

초고성능 콘크리트 프리텐션부재의 응력전달길이

A Stress Transfer Length of Pre-tensioned Members Using Ultra High Performance Concrete

김지상^{1*} · 최동훈²

Jee-Sang Kim^{1*} · Dong-Hun Choi²

(Received November 12, 2018 / Revised November 28, 2018 / Accepted November 28, 2018)

The prestressing force introduced to the tendon in pretensioned concrete members is transferred by direct bond between tendon and concrete, which requires a proper estimation of stress transfer length. The use of pretensioned and/or precast members with UHPC (Ultra High Performance Concrete) may give many advantages in quality control. This paper presents an experiment to estimate the stress transfer length of UHPC for various compressive strength levels of UHPC, cover depths, diameters of tendons and tensioning forces. According to the result of this experiment, the stress transfer length of UHPC member is much reduced comparing that of normal strength concrete. The reduction in stress transfer length of UHPC may come from the high bond strength capacity of UHPC. The transfer lengths obtained from this experiment are compared to those in current design code and a new formula is proposed.

키워드 : 초고성능 콘크리트, PS 강연선, 프리텐션, 응력전달길이

Keywords : Ultra high performance concrete, PS strand, Pretension, Stress transfer length

1. 서론

최근 콘크리트 구조물은 경량화 및 초고층화가 진행되고 있으며, 이러한 경향에 따라 고강도 및 고성능 콘크리트의 수요가 증가하고 있으며, 특히 높은 압축강도, 인장강도 및 내구성을 보이는 초고성능 콘크리트(UHPC)가 개발되어 활발한 연구가 진행 중이다. UHPC의 특징은 낮은 물-결합재비를 가지고 있고, 최적의 혼화재료를 사용하여 일반 콘크리트 및 고강도 콘크리트보다 밀도가 매우 높기 때문에 높은 압축성을 발휘한다. 또한, 강섬유를 사용하여 제작하기 때문에 인장력 저항에 상당히 유리하다. 그러나, 품질관리 측면에서 높은 정밀도가 요구되는 초고성능 콘크리트의 특성을 고려할 때 도입 초기에는 현장타설에 의한 시공보다는 공장제품으로 활용하는 것이 바람직하다. 따라서, 프리텐션 부재를 제작하는데 초고성능 콘크리트를 활용하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

프리텐션 공법에서는 프리스트레싱 힘이 PS강연선의 부착을 통하여 콘크리트로 직접 전달되는데 긴장력의 도입 여부는 응력전

달길이의 개념을 적용하여 판단하게 된다. 응력전달길이는 PS강연선에 도입된 인장력이 콘크리트에 완전히 전달되는 부분까지의 길이를 말하며, 전달이 이루어진 이후 구간부터는 유효 프리스트레싱 힘이 작용하는 것으로 판단한다. 따라서, 응력 전달길이의 산정은 프리텐션 공법 적용에 있어 매우 중요한 부분이나, 초고성능 콘크리트는 일반 콘크리트와 완전히 다른 재료로서 현행 설계 기준에서 제안하고 있는 산정식을 UHPC 부재에 적용할 수 있는지 평가하는 과정이 요구된다.

일반 콘크리트를 사용한 프리텐션 부재의 응력전달길이 특성과 관련한 기존 연구로 Zia and Mostafa(1997)는 14~56MPa급 콘크리트를 적용한 프리텐션 부재의 응력전달 특성을 강연선 지름, 피복 두께 등의 다양한 변수를 적용한 실험을 통하여 확인하고 새로운 응력전달길이 산정식을 제안한 바 있다. 또한, Russel and Burns(1996)은 강연선의 종류와 지름, 비부착 구간 등을 고려하여 응력전달길이 특성을 연구하였으며, Oh et al.(2014)는 해석적 연구 및 실험을 통하여 PS강연선과 콘크리트 사이의 부착특성에 따

* Corresponding author E-mail: zskim@skuniv.ac.kr

¹서경대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Seokyeong University, Seoul, 02713, Korea)

²(주)디엠 엔지니어링 대리 (DM Engineering Co., Ltd., Seoul, 05288, Korea)

른 응력전달길이 식을 제안한 바 있다. 초고성능 콘크리트의 경우 일반철근의 부착특성에 대한 연구(Yuan and Graybeal 2015) 에 비하여 강연선의 부착특성 또는 응력전달길이에 대한 연구(Kim and Choi 2016)는 부족한 실정이다.

