大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第30卷 第2A號・2010年 3月
pp. 137 ~ 148

국내 설계하중의 피로특성을 적용한 고주탑 엑스트라도즈드교의 성능개선에 관한 연구

A Study on the Performance Improvement of High-Pylon Extradosed Bridge adopting Fatigue Loading Condition

이영진* ・ 신승교** ・ 임윤묵***
Lee, Young Jin・Shin, Seung Kyo・Lim, Yun Mook

Abstract

This study proposes the optimal ratio of vertical load-carrying capacity (β) by investigating structural performances and economic efficiency in the extradosed bridges. Without design standards for the extradosed bridge, Japanese design standards have been used domestically. For the design live load, DL24 is found to be more adequate than DB24. Using the DL24 load, parameter studies are carried out. The parameters are 'main tower height', 'main girder stiffness', and 'cable arrangement'. As a result, it is found that one side cable-stayed extradosed bridges are more economical than double side cable-stayed extradosed bridges. This study also shows that when the ratio of vertical load-carrying capacity(β) is 30~50% in the extradosed bridge with the ratio of tower height to main span length 1/6, the extradosed bridge is most economical because of the cable stress less than the allowable stress.

Keywords : *extradosed bridge, high tower, stress change, vertical load ratio, fatigue load*

요 지

본 연구에서는 기존 엑스트라도즈드교와 PSC 사장교 사이의 영역인 주탑고비 1/6~1/7의 고주탑을 적용하여 엑스트라도즈드교의 구조적, 경제적 특성을 평가하였다. 주탑고가 증가함에 따라 사재의 연직하중 분담율의 증가와 함께 변동응력도 증가하여 사재의 피로안정성이 주요 설계변수임을 알 수 있었다. 국내에서는 엑스트라도즈드교의 설계기준 부재로 인하여 일본 설계기준을 준용하고 있다. 또한, 피로 검토하중도 정립되지 않고 있어 본 연구에서는 일본 피로 검토하중에 대응하는 국내 활하중을 적용 검토하여 DL24 하중이 피로 검토하중으로 적정함을 알 수 있었다. 제시된 피로 검토하중을 적용하여 주탑고, 주거더의 강성, 케이블 면수 등을 매개변수로 엑스트라도즈드교의 구조적, 경제적 특성을 검토하였다. 본 연구의 결과로써 일면 케이블 배치가 이면 케이블 배치보다 경제적임을 알 수 있었다. 또한, 주탑고비가 1/6의 변단면 고주탑 엑스트라도즈교에서 연직 하중분담율이 30~50% 이내로 모든 사재가 허용변동응력 이내로 들어와 사재를 효율적으로 사용할 수 있어 가장 경제적임을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 기존의 엑스트라도즈드교보다 높은 주탑고를 적용함에 따라 구조적, 경제적으로 효율성을 높일 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 엑스트라도즈드교, 고주탑, 변동응력, 연직하중 분담율, 피로 검토하중

1. 서 론

엑스트라도즈드교와 사장교의 차이는 외형적으로 주탑높이와 거더강성, 구조적으로는 케이블의 하중분담율과 피로응력으로 구분할 수 있다. 사장교의 케이블은 거더에 작용하는 하중을 대부분 부담하기 때문에 사장교의 거더는 최소한의 강성만 확보하면 된다(Gimsing, 1997). 따라서 지간장에 따라 형고가 결정되는 것이 아니라 케이블 지지점간의 거리에 따라 단면이 결정되는 보강형의 의미를 갖는다(Leonhardt, 1987). 반면에 엑스트라도즈드교의 케이블은 주거더인 PSC 거더를 보조하여 부모멘트가 크게 작용하는 지점부 단면에 압축력과 정모멘트를 도입하는 역할을 한다. 따라서 엑스트라도즈드교의 주거더는 지간장에 따라 강성과 형고가 결정되는 거더교의 특성을 갖는다(Mathivat, 1988). 또한 사용하중하에서 엑스트라도즈드교의 케이블은 축방향 강성의 연직성분이 작기 때문에 활하중에 의한 케이블 응력변동을 PSC 사장교의 1/3~1/4로 억제하는 것이 가능하게 된다. 이런 점을 근거로 일본에서는 엑스트라도즈드교의 사재 허용응력을

*정회원・한국종합기술 구조부 상무 (E-mail : leeyj59@dreamwiz.com)
**(주)한화건설 기술연구소 책임연구원 (E-mail : shin89@hanwha.co.kr)
***정회원・교신저자・연세대학교 토목공학과 교수 (E-mail : yunmook@yonsei.ac.kr)

주거더내의 PS강재와 동일하게 사재 인장강도의 60%로 한다는 것이 큰 특징이라 할 수 있겠다(Japan Prestressed Concrete Engineering Association, 2000). 즉, 케이블의 안전율의 차이는 피로에 대한 안전성 차이인데 피로에 대한 안전성을 동일하게 볼 수 있다는 것이다. 따라서 사장교 케이블의 허용응력은 인장강도의 40%로 사장교의 케이블보다 효율적으로 사용할 수 있다는 것과 높은 피로강도를 가진 정착장치를 필요하지 않다는 점 등으로 엑스트라도즈드교는 PSC 거더교와 사장교 사이의 지간장(100~250 m)에서 경쟁력 있는 교량형식으로 자리 잡고 있다(Matsushita 등, 2002).

엑스트라도즈드교에 대한 국내외의 연구동향을 검토하면 국내에서는 오병환 등(2004)의 연구에서 크리프, 건조수축의 영향 등을 고려하여 시공단계별 해석 및 시간 거동해석을 수행하였고, 조인호(2003)는 사재의 비부착 거동을 고려하여 케이블 장력 산정기법을 제시하였다. 또한, 유영 등(2005)은 주형의 형고, 복부의 두께, 바닥판의 횡방향 폭과 두께, 사재의 정착위치 등을 고려하여 사재 케이블에 의한 프리스트레스 유효 전달길이의 특성을 파악하고, 유효 전달길이를 추정할 수 있는 간편식을 제안하였다. 외국의 사례를 보면, 특히 일본에서 연구활동이 활발한데 Komiya 등(1997)과 Oka 등(1997)의 연구에서는 활하중에 의한 변동응력과 연직하중 분담율 β를 고려하여 상대적으로 큰 강성의 주거더를 갖는 엑스트라도즈드교의 최적 주탑고 비는 1/8~1/12임을 보여주고 있다. 이전까지 기 시공된 엑스트라도즈드교의 주탑고 비는 1/10~1/12이여서 구조적 효율을 위해 주탑이 높아지고 있음을 알 수 있다. 또한 Kawasaki 등(2000)의 연구에서도 상대적으로 주형강성이 큰 2경간 엑스트라도즈드교에 1/7의 주탑고 비를 적용하여 구조거동을 개선하고 경제성을 평가하였다. 여러 연구를 통해 관찰할 수 있듯이 엑스트라도즈드교는 구조적, 경제적 이유로 주탑의 높이가 높아짐을 알 수 있다. 하지만, 상기의 연구는 케이블 허용응력 산정을 위한 피로검토하중이 우리나라와 상이하여 이에 대한 비교·검토 없이 국내에 적용한다면 교량의 내구성과 안전에 문제가 발생할 소지가 있다.

따라서 본 연구는 해외의 엑스트라도즈드교의 피로설계기준을 검토하여 국내 실정에 맞는 엑스트라도즈드교의 피로검토하중을 제시하고, 제시된 피로하중을 적용하여 주탑고 변화에 따른 엑스트라도즈드교의 거동특성을 파악하여 최적의 케이블과 거더의 하중 분담율을 제시함으로써 엑스트라도즈드교의 계획 및 설계시에 기초자료를 제공하는 데 목적이 있다.

2. 사재의 피로검토를 위한 활하중

2.1 일본 피로설계 하중

국내에서는 엑스트라도즈드교의 피로 설계시 일본 설계 규정을 따르고 있는데, 외국 설계기준을 준용할 경우 미리 충분한 이해와 검토가 수행되어야 적절한 안전성이 확보 될 수 있다. 본 절에서는 국내 차량 활하중의 적용성 검토를 수행하여 피로검토 하중으로 일본의 L 하중에 대응하는 피로하중을 제시한다. 일본의 경우 도로교에서는 교통량 예측이 명확한 경우 피로설계하중(TT43활하중)에 의한 검토를 수행하고 교통량 예측이 곤란한 경우 L하중에 의한 변동응력 $\Delta\sigma_L$ 을 지표로 검토하는 방법을 사용하고 있다. 본 연구에서는 국내 현실에 부합하는 엑스트라도즈드교의 피로검토 하중을 제시하기 위하여 이 두 방법 사이의 관계를 검토하였다.

