



비부착 강연선에 대한 포스트텐션 정착구 개발 및 성능 시험

조아서¹⁾ · 조영욱²⁾ · 전병갑²⁾ · 강현구^{1)*}

¹⁾서울대학교 건축학과 ²⁾삼성물산주식회사 건설부문 주택ENG팀

Development and Performance Test for Unbonded Post-Tensioned Anchor

Ah Sir Cho,¹⁾ Yeong Wook Jo,²⁾ Byong Kap Jeon,²⁾ and Thomas H.-K. Kang^{1)*}

¹⁾Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

²⁾Residential Structural Team, Engineering & Construction Group, Samsung C&T Corporation, Seoul 137-956, Korea

ABSTRACT An unbonded post-tensioned anchor using a 15.2 mm diameter 7-wire strand was developed based on finite element analysis and experimental testing. In order to evaluate its performance, static load tests and load transfer tests were conducted following KCI-PS101. The static load tests and additional strand tensile tests confirmed that the developed anchor had a capacity more than nominal tensile strength of a 7-wire strand without any damage or deterioration. According to the result of load transfer tests for many different reinforcing details, specimens with no additional reinforcing bars sustained at least 1.64 times the nominal tensile strength of the strand.

Keywords : anchor, anchorage, post-tension, static load, load transfer

1. 서 론

인장에 약한 콘크리트를 보완하기 위한 프리스트레스트 공법 중 콘크리트 타설 및 경화 후 응력을 주는 것을 포스트텐션(PT, Post-Tension) 공법이라 하며, 포스트텐션 정착구는 이 공법에 사용되는 필수적인 구조적 장치이다. 정착구를 비롯한 관련 제품들을 개발하여 전 세계 시장에 판매하는 유럽이나 미국 등과 달리, 지금까지 국내에서는 전량을 해외업체의 제품에 의존하고 있다. 해외업체의 정착구 및 액세서리는 고가로서 국내 PT 건축시장에 적용하는 것이 경제적 측면에서 큰 부담이 되고 있다.

기존 연구로는 UHPC(Ultra High-Performance Concrete)에 적용하는 정착장치에 대한 하중전달시험¹⁾과 UHPC를 적용한 프리스트레스트 정착부에 대한 응력해석²⁾ 연구가 있으며, 직사각형 정착관을 가지며 5개의 강연선을 사용하는 정착장치에 대하여 보강 상세에 따른 거동을 분석한 연구도 있다.³⁾ 그러나 국내에서 단일 강연선을 사용하는 정착장치에 관한 구조적 연구 및 실험은 부족한 상황이다.

이 연구에서는 단일 비부착 강연선을 고정할 수 있는 1구 정착구의 형태를 유한요소해석을 기반으로 개발하고, 정

하중 및 하중전달시험을 통해 개발된 정착구의 성능을 평가하고자 하였다. 정하중시험을 통해 정착구의 성능을 파악하고, 하중전달시험을 통하여 정착구 보강상세에 따른 압축강도를 검토하였다. 또한 국내외의 정착장치 시험방법에 대한 고찰도 함께 수행하였다.

2. 각 기준의 정착장치 성능 시험방법 고찰

국내의 경우, 콘크리트 표준시방서에 따르면 프리스트레스트 공법에 사용하는 정착장치의 성능은 KCI-PS101을 따르도록 명시하고 있다.⁴⁾ KCI-PS101은 콘크리트 표준시방서 해설의 부록 15장에 해당하며, 세 가지 시험방법(정하중시험, 피로시험, 하중전달시험)을 제시하고 있다. 이는 유럽의 ETAG 013을 토대로 작성된 것이다. ETAG에서는 총 20가지의 시험을 제시하고 있으며, 이 중 필수 시험으로는 KCI에서 제시한 정하중시험, 피로시험, 하중전달시험을 포함하여 6가지가 지정되어 있다. ETAG에서는 단일 강연선을 위한 정착장치 시험의 경우 시험별 실험체 수를 Table 1과 같이 규정하고 있으며, KCI는 실험체 수에 대해 특별히 규정하고 있지 않다.⁵⁾ 미국의 경우에는 ACI 423.6-01에서 정하중시험과 피로시험을 언급하고 있으나 KCI나 ETAG와 같이 시험 방법을 구체적으로 제시하고 있지는 않다.⁶⁾ 피로시험은 피로하중 작용 시 정착장치의 피로하중 지지능력을 확인하기 위한 시험인데, 본 연구에서는 피로하중이 없는 건

*Corresponding author E-mail : tkang@snu.ac.kr

Received March 3, 2014, Revised November 11, 2014,

Accepted November 11, 2014

©2015 by Korea Concrete Institute

Table 1 Number of tests in ETAG

Test Method	Total Number of Tests
Resistance to Static Load	5
Resistance to Fatigue	4
Load Transfer to the Structure	4
Friction Coefficient	(1)
Deviation / Deflection (Limits)	(1)
Practicability / Reliability of Installation	(1)

축물에 적용하기 위한 연구이므로 피로시험은 생략하였다. 참고로 최근 유럽에서는 건축물의 경우 ETAG에 의거하여 승인된 정착구의 사용을 의무화하지 않고 있으며, 발주처나 건물주가 정착구를 자유로이 선택할 수 있도록 기준이 수정되었다.

2.1 정하중시험

정하중시험은 정하중이 작용하였을 때 정착장치의 성능 및 인장요소의 거동을 확인하는 시험이다. 특히 강연선의 공칭인장강도에 상응하는 하중이 작용할 때 정착장치가 그 성능을 만족시키는지 확인하는 것이 정하중시험의 주된 목적이다.

KCI와 ETAG에서는 실험체 전체의 길이에 대해서는 구체적으로 규정하고 있지 않으나 강연선의 자유장이 최소 3.0 m 이상이 되어야 한다고 명시하고 있다.^{4,5)} 반면 ACI는 실험체 전체 길이를 최소 1.1 m로 규정하고 있으며⁶⁾, 강연선의 자유장 길이에 대해서는 직접적으로 언급하고 있지 않다. 그러나 연신율을 얻기 위한 두 측정지점 사이의 거리가 최소 915 mm 이상이 되어야 한다고 규정하고 있고 각각의 측정지점이 정착장치로부터 최소 75 mm 이상 떨어져야 한다고 규정하고 있기 때문에, 자유장의 길이는 최소 1065 mm 이상이어야 함을 유추할 수 있다.⁶⁾ 한편, 측정지점과 관련하여서 KCI와 ETAG에서는 특별히 언급되어 있지 않다.

고정단에서는 정착 시 강연선 및 썸머의 길이방향 변위를 측정해야 한다. 7연선 중 중심에 있는 강선 1가닥과 바깥을 둘러싸고 있는 강선 6가닥 중 임의의 한 가닥을 선택하여 변위를 측정해야 한다. 또한 썸머의 쪽들 중 임의로 한 개를 선택하여 변위를 측정해야 한다.

