

## 철골구조설계에서의 회전강성을 고려하는 방안



김요숙\*

### 1. 서론

현대 건축기술의 발달로 건물은 고층화, 경량화되면서 철골구조물이 많이 건설되고 있다. 철골 접합부를 시공하는 방법과 해석하는 방법은 각각 2가지가 있다. 시공방식으로는 크게 리벳·볼트·고력볼트와 같은 기계적인 접합방식과 용접접합방식이 있고, 구조해석 방법으로는 접합부를 핀(pin connection)과 강결(rigid connection)로 가정하는 방법과 접합부의 회전강성을 고려하는 방법이 있다.

설계 초기단계에 결정해야하는 요소들 중에서 "접합부의 가정"은 매우 중요한 요소들 중의 하나이다. 접합부를 강결로 시공하면 용접에 따른 전문인력의 수급과 인건비 등으로 당연히 공사비용이 올라간다. 하지만 횡하중 즉 풍하중이나 지진하중에 대한 건물의 횡저항력을 높일 수 있다는 일반적인 상식 때문에 강결의 사용은 별 논란 없이 많이 사용되었다. 하지만 최근 미국 Northridge 지진을 포함한 일련의 사건들로 인하여

전세계 학계에서는 강결로 설계하는 것만이 최선이 아니라는 결론에 도달하게 되었다.

접합부를 핀과 강결로 가정하여 해석하는 방법은 철골구조를 해석하는 가장 일반적인 방법이다. 이 방법은 설계하중(service load)에 대한 구조해석에는 실용적인 방법이지만 접합부의 회전강성을 무시함으로써 지진하중이나 충격하중에 의한 건물의 실제거동을 예측할 수는 없다.

접합부의 회전강성을 고려하는 설계법은 접합부의 종류만큼의 회전강성(rotational stiffness) 정보가 필요할 뿐만 아니라 설계 절차에 대한 구체적인 시방서가 제공되어 있지 못한 실정이다. 그러나 접합부의 회전강성에 관한 연구는 이미 반세기를 넘어서고 있으며, 모든 접합부는 회전강성을 가진다는 점을 고려한다면 체계적인 설계방법이 제시되어야 한다.

본 학술기사는 미국 AISC/LRFD 시방서를 기준으로 철골구조설계에서 회전강성을 고려하는 방법에 대해 기술하고자 한다.

\* 성희원·세종대학교 기술연구소, 연구원

## 2. AISC/LRFD의 해석/설계 방법

### 2.1 Design Format

AISC/LRFD의 설계방법은 일명 극한강도설계법이라 부르며, 식(1)과 같이 저항계수(resistant factors)를 곱한 저항강도(factored strength)가 하중계수(load factors)를 곱한 설계강도(factored load)보다 큰 조건을 만족하는 단면을 선정하는 것이다.

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad (1)$$

여기서  $\gamma_i$ =하중계수;  $Q_i$ =설계하중;  $\phi$ =저항계수;  $R_n$ =저항력이다.

### 2.2 Load Combinations

식(2)의 6가지 하중조합을 만족하는 단면을 선정한다.

$$\begin{aligned} &1.4D \\ &1.2D+1.6L+0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R) \\ &1.2D+1.6(L_r \text{ or } S \text{ or } R)+(0.5L \text{ or } 0.8W) \quad (2) \\ &1.2D+1.3W+0.5L+0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R) \\ &1.2D\pm 1.0E+0.5L+0.25 \\ &0.9D\pm(1.3W \text{ or } 1.0E) \end{aligned}$$

여기서 D=고정하중; L=적재하중;  $L_r$ =지붕 적재하중; W=풍하중; S=적설하중; E=지진하중; R=비나 얼음하중이다.

### 2.3 Beam-column Interaction Equations

축력과 모멘트를 동시에 받는 보-기둥의 축력의 크기에 따른 항복식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8M_u}{9\phi_b M_n} = 1.0, \quad \frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2 \\ &\frac{P_u}{2\phi P_n} + \frac{M_u}{\phi_b M_n} = 1.0, \quad \frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\phi_c=0.85$ ;  $\phi_b=0.9$ 이며  $P_n$ ,  $M_n$ ,  $M_u$ 는 AISC/LRFD Chapter D, Chapter F, Chapter C의 규준에 의해서 구한다.

### 2.4 Serviceability Limit

일반적으로 건물의 수평이동은 건물높이의 1/750에서 1/250까지, 층간 변위는 층고의 1/500에서 1/200까지 허용된다. Ad Hoc Committee (1986)와 Ellingwood (1989)가 제안한 처짐 한도를 정리하면 다음과 같다.

(1) 적재하중하에서 보의 처짐

$$\delta_{load} \leq \frac{L_{span}}{360} \quad (4a)$$

(2) 적재하중하에서 옥상층 보의 처짐

$$\delta_{roof} \leq \frac{L_{span}}{240} \quad (4b)$$

(3) 풍하중에 의한 건물의 수평이동

$$\Delta_{total} \leq \frac{H_{existing}}{400} \quad (4c)$$

(4) 풍하중에 의한 층간 변위

$$\Delta_{story} \leq \frac{h_{story}}{300} \quad (4d)$$

풍하중과 적재하중에 의한 층간 변위

$$\Delta_{story} \leq \frac{h_{story}}{250} \quad (4f)$$

단 설계하중(service load) 하에서는 구조물에 소성힌지(plastic hinge)가 발생하지 않도록 한다.

### 2.5 Ductility Requirement

구조물이 소성과피에 이르기 위해서는 부재의 국부좌굴이 방지되어야 한다. 따라서 LRFD 규준에 따른 플랜지와 웨브의 폭두께비를 적용하면 다음과 같다.

(1) 플랜지

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{65}{\sqrt{F_y}} \quad (5)$$

여기서  $b_f$ =플랜지 폭;  $t_f$ =플랜지 두께;  $F_y$ =항복강도(ksi)이다.

(2) 웨브

$$\frac{h}{t_w} \leq \frac{640}{\sqrt{F_y}} \left( 1 - \frac{2.75P}{\phi_b P_y} \right), \text{ for } \frac{P}{\phi_b P_y} \leq 0.125$$

$$\frac{h}{t_w} \leq \left\{ \frac{191}{\sqrt{F_y}} \left( 2.33 - \frac{P}{\phi_b P_y} \right) \geq \frac{253}{\sqrt{F_y}} \right\}, \quad (6)$$

for  $\frac{P}{\phi_b P_y} \leq 0.125$

여기서 h=웨브의 높이 ; t<sub>w</sub>=웨브의 두께이다.

(3) 브레이싱

$$\frac{L}{r_y} \leq \frac{17200}{F_y} \quad (7)$$

여기서 L=unbraced length ; r<sub>y</sub>=y축에 대한 단면 2차반경이다.

