

고강도 프리텐션 프리스트레스트 콘크리트 부재 단부 영역에서의 PS 강연선 부착특성 연구

김동백[†] · 김의성^{*}

한경대학교 토목공학과 · *현대산업개발주식회사 토목설계팀
(2000. 5. 16. 접수 / 2000. 8. 14. 채택)

Bond Characteristics of PS Strand around the End Zones of High Strength Pretensioned Prestressed Concrete Members

Dong-Baek Kim[†] · Eui-Sung Kim^{*}

Department of Civil Engineering Hankyong National University · *Hyundai Development Company
(Received May 16, 2000 / Accepted August 14, 2000)

Abstract : The extensive use of pretensioned prestressed concrete in the modern construction industry, together with wider application of pretensioned components for structural purposes requires some important consideration on the adequate transfer of prestress force into the concrete, especially around the end zones of pretensioned member. The main objective of this paper is to study the effects of various important parameters on the bond characteristics of prestressing strand around the end zone of high strength pretensioned concrete members. To this end, a comprehensive experimental program has been set up. The principal test variables considered were strand diameter, concrete strength, concrete cover size. The present study provides valuable test data for the realistic and accurate determination of transfer length, which can be efficiently used for improving the design equation of transfer length in pretensioned prestressed concrete members.

Key Words : pretensioned prestressed concrete, transfer of prestress, principal test variables, transfer length

1. 서 론

프리텐션 방식을 이용한 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 부재는 시공의 간편성과 프리캐스트 제작장에서 품질 관리의 용이성으로 인해 세계 각국에서 그 사용이 증가하고 있다. 프리텐션 부재에 있어 가장 중요한 고려 사항 중의 하나는 부재 양단에서의 프리스트레스 힘의 적절한 도입 여부이며, 특히 시간이 짧은 프리텐션 캔틸레버, 철도용 PC 침목, 트러스 부재, 기초용 보 등과 같이 부재 단부 근처에 큰 휨 모멘트가 작용하는 구조물의 경우에는 부재단에서의 이러한 프리스트레스 전달 영역의 중요성은 매우 크다 할 수 있다. 이에 따라 최근에는 프리스트레스 전달 영역

에 대한 관심을 바탕으로 현행 기준의 타당성에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.^{1-5,8,9)}

프리텐션 부재 단부의 정확한 설계를 위해서는 강선으로부터 콘크리트로의 프리스트레스 전달을 지배하는 부착 기구에 대한 이해가 선행되어야 하며 이러한 부착응력의 크기와 분포 영역의 길이가 실제로 결정되어야 한다.

강선 및 콘크리트의 부착은 경계 영역에서의 응력 상태에 의존하며 이러한 응력 상태는 강선 주위의 재료, 기하 특성에 지배되기 때문에 프리텐션 부재에 대한 일반적인 실험 연구들은 강선의 기하 특성 및 콘크리트 재료 특성의 상호 관계에 기초하여 이루어져 왔다.^{2,9)} 하지만 이러한 연구들은 주로 정량적인 분석보다는 정성적인 평가에 머물러왔다. 이들 연구를 통하여 일반적으로 강선의 직경, 프리스트레스싱 수준, 강선의 형상, 콘크리트 압축강도, 시간의존 효과(크리프 및 건

[†]To whom correspondence should be addressed.
dbkim@hnu.hankyong.ac.kr

조수축) 등이 부착 및 전달길이에 영향을 미친다는 사실은 밝혀졌지만 각 변수들의 기여도와 가장 중요한 변수는 무엇인지에 대한 연구와 통계 조사는 아직 미흡한 상태이다.

현행 설계 기준에서는 프리텐션 부재의 전달길이 계산에 프리스트레스 힘의 강도 및 PS 강재의 직경만을 고려하고 다른 변수들의 영향은 포함시키지 않고 있다.^{10,11)} 따라서 본 논문에서는 PS 강연선의 직경, 프리스트레스 도입시의 콘크리트 압축강도, 피복 두께 등을 주변수로 설정하고 프리텐션 부재에 대한 광범위한 실험을 수행함으로써 각 변수들의 영향을 독립적으로 정량 평가·분석하고 현 시방 기준의 개선 방향을 모색하고자 하였다.

