

전단력을 받는 더블 앵글 접합부의 비선형 거동에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on the Nonlinear Behavior of Double Angle Connections Subjected to Shear

이 수 권¹⁾ · 홍 갑 표²⁾

Lee, Soo-Kueon · Hong, Kap-Pyo

요 약 : 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(ver5.8)를 이용하여 전단력을 받는 더블앵글 접합부의 3D 해석을 수행하여 접합부의 모멘트-회전 관계곡선을 구하고 앵글과 볼트의 응력분포를 관찰한다. 해석시 주요 매개변수로는 볼트수, 게이지거리, 앵글의 두께로 하였으며 유한요소해석 결과로 구한 모멘트-회전곡선을 Richard가 제시한 예측식에 적용한 후 회귀분석을 통하여 접합부 거동을 예측하는 데 필요한 매개변수인 초기강성, 소성강성, 참조모멘트, 곡선형태변수를 구한다. 또한 매개변수들이 게이지거리, 앵글의 두께 및 볼트 수 변화에 따른 그래프를 작성하고 또한 이 그래프를 이용하여 접합부의 모멘트 및 LRFD의 접합부 분류에 따른 소성모멘트에 대한 접합부 모멘트의 비를 계산한다.

ABSTRACT : The behavior of double angle connections is analyzed by 3D finite element method using ABAQUS(ver 5.8). Moment-rotation curves for the connections are generated, as well as stress distribution for angle and bolt. Double angle connections have various angle thickness, gage distance and number of bolt. Parameters, such as initial stiffness, plastic tiffness, reference load and curve shape parameter, were obtained by regression method using Richard's formula. These parameter lead to predict nonlinear behavior of double angle connection. Design curves giving the parameters of the moment-rotation curves are generated. These parameters are primarily a function of the angle thickness, gage distance and the number of bolts in the connection. Using these parameters, connection moment and its ratio to the full plastic moment capacity M_p of the beam are calculated.

핵심용어 : 더블앵글 접합부, 3차원 유한요소해석, 모멘트-회전관계 곡선

KEYWORDS : Double angle connection, 3D FEM analysis, Moment-rotation curve

1) 정회원, 동양공업전문대학 건축과 조교수, 박사수료
2) 정회원, 연세대 사회환경건축공학부 부교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2000년 8월 31일까지 학회로 보내
주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

철골 구조물에서 보-기둥 접합부는 전체 구조물의 거동에 영향을 주기 때문에 접합부의 거동을 파악하는 것은 중요하다. 그러나 일반적으로 철골 구조물의 해석 및 설계시 접합부는 편의상 회전단 아니면 고정단으로 단순화시켜 설계되고 있다. 그러나 실제 접합부의 거동은 회전단과 고정단 사이의 반강접 거동을 하고 있기 때문에 최근에는 보다 정확한 접합부 모델링을 위한 다양한 이론적, 실험적인 연구가 많이 이루어지고 있다. 또한 최근에 컴퓨터 및 구조해석용 프로그램의 급속한 발전으로 반강접 접합부에 대한 거동해석이 가능하게 되어 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구 결과로부터 반강접 접합부에 대한 다양한 해석모델과 설계식들이 제안되었으나 아직 실용적으로 사용하기 위한 구체적인 방법은 제안되지 않고 있다.

AISC의 LRFD 규준에서도 반강접 접합부를 사용하는 경우에 이론적인 근거나 실험적인 데이터를 요구하고 있을 뿐 실제적으로 적용이 가능하도록 자세한 설계과정은 제시하고 있지 않다.

더블 앵글 접합부에 대한 연구자료는 아직 많지 않으므로 본 연구의 목적은 기둥 플랜지에 볼트로 연결되고 보의 웨브에는 용접된 더블앵글 접합부가 전단력을 받는 경우에 접합부의 기하학적 형상을 고려한 비선형 거동을 분석하여 더블 앵글 접합부의 설계 기초자료를 제시하는 것이다.

