

LNG저장탱크 코너프로텍션의 설계 최적화에 관한 연구

김형식* · 홍성호* · 서흥석*

(2004년 4월 19일 접수, 2004년 6월 14일 심사완료)

A Study on the Design Optimization of Corner Protection for LNG Storage Tank

Hyungsik Kim, Seongho Hong and Heungseok Seo

Key Words: LNG Storage Tank(LNG저장탱크), Corner Protection(코너 프로텍션), Optimum Design(설계 최적화), Design Guideline(설계지침)

Abstract

The full containment Liquefied Natural Gas(LNG) storage tank is based on a double liquid container concept : two separate containers, one within the other, are capable of containing the LNG. The outer concrete tank provides corner protection(secondary containment) to withstand and safely contain any spill from the inner tank. The corner protection is installed on inside corner surface of outer concrete tank. Because of high and complex stresses, corner protection is designed by ASME section VIII Div. 2, Appendix 4 on behalf of API 620 which is main design code for LNG tank. Design guidelines to determine design factors such as liner thickness and knuckle radius are not well understood because Appendix 4 is the design method not based on equation but FEM. Recently, the volume of LNG tank shows a tendency to increase. So it is necessary to set up the design guidelines to cope with change of LNG tank capacity and height/diameter ratio. In this paper, optimum design of corner protection was performed and the design guidelines were suggested by the results of FEM for LNG tanks which have different capacities and height/diameter ratio.

1. 서 론

한국가스공사에서 운영하고 있는 9%니켈강형 LNG저장탱크는 완전방호식 LNG저장탱크(Full containment LNG storage tank)이다. 완전방호식이란 내조(inner tank)와 외조(outer tank)가 각각 독립적으로 LNG를 저장할 수 있는 기능을 갖는 이중구조의 탱크를 말한다.⁽¹⁾

Fig. 1과 2에 LNG저장탱크의 단면도를 나타내었다. 140,000 m³ 탱크의 경우 반경이 약 40m로 내조의 경우에는 두께 10-25mm의 9%니켈강

이 사용되고 있다. 그리고 내조 바깥 쪽은 스프링싱 질을 갖는 블랭킷(blanket)이 감싸고 있다. 이 블랭킷은 9%니켈강 내조의 수축과 팽창을 흡수하여 열응력이 발생하지 않게 하는 역할을 하고 있다. 그러므로 내조의 설계시에는 열응력은 고려하지 않고 단지 액체의 하중을 견딜 수 있도록 설계한다.

하지만 콘크리트 외조의 경우에 초저온의 LNG를 저장하게 되면 고정되어 있는 바닥과 내면/외면의 온도차에 의해 원통형 하단부에 큰 열적 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 인장응력은 원통형 콘크리트탱크의 설계를 거의 불가능하게 한다. 따라서 코너부에서의 열하중에 의한 인장응력을 감소시키기 위해 Fig. 1, 2에서 보는 바와 같이 높이 5m까지 콘크리트외조 하단부 내면에 단열재인 폼그라스(formglass)를 설치하고 기밀성을 유지하기 위해 5-20mm 두께의 9%니켈강 라이너를 시공하게 되는데 이를 코너프로텍션

† 책임저자, 회원, 한국가스공사 연구개발원

E-mail : hskim@kogas.or.kr

TEL : (031)400-7463 FAX : (031)400-1495

* 회원, 한국가스공사 연구개발원

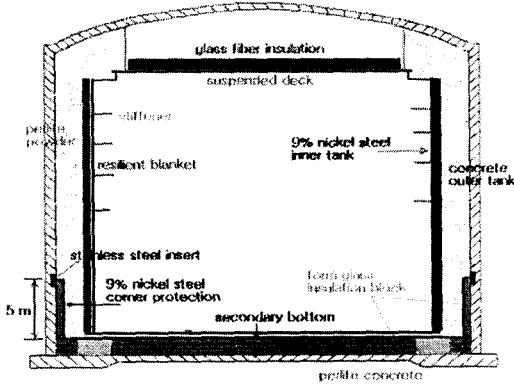


Fig. 1 Cross-sectional view of LNG storage tank

이라 한다.