이 논문에서는 프리텐션 부재의 응력전달길이에 영향을 주는 요소인 초고성능 콘크리트의 압축강도수준, 강연선의 지름, 긴장력의 크기 및 피복두께의 영향을 실험 변수로 하여 실험을 수행하고 이를 바탕으로 초고성능 콘크리트의 응력 전달길이를 산정할 수 있는 새로운 식을 제안하였다.

2. 실험 계획

2.1 초고성능 콘크리트 배합

실험에 사용한 초고성능 콘크리트는 목표압축강도 120MPa 및 180MPa의 두 종류로 하였으며 길이 16mm 및 20m의 강섬유를 혼합하여 사용하였는데, 그 배합을 Table 1에 정리하였다.

2.2 실험체 제작

실험체는 기존 연구(Park 2015)를 참고하여 제작하였는데, 150mmx150mmx1200mm의 각주형 시험체로 콘크리트 타설 후 3일간 기건양생을 하고 그 후 2일간 증기양생을 실시하였다. 원주형 공시체 실험을 통하여 압축강도를 확인하고 강연선을 절단하여 인장력을 도입하였는데, 강연선을 산소절단기로 자르는 방법을 택하였다. 사용 강연선은 SWPC 7B 1860MPa급 단일 강연선으로 지름 12.7mm 및 15.2mm를 각각 사용하였으며, 콘크리트의 피복두께는 강연선 지름의 1배 및 2배로 하였다(Choi 2017). Fig. 1에 실험체의 제원을 도시하였으며, Fig. 2 및 Fig. 3은 실험체 제작 과정 및 양생과정을 보여주는 것이다.

실험체에 도입한 인장력의 크기는 강연선 인장강도의 65% 및 85%로 하였으며, LVDT를 이용하여 실험체 단부에서 콘크리트와 강연선의 미끌림량을 측정하였다. 또한, Fig. 4 및 Fig. 5에 보인 것처럼 강연선과 콘크리트에 전기저항식 스트레인 게이지를 표면에 부착하여 변형율을 측정하고 응력을 산정하였다.

2.3 계측

콘크리트의 변형율은 Fig. 4에 보인 것과 같이 강연선이 설치된 위치의 콘크리트 표면에 스트레인 게이지를 일정한 간격으로 설치하여 측정하였으며, 강연선의 변형율은 Fig. 5에 보인 것과 같이

Table 1. UHPC mix proportioning

f_c (MPa)	W/B	Unit mass(kg/m ³)						
		W	B	FA	Steel fiber		Super plasticizer	Anti foaming agent
					16mm	20mm		
120	0.166	209	1258	847	0	78	17.7	0.7
180	0.155	197	1269	867	39	78	18.1	0.5

W : water

B : binder

FA : fine aggregate



Fig. 1. Test specimens(unit : mm)

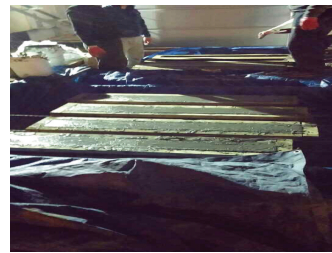


Fig. 2. Fabrication of specimens



Fig. 3. Steam curing

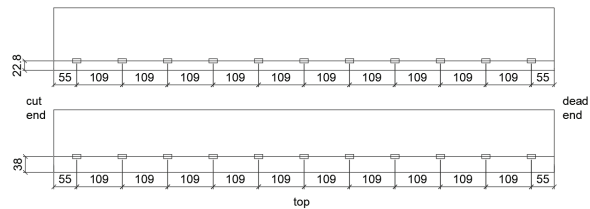


Fig. 4. Concrete strain gauge arrangement(unit : mm)