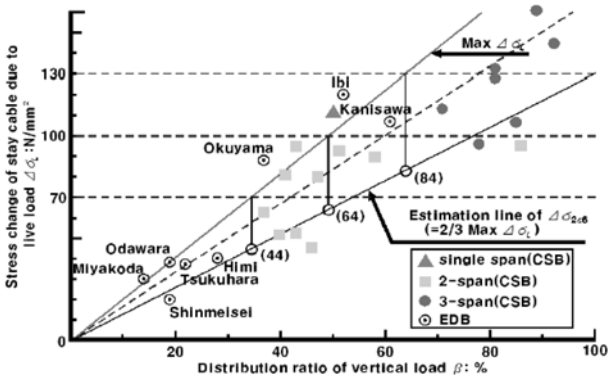


그림 1. $\Delta\sigma_L$ 과 $\Delta\sigma_{200eq}$ 의 관계

2차 휨을 포함한 환산변동응력 $\Delta\sigma_{200eq}$ (200만회의 환산변동응력)의 추정선은 설계내용기간 50년, 일교통량 7만대 정도, 대형차량 혼입률 50%라는 조건에서 피로설계를 하였다. 다시 말해 피로하중 TT43 활하중 1대에 의한 케이블 장력의 $\Delta\sigma_{200eq}$ 는 L하중에 의한 케이블의 최대변동응력 Max$\Delta\sigma_L$ 의 1/3~1/4정도가 되고, 거더 처짐 등의 2차 휨에 의한 케이블 장력 또한 활하중에 의한 $\Delta\sigma_{200eq}$ 과 같은 값 정도로 발생될 가능성이 크다고 가정하여 2차 휨을 포함한 $\Delta\sigma_{200eq}$ 의 추정선은 $2\frac{1}{3}$(Max$\Delta\sigma_L$)정도 될 것이라 추정된다. 그림 1에 $\Delta\sigma_L$ 과 $\Delta\sigma_{200eq}$ 의 관계가 나타나 있다.

2.2 국내 활하중과 일본 L 하중의 비교 검토

일본의 활하중인 L하중의 특징은 그림 2와 같이 주 재하하중과 종 재하하중으로 나누어져 있어 교량연장과 교폭의 영향을 동시에 고려하고 있다(日本道路橋協會, 1990). L 하중의 재하방법은 차도부분에 2종류의 등분포하중 p1, p2를 재하하는 것으로 하고, p1은 교량당 하나의 조합을 사용한다. L하중은 착안하고 있는 점이나 부재에 가장 불리한 응력이 생기도록 교폭 5.5 m까지는 등분포하중 p1 및 p2(주재하하중)를, 남은 부분에는 이들을 각각 1/2(종속재하하중)을 재하한다. p1과 p2의 크기, 재하방법 및 재하길이를 정리하면 표 1과 같다. 주 재하장 10 m와 주재하 하중폭 5 m를 갖는 L하중은 차선폭이 커지거나 교량연장이 길어지

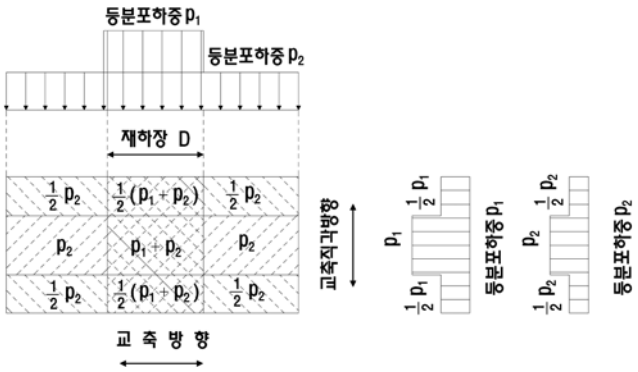
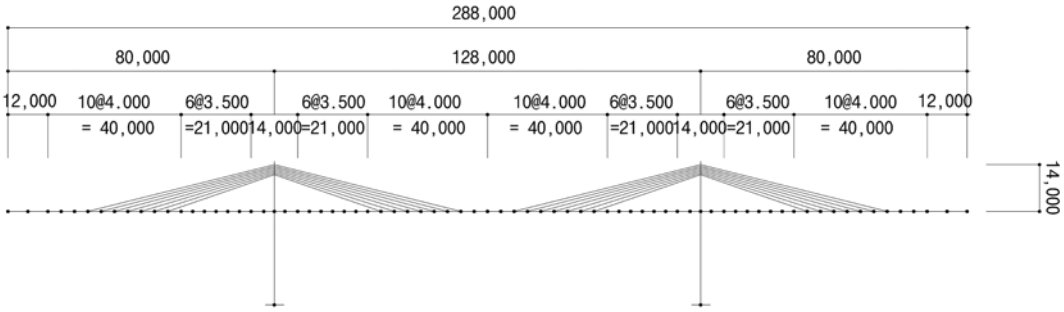


그림 2. 일본 L 하중

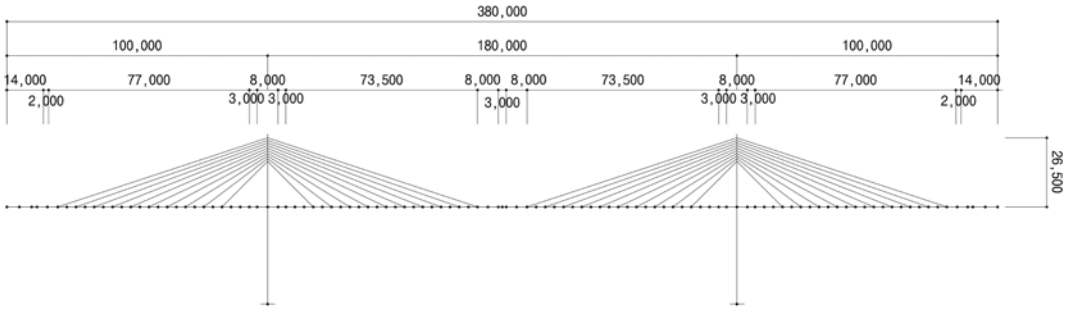
표 1. L 하중 재하방법 및 재하길이

주재하하중(교폭 5.5 m)						종속재하하중
등분포 하중 p_1			등분포 하중 p_2			
재하장 D(m)	하중(kgf/m^2)		하중(kgf/m^2)			
	모멘트	전단력	L80	80<L≦130	L≧130	
10	1,000	1,200	350	430 - L	300	주요재하하중의 50%



■ 주탑높이 : 14m ■ 케이블 : 27ϕ15.2 ■ f_{ck} = 40MPa
■ 형고높이 : 3.5~4.5m ■ tendon : 상 12ϕ15.2 ■ 주두부 경계조건
하 19ϕ15.2 : 연속구조

그림 3. 보통규모의 엑스트라도즈드교 (중앙지간장 L=128 m) - CASE 1



■ 주탑높이 : 26.5m ■ 케이블 : 27ϕ15.2 ■ f_{ck} = 40MPa
■ 형고높이 : 3.3~5.3m ■ tendon : 19ϕ15.2 ■ 주두부 경계조건
: 강결구조

그림 4. 고주탑 엑스트라도즈드교 (중앙지간장 L=180 m) - CASE 2

면 하중 증가율이 완만하다. 반면 우리나라 차선하중인 DL하중은 교량연장 및 폭이 증가할수록 하중증가율이 L하중과 비교하여 다소 급해진다(건설교통부, 2005). 보통 규모의 엑스트라도즈드교와 고주탑 엑스트라도즈드교의 피로응력 분석을 위해 주경간장을 각각 128 m, 180 m로 나누어 L하중과 DL24, DB24하중의 변동응력을 비교해 보았다. 해석모델은 그림 3 및 그림 4와 같다. 두 해석모델에 대해서 L하중과 국내차량하중을 2차선에서 6차선까지 재하하여 차선증가와 교장증가에 따른 두 하중의 특성을 검토하였으며, 검토결과를 그림 5~그림 10에 제시하였다.

그림 5에서 그림 8의 보강형의 최대 정·부모멘트 변화를 보면 L하중은 DB24하중보다 DL24하중이 더 유사함을 알 수 있었으며 차선폭이 커질수록 L하중보다 DL하중에 의한 모멘트 증가가 커짐을 알 수 있다. 또한, 정모멘트 크기와 부모멘트 크기를 보면 두 하중의 차이를 알 수 있다. 즉, L하중은 주 재하하중이 10 m로 분포되어 집중하중만 재하되

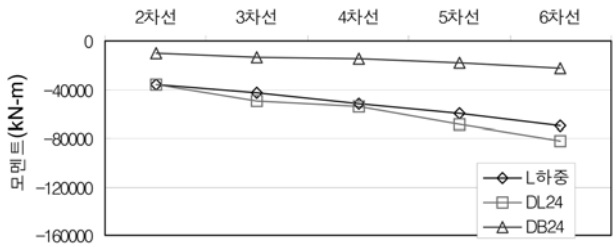


그림 5. 교량의 차선변화에 따른 부모멘트 변화 (주경간장 128 m)

는 DL하중과 비교하여 최대부모멘트는 DL하중이, 최대정모멘트는 L하중이 크게 나타났다. 두 하중의 최대 모멘트의 오차는 17% 정도로 나타났다. 그림 9와 그림 10의 변동응력 그래프를 보면 DL24의 경우 엑스트라도즈드교가 주로 적용되는 2차선에서 4차선까지의 변동응력 차이는 거의 발생하지 않았으며 5차선 이후부터 변동응력 차이가 커지는 것으로 분석되었는데 6차선에서 중앙지간장에 따라 9%(L=128 m)에서

