

Belite 시멘트를 이용한 고성능 콘크리트의 철근 부착성능 실험연구

An experimental study on Bond strength of Reinforcing steel to
High-performance Concrete using Belite Cement

조 필 규* 김 상 준** 강 지 훈*** 김 영 식**** 최 원 철*****
Cho, Pil-Kyu Kim, Sang-Jun Kang, Ji-Hun Kim, Young-Sik Choi, Oan-Chul

Abstract

Bond strength of reinforcing bar to high-performance concrete using Belite cement is explored using beam end test specimen. The key parameters for the bond test are slump of concrete, top bar effect, and strength of concrete in addition to concrete covers.

Specimen failed in the typical brittle bond failure splitting the concrete cover as the wedging action. The test results show that for the group with portland cement I using superplasticizer additional slump does not decrease the bond strength. Bond strength of the top bar is less than bond strength of bottom bar, but the top bar factor satisfy the modification factor for top reinforcement. The result also show that bond strength is function of square root of concrete compressive strength and cover thickness. More detailed evaluation will be conducted from the test specimen with high strength concrete using the belite cement.

1. 서론

최근 건설시장의 개방과 더불어 토목, 건축 기술이 급속히 발전하고 있으며 대규모의 SOC사업, 민간 부분 대형건설수요의 증가등으로 인해 건설기초재료인 시멘트의 수요가 연간 5000만톤 이상에 달하게 되었다. 이러한 건축물에 대한 요구를 만족시키기 위해서 보다 합리적이고 경제적인 구조시스템의 개발과 함께 구조재료의 성능에 대한 요구도 다양화 되고 있는 실정이다.

따라서 이러한 요구를 해결하기 위해 시멘트에 플라이애쉬, 슬래그, 실리카폼등 혼합재를 첨가하여 요구되는 특성을 얻고자 시도하고 있지만 시멘트 이외에 다른 재료를 혼합사용하는 데에 따른 설비, 품질관리 및 시공상의 부담이 가중되고 있는 실정이다. 이러한 사회적 여건변화 및 실상에 따라 건축 구조재료의 주류를 이루고 있는 콘크리트에 대해서 보다 다양한 품질이 요구되고 있다. 현재 쌍용양회

* 숭실대학교 대학원 석사과정

** 숭실대학교 대학원 석사과정

*** 쌍용건설기술연구소, 연구원

**** 쌍용건설기술연구소, 연구원

***** 정회원, 숭실대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

중앙연구소가 개발한 Belite시멘트는 고강도, 고유동, 저발열 특성이 동시에 발현되도록 시멘트를 형성하는 구성광물 자체의 함량을 조절하여 제조한 시멘트로서 실리카퓌, 플라이애쉬, 슬래그등 혼합재의 사용이 필요없어 품질관리가 용이하고 안정된 포틀랜드계 시멘트이다.

본 연구에서는 구조재로서 Belite 시멘트 개발에 따라 철근콘크리트 구조의 기본 특성중의 하나인 철근과 콘크리트 사이의 부착특성을 평가하고자 한다. 부착에 대한 주요 영향요인인 콘크리트의 강도(압축, 인장), 유동성(슬럼프), 배근위치(상/하부철근)등 재료관련 성능의 변수와 설계주요 변수인 피복두께 및 철근 직경별로 부착강도를 측정한다. 콘크리트의 고성능에 따른 부착강도의 영향을 1종 포틀랜드 시멘트의 실험결과와 비교 평가한다.

2. 부착실험

본 연구는 크게 3가지 그룹으로 나누어 각각 그룹에 대해서 보단부시험체 및 이음길이 보시험체의 2 종류를 만들어 실험하고자 한다.(본 논문에서는 현재까지의 연구결과인 제1그룹의 자료를 게재한다.)

- 1그룹 : 1종 포틀랜드 시멘트를 이용한 일반강도의 시험체
- 2그룹 : 1종 포틀랜드 시멘트와 같은 강도조건의 Belite 시멘트를 이용한 시험체
- 3그룹 : Belite 시멘트를 이용한 고강도 시험체

2.1 실험계획 및 재료

본 연구에서는 철근 콘크리트 보의 응력분포와 동일하며 그 크기를 줄이고 보다 많은 데이터를 얻을 수 있는 보단부 부착시험체를 사용하였다. 보단부 시험체의 크기는 단면의 폭이 22cm, 높이가 39cm, 길이는 49cm이다. 채하되는 철근은 D16, D19의 2가지 종류를 사용하였고, 철근의 위치에 따른 부착강도의 변화를 관찰하기 위하여 상/하부 철근을 배치하였다. 또한 콘크리트의 할열강도에 직접적인 관계가 있는 콘크리트의 피복두께는 0.5, 1, 2, 3db로 계획하였다. 정착길이는 ACI 318-95 표준과 기존의 연구에 의하여 D16 및 D19 철근에서 각각 8cm 및 10cm로 계획하였다.

