

링 마디식 멤브레인 유니트의 피치설계에 관한 유한요소해석

김 청 균 · 이 영 숙 · 차 백 순 · 오 병 택* · 윤 인 수* · 홍 성 호*

홍익대학교 트라이블로지 연구센터, *한국가스공사
(1999년 10월 6일 접수, 1999년 12월 24일 채택)

Finite Element Analysis on the Pitch Design of Ring Knot Type Membrane Unit

Chung Kyun Kim · Young-Suk Lee · Baeg-Soon Cha ·
Byoung-Taek Oh* · In Soo Yoon* · Seong Ho Hong*

*Tribology Research Center Hongik Univ., *Korea Gas Co.*
(Received 6 October 1999 ; Accepted 24 December 1999)

요 약

멤브레인 방식의 저장탱크 제작에서 가장 중요한 설계 파라메타인 멤브레인 유니트의 피치에 관한 응력거동 문제를 유한요소법을 사용하여 해석하였고, 이 결과를 기존의 피치 설계치수와 비교·검토하였다. 본 연구에서 고려한 링 마디식 멤브레인의 경우 피치의 길이를 어떻게 설정하든지 초대형 탱크의 경우에는 안전성 문제가 발생하지 않았다. 그러나 반복하중에 의한 피로강도가 문제되는 선박용 멤브레인의 경우에는 피치를 짧게 설계하는 것이 유리하다는 것을 보여주고 있다. 멤브레인 주름의 변형거동을 보면 주름의 높이는 방향 변형이 폭에 비하여 15~50% 정도 더 크게 발생하고, -162°C의 초저온에 의한 변형은 액압에 의한 변형과 비교할 때 그리 크지는 않음을 보여준다.

Abstract - This paper has been analyzed for the stress behavior problems of the ring knot membrane unit using the finite element method about the pitch design of the membrane unit, which is one of the most important parameters in manufacturing of the membrane type LNG storage tanks. The FEM results have been compared those of the existing pitch design length. The safety problem of the ring knot membrane model, which is considered in this study, does not come out any more no matter what the pitch length is used in the extra large LNG storage tanks. But in the case of the membrane for LNG tankers, it is advantageous to design the pitch short because of fatigue strength caused by repeated loadings. Looking at the deformation behaviors of the membrane corrugation, the deformation of the height in the y direction occurs 15~50% more than that of the width in the z direction. It shows also that the deformation of the membrane with -162°C cryogenic temperature is not so great compared with the deformation by hydrostatic pressure.

Key Words : Membrane, Ring knot, Pitch, LNG, Storage tank, FEM

1. 서 론

액화천연가스(LNG)를 안전하게 저장하는 탱크에는 멤브레인식 저장탱크와 9% 니켈 강재식 저장탱크의 두가지가 있고, 저장탱크를 설치하는 방식에 따라서 지상식, 지중식, 지하식 등으로 분류할 수 있다[1]. 한국이나 일본과 같이 인구밀도가 높고, 도시화가 집중된 나라에서는 LNG 저장탱크를 건설할 경우, 부지나과 안전성 확보 측면에서 초대형화와 지중식 또는 지하식으로 가는 경향이 있으나, 이에 따른 저장탱크의 건설 단가가 급등하는 문제점이 있다. 이러한 저장탱크의 초대형화는 설계 안전성 측면에서 9% 니켈 강재식 저장탱크보다는 설계기술을 극대화시킨 멤브레인식 저장탱크를 선호하는 경향이 있다.

초대형 저장탱크나 선박용 저장탱크에서 널리 사용하는 멤브레인 유니트의 핵심 구성 요소인 마디(knot)와 마디 사이의 거리를 피치(pitch)라고 하는데, 멤브레인 패널 제작에서 대단히 중요한 설계 파라메타이다. 즉, 멤브레인 패널 유니트에서 최적화 피치 설계는 거대한 LNG 저장탱크 건설에서 멤브레인 패널의 용접 길이를 크게 줄여줄 수 있으므로 저장탱크의 기밀성과 제작성이 우수해진다. 기존의 멤브레인식 저장탱크에서 현재까지 실제로 사용한 피치 설계는 경험적 요소와 부분적인 실험적 데이터에 의하여 결정되었으며, 피치설계와 관련하여 기존 데이터가 공개된 사례는 없고, 더욱이 해석적 연구가 발표된 예는 아직 없다.

