



콘크리트 타설에 따른 지하식 LNG 저장탱크 컴프레션링 거동 분석

†김영균 · 김지훈 · 윤인수 · 오병택 · 양영명

한국가스공사 연구개발원

(2005년 1월 13일 접수, 2005년 5월 31일 채택)

The Analysis of Inground LNG Storage Tank Compression Ring Behavior during Concrete Pouring

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

KOGAS R&D Division

(Received 13 January 2005, Accepted 31 May 2005)

요 약

LNG저장탱크에서의 컴프레션링의 역할은 콘크리트 벽체에 고정되어 Steel 루프 플레이트를 연결 지지하는 것이다. 구체적으로는 한쪽 끝부분은 콘크리트 벽체에 묻혀 고정되며 다른 쪽 끝부분은 루프 플레이트와 용접 연결되어 중첩된다. 이러한 조건에서 예측되는 하중 조건인 자중, 내부압력 및 콘크리트 무게에 대한 충분한 안전성을 확보하도록 설계 되어야 한다. 본 논문에서는 유한요소법과 실제 시공 시 측측을 통해 획득한 데이터를 이용하여 콘크리트 타설 시공에 따른 컴프레션링의 거동을 파악하였다. 또한 설계변수 변화에 따른 컴프레션링의 거동을 분석한 결과를 기본으로 하여 보다 합리적인 설계법을 제시하고자 하였다.

Abstract - Functions of the compression ring plate fixed at the concrete side wall are to connect and support the steel roof plate. It should be designed to endure stably all the loads such as weight of steel roof, inner pressure and concrete weight. Behavior of the compression ring during construction has been analyzed by the finite element method and real measured data. Additionally, on the basis of results from parametric study of design variables for the steel roof, a more reasonable design method for the compression ring has been proposed.

Key words : LNG Storage Tank(LNG저장탱크), Compression Ring(컴프레션 링), FEM(유한요소해석), Design Variables(설계변수), Concrete Hydration(콘크리트 양생)

I. 서 론

LNG 저장탱크 용량이 대형화됨에 따라 안전성을 확보하기 위하여 원통 쉘 구조의 측벽과 원판 형태의 바닥판에 철근 콘크리트로 시공 건설 된다. 루프는 돔 형상을 갖는 구조물로서 벽체 정상부에 지지 되어진 강관의 구형 쉘 구조로 구성되며 루프 프레임에 고정 지지된 서스펜디드데크 상부에 단열재를 설치하여 단열하는 방식이 주로 사용된다. 초기 1970년대 LNG 저장탱크에는 Steel 만으로 루프를 시공하였으나 외부의 충격 등에 대비하여 Steel 루프 상부를 콘크리트로 타설 시공하는 복합구조를 구성하여 안전성을 확보하고 있다. 컴프레션링은 한쪽 끝이 콘크리트 벽체 내에 설치

고정되어 다른 한쪽 끝이 Steel 루프 플레이트부와 용접 결합하여 지지하는 구조를 가지고 있다. 컴프레션링의 주 기능은 벽체에 고정되어 강제 루프의 자중 그리고 콘크리트 타설 시공에 의해 부하되는 하중을 지지하는 구조로서 안전성 및 안정성이 특히 요구되는 구조이다.

본 연구에서는 LNG 저장탱크 건설시 특히 콘크리트 타설시 컴프레션링의 거동 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 한국가스공사 인천생산기지에 적용 건설된 #213호기 지하식 LNG 저장탱크에 실제 콘크리트 타설 시공 과정에서의 컴프레션링의 거동을 이론과 측정을 통하여 분석하였다. 유한요소해석 프로그램을 (LUSAS) 사용하여 컴프레션링의 거동을 이론적으로 파악하였다. 또한 타설된 콘크리트 각 부분의 수화열 온도를 측정하여 수화열이 미치는 영향을 검토하였으

