

# 부착할열파괴에 대한 콘크리트의 횡구속에 관한 연구

A Study on the Confinement of Concrete from Splitting Bond Failure

최 완 철\*      정 일 영\*\*  
Choi, Oan Chul      Chung, Il Young

The confinement of concrete from splitting bond failure is studied with the experiments and finite element models. The cracks in the test beam-end specimens containing various covers show a typical splitting failure with a dominant fracture surface. The finite element model includes representation of the splitting cracking using Hillerborg's fictitious crack model. The increases in bond strength from addition of covers are consistant for both test bars and numerical models. The numerical solution agrees well with the test results and also with the empirical equations. The splitting crack in the numerical models generally matches the crack surface observed in the laboratory. The confinement of concrete from splitting is one of the governing factors in the ultimate bond force.

## 1. 서론

합성재료의 특성상 철근과 그것을 싸고있는 콘크리트사이의 부착은 철근콘크리트공학의 중요한 기본메카니즘의 하나이다. 하중의 작용으로 두 재료는 서로간에 밀착되어 응력이 전달되며 부착력은 이들 경계면에서의 작용력이다. 철근과 콘크리트 상호간에 전달되는 부착력의 최대내력 즉, 부착강도를 근거로 정착 및 이음길이를 적절히 설계하여 구조물의 안전을 합리적으로 확보한다.

부착강도는 압축강도를 포함한 콘크리트의 품질, 철근의 형상및 재료, 또한 철근주위의 횡구속(confinement) 정도에 의하여 복합적으로 영향을 받는다. 개정된 ACI 318-89에서 콘크리트 피복두께, 철근간격 및 횡 보강근(늑근, 대근)의 부착강도에 대

한 중요성을 인정하여 이들을 정착길이 산정시의 중요항목으로 규정하고 있다. 동시에 피복두께를 포함한 이들 횡구속정도에 따라 부착할열파괴(splitting failure)를 예상하여 이에 근거되어 정착길이가 결정되도록 여러개소에서 언급하고있다.

최근연구에 의해 부착파괴에 관한 지식이 발전되어가고, 이형철근에서의 마디주위에 발생하는 미세현상에 관해서도 관심이 모아지고 있다. 부착력은 철근의 마디의 돌기(lug)에 의하여 방사형태로 주위의 콘크리트에 전달되고 결과적으로 콘크리트피복이 할열파괴된다.

본 연구에서는 부착기구에 대한 이론적 이해를 발전시키기 위해 유한요소법에 의해 부착할열파괴를 재현한다. 해석적 결과는 부착모델의 타당성을 검토하기 위하여 실험에 의한 연구부분과 비교된다. 연구의 결과는 부착할열파괴에 대한 이해를 높이고, 부착강도에 대한 콘크리트 횡구속의 영향을 규명하여 정착길이 설계에 방향을 제시한

\* 정회원, 숭실대학교 건축공학과 조교수

\*\* 정회원, 서울대학교 건축학과 교수

다.

## 2. 부착할열파괴

부착파괴는 콘크리트 피복두께방향의 조개짐파괴(splitting failure) 또는 할열파괴와 콘크리트-철근사이의 재료파괴(material failure)에 의한 철근의 뽑힘파괴(pullout failure)로 대별된다. 이들 부착파괴형태는 이미 언급한 부착력 영향인자에 상관되며 특히 횡구속의 정도에 좌우되며 결과적으로 부착강도를 결정한다. 예컨대 구속정도가 충분히 크지않은 경우, 콘크리트 피복두께방향으로 조개짐파괴가 일어나며, 따라서 피복두께 증가에 따라 부착강도는 증가한다.

