

경량콘크리트의 부착특성에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Bond Strength of Deformed Bars in Artificial Lightweight Aggregate Concrete

조 장 세†
Cho, Jang Se

나 성 준*
La, Sung Jun

김 민 숙**
Kim, Min Sook

이 영 학***
Lee, Young Hak

김 희 철****
Kim, Heecheul

요 지

철근 콘크리트 부재에서 부착강도는 콘크리트와 보강근 사이에 중요한 요소 중 하나이다. 본 실험에서는 인공경량골재를 사용한 경량콘크리트와 이형철근의 부착강도의 특성을 확인하기 위하여 인발실험을 수행하였다. 콘크리트의 압축강도, 이형철근의 직경과 묻힘길이를 변수로 하는 144개의 인발실험 시험체가 사용되었다. 보통콘크리트와의 비교를 위하여 물/시멘트 비 50%의 보통콘크리트의 인발실험을 수행하였으며, 실험을 통해서 부착응력-미끄러짐 관계와 파괴형상을 평가하였다. 물/시멘트 비에 따른 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 부착강도는 증가하였다. 또한 인발실험을 토대로 회귀분석을 실시하여 경량 콘크리트의 부착응력에 대한 산정식을 제안하였다.

핵심용어 : 부착강도, 경량콘크리트, 인발실험, 묻힘길이

Abstract

For reinforced concrete members, the bond strength is one of the important factors between two materials: concrete and reinforcing element. This study concerns the bond strength of deformed bars in artificial lightweight aggregate concrete by pull-out test. 144 cubic specimens were manufactured for the test. concrete compressive strength, size of deformed bar and embedment lengths were considered as variables in this study. Normal concrete with W/C ratio 50% specimens were tested for the comparison. Test results included the bond stress-slip responses and modes of failure. Bond strength increased with an increase of compressive strength of concrete according to W/C ratio. The equation of bond stress of polymer-modified lightweight aggregate concrete were proposed by regression analysis based on the result.

Keywords : bond strength, artificial lightweight aggregate concrete, pull-out test, embedment length

1. 서 론

철근 콘크리트 구조물에서 콘크리트는 크기나 모양에 제약을 받지 않고 내구성, 내화성, 내진성이 좋으며 임의의 강도를 발휘하기 쉬운 장점들에 의하여 건물의 재료로써 많이 사용되고 있다. 그러나 재료의 강도에 비하여 단위강도 당 자중이 무거운 단점 때문에 구조부재로써 경량콘크리트의 사용이 대두되고 있으며(Qiao 등, 2008), 콘크리트의 주재료인 천연골재가 고갈되어감에 따라 대체 자원의 개발 및 산업부

산물을 재사용에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 선진국에서는 석탄회를 이용한 인공 경량골재를 사용한 콘크리트를 다양한 용도로 활용하고 있으며 우리나라도 인공골재를 사용한 경량콘크리트 개발의 시작점에 서있다(이동운 등, 2006; 권기주, 2010).

석탄회는 화력발전소에서 석탄을 연소시킨 결과로 발생하는 부산물로써 Fly ash, Cinder ash, Bottom ash 등으로 구분된다. 이 중 Fly ash는 콘크리트의 혼화제로 재활용되며 석탄회 재활용분야의 78%이상을 차지하고 있다(권기주,

† 책임저자, 학생회원 · 경희대학교 건축공학과 석사과정

* 경희대학교 건축공학과 석사과정

** 학생회원 · 경희대학교 건축공학과 박사과정

*** 교신저자, 정희원 · 경희대학교 건축공학과 조교수

Tel: 031-201-2864 ; Fax: 031-204-3815

E-mail: leeyh@khu.ac.kr

**** 정희원 · 경희대학교 건축공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

2010). 그러나 석탄회 발생량의 10~15%를 차지하는 Bottom ash는 대부분 매립·폐기되고 있는 실정이다(이중호 등, 2002). 이에 대하여 최근에는 잔골재의 대체재로서 Bottom ash를 콘크리트에 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다(이중호 등, 2002; 이동훈 등, 2006; 최세진 등, 2009). 그러나 굵은 골재로의 대체재로 사용하는 연구는 미비한 실정이다.

Bottom ash는 비중이 작고 입도조정이 가능하여 경량콘크리트의 굵은 골재로 사용이 가능하며 실제로 경량골재에 대한 물리적 성능평가에서도 사용가능한 성능을 발현하는 것으로 나타났다(한병찬 등, 2001).

본 연구에서는 bottom ash 인공경량골재를 사용한 경량콘크리트의 부착특성을 비교·평가하는데 목적을 두었으며, 이를 위하여 콘크리트 압축강도, 철근 직경과 문힘 길이를 변수로 하여 경량콘크리트와 이형철근 간의 부착특성을 알아보고자 하였으며, 보통강도 콘크리트로 대조군을 제작하여 인발 실험을 수행하였다.

2. 실험계획

2.1 실험재료

2.1.1 콘크리트

경량콘크리트의 부착특성을 알아보기 위한 인발실험을 위해 4종류의 경량콘크리트와 보통강도의 콘크리트에 대한 배합설계를 하였으며, 압축강도 실험을 수행하였다.

압축강도 실험은 KS F 2405(2005)에 의하여 실험을 수행하였다. 공시체는 실린더형의 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 의 크기의 몰드를 사용하였으며, 총 32개의 공시체를 제작하였다. 콘크리트 타설시 규준에 의거하여 3회에 걸쳐 다짐봉으로 매회 25회 다짐을 실시하면서 타설하였다. 압축강도 시험은 7일, 28일 강도를 각각 4개씩 측정하였다. 배합설계와 배합설계에 따른 압축강도를 표 1에 정리하였다.

2.1.2 이형철근

경량콘크리트의 부착특성을 알아보기 위하여 사용된 보강근은 ASTM A 615(2004)에 제시되어 있는 No. 4(D13),

표 1 경량콘크리트 및 콘크리트 배합설계

배합종류	콘크리트 압축강도 (MPa)	W/C (%)	단위재료량(kg/m ³)					고성능 감수제
			자갈	경량골재	모래	시멘트	물	
N50	32.47	50	913.0	-	847.0	366.0	181.0	2.2
S50	29.44	50	-	795.4	791.5	340.0	152.9	2.2
S40	30.32	40	-	804.0	691.2	425.0	168.6	2.3
S25	39.88	25	-	695.2	674.1	660.0	165.4	7.9

표 2 이형철근의 재료적 특성

구분	D13	D16	D19
직경(mm)	12.7	15.9	19.1
단면적(mm ²)	126.7	198.6	286.5
연신율(%)	14.38	13.93	17.62
항복강도(MPa)	522.22	488.40	434.51
인장강도(MPa)	652.17	664.32	661.76
탄성계수(GPa)	195.39	218.86	195.37

No. 5(D16), No. 6(D19) 3종류의 이형철근을 사용하였으며, 각각 10개 시편의 인장강도 실험을 수행한 결과를 표 2에 정리하였다.

2.2 시험체

시험체는 ASTM C 234(1991)에서 제시된 규격에 의하여 제작되었다. 그림 1과 같이 150mm×150mm×150mm의 정방형 시험체를 사용하였으며 사각형의 중심에 길이 680mm의 이형철근을 설치한 후에 콘크리트를 타설하였다. 콘크리트 타설시 3회에 나누어서 타설하였으며, 이형철근의 문힘길이는 실험 변수에 따라 달리 하였으며, 부착되는 면이 시험체의 하단부터 형성하였다. 또한 시험체의 상단부터 PVC 관을 삽입하여 콘크리트와의 부착을 방지하는 부분을 형성하도록 하였다. 또한 인발실험 시 이형철근과 콘크리트 덩어리가 같이 파괴되는 현상을 방지하기 위하여 시험체 하단에 이형철근이 10mm정도 이격되도록 제작하였다.

