

LNG 저장탱크용 멤브레인 형상설계를 위한 유한요소해석 Finite Element Analysis of the Corrugated Membrane of LNG Storage Tank for Its Geometric Design

김성원, 이성우, 이증남(삼성중공업 기전연구소)

Seong Weon Kim, Sung Woo Lee, Jung Nam Lee(SamSung Heavy Industries)

ABSTRACT

Corrugated membranes which are used as a means of liquid- and gas-sealing for a LNG storage tank and provide one of the most reliable primary barrier are the main component of in-ground membrane types for the assurance of high safety. It absorbs large thermal and mechanical deformations caused by ultra low temperature of LNG, -162°C , the cryogenic liquid and boil off gas pressure. Stress analysis was carried out on crossing corrugation by a commercial F.E. code, ANSYS.

This paper presents some of results in stress analysis of membranes performed for the purpose to investigate the strength of existing membrane for LNG storage tank designed by IHI, MHI, KHI and KGC expect for Technigaz early published.

Based on these analytical studies, design criteria were established and SHI original membranes having a high level of safety and fitting to larger capacities were developed.

Key Words : LNG storage tank(액화천연가스 저장탱크), liquid-sealing(액밀), gas-sealing(기밀), crossing corrugation(십자형 주름), design criteria(설계기준), safety(안정성)

1. 서 론

최근 우리나라에서도 에너지자원의 다변화정책과 환경오염에 대처하기 위한 청정에너지로써 액화천연가스(Liquefied Natural Gas)의 수입 및 사용이 급증하고 있으며 이에 대응하여 수입기지 및 저장설비의 확충이 계속되고 있다.⁽¹⁾ 당사에서는 LNG 저장탱크와 관련한 사업을 지속적으로 추진하고 준비하여 왔으며 특히 고비용의 멤브레인의 자사 생산을 적극 검토하고 있다.

LNG 저장탱크는 크게 지하식과 지상식으로 분류되며 이 중에서 원통형 혹은 다각형으로 이루어진 멤브레인형 지하식 저장탱크에는 액화온도 -162°C 의 액화천연가스와 직접 접촉하면서 액밀(Liquid-Sealing)과 기밀(Gas-Sealing)을 보존하기 위하여 내벽에 멤브레인을 설치한다.⁽²⁾

사용기간동안 저장탱크는 운송선으로부터 액화천연가스의 주입, 저장 및 탱크 외부로의 송출을 반복하며 따라서 주입 및 송출시의 온도변화에 따른 수축과 팽창을 모든 방향으로 원활하게 흡수할 수 있도록 마디부에 십자형주름을 설치하는데 이 형상은 저장시 자중에 기인한 액압 및 기화압력을 보냉재에 전달할 수 있

어야 한다. 또한 사용수명동안 주입과 송출에 따라 반복적으로 열응력과 액압을 받으며 따라서 피로 파손에 대하여 안정성을 유지할 수 있어야 한다.⁽³⁾

초저온상태에서 구조적으로 강건성을 유지할수 있는 멤브레인 재질로는 저온에서도 우수한 인장강도와 피로강도를 갖는 그리고 내식성, 성형성 및 용접성이 양호한 약 1.2~2.0 mm 두께의 오스테나이트계 스테인레스강이 대부분 사용되고 있다.⁽⁴⁾

지금까지 온도변화에 따른 수축 및 압력변화에 원활하게 변형할 수 있도록 개발된 멤브레인들은 두종류로 구분된다. 1960년대초 프랑스 Technigaz사에서 양방향으로 주름크기가 다른 그리고 주름부의 수축을 마디부에서 흡수 가능한 형상으로 이루어진 단열주름식 십자형 멤브레인을 육상용과 선박용에 적용할 수 있도록 처음으로 개발하였다.⁽⁵⁾ 그 후 Ishikawajima-Harima 및 Korea Gas Coperation^(6,7)에서 주름부 및 마디부의 형상은 다르지만 동일기능을 수행할수 있는 구조를 독자적으로 개발하였다. 이와 다른 형태로 Mitsubishi와 Kawasaki사들은 주름사이의 피치 중심에 위치한 앵커를 회전구조로 하며 주름을 단열 혹은 복열로 배열하여 수축시 앵커를 중심으로 회전변형이 가능한 구조를

