

에폭시 코팅 처리된 PS 강선의 정착부착성능 실험

Tests on Transfer Bond Performance of Epoxy Coated Prestressing Strands

유승룡*
Yu, Sung Yong

요 약

프리스트레스 프리텐션 보의 전달길이를 위하여 콘크리트의 변형율에 의하여 부착력을 측정하는 간접적인 방법을 일반적으로 사용하여 왔다. 이 트랜스퍼 실험은 실제 보에서 행하여지므로, 실제 상태의 정착부착력을 측정할 수 있다는 장점이 있으나, 최대 정착부착응력과 부착강비를 구하기 난해하며, 그 결과값이 매우 분산되어 있으므로, 구조 설계자가 안전한 적정기준을 이해하고 선택하기 어렵다.

콘크리트의 변형을 측정하지 않아도 PS 강선의 정착부착 성능을 얻을 수 있는 대안을 소개하였다. 실제 보에서 PS 강재의 긴장을 풀 때와 유사한 상황에서 정착부착 응력을 직접 구하였다. 하중제하부에서 풀려진 PS 강선의 긴장력은 하중제하부쪽 강선의 단면증가를 가져오고, 콘크리트 블록에 정착부착력을 발생시키며, 다른 방향(고정부 쪽)으로 슬립을 유발시킨다. 두개의 중공 로드셀로 양단하중을 최대 부착응력 또는 전면슬립이 일어난 때까지 측정하였다. 프리텐션 콘크리트보의 정착부착 길이를 구하기 위하여 이 방법을 기존의 트랜스퍼 실험방법과 병행하여 사용할 것을 제안한다.

Abstract

The current test procedure for transfer length, which determine transfer length by measuring concrete strain, has an actual bond stress state in the prestressed pretensioned member ; however, it is difficult to determine the bond properties of maximum bond stress and bond stiffness with this method. It is also difficult for design engineer to understand and select a correct safety criterion from the widely distributed results of such a transfer test alone.

An alternative testing procedure is provided here to determine the bond properties without measuring the concrete strain. In this test the bond stress is measured directly by creating a similar boundary condition within the transfer length in a real beam during the transfer of prestressing force. The prestressing force was released step by step from the unloading side. The release of force induces a swelling of the strand at the unloading side of concrete block, bonding force in the block, and a bond slip of the strand toward the other side of the block. Two center-hole load cells are used to record the end loads until the point of general bond slip(maximum bond stress). It is suggested that this test procedure be performed with the ordinary transfer test when determining the transfer length in a prestressed, pretensioned concrete beam.

Keywords : bond, transfer length, prestressed concrete,
slip, hoyer effect, unbonded, epoxy coated

* 정회원, 동국대학교 건축공학과 전임강사

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 4월 30일까지 학회에 보내 주시면 1994년 6월호에 토의 해답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

프리스트레스 콘크리트는 지난 수십년간 구비에서 가장 많이 사용되는 구조재료중 하나였으나, ACI-318 규준[1] 정착부착길이에 대하여는 최근까지 흥미로운 연구과제로 많은 논란의 여지를 가져왔다.

프리텐션 콘크리트 부재에서 PS 강선에 적용된 전체 유효 강선응력(effective steel stress)은 반드시 콘크리트와 PS 강선사이에서 발생하는 정착부착력만으로 전달받지 못한다. 이 유효 강선응력의 전달에 필요한 길이를 전달길이(transfer length)라 한다.

전체 정착길이(development length)를 구하기 위하여 우선 전달길이를 구하여야 한다. 프리스트레스 보의 한계단면에서 최대 전달강도와 휨강도에 대한 ACI 규준도 부착과파괴가 일어나지 않는다는 가정하에 규정되었으므로, 최대 전달강도와 휨강도를 음수로 예측하기 위하여도 PS 강선의 전달길이와 전달부착응력에 대한 실질적인 예상치가 먼저 규정되어야 한다.

전달길이를 얻기위하여 콘크리트의 변형을 측정에 의한 트랜스퍼 실험(transfer test)은 실제 부재에서 시도될 수 있으나, 해석과 이해를 위하여 필요한 최대 정착부착응력과 부착응력과 슬립에 대한 비율을 규정하기 어렵다. 또한, 트랜스퍼 실험의 경우 그 결과치가 매우 분산되어 있으므로, 트랜스퍼 실험으로 얻은 선택된 강선의 전달길이에 대한 간단한 결론은, 동일한 실험의 결과치가 다른 이유에 대한 충분한 설명을 줄 수 없다.

콘크리트의 변형율을 측정하지 않아도 PS 강선의 정착부착 성능을 얻을 수 있는 대안을 소개하였다. 실제 보에서 PS 강선의 긴장을 풀 때(release)와 유사한 상황에서 정착부착력을 직접 구하였다. 프리텐션 콘크리트보의 정착부착 길이를 구하기 위하여 이 방법을 기존의 트랜스퍼 실험방법과 병행하여 사용할 것을 제안한다.

2. 전달길이에 관한 연구현황

2.1 전달길이 내의 부착응력 특성

Hoyer 와 Friedrich[2]는 PS강선의 단면증가

가 프리텐션 부재에서 단부 강선정착을 위한 주된 요인임을 지적하였다. 강선단면의 증가는 강선의 긴장후 풀림으로 인한 강선응력의 감소에 의한 것으로 프리스트레스 보에 쐐기작용(wedge effect)을 일으켜 전달길이내에 큰 마찰저항(frictional force)을 가능토록 한다. 이 현상을 “Hoyer effect”라고 한다.

Hognestad와 Janney[3]는 PS강선의 부착력은 점착력(adhesion), 마찰력(friction), 기계적 부착력(mechanical interlock)에 기인하며, 프리텐션 보에서 PS강선의 큰 슬립을 고려할때 마찰력과 기계적 부착력이 전달 정착부착응력을 위하여 그 주된 요소임을 지적하였다.

Over와 Au[4]는 원형과 칠연선의 PS강선 전달 정착부착기동에 대하여 연구하였다. 이 실험에서 강선에 적용된 응력분포와 콘크리트표면 응력분포 사이에 큰 차이를 재현할 수 있었으며, 강선 응력분포가 훨씬 정확하였다고 주장하였다.

Deatherage 와 Burdette[5]는 20개의 Type I AASHTO 프리스트레스 보와 6개의 단면축소 프리즘에 대한 트랜스퍼 실험을 하였는데, 전달길이에 대한 변형을 곡선 후반부(탄성영역)에서 주로 발생하는 파동은 결과에 대한 해석에 따라 상당한 오차를 유발시킬 수 있는 요인임을 지적하였다.

