

# 3경간 연속 Preflex 합성형교의 최적설계에 관한 연구

A Study on the Optimum Design of  
Three Span Continuous Preflex Composite Girder Bridge

구 민 세<sup>1)</sup> · 장 성 수<sup>2)</sup> · 정 진 일<sup>3)</sup>  
*Koo, Min Se Chang, Suong Su Jeong, Jin Il*

**요약 :** 본 연구에서는 내측지점의 상승·하강을 이용하여 부모멘트구간에 프리스트레스를 도입하는 3경간 연속 프리플렉스 합성형교의 설계방법을 제시하고 이를 전산 프로그램화하여 최적설계를 수행하였다. 최적설계를 위한 목적함수로는 3경간 연속 프리플렉스 합성형교의 재료비용으로 결정하고, 제약방정식은 설계과정 및 시방서에 명시된 최소설계단면제원과 부재별 허용응력에 근거하여 구성하였다. 최적설계기법으로는 기존의 2경간 최적화 연구에서 제시된 수치적 최적화기법의 하나인 순차 비제약 최소화기법을 재검토 및 수정하여 설계를 수행하였다.

민감도분석 결과에 근거하여 지간길이에 따른 최적설계단면을 결정하고, 여기서 정해진 최종 설계단면을 단순보형 프리플렉스 합성형교의 설계단면과 비교하였다. 그리고 각 지간별 합성보의 형고를 변화시키면서 최적화를 수행하여 형고와 재료비용과의 관계도를 제시하고 최적형고를 결정하였다.

**ABSTRACT :** This study presents a design method for three-span continuous preflex composite girder bridges (3S-PCB) which imposes prestresses in the negative moment region by lifting or lowering interior supports and the design method is automated by a computer program which incorporates optimal design procedure. The objective function for the design of 3S-PCB minimizes the cost of construction materials and the constraint functions represent the limited dimensions of the design section and the allowable stress for each structural member as given in the specifications. Optimal design procedure used in this study is a modification of existing sequential unconstrained minimization technique (SUMT), a numerical analyses procedure for two-span continuous preflex composite bridges.

1) 정회원, 인하대학교 토목공학과 부교수

2) 인하대학교 토목공학과 박사과정

3) 인하대학교 토목공학과 석사

본 논문에 대한 토의를 1998년 9월 30일까지 학회로 보내  
주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

The optimized design sections determined for each span length are compared with those of simple preflex composite beams (SPCB) and the optimal girder depth is determined by defining the relationship between girder depth and construction material costs.

핵심용어 : 프리플렉스, 순차 비제약 최소화 기법, 민감도 분석

KEYWORDS : Preflex, SUMT, Sensitivity Analysis

## 1. 서 론

기존의 프리플렉스 합성보공법은 단순보형태의 교량에만 적용되었다. 따라서 다경간 교량의 경우 보와 보의 연결부를 고가의 팽창조인트로 연결하고 있으나 지속적인 보수 및 유지관리가 필요하고 주행감 또한 저하시키고 있다. 이에 비하여 연속 프리플렉스 합성보공법[구민세, 1994]은 프리플렉스 합성형교량을 연속화하고 이때 발생하는 부모멘트구간에서의 인장응력은 내측지점의 상승·하강에 의한 프리스트레스를 도입하여 효과적으로 해결할 수 있다. 따라서 연속 프리플렉스 합성보공법은 교량의 연속화를 통한 단면절감과 고가의 팽창조인트를 제거할 수 있는 경제적인 시공법이 될 수 있다.

연속 프리플렉스 합성형교는 여러 단계의 시공 과정을 거치게 되고, 제작과정의 특수성으로 많은 설계변수들이 서로 종속적인 관계에 있기 때문에 경간수가 증가하면 그에 따른 설계변수 및 역학적 특성을 고려하여 시공방법이 달라져야하며 그에 따른 각종 변수는 더욱 복잡하게 된다. 따라서 기존의 2경간 연속 프리플렉스 합성보[구민세 외 1인, 1995]에서 제시된 방법을 이용할 수가 없다.

본 연구에서는 교량의 내·외측 거더의 역학적 특성을 고려한 프리스트레스 도입방법을 연구하고 3경간 연속 프리플렉스 합성형교를 설계 및 해석 할 수 있는 전산 프로그램을 유한요소법을 이용하여 개발한다. 또한 수학적 최적화기법인 순차 비제약 최소화기법(SUMT)을 도입하여 설계변수 및 구조거동에 부과된 다수의 제약조건을 동시에

만족하는 가장 경제적인 구조형식 및 설계단면의 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 정식화

### 2.1 목적함수의 정식화

3경간 연속 프리플렉스 합성형교의 최적화 목적함수로는 합성보 교량의 전체 재료비용으로 결정한다.  $C_s$ 는 강재의 단위중량( $r_s$ )당 비용으로 68만원/t이고,  $C_c$ 는 콘크리트의 단위부피당 비용으로 7만원/m<sup>3</sup>이다. 또한 L은 3경간 교량의 전체길이로 90m(30m×3), 105m(35m×3), 120m (40m×3), 135m(45m×3), 150m (50m×3)에 대해 각각 설계를 수행한다.