1.2 연구 방법 및 범위

더블앵글 접합부의 거동은 지레작용(prying action), 긴결재와 앵글 접촉면의 감소, 긴결재의 슬립(slip), 고력볼트의 프리스트레싱, 그리고 재료적인 비탄성 등의 상호관계로 복잡한 양상을 나타낸다. 이러한 접합부의 거동을 분석하기 위하여

유한요소 해석프로그램인 ABAQUS(ver.5.8)를 사용하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

본 연구에서의 설계변수로는 앵글의 두께, 게이지거리 및 볼트 수로 하였으며, 앵글의 두께는 7 mm, 10 mm, 13 mm의 세 가지, 게이지거리는 40 mm, 65 mm, 90 mm의 세 가지, 볼트 수는 3개, 4개, 5개, 6개의 네 가지인 경우로 총 경우의 수는 36가지이다. 더블앵글 접합부를 구성하고 있는 앵글은 L-125×75×7, L-125×75×10, L-125×75×13의 3가지 종류를 사용하였고, 기둥은 H-350×350×12×19, 긴결재는 F10T M20을 사용하였다. 시험체의 기하학적 형상과 종류 및 치수는 그림 1 및 표 1에 정리되어 있고, 하중은 그림 1에서와 같이 전단력이 보의 상부 플랜지에 수직방향으로 등분포 하중을 작용시킨다.

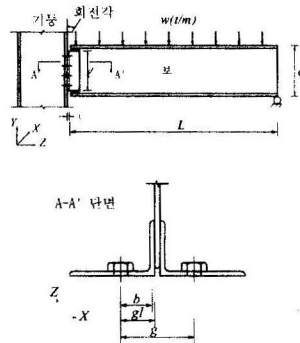


그림1. 더블 앵글 접합부 형상 및 하중가력

접합부의 거동을 평가하기 위하여 하중 증가에 따라 앵글 모서리 부분의 변위를 구하여 접합부의 회전각을 구하였으며, 힘의 평형조건을 사용하면 접합부의 모멘트-회전각 관계로 나타낼 수 있다. 해석결과로 구한 더블 앵글 접합부의 모멘트-회전각 곡선을 Richard가 제시한 모멘트-회전각 예측식에 적용하여 회귀분석을 수행한 후, 접합부의 모멘트-회전각 관계를 예측하는데 필요한 매개변수인 초기강성, 소성강성, 참조모멘트, 곡선형태 변수를 구한다. 이 매개변수들은 앵글의 두께, 게

표 1. 시험체의 종류 및 치수 단위 :mm

볼트 개수	앵글의 종류	<i>l</i>	<i>d</i>	<i>L</i>	<i>g</i>	<i>g</i> 1 ¹⁾	<i>b</i> ²⁾
3	L-125x75x7	210	400	6.000	120	40	36.5
					170	65	61.5
					220	90	86.5
	L-125x75x10				120	40	35
					170	65	60
					220	90	85
	L-125x75x13				120	40	26.5
					170	65	58.25
					220	90	83.5
4	L-125x75x7	280	400	6.000	120	40	36.5
					170	65	61.5
					220	90	86.5
	L-125x75x10				120	40	35
					170	65	60
					220	90	85
	L-125x75x13				120	40	26.5
					170	65	58.25
					220	90	83.5
5	L-125x75x7	350	400	6.000	120	40	36.5
					170	65	61.5
					220	90	86.5
	L-125x75x10				120	40	35
					170	65	60
					220	90	85
	L-125x75x13				120	40	26.5
					170	65	58.25
					220	90	83.5
6	L-125x75x7	420	400	6.000	120	40	36.5
					170	65	61.5
					220	90	86.5
	L-125x75x10				120	40	35
					170	65	60
					220	90	85
	L-125x75x13				120	40	26.5
					170	65	58.25
					220	90	83.5

1) $g_1 = (g - \text{보 웨브두께}) / 2$, 2) $b = g_1 - t / 2$

이지 거리 및 접합부의 볼트 수의 함수이며, 이러한 매개변수를 사용하면 복잡한 3차원 유한요소 해석을 하지 않고도 주어진 하중범위 내에서 더블 앵글 접합부의 거동을 정확히 예측할 수 있다.