2.2 ACI/ AASHTO 전달및 전체정착길이

ACI 위원회 318의 PS강선의 전체부착응력에 대한(Section 12.9.1) 사항은 Hanson과 Kaar[6]의 휨부착길이와 Kaar, Lafraugh, Mass[7]의 전달길이에 대한 연구에 그 기초를 두고 있다. 전체 정착길이에 대한 그림 1은 다음 방정식에 그 기초를 두고 있다. 여기에서, 실수 7은 단위환산을 위함이다.

$$L_d = (f_{ps} - 2/3 f_{sc}) d_b / 7 \quad (1)$$

여기서, L_d = 전체 정착길이(mm),

f_{ps} = 봉칭 부재강도하에서 강선응력 (megapascal),

f_{sc} = 유효 강선응력 (megapascal),

d_b = 공칭 강선 직경(mm),

위의 방정식 (1)은 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$L_d = (f_{se}/3)d_b/7 + (f_{ps} - f_{se})d_b/7 \quad (2)$$

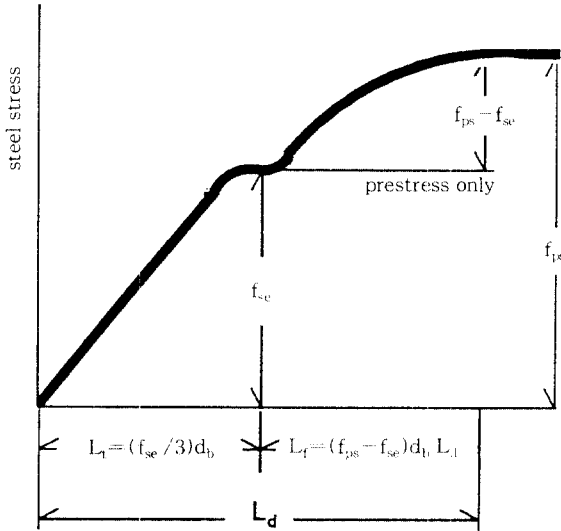


Fig. 1 Model of ACI equations for transfer and development length.

위의 식에서 첫항은 전달길이를 둘째항은 휨부착길이를 나타내고 있다. 유효 강선응력은 프리스트레스 프리텐션 보에서 초기 긴장과 풀음으로 생긴다. 이 유효 인장력이 콘크리트에 전달되는데 필요한 길이를 전달길이(transfer length)라 한다. 휨부착응력은 외부 하중으로 인하여 부재가 휨을 일으킬 때 발생된다. 이 부가되는 응력에 의한 첨가된 길이를 휨부착길이(flexural bond length)라 한다. 전달길이와 휨부착길이의 합을 전체 정착길이(development length)라 한다. 이용 가능한 정착길이(available bond length)는 보통 전달스팬 과 내림길이의 합으로 구할 수 있다. 이용가능한 정착길이가 요구되는 전체 정착길이보다 작을 때는 조기 부착파괴(premature bond failure)를 일으킬 수 있다. 프리스트레스 보가 조기 부착파괴에 의해 파괴될 때 취성 파괴(brittle failure)를 경험하게 되므로 반드시 방지할 수 있어야 한다.

방정식(2)에서 전달길이는 유효 강선응력과 공칭강선직경에 의하여 구하여 진다. Zia와 Mostafa[8]는 이 식에서 숫자 3은 콘크리트 압축강도의 보수적 평균값 3 Ksi(210 Kg /Cm²)를 암시한것으로 지적하였다. 또한, ACI 규준 Section 11.4.3에 의하면, 전달길이는 강선 직경의 50배인 50 d_b 를 전달길이로 고려할 수 있음을 암시하고 있

Table 1 Comparison of results of previous transfer length tests of 1/2"-diameter strands

Diameter & Surface Cond.	Type, Release	f_{ct} (psi)	Ave. L_t (in)	U'_1 (psi)	
(1) Janney 1963	1/2 U, CL	4,115	33.0	8.1	
	1/2 U, RU	4,090	24.0	11.2	
(2) Kaar 1963	1/2 U, G	4,170	34.0	7.8	
	1/2 U, S	4,170	37.0	7.1	
	1/2 U, S	5,000	41.0	5.9	
(3) Over, 1965	1/2 U	5,500	35.0	5.6	
(4) Dorsten 1984	1/2 U, G	4,000	26.3	11.1	
	1/2 U, G	4,000	27.5	10.6	
	1/2 U, G	4,000	33.3	8.7	
(5) Deatherage 1990	1/2 U	4,000	42.8	6.7	
(6) Cousins 1991	1/2 U, S	4,110	62.5	4.4	
	1/2 CM, G	4,110	16.0	17.8	
	1/2 CH, G	4,110	16.1	16.6	
(7) Shahawy 1992	1/2 U	5,110	30.0	7.4	
(8) Lane 1992	1/2 U	One strand	4,330	33.0	7.1
		Four strands	4,330	40.0	5.7
	1/2 C	One strand	4,330	20.2	11.7
		Four strands	4,330	26.0	8.8

Source : (1) Janney [10],

(2) Kaar et al. [7],

(3) Over and Au [4],

(4) Dorsten et al. [11],

(5) Deatherage and Burdette [5],

(6) Cousins et al. [12, 13, 14],

(7) Shahawy et al. [15],

(8) Lane [16].

Note : U -uncoated strand,

C -epoxy coated strand,

CH -high coated strand,

CL -light coated strand,

CM -medium coated strand,

RU - rusted and uncoated strand,

G - gradual release,

S - sudden release.

다고 하였다. 이는 즉, 강선 유효 장선응력이 150 Ksi(10,546 Kg/Cm²)임을 가정한 것이다. Fagundo와 Narayan[9]은 유효 인장응력은 초기 긴장력과 풀림때의 손실(loss)의 크기에 의존함으로, 이는 곧 강선의 항복강도의 70% 재킹하중과 20%의 손실을 의미함을 지적하였다. 방정식 (2)의 두번째 항의 휨부작용력은 A_{ps} 가 강선 단면적일 때 평균 부착응력 U_{ave} 에 의해 $(f_{ps} - f_{sc}) A_{ps} / (U_{ave} d_b)$ 과 같이 표현될 수 있다. 이는 $(f_{ps} - f_{sc}) d_b / (4 U_{ave})$ 로 간략 시킬 수 있으므로 휨 부작 길이를 1 Ksi로 가정한것임을 알 수 있다. 즉, ACI 규준은 250 psi(17.5 Kg/Cm²)를 휨부작용력, U_{ave} 로 고려하였음도 알 수 있다. 그러므로 ACI 규준은 최소 휨 부작 길이를 의도적으로 규정하기 위하여 부착력이 어느한계를 넘지 못하도록하는 가정에 그 기초를 두고 있다고 할 수 있다.