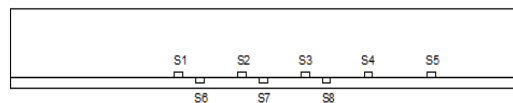


Fig. 5. PS strand strain gauge arrangement

절단단(cut end) 부분에 가까운 위치에 콘크리트 타설 전에 미리 게이지를 부착하여 측정하였다. 실험을 통하여 측정된 값은 보다 평탄하고 실제적인 분포값을 얻기 위하여 Smoothing Technique 을 적용하였다(Park 2015).

3. 실험 결과 분석

UHPC의 압축강도, 피복두께, 강연선의 지름 및 긴장력의 수준 등 적용 변수들에 대하여 실행한 실험 결과를 절단단(cut end)과 고정단(dead end)으로 구분하여 Table 2와 Table 3에 정리하였다. 시험체 위치별 콘크리트의 변형율은 Fig. 6과 Fig. 7에 보인 것과 같으며, 이는 동일한 위치에서 측정된 강연선의 변형율과 거의 동일한 값을 보였다. 또한, 일반 콘크리트와의 차이를 확인하기 위하여 기존 연구 결과(Park 2015)를 Table 2와 Table 3에 비교 자료로 함께 정리하였다. 이 절에서는 강연선 지름, 피복두께, 초고성능 콘크리트의 압축강도 수준 및 긴장력의 크기의 영향을 구분하여 실험 결과를 분석하였다.

3.1 강연선 지름의 영향

콘크리트구조기준(KCI 2012)은 PS강연선의 정착길이(l_d)를 응력전달에 필요한 길이와 추가적으로 매입하여야 하는 길이의 합으로 식(1)과 같이 계산하도록 규정하고 있다.

$$l_d = 0.145 \left(\frac{f_{sc}}{3} \right) d_b + 0.145 (f_{ps} - f_{sc}) d_b \quad (1)$$

여기서, f_{sc} 는 모든 프리스트레스 손실이 발생한 이후 프리스트레싱 강재의 유효응력(MPa), d_b 는 프리스트레싱 강연선의 공칭 지름(mm), f_{ps} 는 공칭강도를 발휘할 때 긴장재의 인장응력(MPa)을 각각 나타낸다. 즉, 강연선의 응력전달길이는 강연선의 응력수준과 지름에 비례하여 길어지게 되며, 실험결과를 정리한 Fig. 6 및 Fig. 7은 동일한 경향을 보이고 있다. 이는 지름이 큰 경우 단면적이 증가하여 도입되는 긴장력의 크기가 증가하나 강연선 둘레의 면적인 응력전달 면적은 같은 비율로 증가하지 않는 것에서 비롯되는 것이다.

3.2 피복두께의 영향

콘크리트 구조기준(KCI 2012)에서 제시한 산정식은 50mm 이상의 피복두께를 갖는 강연선의 실험결과로부터 도출된 식이다.