따라서 볼트 수, 앵글의 두께 및 게이지 거리에 따라 Richard 매개변수를 구할 수 있는 그래프를 구하고, 이 그래프를 이용하여 구한 매개변수를 사용하여 기둥에 접합되는 보와 주어진 하중 크기에 따라 접합부의 모멘트-회전 곡선, 접합부에 연결된 보의 소성모멘트에 대한 접합부의 고정도 및 접합부 춤에 대한 편심거리비를 조사한다.

2. 3D 유한요소해석

2.1 유한요소 모델링과 해석방법

전단력을 받는 더블앵글 접합부의 비선형 거동을 조사하기 위하여 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(ver5.8)을 이용하여 접합부의 볼트수, 게이지거리, 앵글의 두께를 설계변수로 하여 접합부 거동을 조사하였다. 해석시 접합부의 대칭성을 고려하여 한 개의 앵글 만을 모델링하였으며, 앵글과 볼트는 C3D20요소를 사용하였다. 또한, 볼트의 육각형 헤드는 해석을 단순화하기 위하여 4각형으로 이상화하였으며, 워셔는 모델링에서 제외하였다.

보는 C3D8요소를 사용하였으며, 해석의 편의상 H형강으로 모델링하지 않고, 등가의 단면2차 모멘트를 가지는 직사각형 단면으로 단순화하였다. 보의 웨브 부분과 앵글의 용접부분은 C3D6의 요소를 사용하였다. 또한 해석시간의 단축을 위하여 앵글이 볼트로 연결되는 기둥의 플랜지 부분은 SPRING2 요소를 사용하여 압축에 대해서는 무한강성을 가지고 인장에 대해서는 무시할 수 있을 정도의 작은 강성을 가지도록 모델링하였다.

볼트 헤드와 앵글과의 접촉 부분은 ABAQUS의 "FINITE SLIDING CONTACT" 옵션을 사용하였고 마찰계수 $\mu = 0.6$ 으로 하였다. 볼트 부분과 볼트 구멍 사이의 지압은 무시하였고 보의 웨브 부분과 앵글을 연결시키는 용접은 "MPC" 옵션을 사용하였다. 볼트에 작용하는 인장력을 모델링하기 위하여 초기응력으로서 각 볼트에 6.27 t의 프리스트레스(Prestressing)를 가하였다. 이를 위해 "BOUNDARY, OP=NEW, FIXED"와 "CLOAD, OP=NEW"조건이 사용되었다. 따라서 유한요소 모델은 앵글과 볼트, 스프링, 등가의 보로 구성되어 있으며, 볼트 수가 5개인 볼트와 앵글의 모델링은 그림 3, 4와 같다.

사용된 앵글의 재질은 SS400으로 그림 2와 같은 재료적 특징을 소성계수식 (1)을 적용하여 해

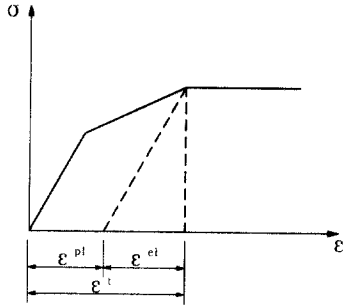


그림 2. 앵글의 응력-변형도 곡선

$$\epsilon^{pl} = \epsilon^t - \epsilon^{el} = \epsilon^t - \sigma/E$$

그림 3. 볼트 모델링

그림 4. 볼트수가 5개인 경우 앵글 모델링

석 방법에 이용하였다. 항복강도 $\sigma_y = 2.4 \text{ t/cm}^2$, 인장강도 $\sigma_u = 3.6 \text{ t/cm}^2$, 영계수 $E = 2,100 \text{ t/cm}^2$, 프와송비는 0.3으로 하였다. 또한 von Mises의 항복기준을 사용하였으며, 하중 증가에 따른 변위와 응력 계산에는 수정된 Riks-Wempner 방법을 사용하였다. 이 모델링 기법은 축방향 인장력을 받는 실험을 통하여 타당성이 검증되었다.³⁾