코너프로텍션의 경우 LNG의 액압하중 뿐만 아니라 상온에서 시공된 9%니켈강이 -170°C 의 LNG온도까지 떨어짐으로써 발생하는 열하중도 함께 받게 되기 때문에 발생하는 응력의 크기가 크며 또한 응력의 상태도 복잡하게 된다. 따라서 이의 설계에는 LNG저장탱크의 주 설계규격인 API620(2)을 사용하지 못하고 유한요소해석에 의해 설계하는 ASME Section VIII, Div. 2, Appendix 4에 따라 설계한다.

이와 같이 유한요소해석에 의해 코너프로텍션이 설계되기 때문에 설계요소의 값을 결정하는 것은 경험에 의존하는 방법밖에 없는 실정이다. 하지만 최근에 LNG저장탱크가 점차 대형화 되고 있고 다양한 높이/직경 비를 갖는 탱크가 설계됨에 따라 경제성제고를 위해 최적화된 설계요소의 결정이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 KOGAS형 코너프로텍션의 설계요소 변경에 따른 응력의 변화를 분석하여 설계 최적화를 수행함과 아울러 탱크의 대형화에 따른 설계지침을 수립하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 코너프로텍션의 구조 및 설계요소

Fig. 2에서 보는 바와 같이 코너프로텍션은 라이너(wall liner), 탑링(top ring), 너클(knuckle)로 구성된다. 라이너는 상부와 하부 라이너로 구분하여 설계한다. 왜냐하면 경제성 향상을 위하여 상대적으로 큰 하중을 받는 하부라이너만을 두껍

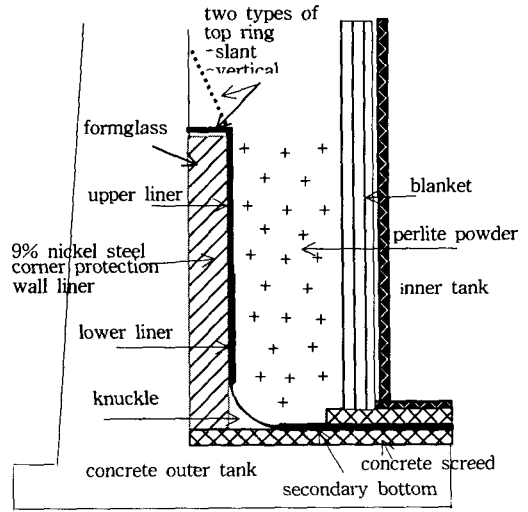


Fig. 2 Detail of corner protection

게 설계하기 위해서이다. 탑링의 경우는 그림에서 보는 바와 같이 수직형 또는 경사형으로 설계된다. 그리고 너클은 일정한 반경을 갖는 원형으로 설계하는데 이는 2차바닥(secondary bottom)의 수축을 효과적으로 흡수하기 위해서이다.

코너프로텍션에 가해지는 하중을 가장 크게 변화시키는 요소는 탱크의 반경과 저장되는 LNG의 높이이다. 탱크의 반경이 커질수록 2차바닥의 수축에 의해 너클에 전달되는 수축하중이 커지게 되며 액체의 높이가 높아지면 액압이 커지게 된다.

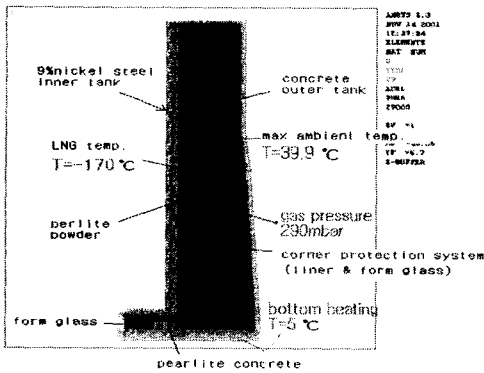
본 연구에서는 이러한 설계요소들 중 다음의 요소들을 변수로 하여 해석하여 그 경향을 분석하였다.