Table 2. Stress transfer length measured from cut end(mm)

Compressive strength of concrete	12.7mm strand				15.2mm strand			
	1d _b		2d _b		1d _b		2d _b	
	0.65f _{pu}	0.85f _{pu}	0.65f _{pu}	0.85f _{pu}	0.65f _{pu}	0.85f _{pu}	0.65f _{pu}	0.85f _{pu}
180MPa	324	198	200	310	322	350	320	202
120MPa	214	420	322	323	340	339	350	250
40MPa	-	-	-	-	644	-	487	-

db : nominal diameter strand(mm)
fpu : ultimate strength of strand(MPa)

Table 3. Stress transfer length measured from dead end(mm)

Compressive strength of concrete	12.7mm strand				15.2mm strand			
	1d _b		2d _b		1d _b		2d _b	
	0.65f _{pu}	0.85f _{pu}	0.65f _{pu}	0.85f _{pu}	0.65f _{pu}	0.85f _{pu}	0.65f _{pu}	0.85f _{pu}
180MPa	210	300	500	470	325	270	201	380
120MPa	330	320	240	179	239	229	258	292
40MPa	-	-	-	-	575	-	399	-

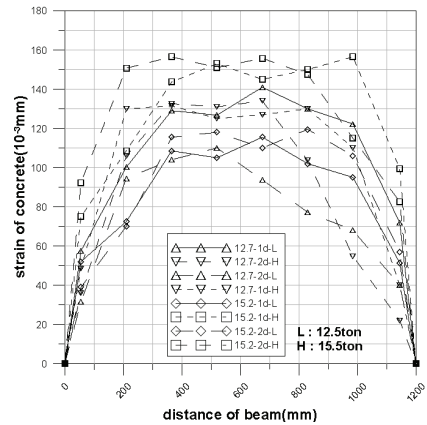


Fig. 6. Stains measured along the specimens(180MPa UHPC)

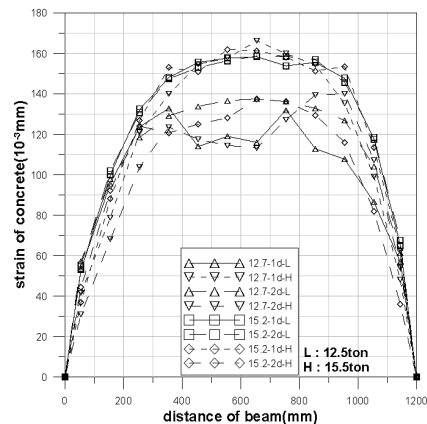


Fig. 7. Stains measured along the specimens(120MPa UHPC)

이 실험에서는 피복두께를 변수로 하여 응력전달길이의 변화를 확인하였는데, 일반적으로 피복두께가 증가함에 따라 부착응력이 증가하여 응력전달길이의 감소를 가져오는 것이 알려져 있다(CEN 2004). 또한 일반 콘크리트에 대한 실험 연구 결과(Oh et al. 2014) 역시 같은 경향을 보고하고 있다. 이 실험에서 구한 전달길이 또한 강연선 절단 방식의 영향을 고려할 때 동일한 경향을 보이고 있다.

3.3 초고성능 콘크리트 압축강도의 영향

일반 콘크리트를 적용한 응력전달길이 연구(Park 2015)와 비교해 보면, UHPC를 적용한 이 실험의 결과는 응력전달길이가 35~58%정도 줄어든 것으로 나타났다. 또한 콘크리트의 압축강도 수준이 증가할수록 응력전달길이가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 피복두께 증가에 따른 응력전달길이 감소와 유사한 이유에서 비롯된 것으로 판단된다. 즉, 압축강도 증가에 따라 부착강도의 증가가 생기고 짧은 구간에서 긴장력의 전달이 이루어진 결과이다. 따라서, 응력 전달길이의 산정에 있어 콘크리트 압축강도 또는 부착강도의 영향을 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.4 강연선 긴장력 크기의 영향

콘크리트의 응력 전달길이는 강연선에 도입된 긴장력 크기의 영향을 받으며 식(1)에 따르면 긴장력의 크기가 증가할수록 요구되는 응력전달 길이 또한 증가한다. 이 실험 결과에 따르면 전달길이의 증가량이 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났으며, 압축강도가 증가할수록 긴장력 증가에 따른 응력전달길이의 증가율은 감소하는 것으로 나타났다.