2.2 유한요소 해석결과

보의 플랜지 상단에 작용하는 하중을 점진적으로 증가시키면서 앵글 모서리 상단의 변위를 측정 한 후, 힘의 평형조건을 이용하여 모멘트-회전각 관계를 구할 수 있다. 이 모멘트-회전각 관계로부터 접합부의 거동을 예측하는데 중요한 초기강성을 구할 수 있다. 그림 5, 6, 7은 각각 볼트수가 5개이고, 앵글의 두께가 10 mm이고, 게이지거리가 40 mm, 65 mm, 90 mm인 경우의 모멘트-회전각 곡선을 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 초기 가력 단계에서는 모든 시험체가 선형거동을 하다가 하중이 증가하면서 강성이 감소하고 있음을 알 수 있다. 앵글이 두께가 얇고 게이지 거리가 비교적 긴 앵글두께 7 mm, 게이지 거리 90 mm인 경우는 회전각이 0.005 rad에 이를 때까지 선형에 가까운 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 게이지 거리가 40 mm이고 앵글의 두께가 10 mm, 13 mm인 경우는 회전각이 0.0015정도까지 선형거동을 하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 볼트 수가 5개이고, 앵글의 두께가 10 mm, 게이지거리가 65 mm인 경우의 최종가력 상태에서의 변형양상이다. 앵글의 윗부분의 모서리는 축방향으로 이동하고 있으며, 아래 부분의 모서리는 기둥을 모델링한 스프링에 의해 지지되고 있어 가력이전의 위치를 유지하고 있다.

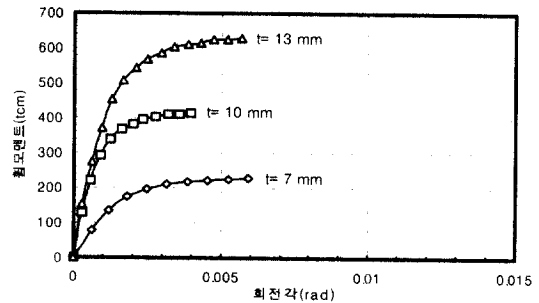


그림 5. 모멘트-회전각 곡선
(볼트수 5개, $t = 10 \text{ mm}$, $g_1 = 40 \text{ mm}$)

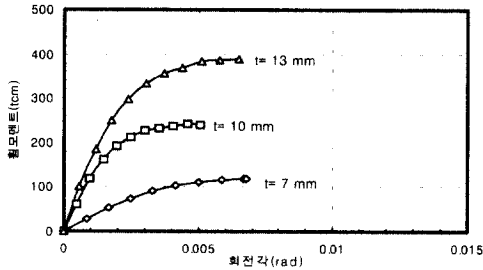


그림 6 모멘트-회전각 곡선
(볼트수 5개, $t=10$ mm, $g_1=65$ mm)

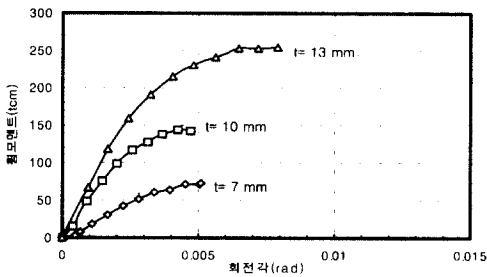


그림 7 모멘트-회전각 곡선
(볼트수 5개, $t=10$ mm, $g_1=90$ mm)

