



## 설계 변수 변화에 따른 LNG 저장탱크 Steel Roof 거동 분석

†김영균 · 김지훈 · 오병택 · 윤인수 · 양영명

한국가스공사 연구개발원

(2004년 10월 27일 접수, 2005년 2월 12일 채택)

## The Analysis of LNG Storage Tank Steel Roof Behavior by the Change of Design Variables

†Y.K. Kim · J.H. Kim · B.T. Oh · I.S. Yoon · Y.M. Yang

Kogas R&D Center

(Received 27 October 2004, Accepted 12 February 2005)

### 요 약

본 논문은 설계 변수 변화에 따른 LNG저장탱크 강제 루프의 거동을 분석 하였다. 강제 루프 설계에서는 여러 가지 하중 조건 그리고 이러한 하중 조건의 조합에 대하여 안정적인 거동을 하여야 한다. 본 논문에서는 콘크리트 타설에 따른 강제 루프의 거동 그리고 H빔 및 루프 판의 두께 변화와 같은 설계 변수의 변화에 대한 강제 루프의 거동을 비교 분석하였다. 이렇게 구해진 결과를 바탕으로 LNG 저장탱크 강제 루프 설계시 보다 합리적인 설계법을 제시하고자 하였다.

**Abstract** – This paper deals with parametric studies for the structural response of LNG Storage Tank steel roof behavior according to change in design condition. In the design of steel roof, it may be required to represent a stable behavior under many loading conditions and those of combinations. We fulfill the analysis the steel roof behavior during concret placing and additionally change the design variables like H beam, pressure and steel roof plate thickness. On the basis of the obtained results from this studies a guideline for a more reasonable design of LNG storage tank steel roof is introduced.

**Key words** : LNG Storage Tank (LNG저장탱크), Steel Roof (강제 지붕), FEM (유한요소해석) Design Variables (설계변수), Concrete Hydration (콘크리트 양생)

### I. 서 론

LNG 저장탱크는 내조 · 벽체 · Roof로 구성된 원통 셸 구조물로서 일반적인 구조물과는 달리 내부에 LNG를  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 액체 상태로 저장해야 하므로 액체압은 물론 극저온 온도에 따른 영향에 대하여 충분한 안전성을 요구하는 특수 구조물이다. LNG와 직접 접촉하는 내조는 9% Ni강 형식과 멤브레인 형식으로 나뉘어지며 각각의 형식에 따라 단열 방식과 내조 설계 방법이 달라지며 고유의 설계기술이 필요하다. 초기의 LNG 저장탱크의 경우 외조 벽체부를 탄소강 재료를 사용하여 구성 하였으나 저장탱크 용량이 대형화 됨에 따라 안전성을 확보하기 위하여 원통 셸 구조의 측벽과 원판 형태의 바닥판으로 구성된 철근 콘크리트로 시공

된다. Roof는 돔형상을 갖는 구조물로서 벽체 정상부에 지지 되어진 강판의 구형 셸 구조로 구성되며 Roof 프레임에 고정 지지된 서스펜디드 데크 상부에 단열재를 설치하여 단열하는 방식이 주로 사용된다.

Steel Roof의 설계는 국제 규격인 미국[1]과 유럽[2]에서 사용되는 규격과 일본 가스협회에서 선진 해외 규격을 종합 하여 LNG저장탱크 설계를 위한 일종의 지침서를[3] 작성하였으며 이를 바탕으로 설계가 이루어져 왔다. LNG 저장용량의 대형화에 따라 안전성을 확보하기 위하여 외조를 프리스트레스 콘크리트로 시공하며 Steel Roof 상부도 콘크리트로 작업을 하게 된다. 이러한 형상 및 형식의 변화에 따라 각각 탱크 설계사별로 이러한 구조에 대한 설계법을 확립 하기 위하여 추가적인 연구를 수행하였다.