개발하였다. 최근에는 용접길이를 단축으로 구조물의 신뢰성을 향상시키기 위한 그리고 대용량의 저장이 가능한 탱크에 대한 요구에 따라 주름(Corrugation) 사이의 피치간격을 크게하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

구조물에 대한 안정성을 검토 그리고 개발시 설계기준을 도출하기 위한 사용시 멤브레인의 변형거동에 대한 해석으로 NKK의 M. Kawahara등⁽⁸⁾은 Technigaz 멤브레인을 도입하면서 피로강도 특성을 평가하기 위하여 구조해석 프로그램 SAP IV 및 NASTRAN을 이용하여 응력평가를 수행하였다. 또한 J. Hirata등⁽⁹⁾은 Technigaz 멤브레인 마디부의 복잡한 형상을 모델링하기 위하여 양방향으로 5mm간격으로 실제형상을 분할 측정후 범용 해석코드인 THANKS를 이용한 구조해석과 실험적 방법을 동시에 수행하였다. MHI사의 出口明雄 등⁽⁹⁾은 실물모델을 사용하여 냉각시험을 수행함으로써 대용량에 적합한 멤브레인 개발에 따른 안정성을 확인하였다. 국내에서는 Kim 등^(1,6,7)이 MARC를 이용하여 Technigaz 및 Kawasaki형 멤브레인 변형거동 해석을 수행한 바 있다.

본 연구에서는 기존 사용실적을 갖고 있는 멤브레인에 대한 유한요소해석을 수행하여 멤브레인 구조물의 변형거동을 파악하고자 하였으며 이를 바탕으로 대용량에 적합한 그리고 안정성이 우수한 멤브레인을 개발하기 위한 기준을 설정함과 동시에 본 연구에서 형상 설계된 고유 멤브레인 모델의 이론적 접근방법에 의한 안정성을 제시하고자 한다.

2. 멤브레인 유한요소 해석

멤브레인 구조물의 안정성은 LNG 저장탱크의 사용조건에 기인하여 엄격히 제한되어 있다. Fig.1은 일반적인 지하식 저장탱크의 단면도를 나타낸 것으로 외벽에는 PC콘크리트 본체를 그리고 내벽에는 멤브레인을 설치하며 그 사이에 보냉재를 사용하여 탱크내부에 저장된 LNG기화를 최소한으로 억제시키는 구조로 되어 있다. 저장탱크의 운전은 주기적인 주입, 저장 및 송출을 반복하며 따라서 멤브레인 설계시 운전중 안정성을 유지하기 위한 다음과 같은 하중조건이 설정된다.

- 1) 정적하중에 대한 안정성 확인
- 2) 하중 조건이 해소되었을 때 원래 형상으로 회복이 가능한 지에 대한 안정성 확인
- 3) 하중을 받은상태에서 시간에 따른 변형거동의 확인
- 4) 사용수명 동안 반복하중에 기인한 피로파손에 대한 안정성 확인

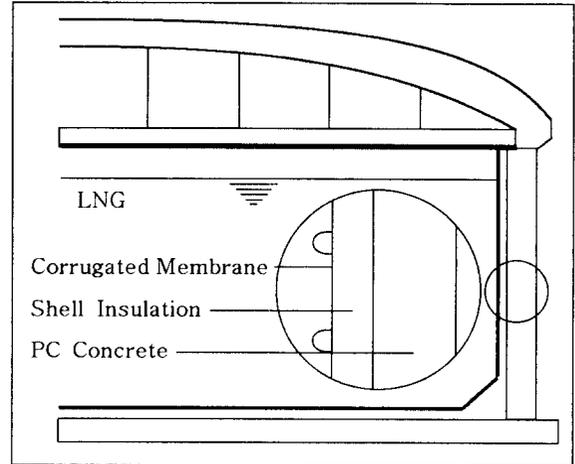


Fig.1 Schematic Sectional Drawing of Inground Liquefied Natural Gas Tank.