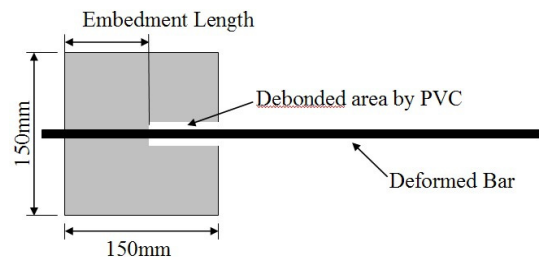


그림 1 인발실험을 위한 시험체

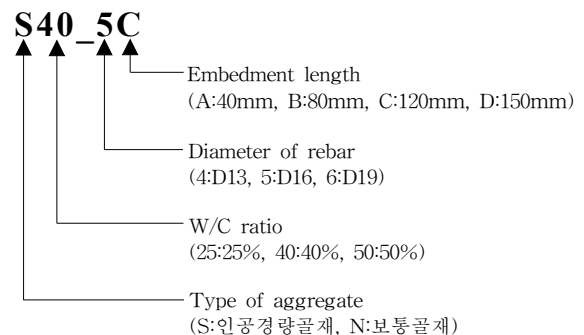


그림 2 시험체의 표기

시험체는 경량콘크리트의 압축강도(W/C 50%, 40%, 25%), 보강근의 직경(D13, D16, D19)과 문힘길이(40mm, 80mm, 120mm, 150mm)에 따라 각각 3개의 시험체를 제작하였으며, 경량콘크리트의 부착특성을 비교하기 위하여 W/C 50%의 보통콘크리트를 사용하였다. 총 144개의 시험체를 제작하여 실험을 수행하였으며 시험체의 표기방법은 그림 2와 같다.

3. 실험방법

ASTM C 234(1991)의 기준에 따라 인발실험을 수행하였다. 인발실험을 수행하기 위하여 그림 3과 같이 별도의 지그를 제작하였으며, 1,000kN 용량의 만능시험기(UTM)을 이용하여 1.2mm/min의 속도로 가력 하는 변위제어 방식을 채택하여 실험을 진행하였다. 또한 하중단과 자유단의 미끄럼 길이를 측정하기 위하여 하중단에 2개의 LVDT를 설치하였고 자유단에는 1개의 LVDT를 설치하여 미끄럼 길이를 측정하였다.

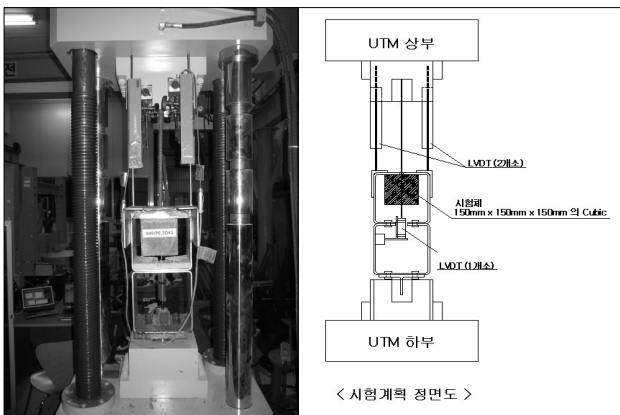


그림 3 인발실험 Set up

4. 실험결과

인발실험은 인발 시험체가 파괴되거나 이형철근이 뽑힐 때까지 실험을 수행하였으며, 인발실험 중 최대 인발하중에 도달하였을 때 평균 부착 응력을 구하였다. 이때의 하중단과 자유단의 미끄럼 길이와 파괴형상에 대해 조사하였으며, 경량콘크리트의 부착특성에 대한 결과는 표 3에 정리하여 나타내었다.

4.1 파괴양상

선행 실험결과에 따르면 인발실험에 의한 시험체의 파괴형상은 쪼갬파괴, 뽑힘파괴, 보강근의 항복에 의한 파괴, 보강근의 부착면의 파괴 총 4가지 경우로 나타난다고 기술하고

있다(Okelo 등, 2005; Lee 등, 2008; 문경주 등, 2005). 본 실험에 사용된 시험체는 대부분 그림 4와 같이 콘크리트의 쪼갬에 의한 파괴에 의한 파괴현상(약 73%)을 보이고 있으며 다음으로는 그림 5와 같이 뽑힘에 의한 파괴현상(약 24%)이 관찰되었다. 보강근의 항복에 의한 파괴는 N50_4D 시험체 등 5개의 시험체에서 보이는 것으로 나타났다.

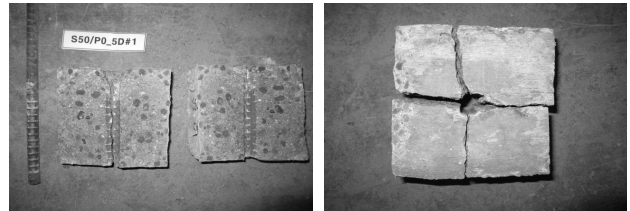


그림 4 인발실험으로 인한 쪼갬파괴

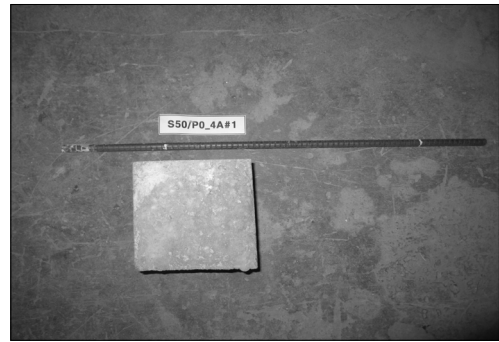


그림 5 인발실험으로 인한 뽑힘파괴

표 3 시험체의 인발실험 결과

시험체명	Ultimate State				
	평균부착응력 (MPa)	Load end Slip(mm)	Free end Slip(mm)	하중 (kN)	파괴양상*
N50_4A#1	15.80	3.45	2.05	25.21	P
N50_4A#2	11.87	6.90	3.87	18.94	P
N50_4A#3	17.05	6.49	3.41	27.21	P
N50_4B#1	14.36	6.82	3.95	45.83	P
N50_4B#2	14.00	8.69	4.72	44.69	P
N50_4B#3	10.81	10.05	4.12	34.52	P
N50_4C#1	12.33	12.46	5.43	59.06	P
N50_4C#2	11.51	8.21	5.29	55.12	P
N50_4C#3	12.30	9.74	5.35	58.91	P
N50_4D#1	11.25	29.27	6.47	67.31	Y
N50_4D#2	10.05	10.85	5.68	60.13	P
N50_4D#3	10.54	9.58	6.46	63.07	P
N50_5A#1	19.36	8.15	2.93	38.69	P
N50_5A#2	19.79	9.44	3.41	39.55	P
N50_5A#3	30.83	10.65	5.50	61.60	P
N50_5B#1	16.32	16.40	6.66	65.20	P
N50_5B#2	17.15	12.25	5.79	68.54	P
N50_5B#3	20.02	7.34	5.46	80.00	S
N50_5C#1	15.60	10.53	5.63	93.51	S
N50_5C#2	12.84	9.45	5.33	76.97	P