†주저자:kyk@kogas.re.kr

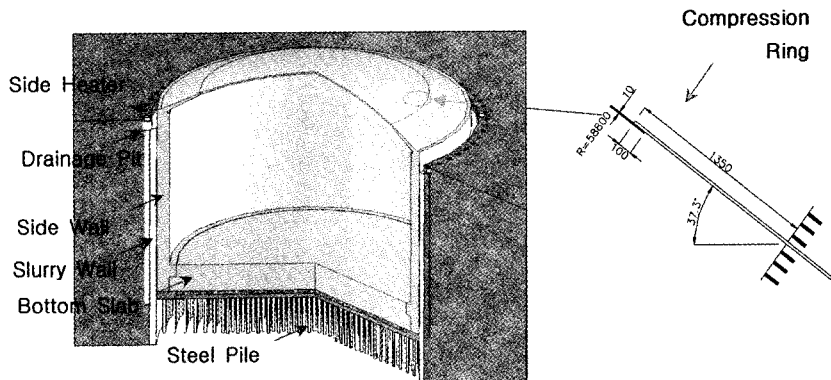


Fig. 1. Inground LNG storage tank.

며, 광과기를 이용하여 컴프레션링의 수직 변위를 측정하여 해석 결과와 비교하여 해석결과에 대한 신뢰성을 부여하였다. 이를 토대로 LNG 저장탱크 컴프레션링의 독자적인 해석·설계 기술을 확보하기 위한 기초 자료를 제공할 수 있도록 하고자 한다. 지하식 저장탱크의 전체 형상 및 컴프레션링의 자세한 형상은 Fig. 1에 나타냈다.

II. LNG저장탱크 Roof 해석

2.1. 시공 절차

LNG저장탱크의 시공절차는 Fig. 2(a)와 같이 탱크 바닥 면에서 빔과 루프 플레이트를 용접 작업 후 서스펜디드데크 작업을 한 후에 (b)와 같이 루프 내부에 공기압을 가압하여 그 압력으로 일정한 속도로 부상하여 완전히 상승하였을 때 미리 벽체에 설치 고정된 컴프레션링에 용접 고정한다. 이렇게 Steel 루프의 설치 작업이 완료된 후엔 (c)와 같이 철근을 배열한 후 (d)와 같이 콘크리트 타설에 의하여 시공 작업을 마치게 된다. 따라서 LNG 저장탱크가 건설완료 후의 루프 거동은 Steel과 콘크리트로 이루어진 복합 구조로서 거동하며 탱크 내부의 기밀유지는 Steel 루프에서, 내압 및 외

부의 충격 하중에 대해서는 콘크리트 루프에서 지지하게 된다. 결국 Steel 루프의 주된 기능은 탱크 시공 중에는 콘크리트 타설 시의 외부 하중을 지지하는 거푸집 기능을, 운전 중에는 내부 기밀을 유지하는 기능을 필요로 하게 된다. 구조적 특징은 단순하게 플레이트 구조를 갖는 일반 압력용기와는 구조가 달리 플레이트의 두께 이외에도 플레이트를 지지하며 안정적인 구조를 위해 보강하는 H 빔과 후판으로 벽체에 고정되어 벽체와 루프 플레이트를 연결해주는 기능을 가진 컴프레션링 플레이트와 같이 연동을 하게 된다.

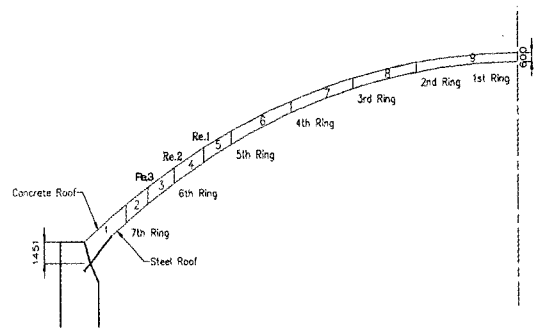


Fig. 3. Pouring concrete procedure on steel roof.