그림 8 앵글의 변형된 형상

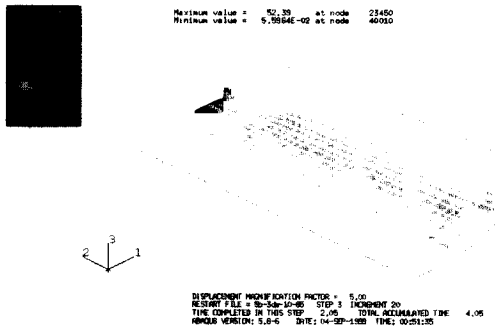


그림 9 앵글의 von Mises 응력도

그림 10 볼트의 von Mises 응력도

그림 9와 10은 각각 최종 가력단계에서 시험체의 앵글과 볼트의 von Mises 응력도이다. 그림에 나타난 바와 같이 앵글의 윗 부분은 인장력을 받고 아래 부분은 압축력을 받고 있으며, 각 볼트의 위치마다 응력의 분포가 다르게 나타나고 있다. 또한 볼트의 응력분포와 마찬가지로 앵글의 응력분포도 앵글의 오른쪽 하단에서 왼쪽 대각선 방향으로 응력이 집중되어 있음을 알수 있으며, 다른 시험체들도 같은 양상의 응력분포를 보이고 있다.

3. R.M. Richard 공식의 매개변수

R.M. Richard(1988)는 그림 11에 표시된 바와 같이 4개의 매개변수를 이용하여 하중-변위 곡선을 구하는 식 (2)를 제안하였다. 식 (2)에서 초기강성, 소성강성, 참조하중, 곡선형태변수를 적용하면 하중-변위 관계식을 얻을 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 3차원 유한요소 해석 결과를 이용하여 모멘트-회전각 관계곡선을 구한 후, R.M. Richard식에 적용하여 회귀분석을 수행하면 모멘트-회전각 관계곡선을 예측하기 위한 4개의 매개변수를 구할 수 있다.

$$M(\theta) = \frac{(K - K_p)\theta}{\left(1 + \left|\frac{(K - K_p)\theta}{M_0}\right|^n\right)^{1/n}} + K_p\theta \quad (2)$$

여기에서 K 는 초기회전강성, K_p 는 소성회전강

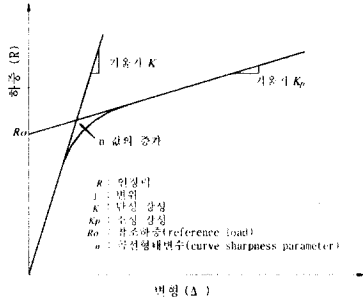


그림 11. Richard 공식

성, M_0 는 참조모멘트, n 은 곡선형태변수, θ 는 회전각이다.

4. 모멘트-회전곡선 매개변수

그림 12~23은 기둥에 연결되는 앵글 장변의 볼트수, 게이지 거리 및 앵글의 두께에 따른 Richard 식의 매개변수를 나타내고 있는 그래프이다. 예를 들면, 볼트 수가 6개, 앵글의 두께 10 mm, 게이지거리 65 mm인 더블앵글 접합부가 H-400×200×8×13의 보를 지지하고, 11.06 t/m의 등분포 하중을 받는 경우, 접합부의 모멘트-회전각 관계를 나타내는 매개변수는 그림 13에서 $K=135,000 \text{ t}\cdot\text{cm}/\text{rad}$, 그림 16에서 $K_p=850 \text{ t}\cdot\text{cm}/\text{rad}$, 그림 19에서 $M_0=259.1 \text{ t}\cdot\text{cm}$, 그림 22에서 $n=2.1$ 이다.