프리스트레스 보의 전달길이의 그에 대한 최고 부착응력은 PS강선을 긴장하고 풀을 때, 강선 중립축을 기선으로한 콘크리트 외측 변형율을 계측함으로써 얻어지며, 이 방법을 트랜스퍼 실험이라 한다. 표 1의 프리스트레스 부재의 트랜스퍼 실험 결과에서 알 수 있듯이 동일한 종류의 실험에서도 그 결과가 매우 분산되어 있음을 알 수 있다. 즉, 기존의 트랜스퍼 실험은 전달길이와 그 기동에 대한 충분한 이해를 줄 수 없음을 알 수 있다. 여기에서 콘크리트 압축강도의 평방근분에 최대 부착응력, U_1 는 부착응력이 전체 전달길이내에서 균등하게 분포되었음을 가정하여 구하였다.

2.3 부착응력-슬립 실험

Edward와 Piccard[17], Stocker와 Sozen[18], Brearly와 Johnstone[19]은 PS 강선에 대한 인발시험(pull-out test)을 시도하였으나 Hoyer Effect에 의한 강선 단면의 증가를 고려하지 못하였으므로 실질적인 전달길이 내에서의 부착응력과는 다른 결과를 얻었다.

최근, Cousins, Badeaux, Mostafa의 실험[20]은 Hoyer Effect를 고려한 인발실험이라 생각할 수 있으나 다음과 같은 문제점이 이 연구에서 보정되었다.

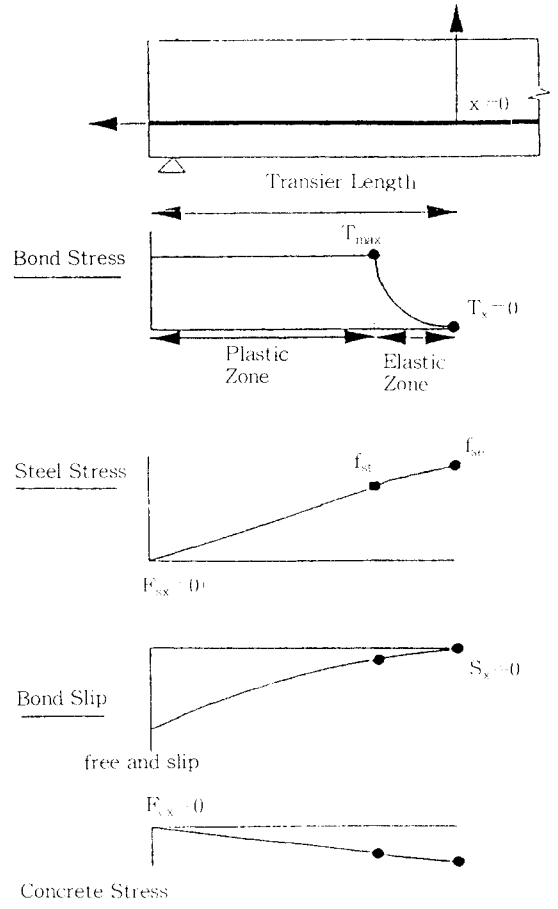


Fig. 2 Transfer bond stress model

1) PS 강선 인발시험은 전달길이 내에서의 부착응력 상태를 모델링하기 위하여 고안되었다. 전달길이 내에서 오직 탄성영역만 부착응력-슬립비에 의존한다. 그림 2에서 알 수 있듯이 탄성영역 안에서 슬립이 증가할수록 부착응력은 증가되나 강선응력은 감소됨을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 Cousins et al.은 슬립이 증가할수록 강선과 부착응력이 함께 초기 값 0에서 증가됨을 알 수 있다.

2) 콘크리트 블록의 강선에 대한 상대변위(relative slip)를 얻기 위하여 강선을 고정하고 콘크리트 블록을 이동시킴으로 구하여 졌으나, 다음의 제안하는 실험에선 콘크리트를 고정하고 강선을 이동시킴으로 Hoyer Effect를 고려한, 실제 프리스트레스 보에서 강선을 긴장 및 풀때와 같은

효과를 구할 수 있었다. 실험중 강선의 응력은 항상 감소 되므로 이로인한 강선 단면의 증가는 양단 고정부에 의미있는 손실을 줄 수가 없다.

3. 실험모델개요

프리스트레스 실험대는 그림 3에서와 같이 I형 강에 PS 지지부를 용접함으로 만들었다.

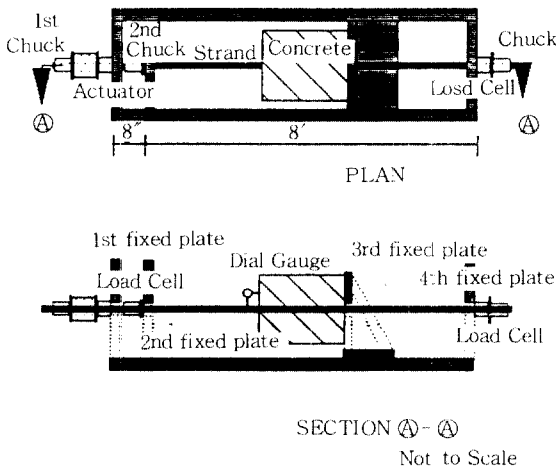


Fig. 3 Prestressing test frame

본 실험에 들어가기전에 PS 강선에 유압재크를 이용하여 인장력을 가하고(그림 4(a)), 콘크리트를 시험 기구집에 다설한다. 콘크리트가 일정강도를 갖게되면 최소한의 증가된 인장력을 강선에 가하여 콘크리트 경화과정에 사용되었던 두번째 책을 제거한다. 이 증가된 인장력은 세번째 고정철판과 콘크리트 사이에 오일을 발라서 부착력을 제거하였으므로 강선 부착력에는 영향을 주지않는다(그림 4(b)).