일본 NKK사의 渡辺英雄등[4]은 지하식 저장탱크 최초로 콘크리트로 타설 시공된 Roof의 안전성을 확보

†주저자:kyk@kogas.re.kr

하기 위하여 유한요소 해석을 이용하여 콘크리트 타설 시의 Steel Roof의 안전성 확인하였다. 또한 완공후엔 실제 운전 상태시의 내부압력 변화에 따른 콘크리트 Roof의 실제 거동을 유한요소 해석과 실제 측량을 통하여 변형량을 측정하여 설계기술을 확보하고자 하였다. 도쿄가스사의 高木淳[5]등은 200,000만kl 대용량 LNG 저장탱크 콘크리트 Roof 시공에 대한 절차와 콘크리트 타설공정에 대하여 설명하였다. 여기서는 Roof를 총 6개의 구역으로 구분하여 각각의 구역별로 콘크리트 타설과 양생 작업을 하여 총 1개월에 걸쳐 시공을 완료 하였다. 일본 IHI사의 大矢弘史[6]등은 LNG저장탱크의 좌굴을 해석 하기 위하여 RPIS에서 제시한 모델의 1/10 스케일 모델에 대하여 유한요소 해석에 의한 좌굴 하중값과 실험에 의한 붕괴 하중값을 비교하여 보정계수를 구하였다. 이와같은 연구를 통해 대변형 탄소성 해석법을 확립하여 대용량 LNG 저장탱크 돔 Roof의 실험적 붕괴하중과 모드 그리고 붕괴 거동을 시뮬레이션할 수 있도록 하였으며 이 해석법을 바탕으로 LNG 저장탱크 Roof 설계에 적용 하였다. 한편 이강원 등[7]은 Steel Roof의 해석결과를 콘크리트 Roof 해석 시 하중값으로 입력하여 Steel과 콘크리트의 복합적인 거동에 대한 수치 모형화 및 유한요소 해석을 실시 하여 축력 전단력에 대한 안전성을 확인 하였다. 최창근[8]등은 자체 개발한 유한요소 해석 모델을 하여 지하식 LNG저장탱크를 해석 하였다. 기존의 유한요소 해석 프로그램을 이용할 경우 Roof 최상단에 특이성을 제거 하기 위하여 인위적인 빈 구멍으로 모델링을 해야 하며 벽체와 Roof의 연결부위등 불합리한 모델링 문제를 해결하기 위한 복잡한 모델링에 효과적으로 사용할 수 있는 유한요소를 개발하여 정확한 해석을 하고자 하였다.

본 연구에서는 LNG 저장탱크의 주요 부위인 Steel Roof를 실제적으로 해석하고 설계할 수 있는 기술을 구체적으로 개발하여 향후 건설될 저장탱크에 대한 안정성을 확보할 수 있는 근거를 마련하고 해석 및 설계기술의 국산화를 위한 구체적인 단계로서 유한요소 해석법을 이용한 대용량 LNG 저장탱크 Steel 돔 Roof의 설계 기술을 개발하고자 한다. 이를 위하여 실제로 시공 건설된 LNG 저장탱크의 Roof의 변형 거동을 해석하였으며 설계 변수 변화에 의한 해석 결과와 비교하였다.

## II. LNG 저장탱크 형상 및 설계 변수

본 연구에서 적용한 LNG 저장탱크 Roof 모델은 일본 IHI사에서 설계하여 한국가스공사 인천 LNG 인수

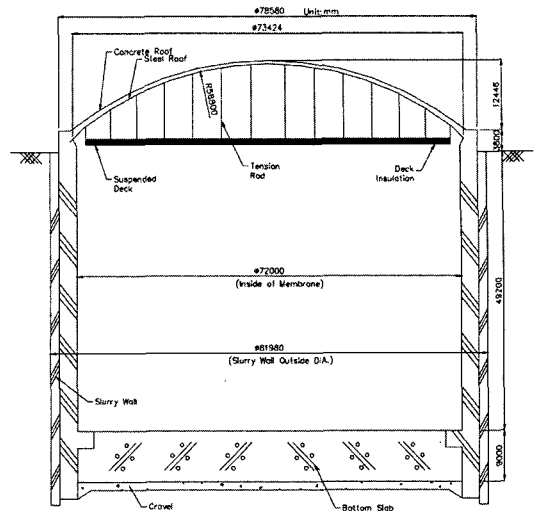


Fig. 1. The configuration of LNG storage tank.

