

멤브레인의 주름 형상이 응력거동에 미치는 영향에 관한 수치적 해석

김청균 · 이영숙 · 차백순 · 김영규* · 윤인수** · 홍성호**

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터, *한국가스안전공사, **한국가스공사
(1997년 10월 30일 접수, 1997년 11월 7일 채택)

Numerical Analysis on the Stress Behaviours Due to Geometry Effects of the Membrane Corrugation

Chung-Kyun Kim, Young-Suck Lee, Baeg-Soon Cha,
Young-Gyu Kim*, In Soo Yoon** and Seong Ho Hong**

*Tribology Research Center, **Korea Gas Safety Co., ***Korea Gas Co.

(Received 30 October 1997; accepted 7 November 1997)

요 약

본 논문에서는 비선형 유한요소해석 프로그램을 이용하여 초저온 액체에 의한 정압과 열하중을 받는 멤브레인 구조물의 응력거동과 응력수준을 6가지 주름모델에 대한 수치적 해석결과를 제시하였다. 멤브레인 판재의 상면을 따라 최대 평균법선 응력분포에 관한 여러 가지 기하학적 주름의 3차원 해석을 수행하였고, 이들 주름형상에 대한 유한요소해석 결과를 비교·고찰하였다. 링 마디식 모델의 주름 형상은 작은 코너반경과 정점 곡률을 갖는 테크니가스식 주름에 비하여 효과적으로 거동하고 있음을 보여주고 있다. 유한요소해석 결과에 의하면 LNG 저장탱크에 이들 모델을 사용할 경우 링 마디식 주름이 여타 주름 모델에 비하여 가장 깊은 180m에서도 사용될 수 있음을 보여준다.

Abstract - This paper presents the numerical results of six corrugation models which compute the stress behaviours and stress levels of the membrane structure under the hydrostatic pressure of cryogenic liquids and thermal loadings using a non-linear finite element analysis program. A three-dimensional analysis of various corrugation geometries was performed on the maximum mean normal stress distributions along the upper surface of the membrane sheet. Comparisons of the FEM results for various geometry models of the corrugation are presented, which shows that the corrugated configuration of the ring knot model can be effectively performed for the combined forces such as the hydrostatic pressure and thermal loading in comparison with the Technigaz type corrugation which has small corner and apex curvatures. The FEM results show that the ring knot corrugation can be used for the deepest depth, 180m of the LNG storage tank in comparison with other corrugation models.

Key words : Membrane, Ring knot, Corrugation, Stress behaviours, Maximum mean normal stress

1. 서 론

액화천연가스(LNG)를 안전하게 저장하기 위하여 개발된 저장탱크는 크게 멤브레인식 저장탱크와 9% 니켈 강재식 저장탱크의 두가지가

있다. 전자는 304 계열의 저탄소 스테인레스 판재에 특수한 형상을 갖는 주름을 제작하여 천연가스의 액화중이나 -162°C 의 열응력 변형에 잘 견디도록 한 것이고, 후자는 열팽창 계수가 대단히 작은 9% 니켈 강재를 사용하여 제

작한 저장탱크로 두가지 모델 모두가 현재 사용중에 있다.[1]

최근에는 액화천연가스의 대량소비 추세에 따라서 토지 이용과 저장 효율, 건설비용, 환경문제, 가동률 용이도와 단순성, 유지·보수와 안전성 측면을 고려한 200,000m³의 멤브레인식 초대형 저장탱크 2기를 1996년에 일본에서 세계 최초로 가동하였고, 추가로 2기를 건설중에 있으며, 한국에는 동급의 초대형 저장탱크 2기를 금년말에 착공할 예정이다.[2] 이러한 멤브레인식 저장탱크의 초대형화 추구는 기존의 9% 니켈강재식으로는 초후판의 용접성과 자중량 증가로 인한 저장탱크의 안전성 측면에서 많은 문제점을 제기하기 때문에 멤브레인 방식의 저장탱크 건설에 보다 많은 관심을 기울이고 있다.

