

## 승용차 전용 조립식 고가도로의 최적설계

### Optimal Design of Prefabricated Passenger Car-overpass Structures

조 성 배\*                      김 영 우\*\*                      신 영 석\*\*\*  
Cho, Soung-Bae              Kim, Young-Woo              Shin, Yung-Seok

---

#### ABSTRACT

The main objective of this research is to determine the optimal sections of infrastructure (the pier and foundation) for orthotropic steel decks which is a part of prefabricated passenger car overpasses. Since the bridge to be designed allows only passenger cars, design loads are determined according to this condition. The total volume of the infrastructure is formulated as the objective function and the design constraints are based on the "Korean Bridge Design Code" and "Design Manual of Steel Framed Pier". The programs used in this research are MATLAB 6.5 and MIDAS CIVIL.

---

#### 1. 서      론

최근 차량의 지속적인 증가로 인하여 극심한 교통 혼잡이 유발되고 있으며, 이로 인해 막대한 경제적 손실이 초래되고 있다. 2000년 통계청 조사 한국 주요 경제 지표에 따르면 한 해 전국 교통 혼잡비용만 20조원에 이르고 있으며 매년 16%씩 상승하는 추세이다(통계청, 2000). 따라서 도로의 확충 방안으로, 보상비와 민원, 공사기간, 교통 통제기간 등의 측면에서, 고가도로의 건설이 효과적인 방법으로 대두되고 있다(한국건설기술연구원, 1996). 특히 고가도로의 차량을 승용차로 제한할 경우 사용하중의 경감으로 건설비가 절감되며 상부구조의 경량화로 조립식 공법의 적용이 용이하여 공기 및 교통 통제기간을 단축할 수 있게 된다. 특히 강재교각은 경량 하부구조 형식으로서 기초 규모의 최소화 가능하고 연약지반에 유리하다. 강재교각은 콘크리트 교각에 비해 내진성이 우수하여 재해저감 측면에서도 유리하며, 이는 1995년 1월 고베 지진시에도 입증되었다. 또한 강재교각은 도심지 적용시 미관이 우수하고, 재료의 재활용이 가능한 장점이 있다.

본 연구는 승용차 전용 조립식 고가도로 프로젝트의 일부인 강바닥판의 하부구조를 지간길이 변화(20m, 30m, 40m, 50m)에 따라 최적설계 및 비교하는 것을 목적으로 한다. 최적설계는 상용 프로그램인 MATLAB 6.5를 사용하여 수행하였다. 또한 최적설계를 위한 지진하중에 대한 수평력은 MIDAS CIVIL로 구조해석을 실시하였다.

---

\* 학생회원 · 아주대학교 건설교통공학과 석사과정

\*\* 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 박사수료

\*\*\* 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 정교수

## 2. 교각 최적설계

### 2.1. 설계조건

강재교각을 설계하기 위한 설계조건은 표 2.1, 2.2와 같다. 표 2.1은 구조 형식에 대한 조건이고 표 2.2는 설계를 위한 승용차의 활하중에 대한 하중 조건을 김상진의 연구 결과를 토대로 정리한 것이다.

<표 2.1 구조형식 조건>

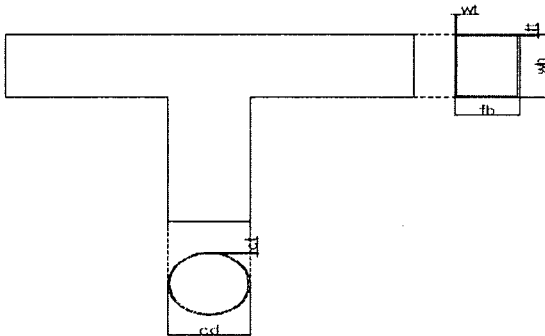
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 형식 : 강바닥판교</li> <li>• 등급 : 승용차 전용도로</li> <li>• 경간구성 : 5경간 연속교</li> <li>• 지간 : 20m, 30m, 40m, 50m</li> <li>• 주형수 : 2개</li> <li>• 주형간격 : 5.8m</li> <li>• 강바닥판 두께 : 0.75cm</li> <li>• 아스팔트 포장 두께 : 5cm</li> <li>• 교각형식 : 2차로지그 T형 교각</li> <li>• 사용강재 : SM490</li> </ul>
---

