

# 2주형 판형교의 최적설계 Optimization of Two Plate Girders Bridge

김건희\*, 유선미\*\*, 조선규\*\*\*  
Kim, Kun-Hoi You, Sun-mi Cho, Sun-Kyu

## Abstract

Two plate girders bridge has an advantage for execution of works and quality control because of its simplicity of super-structure caused by decreasing in amount of members and also is distinguished as aesthetic bridge type. Recently this has been adopted for structure of highway as well as railway and introduced into domestic. In order to plan or design two plate girders bridge more rationally, it is necessary to comprehend its structural behavior as well as to consider the critical design factors. Thus, in this study the formulation of optimum design for two plate girders bridge is proposed and the critical design variables and restraints are considered and founded out by caring out optimum design. The objective function of optimization is formulated as a minimum cost design problem. And the thickness and length of I-shaped section are decided as design variables. The design constraints are formulated based on Design Criteria for Railroad(Bridges). By comparing the optimum results with those of the conventional design, the effectiveness of proposed optimum design formulation is investigated. From the results, the way to do optimum design of two plate girders bridge is suggested.

## 1. 서론

사회기반시설물인 토목구조물에 대한 경제성 분석에 대하여 초기공사비만을 고려했던 기존방식과는 달리, 초기공사비를 포함한 생애주기비용(LCC; Life Cycle Cost)에 대한 관심이 커지고 있다. 즉, 경제적인 교량은 초기공사비가 지배하기보다는 공용중에 추가되는 유지 및 보수비용까지 포함한 교량의 생애주기비용에 지배된다. 강합성 판형교는 강재의 효율적인 활용이 가능한 형식이지만, 주부재의 수가 많을 뿐만 아니라 부부재 및 보강재가 많이 추가되어, 유지 및 보수작업에 수반되는 비용이 증가하게 되는 단점을 갖고 있다. 따라서, 강합성 판형교의 장점을 가지면서 단점을 보완하기 위해서 후판을 적용하고 판형의 크기를 키워 주형의 수를 줄이고 부부재 및 보강재를 생략할 수 있도록 한 2주형 판형교의 형식이 제안되었으며, 일본과 유럽에서는 오래전부터 적용되고 있다. 현재 국내에서도 고속도로 구간과 고속철도 일부구간에 2주형 판형교가 적용되어 시공되고 있다. 하지만 국내실정과 설계풍토에 알맞게 적용하기 위해서는 2주형 판형교만의 거동 특성을 파악할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 2주형 판형교에 대한 최적설계의 정식화를 제안하고, 2주형 판형교의 최적설계를 적용함으로써 지배적인 설계인자를 고찰하고자 한다.

## 2. 최적설계 문제의 정식화

강합성형교의 설계는 콘크리트 바닥판과 강재 주형으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 콘크리트 바닥판을 강재 주형에 작용하는 고정하중으로 간주하고, 2주형 판형교의 강재 주형에 대한 최적설계 문제를 정식화 하였다.

\* 서울산업대학교 철도전문대학원, 석사과정, 02-484-9213, kitckkh@korea.com

\*\* 서울산업대학교 산업대학원, 석사과정, 02-970-6512, muzero@msn.com

\*\*\* 서울산업대학교, 조교수, 공학박사, 02-970-6512, skcho@snut.ac.kr

## 2.1 설계변수

플레이트 거더의 상·하 플랜지의 폭과 두께 그리고 웨브의 높이와 두께를 설계변수로 선정하였다. 플레이트 거더의 각 부재가 전체 설계에 기여하는 정도를 알아보기 위해서 설계변수를 다음 그림 1, 2 그리고 3에 나타낸 바와 같이 세 가지 경우로 고려하여 2주형 편형교에 대한 최적설계 문제를 정식화하였다. 첫 번째 경우는 그림 1에 나타낸 바와 같이 상부 및 하부 플랜지의 두께와 웨브의 두께를 설계변수로 선정하였으며, 두 번째 경우는 지간장과 형고에 관한 상관관계를 알아보기 위해서 웨브의 높이만을 설계변수로 선정하였다. 마지막으로 세 번째 경우는 형고의 변화에 따른 최적단면 형상의 변화 추이를 알아보기 위해서 웨브의 높이를 미리 결정한 상태에서 상·하 플랜지의 폭과 두께 및 웨브의 두께를 설계변수로 선정하였다. 그리고 주형의 변단면을 고려하기 위해서 교축방향으로 변화하는 단면마다 단면 부재의 치수를 설계변수로 고려하였다.