보단부 부착시험체의 결과를 확인하기 위하여 최소개수의 이음길이 부착시험체를 제작하였다. 이음길이 보시험체는 단면치수 18×25cm, 인장철근 2-D16, 압축철근 2-D10, 길이 2.4m의 장방향 복근보로 제작되었고, 피복두께는 보단부 시험체와 같이 0.5, 1, 2, 3db로 계획하였다. 인장철근의 이음길이는 ACI 318-95 표준에 의한 값의 약 1/2인 16cm가 되도록 계획하였다.

본 실험에서 사용한 1종 포틀랜드 시멘트계 콘크리트 설계강도는 350 kg/cm² 로 설계된 레미콘제품을 사용하였다. 타설시 슬럼프 값은 11.5cm로 나타났으며, 유동화제(Mighty-2000) 0.4%를 첨가한 슬럼프 값은 19cm를 나타냈다. 시험체 배근에 사용된 철근은 설계항복응력 4000 kg/cm²인 D10, D16, D19철근을 사용하였다. 콘크리트의 배합비와 재령별 강도측정 결과는 표 2-1, 2-2와 같다.

표 2-1 콘크리트 배합비

W/C (%)	S/A (%)	공기량 (%)	단위재료량(kg/m ³)				
			물	시멘트	모래	자갈	혼화제 *
39.8	41.0	4.5±1.5	197	495	646	973	4.95

* 사용혼화제 종류 : Neomix (AE 감수제)

표 2-2 재령별 콘크리트 강도

양생 구분	Slump (cm)	* 측정 항목	4일 (4/29)	7일 (5/2)	11일 (5/6)	14일 (5/9)	17일 (5/12)	28일 (5/23)
현장 양생	12	압축	210	257	283	346	362	401
		탄성계수	-	2.06×10^5	-	-	-	2.21×10^5
		인장	-	23	-	-	30	34
	18	압축	193	266	280	312	314	398
		탄성계수	-	2.03×10^5	-	-	-	2.15×10^5
		인장	-	24	-	-	29	35

* 측정치 : 3EA 평균치

2.2 시험체 제작

보단부 시험체는 길이 110cm의 D16 및 D19의 이형철근을 시험체의 상/하부 각각에 설치하고 D10의 수평보강근을 상/하부 양쪽 모서리에 설치하였다. 상/하부 각각의 철근에는 정착길이를 정확하게 유지하기 위하여 상/하부 철근 양단부에 PVC 파이프를 삽입하였다.(그림 2-1)

이음길이 보시시험체는 상부근 2-D10과 하부근 2-D16을 사용하여, 하부근에서만 중앙부에서 양쪽으로 각 8cm씩 전체 이음길이가 16cm가 되도록 하였고, 이음이 끝나는 곳에 strain gauge를 철근 하부에 각각 1개씩 붙여 최단부의 응력상태를 측정하고자 하였다. 전단보강근은 보 중앙에서 양쪽으로 50cm 되는 구간을 제외하고 나머지 구간에서 D10 @100간격으로 배근 하였다. (그림 2-2)

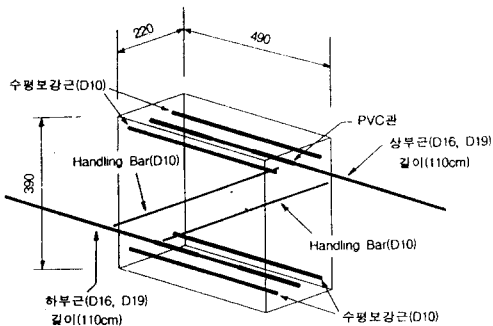


그림2-1 보단부 시험체

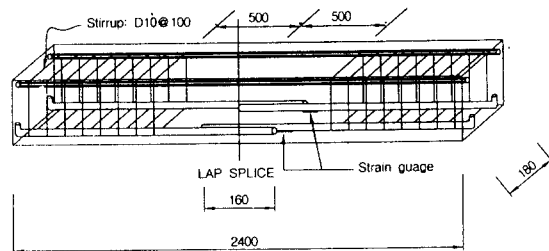


그림2-2. 이음길이 보시시험체

2.3 재하 및 측정방법

보단부 시험체에서는 20ton 용량의 중공 유압식 오일잭 2개를 사용하여 약 3초 간격으로 하중을 가력하였으며, 이 하중은 다시 직경 2.54cm의 냉간 가공된 강봉 (steel rod)에 의하여 전달되고, 이때 강봉은 load cell역할을 하게 된다. 강봉을 통한 하중은 재하단을 통하여 철근에 인장력을 작용시킨다.

