

# 최적설계에 의한 PSC 박스 거더교의 변단면 거더유형과 긴장재 배치에 관한 연구

Research on Variable Girder Types and Tendon Arrangement  
of PSC Box Girder Bridges by using the Optimum Design

김 기 욱\*  
Kim, Ki-Wook

## Abstract

This study performed the optimum design of balanced and unbalanced span length bridges with many variable Girder types by using the optimum design program to minimize the cost for PSC box girder bridge of the full staging method. The objective of this study is to present tendon's application direction about complicated construction hereafter by studying about optimum tendon arrangement that is worked in each variable Girder type. This program used SUMT procedure and Kavlie's extended penalty function to allow in-feasible design points in the process. Powell's direct method was used in searching design points and Gradient Approximate Method was used to reduce design hours.

## 요 지

본 연구는 FSM 공법의 PSC 박스 거더교를 최소경비로 자동 설계하는 최적설계 프로그램을 이용하여 다양한 변단면 거더유형을 가진 등경간 및 부등경간 거더교에 대하여 최적설계를 수행하였다. 또한 각 변단면 거더유형에서 산출된 최적의 긴장재 배치에 관하여 연구함으로써 향후 복잡한 구조물에 대하여 더욱 적절한 긴장재의 배치형태에 대한 방향을 제시하고자 하는데 목적이 있다. 사용된 최적설계 프로그램은 축차 무제약 최소화 기법을 이용하였고, 설계과정에서 설계점들이 설계가능 영역밖에 있는 것을 허용할 수 있도록 Kavlie가 제안한 확장 벌칙함수를 도입하였다. 또한 설계점들의 탐사 방법은 Powell's direct search method를 사용하며, 설계시간을 단축시키기 위해 설계점 변화에 따른 단면력 변화를 Gradient를 이용하여 근사화 시키는 방법을 사용하였다.

**Keywords** : Variable Girder Depth, Optimum Design, PSC Box-girder, SUMT

**핵심 용어** : 변단면 거더, 최적설계, 프리스트레스 박스거더, 축차무제약최소화기법

\* 정회원, Post-Doc. The Ohio-State University, 공학박사

E-mail: ce5@korea.com 1-614-688-9033

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

철근 콘크리트 구조물, 강구조물, 합성단면 뼈대구조물, 및 강교에 대한 최적설계에 관해서는 많은 연구가 있으나 PSC 교량에 있어서는 자동화설계를 위한 프로그램 개발에 국한되어 있으며, 최적화기법을 이용한 실 구조물의 최적설계는 다소 미진한 실정이고 특히 변단면 PSC 박스 거더교의 최적설계에 대해서는 현재까지 거의 연구가 되어지지 않고 있다. 그러므로 변단면 PSC 박스 거더교의 경제적인 건설을 위해서는 시방서에 근거한 구조해석과 최적설계를 동시에 수행할 수 있는 자동화된 최적화 프로그램의 개발과 이에 대한 보다 광범위한 조사와 연구가 필요하다.

그리고 변단면 거더교는 대개 등단면 거더교 보다 작은 중앙부 거더높이를 가지므로 강교 및 철근 콘크리트교에서 변단면으로 설계하면 경제적인 설계가 되며, 수려한 경관미를 갖게 된다. 또한 경간장 면에서도 등경간 연속교 보다는 부등경간 연속교가 경제적, 미적으로 유리한 장점이 있다. 이러한 장점들이 PSC 박스 변단면 거더교에 얼마나 부합하는지 검토해 보기 위하여 교량길이가 동일한 여러 형태의 등경간 및 부등 3경간 연속 PSC 변단면 거더교에 대하여 동일한 설계조건으로 최적설계를 수행하여 결과를 분석하였다. 2004년에 발표된 논문<sup>(1)</sup>에서는 등경간 변단면 거더만을 대상으로 하였으나 부등경간을 동시에 고려함으로써 최적 기간장이면서 최적 변단면의 특이한 유형을 찾을 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 긴장재의 배치형태를 각 경간에서 비슷하게 처지도록 요구한 경우와 긴장재의 고·저점이 최적설계에 도달하기 위해 각 경간에서 독립적으로 조정되는 경우의 두 방법 모두의 장·단점을 파악하여 변단면 박스 거더교에 적용하여 좀더 적절한 형태의 긴장재 배치방법을 연구함으로써 향후 복잡한 구조물의 긴장재 배치형태에 대한 방향을 제시하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 구조해석 및 최적설계

최적설계 프로그램은 고정하중, 활하중, 프리스트레싱에 의한 단면력을 자동으로 계산하고, 설계자가 원

하는 검사위치에서 검사가 이루어 질 수 있도록 작성하고, 최적설계시 축차 무제약 최소화기법<sup>(2)</sup>을 이용하며, 설계과정에서 설계점들이 설계가능 영역밖에 있더라도 허용할 수 있도록 확장 벌칙함수를 도입하였다.

설계점들의 탐사방법은 Powell's direct search method<sup>(2)</sup>를 사용하며, 설계시간을 단축시키기 위해 설계점 변화에 따른 단면력 변화를 Gradient<sup>(2)</sup>를 이용하여 근사화시키는 방법을 사용하였다.

### 2.1 물리매개변수

설계 문제를 정식화하는 첫번째 단계는 물리매개변수를 설정하는 것이다.