기지에 적용된 저장용량 200,000kl의 지하식 대용량 탱크이며 전체 탱크의 형상은 Fig. 1과 같다. LNG탱크 내부에 최대로 LNG가 채워지는 액위의 높이는 49.2 m이다. 이와 같이 LNG가 실제 저장되는 부분이 지하에 저장 되도록 설계한 형식으로 지진등에 의한 탱크 파손시 LNG의 누설이 발생하지 않는 방식으로 지진에 민감한 일본에서 최초로 개발된 형식이다. Fig. 2에는 Steel Roof와 H 빔의 배치 형상을 Table 1에는 각 요소의 설계 요소의 재료 및 물성치를 나타내었다. Steel Roof에 가장 크게 작용하는 콘크리트 하중의 크기의 산

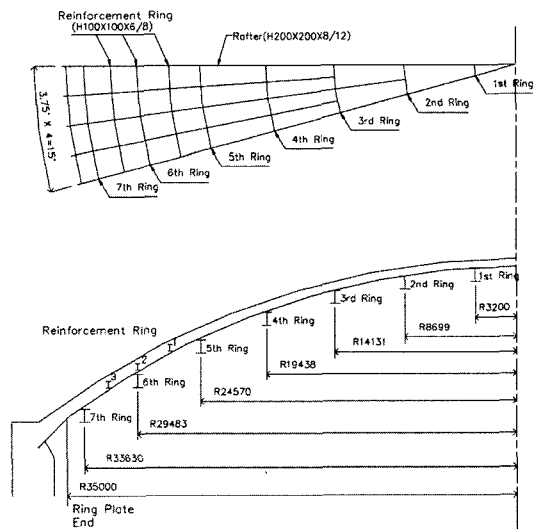
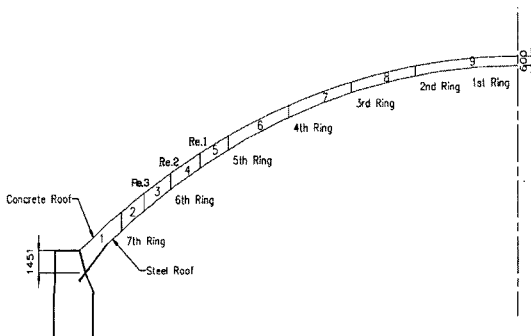


Fig. 2. The configuration of roof plate and beam.

**Table 1.** Material property of roof members.

Material	ASTM A516.GR.70	ASTM A36.mod.1
Tensile Strength(N/mm <sup>2</sup> )	482.85	400.05
Yield Strength(N/mm <sup>2</sup> )	262.12	248.29
Young's Modulus(N/mm <sup>2</sup> )	192,276	192,276
Poisson's ratio	0.3	0.3
Specific gravity(tonf/m <sup>3</sup> )	7.85	7.85

정은 콘크리트의 비중인 2,400 kgf/m<sup>3</sup>을 기준으로 벽체 부위에서 최대 두께가 1.451 m이며 이 두께가 일정하게 감소하다 5번 링 부위에서 0.6 m로 일정해 진다. 콘크리트 타설은 6개 구역에 대하여 각 1대씩의 Pump Car (용량 : 20 m<sup>3</sup>/hour)를 사용하였으며 총 콘크리트 타설량은 3,509 m<sup>3</sup> 그리고 타설 시간은 23시간이 소요 되었다. 타설 방향은 벽체 부에서 중앙부로 즉 Roof 하부에서 상부 방향으로 타설 작업이 진행 되었다. 콘크리트 타설 작업중 Steel Roof의 변형을 계측하기 위하여 Roof 플레이트에 LEVEL 봉을 설치하여 수직 변위를 계측하였다. 변형 계측 측량에 사용된 장비는 Sokkia사 광파 측정기를 (모델명 : SET3B) 사용하였으며 Steel Roof 플레이트 상부에 침하봉을 용접 고정 설치한 후 일정한 시간 간격으로 Roof의 처짐을 측정 하여 그 결과를 해석 결과와 비교 하고자 하였다. 콘크리트는 위와 같이 일정한 작업단계를 통해 타설이 이루어 지므로 해석시엔 Fig. 3과 같이 9개의 단계로 단계적인 해석을 수행 하였다. 유한요소해석은 상용 프로그램인 Lusas13.4를 사용하였다. Steel Roof의 경우 Roof 플레이트와 플레이트 하부에 용접 설치된 빔으로 구성 되어, 벽체에 고정된 컴프레션 링과 용접 연결되어 지지된다. Roof 플레이트와 컴프레션링은 셸 요소를 빔에는 빔요소를 사용 하였으며 전체 모델에 대해 빔 엘



**Fig. 3.** The procedure of concrete pouring.

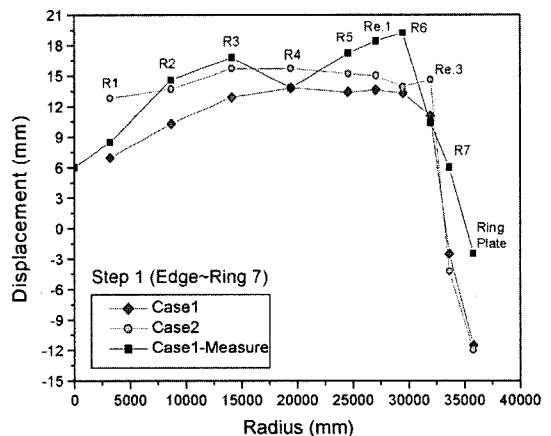
리먼트와 셸 엘리먼트의 복합 구조에서는 편심을 주어 해석할 수 있도록 하였다. 본 구조에서는 Roof 최상부는 특이성을 제거하기 위하여 인위적인 빈 구멍으로 모델링을 하였다. 경계조건은 Roof 하단 벽체 고정부는 전체를 구속 하였으며 대칭 면에는 대칭 구조를 부여 하였다.

### III. 설계 변수에 의한 영향

유한요소 해석을 통해 구한 실제 건설 조건에서의 해석 값을 기본으로 설계변수의 변화에 따른 각 상태에서의 수직변위 및 상당응력을 비교 분석 하였다. 여기서 설계변수로는 H 빔의 형상, Steel Roof 두께 그리고 내부 압력에 대하여 비교를 하였으며 각각의 설계변수 조건을 Table 3에 나타내었다. 해석 결과중에서 Roof 시공시 중요한 시공 과정인 가장 큰 두께의 콘크리트 타설이 이루어지는 Step1에 대한 측정값과 해석 결과를 비교 하였다.

#### 3.1. H Beam 형상에 의한 영향

H-Beam에 의한 영향을 파악하기 위해 실제 시공 건설된 H200의 결과를 기본으로 추가로 H100을 이용한 구조(Case2)에 대한 해석 결과를 비교 하였다. H형강의 변화에 따른 Case1과 Case2의 해석 결과를 수직 변위는 Fig. 4, 상당 응력값은 Fig. 5에 나타냈다. Step1의 거동에서는 H200강 보다 H100강의 거동이 실제 거동과 비슷하게 나타났으며, 응력값은 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 수직변위의 경우 H형강과 Roof 플레이트의 용접결합이 모든 부분에서 이루어지



**Fig. 4.** Comparison of displacement from differentiate the H Beam members.

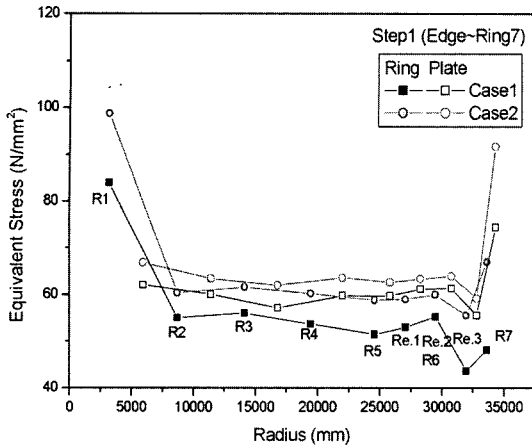


Fig. 5. Comparison of equivalent stress from differentiate the H Beam members.

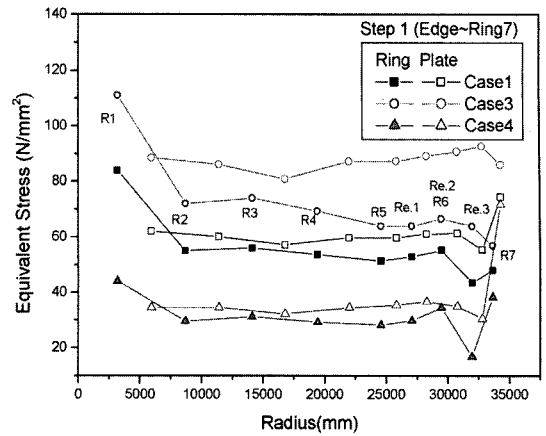


Fig. 7. Comparison of equivalent stress from differentiate the plate thickness.