$$\begin{aligned} F &= C_c V_c + C_s r_s V_s \\ &= C_c \cdot \left\{ V_{total} + \left( \frac{C_s r_s}{C_c} - 1 \right) V_s \right\} \\ &= C_c \cdot L \cdot \{(b_{cu} \cdot t_{cu} + b_{cl} \cdot t_{cl} + h_{cw} \cdot t_{cu} \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{C_s r_s}{C_c} - 1 \right) (2b_{sf_i} \cdot t_{sf_i} + 2b_{sf_o} \cdot t_{sf_o} + h_{sw} \right.\right. \\ &\quad \left.\left. + h_{sw} \right)\right\} \end{aligned}$$

여기서,

$t_{sf_i}$ ,  $b_{sf_i}$  : plate girder 내측플랜지의 두께와 폭  
 $t_{sf_o}$ ,  $b_{sf_o}$  : plate girder 외측플랜지의 두께와 폭  
 $t_{sw}$ ,  $h_{sw}$  : web의 두께와 폭  
 $t_{cu}$ ,  $b_{cu}$  : 상부 콘크리트의 두께와 폭  
 $t_{cl}$ ,  $b_{cl}$  : 하부 콘크리트의 두께와 폭  
 $t_{cw}$ ,  $b_{cw}$  : 복부 콘크리트의 높이와 두께

$V_c$ ,  $V_s$  : 콘크리트 및 강재의 부피

$V_{total}$  : 전체의 부피

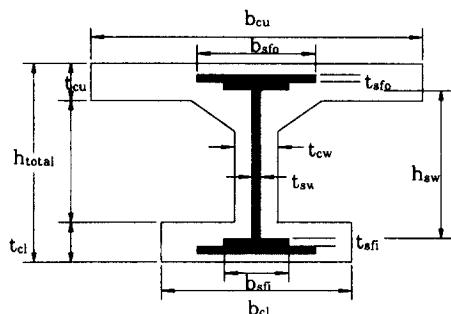


그림 1. 3경간 연속 프리플렉스 합성보의 설계단면

## 2.2 설계변수의 선정

본 연구에서는 3경간 연속 프리플렉스 합성형 교의 설계단면 중  $b_{cu}$ 는 유효폭을 고려하여 300cm로 가정하였고,  $t_{cw}$ 는 합성형의 형고에 따라 최소 16cm의 값을 갖는 상수이다.  $t_{cf1}$ 는 바닥판 지간길이에 따라 최소 22cm의 값을 갖는 상수이다. 따라서 상호 독립적인 것으로 판단되는  $t_{sf1}$ ,  $b_{sf1}$ ,  $t_{sf0}$ ,  $b_{sf0}$ ,  $t_{sw}$ ,  $h_{sw}$ ,  $t_{cf1}$ ,  $b_{cf1}$ 의 8개 변수를 설계변수로 선택할 수 있다.(표 1) 여기서  $web$ 의 높이( $h_{sw}$ )는 전체 형고에 직접적인 영향을 미치는 변수이고 전체 형고는 실제 교량설계에 있어 현장조건이나 설계계약 등에 의해 제시되거나 설계자의 경험적 판단에 의해 결정된다.

본 연구에서는  $h_{sw}$ 를 전체형고에 의한 종속적 변수로 구성하고 전체 형고를 임의로 변화시킴으로서 형고와 목적함수와의 관계를 연구하고자 한다.

표 1. 설계변수와 부재명의 관계

설계변수	부재명	설계변수	부재명
X(1)	$t_{sf1}$	X(5)	$b_{sf1}$
X(2)	$t_{sf0}$	X(6)	$h_{sw}$
X(3)	$t_{sw}$	X(7)	$b_{cf1}$
X(4)	$b_{sf0}$	X(8)	$t_{cf1}$

## 2.3 부재단면에 대한 제약조건방정식의 구성

본 연구에서는 SWS50YB( $3,600\text{kg/cm}^2$ )의 강종을 선택하였다. 표 2는 부재의 단면제원에 대한 제약조건방정식은 도로교 표준시방서 및 프리플렉스 합성형 표준시방서 및 동해설(안) 규정에 근거하여 구성한다

표 2. 부재 단면제원에 대한 제약조건 (단위:cm)

설계변수	제약조건 방정식
$t_{sf1}$	$X(1) \quad 0.8 \leq X(1) \leq 3.2$
$t_{sf0}$	$X(2) \quad 0.8 \leq X(2) \leq 3.2$ $X(2) \leq 1.5X(1)$
$t_{sw}$	$X(3) \quad 0.8 \leq X(1) \leq 3.2$
$b_{sf0}$	$X(4) \quad X(4) \leq 24X(2)$
$b_{sf1}$	$X(5) \quad X(5) \leq 21.4X(1)$
$h_{sw}$	$X(6) = h_{total} - 2(X(1) + X(2)) - 22$ $X(6) \leq 123X(3)$
$b_{cf1}$	$X(7) \geq \max\{X(4), X(5)\} + 20$
$t_{cf1}$	$X(8) \geq X(1) + X(2) + 16$

## 2.4 구조거동에 대한 제약방정식의 구성

3경간 연속 프리플렉스 합성형교의 설계과정 중 보의 휨강성은 정모멘트구간과 부모멘트구간에서 각기 다르고, 슬래브 콘크리트와 프리스트레스가 도입되는 콘크리트의 강도차이로 인해 휨강성이 균일하지 않기 때문에 해석적방법으로 수식화하여 설계를 수행한다는 것은 매우 어려운 일이며, 이를 프로그램화하는 것은 사실상 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 3경간 연속 프리플렉스 합성형교를 유한요소법으로 설계 및 해석 할 수 있는 전산 프로그램을 개발하여 각 단면위치에서 부재에 발생하는 응력 및 보의 처짐을 산출한다.

