
고강도콘크리트의 부착특성에 관한 유한요소해석

A FEM Analysis on the Bond Properties of High Strength Concrete



홍건호*

ABSTRACT

The mechanical and structural properties of HSC (high strength concrete) is very different from normal strength concrete. In this study FEM analysis is performed to advance a theory for bond design in HSC. The main analysis variables are selected by concrete compressive strength, bond length and cover thickness. The purpose of this study is to reconcile theory and test by developing simplifying 2-D models and to explain the experimental behavior observed during tests by analysis results. The finite element model in this study is modeled to represent actual tested beam-end specimen shape. But due to symmetry, only one-fourth of the beam-end specimen is modeled.

The principal results of this study is that bond strength of HSC is linearly proportional to concrete cover thickness, but is not proportional to bond length. This is the same results with previous tests. The reason of this phenomenon is verified by analysis results that the increase of concrete stiffness in HSC induce stress concentration on loading area, hence the bond stress is not uniformly distributed on bond length.

* 정회원. 호서대학교 건축학부 전임강사

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 10월 31일까지 학회로 보내주
시면 1998년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

Keyword : high strength concrete, bond strength, FEM analysis, bond length, cover thickness, compressive strength

1. 서론

콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 나타나게 되는 여러가지 역학적 특성의 변화는 기존의 보통강도콘크리트를 대상으로 성립된 각종 가정 및 설계 기준의 적용에 한계가 있음을 나타내게 된다. 이에따라 선진 각국에서는 고강도콘크리트의 개발 및 역학적 특성을 고려한 설계기준의 개발에 많은 인력과 시간을 투자하고 있으나 아직까지는 그 특성의 규명이 명확치 않은 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 고강도콘크리트를 철근콘크리트 부재로 사용하기 위한 부착특성의 규명을 위하여 1차적으로 실시한 실험결과¹⁾를 토대로 철근과의 부착거동을 해석적으로 분석하고 이를 기존의 실험결과와 비교·검토함으로써 고강도콘크리트에서의 부착설계를 위한 이론적인 근간을 마련하도록 하였다.

2. 연구의 방법

기존의 연구결과에서 나타나는 콘크리트와 철근 사이의 계면에서 관찰되는 복잡한 관계는 시험체의 형상에 많은 영향을 받게 된다. 따라서 시험체의 형상효과(geometry effect)를 유한요소모델이라는 방법으로 고정시킨 후 재료모델을 반복해석하게 되면, 시험체의 형상과는 독립된 단순한 해를 유도할 수 있다.⁴⁾

본 연구에서는 철근과 콘크리트 사이의 부착거동을 해석하기 위하여, 프로그램내의 계면요소가 다양하고 비선형 유한요소법 해석에 뛰어난 ABAQUS를 주해석용 프로그램으로 사용하였다.

철근과 콘크리트 사이의 부착은 기본적으로 3차원 거동을 보이게 되나 기존의 많은 연구자들이 주로 수직응력과 전단응력의 조합에 의한 평면모델을 활용

하여 계면에서의 접합특성을 분석하고 있다.¹¹⁾ 이에 따라 본 연구에서의 기본적인 모델의 성상은 이형철근과 콘크리트 부착부분의 기하학적 형상을 비교적 실제와 유사하게 모델링시킨 2차원의 평면모델을 사용하였으며, 이 모델을 기초로 하여 철근과 콘크리트 사이의 기본적인 부착특성에의 영향인자들에 대한 변수를 해석하도록 하였다.

3. 해석요소의 모델링

철근콘크리트 부재에서 실제의 계면 구성 거동은 상대적으로 단순한 재료 모델을 이용하여 나타낼 수 있는 것으로 가정한다. 즉, 부착응력도-미끄러짐 관계의 복잡성은 시험체 형상의 영향을 받는 부분이 상당한 것으로 가정한다.⁴⁾ 따라서, 계면에 대하여는 단순한 구성모델을 사용하고 시험체의 형상효과는 유한요소법을 사용하여 가능한 한 정확히 표현하였다. 철근콘크리트 시험체에서 철근과 콘크리트 사이의 미끄러짐은 이형철근의 리브와 주변 콘크리트 사이의 기계적인 상호 맞물림작용에 의하여 주로 저항하게 된다. 이때 콘크리트에 사용된 자갈의 크기와 리브의 위치 등에 영향을 받게 되며, 기계적인 상호 맞물림작용에 의하여 fiber가 하중을 받기 전에 초기 미끄러짐이 있다는 사실을 인식하여야 한다. 또한 철근의 주위에는 매우 낮은 응력도 단계에서도 내부 균열이 형성된다는 사실은 잘 알려져 있다.⁵⁾ 이러한 현상은 계면에서의 콘크리트의 강성을 감소시킴으로써 나타낼 수 있다.