멤브레인 판재는 액화천연가스를 저장하기 위한 초저온 저장 탱크의 내부 구조물, 즉 내조(inner tank)로 사용한 멤브레인 구조물은 온도와 하중변화에 유연하면서도 안전하게 거동할 수 있도록 설계·제작되어야 한다. 즉, 멤브레인은 저장탱크의 최내측에 설치하여 액화천연가스와 직접 접촉하면서 -162°C의 열하중(thermal loading), 유체 정하중 및 동하중(hydro-static and hydrodynamic loading), 가스하중(gas loading) 등에 견딜 수 있도록 제작된 특수한 판재이다.

다수의 멤브레인 유니트를 용접하여 제작한 멤브레인 패널은 LNG 저장탱크의 핵심기술로 탱크의 측면(side wall)과 바닥면(bottom)에 설치되어 초저온 액체의 누설을 방지하는 역할을 1차적으로 수행하고, 저장된 LNG에 의하여 발생된 각종 하중을 받아서 외조(outer tank)에 전달하는 기능을 2차적으로 수행하고 있다. 즉, 멤브레인 자체는 저장액체의 기계적 하중을 직접 담당하지는 않고 예응력 콘크리트(PC) 구조물로 전달하는 기능을 갖고 있다.

멤브레인식 저장탱크는 멤브레인 유니트를 용접하여 연결한 거대한 탱크 구조물로 멤브레인 유니트는 각종 하중에 의한 팽창과 수축의 거동변화를 자체적으로 흡수함으로써 인접한 멤브레인 유니트에 영향을 주지 않도록 설계·제작되어 있다. 이러한 기능을 효과적으로 확보하기 위하여 개발된 방식이 스테인레스 판재에 주름(corrugation)을 설치하는 것이다. 현재까지 개발된 대표적인 주름 형태로는 테크니가즈 멤브레인(Technigaz membrane : TGM)에서 채택한 굽힘가공을 한 주름 모델[3], 이것을 약간 개조한 일본의 NKK 주름 모델과 일본에서 독자적으로 개발한 IHI, MHI, KHI 주름 모델, 최근에 국내에서 개발한 링 마디식 멤브레인(ring knot membrane : RKM) 주름 모델[4,5] 등이 있다. 멤브레인의 주름에서는 열하중

이나 LNG 액하중에 의한 변형 거동을 안전하게 흡수해야 하는데, 이것은 주름의 곡률반경, 높이, 폭과 같은 기하학적인 형상에 의하여 멤브레인의 성능 특성이 결정된다.

본 연구에서는 상기와 같은 초대형 저장탱크의 건설 추세에 따라서 현재 사용중인 여러 가지 멤브레인과 최근에 새로이 개발하여 국내외 특허를 획득한 링 마디식 멤브레인의 주름 형상에 따른 응력거동 특성 문제를 액화천연가스에 의하여 발생하는 유체 정하중과 열하중을 고려하여 유한요소해석 기법으로 해석하고자 한다.

2. 유한요소해석

2-1. 해석 모델

각종 하중에 대하여 변형거동이 용이하게 일어날 수 있도록 개발된 멤브레인 주름의 기하학적 형상이 멤브레인의 거동특성에서 대단히 중요하기 때문에 기존에 사용중인 여러 가지 모델과 본 연구에서 새로이 개발한 멤브레인 주름에 대한 응력특성을 유한요소법으로 비교·연구하고자 한다.

Fig. 1은 컴퓨터 시뮬레이션에서 사용한 링 마디식(RKM) 주름, 테크니가즈(TGM) 주름, MHI 주름, KHI 주름, NKK 주름, IHI 주름의 6가지 모델에 대하여 해석하였다. 멤브레인 주름의 응력특성 해석에서 제작성도 중요한 파라메타이기는 하지만, 본 연구에서는 응력을 유한요소기법으로 해석하기 때문에 주름 모델의 기하학적 형상이 더욱 중요하다. 멤브레인 주름에 대한 거동특성 해석에서 고려한 중요한 파라메타는 주름의 높이, 폭, 곡률반경, 두께 등이 있다.