도로교 표준시방서[1992] 및 프리플렉스 합성형 표준시방서 및 동해설(안)[1986] 규정에 근거한 부재별 허용응력 표 3과 표 4와 같다.

표 3. 강재의 허용응력에 대한 규준

응력의 종류	하중상태	허용응력 적용
인장응력	Preflexion할때	$0.8 \sigma_{sy}$
	설계하중작용할때	$0.7 \sigma_{sy}$
압축응력	Preflexion할때	$0.9 \sigma_{sy}$
	설계하중작용할때	$0.7 \sigma_{sy}$
전단응력	Preflexion 및 설계하중작용할때	SWS -50YB

표 4. 콘크리트의 허용응력

부재	응력상태	하중상태	허용응력 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
프리스트레싱 콘크리트 $\sigma_{ck} = 400$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	허용 인장응력	Release 직후	$1.6 \sqrt{\sigma_a}$
		설계하중 작용할때	$2.0 \sqrt{\sigma_{ck}}$
	허용 압축응력	Release 직후	$0.6 \sigma_{ci}$
		설계하중 작용할때	$0.4 \sigma_{ck}$
슬래브, 복부 콘크리트 $\sigma_{ck} = 270$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	허용 인장응력	설계하중 작용할때	$\sigma_{ck}/15$
	허용 압축응력	설계하중 작용할때	$\sigma_{ck}/3.5$

표 5는 구조거동에 대한 제약조건을 나타낸 것이다. 각 제작단계에서 누적되는 응력은 허용응력 내에 있어야 한다. 여기서  $I = 1, 2, \dots, 48$  (보조소에 대한 index number)이고  $J = 1, 2, \dots, 14$  (설계단계에 대한 index number)이다.

표 5. 구조적 거동에 대한 제약조건방정식

제약 조건	제약조건 방정식
힘응력	$\sum_{I=1}^{14} (\max[(\sigma_{st,i})_I, (\sigma_{st,s})_I])_J \leq (\sigma_s)_{allow,J}$ - 강재판형 상·하면의 힘응력 -
	$\sum_{I=1}^{14} (\max[(\sigma_{cu,i})_I, (\sigma_{cu,s})_I])_J \leq (\sigma_{cu})_{allow,J}$ - 슬래브 상·하면의 힘응력 -
	$\sum_{I=1}^{14} (\max[(\sigma_{cl,i})_I, (\sigma_{cl,s})_I])_J \leq (\sigma_{cl})_{allow,J}$ - 하부 콘크리트 상·하면의 힘응력 -
전단응력	$\max[(\tau_s)_J]_{J=1} \leq (\tau_s)_{allow}$ - 강재판형의 전단응력 -
처짐	$\max[\delta_I]_{J=14} \leq \delta_{allow}$ - 활하중에 의한 처짐 -

### 3.3 경간 연속 프리플렉스 합성형교의 설계

#### 3.1 제작방법

3경간 연속 프리플렉스 합성형교의 제작은 기존의 2경간 프리플렉스 합성보 제작방법(구민세 외 1인, 1995)에 기초를 두고 있다. 전체 제작과정은 모두 14단계의 과정을 거치게 되며, 단계별 제작순서도는 그림 2과 같다. 3경간 교량제작의 가장 큰 특징은 2경간 교량과는 달리 내측부재와 외측부재의 정모멘트구간의 프리스트레스 도입력을 달리해야 하며 내·외측부재에 도입되는 프리스트레스력의 상호관계 및 내측지점에 프리스트레스를 도입하기 위한 지점 상승·하강량에 미치는 영향까지 고려해야 한다. 표 6은 3경간 교량의 제작방법을 시공단계별로 나타내었다.

