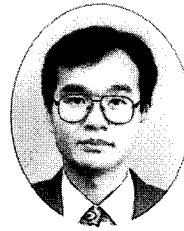


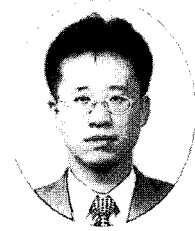
특 집

|| LNG 저장탱크의 설계와 시공기술 동향 ||

지하식 LNG 저장탱크의 시공사례(일본) - Construction Case of the In-ground LNG Tank in Japan -



권영호*
Kwon, Yeong Ho



이현호*
Lee, Hyun Ho

1. 머리말

동경가스(주) 根岸공장은 해마다 증가하는 도시가스의 수요에 대응하기 위해 1991년부터 증강계획을 추진하여 왔으며, 20만 kl 용량의 지하식 LNG 저장탱크 1기를 1995년부터 가동하고 있다. 지하식 LNG 저장탱크는 저장조의 최고액면이 지표면 아래에 있으며, 어떤 경우에도 지표면이 유실될 우려가 없어야 본질적인 안정성을 확보할 수 있다. 또한, 방액제(防液提) 등의 지상설비가 필요 없기 때문에, 토지의 이용효율을 높일 수 있는 장점이 있다.

일본에서 지하식 LNG 저장탱크의 역사는 1970년에 처음으로 1만 kl 저장탱크를 개발한 이래, 용량은 증가되고 깊이가 깊어지는 등의 기술진보를 이루었다. 현재, 세계 최대 용량인 20만 kl 지하탱크를 건설하는 단계까지 왔으며, 이는 지금까지 최대용량인 袖浦공장의 지하탱크 14만 kl를 크게 초과하는 용량이다. 저장탱크의 용량을 증대시키는 방안으로 깊이를 깊게 하는 방안과 직경을 증대하는 방안이 있지만, 토지의 이용효율을 최대한으로 증대시키는 관점에서 보면 깊이를 깊게 하는 방안이 바람직하다. 그러나 굴착깊이가 깊을수록 토압 및 수압 등의 외압이 증가하기 때문에, 부재의 두께를 증대시키거나 고강도화하는 방안이 필요하다. 이번에 건설된 20만 kl 지하식 저장탱크는 고강도 콘크리트를 사용함으로써 축벽의 두께를 줄일 수 있었을 뿐만 아니라 깊이를 깊게 할 수가 있었다. 그 밖에도 콘크리트 지붕, 시공

합리화 등과 같은 신기술이 도입되어 완성도가 매우 높은 지하탱크의 건설이었다.

본고에서는 20만 kl 지하식 LNG 저장탱크의 건설에 채용된 신기술 중에서 고강도 축벽(side wall) 및 콘크리트 지붕(roof)의 개발과 시공에 대하여 소개하고자 한다.

2. 20만 kl 지하식 LNG 저장탱크의 특징

세계 최대용량인 20만 kl 지하식 LNG 저장탱크는 최신·최첨단 기술을 사용한 LNG 저장탱크 건설기술의 총결산이며, 대용량화에 대한 새로운 출발점이다. 20만 kl 저장탱크의 주요사양 및 일반적인 구조는 <표 1> 및 <그림 1>과 같고, 대표적인 특징을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 土丹層의 자립성을 활용한 NATM공법으로 굴착내경이 76m이고, 깊이가 57m인 대규모 원통형으로 굴착

표 1. 20만 kl 지하식 LNG 저장탱크의 주요사양

저장액	LNG(-162°C)		상부판	SL 9N 60 7.6 mm
용량	200,000 kl		링플레이트	SL 9N 60 32 mm
	주요 치수	내경	68.1 m	멤브레인
액체깊이		55.1 m	축벽	RC 1.6 ~ 2.5 m
상부내반경		56.5 m	저판	RC 1.6 m
			지붕	RC 0.5 ~ 1.3 m
			보내재	경질우레탄 200 ~ 300 mm

* 정희원, 동양대학교 건축공학과 교수

- (2) 측벽에는 지금까지의 설계기준강도보다 2배정도인 600 kgf/cm²급 고강도 콘크리트를 사용하여 부재의 두께를 대폭으로 축소
- (3) 일본에서 최초로 강제지붕을 콘크리트로 타설·안전성 향상
- (4) NATM 및 콘크리트의 타설에 자동화시스템을 도입하여 시공의 합리화 달성

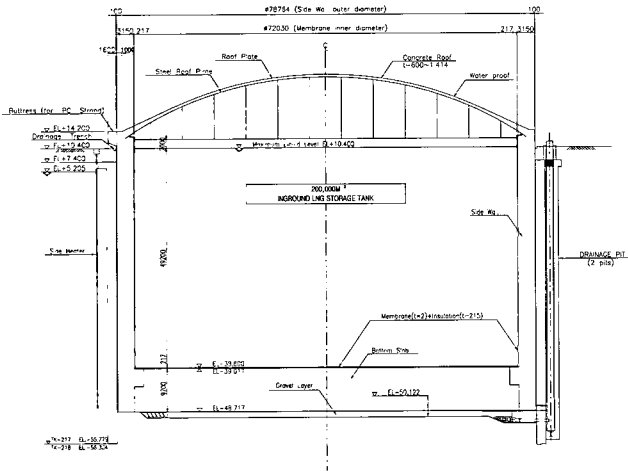


그림 1. 20만 kl 지하식 LNG 저장탱크 일반구조도

3. 공사개요

토목공사는 굴착공사·구체공사(저판 및 측벽)·RC 지붕공사·히터 설비공사 등으로 강제지붕공사·보냉공사·멤브레인공사는 기계공사에 속하며, 주요물량은 <표 2>와 같다. 또한, 각 공사별 공정은 <표 3>과 같다.