본 연구에서는 고정 매개변수로 경간수, Cell의 수, 상부플랜지의 폭, 바닥플랜지의 폭, 경간장, 콘크리트·긴장재·철근의 물성치를 두었고, 변동 물리매개변수로는 긴장재의 긴장력, 거더높이, 모든 웹들의 통합 두께, 긴장재 편심, 상부플랜지 두께, 하부플랜지 두께등을 두었으며, 종속 물리매개변수로는 각 경간별 지점·중앙점·경간 1/4지점에서의 전단 철근량, Cable의 전체 수, 각 웹에서의 Cable수, 부(-)의 극한모멘트 부분 보강 철근량등을 두었다.

### 2.2 구조계산 및 단면설계

주어진 변동 물리매개변수로 인한 거더의 거동평가에 대한 계산은 크게 구조해석과 단면설계의 두 부분으로 나누어 수행하였다.

#### 2.2.1 구조해석 부분

거더에 작용하는 고정하중, 활하중, 프리스트레싱의 영향을 받는 모든 검토단면에서의 모멘트와 전단력을 계산하는 부분으로, 절차는 다음과 같이 크게 네 부분으로 구성하였다.

(가) 구조물 강성 행렬의 정식화

(나) 프리스트레싱 영향의 계산

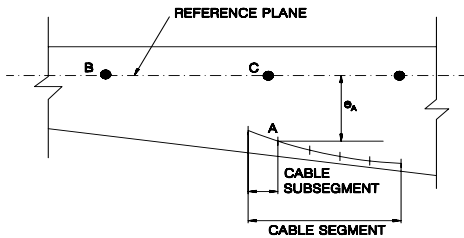
(다) 고정하중 영향의 계산

(라) 활하중 영향의 계산

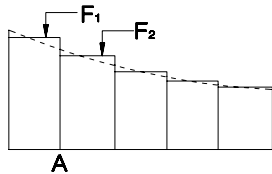
여기서, (가)과정인 구조물 강성 행렬<sup>(3)</sup>은 변위법을

사용하여 구하였다. (나)과정인 거더에 작용하는 긴장력은 Fig. 1과 같이 고려하였다.

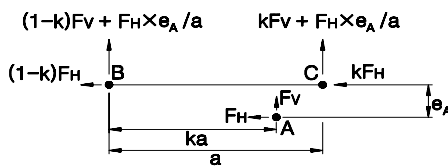
Fig. 1(a)와 같이 긴장재를 곡선 세그먼트로 분할하여 세그먼트내에서는 긴장력이 일정하고 긴장재에 의해 거더에 전달되는 하중은 각 세그먼트 절점에서만 작용한다고 가정한다. 물론 실제로는 분포하중의 개념이므로 실제와는 오차가 있으나 무시할 수 있을 정도이고, 이러한 가정을 함으로써 텐던이 거더에 미치는 영향을 간편하게 고려할 수 있다. 긴장재 세그먼트 절점은 일반적으로 거더 구조해석을 위한 요소절점과 일치하지 않으므로 Fig. 1(c)와 같이 요소의 절점하중으로 치환하여 구조해석을 시행한다. 또한 (나),(다),(라)의 모든 과정은 단면제원이 변함에 따라 민감하게 변화되므로 Gradient를 이용하여 설계점 변화에 따른 프리스트레스의 영향을 근사화시켜 구조해석을 수행하였다.



(a) 거더에서 Cable 위치



(b) 세그먼트 분할에 의한 긴장력 가정



(c) 절점에서의 등가하중

Fig. 1 거더에 작용하는 프리스트레스력

## 2.2.2 단면설계 부분

단면설계 부분은 해석에서 얻은 모멘트와 전단력의 값으로, 지정된 단면에서 휨응력, 전단 강도, 극한 모멘트 검토등이 수행되며, 동시에 모든 종속 물리매개 변수의 값이 계산된다.

## 2.3 최적설계

본 연구에서 수행한 프로그램의 알고리즘은 Fig. 2와 같으며, 구조해석시 횡방향설계와 종방향 설계를 모두 고려하도록 하였으며, 구조해석과 최적설계가 동시에 이루어지도록 하였다. 설계 관련규정은 AASHTO Standard 2002<sup>(8)</sup>를 근거로 하였으며, 최적화기법은 벌칙함수(Penalty Function)를 사용하여 제약조건을 갖는 비선형 계획문제를 무제약 비선형 계획문제로 변환시켜서 시방서상의 많은 제약조건을 간편하게 취급할 수 있는 SUMT<sup>(2)</sup>기법을 사용하였다. SUMT기법 중에서도 PSC 박스 거더교에 가장 효율성과 신뢰도가 높다고 알려진 Direct Search Method<sup>(2)</sup> 중의 한가지 방법인 Powell's Method<sup>(2)</sup>를 사용하였다.

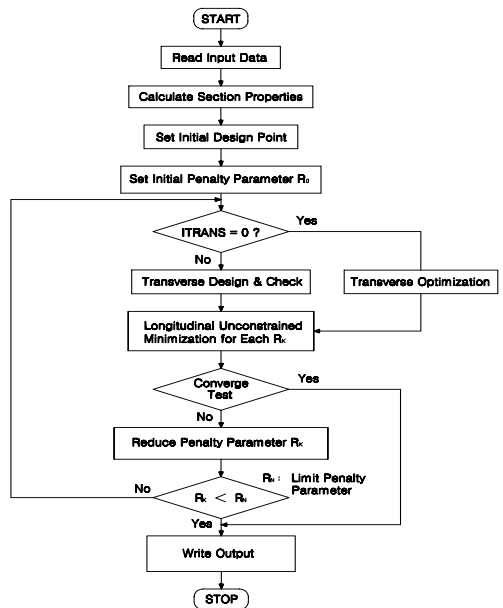


Fig. 2 프로그램 알고리즘

### 2.3.1 확장 벌칙함수와 목적함수

식(2)와 같이 Kavlie<sup>(9)</sup>가 제안한 확장 벌칙함수를 도입함으로써 초기 설계점과 순차적인 설계점이 설계 가능 영역에 위치해 있지 않더라도 무제약 목적함수의 최소화 과정을 통해 설계가능 영역으로 전이시켜 최적해를 구할 수 있도록 하였다.