본 연구에서는 멤브레인식 저장탱크 제작시 가장 중요한 설계 파라메타인 멤브레인 유니트의 피치설계를 어떻게 설정하는 것이 가장 유리한가를 유한요소법으로 해석하여 기존의 피치 설계치와 비교·검토하고자 한다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션

2.1. 해석 모델 및 유한요소망

본 연구에서 해석한 멤브레인 모델은 링 마디식으로 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 중앙에는 원형의 링 마디가 있고, 주변에는 십자형으로 분리된 4개의 주름이 링과 일정한 거리를 두고 일직선으로 설치되어 있다. 여기서 링과 주름의 형상에 관련된 주름의 높이와 폭, 곡률반경, 그리고 Fig. 1에서 보여주는 링의 반경 a

와 링과 분리된 직선 주름이 시작되는 중심부의 간격 b 는 기존의 연구[2,3]에서 가장 적합한 치수로 결정되었다. 본 연구에서는 멤브레인 패널의 크기를 결정해 주는 피치설계를 최적화시키고자 한다.

Fig. 1의 링 마디식 멤브레인은 기하학적으로 완벽한 대칭성을 이루기 때문에 멤브레인 유니트의 1/4만을 Fig. 2와 같이 고려하였고, 멤브레인 박판에 작용하는 응력거동 문제를 3차원적으로 해석하였다. 멤브레인의 상면(upper layer)에 작용하는 초저온 액체에 의한 액하중(최대 0.98MPa)과 -162°C 의 열하중을 동시에 고려한 응력거동 문제를 유한요소해석 프로그램인 MARC[4]를 사용하여 해석하였다. 멤브레인 유니트의 기하학적 형상과 외력조건에 따른 유한변형률(finite strain elasticity), 대변형(large displacement)과 종동력(follower force)의 세가지 비선형성을 고려하여 링 마디식 멤브레인에 대한 응력거동과 피치설계에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

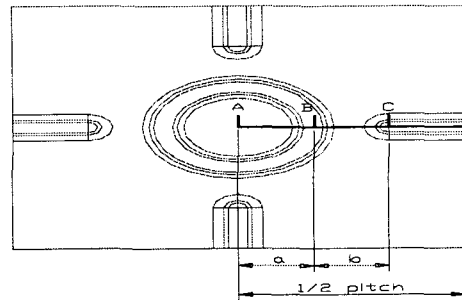


Fig. 1. Design variables of ring knot membrane.

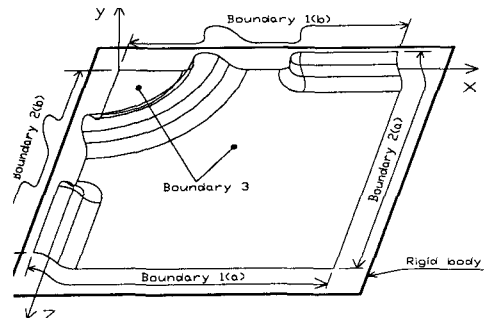


Fig. 2. Boundary conditions of the ring knot membrane.

멤브레인 유니트에 대한 응력거동 특성과 피치설계에 대한 열적-기계적 연계 해석(coupled thermal-mechanical analysis)을 수행하기 위한 멤브레인 소재의 물리적 특성은 -162°C 의 초저온 상태에서 획득한 데이터로 Table 1에서 제시하고 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 $^{\circ}\text{C}$	1.4×10^{-5}
• Poisson's ratio	0.475
• Specific gravity	7.85
• Cryogenic temperature, $^{\circ}\text{C}$	-162
• Ambient temperature, $^{\circ}\text{C}$	25
• Liquid pressure, MPa	0.245~0.98