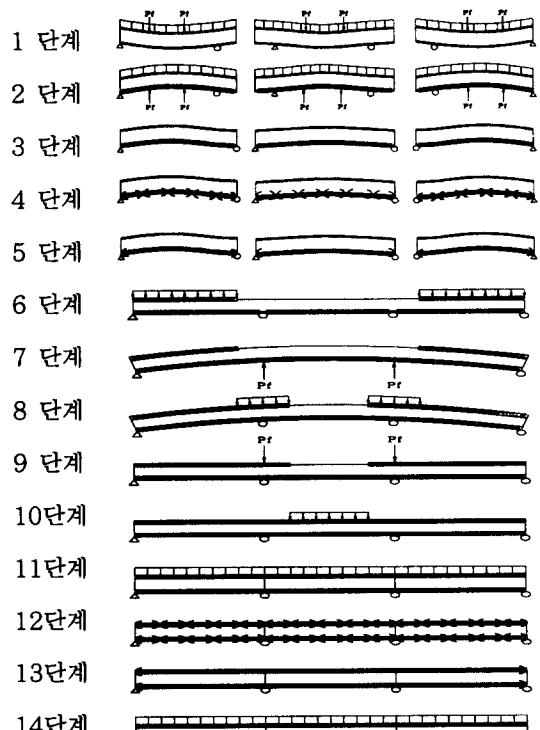


그림 2. 3경간 교량의 제작순서도

표 6. 3경간 교량의 단계별 제작방법

제작단계	단계별 시공과정 내용
단계 1	강재 보의 거치 및 프리풀렉션 하중의 재하
단계 2	하부플랜지 콘크리트의 타설 및 월리즈
단계 3	단순거치
단계 4	하부플랜지 콘크리트의 초기 크리프
단계 5	하부플랜지 콘크리트의 초기 전조수축
단계 6	부재연결 및 외측교량의 상부콘크리트의 타설
단계 7	내측 연결지점의 상승
단계 8	내측 지점부의 상부플랜지 콘크리트의 타설
단계 9	내측 연결지점의 하강
단계 10	내측교량의 슬래브 및 복부콘크리트의 타설
단계 11	아스팔트의 타설
단계 12	상·하부플랜지 콘크리트의 최종 크리프
단계 13	상·하부플랜지 콘크리트의 최종 전조수축
단계 14	활하중 재하

### 3.2 기존의 제약조건 프로그램에 대한 검토

기존의 2경간 최적화 연구의 제약조건 프로그램은 교량제작의 각 단계를 독립적으로 구성하였다. 따라서 설계변수에 대한 민감도분석과정에서 이전 단계에 의한 종속적인 변화를 정확히 검색하지 못하고 어느 한 단계에서의 변화만으로 최적화를 수행하는 문제점이 있었다. 또한 SUMT 프로그램은 모든 제약조건을 순차적으로 만족시켜야 하는 특성이 있음에도 불구하고 교량제작의 각 단계의 부재 용력에 대한 제약을 각각 개별적인 제약조건으로 구성하고 매 단계마다 모든 용력을 제약조건으로 구성하였다. 이는 최적화 수행시 불필요한 정보의 제공과 제약방정식의 증가로 수렴성을 저해하고 최적화시간을 연장하는 결과를 가져온다.(그림 3)

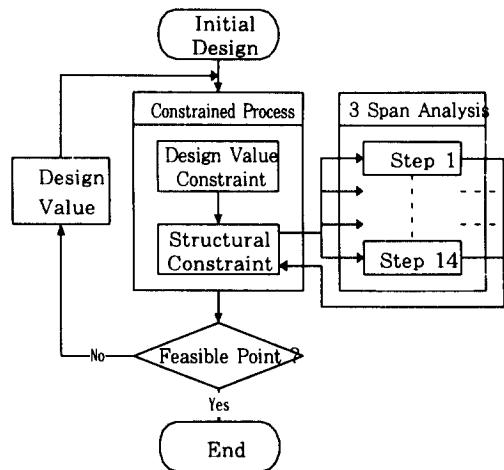


그림 3. 기존의 제약조건 프로그램의 흐름도

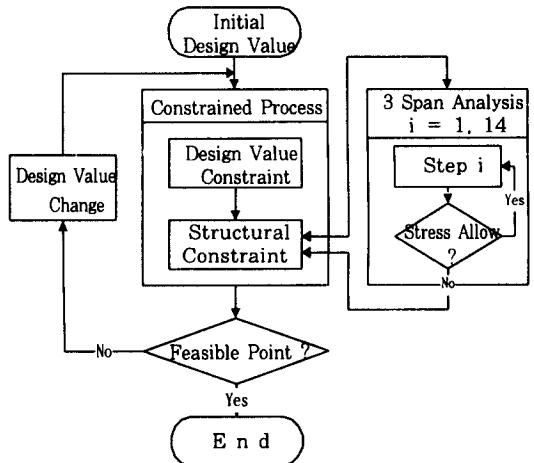


그림 4. 수정된 제약조건 프로그램의 흐름도

### 3.3 수정된 제약조건 프로그램의 적용 및 검토

본 연구에서는 교량제작의 각 단계를 연속적으로 구성하였다. 따라서 설계변수값의 변화에 따른 전체 제작공정의 역학적인 변화를 정확히 고려하여 최적화를 수행할 수 있게 되었다. 또한 모든 구속조건이 순차적으로 만족되어야 하는 SUMT 프로그램의 특성을 이용하여 각 단계를 수행하는

과정에서 허용응력에 위배되는 응력이나 최종단계에서의 가장 큰 응력만을 제약조건으로 구성하도록 하였다.(그림 4)

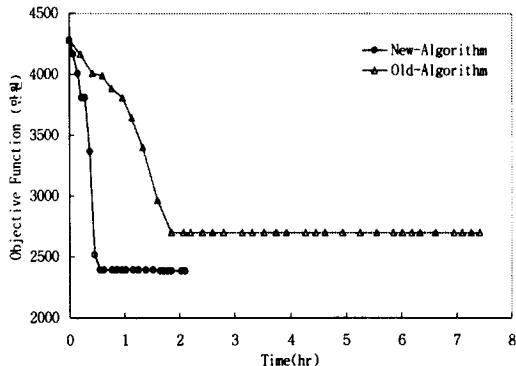


그림 5. 제약 프로그램에 따른 최적화과정 비교

3경간( $30m \times 3$ , 형고 120cm)교량에 기존의 2경간에서 사용한 제약조건 프로그램과 본 연구에서 수정한 제약조건 프로그램을 적용하여 최적화를 수행하였으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 기존의 프로그램보다 수정된 프로그램이 최적화의 반복회수 및 수렴성면에서 매우 개선된 것으로 나타났다. 실행시간면(Intel Pentium 120)에서도 기존 방법이 7~10시간을 사용한데 비해 2~4시간만에 최적화를 수행하여 70%정도의 실행시간을 절약할 수 있었다.