시험체명	Ultimate State				
	평균부착응력 (MPa)	Load end Slip(mm)	Free end Slip(mm)	하중 (kN)	파괴 양상*
N50_5C#3	13.43	7.01	5.06	80.51	P
N50_5D#1	9.46	15.03	11.06	70.90	S
N50_5D#2	9.84	8.73	4.68	73.71	S
N50_5D#3	6.08	7.37	3.64	45.59	S
N50_6A#1	23.44	11.23	5.65	56.25	P
N50_6A#2	14.35	10.59	3.90	34.44	P
N50_6A#3	15.91	8.59	3.98	38.19	P
N50_6B#1	13.47	8.06	5.42	64.66	P
N50_6B#2	13.49	14.87	6.23	64.77	P
N50_6B#3	13.26	7.59	5.64	63.65	P
N50_6C#1	12.46	11.58	8.63	89.74	P
N50_6C#2	15.11	18.70	5.52	108.79	S
N50_6C#3	11.75	12.08	5.73	84.62	S
N50_6D#1	6.11	8.51	4.38	55.03	S
N50_6D#2	4.49	8.58	3.43	40.44	S
N50_6D#3	8.03	12.79	5.61	72.30	S
S50_4A#1	19.45	7.70	3.36	31.05	P
S50_4A#2	23.95	7.18	3.61	38.23	P
S50_4A#3	19.49	8.27	3.75	31.10	P
S50_4B#1	19.55	13.77	4.67	62.41	S
S50_4B#2	15.67	12.76	4.27	50.02	S
S50_4B#3	14.11	6.71	3.26	45.05	S
S50_4C#1	7.97	8.11	3.07	38.16	S
S50_4C#2	7.86	7.78	3.07	37.65	S
S50_4C#3	12.94	10.65	4.33	61.96	S
S50_4D#1	7.51	6.88	3.25	44.95	S
S50_4D#2	6.74	7.37	3.15	40.33	S
S50_4D#3	6.11	6.26	2.79	36.56	S
S50_5A#1	25.50	7.92	3.61	50.96	S
S50_5A#2	31.35	10.72	4.19	62.64	S
S50_5A#3	25.58	11.56	4.47	51.10	P
S50_5B#1	21.19	10.86	4.48	84.66	S
S50_5B#2	14.52	11.02	3.48	58.02	S
S50_5B#3	13.36	9.97	2.85	53.39	S
S50_5C#1	6.84	5.93	2.54	41.00	S
S50_5C#2	6.65	5.70	2.01	39.87	S
S50_5C#3	8.29	7.77	2.66	49.72	S
S50_5D#1	5.49	9.23	2.19	41.11	S
S50_5D#2	4.51	4.46	2.66	33.79	S
S50_5D#3	7.14	9.56	2.85	53.50	S
S50_6A#1	18.66	4.95	2.50	44.78	S
S50_6A#2	15.76	4.73	2.43	37.83	S
S50_6A#3	20.28	6.18	2.91	48.67	S
S50_6B#1	19.38	11.47	5.31	93.04	S
S50_6B#2	16.88	7.83	4.12	81.02	S
S50_6B#3	11.86	9.32	3.57	56.92	S
S50_6C#1	7.51	6.96	2.53	54.07	S
S50_6C#2	10.24	7.94	4.36	73.71	S
S50_6C#3	5.44	7.23	2.24	39.19	S
S50_6D#1	5.06	5.25	2.46	45.56	S

시험체명	Ultimate State				
	평균부착응력 (MPa)	Load end Slip(mm)	Free end Slip(mm)	하중 (kN)	파괴 양상*
S50_6D#2	4.19	6.17	2.10	37.69	S
S50_6D#3	6.22	6.57	2.86	56.01	S
S40_4A#1	19.56	8.19	3.14	31.21	P
S40_4A#2	24.99	7.51	3.37	39.88	P
S40_4A#3	21.25	7.89	3.03	33.91	P
S40_4B#1	19.23	19.12	6.17	61.39	P
S40_4B#2	22.77	33.41	6.43	72.68	Y
S40_4B#3	14.05	8.67	3.78	44.84	S
S40_4C#1	7.30	5.75	2.97	34.94	S
S40_4C#2	8.18	6.48	2.94	39.17	S
S40_4C#3	15.95	63.11	4.52	76.34	Y
S40_4D#1	4.83	6.92	2.33	28.88	S
S40_4D#2	6.15	4.72	3.45	36.79	S
S40_4D#3	6.20	9.33	3.34	37.09	S
S40_5A#1	20.83	6.40	2.91	41.63	S
S40_5A#2	36.04	13.21	4.22	72.00	S
S40_5A#3	27.14	8.73	3.72	54.22	S
S40_5B#1	20.97	8.86	4.25	83.82	S
S40_5B#2	18.56	9.59	3.84	74.15	S
S40_5B#3	23.40	15.33	5.38	93.52	S
S40_5C#1	5.66	5.83	2.04	33.95	S
S40_5C#2	8.97	8.12	3.82	53.74	S
S40_5C#3	11.93	11.84	4.70	71.54	S
S40_5D#1	5.91	4.74	1.90	44.27	S
S40_5D#2	6.86	8.10	2.02	51.39	S
S40_5D#3	4.54	7.64	2.01	34.00	S
S40_6A#1	29.97	9.82	5.05	71.92	S
S40_6A#2	11.81	8.38	1.95	28.34	S
S40_6A#3	21.78	7.82	2.78	52.27	S
S40_6B#1	11.04	6.48	3.27	53.00	S
S40_6B#2	14.22	12.21	3.67	68.27	S
S40_6B#3	10.26	8.21	3.41	49.26	S
S40_6C#1	3.98	5.23	1.77	28.63	S
S40_6C#2	6.12	5.19	2.05	44.09	S
S40_6C#3	4.69	5.07	2.48	33.79	S
S40_6D#1	5.43	5.20	3.18	48.88	S
S40_6D#2	5.64	9.97	2.99	50.78	S
S40_6D#3	5.22	8.03	2.85	46.96	S
S25_4A#1	27.69	9.40	4.92	44.20	P
S25_4A#2	41.30	11.19	5.02	65.91	S
S25_4A#3	30.13	8.67	4.56	48.08	P
S25_4B#1	27.36	53.38	5.81	87.33	Y
S25_4B#2	19.80	21.81	5.10	63.18	S
S25_4B#3	21.52	30.40	5.18	68.70	Y
S25_4C#1	11.66	15.36	4.79	55.82	S
S25_4C#2	9.00	8.78	3.20	43.09	S
S25_4C#3	10.19	12.24	3.94	48.81	S
S25_4D#1	6.70	9.87	5.07	40.08	S
S25_4D#2	9.20	7.64	3.90	55.04	S
S25_4D#3	5.60	8.00	3.39	33.50	S