본 실험에선 강선에 적용된 인장력을 점차로 감소시킨다. 그림 4(c)에서 보듯 이 감소된 인장력은 재크가 있는쪽(하중재하부)의 강선의 단면의 증가를 발생시키고, 콘크리트 블록에 부착응력을 일으키며, 재크 반대(고정부)방향으로 슬립을 일으킨다. 여기서 발생한 슬립은 고정부에 로드셀의 하중을 소량으로 떨어뜨리게 된다(그림 4(c)). 정착부착력은 고정부와 하중재하부에 설치된 두개

의 로드셀의한 하중의 차이로 측정될 수 있다. 한번에 일정량의 하중을 제거한후 슬립과 부착력을 측정하고, 이 방법은 마지막 부착응력의 극한치로 전면 슬립(general bond slip)이 생길때까지 계속된다. 전면 슬립은 일시에 0.025cm(0.1인치)이상 슬립이 일어나는 것으로 알 수 있었다.

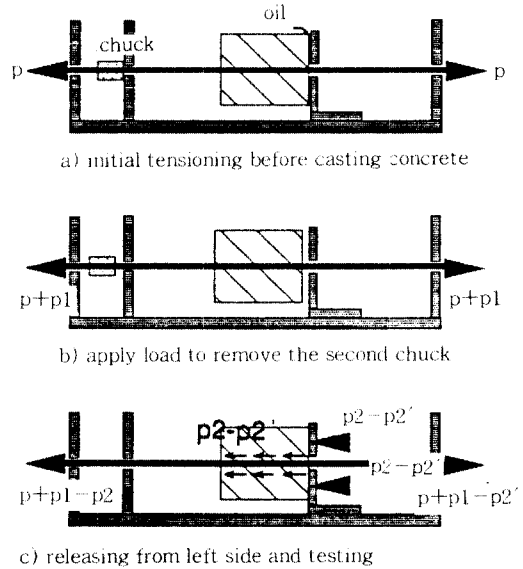


Fig. 4 Free-body diagram of concrete block

3.1 시험체

강선에 대한 구속(confinement)은 복단이나 충분한 피복두께로 얻어질 수 있다. 이 피복두께는 방사성 인장응력(radial tensile stress)로 인한 균열을 방지하기에 충분해야 한다. 이 시험에서 15.0×15.0 Cm의 단면이 사용되었다. Cousins et al의 실험[20]에 의하면 15.0×15.0 Cm 단면은 인장력에 의한 방사성 균열을 방지하기에 충분한 두께임이 고려되었다.

이 실험에서 부착응력은 전체 정착길이에 대하여 균일하게 분포됨을 가정하였다. 이 가정을 위하여 Edward와 Picard[17]는 짧은 시험체를 인발시험(pull out test)에 사용할 것을 권고하였다. Edward와 Picard는 1.27Cm, 2.54Cm, 3.81Cm의 시험체를 이용하였다. Eligehausen, Popov, Bertero[21]는 인발시험에서 철근의 부착응력을

위하여 철근지름의 5배를 사용하였다. 이 실험에 선 방사성균열을 방지할 수 있는 최소길이와 피복 두께를 선택하였다. 시험체 길이와 각 스텝마다의 감소되는 하중은 표 2와 같다.

Table 2 Specimen size and unloading rate

Size and Type of Strand	Specimen Size height×depth×length	Unloading Rate
1/2", uncoated	6" × 6" × 6"	200Lb/step
1/2", coated	6" × 6" × 6"	300Lb/step

3.2 재 료

7연선, 1.27 Cm(0.5인치) 반경, 18,983 Kg /Cm² (270 Ksi) 강도, 로우 릴랙세이션(low relaxation) 그리트 처리된 에폭시코팅 PS 강선(grit impregnated epoxy coated strand)과 코팅 처리되지않은 강선(bare strand)을 사용하였다(그림 5). 이 강선은 ASTM(American Society for Testing and Materials) 기준, Standard A416과 A882 [22, 23]에 적합한 강선이며, 탄성계수는 평균 2,010,809 Kg/Cm²(28,600 Ksi)였다.

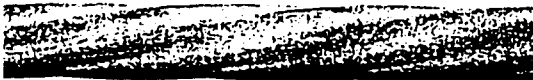


Fig. 5 View of coated and bare strand

콘크리트 배합은 하루동안의 스팀양생으로 351 Kg /Cm²(5,000 psi)의 압축강도를 얻을 수 있도록 설계되었다. 배합수의 양이 콘크리트 강도를

Table 3 Concrete mix proportioning

Materials	Weight, (yd) ³		Volume, (ft) ³
	* ² Dry, Lb	* ³ NMC, Lb	
Air	0.0	0.00	0.81
Cement	940.82	940.82	4.79
Water	378.98	398.89	6.07
Fine aggregate	1147.18	1148.33	7.27
Coarse aggregate	1278.29	1279.57	8.07

Note : *²Dry – materials with a dry condition.

*³NMC – materials with a natural moiature content.

위하여 변수로 사용되었다. 세골재 조립율(F.M)은 2.02이며, 28일 압축강도 422 Kg /Cm²(6,000 psi)를 상회하도록 설계되었다(표 3).

3.3 실험 장비

두개의 중공 로드셀(ceter-hole load cell)을 이용하여 콘크리트블럭 양단부에서 하중을 계측하였다. 이 두개의 로드셀은 각각의 전원 과 계측기로 연결되었으며, 인장력은 유압펌프로 두 방향 중공 재크(double action ceter-hole actuator)에 적용된다(그림 6).

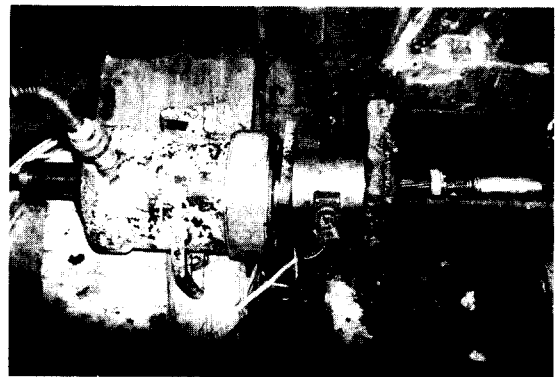


Fig. 6 Installation of Load cell and actuator at unloading side

하중을 조절하기 위하여 두개의 V-8 Needle Valve가 재크와 유압펌프 사이에 연결되었다(그림 7). 처음 밸브는 하중재하속도를 다음 밸브는 하중재하크기를 조절할 수 있다.

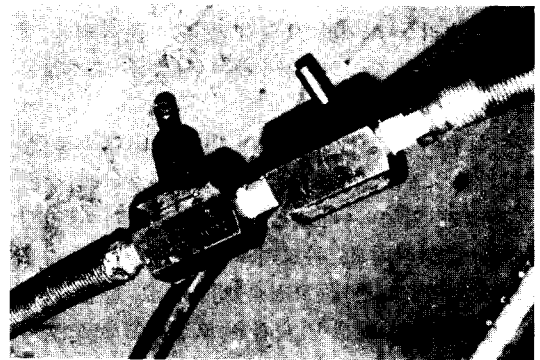


Fig. 7 View of needle valves

콘크리트블럭대 강선의 상대 슬립은 콘크리트블럭의 하중부쪽 강선에 다이알게이지를 설치하여 진면슬립이 일어날때 까지 측정한다(그림 8). 0.0025mm(1/10000인치) 규정오차의 다이알게이지를 사용하였다.