주어진 보와 하중조건에서 단순보의 회전각은 0.02 rad이므로, 앞에서 구한 매개변수를 사용하면 주어진 보의 스패 및 하중에 대한 단부모멘트는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{(135,000 - 850) \times 0.02}{\left(1 + \left| \frac{(135,000 - 850) \times 0.02}{259.1} \right|^{2.1} \right)^{1/2.1}} \\
 &+ 850 \times 0.02 \\
 &= 258.2 + 17.0 = 275.2 \text{ t}\cdot\text{cm}
 \end{aligned}$$

이 보에 대한 소성모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 M_p &= \{20 \times 1.3 \times (40 - 1.3) + (20 - 1.3)^2 \times 0.8\} \\
 &\times 2.4 = 1,286 \times 2.4 = 3,086.3 \text{ t}\cdot\text{cm}
 \end{aligned}$$

따라서, 접합부 모멘트가 접합부에 연결된 보의 소성모멘트에 대한 백분율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{M}{M_p} = \frac{275.2}{3,086.3} \times 100 = 8.92 \%$$

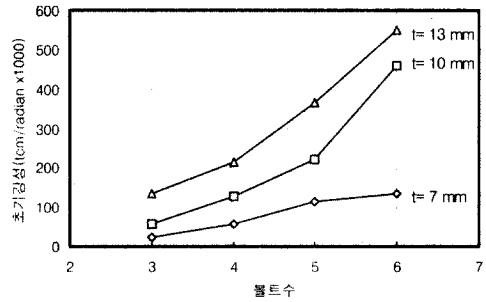


그림 13. $g_1 = 40 \text{ mm}$ 인 경우의 초기강성

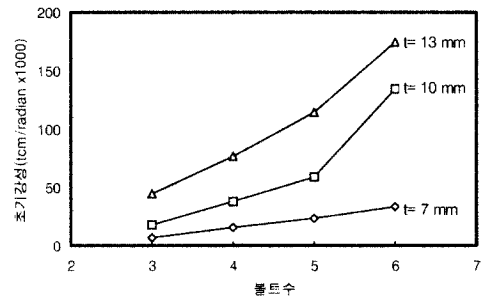


그림 13. $g_1 = 65 \text{ mm}$ 인 경우의 초기강성

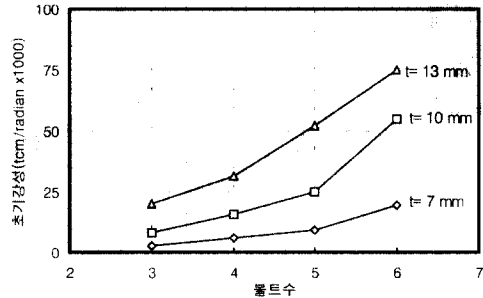


그림 14. $g_1 = 90 \text{ mm}$ 인 경우의 초기강성

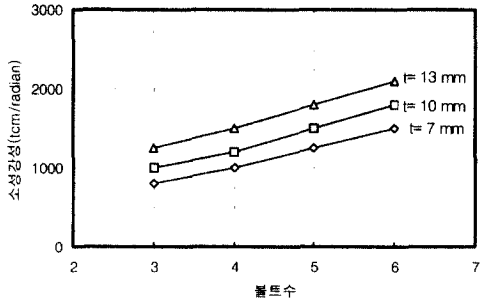


그림 15. $g_1 = 40$ mm인 경우의 소성강성

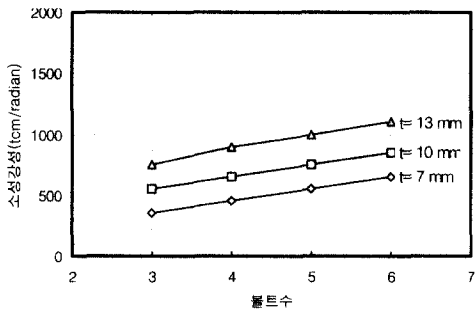


그림 16. $g_1 = 65$ mm인 경우의 소성강성

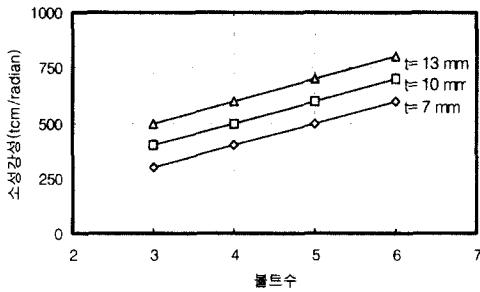


그림 17. $g_1 = 90$ mm인 경우의 소성강성

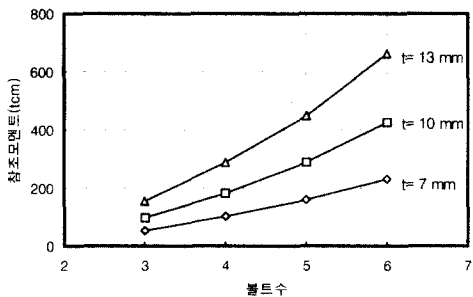


그림 18. $g_1 = 40$ mm인 경우의 참조모멘트