2. 프리텐션 PSC 보 부재의 제작 및 실험

2.1. 실험 변수

프리텐션 방식에 의한 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전달길이 변화를 정량적으로 평가하기 위하여 PS 강선(7연선)의 직경, 프리스트레스 도입시의 콘크리트 압축강도, 피복 두께를 주변수로 설정하여 총 24개의 프리텐션 보 부재를 제작하였다. 본 실험에서 사용한 주 변수들은 다음과 같다.

- (1) PS 강연선의 공칭 직경 (db) : 12.7mm, 15.2mm
- (2) 프리스트레스 도입시의 콘크리트 압축강도 (fci) : 35MPa, 45MPa
- (3) 보 하부의 순 피복두께 (cb) : 3cm, 4cm, 5cm

2.2. 실험 부재 명칭

실제 프리텐션 보 부재의 형상 특성을 모사하기 위하여 모든 PS 강연선은 도심 아래쪽으로 편심을 갖도록 배치하였다. 모든 보는 동일한 높이 (h=200mm)를 갖도록 하였으며 부재의 양단에서 충분한 전달길이가 확보될 수 있도록 부재 길이 (L=3000mm)를 설계하였다. 전달길이 측정용 실험 부재는 주 변수의 조합에 따라 강연선 직경 2종 × 콘크리트 압축강도 2종 × 하부 피복두께 3종 = 총 12계열, 24부재로 구성된다.

Fig. 1은 각 부재의 형상과 치수 상세를 나타내고 있다. 각 실험 부재의 명칭은 특성 파악을 용이하게 하기 위한 기호의 조합을 이용하여 표기되며 그 방법은 다음 Fig. 2와 같다.

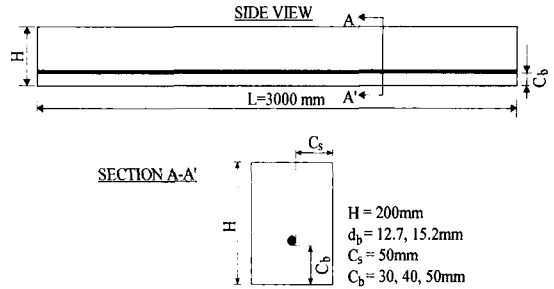


Fig. 1. Details of test beams

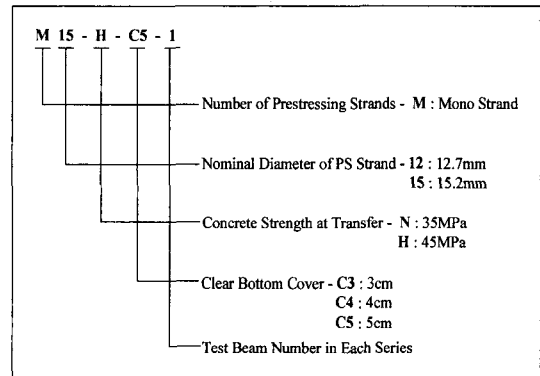


Fig. 2. Key to beam numbering system

2.3. 재료 특성

콘크리트 압축강도에 따른 프리텐션 PSC 보의 부착 특성 파악을 위해 프리스트레스 도입시의 목표 압축강도를 N-계열에 대해 35MPa, H-계열에 대해 45MPa로 설정하였다. 각 실험 부재 제작 시 10cm×20cm 원주형 공시체를 함께 제작하고 보와 동일한 조건으로 양생한 후 이를 토대로 프리스트레스 도입시의 콘크리트 압축강도를 평가하였다. 실험에 사용한 PS 강연선은 공칭직경 12.7mm, 15.2mm의 저릴렉세이션, 용력저거 7연선으로서, 각 PS 강연선은 표면 조건의 영향을 최소화하기 위해 전 제작 과정을 통해 공장 생산 직후의 조건을 유지시켰다.

