

인장을 가하지 않은 PS강연선의 인발 부착특성

Pullout Bond Characteristics of Untensioned Prestressing Strand

하 상 수*

Ha, Sang-Su

Abstract

The primary objective of this research is a study on the pullout bond characteristics of untensioned prestressing strand in concrete. The bond characteristics of untensioned prestressing strand in concrete differs from that of deformed reinforcing bar. In order to use and design untensioned prestressing strand as deformed reinforcing bar, a study for bond characteristics of the untensioned prestressing strand was progressed. Major test variables are embedment length ($10d_b \sim 60d_b$), concrete cover (45mm, 70mm, 100mm) and diameter of strands. (12.7mm : SWPC7, 9.3mm : SWPC7A)

As a results, these showed that average bond stress was decreased as a growing the embedment length, and then showed that the bond performance of untensioned prestressing strand was improved if embedment length was above $60d_b$.

요 지

본 연구는 콘크리트에서 인발시험(pullout test)을 통해서 인장을 가하지 않은 강연선의 부착특성을 파악하기 위한 것이다. 인장을 가하지 않은 강연선의 부착특성은 이형철근이나 인장이 가해진 강연선과는 다르게 나타난다. 본 연구에서 인장을 가하지 않은 강연선을 철근과 같은 용도로 사용하고 설계하기 위해서는 인장을 가하지 않은 강연선의 부착특성에 관한 연구가 필요하다. 본 연구는 묻힘 길이($10d_b \sim 60d_b$), 콘크리트 피복두께(45mm, 70mm, 100mm), 그리고 강연선의 직경(12.7mm : SWPC7B, 9.3mm : SWPC7A)을 주요변수로 선정하였다. 실험결과, 묻힘길이가 증가함에 따라 상대적으로 평균부착응력은 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 묻힘길이가 $60d_b$ 이상 확보된다면 인장을 가하지 않은 강연선의 부착성능에 기여할 수 있을 거라 판단된다.

Keywords : Bond stress, Concrete cover, Embedment length, Untensioned prestressing strand

핵심 용어 : 부착응력, 피복두께, 묻힘 길이, 인장을 가하지 않은 강연선

* 정희원, 환경대학교 건설공학연구소 전임연구교수

E-mail : drhaha@naver.com 031-670-5278

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2009년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

프리캐스트 콘크리트 구조물에서 PC 부재간 연결재로 이형철근이 주로 사용된다. 이럴 경우 접합부에서 철근이 집중되어 시공성이 저하되고 콘크리트 충전에도 문제가 발생한다. 또한, 대구경 고강도 철근을 사용하여 이음하거나 정착할 경우, 이음 및 정착길이가 길어져 갈고리 형태로 정착되어야 하므로 시공시 고려하여야 한다. 그러나 이형철근 대신 강연선을 연결재로 사용할 경우 이형철근에 비해 작은 단면적을 가지는 강연선으로 시공이 가능하기 때문에 접합부에서의 배근량을 최소화 할 수 있고, 손쉽게 뒤틀 수 있기 때문에 작업이 간편하고, 연결재의 배근공정 및 시공순서에 제약을 받지 않기 때문에 시공성이 매우 우수하다. 이러한 장점에도 불구하고 인장을 가하지 않은 강연선에 관한 연구는 아주 미미한 실정이며, 이에 대한 합리적인 설계방법이 규정되어 있지 않은 실정이다. 현행 기준(KCI⁽¹⁾, ACI⁽²⁾)에서는 강연선이 인장상태에서의 정착길이를 식(1)로 규정하고 있다.

$$0.145(f_{ps} - \frac{2}{3}f_{se})d_b \quad (mm) \quad (1)$$

여기서, f_{ps} : 강연선의 인장응력 (MPa)
 f_{se} : 강연선의 유효응력 (MPa)
 ()안의 단위 무시

식(1)은 강연선에 프리스트레스 유효응력을 고려한 것을 기준으로 하기 때문에 강연선에 프리스트레스를 가하지 않은 상태에서의 정착길이를 산정하기에 부적합하다. 콘크리트 내에서 인장을 가하지 않은 강연선의 부착특성 및 정착길이는 이형철근과 동일한 방법으로 산정할 수 있으며, 강연선의 부착특성 및 정착길이는 이형철근과 마찬가지로 문힘길이, 강연선의 크기 및 위치, 피복두께, 에폭시 도막, 콘크리트 강도, 횡방향 철근 등에 따라 영향을 받는다. 그러나 인장을 가하지 않은 강연선의 기존의 연구⁽³⁾⁻⁽⁵⁾에서는 이형철근

의 정착길이 산정식에서와 같은 다양한 영향인자를 반영하지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 연구의 목적은 문힘 길이, 피복두께, 강연선의 크기를 주요 변수로 하여 인장을 가하지 않은 강연선의 부착특성 및 정착길이 산정을 위한 부착특성을 파악하는 것이다.