Fig. 1과 같이 멤브레인의 응력변형 거동특성과 최적의 피치설계를 고찰하기 위한 유한요소해석에서는 639개의 사변형 요소와 701개의 요소절점을 사요하였다. 특히, 링 마디부와 직선 주름 사이는 응력상태가 대단히 복잡하기 때문에 구조물의 형상 특성에 맞도록 재구성하였고, 평판부와 맞나는 주름의 끝단부(corrugation edge), 링 마디 끝단부(ring knot edge)는 유한요소해석 결과의 정확성을 위하여 보다 미세하게 재분할하였다.

2.2. 경계조건

LNG 저장탱크의 내부탱크에 사용하는 Fig. 1의 멤브레인 유니트는 저장탱크에 가해지는 어떤 종류의 하중에 의한 변형도 안전하게 흡수하고 거동해야 한다. 또한, 저장탱크는 멤브레인 유니트에서 주름과 주름 또는 링 마디와 링 마디 사이의 거리, 즉 피치는 가능한 멤브레인이 사용되는 저장탱크의 크기, 하중조건, 육상 또는 선박 등의 환경조건에 맞도록 설계하여 용접거리 단축에 따른 경제성과 누설 안전성을 확보해야 우수한 성능의 멤브레인 설계가 된다.

이러한 목적을 달성하기 위하여 본 연구에서

해석 대상으로 선정한 링 마디식 멤브레인에 대한 유한요소해석을 수행하기 위하여 사용된 경계조건을 Fig. 2에서 보여주고 있다. 즉, 경계구역 1인 곳에서 z 방향의 변위 $w=0$, 회전항 $\theta_x=\theta_y=0$ 이고, 경계구역 2인 곳에서 x 방향의 변위 $u=0$, 회전항 $\theta_y=\theta_w=0$ 이다. $y=0$ 인 경계구역 3에 대해서는 저장탱크에서 단열재 박스에 의하여 실제로 하중이 지지되고 있기 때문에 여기서는 고정된 강체를 멤브레인의 밑면과 접촉시켜 $-y$ 방향의 변위를 구속하였다. 또한, 탱크에 저장된 액화천연가스에 의한 액압과 $-162 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 의 온도하중이 2mm 두께의 멤브레인 판재의 상면에 균일하게 작용하는 것으로 가정하였다. 즉, 링 마디식 멤브레인을 나타낸 Fig. 2의 상면(upper layer)에는 -162°C 의 초저온 액체가 접촉하고, 단열재 박스에 의하여 지지되는 하면(lower layer)은 25°C 의 상온과 접하고 있다.

3. 해석결과 및 고찰

멤브레인 패널 유니트에 대한 피치설계는 멤브레인 패널의 사용 환경과 저장탱크의 용량에 따라서 결정하는 것이 일반적이다. 그동안 상업적으로 개발된 테크니가즈 멤브레인의 1,2t 경우는 $560\text{mm} \times 650\text{mm}$, 그리고 KHL, MHI, IHI의 2.0t 경우는 $1266\text{mm} \sim 1900\text{mm}$ 의 피치 길이를 사용하고 있다. 육상용 저장탱크에서는 초대형으로 갈수록 일반적으로 피치가 커지고, 선박용에서는 피로하중 등을 고려하여 피치를 작게 설계하고 있다. 그러나 피치설계에 대한 객관적인 해석 데이터가 공개된 예는 없고, 현재까지 평가 기준 또한 없는 것이 사실이다.

피치설계에서 고려해야 할 설계 파라메타로는 멤브레인 주름의 변형 거동에 관련된 데이터가 있고, 멤브레인 판재의 좌굴[5]에 관한 문제가 있다. 그러나 멤브레인의 기본적인 설계 개념은 멤브레인 개개의 유니트 자체가 모든 하중과 모멘트, 응력거동 등의 측면에서 스스로 평형을 이루도록 설계되어야 하고, 멤브레인 유니트가 피치만큼 떨어진 이웃 유니트에 어떠한 영향을 미쳐도 안되기 때문에 실제로 좌굴에 의한 피치설계는 고려의 대상에서 제외된다.