위의 안정성에 대한 확인과정은 최종적으로 실물모델을 통한 검증을 필요로 하나 형상설계시 이론적으로 변형거동의 해석을 통하여 접근할 수 있다.

오스테나이트계 스테인레스 박판(SUS304)으로 성형된 소재는 변형경화에 기인하여 그리고 구조물의 사용온도가 초저온인 경우 강도상의 변화가 발생한다. 따라서 이미 공사에 투입되어 현재 사용중인 멤브레인의 변형해석을 수행함으로써 실제 사용중 멤브레인 구조물의 변형정도를 파악하고 이를 바탕으로 본 연구에서 개발하고자하는 멤브레인 형상설계 기준으로 삼고자 유한요소 해석을 수행하였다.

2.1 하중조건 설정 및 재료물성치

설계기준을 설정하기 위하여 지금까지 개발된 멤브레인의 유한요소 해석을 위한 하중조건은 저장탱크의 용량과 주름 피치를 고려하여 그대로 사용하였으나 당사 멤브레인을 개발하기 위한 하중조건으로는 사용조건에 엄밀한 분석과 구조물의 안정성에 관한 LNG 저장탱크 지침으로부터 Table 1과 같은 하중조건을 설정하였다. 또한 Table 2는 해석시 사용된 오스테나이트계 스테인레스 강판의 재료물성치를 보여준다.

2.2 경계조건 설정

지금까지 제시된 각 사 멤브레인에 대한 유한요소 해석을 수행하기 위한 경계조건은 형상 및 온도변화시 변형거동의 차이에 따라 두가지로 분류하여 설정하였다. IHI와 KGC형은 멤브레인의 대칭성을 고려하여

Table 1 Typical Loading Condition on Membrane Components

Loading Condition		Values	Cycles
Thermal Load	Inspection	190 °C	32
	LNG Loading	70 °C	1500
Hydro-Static Pressure		1.65	1500
Units : Pressure (Kg./cm ²) Temperature (°C)			

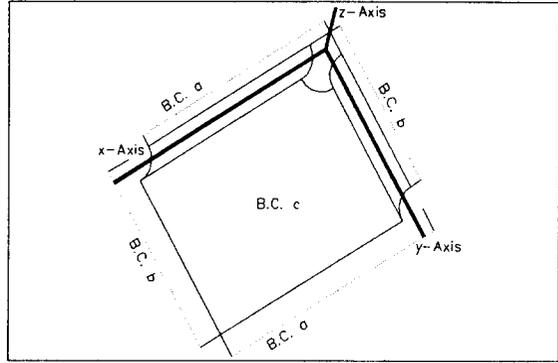
Table 2 Material Properties of SUS 304 used in F.E. Analysis.

Material Properties		Units
Material	SUS 304	
Elastic Modulus	20500	Kg./mm ²
Coefficient of Linear Thermal Expansion	1.4×10^{-6}	mm/mm
Poisson's Ratio	0.3	
Sheet Thickness	2.0	mm

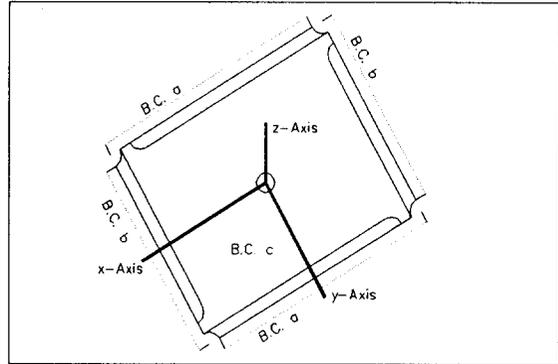
1/4-모델만 해석하였으며 경계조건은 Fig.2(a)와 같다. 그러나 MHI 및 KHI형 멤브레인의 경우 앵커를 중심으로 회전운동을 하면서 수축을 흡수하므로 주름 피치 전체에 대한 모델을 구성한 후 Fig. 2(b)와 같이 경계조건을 설정하였다. Fig. 2의 경계조건에서 B.C. a는 x-축에 직각인 면에 그리고 B.C. b는 y-축에 직각인 면에 대칭조건을 고려하여 구속조건을 설정하였으며 B.C. c는 z-방향 변위를 구속시켰다. 또한 저장 액체의 자중에 의하여 작용하는 압력은 표면에 수직하게 하중조건을 부여하였다. 또한 온도변화를 고려하기 위하여 28°C의 기준온도를 설정한 후 -162°C의 균일 온도장을 하중조건으로 설정하였다.

