한국전산구조공학회
1992년도 가을학술발표회 논문집

단부평판 접합부의 극한저항능력 평가를 위한 비선형 유한요소해석 모델
Nonlinear Finite Element Analysis Model for Ultimate Capacity Estimation of End-Plate Connection

최 창근* 정 기택**
Choi, Chang-Koon Chung, Gi-Taek

ABSTRACT

The ultimate capacity of end-plate connection is investigated through nonlinear finite element analysis. The example models are divided into stiffened case and unstiffened one. The refined finite element models are analyzed by utilizing a general purpose structural analysis computer program ADINA and the moment-rotation relationships of the connections are determined. The results are compared with the regression equation deduced by Krishnamurthy. It is planned to deduce a bilinear regression equation through a parametric study on various dimensions of the connection.

1. 서 론

일반적으로 철골구조물에서 접합부의 변형이 전체 거동에 미치는 영향은 매우 중요하다. 그러므로, 구조해석 및 설계시에 이러한 접합부의 변형이 고려되어야 하지만, 실무에서는 접합부를 힌지나 강절점으로 모델링하는데 그치고 있다[1]. 이를 해결하기 위한 기초작업으로서, 본 연구는 접합부의 국부적인 거동을 파악하는 것을 목적으로 한다.

단부평판 접합부는 생산 및 설치의 간편성 및 경제성으로 인하여, 최근 철골구조물의 모멘트접합부로 많이 사용되고 있다. 단부평판 접합부는 사용된 볼트의 갯수에 따라 크게 세가지(4개, 6개, 8개)로 분류하는데, 본 연구에서는 이 중에서 가장 일반성이 있는 4개의 볼트를 사용한 경우를 대상으로 한다. 개략적인 형상은 그림 1과 같은데, 공장에서 보와 단부평판을 용접하고 현장에서 단부평판과 기둥플랜지를 볼트로 연결함으로써 완성된다.

이러한 접합부의 비선형 거동을 이해하기 위해서는 일반적으로 실험적인 방법을 사용하고 있다[2,3]. 그러나 실험장치 및 기법의 복잡성과 비용문제 등으로 인하여, 여러가지 각기 다른 유형의 접합부에 대해서 모두 실험을 행하는 것은 현실적으로 불가능한 일이다. 따라서 해석적인 연구방법을 채택하여 일부 실험 결과와 비교 및 검토함으로써 개발된 해석모델에 일반성을 부여하는 형식의 접근방법이 필요하게 된다.

* 한국과학기술원 토목공학과 교수, ** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

단부평판접합부에 대한 해석적인 접근방법은 크게 두가지로 분류할 수 있다. 그 중 한가지는 접합부를 구성하는 개개의 요소들에 물리적 의미를 부여하고, T-stub analogy와 파괴역학 및 평판이론 등의 고전역학에 근거하여 접합부의 거동을 결정하는 방법[4,5]이고, 다른 한가지는 접합부의 실제 거동을 표현할 수 있을 만큼 많은 수의 유한요소로 모델링하여 해석함으로써 결과를 도출하는 방법[6,7]이다. 이 중에서도 후자는 실제 실험을 행하는 것과 유사한 효과를 얻을 수 있는 장점이 있기 때문에, 본 연구에서는 이러한 유한요소 모델링의 방법을 연구방법으로 채택한다.

본 논문에서는 우선, 단부평판 접합부의 특성을 파악하고 기존의 유한요소 모델링에 대한 문제점을 검토한 후, 모델링을 보완한다. 이와같이 결정된 모델을 비선형 구조해석 프로그램인 ADINA를 이용하여 해석함으로써, 단부평판접합부의 모멘트-회전변위 관계를 도출한다. 이러한 결과는 최종적으로 기존의 해석적 데이타와 비교 및 검증된다.

2. 유한요소 모델링

2.1 단부평판 접합부의 특성

단부평판 접합부는 다음과 같은 특성들로 인하여 상당히 복잡한 거동을 가지게 된다.