$$\begin{aligned} \Sigma Y_k / g_j(x) & \quad \text{for } g_j(x) \geq \epsilon \\ \Sigma Y_k(2\epsilon - g_j(x)) / \epsilon^2 & \quad \text{for } g_j(x) < \epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $Y_k$ 는 벌칙 매개변수이고,  $g_j(x)$ 는 제약 조건함수이다. 그리고,  $\epsilon = Y_k / \delta$ 이고,  $\delta$ 는 2개의 벌칙 함수항 사이의 전이를 결정하는 상수이다.

목적함수로 비용함수를 선택하였으며, 거더의 총비용은 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} f(x) &= COST_c + COST_s + COST_p \\ &= U_c \times V_c + U_s \times W_s + U_p \times W_p \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $COST_c$ ,  $COST_s$ ,  $COST_p$ 는 콘크리트, 철근, PS강재의 총비용이고  $U_c$ ,  $U_s$ ,  $U_p$ 는 콘크리트, 철근, PS강재의 단가이며,  $V_c$ ,  $W_s$ ,  $W_p$ 는 콘크리트 체적, 철근 및 PS강재의 중량이다.

### 2.3.2 제약조건

본 연구에서는 100여개 이상<sup>(4)</sup>의 다음과 같은 거동 제약조건과 설계 제약조건이 사용되었다.

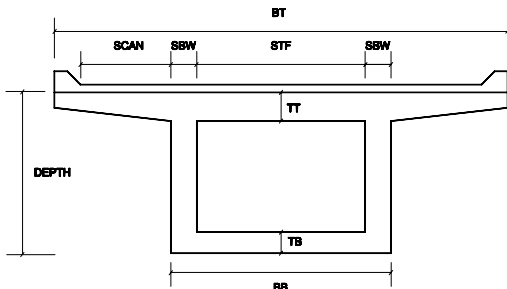


Fig. 3 횡단면 설계변수

### (1) 거동 제약조건

설계 검토가 수행되는 임의 위치에서의 거동에 사용되는 매개변수들로는 프리스트레스 도입시 콘크리트 상·하연단 응력, 사용하중 상태에서의 콘크리트 상·하연단 응력, 전단 강도, 극한 모멘트 강도, 처짐등을 두었고, 다음의 거동 제약조건을 만족하여야 한다.

- (가) 하중단계별 콘크리트 상·하연단 휨응력 ≤ 허용 휨응력
- (나) 소요 전단강도 ≤ 설계 전단강도
- (다) 소요 휨모멘트 강도 ≤ 설계 휨모멘트 강도
- (라) 처짐 ≤ 허용처짐

### (2) 설계 제약조건

주로 기하학적 단면형상에 관한 사항으로 실제 설계 문제에 대한 적합성 확보를 위해 독립변수에 가해지는 제약조건으로서 각 구간별 상·하부 플랜지 두께, 텐던 편심, 복부 두께, 텐던 긴장력, 거더 높이등을 매개변수로 사용하여 설계 제약조건식을 구성하였다.

- (가) 설계 매개변수 ≤ 최대 허용규정
- (나) 설계 매개변수 ≥ 최소 허용규정

## 3. 설계변수 및 설계조건

### 3.1 설계변수

Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 횡단면과 종단면 설계변수를 두었다, Fig. 4에서 TTL·TTM·TTR은 상부 플랜지의 좌측단·중양부·우측단 두께이고, ESLT·

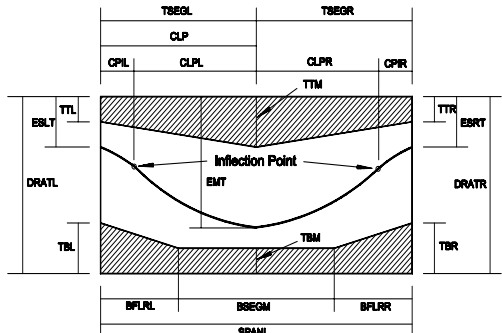


Fig. 4 종단면 설계변수

EMT·ESRT는 긴장계의 좌측단·중앙부·우측단의 편심거리이며, 기타 설계변수에 대해서는 참고문헌<sup>(4)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

### 3.2 설계 조건

Table 1에서와 같이 총 경간장 136.35m(=450ft)인 다양한 3경간 연속 PSC 박스 거더교를 예제로 적용하였으며, 사용된 설계조건은 다음과 같다.