실험시 철근의 미끄러짐량은 시험 철근의 재하단 양쪽에 변위계를 각각 1개씩 설치하였고, 재하되지 않는 자유단 부분(재하단 반대쪽)에서는 1개의 변위계를 설치하여 하중-변위관계를 측정 하였다. (그림 2-3)

이음길이 보 시험체에서는 반력 프레임에 설치한 유압잭으로 보 중앙에서 각 50cm 떨어진 곳에 하중을 가하였고 재하하중량을 검출하기 위해 유압재 하부에 로드셀을 설치하였다. 보처짐 변형을 측정하기 위하여 보시험체 중앙하부에 변위계를 설치하였으며, 하부 인장철근에서는 이음이 끝나는 부분에 변형게이지(strain gauge)를 각각 1개씩 설치하여 철근의 하중-변형 관계를 측정하였다. (그림 2-4)

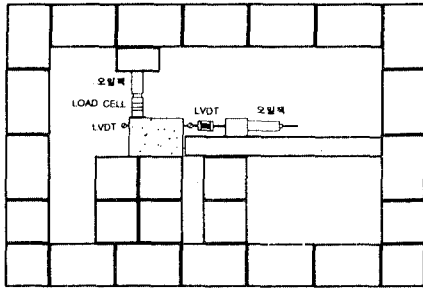


그림2-3. 보단부 시험체 실험장치

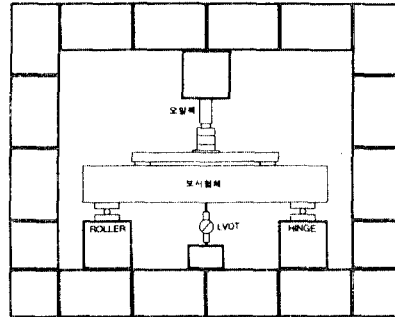


그림2-4. 이음길이 보시험체 실험장치

2.4 균열 발생 및 파괴형태

보단부 시험체에서의 균열발생 및 파괴형태는 콘크리트 할렬파괴시 발생하는 형상과 같은 쪼개짐 파괴형상을 나타내었다. 대부분 시험체는 철근에서 수직하게 윗부분으로 전형적인 파괴역학적(fracture) 균열이 발생였고, 이 균열은 시험체 윗면에서 철근이 정착된 부분까지 이어지고, 철근정착이 끝나 PVC로 연결되는 부분에서 수평으로 균열이 발생되었다.

이음길이 보시험체에서의 균열발생 및 파괴형태는 하중증가에 따라 보시험체의 인장측 하부에서부터 재하점으로 휨균열이 진행되는 전형적인 휨파괴 형상을 나타내었고, 파괴시에는 강한 파열음과 함께 갑자기 철근 이음부위인 보 중앙하부의 균열과 함께 쪼개짐 현상이 발생하였다.

2.5 하중-변위 곡선

보단부 시험체에서의 하중-변위곡선은 대부분 시험체에서 비슷한 양상을 보이며 급격한 부차파괴 후의 변위곡선을 나타내고 있다. 그림 2-5는 피복두께별 상/하부 철근에 대한 재하단에서의 미끄러짐량과 하중간의 그래프이다.

이음길이 보시험체에서 그림 2-6은 슬럼프 11.5cm와 19cm에 대해서 하부 인장철근 이음 끝부분에 붙여진 strain gauge를 통해서 얻은 변형값과 하중간의 관계를 나타낸 그래프이다.