<표 2.2 활하중 조건>

차륜하중	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 총중량 : 4.5 tonf</li> <li>• 전륜하중 : 1,350 kgf</li> <li>• 후륜하중 : 900 kgf</li> <li>• 축거 : 2.7 m</li> <li>• 차륜폭 : 1.5 m</li> </ul>
차선하중	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20m : 470 kgf/m</li> <li>• 30m : 375 kgf/m</li> <li>• 40m : 330 kgf/m</li> <li>• 50m : 300 kgf/m</li> </ul>

### 2.2. 설계변수

강재교각은 보, 기둥, 보-기둥 접합부, 그리고 앵커 정착부로 구성이 된다. 이 중에서도 보-기둥 접합부에서는 응력집중과 보의 전단지연 현상이 문제가 된다. 즉 보-기둥 접합부가 교각 설계에 있어서 중요한 요소로 작용한다. 접합부의 거동을 최적설계에 반영하기 위해 코핑부의 플랜지폭, 두께 및 복부판의 높이, 두께와 기둥에서의 지름, 두께 총 6개를 동시에 설계변수로 적용시키기로 한다.



<그림 2.1 설계변수>

여기서,  $f_b$  : 플랜지의 폭  
 $f_t$  : 플랜지의 두께  
 $w_h$  : 복부판의 높이  
 $w_t$  : 복부판의 두께  
 $c_d$  : 기둥의 지름  
 $c_t$  : 기둥의 두께

### 2.3. 목적함수

목적함수는 교각의 부피로 한다.

$$F = 2 \times C_b \times (2 \times f_b \times f_t + 2 \times w_h \times w_t) + \pi \times (c_d \times c_t - c_t^2) \times C_h$$

여기서,  $C_h$  : 기둥의 높이 (8.5m)  
 $C_b$  : 코핑부의 길이 (7m)

기둥의 높이 8.5m는 푸팅상부의 덮개 0.5m로 가정하고 통과 높이 5.5m 확보 및 여유 높이 2.5m로 가정한 높이이다. 코핑부의 길이는 기존의 연구 결과를 적용한 값이다.

#### 2.4. 제약조건

제약조건은 코핑부에서 면내, 면의 응력 그리고 최소두께, 국부좌굴이 고려되며 접합에서의 전단응력과 기등에서 평상시, 지진시 응력과 오일러 좌굴 및 국부좌굴 최소두께가 고려된다. 플랜지 폭을 제한하기 위해 연단거리 제약조건이 추가된다. 이 조건들을 표로 표현하면 다음과 같다.