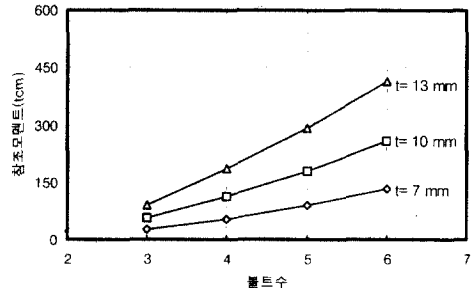


그림 19. $g_1 = 65$ mm인 경우의 참조모멘트

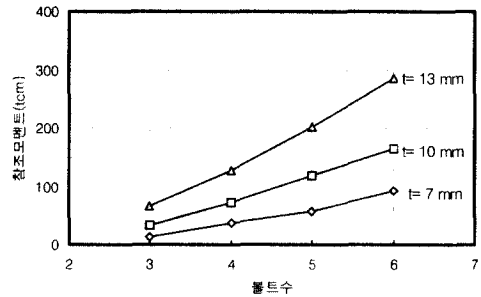


그림 20. $g_1 = 90$ mm인 경우의 참조모멘트

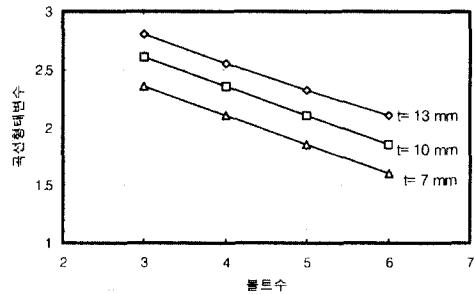


그림 21. $g_1 = 40$ mm인 경우의 곡선형태변수

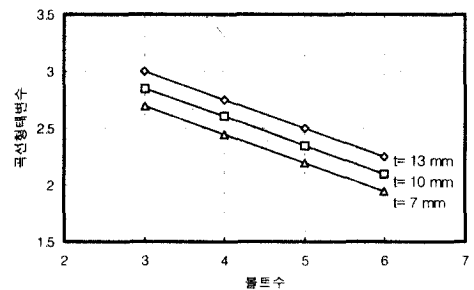


그림 22. $g_1 = 65$ mm인 경우의
곡선형태변수

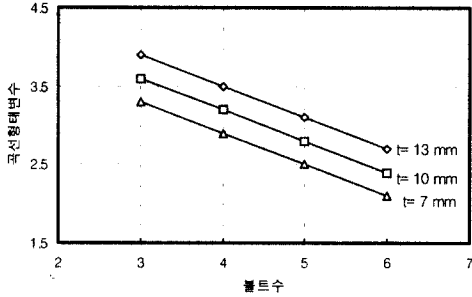


그림 23. g1=90 mm인 경우의 곡선형태변수

LRFD(1997) 규준에 따르면 회전각이 0.02 rad에서 접합부에 연결된 보의 소성모멘트에 대한 접합부 모멘트가 20% 미만일 때, 접합부는 회전강성이 없는 회전단으로 가정하고 있다. 본 연구범위 내에서의 더블앵글 접합부는 LRFD를 따르는 경우 회전단으로 가정할 수 있다. 또한 접합부의 편심률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$e = \frac{M}{V} = \frac{275.2}{33.2} = 8.29 \text{ cm}$$

따라서

$$\frac{e}{d} = \frac{8.29}{35} = 0.24$$

5. 결 론

전단력을 받는 더블앵글 접합부를 볼트수, 앵글의 두께, 게이지 거리를 설계변수로 하여 해석적 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) 전단력을 받는 더블앵글 접합부에 대한 3차원 유한요소해석 결과를 분석하여 설계변수에 따른 각각의 경우에 대한 모멘트-회전각 곡선을 구하였다.
- (2) 앵글이 두께가 얇고 게이지 거리가 클수록 회전각이 0.005 rad에 이를 때까지 선형거

동에 가까운 거동을 하고, 앵글의 두께가 두껍고 게이지 거리가 작은 경우는 회전각이 0.0015정도까지 선형거동을 한다. 따라서, 앵글의 두께와 게이지 거리가 접합부의 거동에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다.

- (3) 최종 가력 단계에서는 시험체의 볼트와 앵글의 von Mises 응력도가 앵글 윗 부분은 인장력을 받고, 아래 부분은 압축력을 받는 것으로 나타났으며, 각 볼트의 위치마다 응력 분포가 다르게 나타났다. 또한 앵글의 응력 분포는 앵글의 오른쪽 하단에서 왼쪽 대각선 방향으로 응력이 집중되는 것으로 나타났다.