2. 실험 계획 및 실험 방법

2.1 실험체 계획 및 제작

실험체 계획은 콘크리트내의 강연선의 인발 부착거동(pullout bond behavior)을 규명하기 위한 것으로 강연선의 직경, 문힘길이, 콘크리트 피복두께를 변수로 하였다. 각 실험체의 일람은 Table 1과 같다.

Table 1에 나타난 바와 같이 강연선은 A계열인 7연선 12.7mm(SWPC7B)와 B계열인 9.3mm(SWPC7A) 2종류를 사용하였으며, 문힘길이는 강연선 직경(d_b)의 10배~60배(SWPC7B인 경우 : 10 d_b , 15 d_b , 30 d_b , 45 d_b , 60 d_b , SWPC7A인 경우 : 10 d_b , 20 d_b , 30 d_b , 45 d_b , 60 d_b)로 계획하였다. 그리고 피복두께는 쪼갬 파괴(splitting failure)의 가능성을 배제하기 위하여 3.5 d_b 이상(SWPC7B인 경우; 3.5 d_b , 5.5 d_b , 7.9 d_b , SWPC7A인 경우; 4.8 d_b , 7.5 d_b , 10.8 d_b)확보하였다. 여기서 피복두께는 콘크리트 표면에서 강연선 중심까지의 거리를 말한다.

실험체 형상은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 일정 크기의 직육면체 블록 중앙에 강연선을 배치하였다. 직육면체 블록 단면은 정사각형으로 각각 90mm x 90mm, 140mm x 140mm, 200mm x 200mm인 3종류이며, 블록 길이는 문힘길이에 따라 400mm 와 800mm인 것으로 계획하였다. 문힘길이의 조절은

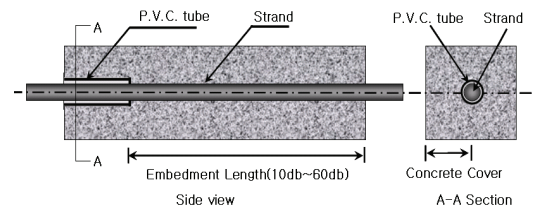


Fig. 1 인발 실험체 상세

Table 1 실험체 일람표

12.7mm strand specimens (A Series)						9.3mm strand specimens (B Series)									
No.	Specimen index	Series	Embedment length		Cover		Specimen dimension W×H×L(mm)	No.	Specimen index	Series	Embedment length		Cover		Specimen dimension W×H×L(mm)
			d _b	mm	d _b	mm					d _b	mm	d _b	mm	
1	AS-10d _b	AS	10	127	3.5	45	90×90×400	16	BS-10d _b	BS	10	93	4.8	45	90×90×400
2	AS-15d _b		15	190.5			90×90×400	17	BS-20d _b		20	186			90×90×400
3	AS-30d _b		30	381			90×90×400	18	BS-30d _b		30	279			90×90×400
4	AS-45d _b		45	571.5			90×90×800	19	BS-45d _b		45	571.5			90×90×800
5	AS-60d _b		60	762			90×90×800	20	BS-60d _b		60	558			90×90×800
6	AM-10d _b	AM	10	127	5.5	70	140×140×400	21	BM-10d _b	BM	10	93	7.5	70	140×140×400
7	AM-15d _b		15	190.5			140×140×400	22	BM-20d _b		20	186			140×140×400
8	AM-30d _b		30	381			140×140×400	23	BM-30d _b		30	279			140×140×400
9	AM-45d _b		45	571.5			140×140×800	24	BM-45d _b		45	571.5			140×140×800
10	AM-60d _b		60	762			140×140×800	25	BM-60d _b		60	558			140×140×800
11	AL-10d _b	AL	10	127	7.9	100	200×200×400	26	BL-10d _b	BL	10	93	10.8	100	200×200×400
12	AL-15d _b		15	190.5			200×200×400	27	BL-20d _b		20	186			200×200×400
13	AL-30d _b		30	381			200×200×400	28	BL-30d _b		30	279			200×200×400
14	AL-45d _b		45	571.5			200×200×800	29	BL-45d _b		45	571.5			200×200×800
15	AL-60d _b		60	762			200×200×800	30	BL-60d _b		60	558			200×200×800

Note 1. specimen index: AS-10d_b, A=12.7mm strand(SWPC7B), B=9.3mm strand(SWPC7A), S=small block(90x90 section), M=middle block(140x140 section), L=large block(200x200 section), 10d_b=embedded length.