#### 4. 민감도분석

##### 4.1 설계변수의 민감도분석 및 재검토

2.2절에서 선정한 설계변수로 민감도분석을 수행하였다. 그리고 최종 설계변수의 값이 제약방정식의 임계값에 매우 근사하거나 또는 초기 설계점의 값에서 거의 변화가 없는 설계변수들은 종속변수로 전환하였다.

##### (1) 강재 복부의 두께( $t_{web}$ )

$t_{web}$ 에 대한 민감도분석을 각 지간길이에 대하여 형고를 변화시키며 실시하였다. 그 결과  $t_{web}$ 는 초기 input data와 지간 길이에 관계없이 단면제약조건의 최소임계치( $h_{web}/123$ )에 거의 일치하는 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는  $t_{web}$ 를 독립적인 설계변수가 아닌  $h_{web}$ 의 종속적인 설계변수로 구성하였다. (표 7은 지간길이 30m, 50m의 경우임.)

표 7. 강재 복부의 두께에 대한 민감도분석

형고 (cm)	90m ( $30m \times 3$ )			150m ( $50m \times 3$ )		
	초기 data	임계값	최적화 결과	초기 data	임계값	최적화 결과
110	1.50	0.80	0.80			
120	1.50	0.80	0.80			
130	1.50	0.82	1.82			
140	1.50	0.91	0.91			
150	1.50	1.00	1.00			
160	1.50	1.17	1.17			
180				2.00	1.20	1.20
190				2.00	1.30	1.30
200				2.00	1.38	1.38
210				2.00	1.47	1.47
220				2.00	1.56	1.56
230				2.00	1.64	1.64

##### (2) 아래 플랜지 콘크리트의 폭( $b_{cl}$ )

아래 플랜지 콘크리트의 폭( $b_{cl}$ )에 대한 민감도분석 결과를 표 8에 나타내었다.  $b_{cl}$ 은 초기 input data값에서 최적화수행 이후에도 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 아래 플랜지 콘크리트의 폭( $b_{cl}$ )을 강재 Plate Girder의 폭에 따라서 최소 콘크리트의 피복두께만을 고려하도록한 종속변수로 구성하였다.

표 8에서 임계치 값은 Plate Girder의 폭에 최소 콘크리트 피복두께(20cm)를 고려한 값이다.

표 8. 아래플랜지 콘크리트의 폭의 민감도분석 결과

형고 (cm)	90m (30m×3)			150m (50m×3)		
	초기 data	임계값	최적화 결과	초기 data	임계값	최적화 결과
110	89.0	68.1	91.9			
120	89.0	63.3	89.4			
130	89.0	61.6	89.3			
140	89.0	59.9	89.4			
150	89.0	58.8	89.3			
160	89.0	57.3	89.4			
180				109.0	79.3	109.7
190				109.0	74.9	109.3
200				109.0	73.9	109.2
210				109.0	71.9	109.1
220				109.0	69.8	109.0
230				109.0	48.0	108.9

### (3) 설계변수 및 제약방정식의 수정에 따른 최적해의 변화

수정한 설계변수 및 제약방정식을 이용하여 3 경간(30m×3)교량에 적용하여 최적화를 수행하였다. 그림 6은 설계변수 및 제약방정식의 수정에 따른 최적화 과정을 비교한 것이다. 제약조건 프로그램의 수정으로 개선되었던 최적해가 설계변수 및 제약방정식의 수정으로 다시 8%정도 감소되었고 실행시간도 9%정도 감소되었다.

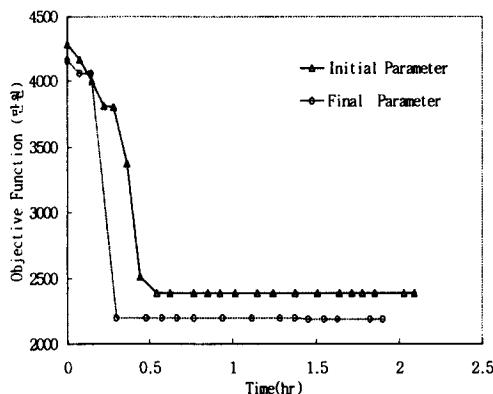


그림 6. 설계변수 및 제약방정식의 수정에 따른 최적화과정 비교

### 4.2 초기 설계점의 변화에 따른 최적해

본 연구의 결과에 국부적인 해가 여러개 존재한다면 수렴의 방향이 왜곡될 수 있는 가능성이 있다. 따라서 이와 같은 가능성을 확인하는 방법으로 표 9과 같이 초기 가능설계점을 변화시키면서 최적화를 수행하고 그 결과를 비교함으로서 국부적 최소해로의 수렴성을 검토해 볼 필요가 있다. 표 9은 지간길이 40m(형고:150cm)의 경우에 5가지의 각기 다른 초기 가능설계점과 그에 따른 초기 목적함수값을 나타낸 것이다. (표 9, 표 10에서 종속변수는 음영으로 표시)