시험체명	Ultimate State				
	평균부착응력 (MPa)	Load end Slip(mm)	Free end Slip(mm)	하중 (kN)	파괴양상*
S25_5A#1	27.87	9.98	3.52	55.69	S
S25_5A#2	35.53	9.08	4.02	71.00	S
S25_5A#3	44.25	15.23	5.06	88.41	S
S25_5B#1	24.17	15.16	5.56	96.60	S
S25_5B#2	24.08	11.15	4.79	96.24	S
S25_5B#3	16.12	9.34	3.40	64.41	S
S25_5C#1	15.92	15.36	5.18	95.43	S
S25_5C#2	8.66	11.30	3.69	51.91	S
S25_5C#3	8.19	10.26	2.71	49.11	S
S25_5D#1	5.99	7.67	2.98	44.85	S
S25_5D#2	5.10	6.37	2.59	38.19	S
S25_5D#3	6.69	8.28	3.10	50.15	S
S25_6A#1	28.05	14.78	5.55	67.32	S
S25_6A#2	21.81	13.13	3.59	52.34	S
S25_6A#3	21.14	10.66	3.04	50.74	S
S25_6B#1	14.37	13.89	4.30	68.98	S
S25_6B#2	17.66	13.80	6.50	84.76	S
S25_6B#3	17.30	13.28	4.78	83.06	S
S25_6C#1	9.92	11.12	4.10	71.42	S
S25_6C#2	5.97	7.19	2.11	42.97	S
S25_6C#3	6.66	6.87	2.63	47.95	S
S25_6D#1	8.75	8.39	3.71	78.78	S
S25_6D#2	6.93	13.57	4.15	62.41	S
S25_6D#3	5.83	8.11	2.60	52.47	S

* 파괴양상

S-쪼갠파괴, P-뿔힘파괴, Y-보강근의 항복파괴

4.2 부착응력과 미끄러짐의 관계

Xiao(2007)는 인발실험에 대해 미세미끄러짐 단계, 내부 균열단계, 인발단계, 응력의 감소단계, 잔여응력으로 총 5개의 단계로 구분하고 있다.

미세 미끄러짐 단계에서는 자유단의 미끄러짐이 없는 단계이며, 내부 균열단계에서는 하중이 증가하면서 미끄러짐 또한 증가하기 시작하는 단계이다. 이는 이형철근과 콘크리트의 접촉부의 응력이 소진되면서 미끄러짐이 생기는 것으로 나타나고 있다. 또한 인발단계에서는 응력이 급격히 증가하는 현상을 보이며, 이때 최대하중에서의 부착응력을 평균부착응력으로 나타내고 있다. 평균부착응력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$u = \frac{P}{\pi d_b l_d} \quad (1)$$

여기서, u 는 평균부착응력, P 는 인발하중, d_b 는 이형철근의 지름, l_d 는 이형철근의 묻힘길이이다.

하중단의 미끄러짐 길이를 보다 정확하게 계산하기 위하여 인발실험 시 이형철근이 탄성변형을 한다는 가정 하에 다음의 계산식으로 미끄러짐을 계산하였다.

$$\delta_a = \delta_m - \delta_c \quad (2)$$

$$\delta_c = \frac{PL}{EA} \quad (3)$$

여기서, δ_a 는 하중단의 미끄러짐, δ_m 은 실제로 측정된 하중단의 미끄러짐, δ_c 는 탄성변형에 의한 변형, P 는 인발하중, L 은 묻힘길이부터 하중단 LVDT 고정위치까지의 거리, E 는 이형철근의 탄성계수, A 는 이형철근의 단면적이다.

응력 감소 단계에서는 최대하중을 지나 급격한 감소현상을 보였다. 쪼갠 파괴 시에는 이 단계에서 실험이 종료되며, 뿔힘 파괴 시에는 잔여응력 단계가 나타나는데, 이는 이형철근과 콘크리트와의 마찰 저항으로 생기는 현상으로 사료된다.

그림 6은 보통 콘크리트에 대한 이형철근의 직경과 묻힘 길이에 따른 평균 부착응력과 미끄러짐의 관계를 나타내고 있다. 대부분의 시험체는 뿔힘 파괴를 나타내고 있으며, 전술한 것과 같이 5단계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 5의 부착응력은 최대하중을 기점으로 급격한 감소현상을 보이고 있으며 잔여응력 단계에서는 최대하중을 지나 약 10~20%의 수준을 유지하면서 뿔힘 파괴가 진행되는데, 이는 이형철근과 콘크리트의 마찰저항에 의하여 최소한의 응력을 유지하는 것으로 사료된다.

경량콘크리트에 대해 이형철근의 직경과 묻힘 길이에 따른 평균 부착응력과 미끄러짐의 관계를 나타내고 있다. 경량콘크리트의 경우 보통콘크리트와는 다르게 뿔힘 파괴, 쪼갠 파괴 및 이형철근의 항복에 의한 파괴를 모두 보이고 있다. 그림 7(a)와 같이 쪼갠 파괴의 경우 최대하중 도달 후 콘크리트의 균열로 인하여 부착성능을 상실하는 것을 알 수 있다. 그러

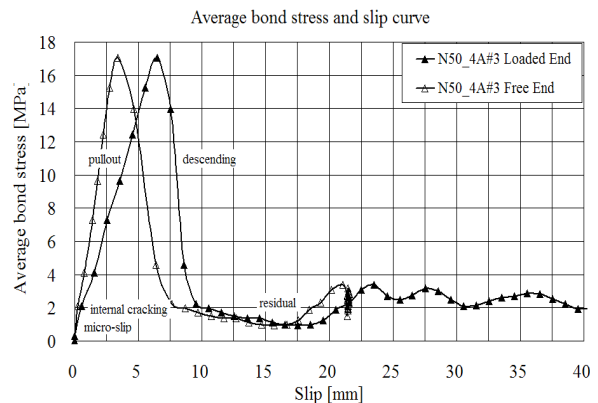
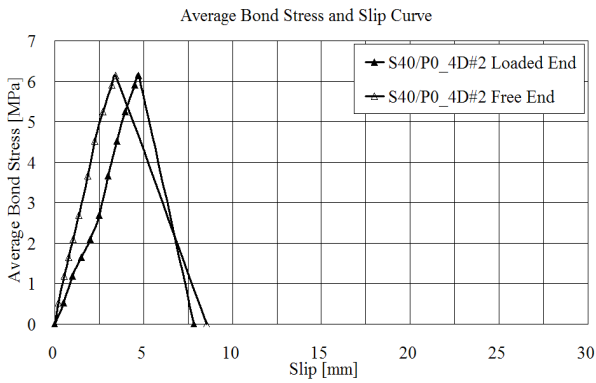
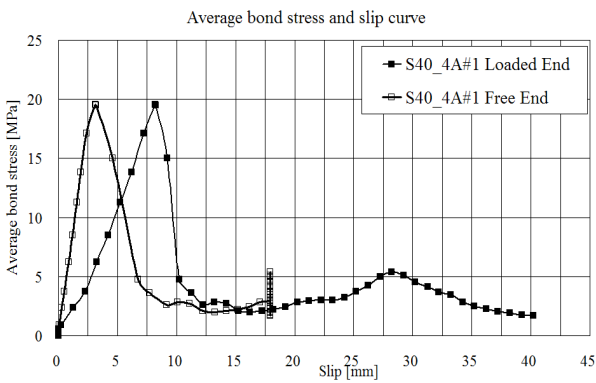


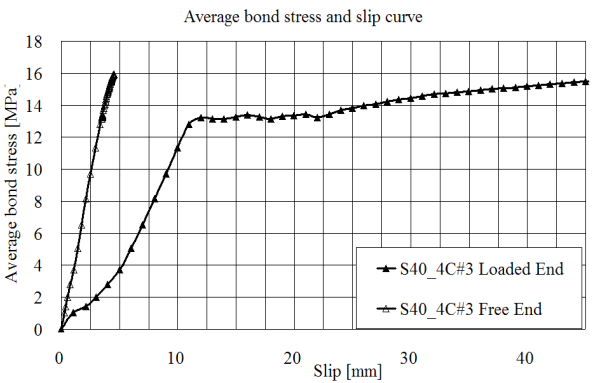
그림 6 보통콘크리트의 평균부착응력과 미끄러짐관계



(a) 쪼갬파괴



(b) 뺨힘파괴



(c) 이형철근의 항복

그림 7 경량콘크리트의 평균부착응력과 미끌림관계

나 그림 7(b)와 같이 뺨힘 파괴의 경우, 보통 콘크리트의 평균부착응력 미끌림 관계과 비슷한 양상을 보이고 있다. 위의 파괴현상과는 대조적으로 그림 7(c)와 같이 이형철근의 항복에 의한 파괴는 최대하중에 도달하였을 때 철근의 항복으로 인하여 하중은 감소하지 않으며 하중단의 미끌림 길이가 계속 증가하는 현상을 관찰 할 수 있다.