2.3 유한요소법에 의한 변형거동 해석

Fig. 3은 IHI의 Cross Type 멤브레인에 대한 유한요소 격자생성 모델의 일부를 보여준다. 멤브레인의 격자형상은 각사 기밀로 보존되고 있다. IHI 멤브레인의 경우 격자생성을 위한 형상 데이터는 3차원 측정기(ZEISS UMC 850)를 이용하였다.



(a) Boundary Condition of IHI-Type Membrane



(b) Boundary Condition of MHI-Type Membrane
Fig. 2 Boundary Conditions of Existed Membrane

모델은 Shell 63으로 4091개의 Nodes와 4038개의 Elements로 구성되었다.



Fig. 3 Mesh Generation of IHI Membrane

Fig. 4는 온도편차가 190°C인 경우 IHI 멤브레인의 등가변형을 분포를 보여준다. 이 그림으로부터 온도편차에 따른 직선주름부의 수축을 십자형 주름의 팽창에 의하여 흡수함을 알 수 있으며 최대변형률의 발생은

곡율이 작은 모서리에서 발생한다.



Fig. 4 Equivalent Strain of IHI Membrane.

Fig. 5는 동일온도 편차에서 KGC 멤브레인이 받는 변형을 분포를 나타낸다. 여기서 주름피치는 소재치수를 기준하여 660mm로 하였다.

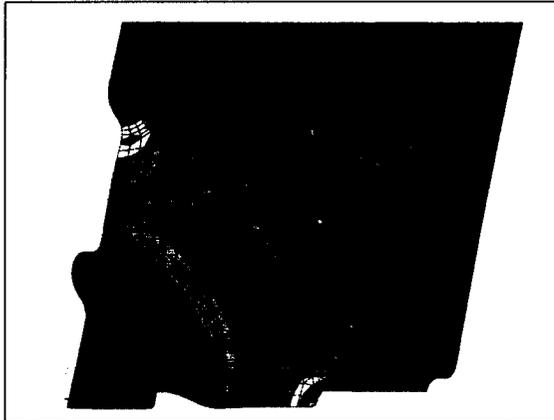


Fig. 5 Equivalent Strain of KGC Membrane

Fig. 6은 KHI 멤브레인이 받는 등가변형을 분포를 나타낸다. 변형률분포로부터 직선주름부의 수축에 의하여 중심에 대하여 회전하는 구조임을 알 수 있다.

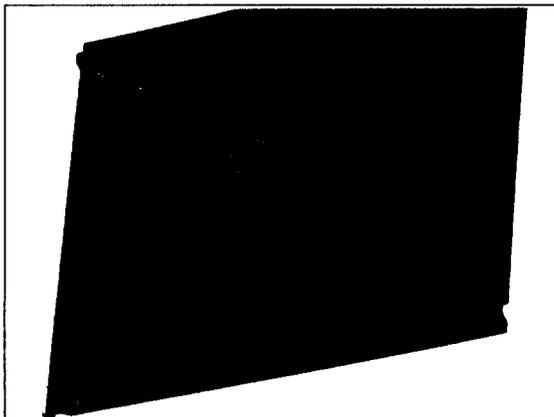


Fig. 6 Equivalent Strain of KHI Membrane.