### 2.6 Analysis

본 학술기사의 설계/해석 방법을 이용하려면, 해석 프로그램에 스프링 요소가 있거나 접합부의 모멘트를 부분적으로 풀어줄 수 있는 프로그램이어야 한다. 단 선형 스프링 요소는 스프링 지지단 조건과 다르다는 것에 유의해야 한다. 즉 SAP2000, RAMSTEEL, ALGOR, SODA, STRAP, IES, StrucCAD\*3D는 스프링 요소나 부분 모멘트 해제 기능이 없어서 본 학술기사의 설계/해석 방법을 사용할 수 없다.

#### 2.6.1 First-order Analysis

회전강성을 고려하여 일반적인 탄성해석을 하는 순서는 다음과 같다(그림 1).

1. 6가지 하중조합에 따른 하중계산
2. 예비 설계
  - 2-1 부재 단면 산정
  - 2-2 접합부 선택-[설계도표 또는 프로그램 Table.cc]<sup>(1)</sup>
3. 수정 회전강성(R<sub>ko</sub> and R<sub>kb</sub>) 계산-수정최기강성과 beam-line을 이용하여 구한다(그림 2).
4. 구조해석-보-기둥 접합부에 수정회전강성을 가지는 스프링 요소를 삽입하여 해석한다.

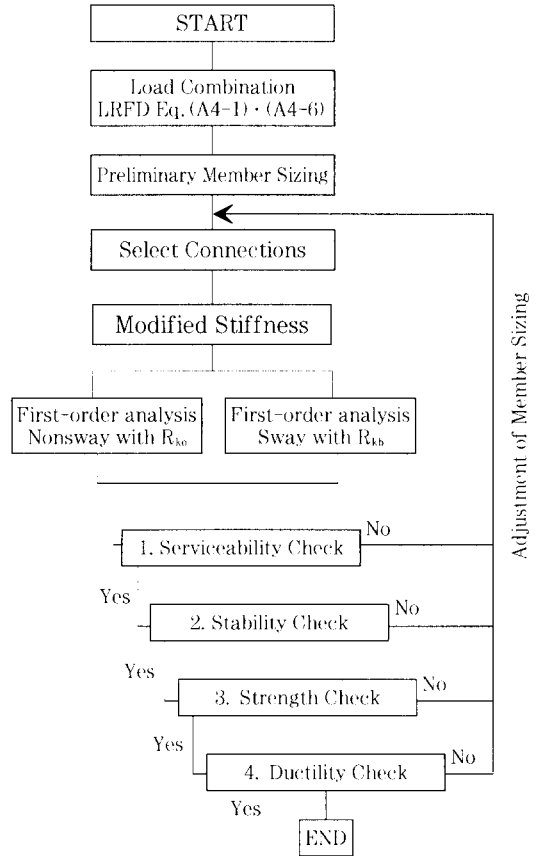


그림 1 Flowchart of first-order analysis

- 4-1 Nonsway Case-수정회전강성 R<sub>ko</sub>을 사용하여 M<sub>nt</sub>를 구한다.
- 4-2 Sway Case-수정회전강성 R<sub>kb</sub>을 사용하여 M<sub>nt</sub>를 구한다.
5. 시방서 기준 체크
  - 5-1 처짐 (serviceability check) -식 (4)
  - 5-2 구조안정 (stability check) 과 강도 (strength check) -식 (2)
  - 5-3 연성 (ductility check) -식 (5) ~ 식 (7), Bjorhovde et al(1990)
6. 식 (2)의 6가지 하중조합에 대해서 5번의 모든 조건이 만족할 때까지 2번부터 5번까지를 반복 수행한다.  
 식 (2)의 M<sub>nt</sub>는 4번 절차에 의한 모멘트 M<sub>nt</sub>과

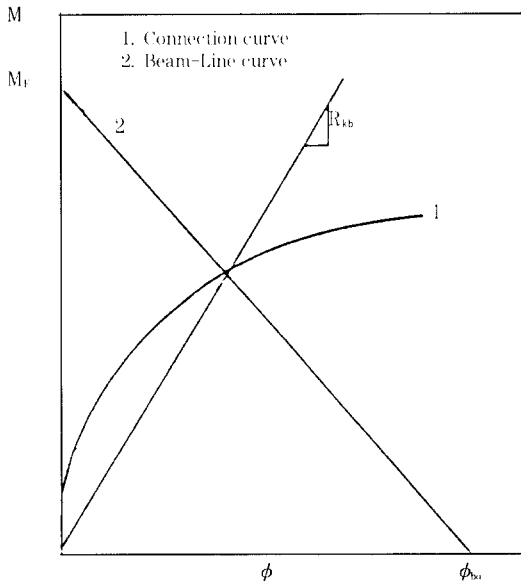
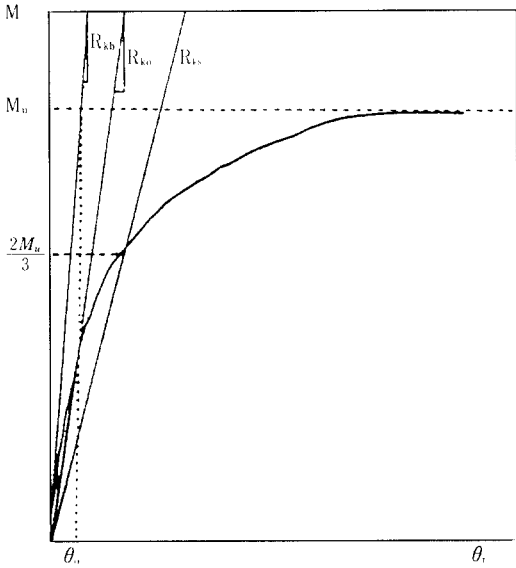


그림 2 수정 회전강성  $R_{ko}$ ,  $R_{ks}$ 와  $R_{kb}$

$M_u$ 에 확대계수 (amplification factor)를 곱해서 다음과 같이 구한다.

$$M_u = B_1 M_{nt} + B_2 M_{tt} \quad (8)$$

여기서  $B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{P_{c1}}} \geq 1$ ;  $B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{\sum P_{c2}}}$  ;

$P_c = \frac{AF_y}{\lambda^2}$ ;  $\lambda = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}}$ ; K= 유효길이이다. 회전강성이 고려되었을 때의 유효길이 K는 기둥과 보의 강성비인 G 값을 식 (9)와 같이 수정하여 Alignment charts (LRFD Figure C-C2.2.)에서 구한다. 단 실용설계를 위해서 횡보강이 되어 있는 구조물 (braced frames)은 유효길이 K를 0.5 ~ 1로, 보강이 되어 있지 않은 구조물 (unbraced frames)은 유효길이를 1 ~ 10으로 사용한다.