표 9. 초기 가능설계점 및 초기 목적함수치

설계변수	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
X(1)	28	30	29	27	29
X(2)	30	31	30	29	31
X(3)	10	10	10	10	10
X(4)	680	740	700	650	720
X(5)	650	630	600	560	610
X(6)	1164	1158	1162	1168	1160
X(7)	880	940	900	850	820
X(8)	320	380	350	350	400
목적 함수	6340	7012	6549	5978	6788

표 10. 초기 설계점의 선택에 따른 최적해의 변화

설계변수	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
X(1)	19	19	20	20	19
X(2)	22	21	21	21	21
X(3)	10	10	10	10	10
X(4)	491	494	492	488	489
X(5)	405	406	408	411	402
X(6)	1198	1200	1198	1198	1200
X(7)	691	694	692	688	689
X(8)	314	361	334	337	382
목적 함수	3943	3929	3940	3939	3915

표 9의 초기 가능설계점으로 최적화를 수행한 결과를 표 10에 나타내었다. 최적 설계점을 비교해보면 초기 설계점이 다음에도 불구하고 강재 ( $X(1) \sim X(6)$ )의 경우, 거의 비슷한 설계점으로 수렴하고 있으나 콘크리트 ( $X(7), X(8)$ )은 다소간의 오차를 보이고 있다. 그러나 목적함수 값의 최대치(Case 1)와 최소치(Case 5)의 차이가 약 1.0%미만이고 최적화 과정의 수치적인 error 등을 고려한다면, 본 연구에서 정식화한 목적함수 및 제약방정식들은 3경간 연속 프리플렉스 합성 보의 최적해를 전역적인 최소해로 수렴시키는데 적합한 것으로 판단된다.

#### 4.3 프리플렉션 하중의 재하점 및 임시지점에 따른 최적해의 변화

3경간 연속 프리플렉스 합성형교의 설계에는 구조적 거동에 관련된 다양한 변수가 이용되나, 역학적인 비중이 있는 프리플렉션 하중재하점 및 임시지점의 변동에 따른 최적해의 변화를 고찰한다. 민감도분석 결과를 분석한 결과 외·내측 부재의 임시 지점의 위치는 선정된 범위 내에서 목적함수 값에 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 반면에 외측·내측 부재의 하중재하 위치는 목적함수값에 다소간의 변화를 주었다. 본 연구에서는 실행시간 및 수렴성을 고려하여 하중재하점 및 임시지점 위치를 선정하였다. 표 11는 최종 선정된 하중재하점 및 임시지점 위치를 지간길이에 따라 나타낸 것이다.

표 11. 최종 선정된 하중재하점 및 임시지점 위치

지간길이 (m)	외측 임시지점	내측 임시지점	외측 하중재하	내측 하중재하
30	1 · 16	2 · 16	5 · 11	6 · 12
35	1 · 16	2 · 16	5 · 11	7 · 11
40	1 · 16	2 · 16	5 · 11	7 · 11
45	1 · 16	2 · 16	5 · 12	7 · 11
50	1 · 16	2 · 16	5 · 12	7 · 11

#### 4.4 프리플렉션 하중변수에 따른 최적해의 변화

##### (1) 외측부재의 프리플렉션 하중변수( $\gamma_E$ )

프리플렉션 하중변수( $\gamma_E, \gamma_I$ )의 가장 정확한 민감도분석은 가능한 모든 경우를 조합하고 그 최적화결과로서 평가하는 것이다. 그러나 그 경우의 수가 매우 많고 최적화에 따른 소요시간등을 고려해볼 때 이는 불가능한 것으로 판단된다. 본 연구에서는  $\gamma_E$ 와  $\gamma_I$ 를 분리하여 민감도분석을 수행하였다.(그림 7) 지간길이 40m, 형고 150cm인 경우,  $\gamma_E$ 가 0.9에서 가장 최소해를 갖는 것으로 나타났다. 또한 형고를 170cm, 190cm로 변화시키며 최적화를 수행한 결과도  $\gamma_E$ 가 0.9에서 최소해를 나타내었다. 따라서 외측경간의 프리플렉션 하중변수( $\gamma_E$ )는 형고의 변화에 관계없이 항상 0.9를 사용할 수 있다. 또한 지간길이에 따른  $\gamma_E$ 의 변화를 고찰하기 위해 각 지간길이에 대하여 동일한 민감도분석을 실시하였다. 그림 8는 지간길이와  $\gamma_E$ 에 따른 목적함수값의 변화를 나타낸 것으로  $\gamma_E$ 가 지간길이의 변화에도 항상 0.9에서 최소해를 갖고 있음을 나타낸다.

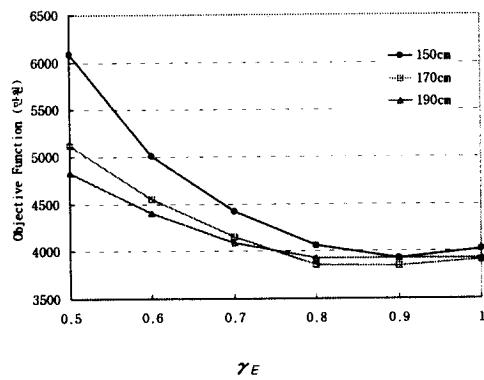


그림 7. 형고와  $\gamma_E$ 에 따른 목적함수값의 변화  
(지간길이 40m)

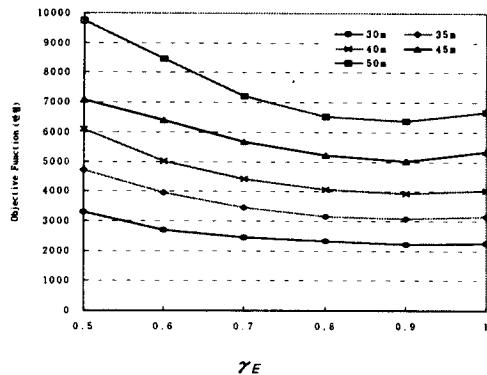


그림 8. 지간길이와  $\gamma_E$ 에 따른 목적함수값의 변화

#### (2) 내측부재의 프리플렉션 하중변수( $\gamma_I$ )

4.4-(1)항에서 결정된  $\gamma_E = 0.9$ 를 사용하여 지간길이 40m, 형고 150cm에 대하여  $\gamma_I$ 값을 변화시키며 민감도분석을 실시하였다. 또한 형고도 4.4-(1)항에서와 같이 150cm, 170cm, 190cm로 변화시켰다. 그림 4.4는 형고와  $\gamma_I$ 값의 변화에 따른 민감도분석 결과를 나타낸 것이다.  $\gamma_E$ 가 항상 일정한 값을 갖는 것과는 달리  $\gamma_I$ 는 형고의 변화에 따라 최소해를 갖는  $\gamma_I$ 가 서로 달라지고 있다. 이것은 각각의 형고마다  $\gamma_I$ 를 결정하기 위한 민감도분석이 병행되어야함을 나타낸다. 또한 지간길이가 달라지면 그에 따른 형고도 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 지간길이와 형고의 변화에 따라 각각 최적의  $\gamma_I$ 를 찾기 위해

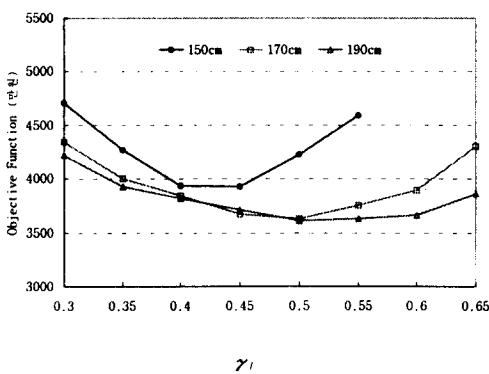


그림 9. 형고와  $\gamma_I$ 에 따른 목적함수값의 변화

민감도분석을 실시하였으며, 이러한 민감도분석을 통해 선정된  $\gamma_I$ 를 표 12에 나타내었다.

표 12. 지간길이 및 형고에 따른 최적의  $\gamma_I$

형고	내측지점의 프리플렉션 하중변수( $\gamma_I$ )				
	30m×3	35m×3	40m×3	45m×3	50m×3
110cm	0.40				
120cm	<b>0.45</b>	0.40			
130cm	0.50	<b>0.45</b>			
140cm	0.50	0.45	0.40		
150cm	0.55	0.55	<b>0.45</b>		
160cm	0.50	0.55	0.45	0.40	
170cm		0.60	0.50	<b>0.40</b>	
180cm			0.50	0.45	0.40
190cm			0.50	0.50	<b>0.40</b>
200cm				0.55	0.45
210cm				0.50	0.50
220cm					0.50
230cm					0.50

(단경간과 동일한 형고는 음영으로 표시)

#### 5. 지간길이별 최적 설계단면 및 기존 연구결과와의 비교

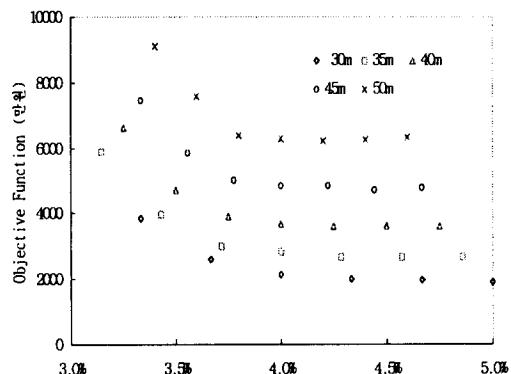
본 연구에서 수행된 3경간 연속 프리플렉스 합성형교의 최적설계에 의한 설계단면은 2절에서 정식화한 목적함수 및 제약방정식에 대해 수정된 순차 비제약 최소화기법을 적용하고, 각종 민감도 분석 결과에 근거하여 최종적으로 결정된다. 3경간 연속 프리플렉스 합성보의 단면적 및 재료비용을 지간길이에 따라 표 13에 나타내었다. 단경간 프리플렉스 합성보(기준 단면적:100%)와 동일한 형고의 단면을 비교대상으로 하였다. 표 13에서 음영으로 표시된 부분은 본 연구의 목적함수이다.