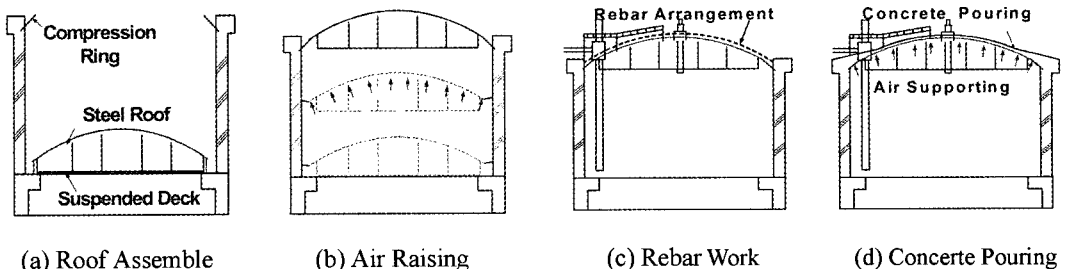


Fig. 2. The construction procedure of LNG storage tank roof structure.

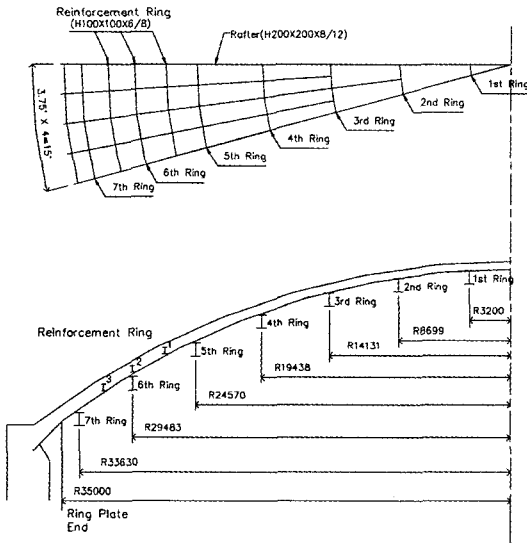


Fig. 4. The configuration of roof plate and beam.

2.2. 유한요소해석

유한요소 해석은 LUSAS13.4 프로그램을 이용하여 선형 해석을 수행하였다. Steel 루프의 경우 루프 플레이트와 플레이트 하부에 용접 설치된 빔으로 구성된다. 루프 플레이트와 컴프레션링은 셸 요소를 빔에는 빔요소를 적용하여 해석을 수행하였다. 특히 빔 엘리먼트와 셸 엘리먼트의 복합 구조에서는 빔 요소에 편심을 주어 해석을 하였다. 빔 요소는 6자유도($u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)를 가지며 전단 변형을 포함하는 3차원 빔요소를, 셸 요소는 각 코너의 절점에서는 3자유도(u, v, w)를 갖고 중간점에서는 5자유도($u, v, w, \theta_1, \theta_2$)를 갖는 Shell 요소를 사용하였다. 모델은 대칭성을 고려하여 180°를 해석 대상으로 하였으며 루프 최상 부는 특이성을 제거하기 위하여 인위적인 빈 구멍으로 모델링을 하였다. 경계조건은 루프 하단 벽체 고정부는 전체를 구속 하였으며 대칭면에는 대칭 구조를 부여하였다.

또한 Steel 루프 플레이트, 컴프레션링 그리고 빔 모두 ASTM-A516 Gr.70 재료로 구성되었다.

III. 컴프레션링 거동 분석

3.1. 온도 측정

온도 측정부위는 컴프레션링에 인접한 곳에 두께에 따라 3개의 온도 센서를 설치하여 측정하였다. Fig. 3에는 콘크리트 타설 절차를 Fig. 5에는 콘크리트 타설 시 발생하는 수화열에 의한 온도변화를 나타냈다. 온도 측정 결과 콘크리트가 타설되는 동안 최대 온도가 측

Table 2. Load conditions specification at compression ring (Unit : N/mm²).

