

멤브레인 주름의 응력거동에 관한 수치적 연구

김청균*, 이영숙*, 차백순*, 김영규**, 윤인수***, 홍성호***

*홍익대학교 트라이볼로지 연구센터, **한국가스안전공사, ***한국가스공사

Numerical Study on the Stress Behaviours of the Membrane Corrugation

Chung Kyun Kim*, Young Suck Lee*, Baeg Soon Cha*,

Young Gyu Kim**, In Soo Yoon***, Seung Ho Hong***

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

1. 서론

액화천연가스(LNG)를 안전하게 저장하기 위해서는 -162°C 의 열하중(thermal loading), 유체 정하중 및 동하중(hydrostatic and hydrodynamic loading), 가스하중(gas loading) 등에 견딜 수 있도록 제작된 특수 탱크가 사용된다. 이와 같은 하중을 안전하게 지탱하기 위해서는 열팽창 계수가 대단히 작은 9% 니켈 강재를 사용한 저장탱크와 스테인레스 판재로 제작된 멤브레인식 저장탱크의 두가지가 있다.

최근 LNG 저장탱크는 보다 효율적인 경제성과 안전성을 추구하는 경향, 그리고 대규모 부지 확보가 어렵다는 사실 때문에 대형의 지중식으로 건설하는 경향이 일반화 되었고, 결과적으로 저장탱크 건설시 9% 니켈식 탱크보다는 멤브레인식 탱크를 선호하고 있다.

액화천연가스를 저장하기 위한 초저온 저장 탱크의 내부 구조물, 즉 내조(inner tank)에 사용하는 멤브레인 구조물은 온도와 하중변화에 유연하면서 안전하게 거동할 수 있도록 설계·제작되어야 한다. 멤브레인 유니트는 LNG 저장탱크의 핵심기술로 탱크의 측벽면(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 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 용접으로 바로 인접한 멤브레인 유니트에 영향을 주지 않도록

설계·제작되어 있다. 이러한 기능을 최대한 확보하기 위하여 개발된 방식이 스테인레스 판재에 주름(corrugation)을 설치하는 것이다. 현재까지 개발된 대표적인 주름 형태로는 테크니가즈 멤브레인(Technigaz membrane)에서 채택한 주름 모델[1], 이것을 약간 변형한 유사 모델, 최근에 개발한 링 마디식 멤브레인(ring knot membrane)에서 사용하는 주름 모델[2,3] 등이 있다. 멤브레인의 주름에서는 열하중이나 액압에 의한 변형 거동을 안전하게 흡수해야 하는데, 이것은 주름의 곡률반경, 높이, 폭과 같은 형상에 의하여 멤브레인의 성능 특성이 결정된다.

본 연구에서는 유한요소해석 기법을 활용하여 기존의 테크니가즈 주름 모델과 링 마디식 주름 모델의 주름부에서 발생하는 응력 변형거동 문제를 열하중과 액하중이 동시에 작용하는 조건에 대하여 수치적으로 해석하고자 한다.

2. 수치적 해석

멤브레인 주름의 기하학적 대칭성을 고려하여 멤브레인 주름의 1/2을 분할하였고, 2차원적으로 해석하였다. 멤브레인 주름에는 초저온 액체에 의한 압력하중과 -162℃의 온도하중에 의한 변형거동 문제를 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC[4]로 해석하였다.

주름의 응력거동 특성 문제를 해석하기 위한 멤브레인 소재의 물리적 특성은 -162℃의 초저온 상태에서 획득한 시뮬레이션 데이터로 Table 1에서 주어지고, 해석에서 사용한 경계조건은 Fig. 1에서 보여주고 있다. 이 그림에서 멤브레인 평탄부와 단열재 박스가 접촉하는 구역 A에서 Y 방향으로의 지지되었으나, 수평 방향으로의 자유로이 거동한다. 또한 거동응력 구역 B에서 X 방향으로의 구속되었으나, 수직방향으로는 자유롭게 변형거동하게 된다.