- 탱크의 반경
- 너클의 반경
- 탑링의 형태(수직형, 경사형)

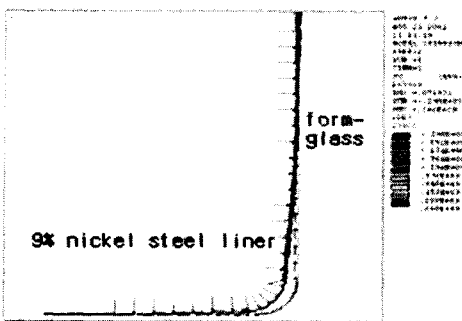
2.2 하중의 전달경로 분석

코너프로텍션에 가해지는 하중은 LNG저장탱크의 상태에 따라 변화하게 된다. 내조에만 LNG가 채워져 있는 정상운전(normal operation)시에 코너프로텍션에 가해지는 하중은 온도하중과 가스압력이다. Fig. 3(a), (b)는 정상운전시 코너프로텍션에 가해지는 하중을 전달하고 있는 상태를 보여준다. 먼저 내조는 -170°C 의 LNG온도 상태에 있으며 콘크리트 외조 바깥면은 최고 대기온도를 유지하고 있으며 바닥히터가 있는 콘크리트 바닥

면은 항상 5°C를 유지하게 된다. 내조 바닥과 2차바닥은 약 5cm의 콘크리트에 의해 분리되어 있으므로 두 부분은 동일한 LNG 온도가 된다. 그러므로 시공 후 정상운전상태가 되면 2차바닥의 수축은 니클과 그 근처의 라이너가 폼그라스로부터 이탈하면서 흡수되게 된다[Fig. 3(b)]. 그리고 나머지 대부분의 라이너의 경우에는 단열재인 퍼얼라이트 가루에 의해 내조와 열적으로 분리되어 있어 상온상태에 있게 된다. 따라서 원주방향으로의 수축은 거의 발생하지 않으므로 폼그라스와 밀착된 상태를 유지하게 된다. 이 상태에서 가스압력이 가해지게 되면 대부분의 라이너의 경우 폼그라스에 밀착되어 라이너+폼그라스가 가스압력하중을 지탱하게 된다. 그리고 일부 하단부 라이너와 니클판이 독자적으로 가스압력을 곱하중 형태로 지탱하게 되는 상태에 있게 된다.



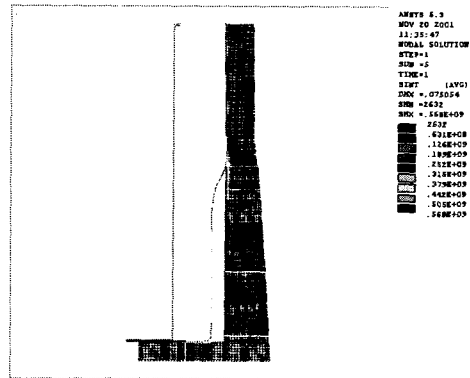
(a) Contacting between liner and formglass



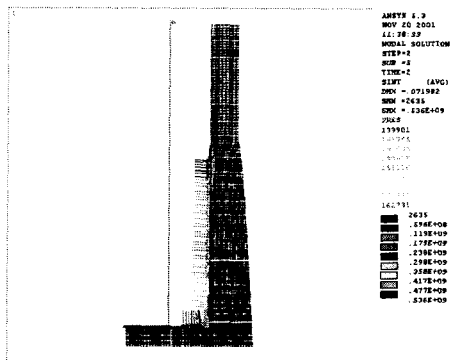
(b) Separation between liner and formglass

Fig. 3 Explanation of load carrying path for corner protection liner at condition of normal operation