Load Case	Pressure Load	Concrete Load
Pr.	0.02634	×
Step 1	0.02634	-0.0291
Applied Area	All	Edge ~ 7th ring

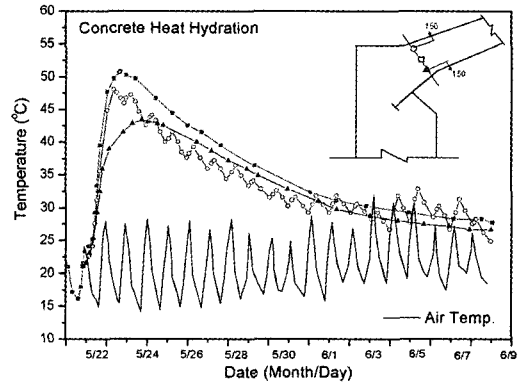


Fig. 5. Measured temperature in compression ring plate.

정되었으며 그 후에는 점진적으로 온도 감소가 진행되어 대기온도와 비슷한 온도로 안정화 되었다. 두께에 대한 온도 분포는 타설 중 및 타설 후 모두 콘크리트 두께 중간부에서 발생하였다. 온도를 측정한 결과 Steel 루프에 미치는 영향은 온도 하중으로 고려하였을 때 대기온도와 비교하였을 때 최대 35°C이며 이 조건에서 열팽창계수를 고려하였을 때 컴프레션링의 구조에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

3.2. 컴프레션링 변형 거동

Fig. 6에는 Steel 루프에 내압이 작용하는 조건에서 Fig. 7에서는 콘크리트가 타설되는 조건인 Step 1에서

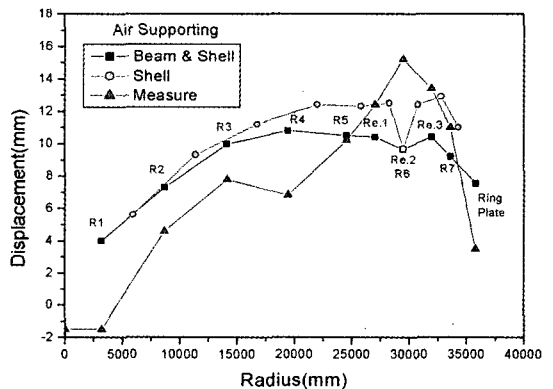


Fig. 6. The steel roof behavior during inner pressure loaded.

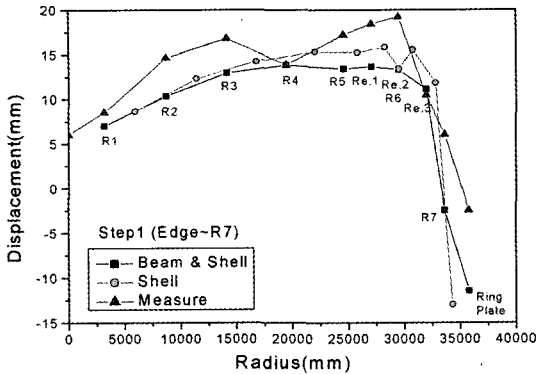


Fig. 7. The steel roof behavior during concrete pouring.

의 거동을 광파기로 측정된 값과 해석에 의한 값을 비교하여 나타냈다. 내압에 대한 수직 변위 상승 값과 콘크리트 하중에 대한 수직 변위 처짐 값 모두 해석 값이 크게 나타났으며 전체적으로 안정적 거동 특성을 보이고 있다. 루프 최상 부는 내압 작용시 수직방향 처짐이 발생하는 것으로 나타났는데 이는 이 부위에 노즐이 설치되어 이에 의한 자중 등에 의한 영향으로 이러한 현상이 나타났다.

3.3. 설계변수 변화시 컴프레션링 거동

Table 3에는 설계변수에 변화에 의한 컴프레션링 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 해석에 적용된 Case 별로 하중을 나타내었다. Fig. 8에서는 컴프레션링 두께를 관련 규격에서 요구하는 최소 두께인 14.9 mm를 사용하였을 때와 실제 건설에 적용된 20 mm 두께의 경우에 대하여 해석을 수행하여 그 특성을 비교 도시하였다. 루프 플레이트와 컴프레션링이 겹쳐져 있는 부위는 두께가 중첩에 의해 증가하여 변위 및 응력 값이 감소하는 것으로 나타났다. 컴프레션링 플레이트의 두께에 따른 거동의 차이가 약간 발생하였으나 콘크리트 타설 작업이 진행되면서 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 연속적인 타설이 진행됨에 따라

Table 3. Load cases (Design Variables).