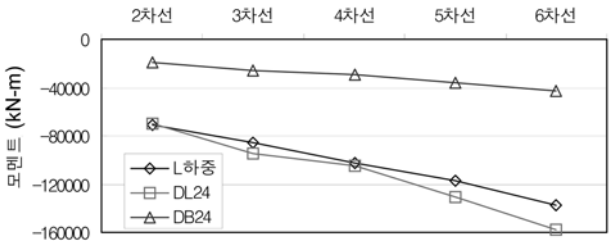


그림 6. CASE 2 교량의 차선변화에 따른 부모멘트 변화 (주경간장 180 m)

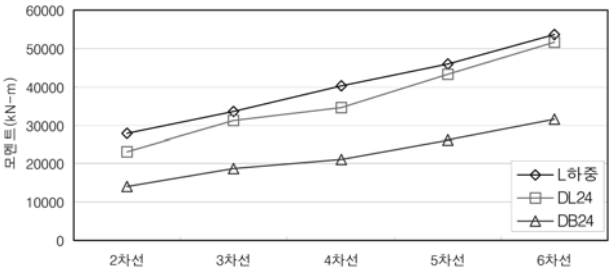


그림 7. 교량의 차선변화에 따른 정모멘트 변화(주경간장 128 m)

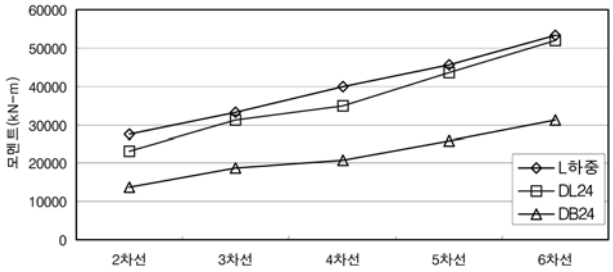


그림 8. 교량의 차선변화에 따른 정모멘트 변화(주경간장 180 m)

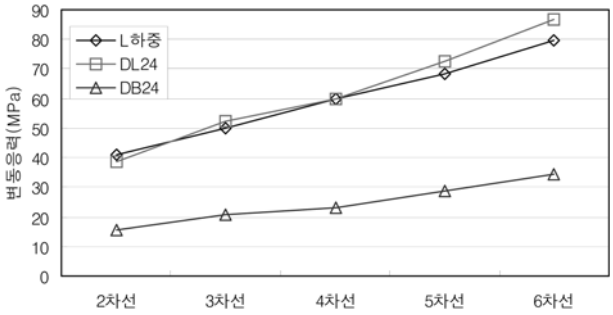


그림 9. 교량의 차선변화에 따른 변동응력 변화(주경간장 128 m)

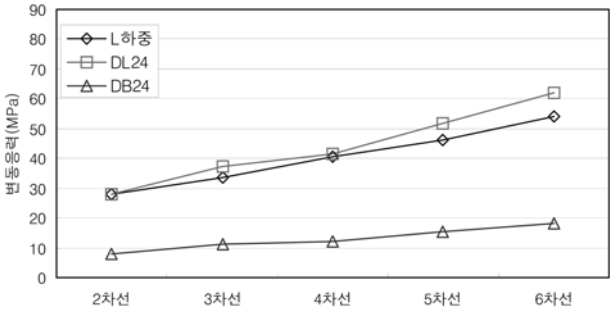


그림 10. 교량의 차선변화에 따른 변동응력 변화(주경간장 180 m)

15%(L=180 m)까지 DL24하중이 크게 발생하여 다소 안전측 설계가 가능할 것으로 판단되었다.

DB24의 경우, L하중으로 인한 변동응력보다 최소 56%에서 최대 72%까지 작게 발생하여 적정 수준의 피로안정성을 확보할 수 없을 것으로 판단되어 일본의 허용응력 그래프 적용 시 DL24하중이 피로검토하중으로 적절함을 알 수 있었다.

3. 매개변수 결정 및 해석모델

3.1 매개변수 결정

본 연구에서는 고주탑 적용에 따른 구조적 거동특성을 분석하기 위해 주탑높이, 주거더 강성, 케이블 면수 등을 매개변수로 두어 검토하였다. 그 외 설계변수들은 일반적인 엑스트라도즈드교에 적용되는 수치를 적용하였다. 본 연구에서 위 세가지 변수를 기준으로 매개변수 해석을 수행한 이유는 하중분담율이 사재 안전율의 기준이 되는 변동응력(피로응력)의 설계지표가 될 수 있기 때문이다. 즉, 변동응력은 사장교의 케이블 안전율을 적용할 것인가, 엑스트라도즈드교의 케이블 안전율을 적용할 것인가의 판단근거가 되는데 복잡한 피로응력 검토없이 하중분담율은 교량의 특성을 알 수 있는 선행 설계지표라 할 수 있다. 그리고, 하중분담율은 주탑높이와 주거더의 강성에 따라 영향을 받고, 케이블면수의 경우 고주탑의 효과가 어느 경우(일면과 이면)에 더 크게 나타나는지 확인할 수 있는 파라메타이기 때문이다.

중앙지간장에 대한 측경간장의 비는 케이블의 축력변동과의 관계가 명확하지 않으므로 일반적으로 사용되는 0.60을 사용하고, 주거더 지지형식은 활하중에 의한 케이블 변동응력에 유리하고 FCM 가설시 주두부 고정용 가설재가 필요없는 강결구조형식을 적용한다. 사재 배치 형상은 시공실적도 많고 하프(harp)형에 비해 변동응력이 다소 크게 발생하지만 일반적으로 엑스트라도즈드교에 많이 적용되는 팬(fan)형 을 적용한다. 엑스트라도즈드교에서 케이블 배치의 목적이 지점부의 모멘트 저감시키기 위한 것이며, 캔틸레버 공법 가설시 부모멘트가 작을수록 경제적이라는 관점에서 보면 케이블의 정착위치를 주탑에 근접하는 것이 유리하다. 또한, 고주탑을 적용할 경우 낮은 형고 적용으로 작아진 거더의 강성을 보강하기 위해 보통의 엑스트라도즈드교와 다른 케이블 정착위치를 적용한다.

3.2 구조 해석모델 선정

매개변수 해석모델은 중앙지간장 180 m를 갖는 그림 11과 같은 3경간 엑스트라도즈드교를 기본모델로 선정하고 해석모델의 수는 경제성 분석 시 기준이 되는 PSC 박스교와 일반적인 엑스트라도즈드교 2개, 고주탑 엑스트라도즈드교 12개를 포함하여 총 15개 모델을 선정하였다. 그림 11은 해석모델의 예로 CASE2 모델의 내부 강연선과 사재 배치 현황을 나타내고 있다. 또한, 표 2에 매개변수 해석모델의 제원을 제시하였다. 연직하중에 대한 사재의 분담율을 나타내는 연직하중분담율 β는 사재와 주거더의 강성비를 나타내는 지표이긴 하나 사재의 허용응력을 결정하는 직접적인 지표는 아니다. 그러나 예비설계시 간단한 해석으로 피로응력의 범위를 예측할 수 있어서 여러 설계 변수로 인해 수많은 설계과정을 거쳐야 하는 엑스트라도즈드교의 경우 중요한 참고자료가 될 수 있다. 연직하중 분담율의 산정은 교량의 경간수에 따라 표 3과 같이 단위하중을 재하하여 지점에서의 수직반력 합에 대한 사재의 연직성분 축력의 비로 산정한다.

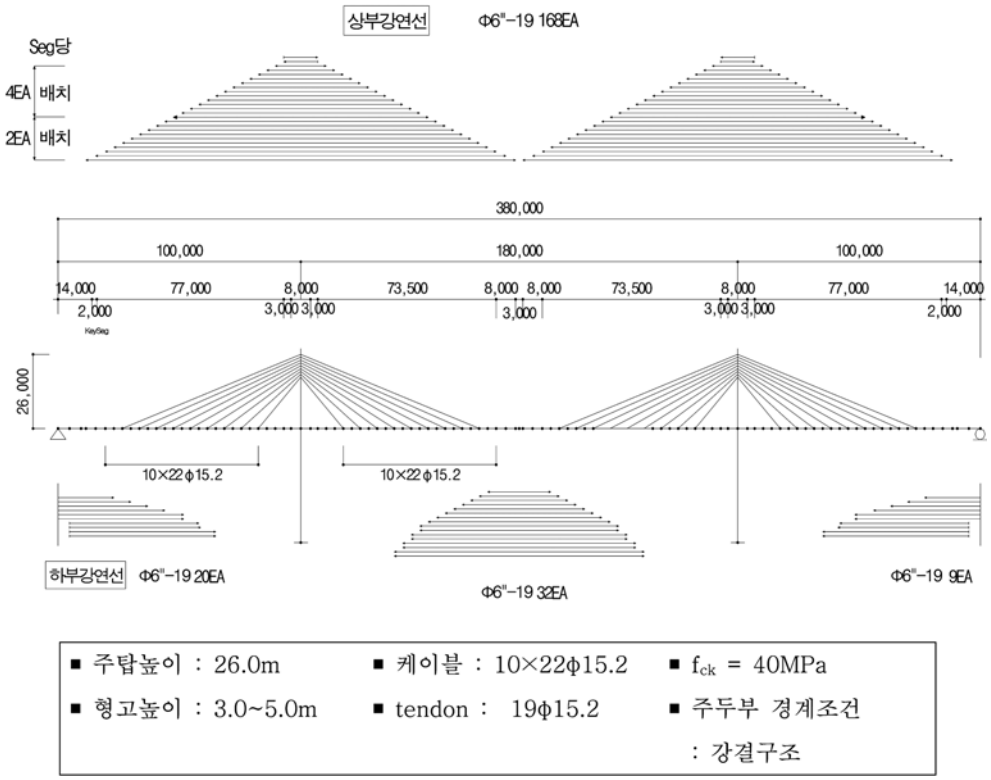


그림 11. 매개변수 해석 모델 (Case 2)