<표 2.3-a 제약조건 1>

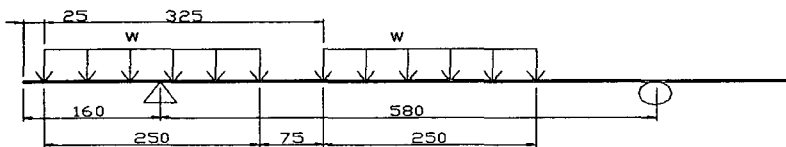
	제 약 조 건	기 호 설 명
Beam 허용 휨응력(면내)	$\frac{f_{be}}{f_a} - 1 \leq 0$	$f_{be}$ : 보의 면내 휨응력 $f_a$ : 보의 허용 휨응력 (1,900kgf/cm <sup>2</sup> )
Beam 허용 전단응력(면내)	$\frac{\tau_b}{\tau_a} - 1 \leq 0$	$\tau_b$ : 보의 면내 전단응력 $\tau_a$ : 보의 허용 전단응력 (1,100kgf/cm <sup>2</sup> )
Beam 합성응력	$[\frac{f_{be}}{f_a}]^2 + [\frac{\tau_b}{\tau_a}]^2 - 1.2 \leq 0$	
복부판의 최소두께	$\frac{w_t}{t_{min}} - 1.0 \leq 0$	$t_{min}$ : 복부판의 최소 두께 (0.8cm)
플랜지의 최소두께	$\frac{f_t}{t_{min}} - 1.0 \leq 0$	$t_{min}$ : 플랜지의 최소 두께 (0.8cm)
양연지지 복부판 최소두께	$\frac{w_h}{48 \times f \times w_t} - 1 \leq 0$	$f$ : 응력구배계수
양연지지 복부판의 국부 좌굴에 대한 허용응력	$\frac{w_h}{34 \times f} \leq w_t$ 일때 $\frac{f_{b1}}{1,900} - 1 \leq 0$ $w_t < \frac{w_h}{34 \times f}$ 일때 $f_{b1} - 2200000[\frac{w_t \times f}{1,900}]^2 \leq 0$	$f_{b1}$ : 양연지지판에 작용하는 최대 압축응력
양연지지 플랜지 최소두께	$\frac{f_b}{48 \times f \times f_t} - 1 \leq 0$	
양연지지 플랜지의 국부 좌굴에 대한 허용응력	$\frac{f_b}{34 \times f} \leq f_t$ 일때 $\frac{f_{b1}}{1,900} - 1 \leq 0$ $f_t < \frac{f_b}{34 \times f}$ 일때 $f_{b1} - 2200000[\frac{f_t \times f}{1,900}]^2 \leq 0$	
Beam 허용 휨응력(면외)	$\frac{f_w}{f_a} - 1 \leq 0$	$f_w$ : 보의 면외 휨응력
접합부 전단응력1	$\frac{\tau_1}{1100 \times 0.45} - 1 \leq 0$	$\tau_1$ : 접합부전단응력 $f_{t1}$ : 보의 플랜지로부터의 집중력 $d_2$ : 기등의 플랜지 중심간격
접합부 전단응력2	$\frac{\tau_2}{1100 \times 0.45} - 1 \leq 0$	$\tau_2$ : 접합부전단응력 $P_d$ : 상부구조물의 사하중 $f_{t3}$ : 보의 플랜지로부터의 집중력 $d_1$ : 보의 플랜지 중심간격
기등 허용 압축응력	$\frac{f_c}{f_a} - 1 \leq 0$	$f_c$ : 기등의 압축응력
기등 허용 전단응력	$\frac{\tau_c}{\tau_a} - 1 \leq 0$	$\tau_c$ : 기등의 전단응력
기등 합성응력	$[\frac{f_c}{f_a}]^2 + [\frac{\tau_c}{\tau_a}]^2 - 1.2 \leq 0$	

<표 2.3-b 제약조건 2>

	제약조건	기호설명
기둥 최소두께	$\frac{c_t}{t_{min}} - 1.0 \leq 0$	$t_{min}$ : 기둥의 최소 두께 (0.79cm)
기둥 세장비	$\frac{15r}{c_h} - 1 \leq 0$	$r$ : 회전반경
기둥 Euler좌굴	$\frac{f_c}{f_{cr}} - 1 \leq 0$	$f_{cr}$ : 기둥의 임계 좌굴응력
국부좌굴을 고려하지 않은 허용축방향 압축응력	$\frac{c_h}{r} \leq 15$ 일때 $\frac{f_c}{1900} - 1 \leq 0$ $15 < \frac{c_h}{r} \leq 80$ 일때 $\frac{f_c}{1900 - 13(\frac{c_h}{r} - 15)} - 1 \leq 0$ $80 < \frac{c_h}{r}$ 일때 $\frac{f_c}{5000 + (\frac{c_h}{r})^2} - 1 \leq 0$	
지진시 기둥 Normal응력	$\frac{f_e}{f_a} - 1.5 \leq 0$	$f_e$ : 지진시 기둥 Normal응력
지진시 기둥 전단응력	$\frac{\tau_e}{\tau_a} - 1.5 \leq 0$	$\tau_e$ : 지진시 기둥 전단응력
탄성받침 연단거리	$\frac{2s}{f_b} - 1 \leq 0$	$s$ : 연단거리
강관 국부좌굴에 대한 허용응력	$\frac{R}{ac_t} \leq 40$ 일때 $\frac{f_c}{1900} - 1 \leq 0$ $40 < \frac{R}{ac_t}$ 일때 $\frac{f_c}{1900 - 6.1(\frac{R}{ac_t} - 40)} - 1 \leq 0$	$R$ : 강관의 반지름 $\alpha = 1 + \frac{\phi}{10}$ , $\phi = \frac{f_1 - f_2}{f_1}$
원형단면 최소강관 두께	$\frac{c_d}{80c_t} - 1 \leq 0$	

