

(技術論文)

액화천연가스 저장탱크용 멤브레인의 유한요소해석

김영규* · 전인기** · 윤인수*** · 이용원*** · 홍성호*** · 김청균*

(1994년 3월 5일 접수)

Finite Element Analysis of Membrane for LNG Storage Tank

Young Gyu Kim, In Ki Jun, In Soo Yoon, Yong Won Lee, Seung Ho Hong
and Chung Kyun Kim

Key Words : Liquefied Natural Gas(액화천연가스), Cryogenic Liquid(초저온 액체), Storage Tank(저장탱크), Membrane(멤브레인), Corrugation(주름), Cross Knot(십자 마디), Ring Knot(링 마디), FEM(유한요소법)

Abstract

This paper analyzes the behaviors of corrugated membrane under the cryogenic liquid pressure and thermal loading using the FEM analysis program MARC. The FEM calculations were carried out on the basis of measured data of Technigaz membrane. It is very important to know the concentration levels and distributions of stress in the corrugated membrane. A quarter of the membrane sheet in place of the whole membrane was simulated because of its geometric symmetry. The calculated results of the concentrated stress showed that the maximum stress occurs at the knot parts and at the root corner radius of the corrugations. The FEM calculated results indicated that the ring knot membrane which was developed in this study showed uniformly distributed stress and the lowest stress levels in the cross knot area in comparison with other two membranes. These results are very important to optimize the shape and improve the safety of membrane structure.

1. 서 론

에너지파동에 따른 에너지원의 다변화 정책과 대기오염 등의 환경문제가 대두되면서 1986년에 인도네시아산 액화천연가스(liquefied natural gas; LNG)가 처음 수입된 이후로 천연가스 수요는 급속하게 증가하고 있다. 액화천연가스는 대기압하에서 비등점 -162°C 인 초저온 액체(cryogenic liquid)로서 대형탱크에 저장되는 것이 일반적이며, 저장탱크

(storage tank)는 평저 원통형의 이중구조로서 구성된다. 내부 탱크인 멤브레인은 저온취성에 강한 재질을 사용하며, 외부탱크인 축판은 PC(prestressed concrete) 또는 탄소강을 사용하여 만들고, ^(1,2) 그 사이에는 단열재(insulation material)를 넣어 탱크 외부에서의 침입열량에 의한 기화가스(boil-off gas) 발생이 최소가 되도록 제작한다.

초저온 저장탱크에서 멤브레인(membrane)이란 재질이 온도와 하중의 변화에 대하여 자유로이 팽창과 수축을 할 수 있도록 설계·제작한 특수관재를 의미하는 것으로 탱크의 측면과 밑면에 설치되어 초저온 액체의 누설을 방지하는 밀봉기능을 1차적으로 담당하고, 열하중에 의한 피로하중(fatigue

*정회원, 홍익대학교 트라이볼로지연구소

**홍익대학교 트라이볼로지연구소

***한국가스공사 연구개발원

cyclic load)을 견디면서 액압력 또는 자중량 등에 의해서 발생하는 하중을 흡수하여 단열패널(insulation panel)로 전달하는 기능을 갖고 있다.^(2,3)

초저온에 의한 열수축 변형을 원활하게 흡수할 수 있도록 판재의 일부에 주름(corrugation)을 설치하는데, 현재 실용화된 대표적인 주름형태는 단일 주름식 멤브레인(single corrugated membrane)⁽⁴⁾과 복열 주름식 멤브레인(double corrugated membrane)⁽⁵⁾이 있다. 프랑스 Technigaz사가 개발한 멤브레인은 단일 주름식 멤브레인의 대표적인 예로써 원주방향과 수직방향의 변형거동에 대한 안정성을 확보하기 위하여 주름이 서로 겹치도록 설계되어, 그 교점에서 온도와 압력변동에 따른 멤브레인의 변형거동을 흡수할 수 있게 십자 마디식 주름(cross knot corrugation)을 설치한 구조이다. 또한 일본 Kawasaki사에서 개발한 복열 주름식 멤브레인은 수직으로 위치한 두개의 주름이 서로 균형을 유지하면서 모멘트 및 열수축에 따른 회전변형거동을 상호흡수하도록 설계한 구조이다. 링 마디식 멤브레인(ring knot membrane)은 본 연구팀이 개발한 단일 주름식 모델로 링마디와 주름이 서로 조합된 구조로 설계되었다.