(1) 경간장 : 136.35 m(Table 1 참조)

(2) 교 폭 : 2차선 교량

(3) 횡단면 셀(cell)수 : 3셀

(4) 활하중 : HS-20 차량 및 차선하중

(5) 긴장계

- 인장강도 ( $f'_{pu}$ ) : 1,894.44 MPa

- 허용인장응력 :

인장시 : 0.75 ( $f'_{pu}$ )=1,420.83 MPa

정착후 : 0.7 ( $f'_{pu}$ )=1,326.11 MPa

설계하중 작용시 : 0.6 ( $f'_{pu}$ )=1,137MPa

Table 1 3경간 연속 변단면 거더교의 거더 유형

구 분	Span Length Ratio	Girder Depth Ratio (등3경간 연속)							구 분	Span Length Ratio	Girder Depth Ratio (부등3경간 연속)				
		Type -A	Type -B	Type -C	Type -D	Type -E	Type -F	Type -G			Type -H	Type -I	Type -J	Type-K	Type-L
Span 1 45.45m	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	Span 1 42.88m	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0		0.2	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.3	1.0	0.9	0.8	1.0	0.9	1.2	1.1		0.3	1.0	0.9	0.8	1.0	
	0.4	1.0	0.8	0.7	1.0	0.8	1.3	1.2		0.4	1.0	0.8	0.7	1.0	
	0.5	1.0	0.7	0.6	1.0	0.7	1.3	1.4		0.5	1.0	0.7	0.7	0.8	
	0.6	1.0	0.8	0.7	1.0	0.8	1.3	1.2		0.6	1.0	0.8	0.7	1.0	
	0.7	1.0	0.9	0.8	1.0	0.9	1.2	1.1		0.7	1.0	0.9	0.8	1.0	
	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0		0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0			
Span 2 45.45m	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	Span 2 50.60m	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0		0.2	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.3	1.0	0.9	0.8	0.9	1.0	1.2	1.1		0.3	1.0	0.9	0.8	0.9	
	0.4	1.0	0.8	0.7	0.8	1.0	1.3	1.2		0.4	1.0	0.8	0.7	0.8	
	0.5	1.0	0.7	0.6	0.7	1.0	1.3	1.4		0.5	1.0	0.7	0.7	0.8	
	0.6	1.0	0.8	0.7	0.8	1.0	1.3	1.2		0.6	1.0	0.8	0.7	0.8	
	0.7	1.0	0.9	0.8	0.9	1.0	1.2	1.1		0.7	1.0	0.9	0.8	0.9	
	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0		0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0			
Span 3 45.45m	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	Span 3 42.88m	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0		0.2	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.3	1.0	0.9	0.8	1.0	0.9	1.2	1.1		0.3	1.0	0.9	0.8	1.0	
	0.4	1.0	0.8	0.7	1.0	0.8	1.3	1.2		0.4	1.0	0.8	0.7	1.0	
	0.5	1.0	0.7	0.6	1.0	0.7	1.3	1.4		0.5	1.0	0.7	0.7	0.8	
	0.6	1.0	0.8	0.7	1.0	0.8	1.3	1.2		0.6	1.0	0.8	0.7	1.0	
	0.7	1.0	0.9	0.8	1.0	0.9	1.2	1.1		0.7	1.0	0.9	0.8	1.0	
	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0		0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	
	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0			

- 단위중량 :  $7.840 \text{ KN}/\text{m}^3$
- 덕트 직경 :  $0.0762 \text{ m}$
- 강제 단면적 :  $0.0000987 \text{ m}^2$
- 탄성계수 :  $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$
- 곡률마찰계수 :  $0.25 / \text{rad}$
- 파상마찰계수 :  $0.0007 / \text{m}$
- Anchor set :  $0.015875 \text{ m}$

(6) 철근 항복강도 :  $420 \text{ MPa}$

(7) 콘크리트

- 설계기준강도 :  $(f'_{ck})=35 \text{ MPa}$
- 초기압축강도 :  $(f'_{ci})=24.5 \text{ MPa}$
- 초기허용압축응력 :  
 $0.55 (f'_{ci}) = 13.5 \text{ MPa}$
- 초기허용인장응력 :  
 $3.0 \sqrt{f'_{ci}} = 1.242 \text{ MPa}$
- 허용압축응력 :  $0.4 (f'_{ck})=14 \text{ MPa}$
- 허용인장응력 :  $0 \text{ MPa}$
- 탄성계수 :  $24,556 \text{ MPa}$
- 크리프계수 :  $2.5$
- 크리프손실 :  $175 \text{ MPa}$
- 단위중량 :  $24 \text{ KN}/\text{m}^3$

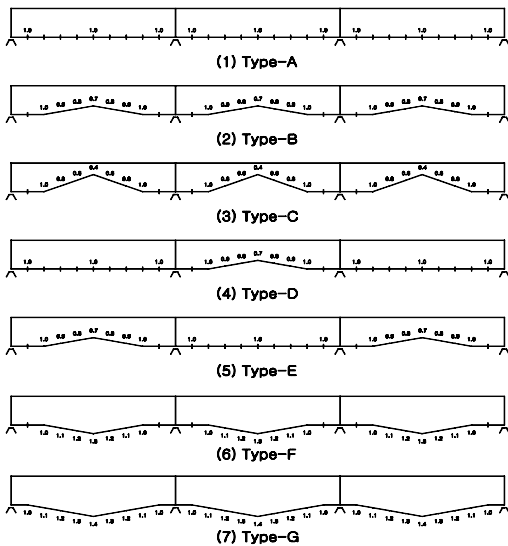


Fig. 5 등 3경간 연속 변단면 거더교의 거더 유형

(8) 단가 : 국내·외의 문헌과 물가자료<sup>(5)</sup>를 종합한 단가를 가정하여 적용하였으며, 재료경비에는 인건비가 포함되어 있으며, 1\$를 1,200원으로 계산하였다.