또한 자유단의 미끌림보다 하중단의 미끌림 길이가 더 긴 현상을 보이고 있는데 이는 보강근과 콘크리트와의 부착응력이 하중단에서부터 시작하여 점차 파괴되고, 부착저항이 점

점 파괴되지 않은 부위로 이동하면서 일어나는 현상으로 사료된다(최동욱 등, 2007).

4.3 문힘길이와 부착특성과의 관계

선행 실험된 고강도 경량콘크리트와 이형철근의 부착특성의 연구에 의하면 보강근의 경우 문힘길이가 증가할수록 부착강도는 감소하는 경향을 보인다고 기술하였다(김현식 등, 1998). 본 실험에서 사용된 이형철근도 그림 8과 같이 문힘길이가 증가할수록 평균 부착강도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 문힘길이가 길어질수록 이형철근과 콘크리트와 접하는 면적이 커지게 되며 인발하중이 증가하게 된다. 그러나 인발하중의 증가 경향이 작기 때문에 상대적으로 마찰면적의 증가에 따른 단위면적당 받는 부착응력은 작아지게 되는 것이다.

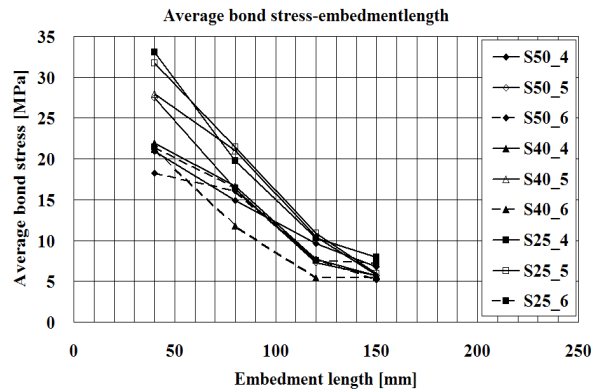


그림 8 문힘길이와 부착응력과의 관계

4.4 이형철근의 직경과 부착특성과의 관계

본 실험에서 동일한 문힘길이(150mm)에서 이형철근의 직경에 따른 부착 특성을 비교한 결과, 그림 9와 10에 나타

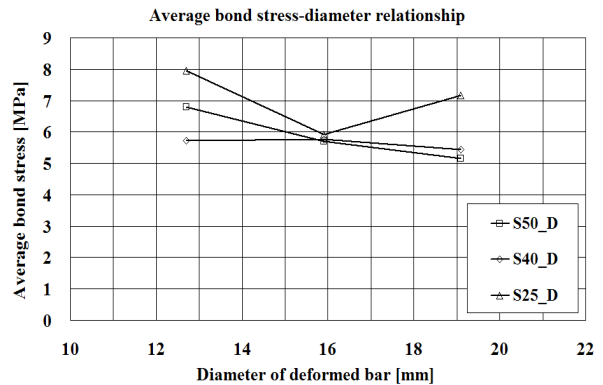


그림 9 이형철근의 직경과 부착응력과의 관계

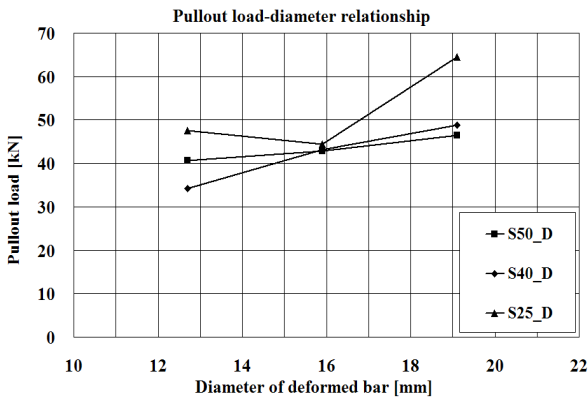


그림 10 이형철근의 직경과 인발하중과의 관계

난 것처럼 이형철근의 직경이 증가할수록 인발하중은 대체로 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 이형철근의 직경이 증가함에 따라 부착응력의 뚜렷한 증감현상을 확인하기 어려움을 알 수 있다. 이는 직경이 증가할수록 콘크리트와의 접촉면적이 증가하여 인발하중은 증가하지만 동일한 문힘길이에 있어서 이형철근의 직경은 부착면적의 증/감에 미비한 영향을 주기 때문인 것으로 사료된다.

4.5 콘크리트 압축강도와 부착특성과의 관계

본 실험에서는 압축강도의 변화를 주기 위하여 경량콘크리트 배합 시 물/시멘트 비를 변수로 두었다. 물/시멘트비(50%, 40%, 25%)의 변화에 따른 콘크리트 압축강도는 각각 29.44MPa, 30.32MPa, 39.88MPa로 나타났다. 4종류의 문힘 길이에 대해 콘크리트 압축강도에 따른 부착응력을 그림 11에 나타내었으며, 그림에서 볼 수 있듯이 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 부착응력이 증가함을 알 수 있다. 이는 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 콘크리트와 이형철근 사이에 더 큰 저항력이 작용하기 때문인 것으로 사료된다 (ACI-408R, 2003).

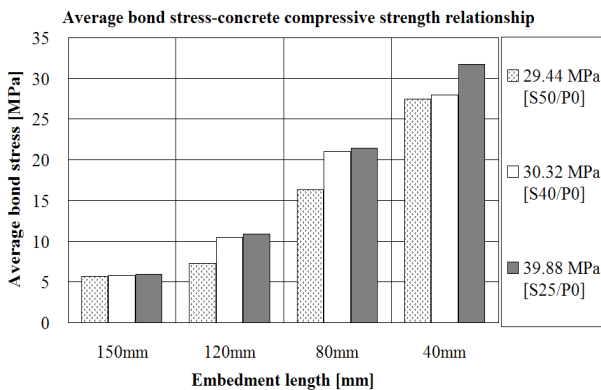


그림 11 콘크리트 압축강도와 부착응력과의 관계

4.6 보통콘크리트와의 비교

보통콘크리트와의 비교를 위해 N50(32.47MPa)과 S40(30.32MPa)의 두 시험체 군을 비교하였다. 그림 12는 이형철근 D19를 사용한 4종류의 문힘 길이에 대하여 경량콘크리트와 보통콘크리트 사용에 따른 부착응력을 비교하여 나타낸 것이다. 문힘 길이가 40mm인 시험체에서는 경량콘크리트를 사용하였을 때 보통콘크리트보다 부착응력이 약 18% 증가하는 현상을 보였으나, 나머지는 부착응력이 감소하는 현상을 보이고 있다. 이는 같은 콘크리트 압축강도에서도 경량콘크리트의 골재의 강도가 작기 때문에, 낮은 인장강도와 지지력을 가지게 되며, 경량콘크리트는 보통콘크리트의 부착특성보다 떨어진다는 ACI-408(2003)의 연구결과와 같은 양상임을 확인할 수 있다.