2.4. 실험 절차

프리텐션 PSC 보 부재의 제작 및 측정 절차를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PS 강연선 표면에 전기저항식 변형률 게이지(ERSG) 부착
- (2) 목표 용력 수준까지 PS 강연선 긴장 (=0.75fpu)
- (3) PS 강연선의 초기 변형률 측정

- (4) 콘크리트 타설을 위한 거푸집 조립
- (5) 콘크리트 타설 및 양생
- (6) 거푸집 제거, Demec 게이지 포인트 부착
- (8) 프리스트레스 힘 도입 직전의 초기 측정 실시
- (9) 프리스트레스 힘 도입
- (10) 시간 경과별 측정 실시

2.5. 측정 장치

전달길이는 부재 길이 방향의 콘크리트 변형을 또는 강연선 변형을 분포 모두를 통해 결정할 수 있지만 강연선과 콘크리트와의 경계면의 중요성을 고려할 때 경계면에서의 부착 성능을 저해하지 않는 방법이 선호된다.^{1~9)} 따라서 본 연구에서는 측정된 콘크리트 변형을 분포를 전달길이 결정의 기준으로 삼았다. 모든 부재에 대해 강선 측면의 피복두께가 작아 ($c_s=50\text{mm}$) 강선과 동일한 높이에 있는 콘크리트 표면의 변형을 분포를 사용하였으며 PS 강연선에 부착한 변형을 게이지의 측정값을 통하여 그 적용성을 검증하였다. [Fig. 3]

콘크리트 변형을 분포는 Fig. 4와 같은 Demec 게이지 (Detachable mechanical strain gage) 및 Demec 포인트를 통해 측정된다. Demec 게이지의 정밀도는 $20\sim 30 (\times 10^{-6} \text{ mm/mm})$ 로써 오차의 최소화를 위해 프리스트레스 도입 전후에 각기 다른 2명에 의해 중복 측정을 하여 평균값을 사용하였으며 그 결과가 상호 일치하지 않으면 재 측정을 실시하였다.

Demec 포인트는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 강연선과 동일한 높이에 맞춰 부재의 양측면에 50mm의 간격으로 설치하였으며, 강연선의 적정 긴장력 도입 여부를 확인하기 위한 전기저항식 변형을 게이지(ERSG) 또한 Fig. 3에 나타난 위치

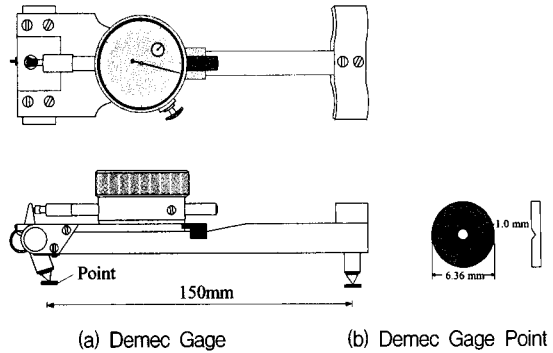


Fig. 4. Details of Demec gage and Demec gage point

에 부착하였다.

3. 변형을 측정 자료 처리 기법

3.1. 완화기법 (Smoothing Technique)

전달길이 결정을 위하여 대표적으로 실험부재 M12-N-C4-1에 대하여 보의 길이방향 콘크리트 변형을 분포를 도시하면 Fig. 5와 같다. 부재 단부에 나타난 점진적인 변형을 증가하는 강연선으로부터 콘크리트로의 프리스트레스 힘 전달을 나타낸다.

측정된 변형을 값은 보다 평탄하고 실제적인 변형을 분포를 얻기 위하여 연속된 3개의 게이지 값에 대하여 평균을 취하게 된다.^{1,5)} Fig. 6은 Fig. 5에 나타난 것과 동일한 부재 M12-N-C4-1를 대상으로 완화된 (smoothed) 변형을 분포를 도시한 것으로서 다음 식 (1)에 나타난 중복방법을 통하여 측정값을 평균한 것이다.

$$(Strain)_n = \frac{(Strain)_{n-1} + (Strain)_n + (Strain)_{n+1}}{3} \quad (1)$$