- 긴장재 :  $171.9577 \text{ 원}/\text{N}$
- 철근 :  $52.9101 \text{ 원}/\text{N}$
- 콘크리트 :  $172,642 \text{ 원}/\text{m}^3$

#### 4. 적용 및 결과고찰

##### 4.1 변단면 거더교의 거더 유형 분류방법

3.2절의 설계조건으로 Fig. 5, Fig. 6과 같이 각 경간의 위치에 따라 거더 높이를 달리한 3경간 연속 거더교에 대하여 최적설계를 실시하였다.

Table 1은 각 경간의 위치에 따라 거더 높이를 달리한 비율표이며, Fig. 5와 Fig. 6은 시각적으로 알기 쉽게 Table 1의 내용을 같은 축척으로 도시한 것으로 지간장 길이의 비가 같은 등 3경간 변단면 거더교의 거더 유형을 Type-A부터 Type-G까지 Fig. 5와 같이 구분하였다. 그리고, 지간장 길이의 비가 1:1.18:1인 부등 3경간 변단면 거더교의 거더 유형을

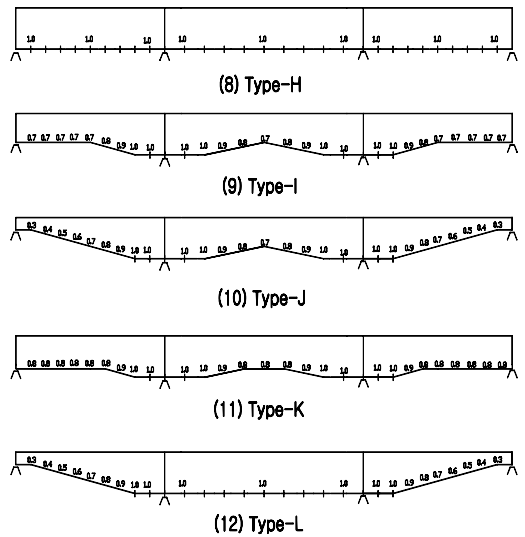


Fig. 6 부등 3경간 연속 변단면 거더교의 거더 유형

Type-H 에서 Type-L까지 Fig. 6과 같이 분류하였다. 여기서 1:1.18:1은 거더높이가 같은 등단면 거더교에 대하여 시간장의 길이를 변화시켜가며 최적설계를 수행한 후 이 중에서 비용면에서 가장 유리한 최적 시간장을 선정한 것이며, 이렇게 선정된 최적 부등 경간 비율에 변단면을 적용하였다. 즉 일반적인 3경간 연속보의 최적 경간장은 공법에 따라 다르나 본 연구에서는 최적설계에 의해 산출한 최적 경간장인 1:1.16:1(0.86:1:0.86)<sup>(1)</sup>을 적용하였다. 이렇게 적용함으로써 최적 시간장이면서 최적 변단면의 유형을 찾을 수 있을 것으로 판단되었기 때문이다.

또한 텐던의 배치를 Option 1과 Option 2의 경우로 나누어 최적설계를 수행하였다. Option 1의 경우는 각 경간에서 텐던이 비슷하게 처지도록 요구한 경우로 최적설계를 수행한 경우이고, Option 2의 경우는 텐던의 고·저점이 최적설계에 도달하기 위해 각 경간에서 독립적으로 조정되는 방법으로 최적설계한 경우인데, 이렇게 Option 1과 Option 2로 구분함으로써 등경간과 부등경간, 그리고 등단면과 변단면의 PSC 박스 거더교에 더욱 적절한 긴장재의 배치형태를 찾을 수 있을 것으로 판단되었다.

#### 4.2 변단면 거더교의 최적설계 결과고찰

앞서 언급한 바와 같이 최적의 부등경간을 변단면과 함께 적용하여 최적설계를 수행하면 최적 시간장이면서 최적 변단면의 특이한 유형을 찾을 수 있을 것으로 판단하였으나, Fig. 7과 Table 2에 나타난 바와 같이 최적 비용 면에서는 뚜렷한 유형이 없는 것으로 나타났다.

Fig. 7의 결과를 보면 전체 등단면인 Type-A와 오목한 형태인 Type-B의 비용이 거의 차이가 없는 것으로 분석되었고, 중앙 경간만 오목한 Type-D가 경

제적인 것으로 나타났다. 반대로 30% 볼록한 경우인 Type-F를 보면 미세한 차이지만 Type-D 보다 좀더 유리하게 분석되었는데 이는 지점부 부모멘트를 철근이 부담하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 극단적으로 오목한 경우인 Type-C를 보면 약 20% 정도의 비용 상승이 있고 Type-G를 보면 더 볼록하게 해도 비경제적인 것으로 나타났다.

여기에서 Type-F와 Type-G 같이 시공된 경우는 거의 없고 미관성도 떨어지지만, PSC 박스 변단면 최적설계 검토시 텐던의 배치형태와 비슷한 거더 단면모양을 사용하는 것도 의미가 있을 것으로 판단되어 적용하였으나 최적비용면에서 값 차이가 크지 않고, 경관미도 좋지 않으므로 최적의 단면 형태라고 보기는 어렵다. 결론적으로 등경간과 부등경간, 그리고 등단면과 변단면을 모두 고려한 PSC 박스거더교에 최적설계를 도입할 경우 중앙 경간만 곡선으로 하는 것이 가장 유리하나 최적비용측면에서 큰 차이를 보이지 않으므로, 설계자는 PSC 박스거더교 설계시 변단면의 경제적인 측면 보다는 미관이나 형고의 제약등 제반여건 등을 고려하여 거더형태를 결정하여야 할 것으로 판단된다.

