

축방향 인장력을 받는 더블 앵글 접합부의 단순모형에 관한 연구

A Study on Simplified Model of Double Angle Connections Subjected to Axial Loads

홍 갑 표¹⁾ · 양 재 근²⁾ · 이 수 권³⁾ · 송 병 주⁴⁾
Hong, Kap-Pyo Yang, Jae-Guen Lee, Soo-Kueon Song, Byung-Ju

요 약 : 현재 접합부에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 구조물의 설계에서는 접합부를 강접합 또는 핀접합으로 가정하여 설계를 하고 있으나, 실제 접합부의 거동은 완전한 강접합도 핀접합도 아닌 반강접의 특성을 보이고 있다. 본 연구에서는 이러한 반강접의 분야 중 더블앵글에 의한 접합부의 거동을 파악하고자 한다. 중·저층 건물에서 가새의 지지능력을 상실하거나, 갑작스럽게 발생할지 모르는 축방향 인장력에 대한 더블앵글의 거동을 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 3D 비선형 해석을 수행하였다. 3D 해석결과를 이용하여 더블앵글 접합부를 단순화한 앵글모델로 유도한 후 앵글의 코너에서의 회전강성을 찾아내어 더블앵글 접합부에 대한 설계 기초자료로 제시하였다.

ABSTRACT : Recently, many studies on connections in steel structures have been performed. In practice, designers assume that the connection is a rigid- or pinned-one, however, actually the connection behaves as partially restrained one, neither fully restrained nor unrestrained. This paper concentrates on the behavior of double angle connections in the field of semi-rigid connections. The behavior of double angle connection, induced by abrupt axial tension load or by collapsed brace in medium or low rise building, is analyzed by 3D nonlinear finite element method using ABAQUS(ver 5.8). From the analytic results, a simplified model of double angle and a rotational stiffness at the corner of the angle are derived, which are fundamentally used for understanding the behavior of the double angle connection.

핵심 용어 : 더블앵글 접합부, 3D 비선형 해석, 단순모형

KEYWORDS : Double Angel Connections, 3D Nonlinear analysis, Simplified Model

1) 정희원, 연세대 사회환경건축공학부 부교수, 공학박사
2) 정희원, 관동대 건축공학과 조교수, 공학박사
3) 정희원, 동양공업전문대 건축과 조교수, 박사과정
4) (주)센구조 연구소, 사원

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

1. 서 론

현재의 구조설계에서 보-기둥 접합부는 단순히 강접 혹은 핀의 접합으로 이루어지는 것이 현실이다. 그러나 실제의 접합부의 거동에 있어서는 반강접의 특성을 보이고 있다. 지금까지는 보-기둥의 접합부에 있어서는 모멘트-회전각 중심의 연구가 활발하게 진행되고 있지만, 건물에서 지진이나 바람으로 인하여 예상하지 못한 축인장력의 영향에 대한 연구는 상당히 부족한 것이 현실이다. 따라서 반강접 접합부가 축인장력을 받는 경우의 연구를 통하여 축인장력의 영향에 대한 자료가 필요하다. 본 연구에서는 축 방향 인장력을 받는 더블앵글 접합부의 거동을 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 3D 유한요소해석을 실시하고 단순 모형의 이론에 적용하여 앵글의 거동을 단순화한다. 즉 해석과 단순모형의 이론을 적용·분석하여 축인장력에 대한 더블앵글 반강접 접합부의 설계에 필요한 기초자료로 제시하는데 그 목적이 있다.

1.2 연구 방법 및 절차

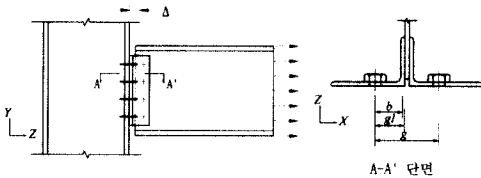


그림 1. 전체 모델링

본 연구에서는 그림 1과 같이 기둥 플랜지에 볼트로 연결되고 보의 웨브에는 용접되어 있는 더블앵글 접합부에 축인장력이 작용하는 경우에 대하여 해석을 수행하는 연구이다. 기하학적 비선형을 고려한 더블 앵글의 두께 (t), 볼트의 중심부터 앵글의 긴변과 짧은 변이 만나는 부분까지의 거리인 게이지거리(g_1)의 변화를 매개변수로 하여 해석을 수행한다. 해석은 상용 유한요소해석

프로그램인 ABAQUS를 사용하여 3차원 비선형 해석을 수행한다. 해석결과를 근거로 하여 하중-변위 관계를 구하였다. 해석의 결과를 이용하여 단순화된 앵글모형으로 앵글의 코너에서의 회전강성을 구한다. 위의 각각의 결과를 이용하여 축인장력을 받는 더블앵글 접합부의 거동을 알 수 있다.