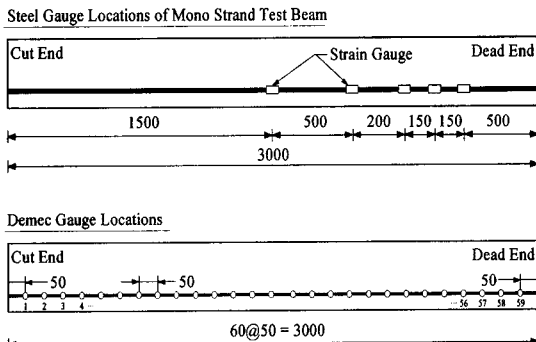


Fig. 3. Location of ERSG and Demec gage points

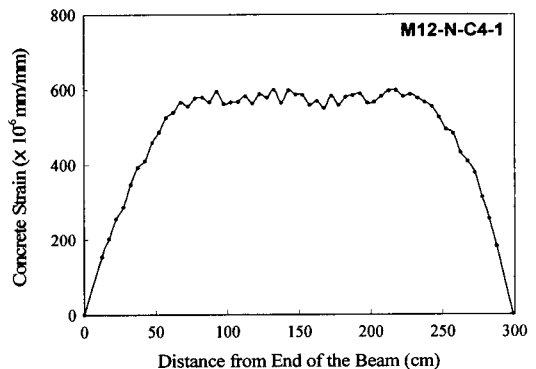


Fig. 5. Measured typical concrete strain profile

3.2. 전달길이 결정 방법 : 95% 평균 최대 변형률법

본 논문에서 전달길이 결정을 위해 채택한 방법은 “95% 평균 최대 변형률법 (95% Average Maximum Strain Method)”이며 그 방법을 요약하면 다음과 같다.^{1,5,6)}

- (1) 측정된 변형률 값들로부터 완화된 변형률 분포를 도출한다.
- (2) 완전 유효 프리스트레스(f_{pe})의 도입을 나타내는 변형률 고원 (strain plateau) 구역의 모든 변형률 값을 평균함으로써 “평균 최대 변형률 (AMS)”을 구한다.
- (3) 계산된 AMS 값의 95%를 취하여 이 값에 해당하는 수평선을 도출한다. [Fig. 6]
- (4) 95% AMS 선과 완화된 변형률 분포도의 교차점으로부터 전달길이를 결정한다.

이 방법의 최대 장점은 측정 결과의 인위적인 해석을 배제시킴으로써 보다 실제적이고 합리적인 결과를 획득할 수 있다는 것이며, M12-N-C4-1 부재를 대상으로 95% AMS법을 사용한 결과를 Fig. 6에서 볼 수 있다.

Fig. 7은 전체 실험 부재를 대표하여 부재 M12-H-C4-1의 콘크리트 변형률 측정 결과를 예시한 것으로 두 개의 곡선은 시간 의존적 효과를 관찰하기 위하여 프리스트레스 도입 후 경과 시간을 달리하여 측정된 결과를 도시한 것이다. 더불어 프리스트레스 힘 도입 방법에 따른 변화를 관찰하기 위하여 “고정단부 (dead end)” 및 “절단 단부(cut end)”에서 모두 전달길이를 결정하였다.