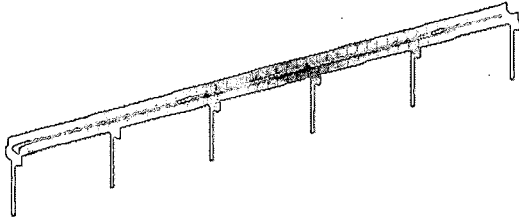
2.5. 설계하중

설계하중은 크게 평상시와 지진시로 구분하여 하중을 고려한다. 평상시에는 사하중과 활하중의 효과만을 고려하고 지진시에는 사하중과 지진하중의 효과만을 고려하여 설계에 반영하게 된다. 사하중 적용되는 요소로는 아스팔트, 강바닥판, 가로리브(U형 리브, L형 리브), 연석, I형거더의 사하중이 단위하중으로 작용하여 설계에 반영되었다. 활하중은 PL하중(차선하중)이 PC하중(차륜하중)보다 지배적이므로 본 연구에서는 PL하중을 주요 활하중으로 재하하기로 하였다. 그림 2.2는 활하중이 최대 발생하게 되는 하중 재하 위치로 그림과 같이 2대의 차선하중이 교축방향으로 작용 될 때 최대 활하중 값을 보이게 되고 이 때 발생하는 지점 반력 값이 최적설계의 활하중 요소로 적용된다.



<그림 2.2 활하중 재하 위치>

마지막으로 지진에 의한 수평력은 다음과 같이 구조해석 프로그램인 Midas Civil를 사용하여 수행하였다. 5경간 연속교로 모델링을 하였고 지진하중의 수평력을 설계하기 위한 설계 조건은 다음과 같다.



지진구역계수 : 0.11g (지진구역1)

위험도 계수 : I=1.4 (재현주기 1000년)

지반종류 : S=1.2 (지반종류 II)

가속도 계수 : A=지진구역계수×위험도계수=0.154

<그림 2.3 내진해석 설계모형>

위와 같은 방식으로 각 지간길이별로 내진해석을 실시한 결과 질량참여율과 수평력의 크기를 살펴보면 다음과 같은 결과를 보였다.

<표 2.4 질량참여율>

지간길이	UX (%)	UY (%)	UZ (%)
20m	99.31	99.05	97.24
30m	99.46	99.24	97.77
40m	99.49	99.29	97.76
50m	99.44	99.33	96.16

<표 2.5 수평력>

지간길이	교축방향(kgf)	교축직각방향(kgf)
20m	7,774	7,444
30m	12,405	12,399
40m	17,219	17,669
50m	22,691	24,807

## 2.6. 최적설계 결과

강바닥판교의 지간길이에 대한 교각 최적설계의 결과를 살펴보면 표 2.7과 같다. 표에서 보이는 것처럼 지간길이가 길어질수록 설계변수 값이 커지게 되고 이에 따라 목적함수인 교각의 부피가 커짐을 알 수 있다. 활성화 제약조건은 ③ Beam 합성응력 제약조건(면내) ⑦ 양연지지 북부판의 국부좌굴에 대한 허용응력 제약조건 ⑨ 양연지지 플랜지의 국부좌굴에 대한 허용응력 제약조건 ⑳ 지진시 기둥의 Normal응력 제약조건 ㉑ 탄성받침 연단거리 제약조건 ㉒ 원형단면 기둥 최소 강판 두께 제약조건으로 이 6가지 조건에 의해서 교각이 최적설계 되어진다.