1) 접합부는 많은 갯수의 작은 성분들로 구성된다.
2) 연결재(볼트)의 휨스팬이 연결되는 부재의 두께와 크기가 같거나 더 작다.
3) 볼트헤드와 용접부위가 전체 거동을 상당히 강하게 한다.
4) 보와 기둥간에 힘이 전달되는 과정에서 단부평판을 거치면서, 모멘트 및 응력의 분포가 상당히 완만해지게 된다.
5) 하중 및 반력이 한 평면 이상에서 발생하므로, 휨은 보통 이축으로 작용한다.
6) 초기 인장을 받은 볼트로 인하여 주위의 평판은 압착되고, 멀리 떨어진 부분은 휨으로 인하여 벌어지게 된다.
7) 단부평판과 기둥플랜지 사이의 접촉영역은 하중조건이 바뀜에 따라 변하므로, 예측하기가 어렵다.

따라서, 모든 성분들이 탄성상태를 유지하여도, 단부평판 접합부의 전체적인 거동은 근본적으로 비선형의 특성을 가지게 된다. 이러한 특성에 근거하여, 기존의 모델링을 검토하면 다음과 같다.

우선 Krishnamurthy의 모델링[6]에서는 기둥플랜지는 변형하지 않는다는 가정이 있는데, 이것은 기둥플랜지가 완전히 강한 이상적인 경우에만 적용될 수 있다. 즉, 기둥플랜지는 기둥웨브로 지지되는 부분을 제외하고는 변형할 수밖에 없으며, 보강재로 보강되어 있다 하더라도 보강재 영역을 제외한 부분에서는 변형이 발생하기 때문이다. 이 문제와 관련하여 경계조건의 처리는 문제점을 내포하고 있다. 즉, 단부평판의 후면을 완전히 고정시키고 고정된 위치에서 인장력이 발생하지 않을 때까지 반복 해석하기 때문에, 압축측의 변형은 고려하지 못한다. 또한 삼차원요소가 아닌 이차원요소를 사용하여 해석하고 그 결과를 삼차원요소를 사용한 결과와의 상관계수를 이용하여 보정하였기 때문에, 정확한 거동을 표현하는데는 부족하다.

한편 Tarpy는 기둥플랜지의 변형까지 고려하여 모델링을 하였는데, 관계식을 표현하는 계수중에서 보의 플랜지 및 웨브 두께, 볼트 크기 등이 고려되지 않았다[7]. 이에 본 연구에서는 다음과 같이 모델링을 개선함으로써, 접합부의 거동을 보다 정확하게 파악하고자 한다.

2.2 모델링 개요

보와 기둥이 만나는 부분의 변형은 크게 panel zone의 변형과 접합부의 변형으로 구분되는데, 본 연구에서 대상으로 하는 것은 후자이다. 접합부의 변형은 보와 기둥을 연결하는데 관계되는 요소들의 변형으로 이루어진다. 즉, 단부평판 접합부의 경우에는 단부평판과 볼트 및 기둥플랜지의 국부적인 변형으로 이루어진다. 따라서 모델링의 범위는 보의 일부분과 단부평판 및 기둥플랜지로 한정한다. 보의 웨브축에 대한 대칭성을 고려하여, 전체 모델의 반만 모델링한다.

본 연구의 해석모델은 기둥의 웨브부분을 보강재를 이용하여 보강한 경우와 보강하지 않은 경우의 두가지로 분류한다. 전체적인 경계조건의 처리는, 비보강인 경우에는 기둥웨브의 두께에 해당하는 부분만 고정시키고, 보강된 경우에는 보강재의 영역까지 추가로 고정시킨다. 여기서 보강재의 영역은 보의 플랜지영역과 동일한 것으로 가정한다. 이와같이 구속함으로써, panel zone의 변형을 제외한 접합부만의 변형을 추출할 수 있게 된다. 한편, 하중의 상태에 따라 일정하지 않은, 단부평판과 기둥플랜지사이의 접촉 영역은 3D Contact Surface로 모델링한다.

2.3 모델링 상세

2.3.1 하중 모델링

볼트의 초기인장력은 일반적으로 볼트의 항복강도의 약 0.7배값을 사용한다. 즉, A325볼트의 경우, 항복강도가 81 ksi이므로, 0.7배인 56 ksi 만큼 초기 인장력을 가한다. 앞서 언급한 바와 같이 초기 인장된 볼트는 볼트헤드 부분과 단부평판간에 압축상태를 발생시킨다. 따라서 초기인장응력은 등가의 효과를 가지는 온도하중으로 모델링한다.