초저온 재질^(6,7)로는 스테인레스강, 알루미늄 합금, 인바(invar), 9% Ni강 등이 사용되며, 멤브레인 재질로 SUS재의 경우 1.2~2.0 mm 두께의 오스테나이트계 스테인레스강이 가장 많이 사용되고 있다. 멤브레인은 사용상태가 극저온이고, 맥동하는 유체압력 하중을 받기 때문에 재질선정과 설계측면에서 응력변형 거동해석은 대단히 중요하다. 멤브레인 구조물의 마디부(knot parts)는 굽힘가공이나 프레스가공에 따른 복잡한 3차원 구조로 이루어졌기 때문에 이들 마디부를 이론적으로 해석하는 것이 난해하여 그동안 실험적 해석에 의존하였다. 최근에는 컴퓨터를 이용한 해석기법, 특히 유한요소법을 이용한 멤브레인 구조물의 응력해석을 부분적으로 수행하고 있으나, 멤브레인 형상이 복잡하고 초저온 거동해석에 이용 가능한 실제적인 데이터가 크게 부족하기 때문에 단편적인 사용에 그치고 있는 실정이다.

멤브레인 해석에 컴퓨터시뮬레이션 기법을 활용한 예는 NKK사가 1984년에 발표한 Technigaz 멤브레인에 대한 응력해석에서 기존의 범용 FEM 프로그램인 SAP IV, NASTRAN으로 수행하여 좋은 결과를 얻었다.⁽⁸⁾ 이 해석들은 기존의 해석방법들

과는 달리 복잡한 멤브레인의 해석을 실험에 의존하지 않고 컴퓨터시뮬레이션으로 수행하였다는 점에서 높이 평가된다. Kawasaki사에서는 복열 주름식 멤브레인의 개발 및 응력해석시 MARC을 이용한 최적의 주름 곡률반경을 선정하는 등 발전된 형태의 FEM 해석방법을 시도하였다.⁽⁹⁾

본 연구는 유한요소법을 이용하여 초저온 탱크에서 가장 중요한 구조물인 멤브레인의 응력을 해석하여 기존의 모델과 비교·검토함으로써 기존의 문제점을 제시하고 새로운 형태의 멤브레인 모델개발에 따른 이 모델의 거동해석을 수행하고자 한다.

2. 수치적 해석

멤브레인판의 기하학적 대칭성을 고려하여 모델을 1/4로 분할하였고, 이 모델에 대한 3차원 거동해석을 수행하였다. 멤브레인 판에는 저장액체의 압력에 의하여 주름에 수직으로 작용하는 균일분포 압력과 -162°C 의 균일한 온도장을 가정하여 유한요소해석을 하였다.