2. 3D 유한요소해석

2.1 해석모델

전체 더블앵글 접합부 모델링에는 다음과 같은 ABAQUS의 FEM 요소를 이용하였다.

- (1) C3D20(20-node quadratic brick, 20개의 절점을 가지는 6면체) : 그림 2로 앵글과 볼트에 적용되었다. 볼트의 육각형 헤드는 사각형으로 이상화하였고 와서는 해석시간과, 기존 연구⁶⁾를 참고하여 볼 때 상대적으로 미비하여 제외하였다.
- (2) C3D8(8-node linear brick, 8개의 절점을 가지는 6면체)은 그림 3으로 보에 적용되었다. 전체 보 모델이 강축에 대해 실제 보와 같은 값의 단면 2차 모멘트를 가지는 보의 형태로 단순화하였다.

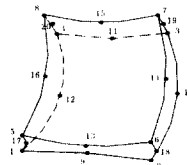


그림 2. C3D20 부재요소

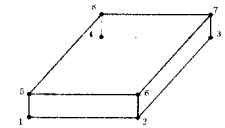


그림 3. C3D8 부재요소

- (3) C3D6(6-node linear triangular prism)은 그림 4로 용접부위에 적용되었다.

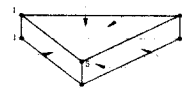


그림 4. C3D6 부재요소

(4) Spring2(두 절점 사이를 spring으로 연결, 고정축 방향으로 이동하도록 고정)는 더블앵글과 기둥의 접촉면에 사용되었다. 고력 볼트는 프리텐션을 가하였고, 기둥의 플랜지와 앵글의 접촉면은 컴퓨터 용량과 해석시간을 고려하여 압축에 대해서는 무한강성을 갖고 인장에 대해서는 무시 해도 될 정도로 작은 강성을 갖는 SPRING 요소를 이용하여 기둥 플랜지를 형상화하였다.

2.2 해석방법

모델의 해석 방법에 있어서 사용한 중요 방법 및 초기 조건은 다음과 같다.

- (1) 너트를 모델링하지 않고 볼트에 인장력을 가하였다. ABAQUS의 선택조건 중에서 "경계조건, OP=NEW, FIXED"와 "CLOAD, OP=NEW"를 사용하였다.
- (2) 앵글과 볼트가 만나는 부분은 게이지 거리별, 두께별로 각각 적용할 수 있는 해석방법을 사용하였다. 게이지거리가 긴 경우는 "CONTACT PAIR, SMALL SLIDING"과 "SURFACE BEHAVIOR, NO SEPARATION"를 사용하였다. 게이지거리가 짧고 앵글의 두께가 두꺼운 경우는 "SMALL SLIDING" 옵션을 사용하지 않고 "FINITE-SLIDING CONTACT" 옵션을 앵글과 볼트의 접촉면의 모델링에 사용하였다.
- (3) 앵글의 짧은 변 부분과 보가 만나는 부분은 ABAQUS의 선택조건 중에서 "MPC(multi-point constraints)를 사용하였다.
- (4) 해석에 사용된 재료의 특성은 그림 5와 같이 재료비선형을 고려한 응력-변형그래프를 이용하였다.

SS400에 대해 영계수 $E=2,100 \text{ t/cm}^2$, 항복강도 $\sigma_y=2.4 \text{ t/cm}^2$, 인장강도 $\sigma_u=3.6 \text{ t/cm}^2$

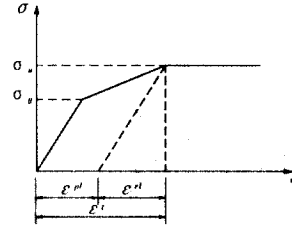


그림 5. 재료 비선형 그래프

를 사용하였으며 $\epsilon^t=0.15$ 로 사용하여 거의 완전 탄-소성의 재료특성으로 해석하였다. 이 모델링 기법은 축방향 인장력을 받는 실험을 통하여 타당성을 검증하였다.⁽²⁾

2.3 유한 요소 해석 결과

두께가 7 mm, 10 mm, 13 mm의 더블앵글 모델은 각각 세 종류의 게이지 거리 40 mm, 65 mm, 90 mm에 의해 총 9개의 3D 유한요소해석을 수행하였다. 하중을 제거한 후 0.2 mm의 잔류변형을 보이는 점을 항복점으로 정의하였다.