내조가 파손된 비정상상태에서는 코너프로텍션 라이너에 LNG가 직접 접촉되어 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 2차바닥의 수축에 의한 하중이 니클에 전달될 뿐만 아니라 라이너 전체가 원주방향으로 수축하면서 라이너가 폼그라스 표면으로부터 완전히 이탈하게 된다. 이러한 상태에서는 LNG의 액위에 따라 하중의 전달 형태가 변경된다. 즉 액위가 낮은 경우에는 라이너가 LNG의 액위에 의한 하중을 모두 지탱하는 상태가 된다. 하지만 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 이탈된 라이너는 특정한 액위하중이 가해지게 되면 다시 팽창하여 폼그라스에 접촉하게 되고 그이후의 액위에 의한 하중은 폼그라스와 라이너가 공동으로 지탱하는 상태가 된다.



(a) Separation



(b) Re-contacting between liner and formglass by LNG liquid pressure

Fig. 4 Explanation of load carrying path for corner protection liner at condition of spillage

2.3 허용응력^(3,4)

ASME Section VIII Div. 2 Appendix 4의 주요 개념은 하중의 유형을 결정하여 각 하중유형에 의해 발생하는 응력에 대해 다른 허용응력을 적용하는 것이다. 예를 들어 압력부품에 내압, 무게와 같은 기계적인 하중에 의해 항복강도 이상의 응력이 발생하면 항복은 가공경화 또는 응력 재분포가 없다면 그 부품이 파괴될 때까지 계속된다. Appendix 4에서 이러한 응력들을 1차응력(primary stress)이라 하고 이들의 주요특징은 변형에 의해 응력이 감소하지 않는 자체한계를 갖지 않는다는 것이다.

반면에 부재에 작용하는 열하중의 경우에는 아주 작고 영구적인 국부변형에 의해 발생하는 응력이 급격히 감소되며 부재를 파괴할 수 있는 능력이 없다. 이러한 응력들은 2차응력(secondary stress)이라 하고 자체한계와 자체평형화 특징을 갖고 있다.

Appendix 4에서는 파괴까지 도달하게 하는 1차하중에 대해 외형의 지나친 뒤틀림을 방지할 정도의 응력을 허용하며 2차하중과 연관되어서는 1, 2차 하중의 합이 반복 부하시 래킷팅이 일어나지 않는 조건을 한계응력으로 하고 있다.

1차하중에 의한 외형의 지나친 뒤틀림 방지조건이란 멤브레인응력(Pm)만이 존재하는 지역에서는 전체 단면에 걸쳐 Pm이 항복강도를 넘지 않아야 하며 굽힘응력(Pb)이 존재하는 경우에는 전단면에 걸친 항복이 일어나지 않는 조건인 Pm+Pb 를 항복강도의 1.5배까지 까지 허용한다.

1, 2차 하중합의 허용응력과 연관된 래킷팅이란 하중의 반복에 의해 소성변형이 축적되지 않는 조건이다. 즉 구조물이 연속적인 하중의 반복을 받은 후에 다시 탄성거동을 할 수 있는 하중이라면 최초의 수회에 걸친 소성변형을 허용한다는 것이다. 이와 같이 소성 변형 후에 다시 탄성거동을 하게 되는 현상을 셰이크다운이라 하며 셰이크다운이 일어날 조건은 전체하중이 항복강도의 2배를 초과해서는 안 된다.

Table 1에 항복강도가 400MPa인 9%니켈강 용접금속부에 대해 안전계수를 1로 사용할 경우의 허용응력을 나타내었다. 발주자의 요건에 따라 이러한 안전계수는 1보다 낮은 값을 사용할 수 있다. 그리고 코너프로텍션은 모재보다 강도가 낮은 용접금속을 기준으로 설계되고 있다.