<표 2.6 지간길이별 교각 최적설계 결과>

단위 : cm

구 분	20m	30m	40m	50m
$f_b$ (플랜지의 폭)	60.00	70.00	80.00	90.00
$f_t$ (플랜지의 두께)	0.99	1.10	1.23	1.33
$w_h$ (북부판의 높이)	64.68	76.46	85.44	95.55
$w_t$ (북부판의 두께)	1.07	1.21	1.31	1.42
$c_t$ (기둥의 두께)	0.81	0.95	1.07	1.20
$c_d$ (기둥의 지름)	64.88	76.17	85.92	96.26
목적함수(교각부피 $cm^3$ )	499,896	666,148	832,157	1,019,860
활성화 제약조건	3 7 9 20 22 24	3 7 9 20 22 24	3 7 9 20 22 24	3 7 9 20 22 24

### 3. 기초 최적설계

#### 3.1. 설계조건

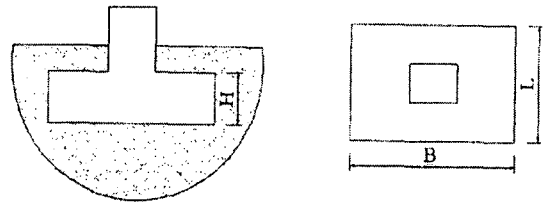
기본적인 설계조건 즉 형식, 등급, 지간길이, 주형간격 등은 교각에서의 설계조건과 동일하다. 기초형식은 직접기초이고 기초설계를 위한 지반조건은 표 3.1과 같다.

#### 3.2. 설계변수

설계변수는 기초의 폭(B), 길이(L), 높이(H) 세가지로 구성된다. 여기서 기초의 폭은 교축직각 방향이고 기초의 길이는 교축방향이다.

<표 3.1 지반조건>

지반종류 : 퇴적토층 (점토 및 실트질) 점착력(c) = 0.1kg/cm <sup>2</sup> 내부마찰각 = 35° 단위중량 = 1.8 t/m <sup>3</sup> N 치 = 35
--



<그림 3.1 설계변수>

#### 3.3. 목적함수

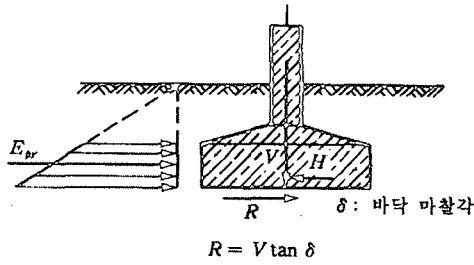
목적함수는 기초의 부피로 한다.

$$F = B \times L \times H$$

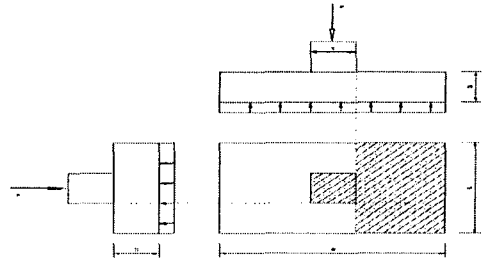
여기서, B : 기초의 폭 (교축직각방향)  
 L : 기초의 길이 (교축방향)  
 H : 기초의 높이