Table 2 강연선의 재료시험결과

Materials	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elong. (%)
12.7mm (SWPC7B)	1750	1940	211.8	3.5
9.3mm (SWPC7A)	1689	1864	201.3	3.5

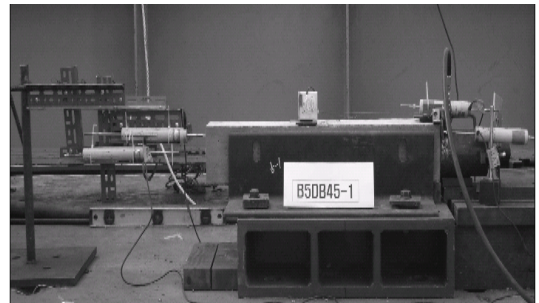


Fig. 2 실험체 설치상황

P.V.C. 파이프를 삽입하여 P.V.C. 파이프의 길이를 조정하여 제작하였다. 각 변수별 2개씩의 실험체를 제작하여 제작과정과 실험 중 발생하는 오차를 최소화하고자 하였다.

2.2 실험 재료의 역학적 특징

실험체에 사용한 콘크리트의 설계 압축강도는 30 MPa 계획하였으며, 압축강도 시험결과 34.2 MPa로 나타났다. 실험에 사용된 강연선(직경 12.7mm, 9.3mm 7연선)의 인장 시험결과와 Table 2와 같다.

2.3 재하 및 측정방법

본 연구에서는 기존연구^{(3),(4)}를 바탕으로 일면 인발 실험법을 채택하여 부착거동을 파악하였다. 인발 실험을 위한 실험장치는 Fig. 2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 실험체에 매입된 강연선의 한쪽을 300kN 단동실린더를 이용하여 강연선을 인발하였으며 콘크리트와 강연선 사이의 미끄러짐은 자유단에서 변위계(LVDT)로 측정하였다. 실험은 쪼갬파괴되거나 뿔뿔 파괴가 될 때까지 계속 진행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

각각의 강연선의 인발실험 결과를 미끄러짐이 발생하기 전의 부착응력, 최대 인발하중, 최대 인발하중시의 평균 부착응력 등을 분석하여 Table 3에 나타내었으며 전반적인 거동 특성 및 각 변수에 관한 효과를 살펴보면 다음과 같다.

3.1 파괴양상 및 하중-미끄러짐과의 관계

문힘길이가 60d_b, 45d_b인 실험체는 강연선 지름, 피복두께에 관계없이 모두 쪼갬파괴(splitting failure)가 발생되었으며, 문힘길이가 30d_b 이하인 실험체는 모두 뽑힘파괴(pullout failure)되었다.