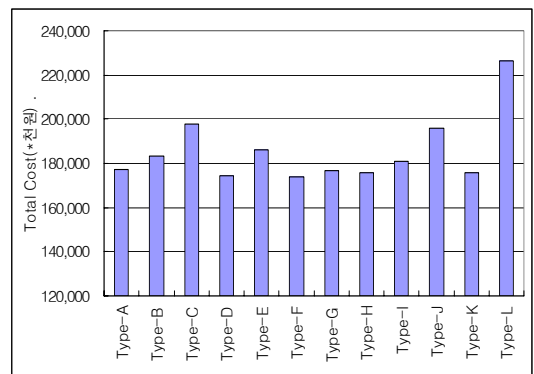
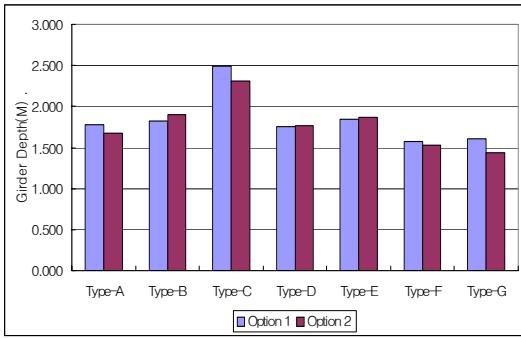


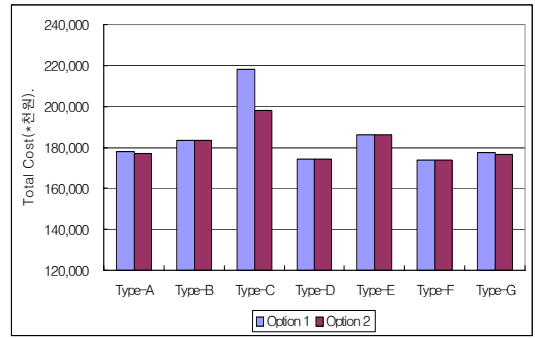
Fig. 7 거더 유형별 최적설계 결과(option 2)

Table 2 거더 유형별 최적설계 결과(option 2)

등 3경간 연속	구 분	Type-A	Type-B	Type-C	Type-D	Type-E	Type-F	Type-G	
	전체비용(*천원)		177,130	183,281	197,902	174,518	186,303	173,965	176,724
비율(%)		100.00	103.47	111.73	98.53	105.18	98.21	99.77	
부등3경간 연속	구 분	Type-H	Type-I	Type-J	Type-K	Type-L			
	전체비용(*천원)		175,901	180,808	196,156	175,706	226,536		
	비율(%)		99.31	102.08	110.74	99.20	127.89		



(a) 변단면 유형과 Option별 공칭거더높이



(b) 변단면 유형과 Option별 전체비용

Fig. 8 등 3경간 연속 변단면 거더교의 최적설계 결과

Fig. 8은 긴장재의 배치방법(Option 1, 2)에 따른 공칭거더높이와 전체비용을 그래프로 나타낸 것으로 텐던의 고·저점이 최적설계에 도달하기 위해 각 경간에서 독립적으로 조정되는 방법으로 최적설계한 경우(Option 2)가 각 경간에서 텐던이 비슷하게 처지도록 최적설계한 경우(Option 1)보다 최적비용에서 다소 유리하였으나 그 값의 차이는 크지 않았다. 보통 경간 길이가 거의 같고, 각 경간에서의 거더높이가 비슷한

경우에서는 Option 1로 텐던이 비슷하게 처지도록 최적설계하는 것이 정확도가 우수하지만, 부등경간 교량 및 거더높이의 변화가 심한 교량에서는 Option 2로 텐던의 고저점이 최적설계에 도달하기 위해 독립적으로 조정되도록 설계하면 더욱 정확하고 합리적인 최적설계가 된다.

그러므로 최적비용측면에서 Option 1과 Option 2의 값 차이가 크게 나지 않더라도 곡률이 심한 변단면

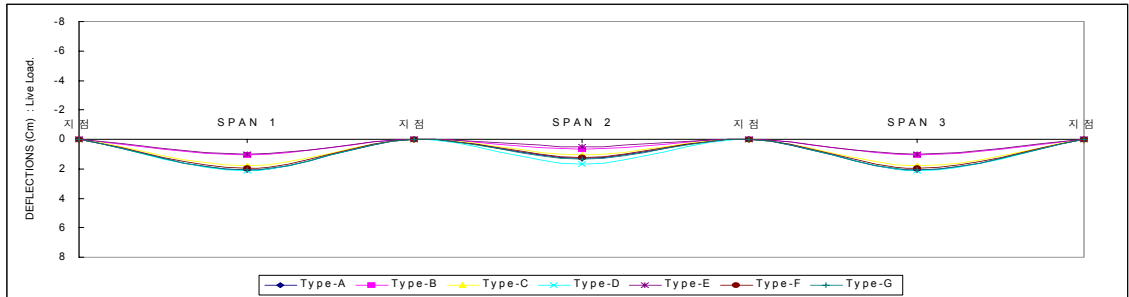


Fig. 9 활하중에 의한 등 3경간 연속 PSC 변단면 박스 유형별 처짐(option 1)