Fig. 7은 MHI 멤브레인의 변형을 분포의 일부를 나타낸다. MHI 멤브레인의 경우 폭 8mm 그리고 높이 120mm의 주름으로 매우 얇기 때문에 주름 선단부에 응력이 집중되어 있는 것을 알 수 있다.

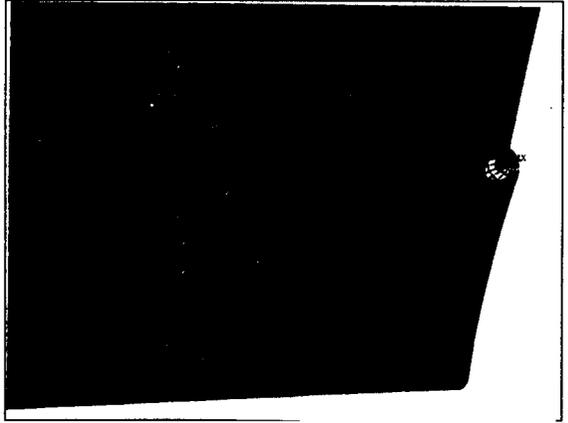


Fig. 7 Equivalent Strain of MHI Membrane.

이상의 해석결과로부터 Technigaz, IHI 및 KGC형 멤브레인의 경우 십자형 주름에서 온도편차에 의한 수축을 흡수하나 KHI 및 MHI형 멤브레인의 경우 직선 주름부의 앵커를 중심으로한 회전운동에 의하여 변형을 흡수한다. 변형에 대한 원활한 대응은 훨씬 뛰어나지만 주름 선단부의 복잡한 용접 제작공정에 기인하여 신뢰성 및 납기의 저하를 초래할 수 있다.

3. 고유모델 형상설계

기존 멤브레인의 변형해석은 열수축에 의한 변형거동 해석, 액압에 의한 변형거동 해석 및 열수축과 액압이 동시에 작용하는 경우로 나누어 해석되었다. 이 해석결과를 요약하면 Table 3과 같다.

Table 3 Calculated Results of Existing Membrane

	ΔT (190)	ΔT (70)	P (1.65)	$\Delta T+P$
IHI	100.0	36.8	25.7	167.3
KGC	138.0	50.8	28.6	200.7
KHI	43.3	15.9	12.3	47.2
MHI	94.5	34.8	25.0	131.3

이상의 결과로부터 본 연구에서 개발하고자 하는 멤브레인의 KHI의 복열주름식 멤브레인의 경우 가장 양호한 변형거동을 보인다.

고유모델 형상설계를 위하여 기존 멤브레인 형상에 대한 엄밀한 분석을 수행하였다. 앵커를 중심으로 회전운동을 통하여 주름의 변형을 흡수할 수 있는 멤브레인은 형상구성상 용접길이가 긴 특징을 갖고 있기 때문에 신뢰성을 고려하여 제외되었다. 따라서 마디부에서 모든 방향의 수축을 흡수할 수 있는 Technigaz, IHI 및 KGC형 멤브레인의 개발에 목표를 설정하였다. 특히 형상의 급격한 변화에 기인한 응력집중을 피하며 가능한 한 공정으로 성형이 가능하면서 성형후에도 초기소재와 거의 동일한 형상의 모서리를 유지할 수 있는 형상설계에 주안점을 두었다. Technigaz형 멤브레인의 경우 예리한 모서리가 다수 존재하여 변형시 응력집중의 발생을 피하기 어려운 단점이 있으며 또한 주름피치가 매우 작다. KGC형 멤브레인의 경우 주름피치가 큰 경우 원주방향의 변형에 기인하여 마디부에서 매우 큰 응력이 발생한다.

Fig. 8은 본 연구에서 개발된 마디부 형상을 보여준다. 원주방향의 수축에 대한 흡수가 용이하도록 마디부에 십자형의 주름을 부가하였다.

Table 4는 본 연구에서 개발된 멤브레인의 해석결과를 나타낸다. 이 결과로부터 IHI형 멤브레인과 거의 유사한 변형 흡수능력을 갖는 것을 알 수 있다.