Figs. 1, 2와 3은 멤브레인의 유한요소해석을 위한 유한요소망을 보여주고 있는데, 본 논문에서 테크

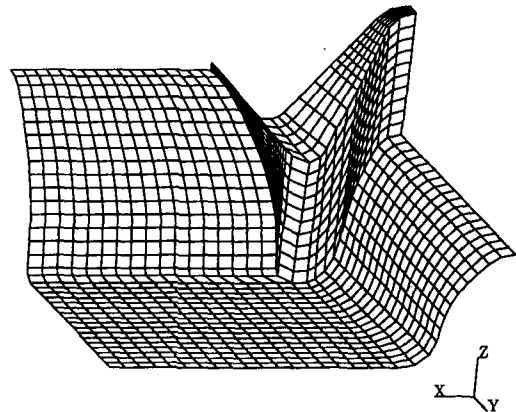


Fig. 1 Mesh generation of Technigaz membrane

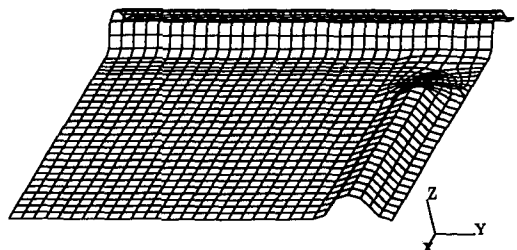


Fig. 2 Mesh generation of Kawasaki membrane

테크니가스 멤브레인, 가와사키 멤브레인, 링 마디식 멤브레인 모델은 각각 1314, 1175, 732개의 Doubly curved thick shell의 4절점 Twisted 사변형 요소와 1394, 1243, 781개의 요소절점으로 구성되어 있으며, 멤브레인의 형상은 기능상 구조가 복잡하기 때문에 사변형 메쉬구성은 구조물의 형상특성에 맞도록 재구성시켰고, 특히 주름 끝단부, 마디부, 주름과 마디가 서로 만나는 부분은 그림에서 보여주는 것처럼 보다 미세한 요소로 분할하였다. 여기서 유한요소해석용 프로그램은 가와사키 멤브레인 개발시 사용되었던 MARC⁽¹⁰⁾를 활용하였고, 본 과제 의 유한요소해석에서는 유한 변형률(finite strain elasticity), 대변위(large displacement)와 중동력(follower force)의 세가지 비선형성을 고려하였다.

수치해석에서 사용한 재질특성이나 경계조건에 관한 물성치는 Table 1에서 주어지며 부분적으로

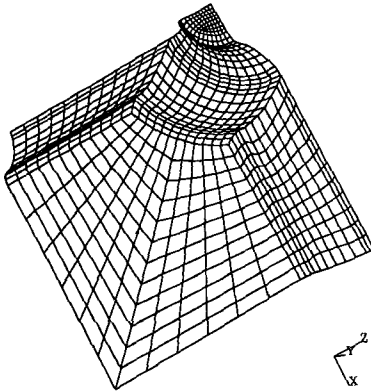


Fig. 3 Mesh generation of ring knot membrane

Table 1 Physical properties used in the FEM

Material	SUS 304
Thickness, mm	1.2~2.0
Elastic modulus,* kg/mm ²	0.32×10^3
Coef. of linear expansion,* mm/mm °C	1.4×10^{-5}
Poisson's ratio*	0.475
Specific gravity	7.85
Temperature, °C	-162
Pressure, kg/mm ²	0.1

* Experimental data of SUS304 corrugated sheet at -162°C

테크니가스사의 실험 데이터를 사용하였고, 링 마디식 멤브레인의 해석모델을 수행하기 위한 경계조건은 Fig. 4와 같다. 이 그림에서 경계면 1 및 2는 각각 대칭 경계조건을 가정하였다. 또한 주름마디부를 제외한 평판부(boundary 3)는 Z축 방향으로의 변위가 없다. 테크니가스 멤브레인(참조 Fig. 1)과 가와사키 멤브레인(참조 Fig. 2) 모델에 대한 경계조건도 링 마디식 멤브레인의 경계조건과 동일하게 적용하였다.

3. 계산결과 및 고찰

컴퓨터시뮬레이션을 수행한 모델은 기존에 개발된 멤브레인 중에서 대표적인 예라할 수 있는 프랑스의 테크니가스 멤브레인(TM), 가와사키 멤브레인(KM)과 새로이 개발한 링 마디식 멤브레인(RM)이다. 멤브레인을 보다 정확하게 해석하기 위하여 판재의 두께를 액과 접촉하는 상면(Layer 1), 두께의 중간면(Layer 2), 그리고 단열재와 접촉하는 하면(Layer 3)의 세부분에 대한 수치적 결과를 얻었으며, 본 논문에는 상면과 중간면에 대한 결과만을 제시하였다.

Figs. 5, 6과 7은 멤브레인 판재에 걸리는 von Mises 등가응력(equivalent von Mises stress) 분포도를 보여주고 있다. 세 가지 모델해석에서 멤브레인 상면에서 발생하는 von Mises 등가응력은 Fig. 5(a), 6(a)와 7(a)에서 보여주는 것처럼 테크니가스 멤브레인이 105 kg/mm², 가와사키 멤브레인이 78 kg/mm², 링 마디식 멤브레인이 32 kg/mm²으로 해석되었다. 또한 멤브레인의 중간면에 나타나는 von Mises 등가응력은 테크니가스 멤브레인이 가장 큰 61 kg/mm², 가와사키 멤브레인은 35 kg/mm²,