이형철근에서의 응력은 주로 철근마디(deformation)의 돌기(lug)와 주위 콘크리트 사이의 기계적인 물림(interlocking)에 의해 전달된다. 최근 연구에 의하면 돌기에 의해 콘크리트에 전달되는 힘의 합력은 철근의 길이방향에 대해  $\beta$ 의 각도로 기울어져 작용된다고 본다(그림 1). 부착력, 즉 철근의 축에 평행한 힘의 성분을  $u$  라고할때, 이러한 부착력으로 인한 방사성분은  $u \tan \beta$  가 된다. 이와 같이 철근주장에 걸쳐있는 돌기로부터 방사(radial) 형태로 응력이 전달되고 이들 방사형의 응력성분이 콘크리트의 피복두께에 인장을 발생시키고 종국적으로는 조개짐파괴를 일어나게 한다.

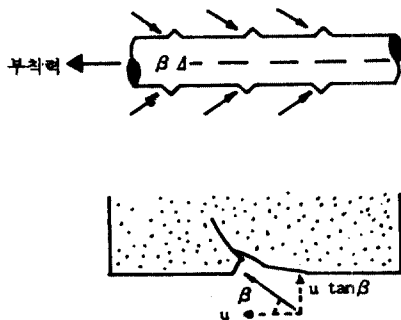
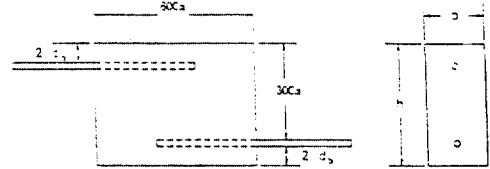


그림 1 철근 마디돌기주위의 응력성분

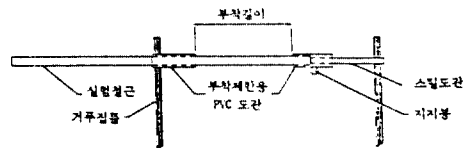
## 3. 실험적 고찰

부착 시험체 : 본 연구에서는 보단부 부착 시험체(beam-end-specimen)를 사용하여 부착강도를 측정된 결과를 이용한다. 보단부 부착시험체(그림 2)는 폭이 23 cm 이고 길이가 60 cm 이며 깊이는 상단철근을 실험하기 위한 높이 30 cm 와 피복두께의 합이 된다.

본 실험연구에서는 3개 그룹의 총 23개의 보단부실험체로 한다. 철근은 ASTM A 615 Grade 60 인 16 mm 와 25 mm 가 사용되었다. 사용된 콘크리트의 강도는 350 kg/cm<sup>2</sup> 와 420 kg/cm<sup>2</sup> 이며 비공기 연행 콘크리트가 사용되었다. 실험과정에서 부착력, 정착된 철근의 양단부(loaded and unloaded ends)의 슬립량이 측정되었다.



(a)시험체 치수



(b)실험철근 설치도

그림 2 보 단부 시험체

### 실험결과 및 분석:

실험결과로 부터 그림 3는 철근직경으로 환산된 피복두께, 직경환산피복,에 따른 부착강도의 변화를 나타내고 있다. 제 1 그룹에서는 D 25의 상단철근, 제 2 그룹에서는

D 16의 하단철근이, 제 3 그룹에서는 D 25의 하단철근의 시험결과이다. 피복두께 증가에 따른 부착강도 증가는 콘크리트 타설시 철근의 위치에는 대체로 무관하나 철근의 크기에 관계됨을 보여준다.

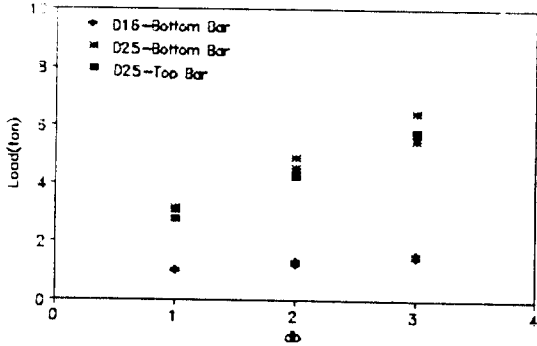


그림 3 피복두께 증가에 따른 부착강도증가

그림 4은 부착실험에서 얻은 하중-슬립곡선으로 비선형 부착내력을 보여주며 더욱 중요하게 최고점에서 부착력의 급락을 나타내어 대표적인 부착의 취성파괴현상을 보여주고 있다.