Table 1 Allowable stresses for 9% nickel steel weld

	weld YS (MPa)	Primary stress(MPa)		total (2YS)
		Pm (YS)	Pm+Pb (1.5YS)	
stress(MPa)	400	400	600	800

2.4 유한요소 해석과 모델링

해석에는 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.3을 사용하였다. 요소는 열해석과 기계적해석이 가능한 plane 13을 사용하여 축대칭조건으로 원통형탱크의 단면을 모델링하였다. Fig. 3.에서 보는 바와 같이 모델에는 9%니켈강 내조, 콘크리트, 폼그라스 등이 포함되어 있다.

모델링시 2차바닥 및 내조바닥의 수축에 의한 변위가 코너프로텍션에 가해질 수 있도록 2차바닥과 주변 콘크리트 스크리드를 별개로 모델링하고 x, y 축 커플링을 하여 콘크리트의 온도분포에 따른 수축하중이 2차바닥에 전달되도록 하였다. 그리고 라이너가 각 해석조건에서 가스와 LNG 액압 독자적으로 지탱하거나 혹은 폼그라스와 공동으로 지탱할 수 있도록 라이너와 폼그라스 사이와 2차바닥과 콘크리트스크리드 사이 일부에 하중전달이 일어나도록 contact 48 요소를 삽입하였다.

그리고 해석은 먼저 전체하중을 가하여 해석한 후 다시 열하중 등 2차하중을 가해서 해석하였다. 1차하중에 의한 응력의 경우에는 전체하중에 의한 결과에서 2차하중에 의한 결과를 산술적으로 빼기를 함으로서 구하였다.

2.5 해석결과 분석

설계 최적화 및 탱크형상(높이/직경 비)에 따른 설계가이드라인을 제시하기 위해 탱크반경, 라이너의 두께, 탐링의 형태, 너클의 반경을 변화시키면서 약 100개의 유한요소해석모델에 대하여 해석하여 허용응력의 초과여부를 검토하였다.

2.5.1 1차응력

a. Pm 응력⁽⁴⁾

순수 멤브레인 응력인 Pm의 경우 주로 탐링과 너클에서 떨어져 있는 라이너에서 발생한다. 콘크리트 외조가 LNG를 저장하는 경우 코너프로텍션 라이너는 다음과 같은 거동을 보이게 된다.

- -170℃의 LNG가 접촉하면 라이너가 반지름

방향으로 수축함으로서 폼그라스로부터 이탈된다. 이탈되는 크기는 $\Delta R_{th} = \alpha \cdot R \cdot \Delta T$ 에 의해 계산된다. 여기서 ΔR_{th} : 수축량, α : 열팽창계수, R: 탱크의 반경, ΔT : 온도차이다.

· 이탈상태의 라이너는 다시 LNG의 무게와 가스압력에 의해 반지름 방향으로 팽창이 일어나 폼그라스 표면에 다시 접촉하게 된다. 이러한 과정은 $\Delta R_p = P \cdot R^2 / E \cdot t$ 로 표현된다. 여기서 ΔR_p : 압력에 의한 팽창, P: 압력, R: 반지름, E: 영의 계수, t: 라이너의 두께이다.

그러므로 폼그라스로부터 이탈되었던 라이너가 압력에 의해 다시 접촉되는 상태에서의 Pm값을 계산하면 $P_m = PR/t = \alpha \cdot \Delta T \cdot E$ 가 된다. 여기서 설계상에 중요한 정보를 얻을 수 있다. 즉 코너 프로텍션 라이너에 발생하는 1차하중에 의한 Pm값은 탱크의 반경, 라이너의 두께와 무관하게 $\alpha \cdot \Delta T \cdot E$ 에 의해 결정되게 된다. 따라서 9%니켈강 라이너의 경우에는 Pm값이 $9.8E-6/^\circ C \times 190^\circ C \times 210E9 Pa = 377MPa$ 이 된다. 이는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 액위 24m를 지탱하고 있는 라이너 단면에서의 평면응력성분 Pm값인 368Mpa와 거의 일치하고 있다.