2.3.1 L-125×75×7 앵글모델

그림 6은 두께 7 mm일 때 게이지 거리가 90 mm, 65 mm, 40 mm인 경우의 해석결과를 보여 준다.

- (1) 두께가 7 mm일 때 게이지거리별 초기강성은 각각 24.6 t/cm, 54.2 t/cm, 166.2 t/cm의 값을 보여준다. 게이지거리 90 mm을 기준으로 각각 2.2배, 6.8배의 증가를 보여준다.

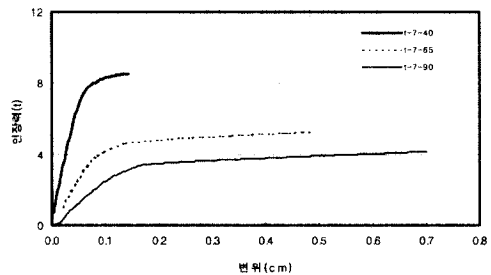


그림 6. 두께 7 mm 3D 해석결과

이고 있다. 게이지거리(g_1)가 짧은 40 mm의 경우는 휨에 의한 거동보다는 전단거동의 특성을 보여준다.

- (4) 그림 7, 8, 9의 Von-Mises 응력도에서 나타난 바와 같이 인장력을 받을 때 볼트의 머리 부분과 앵글의 코너 부분에서 항복됨을 보여준다. 볼트머리를 중심으로 항복이 발생되어 점차 증가되면서 높은 응력도를 보이고 있다.

그림 7. L-7-90 von-Mises 응력도

2.3.2 L-125×75×10 앵글모델

그림 10는 두께 10 mm일 때 게이지거리가 90 mm, 65 mm, 40 mm경우의 해석결과를 보여준다.

- (1) 두께가 10 mm일 때 게이지거리별 초기강성은 각각 64.4 t/mm, 109.2 t/mm, 348.5 t/mm의 값을 보여준다. 게이지거리 90 mm을 기준으로 각각 1.7배, 5.4배의 증가를 보여준다. 따라서 게이지거리(g_1)의 영향이 크다.
- (2) 본 논문의 정의를 적용하여 찾아낸 항복점은 각각 5.7 t, 7.2 t, 14.2 t이다.
- (3) 해석결과 앵글의 게이지거리가 90 mm, 65 mm경우는 두 개의 곡률을 가지는 변형을 보이고 있다. 게이지 거리가 짧은 40 mm의 경우는 휨에 의한 거동보다는 전단거동의 특성을 보여준다.

그림 8. L-7-65 von-Mises 응력도

그림 9. L-7-40 von-Mises 응력도

- (2) 논문에서의 정의를 적용하여 찾아낸 항복점은 각각 2.8 t, 4 t, 7.4 t 이다.
- (3) 해석결과 앵글의 게이지거리가 90 mm, 65 mm경우는 두 개의 곡률을 가지는 변형을 보

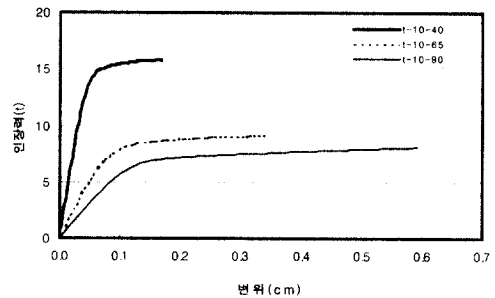


그림 10. 두께 10 mm 3D 해석결과

(4) 그림 11, 12, 13에서 나타난 바와 같이 인장력을 받을 때 볼트의 머리부분과 앵글의 코너 부분에서 항복되고 있다. 또한 볼트머리를 중심으로 항복이 발생되어 범위가 점차 증가되고 있다. 또한 두께가 7 mm의 경우보다 높은 응력의 분포를 보여주고 있다. 이는 인장력의 증가로 인하여 높은 응력 발생의 결과로 판단된다. 앵글과 볼트의 머리가 만나는 부분에서 높은 응력도를 보여주고 있다.