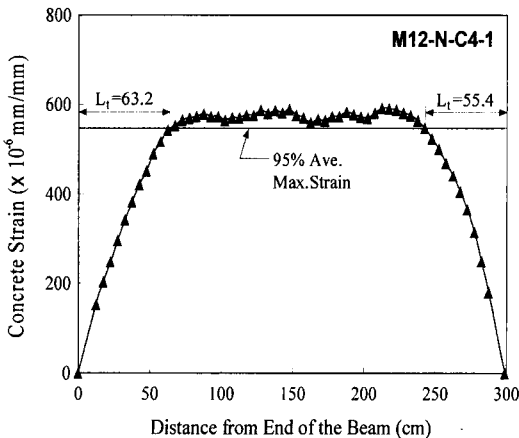


Fig. 6. Determination of transfer length by 95% AMS method

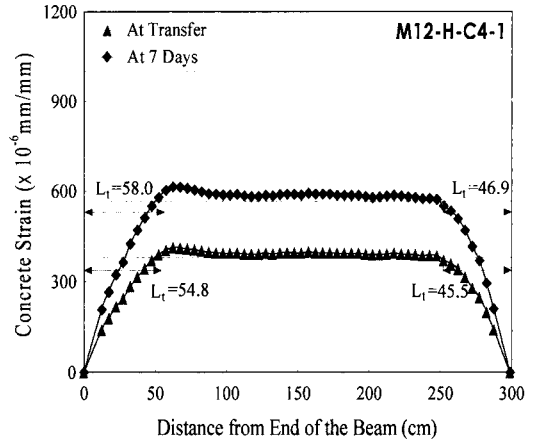


Fig. 7. Strain profile and transfer length for test beam M12-H-C4-1

4. 실험 결과 분석

4.1. 강연선 직경에 따른 전달길이 변화

두 가지 직경의 강연선에 대한 전달길이를 비교한 결과 표 1에 나타난 바와 같이 직경 15.2mm 강연선의 전달길이가 직경 12.7mm 강연선에 비해 약 25% 큰 것으로 나타났다. 이는 단면적/둘레 길이 비율의 상대적인 차이에 기인하는 것으로 15.2mm 강연선의 단면적이 42% 더 크기 때문에 동일한 비율만큼의 프리스트레스 힘이 더 도입되어 있는 반면 부착을 발휘할 수 있는 표면적은 12.7mm 강연선에 비해 20% 정도밖에 더 크지 않기 때문이다.

현행 시방 기준 [식 (2)]에 따르면 전달길이(l_t)는 강연선의 직경(d_b)에 선형 비례하며 따라서 강연선의 직경 비율에 따라 15.2mm 강연선의 전달길이는 12.7mm 강연선에 비해 20% 큰 결과를 나타내어야 한다. 하지만 본 연구 결과에서는 시방 기준보다 조금 큰 증가비율을 나타냄으로써 전달길이가 강연선 직경 변화에 완전히 선형 비례하지는 않는 것으로 나타났다.

$$l_t = \frac{f_{pe} d_b}{3} \quad (2)$$

4.2. 프리스트레스 도입시의 콘크리트 압축 강도에 따른 전달길이 변화

전달길이에 미치는 콘크리트 압축강도의 효과

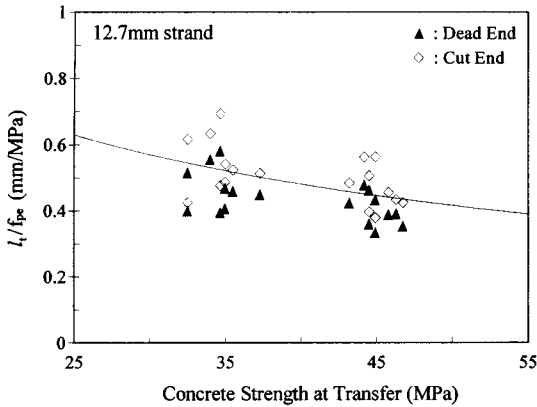


Fig. 8. Transfer length according to concrete strength ($d_s = 12.7\text{mm}$)

에 대해서는 상호 배치되는 연구 결과들이 보고 되어 있어^{4,7,9)} 본 실험에서도 콘크리트 압축강도를 주 실험 변수로 설정하고 표 2에 그 결과를 분석하였다. Fig. 8은 프리스트레스 도입시의 콘크리트 압축강도 증가에 따른 평균 전달길이 변화 양상을 보여주고 있다. 그림에서 수직축은 부재별 PS 강연선의 긴장력 차이를 고려하여 각 전달길이 값을 f_{pe} 값으로 나누어 도시하였으며, 그 결과 압축강도 증가에 따라 전달길이의 감소 경향이 분명히 나타나고 있다. 반면 전달길이 계산을 위한 현행 시방서 식은 콘크리트 압축강도를 주 변수로 포함하고 있지 않기 때문에 압축강도의 변화에 상관없이 일정한 전달길이 값을 산출하게 된다.

4.3. 콘크리트 피복두께에 따른 전달길이 변화

콘크리트 피복두께에 따른 전달길이 변화를 평가하기 위해 부재의 하부 피복두께(c_b)를 3cm, 4cm, 5cm로 변화시켰다. 이때 하부 피복두께만의 영향을 독립시키기 위하여 부재 양 측면의 피복두께(c_s)는 5cm로 고정하였다. 그 결과 표 3에 나타난 바와 같이 피복두께가 감소함에 따라 전달길이가 증가하는 분명한 경향이 나타났으며, 하부 피복두께가 3cm인 경우에는 현 시방기준에 의거한 결과보다 더 작은 결과를 나타내었다.