하중과 미끄러짐의 관계 곡선은 Figs. 3과 4에 나

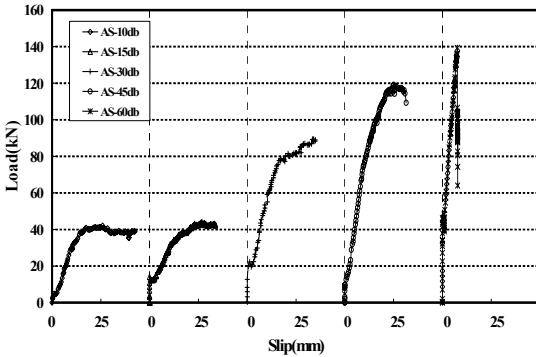
Table 3 실험결과

Specimen index	d _b (mm)	A _s (mm ²)	Embedment length		f _{ck} (MPa)	Concrete cover (mm)	Initial Free end movement		Maximum		f _{pu} ① (MPa)	f _{ps} (ini.)② (MPa)	f _{ps} (ult.)③ (MPa)	①/② (f _{ps} (initial))	①/③ (f _{ps} (ultimate))
			(mm)	L/d _b			P _i (kN)	U _i (MPa)	P _{max} (kN)	U _{max} (MPa)					
AS-10d _b	12.7	98.71	127	10d _b	34.2	45	2.34	0.46	42.15	8.32	1940	23.7	427.0	0.01	0.22
AS-15d _b	12.7	98.71	190.5	15d _b	34.2	45	14.10	1.86	44.02	5.79	1940	142.9	445.9	0.07	0.23
AS-30d _b	12.7	98.71	381	30d _b	34.2	45	16.98	1.12	86.17	5.67	1940	172.1	872.9	0.09	0.45
AS-45d _b	12.7	98.71	571.5	45d _b	34.2	45	27.58	1.21	111.10	4.87	1940	279.4	1125.5	0.14	0.58
AS-60d _b	12.7	98.71	762	60d _b	34.2	45	38.25	1.26	128.01	4.21	1940	387.5	1296.8	0.20	0.67
AM-10d _b	12.7	98.71	127	10d _b	34.2	70	10.67	2.11	40.28	7.95	1940	108.1	408.1	0.06	0.21
AM-15d _b	12.7	98.71	190.5	15d _b	34.2	70	14.57	1.92	45.89	6.04	1940	147.6	464.9	0.08	0.24
AM-30d _b	12.7	98.71	381	30d _b	34.2	70	18.15	1.19	80.01	5.26	1940	183.9	810.6	0.09	0.42
AM-45d _b	12.7	98.71	571.5	45d _b	34.2	70	25.94	1.14	110.55	4.85	1940	262.8	1120.0	0.14	0.58
AM-60d _b	12.7	98.71	762	60d _b	34.2	70	21.97	0.72	117.41	3.86	1940	222.6	1189.5	0.11	0.61
AL-10d _b	12.7	98.71	127	10d _b	34.2	100	7.32	1.45	37.63	7.43	1940	74.2	381.2	0.04	0.20
AL-15d _b	12.7	98.71	190.5	15d _b	34.2	100	13.63	1.79	56.10	7.38	1940	138.1	568.3	0.07	0.29
AL-30d _b	12.7	98.71	381	30d _b	34.2	100	19.79	1.30	95.05	6.25	1940	200.5	962.9	0.10	0.50
AL-45d _b	12.7	98.71	571.5	45d _b	34.2	100	39.27	1.72	143.28	6.28	1940	397.8	1451.5	0.21	0.75
AL-60d _b	12.7	98.71	762	60d _b	34.2	100	56.02	1.84	133.54	4.39	1940	567.5	1352.8	0.29	0.70
BS-10d _b	9.3	51.61	93	10d _b	34.2	45	4.99	1.84	16.83	6.19	1864	96.6	326.1	0.05	0.17
BS-20d _b	9.3	51.61	186	20d _b	34.2	45	7.85	1.44	29.22	5.38	1864	152.1	566.1	0.08	0.30
BS-30d _b	9.3	51.61	279	30d _b	34.2	45	11.92	1.46	40.98	5.03	1864	231.0	794.0	0.12	0.48
BS-45d _b	9.3	51.61	418.5	45d _b	34.2	45	6.23	0.51	51.34	4.20	1864	120.8	994.8	0.06	0.58
BS-60d _b	9.3	51.61	558	60d _b	34.2	45	21.58	1.32	58.04	3.56	1864	418.2	1124.6	0.22	0.60
BM-10d _b	9.3	51.61	93	10d _b	34.2	70	7.01	2.58	18.70	6.88	1864	135.9	362.3	0.07	0.19
BM-20d _b	9.3	51.61	186	20d _b	34.2	70	8.10	1.49	33.42	6.15	1864	157.0	647.6	0.08	0.35
BM-30d _b	9.3	51.61	279	30d _b	34.2	70	13.24	1.62	48.54	5.95	1864	256.6	940.5	0.14	0.50
BM-45d _b	9.3	51.61	418.5	45d _b	34.2	70	16.75	1.37	69.42	5.68	1864	324.6	1345.0	0.17	0.72
BM-60d _b	9.3	51.61	558	60d _b	34.2	70	25.24	1.55	88.12	5.40	1864	489.1	1707.4	0.26	0.92
BL-10d _b	9.3	51.61	93	10d _b	34.2	100	7.09	2.61	29.53	10.87	1864	137.4	572.1	0.07	0.31
BL-20d _b	9.3	51.61	186	20d _b	34.2	100	9.51	1.75	53.06	9.76	1864	184.2	1028.0	0.10	0.55
BL-30d _b	9.3	51.61	279	30d _b	34.2	100	10.75	1.32	65.76	8.07	1864	208.3	1274.1	0.11	0.68
BL-45d _b	9.3	51.61	418.5	45d _b	34.2	100	17.45	1.43	91.08	7.45	1864	338.1	1764.7	0.18	0.95
BL-60d _b	9.3	51.61	558	60d _b	34.2	100	35.22	2.16	98.01	6.01	1864	682.3	1899.1	0.37	1.02