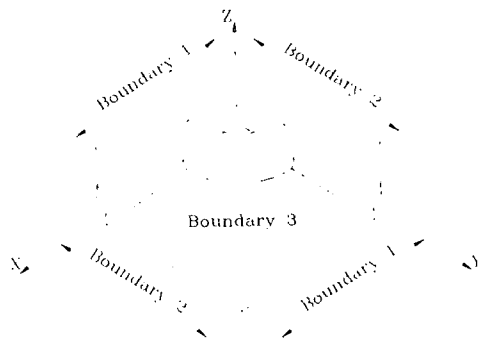
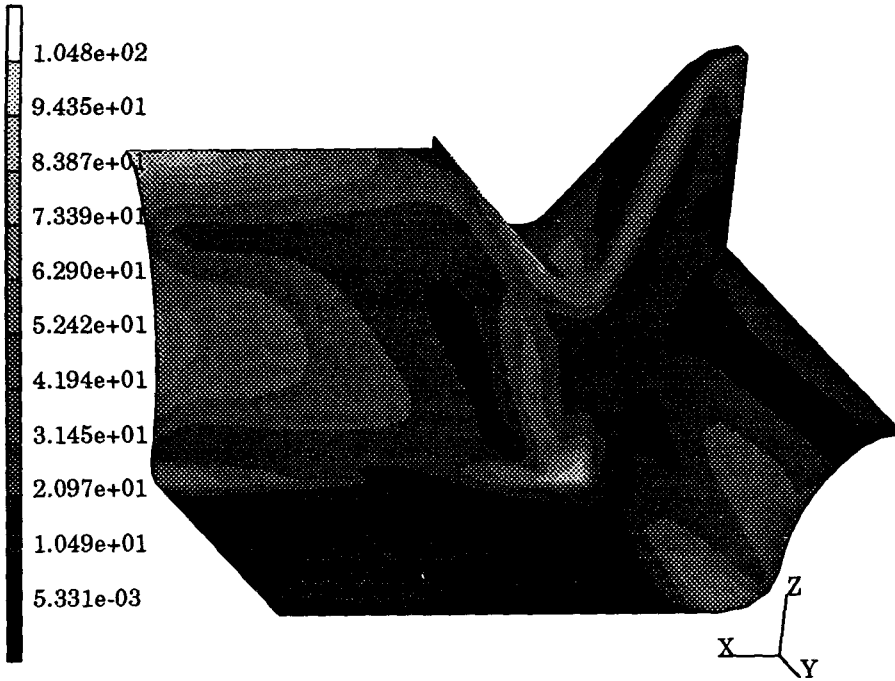
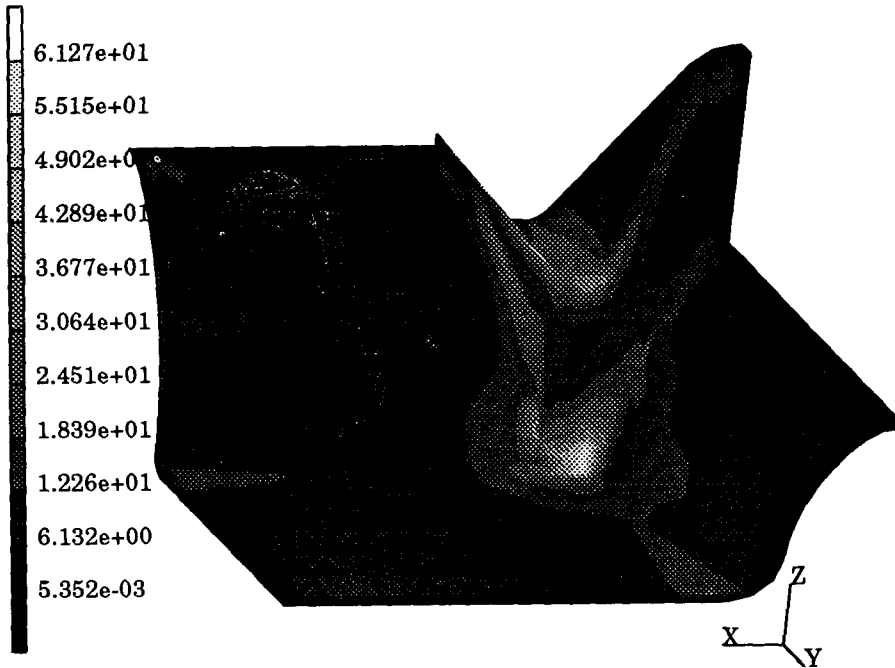


Fig. 4 Boundary conditions of ring knot membrane

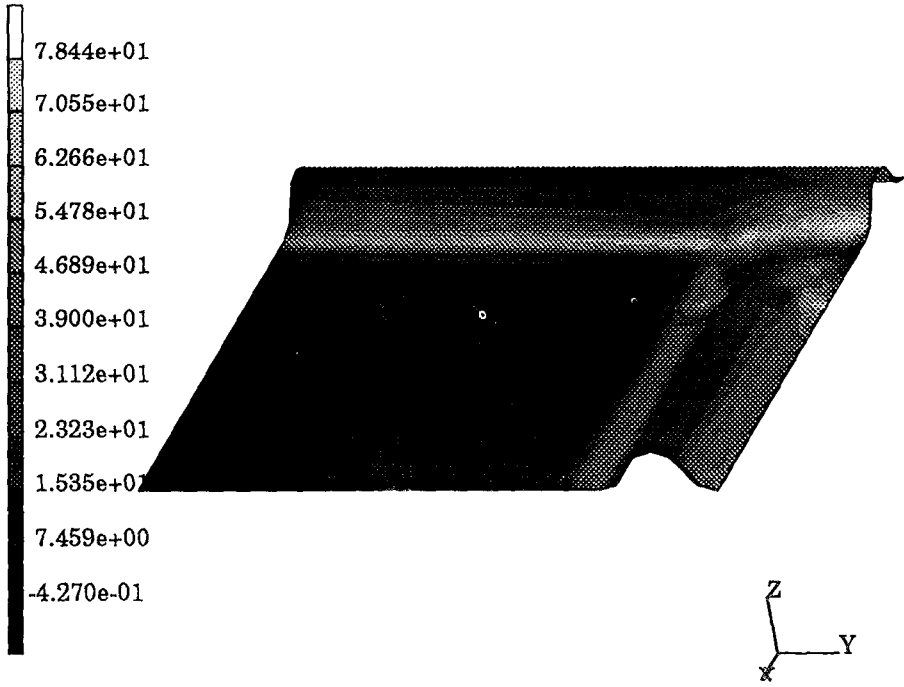


(a) First layer

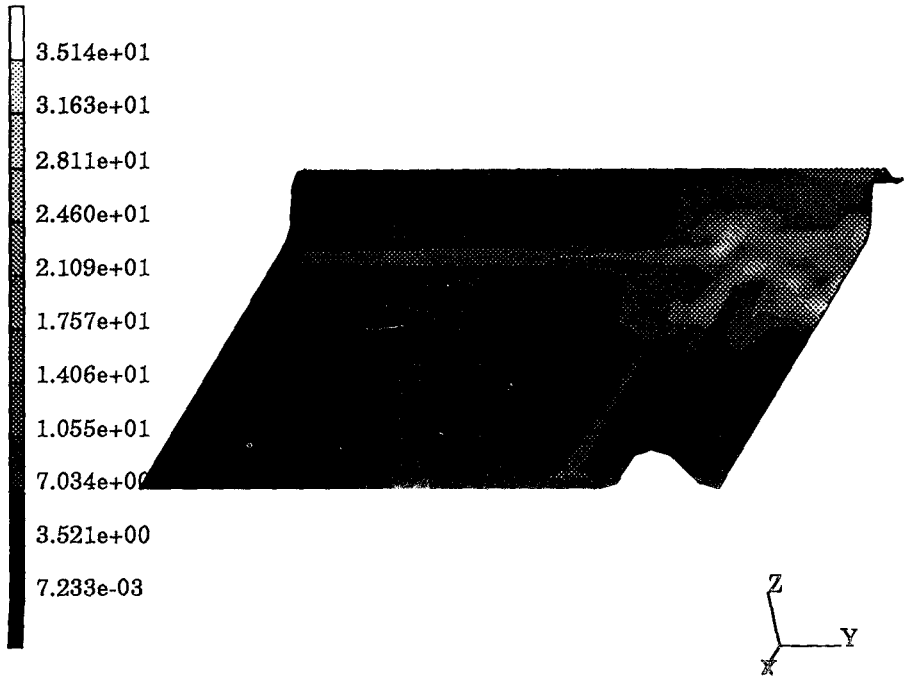


(b) Second layer

Fig. 5 Equivalent von Mises stress of Technigaz membrane