4. 초고성능 콘크리트의 응력전달길이

4.1 기존 설계 기준의 응력전달길이 산정식

이 논문에서 수행한 실험결과로부터 초고성능 콘크리트를 사용한 프리텐션부재의 응력전달길이를 산정하기 위하여 현재 사용되고 있는 설계기준의 산정식과 실험결과를 비교하고 새로운 변수를 도입한 보다 합리적인 산정식을 제안하였다. 실험결과를 ACI설계기준(ACI 2014), AASHTO 설계기준(AASHTO 2010) 및 EuroCode 2(CEN 2004)의 기준과 비교하여 정리한 것이 Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10이다.

ACI의 설계기준식은 우리나라 콘크리트 구조기준의 식과 동일하며, AASHTO LRFD의 경우 식(2)와 같은 형태의 식을 제안하고

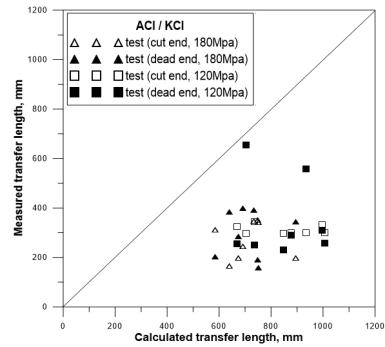


Fig. 8. Comparison of transfer length with ACI

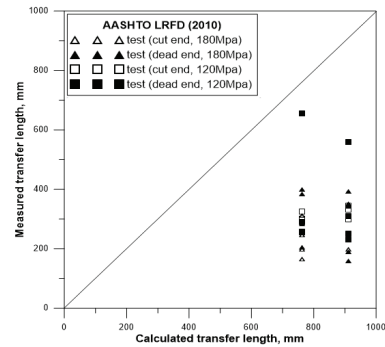


Fig. 9. Comparison of transfer length with AASHTO LRFD

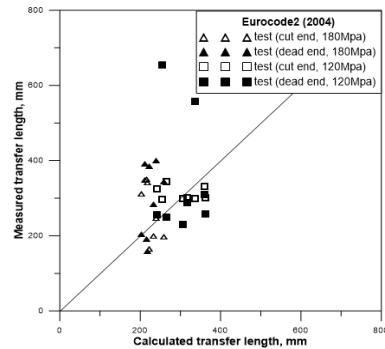


Fig. 10. Comparison of transfer length with Eurocode 2

있는데, 강연선의 지름만을 고려하여 응력전달길이를 산정한다.

$$l_t = 60d_b \tag{2}$$

또한, EuroCode에서 규정한 PS 강재의 응력전달길이 (transmission length, l_{pt})는 식(3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$l_{pt} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 d_b \sigma_{pm0}}{f_{lpt}} \tag{3}$$

여기서,

- α_1 = PS강재의 응력도입방법에 따른 계수
- α_2 = PS강재의 종류에 따른 계수
- d_b = PS 강재의 공칭지름(mm)
- σ_{pm0} = 긴장력 도입시의 PS 강재응력 (MPa)
- f_{bpt} = PS강재의 부착응력(MPa)

을 각각 의미한다.

ACI의 설계기준은 식(1)에 보인 KCI 기준과 동일하며 유효인장력과 강연선의 지름만을 통하여 응력전달길이를 산정하기 때문에 Fig. 8에 보인 것처럼 실험결과보다 매우 큰 응력 전달길이를 보인다. 이는 콘크리트 강도의 영향을 고려하지 않아서 초고성능 콘크리트의 뛰어난 부착능이 반영되지 못하는 결과에서 비롯된 것이다. 또한, AASHTO LRFD의 경우 Fig.9에 나타난 것과 같이 ACI와 유사하게 초고성능 콘크리트를 적용하는 경우 응력전달길이를 과다하게 산정하는 것으로 나타났다.