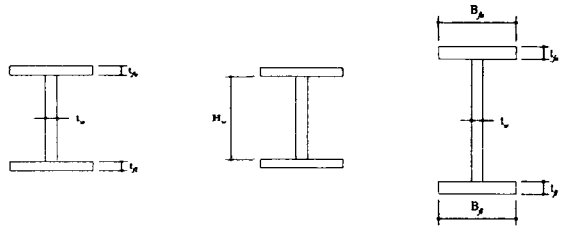


그림 1. 설계변수(경우1) 그림 2. 설계변수(경우2) 그림 3. 설계변수(경우3)

## 2.2 목적함수

본 연구에서는 2주형 편형교 주형의 최소 제작비용을 목적함수로 정식화하였다. 제작비용의 정확한 산출은 간단하지 않지만 제작비용이 구조물의 중량에 비례한다는 실무경험을 바탕으로 주형의 목적함수를 식 (1)에 나타낸 제작비용의 함수로 정식화하였다.

$$F(X) = F_0 + F_{g\ddot{u}rder} + F_{slab} \quad (1)$$

$$F_{g\ddot{u}rder} = C_s \times W_s + C_w \times L_s + C_p \times A_s \quad (2)$$

$$F_{slab} = C_{slab} \times V_{slab} + C_{ss} \times W_{ss} \times V_{slab} + C_{f1} \times A_f + C_{f2} \times V_f + C_{PS} \times N_{td} \quad (3)$$

여기서, 식(1), (2), (3)의 기호는 다음 표1.과 같다.

표 1. 제작비용 정식화 함수 기호

$F_0$ = 공통비용(원/거더)	$C_s$ = 플레이트거더의 강재 단가(원/tonf)
$C_w$ = 플레이트거더의 용접 단가(원/m)	$C_p$ = 플레이트거더의 도장 단가(원/m <sup>2</sup> )
$C_{slab}$ = 바닥판슬래브의 콘크리트 단가(원/m <sup>3</sup> )	$C_{ss}$ = 바닥판슬래브의 철근 단가(원/ton)
$C_{f1}$ = 바닥판슬래브의 거푸집 단가(원/m <sup>2</sup> )	$C_{f2}$ = 바닥판슬래브의 동바리 단가(원/m <sup>2</sup> )
$C_{PS}$ = P.S 강재 단가(원/EA)	$W_s$ = 플레이트거더의 강재중량 (tonf)
$L_s$ = 플레이트거더의 용접길이(m)	$A_s$ = 플레이트거더의 도장면적(m <sup>2</sup> )
$V_{slab}$ = 바닥판슬래브의 콘크리트 체적(m <sup>3</sup> )	$N_{td}$ = 바닥판슬래브의 텐던의 갯수(EA)
$W_{ss}$ = 바닥판슬래브의 단위체적당 사용 철근량(tonf/m <sup>3</sup> )	
$A_{f1}$ = 바닥판슬래브의 거푸집 설치 단면적(m <sup>2</sup> )	$V_{f2}$ = 바닥판슬래브의 동바리 설치 체적(m <sup>3</sup> )

여기서, 단가는 재료비, 노무비 등의 직접공사비와 간접노무비, 산재보험료 등의 제작비를 포함한 2002년도 단가기준의 공사비이다.

## 2.3 제약조건

강합성 2주형 편형교의 주형 설계에 고려되는 제약조건은 철도설계기준(철도교편)[철도청 1999]의 강교설계편을 기준으로 정식화하였으며 표 2에 나타낸 바와 같다.