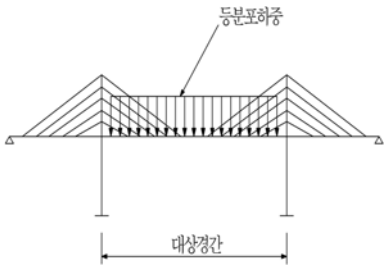
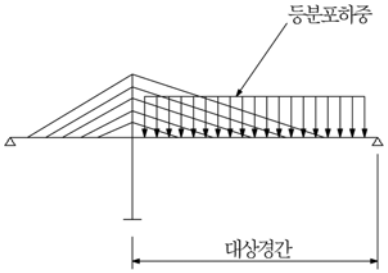
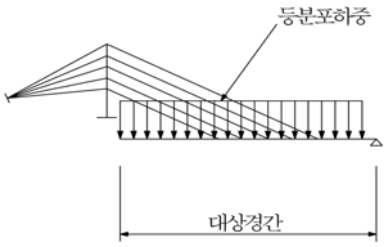
표 2. 매개변수 해석모델의 제원

해석모델 No.	케이블 배치	주탑 높이 (m)	거더 높이 (m)	케이블 단수		형고 변화	비고
				갯수	상세		
CASE 0	-	-	5.0~11.0	-	-	○	PSC 박스교
CASE 1	이면 배치	18.0	4.0~6.5	9	3×22ϕ15.2 6×27ϕ15.2	○	주탑고비 1/10
CASE 2		26.0	3.0~5.0	10	10×22ϕ15.2	○	주탑고비 1/7
CASE 3			3.0~3.5	11	7×27ϕ15.2 4×31ϕ15.2	-	
CASE 4			2.5~3.0	11	5×27ϕ15.2 6×31ϕ15.2	-	
CASE 5		30.0	3.0~5.0	10	8×19ϕ15.2 2×22ϕ15.2	○	주탑고비 1/6
CASE 6			3.0~3.5	11	5×22ϕ15.2 6×27ϕ15.2	-	
CASE 7			2.5~3.0	11	11×27ϕ15.2	-	
CASE 1'	일면 배치	18.0	4.0~6.5	9	2×31ϕ15.2 7×37ϕ15.2	○	주탑고비 1/10
CASE 2'		26.0	3.0~5.0	10	2×31ϕ15.2 8×37ϕ15.2	○	주탑고비 1/7
CASE 3'			3.0~3.5	11	4×47ϕ15.2 7×51ϕ15.2	-	
CASE 4'			2.5~3.0	11	11×51ϕ15.2	-	
CASE 5'		30.0	3.0~5.0	10	8×31ϕ15.2 2×37ϕ15.2	○	주탑고비 1/6
CASE 6'			3.0~3.5	11	5×43ϕ15.2 6×47ϕ15.2	-	
CASE 7'			2.5~3.0	11	11×47ϕ15.2	-	

$$\beta = \frac{\text{사재부담하중}}{\text{전체재하하중}} \times 100(\%) \quad (1)$$

그림 12와 그림 13은 각각 매개변수해석을 위한 CASE2와 CASE2'의 수치해석 모델이며 주거더와 주탑, 교각은 프레임요소를 사용하고 사재는 기하학적 비선형성이 작기 때문에 사용하기 간편한 트러스요소를 적용하여 모델링하였다.

표 3. 연직하중 재하방법

	3경간연속	2경간연속	단경간
재하방법			

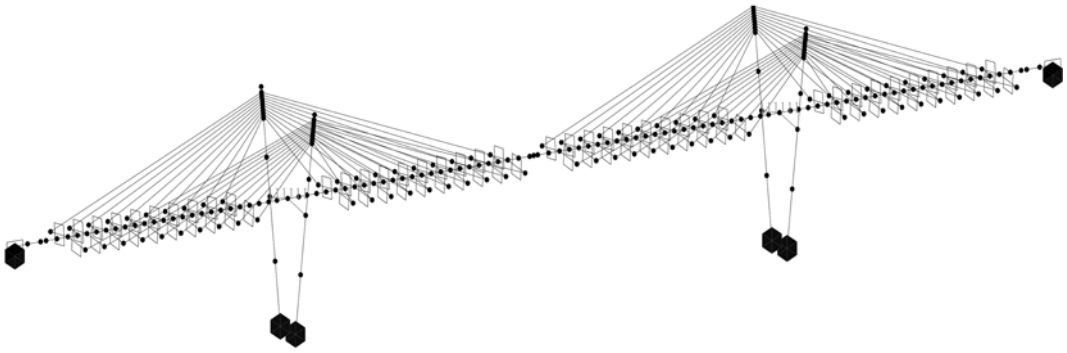


그림 12. CASE 2의 수치해석 모델

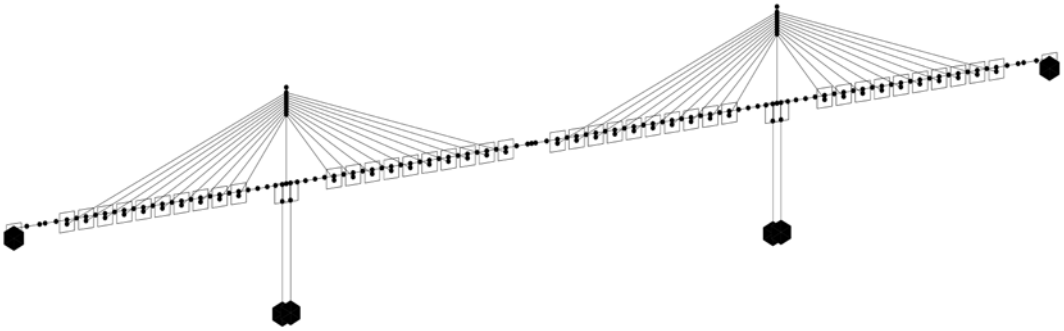


그림 13. CASE 2'의 수치해석 모델

CASE2의 경우 프레임 요소 168개, 트러스 요소 80개가 사용되었고 CASE2'의 경우 프레임 요소 138개, 트러스 요소 40개가 사용되었다.

4. 매개변수 해석결과

매개변수 해석 시 시공방법은 현장타설 켄틸레버공법(FCM)을 적용하여 시공단계를 고려하였으며 내부 텐던량과 사재량을 조절하여 구조물의 안전성을 확보하였다. 구조해석 시 공통적으로 고정하중과 활하중 조합에 대해서 주거더의 응력수준은 95%이내, 사재의 장력은 허용장력이내가 되도록 하였다. 변동응력과 연직하중 분담율은 위의 두 조건을 만족하는 상태에서의 값을 적용하였으며 경제성 분석시에는 허용변동응력 70 MPa를 넘는 사재의 경우, 사재의 면적을 키워 피로안정성을 확보하였으며 증가된 물량을 반영하여 사재량을 산출, 경제성을 검토하였다.

4.1 구조거동 분석

그림 14~그림 16은 고정하중과 활하중 조합에 대한 주거더의 최대 모멘트도를 보여주고 있다. CASE 0은 일반 PSC 박스거더교이고 CASE 1는 이면 케이블을 갖는 보통 주탑고의 엑스트라도즈드교이며, CASE 2~4는 주탑고가 26.0 m(주탑고비 1/7)이며 CASE5~7은 주탑고가 30.0 m(주탑고비 1/6)이다. 또한, 일면 케이블를 갖는 엑스트라도즈드교는 각 케이스 넘버 뒤에 프라임(') 기호를 붙여 구분하였다. 그림 14~그림 16을 토대로 각 케이블별 주두부에서의 최대부모멘트와 지간중앙부에서의 최대정모멘트를 비교하여 그림 17과 그림 18에 제시하였다.