Eurocode 2는 부착응력, 콘크리트의 설계인장강도, 부착상태, 강연선의 종류, 시멘트의 종류, 콘크리트의 양생기간, 프리스트레싱 힘의 도입 방식, 콘크리트의 압축강도 등을 고려하여 응력전달길이를 산정한다. 따라서, 초고성능 콘크리트의 응력전달길이를 예측하는데 사용할 수 있는 것으로 판단되나, 이 실험결과에 따르면 Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 UHPC에 계수의 결정에 필요한 연구결과가 부족하여 현 시점에서 각 변수들을 산정하기 어려워 사용하기에는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 특히, 절단단부(cut end)에서는 실험 결과보다 크게 계산되는 경향을 나타내므로 적용성을 검토할 필요가 있다.

4.2 초고성능 콘크리트 응력전달길이 제안식

현재 많이 사용되고 있는 설계 기준과 이 실험의 결과를 비교한 결과, 현행 설계기준에 의하여 산정된 응력전달길이는 전체적으로 초고성능 콘크리트의 강연선 응력전달 능력을 과소평가하는 것으로 나타났다. 따라서, 초고성능 콘크리트를 사용한 PS 강연선의 응력전달길이를 합리적으로 산정할 수 있도록 이 연구의 실험결과를 바탕으로 식(4)의 형태로 새로운 응력전달길이 산정식을 제안하였다.

$$l_t = 2.431(f_{pi}/f_{ci})d_b \tag{4}$$

여기서, l_t = 초고성능 콘크리트를 사용한 PS 강연선의 응력전

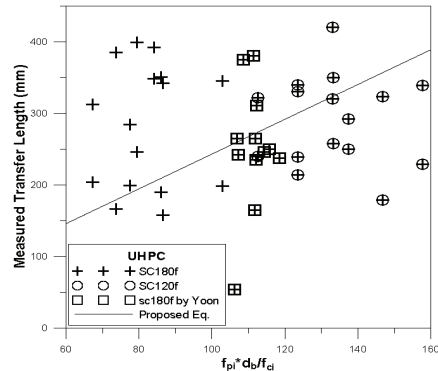


Fig. 11. A Regression Analysis on 120MPa and 180MPa UHPC Experiment Result

달길이(mm), f_{pi} = PS 강연선의 초기 프리스트레싱 응력(MPa), f_{ci} = 초기 인장력 도입 시 콘크리트 압축강도(MPa), d_b = PS 강연선의 공칭 지름(mm)이다. 이 산정식은 기존의 초고성능 콘크리트 응력전달길이 실험 연구(Kwahk et al. 2010)를 포함하여 이 실험의 연구결과로부터 회귀분석을 통하여 도출한 것으로, Fig. 11은 그 결과를 정리한 그림이다.

이 식은 제한된 실험결과에 의하여 도출된 것이므로 추후 실험 결과의 축적에 따라 신뢰도를 향상 시키는 과정이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

이 논문은 초고성능 콘크리트를 사용한 프리텐션 부재에 있어서 PS 강연선의 응력전달길이를 산정하기 위하여 초고성능 콘크리트의 압축강도, 피복두께, 긴장재의 지름 및 긴장력을 변수로 하여 실험을 진행하고 그 결과를 분석한 내용을 정리한 것이다. 이 연구로부터 얻은 구체적인 결론은 다음과 같다.

- 1) 초고성능 콘크리트를 사용한 프리텐션 부재의 응력전달길이는 콘크리트 강연선의 지름 증가, 압축강도 수준의 감소 및 피복 두께 감소에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기존 일반 콘크리트에 대한 실험 결과와 유사한 경향이며, 설계 기준에서 제시한 산정식의 개념과도 동일한 경향이다.
- 2) 초고성능 콘크리트를 사용하는 경우 콘크리트에 비하여 응력전달길이 값이 35~58% 정도 범위였으며, 이는 초고성능 콘크리트의 뛰어난 부착능에서 비롯된 것으로 판단된다.
- 3) ACI, AASHTO LRFD 및 Eurocode 2의 현행 설계기준이 제시하고 있는 응력전달길이 산정식은 사용하는 변수의 제한

