

## LRFD에 의한 2경간 강박스형교 최적화 설계 Optimal Design of Two-Span Steel Box Girder Bridges by LRFD

국 중 식\*  
Gook, Joong-Sik

신 영 석\*\*  
Shin, Yung-Seok

---

### ABSTRACT

In this study, steel box girders used as main members of a two span continuous steel bridge, are optimally designed by a Load and Resistance Factor Design method(LRFD) using an numerical optimization method. The width, height, web thickness and flange thickness of the main girder are set as design variables, and light weight design is attempted by choosing the cross-sectional area as an object function. We studied the results of steel box girders and compared with those of I-type girders. The main program is coded with C++ and connected with optimization modul ADS, which is coded with FORTRAN.

---

### 1.서론

본 논문에서 사용된 설계식은 최근에 제안되고 있는 하중저항계수(LRFD) 설계법에 기본을 두고 있다. LRFD는 하중의 종류에 따라 하중계수를 달리할 뿐만 아니라, 부재의 중요도에 따라 저항계수를 변화시켜준다. 이 계수들은 하중과 구조적 성능에 관한 현 시점에서의 통계적 지식에 근거한 신뢰도 이론으로부터 개발된 것이다. 따라서 기존의 허용응력설계법보다 합리적이고 재료를 훨씬 더 효과적으로 사용할 수 있는 설계 개념으로 인식되고 있다. 최근들어 국내에서도 LRFD설계법에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. 이성철<sup>(1)</sup>, 안성욱<sup>(2)</sup> 등에 의해 I형 교에 대한 연구가 진행되었으며, 강박스형에 대한 연구는 조효남<sup>(3)</sup>, 박진석<sup>(4)</sup>, 이창환<sup>(5)</sup> 등 다수에 의해서 연구되어졌다. 이상과 같이 대부분 강박스형에 대한 해석이 연구 중이며, 최적 설계 분야에서도 활발한 연구가 진행되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 LRFD시방서<sup>(6),(7)</sup>의 내용을 기준으로 2경간인 강박스형교를 지간에 따른 주형의 형상과 활성화 제약 조건에 대하여 비교 분석하여 단면을 최소화할 시에 단면 설계에 영향을 주는 설계조건을 검토해 보았다. 또한 동일한 교량에 대하여 I형의 주형을 가지는 단면과 비교하여 단면에 영향을 주는 설계조건을 비교 검토해 보았다. 단면 설계에 있어서 최적화 기법을 도입하여 최적 설계되도록 했으며, 최적화 프로그램으로는 ADS<sup>(8)</sup>(a FORTRAN program for Automated Design Synthesis) 소프트웨어를 사용하였다.

---

\* 아주대학교 건설교통공학과 석사과정

\*\* 아주대학교 건설교통공학과 교수

## 2. 설계 교량

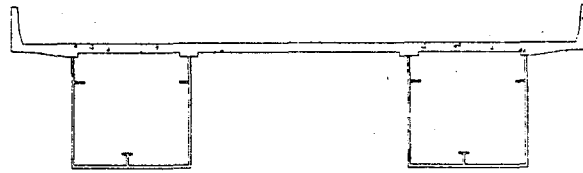


그림 1. 설계교량 종단면도

이번 연구에 사용된 교량은 2경간 연속보로써 2차선의 폭을 가지며 두 개의 박스형 주형을 가지는 교량이며, 지점부를 제외하고 5m 간격으로 가로보가 설치되어 있으며 수평보강재 및 브레이싱이 설치되도록 하였고, 1등급 교량으로 설계하였다.

## 3. 목적 함수

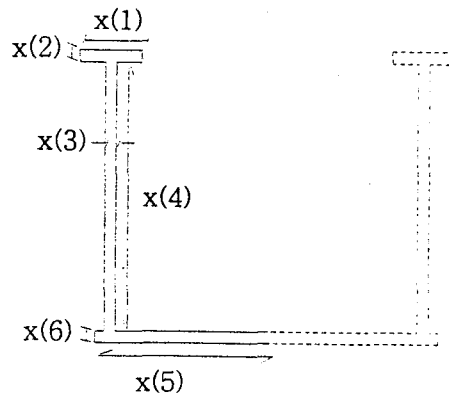


그림 2. 설계 변수

플랜지의 폭과 두께 및 복부의 폭과 높이를 설계변수로 선정하였으며, 대칭단면에 대하여 한쪽부분에 대하여만 변수로 설정하였다. 목적함수는 다음과 같이 전체 단면적으로 설정하였다.