그림 17을 보면 주두부 부모멘트는 PSC 박스교 대비 주탑고비 1/10의 보통 엑스트라도즈드교의 경우는 41%, 주탑고비 1/6의 고주탑 엑스트라도즈드교의 경우는 최대 83%가 감소하였다. 따라서 주두부 거더높이는 고주탑 엑스트라도즈드교의 경우 PSC 박스교 대비 27%인 3 m까지 감소가 가능하였다. 이러한 감소는 거더높이가 줄어들수록 주거더의 자중과 주두부의 모멘트가 크게 감소하였기 때문이며 줄어든 거더의 강성은 사재로 보강할 수 있었다. 그러나, 주두부 부모멘트는 크게 감소하였지만 축력은 오히려 증가하여 거더의 높이가 작아질수록 내부 텐던량을 줄이거나 거더 하부 슬래브 두께를 증가시켜 거더의 응력이 콘크리트의 허용압축응력 이내에 들도록 하였다. 그림 18을 보면 지간 중앙부

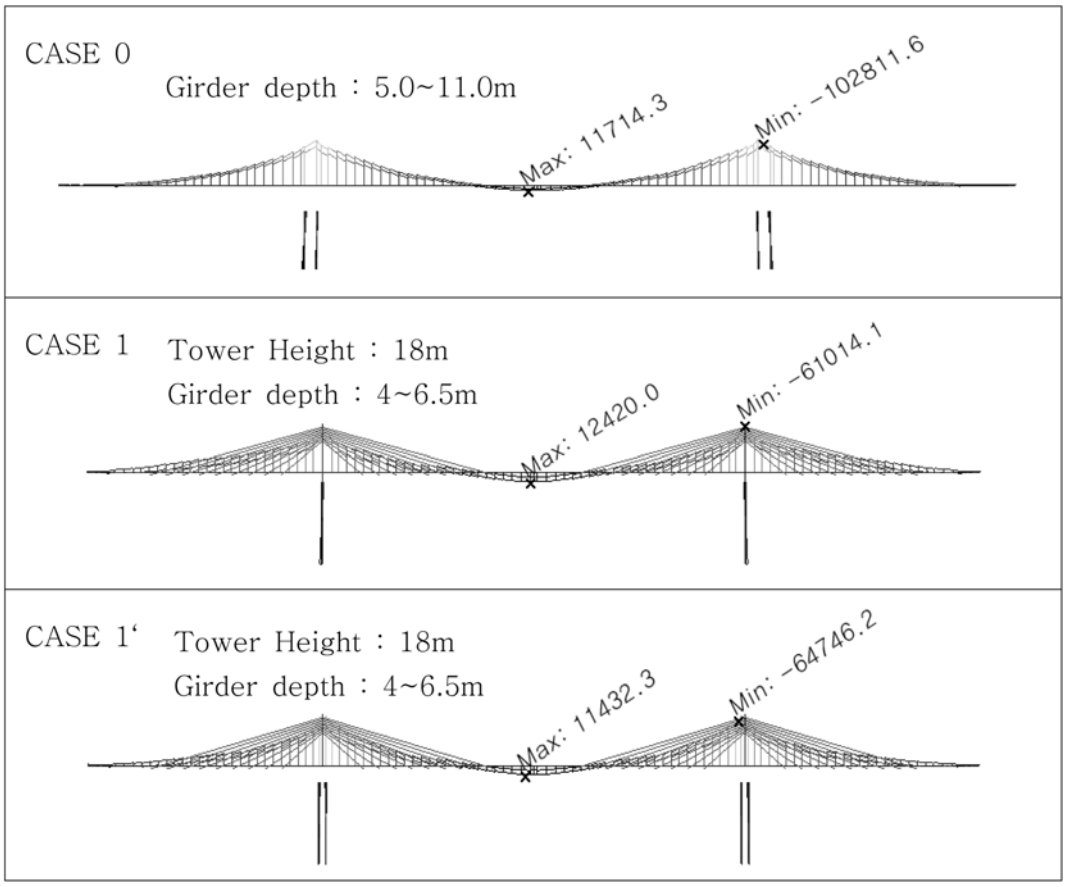


그림 14. PSC박스교와 보통규모 엑스트라도즈드교의 최대 정・부 휨모멘트도(단위:tonf·m)

정모멘트는 보통 엑스트라도즈드교는 PSC 박스교와 비슷하였으나 고주탑 엑스트라도즈드교는 최대 45%까지 감소하여 거더높이를 PSC 박스교와 비교하여 50%인 2.5 m까지 줄일 수 있었다. 이러한 감소는 주두부와 달리 모멘트 감소가 크지 않아 보통 엑스트라도즈드교의 사재 최외측 간격인 중앙지간장의 18%를 고주탑 엑스트라도즈드교에서 1.7%까지 줄여 지간 중앙부 모멘트를 감소시킬 수 있었다. 즉, 그림 19와 같이 케이블 최외측 간격을 일반 엑스트라도즈드교보다 작게 배치하여 단면의 높이를 최적화할 수 있었다.

3장에서 제시한 엑스트라도즈드교의 해석모델에 대해 DL24하중에 의한 변동응력과 연직하중 분담율을 산정하여 둘 사이의 관계를 확인하였다. 그림 20을 보면 변동응력과 연직하중 분담율에 따라 세 부분으로 나눌 수 있다. 먼저 Part1은 일반 엑스트라도즈드교 영역으로 실적에 근거한 사례조사와 같음을 알 수 있었다. Part2는 고주탑 엑스트라도즈드교 구간으로 연직하중 분담율은 35~80%이고 변동응력은 54~91 MPa 사이에 있었다. 마지막으로 Part3는 사장교 구간으로 본 연구의 매개변수모델에서는 엑스트라도즈드교를 대상으로 수행하여 Part3에 해당하는 모델은 없었다. 그림 20을 검토하면 각 구간별로 변동응력과 연직하중 분담율은 비례관계에 있다는 것을 알 수 있으며, 특히 Part2에서는 변단면(연직하중 분담율 35~50%)과 등단면(연직하중 분담율 60~80%)에 따라서 기울기가 다른 비례관계를 나타났다. 또한, 변단면의 경우 배치된 모든 사재의 변동응력이 허용변동응력 이내로 들어와 사재의 허용응력을 사재의 인장강도 60%로 적용할 수 있었으나, 등단면의 경우 일부 사재에 다른 허용응력을 적용하거나 사재의 면적을 늘려 허용변동응력 범위 내에 들어오도록 하였다.

국내에서는 보통 사재의 면적을 늘려 피로안전성을 확보하고 있다. 연직하중 분담율 β에 대한 구조적 특성을 요약해 보면, 첫째, β가 30% 이내이면 변동응력은 50 MPa 이내로 발생함을 알 수 있었다. 주탑 정착장치를 새들시스템으로 적용할 경우, 사재의 상호 접촉에 의해서 발생하는 플랫팅 피로로 허용변동응력을 50 MPa 이하로 제한하고 있다(Cho, 2003). 즉, 고주탑 적용을 위해선 새들시스템보다는 분리정착시스템이 유리함을 알 수 있었다. 둘째, 고주탑 영역에서 주두부의 높이를 중앙지간장 대비 1/36의 값을 적용한 변단면을 사용하여 β가 30~50% 이내이면 모든 사재가 70 MPa 이내로 발생하였다. 셋째, 고주탑 영역에서, 시공성 향상을 위해 주두부의 높이를 최대 3.0 m까지 줄여 등단면으로 계획하면 β는 60~80%가 되었다. 이때, 배치된 사재 중 최소 5%에서 최대 55%는 허용변동응력 70 MPa를 초과하여 사장재 케이블의 허용변동응력 기준이 되는 100 MPa 이내로 발생하였다. 매개변수 해석을 통하여 연직하중 분담율에 따라 엑스트라도즈드교의 거동특성을 구분할 수 있었으며 엑스트라도즈드교 기본계획 시 지표로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 경제성 분석

본 절에서는 왕복 4차선의 중앙지간장 180 m, 총 연장 380 m의 3경간 교량을 PSC 박스교와 주탑고가 다른 엑스트라도즈드교로 계획하였을 경우의 공사비를 분석하여 고주탑