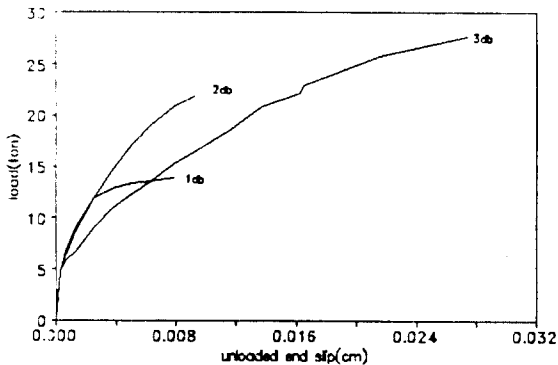


그림 4 부착-슬립곡선

#### 4. 해석적 고찰

부착모델: 보단부시험체의 부착실험과정에서, 콘크리트 균열은 내부에 정착된 철근주위에서 시작하여 피복두께방향으로 순간적으로 진행되며, 철근을 중심으로 피복두께

가 둘로 쪼개어지는 것으로 관찰된다.

시험후 피복두께를 제거하면 그림 5과 같이 쪼개짐면이 보여지며, 정착길이 만큼의 길이와 피복두께 및 그의 반대측의 일정량의 깊이를 갖는 삼각형의 쪼개짐면으로 관찰된다. 따라서 피복두께 증가에 따라 쪼개짐면이 커지고 파괴에너지가 증가되고 결과적으로 부착강도가 증가하는 것으로 판단된다.



그림 5 부착합열파괴면

이러한 부착파괴로 인한 쪼개짐면은 파괴역학의 대표적인 파괴면(fracture surface)으로 추정될 수 있다. 또한 파괴면은 파괴역학의 벌림모양(opening mode), 즉 국부변위가 파단면에 대해 대칭형으로, 대칭면에 직각되어 두 파단면은 각각 반대방향으로 벌어지는 것으로 추정될 수 있다.

이러한 추론으로부터 시험체의 부착파괴인 쪼개짐파괴는 비선형파괴역학(non-linear fracture mechanics)의 개념을 도입한 Hillerborg의 가상(fictitious)균열모델을 이용하여 재현할 수 있다.

시험체 균열면은 대칭형의 균열면에 직각되게 rod 요소를 배치하여 표현하며 가상균열모델을 적용한다. 이 rod 요소는 초기의 탄성하중, 즉 균열에 필요한 응력에 도달되기 이전에는 높은 강성을 갖게 하여 변위를 극소화시키고, 일단 인장강도에 도달시에는

정의된 응력도-변위(stress-displacement) 곡선을 따르게하여 균열 발생후를 나타내게 한다.

실험에 사용된 콘크리트의 압축강도에 따라 인장강도와 파괴(fracture)에너지를 추정하고 응력도-변위곡선의 면적은 파괴에너지와 같다는 파괴역학의 기본개념에 따라 콘크리트인장강도가 소멸하는 위치를 얻는다.

본 연구에서 철근과 콘크리트사이의 경계면은 3차원의 경계면요소(interface element)를 사용하여 표현하였다. 경계면요소의 주요 특성은 정의된 슬립면(slip surface)으로 경계면에 따라 비선형의 미끄러짐을 발생시킨다. 수직응력도와 접선응력도의 조합에 따른 이러한 슬립면은 3차원의 경계면 요소에 대해 원추형으로 표현된다. 원추형의 축이 수직응력도이며 원추의 경사각을 마찰계수  $\mu$ 로, 또한 수직응력이 없을 때의 원추의 반경을 경계면요소의 점착력(cohesive strength)  $c$ 로 각각 나타낸다. 경계면상에서의 전단응력도가 그때의 대응되는 정의된 슬립면상의 값을 초과할때 슬립이 발생된다.