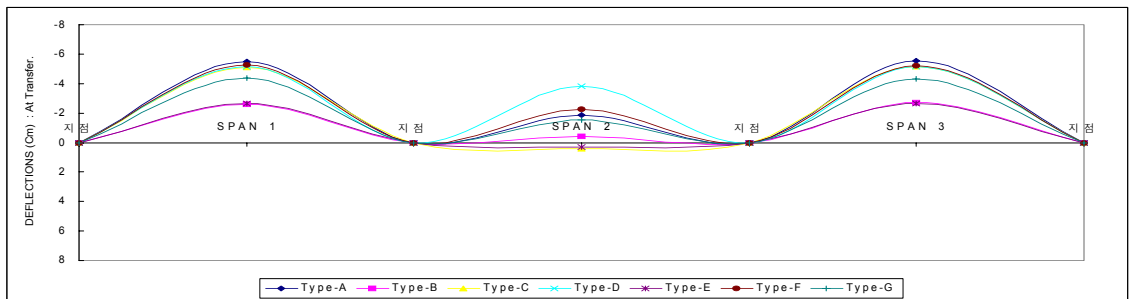


Fig. 10 프리스트레스 하중에 의한 등 3경간 연속 PSC 변단면 박스 유형별 처짐(option 1)



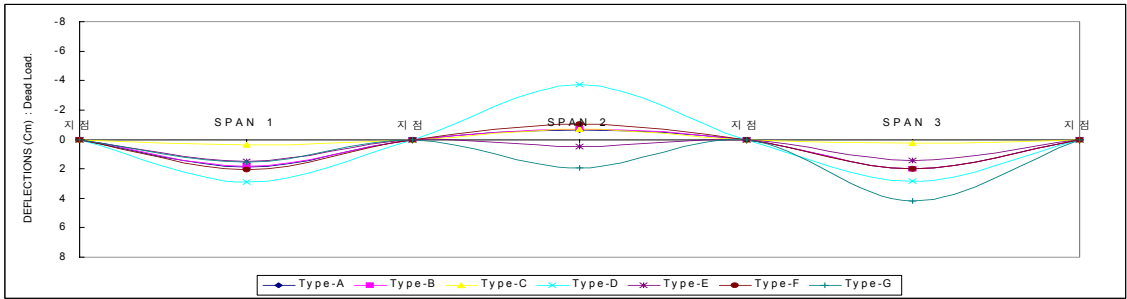


Fig. 11 고정하중에 의한 등 3경간 연속 PSC 변단면 박스 거더 유형별 처짐(option 1)

및 부등경간 교량에서는 Option 2로 설계하여야 할 것이다. Fig. 9에서 Fig. 11은 각 경간에서 텐던이 비슷하게 처지도록 요구한 경우(Option 1)에서 발생하는 하중별 처짐을 그래프로 나타낸 것이며, Option 2로 최적설계한 경우에 발생하는 하중별 처짐 또한 Fig. 9에서 Fig. 11과 비슷한 유형으로 나타났기 때문에 그래프는 생략한다. 여기서 나타난 바와 같이 Type-C의 경우 고정하중과 프리스트레스 하중으로 발생하는 두 번째 경간에서의 처짐이 상대적으로 좋지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 변단면 종단 곡물이

너무 크기 때문에 발생하는 현상이라 판단되며, 이는 Option 2에서도 마찬가지로 나타났다.

본 연구에서 사용된 긴장재 배치는 PSC 박스거더 교량 구조물에 가장 유리하다<sup>(10)</sup>고 알려진 포물선 형태를 채택하였고, 형상은 반포물선 공식으로 가정하였는데, 이것은 변곡점의 위치계산이나 계산상의 편이성 및 기하학적으로 가장 유사하기 때문이다. 이러한 곡선형태의 긴장재를 Option 1과 Option 2의 방법으로 최적설계한 후 긴장재 도심까지의 거리를 산출된 결과를 그래프로 표시하면 Fig. 12와 Fig. 13과 같

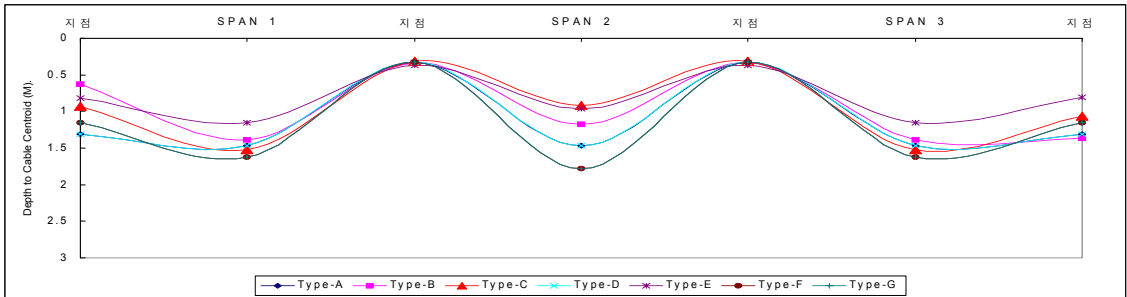


Fig. 12 등 3경간 연속 PSC 변단면 박스 거더교의 긴장재 도심까지의 거리(option 1)

