



2,400 MPa PS강연선의 LNG/LPG탱크 적용기술

Application of 2,400 MPa PS Strand to LNG/LPG Storage Tank

양준모 Jun-Mo Yang
(주)포스코
제품이용기술센터 책임
연구원

김진국 Jin-Kook Kim
(주)포스코
제품이용기술센터 전문
연구원

윤석구 Seok-Goo Youn
서울과학기술대학교
건설시스템공학과 교수

전세진 Se-Jin Jeon
아주대학교
건설시스템공학과 교수

김기현 Ki-Hyun Kim
컨택이앤씨(주)
대표이사

안용수 Yong-Soo Ahn
효명ECS 이사

1. 머리말

초장대케이블교량사업단 연구 과제를 통해 개발된 2,400 MPa급 고강도 PS강연선은 2011년 3월경 KS 규격(KS D 7002)에 SWPC7D로 포함되어 많은 교량에 설계 또는 현장에 적용되고 있다. 2,400 MPa급 고강도 PS강연선을 프리스트레스트 콘크리트 구조물이나 케이블 교량에 적용하는 경우 기존 1,860 MPa급 PS강연선 대비 재료의 사용량이 경감되어 경제성이 향상되는 장점이 있으며, 이러한 장점을 활용하기 위해 최근 포스코에서는 2,400 MPa급 고강도 PS강연선을 LNG/LPG 탱크, 건축용 슬래브/보 등에 적용하기 위한 연구를 활발하게 수행하고 있다. 액화가스를 저장하는 원형구조물인 LNG 및 LPG 탱크는 매우 특수한 분야의 구조물로 LNG/LPG 탱크 외조는 주로 프리스트레스트 콘크리트 구조로 설계/시공되고 있다. 원형탱크 형태의 콘크리트 구조는 외력에 의해 발생하는 콘크리트의 인장응력을 상쇄시키기 위해 수직방향과 원환방향으로 프리스트레스트가 도입되는데, 지금까지 1,860 MPa급 PS강연선이 주로 적용되고 있다. 또한, LNG/LPG 탱크의 규모가 계속 커지는 최근 추세로 인해 도입되는 수직텐던과 원환텐던의 양이 많아지고 텐던당 소요되는 PS강연선의 개수도 증가되고 있다. 실제 20만 kL급 LNG탱크의 경우 1,860 MPa 강연선을 사용하여 설계하면 약 1,000 톤/기 수준의 강연선량이 요구된다.

기존 LNG/LPG 탱크에 적용된 1,860 MPa 강연선 대신 최근 개발된 2,400 MPa 고강도 강연선을 적용하여 콘크리트에 발생하는 인장응력을 동일하게 상쇄할 수 있다면 2,400 MPa 강연선을 LNG/LPG 탱크에 큰 무리가 없이 적용할 수 있고, 텐던 및 PS강연선 물량을 감소시킬 수 있을 것이다. 2,400 MPa 고강도 강연선을 LNG/LPG 탱크에 적용하면 텐던당 강연선 개수를 감소시킬 수 있고, 기존 수직텐던과 원환텐던의 간격을 넓혀 텐던 개수를 감소시킬 수 있어 강연선, 정착구 등을 포함한 재료비와 노무비의 감소를 유도할 수 있다. 이에 포스코는 한국콘크리트학회 프리스트레스트콘크리트위원회와 함께 2,400 MPa 고강도 PS강연선을 LNG/LPG 탱크에 경제적으로 적용할 수 있는 상세 방안들을 검토하였고, 그 결과로 'LNG/LPG 탱크 고강도 강연선 설계지침(안)'을 작성하였다. 본고에서는 그 설계지침 내용과 지침작성을 위한 검토내용을 소개하고자 한다(그림 1).

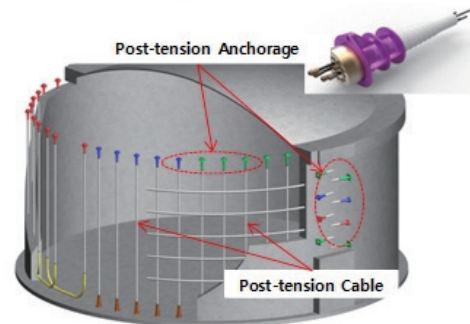


그림 1. LNG 저장탱크 포스트텐서닝 케이블 & 정착구 (출처: 브이에스엘코리아, 케이티에이)

2. LNG/LPG 탱크 프리스트레싱 관련 국내외 설계규정

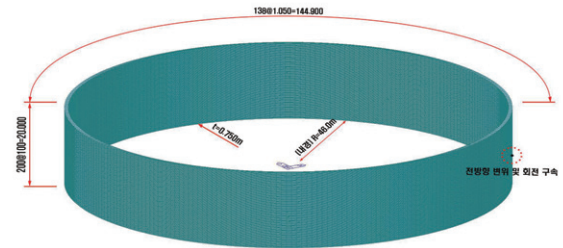
국내외 설계규정에 의하면 LNG/LPG 탱크에 도입되는 프리스트레싱은 외력에 의해 발생하는 콘크리트 인장응력을 상쇄시켜 균열발생을 막는 것에 초점을 두고 있고 일반적인 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 설계 및 시공 방법과 다른 특별한 규정을 포함하고 있지 않다. 설계법은 주로 한계상태설계법(LSD: Limit State Design)을 적용하고 있으며, 수직텐던과 원환텐던 배치는 도입되는 프리스트레싱이 LPG 및 LNG 탱크 벽체에 균등하게 분산되도록 해야 한다고 규정하고 있다.

프리스트레싱 텐던의 최대 중심간격에 대해서는 국내 설계규정의 경우 명확한 규정이 없다. 해외의 경우 ACI 373 "Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures with Circumferential Tendons"에서 벽체 두께를 기준으로 수직텐던은 4배 이하, 원환텐던은 3배 이하를 규정하고 있고, 일본 '저수용 원통형 PSC 탱크의 설계·시공에 관한 규정'에서는 벽체 두께 기준으로 수직텐던은 3배 이하, 원환텐던은 5배 이하로 프리스트레싱 텐던의 최대 중심간격을 규정하고 있다. 또한, 정착구 집중하중은 45°로 분산되므로 정착구에서 설계단면까지 거리가 짧고 긴장재 배치 간격이 클 경우 주의를 요한다는 내용도 포함하고 있다.

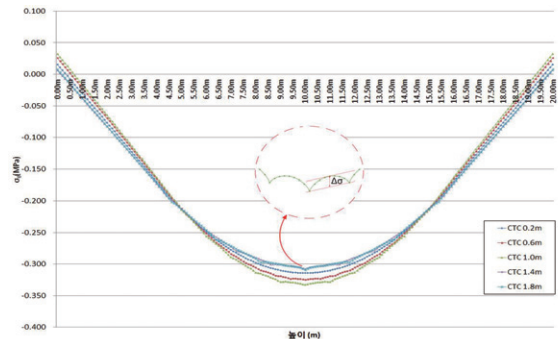
3. 고강도 강연선 적용 시 구조적 영향 분석

LNG/LPG 탱크에 2,400 MPa급 고강도 PS강연선을 적용할 때 수직텐던과 원환텐던의 배치간격 변화에 따라 콘크리트 벽체에 도입되는 압축응력의 크기 변동성을 알아보기 위한 변수해석 연구를 수행하였다. 해석을 위해 MIDAS CIVIL LSD 프로그램을 사용하였고, 750 mm 벽체두께 등 모델링 상세는 <그림 2-(a)>와 같다. 각 Case별로 도입되는 프리스트레싱 하중의 총합은 모두 동일하도록 하중 크기를 조절하였다. 또한 텐던의 간격은 현재 원환텐던 및 수직텐던 설계에서 일반적으로 사용되는 간격을 포함하여 고강도 강연선 적용 시 예상되는 넓은 간격을 고려해 보았다.

원환텐던의 경우 텐던의 수직 간격을 0.2m에서 1.8m 까지 변화시켜 해석하였다. 해석결과 <그림 2-(b)>와 같



(a) 원환텐던 모델링 개요도



(b) 원환텐던 접선방향 응력해석 결과

그림 2. 원환텐던 변수 해석

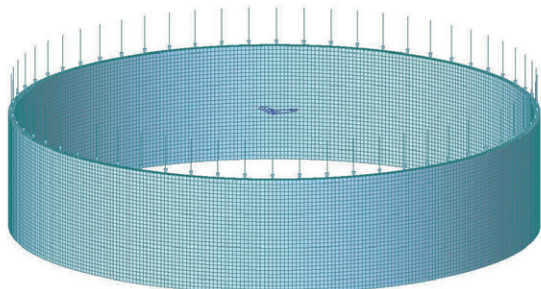
이 텐던의 수직간격 1.8m 수준에서도 콘크리트 벽체에 도입되는 접선방향 압축응력의 차이가 0.3% 수준 이내로 매우 균등하게 도입된다는 것을 확인할 수 있었다.

수직텐던의 경우 텐던의 수평 간격을 0.5m에서 3.5m 까지 변화시키며 상세해석을 수행하였다. 해석결과 텐던의 수평간격이 증가함에 따라 콘크리트 벽체에 도입되는 압축응력의 크기가 균등하게 도입되는 위치도 하중재하점으로부터 멀어졌다. 정착구에서의 하중은 45°보다 큰 63° 정도로 분포되었으며, 이때 도입되는 압축응력의 차이는 0.5% 수준 이내였다(그림 3).

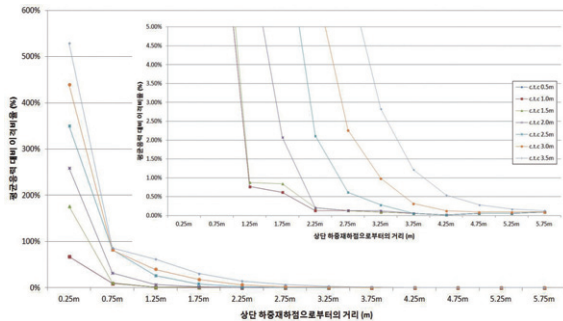
원환텐던과 수직텐던의 배치간격에 따른 변수해석결과를 토대로 2,400 MPa급 고강도 강연선 적용 시 텐던의 배치 간격을 현행 설계예보다 넓힐 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 고강도 강연선 적용 LNG 탱크 모의설계 및 경제성 분석

기존에 1,860 MPa급 일반 강연선으로 설계/시공된 LNG 탱크에 대해 2,400 MPa급 고강도 강연선을 적용해 모의 설계를 수행하였다. 대상 LNG 탱크는 현재 가장 선호도가 높은 저장용량인 20만 kl급 9% 니켈형 지상식 LNG 저장탱크와 세계 최대 저장용량인 27만 kl급 9% 니



(a) 수직텐던 모델링 개요도(내측반경 33 m, 높이 15 m, 벽체두께 0.75 m)



(b) 수직텐던 상단 하중재하점으로부터의 거리에 따른 응력 이격비율

그림 3. 수직텐던 변수 해석

켈형 지상식 LNG 저장탱크를 선택하였다. <표 1>에 요약된 바와 같이 20만 킬급 LNG탱크의 경우 벽체 하부에 배치된 원환텐던의 간격만 증가되었고, 그 외 원환텐던과 수직텐던은 동일한 간격으로 배치되고 텐던당 강연선 수가 감소되었다. 그 결과 텐던수는 4.4%, 강연선 물량은 21.5% 감소되었다. 27만 킬급 LNG 탱크의 경우 벽체 하부 및 링법 원환텐던의 간격이 증가되었고, 수직텐던의 간격 역시 0.813m에서 1.219m로 증가되었다. 그 결과 텐던수는 23.3%, 강연선 물량은 22.4% 감소되었다. 이러한 결과를 바탕으로 경제성을 분석한 결과 20만 킬급 LNG 탱크의 경우 약 4%, 27만 킬급 LNG 탱크의 경우 약 11%의 프리스트레싱 시공비 절감을 기대할 수 있는 것으로 분

석되었다. 두 LNG 탱크가 유사한 강연선 물량 감소를 나타낸 반면 경제성에서 두 배 이상의 차이가 발생하는 것은 텐던 배치 간격을 넓히는 것이 정착구, 쉬스관 및 그라우팅 등의 수량 또한 감소하여 시공성 및 경제성 측면에서 유리하기 때문이다.

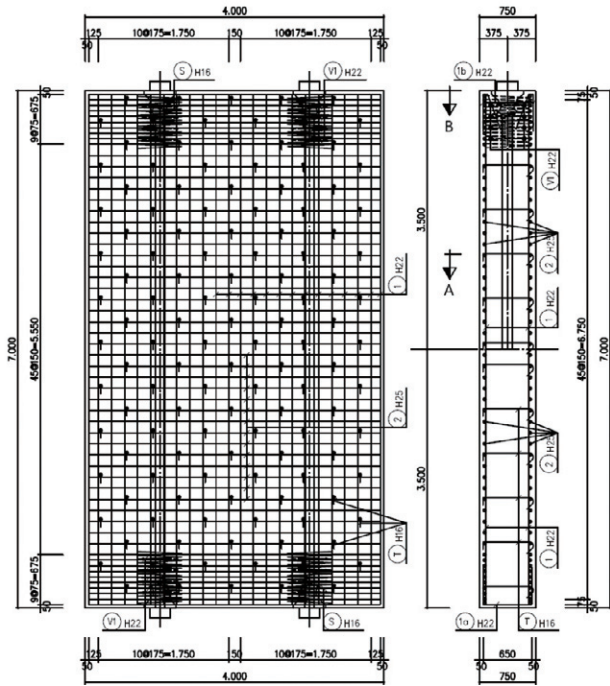
LNG 탱크 설계에서 경제성을 보다 더 확보하기 위해서는 텐던의 간격을 추가적으로 조정하여야 하지만 벽체에서 원환텐던의 간격을 너무 넓힐 경우 프리스트레싱에 의한 응력이 고르게 분포되지 않을 우려가 있고, 수직텐던의 배치는 지붕 Rafter 지지부 간격과 밀접하게 연관되어 있어 텐던 개수를 감소시키는데 어려움이 따른다. 그러나 본 연구의 변수해석결과를 토대로 원환텐던의 최대간격(0.9 m 또는 1.32 m)과 수직텐던의 간격(1.268 m 또는 1.219 m)을 추가적으로 증가시킬 경우 두 LNG 탱크 모두 15% 이상의 경제성 확보가 가능할 것으로 판단된다.

5. Mock-up 시험

텐던간격에 대한 변수해석 결과의 신뢰성 확보뿐만 아니라 2,400 MPa 강연선을 이용한 텐던(31C15.2)을 통해 약 850 ton(=0.8 fpu=0.94 fpy)의 긴장력 도입이 가능한지 시공성을 검증하기 위해 Mock-up 시험을 수행하였다. 두께 750 mm, 폭 4 m, 길이 7 m인 콘크리트 벽체를 제작하였으며, 콘크리트 벽체 내부에 2 m 간격으로 배치된 두 개의 텐던을 통해 총 1,700 ton의 긴장력을 도입하는 실험을 수행하였다. 모의설계의 정착구 주변 철근배근을 토대로 <그림 4-(a)>와 같이 배근상세를 결정하였고, 매립형 콘크리트 게이지 28개, 철근 게이지 19개, 표면부착형 콘크리트 게이지 8개를 설치하여 긴장력 도입 시 응력변화를 측정하였다. 시험당일 측정된 콘크리트 압축강

표 1. 2,400 MPa PS강연선 적용 LNG 탱크 모의설계 요약

구분	20만 킬			27만 킬		
	1,860 MPa	2,400 MPa	비고	1,860 MPa	2,400 MPa	비고
텐던규격 및 개수	19C15.7-108 ea 27C15.7-164 ea	16C15.2-108 ea 22C15.2-76 ea 27C15.2-76 ea	▼24 ea (▼4.4%)	27C15.2-180 ea 31C15.2-240 ea	24C15.2-64 ea 31C15.2-258 ea	▼196 ea (▼23.3%)
텐던 배치간격	원환: 0.28 ~ 0.9 m 수직: 1.268 m	원환: 0.32 ~ 0.9 m 수직: 1.268 m	원환 텐던 간격 증가	원환: 0.265 ~ 1.32 m 수직: 0.813 m	원환: 0.32 ~ 1.32 m 수직: 1.219 m	원환/ 수직텐던 간격 증가
강연선 물량	995 ton	781 ton	▼214 ton (▼21.5%)	1,819 ton	1,411 ton	▼407 ton (▼22.4%)



(a) Mock-up 시험체 평면도 및 측면도



(b) 긴장력 도입

그림 4. Mock-up 시험체

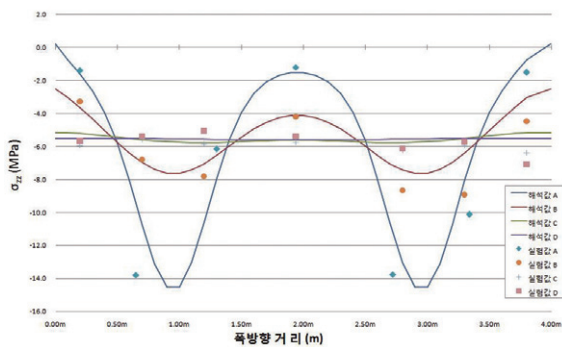


그림 5. Mock-up 시험체 해석값과 실험값 비교

도는 27.4 MPa이었다.

실험 결과 텐던당 긴장력 850 톤을 특별한 어려움 없이 콘크리트 벽체에 도입할 수 있음이 확인되었다. 또한 <그

림 5>와 같이 Mock-up 시험체에서 측정된 콘크리트 벽체에 도입되는 콘크리트 압축응력의 크기가 해석치와 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 이러한 실험 결과를 토대로 2,400 MPa PS강연선을 적용하여 LNG 탱크 설계 시한 텐던당 31개 강연선까지도 설계가 가능하고 변수해석 결과와 같이 텐던의 배치 간격을 현행 설계에보다 넓힐 수 있음이 검증되었다.

6. LNG/LPG 탱크 고강도 강연선 설계지침(안)

이상과 같이 LNG/LPG 탱크의 수직텐던과 원환텐던에 2,400 MPa PS강연선을 효과적으로 적용할 수 있는 방안을 마련하기 위해 국내외 관련 규정을 분석하고, 2,400 MPa 고강도 강연선을 적용한 LNG 탱크의 모의 설계, 상세해석 및 Mock-up 시험을 수행하였다. 이를 바탕으로 실무에서 2,400 MPa급 고강도 강연선을 LPG 및 LNG 탱크에 쉽게 적용할 수 있도록 'LNG/LPG 탱크 고강도 강연선 설계지침(안)'을 개발하였다. 설계지침(안)에는 기존 설계기준에 제시된 일반 사항을 토대로 2,400 MPa급 고강도 강연선에 관련된 지침을 포함하였고, 특히 경제성 향상을 위해 원환텐던과 수직텐던의 최대 간격과 배치 위치 등을 실무에서 쉽게 적용할 수 있도록 구성하였다. 설계지침(안)에 포함된 주요내용을 간단히 소개하면 다음과 같다.

- (1) 원환텐던이 삽입된 덕트의 최대 중심 간격은 벽체 두께의 3배 이하로 한다. 단, 적합한 해석 또는 실험으로 타당성을 증명할 수 있으면 중심 간격을 더 증가시킬 수 있다.
- (2) 수직텐던이 삽입된 덕트의 최대 중심 간격은 벽체 두께의 4배 이하로 한다. 단, 적합한 해석 또는 실험으로 타당성을 증명할 수 있으면 중심 간격을 더 증가시킬 수 있다.
- (3) 여유압축응력은 건조수축이나 온도변화 등에 대비하고 수밀성을 확보하기 위하여 원환방향으로 최소 1~2 MPa 범위 이상 도입해야 한다.
- (4) 여유압축구간은 설계하중이 작용할 때 콘크리트 단면 내에서 압축응력 상태를 유지하고 있는 구간이며, 수평으로 자른 벽체 단면의 두께 방향으로 최소 100 mm의 여유압축구간을 확보해야 한다.
- (5) 수직텐던의 프리스트레싱에 의해 수직방향으로 작

용하는 집중하중은 설계시의 편의를 위하여 벽체 단면에 작용하는 균일한 압축응력으로 치환할 수 있다. 다만, 덕트의 중심 간격이 커서 수직텐던 정착구 부근에서의 압축응력이 균일하지 않다고 판단되면 응력집중 현상에 의한 불균일한 응력 분포를 고려하여 설계하여야 한다. 이 때, 정착구에서의 집중하중이 45°~63°의 각도로 분산된다고 가정할 수 있다.



양준모 책임연구원은 McGill University에서 연구원으로 근무하고 고려대학교 토목환경공학과에서 하이브리드 보강 고강도 콘크리트 부재의 성능 향상에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 2011년 포스코 철강솔루션 마케팅실 (구, (재)포항산업과학연구원 강구조연구소)에 입사하여 PS강연선 및 정착시스템, 감섬유보강 콘크리트 등과 관련된 다양한 연구를 수행하고 있다.
jm.yang@posco.com



김진국 전문연구원은 KAIST 건설환경공학과에서 콘크리트-철근의 부착슬립과 RC 기둥의 장기거동 고려 비선형 해석 관련 연구로 박사학위를 취득한 후 2006년 (재)포항산업과학연구원 강구조연구소에 입사하여 PS강연선 및 정착시스템과 합성구조 관련하여 거더, 교각 등 다양한 연구를 수행하였다. 현재는 부서가 포스코 철강솔루션마케팅실로 이관되어 케이블 관련 업무를 지속해서 수행하고 있다.
kim.jinkook@posco.com



윤석구 교수는 서울대학교 토목공학과에서 합성형교량 철근콘크리트 교량바닥판의 피로거동 및 피로설계에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 한국국도로공사 도로교통연구원과 영국 교통연구원(TRL)에서 근무하였으며, 2002년부터 한국과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 합성구조, 교량바닥판이며, 우리 학회 프리스트레스트콘크리트위원회 위원장을 맡고 있다.
sgyoun@snut.ac.kr

7. 맺음말

LNG 및 LPG 탱크는 토목 분야에서 매우 특수한 구조물에 해당되며 콘크리트 외조만 토목 분야에서 설계하고 있다. 따라서 이와 관련된 실무를 수행하고 있는 설계사나 실무자가 매우 한정적이고 관련 연구 역시 제한되어 있는 실정이다. 본고에서 소개한 바와 같이 2,400 MPa급 고강도 강연선을 LNG 및 LPG 탱크에 적용하려는 이론적 또는 실험적 연구와 더불어 이를 토대로 작성된 'LNG/LPG 탱크 고강도 강연선 설계지침(안)'이 LNG/LPG 탱크 관련 기술 발전 및 고강도 강연선의 실용화에 보탬이 되었으면 하는 바람이다. ☑

담당 편집위원 : 김진국((주)포스코) jinkook.kim@gmail.com



전세진 교수는 2001년 서울대학교 토목공학과에서 PSC 쉘 구조물의 비선형해석으로 박사학위를 취득한 후 대우건설 기술연구원에서 10여 년간 근무하였으며, 2012년부터 아주대학교 건설시스템공학과에서 조교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 PSC 구조물의 해석, 콘크리트구조물의 온도해석(수화열, 화재, 극저온), 항공기 충돌, 격납구조물의 해석 등이며, 우리 학회 매스콘크리트위원회 간사, 프리스트레스트콘크리트위원회 간사로 활동하고 있다.
concc@ajou.ac.kr



김기현 대표이사는 2008년 서울과학기술대학교 토목공학과에서 고강도 강연선의 장기손실에 관한 해석적 연구로 석사학위를 취득하였다. (주)씨씨엘코리아에서 10여 년간 기술연구소에서 근무하였으며, 2012년부터 컨택이앤씨(주)의 대표이사를 역임하고 있다.
paoro@seoultech.ac.kr



안용수 이사는 1999년 연세대학교 토목공학과를 졸업한 후 ㈜제일엔지니어링 구조부에서 10여 년간 근무하였으며, 2012년부터 (주)효명ECS 기술연구소에서 근무하고 있다.
tfd@daum.net