KCI와 ETAG는 가력 방법을 강연선 공칭인장강도(F_{pk})를 기준으로 제시하고 있으며, 이는 실제 시공방법을 고려한 것이라고 할 수 있다. 우선 긴장기를 이용해 F_{pk} 의 10%만큼 힘을 가한다. 이는 고정단의 썸머가 정착장치 및 강연선으로부터 떨어지지 않도록 하기 위함으로, 가인장에 해당한다. 이 때 가력의 크기는 정착장치의 내구성이나 썸머 및 강연선이 안정되는 시간에는 관련이 없지만 변위계를 이용해 측정하는 자유장의 연신율에 영향을 미치므로 고정단의 썸머가 고정될 정도가 타당하다고 판단된다.

가인장 후 변위계들을 설치하고 긴장기를 이용해 F_{pk} 의 80%까지 100 MPa/min의 속도로 가력하고, 이 상태를 1시간 동안 유지한다. 이 1시간 중 초반 30분 내에 고정단에서 측정하는 변위들이 안정되어야 하는데, 이는 강연선이 썸머에 고정되었고 썸머는 정착장치에 정착된 것을 의미한다. 만약 30분을 넘어서도 안정이 되지 않는다면 썸머 및 강연선이 완전히 정착되지 않은 것이기 때문에, 이후 강연선이 썸머로부터 미끄러지거나 썸머가 정착장치로부터 탈락할 가능성이 있다. 이후 강연선의 파단까지 인장하고 최대하중을 확인한다. 이는 강연선이 파단될 때까지 정착구가 구조적으로 안전하게 버티는지를 확인하기 위함이다.

시험 후에는 실험체로부터 정착장치를 꺼내어 육안으로 확인해야 한다. 이는 실험 중에 정착구 및 썸머가 파손되었는지를 확인하는 과정으로서, 정상적인 경우에 정착구는 파손되지 않으며 썸머는 제품의 특성이나 정착구의 접촉면의 상태에 따라 쪼개짐이 일부 발생할 수 있다.

ETAG에서는 정하중에 의한 정착구의 변형과 변위를 측정하는 사항도 기재되어 있으나⁵⁾ KCI에서는 이를 포함하고 있지 않다.

2.2 하중전달시험

하중전달시험은 하중에 따른 압축요소의 거동과 하중지능력을 확인하는 방법으로, 정착장치 및 보강상세 성능의 확인이 그 목적이다. ETAG는 mechanical anchorage와 bond anchorage에 대해 각각 시험 방법을 제시하고 있는 반면, KCI는 정착장치의 구분 없이 ETAG의 mechanical anchorage에 대한 시험방법과 동일한 내용만을 제시하고 있다.

두 기준 모두 실험체의 크기에 대해 동일한 제한을 두고 있는데 이는 실험체의 높이가 두 옆면의 길이 중 긴 것의 2배 이상이 되어야 한다는 기준이며, 이를 제외하고 1구 정착구를 사용하는 실험체 옆면 길이에 대한 제한사항은 없다.^{4,5)}

정착장치의 보강상세에 대한 예시는 주어지지 않았으나, 실험체 바닥면으로부터 높이의 1/2지점까지의 구간에는 기본적으로 보강되는 철근을 제외하고 정착구에 대한 보강상세가 적용되지 않아야 한다(Fig. 1).

최소 두 옆면에서 종방향과 횡방향으로 콘크리트 변형률을 측정하여야 한다. 종방향으로는 하중에 의한 콘크리트의 압축변형을, 횡방향으로는 균열폭을 측정한다. 이때 측정된 변형률(ϵ)과 실험 중 확인하는 균열폭(w)은 다음의 안정화 공식에 이용되며 그 식은 다음과 같다.^{4,5)}

$$\omega_n - \omega_{n-4} \leq \frac{1}{3}(\omega_{n-4} - \omega_0), n \geq 10 \tag{1}$$

$$\epsilon_n - \epsilon_{n-4} \leq \frac{1}{3}(\epsilon_{n-4} - \epsilon_0), n \geq 10 \tag{2}$$

여기서, n 은 반복하중 횟수로 최소 10회 이상이어야 하며, (1)과 (2)가 모두 성립하면 비로소 실험체의 파괴까지 가력

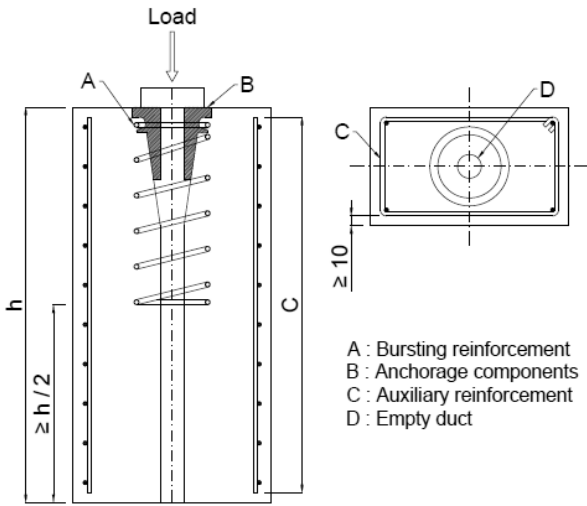


Fig. 1 Example of specimen for load transfer test⁵⁾

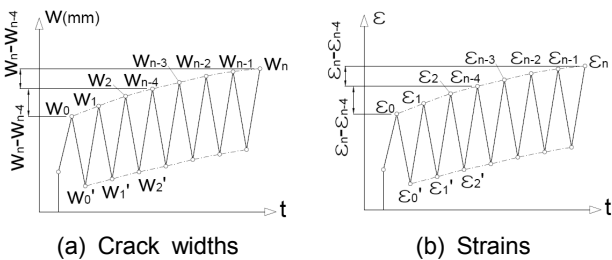


Fig. 2 Assessment of crack width and strain stabilisation⁵⁾

하게 된다. 반복하중이 진행됨에 따라 균열폭 및 변형률의 증가율이 점차 줄어드는데, 이는 실험체 내부에서 정착장치 및 철근과 콘크리트 사이의 상호작용이 안정화되어 반복하중 구간 내의 하중이 작용하더라도 균열이 더 이상 급격하게 커지지 않는 것을 의미한다(Fig. 2). 최소 10회 이상의 반복하중을 가하도록 규정한 것은 콘크리트와 철근 및 정착구 사이의 초기 접촉 상태에 따라 균열폭 또는 변형률이 극단적으로 나타날 수 있기 때문에 충분한 반복하중을 주어 실험체를 어느 정도 손상이 누적된 상태로 만들기 위함이다.

시험 허용기준으로 첫 $0.8F_{pk}$ 와 마지막 $0.12F_{pk}$ 에 도달하였을 때 최대 균열폭이 0.15 mm 이하여야 하며, 마지막 $0.8F_{pk}$ 일 때는 최대 균열폭이 0.25 mm 이하여야 한다.¹⁾ 최대 균열폭이 해당 수치보다 크다는 것은 콘크리트 지압강도가 정착장치로부터 받는 압력보다 약하다는 것을 의미하므로, 보강철근을 늘리거나 정착장치의 정착면적을 늘려야 한다.