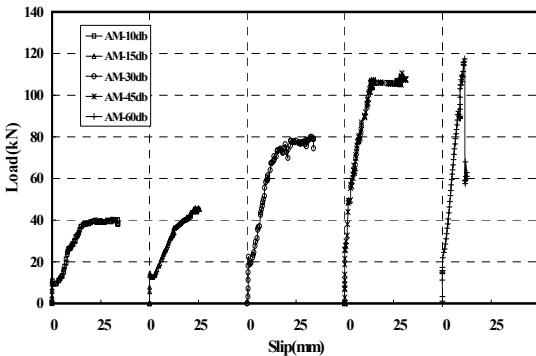
Note. f_{ck} : compressive strength of concrete, P_i : initial slip pullout force, P_{max} : Max. pullout force, U_i : initial slip bond stress, U_{max} : Max. bond stress, f_{pu} : specified tensile strength of prestressing strand, f_{ps}(i) : initial slip developed strand stress(=P_i/A_s), f_{ps}(max) : Max. developed strand stress(=P_{max}/A_s)

타내었다. 하중은 실린더 유압으로부터 측정하였고, 미끄러짐은 강연선 자유단에 설치된 LVDT로부터 측정된 값이다. 그림에서 보는 바와 같이 하중-미끄러짐 곡선은 크게 두 가지 형태로 대별된다. 한 가지는 초기 단계부터 하중 증가와 함께 변위가 발생하는 경우이고, 다른 한 가지는 하중이 어느 정도 진행된 후에 변위가 발생하는 경우이다.

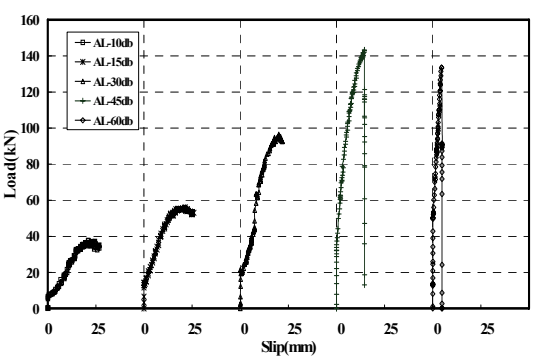
첫 번째 경우는 문힘길이가 작은 실험체(10db, 15db)에서 발생하였고, 두 번째 경우는 문힘길이가 20db 이상에서 발생하였다. 인발하중은 전반적으로 같은 단면에서 문힘길이가 길어질수록 하중이 증가하는 양상으로 나타나고 있으나, 미끄러짐 변위는 작은 값을 보여주고 있다.



(a) AS Series

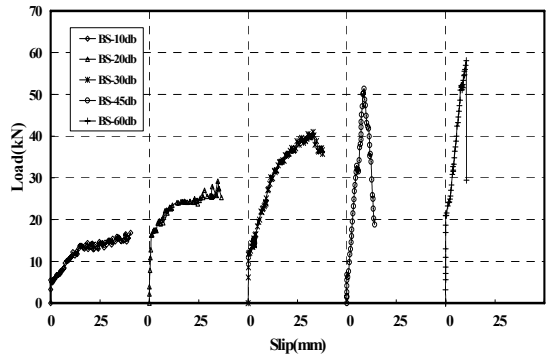


(b) AM Series

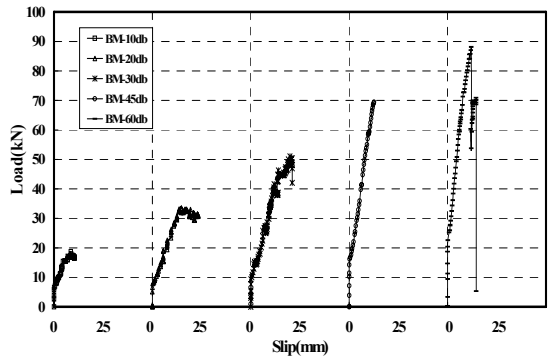


(c) AL Series

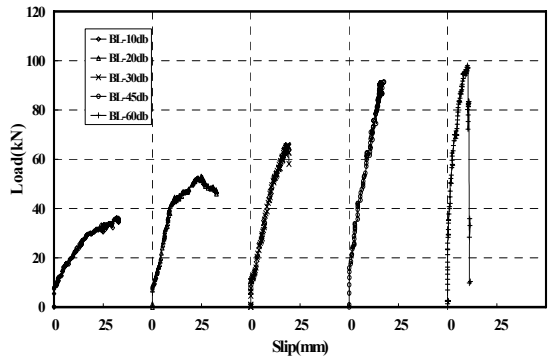
Fig. 3 Load-slip relationship : A series