즉, 계면의 콘크리트는 그 탄성계수가 비균열 콘크리트의 탄성계수보다 적게 함으로써 하중의 영향을 더 많이 받는 콘크리트로 가정할 수 있다.

해석에 사용된 콘크리트의 모델은 프로그램내의 콘크리트 모델을 기본적으로 사용하되, 고강도콘크리트의 경우에는 수정된 Fafitis의 모델을 활용하였

다. ^{2,6)}

ABAQUS 내의 요소(Element)에는 두개의 이질 재료 사이의 계면을 표시할 수 있는 계면요소로 크게 갭요소(Gap Element)와 계면요소(Interface Element)의 2가지로 구성되어 있다.

두가지 요소 사이의 가장 큰 차이점은 갭요소의 경우에는 유한요소의 절점과 절점을 스프링 등을 이용하여 연결하여 주도록 되어 있으며, 반면에 계면요소의 경우에는 절점 사이의 연결 및 선과 면 사이를 접촉, 마찰의 개념으로 연결시킬 수 있도록 되어 있다.

기존의 연구자들에 의한 부착모델⁷⁾에서는 철근과 콘크리트 사이의 부착요소로 대부분 갭요소와 유사한 2차원의 연결요소(linkage element)를 사용하였다. 그러나, 이와같이 2차원 연결요소를 사용한 모델링은 실제 철근과 콘크리트 사이의 부착기구를 각 절점사이에 위치한 스프링의 강성으로 치환하여야 하며, 접촉면의 접촉과 분리시의 강성행렬을 재구성하여 주어야 하는 단점이 발생하게 된다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트와 철근 사이의 계면을 Fig. 1과 같은 4절점 계면요소를(INTER2) 사용하여 모델링하였다.

접촉면에서 두 요소의 거동을 나타내게 되는 계면요소의 기본적인 접촉 알고리즘은 Fig. 2와 같은 주와 종속의 알고리즘(master and slave algorithm)을 갖게 된다. 즉, 두개의 요소는 각각 주 표면과 종속 표면으로 구성되며, 이때 주 절점은 종속 표면 내로의 변형이 가능하나, 종속 절점의 경우에는 주 표면 내로의 이동이 불가능하게 되며, 따라서 접촉방향은 항상 주 표면에 대하여 수직을 유지하게 된다. 이러한 방향성을 그림으로 도식하면 다음의 Fig. 3과 같다.

계면요소의 접촉면에서의 하중전달은 두 요소 사이의 간격(clearance)에 의하여 접촉하중이 변화하게 되며, 본 연구에서는 ABAQUS 내에 내장된 여러 함수중 다음의 Fig. 4와 같은 접촉압력(contact pressure)-간격의 관계를 사용하였다. 즉, 두개의 요소 사이의 간격이 0인 경우에는 어떤 크기의 압축하중도 전달이 가능하게 되며, 상호간의 간격을 벌여지게 하려는 인장하중에 대하여도 p^0 만큼의 접촉력이 저항하게 된다.

또한, c 만큼의 중첩거리 이상으로 두개의 요소가

상호간의 중첩이 일어나지 않도록 하며, 두개의 요소 사이의 간격이 발생하게 되면 하중의 전달이 일어나지 않게 된다.

계면요소의 마찰모델(friction model)은 Fig. 5와 같은 Coulomb의 모델을 사용하였다.

4. 해석 계획

본 연구에서 사용한 평면 해석모델의 기본적인 기하학적 형태는 보단부형 부착시험체를 평면모델로 변형시킨 것으로써 그 개념은 다음의 Fig. 6과 같다.

Table 1 Analysis variable design

	Bond length (Rib number)	Cover thickness	Concrete strength (kg/cm ²)
Variable	1.5 d. (2)	1 d.	270
	3 d. (4)	2 d.	500
	4.5 d. (6)	3 d.	800 900

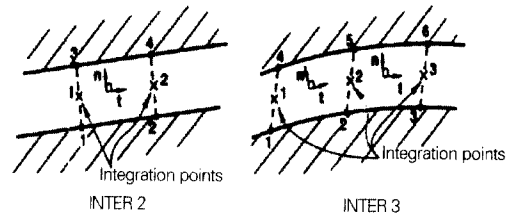


Fig. 1 Interface Element

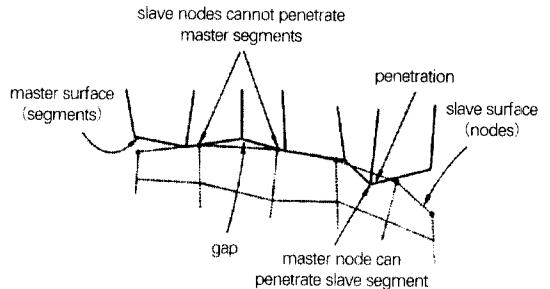


Fig. 2 Master & Slave Contact Algorithm

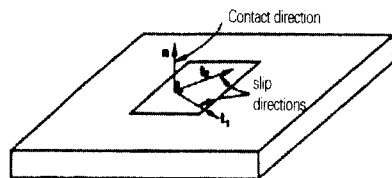


Fig. 3 Local coordinate of Interface Element

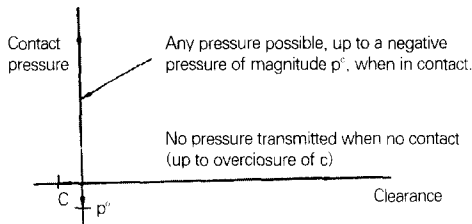


Fig. 4 Contact Pressure-Clearance Relationship

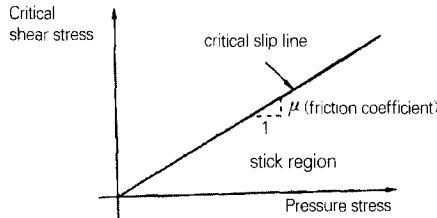


Fig. 5 Friction Model

가력부분의 하중축 선단길이(lead length)는 $3d_s$ 로 고정시키고 해석변수로서 철근과 콘크리트의 부착길이, 콘크리트의 피복두께 및 압축강도를 Table 1과 같이 계획하였다. 사용된 철근 및 콘크리트의 요소는 Plane Stress Element를 사용하였으며, 이때 일정한 응력도가 가정되는 요소의 두께는 단위두께 (1 mm)를 사용하였다. 요소의 두께를 전체 모델의 크기에 비하여 적게 가정한 것은 철근의 실제 형상이 원형인 데 반하여 해석모델에서는 두께방향의 응력도가 일정한 사각형태를 갖게 되므로, 그 치수를 제한하여 단면의 면적 및 형태가 실제상황과 큰 차이를 갖지 않도록 하기 위함이다.

철근과 콘크리트 사이의 계면은 양 요소를 연결해주는 4절점의 계면요소를 사용하였다. 사용된 계면요소는 2개의 성상을 갖도록 하여 하중단 쪽의 하중축 선단길이 부분에 사용된 계면요소는 철근과 콘크리트 사이의 부착력이 전혀 없도록 하였으며, 단지 콘크리트 부분이 후면 집중부분에서 전달되는 사선방향의 응력 만을 부담하도록 하였다. 하중축 선단길이 뒷부분의 실제 부착부분의 계면요소는 부착길이에 해당하는 부분에 대하여 마찰계수 0.4를 갖는 계면요소를 사용하여 마찰력과 마디의 지압력에 의하여 부착력을 발휘하도록 하였으며, 두 재료 사이의 점착력은 콘크리트와 강관 사이의 부착력에 대한 국내 실험

결과를 이용하여 10 kg/cm^2 로 가정하였다.³⁾

가력방법은 철근의 하중단 5개의 절점에 등가의 집중하중이 가해지도록 하여 하중조건을 시도하였으며, 철근 주변의 콘크리트에서 균열이 발생하여 철근의 변위가 일정한 하중의 증분없이도 증가하게 되는 시점까지 가력하도록 하였다.

콘크리트의 응력도-변형도 모델은 앞에서 설명한 바와 같이 ABAQUS내의 내장 모델에 수정된 Fafitis의 모델을 접목하여 사용하였으며, 콘크리트의 인장강도는 Dewar의 실험결과에 따라 고강도역에 대하여는 압축강도의 5%, 보통강도의 경우에는 9%로 가정하였다.⁵⁾

모델을 구성하는 각 유한요소의 크기는 철근과 콘크리트 사이의 부착강도에 가장 큰 영향을 미치게 되는 철근 리브 주위의 콘크리트를 기준으로 구성하였다. 이러한 요소의 크기는 모델 전체의 크기에 비하여 상당히 적은 치수를 가지게 됨에 따라 전체 모델을 구성하는 요소의 수가 상당히 증가하여 해석에 소요되는 계산시간 및 용량의 증가가 수반되게 된다. 따라서, 본 연구에서는 부착강도의 발현에 큰 영향을 미치게 되는 계면부위 요소의 크기는 철근 리브의 높이를 기준으로 밀실하게 구성하도록 하고, 부착응력도의 변화가 비교적 크게 나타나지 않는 계면에서 일정한 거리 이상의 요소에 대하여는 계면에서부터의 거리에 비례하여 요소의 길이가 1.2배로 증가하도록 하였다.

한편, 이러한 유한요소의 선택은 Fig. 6에서 나타나듯이 단부 콘크리트에서는 그 세장비가 20 이상이 되는 비정상적인 형상을 지니는 요소가 발생하게 된다. 따라서, 이와같은 요소의 형상이 전체 해석의 결과에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 7과 같이 전체 콘크리트 요소의 형상이 정방형의 형태를 가지고 있는 경우와 비교하여 보도록 하였다. 이에따라 본 연구에서 계획한 평면모델과 요소의 형상을 고려한 모델에 대한 해석의 결과는 Fig. 8과 같다. 그림에서 콘크리트 요소의 형상비에 따른 해석결과는 본 연구에서 계획한 모델과 정방형의 콘크리트 요소를 사용한 해석모델이 거의 유사한 하중-변위곡선을 나타내고 있으며, 다만 부착강도의 최대값에서 약 6% 정도의 차이를 나타내고 있다. 따라서, 철근과 콘크리트 사이의 계면부위에서 일정한 거리가 떨어져 있

는 요소의 세장한 형태는 전체 부착거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

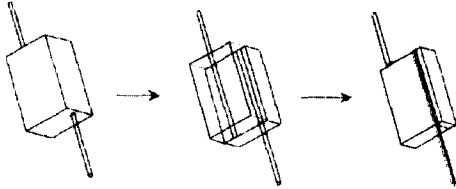


Fig. 6 Plane Modelling concept



Fig. 7 Plane Model concerning element shape

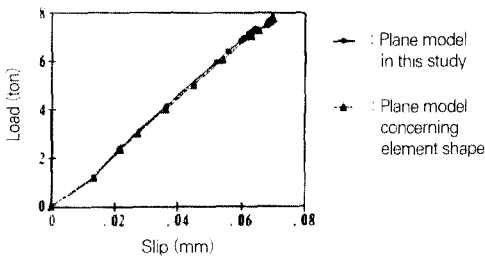


Fig. 8 Load-Slip Curve Comparison between 2 models

이와같이 단부 콘크리트 요소의 형상이 전체 부착 거동에 큰 영향을 미치지 않는 이유는 응력도의 변화량이 피복단부에서는 크지 않기 때문으로 판단된다.

이와같은 요소 형상에 따른 해석의 결과를 종합하여 볼 때 본 연구에서 계획한 유한요소 모델의 기하학적 형태는 타당한 것으로 볼 수 있으며, 이러한 방

법에 의하여 해석모델을 구성하게 되는 요소의 수를 약 6,000개에서 1,500개 정도로 감소시킬 수 있게 되며, 소요되는 시간도 약 4 정도로 감소시킬 수 있었다.

5. 해석 결과 및 분석

위와같이 계획한 부착모델에 대한 해석의 결과를 각 변수별로 비교·분석하고 이를 기존의 실험결과와 비교하여 보면 다음과 같다.

5.1 부착길이에 따른 부착강도의 변화

기존의 규준에서 제시하고 있는 철근의 정착 및 이음길이의 산정은 철근과 콘크리트 사이의 부착응력이 등분포라는 가정에서 출발하고 있다.

그러나, 실제의 경우에는 철근과 콘크리트 사이의 부착응력이 가정에서와 같은 등분포의 형태를 띠지 않으며, 하중단에서의 거리에 반비례하는 응력의 분포를 갖는 것으로 나타나고 있다.

특히 이와같은 현상은 기존의 연구결과에 의하면 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 더욱 커지는 것으로 알려져 있으며, 따라서 고강도콘크리트의 경우에는 부착응력의 분포가 등분포라는 가정하에 정착 및 이음길이를 산정하기에는 무리가 있을 수 있다고 볼 수 있다.

Ghosh et al.¹⁹⁾에 의하면 1993년 콘크리트의 압축강도 700 kg/cm²까지의 보시형체에 대하여 부착실험을 실시한 후 실험결과치를 일반화시킨 결과 그 값이 고강도의 경우에는 보통강도의 콘크리트 경우보다 오히려 적은 값을 나타내었으며, 이러한 이유를 부착응력도의 불균일에서 찾을 수 있었다. 즉, Ghosh et al.이 실험의 결과를 토대로 인장을 받는 이형철근 주변의 콘크리트의 응력을 부착길이를 따라 이상화시킨 결과는 Fig. 9와 같다.

본 연구에서는 이와같은 부착길이의 강도에 대한 영향을 분석하기 위하여 부착길이를 3가지로 조절하여 극한 부착강도를 살펴보았다. 부착길이는 해석 모델의 크기를 고려하여 콘크리트와의 부착부분에 철근의 리브갯수를 2, 4, 6개로 조절하였으며, 이는 각각 1.5 d_s, 3 d_s, 4.5 d_s에 해당한다.

해석결과를 Table 2 및 Fig. 10과 같다. 해석결과

에서 콘크리트의 압축강도 270 kg/cm^2 의 경우, 콘크리트와 철근과의 부착길이가 1.5, 3, 4.5 d_b 로 증가함에 따라 부착강도는 1, 1.8, 2.1배 만큼 증가하는 현상을 나타내었으나, 압축강도 800 kg/cm^2 의 경우에는 증가폭이 훨씬 적은 1, 1.29, 1.38배의 부착강도의 증가를 나타내었다. 고강도콘크리트의 경우에 있어 이처럼 부착길이의 영향을 더 적게 받는 이유는 해석결과의 응력분포를 살펴볼 때, 고강도콘크리트 부재의 경우에는 하중전면의 마디부분에 후면의 마디 부분보다 더욱 큰 응력이 집중하게 되며 이에따라 후면 마디의 주변 콘크리트에 최대응력이 가해지기 이전에 전면 마디 주위의 콘크리트가 할열 파괴되기 때문인 것으로 분석된다. 이와같은 결과는 Ghosh 등의 실험결과에서 나타난 콘크리트의 강도에 따른 철근 주변 응력분포와 유사하다고 볼 수 있다.

한편, 이와같은 부착길이의 변화에 대한 해석결과를 실험결과와 비교하여 보면 Fig. 11 및 12와 같다. 해석의 목적상 해석모델상의 부착길이는 모델의 크

Table 2 Analysis results according to bond length

Bond length	Concrete Strength 270 kg/cm^2		Concrete Strength 800 kg/cm^2	
	Bond strength (ton)	Strength ratio (/1.5 d_b)	Bond strength (ton)	Strength ratio (/1.5 d_b)
1.5 d_b	1.81	1	5.12	1
3 d_b	3.25	1.80	6.58	1.29
4.5 d_b	3.8	2.10	7.09	1.38

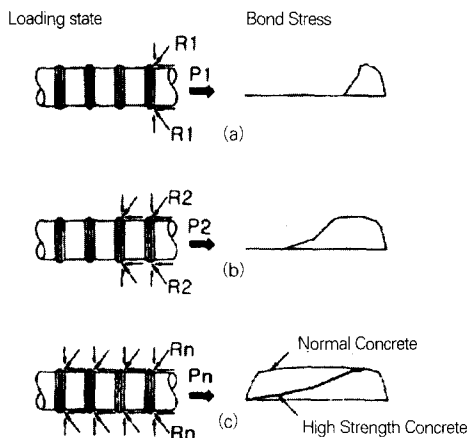


Fig. 9 Concrete stress distribution around re-bar (Ghosh et al.)

기를 줄이고 각 변수간의 상호 영향정도만을 실험결과와 비교하기 위하여 1.5, 3, 4.5 d_b 로 계획하였다. 따라서, 6 d_b 이상의 부착길이에 대하여 실시한 실험결과와의 직접적인 비교대신 부착강도의 증가경향을 부착길이의 증가를 따라 추적하여 본 결과, Fig. 11에서 나타나듯이 해석의 결과와 실험의 결과가 나타내는 부착강도의 증가 기울기가 각 강도에서 비교적 유사하게 나타남을 알 수 있다.

또한, 실험과 해석결과를 비교하기 위하여 부착길이가 증가하는 비율에 따라 부착강도의 증가비율을 그림으로 도식하여 보면 Fig. 12와 같이 그 기울기는 해석결과에서 보통강도 및 고강도콘크리트에서 각각 0.55, 0.19로 나타났다. 한편, 실험결과에서는 증가 기울기가 각각 0.60, 0.17로 나타나 해석의 결과와 약 10% 이내의 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

5.2 피복두께에 따른 부착강도의 변화

피복두께에 대한 제한치를 규정하는 기존 규준에서 채택하고 있는 개념은 주로 철근콘크리트 부재에 있어서의 철근의 내화, 내구 및 콘크리트와의 부착성능의 확보를 보장하기 위한 최소한의 두께라는 개념을 가지고 접근하고 있다. 따라서, 철근콘크리트 부

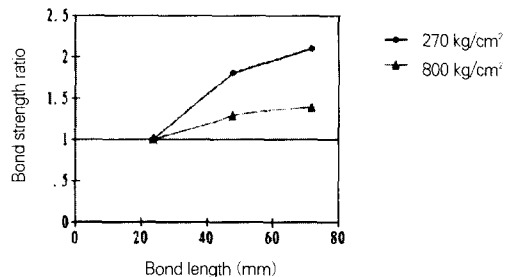


Fig. 10 Analysis results according to bond length

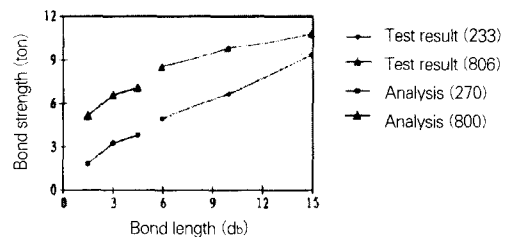


Fig. 11 Results comparison between analysis and tests (bond length)

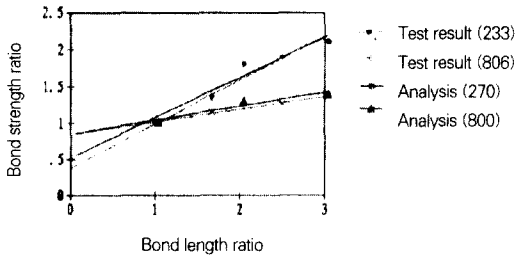


Fig. 12 Results comparison between analysis and tests (bond strength ratio)

재에서 각기 다른 강성을 지니는 두가지의 재료가 일체적으로 거동하기 위해서는 철근 주위의 콘크리트가 철근의 항복점 강도에 도달할 수 있을 정도의 내력을 지니고 있어야 한다. 이를 위해서는 철근 주위의 콘크리트가 철근과의 부착력에 의하여 파단될 때 그 파단선을 추정하여 이에 따른 콘크리트의 파괴하중을 예상하고, 이 값이 철근의 항복강도 이상이 될 수 있도록 보장하여 주는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트의 피복두께를 철근 지름의 1, 2, 3배로 변화시키며, 각 경우에서의 부착강도의 변화를 살펴보았다. 해석결과는 다음의 Table 3 및 Fig. 13과 같다.

해석결과 부착강도에 대한 피복두께의 영향은 콘크리트의 압축강도에 관계없이 콘크리트의 피복두께가 증가함에 따라 철근과의 부착강도가 선형으로 비례하여 증가하게 됨을 알 수 있었으며, 증가 비율은 고강도콘크리트에서 약간 더 크게 나타나고 있다. 이와같은 현상은 콘크리트의 피복두께가 증가함에 따라 콘크리트의 파단면이 커지게 되고, 따라서 전체적인 부착강도가 증가함으로 볼 수 있다.

이와같은 해석의 결과를 기존의 실험결과와 비교하여 보면 Fig. 14와 같다. 그림에서 부착강도에 대한 피복두께의 영향은 실험 및 해석의 결과에서 모두 선형으로 비례하는 경향을 나타내고 있다. 피복두께에 따른 부착강도의 증가율을 선형으로 회귀분석하여 보면 실험결과에 의한 부착강도의 증가기울기는 보통강도 콘크리트의 경우에는 0.03, 고강도콘크리트의 경우에는 0.14로 나타나는 반면, 해석의 결과에서는 보통강도 및 고강도에서 각각 0.02 및 0.04의 기울기를 나타내게 된다. 즉, 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 피복두께의 영향이 더 커지게 되는 현상

은 실험 및 해석의 결과가 동일하게 나타나게 되나, 그 증가율의 경우에는 실험결과에 의한 상대적인 부착강도의 증가율이 해석결과보다 약 2배 이상의 값을 나타내고 있다. 이와같이 실험자료에 의한 기울기의 증가율이 해석의 결과보다 크게 나타나는 이유는 실험에서 사용한 시험체의 경우 해석에서 실시한 모델보다 더 큰 부착길이를 가지고 있으며, 해석수행시에는 실험시와 같이 시험체의 표면까지 균열이 발생되는 완전한 부착 파괴까지 해석을 수행하지 못하고 철근 마디주변의 콘크리트에서 균열이 발생하여 더 이상의 부착능력을 발휘할 수 없는 시점까지만 수행된 관계로 나타난 현상으로 분석된다.

Table 3 Analysis Results to cover thickness

Cover thickness	Concrete Strength 270 kg/cm ²		Concrete Strength 800 kg/cm ²	
	Bond strength (ton)	Strength ratio (/1 d _b)	Bond strength (ton)	Strength ratio (/1 d _b)
1 d _b	3.22	1	5.82	1
2 d _b	3.46	1.08	6.67	1.15
3 d _b	3.80	1.18	7.09	1.22

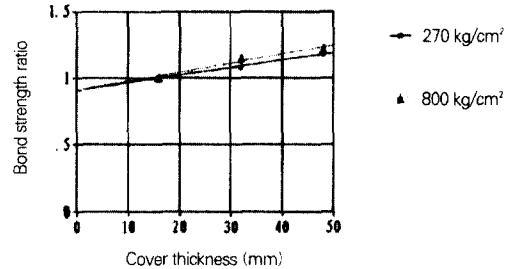


Fig. 13 Analysis Results according to cover thickness

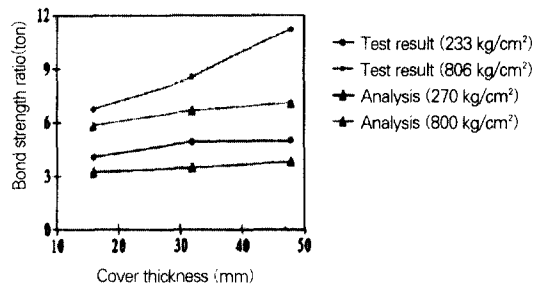


Fig. 14 Results comparison between analysis and tests (cover thickness)

5.3 콘크리트의 강도증가에 따른 부착강도

기존의 연구결과에 따르면 콘크리트와 철근 사이의 부착강도는 콘크리트의 인장강도에 비례하는 것으로 나타나고 있으며, 이때 콘크리트의 인장강도는 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 실시한 해석의 결과에 의하면 콘크리트의 압축강도 270, 500, 800, 900 kg/cm²에 대하여 각각 부착강도는 3.8, 5.24, 7.09, 7.34 ton 으로 나타났으며, 실험결과에 따르면 콘크리트 강도 233, 297, 557, 806 kg/cm²에 대하여 각각 4.98, 6.02, 9.01, 11.19 ton 으로 나타났다. 이와같은 결과를 종합하여 볼 때 극한부착강도의 절대값을 비교하여 보면 해석결과에서 나타난 부착강도의 값이 실험결과의 약 60% 정도에 불과하게 되나, 이와같은 결과는 해석에서 사용한 부착길이의 값이 실험의 75%에 해당하며 해석의 수행과정에서 철근주변 콘크리트의 균열이 일정폭 이상의 값을 가지게 되면 콘크리트요소 주위의 절점에서 수렴문제가 발생되어 해석을 중단시킨 결과로 분석된다.

한편, 이와같은 결과를 콘크리트 압축강도 270 kg/cm²을 기준으로 하여 그 부착강도비를 그림으로 도식하여 보면 Fig. 15와 같다. 그림에서 철근과 콘크리트 사이의 부착강도비는 부착길이 4.5 d_b에 대하여 해석한 결과, 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 대체로 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례하여 증가한다고 볼 수 있다.

또한, 부착길이 6 d_b를 갖는 시험체에 대한 실험결과를 부착강도비로 환산하여 도식한 결과도 그 부착강도비가 해석의 결과와 동일하게 콘크리트 압축강도의 제곱근에 거의 비례하게 됨을 알 수 있다. 이와같은 결과를 종합하여 볼 때, 제한된 길이를 부착길이로 갖는 철근콘크리트 시험체의 경우에는 그 부착강도가 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례한다는 기존의 연구결과를 고강도콘크리트에 대하여도 적용시킬 수 있다.

단, 위에서 비교한 실험 및 해석의 결과는 각각 6 d_b, 4.5 d_b의 제한된 부착길이를 갖는 경우로서 실제 철근의 정착길이에겐 미달하게 된다.

따라서, 앞에서 설명한 부착강도에 대한 부착길이의 영향에 대한 실험 및 해석의 결과와 본 절의 결

과를 종합하여 보면, 제한된 부착길이내의 부착강도는 콘크리트의 인장강도, 즉 압축강도의 제곱근에 비례하게 되나 부착길이가 증가함에 따른 부착강도의 증가효과는 고강도콘크리트일수록 감소하는 경향을 나타내어 철근의 정착을 위한 부착길이는 이러한 효과가 종합적으로 고려되어야 한다고 볼 수 있다.

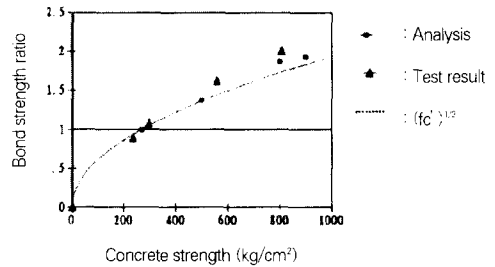


Fig. 15 Bond strength to concrete strength

6. 결론

고강도콘크리트에서의 부착특성에 대한 유한요소 해석의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 철근과 콘크리트 사이의 부착길이에 따른 부착강도의 변화를 해석하여 본 결과, 부착강도는 부착길이의 변화에 직접적으로 비례하지 않으며, 그 정도는 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 더 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이와같은 원인은 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 부착길이를 따른 응력도의 분포가 고르지 않게 됨으로써, 부착길이가 증가하더라도 하중단 부분에 응력이 집중되어 이들 콘크리트 요소가 그 내력을 상실할 때까지 후면 마디 주위의 콘크리트 요소에서는 최대 내력이 발현되지 않아 전체 부착강도에의 영향이 감소되기 때문으로 나타났다. 다만, 본 연구에서 사용한 부착길이가 해석용량의 문제로 실제 철근의 정착길이에겐 미달하므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 볼 수 있다.
- 2) 콘크리트 피복두께의 변화에 따른 부착강도는 피복두께와 거의 선형으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이때, 부착강도의 증가 기울기는 콘크리트의 강도가 커짐에 따라 더 급하게 나

타남으로써, 고강도콘크리트의 경우 보통강도에 비하여 피복두께의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단할 수 있다.

- 3) 콘크리트의 강도와 부착강도와의 관계는 부착길이 4.5 d_b 의 경우에는 대체로 압축강도의 제곱근에 비례하여 증가하는 것으로 나타나, 콘크리트의 인장강도가 압축강도의 제곱근에 비례한다는 일반적인 관점에서 볼 때 적은 부착길이를 갖는 경우에 한하여 그 부착강도가 콘크리트 인장강도에 비례하는 것으로 볼 수 있다.

참 고 문 헌

1. 홍건호, 신영수, 정일영, "고강도콘크리트의 부착특성에 관한 연구," 콘크리트학회지, Vol.8, No.5, 1996.10, pp155~162
2. 홍건호, 정일영, "콘크리트의 강도 및 강성 발현평가에 대한 기초적 연구," 대한건축학회 논문집 제 12권 7호, 1996. 7
3. 조성상, "프리캐스트 콘크리트 접합부 계면의 전단전달 특성에 관한 연구," 서울대학교 건축학과 석사학위 논문, 1994, pp.23-24
4. Subodh Kumar Mital, "Interface Behavior in Reinforced Concrete." Philosophy of Degree of Doctor. Case Western Reserve University, May, 1989
5. Goto, Y., "Cracks formed in concrete around deformed tension bars," Journal of ACI, Vol.68, April, 1971, pp244-251
6. ABAQUS/Standard - User's Manual Vol I, Ver.5.4, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc, 1994
7. Bangash M.Y.H., "Concrete and concrete structures : Numerical modeling and applications," Elsevier applied science, 1989, pp 112-134
8. State-of-the-Art report on high strength concrete, ACI, Sep., 1992
9. Atorod Azizinamini, Mark Stark, John J. Roller, and S.K. Ghosh, "Bond performance of reinforcing bars embedded in high-strength concrete," ACI structural journal, Sep-Oct., 1993, pp.554-561
10. Ezeldin A.S. and Balaguru P.N., "Bond behavior of normal and high-strength fiber reinforced concrete," ACI Materials Journal, Vol.86, No.5, Sep-Oct., 1989, pp.515-524
11. Choi O.C., "Bond Strength of Epoxy-Coated Reinforcement to Concrete," Ph.D. Dissertation, University of Kansas, 1990

요 약

고강도콘크리트의 역학적 특성은 그 압축강도의 증가 이외에도 여러 가지 변화를 갖게 된다. 본 연구에서는 이와같은 여러 특성의 변화중 철근과의 부착특성에 관한 해석적 접근을 통하여 고강도콘크리트부재의 부착설계를 위한 이론적인 접근을 시도하였다. 해석의 변수로는 콘크리트의 압축강도, 부착길이 및 피복두께 등 3가지의 변수를 선정하였으며, 해석의 목적은 본 연구에 앞서 실시된 실험의 결과를 예측할 수 있는 단순화된 모델을 개발하고, 이를 이용하여 부착실험의 결과를 해석적으로 분석하도록 하였다. 이에따라 사용된 모델은 실험에서 사용한 보단부형 부착시험체의 철근과 콘크리트 부착부분의 기하학적 형상을 비교적 실제와 유사하게 모델링시킨 2차원의 평면모델을 사용하였다.

본 연구의 주요결과를 살펴보면 고강도콘크리트의 부착강도는 콘크리트의 피복두께에는 선형으로 비례하게 되나 부착길이에는 비례하지 않는 것으로 나타났다. 이와같은 결과는 기존의 실험결과와도 일치하고 있으며, 그 원인은 콘크리트의 강성증가에 따라 하중단축에 응력이 집중됨으로써 보통강도콘크리트의 경우와 같이 응력의 균등한 배분을 기대할 수 없기 때문으로 나타났다.

(접수일자 : 1998. 2. 3)