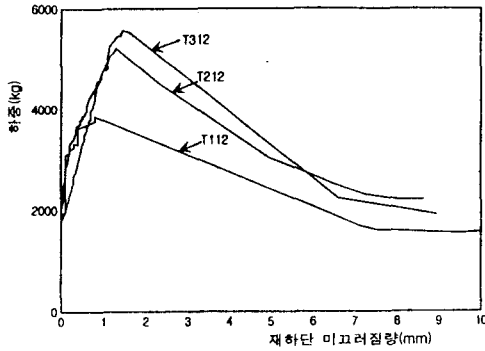


그림2-5. 피복두께별 재하단에서의 하중-변위곡선

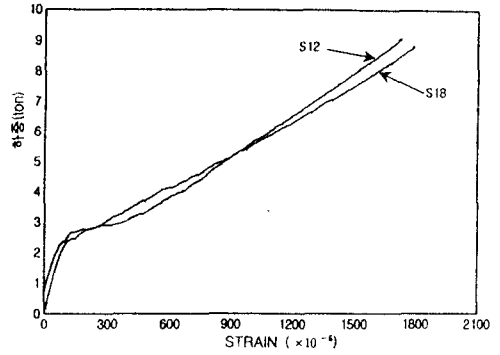


그림2-6. 슬럼프에 대한 하중-철근변형곡선

2.6 실험 결과

보단부 시험체 및 이음길이 보시험체에서의 각각 변수별 부착강도는 표2-5, 2-6과 같다.

표 2-5 보단부 시험체 변수별 부착강도

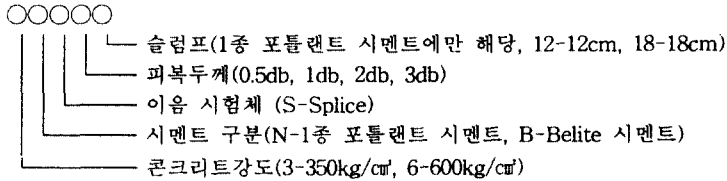
시험체명	시멘트종류	콘크리트 강도(kg/cm ²)	철근직경	피복두께	슬럼프(cm)	철근위치	부착강도 (ton)
3N16T112	1종 포틀랜드 시멘트	355	D16	1db	11.5	상단	3.85
3N16B112						하단	4.41
3N16T118						상단	3.99
3N16B118						하단	4.17
3N16T212		355		2db	11.5	상단	4.64
3N16B212						하단	5.09
3N16T218						상단	4.62
3N16B218						하단	4.99
3N16T312		355		3db	11.5	상단	5.21
3N16B312						하단	5.96
3N16T318						상단	4.89
3N16B318						하단	5.88
		313			19		

○○○○○○

- └ 슬럼프(1종 포틀랜드 시멘트에만 해당, 12-12cm, 18-18cm)
- └ 피복두께(0.5db, 1db, 2db, 3db)
- └ 철근위치(T-Top Bar, B-Bottom Bar)
- └ 철근직경(D16, D19)
- └ 시멘트 구분(N-1종 포틀랜드 시멘트, B-Belite 시멘트)
- └ 콘크리트강도(3-350kg/cm², 6-600kg/cm²)

표 2-6 이음길이 시험체 변수별 부착강도

시험체명	시멘트종류	콘크리트 강도(kg/cm ²)	철근직경	피복두께	슬럼프(cm)	처짐량(mm)	부착강도 (ton)
3NS212	1종 포틀랜드	355	D16	2db	11.5	5.1	9.12
3NS218	시멘트	313			19	5.3	8.87



3. 부착강도 평가

(1) 슬럼프

콘크리트는 그 시공성의 확보를 위하여 일정 슬럼프치를 유지하여야 한다. 높은 시공성을 확보하기 위해서 슬럼프가 커지며 이러한 고성능 콘크리트에서 부착강도의 변화는 필히 확인하여야 할 요소중의 하나이다. 그림 3-1 슬럼프에 따른 부착강도를 나타낸 그래프에서 보듯이 슬럼프 차이가 있음에도 불구하고 부착강도는 아주 미미한 차이를 나타내고 있다. 이같은 원인은 유동화제를 첨가한 경우 강도발현이 다소 늦어진 점과 유동화제에 의하여 콘크리트 점성이 높아졌기 때문이라 판단된다.

(2) 철근위치

높은 슬럼프는 시공성의 확보라는 측면에서 유리하나 깊은 단면을 갖는 일반적인 구조체의 경우에는 상/하부 콘크리트의 강도차이를 유발하게 되어 구조적으로 불리한 측면을 가져오게 된다. 본 연구에서는 이러한 상/하부 콘크리트의 강도차에 의한 부착강도의 영향을 고려하기 위하여 상/하부근에 대한 부착강도의 차이를 시험하였다. 그림 3-2의 결과에서 보듯이 1종 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에서 적절한 유동화제를 사용하였을 때, 규준의 상부근 보정계수인 1.3의 범위에 들어감을 알 수 있다.