3. 해석결과 및 고찰

주름의 형상은 유사하지만 서로 다른 특성을 갖고 있는 두가지 해석 모델(테크니가즈 멤브레인에 사용한 주름 모델과 링 마디 멤브레인의 주름 모델)의 주름에서 발생하는 응력거동을 보다 엄밀하게 해석하기 위하여 스테인레스 판재에서 초저온 액체와 직접 접촉하는 부위를 상면(upper layer), 단열 패널과 접촉·지지하는 밀폐된 공기층을 하면(lower layer)이라 하고, 이 곳에서의 접촉응력 거동문제를 해석하였다.

Figs. 2, 3과 4는 테크니가즈식 멤브레인의 주름에 걸리는 변형거동과 응력을 각각 보여주고 있다. Fig. 2에서 X 방향과 Y 방향으로 발생하는 변형 거동 패턴

을 보면 주름의 평탄부(flat surface), 코너반경(corner radius), 정점반경(apex radius)에서 크게 변형거동하고 있음을 알 수 있다. 이것은 주름의 코너 반경과 정점 반경을 가능한 작게 설계하여 변형거동에 잘 적응하고, 제작을 용이하도록 하기 위한 테크니가즈 고유의 설계 조건과 밀접한 관계가 있다. 이러한 설계기술로는 초저온 액체의 변동하중 조건이 그다지 크지 않은 환경에서 사용하는 경우는 문제가 없으나, 선박과 같이 반복 하중 변화가 크게 발생하는 테크니가즈 모델에 대한 응력 해석 결과를 제시한 경우는 피로하중에 의한 안전성 확보가 어려울 것으로 생각된다.

Fig. 3은 테크니가즈 멤브레인의 주름 상면에 걸리는 응력으로 평탄부에서는 변화가 없으나 코너 반경부에서는 압축응력이 걸리고, 정점 반경부에서는 인장응력이 118kg/mm^2 으로 코너 반경부의 압축응력에 비하여 2배 정도 높게 발생됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 4에서는 멤브레인 주름의 하면, 즉 단열박스와 직접 접촉하는 부위에서는 코너 반경부의 인장응력이 정점 반경부의 압축응력에 비하여 3배 정도로 높게 나타났으며, 상면과 하면에서의 응력분포 차이가 비교적 큼을 알 수 있다.

테크니가즈 멤브레인 주름에서의 응력 집중도를 보면 주름 하면(lower surface of corrugation) 코너 반경부에서 가장 높게 나타났던 것으로 보아 테크니가즈의 주름에서 취약한 부위는 바로 이곳으로 생각된다. 유한요소해석 결과에 의하면 테크니가즈식 멤브레인은 피로 하중조건이 가혹한 선박용보다는 육상용 저장탱크에 사용하는 것이 보다 안전할 것으로 생각된다.

최근 국내에서 독자적으로 개발하여 국내외 특허를 획득한 링 마디식 멤브레인의 주름에 대한 응력 변형거동의 해석결과는 Figs. 5, 6과 7에서 각각 보여주고 있다. 링 마디식 주름의 변형 거동을 보여주는 Fig. 5의 해석 결과에 의하면, 주름의 평탄부와 정점 반경부에서 발생하는 변형거동은 없고, 단지 코너 반경부에서 약간 변화되는 형태를 보여주고 있다. 이것은 테크니가즈 모델에 비하여 코너 반경부와 정점 반경부를 약간 크게 제작하였기 때문으로 생각되며, 설계상 우수한 변형거동 형태를 보여주고 있다.

Fig. 6에서 보여준 링 마디식 멤브레인 주름의 상면에서 발생된 해석결과에 의하면 주름의 평탄부에서는 인장응력, 코너 반경부에서는 압축응력, 그리고 정점 반경부에서는 평탄부에서 발생하는 인장응력 크기보다 작게 발생하며, 이들의 응력 크기는 Fig. 3의 테크니가즈 모델에 비하여 대단히 작으며, 비교적 균형을 이루고 있음을 알 수 있다. Fig. 7에서는 주름의 하면에서 발생하는 응력 해석결과로 평탄부에서는 압축응력, 코너 반경부에서는 인장응력, 그리고 정점 반경부에서는 완화된 인장응력이 각각 발생하고 있다. 주름 하면부의 평탄부에서 발생하

는 압축응력이 코너 반경부의 인장응력에 비하여 약 2배 정도 높게 발생하고는 있으나 Fig. 4의 테크니가스 주름에 대한 계산결과에 비하여 압력크기가 대단히 작고, 비교적 균형을 이루고 있다.

상기의 두가지 주름 모델에서 테크니가스 멤브레인 주름에 발생하는 응력은 링 마디식 멤브레인 주름에 비하여 5배 이상 크게 계산된 것으로 보아 완만한 곡률을 갖는 링 마디식 주름 모델이 보다 안전하고, 변형 거동은 더욱 우수하다는 사실을 보여주고 있다. 이들 해석 결과를 보면 링 마디식 멤브레인은 육상용 뿐만 아니라 가혹한 반복하중 조건의 선박용으로 사용하여도 문제가 없을 것으로 생각된다.

Table 1. Material properties used in the FEM computations.

Properties	Values
• Sheet material	SUS 304
• Thickness, mm	1.2~2.0
• Elastic modulus, kg/mm^2	0.32×10^3
• Coefficient of linear expansion, $\text{mm/mm}^\circ\text{C}$	1.4×10^{-5}
• Poisson's ratio	0.475
• Specific gravity	7.85
• Cryogenic temperature, $^\circ\text{C}$	-162
• Liquid pressure, kg/mm^2	0.1

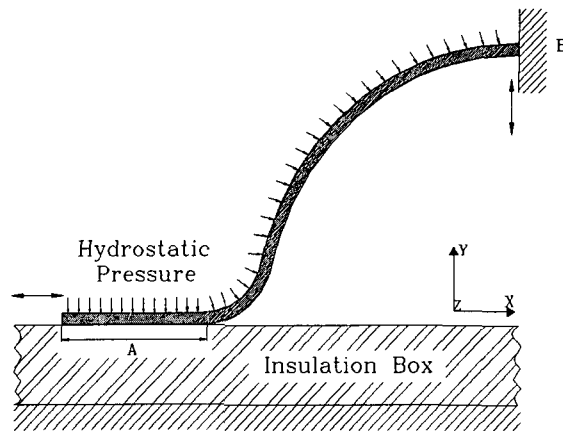


Fig. 1 Boundary conditions of the corrugation.

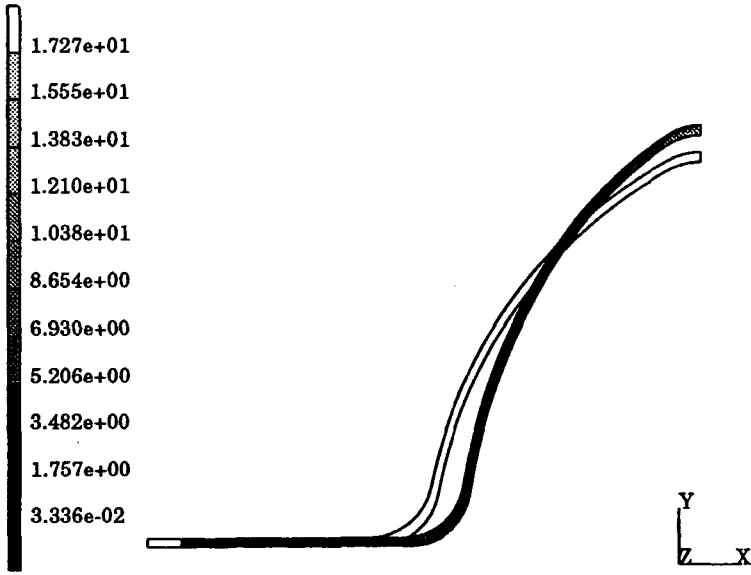


Fig. 2 Deformed profiles of the Technigaz type corrugation.