실험체를 타설하고 하루 후에 탈형을 하며, 이후 습윤양생을 한다.^{4,5)} 이는 콘크리트 건조수축으로 인한 균열 발생을 최소화하여 실험에서 균열폭과 변형률을 보다 정확하게 측정하기 위함이다.

3. 유한요소해석을 통한 정착구 개발

이 연구에서는 국내에서 주로 사용하는 직경 15.2 mm에 대한 정착장치를 개발하였는데, 형태, 구조, 경량성을 고려

Table 2 Measured material properties of GCD500-7

Properties	KS D 4302	Results		
Tensile Strength (N/mm ²)	500 ↑	612	602	616
Elongation (%)	7 ↑	9.6	9.8	9.6
Brinell Hardness	150~230	207	201	207

하여 정착판, 몸통, 거셋으로 나누어 분석한 후 각 요소의 위치나 형태를 변수로 하여 해석하였다. 여기서 거셋이란 보강을 목적으로 몸통과 정착판 사이에 덧붙여진 부분을 말한다. 해석에는 ABAQUS 6.10이 사용되었다.⁷⁾

우선 기성 쇠기 제품을 기준으로 이와 호환되는 몸통 내 접촉면을 설계하였다. 정착판의 넓이는 콘크리트 지압강도를 고려하여 가로 125 mm, 세로 70 mm로 결정하였는데, 추후 하중전달시험을 통해 검증되었다.

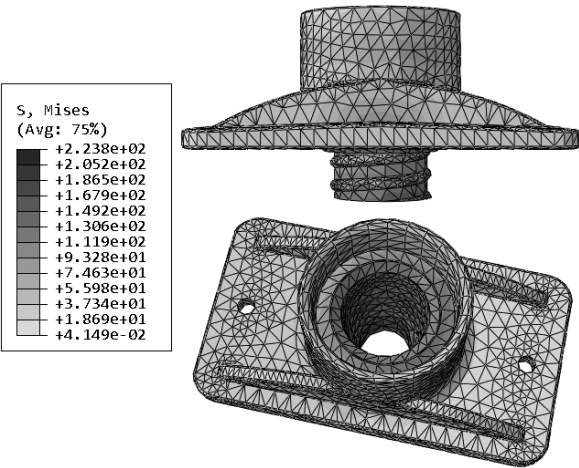
KCI와 ACI에 따르면 강연선 공칭인장강도의 95%에 이르기 전에 정착구가 파괴되거나 큰 변형이 일어나지 않아야 한다고 규정하고 있다.^{4,6)} 이를 고려하기 위하여 유한요소해석을 위해 입력하는 하중은 보수적으로 $1.0F_{pk}$ 를 택하였다. 강도가 1860 MPa이고 직경이 15.2 mm인 강연선의 F_{pk} 는 258 kN이며 앞서 설계한 쇠기접촉면의 면적은 2872.6 mm²이므로, 강연선에 의해 접촉면이 받는 압력은 약 90 MPa로 산정하였다.

정착구 재료로는 구상흑연주철 GCD 400~500이 일반적으로 사용되는데, 이 연구에서도 역시 다소 보수적으로 GCD 500-7을 사용하였다. KS 규격에 의해 GCD 500-7은 인장강도 500 N/mm² 이상, 항복강도 320 N/mm² 이상, 연신율 7% 이상을 만족해야 한다.⁸⁾ 3개의 시편을 이용하여 측정한 재료시험 결과는 Table 2와 같으며, 보편성을 반영하기 위하여 해석에서는 최소 항복강도의 1.25배값인 400 N/mm²에서 재료가 항복하며 탄성계수는 200000 MPa를 가진다고 가정하였다.

정착장치는 콘크리트 내에 묻히기 때문에, 충분히 큰 외력 없이는 콘크리트에 직접 닿는 부분의 변형은 거의 일어나지 않는다. 따라서 정착장치의 내부면과 콘크리트와의 경계면을 완전고정 경계조건인 ENCASTRE (U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0)으로 설정하였다. 또한 콘크리트와 접촉하는 모든 면에 이 같은 경계조건을 적용하면 정착구 자체의 변형을 고려할 수 없기 때문에 정착판과 평행한 안쪽 면만 설정하였다.

동일압력이 작용할 때 정착구가 받는 최대 응력이 최소가 되도록 설계하는 것이 목적이므로(응력을 고루 분포시키는 것이 목적이므로), 각 변수의 변동에 따른 정착장치 내 최대 von Mises 값을 확인하여 최소값을 선택하되 실용성을 고려하여 최종적인 형태를 결정하였다(Table 3). 다음은 정착구 형태 및 치수의 최적화 설계를 위한 해석결과의 요약이며, 그 해석과정의 일례를 Fig. 3에 나타내었다.

Table 3 FEM analysis results



	18	19	20	21	22
a (mm)	18	19	20	21	22
Max. von Mises Stress (MPa)	210.4	208.4	201.6	206.5	232.0
b (mm)	5	10	15	20	25
Max. von Mises Stress (MPa)	353.5	400	368.9	400	340.0
c (mm)	35	37	39	41	43
Max. von Mises Stress (MPa)	369.3	370.3	340.7	365.9	400
d-e (mm-mm)	5-5	5-7	6-5	7-5	7-7
Max. von Mises Stress (MPa)	371.6	362.1	394.0	358.5	367.5

Fig. 3 FEM analysis results

- 1) 정착판의 위치가 정착구의 중간높이보다 콘크리트 부재 쪽으로 위치할 때 응력 분포가 보다 효과적이었다.
- 2) 몸통의 형태는 정착판을 기준으로 거셋이 있는 쪽이 원뿔대의 형태이고 슬리브쪽 부분이 원통형일 때 응력 분포가 보다 효과적이었다.
- 3) 정착판은 위로 볼록한 형태가 평평한 형태, 아래로 볼록한 형태, 또는 위아래 모두 볼록한 형태와 비교하여 응력 분포에 보다 효과적이었다.
- 4) 두 거셋의 중심간격이 40 mm일 때 정착판의 응력이 보다 효과적으로 분산되었다.
- 5) 거셋 두께는 정착판에 닿는 부분이 5 mm, 몸통에 닿는 부분이 7 mm일 때 응력 분포에 보다 효과적이었다.

상기 해석결과를 기반으로 설계한 최종 형태는 Fig. 4와 같으며, 이때 최대 von Mises 값은 358.5 MPa로 나타났다. 다음은 최종적으로 설계된 정착구의 형태 및 치수의 요약이다.

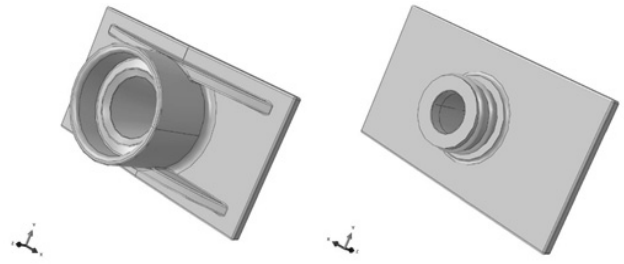


Fig. 4 3D model of developed anchor

- 1) 몸통은 정착판을 기준으로 거셋 쪽은 지름이 55 mm인 원통형이고, 슬리브 쪽은 지름이 39 mm인 원통형에 나선형으로 슬리브 체결이 가능한 형태
- 2) 가로 125 mm, 세로 70 mm, 두께 6~8 mm인 정착판으로서, 주물 제작과정의 문제로 위가 볼록한 형태 대신 위아래 모두 볼록한 형태를 사용
- 3) 평면상으로 11자형이면서 측면상으로는 아치형인 거셋을 구비

4. 실험계획

4.1 정하중시험 계획

4.1.1 실험체

정하중시험을 위한 3개의 실험체를 모두 동일한 규격과 조건으로 제작하였으며, 각각 PTa, PTb, PTc라 명하였다. KCI와 ETAG에 제시된 실험체 예시 그림에는 철재 프레임으로 나타나 있지만 강연선의 인장에 의한 좌굴 등에 보다 안전하게 실험을 수행하기 위해 철근콘크리트로 제작하였다. 이때 콘크리트의 강도는 80 MPa을 사용하고 보강철근을 조밀하게 배치하여 충분한 부분지압강도를 가지도록 하였다 (Fig. 5).

실험체의 콘크리트 길이는 3120 mm이고, 실험체 내 강연선의 자유장은 3000 mm이다. 양쪽 끝에 콘크리트 내에 삽입되는 정착구의 높이는 고정단과 긴장단에서 각각 65 mm, 55 mm이다. 긴장단에서는 정착구 끝이 10 mm 돌출하도록 배치하여 긴장기가 정착장치에만 접촉하여 가력할 수 있도록 하였다.

콘크리트 단면은 가로 400 mm, 세로 400 mm의 정사각형이며 그 중심에 강연선이 지나갈 수 있도록 하였다. 자유장 내 두 측정지점 사이의 거리는 1200 mm이며, 실험체 중간에 강연선이 노출될 수 있도록 가로 100 mm, 세로 242 mm, 길이 1500 mm의 포켓을 두었다(Figs. 5 and 6).

실험체에서 철근은 주근으로 SD400 D16을 사용하였으며 보강철근으로 SD400 D13을 이용하였다. 철근피복 두께는 10 mm로 동일하게 하였다.

실험체가 강연선에 의해 압축되는 변위를 최소화하고 파괴가 일어나지 않도록 하기 위해 충분한 강도가 나올 수 있

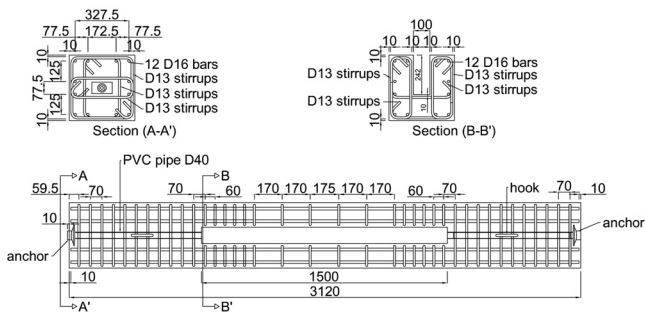


Fig. 5 Details of static load test specimen (All units: mm)

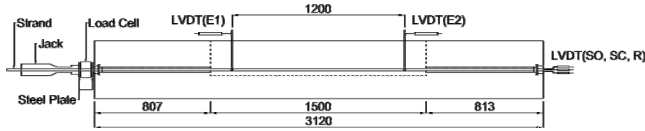


Fig. 6 Test set-up and instrumentation for static load test (All units: mm)

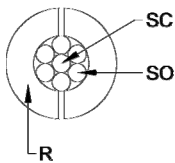


Fig. 7 Measuring points of displacement meters at fixed end

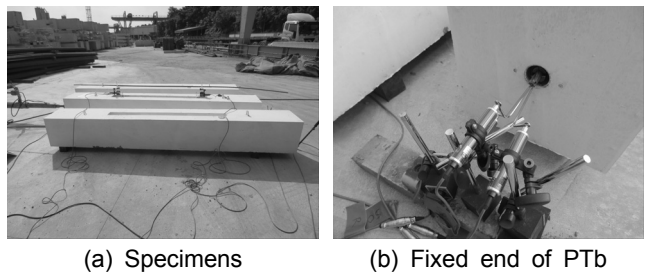


Fig. 8 Testing of specimen

도록 타설 후 1달이 지난 시점에 실험을 수행하였다. 또한 실험체를 제작할 때 강도시험용 공시체 15개를 제작하여 건축구조기준⁹⁾에 따라 콘크리트 압축강도를 측정하였다.

4.1.2 가력 및 계측계획

강연선이 실험체 중심을 관통하도록 삽입한 후, 긴장단쪽에 로드셀과 긴장기를 설치하였다. 이 때 로드셀의 손상을 방지하고 실험체에서 돌출된 정착구 윗면에 힘을 전달시킬 수 있도록 로드셀 양쪽에 철판을 덧대었다(Fig. 6).

강연선의 연신율을 측정하기 위해 자유장 내 두 지점에 변위계를 설치하여 변위량을 측정하였다. E1은 긴장단쪽에, E2는 고정단쪽에 설치한 변위계이며, E1과 E2 사이의 거리는 1200 mm로 하여 ACI 기준을 충족하였다. 전술하였듯 KCI에서는 특별히 변위계의 위치를 명시하지 않고 있다.

고정단에서 강연선 및 썬기의 변위를 측정하기 위하여 3개의 변위계를 설치하였다. SC는 강연선의 가장 중심에 있

는 강연선에 대한 변위를, SO는 중심 강연을 제외한 나머지 6개의 강연들 중 임의로 선택된 한 개의 강연에 대한 변위를 나타낸다. R은 썬기 두 쪽 중 하나를 선택하여 측정된 변위를 나타낸다(Fig. 7). SC, SO, R 측정지점의 거리가 서로 가깝기 때문에 약 100 mm 길이의 가시 모양 철물을 제작하여 변위계 끝에 부착하여 측정하였다(Fig. 8).

4.2 강연선 인장 시험계획

정하중시험에서 긴장기 하중용량의 한계로 F_{pk} 의 90~98%의 최대인장력이 작용하였다. 강연선의 파단까지 실험을 진행할 수 없었기 때문에 이를 보완하기 위하여 실험에 사용했던 것과 동일한 강연선 및 썬기에 대한 인장시험을 별도로 수행하였다.

총 5개의 1 m 길이 강연선을 실험하였는데, 이 중 3개는 동일 썬기 및 개발된 정착구와 동일한 정착면을 갖는 원통형 정착구를 사용하여 실험하였고, 강연선 자체의 연신율을 정확하게 측정하기 위하여 나머지 2개는 썬기와 정착구를 사용하지 않고 지그로 고정하여 실험하였다.

4.3 하중전달시험 계획

4.3.1 실험체

하중전달시험을 위한 실험체는 콘크리트 사각기둥 형태로 일축압축 시험에 맞게 제작되었다. 일반적인 슬래브 두께와 정착장치의 크기를 고려하여 콘크리트 단면의 가로는 300 mm, 세로는 250 mm로 정하였고, 실험체 높이는 가로 길이 300 mm의 최소 2배가 되어야 하므로 600 mm로 결정하였다. 실험체 도면은 Fig. 9와 같다.

종방향 주근과 스테럽은 하중전달실험체에 기본적으로 배근되는 철근이다. 즉, 연속된 콘크리트 부재의 조건을 모사하기 위한 철근이라 할 수 있다. 일반적인 상황에 대한 실험이기 때문에 별도의 기술승인이 필요 없는 기본 조건을 적용하였다. 주근은 총 단면적이 $0.003A_c$ 를 넘지 않도록^{4,5)} SD400 D16을 사용하였다. 인양고리를 별도로 만들어 삽입하게 되면 실험 결과에 영향을 줄 수 있기 때문에, 모서리에 위치한 종방향 주근이 실험체 외부에서 이어지게끔 한 개의 철근으로 제작하여 인장고리의 역할도 겸하였다. 스테럽은 KCI와 ETAG 기준에 따라 콘크리트 1m³당 50kg을 넘지 않도록 SD400 D10을 사용하였으며 170 mm 간격으로 높이에 따라 균등하게 배치하였다.^{4,5)}

이 연구에서 개발된 정착장치에 대한 보강상세 철근으로서 정착판의 긴 변에 평행한 철근(HB)과 이에 수직이며 ㄷ자 형태인 헤어핀(HP)을 배근하였다. HB는 활렬력을 저항하기 위한 목적으로 정착판 바로 앞에 배치된 보강철근이고, HP는 실험체 세로방향으로 작용하는 파열력을 저항하기 위한 보강철근이다. 또한 무보강 실험체도 2개 제작하였는데, 이때에도 KCI와 ETAG 기준에 따라 종방향 모서리 주근과 3개의 스테럽은 배근되었다. 보강상세에 따른 성능

Table 4 Number of specimens for load transfer test

	No HP	HP3	HP4	HP5
No HB	2	N.A	N.A	N.A
HB4	2	2	2	N.A
HB5	2	N.A	2	2
MHB4	2	2	N.A	N.A

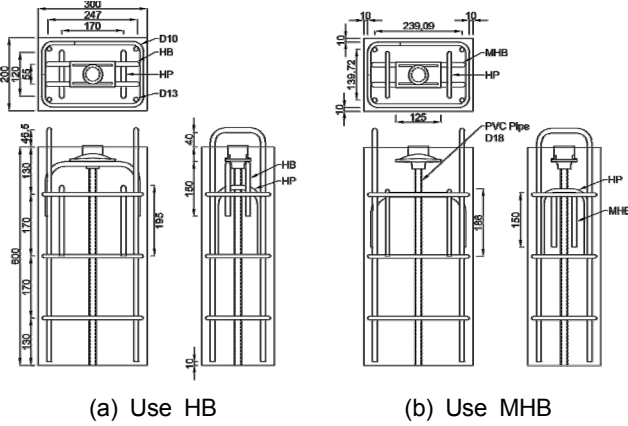


Fig. 9 Details of load transfer test specimens (All units: mm)

변화를 확인하고자 Table 4와 같이 총 18개의 실험체를 구성하였다. 숫자는 철근의 규격을 나타내는데, 3은 D10, 4는 D13, 5는 D16을 의미한다. MHB는 HB와 평행하지만 HP의 안쪽에 위치한 철근으로서 실험체 가로방향으로 작용하는 좌우력을 저항하기 위한 보강철근이다. ACI에서는 슬래브의 경우 정착구의 양쪽 바깥으로 150 mm 연장하여 철근이 정착되도록 제시하고 있지만,¹⁰⁾ 실험체의 크기상 HB와 MHB를 일직선으로 정착시킬 수 없으므로 90도 구부린 갈고리 형태로 정착하였고, 갈고리 길이는 공히 150 mm로 하였다.

ACI에 따르면 HP는 수평길이가 최소 230 mm 이상이 되어야 하지만 KCI와 ETAG에 따라 보강상세가 실험체 중간 높이보다 하단에 배근되지 않아야 하므로, HP를 실험체 중간 높이까지만 연장하였다.

실험날짜를 고려하여 동일한 실험체들을 각 세트별로 다른 날 타설하여 Set A, B로 나누었고 실험체명 끝에 a, b를 붙여 표기하였다. 27 MPa의 콘크리트로 타설하였으며 이틀 날 탈형하고 피복양생제 처리를 하여 습윤양생을 대신하였다. 또한 공시체를 각 세트당 45개씩 제작하고, 실험체와 동일한 환경에서 보관하였다.

4.3.2 가력 및 계측계획

강연선을 긴장할 수 있는 최소 콘크리트 강도인 21 MPa에 실험체 콘크리트 강도가 도달하였을 때 실험을 수행하였다.¹¹⁾ 건축물 실제 현장에서는 최소 콘크리트 강도로 21~28 MPa이 적용된다. 본 연구에서는 보수적으로 21 MPa를 택함으로써 안전치를 두었다. 실험체를 타설한 후 4일째 되는 날부터 공시체를 이용하여 매일 콘크리트 강도를 확인하였다.

콘크리트의 변형률은 Fig. 10과 같이 콘크리트 게이지를

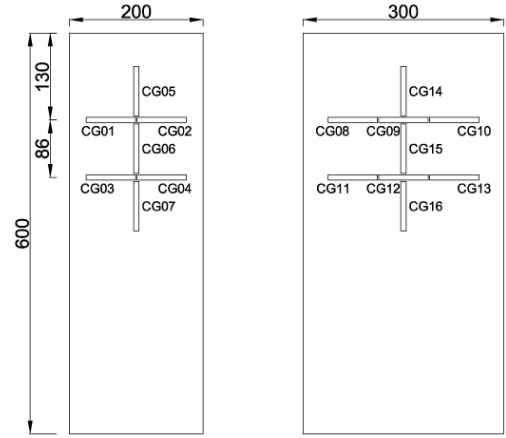


Fig. 10 Concrete strain gauges for load transfer test (All units: mm)

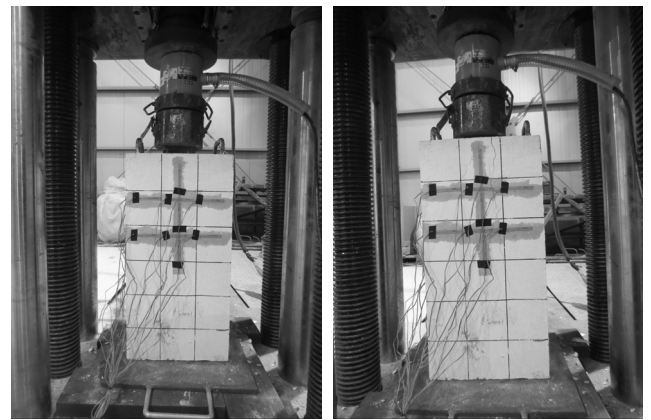


Fig. 11 Test set-up for specimen of load transfer test

이용하여 측정하였다. KCI와 ETAG에 의하면 두 점 사이의 변형률만 측정하게 되어 있지만 본 실험에서는 보다 많은 양의 콘크리트 게이지를 사용하였다.

실험체를 F_{pk} 의 80%까지 가력한 후, 12%와 80% 사이의 주기하중을 최소 10회 이상 안정화 공식이 성립할 때까지 반복하였다. 변형률은 $0.8F_{pk}$ 와 $0.12F_{pk}$ 에 도달할 때마다 그 값을 기록하였으며, 균열은 첫 $0.8F_{pk}$ 와 마지막 $0.12F_{pk}$ 및 $0.8F_{pk}$ 에 도달하였을 때 측정하였다. 강연선 및 긴장기를 사용하지 않으므로 실험체로부터 돌출된 정착구의 긴장하는 쪽 면을 평평하게 가공하고 이 면에 강판을 덧대어 가력하였다(Fig. 11). 이후 실험체가 파괴될 때까지 가력하고 파괴될 때의 하중과 변형률을 측정하였다. KCI에 따라 파괴된 실험체로부터 정착구를 꺼내어 육안으로 확인하고 사진 기록을 남겼다.

5. 실험 결과 및 분석

5.1 정하중시험 결과

공시체 6개의 평균 압축강도가 73.1 MPa일 때 정하중시험을 수행하였다. 각 실험체에 대한 결과는 Fig. 12, 13과

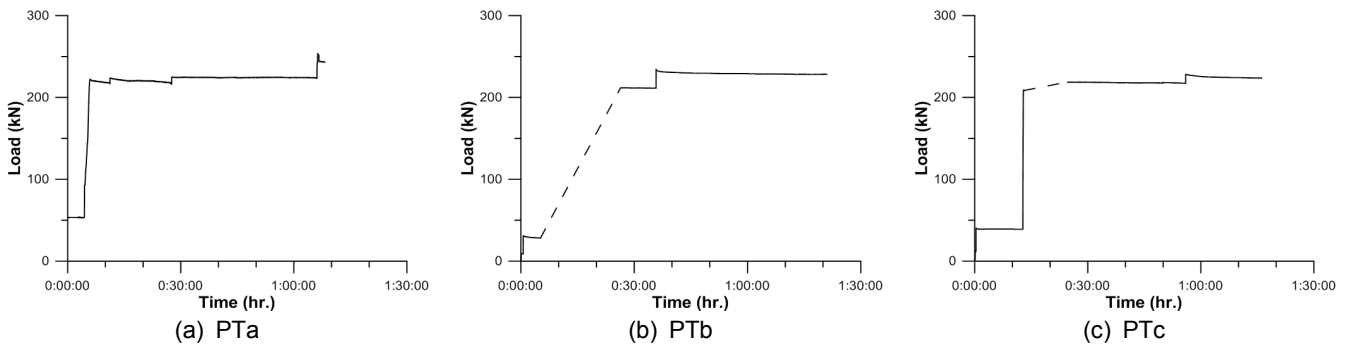


Fig. 12 Load histories measured in static load test

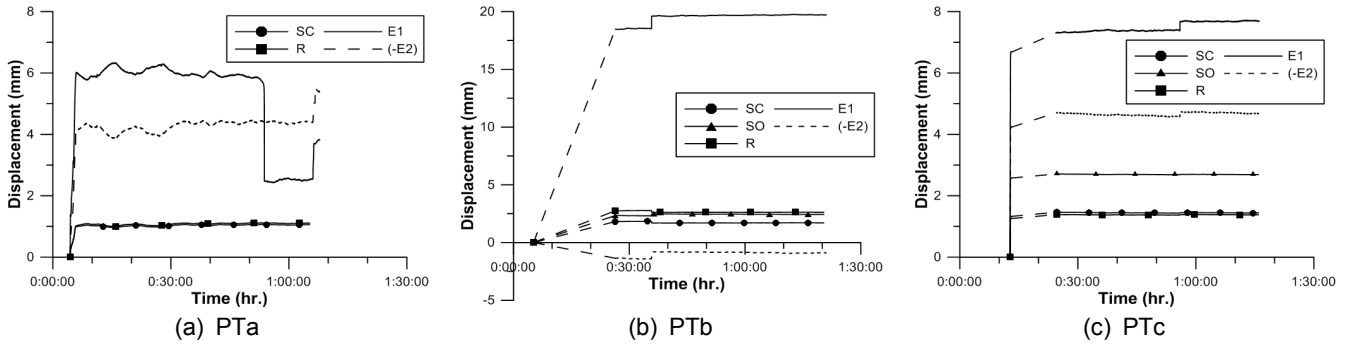
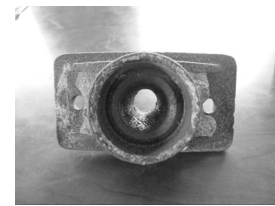


Fig. 13 Displacement histories measured in static load test

Table 5 Results of static load tests

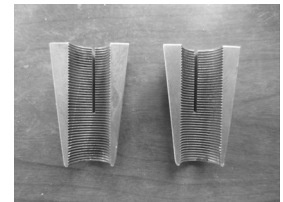
	PTa	PTb	PTc
Load at $0.1F_{pk}$ (kN)	53.4	28.2	39.0
Max. Load (kN)	253.9	234.5	228.4
SC (mm)	At least 1.06	1.70	1.44
SO (mm)	N.A	2.46	2.69
R (mm)	At least 1.11	2.63	1.38
E1 (mm)	N.A	19.62	7.68
-E2 (mm)	N.A	0.82	-4.73
E1-E2 (mm)	N.A	20.44	2.95



(a) Anchor



(b) Wedge (outside)



(c) Wedge (inside)

Fig. 14 Anchor and wedge after static load test

Table 5에 나타내었다. 시험 도중 장비의 문제로 인하여 PTb는 0:05:11부터 0:26:23까지, PTc는 0:13:08부터 0:24:36까지의 결과가 측정되지 않았으며, 이 구간은 그래프에서 점선으로 표시하였다. 또한 실제 시험 중 가력속도는 KCI에서 제시하는 가력속도와 다소 차이를 보였다. 가인장할 때 F_{pk} 의 10%보다 큰 힘이 작용되었고 F_{pk} 의 80%까지 가력하는 시간도 짧았으나(Table 5, Fig. 12), 오히려 이는 실제 긴장작업 속도에 더 가까운 것이다.

측정된 최대하중은 PTa, PTb, PTc에서 253.90 kN, 234.5 kN, 228.4 kN으로 각각 나타났으며, 이는 각각 F_{pk} 의 98%, 91%, 89%에 해당한다. F_{pk} 의 80%까지 가력한 상태를 1시간 동안 유지하는 과정에서 고정단에서 측정된 SC, SO, R 변위량은 실험체마다 다소 차이를 보였으나, 가력 직후 정착상태가 안정되었음을 확인하였다. Fig. 13(a)에서 0:53:46

에 PTa의 E1의 수치가 급격하게 떨어진 것은 변위계를 고정하던 철판이 실험 중 콘크리트로부터 탈락했기 때문으로 구조적 거동과는 무관하다. 또한 F_{pk} 의 80%를 오차 범위 내로 유지하기 위해 가력하였을 때 E1과 E2 변위의 변화는 확인하게 나타나는 반면에 고정단에서의 변위는 영향을 받지 않았다. 이는 쐐기와 강연선이 정착구에 단단하게 정착되었음을 의미하는 것이다. KCI에 따라 정착중시험에 사용된 정착구들을 꺼내어 확인한 결과, 모든 정착구 내의 쐐기 접촉면과 정착판에 변형되거나 파손된 부분이 없었으며, 쐐기에서도 흠집이나 변형은 발견되지 않았다(Fig. 14).

자유장 내에서 측정된 강연선의 신장량은 E1-E2와 같다.

KCI, ETAG, ACI에서 요구하는 연신율은 2% 이상이므로^{4,6)} 신장량이 24 mm 이상이 되어야 한다. 파단 시까지 실험이 진행되지 못한 관계로 연신율 2%에 미치지 못하였다. 따라서 파단 시 최대연신율을 파악하기 위하여 동일짜기에 정착된 강연선을 사용하여 별도의 인장 시험을 수행하였다.

5.2 강연선 인장시험 결과

정하중시험에 사용된 강연선과 동일한 시편 5개에 대한 인장시험 결과를 Table 6에 나타내었다. 평균 인장강도는 267.2 kN이었으며, 평균 연신율은 8.8%으로 나타났다. 정착장치와 썬기를 이용할 때 정착과정에서 슬립이 발생하는 것을 고려하더라도 강연선의 연신율은 2%를 크게 상회하고 있는 것으로 보아, 강연선과 썬기의 상호작용이 연신율 2%를 확보하는데 문제가 없다고 사료된다(Fig. 15).

또한 강연선 인장시험 결과를 이용하여 정하중시험 중 가력하중과 실제 인장강도의 비율을 재확인할 수 있었다.

Table 7은 정하중시험에서 1시간의 인장강도 유지시간 동안 측정된 최소하중과 강연선 공칭인장강도(F_{pk}) 및 실제 강연선 인장강도에 대한 비율을 나타낸 것이다. 모든 실험체들은 1시간 동안 실제 강연선 인장강도의 80% 이상을 유지

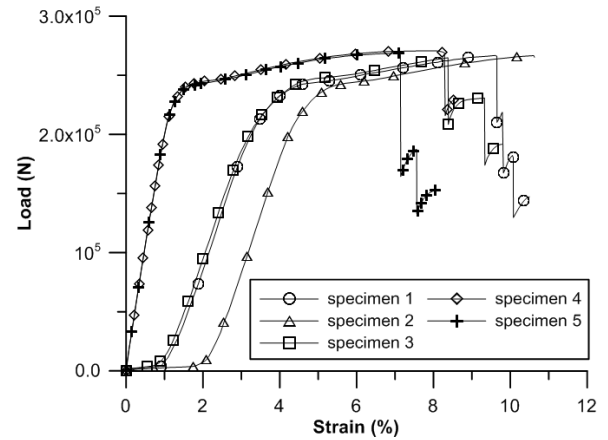


Fig. 15 Load-strain diagram for strands

Table 6 Test results of five uncoated 7-wire steel strands

	Avg.	Specimens				
		1	2	3	4	5
Tensile Load (kN)	267.2	266	266	265	270.8	268.3
Yield Strength (kN)	236.0	233	234	234	240.1	239.1
Elongation (%)	8.8	9.7	10.6	8.4	8.3	7.1

Table 7 Load and ratio measured in tension test of strands

	PTa	PTb	PTc
Min. Load during 1hr. (kN)	216.2	211.3	217.1
Ratio to Nominal Tensile Load (F_{pk})	0.84	0.82	0.84
Ratio to Measured Tensile Load	0.81	0.79	0.81

Table 8 Result of load transfer test specimens (Strain gauge location is indicated in Fig. 10)

Specimen	# of Cycle	First $0.8F_{pk}$		Last $0.12F_{pk}$		Last $0.8F_{pk}$		Failure		
		Max. Strain Location	Max. Strain ($\times 10^{-6}$)	Max. Strain Location	Max. Strain ($\times 10^{-6}$)	Max. Strain Location	Max. Strain ($\times 10^{-6}$)	Load (kN)	Max. Strain Location	Max. Strain ($\times 10^{-6}$)
RCa	10	CG09	115.9	CG09	47.3	CG09	139.1	440.1	CG08	4977.8
RCb	0	CG09	126.6	N.A	N.A	N.A	N.A	422.2	CG14	7919.8
MHB4a	10	CG09	127.5	CG14	149.8	CG09	141.1	476.4	CG04	5089.8
MHB4b	12	CG09	130.4	CG09	32.9	CG09	143.0	439.8	CG05	2258.0
MHB4HP3a	10	CG09	110.1	CG09	30.0	CG09	119.8	488.6	CG01	4111.1
MHB4HP3b	10	CG09	105.3	CG09	30.9	CG09	110.1	485.8	CG12	3170.0
HB4a	15	CG09	115.0	CG09	49.3	CG09	143.0	488.6	CG10	9610.6
HB4b	10	CG09	138.2	CG09	44.4	CG09	147.8	452.6	CG03	2615.4
HB4HP3a	10	CG09	115.0	CG09	57.0	CG09	154.6	532.4	CG14	4580.7
HB4HP3b	11	CG09	119.8	CG09	33.8	CG09	133.3	505.2	CG09	4490.8
HB4HP4a	11	CG09	117.9	CG09	38.6	CG09	139.1	468.6	CG10	3692.7
HB4HP4b	10	CG09	114.0	CG09	39.6	CG09	138.2	526.8	CG11	4638.6
HB5a	11	CG09	116.9	CG09	41.5	CG09	132.4	517.1	CG10	2267.6
HB5b	10	CG09	117.9	CG09	48.3	CG09	161.4	559.6	CG08	4230.9
HB5HP4a	12	CG09	108.2	CG09	54.1	CG09	139.1	523.0	CG09	2407.7
HB5HP4b	10	CG09	146.9	CG09	64.7	CG09	183.6	527.1	CG13	3781.6
HB5HP5a	10	CG09	102.4	CG09	37.7	CG09	123.7	543.1	CG11	4595.2
HB5HP5b	10	CG09	126.6	CG12	23.2	CG09	110.1	527.7	CG11	2476.3

하였다. PTb는 1시간 동안의 최소하중이 실제 강연선 인장 강도의 79%로 나타났으나 이는 시험 방법에서 규정하는 오차범위 2% 이내에 해당한다.

5.3 하중전달시험 결과

실험 당일 각 세트당 임의로 공시체를 3개씩 선택하여 압축강도를 측정된 결과, Set A는 20.0 MPa이고 Set B는 21.5 MPa으로 나타났다.

장비 조작 문제가 있었던 RCb를 제외한 모든 실험체는 10회 이상의 반복하중을 주었으며, 실험 결과는 Table 8에 요약되었다. 실험체명은 Table 4의 조합으로 만든 것이며, RC는 HP와 HB 등 보강상세가 없는 무보강 실험체이다.

반복하중 종결을 판단하는 데 있어서 실험 중 육안으로 관찰되는 균열 및 미세균열이 없었기에, 이 실험에서는 콘크리트 게이지의 변형률 값만을 사용하여 안정화 상태를 결정하였다.

반복하중 내에서 모든 계측지점에서의 최대변형률은 183.6×10^{-6} 이하로, 마지막 $0.12F_{pk}$ 일 때의 최대변형률은 MHB4a와 HB5HP5b를 제외하고 모두 CG09 위치에서 측정되었다 (Table 8). 반면 실험체가 파괴될 때의 최대변형률은 2258.0×10^{-6} 부터 9610.6×10^{-6} 까지로 크게 증가하였고 최대변형지점은 CG09 위치 외에도 다양하게 나타났다.

파괴하중은 무보강인 RCb가 422.2 kN으로 제일 낮았으나, 이는 F_{pk} 의 1.64배로서 KCI와 ETAG의 기준인 1.1배를 만족하는 값이다.^{4,5)} 또한 보강상세에 사용된 철근의 개수가 증가할수록 그리고 철근의 지름이 증가할수록 파괴하중의 크기도 비례해서 증가하는 추세를 보였다. HB와 MHB의 경우에 성능 차이가 크게 나타나지는 않았으나, HB가 MHB보다 평균 4.7% 높은 성능을 나타낸 것을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 유한요소 해석을 통해 아치형 거셋을 가지는 정착구를 개발한 후, 개발된 정착구에 대한 성능을 검증하기 위하여 정하중시험 및 하중전달시험 등을 실시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지름 55 mm 원통형 몸통에 가로 125 mm, 세로 70 mm, 두께 6~8 mm인 정착판과 아치형 거셋을 가지는, 비부착 단일 강연선에 대한 1구 정착구를 유한요소해석을 통하여 개발하였다. 이 과정에서 정착판의 위치가 정착구의 중간높이보다 콘크리트부재 쪽으로 위치할 때 응력분포에 효과적인 것으로 나타났으며, 두 개의 아치형 거셋이 원통형 몸통의 양끝에 각각 위치하며 평행한 형태를 유지할 때 역시 응력 분포에 효과적인 것으로 나타났다.
- 2) 정하중시험을 통하여 개발된 정착장치의 성능이 강연선의 공칭인장강도를 상회하여 유지할 수 있음을 확인하였다. 또한 강연선 인장강도의 80%까지 가력한

상태를 1시간 동안 유지하는 과정에서 고정단에서 썩기와 강연선의 길이방향 변위를 측정하여 가력 직후 썩기와 강연선이 정착구에 단단히 정착됨을 검증하였다. 정하중시험 완료 후 검수과정에서 썩기, 정착구 썩기접촉면과 정착판의 변형 및 파손은 발견되지 않았다.

- 3) 강연선 인장시험 결과 평균 연신율은 8.8%으로 나타났으며, 따라서 강연선과 썩기의 상호작용이 연신율 2%를 확보하는데 문제가 없다고 사료된다.
- 4) 콘크리트 압축강도가 20~21.5 MPa에 도달했을 때 하중전달시험을 수행하였으며, 이를 통해 정착구에 대한 추가 보강상세 없이도 강연선 공칭인장강도의 1.64배까지 저항할 수 있다는 결과를 얻었다. 하지만 철근의 개수가 증가하고 철근지름이 증가할수록 실험체의 성능이 향상되었음을 고려할 때 보수적으로 ACI의 보강상세를 추가하여 시공하는 것을 권유한다.

감사의 글

이 연구는 2013년 삼성물산주식회사 건설부문의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사합니다.

References

1. Toutlemonde, F., Renaud, J.-C., Lauvin, L., Behloul, M., Simon, A., and Vildare, S., "Testing and analysing innovative design of UHPFRC anchor blocks for post-tensioning tendons", *6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FRAMCOS-6)*, Catania, Italy, pp. 17-22.
2. Kim, J. S. and Choi, Y. S., "Stress Analysis of PS Anchorage Zone Using Ultra High Performance Concrete", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 4, July 2013, pp. 1349-1360 (in Korean).
3. Kim, J.-K., Kwon, Y., and Kwak, H.-K., "Anchorage Zone Behavior in the Slab with Flat Anchorage", *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 1, Feb 2014, pp. 67-76 (in Korean).
4. Korea Concrete Institute, *Construction Specification and Commentary of Concrete Structures*, Korea Concrete Institute, 2009, p. 762 (in Korean).
5. EOTA, *Guideline for European Technical Approval of Post-Tensioning Kits for Prestressing of Structures (ETAG 013)*, European Organisation for Technical Approvals, Belgium, 2002, p. 136.
6. Joint ACI-ASCE Committee 423, *Specification for Unbonded Single-Strand Tendons (ACI 423.6R-01) and Commentary (ACI 423.6R-01)*, American Concrete Institute, USA, 2001, p. 29.
7. Dassault Systems, *ABAQUS/Standard 6.10 User's Manual*,

- Dassault Systems, 2010.
8. Korean Agency for Technology and Standards, *Spheroidal Graphite Iron Castings KSD 4302: 2011*, Korean Standards Association, 2011, p. 16 (in Korean).
 9. Architectural Institute of Korea, *Korean Building Code and Commentary 2009*, Kimundang, 2009, p. 1039 (in Korean).
 10. Joint ACI-ASCE Committee 423, *Recommendations for Concrete Members Prestressed with Unbonded Tendons (ACI 423.3R-05)*, American Concrete Institute, USA, 2005, p. 21.
 11. Korea Concrete Institute, *Manual of Concrete Practice: Post-Tensioned Building Systems*, Kimundang, 2013, p. 131 (in Korean).

요 약 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 직경 15.2 mm의 비부착식 강연선을 위한 포스트텐션 1구 정착구를 개발하였고 이에 대한 성능시험을 수행하였다. 정착장치에 대한 성능시험으로 콘크리트 표준시방서에 따라 KCI-PS101에 제시된 정하중시험과 하중전달시험 방법이 사용되었다. 정하중시험과 강연선 인장시험을 통하여 개발된 정착구가 강연선 공칭인장강도에도 손상 및 파괴되지 않음을 확인하였다. 하중전달시험을 통해서도 각종 철근보강에 따른 실험체의 압축성능을 확인하였고, 무보강 실험체가 강연선 인장강도의 1.64배까지 저항할 수 있다는 결과를 얻었다.

핵심용어 : 정착구, 정착장치, 포스트텐션, 정하중, 하중전달