보단부시험체의 대칭성을 이용하여 시험체의 절반을 해석모델로 한다. 원형의 이형철근을 단순화 하여 사각형으로하고 그 한면에 마디모양을 나타낸다. 마디의 높이, 마디의 경사각등은 D 25 철근의 실제치수를 사용하였다.

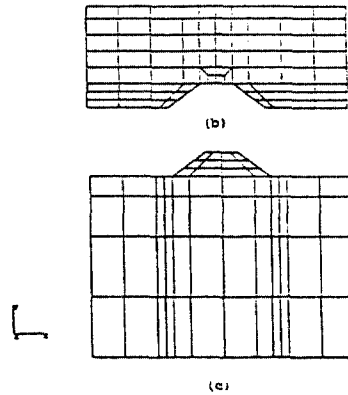
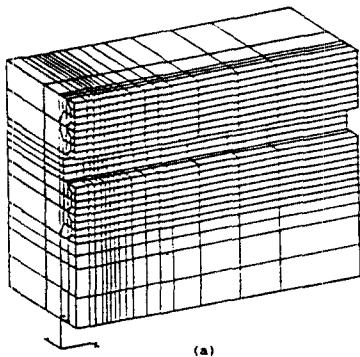


그림 6 유한요소 해석모델

3차원의 유한요소모델은 3개의 substructure로(그림 6), 즉 철근, 내부콘크리트, 그리고 외부콘크리트substructure로 구성된다. 내부콘크리트와 철근은 경계면요소(interface element)를 통하여 상호 연결된다. 외부콘크리트는 또한 콘크리트의 쪼개짐 균열(splitting crack)을 재현시키도록 대칭면에 따라서 재료의 비선형을 나타내는 rod의 요소가 붙어있다.

해석결과: 부착모델에 대한 평가는 먼저 하중-슬립곡선에 의해 시행될 수 있다. 하중 초기부터 서서히 점착력이 소멸되고 마찰력이 부착력에 결정적이 된다. 하중초기에는 점착력이 유지되나, 일단 슬립이 발생됨에 따라 점착력이 없어지는 것으로 관찰된다. 즉 이형철근 마디의 돌기부분과 콘크리트사이의 압축력에 의한 마찰력이 주로 부착력에 영향을 주게된다.

초기의 하중단계를 지나 슬립이 하중증가에 따라 계속되고 하중-슬립곡선은 비선형곡선으로 나타난다. 이때의 이러한 비선형의 원인은 경계면상의 재료의 비선형에 의한 부분이 아니고 콘크리트의 쪼개짐균열이 생성됨으로 부터 얻어진 것이다. 이러한 비선형의 거동은 최대하중점에 이르기까지 단조로운 곡선으로 계속된다.

그림 7는 콘크리트 내부의 균열파급(crack propagation) 현상을 보여주고 있다. 콘크리트의 파괴는 철근상하부에서 시작되어 피

복두께 및 철근아래 양방향으로 진행되며 특히 상부피복두께 방향으로 급속히 발전된다. 해석결과 보여진 균열면은 대체로 삼각형으로 실험실에서 관찰된 균열면과 유사하며 fracture에 의한 균열면이라는 가설이 검증된다.