으로 초고성능 콘크리트의 높은 부착성을 합리적으로 반영하지 못하고 있다, 따라서, 이 실험의 결과에 근거하여 새로운 응력전달길이 산정식을 제안하였는데, 이 식은 도입 인장력과 크기, 도입 시 콘크리트 강도 및 PS 강연선의 지름의 영향을 고려하여 보다 합리적인 결과를 주고 있다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- American Association of State Highway and Transportation Officials, (2010), AASHTO LRFD Bridge Design Specification, Washington D.C, 5th edition, AASHTO-LRFD.
- American Concrete Institute (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary(ACI 318-14).
- Choi, D.H. (2017). An Experiment and Analysis on Stress Transfer Properties of Pretensioned Members using Ultra High Performance Concrete, Master's Thesis, Seokyeong University [In Korean].
- European Committee for Standardization (2004). Design of Concrete Structures, Part 1-1:General Rules and Rules for Buildings.
- Kim, J.S., Choi D.H. (2016). An experiment on the bond-slip behaviors of pre-tensioned prestressed UHPC members, Material Science Forum, **878**, 161-164.
- Kwahk, I.J., Yoon, Y.S., Kook, K.H., Shin H.O. (2010). Bond Characteristics of Ultra High Performance Concrete, Journal of Korea Concrete Institute, **22(6)**, 753-760 [In Korean].
- Korea Concrete Institute (2012). Structural Code for Concrete Structures [in Korean].
- Oh, B.H., Lim, S.N., Lee, M.K., Yoo, S.W. (2014). Analysis and prediction of transfer length in pretensioned, prestressed concrete members, ACI Structural Journal, **111**, 549-560.
- Park, H. (2015). Behavior and Analysis of Transfer Zone in Pretensioned Prestressed Concrete Members, Ph.D Thesis, Seoul National University.
- Russell, B.W., Burns, N.H. (1996). Measured transfer length of 0.5 and 0.6 in. strands in pretensioned concrete, PCI Journal, **41(5)**, 44-65.
- Yuan, J., Graybeal, B. (2015). Bond of reinforcement in ultra-high-performance concrete, ACI Structural Journal, **112**, 851-860.
- Zia, P., Mostafa, T. (1997). Development length of prestressing standards, PCI Journal, **22(5)**, 54-65.

초고성능 콘크리트 프리텐션부재의 응력전달길이

프리텐션 콘크리트 부재에서 긴장재에 도입된 프리스트레싱힘은 긴장재와 콘크리트의 직접 부착에 의하여 콘크리트에 전달되므로 응력전달길이를 합리적으로 산정하는 것이 중요하다. 프리텐션부재 또는 프리캐스트 부재에 UHPC를 사용하는 경우 품질관리 측면에서 많은 장점이 있다. 따라서, 이 논문은 초고성능 콘크리트를 사용한 프리텐션 부재에 있어서 PS 강연선의 응력전달길이를 구하기 위하여 초고성능 콘크리트의 압축강도, 피복두께, 긴장재의 지름 및 긴장력을 변수로 하여 실험을 진행하고 그 결과를 분석한 내용을 정리한 것이다. 실험 결과에 따르면 초고성능 콘크리트를 사용한 경우 일반 콘크리트에 비하여 응력 전달길이가 크게 감소하였으며, 압축강도 수준이 증가할수록 응력전달길이가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 초고성능 콘크리트의 높은 부착강도에서 비롯되는 것으로 판단된다. 또한, 실험결과와 기존 설계기준의 응력전달길이 산정식을 비교하고, 초고성능 콘크리트 프리텐션 부재의 응력전달길이를 산정할 수 있는 새로운 공식을 제안하였다.