2400MPa PT 정착시스템의 LNG 저장탱크 적용을 위한 정하중, 극저온 성능평가

Static and Cryogenic Performance Evaluation of 2400 MPa PT Anchorage System for Applying LNG Storage Tank

전기우* · 김진국** · 양준모***

Jun, Kiwoo*, Kim, Jin-Kook**, and Yang, Jun-Mo***

Abstract

In this paper, the static and cryogenic performance of the 2400 MPa PT anchorage system was evaluated in accordance with the ETAG013 standard in order to securely apply the 2400 MPa PS strand to the “I” LNG storage tank. The results of the static load test showed that the measured maximum load was 95.9% of the actual ultimate tensile load of the tendon, and the total elongation of the tendon at the maximum load was 2.36%. The cryogenic static load test results showed that the 2400 MPa PT anchorage system safely resists cyclic loading of the 80-100% characteristic yield load of the tendon in the cryogenic environment of -196 °C, and the measured maximum load was 96.1% of the actual ultimate tensile load of the tendon. As a result, the static and cryogenic performance of the 2400 MPa PT anchorage system satisfied the ETAG013 standard.

Key words : Anchorage System, Post-tension, 2400MPa Prestressing Strand, Static Load Test, Cryogenic Static Load Test

요 지

본 논문에서는 2400 MPa PS강연선을 ‘I’ LNG 저장탱크에 안전하게 적용하기 위해 2400 MPa PT정착시스템의 정하중, 극저온 성능을 ETAG013 기준에 준하여 평가하였다. 정하중 시험 결과 측정된 최대하중은 텐던 실제극한하중의 95.9%로 나타났고, 최대하중에서 텐던의 총 신장량은 2.36%로 측정되었다. 극저온 시험 결과 2400 MPa PT정착시스템은 -196℃의 극저온 환경에서 텐던 공칭항복하중의 80~100% 반복하중을 안전하게 저항하였고, 측정된 최대하중은 텐던 실제 극한하중의 96.1%로 나타났다. 이를 통해 2400 MPa PT정착시스템의 정하중, 극저온 성능은 ETAG013 기준을 만족하였다.

핵심용어 : 정착시스템, 포스트텐션, 2400MPa PS강연선, 정하중시험, 극저온시험

1. 서 론

프리스트레스드 콘크리트(Pre-Stressed Concrete, PSC) 공법 중에 하나인 포스트텐션(Post-Tension, PT) 공법은 굳은 콘크리트 내에 매립된 쉬스관에 여러 다발의 강연선을 삽입하고 동시에 여러 강연선 다발을 긴장한 후 이를 하나의 정착장치

에 정착하여 콘크리트에 선압축력을 도입하는 공법이다. 이때 수십톤에서 수백톤의 힘이 정착장치를 통해 콘크리트에 도입되기 때문에 텐던, 정착장치, 콘크리트 상호간의 하중전달 및 상관관계가 구조물 전체의 성능 및 안전에 매우 중요한 영향을 끼친다(Nawy, 2009; Kim et al., 2017). 이러한 이유로 여러 포스트텐션 구조물 관련 시방서에서는 텐던, 정착장치

*정회원, ¹ 한국가스공사 인천기지건설단 과장

² 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정(E-mail: junkiwoo@kogas.or.kr)

Member, ¹ Manager, Incheon Terminal Construction Group, Korea Gas Corporation

² Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

**정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 조교수

Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

***교신저자, 정회원, 계명대학교 건축토목공학부 조교수(Tel: +82-53-580-5297, Fax: +82-53-586-1313, E-mail: jm.yang@kmu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Keimyung University