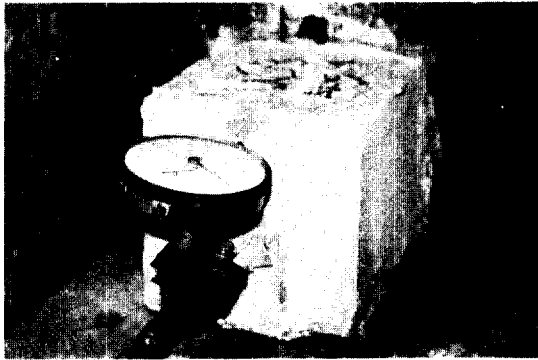


Fig. 8 View of dial gauge and mount

3.4 조 립

콘크리트블럭은 재 사용이 가능한 방수처리된 나무 형틀이 사용되었다. 이 블럭은 형틀외측에 진동다짐과 블럭양쪽 강선을 열번째 두드려 다짐한후, 16시간의 스팀 양생을 하였다. 부작력에 대한 온도의 영향을 줄이기 위하여 스팀양생후 상온까지 냉각시킨 후에 실험을 실시하였다. 압축강도 실험을 위하여 세개의 지름 15 Cm 높이 30 Cm의 표준 원주형 공시체도 시험체와 같은 조건에서 양생되었다.

PS강선은 실제 보 안에서 췌기작용(Wedge Effect)에 의하여 회전하므로, 이를 돕기 위하여

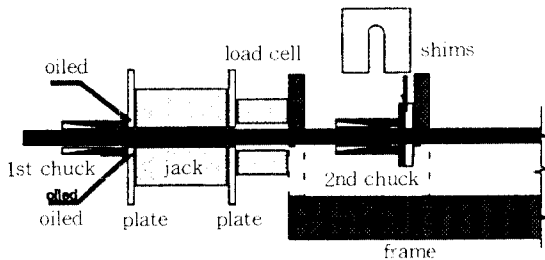


Fig. 9 Shims for minimum seating loss

그림 9에서와 같이 칩과 재크사이에는 오일을 이용하여 마찰을 줄였다.

4. 실험절차

실험절차는 다음과 같다.

1. 실험대를 깨끗이 청소한후 형깁조각을 이용하여 세번째 고정 철판에 오일을 바른다.
2. 로드셀과 하중재하부와 관련된 장비를 설치한후 100~200 Kg의 하중을 가한다. 작은 하중이 가해졌으므로 PS강선과 로드 셀을 원하는 장소로 이동 함으로서 편심이나 네개의 구멍에 접촉 없이 설치할 수 있다.

3. PS 강선에 항복인장강도의 50%에서 55% 정도의 인장력을 가한다. 두 로드셀은 그 측정결과가 양쪽에서 편심으로 인한 영향없이 동일하게 측정되는지 점검하고, 동일한 차이로 그 결과가 나타나면 PS강선이 적절하게 설치되었음을 알 수 있다. 콘크리트 양생중 단부에서 PS강선의 슬립으로 인한 오차를 줄이기 위하여 다음과 같이 췌기(shim)를 설치한다.

- a) 9.5~10.5톤의 인장하중을 PS강선에 주어 두번째 칩을 두번째 고정 철판으로 밀어 넣고 인장하중을 2톤정도까지 풀어준다.
- b) PS 강선에 9.5~10.8톤 인장하중을 다시 적용하고 다양한 두께의 그림 8과 같은 shim을 칩과 두번째 고정철판 사이에 끼워 넣는다.
- c) PS 강선에 요구되는 인장력을 얻을때 까지 이 절차를 반복한다. 일반적으로 다양한 두께의 3~4개 shim이 적용된다.

4. 형틀을 설치하고 콘크리트를 타설한다. 형틀외측 진동다짐과 PS 강선을 두드려 줌으로서 콘크리트를 밀실하게 한다. 3개의 원주형 공시체도 같은 방법으로 준비된다.

5. 콘크리트가 응결된다음 스팀양생을 시작하며, 콘크리트 응결은 수정 Gillmore Test로 확인한다.

6. 3개의 원주형 공시체도 콘크리트 블럭과 같은 환경에서 양생한다.

7. 탈형한후 다이알게이지를 정착한다.

8. 부작력에대한 열효과를 방지하기 위하여 콘

크리트 블록을 상온까지 식힌다. 3개의 원주형 공시체에 압축응력 실험을 한다.

9. 첫번째 척에 최소한의 하중 1~2톤을 더 적용하여 두번째 척에 있는 shim을 제거하고 두번째 척을 제거한다.

10. 본 실험에서 하중재하부쪽에 있는 Needle Valve를 개폐함으로 90~140Kg(200~300lb)씩 하중을 감소시키고, 다이알게이지와 양쪽 로드셀을 계측한다. 이 절차는 전면 슬립이 일어날때까지 계속된다. 첫번째 밸브는 조금일어 하중속도를 조절하고, 두번째 밸브는 하중양을 조절한다. 90~140Kg를 줄이기 위하여, 대체로 10 초에서 15 초 정도의 시간이 경과되었다.

11. 최대 부착력은 0.025 Cm(0.01인치)보다 큰 갑작스런 전면 슬립을 목격함으로 얻어진다. 최대 부착력이 구하여진 후에도 부착응력 대 슬립 비율은 부착력 파괴후의 거동을 위하여 계속 계측한다.

5. 결 과

이 실험은 0.5인치의 코팅처리되지 않은 PS 강선의 충분히 다짐을 하지않은 2개의 시험체와 충분한 다짐을 한 5개의 시험체에 대하여, 그리고 그리트 처리된 에폭시코팅 PS 강선의 5개 시험체에 대하여 행하였다. 실험할 때의 콘크리트 압축강도 영향을 고려하였다. 압축강도는 280 Kg /Cm²에서 422 Kg /Cm²(4 Ksi에서 6 Ksi)로 정해졌다.