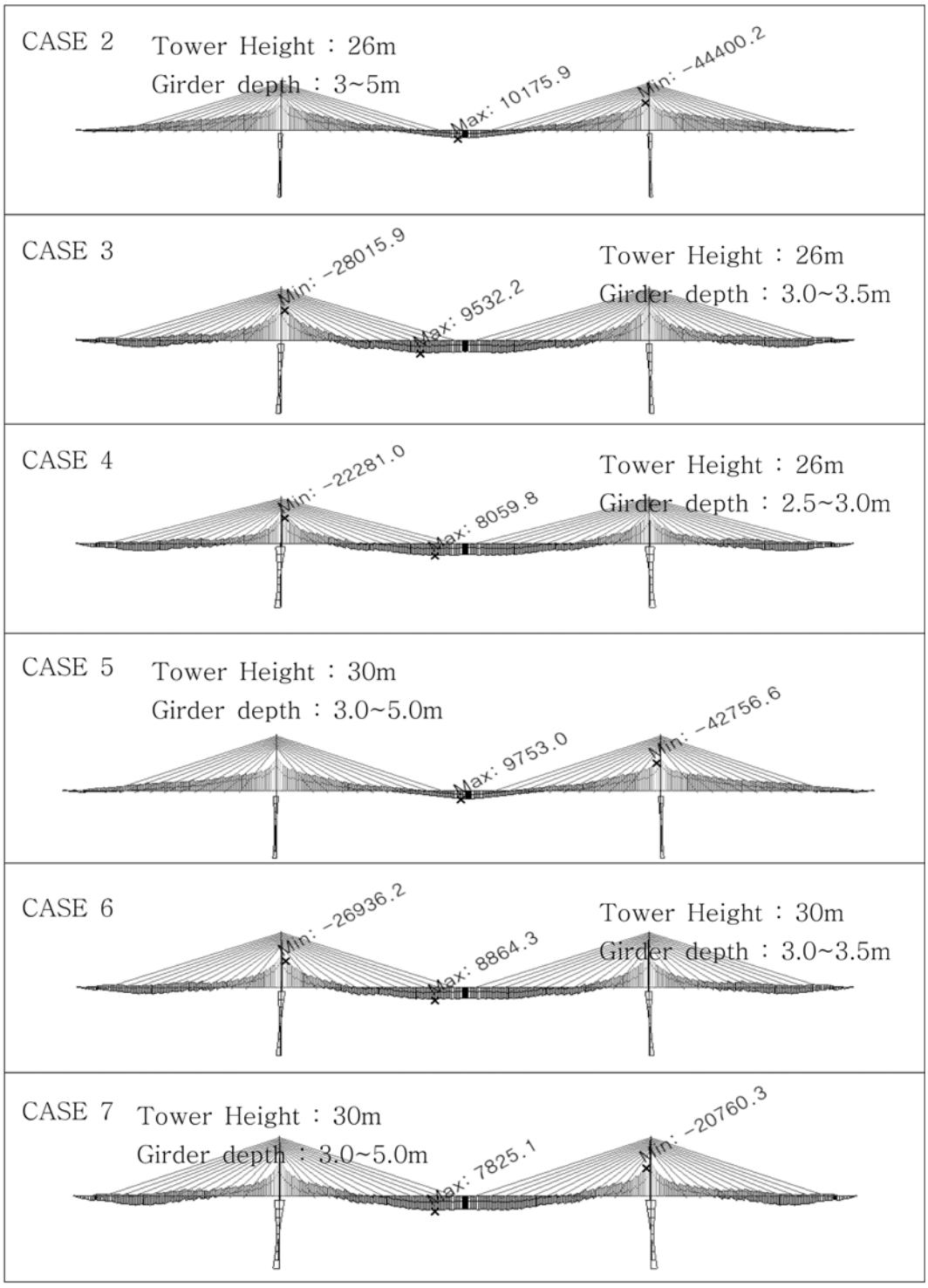


그림 15. 이면 고주탑 엑스트라도즈드교의 최대 정・부 휨모멘트도(단위:tonf·m)

적용에 따른 경제성 평가를 수행하였다. 매개변수 모델별로 콘크리트, 철근, 텐던, 사재 등의 주요 물량을 산출하여 PSC 박스교 대비 건설비용 비율을 검토하였다. 또한, 건설비용 비율와 연직하중 분담율과의 관계를 확인하여 최적의 연직하중 분담율을 추정하였다. 그림 21~그림 24에 매개변수 모델별 콘크리트, 철근, 텐던, 사재의 물량변화를 제시하였다. 콘크리트는 이면보다 일면 케이블 엑스트라도즈드교가 10% 내외로 작았는데 이는 일면 케이블 배치의 경우 주탑의 수량이 상대적으로 적고 단면을 효율적으로 계획할 수 있었기 때문이다. 콘크리트에 비례하는 철근도 같은 경향을 보임을 알 수 있었다. 내부 텐던량도 이면 케이블 배치보다 일면 케이블 배치가 5~15% 정도 더 적었으며 고주탑 영역에서는 주탑고 변화에 따른 내부 텐던량의 변화는 없었다. 이것은 거더의 안전성 확보를 위해 텐던량으로 조절하는 것보다 사재량을 조절하는 것이 더 효과적이어서 사재량만을 변화시켰기 때문이다. 사재량은 케이블 배치에 따라서는 일면 배치 케이블이 이면 배치 케이블에 비해 12~27%, 주탑이 높아짐에 따라서 1~9% 가량 감소함을 알 수 있다.

표 4는 매개변수에 따른 엑스트라도즈드교의 구조적, 경제적 특징을 보여주고 있다. 즉, 매개변수 모델별 연직하중 분담율 β와 변동응력 Δf_L, 기초를 제외한 개략 공사비, PSC 박스교의 건설비용 대비 비율을 파악함으로써 적정수준의 사

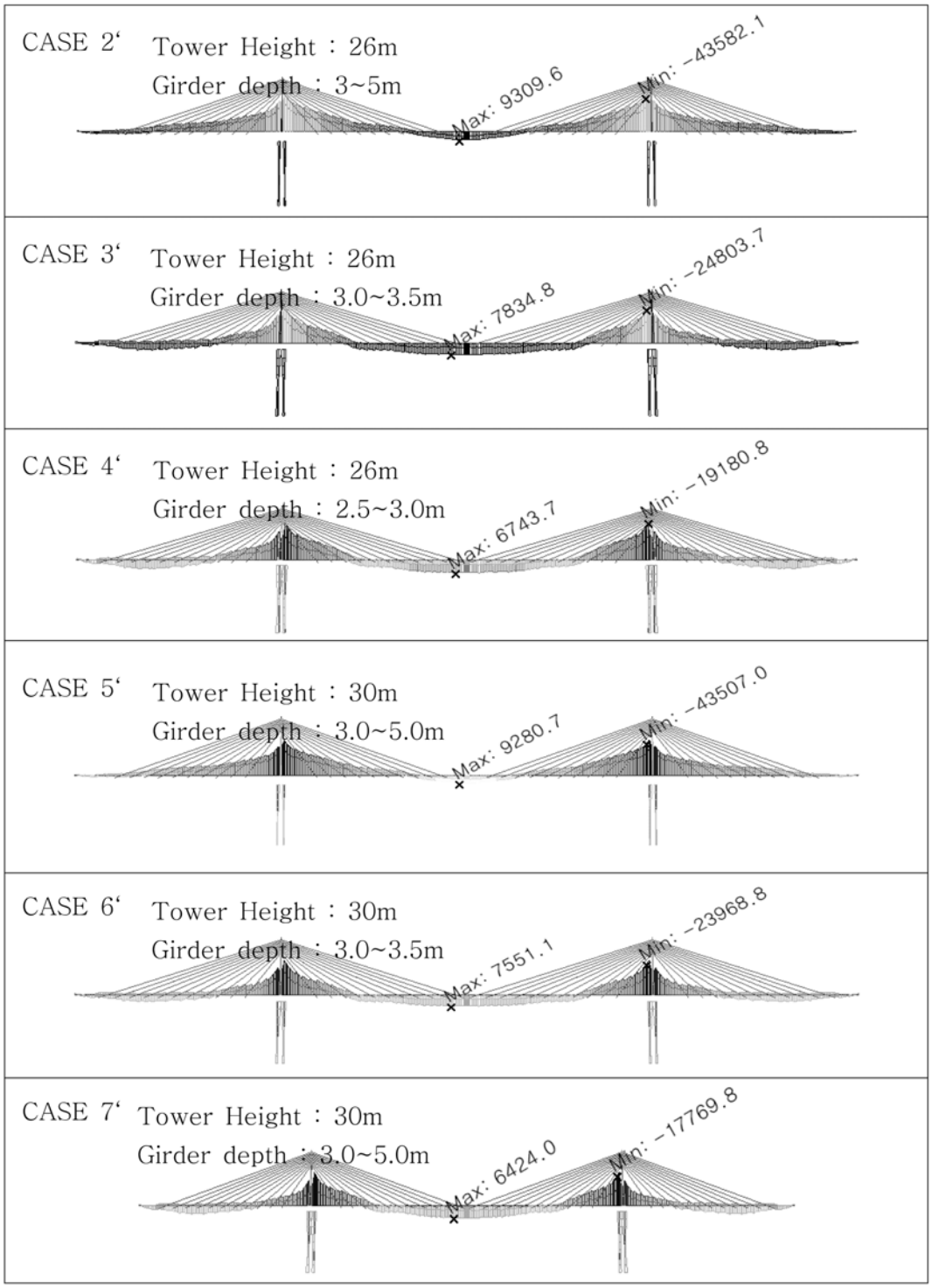


그림 16. 일면 고주탑 엑스트라도즈드교의 최대 정 · 부 휨모멘트도(단위: tonf·m)

재와 거더의 하중분담 비율을 알 수 있다. 공사비 산정시 주요 물량을 근거로 하여 2008년도 단가(單價)를 적용하였다. 건설비용 비율 C는 PSC 박스교의 공사비를 기준으로 산정하였다. 케이블 배치에 따라 공사비를 비교해 보면 일면 케이블 배치의 경우 대부분이 PSC 박스교보다 경제적이였으며 CASE5가 87.5억원으로 가장 적었다. 이면 케이블 배치의 경우 모두 PSC 박스교보다 공사비가 컸으며 CASE5가 96.7억원으로 이면 케이블 배치 모델우 모가장 경제적이었다. 즉, 케이블 배치는 이면 배치보다 일면 배치가 더 경제적이였으며 주탑고의 증가가 효율적임을 알 수 있었다. 같은 편심거리를 확보하더라도 일면 케이블 배치 주탑은 콘크리트가 적게 필요하였고 거더의 단면을 효율적으로 계획할 수 있어 거더의 중량이 작아 사재도 적게 필요하였다. 또한, 일면 배치의 경우 다 P고가인 정착장치의 수가 반으로 줄어들어 경제적이었고 긴장작업 수가 줄어들어 시공성도 좋았다.