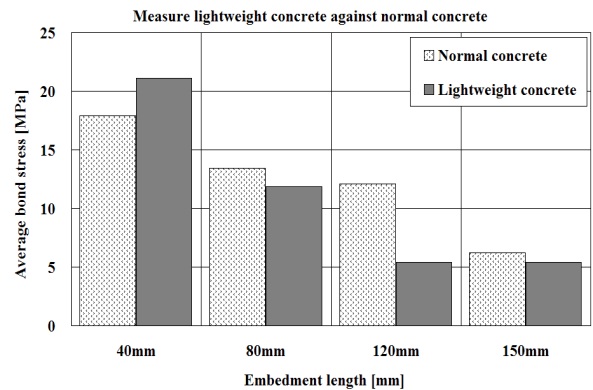


그림 12 경량콘크리트와 보통콘크리트의 비교

5. 산정식에 의한 부착응력 분석

5.1 기존 제안식과의 비교

철근콘크리트에서 보강근의 부착응력에 대하여 ACI-408R(2003)에서는 콘크리트의 압축강도($\sqrt{f'_c}$)에 비례하고 직경에 반비례하는 다음과 같은 식을 제시하고 있다.

$$u = 20 \frac{\sqrt{f'_c}}{d_b} \tag{4}$$

여기서, u 는 평균부착응력, d_b 는 보강근의 직경, f'_c 는 콘크리트의 압축강도이다.

이에 반하여 Orangun(1977)은 기존의 부착응력관계식이 보수적이라고 판단하고 62개의 보 형상의 부착강도 실험을 수행하였으며, 콘크리트의 피복두께, 보강근의 직경, 문힘길이 및 콘크리트의 압축강도와 스트립에 의한 콘크리트의 구

속효과를 고려하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\frac{u}{\sqrt{f'_c}} = 0.1 + 0.25\left(\frac{c_{\min}}{d_b}\right) + 4.15\left(\frac{d_b}{l_d}\right) \quad (5)$$

여기서, u 는 평균부착응력, c_{\min} 은 밀면 피복두께와 옆면 피복두께 중 작은값, d_b 는 이형철근의 직경, l_d 는 이형철근의 묻힘길이, f'_c 는 콘크리트의 압축강도이다.

또한 Darwin(1992; 2000)은 부착응력이 콘크리트의 압축강도의 제곱근에 비례하지 않고 4제곱근에 비례한다는 실험결과와 겹침이음에 대한 단면적의 영향 및 콘크리트의 구

표 4 실험값과 기존 제안식과의 비교

시험체	Uexp (MPa)	UACI (MPa)	UOrangun (MPa)	UDarwin (MPa)
S50/P0_4A	20.964	8.545	15.024	16.408
S50/P0_4B	14.893	8.545	11.450	11.203
S50/P0_4C	9.591	8.545	10.258	9.468
S50/P0_4D	6.787	8.545	9.781	8.774
S50/P0_5A	27.477	6.825	15.350	17.931
S50/P0_5B	16.355	6.825	10.875	11.415
S50/P0_5C	7.262	6.825	9.383	9.243
S50/P0_5D	5.712	6.825	8.786	8.374
S50/P0_6A	18.232	5.682	16.170	19.822
S50/P0_6B	16.039	5.682	10.794	11.995
S50/P0_6C	7.729	5.682	9.002	9.386
S50/P0_6D	5.157	5.682	8.285	8.342
S40/P0_4A	21.933	8.671	15.247	16.529
S40/P0_4B	16.640	8.671	11.619	11.286
S40/P0_4C	7.739	8.671	10.410	9.538
S40/P0_4D	5.724	8.671	9.927	8.839
S40/P0_5A	28.002	6.926	15.578	18.063
S40/P0_5B	20.977	6.926	11.036	11.499
S40/P0_5C	10.450	6.926	9.522	9.311
S40/P0_5D	5.768	6.926	8.916	8.436
S40/P0_6A	21.184	5.766	16.410	19.969
S40/P0_6B	11.841	5.766	10.954	12.084
S40/P0_6C	5.408	5.766	9.136	9.455
S40/P0_6D	5.430	5.766	8.408	8.404
S25/P0_4A	33.041	9.945	17.486	17.701
S25/P0_4B	19.795	9.945	13.326	12.086
S25/P0_4C	10.284	9.945	11.939	10.215
S25/P0_4D	7.947	9.945	11.384	9.466
S25/P0_5A	31.704	7.943	17.865	19.344
S25/P0_5B	21.458	7.943	12.657	12.315
S25/P0_5C	10.924	7.943	10.920	9.971
S25/P0_5D	5.925	7.943	10.226	9.034
S25/P0_6A	21.473	6.613	18.820	21.385
S25/P0_6B	16.443	6.613	12.563	12.941
S25/P0_6C	7.516	6.613	10.477	10.126
S25/P0_6D	7.172	6.613	9.643	9.000

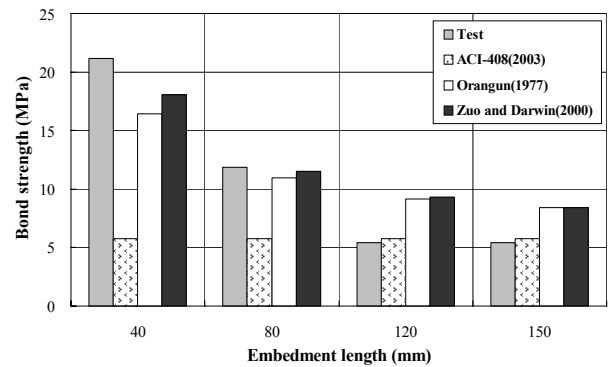
속효과를 고려하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\frac{T}{f'_c{}^{1/4}} = [1.44l_d(c_m + 0.5d_b) + 56.3A_b](0.1\frac{c_M}{c_m} + 0.9) \quad (6)$$

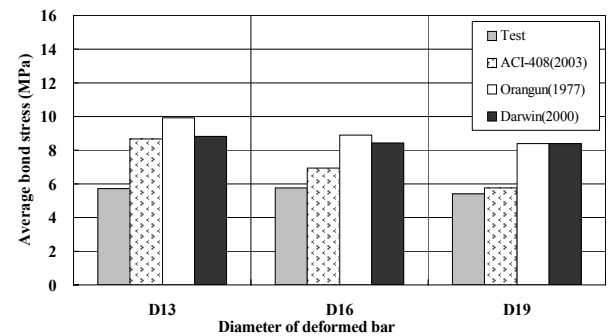
여기서, T =인발하중, c_M 및 c_m 은 밀면 피복두께와 옆면 피복두께 중 최대값 및 작은값, d_b 는 이형철근의 직경, l_d 는 이형철근의 묻힘길이, A_b 는 이형철근의 단면적, f'_c 는 콘크리트의 압축강도이다.

표 4는 본 연구의 실험값과 기존 제안식을 통한 계산값을 비교하였다. Orangun(1977) 및 Darwin(1992; 2000)의 제안식에 사용되는 피복두께는 본 실험에서는 실험변수로 사용되지 않았기 때문에 65.5mm로 동일한 조건하에서 계산되었다. 또한 그림 13은 이형철근의 직경 및 묻힘길이에 따른 부착응력의 실험값과 계산값을 비교하여 나타내었다.