각각의 성능뿐만 아니라 텐던-정착장치-콘크리트 모두를 포함하는 정착시스템의 성능에 대한 인증기준을 두고 관리하고 있다. AASHTO (2017)에서는 정착장치가 구축철근과 함께 설치된 콘크리트 블록에 대한 반복하중시험, 지속하중시험, 단조하중시험을 통해 정착시스템 성능 인증을 하도록 하고 있고, PTI (PTI M50.1, 1998)에서는 정착 플레이트에 대한 하중전달시험, 부착텐던 시스템에 대한 정적인장시험, 비부착텐던 시스템에 대한 정적/동적 인장시험을 통해 정착시스템 성능 인증을 하도록 하고 있다. 또한, 유럽의 EOTA (ETAG 013, 2002)에서는 하중전달시험, 정하중시험, 피로시험, 마찰 손실시험 등의 다양한 성능인증 시험법을 통해 포스트텐션 시스템을 관리하도록 하고 있으며, 국내에서는 한국콘크리트 학회(KCI-PS101, 2010)에서 “PSC 텐던 정착장치 및 접속장치의 성능 시험 방법”의 제규정을 두고 있다.

현재 한국가스공사에서 건설중인 ‘I’ LNG 저장탱크는 20만kl 용량의 완전방호식 지상식 LNG 탱크 형식으로 설계되었고, 정상가동 시 LNG를 보유하고 있는 9% 니켈강 내조 및 철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC) 또는 프리스트레스트 콘크리트에 이루어진 외조로 구성되어 있다. 외조에는 LNG 누출 사고 시의 유체압 등에 대비하기 위해 원환방향 및 수직방향으로 각각 포스트텐션 방식의 원환텐던 및 수직텐던이 배치되는데, 한국가스공사에서 제정한 ‘I’ LNG 저장탱크 건설공사 시방서에서는 정착시스템에 대한 하중전달 시험(Load Transfer Test), 정하중시험(Static Load Test), 극저온시험(Cryogenic Static Load Test)을 ETAG 013 (2002) 기준에 준하여 수행하고 포스트텐션 정착시스템의 성능을 검증하도록 규정하고 있다. 여기서는 일반적인 포스트텐션 시스템 검증에서 잘 수행하지 않는 극저온시험을 포함하고 있는데, 이는 LNG 누출시 정착시스템이 LNG 액화온도인 -196℃ 환경에 노출되는 상황에서 포스트텐션 정착시스템의 안전성을 검증하는 시험이다.

또한, ‘I’ LNG 저장탱크는 2400MPa급 고강도 강연선으로 설계되었다. 이 2400MPa PS강연선은 기존의 1860MPa PS강연선 대비 인장강도 및 항복강도가 약 28% 증가된 강연선으로 국내 대형연구과제의 일환으로 개발되어 2011년 KS 규격(KS D7002, 2018)에 반영되었고, 많은 교량에 설계 또는 적용되고 있는 세계 최고강도 강연선이다(Kim et al., 2012; Kim et al., 2016; Yang, Yim, et al., 2016). 기존 1860MPa PS강연선 대신 2400MPa PS강연선을 LNG 저장탱크에 적용

하면 증가된 인장강도에 상응하는 텐던당 강연선 개수를 감소시킬 수 있고, 기존 수직텐던과 원환텐던의 간격을 넓혀 텐던 개수를 감소시킬 수 있어 강연선, 정착장치 등을 포함한 재료비와 노무비의 감소를 유도할 수 있다. 이러한 장점을 활용하여 2400MPa PS강연선을 LNG 저장탱크에 경제적으로 안전하게 적용하기 위해 다양한 연구가 수행된 바 있다 (Jeon et al., 2016; Yang, Kim, et al., 2016). 그러나, 2400MPa PS강연선을 적용하기 위해 가장 먼저 선행되어야 할 것은 증가된 강연선의 인장강도에 상응하는 포스트텐션 정착장치의 성능 향상과 정착시스템의 성능 안정화일 것이다.

본 논문에서는 2400MPa PS강연선을 ‘I’ LNG 저장탱크에 안전하게 적용하기 위해 2400MPa PT정착시스템의 정하중, 극저온 성능을 평가하였다. ETAG 013 (2002) 기준에 준하여 시험하고 평가하는 방법을 상세히 소개하고, 그 평가 결과를 분석하였다.