주탑고 변화에 따른 공사비를 비교해 보면 보통의 엑스트라도즈드교보다 고주탑 엑스트라도즈드교가 순공사비로 약 3% 정도 절감시킬 수 있었다. 하지만, 고주탑 영역에서 주탑고비 1/7과 1/6의 건설비용은 차이가 거의 없었는데 이는 편심거리 증가로 구조적 효율성은 좋아지지만 변동응력의 증가로 인해 사재의 단면적이 커져 구조적 효율성이 좋아지는 만큼 사재의 양을 감소시킬 수 없었기 때문이다. 즉, 주탑고가 높아질수록 편심거리가 커져 구조적 효율성은 좋아지지만 피로응력이 커지므로 공사비는 주탑고비 1/6일 정도에서

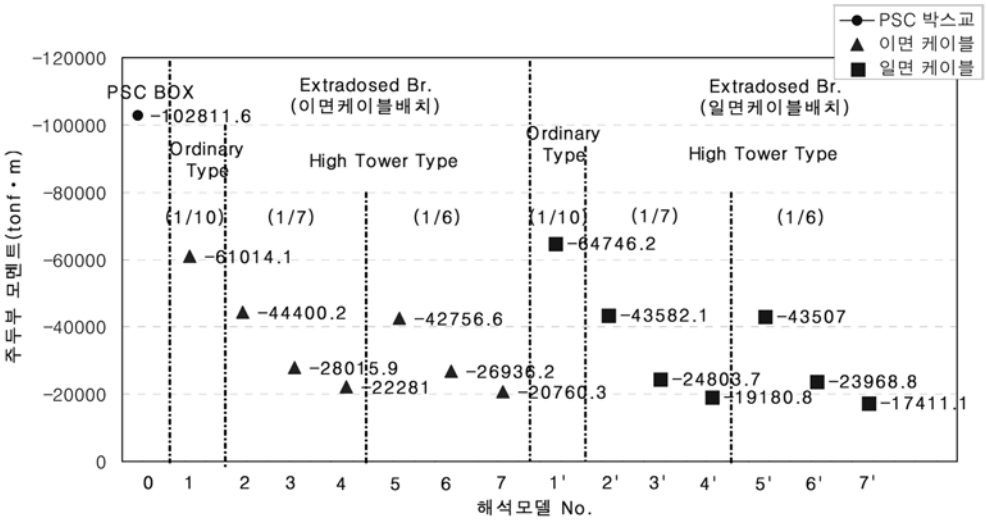


그림 17. 해석모델별 주두부의 최대 부모멘트

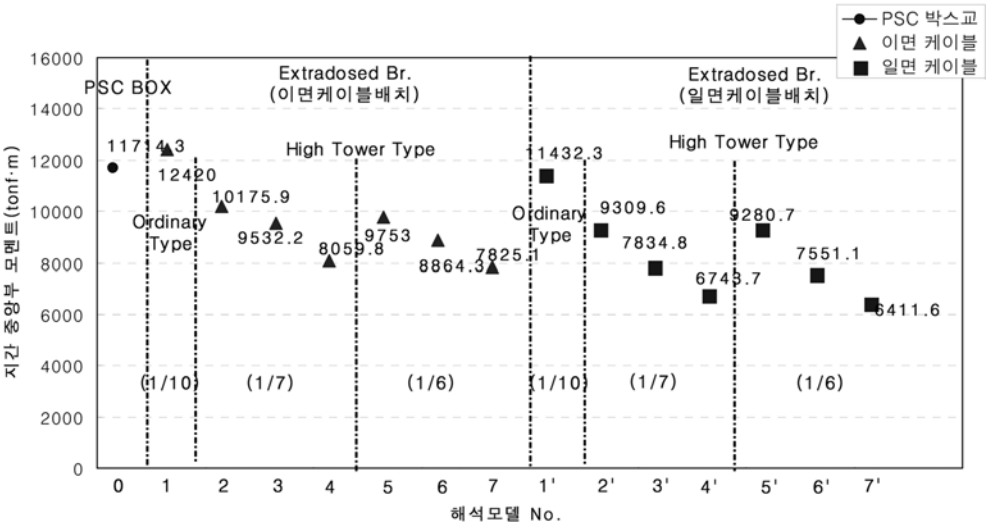


그림 18. 해석모델별 지간 중앙부의 최대 정모멘트

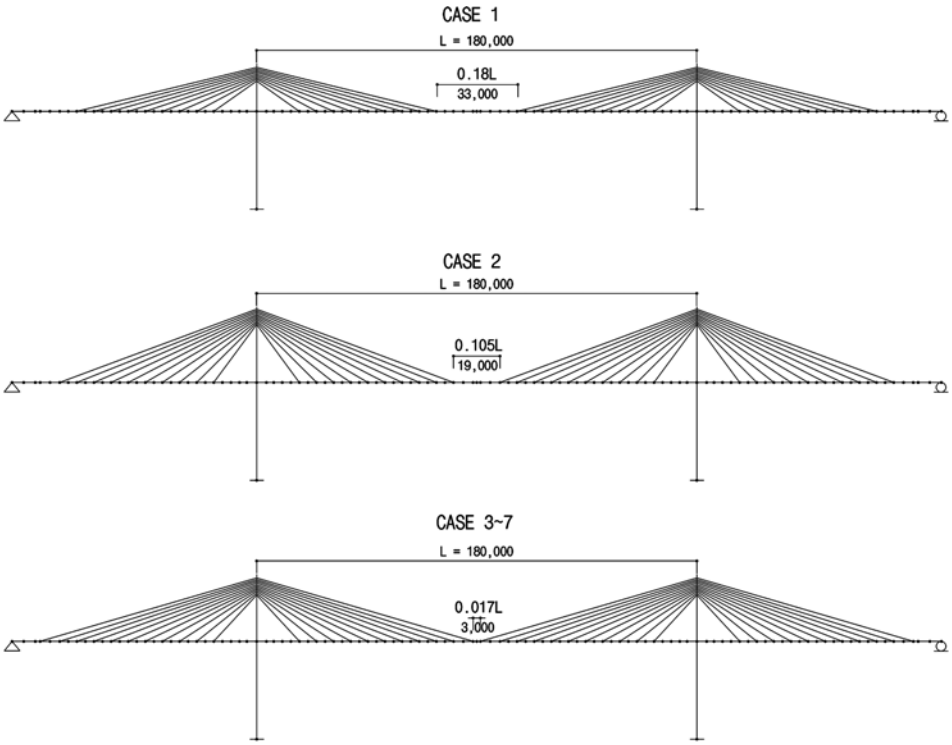


그림 19. CASE에 따른 사재의 정착위치 (단위:mm)