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

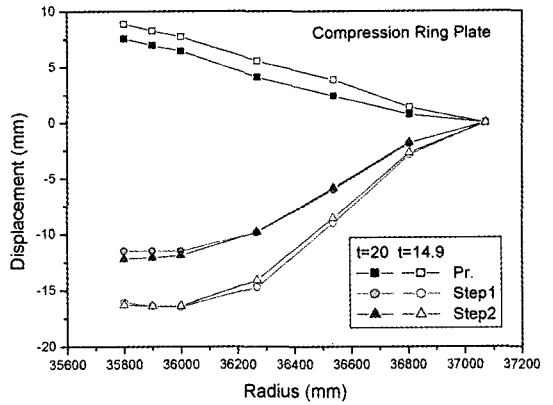


Fig. 8. Comparison of displacement from differentiate the thickness.

내압과 외압의 균형이 맞게 되어 처짐 현상이 상쇄되는 것으로 판단된다.

루프 플레이트의 두께 변화에 의한 컴프레션링의 변형 거동특성은 Fig. 9~10에 나타났다. 내압이 작용하는 중에는 컴프레션링은 Case 3과 같이 H형강의 보강시킨 경우에도 효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 외압이 작용하는 Step1에서는 Case 3의 경우 컴프레션링의 수직 변위가 Case 2보다 감소되어 Case 1과 비슷하게 나타나 수직하중 작용시엔 H형강의 보강에 의한 효과가 나타났다. 수직 하중에 대해서는 H형강의 보강에 의해 거동의 안전성을 확보할 수 있는 것으로 판단 된다.

콘크리트 타설 하중을 지지하는 내부 압력을 감소한 경우와 큰 H형강을 사용하여 보강을 한 경우에 대한 컴프레션링의 변형 거동에 대한 해석결과를 Fig. 11~12에 나타났다. Case 1과 비교하여 내부 압력이 감소하는 Case 4, 5의 경우에는 변위 값이 큰 차이를 보였다. 즉

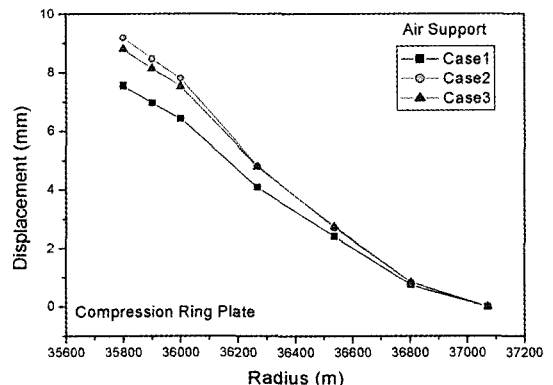


Fig. 9. Comparison of displacement from differentiate the Roof thickness (Pr.).

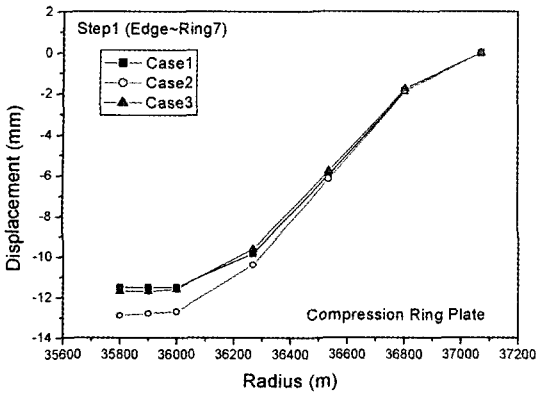


Fig. 10. Comparison of displacement from differentiate the Roof thickness (Step1).