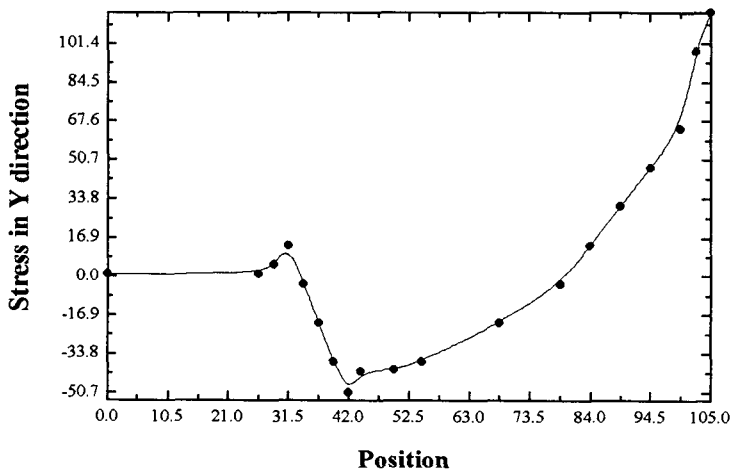


Fig. 3 Stress distribution on the upper surface of the Technigaz type corrugation along the x-direction.

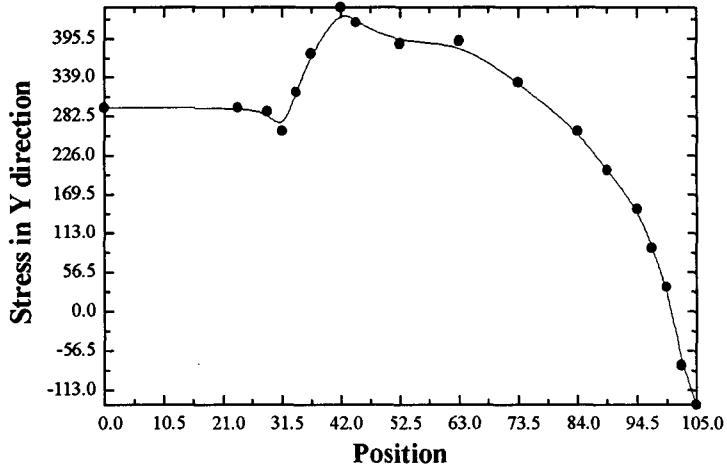


Fig. 4 Stress distribution on the lower surface of the Technigaz type corrugation along the x-direction.

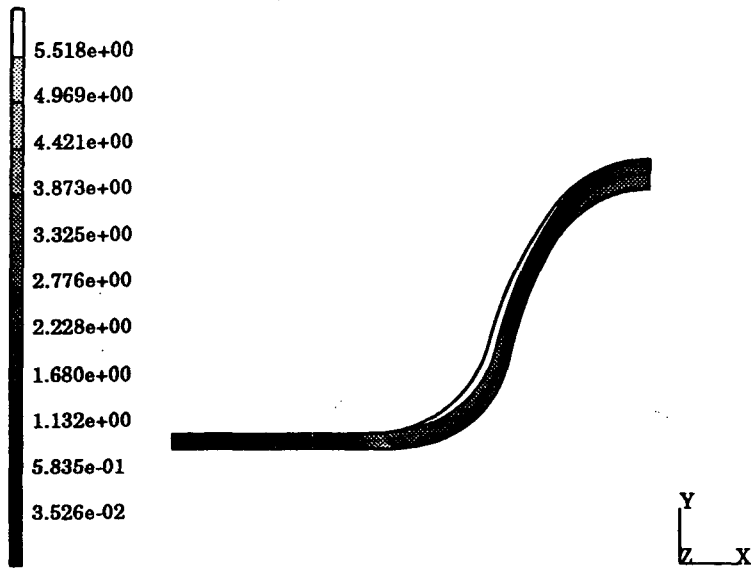


Fig. 5 Deformed profiles of the ring knot type corrugation.

