004). “ILM 상부구조와 변단면 압출 추진코의 상호작용에 관한 매개변수 해석”, *부경대학교 대학원, 석사학위논문*.
- 문영철 (2002). “ILM 공법에 의해 건설되는 PS콘크리트 교량의 거동”, *부경대학교 대학원, 석사학위논문*.
- 신현목 (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

대학원 진학부터 이 논문이 완성되기까지 부족한 저를 이끌어 주시고 학문적 지도와 격려를 해 주신 지도교수 이환우 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그리고 논문지도를 위해 많은 충고와 관심으로 심사해 주신 김명식 교수님, 국승규 교수님께 깊이 감사드립니다. 또한 항상 많은 관심으로 지켜봐 주신 김상용 교수님, 김종수 교수님, 장희석 교수님, 손인식 교수님, 이종섭 교수님, 이동욱 교수님, 이종출 교수님, 이영대 교수님, 정진호 교수님, 김수용 교수님, 정두희 교수님, 이상호 교수님께 진심으로 감사드립니다.

논문 시작에서 마무리까지 노고를 아끼지 않고 함께 애를 써 주신 구조설계 연구실의 김광양 선배, 연구실의 일꾼 안태욱, 김관수, 최용준, 그리고 구조설계 연구실의 박익태 회장님 이하 여러 선후배 회원님들께도 감사드립니다.

그리고 바쁜 직장생활에도 시간적인 배려와 격려를 아끼지 않으신 부산교통공단 류중열 시설관리소장님, 김섭 팀장님, 류춘국 과장님, 직원 동료 여러분께 감사드립니다. 논문자료를 위해 아낌없이 협조하여 주신 한마음회 김재원, 건설1차 박강호 감독님, 그리고 지하철 3호선 309공구 현대산업개발 백정렬 부장님, 유신 코퍼레이션 감리단 류무열 차장님과 303공구 동명기술공단 감리단 김종훈 후배에게도 감사드립니다. 저를 대학원까지 학문의 길로 올 수 있도록 용기를 북돋아 인도하며 가르쳐 주신 동의공업대 임채중 교수님, 김원규 교수님 그리고 토목공학 교수님들께 다시 한번 깊은 감사를 드립니다.

끝으로 오늘의 제가 있기까지 사랑과 정성으로 보살펴 주시고 늘 자식을 위해 뒷바라지에 평생을 보내신 아버지님, 어머니님, 그리고 장인, 장모님, 형제분들께 감사하는 마음으로 조그만 결실을 바치고자 하며, 바쁜 어려움 속에서도 늘 따뜻한 내조와 사랑을 아끼지 않았던 아내 혜숙, 딸 연경, 아들 한섭, 지훈에게 진실로 고마움을 표하며, 이 한편의 논문이 조그마한 선물이 되었으면 합니다.