2. 시험 재료 및 장비

2.1 2400MPa PS강연선

‘I’ LNG 저장탱크는 KS D7002 (2018)에 등록된 2400MPa PS강연선(SWPC7DL)으로 외조 구조가 설계되었다. 현장에 실제 사용된 2400MPa PS강연선은 ‘P’사에서 제조된 선재를 ‘K’ 신선사에서 신선, 열처리, 연선 등의 가공을 통해 생산하고 납품하였다. 2400MPa PT 정착시스템 성능평가를 위해 사용된 강연선은 동일 공급사에서 제공하였고, 그 재료적 특성은 Table 1과 같다. 강연선 공급사에서 측정하고 제공한 재료 특성값들(Mill test certificate)은 모두 KS D7002 기준에 부합하였으며, 정착시스템 성능평가 전 측정한 강연선의 실제 인장강도(Breaking strength by lab test, 336.7 kN)은 공급사에서 제공한 인장강도와 유사한 값을 나타내었다. 강연선의 실제인장강도는 KS D7002 (2018), ISO 15630-3 (2010)의 인장시험 방법에 따라 3개의 강연선 샘플에 대해 시험하고 측정된 각 최대하중을 산술평균하여 산정하였으며, 공칭인장강도와 함께 정착시스템 성능평가의 허용기준 계산을 위해 사용되었다. 한 시편의 인장시험 결과 나타난 하중-변위 곡선을 Fig. 1에 도시하였다. ‘I’ LNG 저장탱크 외조 설계에 적용된 텐던의 2400MPa 강연선 가닥수인 19가닥을 반영하여 계산된 텐던의 공칭극한하중 및 실제극한하중값은 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Properties of 2400MPa Prestressing Strand

Item	Mill test certificate							Breaking strength by lab test (kN)
	Diameter (mm)	Section area (mm ²)	Breaking strength (kN)	Yield strength (kN)	Elongation (%)	Elastic modulus (GPa)	Relaxation (%)	
Specification	15.20	138.70	333.0	283.0	3.5	-	2.5	333.0
Test result	15.46	144.99	337.4	317.5	10.1	203.6	2.18	336.7

Table 2. Tensile Strength of Tendon

Hole number of tendon, n	Characteristic ultimate resisting force of tendon, F_{pk} (kN)	Actual ultimate resisting force of tendon, F_{pm} (kN)	95% F_{pk} (kN)	95% F_{pm} (kN)
19	6327.0	6397.3	6010.7	6077.4

Fig. 1. Load-Displacement Curve of 2400MPa Strand

2.2 정착장치

2400MPa PS강연선의 포스트텐션 시스템 적용을 위해 'K' 제조사에서 제조한 2400MPa 강연선용 PT 정착장치를 사용하였다. 앵커헤드는 SM45C 소재를 사용하여, 229mm 직경 및 95mm 두께로 제작되었다(Fig. 2). 또한, 웨지는 SNCM420 소재를 사용하여 제작되었으며, 세 조각이 함께 28.5mm 바깥 외경 및 50mm 길이를 구성하였다(Fig. 3). 앵커 캐스팅은 콘크리트 구체에 매립 설치되는 형태로 시험기에 직접 설치가 불가능하므로 이를 모사하여 제작된 별도의 Special sleeve로 대체하여 설치하였다.

Fig. 2. Details of Anchor Head

Fig. 3. Details of Wedge

2.3 시험장비

ETAG 013 (2002) 기준의 정하중, 극저온 시험방법에 준하여 시험장비를 구성하였다. 전체적인 시험체 설치 및 전체 하중/변위 계측은 'P'사에서 보유한 케이블 인장시험기를 사용하였다. 케이블 인장 시험기는 최대 정하중 30MN, 최대 동하중 18MN의 하중능력을 가지고 있고, 최대 500mm 스트로크까지 시험이 가능하다. 2400MPa PS강연선의 초기 인장을 위해서는 30ton 용량의 모노잭을 사용하였고, 공칭 인장하중의 80% 하중까지 텐던 인장을 위해 550ton 용량의 멀티잭을 사용하였다.