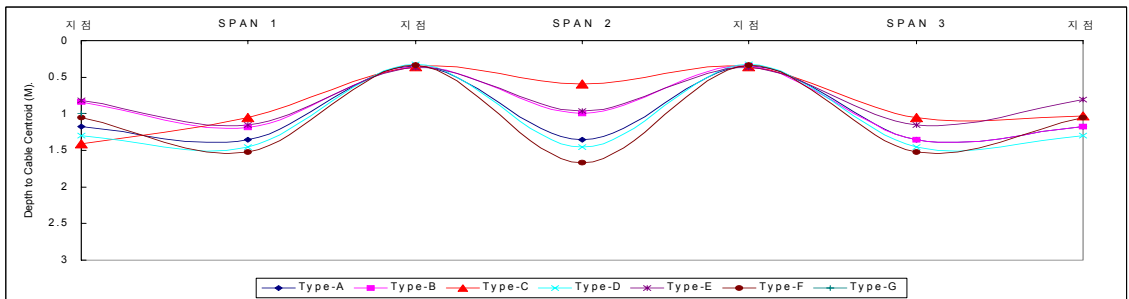


Fig. 13 등 3경간 연속 PSC 변단면 박스 거더교의 긴장재 도심까지의 거리(option 2)

며 이것이 곧 Option 1과 Option 2에서의 긴장재 배치 형태이다. 여기서 Option 1의 경우는 각 경간에서 텐던이 비슷하게 처지도록 최적설계한 경우이고, Option 2의 경우는 텐던의 고·저점이 최적설계에 도달하기 위해 각 경간에서 독립적으로 조정되는 방법으로 최적설계한 경우인데, Fig. 12와 Fig. 13을 보면 이를 잘 이해할 수 있을 것이다.

그러므로 앞서 설명한 바와같이 설계자는 긴장재의 배치형태를 각 경간에서 비슷하게 처지도록 요구한 경우와 긴장재의 고·저점이 최적설계에 도달하기 위해 각 경간에서 독립적으로 조정되는 경우의 두 방법 모두의 장·단점을 파악하여 PSC 박스 거더교에 적용할 때 좀더 적절한 형태로 긴장재를 배치함으로써 콘크리트에 원하는 프리스트레스의 힘을 줄 수 있도록 해야 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 FSM 공법을 사용하는 변단면 PSC 박스 거더교의 상부구조를 축차 무제약 최적화 기법에 의해 최소경비로 설계할 수 있는 프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 등경간과 부등경간, 그리고 등단면과 변단면의 PSC 박스 거더교에 적용하였다. 최적설계를 수행한 연구결과와 결과고찰을 통하여 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 등경간과 부등경간, 그리고 등단면과 변단면을 모두 고려한 PSC 박스 거더교에서 종방향으로 거더 높이가 변하는 아치 형태의 변단면 구조로 최적설계 할 경우 3경간 연속거더에서는 내측 경간장만 아치 형태로 단면을 구성하는 것이 가장 경제적으로 나타났으나 최적비용면에서 1~2%정도의 차이만이 나타났다. 이렇게 변단면 PSC 박스 거더교 설계시 경제성만으로는 단면의 형상이 크게 영향을 미치지 않으므로 변단면 거푸집 제작과 시공성을 고려하고 미관이나 형고의 제약등 제반여건에 의한 종합적인 판단으로 설계가 이루어져야 할 것이다.
- 2) 긴장재의 배치 형태면에서는 각 경간에서 비슷하게 처지도록 구성한 경우보다는 긴장재의 고,저점이 각 경간에서 독립적으로 조정되는 경우가 긴장재의

최대 강성을 확보하는 것을 알 수 있었다. 따라서 변단면 PSC 박스 거더교의 최적설계시에는 긴장재의 고,저점의 배치형태에 대한 형상제약조건을 고려하여 좀더 적절한 형태로 긴장재를 배치함으로써 콘크리트에 원하는 프리스트레스의 힘을 줄 수 있도록 해야 한다. 향후 이러한 개념을 좀더 복잡한 구조물, 예를 들면 연속보, 라멘 등에 사용하면 더욱 적절한 형태의 긴장재 배치를 찾을 수 있을 것으로 판단되며, 단계별 프리스트레싱에 의한 비용효과 및 긴장력의 변화등도 연구되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 2004년 학술진흥재단 해외포닥 지원사업(접수번호 : M01-2004-000-20005-0)으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능하게한 재단에 진심으로 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김기욱, 박문호 “부등 경간 비율, 하중계수 및 변단면의 영향을 고려한 PSC 박스 거더교의 최적설계” 전산구조 공학회지, 제17권, 3호, pp.309~318, 2004.
2. 박문호, 조효남, 류연선, “구조물의 최적설계”, 한국전산 구조공학회, 단행본, 1991.
3. 허택녕, “전산구조해석”, 엔지니어즈, 1994.
4. 김기욱, “FCM 공법 PSC 박스거더교의 최적설계”, 경북대학교 공학박사 학위논문, 2002.
5. 편집부편, “물가자료”, 한국물가협회, 2004.
6. 김기욱, 박문호, 장준호 “FSM 공법 PSC 박스 거더교의 최적설계에 관한 연구” 구조물진단학회지, 제8권 3호, pp. 159~167, 2004.
7. 김기욱, 박문호 “PSC 박스 거더교 최적설계에 의한 최적비용식의 개발” 대한토목학회지, 제24권, 5A호, pp.961~968, 2004.
8. AASHTO “Standard Specifications for Highway Bridges”, 2002.
9. Kavlie, D., “Optimum Design of Statically Indeterminate Structures”, Dep., of Civil Engineering, Univ. of California, Berkeley, Sep, 1970.
10. C. Menn “Prestressed Concrete Bridges” 1990.

(접수일자 : 2005년 11월 16일)