또한 멤브레인의 주름 해석시 초저온 액체와 직접 접촉하는 부위를 상면(upper layer), 단열패널과 접촉·지지하는 밀폐된 공기층을 하면(lower layer)이라 하고, 본 연구에서 다른 지적이 없으면 상면에 대한 최대 평균응력 거동 문제를 해석하였다.



(a) Ring knot corrugation



(b) Technigaz corrugation

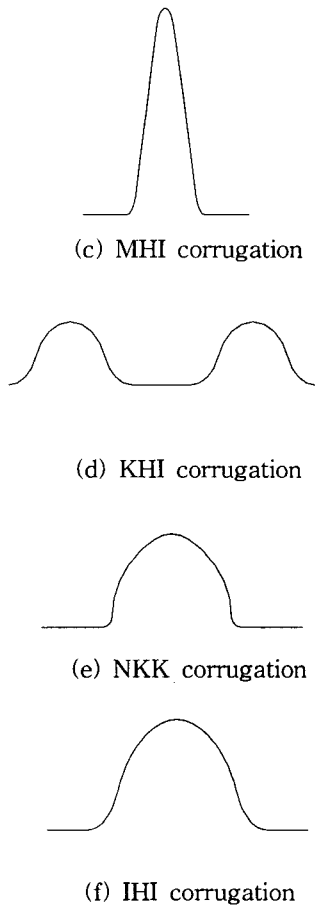


Fig. 1. Typical configurations of the membrane models with 2.0mm thickness used in the FEM simulation.

2-2. 경계조건 및 유한요소망

저장탱크에 사용하는 멤브레인은 변형거동에 대한 안전성을 확보해야 하기 때문에 주름은 반드시 기하학적 대칭성을 유지하도록 설계하는 것이 유리하다. 컴퓨터 시뮬레이션 해석에 사용한 모델은 멤브레인 주름의 좌우 대칭성을 고려하여 반으로 분할하고, 3차원적으로 해석하였다. 멤브레인 주름은 -162℃의 초저온 액체에 의한 액하중과 -162℃의 열응력 하중에 의한 변형거동 문제를 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC[6]로 해석하였다.

멤브레인 주름에서 발생하는 응력거동 특성 문제를 해석하기 위한 멤브레인 소재의 물리적 특성은 -162℃의 초저온 상태에 대한 데이터로 Table 1에서 제시하고 있다. 또한 유한요소해석에 사용한 여러 가지 멤브레인 주름 모델중

에서 대표적이라 할 수 있는 링 마디식 주름에 대한 경계조건을 Fig. 2에서 보여주고 있다. X=0인 곳에 대해서는 X 방향의 변위 $u=0$, 회전항 $\theta_y=\theta_z=0$ 이고, Y=0인 곳에 대해서는 Y 방향의 변위 $v=0$, 회전항 $\theta_x=\theta_z=0$ 이며, Z=0인 곳에 대해서는 Z 방향의 변위 $w=0$, 회전항 $\theta_y=\theta_x=0$ 로 가정한다. 또한 경계구역 4에서는 액압과 온도가 멤브레인의 상면에 균일하게 작용하는 것으로 가정하였다. 여타 멤브레인 주름의 응력거동 특성 문제를 해석하기 위한 시뮬레이션도 링 마디식 주름과 같은 조건으로 해석하여 비교하였다. Fig. 2에서 주름의 상면(upper layer)은 -162℃의 초저온 액체와 그리고 하면(lower layer)은 25℃의 상온과 접하고 있다.

Fig. 3은 멤브레인의 주름 모델 2가지에 대한 응력변형 거동특성을 고찰하기 위한 유한요소망을 보여주고 있다.

Table 1. Material properties used in the FEM computations.