그래서 본 연구에서는 멤브레인 유니트의 피치설계에서 탱크에 저장된 액화천연가스의 액하중과 초저온 액체에 의한 온도하중을 동시에

받는 경우에 대한 연계 문제를 링 마디와 직선 주름에 대하여 동시에 해석함으로써 피치설계를 위한 기본 데이터를 획득하고자 한다. 멤브레인 유니트에 대한 최적화 피치설계는 거대한 저장탱크 건설시 용접 길이를 최소화시킬 수 있으므로 저장탱크의 기밀성과 제작성을 크게 향상시킬 수 있다.

멤브레인 판재에 대한 설계변수 $A=b/a$ 가 결정되면 링 마디와 주름의 크기와 위치가 결정되고, 이어서 멤브레인 유니트를 연결시키는 길이인 피치가 결정되어야 한다. Fig. 1에서 A-D의 거리는 피치의 반을 나타낸 것으로 피치는 링 마디의 중심점 A로부터 이웃하는 링 마디의 중심점 A까지의 거리를 나타낸다. 피치를 결정하는데 고려되어야 하는 요인으로는 피치의 크기 변화에 따른 주름과 링 마디 주위에 미치는 응력분포, 제작시 발생할 수 있는 금형과 프레스 가공상의 문제점, 그리고 사용 가능한 스테인레스 판재의 크기 등이 있다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용한 수치적 해석을 통하여 주름 주위에 작용하는 응력분포를 해석하여 피치의 선정에 대한 필요한 기본 자료를 제시하고자 한다.

140,000m³의 초대형 저장탱크에 KHI 멤브레인을 사용한 경우의 피치는 1,250~1,370mm인데 비하여, Fig. 3(a)에서 보여준 계산 결과는 피치가 1,380mm인 경우에 대한 것이다. Fig. 3(a)는 피치가 1,380mm인 대표적인 멤브레인 유니트의 피치를 절반으로 분할하여 해석한 것으로 액하중과 초저온 액체에 의한 열하중을 동시에 받고 있을 때의 von Mises 등가 응력 분포를 나타내고 있다. 해석 결과에 의하면 링 마디보다는 피치의 중앙부인 직선 주름의 끝단부인 D지역 경사면에서 152MPa 정도의 최대 von Mises 등가 응력이 걸리고 있음을 알 수 있다.

이러한 계산결과를 기초로 여러 가지 액하중과 온도하중 문제를 멤브레인의 피치에 대하여 계산하면 Figs. 3(b), 4(b), 5(b)에서 보여주는 것과 같은 응력과 변형량에 관한 데이터를 제공할 수 있다. Fig. 3(b)는 멤브레인 패널이 세 가지의 액하중 0.98, 0.49, 0.245MPa를 받을 경우 각각의 직선 주름 끝단부의 경사면에서 발생하는 최대 von Mises 등가 응력을 피치의 함수로 제시하고 있다. 즉, 피치가 600mm 정도까지는 최대 응력이 완만하게 증가하다가 600~900mm에서는 불안정하고, 피치가

1,000mm 정도를 넘어서게 되면 멤브레인의 응력이 피치에 관계없이 다시 안정화된 상태를 보여주고 있다. 또한, 멤브레인에 작용하는 액하중이 0.98MPa과 같이 증가할수록 피치가 600~900mm 구역에서 불안정하게 나타나지만 액하중이 0.49, 0.245MPa로 낮아질수록 피치의 전구간에서 대단히 안정화된 결과를 보여준다. Fig. 3(b)에서는 멤브레인의 상면에 작용하는 액체가 -162℃와 25℃의 두가지 경우에 대한 해석결과를 제시하고 있는데, 열하중이 액하중에 비하여 커다란 영향을 주지 못하고 있다.