$$G = \frac{\sum(I_c/L_c)}{\sum(I_r/L_r)}, I_r \text{ 대신에 } I_{kr} \text{을 사용한다.}$$

$$I_{kr} = \frac{1}{1 + \frac{2EI}{R_{ko}L}}, \text{ for Braced Frames} \quad (9)$$

$$I_{kr} = \frac{1}{1 + \frac{6EI}{R_{ko}L}}, \text{ for Unbraced Frames}$$

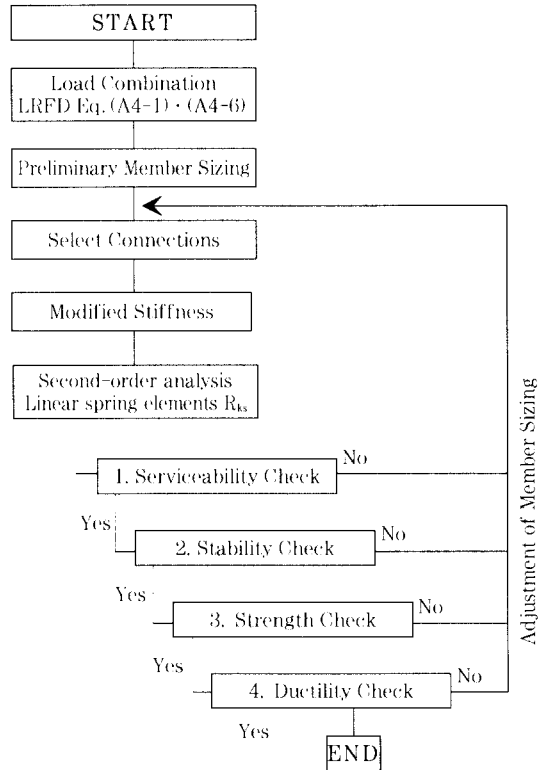


그림 3 Flowchart of second-order analysis

여기서  $I$ =단면 2차 모멘트;  $L$ =부재 길이;  $R_{ks}$ 와  $R_{kb}$ =그림 2의 집합부 수정회전강성이다.

2. 6. 2 Second-order Analysis

$P-\delta$ 와  $P-\Delta$ 의 second 효과를 고려한 second-order 해석 순서는 다음과 같다(그림 3). 만약 second-order 해석 프로그램이 회전강성을 비선형으로 처리할 수 있다면 아래의 순서에서 3의 절차를 생략할 수 있다.

1&2. first-order Analysis와 동일

3. 수정 회전강성 ( $R_{ks}$ ) 계산- $2M_w/3$ 의 교점으로 구한다(그림 2).

4. 구조해석- $R_{ks}$

5&6. first-order analysis와 동일

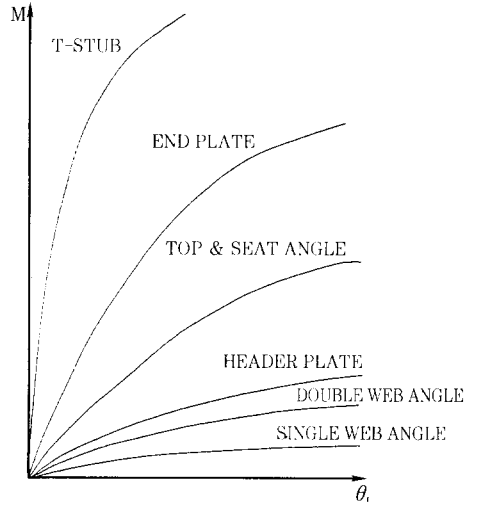


그림 4 다양한 집합부의 회전강성

3. 집합부 설계

집합부 형상에 따른 종류로는 강접합과 거의 비슷한 거동을 가지는 extended-end plate 집합과 다양한 회전강성을 가지는 상하부 앵글과 웨브에 복앵글(top-and seat-angle with double web-angle) 집합 및 회전강성이 미약하여 핀으로 설계되는 하부앵글(seat-angle)이나 웨브앵글(web-angle) 집합이 있다. 집합부의 종류와 그 회전강성을 그림 4에 나타내었다.

같은 집합부 형상을 가지고 있다라도 회전강성에 따라 강절(rigid), 핀(pin), 반강절(semi-rigid)으로 분류된다. AISC/LRFD는 회전이 구속되어 있는 FR(Fully Restraint), 회전강성을 고려하는 PR(Partially Restraint), 회전강성을 무시되는 핀으로 분류(Classification)하고 있다(그림 5). 실제 설계에 적용할 때에는 유럽기준인 EC3(1992)가 LRFD보다 명확한 기준을 제공하고 있기 때문에 EC3를 적용하는 것이 바람직하며, 회

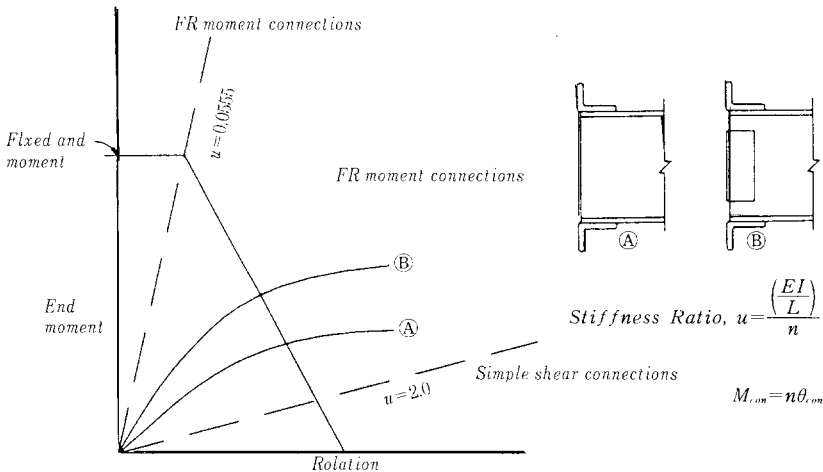


그림 5 집합부 분류 기준(AISC/LRFD)

전 연성 (required rotational ductility)에 대해서는 Bjorhovde et al(1990)의 분류법을 이용할 수 있다.

본 학술기사에서서는 대표적인 PR 접합부인 그림 6의 상하부 앵글과 복웹 앵글접합 (top-and seat-angle with double web-angle connecs)을 사용하여 회전강성을 구하는 방법을 보여 주고자 한다.