(a) BS Series



(b) BM Series



(c) BL Series

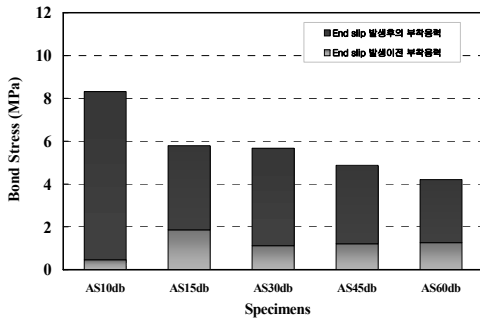
Fig. 4 Load-slip relationship : B series

3.2 평균부착응력의 산정

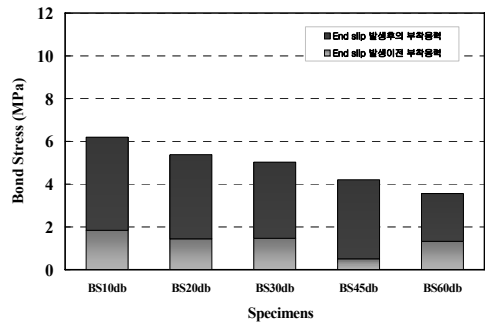
콘크리트 내에 묻혀 있는 강연선이 인장력을 받을 때 강연선의 묻힘길이에 따라 부착응력의 분포가 달라진다. 이는 강연선으로부터 콘크리트로 전달되는 응력이 각 위치마다 다르기 때문이며, 강연선과 콘크리트 사이의 미끄러짐에 따라라도 변화하기 때문이다.

실제 부착응력은 균등하게 분배되지 않으나, 본 실험에서는 매립된 PS강연선을 따라 부착응력이 일정하게 분배된다고 가정하여 다음과 같이 강연선의 인발하중을 부착면적으로 나눈 평균부착응력으로 도출하였다.

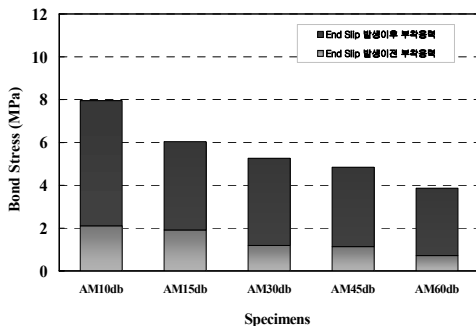
$$U = \frac{P}{\pi DL} \quad (2)$$



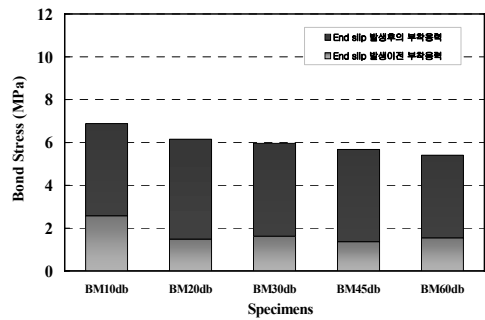
(a) AS Series



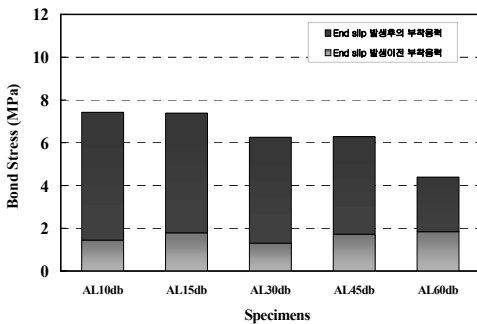
(a) BS Series



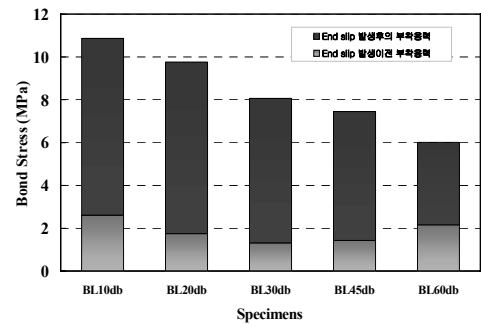
(b) AM Series



(b) BM Series



(c) AL Series



(c) BL Series

Fig. 5 초기 미끄러짐에 대한 부착응력: A Series

Fig. 6 초기 미끄러짐에 대한 부착응력 : B series

여기서, U : 평균부착응력(MPa)
 P : 최대인발하중(kN)
 D : PS강연선의 공칭지름(mm)
 L : 강연선의 문힘길이(mm)