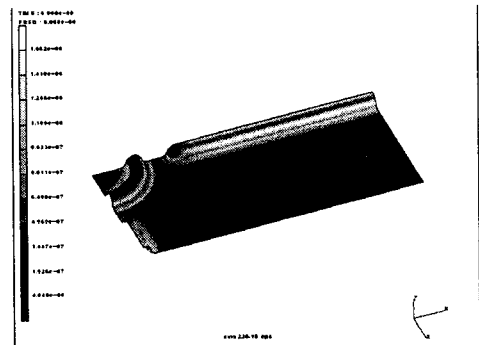


Fig. 3(a). Equivalent von Mises stress distributions for the pitch of 1,380mm with $p=0.98$ MPa.

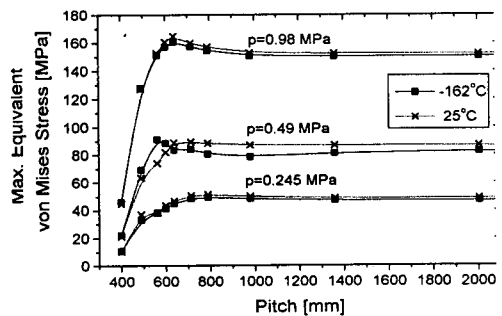


Fig. 3(b). Maximum equivalent von Mises stress as a function of the pitch for various values of liquid pressures and thermal loadings.

상기의 응력거동 결과를 요약하면 링 마디식 경우 피치 크기를 어떻게 설계해도 커다란 문제가 없다는 사실을 Fig. 3(b)에서 보여주고

는 있으나 멤브레인의 피치설계에서 100,000m³ 이상의 대형 저장탱크에서는 피치를 1,000mm 이상으로 설계하는 것이 보다 안정적이고, 그 이하에서는 차라리 피치를 600mm 이하로 설계하는 것이 바람직하다는 결과를 보여주고 있다. 이러한 결과는 현재 멤브레인 저장탱크 건설시 사용되는 실제의 데이터와 유사한 경향을 보여주고 있다는 사실에 주목할 필요가 있다.

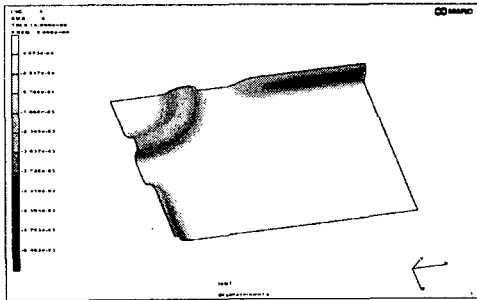


Fig. 4(a). Displacement distribution in the y direction for the pitch of 600mm with $p=0.98\text{MPa}$.

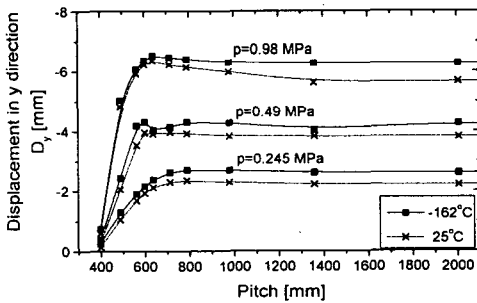


Fig. 4(b). Displacement in the y direction as a function of the pitch for various values of liquid pressures and thermal loadings.

Figs. 4(b)와 5(b)는 주름의 경사면에서 최대 von Mises의 등가응력이 걸리는 점에서의 높이방향 거동을 나타낸 y 방향과 폭방향 거동을 나타낸 z 방향의 변형거동을 각각 보여주고 있다. 이 지점에서 높이방향의 변형이 폭방향의 변형에 비하여 크게 변형 거동하고 있으며, 온도에 의한 영향이 높이방향의 변형보다 폭방향의 변형에 더 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 주름의 높이방향 거동 결과를 제시한 Fig. 4에 의하면 주름이 상온인 경우보다는 -162°C