5.1 실험 오차

이미 언급하였듯 두번째 척을 제거한후 실험을 시도 할 수 있으므로 이를 위하여 최소한의 하중을 더하여 주게 되는데 가력된 인장력은 콘크리트 블록을 세번째 고정철판에서 하중재하부쪽으로 움직이게 한다(그림 4(b)), 이때 철판과 콘크리트 블록은 오일처리 되었으므로 콘크리트와 고정철판사이의 부착력으로 인한 PS강선의 부착력은 파손되지 않는다. 척을 제거한후 그림 4에서와 같이 콘크리트 블록과 세번째 고정철판은 떨어져 있으므로, 처음 몇번의 두 로드셀 결과치는 콘크리트 블록이 고정철판에 닿을때까지 같은 크기로 줄어

든다. 중간에 방해물이 없으므로 두 결과치는 이론상으론 동일하여야 하지만, 로드셀 검증시험(calibration test)으로 인한 오차나 로드셀 정차으로 인한 오차로 미소한 차이가 있었다. 그러나, 두값이 선형으로 일정한 차이를 두고 줄어들 때에는 이 차이를 초기값 0으로 간주할 수 있었다.

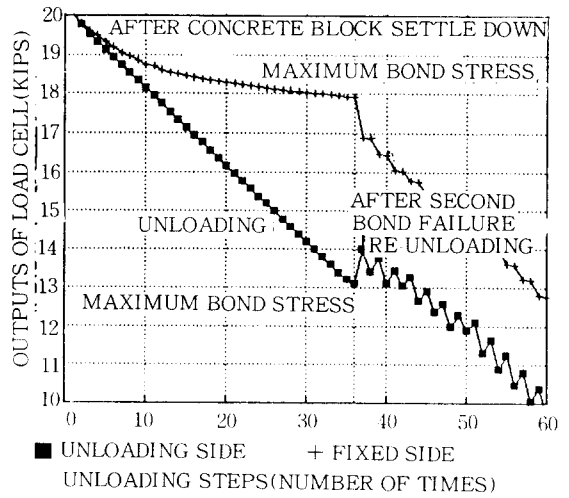


Fig. 10 Typical outputs for two load cells
(Model #US-5, Bare Strand)

5.2 두 로드셀의 결과

그림 10에서 알 수 있듯이, 콘크리트 블록이 철판에 접촉한 후에도 하중재하부에선 결과치가 선형으로 줄어드나 고정부에서 결과치가 비선형으로 둔화되게 된다. 콘크리트 블록이 고정판에 완전히 정착한 후에도 고정부에서는 결과치에 미소한 감소가 보이는 것은 당해 하중에 대한 슬립으로 고정부에서 하중값이 줄었기 때문이다. 이때 부착력은 두 로드셀 결과치의 차이로 얻을 수 있으므로 구하여진 부착력은 블록이 철판에 닿기 전에는 미소하게 증가하나 콘크리트 블록이 정착한 후에는 하중재하부에서 감소된 하중이 슬립으로 인한 고정부에 미소한 하중전달치를 감한 거의 모든 값이 부착력으로 치환되게 된다(그림 10).

5.3 슬립과 최대 부착응력

첫 슬립은 코팅 처리않은 부착응력이 평균 8

Kg / Cm²(110 psi)에 도달하였을때, 코팅된 강선은 10.5 Kg / Cm²(150 psi) 도달하였을때 0.00064 ~ 0.00127mm(0.000025 ~ 0.00005인치) 정도 일어 난다. 코팅처리되지 않은 PS 강선에서 슬립은 하중재하부에서 하중을 가하는 것과 함께 발생되고 멈추게된다. 그러나, 코팅된 강선은 높은 하중에선 하중을 가한후에도 상당기간 슬립이 계속되었으며, 정적 균형 (static equilibrium) 에 도달하기까지 상당한 시간이 요구되었다(5분-10분). 측정된 부착응력과 슬립은 하중이 거절수후 연속적으로 천천히 증가되었다. 90 ~ 140 Kg(200-300lb)의 당해하중에 대하여 .00254mm에서 .0254mm의 슬립이 발생하였다.

그림 11과 같이 대표적인 부착응력대 슬립 곡선을 얻을 수 있었다. 이 그림에서 초기 슬립은 평균 8 Kg / Cm²(110 psi)의 부착응력에서 발달하기 시작하여, 이 비율은 초기값에서 높은값을 보이나 같은 하중의 증가에도 불구하고 점점 작은값으로 나타났다. 최대 부착응력은 이후에 일어나는 슬립으로 인하여, 다이알게이지 큰 바늘이 반바퀴정도(0.25mm(0.01인치)) 일시에 도는 것으로 확인할 수 있었다. 최대 부착응력에서 슬립이 갑작스럽고 크게 일어나므로, 양쪽 로드셀에서 하중이 진이되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 하중재하부에서

하중의 증가와 고정부에서 하중의 감소를 가져오게 된다. 그러므로 이로인한 부착응력은 급격히 떨어지게 된다.

5.4 부착 파괴후

첫 정착부착력의 파괴가 일어난후 하중재하부에서 1.8mm(0.07인치)의 전체슬립이 일어날때까지 하중재하를 계속하였다. 코팅않은 강선의 부착력은 27-32 Kg(60-70 lb) 정도 증가한후 파괴되었으며, 20번정도의 부착파괴(bond failure)에도 불구하고 평균 19 Kg / Cm²(270psi)를 유지하였다. 코팅한 강선은 4.5-6.8 Kg(10-15 lb)정도 증가후 평균 51.33 Kg / Cm²(730 psi)를 유지하였다. 이는 곧 Hoyer effect 부착응력은 슬립에 의하여 0의 상태가 될 수 없으며 거의 일정치를 유지함을 알 수 있다.

5.5 코팅처리않은 강선(Bare Strand)

Hoyer effect 에 의한 최대부착응력은 일반적인 인발시험에 의한 부착응력보다 철근단면증가의 압박작용(clamping action)으로 인하여 더욱 크게 나타났다. 코팅처리않은 PS강선의 최대 부착응력은 평균 32.6 Kg / Cm²(464.08 psi) 이며(표

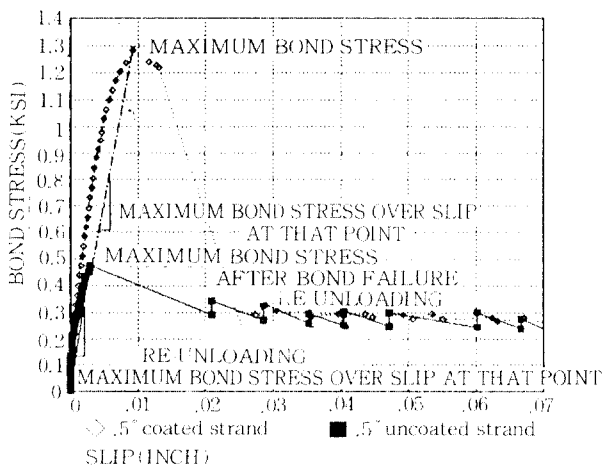


Fig. 11 Comparison of typical bond stress-slip relationships of coated and bare strands (model #US 5 : Bare and #CS-1 Coated)