표 2. 주형의 제약조건

	설계 제약조건	기호 설명
조합응력	$G_{3i-2} = f_{ca}^{(i)}/f_{ca}^{(i)} - 1 \leq 0$	$f_{ca}$ = 콘크리트 바닥판 상단의 휨응력, $f_{sa}$ , $f_{sl}$ = 강형 상·하단의 휨응력
	$G_{3i-1} = f_{sa}^{(i)}/f_{sa}^{(i)} - 1 \leq 0$	$f_{ca}$ = 콘크리트 바닥판 상단의 허용휨응력
	$G_{3i-0} = f_{sl}^{(i)}/f_{sl}^{(i)} - 1 \leq 0$	$f_{sa}$ , $f_{sl}$ = 강형 상·하단의 허용휨응력, $i$ = 조합응력의 하중조합 경우(1-5)*
전단응력	$G_{16} = v/v_a - 1 \leq 0$	$v$ = 전단응력, $v_a$ = 허용전단응력
합성응력	$G_{17} = \left[ \left( \frac{f}{f_a} \right)^2 + \left( \frac{v}{v_a} \right)^2 \right] / 1.1 - 1 \leq 0$	$f$ = 주하중에 의한 휨응력, $v$ = 주하중에 의한 전단응력 $f_a$ = 허용휨응력, $v_a$ = 허용전단응력
폭/두께비	$G_{18} = (B_{fu}/t_{fu}) / R_f - 1 \leq 0$	$B_{fu}$ = 상부 플랜지의 폭, $B_{fl}$ = 하부 플랜지의 폭, $t_{fu}$ = 상부 플랜지의 두께
	$G_{19} = (B_{fl}/t_{fl}) / R_f - 1 \leq 0$	$t_{fl}$ = 상부 플랜지의 두께, $t_w$ = 웨브의 두께, $H_w$ = 웨브의 높이,
	$G_{20} = (H_w/t_w) / R_w - 1 \leq 0$	$R_f$ = 플랜지의 최소 폭-두께비, $R_w$ = 웨브의 최소 폭-두께비
활하중처짐	$G_{21} = \delta_{max} / \delta_a - 1 \leq 0$	$\delta_{max}$ = 열차하중 단선재하시 최대처짐, $\delta_a$ = 허용처짐(L/1100)

\*  $i=1$  : 주하중(합성전/후사하중+활하중+크리프+건조수축+축력)

$i=2$  : 주하중+온도하중,  $i=3$  : 주하중+풍하중,  $i=4$  : 주하중+활하중/시제동하중,  $i=5$  : 주하중+풍하중+활하중/시제동하중

### 3. 2주형 판형교의 최적설계 알고리즘 구성

#### 3.1 최적설계 알고리즘

제안하는 2주형 판형교의 최적설계를 위한 알고리즘은 그림 4에 나타난 바와 같다. 여기서 설계변수와 제약조건의 수는 수치계산비용에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 설계변수최소화를 위해 설계변수의 연결기법을 도입하였으며, 제약조건의 수를 줄이기 위해 제약조건 소거기법을 이용하였다.

#### 3.2 최적화 기법 및 구조해석

최적화 기법에는 여러 가지 알고리즘이 개발되어 왔다. 본 연구에서는 그 중에서 공학 문제에 적합한 몇 가지 알고리즘들을 구현할 수 있도록 개발된 ADS(automated design synthesis)를 이용하였다. 공학문제의 특성에 따라 적절한 최적화 알고리즘의 선택 또한 중요하다. 하지만 2주형 판형교의 최적설계와 같이 설계변수와 제약조건이 많고 제약조건이 음함수(implicit function) 형태로 되어 있는 공학문제의 경우 그 문제의 특성을 파악하기는 매우 어렵다. 따라서, 본 연구에 가장 적합한 최적화 알고리즘을 선택하기 위해서 ADS에서 지원하는 모든 알고리즘으로 최적설계를 수행한 결과 해의 수렴성이 가장 우수한 ALM(Augmented Lagrange Multiplier Method)를 이용하였다. 이때 변환된 무제약 최적화 문제를 1계방법(1st order method)에 해당하는 BFGS(Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno)의 방법으로 해를 구했다. 또한 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다.

2주형 판형교의 구조해석을 위해서 설계실무에서 많이 사용되고 있으며, 열차하중과 같이 중력방향에 대한 이동하중 뿐만 아니라 수평방향에 대한 이동하중의 재하가 가능한, 교량구조물 전문해석 프로그램인 RM Space-Frame을 이용하였다. 그리고 해석 프로그램과 최적설계 프로그램을 연동시키기 위해서 대상구조물에 대한 RM Space-Frame의 입력파일을 자동으로 생성하여 해석을 수행하고, 해석된 결과파일을 자동으로 탐색하는 인터페이스 프로그램을 개발하였다.