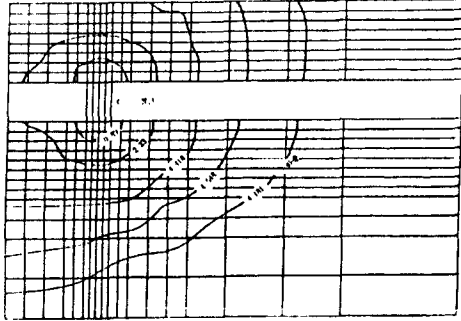


그림 7 균열면의 파급

그림 8에서 보듯이 최대하중이후, 대표적인 취성파괴인 급격한 부착파괴를 보여주고있다. 즉 썰기의 적은 양의 벌어짐으로 인해 슬립이 증가되고 증가된 슬립은 더욱 썰기의 쪼개짐을 가속시켜 급격한 파괴로 이르게한다. 이러한 취성파괴는 콘크리트재료가 취성이라는 특성뿐만아니라 썰기모양의 작용(wedging action)으로 피복두께의 쪼개짐파괴시 콘크리트의 파괴(fracture)로 설명되어진다. 이와같은 파괴 추론에 따라 부착열파괴가 극히 취성임이 설명되고 또한 콘크리트피복에 의한 구속정도가 최대 부착력, 즉 부착강도의 주 결정요인의 하나라고 관찰되었다.

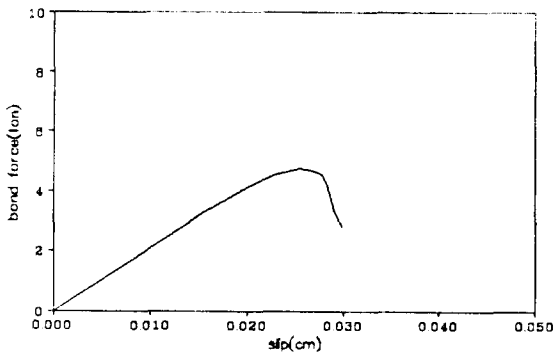


그림 8 부착-슬립곡선 (1db 모델)

그림 9은 콘크리트의 피복두께를 주요변수로 한 해석결과로서, 해석모델에서 피복두께를 철근직경의 각각 1 배, 2 배, 3 배로 한 경우의 부착력-슬립 곡선이다. 부착강도는 각각 4.50, 5.90, 7.52 ton으로 그림에서 보듯이 피복두께 증가에 따라 부착강도가 증가되는 것으로 실험결과와 일치된다.

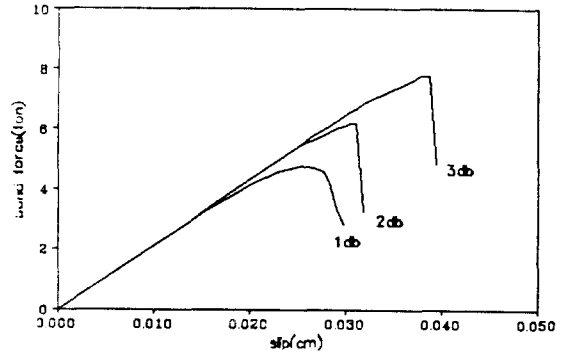


그림 9 부착-슬립곡선 (1db, 2db, 3db 모델)

그림 10은 실험결과에 의한 부착강도와 해석결과에 의한 추정치의 직접 비교를 보여주고있다. 그림에서 표준인 철근직경의 2 배 피복두께에 대한 각각 다른 경우의 부착강도의 비를 비교하고 있다. 유한요소해석 결과로 얻은 데이터에 cubic spline function을 적용한 곡선이 실험결과와 비교되며 해석결과는 실험데이터의 범위내에 있어 대체로 잘 일치되고 있음을 보여준다.

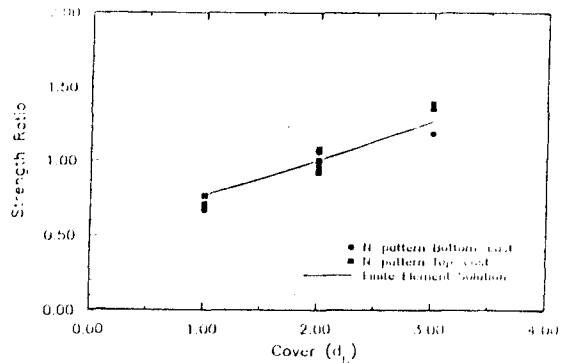


그림 10 피복두께-부착강도율 (실험과 해석결과의 비교)

그림 11 은 이들의 결과에 전절에서 언급된 부착강도에 대한 기존의 경험식을 함께 나타내고 있다. 본 연구의 해석결과는 Orangun 식에 가장 근접하고 Zsutty 식에 가까우며 Jimenez 식과는 차이가 있음을 보여주고 있다. 전자의 두식이 부착강도를 보다 잘 나타내는 식임으로 해석모델의 타당성을 보여주고 있다. 해석의 결과와 실험및 기존의 경험식의 이러한 일치는 이상에서 논의된 부착할열파괴의 메카니즘에 대한 가설을 검증시켜준다.

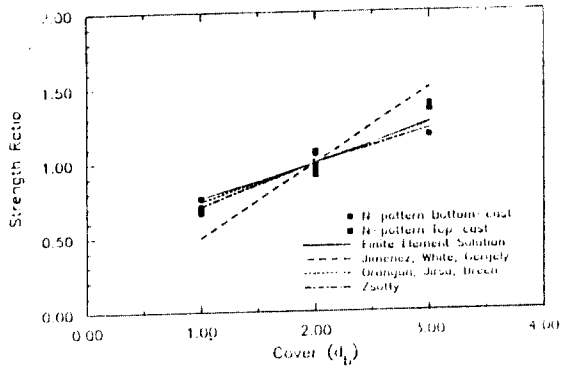


그림 11 피복두께-부착강도율  
(경험식과 해석결과의 비교)

## 5. 결 론

급격하고 취성이 높은 철근콘크리트보의 부착할열파괴에 관해 실험적 방법과 유한요소법에 의해 비교 연구되었다. 해석의 결과와 실험에 의한 결과는 대체로 일치하며, 이러한 일치는 논의된 할열파괴의 메카니즘에 대한 가설을 검증시켜주고 부착기구에 대한 이해를 높여준다.

조개짐 균열은 철근의 상하에서 출발하여 피복두께방향 및 철근의 아래방향으로도 파급되어 대체로 삼각형의 조개짐면을 보여준다. 부착할열파괴는 철근마디돌기의 썩기작용으로 콘크리트의 횡구속이 fracture에 의해 파괴되는 것으로 설명된다. 부착할열파괴는 극히 취성이고, 콘크리트의 횡구속이 부착강도를 결정하는 중요한 요인이 됨이 확인되었다.

## 참 고 문 헌

- 鄭日榮, 철근콘크리트부재의 전단기구에 관한 연구, 1987, 4 pp95-102
- 崔完喆, 비선형 유한요소법에 의한 에폭시 피막된 철근의 부착에 관한 연구, 한국콘크리트학회, 1991.5
- ACI Committee 318. (1989). "Building Code requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89) and Commentary (ACI 318R-89)," American Concrete Institute, Detroit, MI, 353pp.
- Choi, Oan Chul, Hadje-Ghaffari, H., Darwin, D., McCabe, S.L. "Bond of Epoxy-Coated Reinforcement to Concrete : Bar Parameter," ACI Material Journal, March, pp 207-217
- Darwin, D., McCabe, S.L., Choi, O.C. (1990). "Evaluation of Bond Performance of Epoxy-Coated Reinforcing Steel Using Nonlinear Finite Element Analysis," Proceeding, ASCE Material Congress, Denver, CO, August, pp.135-44.
- Orangun, C. O., Jirsa, J. O. and Breen, J. E. (1977). "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," Journal of the American Concrete Institute, Vol. 74, No. 3, March, pp. 114-122.
- Petersson, P-E, (1981). "Crack Growth and Development of Fracture Zone in Plain Concrete and Similar Materials," Report TVBM-1006, Div. of Bldg. Materials, University of Lund, Sweden, 174 pp.