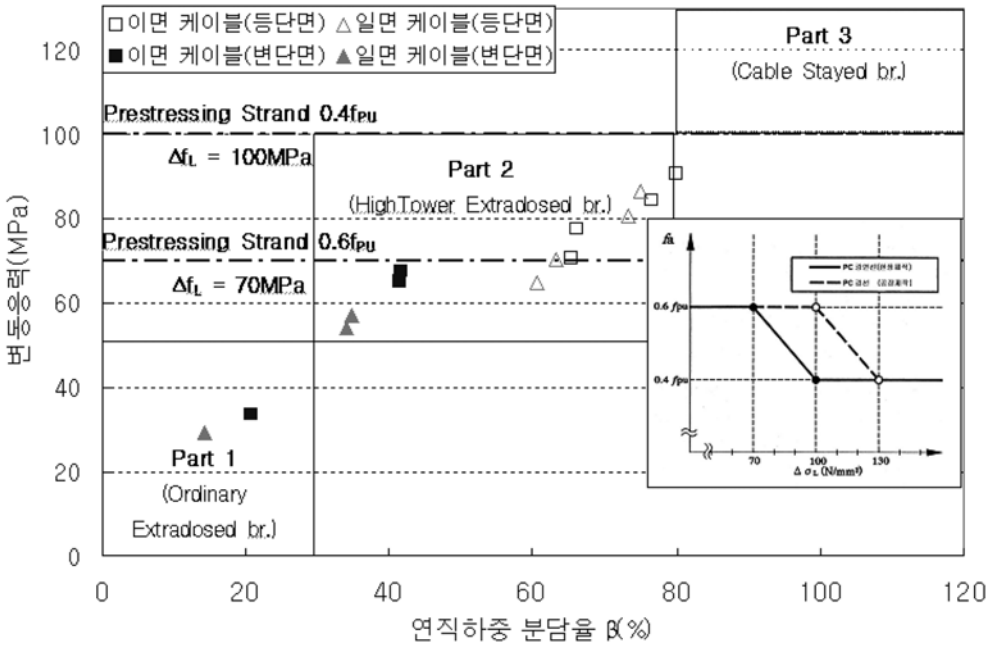


그림 20. 변동응력과 연직하중 분담율과의 관계

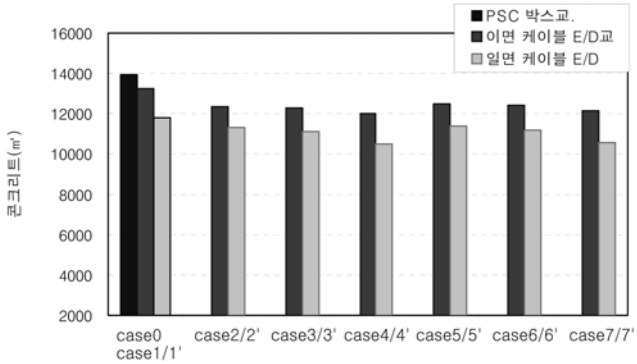


그림 21. 해석모델별 콘크리트 물량

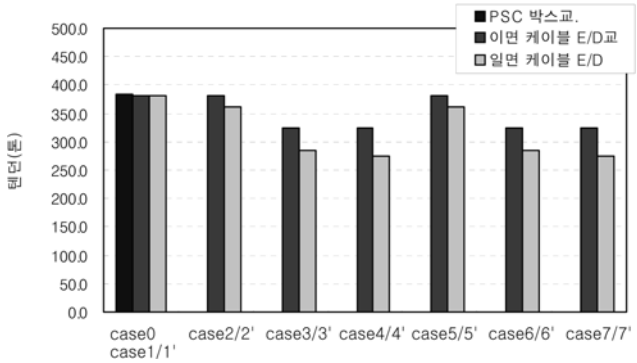


그림 23. 해석모델별 텐던 물량

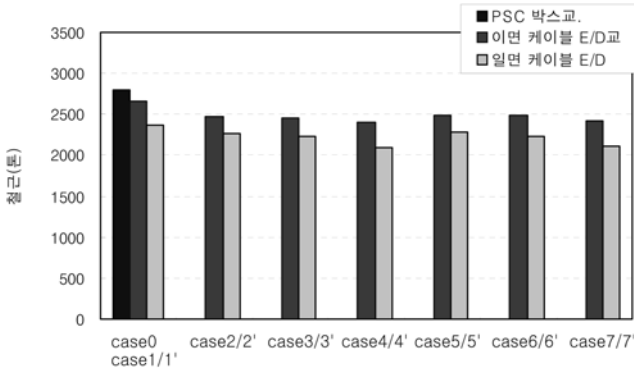


그림 22. 해석모델별 철근 물량

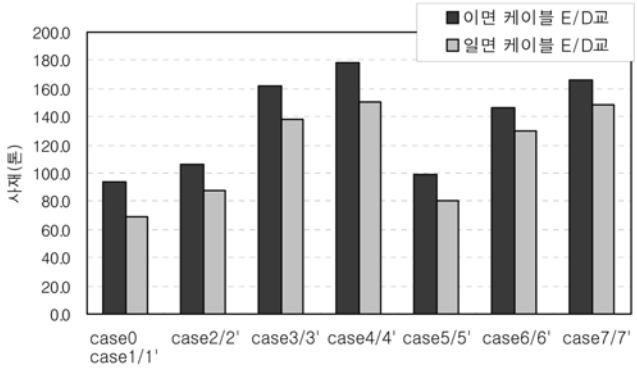


그림 24. 해석모델별 사재 물량

표 4. 매개변수 모델의 구조적, 경제적 특성

구분	PSC 박스교	엑스트라도즈드교													
		이면 케이블 배치							일면 케이블 배치						
		H/L=1/10	H/L=1/7			H/L=1/6			H/L=1/10	H/L=1/7			H/L=1/6		
	case0	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case1'	case2'	case3'	case4'	case5'	case6'	case7'
β(%)	-	20.7	41.4	65.4	76.6	41.6	65.9	79.9	14.4	34.0	60.7	73.2	35.5	63.2	75.0
Δf_L(MPa)	-	33.6	65.1	71	84.4	67.6	77.7	90.8	29.3	54	70.3	80.8	57.7	70.5	86.4
순공사비(억원)	90.6	100.0	97.6	102.0	103.5	96.7	101.7	101.8	90.0	88.5	91.3	89.9	87.5	90.0	90.7
C	1.00	1.10	1.08	1.13	1.14	1.07	1.12	1.12	0.99	0.98	1.01	0.99	0.97	0.99	1.00

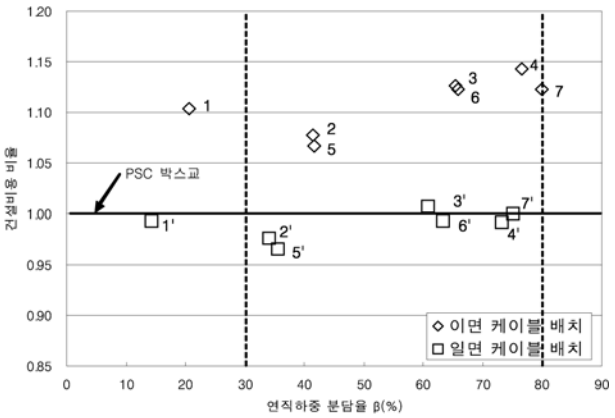


그림 25. 연직하중 분담율 β와 건설비용과의 관계

수렴할 것으로 추정되었다. 또한, 주탑고가 높아질수록 연직하중 분담율이 증가하였는데 연직하중 분담율 β와 건설비용과의 관계를 추정하여 최적의 사재와 거더의 하중분담 비율을 제공함으로써 엑스트라도즈드교 설계 시 지표를 제시하고자 한다.

그림 25에 연직하중 분담율 β와 건설비용과의 관계를 제시하였다. 연직하중 분담율 β에 대한 경제적 특성을 요약해보면, 첫째, 이면 케이블 배치의 경우 β가 41% 정도에서 최적임을 알 수 있었고 일면 케이블 배치의 경우 β가 35%에서 가장 경제적으로 나타났다. 둘째, β가 30~50% 이내의 경우, 모든 사재가 허용변동응력 이내로 들어와 사재를 효율적으로 사용할 수 있어 가장 경제적으로 계획할 수 있었다. 셋째, β가 60~80%인 경우 공사비의 증감이 거의 없게 나타나 이 정도의 연직하중 분담율에서 공사비가 수렴할 것으로 검토되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존 엑스트라도즈드교와 PSC 사장교 사이의 영역인 주탑고비 1/6~1/7의 고주탑을 적용하여 구조적, 경제적 특성을 평가하였다. 먼저, 일본의 L하중에 대응하는 피로검토하중을 제시하고자 수행한 국내 활하중과의 비교검토 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 엑스트라도즈드교가 주로 적용되는 2차선에서 4차선까지의 L하중과 DL24하중의 변동응력 차이가 거의 발생하지 않았고 4차선 이후부터는 변동응력 차이가 커지는 것으로 분석되었으며, 6차선에서는 9%에서 13%까지 DL24하중이 크게 발생하여 다소 안전축 설계가 가능하다는 것으로 분석되었다.
2. L하중과 DB24하중과는 변동응력이 최소 56%에서 최대 72%까지 오차가 발생하여 일본의 허용응력 그래프 준용 시 DL24하중이 피로검토하중으로 적절함을 알 수 있었다.

총 15개의 매개변수모델의 해석을 통해 엑스트라도즈드교의 고주탑 적용에 따른 성능개선 사항을 분석하였다. 본 연구의 매개변수모델에 대한 외형적, 구조적 특징을 기존 사례와 비교해 본 결과 형고에 대한 주탑고비는 7전후에 분포하였고, 그에 따라 연직하중 분담율은 35~80%, 사재변동응력은 54~91 MPa로 분포하였다. 외형적으로는 형고에 대한 주탑고비가 6인 경우가 가장 경제적임을 알 수 있었다. 매개변수 모델별로 콘크리트, 철근, 텐던, 사재 등의 주요 물량을 산출하여 PSC 박스교 대비 건설비용 비율을 검토하였고 건설비용과 연직하중 분담율과의 관계를 확인하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 일면 케이블 배치의 경우 이면 케이블 배치보다 경제적이었다.

2) 이면 케이블 배치의 경우 연직하중 분담율이 41% 정도에서 최적임을 알 수 있었고 일면 케이블 배치의 경우 35%에서 가장 경제적으로 나타났다.

3) 연직하중 분담율이 30~50% 이내의 경우 모든 사재가 허용변동응력 이내로 들어와 사재를 효율적으로 사용할 수 있어 가장 경제적임을 알 수 있었다.

참고문헌

건설교통부(2005) **도로교설계기준**.

오병환, 이성철, 최영철(2004) 엑스트라도즈드 PSC 교량의 구조거동 해석, **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 2040-2044.

유영, 조정식, 김동근, 유웅석(2005) Extradosed PSC교 사재 장력의 유효전달길이에 관한 연구, **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 123-126.

日本道路橋協會(1990) 道路橋示方書・同解說.

Cho, I.H. (2003) *Analysis of cable force distribution in extradosed PSC Bridges*, Master's thesis, Seoul National University.

Gimsing, N.J. (1997) *Cable Supported Bridges:Concept and Design*, John Wiley & Sons, Inc.

Kawasaki, H. and Yamauchi, A. (2000) New design consideration technique in Matakina bridge, *Prestressed Concrete*, Vol. 42, No. 3, pp. 32-36.

Komiya, M. (1997) Consideration concerning structural character in extradosed bridge, *Civil Engineering Association Scientific Thesis Collection*, Vol. 516, pp. 27-39.

Leonhardt, F. (1987) Cable stayed bridges with prestressed concrete, *PCI Journal,* Vol. 32, No. 5.

Mathivat, J. (1988) Recent development in prestressed concrete bridges. *FIB note*, pp. 15-22.

Matsushita, H., Kawasaki, H., and Shiota, R. (2002) *Structural and Economical Characteristics of Extradosed Bridge with Multiple Span and High Tower, Proceedings of FIB Symposium*, pp. 117-124.

Oka, K., Kasuga, A., and Yamasaki, J. (1997) Consideration concerning structural character in extradosed bridge, *Prestressed Concrete*, Vol. 9, No. 2, pp. 53-58.

Spcifications for Design and Construction of Prestressed Concrete Cable-Stayed Bridges and Extradosed Bridges (2000) Japan Prestressed Concrete Engineering Association.

(접수일: 2009.12.8/심사일: 2010.2.3/심사완료일: 2010.2.3)