Table 2. Load condition of concrete load.

	From	To	Stress (N/mm <sup>2</sup> )
Step 1	Edge	7th Ring	0.0291

지 않은 부분 용접이 이루어져, 완전 용접 조건으로 해석이 이루어진 경우와 다르게 거동이 발생하는 것으로 나타났다.

### 3.2. Plate 두께의 변화에 의한 영향

Roof 플레이트 두께의 감소와 H형강의 크기 증가에 의한 보강 효과를 분석하기 위하여 Fig. 6에는 수직 변위를 Fig. 7에는 상당응력 변화를 비교 도시 하였다. 수직 변위 결과에 의하면 Case3의 경우 수직 변위 값이

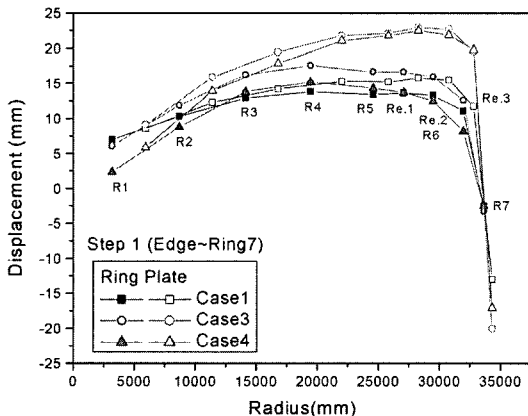


Fig. 6. Comparison of displacement from differentiate the plate thickness.

Table 3. Load cases of the analyses.

Load Case	Roof Plate (mm)	H Beam	Air Support Pr. (N/mm <sup>2</sup> )
Case 1	10	200 × 200 × 8/12	0.02634
Case 2	10	100 × 100 × 6/8	0.02634
Case 3	7	200 × 200 × 8/12	0.02634
Case 4	7	300 × 300 × 10/15	0.02634
Case 5	10	200 × 200 × 8/12	0.01756
Case 6	10	300 × 300 × 10/15	0.01756

크게 증가 하였으며 H300형강을 사용하여 보강이 이루어진 Case4의 경우엔 H형강 부에서는 수직 변위가 작게 나타나 보강 효과가 나타났으나 H형강 사이의 셸 플레이트 부위에서는 Case3과 비슷하게 나타났다. 초기 콘크리트 타설 단계인 Step1에서는 전체적인 응력 값은 Case3의 경우에 가장 큰 응력 분포를 나타냈으며 같은 7 mm 두께의 Roof 플레이트에서도 Case4의 경우엔 H형강의 보강이 이루어져 응력 값이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 수직변위의 경우 H형강으로 보강이 이루어진 경우에도 변위 값의 감소효과가 그렇게 크지 않았으나, 상당응력값으로 비교한 결과 보강효과가 큰 것으로 나타났다.

### 3.3. 압력 변화에 의한 영향

콘크리트 타설 작업이 이루어 지는 동안 Roof 구조의 안정성을 위하여 내부에 압력을 부하하게 된다. 이러한 압력 값의 변화에 의한 Roof 구조의 변위 거동 및 응력값에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 실제 시공시에 가압된 압력 보다 작은 압력을 부하한 상태에서

## 설계 변수 변화에 따른 LNG 저장탱크 Steel Roof 거동 분석

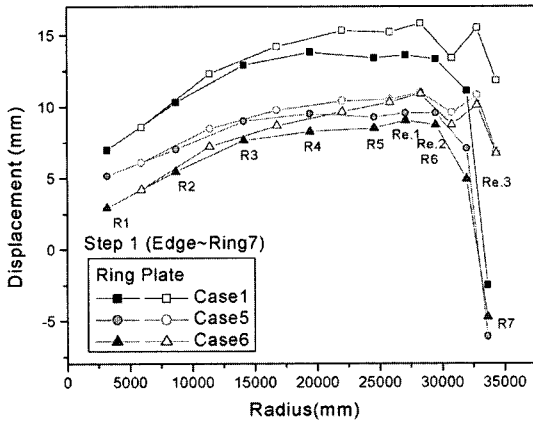


Fig. 8. Comparison of displacement from differentiate the inner pressure.