$$F(X) : 2 \times [X(1) \times X(2) + X(3) \times X(4) + X(5) \times X(6)]$$

## 4. 설계 조건

다음은 시방서<sup>(6),(7)</sup>를 기준으로 하여 나타낸 강박스형에 대한 설계 조건을 나타낸 것이다. 정모멘트 부분과 부모멘트 부분으로 나누어 설계 조건을 검토하였으며, 아래의 표에 인용한 검토식은 시방서에 나와있는 설계식을 나타낸 것이다. 아래에서 보는 바와 같이 가로보에 대해 지점부 이외에서는 5m 간격으로 설치하여 배치하였기 때문에 따로이 검토를 하지 않았으며, 전단연결재와 브레이싱에 관한 설계 검토는 주형이 결정된 다음, 그 주형에 맞게 배치하여 결정되어지므로 이 또한 여기서 검토되어지지 않았다.

표 1. 정모멘트 부분의 설계 검토

설계 조건	검토식
소성모멘트 검토	$M_u \leq M_p \quad (M_n = 1.3 R_h M_p)$
복부의 세장비 검토	$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}}$
전단응력 검토	$V_u \leq V_n$
복부의 피로응력 검토	$\sigma_{cf} \leq \sigma_{yw}$
압축플랜지 피로응력 검토	$\sigma_{cf} \leq \sigma_{(LLIM)_{max}}$
인장플랜지 피로응력 검토	$\sigma_f \leq \Phi \sigma_{yt} \quad (\Phi = 0.95)$
복부의 세장비 검토	$\frac{2D_c}{t_w} \leq 6.77 \sqrt{\frac{E}{f_c}}$
압축플랜지의 세장비 검토	$\frac{b_f}{2t_w} \leq 1.38 \sqrt{\frac{E}{f_c} \frac{2D_c}{t_w}}$
지점 보강부이 전단응력 검토	$V_{u-dcl} \leq V_r$

표 2. 부모멘트 구간의 설계 검토

설계 조건	검토식
복부의 세장비 검토	$\frac{2D_{eff}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{\sigma_{yc}}}$
압축플랜지에 보강된 보강재에 의한 좌굴 저항 검토	$\left( \frac{8I_s}{wt^3} \right)^{\frac{1}{3}} \leq 4$
탄성휨좌굴응력에 대한 복부의 세장비 검토	$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq \lambda_b \sqrt{\frac{E}{f_c}}$
압축플랜지 응력 검토	$\sigma_{LLIM} \leq \sigma_{(LLIM)_{max}}$
인장플랜지 응력 검토	$\sigma_f \leq \sigma_{yt}$
전단응력 검토	$V_u \leq V_n$
연결부 피로응력 검토	$\sigma_r \leq \sigma_n$
복부의 피로응력 검토	$\sigma_{cf} \leq \sigma_{yw}$
지점 보강부의 전단응력 검토	$V_{cf} \leq V_r$

### 5. 제약 조건

다음은 본 논문에 사용된 제약조건을 나타낸 것이다.

표 3. 제약 조건

	정모멘트 부분	부모멘트 부분
G(0)	소성모멘트	소성중립축
G(1)	복부의 세장비	복부의 폭두께비 제약조건
G(2)	복부의 전단응력	압축플랜지 보강재 좌굴저항
G(3)	복부의 피로응력	탄성휨좌굴응력에 대한 복부의 세장비
G(4)	압축플랜지 피로응력	압축플랜지 응력
G(5)	인장플랜지 피로응력	인장플랜지 응력
G(6)	복부의 세장비	복부의 전단응력
G(7)	압축플랜지 세장비	연결부 피로응력
G(8)	지점 보강부 전단응력	복부의 피로응력
G(9)		지점 보강부 전단응력

위의 제약조건은 설계조건을 토대로 하여 선정하였으며, 정모멘트 부분과 부모멘트 부분으로 나누어 설정하였다.

## 6. 최적 설계 결과 및 분석

### 6-1 활성화 제약조건

다음은 이러한 제약조건들로 구성하여 최적화한 결과 중에서 시간에 따라 활성화 된 제약조건을 표로 나타낸 것이다.