의 초저온 액체와 접촉하기 때문에 주름의 높이가 낮아지는 현상(y 방향으로 감소)을 보여준다. 또한 주름의 폭방향 변형 거동을 보여준 Fig. 5에 의하면 멤브레인 유니트가 상온인 경우보다는 멤브레인의 상면에 -162°C 의 초저온 액체와 접촉하는 경우 폭방향으로 줄어드는 안정된 현상(z 방향으로 증가)을 보여주는데, 이것은 Fig. 6에서 초저온 액체에 의한 폭방향 수축과 연계된 거동이다. 이들의 결과를 보면 멤브레인 주름의 거동은 열하중에 의하여 영향을 받기는 하지만 그리 크지는 않고, 주로 LNG의 액하중에 의한 영향이 크게 작용하고 있다. Figs. 4과 5에서 제시한 멤브레인 주름의 변형거동을 보면 주름의 높이방향 변형(Fig. 4)이 폭방향(Fig. 5)에 비하여 15~50% 정도 더 크게 발생하고, -162°C 의 초저온 액체에 의한 열변형도 발생은 하지만 그리 큰 영향은 주지 못하고 있다.

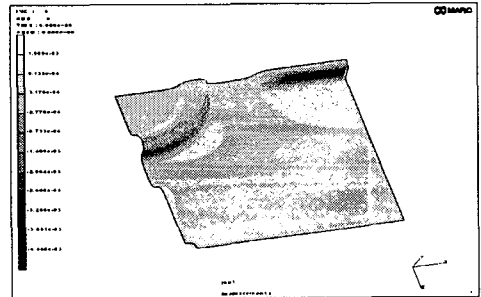


Fig. 5(a). Displacement distribution in the z direction for the pitch of 714mm with $p=0.98\text{MPa}$.

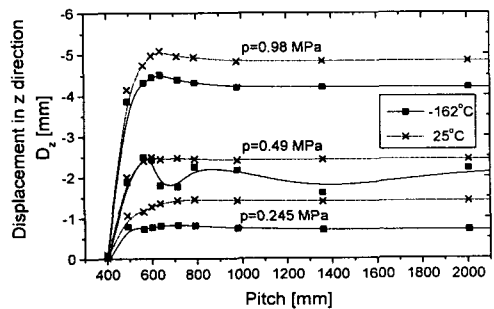


Fig. 5(b). Displacement in the z direction as a function of the pitch for various values of liquid pressures and thermal loadings.

링 마디식 멤브레인에서 직선부 주름의 끝단부 형상 거동은 피치의 크기에 따라서 변화한다. Fig. 6은 피치길이가 1380mm인 직선부 주름의 끝단부에 0.98MPa의 액압이 각각 25°C와 -162°C의 온도하에서 작용하고 있을 때 von Mises의 등가응력 분포를 나타내고 있다. 25°C와 -162°C일 때의 최대값은 각각 155.1MPa과 152.6MPa을 나타내고 있으며, 이 값들은 Fig. 3(b)에 제시되었다. Fig. 6(c)는 주름의 정점부, 최대 von Mises 등가 응력이 작용하는 주름의 경사부, 평판부와 맞나는 주름의 끝단 반경부 세곳에서 25°C와 -162°C의 온도하에서 발생하는 변형거동을 비교한 것이다. 직선 주름의 끝단 반경부의 절점의 위치는 액하중에 의하여 폭방향(-z 방향)으로 변형되었다가 -162°C의 온도하중에 의하여 +z 방향으로 변화하는 모습을 보여주고 있다. 이 때에 주름의 정점부에서는 높이 방향(y 방향)으로의 변위가 Fig. 2의 경계조건 1(b)처럼 구속되지 않았으므로 25°C의 액압에 의하여 주름의 높이가 낮아지고, -162°C의 초저온 액체에 의하여 더욱 낮아진다. 이것은 패널의 양쪽 끝단(Fig. 2에서의 경계조건 1(a)와 1(b))에서 폭방향(z 방향)의 변위가 구속된 상태에서 -162°C의 초저온의 열하중에 의한 패널의 수축 때문이다. 또한, 최대 von Mises 등가 응력이 작용하는 주름의 경사면에서는 폭방향으로 증가된 변위(+z 방향)와 높이방향으로의 감소(-y 방향)된 변위량을 나타내고 있다.