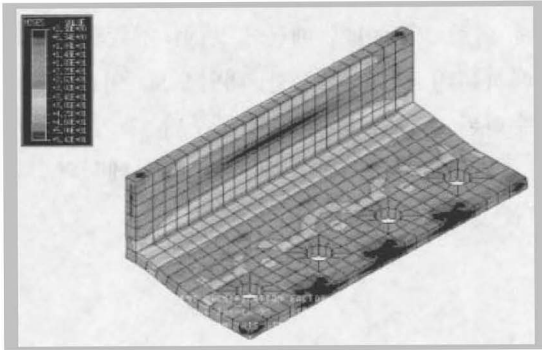


그림 11. L-10-90 von-Mises 응력도

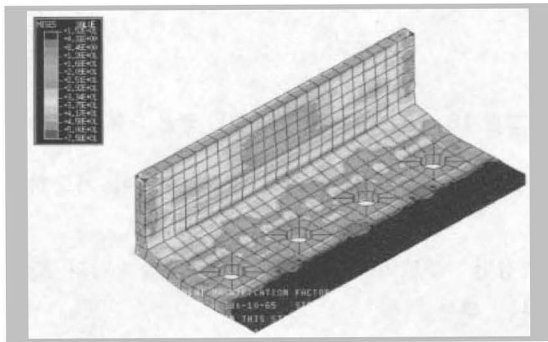


그림 12. L-10-65 von-Mises 응력도

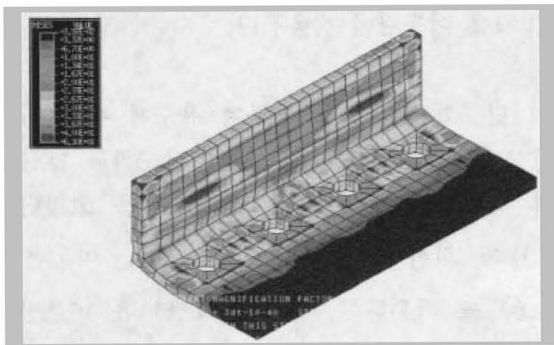


그림 13. L-10-40 von-Mises 응력도

2.3.3 L-125×75×13 앵글모델

그림 14는 두께 13 mm일 때 게이지거리가 90 mm, 65 mm, 40 mm인 경우의 해석결과를 나타낸다.

- (1) 두께가 13 mm일 때 게이지거리별 초기강성은 각각 93.2 t/cm, 206.4 t/cm, 663.5 t/cm의 값을 보여준다. 게이지거리 90 mm을 기준으로 각각 2.2배, 7.1배의 증가를 보여준다. 따라서 게이지거리(g_1)의 영향이 가장 크다.
- (2) 본 논문의 정의를 적용하여 찾아낸 항복점은 각각 6.8 t, 11.4 t, 22.6 t이다.
- (3) 해석결과 앵글의 게이지거리가 90 mm, 65 mm경우는 확실한 두 개의 곡률을 가지는 변형을 보이고 있다. 게이지 거리가 짧은 40 mm의 경우는 힘에 의한 거동보다는 전단거동의 특성을 나타낸다.
- (4) 그림 15, 16, 17의 von-Mises 응력도에서 보이듯이 인장력을 받을 때 볼트헤드 부분과 앵글의 코너 부분에서 항복됨을 보여준다. 볼트의 머리를 중심으로 항복이 발생되어 점차 증가되고 있다. 또한 두께가 7 mm의 경우보다 높은 응력 분포를 보여주고 있다. 인장력의 증가로 인하여 높은 응력발생의 결과로 판단된다. 앵글과 볼트의 머리가 만나는 부분에서 높은 응력도를 보여주고 있다. 그림을 분석하면 앵글의 두께에 의한 영향보다 게이지거리(g_1)의 영향이 큰 것을 알 수 있다

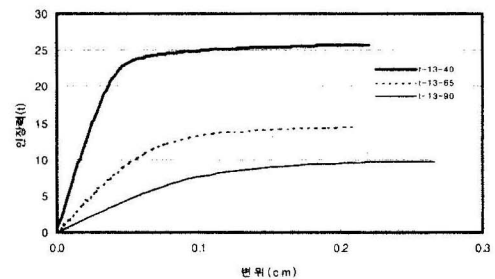


그림 14. 두께 13 mm 3D 해석결과

방향 인장력을 받는 더블 앵글의 초기강성을 찾아낸 후 이 결과를 탄성영역에서의 단순 모형의 미분 방정식에 적용하여 앵글의 모서리 부분에서 작용하는 회전강성을 이끌어 낸다. 이 회전강성은 더블앵글의 거동을 이해하는데 기초자료로 활용된다. 앵글 부분을 단순화한 모형은 그림 18과 같으며, 단순화된 앵글의 모형을 이용하여 앵글의 긴 변 부분의 거동을 알 수 있다. 단순화된 앵글은 기본적으로 두개의 곡률을 가진 보이다. 더블앵글 접합부의 가장 특징적인 거동은 탄성범위 내에서의 휨에 의한 거동이기 때문에 이런 앵글의 거동을 이해하는데 보가 적절한 대안으로 이용된다. 이 단순화된 모형으로부터 접합부의 초기강성을 이용한 긴 변과 짧은 변이 만나는 부분에서의 회전강성을 구할 수 있다.