그림 13(a)는 동일한 직경에 대하여 묻힘길이에 따른 실험값과 계산값을 비교한 그림이다. 보는 바와 같이 ACI-408R (2003)의 제안식은 묻힘길이 40mm, 80mm에서는 실험결과에 비해 38%으로 매우 보수적인 결과를 보이고 있으나 묻힘길이 120mm, 150mm에서는 106%로 비교적 정확한



(a) 묻힘길이



(b) 이형철근의 직경

그림 13 실험값과 제안식의 비교

값을 예측하고 있는 것으로 나타났다. 이외는 반대로 Orangun (1977) 및 Darwin(1992; 2000)의 제안식에서는 문힘길이가 짧은 경우에 비교적 정확한 값을 제시하고 있으나 문힘길이가 긴 경우는 부착응력을 과대 평가하고 있는 것으로 나타났다. 또한 그림 13(b)은 동일한 문힘길이에 대하여 이형철근의 직경에 따른 실험결과와 계산값을 비교한 것이다. ACI-408R(2003)의 제안식은 약 25%, Orangun(1977)의 제안식은 60% 그리고 Darwin(1992; 2000)의 제안식은 51%로 모두 부착응력을 과대평가 하고 있는 것으로 나타났다.

5.2 제안식 도출

ACI-408R(2003)등의 선행 연구결과에서 보면 부착특성에 영향을 주는 요소는 콘크리트의 압축강도, 보강근의 종류, 보강근의 직경, 보강근의 표면처리, 보강근의 위치, 보강근의 리브와 마디의 형상, 피복두께, 문힘길이와 스트립과 같은 콘크리트의 구속효과 등으로 나타내고 있다(ACI-408R, 2003; Orangun 등, 1977).

본 연구에서는 콘크리트의 압축강도, 이형철근의 직경, 문힘길이를 변수로 하여 인발실험을 수행하였으며, 실험결과

보강근의 항복과괴의 양상을 보이는 4개의 시험체를 제외한 104개의 경량콘크리트 시험체에 대하여 회귀분석을 실시하여 부착강도를 예측할 수 있는 제안식을 유도하였다.

콘크리트의 부착강도의 제곱근에 비례한다는 기존 연구결과(ACI-408R, 2003; Orangun 등, 1977)를 토대로 하여 영향변수로는 $(d_b + l_d)^{1/4}$ 을 선정하였으며, 그림 14는 영향변수에 따른 부착응력의 상관관계를 나타내고 있다. 상관계수는 0.79로 비교적 높은 상관성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

회귀분석을 통하여 나타난 부착응력 제안식은 다음과 같다.

$$\frac{u}{\sqrt{f'_c}} = \frac{37.5}{(d_b + l_d)^{1/4}} - 9.4 \quad (7)$$

여기서, u 는 평균부착응력, d_b 는 이형철근의 직경, l_d 는 이형철근의 문힘길이, f'_c 는 콘크리트의 압축강도이다.

그림 15에서 알 수 있듯이 본 제안식은 결정계수가 0.8로 회귀분석에 상당한 유효성을 가지고 있는 것으로 나타나고 있다.

본 연구에서 유도된 부착응력 제안식을 ACI-408R(2003), Orangun(1977) 및 Darwin(1992; 2000)의 제안식과 비교 분석하였으며 표 5에서 알 수 있듯이 본 연구의 제안식은 평균 1.02 표준편차 0.25로 다른 연구자들의 제안식에 비하여 비교적 정확한 값을 예측하고 있다고 볼 수 있다.

그림 16은 표 6에 대하여 본 연구에서 유도된 제안식과 기존 제안식을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 콘크리트의 압축강도와 보강근의 직경만 고려한 ACI-408R(2003)의 제안식은 정확도가 상당히 떨어짐을 알 수 있다.

표 5 제안식과 기존식의 비교

시험체	U_{exp}/U_{pro}	U_{exp}/U_{ACI}	$U_{exp}/U_{Orangun}$	U_{exp}/U_{Darwin}
평균	1.025	1.963	1.118	1.091
표준편차	0.254	1.223	0.499	0.445
변동계수	0.248	0.623	0.446	0.408

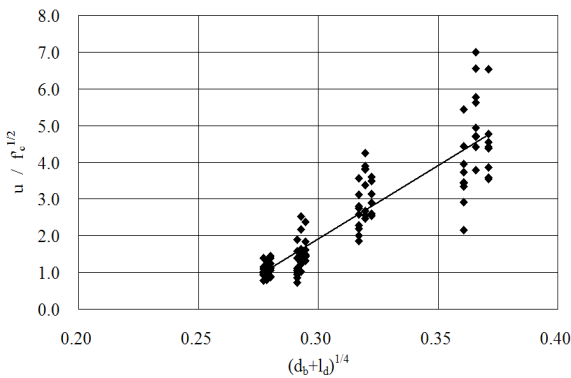


그림 14 부착응력과 영향변수의 상관관계

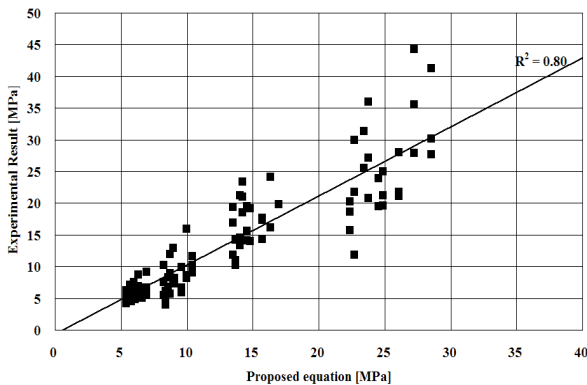


그림 15 회귀분석을 통한 제안식과 결정계수

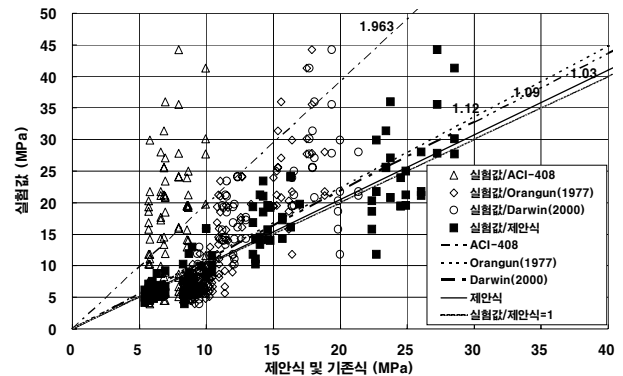


그림 16 제안식과 기존 제안식의 비교

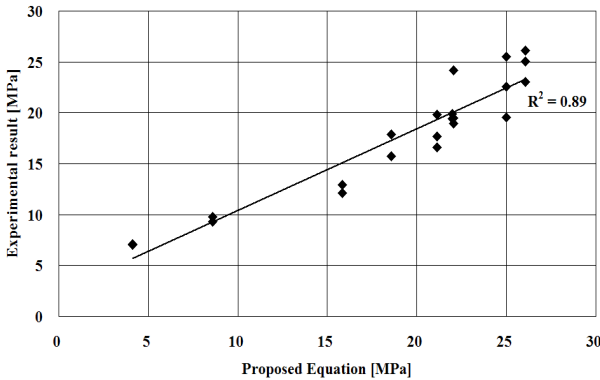


그림 17 결정계수를 통한 제안식의 신뢰성 평가

Orangun(1977)의 식과 David Darwin(1992, 2000)의 식은 실험결과/계산값의 비가 1.12 및 1.09로 비교적 정확한 값을 예측하고 있으나 본 연구의 제안식은 실험결과/계산값의 비가 1.03으로 1에 가장 근접한 결과를 보이고 있어 상당한 유효성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