표 2 지하식 저장탱크 주요공사의 물량

공종	항목	수량	공종	항목	수량
흙막이 공사	강철판	6,300 m	저판공사	쇄석	4,000 m ³
	보호콘크리트	12,000 m ²		콘크리트	6,500 m ³
	Rock bolt	5,000본		철근	1,000 톤
토공사	내부굴착	26,400 m ³	측벽공사	콘크리트	25,000 m ³
	성 토	9,000 m ³		철근	4,700 톤
지붕공사	콘크리트	2,800 m ³	지붕공사	철근	1,000 톤

표 3 지하식 LNG 저장탱크의 공사별 공정표

	1992년				1993년				1994년				1995년			
	1	4	8	12	1	4	8	12	1	4	8	12	1	4	8	12
토 목 공 사	굴착공사				저판·측벽공사				부대공사				RC지붕공사			
기 계 공 사																

표 4. 측벽 콘크리트의 배합조건

배합명	슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/a (%)	단위중량(kg/m ³)				혼화제 (C × %)	
					W	C	S	G	A1	A2
SC	60±5	4.5±1	30	39.7	160	534	635	1,000	1.3	—
FBB	10 → 60±5	4.5±1	31	41.1	130	419	728	1,080	1.6	0.9

* SC : 고로슬레그 시멘트, FBB : 플라이 애쉬 + 고로시멘트

4. 고강도 측벽의 시공

4.1 고강도 콘크리트의 선정

측벽을 고강도 콘크리트로 설계하면, 벽체의 두께를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 콘크리트 및 굴착토량을 저감시킬 수 있기 때문에 공사비를 절감할 수 있다. 따라서, 본 탱크의 측벽은 지금까지의 설계기준강도(300 kgf/cm²)보다 2배정도 높은 600 kgf/cm²급 고강도 콘크리트로 설계하였기 때문에 벽체의 두께를 2.6m에서 1.6m로 줄일 수 있었다. 이러한 고강도 콘크리트를 개발하기 위하여 배합실험 → 부재실험 → 시공성 실험 등을 거쳐 실제 시공까지 약 3년간의 기간이 필요하였으며 설계 및 시공측면을 검토하였다.

설계측면에서는 상온·저온에서의 휨·전단시험을 실시하여 고강도 콘크리트의 강도특성을 파악하였다. 실험결과, 고강도 콘크리트의 경우에도 기본적으로는 보통 콘크리트의 설계방법과 유사한 연장선상에 있으며, RC시방서에서 안전측인 것으로 확인되었다. 그러나, 취성파괴를 방지하기 위하여 최소철근비(p)를 0.2%에서 0.25%로 상향조정하는 방안을 채택하였다. 또한, 측벽의 두께가 내경(68m)에 비해 1.6m로 매우 얇기 때문에, 좌굴에 대한 안정성을 검토하였다. 측벽의 좌굴검토는 IASS(국제 Sell입체구조학회)의 "철근콘크리트 Shell의 좌굴지침"을 근거로 하였다. 이 방법에 의한 FEM으로 탄성고유값을 해석하여 선형 좌굴하중을 산정한 후 콘크리트의 소성화, 초기부정, 균열, 크리프에 의한 저감을 고려하여 설계하중에 대한 안전율을 산정하였다. 해석결과, 좌굴에 대한 안전율은 9.2로 되어 IASS지침에 규정된 원통 Shell안전율 허용값인 3.5를 만족하는 것으로 확인되었다. 고강도 콘크리트를 적용하기 위해 이상과 같이 사전에 설계내용에 대해 검토를 하였으며, 이를 근거로 시공성의 검토를 실시하였다.

4.2 고강도 콘크리트의 시공실험¹⁾

설계기준강도 600 kgf/cm²급 고강도 콘크리트를 지하탱크의 구조체에 적용하기 위한 시공성 측면의 검토과제는 다음과 같다.

- (1) 레미콘 공장에서의 안정적인 제조·공급
- (2) 펌프압송성이 열악한 고점성 콘크리트의 소요압송량 확보

(3) 콘크리트의 측압 검토

이러한 과제를 해결하기 위하여 콘크리트의 품질변동, 펌프압송성 및 측압에 대한 시공성 실험을 실시하였으며, 기초 물성시험으로 선정된 콘크리트의 배합조건을 <표 4>와 같다.

고로슬래그 시멘트를 사용한 배합조건(이하, SC배합)은 점성이 높기 때문에, 단위수량을 증가시키고 폴리칼본산계 고성능 AE감수제를 사용하여 목표 슬럼프 플로우를 60 cm로 하였다. 또한, 플라이 애쉬 10%를 혼입한 저발열형 고로시멘트 B종을 사용한 배합조건(이하, FBB배합)은 고강도 지하연속벽에 적용한 실적²⁾을 근거로, 단위수량을 저감시켰다. 나프탈렌계 고성능 AE 감수제를 사용하여 슬럼프 10 cm인 베이스 콘크리트를 제조한 다음 나프탈렌계 유동화제를 첨가하여 슬럼프 플로우를 60 cm로 증가시켰다. 특히, 혼화제를 선정할 때는 시멘트와의 적합성을 검토하였다.

4.2.1 콘크리트의 품질변동

3개의 레미콘 공장에 대해 요구품질을 만족하는 콘크리트가 안정적으로 제조·공급될 수 있는 지를 확인하는 시험을 실시하였다. SC배합의 경우, 슬럼프 플로우는 공장출하시에 비해 현장반입시에 5 ~ 20 cm 증가하였고 공기량도 증가하는 경향을 나타내었다. FBB배합의 경우, 공장출하 및 현장반입시의 슬럼프 플로우가 거의 같은 값을 보였으며, 공기량은 0.5 ~ 1% 정도 감소되었다. 현장반입시에 제작한 공시체의 압축강도 시험결과는 <표 5>와 같다.

표 5. 레미콘 공장별 압축강도 시험결과

배합명	레미콘 공장(단위 : kgf/cm ²)		
	A	B	C
SC	734	-	832
FBB	697	691	-

* 시험재령은 91일

대부분 소요강도를 만족하였지만, SC배합의 경우 레미콘 공장에 따른 차이가 있었지만, 이는 믹서의 배합성능 및 잔골재의 표면수를 오차로 사료된다. 그러나, 콘크리트의 요구품질을 만족하기 때문에, 안정적인 제조·공급이 가능할 것으로 판단되었다.

4.2.2 펌프 압송성

고강도 콘크리트는 점성이 높아 펌프 압송성이 저하될 우려가 있기 때문에, 이를 방지하기 위하여 측벽의 시공에는 범용성이 높고 최대토출량이 100 m³/hr인 펌프카와 관경 150 A(6 inch)의 수송관을 사용하고 시공시간과 측압을 고려한 압송높이는 0.5 m/hr로 계획하였다. 따라서, 본 계획의 타당성을 확인하기 위한 펌프압송 실험을 실시하였다. 다만, 압송배관의 길이는 실시공을

고려하여 수평환산거리를 약 120 m로 설정하였으며, 펌프압송성 시험을 위해 콘크리트의 종류별로 SC배합의 경우에는 슬럼프 플로우가 60 cm인 사례 1, FBB배합의 경우에는 슬럼프 플로우가 60 cm(이하, FBB 60) 및 50 cm(이하, FBB 50)인 사례 2, 그리고 비교용으로 설계기준강도가 300 kgf/cm²이고 슬럼프 12 cm, W/C 47%인 일반배합(이하, FBB 12) 등 4가지 조건을 대상으로 하였다. 콘크리트의 이론 토출량과 관내압력손실의 관계는 <그림 2>에 나타난 바와 같으며, 콘크리트의 이론토출량과 이론토출압력의 관계는 <그림 3>과 같다.

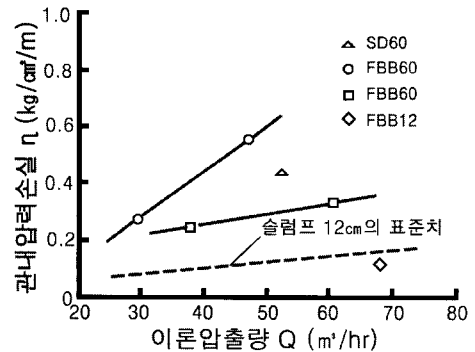


그림 2. 토출량과 관내압력손실

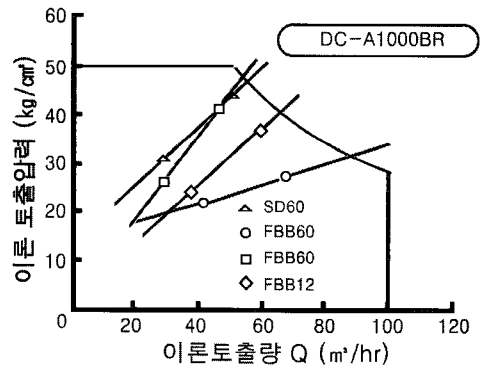


그림 3. 토출량과 이론토출압력

실험결과, 동일한 토출량에 대해 FBB50 > SC60 > FBB60 > FBB12의 순으로 관내압력손실이 감소되는 경향을 나타내었으며, 이러한 순서로 펌프압송성능이 양호한 결과가 얻어졌다. 또한, 펌프의 최대 토출량은 SC60의 경우에 약 55 m³/hr, FBB60의 경우에 65 m³/hr로 나타났기 때문에, 측벽의 압송높이 0.5 m/hr(콘크리트량 약 200 m³/hr)를 확보하기 위해서는 펌프효율을 고려하여 SC60의 경우 5계통, FBB60의 경우 4계통의 배관이 필요한 것으로 평가되었다.

4.2.3 콘크리트 측압

실구조물에 대한 모의부재는 벽두께가 1.6 m, 폭 1.6 m, 높이 3 m인 시험체로 실제 시공의 타설속도를 고려하여 1시간당 50 cm씩 6층으로 타설하고 측압을 측정하였다. 다만, 측정실험은 응결의 지연으로 측압이 최대가 될 것으로 예측되는 동절기를

대상으로 하였다. 실험결과, 콘크리트 측압은 타설후 2시간까지 액압으로 작용하지만, 그후에는 측압의 증가량이 감소하기 시작하여 5시간이 경과한 후에는 상층에 콘크리트를 타설하더라도 측압이 증가되지 않았다. 최대 측압은 $4t/m^2$ 으로 나타났는데, 이는 RC시방서에 규정된 측압 산정식으로 구한 값의 약 2배에 가까운 측압이 작용한 것이다. 타설속도가 0.5m/hr인 경우, 거푸집 설계에 사용되는 측압은 $4t/m^2$ 정도이기 때문에 양호한 값으로 평가되었다.

4.2.4 실 시공에 실험결과 반영

위의 실험결과를 토대로 다음과 같은 시공계획을 세웠다.

- (1) SC배합 및 FBB배합은 대부분의 레미콘 공장에서 안정적인 콘크리트의 제조·공급이 가능하였지만, 펌프압송성이 우수한 FBB60배합을 최적배합으로 선정하였다.
- (2) 소요 콘크리트량을 확보하기 위하여 100 m³/hr급 펌프차를 사용하였으며, 배관직경이 150 A인 수송관을 4계통으로 하였다.
- (3) 거푸집 설계는 콘크리트의 최대측압 4 tf/m²이 작용하는 것으로 하였다.

4.3 측벽 콘크리트 공사

측벽은 약 1년에 걸쳐 시공되었으며, 1 lot당 “철근조립공사 → 거푸집공사 → 콘크리트 타설공사”의 표준사이클은 1개월로 측벽 전체를 높이방향 9 lot로 분할하여 시공하였다.

콘크리트는 3개의 레미콘 공장에서 공급되었고, 1 lot의 최대 타설량은 3,000 m³이고, 전체타설량은 약 2만 5,000 m³이다.

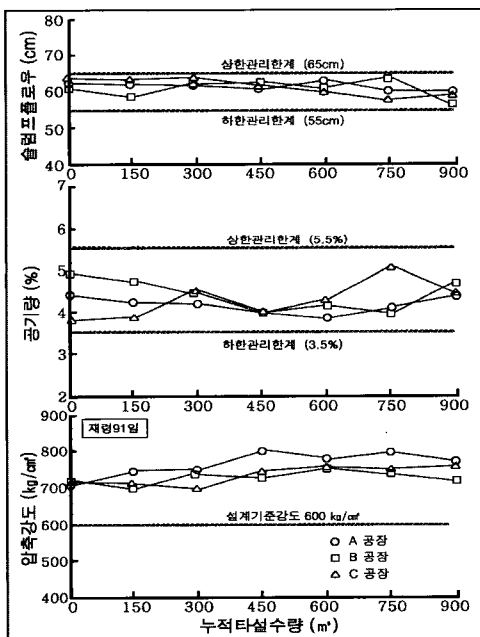


그림 4. 품질관리 실험결과(제 5lot)

각 lot별 콘크리트의 타설은 측벽을 원주방향으로 4등분하여 펌프차 4대로 타설하였다. 이중에서 제 1 ~ 7 lot는 지상에서 압송용 수직배관을 설치한 자동타설 시스템으로 타설하였으며, 제 8 ~ 9 lot는 펌프차의 붐으로 타설하였다.

〈그림 4〉는 품질관리 실험의 일례를 나타낸 것이다. 현장 콘크리트 타설 지점의 슬럼프 플로우, 공기량 및 압축강도 등의 측정결과, 소요의 품질을 만족하는 것으로 나타났다. 특히, 압축강도의 변동계수는 5% 이내로 매우 양호하게 관리된 상태에 있었다. 이는 콘크리트를 제조할 때, 플랜트 믹서의 토크를 측정하였으며, 측정된 토크 값을 근거로 단위수량을 자동으로 보정한 결과로 판단된다.

4.4 측벽콘크리트 공사의 합리화 시공

본 공사의 측벽은 〈그림 5〉에 나타난 바와 같이 일련의 콘크리트 타설작업 전체를 시스템화하여 시공의 합리화를 이루도록 하였다³⁾. 자동타설 시스템은 자동분기밸브, 자동다짐 로봇 및 타설관리 시스템으로 구성되어 있으며, 콘크리트공사의 주요설비는 〈표 6〉과 같다.

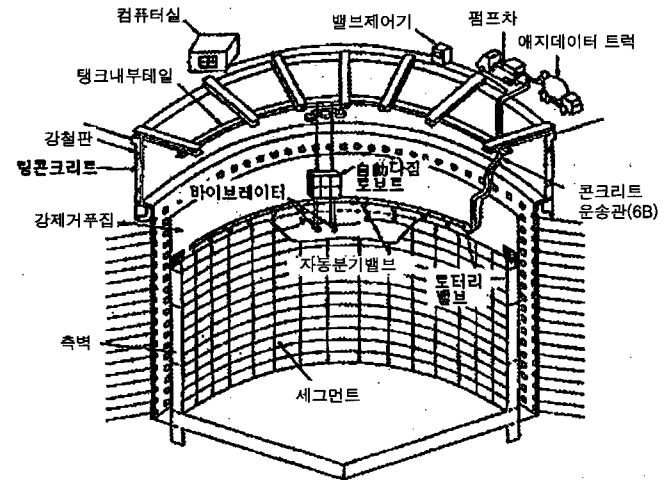


그림 5. 콘크리트의 자동 타설 시스템 개략도

표 6. 측벽 콘크리트 공사의 주요설비

설비	사양	수량
펌프차	100 m ² /hr	4대
수송관	150 A(최장길이 100 m/1계통)	4계통
자동분기밸브	15대/1계통	60대
다짐 로봇	바이브레이터(4분담재/1대)	4대

4.4.1 자동분기밸브

콘크리트 펌프는 지상에 설치하고 수송배관을 수직으로 연결한 다음 타설 lot의 끝부분에서 수평으로 배관하였다. 수평배관은 3 ~ 4 cm 간격으로 자동분기밸브를 설치하여 층당 50 cm가 되도록

록 타설량을 설정한 후에 각 밸브의 개폐를 자동으로 제어하였다. 밸브개폐 제어순서는 <그림 6>과 같다. 특히, 60 m 이상의 수직배관으로 콘크리트를 타설하기 때문에 콘크리트의 자유낙하에 의해 배관내에서 재료분리로 인한 막힘현상을 방지하기 위하여 회전식 스톱밸브를 설치하였다. 밸브는 펌프의 개폐와 함께 자동으로 개폐시켜 수직배관에 콘크리트가 계속 채워져 있는 상태로 되게 하였다.

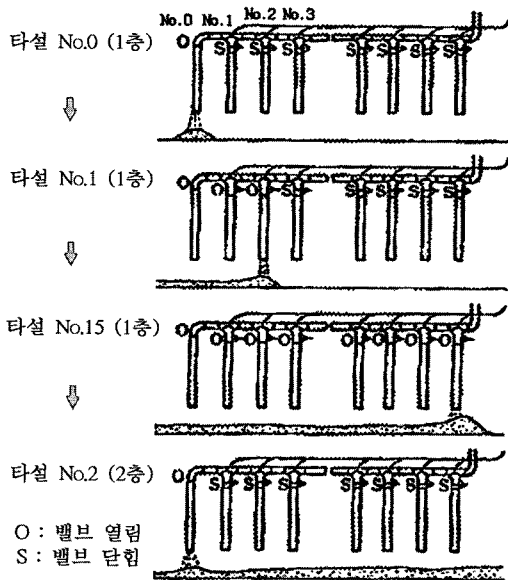


그림 6. 자동분기밸브 개폐제어순서

4.4.2 자동다짐 로봇

다짐장치는 탱크의 외주부를 따라 원주상으로 설치한 레일에서 곤도라식으로 매달린 상자형의 강제프레임에 4분의 바이브레이터를 탑재시킨 로봇을 개발하여 사용하였다. 바이브레이터는 본체에 설치된 윈치로부터 와이어로 매단 상태이며, 콘크리트를 타설한 후에 소정의 깊이까지 삽입해서 다짐한 다음에 원위치까지 감아 올리도록 되어 있다. 이러한 일련의 작업을 자동으로 반복하면서, 순차적으로 콘크리트를 다짐하였다.

4.4.3 타설관리 시스템

타설관리 시스템은 컴퓨터를 이용하여 탱크전체 및 각각의 타설군마다 콘크리트의 타설 진행상황 및 타설량 등을 관리하는 시스템이며, 동시에 고장(하자)이 발생하는 것도 모니터링할 수 있도록 하였다.

5. 콘크리트 지붕의 시공

5.1 콘크리트 지붕의 개요

외국의 LNG 저장탱크는 이미 비래물(飛來物) 대책으로 콘크

리트 지붕을 채택하고 있다. 본 탱크의 건설지역은 거주지역에 근접해 있으며, 장기간에 걸쳐 40만 kl(20 만kl × 2기)의 대용량 LNG를 저장하게 된다는 것, 그리고 비래물을 고려해야 하기 때문에 처음으로 콘크리트 지붕을 채용하게 되었다. 내압기밀 부재인 강제지붕의 외면을 두께 50 cm의 철근 콘크리트로 씌웠기 때문에 지하탱크의 안전성도 향상시킬 수 있다. 콘크리트 지붕은 air support 공법으로 스펠 76 m의 대공간은 무지보로 구축하였으며, 콘크리트 지붕의 시공순서는 <그림 7>과 같다.

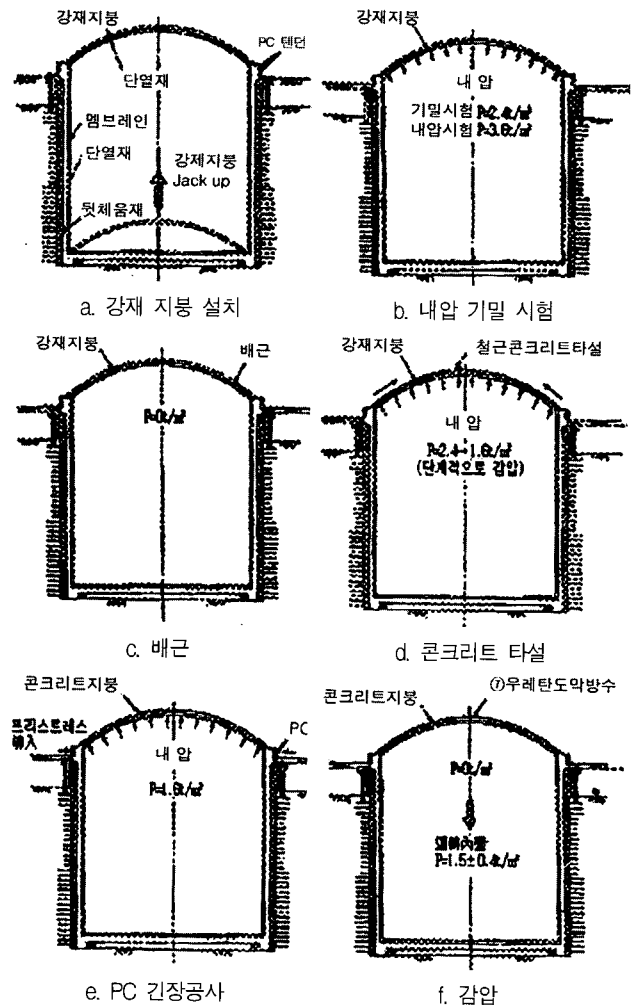


그림 7. 철근 콘크리트 지붕의 시공순서

지붕의 시공순서에 대한 개요를 서술하면 다음과 같다.

- (1) 강제지붕은 저판(슬래브)에서 조립하고 지붕내면에 보냉재를 부착한 후에 lift-up으로 측벽 정상부에 고정시킨다.
- (2) 내압·기밀시험으로 강제지붕의 내압·기밀성을 확인한다.
- (3) 강제지붕 위에서 철근을 조립한다.
- (4) 탱크안을 승압(昇壓)시켜 강제지붕을 air support하고 외주에서 내측까지 고리모양(ring 형상)으로 콘크리트를 타설한다.
- (5) 소정의 기간동안 양생을 한 후에 측벽 정상부에 배치된

PC-텐던으로 소정의 프리스트레스력을 도입한다.

(6) 프리스트레스를 도입한 후에 탱크의 내압을 감압(減壓)한다.

(7) 콘크리트의 표면은 우레탄 방수층으로 전면 피복을 한다.

(4)에서 토목~기계부분에서 타설중인 철근콘크리트 지붕과 강제지붕의 거동을 서로 평가하여 콘크리트지붕의 타설방법을 검토하였다. 그 결과, 지붕전체를 6 lot로 분할하여 타설하였으며, 각 lot별 콘크리트의 자립강도가 확보된 후에 다음 lot를 타설하도록 계획하였다. 또한, 탱크내압은 콘크리트 중량을 상쇄할 뿐만 아니라 강제지붕의 변형을 억제하기 때문에, 각 lot의 두께에 따라 단계적으로 강압하는 방법으로 하였다. (5)에서 약 7,500톤의 콘크리트 및 강제지붕의 중량에 의해 측벽 정상부를 눌러 퍼지도록 하는 수평 thrust(推力)가 작용하게 된다. 수평 thrust에 의해 측벽 정상부에는 hoop-tension(원주방향 축인장력)이 발생한다. 기존의 강제지붕은 hoop-tension을 철근의 보강으로 대처하였지만, 콘크리트지붕의 중량이 크기 때문에 측벽 정상부에 원주방향으로 프리스트레스력을 도입하게 된 것이다.

5.2 지붕 콘크리트의 시공실험

지붕 콘크리트에 요구되는 품질은 <표 7>과 같다.

표 7. 지붕 콘크리트의 요구품질

구분	요구 품질	
강도	설계기준강도	400 kgf/cm ² (재령 28일)
	자립강도	140 kgf/cm ² 제 1 ~ 3 lot(재령 3일) 제 4 ~ 6 lot(재령 2일)
마무리정도	2.0 × 2.0 m의 범위에서 ± 10 mm	

강도측면의 요구품질은 air support공법으로 단계적인 강압(降壓)을 하기 때문에 2 ~ 3일간의 단기간에 자립강도를 확보해야 한다. 한편, 마무리정도에 관한 요구 품질은 2.0 × 2.0 m의 범위에서 요철이 ± 10 mm 이하로 되어야 한다. 따라서, 최대 약 30° 구배로 처짐 및 배부름 등이 발생되지 않고 시공할 수 있는 품질이 요구된다. 일반적으로 구배가 20°를 초과한 콘크리트에서는 진동 거푸집을 설치하지만 거푸집 설치에 따른 공사기간의 증가, 가격상승, 거푸집면의 흠, 곰보자국 등이 발생하는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 공사에서는 거푸집을 설치하지 않고 시공하는 것으로 하였으며, 요구품을 만족하는 콘크리트 배합조건 및 시공방법의 선정을 위하여 실제 크기의 모델을 제작하여 지붕 콘크리트의 시공성 실험을 실시하였다.

5.2.1 콘크리트의 배합조건 선정

<표 8>은 시공성 실험에 앞서 실시한 배합조건의 선정실험에서 얻은 콘크리트의 배합조건을 나타낸 것이다. 사용 시멘트는 측벽의 구속으로 온도균열의 발생이 예상되는 제 1 ~ 3 lot의 경

우 저발열형 고로시멘트 B종(슬래그 함유율 56%), 제 4 ~ 6 lot의 경우 보통 포틀랜드 시멘트를 선정하였다. 또한, 구배가 있는 부위의 다짐 및 마감 등의 시공성을 고려하여 나프탈계의 고성능 AE감수제를 사용하고 단위수량을 감소시켜 콘크리트의 접성을 증가시켰다.

표 8. 지붕 콘크리트의 배합조건

배합	시멘트 종류	G _{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	단위중량(kg/m ³)				고성능 AE감수제
					W	C	S	G	
NO.1	보통 시멘트	20	45.0	42.1	152	338	757	1,080	1.5 %
NO.2	저발열 고로B종		37.0	40.1	140	379	712	1,107	

5.2.2 모델시험체의 개요 및 실험수준

실물크기의 모델시험체는 1 lot를 대상으로 구배를 약 30° 및 부재두께 1.1 m로 하였으며, 측벽의 마찰에 따른 영향을 배제하기 위하여 윗면 4.0 m, 아랫면 6.0 m의 받침대형으로 하였다. 구배부에 타설된 콘크리트의 처짐 및 배부름 현상은 슬럼프값과 관계되기 때문에, 실험수준으로 목표 슬럼프는 8 cm 및 12 cm로 하였으며, 표층의 처짐을 방지하기 위한 대책으로 용접철망의 사용유무에 대한조건을 포함하여 전체 4수준으로 선정하였다. 콘크리트의 배합조건은 구배가 심한 제 1 ~ 3 lot에 타설할 예정인 <표 8>의 No.2로 하였으며, 고성능 AE감수제의 첨가량으로 목표 슬럼프를 확보하였다.

5.2.3 실험방법

콘크리트는 레미콘 공장에서 제조하여 트럭 에지테이터로 현장까지 운반하였다. 현장 콘크리트 타설 시점의 품질관리 시험은 주로 슬럼프, 공기량, 콘크리트 온도에 대해 매차량마다 실시하였다.

5.2.4 실시공에 실험결과 반영

<그림 8>은 Vane 전단시험으로 측정된 콘크리트의 전단강도

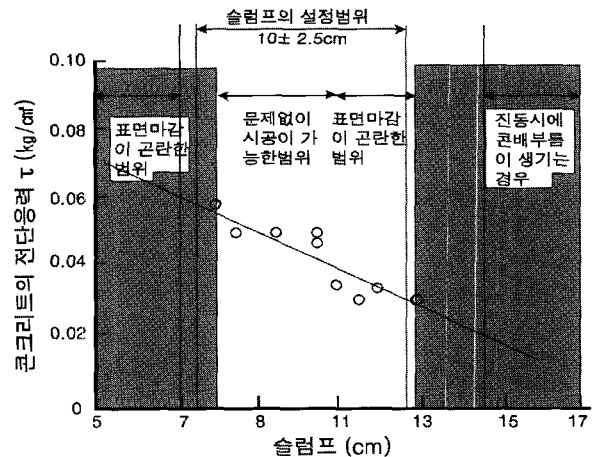


그림 8. 육안관찰 결과와 슬럼프와의 관계

와 슬럼프의 관계를 나타낸 것이다. 실험결과, 콘크리트의 전단 강도와 슬럼프의 관계는 거의 선형으로 되는 것을 확인하였다. 또한, 육안으로 관찰한 결과, 처짐과 배부름도 나타났는데, 육안 관찰 결과와 슬럼프의 관계를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 슬럼프가 8.5 ~ 11 cm인 경우에는 용접철망을 설치하지 않아도 시공에는 문제가 없다.
- (2) 슬럼프가 11 ~ 13 cm인 경우에는 용접철망을 설치하면 처짐 및 배부름이 없이 타설할 수 있다. 그러나, 슬럼프가 14.5cm인 경우에는 용접철망을 설치하더라도 바이브레이터로 진동할 때는 배부름이 발생하였다.
- (3) 슬럼프가 7cm인 경우에는 타설작업에 문제가 없었지만, 표면고름 및 흠손누름이 매우 어렵기 때문에 마감성이 좋지 않았다.

이상과 같은 결과에 따라 지붕 콘크리트의 마감에 요구되는 품질을 만족하기 위해 용접철망을 사용한 경우에는 슬럼프의 범위를 7.5 ~ 13.0 cm(전단강도로 0.03 ~ 0.06 kgf/cm² 범위)로 할 필요가 있다. 따라서, 실제 시공에서는 용접철망을 설치하였으며, 콘크리트의 슬럼프는 10 ± 2.5 cm를 관리기준으로 하였다.

5.3 지붕 콘크리트의 공사

철근콘크리트 지붕공사는 약 1개월이 소요되었으며, 콘크리트의 타설에서 측벽의 PC 긴장까지 작업을 종료하였다. 지붕 콘크리트는 <그림 9>와 같이 6분할로 시공하였다.

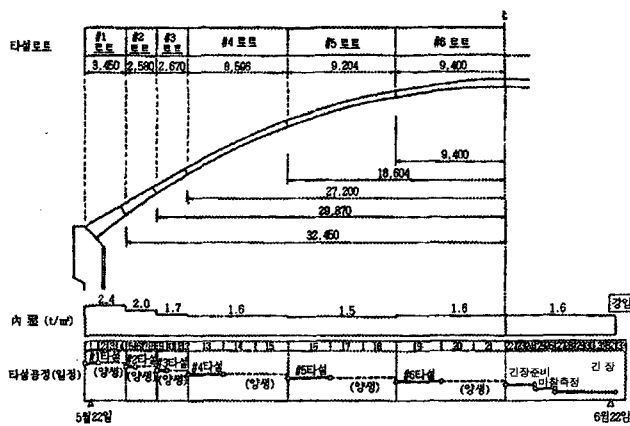


그림 9. 지붕 콘크리트의 타설 평면도

콘크리트의 타설은 붐대가 매우 긴 펌프카를 사용하여 탱크외주에 균등하게 6대를 배치하였으며, 각 타설 lot를 원주방향으로 6분할하여 실시하였다(단, 중앙부 제 6 lot만은 2분할로 하였다). 지붕 콘크리트 타설의 평면배치는 <그림 10>과 같다. 각 lot별 콘크리트 타설을 마친 후에 소정의 자립강도(140 kgf/cm²)를 발현할 때까지 2 ~ 3일의 양생기간을 두었으며, 후속 lot의 타설을 위한 내압조정을 완료한 후, 후속 lot 타설을 진행하였다. 각 lot간의

타설 이음매는 expand metal 이음판을 사용하여 해체 및 타설이음매의 처리가 필요없는 공법으로 하였다.

다만, 표면마감은 규정에 의거 플라스틱콘을 약 2 m × 2 m의 격자상으로 배치하였으며, 사이를 평면상으로 미장 마감하여 돔 형태의 지붕전체를 다면체로 마감하였다. 또한, 구배가 큰 경우에는 바이브레이터의 진동으로 인하여 발생하는 콘크리트의 처짐 및 배부름을 방지하기 위해 철근 상부에 용접철망을 설치하였다. 용접철망은 타설작업할 때에 발판으로도 사용할 수 있기 때문에, 작업의 안전성이 향상되었다.

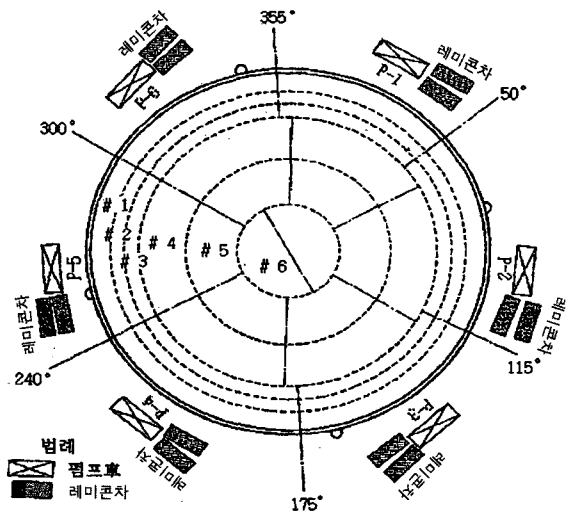


그림 10. 지붕 콘크리트의 타설 평면도

5.4 측벽 정상부의 PC 긴장공사

지붕 콘크리트의 타설을 마친 후에 탱크내압을 유지한 상태에서 측벽 정상부에 배치된 PC 텐던을 긴장하고 소정의 프리스트레스를 도입하였다. 긴장재는 JIS G 3536에 규정된 PC 강에 적합한 7가닥의 강선으로 된 15.2 mm(B종)를 27번 1조로 하여 8단 배치하였으며, 정착공법은 VSL공법으로 하였다. 정착은 4개소의 피라스타로 실시하였으며, 중심각 180°에 대해 1조 사용하였고, 다음 단의 긴장재와는 교대로 배치하였다. 또한, 프리스트레스를 도입할 때의 초기 긴장력(P_i)은 500 톤으로 하였다. PC 텐던의 배치는 <그림 11>에 나타내었다.

5.4.1 시험긴장

본 긴장에 앞서 4개 텐던의 시험긴장을 실시하여 현장에서의 마찰계수(μ)와 PC 텐던의 결보기 탄성계수(E_p)를 측정하였다. 시험긴장은 점진적으로 실시하면서 긴장단 및 고정단의 하중과 신축을 측정하였다. 일반적으로 소정의 하중까지 점진적으로 시험 긴장을 가한 후에 제하하고 양단을 인장하는 본 긴장을 실시하였다. 그러나, 본 공사에서는 텐던의 길이가 길기 때문에, 신축량이 크고 잭 스트로크(stroke)가 부족하여 소정의 하중까지 긴

장할 수 없었다. 따라서, 잭을 교체하면서 시험긴장을 실시하였으며, 시험이 끝난 텐던은 그대로 정착시켜 본 긴장을 겸하는 방법을 채택하였다. 시험긴장의 결과, 마찰계수(μ)는 0.819, 겉보기 탄성계수(E_p)는 $2.15 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 의 결과를 얻었다.

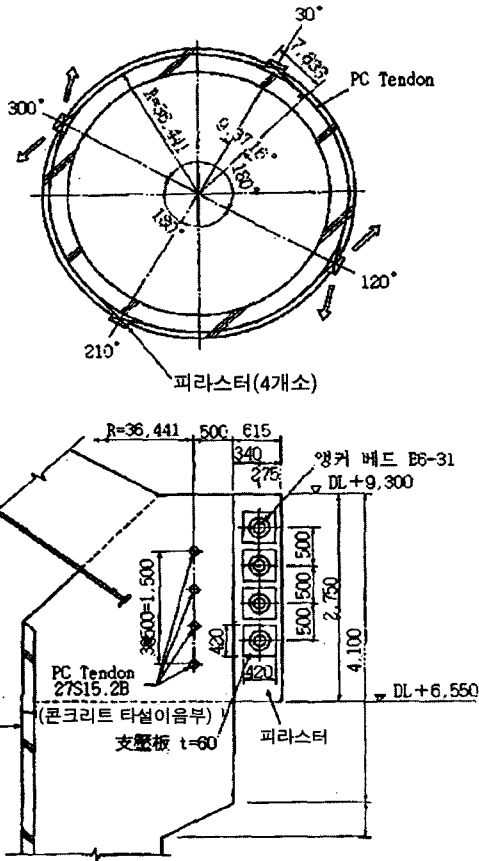


그림 11. PC 텐던 배치도

5.4.2 본 긴장공사

균등하게 프리스트레스를 도입하기 위해 4대의 jack을 사용하여 좌우대칭인 2개의 텐던을 동시에 양단에서 끌어 긴장하였다. 긴장관리는 컴퓨터를 사용하여 2개의 텐던, 4개의 Jack을 동시에 집중적으로 실시하였으며, 신축에 대한 계산값과 실측값의 오차를 실시간으로 구하여 관리도에 기입하고 긴장이 정확하게 이루어지도록 관리하였다. 긴장을 할 때는 다음의 4가지 점을 관리 항목으로 하였다.

- (1) 텐던의 실측된 신축과 현장마찰 시험으로 구한 마찰계수 (μ) 및 겉보기 탄성계수(E_p)로 산출한 신축의 계산값에 대한 오차율이 허용값 이내일 것.
- (2) 하중-신축관계가 직선일 것. (상관계수 > 0.998)
- (3) Set량이 허용 set량(6 mm) 이하일 것.
- (4) 텐던의 실측된 신축이 설정값($\mu = 0.3, \lambda = 0.004, E_p = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)을 사용하여 산출한 신축의 계산값보다 클 것.

5.4.3 그라우트 주입

PC-텐던이 부식되는 것을 보호하기 위하여 PC를 긴장시킨 후에 sheath관내로 그라우트재를 주입하였다. 그라우트재의 품질은 긴 시스관의 한쪽에서 주입하기 때문에 시스관내에서의 충전성을 확보할 수 있어야 한다. 따라서, Non bleeding type의 고성능 그라우트 혼화제(포졸리스 GF 1700)를 사용하였다. 품질 관리 항목은 다음과 같다.

- (1) 컨시스턴스(J14 깔대기시험) 유하시간: 3 ~ 10초
- (2) 28일 압축강도: 200 kgf/cm^2 이상
- (3) 팽창률: 10 % 이하
- (4) 불리딩률: 1 % 이하

그라우트는 내경 25 mm의 호스를 사용하여 한쪽에서 주입하며, 배출구에서 균일한 그라우트재가 배출될 때까지 주입한다.

5.5 지붕 시공시의 계측결과

LNG 저장탱크에 처음으로 콘크리트 지붕을 채택한 본 공사에서는 콘크리트의 타설부터 PC를 긴장할 때까지 RC 지붕 시공과정의 거동을 파악하고, 향후 설계자료를 확보하기 위한 목적으로 여러 가지 계측을 실시하였다. 계측위치는 <그림 12>에 나타내었고, 계측결과는 <그림 13>과 같다.

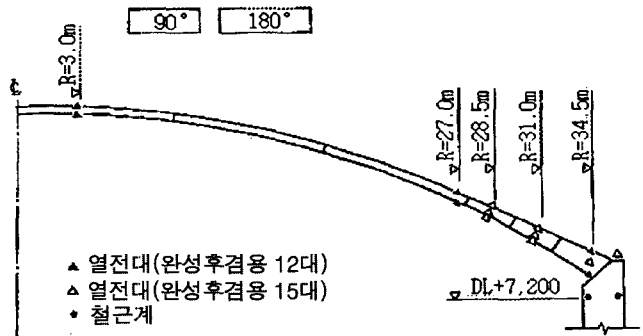


그림 12 RC지붕 시공시의 계측위치

5.5.1 측벽 정상부의 응력

승압 → 타설 → PC 긴장 → 강압에 따른 측벽 정상부 철근응력 (원주 방향)의 경시변화는 해석값과 거의 일치하는 경향을 나타내었으며, 강압후에도 측벽 정상부는 압축상태를 유지하고 있는 것으로 나타났다.

5.5.2 지붕 콘크리트의 온도

콘크리트의 경화발열에 따라 강제 지붕은 팽창·수축과 같은 온도변형의 영향을 받게 된다. 강제지붕의 설계에서는 이러한 온

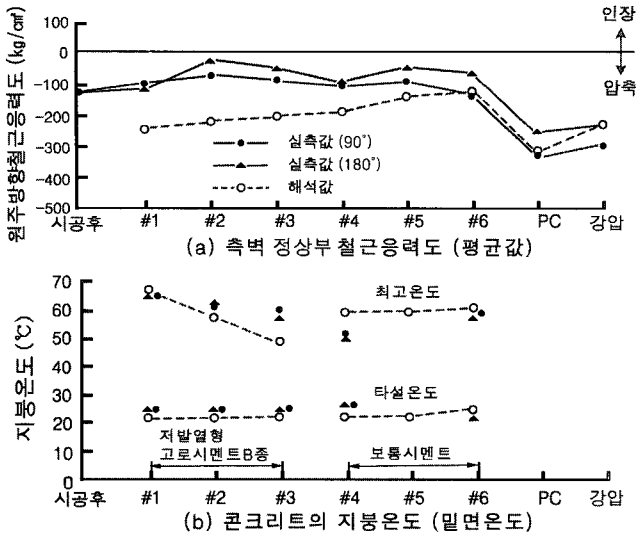


그림 13. 지붕 시공시의 계측결과

도변화를 고려하여 완성후의 잔유변형·응력을 산정하고 있다. <그림 13>의 (b)에서 온도상승량은 해석값과 거의 일치한다. 다만 3lot의 경우 해석값에 비해 온도상승량이 7.5°C 정도 큰 것으로 나타났다. 이는 제 3lot를 타설하기 전에 맑은 날씨가 계속되었기 때문에, 강제지붕의 온도가 복사열에 의해 상승하였으며, 열을 보온시킨 내면 보냉재의 영향으로 콘크리트 온도가 상승하게 된 것으로 판단된다.

6. 결 론

동경가스가 지하 저장조를 착안하여 최초로 1만 kl 지하탱크를 개발한 이래, 4반세기의 시간이 경과하였다. 그간의 많은 기술개발 및 운전자료를 설계에 피드백하여 이번의 根岸 공장에서 20만 kl 지하탱크를 개발하기에 이르렀다⁴⁾. 한편, 扇島 공장에서도 최신식 20만 kl 지하식 LNG 저장탱크가 건설중에 있다.

이 지하탱크는 안전성 및 토지의 유효이용율을 향상시키기 위하여, 콘크리트 지붕을 복토하는 새로운 매설식 지하탱크 형식을

채용하였다. 지붕이 지상으로 노출되는 기존의 지하탱크에 비해 지표면을 녹지로 만들 수 있으며, 환경과도 조화시킬 수 있기 때문에 새로운 형식으로 제안되었다.

根岸 공장의 20만 kl LNG 지하탱크에서 사용된 고강도 콘크리트 및 콘크리트 지붕에 관한 기술은 扇島 공장의 LNG 지하탱크에도 응용·전개되고 있다. LNG와 같은 깨끗한 에너지는 지구친체의 환경문제가 대두되고 있는 현실을 고려할 때 앞으로 수요가 증대될 것으로 사료된다.

LNG 지하탱크의 역사는 발전이라기보다는 진화라는 측면에서 접근하는 것이 더욱 합리적이며, 새로운 21세기의 기술향상을 위하여 많은 노력을 기울여야 할 것이다. □

본고는 日本コンクリート工學協會 Vol.34, No.2, 1996. 2월호에서 발췌한 것으로, 동경가스와 清水建設이 공동으로 저술한 내용을 정리한 것임을 밝힙니다.

참고문헌

1. 名倉健, 中野正文, 上野衛, 中村龍, “設計基準強度 600 kgf/cm²의 高流動콘크리트의 施工性實驗”, 日本コンクリート工學協會第2回 超流動콘크리트에關する인포지움論文報告集, 1994. 5. pp.187~195.
2. 中村修, 勝吉忠市, 木村克彦, “高強度地中連續壁による大空間の施工 -14万klLNG地下タンク工事”, 日本土木學會第8回施工體驗發表會, 1989. 2. pp.73~82.
3. 冢原裕, 田中佳利, 鈴木克南, “地下タンク側壁콘크리트自動打設 시스템의開發,” 建設機械と施工法인포지움論文集, 1993. 1. pp.238~241.
4. 高木淳, 中下兼次, 名倉健, 中村龍, 和賀秀脫, 小野武, 小野定, “世界最大のLNG地下タンクの 合理化施工-東京가스根岸工場TL-41 LNG地下式貯槽”, セメント・コンクリート ウウ・572, 1994. 10. pp.8~13.