그림 15. L-13-90 Von-Mises 응력도

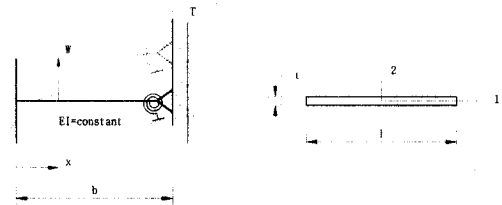


그림 16. L-13-65 Von-Mises 응력도

그림 18. 인장력을 받는 단순화된 앵글 모형

앵글은 단순화하면 아래와 같이 표현이 가능하다.

- ① 고정단 : 볼트의 중심부의 기둥의 플랜지와 만나는 부분
- ② 회전강성을 갖고 있는 이동단 : 앵글의 짧은 변의 중심
- ③ 인장력은 이동단에 작용한다.

그림 17. L-13-40 von-Mises 응력도

위의 단순화된 과정을 통하여 유도된 평형 미분방정식에, 경계조건을 대입하여 단순화된 앵글 모형의 해를 구할 수 있다. 경계조건은 고정단 ($x=0$)과 회전강성(k)을 갖고 있는 이동단 ($x=b$)을 이용한다. 아래의 식 (1)은 미분방정식과 경계조건을 나타내고 있다.

3. 단순 모형 해석

3.1 단순모형 이론식 유도

본 논문의 경우는 3D 해석결과를 이용하여 축

$$\begin{aligned}
 EIw''''(x) &= 0, \\
 w(x) &= A_1 + A_2x + A_3x^2 + A_4x^3 \\
 w(0) &= 0, \quad w'(0) = 0, \\
 w'(b) &= 0, \quad EIw''(b) = k w'
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

이와 같은 평형 미분방정식과 경계조건을 이용하여 해를 구하면 계수는 (2)와 같고 해는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 0, \quad A_2 = 0, \\
 A_3 &= \frac{Tb(2EI - kb)}{4EI(EI - kb)}, \\
 A_4 &= -\frac{T}{6EI}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서, t : 앵글의 두께
 l : 앵글의 길이
 I : 앵글의 단면2차 모멘트 = $lt^3/12$
 T : 인장력
 k : 이동단에서의 회전강성(앵글의 코너부분)

따라서,

$$w(x) = \left[\frac{Tb(2EI - kb)}{4EI(EI - kb)} \right] x^2 - \left(\frac{T}{6EI} \right) x^3 \tag{3}$$

단순화된 앵글모형의 초기강성은 주어진 데이터 식 (3)에 대입하면 다음과 같이 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$K_{ini} = \frac{T}{w(b)} = \frac{Elt^3(Elt^3 - 12kb)}{b^3(4Elt^3 - 12kb)} \tag{4}$$

여기서, K_{ini} : 인장력에 의한 앵글의 초기강성
 E : 탄성계수
 l : 앵글의 길이
 t : 앵글의 두께
 b : 단순모형의 길이, $g_1 - t/2$
 k : 앵글의 모서리부분에 작용하는 회전강성

3D 해석결과인 더블앵글 접합부의 초기강성 값을 식 (4)에 대입하면 앵글의 모서리 부분의 회전강성을 구할 수 있다.

더블앵글 접합부를 단순화한 모형으로 유도한 후, 3D 해석결과와 초기강성을 이용하여 앵글의 모서리에서의 회전강성을 찾아낼 수 있다. 도출된 회전강성은 더블앵글 접합부의 거동을 이해하는데 기초자료로 활용할 수 있다.

3.2 단순모형 적용

표 1에 정리된 앵글의 모서리의 회전강성 값을 통하여 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수 있다. 게이저거리별, 앵글의 두께별로 회전강성을 비교하면 게이저거리가 길고 앵글이 얇을 수록 높은 회전강성 값을 보이고 있다. 이는 앵글이 축인장력을 받을 때 게이저거리가 길고 앵글이 얇을수록 모서리에서의 거동이 직각을 유지하는 거동을 보이고 있기 때문이다.