4.4. 시간 의존 효과에 따른 전달길이 변화

프리스트레스 도입 후 90일까지 변형률 분포의 변화를 측정된 결과 크리프 및 건조수축 효과에

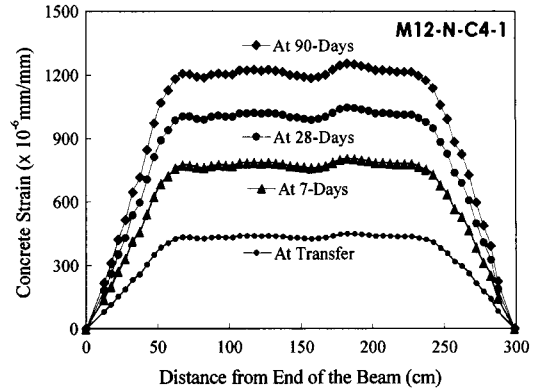


Fig. 9. Variation of concrete strain with time (M12-N-C4-1)

의해 부재 축 방향 콘크리트 변형률이 시간 경과에 따라 증가하였다. 하지만 시간 의존적 효과는 변형률 분포도를 상향 이동시킬 뿐 전달길이의 변화는 거의 발생시키지 않았다. 즉, Fig. 9에서 보듯이 전달길이는 90일까지 약 5% 수준의 미약한 증가를 나타내었다.

5. 결론

본 연구를 통해 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 전달길이에 대한 현행 기준식은 실제 측정 전달길이를 과대 평가하게 되며 특히 콘크리트의 압축강도가 높고 피복두께가 큰 경우에는 최대 70% 내외의 격차를 나타내었다.
2. 본 연구 결과 콘크리트 압축강도 및 피복두께가 증가함에 따라 실제 전달길이는 감소하는 것으로 나타나 이러한 변수들의 영향이 합리적으로 설계 기준에 반영되어야 할 것으로 판단된다.
3. 전달길이는 강연선의 직경이 커짐에 따라 증가하지만 현행 시방서 규정에서와 같이 강연선의 직경에 완전 선형비례하지는 않는 것으로 나타났다.
4. 크리프 및 건조수축 효과로 인해 시간 경과에 따라 전달길이는 약간 증가하며 프리스트레스 도입 후 90일 경과시까지의 증가율은 약 5%로 나타났다.
5. 본 연구에서 제시한 실험 결과는 보다 실제적이고 정확한 전달길이의 결정에 중요한 자료를 제공함으로써 프리텐션 프리스트레스트 콘크리트

부재의 전달길이 설계 기준의 개선에 큰 효용성을 나타낼 것으로 판단된다.

감사의 글 : 이 논문은 1999년도 한경대학교 학술연구지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 김의성, 프리텐션 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전달영역 해석 및 전달길이 예측, 박사학위논문, 서울대학교, 2000.
- 2) Cousins, T. E., Francis, L. H., Stallings, J. M., and Simmons, M. B., Reduced Strand Spacing in Pretensioned Prestressed Members, *ACI Structural Journal*, May-June pp. 277~286, 1994.
- 3) Deatherage, H. J., and Burdette, E. G., and Chong, K., Development Length and Lateral Spacing Requirements of Prestressing Strand for Prestressed Concrete Bridge Girders, *PCI Journal*, Vol. 39, No. 1, January-February, pp. 70~83, 1994.
- 4) Mitchell, D., Cook, W. D., Khan, A. A., and Tham, T., Influence of High Strength Concrete on Transfer and Development Length of Pretensioning Strand, *PCI Journal*, May-June, pp. 52~66, 1993.
- 5) Russell, B. W., and Burns, N. H., Measurement of Transfer Lengths on Pretensioned Concrete Elements, *Journal of Structural Engineering*, May, pp. 541~549, 1997.
- 6) Hanson, N. W., Influence of Surface Roughness of Prestressing Strand in Bond Performance, *PCI Journal*, Vol. 14, No. 1, February, pp. 32~45, 1969.
- 7) Kaar, P. H., LaFraugh, R. W., and Mass, M. A., Influence of Concrete Strength on Strand Transfer Length, *PCI Journal*, Vol. 8, No. 5, October, pp. 47~67, 1963.
- 8) Uijl, J. A. den., Transfer Length of Prestressing Strand in HPC, *Progress in Concrete Research*, Vol. 4, Delft, pp. 75~90, 1995.
- 9) Weerasekera, I. R. A., Transfer and Flexural Bond in Pretensioned Prestressed Concrete, PhD dissertation, University of Calgary, Canada, 1991.
- 10) ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1995.
- 11) AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Edition, American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO), Inc., Washington, D.C., 1996.