3. 정하중 시험

3.1 정하중시험 절차

ETAG 013 (2002) 기준의 정하중시험 방법에 따라 2400MPa PT 정착시스템의 정하중시험을 수행하였다. 정하중시험 절차 및 방법은 다음과 같다.

- (1) 앵커헤드, 웨지, 강연선 등 시험체 구성품에 대한 외관 상태를 확인하고, 앵커헤드의 치수를 측정하였다.
- (2) 정착장치 및 강연선을 케이블 인장시험기에 설치하였다.
- (3) 모노잭을 이용하여 공칭인장하중(F_{pk})의 20% (1265kN)에 해당하는 하중을 19개 강연선 각각에 도입하였다.
- (4) 웨지와 강연선의 상대변위를 측정하여 정착장치의 안정화를 평가하기 위해 고정단 측에 Fig. 4와 같이 변위계를 설치하였다. A, B 각각에 위치한 두 개의 강연선과 한 개의 웨지에 대하여 변위계를 설치하고, 앵커헤드 위치에도 하나의 변위계를 설치하여 총 7개의 변위계로 상대변위를 측정하였다.
- (5) 멀티잭을 이용하여 공칭인장하중의 40%, 60%, 80% (5062kN)까지 하중을 단계적으로 텐던에 도입한 후 멀티잭을 해제하였다.
- (6) 케이블 인장시험기를 이용하여 공칭인장하중(F_{pk})의 80% 하중상태로 1시간 동안 하중을 유지하였다(Fig. 5).
- (7) 공칭인장하중의 80% 상태에서 1시간이 경과 후 고정단 정착장치에 설치한 변위계를 제거하고 텐던의 파단까지 하중을 계속 도입하였다. 하중 도입에 따른 변형을 증가 속도는 분당 0.002이하를 유지하였다. 최대인장하중으로 인정되는 하중이 측정되면 하중 도입을 중지하였다.
- (8) 정착장치 및 강연선을 케이블 인장시험기로 부터 해제한 후, 앵커헤드, 웨지, 강연선 등 시험체 구성품에 대한

외관 상태를 확인하고, 앵커헤드의 치수를 측정하였다. 앵커헤드의 치수(직경, 두께, 깊이)는 Fig. 6의 위치에서 측정하였는데, 직경은 세 위치에서 측정하고, 두께는 네 위치에서 측정하여 산술평균하였다.

정하중시험의 하중 도입방법을 Fig. 5에 도시하였고, 정하중시험 방법 및 절차에 대한 사진을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6. Measurement Position of Anchor Head Dimension

Fig. 4. LVDT Location at Strand (①,②,④,⑤), Wedge (③,⑥), and Anchor Head (C)

Fig. 5. Load Introduction Procedure for Static Load Test

3.2 정하중시험 결과 및 고찰

2400MPa PT 정착시스템 시험체의 정하중시험 결과 도출된 하중-신장량 관계 곡선을 Fig. 8(a)에 도시하였다. 측정된 최대 하중(F_{Tu})은 6134.9kN 으로 나타났다. 이 최대하중은 실제극한 하중($F_{pm} = A_{pm} \cdot f_{pm}$)의 95% 인 6077.4kN 보다 크고, 공칭극한 하중($F_{pk} = A_{pk} \cdot f_{pk}$)의 95% 인 6010.7kN 보다 큰 값으로 나타나 정착시스템 사용에 따른 PS 강연선의 성능 손실을 5% 이내로 제한하고 있는 ETAG 013 (2002) 기준을 만족하는 결과를 보였다.

최대 하중에서 강연선의 변위는 139.0mm 으로 측정되어 자유장에서 강연선의 총 신장량(ϵ_{ti})은 2.36% 으로 나타났다. 이 총 신장량은 최소 2% 이상의 연신율로 연성을 확보하여 한다는 ETAG 013 (2002) 기준을 만족하는 결과이다.

고정단 측에 변위계를 설치하여 웨지와 강연선의 상대변위를 측정한 결과를 Fig. 8(b)에 도시하였다. 강연선 공칭인장하중의 80% 하중까지 하중의 증가에 따라 웨지, 강연선 및 앵커헤드의 상대변위가 일정한 비율로 증가하였다. A 위치 강연선의 중심 소선(A1, Fig. 4)의 상대변위가 3.57mm로 가장 큰 값을 나타내었다. 강연선 공칭인장하중의 80% 하중

(a) Measure the dimension of the specimen

(b) Load introduction using mono jack up to 20% F_{pk}

(c) Installation of LVDT at strand, wedge and anchor head

(d) Load introduction using multi jack up to 80% F_{pk}

(e) Holding constant load of 80% F_{pk} and load increase to failure

(f) Checking appearance and dimensions of the specimen

Fig. 7. Test Procedure of Static Load Test

(a) Load - elongation curve

(b) Displacement of strand, wedge and anchor head

Fig. 8. Result of Static Load Test

상태로 1시간 동안 하중을 고정하였을 때, 웨지(A3, B6) 및 강연선 외측 소선(A2, B5)의 상대 변위 Δt 와 Δs 는 1시간 동안 일정한 값을 보였고, 강연선 중심 소선(A1, B4)의 상대 변위는 초기 10분 동안 증가하다가 그 이후부터 그 증가율이 감소하여 일정한 상태를 유지하였다. 이 결과는 강연선 공칭 인장하중의 80%에서 하중을 고정하였을 때 강연선, 웨지 및 앵커헤드의 상대 변위 Δt 와 Δs 는 처음 30분 안에 안정되어야 한다는 ETAG 013 (2002) 기준에 부합한다. 또한, 강연선 및 웨지의 상대변위는 강연선 공칭인장하중의 80% 하중상태에서 4mm 이하로 나타나 포스트텐션 유효긴장력 산정시 일반적으로 가정하는 웨지 박힘 길이(Anchorage set) 6mm 보다 작은 보수적인 값을 나타내었다. Fig. 8(b)에서 강연선 공칭인장하중의 80% 하중에 도달 직후 약 10분간 하중의 작은 증감이 나타나는데, 이는 멀티잭을 해체하고 케이블 인장시험기에서 하중을 고정하는 과정에서 발생하는 하중의 변화이다.

시험체의 파괴는 강연선에서 발생하였으며, 강연선 중 외측 소선 1가닥이 파단되었다. 정하중시험 종료 후 정착장치를 케이블 인장시험기로부터 해체하고 정착장치를 살펴보니 정착장치 구성요소의 파괴 또는 특이한 물리적인 변화는 관찰할 수 없었다. 정하중 시험 정하중시험 전/후 앵커헤드의 치수를 측정된 결과 직경 및 두께의 변화는 없었고, 깊이의 변화는 가동단의 경우 1.13mm, 고정단의 경우 1.07mm로 측정되어 앵커헤드의 잔류변형은 정착장치의 구성에 적합하고 신뢰할 수 있는 수준이었다.

측정 장비에 의해 측정된 값의 오차는 $\pm 1\%$ 이내였고, 하중은 최대 오차 $\pm 2\%$ 이내에서 유지되었다.

4. 극저온 시험

4.1 극저온시험 절차

ETAG 013 (2002) 기준의 극저온시험 방법에 따라 2400MPa PT 정착시스템의 극저온시험을 수행하였다. 극저

온시험 절차 및 방법은 3.1절의 정하중시험 절차 및 방법과 과정 (7)을 제외하고 동일하다. 정하중시험과 차이는 극저온시험의 과정 (7)을 세분화하여 나타내면 다음과 같다.

(7-1) 공칭인장하중의 80% 상태에서 1시간이 경과 후 고정단 정착장치 측 안정화 측정을 위한 변위계를 제거한 후, 극저온 챔버 내부 및 앵커헤드 표면에 열전대(T-type thermocouple)를 설치하고, 정착장치에 극저온 챔버를 부착하였다.

(7-2) 극저온 챔버 내부에 액체 질소를 주입하여 $-196\pm 5^\circ\text{C}$ 까지 시험체를 냉각시킨 후, 공칭항복하중($F_{p0.1k}$, 5377kN)과 공칭항복하중의 80%의 하중 (4301.6kN) 범위로 10회 반복 하중을 재하하였다(Fig. 9).

Fig. 9. Load and Temperature Introduction Procedure for Cryogenic Load Test

Fig. 10. Load/Temperature - Time Curve

(a) Thermocouple installation in cryogenic chamber and anchor head

(b) Liquified nitrogen injection and 10 repeated loads application

(c) Cryogenic chamber dismantling after tendon fracture

Fig. 11. Test Procedure of Cryogenic Static Load Test

(7-3) 10회 반복하중 후 텐던의 파단까지 하중을 계속 도입하였다. 최대인장하중으로 인정되는 하중이 측정되면 하중 도입 및 액체 질소 주입을 중지하고 극저온 챔버를 해체하였다.

극저온시험의 인장하중 및 극저온 온도 도입방법을 Fig. 9에 도시하였고, 실제 측정한 온도/하중-시간 그래프를 Fig. 10에 나타내었다. 또한, 극저온시험 방법 및 절차 중 정하중 시험 방법과 차이나는 과정에 대한 사진을 Fig. 11에 나타내었다.

4.2 극저온시험 결과 및 고찰

2400MPa PT 정착시스템 시험체의 극저온시험 결과 도출된 하중-신장량 관계 곡선을 Fig. 12(a)에 도시하였다. 측정된 최대하중(F_{th})은 6148.8kN 으로 나타나 실제극한하중의 95%인 6077.4kN 보다 크고, 공칭극한하중의 95%인 6010.7kN 보다 큰 결과를 보였고, 결국 정착시스템 사용에 따른 PS 강연선의 성능 손실은 5% 이내로 확보할 수 있었다. 최대하중에서 강연선의 변위는 122.1mm으로 나타났으며, 자유장에서 강연선의 총 신장량(ϵ_{th})은 2.08% 이었다. 최대하중 및 신장량에 대한 정하중시험과 극저온시험 결과를 비교하면 극저온시험에서 최대하중이 더 크게 나타나고 신장량은 더 작게 나타났다. 이러한 결과는 저온 취성 파괴에 대한 일반적인 결과와 동일한 결과이고, ETAG 013 (2002) 기준에도 부합하는 결과이다.

고정단 측에 변위계를 설치하여 웨지와 강연선의 상대변위를 측정한 결과를 Fig. 12(b)에 도시하였다. 정하중시험 시 측정한 결과와 동일하게 강연선 공칭인장하중의 80% 하중상태로 1시간 동안 하중을 고정하였을 때, 강연선 중심 소선의 상대변위가 초기에 크게 증가하다가 점차 그 증가율이 감소하였고 하중유지 후 30분 이내에 안정화되었다.

실제극한하중의 95% 이상 하중에서 강연선 소선간의 슬립음이 크게 발생하여 시험장비의 안전상의 이유로 하중도입을 중단하였고, 정착장치 해체 후 관찰 결과 강연선 및 정착장치에서 시험체의 파괴 또는 특이한 변화는 발생하지 않았다. 극저온시험 전/후 앵커헤드의 치수를 측정한 결과 직경 및 두께의 변화는 없었고, 깊이의 변화는 고정단의 경우 0.85mm, 고정단의 경우 0.73mm로 측정되어 정하중시험 시 측정한 앵커헤드의 깊이 변화보다 더 작은 변형이었고, 정착장치의 구성에 적합하고 신뢰할 수 있는 수준이었다.

5. 결 론

본 연구에서는 2400MPa PS강연선의 LNG 저장탱크 적용을 위해 2400MPa PT정착시스템의 정하중, 극저온 성능을 평가하고 분석하였다.

(a) Load - elongation curve

(b) Displacement of strand, wedge and anchor head

Fig. 12. Result of Cryogenic Static Load Test

정하중 시험 결과 측정된 최대하중은 텐던 실제극한하중의 95.9%로 나타났고, 최대하중에서 텐던의 총 신장량은 2.36% 으로 측정되어 ETAG 013 기준을 만족하였다. 텐던 공칭강도 80%에서 하중을 1시간 동안 고정하였을 때 강연선, 웨지 및 앵커헤드의 상대변위는 처음 30분 안에 안정되었다. 시험체의 파괴는 강연선에서 발생하였고, 정착장치 구성요소의 파괴 또는 특이한 물리적 변화는 관찰할 수 없었다.

극저온 시험 결과 2400MPa PT정착시스템은 -196℃의 극저온 환경에서 텐던 공칭항복하중의 80~100% 반복하중을 안전하게 저항하였고, 측정된 최대하중은 텐던 실제 극한하중의 96.1%로 정하중 시험 최대하중보다 큰 값을 보이면서 ETAG 013 기준을 만족하였다. 시험체의 파괴는 정착장치가 아닌 강연선에서 발생하였고, 정착장치 구성요소의 잔류변형은 작고 신뢰할 수 있는 수준이었다.

이를 통해 'T' LNG 저장탱크 적용을 위한 2400MPa PT정착시스템의 정하중, 극저온 성능에 대한 안전성의 확인되었다. LNG 저장탱크뿐만 아니라 교량, 건축 슬래브 등의 다른 포스트텐션 구조물에도 이와 같은 PT정착시스템 성능인증 제도가 일반화되기를 기대한다.

References

- AASHTO (American Association of State Highway Transportation Officials). (2017). *AASHTO LRFD bridge construction specifications* (4th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.
- ETAG 013. (2002). *Guideline for European technical approval of post-tensioning kits for prestressing of Structures*. European Organization for Technical Approvals (EOTA), Brussels.
- ISO 15630-3. (2010). *Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 3: Prestressing steel*. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.
- Jeon, S.J., Seo, H.K., Yang, J.M., and Youn, S.G. (2016). Prestressing effect of LNG storage tank with 2,400 MPa high-strength strands. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 6, pp. 999-1010.
- Kim, J.K., Kwon, Y., and Yang, J.M. (2017). Numerical analysis on the local anchorage zone behavior according to the relative size of bearing plate. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp. 171-179.
- Kim, J.K., Seong, T.R. and Lee, J.K. (2012). Development of 2,160 MPa/2,400 MPa PS strand and its application technology. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 3, pp. 45-50.
- Kim, J.K., Yang, J.M., and Yim, H.J. (2016). Experimental evaluation of transfer length in pretensioned concrete beams using 2,400-MPa prestressed strands. *J. Struct. Eng.*, Vol. 142, No. 11, 04016088.
- KCI-PS101. (2010). *KCI Standard - Performance Test Methods for Anchorage and Connection Kits of PSC Tendon*. Korea Concrete Institute (KCI), Korea.
- KS D 7002. (2018). *Uncoated stress-relieved steel wires and strands for prestressed concrete*. Korean Agency for Technology and Standards (KATS), Korea.
- Nawy, E.G. (2009). *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach* (5th ed.). NJ: Prentice Hall.
- PTI M50.1. (1998). *Acceptance Standards for Post-tensioning Systems*. Post-Tensioning Institute (PTI), AZ.

- Yang, J.M., Kim, J.K., Youn, S.G., Jeon, S.J., Kim, K.H., and Ahn, Y.S. (2016). Application of 2,400 MPa PS strand to LNG/LPG storage tank. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 28, No. 1, pp. 41-45.
- Yang, J.M., Yim, H.J., and Kim, J.K. (2016). Transfer length of 2400 MPa seven-wire 15.2 mm steel strands in

high-strength pretensioned prestressed concrete beam. *Smart Struct. Syst.*, Vol. 17, No. 4, pp. 577-591.

Received	■ August 23, 2018
Revised	■ August 27, 2018
Accepted	■ September 27, 2018