5.3 제안된 식을 적용한 부착응력 평가

도출된 제안식의 정확성을 평가하기 위하여 본 실험과 비슷한 조건을 가지는 2개의 연구결과에 제안식을 적용하였다. 철근의 종류, 문힘길이, 콘크리트 양생기간을 변수로 하여 화산 경석으로 제조된 경량콘크리트의 부착특성을 알아보는 Hossain(2008)의 연구결과와 비교하였으며, 콘크리트의 압축강도, 피복두께, 및 부착길이를 변수로 하는 고강도 경량콘크리트의 부착특성을 알아보는 김현식(1998)의 연구결과와 비교하였다. 실험결과/계산값의 비가 0.99로 본 연구에서 도출해낸 실험결과/계산값의 비(1.03)보다 더 정확한 값을 나타내고 있으며, 그림 17에서 보는 바와 같이 결정계수는 0.89로 보다 큰 유효성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 경량콘크리트에 대하여 부착강도에 영향을 미치는 이형철근의 직경, 문힘길이와 콘크리트의 압축강도를 변수로 하여 총 144개의 시험체에 대한 인발실험을 수행하였다. 실험결과 및 기존 연구의 실험결과/회귀분석을 통해 새로운 제안식을 도출하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 경량콘크리트의 문힘길이에 대한 실험결과 문힘길이가 증가할수록 평균 부착응력은 조금씩 감소하는 경향을 보인다. 문힘길이가 적은 부분에서는 큰 차이를 보였지

만 문힘길이가 큰 부분에서는 적은 감소현상을 보였으므로, 감소현상은 일정한 비례에 의하여 이루어지는 것이 아니라고 판단할 수 있다.

- 2) 대체로 이형철근의 직경이 증가함에 따라 인발하중이 증가하는 경향을 보이고 있으나 부착응력의 뚜렷한 증감현상을 확인할 수 없었다. 이는 직경이 증가할수록 콘크리트와의 접촉 면적이 증가하여 인발하중은 증가하지만 동일한 문힘길이에서 이형철근의 직경은 부착면적의 증/감에 미비한 영향을 주기 때문인 것으로 사료된다.
- 3) 보통콘크리트와의 비교하였을 때 문힘길이가 40mm인 시험체 군에서는 부착응력이 약 18% 증가하는 현상을 보였으나 나머지 부분에서는 감소하는 현상을 보이고 있으며, 이는 같은 콘크리트 압축강도에서 경량골재의 강도가 적기 때문에 낮은 인장강도와 지지력으로 인하여 부착특성이 떨어진다는 연구결과에 부합하는 것을 알 수 있다.
- 4) 본 실험결과를 ACI-408R(2003), Orangun(1977) 및 Darwin(1992; 2000)의 연구결과에서 제시된 제안식을 통한 계산값을 비교하였을 때, ACI-408R(2003)의 제안식은 다소 보수적인 결과를 보이고 있으며, 문힘길이에 따른 영향을 고려하지 않아 유효성이 떨어짐을 알 수 있었다. 또한 Orangun(1977) 및 Darwin(1992; 2000)의 제안식은 문힘길이의 증감에 따라 모두 만족하지 못함을 알 수 있었다. 이에 본 실험에서는 새로운 제안식을 도출하였으며, 이는 본 실험결과 및 기존 실험결과에 상당히 부합하는 결과를 나타내는 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 권기주 (2010) 화력발전 부산물의 콘크리트에의 활용, 대한건축학회, 54(2), pp.46~49.
- 김현식, 최명신, 안종문, 이광수, 신성우 (1998) 고강도경량 콘크리트에 매립된 이형철근의 부착특성, 대한건축학회 논문집, 18(1), pp.693~700.
- 문경주, 이철웅, 박원춘, 소양섭 (2005) 무기계 산업폐기물을 이용한 비소성 시멘트 콘크리트의 철근 인발 부착 특성, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 25(1), pp.73~76.

- 이동운, 김영수** (2006) 바텀에시를 잔골재로 부분 치환한 콘크리트의 강도특성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 22(6), pp.79~80.
- 이종호, 김재환, 김용로, 강석표, 최세진, 김무한** (2002) 물시멘트비에 따른 바텀에시를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구, 한국건축시공학회 학술발표대회, 한국건축시공학회, pp.57~60.
- 최동욱, 하상수, 이창호** (2007) 인발실험에 의한 GFRP 보강근의 정착길이 제안, 한국콘크리트학회, 19(3), pp.323~331
- 최세진, 김무한** (2009) 석탄회 종류에 따른 석탄회를 대량 사용한 콘크리트의 내구특성에 관한 연구, 한국건축시공학회 논문집, 9(3), pp.73~78.
- 한국산업규격** (2005) KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 방법, 한국표준협회, pp.16.
- 한병찬, 윤현도, 정수영** (2001) 석탄회 골재를 사용한 고강도 경량콘크리트 보의 휨거동, 대한건축학회 논문집, 17(4), pp.37~44.
- ACI 408R-03** (2003) Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension, *ACI Committee 408*, pp.49.
- ASTM A 615/A 615M-04a** (2004) Standard Specification for Deformed and Plane Carbon Steel Bars for Concrete Reinforcement, *ASTM Committee A01*, pp.6.
- ASTM C 234-91a** (1991) Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel, *ASTM Committee C-9*, pp.5.
- Darwin, D., McCabe, S.L., Idun, E.K., Schoenekase, S.P.** (1992) Development Length Criteria: Bars not Confined by Transverse Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 89(6), pp.709~720.
- Hossain, K.M.A.** (2008) Bond Characteristics of Plain and Deformed Bars in Lightweight Pumice Concrete, *Construction and Building Materials*, 22(7), pp.1491~1499.
- Lee, J.Y., Kim, T.Y., Kim, T.J., Yi C.K., Park, J.S., You, Y.C., Park, Y.H.** (2008) Interfacial Bond Strength of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars in High-Strength Concrete, *Composites Part B: Engineering*, 39(2), pp.258~270.
- Okelo, R., Yuan, R.L.** (2005) Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete, *Journal of Composites for Construction*, 9(3), pp.203~213.
- Orangun, C.O., Jirsa, J.O., Breen, J.E.** (1977) A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, *ACI Structural Journal*, 74(3), pp.114~122.
- Qiao, X.C., Ng, B.R., Tyrer, M., Poon, C.S., Cheeseman, C.R.** (2008) Production of Lightweight Concrete using Incinerator Bottom ash, *Construction and Building Materials*, 22(4), pp.473~474.
- Xiao, J., Falkner, H.** (2007) Bond Behaviour Between Recycled Aggregate Concrete and Steel Rebars, *Construction and Building Materials*, 21(2), pp.395~401.
- Zuo, J., Darwin, D.** (2000) Splice Strength of Conventional and High Relative rib Area Bars in Normal and High-Strength Concrete, *ACI Structural Journal*, 97(4), pp.630~641.

- 논문접수일 2010년 7월 26일
- 논문심사일 2010년 7월 27일
- 게재확정일 2010년 9월 29일