#### 3.4. 제약조건

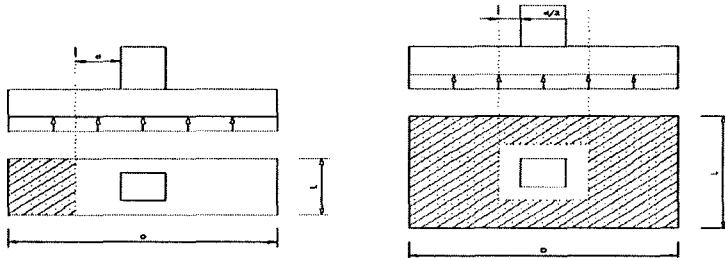
직접기초 단면의 최적설계에 사용되는 제약조건은 다음과 같다. 우선 최소폭 및 최소길이 제약조건으로 기초의 전단에 대해 제약조건을 설정하였고 도로교 설계기준에 따른 최소두께 제약조건을 정하였다. 기초는 지지력에 대해 안정해야 하는데 본 연구에서는 Meyerhof의 공식을 사용하여 허용지지력을 구해 제약조건을 설정했다. 전도와 활동에 대해서도 고려해야 한다. 기초가 전도되는 경우는 기초에 작용하는 합력의 편심이 커서 기초의 접지압의 합이 0보다 작아지거나 전도모멘트가 저항모멘트보다 커지는 경우에 일어나는데 본 연구에서 기초의 전도를 검토하는 방법은 기초의 압굽판 저면선단을 중심으로 전도모멘트를 구하여 저항모멘트와 비교하는 방법으로 검토하였다. 기초의 활동에 대한 안전율은 수평력에 대한 활동저항력의 비로 정의하였다. 마지막으로 기초에 작용하는 휨과 전단에 대해 안전해야 한다. 기초의 휨 설계는 그림 3.3과 같이 위험단면에 대한 기초부분을 캔틸레버 보로 보고 위험단면에 대한 휨모멘트를 계산하여 검토하였다. 기초의 전단설계는 확대기초나 슬래브가 폭이 넓은 보와 같이 작용하는 경우 1방향 전단설계를 하며 사인장 균열이 그림 3.4에서와 같이 집중하중의 둘레에 작용하는 경우, 즉 2방향 작용에 의하여 편칭 전단이 일어난다고 생각될 경우에 2방향 전단에 대해 검토해야 한다.



<그림 3.2 활동파괴에 대한 안정 검토>



<그림 3.3 휨에 대한 검토>



<그림 3.4 전단에 대한 검토>

<표 3.2 제약조건>

	제약조건	기호설명
최소폭	$B \geq t_d + H$	$t_d$ : 정사각형 단면 한변길이
최소길이	$L \geq t_d + H$	$t_d = \sqrt{\frac{\pi \times c d^2}{4}}$
최소 두께	$H \leq \frac{1}{5} L$	
기초 폭방향 허용지지력	$\frac{q_{mat}}{q_{ab}/s_q} - 1 \leq 0$	$q_{mat}$ : 기초에 작용하는 응력 $q_{ab}, q_{al}$ : 기초 허용지지력 $s_q$ : 지지력에 대한 안전률
기초 길이방향 허용지지력	$\frac{q_{mat}}{q_{al}/s_q} - 1 \leq 0$	
기초 폭방향 전도	$\frac{M_{eb}}{M_{ab}/s_l} - 1 \leq 0$	$M_{eb}, M_{el}$ : 지진하중에 의한 전도모멘트 $M_{ab}, M_{al}$ : 저항모멘트 $s_l$ : 전도에 대한 안전률
기초 길이방향 전도	$\frac{M_{el}}{M_{al}/s_l} - 1 \leq 0$	
기초 폭방향 활동	$\frac{e_{fx}}{r_{fx}/s_m} - 1 \leq 0$	$e_{fx}, e_{fy}$ : 지진하중에 의한 수평력 $r_{fx}, r_{fy}$ : 마찰저항력 $s_m$ : 활동에 대한 안전률
기초 길이방향 활동	$\frac{e_{fy}}{r_{fy}/s_m} - 1 \leq 0$	
기초 폭방향 휨 설계	$\frac{M_b}{0.85 \times Mn_b} - 1 \leq 0$	$M_b, M_l$ : 각 방향 작용 휨 모멘트 $M_{nb}, M_{nl}$ : 각 방향 공칭 휨 모멘트
기초 길이방향 휨 설계	$\frac{M_l}{0.85 \times Mn_l} - 1 \leq 0$	
기초 전단설계 (1방향)	$\frac{v_{u1}}{0.8 \times v_{c1}} - 1 \leq 0$	$v_{u1}$ : 위험단면에서 1방향 극한전단응력 $v_{c1}$ : 1방향 허용 전단응력
기초 전단설계 (2방향)	$\frac{v_{u2}}{0.8 \times v_{c2}} - 1 \leq 0$	$v_{u2}$ : 위험단면에서 2방향 극한전단응력 $v_{c2}$ : 2방향 허용 전단응력