표 4. 정모멘트 구간의 활성화 제약조건

	40m	50m	60m	70m	80m	90m
G(0) 소성모멘트	-0.7027	-0.0528	<b>0.0009</b>	<b>-0.000001</b>	<b>-0.000001</b>	<b>-0.00001</b>
G(1) 복부의 세장비	-0.9422	-0.0145	-0.1929	<b>0.000004</b>	<b>-0.00005</b>	<b>-0.00006</b>
G(2) 전단응력	-0.3606	-0.2988	-0.1843	-0.5615	-0.4952	-0.6021
G(3) 복부의 피로	-0.0209	<b>0.0024</b>	<b>0.0029</b>	<b>-0.00004</b>	-0.4758	-0.4753
G(4) 압축플랜지 피로	-0.9688	-0.9592	-0.9276	-0.9250	-0.8592	-0.8484
G(5) 인장플랜지 피로	-0.5558	-0.5791	-0.4390	-0.4755	-0.4642	-0.4600
G(6) 복부의 세장비	<b>0.0012</b>	-0.2697	-0.3703	-0.0589	-0.3809	-0.4448
G(7) 압축플랜지 세장비	-0.5450	-0.5553	-0.5537	-0.5235	-0.8896	-0.9163
G(8) 지점 보강부 전단	-0.2998	-0.3443	-0.3698	-0.1676	-0.7970	-0.8594

\* 굵게 표시된 수치는 활성화된 값을 나타냄.

표 4에서 보는 바와 같이 정모멘구간에서는 소성모멘트와 복부의 세장비 제약조건이 대부분에 시간에 대하여 활성화되었으며, 시간이 줄어들수록 복부의 피로와 비합성단면에 대한 세장비 조건들이 활성화 되었음을 알 수 있다.

다음의 표 5는 부모멘트 구간에서 활성화된 제약조건을 나타낸 표이다. 인장플랜지의 응력과 전단응력에 대한 제약조건들이 대부분의 시간에서 활성화되었으며, 압축플랜지 응력검토를 위한 보강재의 좌굴에 대한 제약조건과 탄성휨좌굴응력에 대한 복부의 세장비 조건 또한 대부분의 시간에서 활성화되었다. 그리고 시간이 짧아질수록 지점 보강부의 전단응력에 대한 제약조건이 활성화된 것을 볼 수 있다.

표 5. 부모멘트 구간의 활성화 제약조건

	40m	50m	60m	70m	80m	90m
G(0) 소성중립축	<b>0.00082</b>	-0.0082	-0.1984	-0.2268	-0.2279	-0.2233
G(1) 복부의 세장비	-0.8409	-0.8009	-0.3989	-0.2954	-0.2924	-0.2961
G(2) 보강재의 좌굴저항	<b>-0.00001</b>	<b>-0.00001</b>	<b>-0.00001</b>	-0.1024	-0.2625	-0.3761
G(3) 복부의 좌굴응력 세장비	-0.6844	-0.6806	-0.1523	<b>0.00001</b>	0.00314	<b>0.00003</b>
G(4) 압축플랜지 응력	-0.8438	-0.7302	-0.5914	-0.6171	-0.6351	-0.6529
G(5) 인장플랜지 응력	-0.3612	<b>0.00046</b>	<b>0.00195</b>	<b>-0.00001</b>	<b>0.00054</b>	<b>-0.00005</b>
G(6) 전단응력	<b>0.00008</b>	<b>0.00057</b>	<b>-0.00014</b>	<b>-0.00006</b>	<b>-0.00055</b>	<b>-0.00005</b>
G(7) 연결부 피로	-0.7423	-0.5212	-0.4502	-0.2510	-0.2214	-0.1687
G(8) 복부 피로	-0.7953	-0.6825	-0.5854	-0.4996	-0.4844	-0.4825
G(9) 지점 보강부 전단	-0.0826	-0.0874	<b>-0.00015</b>	-0.2795	-0.4031	-0.5028

\* 굵게 표시된 수치는 활성화된 값을 나타냄.

### 6-1 시간에 따른 단면 비교

다음 그림 3은 최적화된 단면의 결과를 시간에 따라 비교해 본 것이다.

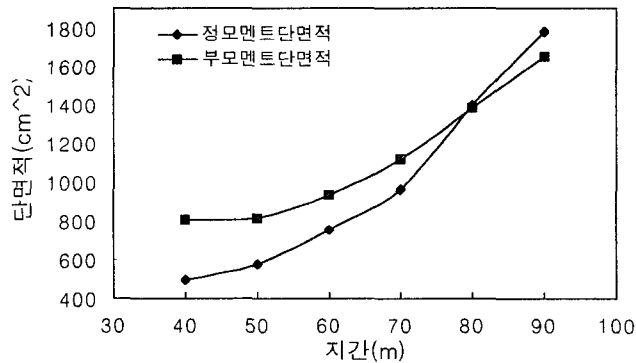


그림 3. 시간에 따른 단면적 비교

80m 구간까지는 부모멘트의 단면적이 크나 80m 이후에는 정모멘트 구간의 단면적이 큰 것으로 나타났다. 이러한 이유는 위 활성화 제약조건에서 본 바와 같이 부모멘트 구간에서는 복부의 좌굴 및 전단 그리고 인장플랜지의 응력 규정 때문에 단면적에 큰 비중이 있는 복부의 단면이 더 이상 커지지 못하는 반면, 정모멘트 부분에서는 소성모멘트를 저항하기 위하여 충분히 복부의 단면이 커지는 현상때문인 것으로 판단된다.

### 6.2 경간별 최적화 단면

다음은 활성화된 제약조건이 변하는 구간에 대한 단면을 비교하여 나타내었다. 아래의 그림 4는 먼저 30m 구간에 대하여 최적화된 단면을 나타낸 것이다.

정모멘트 구간에서는 비합성단면에 대한 복부의 폭두께비에 대한 제약 조건(G(7))이 활성

화되었으며, 부모멘트 구간에서는 소성중립축에 대한 제약조건(G(1))과 압축플랜지에 대한 좌굴계수 제약조건(G(3)), 그리고 전단응력에 대한 제약조건(G(7))이 활성화되었다.

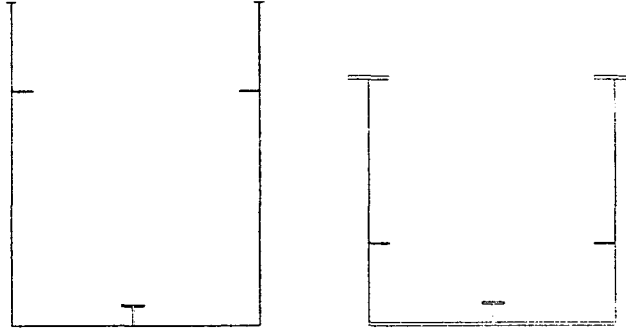


그림 4. 30m 구간의 최적화 단면

다음의 그림 5는 30m 구간으로부터 제약조건이 변하는 다음 단면인 50m 구간에 대하여 나타낸 것이다. 정모멘트 구간에서는 복부의 피로응력에 대한 제약조건(G(4))이 활성화되었으며, 부모멘트 구간에서는 압축플랜지 응력에 대한 좌굴계수 제약조건(G(3)), 인장플랜지 응력에 대한 제약조건(G(6)), 그리고 전단응력에 대한 제약조건(G(7))이 활성화되었다.

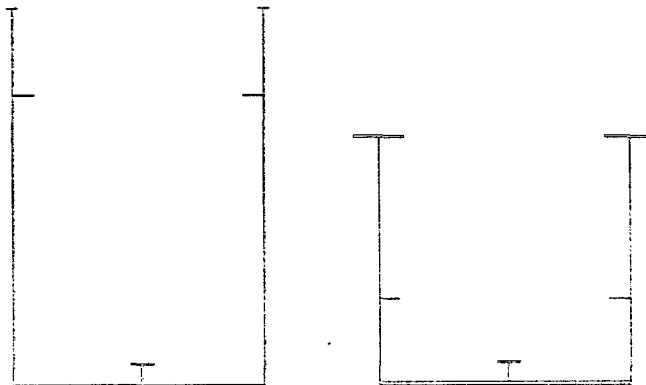


그림 5. 50m 구간의 최적화 단면

다음 그림은 50m 구간으로부터 제약조건이 변하는 다음 단면인 70m 단면에 대하여 나타낸 것이다.

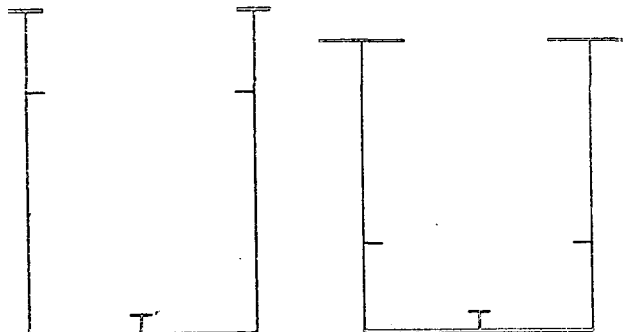


그림 6. 60m 구간의 최적화 단면

정모멘트 구간에서는 연성규정에 의한 모멘트 제약조건(G(1)), 복부의 폭두께비 제약조건(G(2)), 그리고 복부의 피로응력에 대한 제약조건(G(4))이 활성화되었으며, 부모메으 구간에서는 압축플랜지 응력에 대한 세장비 제약조건(G(4)), 인장플랜지 응력에 대한 제약조건(G(6)), 그리고 전단응력 제약조건이 활성화되었다.

최적화된 단면에서 볼 수 있는 것과 같이 정모멘트 구간에서는 복부 높이가 높아지는 방향으로 최적화되었음을 볼 수 있다. 이것은 모멘트에 대하여 보다 효율적인 단면이 되기 위한 최적화 방향이며 이로 인하여 위의 활성화된 제약조건 표에서 본 바와 같이 소성모멘트와 복부의 세장비 그리고 복부의 폭두께비에 대한 제약조건이 전 지간에 대하여 활성화되어 나타난 것이다. 그리고 부모멘트 구간에서는 상부플랜지의 폭이 커져있는 것이 특징이다. 이것은 콘크리트 슬래브가 인장을 충분히 받아주지 못하므로 상부플랜지가 나머지 부분의 인장력을 받아주어야 하기 때문에 이러한 인장응력을 받을 수 있도록 단면이 정해진 것이며, 단면이 소성에 저항하는 것 보다는 상하부 플랜지의 응력에 저항하도록 설계되어졌다. 이것은 정모멘트 구간에서와는 다른 방향으로 설계되어졌는데, 이는 소성에 저항할 때 정모멘트 구간의 단면은 상부 슬래브가 충분히 저항해 주어 그 단면의 안정성을 인정한 것이고, 부모멘트 구간에서는 하부의 주형이 소성에 저항하더라도 상부의 슬래브가 저항하지 못하여 단면이 불안정하기 때문에 단면이 안정할 수 있는 응력에 대하여 설계되어진 것으로 판단된다.

### 6.3 I형교와 박스형교의 비교

다음의 그림은 동일한 교량에 대하여 4개의 주형이 설치된 I형 교량과 박스형 교량의 결과를 비교한 것이다.

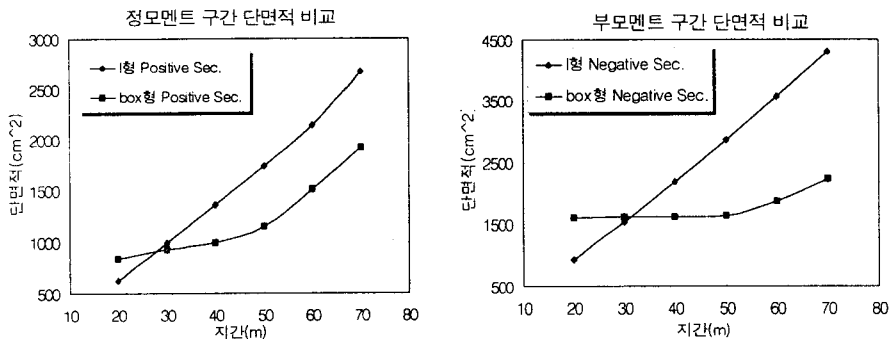


그림 7. I형 거더와 box형 거더의 단면적 비교

위 그림에서 비교되어진 I형교는 LRFD에 규정된 설계조건을 사용하였으며, 다른 조건은 박스형 교량과 동일하도록 설계하여 결과를 도출하였다. 위 그림은 정모멘트 구간과 부모멘트 구간으로 나누어 단면적을 비교하였는데, 30m를 전후하여 박스형 단면이 I형 단면보다 단면적이 크다가 점점 작아짐을 볼 수 있다. 따라서 본 교량에 대하여 I형 거더교의 적정 지간은 20m~30m인 것으로 판단되며, 박스형 거더교의 적정 지간은 이전의 그림에서 본 바와 같이 70m 이후는 너무 단면이 커지기 때문에 30m~70m로 판단된다.

정모멘트 부분에 대하여 활성화된 제약조건들을 비교해 볼 때, I형 거더는 주로 복부의 전단응력과 인장플랜지의 피로응력 그리고 비합성단면에 대한 압축플랜지 폭두께비와 브레이싱에 작용하는 모멘트 제약조건이 활성화 되었으며, 박스거더에서는 소성모멘트와 복부의

세장비 및 피로응력 그리고 비합성단면에 대한 복부의 세장비 조건이 활성화되었다. 그리고 부모멘트 부분의 I형 거더에서는 복부의 세장비 및 상하부 플랜지에 대한 피로응력이 활성화되었으며, 박스거더에서는 보강재의 좌굴저항과 탄성휨좌굴응력에 대한 복부의 세장비 조건 그리고 인장플랜지의 응력과 전단응력이 활성화되었다.

## 8. 결론

위에서 살펴 본 것과 같이 적정 지간 이상의 지간을 가지는 박스형 교량은 박스단면이 커져서 비효율적임을 알 수 있었으며, I형 거더와 비교 시 30m 이상의 지간일 경우에는 박스형 교량이 더 경제적임을 알 수 있었다.

정모멘트 구간에서는 지간이 길어질수록 소성모멘트와 복부의 좌굴이 중요한 설계검토 사항임을 알 수 있었으며, I형 단면은 전단응력, 인장플랜지의 응력, 비합성단면의 압축플랜지 세장비에 대한 제약조건이 활성화되는 것으로 보아 플랜지의 응력과 전단력에 취약한 것으로 나타났고, 박스형 단면은 극한모멘트와 복부의 세장비 및 피로응력에 대한 제약조건이 활성화되는 것으로 보아 모멘트와 복부의 좌굴 및 피로에 취약함을 알 수 있었다.

부모멘트 구간에서 I형 단면은 복부의 세장비 및 상하플랜지의 피로응력에 대한 제약조건이 활성화됨으로써 복부의 좌굴과 플랜지의 피로응력에 취약함을 알 수 있었으며, 박스형 단면은 복부의 좌굴과 압축 플랜지의 보강재 좌굴저항 그리고 전단응력에 대한 제약조건이 활성화됨으로써 단면이 전단과 좌굴에 취약함을 알 수 있었다.

## 6. 참고 문헌

1. 이성철, 최현, 윤동용 “하중-저항 설계방법에 의한 합성 I형 교량의 설계 자동화 프로그램 개발,” 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), 1998.
2. 안성욱, “하중-저항계수 설계법에 의한 강교량주부재의 최적설계 프로그램의 개발보고서,” 아주대 석사 논문 1998.
3. 조효남, 정지승, 민대홍, 김현우, “LRFD에 의한 강상판형교의 시스템 최적설계,” 한국전산구조공학회 봄학술발표회 논문집, 1998.
4. 박진석, “LRFD에 의한 강상자형교의 최적화 연구,” 경희대 석사논문 1995.
5. 이창환, “LRFD에 의한 강합성박스교의 최적화 자동설계프로그램에 관한 연구,” 동국대 석사논문 1997.
6. “AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS,” SI Units Second Edition, pp. 6-1 - B6-4 , 1998.
7. “도로교 표준시방서(부록) 하중-저항계수 설계편,” 건설교통부 pp. 1-1 - 4-172, 1996.
8. Vanderplaats, G. N. “ADS- a Fortran Program for Automated Design Synthesis Version 1.10,” NASA CR 172460, 1984
9. W.F. Chen, Seung-Eock Kim, “LRFD Steel Design using Advanced Analysis”, CRC, pp. 279-296.
10. 선용, 한봉구, 강영철, “Design of Structures,” 야정문화사 pp. 150-152.