Table 4 Summary of test results on 1/2" diameter uncoated strands : specimens with sufficient compacting

Sample	Test data	Strand diameter and surface condition	Dimension(in)
# US-1	8-13	1/2 inch, bare	6 × 6 × 6.203
# US-2	8-14	1/2 inch, bare	6 × 6 × 6.313
# US-3	8-18	1/2 inch, bare	6 × 6 × 6.078
# US-4	8-21	1/2 inch, bare	6 × 6 × 6.375
# US-5	8-27	1/2 inch, bare	6 × 6 × 6.500

Sample	T _{max} (psi)	Slip at T _{max} (in)	K = T _{max} / Slip (K/in)	f _u (psi)	U ₁ (psi)
# US-1	487.98	0.00378	129.3	5.914	6.35
# US-2	446.11	0.00398	112.2	5.172	6.03
# US-3	446.11	0.00387	119.9	5.201	6.16
# US-4	454.66	0.00323	147.2	6.021	6.12
# US-5	471.54	0.00298	158.5	5.573	6.32
Ave.	461.08	0.00353	133.4	5.637	6.18

Table 5 Comparison with other test results on average U_t

Type of Strand	(1) U_t Brearly	(2) U_t Cousins	(3) U_t Cousins	U_t This work
uncoated	3.67	7.00	4.43	6.18
coated	9.59	17.0	18.5	17.26

Source : (1) Pull-out test results from Brearly and Johnston [28]
 (2) Results from Cousins, Badeaux and Mostafa [29]
 (3) Transfer test results from Cousine, Johnston, and zia [17. 32]

4). 최대 부착응력을 콘크리트 압축강도의 평방근으로 나눈값, U_t 는 평균 6.18로 얻어졌다(표 5). 이 결과는 Breatly와 Johnstone의 인발시험에 의한 평균결과, 3.81보다 훨씬 크게 나타났고, Cousins et al의 트랜스퍼 시험에 의한 결과치 4.43보다 크나, Cousins et al의 Standard Test, 7.0 보다는 작은값을 보여주었다. 최대 부착응력에서 슬립은 평균 0.09 mm(0.00353인치) 였다.

2주간에 여러번의 실험이 연속적으로 시행되었으나, 코팅처리않은 PS강선의 최대 부착응력은 실험실 안에서의 녹슬음으로 인하여 증가되지 않음을 보여주었다. 표 6에서 다짐을 충분히 하지않은 UC-1과 UC-2는 콘크리트를 타설후 10초간의 형틀 외측 진동다짐으로 얻어진 것이고 충분한 다짐을한 US 시험체는 형틀 외측 진동다짐과 PS 강선을 두드려 줌으로서 얻을 수 있었다. 두 시험결과는 유사한 모양을 보여주었으나 최고 부착응력과 그에 대한 슬립의 비율, K에서 작은 값을 보여

Table 6 Summary of test results on 1/ 2"-diameter uncoated strands : specimens without sufficient compacting

Sample	Testing data	Strand diameter and surface condition	Dimension(in)
# UC-1	8-12	1/2inch-bare	6 × 6 × 6.22
# UC-2	8-26	1/2inch-bare	6 × 6 × 6.44

Sample	T_{max} (psi)	Slip at T_{max} (in)	$K=T_{max}/Slip$ (K/in)	f_{ci} (psi)	U_t (psi)
# UC-1	340.8	0.00320	106.5	5,492	4.60
# UC-2	331.3	0.00305	108.6	5,010	4.68

주었다.

5.6 그리트 처리된 에폭시 코팅 강선 (Grit Impregnated Epoxy Coated Strand)

하중 감소률(unloading rate)을 140 Kg(300lb)로 바꾸었을뿐, 코팅처리 않은 강선과 동일한 방법으로 실험하였다. 두 시험체를 비교하였을때, 코팅 처리한 강선은 동일 하중하에도 훨씬 많은 양의 슬립을 보여주었고, 최대 부착응력도 높게 나타났다. 높은 하중으로 인하여 비교적 얇은 시험체, CS 1과 CS-2는 방사성 균열(splitting)에 의하여 파괴되었다(표 7). 그러나, 방사성 균열에 의한 시험체도 최대 부착응력은 그렇지 않은 시험체와 유사하거나 높게 나타났으므로 함께 표현하였다.

최대 부착응력은 평균 83 Kg/Cm²(1181.56 psi)였고 최대부착력을 콘크리트 강도의 평방근으로 나눈값, U_t 는 평균 1.21 Kg/Cm²(17.26 psi)로 인발시험에 의한 Brearly와 Johnston 0.87 Kg/Cm²(12.35 psi)보다 크게 나타났고, 트랜스퍼 실험에 의한 Cousins et al[12, 13]과 Standard 실험에 의한 Cousins et al[20]의 결과치와 유사하게 나타났다. 한편, 평균 부착 강비(Bond Stiffness) K는 2754 Kg/Cm³(99.5K/in³)였고,

Table 7 Summary of test results on 1/ 2"-diameter coated strands

Sample	Testing data	Strand diameter and surface condition	Dimension(in)
# CS-1	8-28	1/2 inch, coated	6 × 6 × 4.688
# CS-2	11-25	1/2 inch, coated	6 × 6 × 4.100
# CS-3	12- 2	1/2 inch, coated	6 × 6 × 7.200
# CS-4	12- 5	1/2 inch, coated	6 × 6 × 6.100
# CS-5	12- 9	1/2 inch, coated	6 × 6 × 6.000

Sample	T_{max} (psi)	Slip at T_{max} (in)	$T_{max}/Slip$ (K/in)	f_{ci} (psi)	U_t (psi)
# CS-1	1281.6	0.00931	137.7	5,458	17.35*
# CS-2	1203.2	0.01327	90.7	5,852	15.72*
# CS-3	1176.6	0.01433	75.3	3,325	18.70
# CS-4	1168.0	0.01230	95.7	5,227	16.27
# CS-5	1181.6	0.01190	98.2	4,887	16.71
Average	1181.6	0.01196	99.5	4,724	17.26

Note : * minor cracking - CS 1, CS 2

최대 부착력에서의 평균 슬립 값은 0.3mm(0.01196인치)인 것을 알 수 있었다.