게이저거리가 40 mm이고 앵글 두께 10 mm, 13 mm의 경우 회전 강성 값이 0에 가까운 값을 보여주고 있는데 볼트의 위치가 모서리에서 근접하므로 직각을 유지하지 못한 거동을 보인다는 것을 알 수 있다.

표 1. 앵글의 모서리에서의 회전강성

앵글의 두께 (cm)	g1 (cm)	초기강성 (t/cm)	b (cm)	회전강성 (t-cm/rad)
0.7	9.0	24.8	8.65	2077
	6.5	53.7	6.15	1060
	4.0	170.9	3.65	507
1.0	9.0	64.2	8.5	2943
	6.5	105.2	6	726
	4.0	333.8	3.5	≈0
1.3	9.0	95.7	8.35	1643
	6.5	220.2	5.85	1019
	4.0	622.4	3.35	≈0

4. 결 론

본 연구에서는 더블앵글에 의한 보-기둥의 접합부의 보에 축인장력이 작용할 때 더블앵글 접

합부의 거동에 관하여 고찰하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 앵글의 두께 7 mm, 10 mm, 13 mm에 대한 해석 결과 게이지거리가 90 mm, 65 mm, 40 mm의 경우 각각 초기강성은 게이지거리 90 mm를 기준으로 각각의 두께에 대하여 거의 동일한 증가량을 보이고 있다. 앵글의 인장력에 대한 앵글의 초기강성의 증가는 앵글의 두께가 두껍고 게이지거리가 짧을 수록 확실한 효과를 보여준다.
- (2) 3D해석결과 변형된 모양을 분석하면 앵글의 두께가 얇고 게이지거리가 클수록 두 개의 곡률을 가진 휨거동의 양상을 보이고 있으며, 앵글의 두께가 두껍고 게이지거리가 작을 수록 전단거동의 양상을 보이고 있다.
- (3) 해석결과 앵글의 변형과 von-Mises 응력을 분석하면 앵글에서의 응력집중은 앵글과 볼트가 만나는 부분과 앵글의 모서리 부분에서 집중적으로 발생되고 있다.
- (4) 단순모형의 이론을 적용하여 각각의 경우에 대한 인장력을 받는 앵글의 모서리에서의 회전강성값을 찾을 수 있다. 게이지거리가 길수록 앵글이 얇을수록 모서리에서의 거동이 직각을 유지하는 휨거동을 보이고 있고 게이지거리가 40 mm의 경우 앵글 두께 10 mm, 13 mm의 경우 회전 강성 값이 0에 가깝다. 이는 볼트의 위치가 모서리에서 근접하므로 직각을 유지하지 못하기 때문이다.
- (5) 더블앵글 접합부를 단순화한 모형으로 유도한 후, 3D 해석결과와 초기강성을 이용하여 앵글의 모서리에서의 회전강성을 찾아낼 수 있다. 도출된 회전강성은 더블앵글 접합부의 거동을 이해하는데 기초자료로 활용할 수 있다.

감사의 말

본 연구는 포항제철 지원을 받아 수행된 것이

며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

- (1) 한영철, 홍갑표, 김근덕, "강재 반강접 보-기둥 접합부의 회전강성 모형식에 관한 연구", 한국강구조학회 논문집 제14권 제3호(통권 12호), pp. 155-164, 1992
- (2) 홍갑표, 양재근, 이수권, 송병주, "축 방향 인장력을 받는 더블앵글 접합부의 비탄성 거동에 관한 연구" 대한건축학회 논문집 제 15권 11호, pp. 45-52, 1999
- (3) ABAQUS(1998), *User's Manual*, Vol I, II & III, Version 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- (4) ABAQUS(1998), *Theory Manual*, Version 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- (5) Charles G. Salmon and John E. Johnson, *Steel Structure: Design and Behavior*, Harper Coollins College Publishers, 1996
- (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) Leonard Spiegel and George F. Limbrunner, *Applied Structural Steel Design*, PRENTICE HALL, 1997
- (8) M.De Stefano and A.Astaneh, "Axial-Displacement Behavior of Steel Double Angles", *Journal of Construction Steel Research*, Vol. 20, pp. 161-181, 1991
- (9) W. F. chen, *Joint Flexibility In Steel Frames*, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 8, Elsevier Applied Science, 1987

(접수일자 : 1999년 10월 12일)