Properties	Values
• Sheet material	SUS 304
• Thickness, mm	2.0
• Elastic modulus, MPa	3.1×10^3
• Yield strength, MPa	265
• Coef. of linear expansion, mm/mm℃	1.4×10^{-5}
• Poisson's ratio	0.475
• Specific gravity	7.85
• Temperature, ℃	-162
• Liquid pressure, MPa	0~1.08

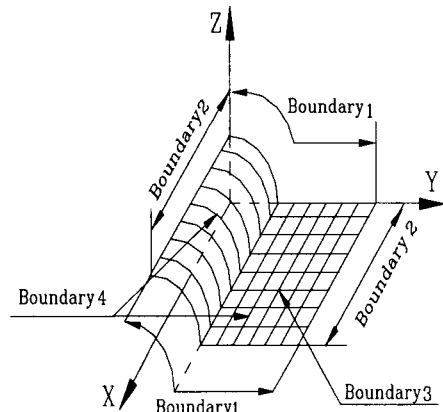
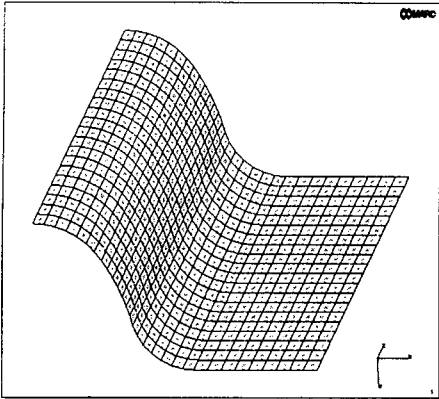
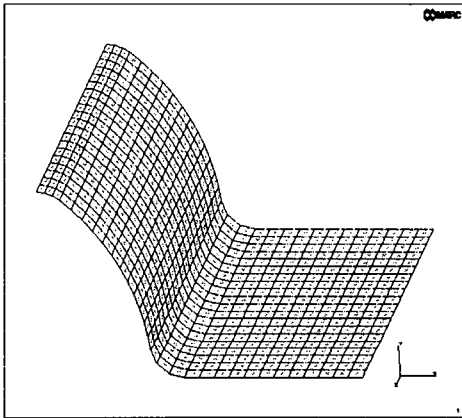


Fig. 2. Boundary conditions of the ring knot corrugation.



(a) Ring knot corrugation profile



(b) Technigaz corrugation profile

Fig. 3. Finite element meshes.

3. 해석결과 및 고찰

멤브레인 판재에 가해지는 여러 가지 하중조건에 의하여 발생되는 응력값을 최저치로 유지할 수 있도록 멤브레인의 주름을 설계하는 것이 대단히 중요하다. 기본적으로 멤브레인 성능은 주름을 어떻게 설계하여 대칭적으로 배열하느냐에 따라서 커다란 영향을 받기 때문이다.

Fig. 1에서 제시한 6가지의 멤브레인 주름 형상에 대한 유한요소해석을 수행한 결과를 보면 주름의 형상이 약간씩 변화함에 따라서 멤브레인에 걸리는 최대 평균응력과 변형량의 크기가 다르게 나타났다. 멤브레인의 주름이 기하학적 형상에 따라서 안전하게 사용 가능한 최대 깊이를 알아본다는 것은 초저온 탱크의 저장용량 설계에서 대단히 중요하기 때문에 본 연구에서는 이에 대한 실제적인 시뮬레이션 데

이타를 가지고 Fig. 1의 여러가지 주름의 형상에 대하여 해석하였다.

Figs. 4와 5는 멤브레인에서 가장 대표적인 두가지의 주름 형상에 대한 응력분포도와 크기를 유한요소해석법으로 계산한 결과이다. 계산에 사용된 상태에서는 멤브레인이 100m 깊이에 놓여있으며 이때 멤브레인은 0.47MPa의 액압을 받고 있다. Fig. 4는 링 마디식 멤브레인의 주름 모델에 대한 응력 분포도를 보여준 결과로 65MPa의 최대 인장응력이 LNG액과 접촉하는 주름의 바닥면 곡률 중심으로부터 약간 떨어진 평판부에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5의 테크니가즈 주름 모델에서는 127MPa의 최대 인장응력이 바닥면과 접촉하는 곡률과 비교적 가까운 지점에서 발생한다는 사실이 링 마디식 멤브레인 주름의 결과와 다른 점이다. 이것은 바닥면에 접한 곡률반경을 $R=9\text{mm}$ 의 값으로 작게할수록 최대 인장응력은 곡률반경에 가까운 곳에서 발생하고, 곡률반경이 클수록 멀리서 발생함을 보여준다. 이것은 멤브레인의 주름에서 발생하는 피로 수명에 직접적인 영향을 주는 요인이고, 곡률반경이 작을수록 변형이 크게 발생하므로 불리하다는 사실을 의미한다.

Figs. 6과 7은 25°C의 상온과 -162°C의 초저온 상태에서 각종의 멤브레인 주름이 LNG 저장탱크의 깊이에 따라서 견딜 수 있는 최대 평균법선응력(Maximum mean normal stress)의 크기를 나타내고 있다. 멤브레인의 주름이 25°C의 상온에서 LNG의 액하중만을 받는 경우에 대한 Fig. 6의 해석결과에 의하면 2mm 두께를 갖는 Fig. 1(a)의 링 마디식 멤브레인 주름 모델은 탱크에 저장된 LNG가 180m 깊이에서 멤브레인에 걸리는 최대 인장응력이 125MPa로 여타 멤브레인 주름에 비하여 크게 낮고, 저장탱크의 깊이가 증가할수록 최대응력은 가장 완만하게 상승하는 경향을 보이다가 1차적으로 180m 부근에서 응력이 수렴하는 현상이 발생하고, 220m에서는 주름이 파손되고 있음을 보여준다. 그러나 멤브레인의 기본 형상이 서로 유사한 TGM 주름 모델(Fig. 1(b))과 2mm 두께의 NKK 모델(Fig. 1(e)), MHI 모델(Fig. 1(c)), KHI 모델(Fig. 1(d))와 IHI 모델(Fig. 1(f)) 등은 멤브레인 주름에 걸리는 최대 인장응력이 저장탱크의 낮은 깊이에서도 비교적 높게 나타났으며, 탱크 깊이가 낮은 상태에서 주름이 파손되고 있음을 알 수 있다. 여기서 멤브레인 주름에 걸리는 최대 평균법선응력이 크기는 하지만 2mm 두께의 TGM 모델(Fig. 1(b)), MHI 모델(Fig. 1(c)), KHI 모델(Fig.

1(d))은 LNG액을 안전하게 저장할 수 있는 탱크의 깊이가 60m 정도로 200,000m³의 초대형 저장탱크 건설에 사용하여도 문제가 없다.

LNG액에 의한 유체 정하중과 -162°C의 초저온 하중을 동시에 받는 경우에 멤브레인 주름에서 발생하는 최대 인장응력의 크기를 Fig. 7에서 제시하였고, 이 때에 사용한 여러 가지 주름 형상은 Fig. 1에서 보여주고 있으며, 이들은 Thermal-Mechanical 연계기법으로 해석하였다. Fig. 7의 해석결과에 따르면 KHI 모델(Fig. 1(d))과 특히 링 마디식 멤브레인 주름(Fig. 1(a))의 두가지 경우에만 응력이 약간 증가하였고, 나머지 주름 모델은 거의 같은 결과를 보여주고 있다. 이것은 KHI 모델과 링 마디식 모델은 멤브레인 주름의 높이가 40~45mm이고, 주름의 높이와 폭의 비가 1 : 2 정도로 균형을 이루도록 설계한 경우는 LNG 액하중에 의한 영향이 크게 작용하지만, 특히 -162°C의 열하중에 의한 변형 거동도 무시할 수 없기 때문에 주름의 상면에 걸리는 최대 인장응력이 약간 증가하였다. 그러나 멤브레인 주름의 높이가 폭보다는 상대적으로 작거나, 1 : 2 정도로 균형을 이루더라도 곡률반경이 R=30mm 이상으로 크면 -162°C의 초저온 하중에 의하여 발생한 열응력이 LNG 액에 의한 유체 정하중에 의한 응력보다 10% 이하로 작다. 또한 발생된 에너지의 대부분이 소재의 변형 에너지로 전환되기 때문에 탱크의 깊이에 따른 최대 평균법선 응력에는 거의 변화가 없다.

멤브레인의 주름 형상에 따른 최대 인장응력을 비교하면 주름의 높이가 반폭에 비하여 크고, 정점곡률(apex curvature)과 바닥면과 만나는 곡률(edge curvature)의 크기가 작을수록 유체 정하중에 의한 영향이 크기 나타나기 때문에 주름에 걸리는 최대 인장응력과 최대 변위량은 크게 나타난다. 이러한 경우 멤브레인의 주름이 안전하게 견딜 수 있도록 저장탱크의 깊이를 작게 설계하는 것이 바람직하다.

그러나 멤브레인의 주름 형상 설계에서 주름의 높이와 폭이 1 : 2 정도로 균형을 이루고, 정점의 곡률반경과 바닥면의 곡률 반경을 최적화시킨다면 주름에 걸리는 최대 응력과 변형량이 작으면서도 균일하게 분포한 주름 설계가 가능해진다.

여러 가지 멤브레인의 주름 형상에 대한 유한요소해석 결과를 보면 링 마디식 멤브레인이 주름에 걸리는 최대 인장응력의 크기와 변형거동 특성의 TG 측면에서 가장 우수하게 나타났고, TGM 주름이나 MHI 멤브레인 주름에서는 곡률반경이 작고, 상대적으로 주름의 높이가 높

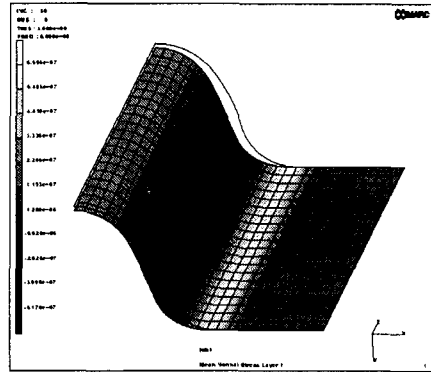


Fig. 4. Mean normal stress distributions of the ring knot type corrugation.

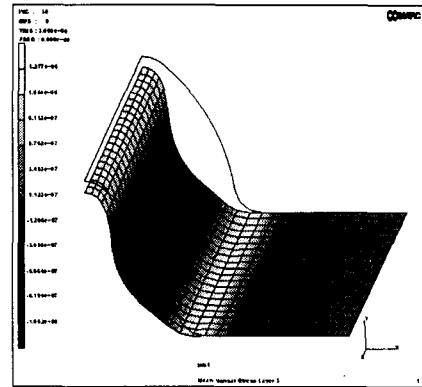


Fig. 5. Mean normal stress distributions of the Technigaz type corrugation.

다는 사실 때문에 동일한 탱크 깊이에 대하여 최대 응력이 상대적으로 크게 걸리는 것으로 해석되었으나 나머지 주름 모델보다는 양호한 결과를 보여준다.

상기의 결과에서 멤브레인 소재의 항복강도가 265MPa라는 사실을 고려할 때 멤브레인 주름에 발생된 최대 평균법선응력을 해석한 결과, 모델 모두가 저장탱크용 멤브레인으로 사용하기에 안전하다는 사실을 보여주고 있다.

여기서 링 마디식 멤브레인 주름은 180m 정도까지 안전하게 저장탱크를 제작할 수 있고, TGM 주름은 110m, MHI는 80m, KHI 모델은 60m, NKK 모델은 40m, IHI 모델은 약 20m 정도까지 안전하게 사용할 수 있다는 사실이다. 이것은 단순히 멤브레인의 기하학적 주름 형상에 따른 상호 비교를 위한 결과이기 때문에 정확한 제작치수를 가지고 시뮬레이션을 하면 실제로 안전하게 사용 가능한 저장탱크 깊

이는 차이가 있을 수 있다. 이들의 결과는 세계 최초로 1996년에 완공된 200,000m³급 초대형 저장탱크의 실제 크기가 직경 80m, 깊이 60m라는 사실은 본 연구에서 안전하다고 Figs. 6과 7에서 제시한 해석결과와 우연히도 일치한다.