3.3 부착응력 결과

3.2 절의 식(2)에 따라 구한 평균부착응력을 Fig. 5와 6에 나타내었다. Fig. 5와 6에 나타낸 바와 같이 평균부착응력은 A계열과 B계열 모두 문힘길이가 길수록 작아지는 경향을 보여주고 있다. 초기 미끄러짐에 대한 부착응력은 2MPa 수준이며, 강연선 크기, 피복 두께, 문힘길이 등 변수에 따른 일정한 경향은 찾아 볼 수 없었다.

3.4 강연선의 응력분석

재료시험에서 얻은 강연선의 인장강도는 각각 1940 MPa (12.7mm), 1864MPa (9.3mm)이다(Table 2 참조). A계열과 B계열의 초기 미끄러짐 발생시의 인장강도($f_{ps}(i)$)와 최대인장 강도의 값($f_{ps}(max)$)은 Table 3에 나타나 있다. $f_{ps}(i)/f_{pu}$ 비율은 문힘길이가 10db에서 0.01~0.07까지의 비율로 보아 문힘길이가 부착성능을 발휘하기에는 부족하다는 것을 극단적으로 보여주고 있다.

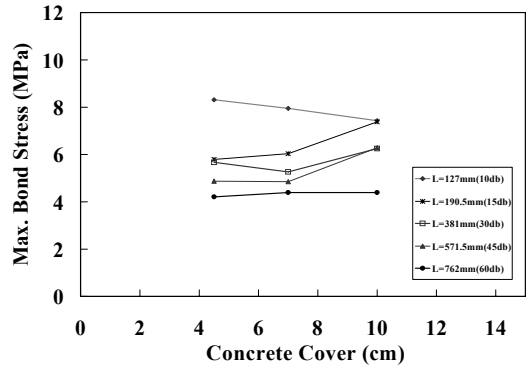
이에 비해 60db에서는 0.11~0.37까지 증가하고 있음을 보여주고 있다. 또한, 문힘길이가 60db인 일부 실험체에서 $f_{ps}(ult.i)/f_{pu}$ 의 실험값이 강연선의 재료시험시의 인장강도에 도달되고 미끄러짐이 발생되더라도 지속적인 하중증가를 보여주고 있어 문힘길이가 충분히 확보된다면 부착성능에 기여할 수 있을 거라 판단 된다.

3.5 피복두께와 문힘길이에 따른 영향

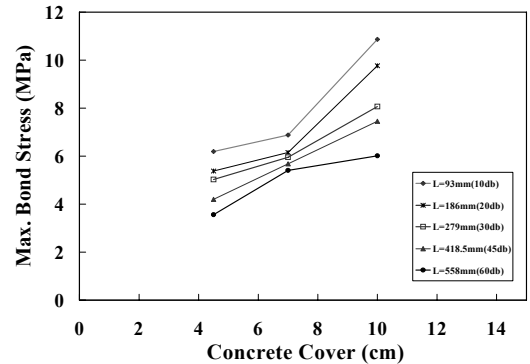
본 연구에서 콘크리트의 피복두께(concrete cover)에 따른 최대 부착응력이 어떻게 변화하고 있는지를 Fig. 7에 나타내고 있다.

Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 A계열(12.7mm)

실험체에서는 피복두께에 따른 평균부착응력은 10db인 실험체를 제외하고 증가하는 경향을 보여주고 있으며, B계열(9.3mm) 실험체에서 더욱 뚜렷한 경향을 보여주고 있다.(Fig. 7(b) 참조)



(a) A 계열(12.7mm strand)



(b) B 계열(9.3mm strand)