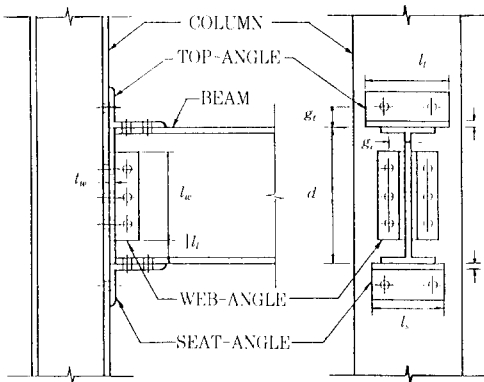


그림 6 상하부 앵글과 복웹 앵글 접합

### 3.1 Initial Stiffness

접합부의 초기강성 (initial stiffness)은 식 (10)과 같이 상부앵글, 하부앵글과 웹앵글의 초기강성을 더해서 구할 수 있다.

$$R_{bi} = K_t + K_s + K_w$$

$$K_t = \frac{3EI_t(d_1)^2}{g_t(g_t^2 + 0.78l_t^2)}, \quad \text{상부앵글 } I_t = \frac{l_t(t_t)^3}{12}$$

$$K_s = \frac{4EI_s}{l_s}, \quad \text{하부앵글 } I_s = \frac{l_s(t_s)^3}{12}$$

$$K_w = \frac{6EI_w(d_3)^2}{g_s(g_s^2 + 0.78l_w^2)}, \quad \text{웹앵글 } I_w = \frac{l_w(t_w)^3}{12} \quad (10)$$

여기서 E=탄성계수;  $l_t, l_s, l_w$  = 앵글 길이;  $t_t, t_s, t_w$  = 앵글 두께;  $d_1 \sim d_4, g_1 \sim g_3, l_{s0}$  = 그림 7~그림 10으로 설명하였다.

### 3.2 Ultimate Moment

접합부의 극한모멘트는 식 (11)과 같이 상부앵글, 하부앵글과 웹앵글의 극한모멘트를 더해서

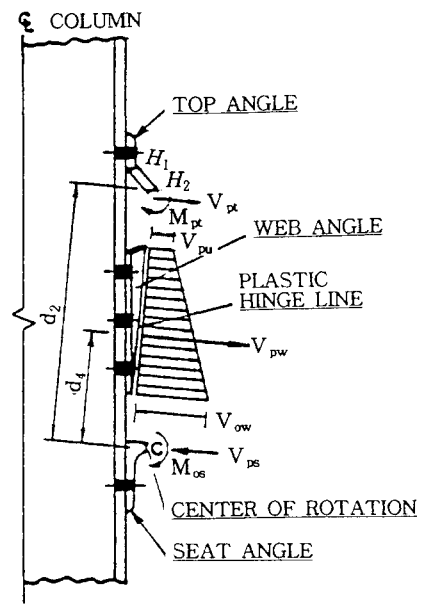
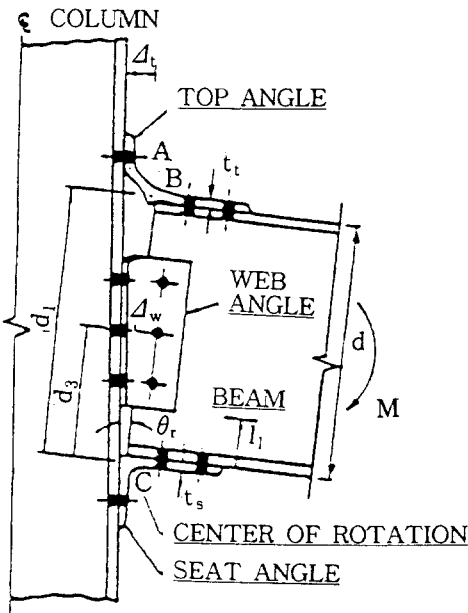


그림 7 Top-and seat-angle with web-angle connection(Kishi et al. 1993)

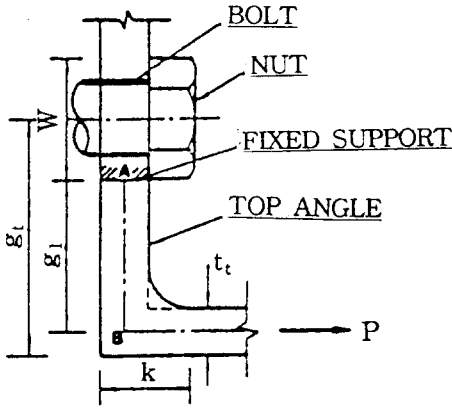


그림 8 Top-angle Sonnection(Kishi et al. 1993)

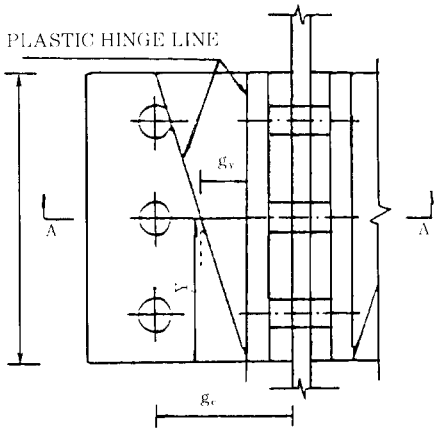
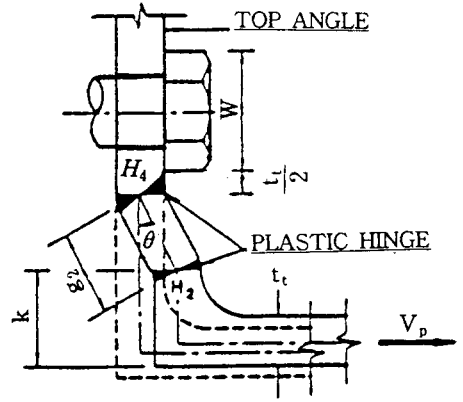


그림 9 Mechanism of web-angle connection of ultimate condition(Kishi et al. 1993)

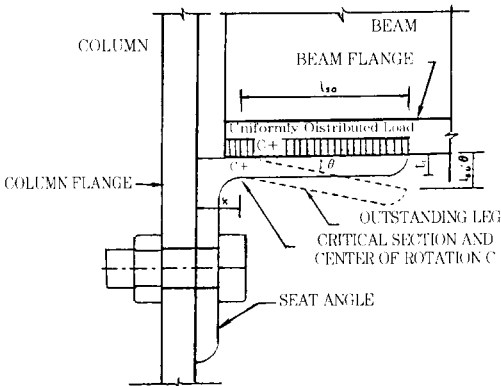
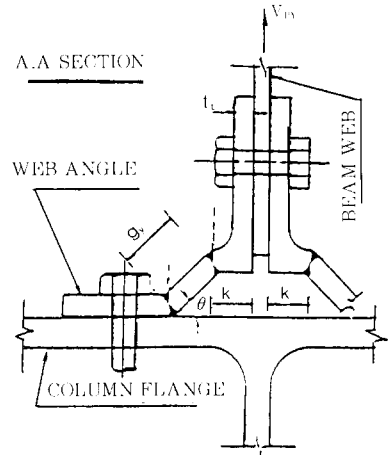