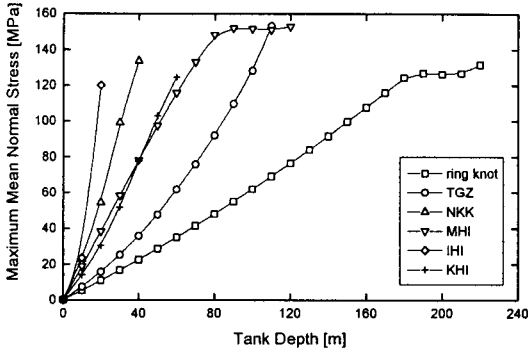


Fig. 6. Maximum mean normal stress as a function of the LNG tank depth at 25°C.

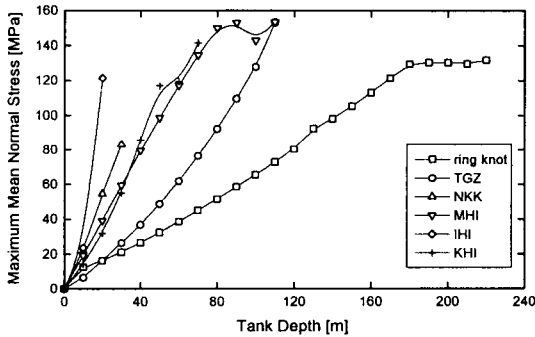


Fig. 7. Maximum mean normal stress as a function of the LNG tank depth at -162°C.

4. 결 과

초저온 저장탱크에서 사용중인 멤브레인의 6가지 주름 형상에 대한 응력 변형거동 특성을 유한요소해석법으로 비교·고찰하면 다음과 같다.

주름의 정점 반경부와 코너 반경부를 작게, 그리고 주름의 높이를 크게 설계한 멤브레인은 최고응력과 변형이 비교적 크게 발생하고, 안전하게 사용할 수 있는 저장탱크의 실제 사용 깊이는 작아진다.

반면에 주름의 정점 곡률, 평판부와 맞나는 코너 곡률 및 주름의 높이와 폭을 1 : 2 정도

로 대칭되게 최적화 설계를 한다면 멤브레인은 최고응력과 변형이 가장 작게 발생하고, 저장탱크의 실제 사용 깊이도 크게 증가하므로 안전하게 사용할 수 있다.

초대형 저장탱크 건설이라는 측면에서 보면 링 마디식 멤브레인 주름에 걸리는 최대 인장 응력의 크기와 변형거동 측면에서 가장 우수하게 나타났고, 테크니가즈 멤브레인 주름이나 MHI 멤브레인 주름도 비교적 우수한 결과를 보여주고 있다.

여러 가지의 멤브레인 주름 모델에 대한 유한요소해석 결과에 의하면 코너 곡률과 정점곡률에 대한 설계가 응력변형 거동에 커다란 영향을 주고 있기 때문에 제작조건이나 하중조건에 따른 주름의 최적화 설계가 중요하다는 사실을 강조한 연구결과이다.

참고문헌

1. 김청균, 김영규, 홍성호 : "LNG 저장탱크 시스템의 안전기술 - 탱크 형식을 중심으로," 가스산업과 기술, 1, 1, 30~40(1997).
2. Goto, Sadao : "The World's Largest LNG Inground Storage Tanks," 11th Korea International Gas Seminar, Seoul, Korea, 1~12(Oct. 1997).
3. Kawahara, M., Kurihara, M., Ohta, T., Tanaka, M., Umekawa, N. and Kawaschima, M. : "Fatigue Strength and Safety Assessment of Membrane Components," Nippon Kokan Technical Report, 42, 11~18(1984).
4. 김영규, 전인기, 윤인수, 이용원, 홍성호, 김청균 : "액화천연가스 저장탱크용 멤브레인의 유한요소해석," 대한기계학회 논문집, 18, 10, 2797~2804(1994).
5. 김청균, 김영규, 홍성호, 윤인수 : "유한요소법을 이용한 링 마디식 멤브레인 구조물의 응력해석," 대한기계학회 논문집, 19, 12, 3151~3158(1995).
6. MARC Analysis Research Co. : MARC user's manual, Version K6.1 (1996).