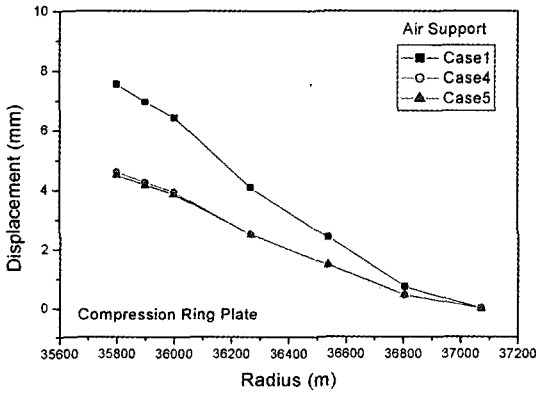


Fig. 11. Comparison of displacement from differentiate the inner Pr. (Pr.).

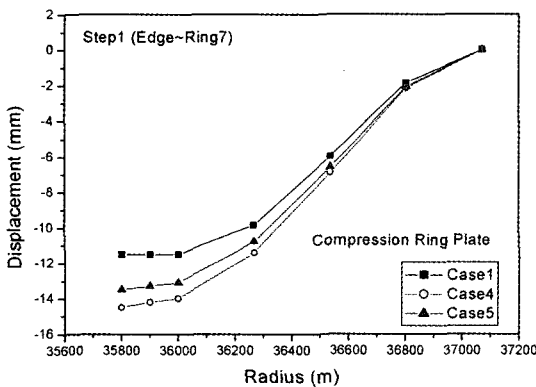


Fig. 12. Comparison of displacement from differentiate the inner Pr. (Step1).

압력 감소에 의해 수직 변위 값이 크게 감소하였으며 콘크리트 타설이 진행되어 외부압력이 작용한 경우엔 Case 5의 거동은 Case 4보다는 변위의 감소가 작았다.

그러나 이를 Case 1의 거동과 비교하면 변위 값이 크게 달라지지 않아 H빔의 보강에 의한 효과가 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

따라서 외부 압력 부하의 경우엔 더 큰 H빔 적용에 의한 보강이 이루어진 보강설계의 경우에도 컴프레션 링 변위등 거동에 미치는 영향은 그다지 크지 않을 것으로 예측된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 지하식 LNG 저장탱크 시공에 따른 컴프레션링의 거동 해석 및 측정을 통하여 실제 거동 분석 및 설계변수 변화에 따른 거동을 예측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 저장식 온도센서를 이용하여 콘크리트 수화열 온도를 측정된 결과, 콘크리트 두께중 중앙부에서 최대 온도가 발생 하였다. 측정 온도와 대기온도를 고려한 결과 콘크리트 타설에 의한 수화열 발생이 Steel 루프 구조물에 미치는 영향은 미비할 것으로 판단되었다.

2. Air Support 압력 및 최대 콘크리트 하중이 부하되는 조건에서의 광파기를 이용한 수직 측정 값과 해석 값을 비교한 결과 근사한 거동특성을 보였으며 이를 통해 유한요소해석의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

3. 설계변수 중 루프 플레이트 두께 감소시 H형강 보강의 경우에 대한 거동특성을 분석한 결과 보강이 이루어질 경우 변위 및 응력 감소 효과가 큰 것으로 나타났다.

4. 설계변수 중 내부압력 감소 하중조건에서 H형강 보강의 경우에 대한 거동특성을 분석한 결과 보강이 이루어질 경우 변위 및 응력 감소 효과가 있으나 그리 크지 않은 것으로 나타나 내부 압력은 일정 압력 이상으로 지지하여야 하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] API Standard 620 Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks
- [2] Flat-bottomed, Vertical, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service BS7777"
- [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 Jan., pp. 14-20, (1996)

콘크리트 타설에 따른 지하식 LNG 저장탱크 컴프레션팅 거동 분석

- [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) 국가스학회 논문집, **6(1)**, 32-37, (2002)
- [7] 이강원, “LNG저장탱크 Roof 설계에 관한 연구”, 한
[8] 최창근 외, 지하식 LNG 저장탱크의 개선된 유한요
소해석 모델, **5**, 1175-1182, (2003)