論文 10-4-8

LNG 저장탱크용 멤브레인의 충격거동에 관한 실험적 연구

Experimental Study of Impact Behaviors of the Membrane for LNG Storage Tank

김 영 규*·김 청 균**
Young-Gyu Kim·Chung-Kyun Kim

ABSTRACT

This paper analyzes the behaviors of the membrane under drop impact loadings using the acoustic emission technique. The analysis is useful for evaluating the strength of the membrane as well as for studying its damping characterisics due to the corrugation and the ring knot. The membrane for LNG storage tank is basically composed linear and circular elements. Two membrane specimens have approximately same drop impact mass and same drop speed. Locan 320 system with piezoelectric sensor is used in the experimental measurement. Experimental results for the membranes indicated that AE siganls having higher energies were generated with increasing drop impact loadings. It was confirmed that the ring knot membrane has high absorption of drop impact loadings in comparison with the flat membrane. These results are very important to reliable design and to improve the safey of the membrane components.

1. 서 론

최근 가스관련 구조물의 안전성 문제가 크게 대두되면서 초저온 저장탱크 설비, 압력용기, 기계구조물 등의 평가에 대한 관심이 대단히 높아지고 있다. 특히 청정연료인 초저온의 액화천연가스(liquefied natural gas : LNG)를 저장하는 탱크[1,2]의 내부에는 스테인레스 강판으로 주름(corrugation)과 마디(knot)를 만들어 특수하게 제작한 멤브레인이라는 판재를 탱크벽면과 바닥에 설치하는

* 한국가스안전공사 기술연구처 제품연구부
** 홍익대학교 기계공학과

데, 멤브레인은 팽창과 수축을 자유로이 할 수 있을 뿐만 아니라 탱크내 액체의 슬로싱(sloshing)에 의한 변형거동을 흡수할 수 있도록 충분한 강도와 탄성을 갖어야 하기 때문에 구조물의 안전성에 대한 평가를 반드시 하여야 한다[3,4].

현재 구조물에 대한 강도평가 및 손상정도를 예측하기 위하여 사용되고 있는 재료측정법에는 자분탐상시험(magnetic test : MT), 액체침투탐상시험(liquid penetrant test : PT), 초음파 탐상시험(ultrasonic test : UT), 방사선 투과시험(radiographic test : RT), 와전류 탐상시험(eddy current test : ET), 음향방출시험(acoustic emission test : AE) 등이 있다[5]. 이와 같은 비파괴 검사기술중에서 AE측정법[6]은 재료내부에서 변형 및 파괴가 일어날 때 재료의 특성 및 작용응력의 형태에 따라 독특한 탄성파(elastic wave)가 방출되는데, 이러한 탄성파를 검출하여 재료내부에서 일어나고 있는 현상들을 간편하게 해석해 나아가는 새로운 재료평가법으로 각광을 받고 있다. 재료내의 응력파[7,8]는 크게 종파, 횡파, 표면파 및 평판파의 형태로 대별되며, 입축파라고도 불리는 종파는 입자가 파의 진행방향으로 파의 진동을 전달하며 반복되는 입축파 희박(rarefraction)의 연속으로 금속을 통하여 전달된다. 횡파도 역시 금속을 통하여 전달되는데 고체는 전파력에 저항성을 보이고 있어서 매질입자의 진동방향과 파의 전파방향이 서로 수직 모우드를 이룬다. 이들 파가 경계면에 닿으면 표면을 따라서 전파하는 표면파가 생긴다. 또한 평판파로 알려져 있는 Lamb파는 아주 얇은 두께의 금속에서 전파된다. 횡파의 전파속도는 종파의 약 60% 정도이고, 표면파의 전파속도는 횡파의 약 90% 수준에 이른다. 한편, 발생원으로부터 전달되는 응력파는 주파수 의존흡수(frequency dependent absorption), 경계면에서의 다중반사(multiple reflection), 입계와 불순물에 의한 산란(scattering), 경계면에서의 모우드 변환(mode conversion) 등과 같은 원인에 의하여 전달경로상에서 변형되는 것으로 알려져 있다.