- (4) 유한요소해석 결과로부터 구한 모멘트-회전각 곡선을 Richard 식에 적용한 후 회귀분석을 실시하여, 초기강성, 소성강성, 참조모멘트, 곡선형태변수를 구하였다. 이 매개변수를 R.M. Richard가 제안한 식에 적용하면 모델링과 해석에 많은 시간이 걸리는 3차원 해석을 하지 않고도 더블앵글 접합부의 모멘트-회전곡선을 구할 수 있다.
- (5) 본 연구범위 내에서의 시험체는 접합부 모멘트가 접합부에 연결된 보의 소성모멘트의 20% 이내로 조사되어 LRFD(1997) 규준을 따르는 경우 더블앵글 접합부는 회전단으로 간주될 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) 하수영, 동가스프링을 이용한 더블앵글 접합부의 해석모델, 석사학위논문, 연세대학교 건축공학과, 1999
- (2) 송병주, 축방향 인장력을 받는 더블앵글 접합부의 거동에 관한 실험 연구, 석사학위논문, 연세대학교 건축공학과, 1999
- (3) 홍갑표, 양재근, 이수권, 송병주, 1999, "축방향 인장력을 받는 더블앵글 접합부의 비탄성 거동에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제15권, 제11호, pp. 45~52.
- (4) ABAQUS(1998), *User's Manual*, Vol I, II & III, Version 5.8, Hibbitt, Karlsson

- & Sorensen, Inc.
- (5) ABAQUS(1998), *Theory Manual*, Version 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
 - (6) Jae-Guen Yang, "Double Angle Framing Connections Subjected to Shear and Tension", Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997
 - (7) W. F. Chen and E. M. Lui, *Stability Design of Steel Frames*, CRC Press, 1991
 - (8) W. F. chen, *Joint Flexibility In Steel Frames*, Journal of Constructional Steel Research, Vol 8, Elsevier Applied Science, 1987

(접수일자 : 1999년 10월 12일)