그리고 라이너의 두께가 두꺼워지면 최대 Pm값이 나타나는 액위가 증가하게 된다. 물론 폼그라스와의 재접촉이 일어나지 않도록 충분히 두껍게 설계하여 Pm값을 377MPa 이하로 설계할 수도 있지만 이는 경제성이 없는 설계라 판단된다. 그리고 일단 라이너가 다시 폼그라스에 접촉하게 되면 액체의 하중을 폼그라스와 라이너가 공동으로 지탱하게 되는데 상대적으로 폼그라스의 단면적이 넓기 때문에 그 이후의 액체의 무게 하중의 경우 대부분 폼그라스가 담당하게 된다.

그러므로 굽힘응력이 작용하지 않는 닉클과 탭링에서 멀리 떨어져 있는 라이너의 경우 두께를 9%니켈강 탱크에서의 최소 판재두께인 5mm를 사용하는 것이 가능하다.

b. Pm+Pb

앞에서 결정하였듯이 Pm값이 라이너의 두께와 무관하게 결정되는 재료상수로 주어진다. 코너 프로텍션의 설계의 요체는 어떻게 Pb값을 감소시킬 수 있는가에 있다.

Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 하부 라이너와 닉클의 경우 2차바닥의 수축에 의해 닉클과 함께

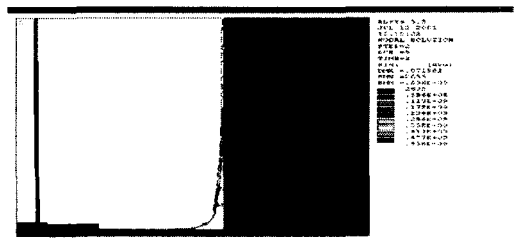
큰 굽힘응력이 발생한다. 이러한 굽힘응력은 닉클의 반경, 탱크의 직경과 밀접한 관계가 있다.

해석결과에 의하면 하부 라이너의 두께를 5mm로 설계하는 것은 닉클의 반경에 무관하게 과도한 굽힘응력이 발생하여 설계가 불가능하였다. 따라서 바닥의 수축에 의한 굽힘응력을 견디기 위해서는 닉클의 반경을 적절히 조절하고 하부 라이너의 두께를 최소 10mm로 설계해야 했다. Fig. 6은 닉클 반경 0.275m에서 탱크의 반경에 따른 최대 Pm+Pb응력을 보여주고 있다. 탱크 반경 30, 40m에서는 닉클의 반경을 0.275로 하였을 때 탭링의 형태에 무관하게 발생하는 응력이 허용응력인 600Mpa.이하였다. 하지만 탱크의 반경이 50m인 경우에는 경사형 탭링만이 허용응력을 초과하지 않는 것을 볼 수 있다.

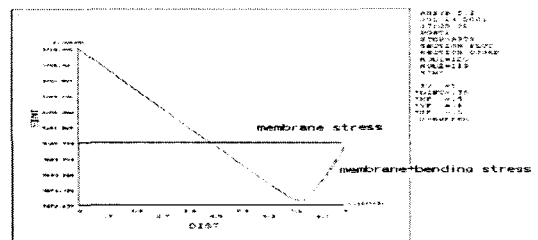
2.5.2 전체하중

하단부 라이너의 두께를 10mm로 하고 상단부 라이너를 5mm로 하였을 때 반경 30, 40, 50 m 탱크에 대해 수직형과 경사형 탭링에서의 닉클반경에 따른 전체하중에 의한 최대응력의 변화를 Fig. 7, 8, 9에 나타내었다.

먼저 탱크의 반경이 증가할수록 해석조건에 관계없이 최대 응력이 증가하는 것을 알 수 있다.