표 13. 단경간 합성보와 3경간 연속 프리풀렉스 합성보의 단면적 및 재료비용

지간길이 (형고)	부재명	단경간	3경간 최적화	비교 (%)
30m×3 (120cm)	강재 면적	669	325	48.6
	콘크리트 면적	10966	9297	84.8
	재료비용(만원)	3906	2153	55.2
35m×3 (130cm)	강재 면적	831	418	50.3
	콘크리트 면적	11239	9925	88.3
	재료비용(만원)	5487	3075	56.1
40m×3 (150cm)	강재 면적	890	479	53.8
	콘크리트 면적	11625	10278	88.4
	재료비용(만원)	6681	3929	58.8
45m×3 (170cm)	강재 면적	1008	553	54.9
	콘크리트 면적	11992	10947	91.3
	재료비용(만원)	8394	5017	59.8
50m×3 (190cm)	강재 면적	1096	645	58.9
	콘크리트 면적	12429	11657	93.8
	재료비용(만원)	10080	6385	63.3

## 6. 형고에 따른 최적화 연구결과

실제 교량설계에 있어 형고는 현장조건이나 설계제약등에 의해 제시되거나 설계자의 경험적 판단에 의해 결정된다. 그러나 형고는 교량의 역학적 거동 및 재료비용에 가장 큰 영향을 미치는 변수로서 설계자가 교량의 적절한 형고를 선택할 지표가 필요하다. 본 연구에서는 지간길이 별로 형고를 변화시키면서 최적화를 수행하였다. 그림 10에서 최저 재료비용을 갖는 최적형고를 결정할 수 있었다. 그러나 최적형고 보다는 재료비용이 급격히 상승하는 경계의 형고가 교량 설계자에게는 더 중요한 의미를 갖을 것으로 판단된다. 각 지간길이에 따라 미소한 차이는 있으나 형고가 지간길이의 3.8%정도인 점을 경계로 하여 재료비용이 급격히 상승하는 것으로 나타났다.



형고/지간길이 × 100%

그림 10. 형고와 지간길이비에 따른 재료비용의 변화

## 7. 결 론

본 연구에서는 3경간 연속 프리풀렉스 합성형교의 설계방법을 제시하고 시방서규정에 따라 목적함수 및 제약방정식을 구성하였다. 민감도분석을 통해 정식화한 함수를 수정하여 최적화를 수행하였다. 본 연구의 범위에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 순차 비제약 최소화기법(SUMT)을 도입함에 있어 제약조건 프로그램을 수정하는 것만으로도 최적해의 수렴성이 개선되었고, 실행시간면에서는 기존의 제약조건 프로그램에 비해 70%정도나 감소시킬 수 있었다.

2) 본 연구에서 선정한 설계변수에 대한 민감도분석을 실시하여 목적함수에 미치는 영향이 미소한 설계변수 및 제약방정식을 수정하였다. 그 결과 제약조건 프로그램의 수정으로 개선되었던 최적해가 다시 8%정도 개선되었고 실행시간도 9%정도 더 감소되었다.

3) 최적화기법을 이용하여 설계한 결과를 단순보형 프리풀렉스합성형교와 비교한 결과 강재 판형보의 설계 단면적은 단순보형과 비교하였을 때 41.1~51.4%정도 감소하는 것으로 나타났고, 콘크리트 단면적의 경우는 6.2~15.2%정도 감소

하는 것으로 나타났다. 또한 본 연구의 목적함수인 재료비용면에서는 36.7~44.8%정도 감소하였다.

4) 각 지간길이(30m, 35m, 40m, 45m, 50m)에 대하여 형고를 변화시키며 최적화를 수행하여 형고와 재료비용의 관계를 도식화하였다. 따라서 설계자는 재료비용등을 고려하여 적절한 형고를 선택할 수 있다. 또한 경제적인면을 고려한다면 최소형고는 지간길이의 3.8%정도가 적합함을 알 수 있었다.

5) 본 연구에서는 합성보의 주요 단면변수를 기초로하여 목적함수 및 제약방정식을 구성하였으나 본 연구에서 고려하지 않은 기타 변수와 소요되는 부대비용등을 포함한 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 감사의 말

본 연구를 위해 아낌없는 후원을 해주신 대농건설 주식회사 박후근 회장님께 진심으로 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 구민세, 신동기, 이재혁(1994), "2경간 연속 P.S. 합성보 구조물의 설계에 관한 연구." 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), pp.169~172.
- (2) 구민세, 신현섭(1995), "시공단계를 고려한 2경간 연속 프리플렉스 합성형교의 최적설계에 관한 연구." 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), pp.305~308.
- (3) 대한토목학회(1986), 프리플렉스 합성형 표준 시방서 및 동해설(안).
- (4) 대한토목학회(1986), 프리플렉스 합성형교의 설계제작 및 시공지도서.
- (5) 조효남 외 2인(1993), "프리플렉스교의 전산화 최적설계", 전산구조공학, 제6권, 제1집, pp.125~133.
- (6) Garret N. Vanderplaats(1984), Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications. McGraw-Hill Book Company.
- (7) Jasbir S. Arora(1989), Introduction to Optimum Design. McGraw-Hill Book Company.
- (8) S.S. RAO(1979), OPTIMIZATION : Theory and Applications, John Wiley & Sons.

(접수일자 : 1998. 1. 13)