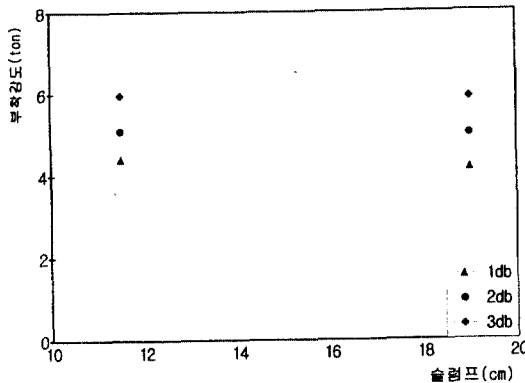


그림3-1. 슬럼프에 따른 부착강도

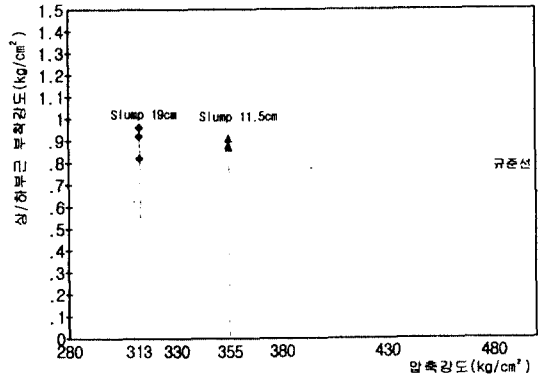


그림3-2. 강도별 상/하부철근의 부착강도비

(3) 콘크리트 강도

기존의 연구결과에 따르면 부착파괴는 콘크리트의 할렬인장파괴에 기인하게되며, 따라서 부착력은 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있다. 그림 3-3은 피복두께 2db인 시험체에 대해서 콘크리트 강도와 부착강도에 대한 것으로 Orangun의 식, Zsutty의 식, ACI 318 code의 이론적인 부착강도와 비교한 그래프이다.

< Orangun의 방정식 >

$$U = (1.2 + \frac{3C}{db} + \frac{50db}{lb}) \times \sqrt{f_c'}$$

< Zsutty의 방정식 >

$$U = 140 (f_c')^{\frac{1}{3}} (\frac{db}{ld})^{\frac{1}{2}} (\frac{C}{db})^{\frac{1}{2}}$$

< ACI 318 >

$$U = 9.5 \frac{\sqrt{f_c'}}{db}$$

(U = 철근의 부착강도(psi), C = 피복두께(in), db = 철근의 직경(in)

ld = 정착길이(in), f_c' = 콘크리트 압축강도(psi) 이다.)

그림 3-4에서 보듯이 콘크리트 강도가 증가함에 따라 콘크리트와 철근사이의 극한 부착강도는 Orangun의 식, Zsutty의 식, ACI 318 code에 의하면 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 나타났고 본 연구에서는 Zsutty의 식, ACI 318 규정 사이의 값을 취하는 것으로 나타났다.