(a) Stress contour of liner



(b) Stress linearization of cross-section

Fig. 5 Stress distribution in wall liner at the full spillage condition of 24m LNG pressure

그리고 반경에 상관없이 넉클반경을 0.275m까지 증가시킴에 따라 응력의 크기가 감소하였으며 0.275 m 이상의 넉클 반경에서는 감소의 폭이 크지 않았다. 또한 Fig. 7의 반경이 30m에서의 경우 모든 넉클반경조건에서 수직형 탭링의 경우가 응력의 크기가 작았으나 Fig. 8의 반경이 40m가 되면 넉클반경이 0.165m 초과에서는 수직 탭링이 0.165m 미만에서는 경사형 탭링이 더 높은 응력을 나타냈다. 특히 반경 50m인 Fig. 9에서는 모든 넉클 반경조건에서 경사형 탭링이 낮은 응력을 나타냈다. Fig. 10에 수직형 및 경사형 탭링에서의 탱크의 반경에 따른 탭링에서의 응력변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 탱크의 반경에 상관없이 경사형의 경우가 멤브레인, 벤딩 응력이 낮게 나타났다. 그러므로 수직형 탭링의 경우 큰 굽힘응력에 견딜 수 있도록 콘크리트외조와의 연결부를 설계하는 것이 필요할 것이다.

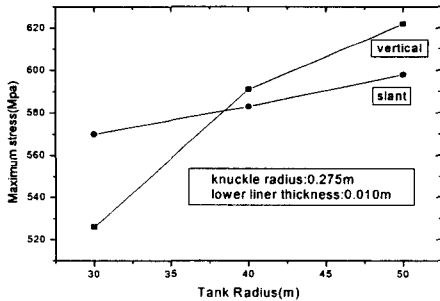


Fig. 6 Maximum Pm+Pb stress variation according to change of tank radius

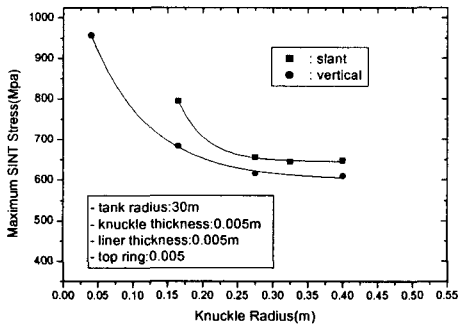


Fig. 7 Maximum stress variation according to change of knuckle radius (Radius=30m, liner thickness=0.005m)

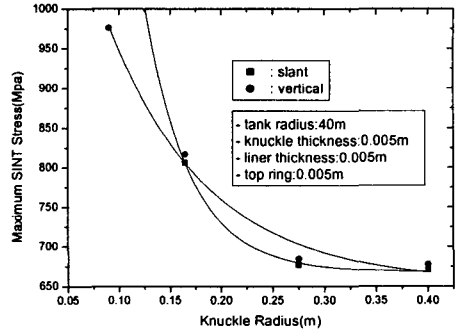


Fig. 8 Maximum stress variation according to change of knuckle radius (Radius=40m, liner thickness=0.005m)

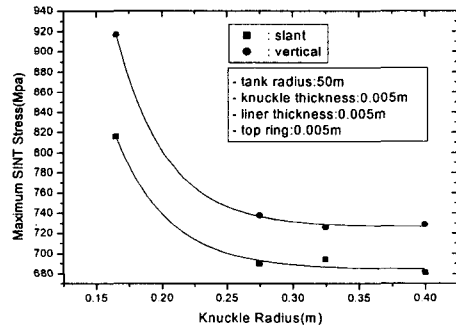


Fig. 9 Maximum stress variation according to change of knuckle radius (Radius=50m, liner thickness=0.005m)