(a) First layer



(b) Second layer

Fig. 6 Equivalent von Mises stress of Kawasaki membrane

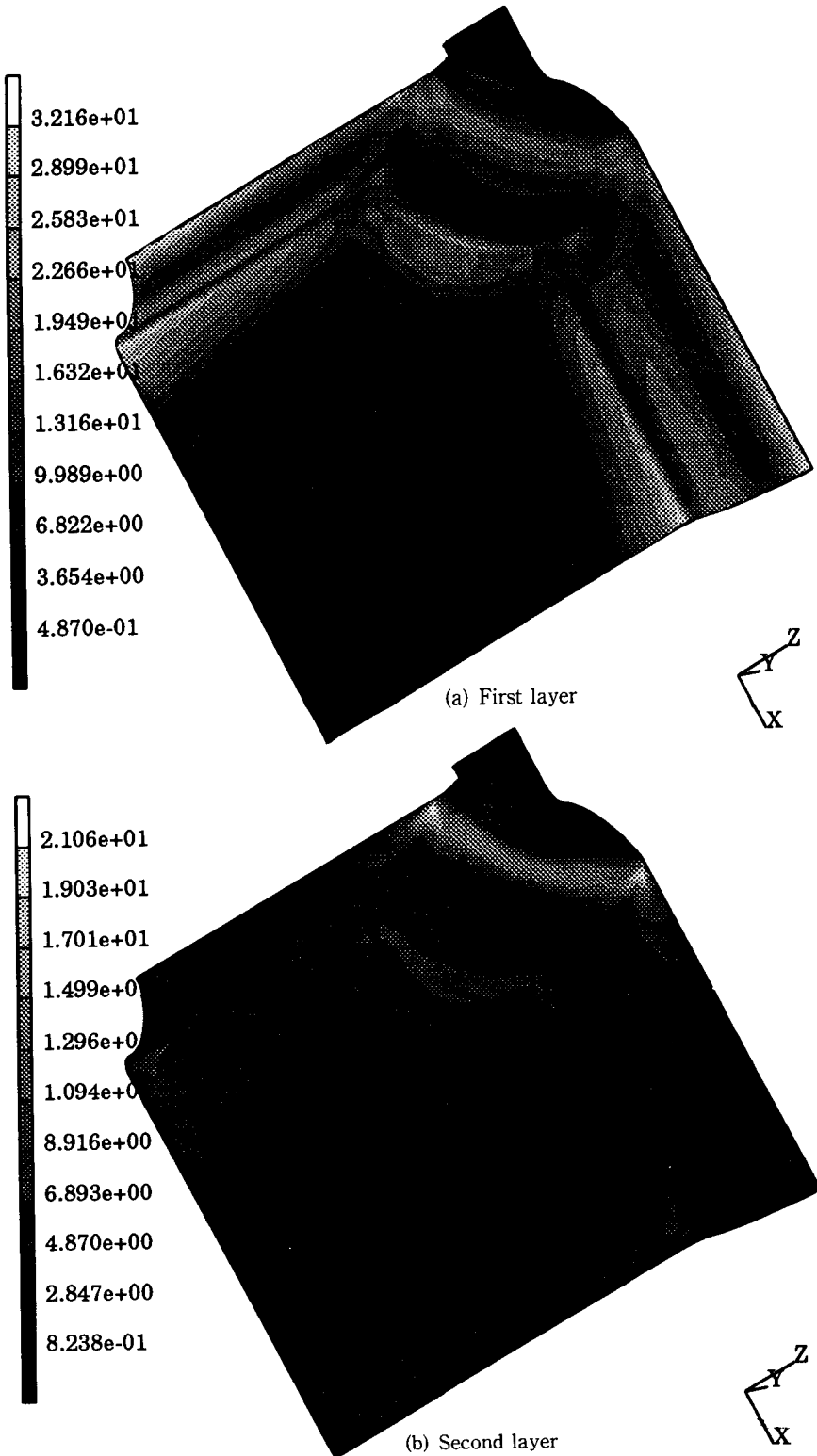


Fig. 7 Equivalent von Mises stress of ring knot membrane

링 마디식 멤브레인은 가장 작은 21 kg/mm^2 정도로 나타났다.

이들 계산결과에 따르면 테크니가스 멤브레인은 응력 집중도가 극부적으로 높으나 응력 분포도는 비교적 균일하게 해석되었고, 가와사키 멤브레인의 응력 집중도는 상대적으로 낮으나 특히 평판부와 맞나는 주름살의 끝단부에서 약간 불균일하게 분포되어 회전변형거동의 불안정성을 보여주고 있으며, 링 마디식 멤브레인은 응력이 대칭적으로 균일하게 분포하고 응력 집중도에서도 테크니가스 멤브레인 대비 약 65.6%, 가와사키 멤브레인 대비 40%의 수준을 유지하는 것으로 보아 기존의 두가지 멤브레인 모델에 비하여 대단히 우수한 성능을 보여주고 있다. 또한 멤브레인에서 가장 취약한 부위로 지적되고 있는 십자 마디부와 주름부위를 세가지의 모델에 대하여 서로 비교한 결과 링 마디식 멤브레인 모델이 $21 \sim 32 \text{ kg/mm}^2$ 으로 가장 안정적인 것으로 해석되었다.

Fig. 5(a)는 테크니가스 멤브레인 상면에 걸리는 등가응력 분포도를 보여주는 것으로 판재의 평판부와 주름이 교차하는 주름에서는 마디부에서 84 kg/mm^2 정도의 최대 압축응력이 작용하나, Fig. 5(b)의 중간면 주름살에서는 상하면에서 발생하는 인장응력과 압축응력이 서로 상쇄되어 응력이 나타나지 않는다. 테크니가스 멤브레인 판에 작용하는 액압력은 주름판에 균일한 압력으로 작용하며, 이 때의 주름 정상부는 주름측면에 가해지는 압력의 영향이 상대적으로 크게 작용하는 것으로 나타났다. 따라서 주름의 형상은 정상부가 볼록하게 변하는 변형(deformation)을 일으키게 되므로 주름판에 압축변형이 발생되고, 온도변화는 탱크내의 멤브레인을 수축시키게 되는데, 단위 멤브레인판은 앵커볼트(anchor bolt)와 같이 용접된 상태이므로 판의 수축에 따른 앵커볼트 부위는 인장변형으로 거동하게 된다.

Fig. 6(a)의 가와사키 멤브레인 상면에서는 78 kg/mm^2 정도의 최대 인장응력이 주름살이 끝나는 부근에서 작용하고 있고, Fig. 6(b)의 중간면에서는 35 kg/mm^2 정도의 인장과 압축응력이 주름살이 끝나는 부근에서 불균일하게 발생하는 현상을 보여주고 있다. 가와사키 멤브레인의 경우는 테크니가스 멤브레인과는 상이한 거동변형을 나타내고 있는데, 특히 균일한 압력하중에서 주름부분의 거동은 주름의 정상부 높이가 낮아지는 형태로 변형이 일

어나며, 그 결과 평판과 주름이 서로 접하는 코너 반경 부분에 큰 응력이 집중되는 것으로 나타났다. 이것은 테크니가스 멤브레인에 비하여 주름부분에서의 변형률은 커지나 응력값은 감소하는 결과를 보여주고 있다.

Fig. 7(a)의 링 마디식 멤브레인에서는 32 kg/mm^2 정도의 인장응력이 평판부와 교차하는 주름살 부근에서 발생하고, 링마디의 정상부에서는 26 kg/mm^2 정도의 압축응력이 작용하고 있다. Fig. 7(b)의 중간면에서는 압력분포가 완전히 대칭적으로 균일하게 발생되며, 링마디 정상부의 링주름과 만나는 부위에서는 약 21 kg/mm^2 의 압축응력이 발생한다. 링 마디식 멤브레인의 특징은 상기의 두 가지 모델에 비하여 응력은 완전히 대칭적으로 분포하며, 링마디부와 주름살간의 응력 차이가 별로 없다는 점이다. 링 마디식 멤브레인에서 링 마디부분의 거동은 균일한 압력이 작용하고 있을 때 아래부분으로 변형이 일어난다. 즉, 마디에서 변형률은 커지지만 응력 집중도는 크게 감소하고 있는데, 이것은 멤브레인판에서 발생하는 피로파괴의 원인을 크게 완화시킬 수 있다. 링 마디식 멤브레인의 경우 마디부에서 응력이 작게 발생하고 있다는 것은 멤브레인 구조물의 안정성 측면에서 대단히 중요한 장점이 될 수 있다. 또한 온도의 변화에 따른 수축변형은 테크니가스과 같은 방식의 변형거동이 일어난다.

MARC 유한요소 프로그램을 이용한 수치적인 해석결과에 의하면 응력 집중도나 응력 분포면에서 링 마디식 멤브레인이 가장 우수하게 나타났고, 테크니가스 멤브레인이나 가와사키 멤브레인은 응력이 크게 걸리는 것으로 해석되었으나 재질의 허용응력 한계내에 있으므로 강도상으로는 문제점은 없는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 초저온 저장탱크에서 널리 사용되는 대표적인 멤브레인 모델에 대하여 유한요소법을 이용하여 응력 거동해석을 하였다.

테크니가스 멤브레인, 가와사키 멤브레인, 새로운 형태의 링 마디식 멤브레인에 대한 해석을 수행한 결과, 세 가지의 멤브레인 모두 평판과 주름이 서로 접하는 코너부분과 주름마디에 큰 응력이 집중되는 현상을 보였다. 멤브레인 모델의 판재 중간

면에 걸리는 응력 집중도는 테크니가스 멤브레인이 61 kg/mm², 가와사키 멤브레인이 35 kg/mm², 링 마디식 멤브레인이 21 kg/mm²으로 각각 나타났고, 초저온 액체가 접촉하는 상면에서는 테크니가스 멤브레인이 105 kg/mm², 가와사키 멤브레인이 78 kg/mm², 링 마디식 멤브레인이 32 kg/mm²으로 해석되었다. 새로이 제안된 링 마디식 멤브레인은 응력 집중도나 응력 분포도면에서 다른 멤브레인에 비하여 대칭으로 균일하게 분포하면서도 가장 안정적인 것으로 해석되었다. 이 결과는 선박용이나 저장탱크용 멤브레인에서 압력과 액화중변화에 의하여 특히 문제가 되고 있는 피로수명을 크게 연장시킬 수 있다는 점에서 대단히 중요하다.

참고문헌

- (1) Tek, M. R., 1989, *Underground Storage of Natural Gas : Theory and Practice*, Kluwer Academic Pub.
- (2) Donald, L. Katz and Robert, L. Lee, 1990, *Natural Gas Engineering-Production and Storage*, McGraw-Hill, Inc.
- (3) 김청균, 김영규, 1992, "LNG 저장탱크의 현황과 동향," 가스안전지, 제18권, 제4호, pp. 65~71.
- (4) 日本特許公報, 昭53-3811, 1978, "抵温液化 가스탱크의 멤브레." "
- (5) 日本特許公報(B2), 昭62-46759, 1987, "抵温液化 가스탱크의 멤브레構造." "
- (6) 系山直之, 1991, "LNG船," 成山堂書店.
- (7) 日本가스協會, 1986, "LNG設備指針." "
- (8) Kawahara, M., Kurihara, M., Ohta, T., Tanaka, M., Umekawa, N. and Kawashima, M., 1984, "Fatigue Strength and Safety Assessment of Membrane Components," *Nippon Kokan Technical Report*, No. 42, pp. 11~18.
- (9) Katuyuki Kakehi, 1992, "The World's Largest LNG Inground Storage Tank of Kawasaki's Membrane," *10th Intl. Conf. on Liquefied Natural Gas*, Session III, Paper 7, pp. 1~20.
- (10) *MARC User's Manual*, 1993, Version K.5, MARC Analysis Research Co.