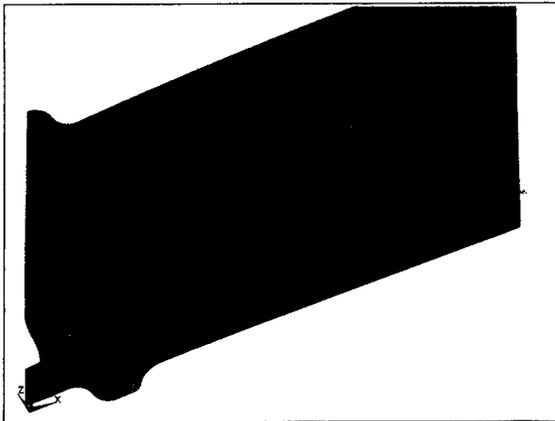


Fig. 8 Equivalent Strain of SHI Membrane.

Table 4 Calculated Results of SHI Membrane

	ΔT (190)	ΔT (70)	P (1.65)	$\Delta T+P$
SHI	103.8	38.3	35.2	172.5

4. 결론

본 연구에서는 이미 해석되어 발표된 Technigaz 멤브레인을 제외한 공사적용 경험이 있는 기존 멤브레인

들에 대하여 유한요소법을 이용한 변형해석을 수행하였다. 해석모델은 직교마디부에 모든 방향 변형이 흡수 가능한 구조로 되어있는 IHI 및 KGC형 멤브레인과 주름부 변형을 앵커중심 회전운동에 의하여 흡수하는 MHI 및 KHI형 멤브레인들이다. 이것들에 대한 상세한 변형거동의 파악이 가능하였다.

멤브레인 구조물의 용접길이가 단축을 통한 신뢰성 확보 및 저장공간 효율화를 위하여 대용량의 저장이 가능한 탱크로 확장되고 있는 추세이다. 따라서 주름피치를 가능한 크게함에 따라 액압보다 온도편차의 영향이 매우 중요하다는 것을 알 수 있었다.

이 해석결과를 바탕으로 멤브레인의 설계자료로 활용할 수 있는 기준이 제시되었으며 또한 안정성이 우수한 그리고 대용량에 적합한 고유모델 멤브레인의 형상설계를 수행하였다.

참고문헌

1. 김영규, 액화천연가스 저장탱크용 링마디식 멤브레인의 해석 및 설계에 관한 연구, 홍익대학교 박사학위논문, 1995.
2. 日本瓦斯協會, LNG 地下式 貯槽指針. 1979.
3. T. Udoguchi et al "Fatigue Characteristics of Type 304 Stainless Steel Thin Plates for LNG Inground Storage Tanks", JHPI, Vol.19, No. 4, pp. 1-7, 1979.
4. 남제복, 류도열, 김영석, "오스테나이트계 AISI 304 스테인레스 강판의 프레스 성형특성", 한국소성가공학회지, 제3권, 제1호, 통권 제6호, pp. 38~50, 1994.
5. J. Hirata et al, "A Study Concerning Cryogenic Storage(No. 2) - Stress Evaluations on Technigaz Type Membrane", 日本鋼管技報, No. 79, pp. 50-60, 1978.
6. 김영규, 전인기, 윤인수, 이용원, 홍성호, 김청균, "액화천연가스 저장탱크용 멤브레인의 유한요소해석", 대한기계학회 논문집, 제18권, 제10호, pp.2797-2804, 1994.
7. 김청균, 김영규, 윤인수, 홍성호, "유한요소법을 이용한 링마디식 멤브레인 구조물의 응력해석", 대한기계학회 논문집, 제19권, 제12호, pp. 3151-3158, 1995.
8. M. Kawahara et al, "Fatigue Strength and Safety Accessment of Membrane Components", Nippon Kokan Technical Report, No. 42, pp. 12-18, 1984.
9. 出口明雄, 西岡信之, "Development of Bended Corrugation Type Side Membrane of Inground LNG Storage Tanks", MHI, Vol. 33, No. 4, pp. 230 ~ 233, 1996.