음향방출법에 대한 연구동향을 살펴보면, 음향방출법은 초기에 지진학 분야에서 지질의 단층운동 특성을 감지하는데 사용되다가 1960년대에 C. A. Tatro가 공학분야에 응용하여 재료특성을 파악하는 비파괴 시험 측정기술로 이용할 수 있다는 가능성을 처음으로 제시하였고[9], 그 후 더욱 발전하여 압력용기나 기계구조물, 파이프 라인 등에 적용되어 미소균열의 발생이나 발생위치를 정확하게 예측할 수 있음을 보였다[10]. AE측정법은 특성상 이미 존재하고 있는 결함상태를 감지하지 못하는 단점은 있으나, 동적특성을 평가할 수 있는 기법으로 대형구조물의 위치표정(source location) 및 전체적인 상태를 파악할 수 있는 장점이 있다. 초저온 탱크의 구조물인 멤브레인의 경우, 사용된 재료의 신뢰성이나 또는 그 재료를 이용하여 제작된 구조물의 안전성을 확보하는 것은 대단히 중요하다.

따라서 본 연구에서는 초저온 저장탱크의 구조물로 김 등[11]에 의해 개발되어 특허를 출원중인 링 마디식 멤브레인(ring knot membrane)의 시작품을 대상으로 하여 자유낙하 하중에 따른 멤브레인 판재(membrane plate)와 기존의 편평한 판재(flat sheet)와의 충격흡수정도를 해석하여 멤브레인 구조물의 안전성 평가의 기본데이타로 활용할 수 있도록 하였고, 이들은 음향방출시험을 이용하여 실험적 연구를 수행하였다.

2. 실 험

2.1 실험모델

본 연구에서 선택한 실험모델은 멤브레인 주름판과 평판을 고려하였으며 Fig. 1과 같은 링 마디식 멤브레인이다. 여기서 사용한 두 모델은 500mm×500mm의 동일한 크기를 갖는다. 제시된

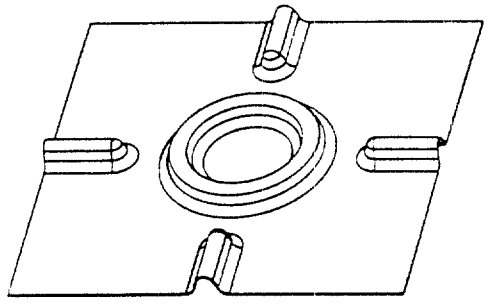


Fig. 1 Configuration of the membrane specimen

해석모델은 비등점이 −162℃인 액화천연가스를 저장하는 원통형 탱크의 내부탱크(inner tank)에 사용되는 멤브레인이고, 두께가 2mm인 판재를 사용하여 프레스 가공방법으로 제작하였다. 스테인레스 강판으로 만들어진 원형의 마디(knot)와 주름(corrugation)으로 구성된 멤브레인은 내부 초저온 액체의 누설을 방지하는 밀봉기능과 초저온의 온도변화에 따른 팽창수축을 흡수하는 역할을 한다. 또한 초기에 LNG액의 충전이나 슬로싱(sloshing)에 의하여 발생되는 충격에너지의 일부를 흡수함으로써 탱크본체에 가해지는 충격력을 감소시켜 주는 작용을 한다.

본 연구에서는 링 마디식 멤브레인의 단일모듈(single module) 판재와 동일한 크기의 평판재에 대하여 충격시험을 수행하였고, 멤브레인 판을 500mm와 1000mm의 높이에서 자유낙하시킬 경우 충돌속도는 $v=\sqrt{2gH}$로 계산된다. 또한 본 실험에서 고려한 낙하하중은 50kg, 100kg으로 하였다. 일반적으로 초저온에서는 재료에 저온취성이 발생하게 되어 재료의 강도에 커다란 영향을 주게 되는데 오스테나이트계 스테인레스(STS 304)는 −273℃까지 사용가능한 우수한 초저온용 재질이다[12]. 본 실험에 사용된 멤브레인 재료의 기계적인 특성치 및 화학조성을 Table 1과 2에 각각 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of STS 304

Yield strength (kg/mm^2)	Tensile strength (kg/mm^2)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
28.8	87.6	54.7	163

Table 2 Chemical compositions(wt %) of STS 304

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
0.045	0.58	1.07	0.025	0.003	18.24	8.59	0.039

2.2 실험방법

2.2.1 AE신호 계측이론

AE는 파동현상의 일종으로 재료 또는 구조의 특성이나 현상을 규명하기 위해서는 일정한 거리로 전달된 파동을 측정하고 해석하여야 한다. 시편에 고정설치된 AE센서에서 발생된 진동주파수는 전압상태로 변환되어 나타나게 되며, 이때 AE센서의 출력전압 V(t)는 다음식과 같이 표현된다.

$$V(t)=V_i e^{-\gamma t}\sin\omega t \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서 V_i는 진폭의 초기값, ω는 주파수, γ는 소멸상수, t는 시간을 각각 나타낸다.

AE에너지는 해석장치에 포함된 기능을 이용하여 처리되는데, AE에너지는 출력전압의 자승형태인 문턱전압값(threshold voltage) 이상의 적분값이므로 다음식으로 계산되어 계측된다.

$$E=\frac{1}{R}\int_0^{\infty} V^2(t)dt \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서 R은 계측회로의 저항값이다.

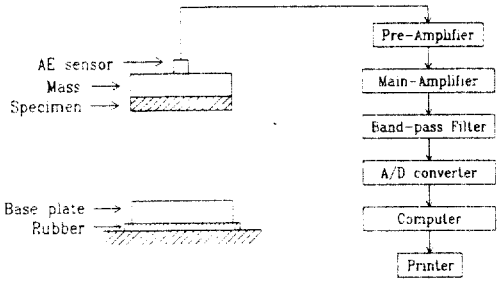
2.2.2 실험절차

링 마디식 멤브레인 판과 평판에 대한 실험은 두 가지 실험모델에 대하여 동일한 조건들을 적용하였으며, 가해지는 낙하하중과 낙하높이를 변화시켜 가면서 각각의 실험을 수행하였다. 실험에서 충격접촉(impact contact)은 표면을 가공한 30mm의 합금공구용 강판(STD 11)에서 이루어지며, 강판아래에는 5mm 고무판을 설치하여 기저부분에서의 순간 탄성파에 의한 튐현상(rebounding)을 방지하였다.

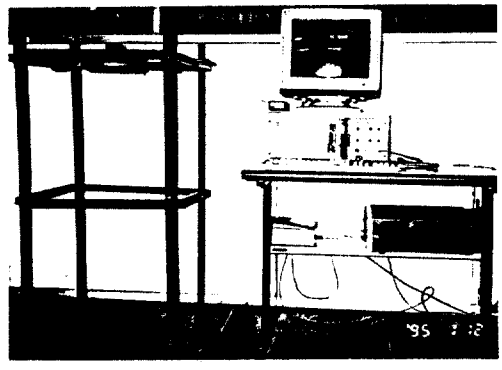
측정장치를 구성하는 요소중에서 가장 중요한 것은 센서로서 센서의 역할은 내부의 파원으로부터 도달한 AE신호(acoustic emission signals)에 의한 표면의 미소변위 또는 속도와 같은 역학적 신호를 전기적인 신호로 바꾸어 주는 것이다. AE신호는 방향성이 없으며 신호의 감쇠가 거의 없이 빠른 속도로 표면으로 균일하게 전달되므로 센서의 설치가 비교적 용이하다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 AE측정장치의 개략도를 보여주고 있다. AE센서는 신호의 주파수 해석을 위하여 전 영역에 걸쳐서 동일한 응답속도를 가지고 있는 압전형 광대역 센서를 시편의 중앙 상부에 설치하였다. 외부의 잡음을 제거하기 위하여 100mV의 문턱값(threshold)을 설정하였으며 AE계측은 총 증폭도 60dB에서 이루어졌다. 시험편 내부에서 방출된 AE신호는 센서에 도착하여 전기적인 신호로 변화된 다음 전치증폭기(pre-amplifier)에서 40dB로 증폭하고, 주증폭기(main-amplifier)에서 20dB를 다시 증폭하여 전체 게인(gain)이 60dB로 대역필터(bandpass filter)를 통과시킨다. 대역필터를 통과한 AE신호는 Locan 320 시스템에서 신호처리가 이루어지는데, 12bit의

고속 A/D변환기에서 원활한 데이타의 처리 및 저장을 위하여 0.25 μs의 샘플링 시간(sampling time)을 두었다. 4개의 채널을 동시에 관리하는 ICC(independent channel controller)에서 대부분의 작업이 수행되고 계산된 데이타는 저장후 PC에서 해석된다.



(a) Schematic diagram



(b) Photograph of experimental set-up

Fig. 2 Acoustic emission measurement system

3. 실험결과 및 고찰

본 연구진이 독자적으로 개발한 링 마디식 멤브레인과 동일한 소재의 평판에 대하여 낙하충격 하중과 낙하높이를 변화시켜 가면서 충격실험을 수행하였으며, 본 논문에는 하중변동에 따른 결과만을 제시하였다.

Fig. 3~Fig. 6은 링 마디식 멤브레인과 평판재에 가해지는 하중을 변화시켜 가면서 실험한 AE 에너지의 분포도를 보여주고 있다. 네가지 모델해석에서 발생되고 있는 AE신호에 따른 에너지값을 살펴보면 평판은 낙하하중과 높이가 50kg, 500mm일 때는 32000mV^{2}이고, 100kg, 500mm일 때는 65500mV^{2}로 나타났으며, 주름식 멤브레인의 경우는 낙하하중과 낙하높이가 50kg, 500mm일 때는 17500mV^2, 그리고 100kg, 500mm일 때는 38000mV^{2}로 각각 나타났다. 이들 실험결과에 따르면 낙하하중에 따라 AE발생량이 선형적으로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 또한 링 마디식 멤브레인의 AE에너지는 평판대비 낙하하중이 50kg의 경우 45.3%, 100kg의 경우는 42.0%로 하중변화에 대하여 서로 비슷한 경향을 보여주고 있는데, 이와 같은 결과는 평판재가 받는 충격에너지의 수준이 주름식 멤브레인에 비하여 약 2배 이상을 나타내어 링 마디식 멤브레인의 충격흡수 성능이 우수함을 의미한다.

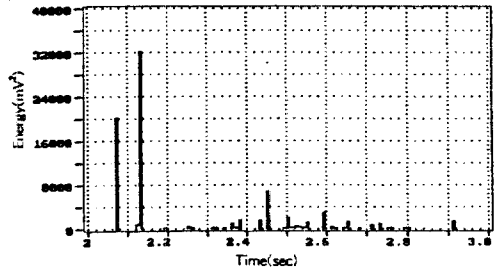


Fig. 3 AE energy of the flat sheet(M=50kg, H=500mm)

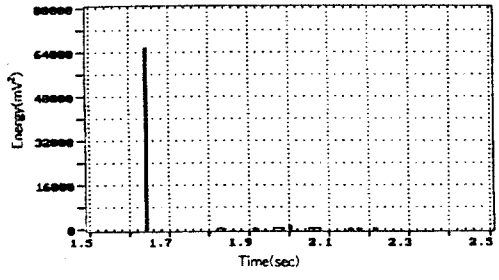


Fig. 4 AE energy of the flat sheet(M=100kg, H=500mm)

Fig. 3은 낙하하중과 높이가 각각 50kg과 500mm로 주어진 평판재에 대한 결과로서 자유낙하 직후에 가해지는 충격에 의하여 AE에너지는 불규칙적인 큰 에너지 변위를 보이다가 서서히 그

수준이 낮아지고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 초기에 대단히 높은 AE신호가 방출되고, 0.15초가 지난 후로는 하중의 영향을 받아 매우 낮은 에너지의 신호가 방출되고 있다.

Fig. 4에서는 매우 특이한 신호발생 거동을 보여주고 있다. 특히 충격초기에 높은 에너지의 신호로 최대피크가 뚜렷하게 관찰되고 있는데, 이것은 평판에 가해지는 낙하충격하중이 증가하면서 그에 따른 충격에너지의 강도도 높아졌기 때문으로 생각된다.

Fig. 5를 살펴보면 전체적으로 낮은 AE에너지의 신호가 다수 방출되고 신호의 에너지 단계의 수도 증가하고 있음을 보여준다. 1차 충격지점을 지나 약 0.25초 후에 또 한번의 피크가 발생되는데, 이것은 멤브레인 주름부와 마디부의 탄성반발력 때문으로 생각된다.

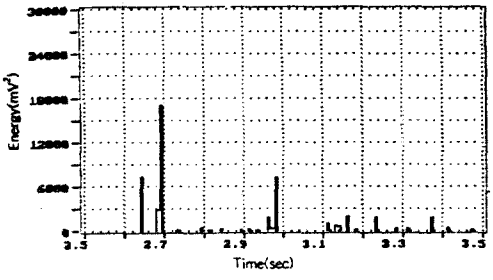


Fig. 5 AE energy of the ring knot membrane(M=50kg, H=500mm)

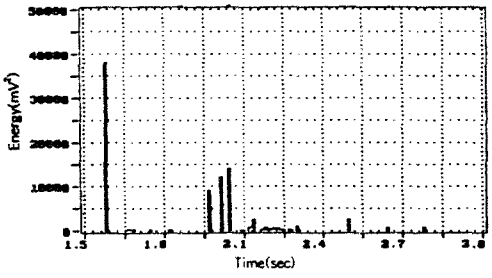


Fig. 6 AE energy of the ring knot membrane(M=100kg, H=500mm)

Fig. 6에서는 가장 많은 단계의 에너지가 발생되고 있으며, 전체적인 에너지분포는 Fig. 5의 결과와 매우 유사한 양상을 보여준다. 충격하중이 커짐에 따라 높은 에너지의 신호가 1차적으로 관찰되고 2차 피크는 0.4초후에 나타나는데, 그 특징은 낮은 AE에너지의 발생이 다른 모델에 비하여 높다는 것이다. 이것은 하중이 증가하면 할수록 높은 충격하중에 의하여 주름부 및 마디부에 변형을 일으켜 더욱 복잡한 메카니즘을 포함하게 된다. 즉, 주름식 멤브레인 판재는 평판재에 비하여 효과적인 충격해방이 상대적으로 높기때문에 충분히 탄성과 강도를 갖는 우수한 구조물로 생각된다.

한편, 피로시험결과에 의하면 스테인레스는 연성이 높은 재료로 항복점 근처에서 AE신호가 집중적으로 방출되고 전반적으로는 그 활성도가 비교적 낮다[10]. 따라서 스테인레스제 멤브레인은 그 두께가 2mm정도이므로 그것의 소성변형에 부합되는 AE신호가 검출될 정도의 충분한 에너지를 가질 것이다. 즉, 발생되고 있는 낮은 수준의 AE신호는 멤브레인 판의 순간변형에 그 발생원을 두고 있음을 예상할 수 있으며, 이러한 초기의 최대에너지는 가해지는 하중의 증가에 따른 재료 내부의 일부 소성변형에 기인하는 것으로 판단된다.

AE신호의 파라메터중에서 충격하중에 커다란 영향을 주는 것중의 하나는 신호의 주파수특성을 조사하는 것이다. 본 실험중 모든 시험편에서 방출되는 AE신호의 주파수의 특성을 Table 3에 요약하여 나타내었다.

Table 3 Comparison of frequency results and parameters

Specimen types	Mass (kg)	Height (mm)	Flat sheet		Ring knot membrane	
			Frequency (MHz)	Duration (sec)	Frequency (MHz)	Duration (sec)
1	50	500	1.25	0.8	0.59	0.9
2		1000	2.88	0.85	1.84	1.6
3	100	500	0.54	0.7	1.60	1.2
4		1000	2.10	0.9	2.12	1.8

요약된 Table 3의 결과에 의하면 평판재는 주파수 지속시간(frequency duration)이 매우 짧은 0.7~0.9초의 범위내에 있으나 링 마디식 멤브레인의 경우는 0.9~1.8초로서 상대적으로 길게 발생되어 평판재의 주파수 응답특성이 빠른 것으로 나타났다. AE신호의 주파수가 낮은 신호값은 0.54MHz와 0.59MHz로 낙하높이가 낮은 상태에서 특징적

인 성분을 가지고 있고 낙하높이가 1000mm에서 평판의 주파수가 2.88MHz로 가장 탁월한 신호를 방출하고 있다. 이것은 평판재에 가해지는 하중이 50kg일 때 얻은 결과로써 방출되는 AE신호 주파수가 가장 큰 값을 나타내었다.

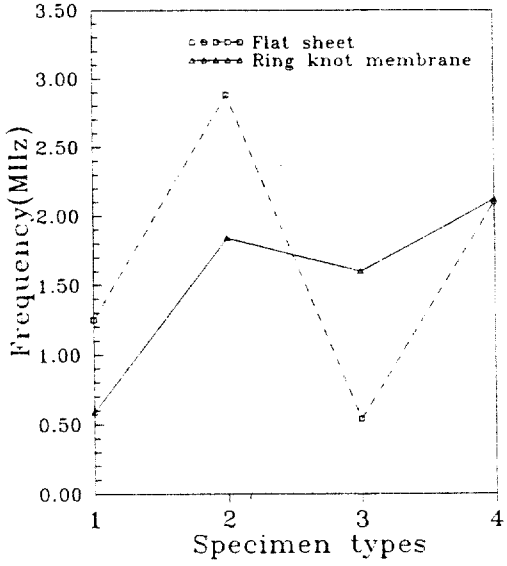


Fig. 7 Frequency level depending on the specimen types of the membrane

Table 3에 주어진 링 마디식 멤브레인 및 평판의 주파수 해석결과가 Fig. 7에 그 모델별로 제시되어 있다. Fig. 7에서 낙하충격하중이 50kg인 시험편 1, 2와 100kg인 시험편 3, 4로 구별하여 이들 시험편에 대한 실험결과를 보여주고 있는데, AE주파수의 발생거동을 보면 시험편 1과 2의 경우 링 마디식 멤브레인의 최대 주파수값이 평판 대비 약 47.2%, 63.9% 수준으로 평판보다 각각 낮게 나타났고, 시험편 3의 고하중상태에서는 이와는 상이하게 링 마디식 멤브레인의 최대 주파수값이 평판재에 비하여 약 66.2% 이상의 높은 주파수 신호가 발생되었다. 그러나 낙하높이가 1000mm인 시험편 4의 경우는 거의 같은 주파수 수준을 보여준다. 이들 주파수 해석결과에 의하면 동일한 조건하의 저하중이나 고하중상태에서는 낙하높이가 높을수록 고주파수를 갖는 신호가 방출되며, 평판재보다는 주름식 멤브레인 판재에서 AE신호의 주파수 상승도가 낮게 나타났다. 또한 주파수의 분포도는 고하중상태의 주름식 멤브레인이 비교적 완만함을 보여주고 있다.

따라서 평판보다는 링 마디 주름식 멤브레인이 LNG 충전시의 충격 및 탱크내 액체가 출렁이는 현상 즉, 슬로싱(sloshing)에 대한 충격력 흡수성능이 높은 것으로 해석된 결과를 미루어 볼 때 멤브레인의 안전성을 향상시킬 수 있다는 점에서 본 연구결과는 중요한 의미를 갖는다.

4. 결 론

본 연구에서는 초저온 저장탱크의 구조물로 개발된 링 마디식 멤브레인(ring knot membrane)의 시작품을 낙하하중에 따른 평판재와의 충격특성을 음향방출법으로 해석한 결과에 의하면 멤브레인 판재에 가해지는 낙하하중이 증가함에 따라 AE발생량은 선형적으로 증가하였고, 링 마디식 멤브레인이 받는 충격에너지는 평판재가 받는 충격에너지 값의 절반수준 정도로 나타났다.

링 마디식 멤브레인의 최대 주파수값은 50kg의 저하중에서 평판 대비 36.1~52.8% 이하의 낮은 수준으로 나타났고, 주파수 지속시간은 100kg의 고하중에서 상대적으로 평판재보다 약 2배정도 길게 발생되는 것으로 보아 링 마디식 멤브레인의 주파수 거동이 안정적이다.

실험적 결과를 요약하면 링 마디식 멤브레인이 탱크내 액체의 슬로싱이나 초기 LNG액의 충전에 의한 변형거동을 흡수하고, 또한 충격력을 감소시켜 주기 때문에 멤브레인의 안전성을 크게 향상시킨 멤브레인 설계라 생각된다. 즉, 링 마디식 멤브레인은 충분한 탄성과 강도를 갖는 우수한 멤브레인 특성을 보여주었다.

참 고 문 헌

1) L. K. Donald, and L. L. Robert, Natural Gas Engineering Production and Storage, McGraw-Hill, New York, pp. 10~21, 1990.
2) 김청균, 김영규, LNG 저장탱크의 현황과 동향, 가스안전지, Vol. 18, No. 4, pp. 66~71, 1992.
3) J. Hirata, Y. Kitano, S. Uchiyama, T. Oikawa, T. Ikeuchi, and H. Shiozu, 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.

4) K. Kakehi, 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, 1992.

5) 이주석, 비파괴 검사에 의한 석유화학설비의 안전진단, 대한기계학회지, Vol. 34. No. 11, pp. 860~861, 1994.

6) A. G. Beattie, Acoustic Emission, Principles and Instrumentation, J. Acoutic Emission, Vol. 2, pp. 95~128, 1983.

7) F. R. Breckenridge, C. E. Tschieg, M. Greenspan, Acoustic Emission : Some Applications of Lamb's Problems, J. Acoust. Soc. Am, Vol. 57, pp. 626~631, 1975.

8) J. R. Matthews, D. K. Hay, Acoustic Emission Evaluation, Gordon and Breach, pp. 106~124, 1983.

9) C. Tatro, Acoustic Emmision from Crystalline Materials Subjected to External loads, Michigan State Univ., 1960.

10) L. R. F. Rose, The Stress Wave Radiation from Growing Cracks, Int. J. Fracture, Vol. 17, pp. 45~60, 1981.

11) 김영규, 전인기, 윤인수, 이용원, 홍성호, 김청균, 액화천연가스 저장탱크용 멤브레인의 유한요소해석, 대한기계학회논문집, Vol. 18, No. 10, pp. 2797~2804, 1994.

12) H. H. Bednar, Pressure vessel design handbook, van Nostrand Reinhold Company Inc., pp. 285~287, 1986.