보에 작용하는 휨모멘트는 단면의 중심축에 대하여 대칭으로 응력이 선형분포하는 것으로 가정하고, 응력집중을 방지하기 위하여 압력하중으로 모델링한다.

2.3.2 볼트헤드와 너트 및 필렛(fillet)용접 모델링

앞서 언급한 바와 같이 볼트헤드와 너트 및 보와 단부평판을 연결하는 용접부위는 전체 거동을 강하게 하는 역할을 한다.

일반적인 철골구조 규준[9]에 의하면, 볼트지름에 따라 볼트헤드와 너트의 지름 및 두께가 결정된다. 이러한 값을 토대로 하여, 볼트축과 볼트헤드 및 너트는 모두 등가면적의 정사각형으로 모델링하며, 볼트헤드와 단부평판 및 너트와 기둥플랜지간의 분리는 고려하지 않는다.

한편 필렛용접의 크기는 규준에 따라 연결되는 부재의 두께 중 큰 값에 의하여 결정된다. 필렛용접의 형상과 유사한 프리즘 요소로 모델링하며, 용접부위의 강도는 일반 강재와 유사한 값을 사용한다.

3. 예제 해석 및 결과 분석

예제모델의 보와 단부평판 및 볼트의 단면칫수는 Krishnamurthy의 A01모델을 참고로 하였으며, 기둥의 단면칫수는 W14X90을 사용한다(표 1). 모델링의 정확성과 해석상의 경제성을 고려하여 그림 2와 같은 삼차원 체눈을 사용하였는데, 총 882개의 절점과 430개의 요소로 구성된다.

해석작업은 총 10단계로 나누어 실행하였는데, 각 단계별 하중조건은 다음과 같다. 우선 1단계에서는 볼트의 초기인장력만을 입력하고, 다음 단계부터 보의 휨모멘트를 입력한다. 휨모멘트는 보의 소성모멘트(M_p)에 도달할 때까지 증가시키는데, 보의 항복모멘트(M_y)는 네 단계(2 - 5단계)로 나누어 입력하고, 나머지 소성값과 항복값의 차이(M_p - M_y)는 모델의 체눈 형태를 고려하여 다섯 단계(6 - 10단계)로 나누어 입력한다.

해석 결과, 접합부의 변형은 보의 인장측 플랜지 주위에서 집중적으로 발생하는데, 이러한 현상은 T-stub analogy와 같은 해석적 연구 이론에 부합된다(그림 3). 접합부의 모멘트-회전변위 관계를 도출하기 위하여, 단부평판의 전면에서 보의 인장측 및 압축측 플랜지에서의 변위값을 추출하고, 두 변위값의 차이를 보 단면의 높이로 나누어 회전변위를 산출한다.

예제모델의 해석결과는 그림 4에 나타낸 바와 같이, 보강된 경우에는 Krishnamurthy의 연구결과와 상당히 일치함을 알 수 있다. 이러한 현상은 앞서 언급한 바와 같이, Krishnamurthy의 연구가 기등플랜지가 무한히 강하거나 보강재로 보강된 경우를 대상으로 하는데 기인한다. 반면에 보강되지 않은 경우에는 보강된 경우에 비하여 강성이 상당히 저하됨을 알 수 있다. 특히 휨모멘트가 항복값에 도달하는 영역에서는 강성 저하가 두드러지게 나타나고, 소성값에 가까와지면서 일정한 값에 수렴하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론 및 추후 연구계획

철골구조물의 해석 및 설계시에 접합부의 변형을 고려하기 위한 기초 연구로서, 기존의 유한요소 모델링을 개선하고 비선형 구조해석 프로그램인 ADINA를 이용하여 해석함으로써, 단부평판 접합부의 모멘트-회전변위 관계를 도출하였다. 보강된 경우의 해석결과는 기존의 연구결과와 상당히 일치하는 반면, 보강되지 않은 경우에는 강성저하가 뚜렷하게 나타났다.

현재 접합부의 구성요소에 대한 치수가 각기 다른 여러가지 경우에 대하여 계속적인 해석작업을 실시하고 있다. 이러한 해석결과는 계수연구를 통하여 단부평판 접합부의 모멘트-회전변위 관계에 대한 일반식으로 도출될 계획이다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 목적기초 연구과제(과제번호 91-07-00-38)의 연구결과의 일부로서, 재단의 지원에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. B.S.Taranath, Structural Analysis and Design of Tall Buildings, McGraw-Hill, 1988.
2. T.M.Murray and A.R.Kukreti, "Design of 8-bolt Stiffened Moment End Plates", AISC Engng. J., 2nd Quarter, pp. 45-53, 1988.
3. K.C.Tsai and E.P.Popov, "Cyclic Behavior of End-Plate Moment Connections", ASCE, Structural Division, Vol.116, No.11, pp 2917-2930, 1990.
4. H.Agerskov, "Analysis of Bolted Connections Subject to Prying", ASCE, Structural Division, Vol.103, No.ST1, pp 2145-2163, 1977.
5. Y.L.Yee and R.E.Melchers, "Moment-Rotation Curves for Bolted Connections", ASCE, Structural Division, Vol.112, No.3, pp 615-635, 1986.
6. N.Krishnamurthy, H.T.Huang, P.K.Jeffrey and L.K.Avery, "Analytical M-θ Curves for End-Plate Connections", ASCE, Structural Division, Vol.105, No.ST1, pp 133-145,

1979.
7. W.F.Chen and E.M.Lui, Stability Design of Steel Frames, CRC Press, 1991.
8. ADINA, A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis, ADINA Engineering Inc., 1984.
9. Manual of Steel Construction, ASD, AISC, 1989.

표 1 해석 모델의 칫수 상세 (단위 : in.)

	폭	높 이	플랜지두께	웨브두께
보	9	20	0.75	0.4375
기 둥	14.5	14	0.6875	0.4375

	폭	높 이	두 께
단부평판	11	28	1

	지 름	게이지	외부피치	내부피치
볼 트	1	5.5	2.25	2.5

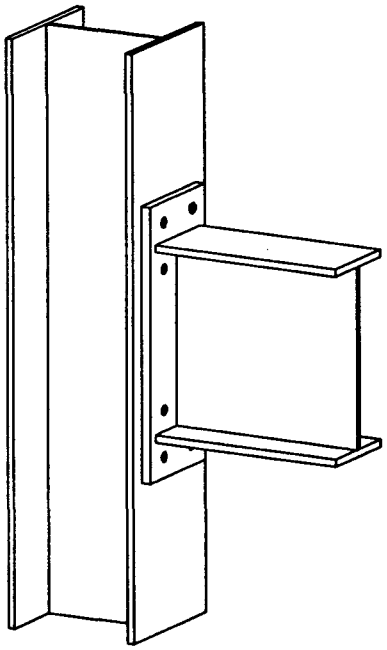


그림 1 단부평판 접합부

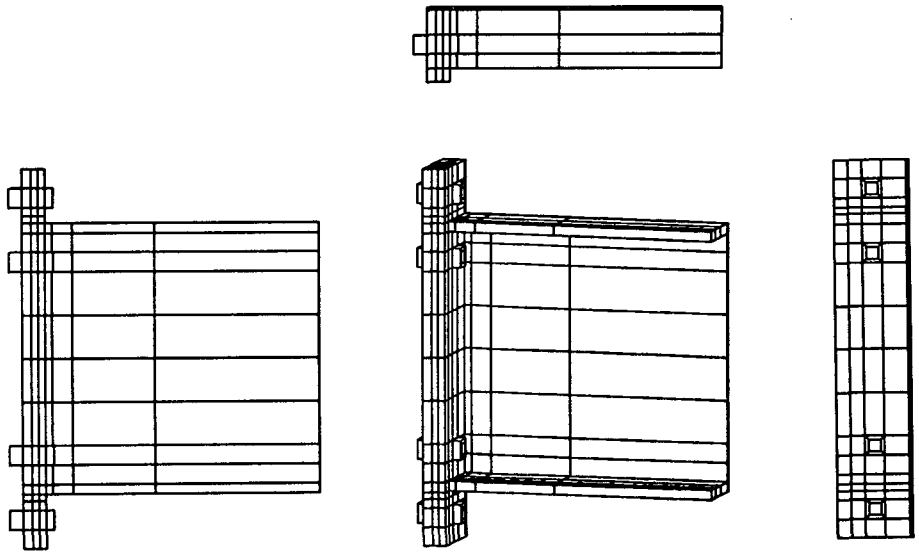
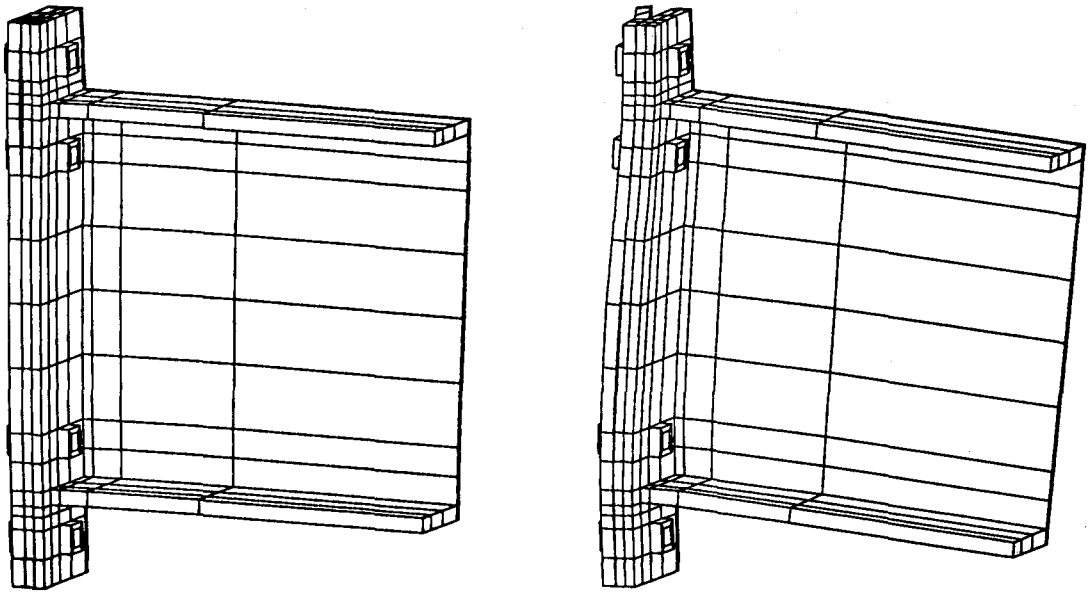


그림 2 예제모델의 삼차원 체눈



(a) 보강된 경우　　(b) 보강되지 않은 경우

그림 3 예제모델의 변형도

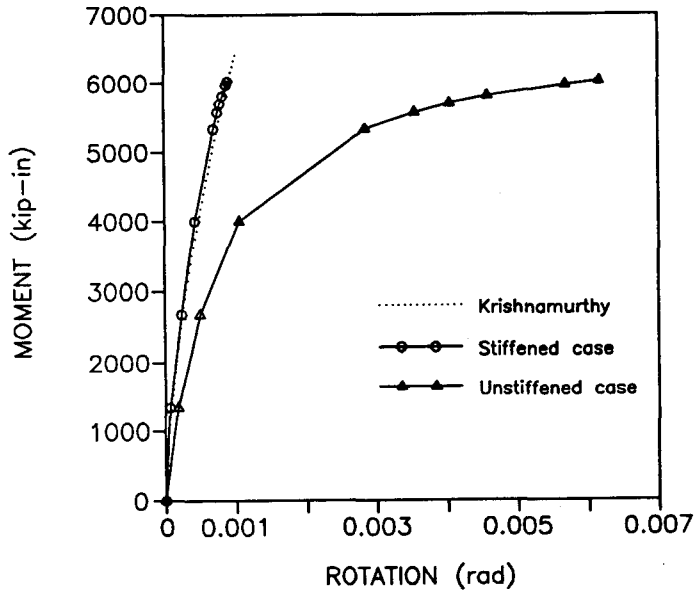


그림 4 예제모델의 모멘트-회전변위 관계