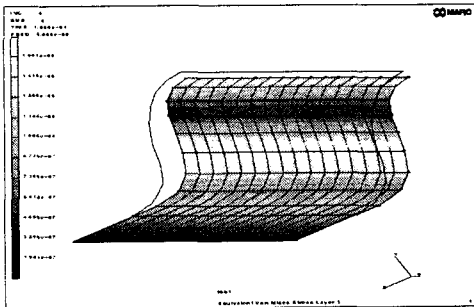


Fig. 6(a). Deformed profile of the straight corrugation for the pitch of 1,380mm at the ambient temperature.

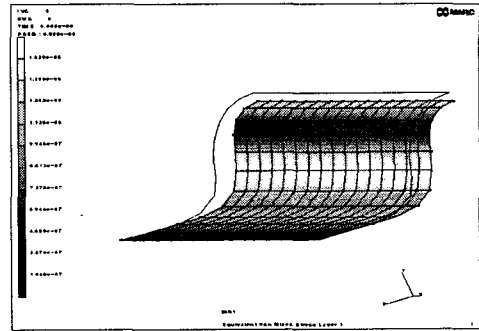


Fig. 6(b). Deformed profile of the straight corrugation for the pitch of 1,380mm at the cryogenic temperature.

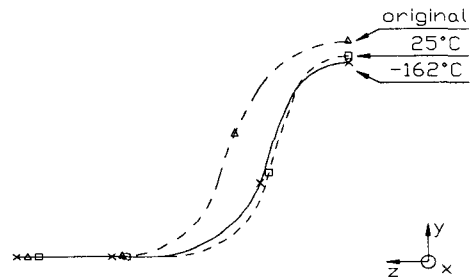


Fig. 6(c). Deformed profiles of the straight corrugation for the pitch of 1,380mm.

4. 결론

멤브레인 유닛의 설계 파라메타인 피치에 대한 설계를 최적화 시키기 위한 데이터를 비선형 유한요소해석법으로 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 용량이 100,000m³인 초대형 탱크에 링 마디식 멤브레인 유닛을 사용할 경우는 피치를 1,000mm 이상으로 설계하고, 100,000m³ 이하의 저장탱크에 사용할 경우는 피치를 600mm 이하로 설계하는 것이 바람직하다. 그렇지만 본 연구에서 고려한 링 마디식 멤브레인의 경우 초대형 탱크에 사용할지라도 피치를 어떻게 설정하든지 안전성 측면에서 문제가 없되지만, 반복하중에 의한 피로강도의 영향을 많이 받는

선박용 멤브레인의 경우는 가능한 피치를 짧게 설계하는 것이 유리하다.

- 멤브레인 주름의 변형거동을 보면 주름의 높이방향 변형이 폭에 비하여 15~50% 정도 더 크게 발생하고, -162℃의 초저온 액체에 의한 변형이 발생은 하지만 그리 크지는 않다.

참 고 문 헌

1. 김청균, 김영규, 홍성호, "LNG 저장탱크 시스템의 안전기술 - 탱크 형식을 중심으로," 가스산업과 기술, 제1권, 제1호, pp. 30~40, 1997.
2. 김영규, 전인기, 윤인수, 이용원, 홍성호, 김청균, "액화천연가스 저장탱크용 멤브레인의 유한요소해석," 대한기계학회 논문집, 제18권, 제10호, pp. 2797~2804, 1994.
3. 김청균, 김영규, 홍성호, 윤인수, "유한요소법을 이용한 링 마디식 멤브레인 구조물의 응력해석," 대한기계학회 논문집, 제19권, 제12호, pp. 3151~3158, 1995.
4. "MARC user's manual," Version K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.
5. Okamoto, H., Onoue, A., Ohtani, Y., Shono, S and Ogura, S., "The Design Method of Aboveground LNG Storage Tank," Nippon Kokan Technical Report, No. 42, pp. 161~168, 1984.