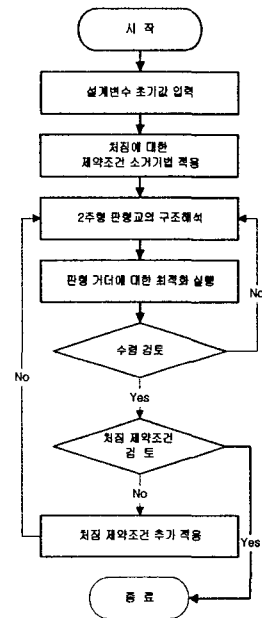


그림 4. 최적설계 흐름도

#### 4. 적용예

본 연구에서 제안하는 2주형 판형교에 대한 최적설계 방법을 검증하고 2주형 판형교의 최적설계 결과에 관하여 고찰하기 위하여 적용예를 통하여 최적설계를 수행하였다.

##### 4.1 대상구조물의 일반사항

최적설계에 적용한 대상교량은 2주형 판형교의 기본적인 역학거동을 파악하기 위하여 복선 열차하중을 지지하는 40m 지간을 갖는 단경간의 교량으로 고려하였다. 단면구성은 두 가지 변단면을 갖는 것으로 가정하였다. 단면1은 단지점으로부터 7.5m 구간까지이며 중앙 구간부 25m 구간은 단면2로 선정하였다. 대상교량에 대한 일반사항과 횡단면도를 표 3과 그림 6에 나타내었다.

표 3. 대상구조물의 일반사항

교량형식	형식	2주형 판형교
	지간	단경간 40m
	교폭	10.90m
활하중	1등급	LS-22, 복선

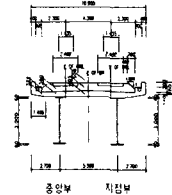


그림 6. 대상구조물 횡단면도(단위:mm)

##### 4.2 결과 및 고찰

본 연구에서 제안한 2주형 판형교의 최적설계 방법의 수렴성을 검증하기 위해서 초기값을 80%에서부터 150%까지 변화시켜 서로 다른 초기값을 사용하여 최적설계를 적용한 결과, 그림 7에 나타낸 바와 같이 안정적으로 최적해에 수렴함을 확인하였다. 따라서, 본 최적설계 알고리즘은 안정적으로 최적해를 도출함을 알 수 있다. 제약조건의 소거기법이 최적설계를 수행하는데 효율적으로 기여하였음을 확인하였다.

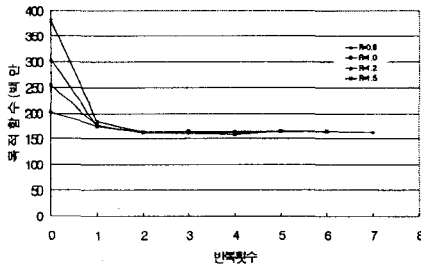


그림 7. 최적해의 수렴성

앞절에서 언급한 바와 같이 설계변수를 세 가지 경우로 각각 정식화하여 2주형 판형교의 대상교량에 대한 최적설계 결과를 표 4에 나타내었다. 강도로교 상부부설계지침에서 제시하고 있는 제작과운반을 고려한 최대 형고를 3m로 제한할 경우, 최적설계의 결과는 설계변수의 정식화 '경우3'에서 형고를 3m로 제한한 경우로 판단된다. 이때 최적의 제작비용은 초기제작비용인 2억 5330만원에서 1억6400만원으로 약 35%정도 감소하였다. 기존설계단면은 안전율을 크게 적용하고 있는 것으로 판단되며, 제안된 최적설계를 이용한다면 모든 설계제약조건을 만족시키는 상태에서 가장 경제적인 설계를 가능하게 할 것으로 판단된다.

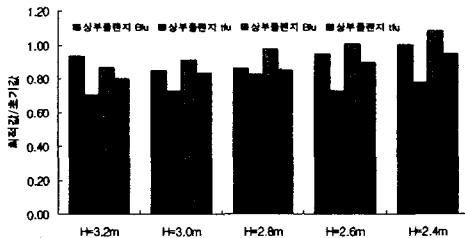
설계변수를 상·하 플랜지의 두께 및 웨브의 두께로 정식화한 '경우1'은 플랜지폭이 고정되어 있을 때, 응력제약조건을 만족하는 필요한 부재의 최소두께를 알아보기 위해서 부재의 폭·두께비에 관한 제약조건을 포함하지 않고 최적설계를 수행하였다. 그 결과 상부 플랜지와 웨브의 두께는 초기값에 비해 대폭 감소한 반면, 하부 플랜지의 두께는 소폭 증가하였다. 대상구조물이 단경간이기 때문에 압축응력을 부담하는 상부플랜지는 콘크리트 바닥판과 합성단면으로 거동하기 때문에 강재의 두께가 감소한 것으로 판단된다. 반면 하부 플랜지만이 전체 인장응력을 부담하기 때문에 상부플랜지 두께의 감소로 인한 단면의 강성저하를 회복하기 위해서 하부 플랜지의 두께는 소폭 증가한 것으로 판단된다. 따라서, 단경간의 구조물과 같이 정모멘트가 발생하는 구간에서는 부재의 최소 폭·두께비를 만족시키면서 상부플랜지의 두께를 줄이기 위해서는 플랜지의 폭이 감소되어야 할 것으로 판단되고, 하부플랜지는 상부 플랜지보다 큰 강성을 갖는 단면형상이 경제적인 설계를 유도할 것으로 판단된다.

표 4. 최적설계 결과

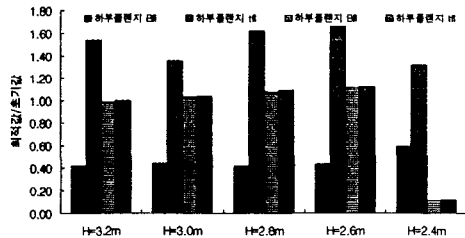
설계변수	단면 1						단면 2						제작비용 (백만원)	
	상부플랜지		웨브		하부플랜지		상부플랜지		웨브		하부플랜지			
	폭 (mm)	두께 (mm)	높이 (mm)	두께 (mm)	폭 (mm)	두께 (mm)	폭 (mm)	두께 (mm)	높이 (mm)	두께 (mm)	폭 (mm)	두께 (mm)		
초기값	600.0	40.0	3000.0	30.0	1200.0	50.0	800.0	60.0	3000.0	30.0	1200.0	60.0	253.3	
(경우1)	-	21.6	-	20.3	-	29.3	-	44.6	-	12.0	-	63.8	164.5	
(경우2)	-	-	2197.8	-	-	-	-	-	2768.0	-	-	-	226.0	
(경우3)	H=3.2m	562.0	28.0	3200.0	15.0	50.0	77.0	695.0	48.0	3200.0	13.0	1184.0	60.0	158.1
	H=3.0m	510.0	29.0	3000.0	19.0	531.0	68.0	731.0	50.0	3000.0	12.0	1236.0	62.0	164.0
	H=2.8m	517.0	33.0	2800.0	20.0	500.0	81.0	783.0	51.0	2800.0	11.0	1281.0	65.0	171.5
	H=2.6m	570.0	29.0	2600.0	12.0	518.0	83.0	806.0	54.0	2600.0	12.0	1332.0	67.0	181.2
	H=2.4m	602.0	31.0	2400.0	10.0	712.0	66.0	867.0	57.0	2400.0	1.0	138.6	7.0	195.1

웨브의 높이만을 설계변수로 고려한 '경우2'에서는 단면1의 웨브 높이가 초기값 3.0m에서 약 2.2m로 감소되었고, 단면2에서는 약 2.8m로 감소하였다. 이는 단면1이 단면2보다 상대적으로 작은 휨모멘트가 발생하므로 필요강성이 그만큼 작게 요구되기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 이때 목적함수인 제작비용은 초기값 2억 5330만원에서 2억 2600만원으로 약 10.8%감소하였다. 따라서, 교량계획시 재료에 관련된 경제적인 측면에서는 등단면보다는 변단면이 유리한 형식임을 확인하였다.

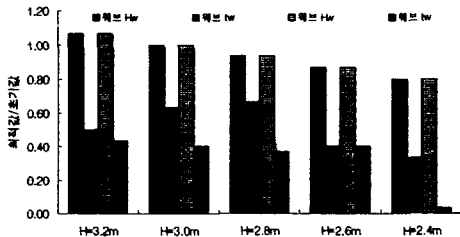
주형 높이를 2.4m에서부터 3.2m까지 0.2m 단위로 먼저 결정시킨 후, 상·하 플랜지의 폭과 두께 그리고 웨브의 두께를 설계변수로 정식화하여 최적설계를 수행한 결과를 표 4에 '경우3'으로 나타내었으며, 설계변수 초기값에 대한 최적값의 변화추이를 그림 8에 나타내었다. 그림 8 (d)에 나타낸 목적함수의 변화추이를 살펴보면 형고의 높이가 증가할수록 제작비용이 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서 형고를 늘리면 경제적인 단면의 설계가 가능하지만 형하공간의 확보 문제와 주형의 제작 및 운반문제를 고려한다면 최대 형고인 3m가 최적의 형고라고 판단된다.



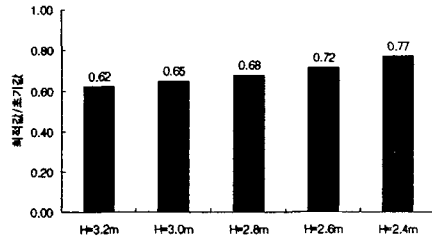
(a) 상부플랜지 변화추이



(b) 하부플랜지 변화추이



(c) 웨브 변화추이



(d) 목적함수 변화추이

그림 8. 주형 높이별 최적설계 결과 비교

최적설계결과 상·하 플랜지의 주하중에 대한 조합응력이 가장 지배적인 제약조건으로 나타났으며, 합성응력과 부재의 최소 폭-두께비에 대한 제약조건이 각각 지배적인 순서로 나타났다. 2주형 판형교는 주형의 수를 줄이는 반면 주형의 크기가 커지므로 지배적인 제약조건이 주하중에 대한 조합응력과 합성응력과 같이 강도제약조건 뿐만 아니라 좌굴의 영향을 고려한 부재의 최소 폭-두께비가 중요한 제약조건으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서 제안한 2주형 판형교의 최적설계를 대상구조물에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 실제 대형구조물을 최적설계하기 위해서는 많은 설계변수와 제약조건이 필요하게 되므로 경제적인 해석방법이 필요하게 된다. 본 연구에서 2주형 판형교의 최적설계를 위해서 도입한 설계변수연결기법은 효과적으로 설계변수를 줄일수 있어 효율적인 최적설계를 가능하게 하였다.

(2) 응력조건과 형상제약조건만을 고려하여 최적설계를 수행하고 그 결과에 대해서 처짐검토를 수행하여, 위반시에만 처짐에 대한 제약조건을 고려하는 제약조건 소거기법의 적용은 2주형 판형교 최적설계에 매우 효율적이다.

(3) 정모멘트가 작용하는 구간에서 판부재의 최소 폭-두께비를 고려하면, 플레이트 거더의 플랜지는 상부의 폭을 좁게하고 하부의 폭을 넓게 하는 형상이 경제적임을 확인하였으며, 주형의 높이는 설계차원에서 높을수록 경제적이지만, 현실적인 최적의 형고를 결정하기 위해서는 현장여건과 형하공간의 확보문제 그리고 제작 및 운반을 모두 고려할 수 있는 계획차원의 제약조건이 필요할 것으로 판단된다.

(4) 주하중에 대한 상·하 플랜지의 조합응력과 합성응력 그리고 부재의 최소 폭-두께비가 지배적인 제약조건으로 나타났다. 따라서 설계단계에서 이에 대해서는 주의깊게 검토되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) Garret N.Vanderplaats(1984), "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design," McGraw -Hill.
- (2) Garret N. Vanderplaats(1985), "ASD: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis", Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California.
- (3) Haftka, R.T.(1992), "Elements of Structural Optimization," Kluwer Academic Publishers.
- (4) RM Space-Frame User Manual
- (5) 小西一郎(1975), "鋼橋" 도서출판 건설도서
- (6) 건설교통부(2000), "도로교표준시방서"
- (7) 건설교통부(1997), 강도도로 상세부설계지침
- (8) 조효남, "강상형교의 최적설계 프로그램(CAOD-sb)개발 최종 보고서"
- (9) 조효남, 박문호, 류연선(1991), "구조물의 최적설계", 한국전산구조공학회
- (10) 철도청(1999), 철도설계기준(철도교편)
- (11) 한국강구조공학회(1995), "강구조편람"
- (12) 조효남, 조선규, 민대홍, 이광민, 김환기(2000), "설계 민감도 해석을 이용한 PSC 박스거더교의 최적설계", 한국콘크리트학회"
- (13) 조효남, 조선규, 민대홍, 김환기(2000), "MSS 공법을 이용한 PSC박스거더교의 최적설계 프로그램" 대한토목학회