### 3.5. 설계하중

설계하중은 교각 설계시 사용했던 설계하중을 그대로 사용하기 때문에 세부적인 사항은 여기서 생략하기로 한다. 단 2절에서 구했던 교각의 최적 설계값이 사하중 요소에 추가되어 기초 최적 설계에 반영된다.

### 3.6. 최적설계 결과

강바닥판교의 지간길이에 대한 교각 최적설계의 결과를 살펴보면 표 3.3과 같다. 기초를 최적 설계하는데 있어서 활성화 제약조건은 ⑥ B변 방향 전도 제약조건, ⑦ L변 방향 전도 제약조건, ⑪ L변 방향 휨 설계 제약조건으로 승용차 전용조립식 고가도로의 자중과 활하중 크기가 작기 때문에 전도가 기초를 설계하는데 있어 가장 중요한 요소임을 알 수 있다.

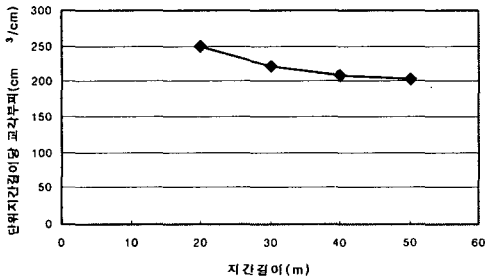
<표 3.3 지간길이별 기초 최적설계 결과>

단위 : m

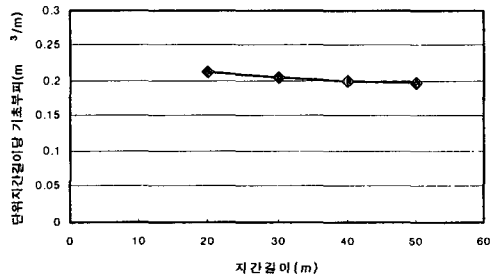
설계변수	20m	30m	40m	50m
B (기초의 폭)	3.84	4.21	4.61	5.09
L (기초의 길이)	3.30	3.91	4.26	4.39
H (기초의 높이)	0.34	0.37	0.41	0.44
목적함수(기초 부피) (m <sup>3</sup> )	4.28	6.16	8.03	9.87
활성화 제약조건	6 7 11	6 7 11	6 7 11	6 7 11

## 4. 결 론

- 1) 승용차 전용 조립식 고가도로에 적용된 설계하중(375kgf/m)이 작기 때문에 설계결과 도출된 단면은 일반교량에 비하여 매우 경제적인 단면이 도출되었다.
- 2) 지간하중에 의한 수평력과 국부좌굴이 교각 설계에 가장 큰 영향을 미치는 요소이고 기초에서는 전도가 가장 중요한 설계요소임을 알 수 있었다.
- 3) 교각과 기초의 최적 설계값을 지간 길이로 나누어 지간 길이에 대한 최적 설계값을 구해보면 그림 4.1, 4.2와 같이 지간 길이가 길어질수록 더 작아진다는 것을 확인할 수 있다.



<그림 4.1 단위 지간길이당 교각 부피>



<그림 4.2 단위 지간길이당 기초 부피>

## 참고 문헌

1. 건설교통부, 도로교설계기준·해설, 2003
2. 김승역, 승용차 전용 조립식 고가도로 건설기술 개발. 연구보고서. 세종대학교, 2003
3. 철강엔지니어링센터, 강재교각설계요령, 1998
4. 김상진, "승용차 전용 고가도로 설계용 활하중 모델의 개발", 대한토목학회 2003년도 정기 학술대회 논문집, pp517~522