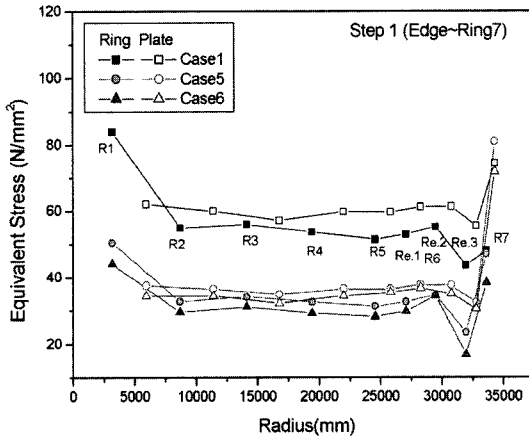


Fig. 9. Comparison of equivalent stress from differentiate the inner support pressure.

기존의 H형강을 그대로 적용한 Case5와 H300형강을 사용하여 보강이 이루어진 Case6의 수직 변위와 상당 응력 결과를 Fig. 8~9에 나타냈다. 내압과 외압이 동시에 작용하는 Step1의 경우에는 벽체에 가까운 부분에서는 압력에 의한 영향이 크게 감소 하는 현상이 발생한다. 즉 Fig. 6과 같이 Step1에서는 Ring6을 기준으로 크게 감소하는 현상이 나타나났다. 이러한 현상은 벽체부의 콘크리트 타설량이 커서 압력 하중을 초과하는 콘크리트 하중이 부하되어 이 부분에서의 지배적인 거동이 처짐 변위가 발생 하며 이러한 현상에 의해 벽체부에 인접한 부위에서 내부 압력에 의한 효과가 상쇄되어 비슷한 거동이 나타났다. Fig. 9의 상당응력 결과를 비교하면 내부 압력이 작용하는 경우에는 0.02634 N/

mm<sup>2</sup>이 작용하는 경우인 Case1에서 모든 응력값이 최대값을 가졌으며 Case5~6와 같이 압력을 감소한 경우엔 내부압력 감소로 인한 전체적인 응력값이 감소 하였으며 벽체에 가까운 플레이트부의 응력이 집중되어 크게 증가하였다. 전체적인 Steel Roof 부에서 응력값이 낮은 값을 보였으나 응력 집중부에서 응력값이 크게 증가하여 한 쪽으로 응력이 집중되는 것으로 나타났다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 지하식 LNG 저장탱크 Roof 구조의 콘크리트 타설 시공시의 거동에 대한 해석 및 축정을 하여 분석을 하였으며 이를 이용한 설계변수에 따른 구조물의 거동을 해석을 하였다. 설계변수인 Steel Roof의 두께 변화, 내압변화가 이루어졌을 때 H형강의 크기 변화에 의한 보강 효과를 주로 조사하였다. H형강의 증대에 의한 보강이 이루어질 경우 수직 변위 및 상당응력의 값이 감소하는 것으로 나타났으나 응력이 고르게 분포 되기 보다는 응력 집중부가 나타나는 현상을 보였다. 따라서 Steel Roof의 거동은 설계변수에 따른 수직 변위 및 응력이 발생하므로, LNG저장탱크 Roof 설계시엔 본 연구결과를 기본으로 경제성 및 시공성을 고려하여 설계변수의 조합에 의한 최적 설계가 필요하다.

## 참고문헌

- [1] API Standard 620 Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks, (2002)
- [2] Flat-bottomed, Vertical, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service BS7777", (1993)
- [3] Japan Gas Association Committee, "Recommend Practice for LNG Inground Storage Tank", (2002)
- [4] 渡辺英雄, "LNG地下式貯槽コンクリート屋根の設計と施工", NKK Technical Report, No.132 pp.70-77, (1990)
- [5] 高木淳, "大容量LNG地下タンクの開発と建設 セメントコンクリート", No.587, pp.14-20, (1996)
- [6] 大矢弘史, "大形タンクドーム屋根の座屈解析", Ichigawajima-Harima Technical Report, 42(1), (2002)
- [7] 이강원, "LNG저장탱크 Roof 설계에 관한 연구", KIGAS, 6(1), 32-37, (2002)
- [8] 최창근 외, 지하식 LNG 저장탱크의 개선된 유한요소해석 모델, 5, 1175-1182, (2003)