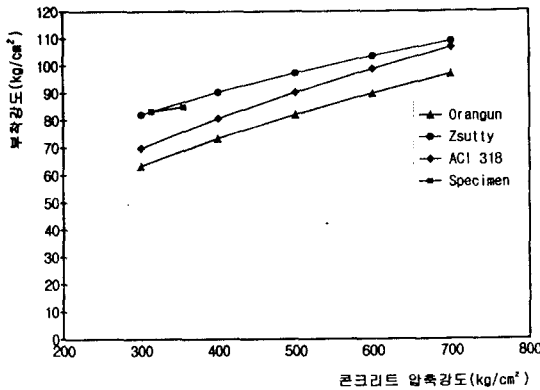


그림3-3. 콘크리트 압축강도에 대한 부착강도

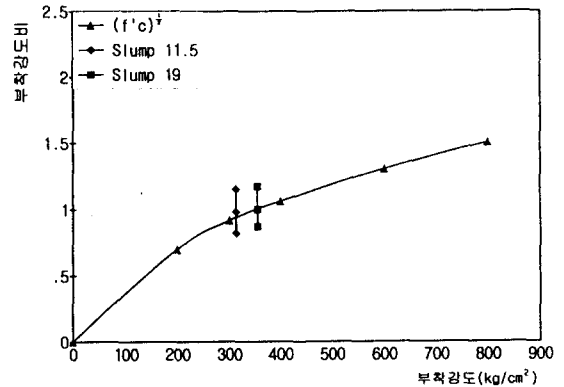


그림3-4. 콘크리트 강도의 제곱근에 대한 부착강도의 비

(4) 피복두께 및 철근직경

피복두께의 변화에 따른 철근과 콘크리트 사이의 부착강도의 변화를 관찰하기 위하여 1종 포틀랜드 시멘트에서는 철근의 직경과 관계하여 1~3db로 피복두께를 변화시켜 그 결과를 관찰하였다. (그림 3-5) 또한, 철근과 콘크리트사이의 부착에 있어 철근의 직경은 정착길이와 더불어 부착면적의 변화를 가져오게 된다. 본 연구에서는 이러한 철근의 직경효과를 관찰하기 위하여 D16, D19의 두종류의 이형 철근을 사용하여 각각의 부착강도의 변화를 관찰하고자 하였다. 그림 3-6에서 보듯이 피복두께에 따른 철근직경의 영향은 콘크리트 압축강도의 변화에 관계없이 모든 경우에서 대체로 선형으로 비례하였으며, Zsutty의 이론식에 가까운 값을 취함을 알 수 있다.

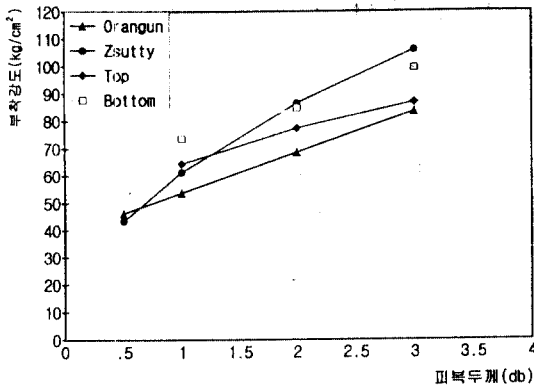


그림3-5. 피복두께에 따른 부착강도

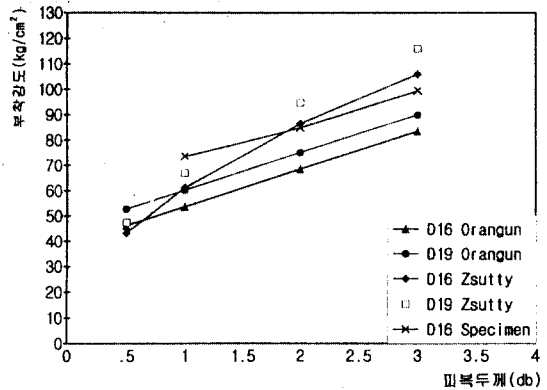


그림3-6. 철근 직경에 따른 부착강도

4. 결론

1종 포틀랜드 시멘트를 이용한 일반강도의 시험체를 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었으며 차후 Belite 고강도 콘크리트 시험결과와 비교할 것이다.

- 1) 콘크리트 강도가 증가함에 따라 부착강도는 Orangun의 식, Zsutty의 식, ACI 318 code에서 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 나타났고, 본 연구에서는 Zsutty의 식, ACI 318 규정사이의 값을 취하는 것으로 나타났다.
- 2) 본 연구에서 유동성을 확보하기 위하여 첨가된 유동화제는 슬럼프치가 11.5cm와 19cm로 차이가 있음에도 불구하고 부착강도에는 큰 변화가 없음을 알 수 있었다.
- 3) 본 연구에서 콘크리트의 압축강도에 대해서 상/하부철근의 부착강도는 전체적으로 하부근에서 다소 큰 값을 나타내었고, 규준에서 제시하고 있는 상부근 계수를 모두 만족하는 것으로 나타났다.
- 4) 피복두께의 영향은 콘크리트의 압축강도의 변화에 관계없이 모든 경우에서 대체로 선형으로 비례하였으며, Zsutty의 이론식에 가까운 값을 취함을 알 수 있었다.

● 참고 문헌 ●

1. 홍건호, "고강도 콘크리트의 부착강도특성을 고려한 이형철근의 정착에 관한 연구," 서울대학교 박사논문, 1996, pp. 81~101
2. 안종문, 이광수, 신성우, "피복두께에 따른 고강도 콘크리트의 부착특성", 1996 대한건축학회 춘계 학술발표대회 논문집, 제16권, pp. 283-286
3. 최완철, "Bond strength of Epoxy-coated reinforcement to concrete," Univ. of Kansas, 1990, pp. 5~15
4. Robert A. Treece and James O. Jirsa, "Bond strength of Epoxy-coated reinforcing bars," Univ. of Texas, 1987, pp. 40~50