Fig. 7 피복두께에 따른 부착응력

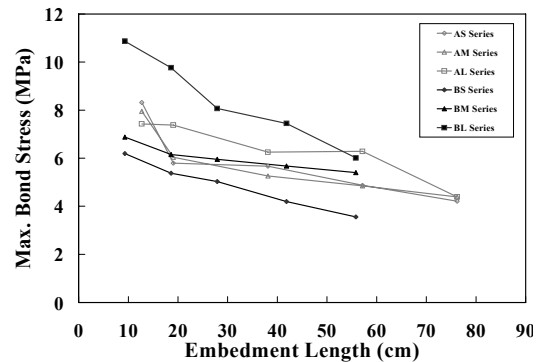


Fig. 8 문힘길이에 따른 부착응력

Fig. 8은 모든 실험체를 문힘길이에 따른 부착강도를 비교하여 나타낸 것이다. 서두에서 언급했듯이 문힘길이가 증가할수록 부착강도는 작아지는 경향을 보여주고 있으며, 다른 변수에 대해서는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

4. 결 론

이상과 같은 실험적 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 문힘길이가 60d_b, 45d_b인 실험체는 강연선 지름, 피복두께에 관계없이 모두 쪼갬파괴(splitting failure)가 발생되었으며, 문힘길이가 30d_b 이하인 실험체는 모두 뽑힘파괴(pullout failure)로 나타나 인장을 가하지 않은 강연선의 뽑힘파괴를 배제하기 위해서는 문힘길이가 최소 45d_b 이상 확보되어야 할 것으로 판단된다.
- 2) 하중-미끄러짐 곡선상에서 같은 조건에서 A계열 실험체가 B계열 실험체 보다 더 큰 하중을 부담하는 것으로 나타났으며, 문힘길이가 증가함에 따라 상대적으로 평균부착응력은 감소하는 경향을 보여주고 있다.
- 3) 최종파괴시의 부착응력은 문힘길이 및 피복두께에 따라 A계열 실험체는 3.86MPa~8.32MPa, B계열 실험체는 3.56MPa~10.87MPa 범위내에 있으며, 초기 미끄러짐에 대한 부착응력은 2MPa 내외 수준인 것으로 나타났다. 그러나 강연선 크기, 피복두께, 문힘길이 등 변수에 따른 일정한 경향은 보여주지 않았다.
- 4) 문힘길이가 10d_b에서 $f_{ps(i)}/f_{pu}$ 비율은 1%~7% 수준으로 부착성능을 발휘하기에는 부족한 것으로 나타났다. 그러나 문힘길이가 60d_b에서는 $f_{ps(i)}/f_{pu}$ 비율이 11%~37%까지 증가하고 또한, 문힘길이가 60d_b인 일부 실험체에서 $f_{ps(ult.i)}/f_{pu}$ 의 실험값이 강연선의 재료시험시의 인장강도에 도달되는 것으로 나타나 미끄러짐이 발생되더라도 지속적인 하중증가를 보여주고 있어 문힘길이가 60d_b 이상 확보된다면 인장을 가하지 않은 강연선의 부착성능에 기여할 수 있을 거라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-050-D00017)하에 이루어진 연구결과의 일부로써 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국 콘크리트 학회, "콘크리트 구조설계기준", 2002.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-05)," American Concrete Institute, Detroit, 2005.
3. John R. Salmons, Timothy E. McCrate., "Bond Characteristics of Untensioned Prestressing Strand", PCI Journal, Vol.22, No.1, January-February, 1977, pp. 52-65.
4. Panyan., Nipon,J., "Pullout Capacity of Non-Prestressed Bent Strands for Prestressed Concrete Girder". PCI Journal, Vol. 47, No. 4, July-August, 2002, pp. 90-103.
5. Edwards. A. D, Picard, A., "Bonding Properties of 1/2 in. Diameter Strand", ACI Journal, Vol. 69, No. 11, November, 1972, pp. 684-689.
6. Ladson M. Brearley Jr., David W. Johnston., "Pull-out Bond Test of Epoxy-Coated Prestressing Strand", ACI Journal, Vol. 116, No. 8, August, 1990, pp. 2236-2252.
7. Orangun, C. O, Jirsa J. O, Breen, J. E., "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices", ACI Journal, Proceedings Vol. 74, No. 3, March, 1977, pp. 114-122.
8. Darwin, D., McCabe, S. L., Idun, E. K., and Schoenekase, S. P. "Development Length Criteria : Bars not Confined by Transverse Reinforcement", ACI Structural Journal, Vol. 89, No. 6, Nov-Dec. 1992, pp. 709-720.
9. KS, "Standard specification," Korean Standard Association, Seoul, 2002.

(접수일자 : 2008년 2월 13일)
(심사완료일자 : 2008년 6월 20일)