이 강선 시험체의 과도한 슬립은 각 스텝마다 정적 균형을 얻기 위하여 상당한 시간을 요구하였고, 최대 부착력도 매우 높았으므로 좀더 콘크리트를 구속(confinement)할 수 있고, 시험체 길이도 긴 것을 사용하면 더욱 좋은 결과를 얻을 것으로 생각되나, 이를 위하여는 장기간의 계측시간을 줄일수 있는 방법이 고안되어야 한다고 사료된다.

6. 결 론

상기 실험으로 부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 그리트 처리된 에폭시 코팅 강선은 코팅처리 않은 강선보다 높은 최대 부착응력을 보였다. 코팅처리하지 PS강선의 최대 부착응력을 평균 32.6 Kg /Cm²(464.08 psi)이며, 최대 부착응력을 콘크리트 압축강도의 평방근으로 나눈 값, U₁는 평균 0.435 Kg /Cm²(6.18 psi)로 얻어졌고, 그리트 처리된 에폭시 코팅 강선은 최대 부착응력에서 83.07 Kg /Cm²(1181.56 psi), U₁에서 1.21 Kg /Cm²(17.26)으로 높은 값을 보였다.

2. 강선에 대한 콘크리트의 다짐효과는 충분하게 다치지 않은 시험체의 U₁가 0.32 ~ .33 Kg /Cm²(4.6에서 4.68 psi)의 작은 값을 보임으로서 부착응력에 중요한 요소로 고려된다.

3. 최대 부착응력후 부착응력은 갑자기 줄어든다, Hoyer Effect에 의하여 0이 되지 않았고, 20번의 계속적인 하중에도 불구하고 부착응력은 코팅처리하지 않은 PS강선이 18.98 Kg /Cm²(270 psi), 그리트 처리된 에폭시 코팅 강선이 51.32 Kg /Cm²(730 psi)로 일정한 값을 유지하였다.

4. 실험실내에서 2주동안 보관으로 인한 녹슬음으로 최대 정적부착력은 영향을 받지않았다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI

- 318-89). American Concrete Institute, Detroit, MI, November 1989.
2. Hoyer, E., and Friedrich, E., "Beitrag zur Frage der Hafspannung in Eisenbeton-bauteilen," Beton und Eisen, Vol. 38, No. 6, Berlin, 1939, pp.107-110.
3. Hognestad, E., and Janney, J., "The Ultimate Strength of Pre-Tensioned Prestressed Concrete Failing in Bond," Magazine of Concrete, June 1954, pp.11-16.
4. Over, R., and Au, T., "Prestress Transfer Bond of Pretensioned Strands in Concrete," ACI Journal, Proceedings, Vol. 62, No. 11, November 1965, pp.1451-1460.
5. Deatherage, J., and Burdette, E., Development Length and Lateral Spacing Requirements of Prestressing Strand for Prestressed Concrete Bridge Products, The University of Tennessee, Knoxville, April 1990.
6. Hanson, N., and Kaar, P., "Flexural Bond Tests of Prestressed Beams," ACI Journal, Proceedings, Vol. 55, No. 7, January 1959, 783-803.
7. Kaar, P., Lafraugh, R., and Mass, M., "Influence of Concrete Strength on Strand Transfer Length," PCI Journal, Vol. 8, No. 5, October 1963, pp.47-67.
8. Zia, P., and Mostafa, T., "Development Length of Prestressing Strands," PCI Journal, Vol. 22, No. 5, September-October 1977, pp.54-65.
9. Fagundo, E., and Narayan, S., "Bond, Anchorage and Shear in Prestressed Concrete Members. A Preliminary Study of Available Published Literature," University of Florida, Civil Engineering Department, December 1988, Unpublished Report.
10. Janney, J., "Report of Stress Transfer Length Studies on 270 K Prestressing Strand," PCI Journal, Vol. 8, No. 1, February 1963, pp.41-43.
11. Dorsten, V., Hunt, F., and Preston, H., "Epoxy Coated Seven-Wire Strand for Prestressed Concrete," PCI Journal, Vol. 29, No. 4, July August 1984, pp.120-129.

12. Cousins, T., Johnston, D., and Zia, P., "Transfer and Development Length of Epoxy-Coated and Uncoated Prestressing Strand," PCI Journal, Vol. 35, No. 4, July-August 1990, pp.92-103.
13. Cousins, T., Johnston, D., and Zia, P., "Transfer Length of Epoxy-Coated Prestressing Strand," ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 3, May-June 1990, pp.193-203.
14. Cousins, T., Johnston, D., and Zia, P., Bond of Epoxy Coated Prestressing Strand, Center for Transportation Engineering Studies, Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC, December 1986.
15. Shahawy, M., Issa, M., and Batchelor, B., "Strand Transfer Lengths in Full Scale AASHTO Prestressed Concrete Girders," PCI Journal, Vol. 37, No. 3, May June 1992.
16. Lane, S., "Transfer Lengths in Rect- angular Prestressed Concrete Concentric Specimens," Public Roads, Vol. 56, No. 2, Sept. 1992, pp. 67-71.
17. Edwards, A., and Picard, A., "Bond Properties of 1/2 in. Diameter Strand." ACI Journal, Proceedings, Vol. 69, No. 11, November 1972, pp.684-689.
18. Stocker, M., and Sozen, M., Investigation of Prestressed Reinforced Concrete for Highway Bridges, Part 5 : Bond Characteristics of Prestressing Strand, Engrg. Exp. Sta. Bull. 503, University of Illinois, Urbana, IL, 1970.
19. Brearly, L., and Johnston, D., "Pull out Bond Tests of Epoxy-Coated Prestressing Strand," ASCE Structural Journal, Vol. 116, No. 8, August 1990, pp.2236-2252.
20. Cousins, T., Badeaux, M., and Mostafa, S., "Proposed Test for Determining Bond Characteristics of Prestressing Strand," PCI Journal, Vol. 37, No. 1, January-February 1992, pp.66-73.
21. Eligehausen, R., Popov, E., and Bertero, V., Local Bond Stress Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitation, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB /EERC-83 /23, University of California, Berkeley, CA, 1983.
22. "Steel Strand, Uncoated Seven-Wire Stress Relieved for Prestressed Concrete," Standard Specification, ASTM A416-87a, Vol. 01. 04, Philadelphia, PA, 1988.
23. "Epoxy Coated Seven-Wire Prestressing Strand," Standard Specification, ASTM A882-91, Philadelphia, PA, 1991.

(접수일자 : 1993. 10. 10)