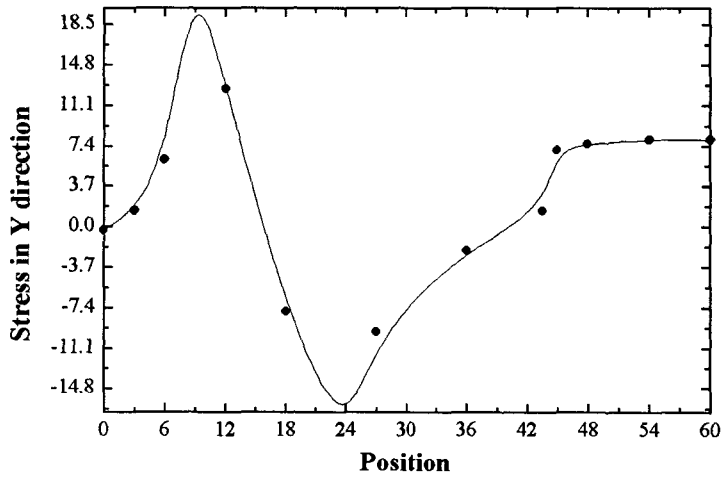


Fig. 6 Stress distribution on the upper surface of the ring knot type corrugation along the x-direction.

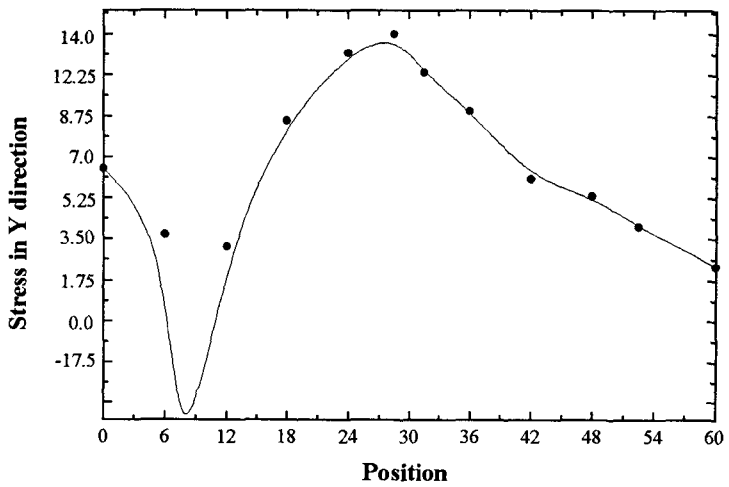


Fig. 7 Stress distribution on the lower surface of the ring knot type corrugation along the x-direction.

4. 결과

멤브레인 유니트에서 채택하고 있는 주름형상은 응력 변형거동이 작으면서 균일하도록 설계·제작되어야 하는데, 본 연구에서 사용한 두가지 모델을 유한요소 해석 기법으로 비교하면 다음과 같다.

(1) 코너 반경부와 정점 반경부를 작게 설계한 테크니가스 멤브레인의 주름은 변형과 응력이 크게 발생되어 육상용으로 사용하기에는 문제가 없으나 선박용으로 사용하기에는 내구성의 문제가 있을 것으로 생각된다.

(2) 링 마디식 멤브레인 주름에서는 테크니가스 주름에 대하여 대칭적으로 곡률 반경을 약간 크게 사용함으로써 변형거동이 거의 일어나지 않고, 곡률의 형상을 따라서 발생하는 응력분포도 대단히 작으면서 비교적 균일하기 때문에 테크니가스에 비하여 대단히 우수함을 알 수 있다.

(3) 두가지 모델에 대한 수치적 해석결과에 의하면 코너 반경과 정점 반경 설계가 응력변형 거동문제에 커다란 영향을 주고 있기 때문에 제작조건이나 하중 조건에 따른 최적화 설계의 중요성을 강조한 결과라 생각된다.

참고문헌

1. 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).
2. 김영규, 전인기, 윤인수, 이용원, 홍성호, 김청균 : 액화천연가스 저장탱크용 멤브레인의 유한요소해석, 대한기계학회 논문집, 18, 10, 2797~2804(1994).
3. 김청균, 김영규, 홍성호, 윤인수 : 유한요소법을 이용한 링 마디식 멤브레인 구조물의 응력해석, 대한기계학회 논문집, 19, 12, 3151~3158(1995).
4. MARC Analysis Research Co. : MARC user's manual, Version K6.1(1996).