그림 10 Seat-angle connection(Kishi et al. 1993)

구할 수 있다.

$$M_u = M_s + M_t + V_{pu} d_2 + 2V_{pu} d_1 \quad (11)$$

식 (11)에서 상부와 하부앵글의 극한모멘트는 식 (12)로, 상부와 웨브의 소성전단력은 식 (13)으로 구할 수 있다.

$$M_t = \frac{V_{pu} g_2}{2}, \quad \text{상부앵글}$$

$$M_s = \frac{F_v l_s (t_s)^2}{4}, \quad \text{하부앵글} \quad (12)$$

$$\left(\frac{V_{pu}}{F_y l_t}\right)^4 + \frac{g_v}{l_t} \left(\frac{V_{pu}}{F_y l_t}\right) - 1 = 0,$$

상부앵글  $d_2 = d + \frac{l_t}{2} + K_t$

$$V_{pu} = \frac{\left(V_{pu} + \frac{F_y l_{tw}}{2}\right) l_w}{2},$$

$$\text{웹앵글 } d_1 = \frac{2V_{pu} + \frac{F_y l_{tw}}{2}}{3\left(V_{pu} + \frac{F_y l_{tw}}{2}\right)} l_w + l_t + \frac{l_s}{2} \quad (13)$$

식 (13)에서 웹앵글의 소성전단력  $V_{pu}$ 를 구하기 위해서는 식 (14)으로  $V_{pu}$ 를 계산한다.

$$\left(\frac{V_{pu}}{F_y l_w}\right)^4 + \frac{g_v}{l_w} \left(\frac{V_{pu}}{F_y l_w}\right) - 1 = 0 \quad (14)$$

### 3.3 Shape Parameter

Kishi et al(1994)이 제안한 상용로그를 사용한 형상계수  $n$ 의 값은 다음과 같다.

$$n = 1.398 \log_{10} \theta_0 + 4.631, \quad \log_{10} \theta_0 > -2.721$$

$$n = 0.827, \quad \log_{10} \theta_0 \leq -2.721 \quad (15)$$

여기서  $\theta_0 = M_u/R_k$ 이다.

### 3.4 모멘트-회전각 곡선

Richard and Abbott(1975)의 3개의 변수 ( $R_k$ ,  $M_u$ ,  $n$ )로 접합부의 모멘트-회전각을 나타내는 일명 Three-Parameter Power Model은 그림 11과 같다.

### 3.5 설계도표 이용법

접합부의 종류마다 3개의 파라미터 즉 초기강성, 극한모멘트, 형상계수를 구하려고 반복작업을 하는 것은 번거로울 뿐만 아니라 계산 도중 실수가 발생되기 때문에 회전강성을 도표에서 찾아 한번에 고려하는 방법이 Kim and Chen

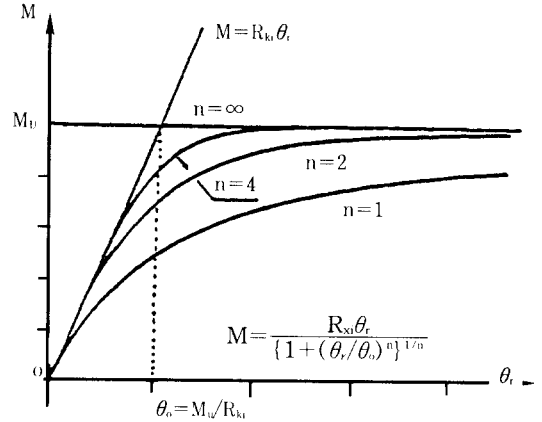


그림 11 Richard and Abbott model

(1998)에 의해서 개발되었다. 접합부 설계도표는 그림 12와 같고, 도표의 열을 설명하면 다음과 같다.

- 1열 : 6가지 두께에 따른 상하부 앵글 (L6×4)
- 2열 : 4가지 두께에 따른 복웨브 앵글 (2L4×3.5)
- 3열 (1행) : 강재의 종류 (36 ksi, 50 ksi 또는  $F_w$ )와 고력볼트 직경 (3/4D 또는 7/8D)
- (나머지) : 극한모멘트 (Kip-in), 초기회전강성 ( $10^3$  Kip-in/radian), 형상계수

단  $F_w$ 는 재료의 최소값인 항복강도 보다 실제적인 재료의 특성을 고려하고자 만들어진 유효항복강도로서 36 ksi 대신에 1.5가 곱해진 54 ksi를, 50 ksi 대신에 1.1이 곱해진 55 ksi를 사용한다.

- 4열 ~ W형강의 높이에 따른 웨브앵글의 시공 가능한 고력볼트 열 (Row)

설계도표를 사용하는 방법은 다음과 같다.

1. 강재의 종류와 고력볼트 직경이 맞는지 3열 1행을 체크한다.
2. 보 단면 (section)의 열로 이동한다.
3. 보 단면의 소성모멘트 ( $M_p = Z \times F_y$ )를 계산하여  $0.5M_p$ 보다 큰 극한모멘트를 가지는 접합부를 선택한다. 3개의 파라미터 ( $M_u$ ,  $R_k$ ,  $n$ )가 결정된다.
4. 선택한 접합부의 1열을 읽어 상하부앵글이, 2열을 읽어 웨브앵글이 결정된다.
5. 선택한 접합부의 1행을 읽어 웨브앵글에 박히는 고력볼트 열을 결정한다. 단 볼트간 간격 (pitch)는 3 inch이다.



Top-and Seat angle  
Length of angle is 6 inch  
Use L6×4 angle

Double Web-angle  
Use L4×3 1/2 angle

I & S I/A <sup>2</sup> L/Ax4x4	Web 2L4x3.5 ta	A36 J/4D	BEAM												
			W8		W10		W12		W14		W16		W18		
			2 row	3 row	3 row	3 row	3 row	3 row	3 row	4 row	3 row	3 row	3 row	5 row	
7/4	1/2	Mu	1042	1258	1418	1594	1671	1924	2177	2431	2430	2721	2996		
		Rki	421	632	687	887	964	1288	1659	1792	2078	2244	2411		
		n	0.99	0.86	0.88	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	
	3/8	Mu	953	1147	1249	1342	1470	1690	1910	2074	2130	2320	2494		
		Rki	380	570	592	800	830	1109	1428	1479	1788	1852	1917		
		n	1	0.87	0.9	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	
	5/16	Mu	921	1108	1191	1294	1399	1607	1814	1949	2022	2177	2320		
		Rki	379	568	589	797	826	1103	1421	1470	1779	1840	1902		
		n	0.98	0.85	0.87	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	
	1/4	Mu	884	1061	1122	1239	1315	1309	1702	1801	1896	2010	2113		
		Rki	366	549	559	770	784	1048	1349	1373	1689	1719	1749		
		n	0.98	0.84	0.87	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	
5/8	1/2	Mu	824	1001	1139	1179	1374	1388	1803	2053	2017	2306	2378		
		Rki	252	381	434	536	612	820	1059	1190	1228	1492	1637		
		n	1.16	1.03	1.04	0.92	0.93	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	
	3/8	Mu	756	892	993	1048	1174	1169	1538	1700	1719	1907	2080		
		Rki	313	371	341	451	481	644	831	882	1042	1106	1169		
		n	1.2	1.06	1.09	0.95	0.98	0.89	0.83	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	
	5/16	Mu	705	853	935	1001	1104	1273	1443	1576	1612	1766	1907		
		Rki	211	319	339	449	477	638	824	872	1033	1094	1154		
		n	1.17	1.04	1.06	0.91	0.95	0.86	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	
	1/4	Mu	668	807	867	946	1022	1177	1332	1429	1487	1640	1702		
		Rki	199	300	310	423	436	584	754	777	945	974	1007		
		n	1.18	1.04	1.07	0.93	0.96	0.87	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	
9/16	1/2	Mu	790	963	1120	1137	1330	1540	1751	2002	1960	2249	2320		
		Rki	272	413	466	583	658	883	1141	1271	1433	1596	1759		
		n	1.09	0.96	0.98	0.85	0.87	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	
	3/8	Mu	702	854	954	1006	1132	1309	1487	1648	1663	1851	2023		
		Rki	233	353	374	499	528	708	915	965	1149	1212	1273		
		n	1.11	0.98	1.01	0.87	0.91	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	
	5/16	Mu	571	815	897	959	1062	1227	1392	1523	1537	1711	1852		
		Rki	232	351	371	496	524	703	908	956	1140	1200	1260		
		n	1.09	0.94	0.98	0.84	0.87	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	
	1/4	Mu	535	770	829	905	980	1131	1282	1378	1433	1545	1647		
		Rki	220	333	342	470	483	649	838	861	1052	1081	1110		
		n	1.09	0.94	0.98	0.84	0.87	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	
7/16	1/2	Mu	584	719	873	853	1044	1216	1388	1630	1559	1845	2113		
		Rki	150	229	280	324	398	535	693	821	872	1033	1194		
		n	1.27	1.14	1.13	1.03	1.03	0.94	0.86	0.86	0.86	0.83	0.83	0.83	
	3/8	Mu	498	611	709	724	848	987	1126	1285	1263	1450	1620		
		Rki	112	171	191	242	270	364	471	520	592	654	717		
		n	1.25	1.22	1.23	1.11	1.14	1.05	0.97	0.99	0.9	0.91	0.94		
	5/16	Mu	467	573	653	678	779	906	1032	1163	1158	1310	1450		
		Rki	111	169	188	239	266	358	464	511	583	643	702		
		n	1.32	1.18	1.3	1.07	1.09	0.91	0.93	0.94	0.86	0.86	0.87	0.88	
	1/4	Mu	432	528	586	624	698	810	922	1018	1034	1140	1247		
		Rki	99	151	160	214	227	305	395	418	497	526	554		
		n	1.34	1.2	1.23	1.09	1.13	1.04	0.96	0.98	0.89	0.92	0.93		
3/8	Mu	556	686	839	817	1007	1174	1342	1539	1510	1794	2061			
	Rki	151	231	282	329	401	541	702	829	884	1044	1204			
	n	1.23	1.1	1.1	0.99	1	0.91	0.84	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83		
5/16	Mu	470	579	677	689	811	946	1081	1240	1216	1400	1570			
	Rki	114	174	194	247	275	371	481	530	606	668	729			
	n	1.3	1.17	1.2	1.06	1.1	1.01	0.93	0.96	0.87	0.89	0.91			
1/4	Mu	440	541	621	642	743	865	988	1118	1110	1251	1400			
	Rki	113	172	191	245	271	366	474	521	597	656	715			
	n	1.27	1.14	1.16	1.03	1.05	0.97	0.89	0.91	0.83	0.84	0.84			

1.6×4×3/8×6  
L-2L4×3.5×1/4×5.5

Ultimate Moment Capacity (Kip-in)  
Initial Connection Stiffness (10<sup>6</sup>Kip-in/radian)  
Shape Parameter

그림 12 설계도표(상하부 앵글과 복웹 앵글 접합부)

4. 설계예제  
-One-Bay Two-Story PR Frame

그림 13의 2차원 단순 반강절 골조에 대해서 본 학술기사의 방법을 적용하면 다음과 같다. 우선 (2)식의 6가지 하중조합들 중에서 식(16)의

두가지 하중조합만 고려한다. 본 예제에 적용된 하중은 표 1에 나타내었고, 식(16)에 의하여 계산된 설계하중은 표 2에 나타내었다. 항복강도 250MPa (36 ksi)과 탄성계수 200,000 MPa (29,000 ksi)를 사용하였다.

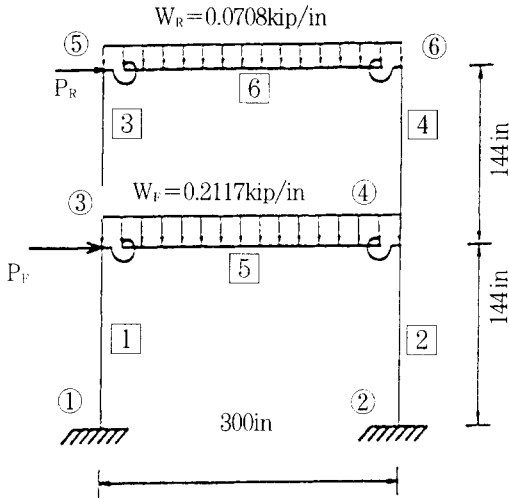


그림 13 One-bay two-story PR frame

표 1 Applied load Intensities

	고정하중 (D)	적재하중 (L)	풍하중 (W)
지붕	988 N/m <sup>2</sup> (20 psf)	988 N/m <sup>2</sup> (20 psf)	988 N/m <sup>2</sup> (20 psf)
1층	3.36 kN/m <sup>2</sup> (68 psf)	1.98 kN/m <sup>2</sup> (40 psf)	

표 2 Applied load

	Load Case I : 1.2D+1.6L	Load Case II : 1.2D+0.5L+1.3W
W <sub>R</sub>	21.19 kN/m(0.1167 kip/in)	12.85 kN/m(0.0708 kip/in)
W <sub>F</sub>	55.01 kN/m(0.303 kip/in)	38.43 kN/m(0.2117 kip/in)
P <sub>R</sub>	0	17.35 kN(3.9 kips)
P <sub>F</sub>	0	34.69 kN(7.8 kips)

Load Case I : 1.2D+1.6L

Load Case II : 1.2D+0.5L+1.3W (16)

#### 4. 1 Preliminary Member Sizing

기둥은 W8에서 보는 W16과 W12 중에서 선택하도록 한다.

##### 4. 1. 1 Column

AISC/LRFD Table 3-2 "Preliminary Beam-

Column Design"를 사용하여 기둥 단면을 결정한 다.

$$P_{u,max} = (W_F + W_R)L/2$$

$$= (38.43 \text{ kN/m} + 12.85 \text{ kN/m})$$

$$\times 7.6 \text{ m}/2 = 194.86 \text{ kN} (42.38 \text{ kips})$$

- 유효길이 K를 1로 가정한다.  $K_x = K_y = 1.0 (KL)_x = (KL)_y = 1.0 \times 3.7 \text{ m} = 3.7 \text{ m} (12 \text{ ft})$
- $M_u = (P_F/2) L_{in-floor} + (P_R/2) L_{in-roof}$   
 $= 34.69 \text{ kN}/2 \times 3.7 \text{ m} + 17.35 \text{ kN}/2 \times 7.4 \text{ m}$   
 $= 128.37 \text{ kN-m} (93.6 \text{ k-ft})$
- $P_{u,col} = P_u + M_u \times m$   
 $= 42.38 + 1.9 \times 93.6 \text{ k-ft} = 220.22 \text{ kips} \Rightarrow W8 \times 35 (\phi P_n = 242 \text{ kips})$

##### 4. 1. 2 Roof Beam

- $M_u = W_R L^2/8$   
 $= 12.85 \text{ kN/m} \times (7.6 \text{ m})^2/8 = 92.78 \text{ kN-m} (796.5 \text{ kip-in})$
- $Z_x = M_u/F_y$   
 $= 92.78 \text{ kN-m}/250 \text{ MPa} = 371 \text{ cm}^3 (22.13 \text{ in}^3)$   
 $\Rightarrow W12 \times 19 (Z_x = 24.7 \text{ in}^3)$

##### 4. 1. 3 Roof Connection

- 최대전단력  $V_u = W_R L/2$   
 $= 12.85 \text{ kN/m} \times 7.6 \text{ m}/2 = 48.8 \text{ kN} (10.62 \text{ kips})$   
 AISC/LRFD Table 9-2 (p. 9-42)에서 웨브앵글 두께가 1/4-in. 일 때 최대전단력 10.62 kips를 만족하는 3/4D 볼트 2열의 전단력 48.9 kips를 선택한다.

$$M_{u,connection} = M_u/2 = (Z_x \times F_y)/2$$

$$= 24.7 \text{ in}^3 \times 36 \text{ ksi} / 2 = 444.6 \text{ kip-in.}$$

LRFD가 접합부 설계도표를 제공하고 있지 않기 때문에 Kim and Chen(1998)의 설계도표(그림 12)를 이용하여 극한모멘트 444.6 kip-in을 만족하는 A36 3/4D 상하부앵글 L6×4×3/8×6과 웨브앵글 2L4×3.5×1/4×5.5의 극한모멘트 588 kip-in을 선택한다. 그림 14에는 접합부의 형상을 그림 15에는 접합부의 모멘트-회전각 관계를 EC3 분류와 중첩하여 나타내었다.

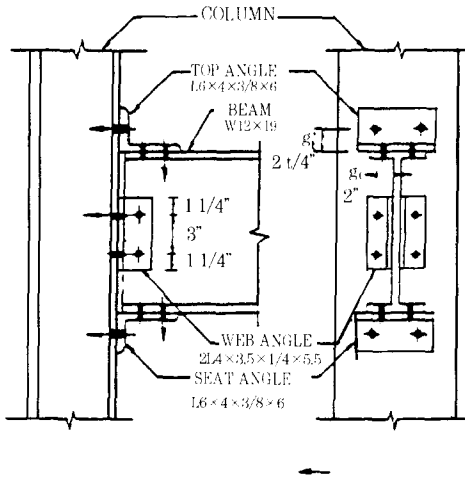


그림 14 Configuration of roof connections

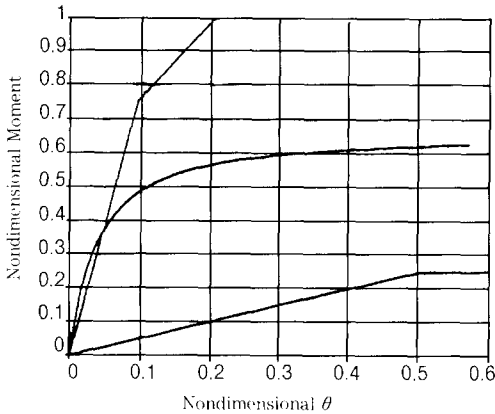


그림 15 Superposition of  $m-\theta$  curve of roof connection on EC3 diagram

4. 1. 4 Floor Beam

- $M_u = W_R L^2 / 8$   
 $= 38.43 \text{ kN/m} \times (7.6 \text{ m})^2 / 8$   
 $= 277.46 \text{ kN-m} (2,381.63 \text{ kip-in})$
- $Z_x = M_u / F_y$   
 $= 277.46 \text{ kN-m} / 250 \text{ MPa}$   
 $= 1,109.8 \text{ cm}^3 (66.16 \text{ in}^3)$   
 $\Rightarrow W16 \times 40 (Z_x = 72.9 \text{ in}^3)$

4. 1. 5 Floor Connection

- 최대전단력  $V_u = W_R L / 2$   
 $= 38.43 \text{ kN/m} \times 7.6 \text{ m} / 2 = 146.03 \text{ kN} (31.76 \text{ kips})$

AISC/LRFD Table 9-2 (p. 9-40) 에서 웨브앵글 두께가 1/4-in. 일 때 최대전단력 31.76 kips를 만족하는 3/4D 볼트 3열의 전단력 76.7 kips를 선택한다.

- $M_u$  에비맞이  $= M_u / 2 = (Z_x \times F_y) / 2$   
 $= 72.9 \text{ in}^3 \times 36 \text{ ksi} / 2 = 1,312.2 \text{ kip-in.}$

그림 8에서 극한모멘트 1,312.2 kip-in를 만족하는 A36 3/4D 상하부앵글 L6x4x5/8x6과 웨브앵글 2L4x3.5x1/4x8.5의 극한모멘트 1,332 kip-in를 선택한다. 그림 16에는 접합부의 형상을 그림 17에는 접합부의 모멘트-회전각 관계를 EC3 분류와 중첩하여 나타내었다.

4. 1. 6 Moment-Rotation Information

first-order 해석을 위해서 하중조합에 따른 수정회전강성  $R_{ko}$ 과  $R_{ks}$ 를 계산하여 표 3에 나타내었다.

second-order 해석을 위해서는 수정회전강성  $R_{ks}$ 를 계산한다. 만약 접합부의 비선형성이 고려되는 프로그램이라면 수정회전강성  $R_{ks}$ 를 계산할 필요 없이 3개의 파라미터를 이용한다.

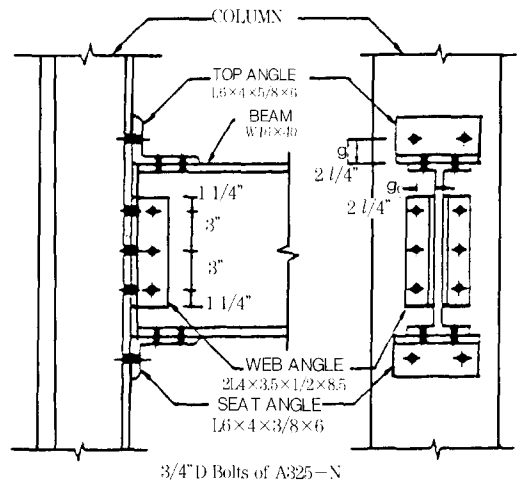


그림 16 Configuration of floor connections

표 3 접합부 회전강성

m- $\theta$ 관계		지붕			1층		
		초기강성	극한모멘트	형상계수	초기강성	극한모멘트	형상계수
		219,000	588	1.04	754,000	1,332	0.83
수정 회전 강성	Rkb	75,876.9			126,912		
	Rkb	Load Case II	설계 풍하중		Load Case II	설계 풍하중	
		75,876.9	126,912		144,152	377,036	

4. 1. 7 Serviceability Check

회전강성이 고려된 구조물 즉 반강접 구조물은 횡변위에 의해 단면이 결정되는 수가 많기 때문에 먼저 이 조건을 만족하는 단면과 접합부를 설계하는 것이 바람직하다. 설계 적재하중에 의한 처짐  $\delta_{roof}$ 이 0.5 in.로서  $L/240(=1.25)$ 를,  $\delta_{floor}$ 이 0.31 in.로서  $L/360(=0.83)$ 를 만족한다. 그러나 설계 풍하중에 의한 수평이동  $\Delta_{total}$ 이 0.9 in.로서  $H/400(=0.72)$ 를 초과함으로써 주어진 단면을 수정하여야 한다.

4. 1. 8 Member Size Adjustments

건물의 수평이동을 줄이기 위하여 기둥을 한 치수 큰 단면 W8×40을 사용하여 다시 체크한다. 반복계산 하는 과정에서 W8을 계속 사용하고 있으므로 접합부의 회전강성은 그대로 사용할 수 있다. 해석결과 수평이동  $\Delta_{total}$ 이 0.84 in.로써

$H/400(=0.72)$ 를 또 초과하였다. 따라서  $\Delta_{total}$ 이  $H/400(=0.72)$ 의 조건을 만족할 때까지 기둥 단면을 키우면서 반복 해석한 결과, W8×58일 때  $\Delta_{total}$ 이 0.68 in.로써  $H/400(=0.72)$ 를 만족하였다.

4. 1. 9 Check Strength and Stability

기둥 W8×58, 보 W12×19와 W16×40을 이용하여 주어진 하중으로 해석한 결과와 식 (2)을 unit value를 표 4에 나타내었다.

4. 1. 10 Ductility Check

second-order 해석 결과 접합부 최대 회전이 Load case I에 대해서는 0.003 radian, Load case II에 대해서는 0.0061 radian으로 Bjorhovde et al (1990)의 조건을 만족하였다.

5. 결 론

접합부의 회전강성을 고려하여 AISC/LRFD 시방서를 기준으로 설계/해석하는 방법을 소개하

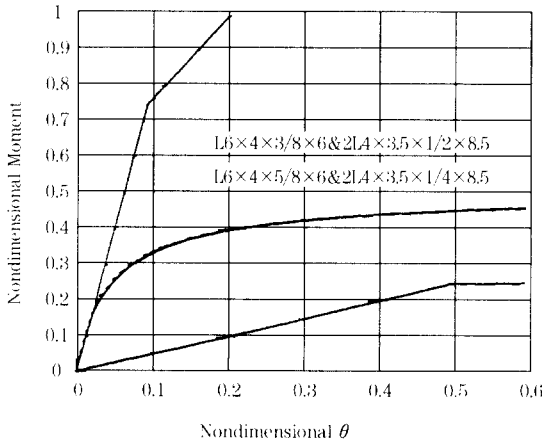


그림 17 Superposition of m- $\theta$  curve of floor connection on EC3 diagram

표 4 Stability check

Load Case	Element	축력 (kips)	모멘트 (kip-in)	Unit Value
I	Col. 1&2	63	613	0.39
	Col. 3&4	17.5	764	0.42
	Roof Beam		681	0.85
	Floor Beam		2,030	0.86
II	Col. 1	37.5	561	0.33
	Col. 2	46.7	998	0.57
	Col. 3	9.2	267	0.15
	Col. 4	12.1	795	0.43
	Roof Beam		604	0.76
	Floor Beam		1,490	0.63

였다. first-order analysis와 second-order analysis 프로그램을 이용할 각각의 경우에 대해서 해석 절차를 기술하였다. 상하부앵글과 복웨브앵글 접합부 (top-and seat-angle with double web-angle connection)를 사용하였을 때의 접합부의 모멘트-회전각 관계를 구하는 방법과 해석에 사용하기 위해서 초기회전강성을 수정하는 방법을 소개하였다. 본 학술기사에서 소개된 방법을 간단한 반강접 골조 설계 예제를 통하여 구체적인 적용 방법을 제시하였다.

### 참 고 문 헌

1. AISC, Load and resistance factor design, manual of steel construction, Vol. 1 and 2, 2nd ed., Chicago, Illinois. 1994
2. An Hoc Committee on Serviceability, "Structural serviceability: a critical appraisal and research structures, ASCE, New York. 1986
3. Ellingwood, B., "Serviceability Guidelines for Steel Structures," *Engineering Journal*, AISC, 4th quarter, pp. 1-8. 1989
4. Eurocode 3, 1992. "Design of Steel Structures, Part 1: General Rules and Rules for Buildings," ENV 1993-1-1:1992, Comite Europeen de Normalisation (CEN), Brussels
5. Kim, Y., 1998. "Practical Analysis for PR Frame Design," Ph.D. Dissertation, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN
6. Kim, Y. And Chen, W. F., 1998. "Design Tables for Top- and Seat-Angle with Double Web-Angle Connections," AISC, *Engineering Journal*, Vol. 35, No. 2, 2nd Quarter
7. Kim, Y. And Chen, W. F., 1998. "Practical Analysis for Partially Restrained Frame Design with LRFD," ASCE, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 7 Jul
8. Richard, R. M. and Abbott, B. J., 1975. "VERSATILE ELASTIC-PLASTIC STRESS-STRAIN FORMULA," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE 