

인장력을 받는 RC 부재와 철골 부재 접합부의 유한요소해석

Finite Element Analysis of Connections between RC and Steel Member under Tensile Loading

김 은 주*
Kim, Eun-Ju

김 승 훈**
Kim, Seung-Hun

서 수 연***
Seo, Soo-Yeon

이 리 형****
Lee, Li-Hyung

ABSTRACT

Finite element analysis using ANSYS program conducted to evaluate the tensile behavior of the connection between reinforced concrete and steel members is presented in this paper. It is assumed that there is a complete bond between head part of the stud and concrete. However, the surface of the column area of stud is separated from the concrete to stop the stress transmission between those. In case of using reinforcement connectors such as C or U type, the interface between concrete and reinforcement is idealized to have strong adhesion. Four concrete-steel specimens which are connected by stud connector or reinforcement connectors are compared and analyzed

From the comparison, it was shown that the connection between concrete and steel could be predicted by using the modeling technique used in this paper.

1. 서 론

최근 들어 철근 콘크리트(RC) 부재와 철골 부재의 접합에 있어 연결재로 스테드(Stud)가 많이 이용되고 있다. 인장력을 받는 스테드에 관한 기존 연구들은 주로 콘크리트 강도 및 스테드 볼트의 묻힘 길이에 따른 인장내력 변화에 집중되어 왔다. 콘크리트 콘 파괴(Cone Failure)시의 설계내력식 또한 이들을 주요 변수로 한 무근 실험체에 대한 인장실험 결과를 바탕으로 제안되고 있다. 하지만 실제 구조물에서 스테드가 사용되어지는 접합부 내에는 일정 이상의 주근 및 전단보강근이 배근되어져 콘 파괴 면의 콘크리트 변형에 대한 구속효과로 접합부 인장거동에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 기존 실험결과¹⁾에서도 주근 및 전단보강근이

* 한양대학교 건축공학과 대학원 석사과정

** 한양대학교 건축공학과 대학원 박사과정

*** 한양대학교 초대형구조시스템연구센터 연구조교수, 정회원

**** 한양대학교 건축공학과 교수, 정회원

인장내력상승과 최대내력이후의 취성파괴 방지에 영향을 미친다고 평가하였지만 그 결과만으로 그 기여도를 정량적으로 평가하기에는 무리가 있으므로 이에 대한 유한요소해석을 통한 접근이 필요한 실정이다.

최근 인장을 받는 스티드 주위 콘크리트의 취성파괴를 방지하기 위하여 C형 및 U형 철근과 같은 새로운 연결재들이 개발²⁾되고 있다. 이러한 이형철근을 이용한 연결재는 그 형태의 특이성으로 인하여 인장거동 및 내력을 평가하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 스티드, C형 철근 및 U형 철근 등의 연결재를 사용한 RC 부재-철골 부재 접합부의 인장거동에 관한 비선형 유한요소해석을 실시하여 실험결과와의 비교·분석을 통하여 해석 모델의 신뢰성 검토를 1차적인 연구목표로 한다. 그리고 이를 기반으로 향후 연결재의 종류 및 치수, 콘크리트 강도 등이 변화하는 다양한 RC 부재-철골 부재 접합부에 대하여 주근 및 전단보강근이 접합부 인장거동에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 모델링 요소

철근콘크리트 부재 - 철골 부재 접합부의 연결재로 스티드와 폐쇄 C형 및 U형 철근을 고려하였으며 접합부 비선형 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.5³⁾를 사용하였다. 본 해석에 사용된 요소 모델은 다음과 같으며, 탄성계수, 프와송비 등의 재료 물성치는 재료시험에 의한 값들을 사용하였고 나머지는 일반적으로 해석에 사용되어지는 이론값들을 사용하였다.

2.1 철근 요소

철근은 3차원 spar요소인 LINK8을 사용하여 모델링 하였다. 이 요소는 1축 방향의 인장과 압축에 대한 거동을 갖고 있으며, 각 절점에는 3방향(x, y, z)에 대한 자유도(degrees of freedom)를 가지고 있다. 철근의 재료 비선형을 고려하기 위하여 이선형 운동학적 경화(bilinear kinematic hardening) 모델인 BKIN을 사용하였으며, 이러한 재료 비선형 모델은 탄성계수와 접선계수 및 항복강도를 필요로 한다. 철근의 재료 비선형을 고려하기 위한 재료 물성치와 BKIN 모델의 응력 - 변형도 곡선을 표 1과 그림 1에 나타내었다.

표 1. 철근의 특성

철근	D13 (주근 및 연결재)	φ 6(전단보강근)
탄성계수(kgf/cm ²)	2.06 × 10 ⁸	2.11 × 10 ⁸
프와송비	0.3	0.3
항복강도(kgf/cm ²)	4977	7460
접선탄성계수(kgf/cm ²)	2.06 × 10 ⁴	2.11 × 10 ⁴

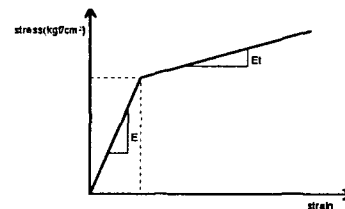


그림 1. 철근 재료 비선형 모델

2.2 스티드 요소

스티드는 3차원 솔리드 요소인 SOLID45 요소를 사용하여 모델링 하였다. 이 요소는 8개의 절점으로 구성되어 있으며 각 절점에는 3방향(x, y, z)에 대한 자유도(degrees of freedom)를 가지고 있다. 스티드의 재료 비선형을 고려하기 위하여 철근과 같이 이선형 운동학적 경화(bilinear kinematic hardening) 모델인 BKIN을 사용하였다. 표 2에 해석에 사용한 스티드의 재료 물성치를 나타내었다.

표 2. 스티드의 특성

스티드	탄성계수(kgf/cm ²)	프와송비	항복강도(kgf/cm ²)	접선탄성계수(kgf/cm ²)
φ13×80	2.12×10 ⁹	0.3	4078	2.06×10 ⁷

2.3 콘크리트 요소

콘크리트는 일반적인 재료가 가지는 탄성, 소성, 크리프 등의 거동 외에 균열거동(cracking behavior)이나 부스러짐 거동(crushing behavior)을 하는 재료적인 특성이 있다. 이러한 특성을 고려하기 위하여 콘크리트는 3차원 솔리드 요소인 SOLID65를 사용하여 모델링 하였다. 이 요소는 8개의 절점을 갖는 6면체 형상으로 각 절점에 3방향(x, y, z)에 대한 자유도(degrees of freedom)를 가지고 있다. 이 콘크리트 모델은 요소내의 적분점에서 균열 및 부스러짐이 가능하고 소성 및 크리프 변형 등을 고려 할 수 있다.

콘크리트 재료 모델은 부서지기 쉬운 결점이 있고, 낮은 인장력과 높은 압축력에 견디는 특징을 지니고 있으므로, 모든 방향에 대하여 재료적인 성질이 동일한 등방성 요소(isotropic)로 입력하였다. 비선형을 고려한 해석에서 필요한 콘크리트의 재료 물성치와 콘크리트 요소를 표 3과 그림 2에 나타내었다.

표 3. 콘크리트의 특성

탄성계수(kgf/cm ²)	2.59×10 ⁹
프와송비	0.167
인장강도(kgf/cm ²)	31.5
압축강도(kgf/cm ²)	361

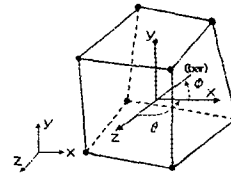


그림 2. 콘크리트 요소

2.4 균열에 대한 모델

하나의 적분점(integration point)에서 균열의 존재는 균열면에서 수직인 방향의 약한면(plane of weakness)에 의한 응력-변형을 관계의 수정을 통해서 나타낼 수 있다. 즉, 열려진 균열에 대한 전단전달계수((shear transfercoefficient for an open crack, β_p)는 균열면과 교차되어 미끄러짐을 유발시키는 추가 하중에 대해 전단강도감소계수(shear strength reduction factor)로 표현되며, 균열이 닫혀지게 되면 균열면에 수

직인 모든 압축응력은 균열과 교차되어 전달되며, 닫혀진 균열에 대한 전단전달계수(shear transfer coefficient for a closed crack, β_c)를 사용하게 된다. 표 4에 콘크리트 모델에서 사용한 전단전달계수 값을 나타내었다. 균열상태에서의 콘크리트 강도는 그림 3과 같으며, 여기서 R' 는 기율기(secant modulus)를 나타내며, 적응적 강하(adaptive descent)⁴⁾를 대상으로 한다.

표 4. 균열에 대한 전단전달계수

β_t	0.3
β_c	0.7

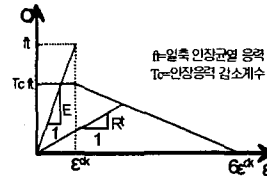


그림 3. 균열 상태에서의 콘크리트 강도

3. 해석 모델 및 해석 방법

3.1 해석모델

해석모델에 사용된 실험체는 표 5 및 그림 4와 같이 스테드, 폐쇄 C형 및 U형 철근 등으로 접합된 RC 부재와 철골 부재 접합부를 대상으로 하였다. CF-A 실험체와 CF-B1 실험체는 스테드 접합부로 주근 및 전단보강근의 유무를 변수로 한 실험체이다. CF-D1 실험체는 폐쇄 C형 철근을 접합 연결재로 사용한 실험체이며 CF-D2a 실험체는 U형 철근 및 스테드를 연결재로 사용한 실험체이다.

표 5. 해석 대상 실험체 일람표

실험체명	주근	전단보강근	연결재
CF-A	5-D13	φ6@125	스테드(φ13-80mm) 4개
CF-B1	-	-	스테드(φ13-80mm) 4개
CF-D1	5-D13	φ6@125	폐쇄 C형 철근(D13)
CF-D2a	5-D13	φ6@125	스테드(φ13-80mm) 4개, U형 철근(D13)

3.2 접합부 모델

해석시 철근과 콘크리트의 부착은 ANSYS 프로그램상에서 고려 될 수 있는 완전 부착으로 하였다. 스테드와 콘크리트의 접합면은 부착과 지압을 고려해야 하는데 스테드의 부착강도(bond strength)는 콘크리트에 손상이 발생되면 급격히 저하되어 부착강도⁵⁾를 상실하게 된다. 또한 주로 전단 연결재로 사용되는 스테드의 경우 문힘길이가 적어 부착력이 크지 않아 스테드 머리에서 전달되는 지압력에 의한 콘크리트의 콘형파괴가

나타난다. 따라서 본 해석 모델링에서는 스테드와 콘크리트 사이의 부착메커니즘이 접합부 거동에 영향을 미치지 않는다고 보고 인장력을 받는 스테드의 머리부분은 콘크리트와 완전 부착된 것으로 가정하였으며 스테드의 기둥부분은 콘크리트와 미세한 거리만큼 떨어진 것으로 모델링하여 부착력을 고려하지 않았다.

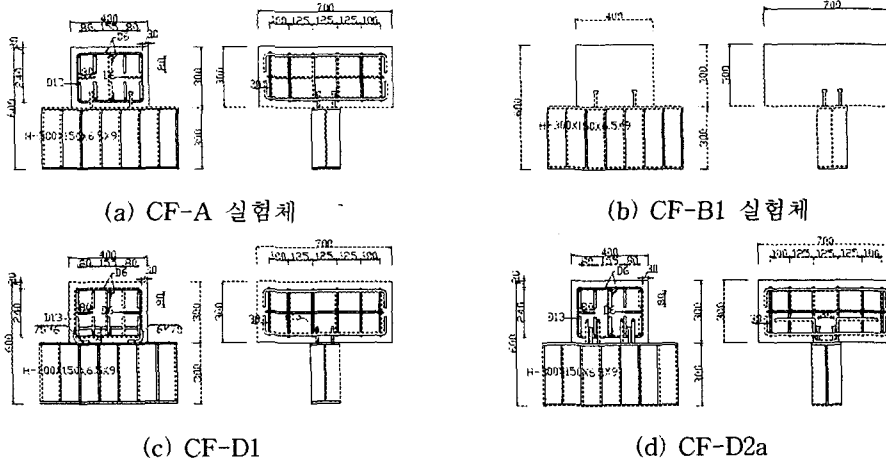


그림 4. 해석 대상 실험체의 치수 및 형상

3.3 가력방법 및 지지조건

해석은 파괴하중에 도달할 때까지 점진가력을 하였으며 하중 증분에 따른 오차를 해결하기 위하여 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson Method)을 사용하였다.

해석에 사용된 실험체의 가력방법은 그림 5와 같이 H형강에 압축력을 가하여 접합부에 인장력이 발생하도록 하였지만 본 해석상에서는 해석 모델의 단순화를 위하여 그림 6과 같이 H형강을 제외하고 직접 연결재에 인장력을 주었으며 지지조건은 실험시 지지대의 내부면을 기준으로 단순보 형태로 지지하였다.

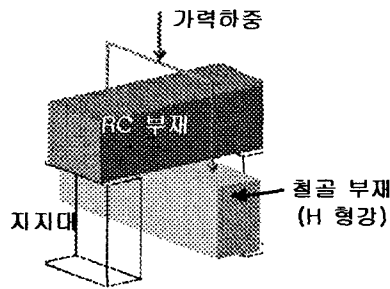


그림 5. 실험체 가력방법

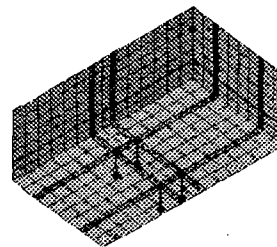


그림 6. 해석 모델 가력 방법

4. 해석 결과 및 분석

4.1 응력 분포 및 변형

실험체의 하중이 항복하중에 도달할 시 스티드를 연결재로 사용한 CF-A 실험체의 콘크리트 부분에 대한 응력 분포와 변형형태를 그림 7(a)에 나타내었다. 그림에서 스티드를 연결재로 사용할 경우 스티드 머리에서 전달되는 지압력에 의하여 콘크리트가 콘 형상으로 인장응력에 도달하는 것을 알 수 있다. 그림 7(b)는 폐쇄 C형 철근을 연결재로 사용한 CF-D1 실험체의 응력 분포와 변형형태를 나타낸 것이다. 폐쇄 C형 철근은 Link 요소로 콘크리트와 일체적으로 거동하기 때문에 그림의 응력 분포는 철근에 작용하는 인장응력이 내포되어 표현된 것이다. 그림에서 폐쇄 C형 철근의 90°로 굴곡된 부분이 인장 항복응력에 도달한 것을 볼 때 충분한 정착내력이 확보된 것을 알 수 있다.

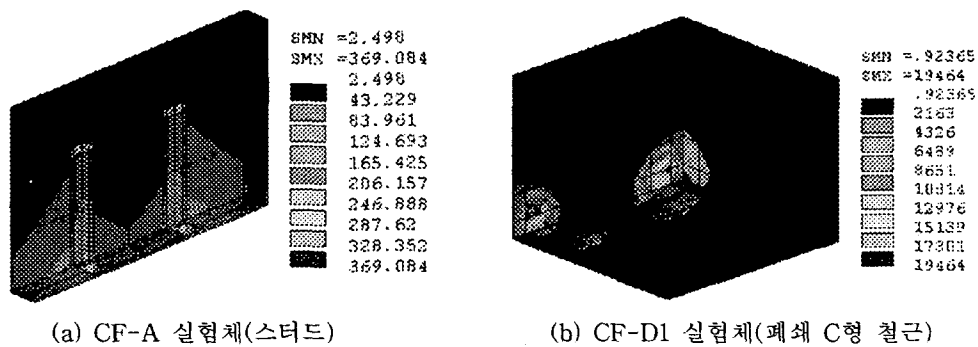


그림 7. 항복하중시 응력 분포 및 변형

4.2 균열 양상

주요 실험체에 대한 초기균열의 양상과 항복하중시의 균열양상을 각각 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 초기 균열의 경우 모든 실험체들이 콘크리트 면의 연결재 끝단 주위의 콘크리트가 국부적인 초기 균열을 나타내었다. 항복하중시에는 스티드를 사용한 실험체의 경우 콘형태의 균열양상을 보였으며 스티드 머리에서의 균열 각도는 ACI349에서 가정하고 있는 45°보다 크게 나타나 파괴면적이 확대되었다. 폐쇄 C형 철근을 연결재로 사용한 CF-D1 실험체의 경우 철근의 정착에 의하여 C형 철근으로 구속된 콘크리트 전반에 걸쳐 균열이 진행된 것을 확인할 수 있다.

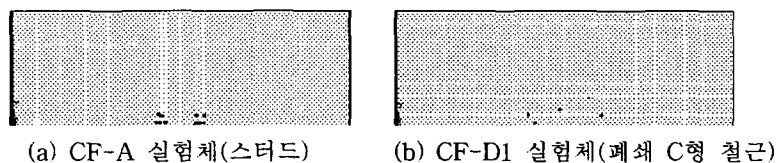
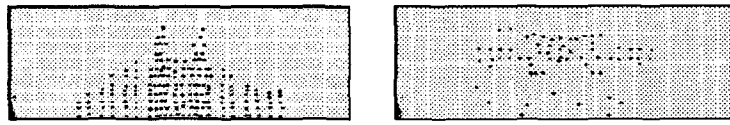


그림 8. 초기 균열 양상



(a) CF-A 실험체(스터드) (b) CF-D1 실험체(폐쇄 C형 철근)

그림 9. 항복하중시 균열 양상

4.3 하중-변위곡선 비교

해석결과 및 실험결과에 의한 하중-변위 곡선을 비교하여 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 스테드가 연결재로 사용된 실험체(CF-A, CF-B1)의 경우 내력면에서 3~8% 편차를, 인장 강성에 대해서는 5~10%의 편차를 보여 실험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 평가되었다. 또한 실험에서와 같이 주근 및 전단 보강근이 인장내력 증가에 기여하는 것으로 확인되었다. 폐쇄 C형 실험체(CF-D1)의 경우 내력에서는 해석치가 8% 과대평가하고 있었지만 거동형상은 유사한 것으로 나타났으며 U형 철근과 스테드를 혼합하여 연결재로 사용한 실험체(CF-D2a)는 내력 및 거동면에서 해석결과가 실험결과를 매우 유사하게 평가하고 있는 것으로 나타났다.

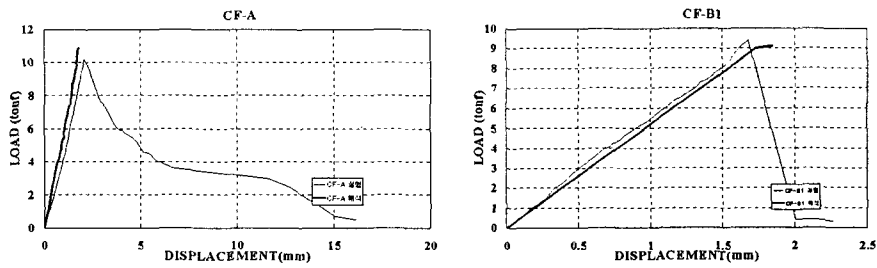


그림 10. 실험과 해석에 대한 하중-변위 곡선(스터드 연결재)

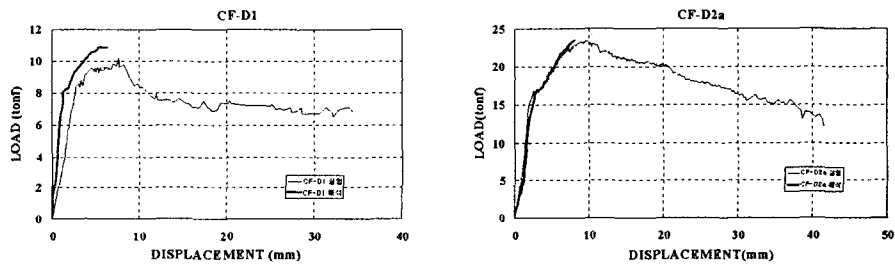


그림 11. 실험과 해석에 대한 하중-변위 곡선(이형 철근 연결재)

5. 결 론

인장력을 받는 RC 부재와 철골 부재 접합부의 비선형 유한요소해석에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 스티드를 연결재로 사용한 실험체의 경우, 응력분포와 균열양상이 콘 형태로 나타났으며 스티드 머리에서의 균열 각도는 ACI349에서 가정하고 있는 45° 보다 크게 나타나 파괴면적이 확대되었다. 또한 주근 및 전단보강근이 인장력을 받는 콘크리트를 구속함으로써 접합부의 인장내력 증진에 기여하는 것으로 평가되었다.
- (2) 폐쇄 C형 실험체의 경우 90° 로 굴곡된 철근 부분의 인장 항복에 의해 내력이 결정되어 본 연결재가 충분한 정착내력이 확보하고 있음을 알 수 있었다. 균열양상에 있어서도 철근의 정착에 의하여 C형 철근으로 구속된 콘크리트 전반에 걸쳐 균열이 진행된 것을 확인할 수 있다.
- (3) 본 연구의 FEM 해석모델을 이용한 주근비와 전단 보강근비, 콘크리트 강도 및 연결재의 치수변화에 따른 접합부의 해석을 통하여 이들 변수에 따른 보다 명확한 내력식 제시가 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구 결과는 한국과학재단지정 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터(STRESS)의 연구비 지원하에 이루어진 연구의 일부로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) 이태석, 김승훈, 서수연, 이리형, 홍원기, “스티드 볼트 접합부의 인장거동에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제13권, 제4호, 2001.8, pp. 321-328
- 2) 삼성중공업(주), 초대형구조시스템연구센터, “SPS 공법의 개발 및 성능 평가에 관한 연구”, 2001. 3
- 3) ANSYS Swanson Analysis System, Inc. ANSYS User’s Manual for Release 5.5
- 4) 박정현 “보 상부철근의 슬래브 내 분산 배근에 따른 휨 강도 연구”, 홍익대학교 박사학위논문, 2001.6
- 5) 천성철, 정석창, 김대영, 김상구, “철근의 기계적 정착”, 콘크리트학회지, 제13권, 1호, 2001. 1
- 6) 박성균, 김호섭, 윤영수 “콘크리트 CIP 앵커시스템의 파괴 거동에 관한 연구”, 한국구조물진단학회, 제5권, 제3호(2001. 7)