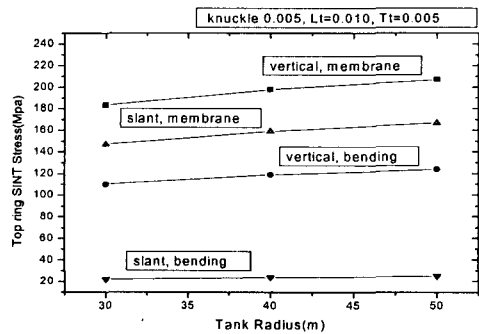


Fig. 10 Stresses in top ring according to change of tank radius

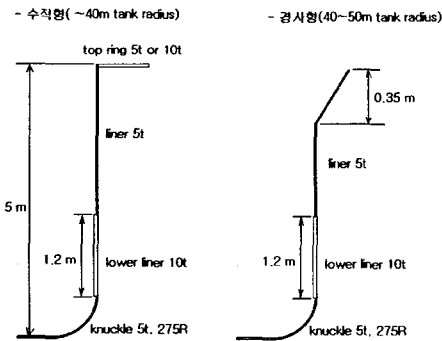


Fig. 11 Suggested optimum design

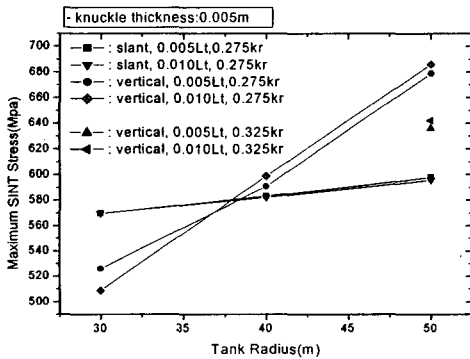


Fig. 12 Maximum stress variation for optimum design according to change of tank radius

2.6 설계 최적화

이상과 같은 해석결과를 토대로 탱크의 반경에 따른 최적 설계를 Fig. 11에서와 같이 제시하였다. 탱크의 반경이 40m 이하에서는 시공성이 우수한 수직형 탭링이 바람직하며 40m를 초과하는 경우에는 경사형 탭링을 최적화 설계로 제시하였다. 그리고 1차하중에 의해 최대응력이 나타나는 라이너 하부를 높이 1.2m까지 10t를 사용하였으며 너클의 반경은 0.275R로 하였다. 이와 같이 최대하중을 나타나는 부분을 부분 보강하여 10t를 사용함으로써 Fig. 12에서 보는 바와 같이 라이너 전체를 10t로 한 경우와 동일한 최대 응력값을 얻을 수 있었다.

3. 결론

다양한 설계조건에 대한 코너프로텍션의 응력 분석을 통하여 다음과 같은 설계지침을 얻을 수 있었다.

(1) 멤브레인 응력인 Pm값의 경우 설계와 관계 없이 주어지는 재료상수로 9%니켈강의 경우 377MPa이다.

(2) 탱크반경이 증가할수록 코너프로텍션의 최대응력의 크기가 증가한다.

(3) 코너프로텍션의 최대응력은 2차바닥의 수축을 얼마나 넉클에서 잘 흡수하느냐에 따라 결정된다. 라이너 두께에 상관없이 0.275m까지 넉클 반경이 증가함에 따라 최대응력이 급속히 감소하였으며 이 이상의 반경에서는 최대응력이 거의 일정한 경향을 나타내었다.

(4) 탱크반경 30m에서는 탭링의 형태를 수직형이나 경사형 모두 설계가 가능하였지만 점차 반경이 증가함에 따라 수직형의 경우 최대응력이 급격히 증가하여 50m에서는 코너프로텍션의 설계가 불가능하였다. 이에 비해 경사형의 경우에는 탱크반경 증가에 따른 응력의 증가가 크지 않기 때문에 탱크반경 50m까지도 경제적인 최적화 설계가 가능하였다.

참고문헌

- (1) Yoon Insu, Lee Yongwon, Hong Seongho and Lee Yongwon, 1994, "Finite Element Analysis of Membrane for Liquefied Natural Gas," *Trans. of the KSME*, Vol .18, No. 10, pp. 2797-2804
- (2) American Petroleum Institute, 1998, "Design and Construction of Large Welded, Low-Pressure Storage Tanks."
- (3) Spence, J., 1994, "Prevessel Design Concept and Principles" E&FN SPON.
- (4) Henry, H., 1986, "Prevessel Design Handbook," VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY.