

LNG 저장탱크용 멤브레인 성형공정에 관한 해석적 · 실험적 연구

노학근¹ · 정주영² · 구태완³ · 강범수[#]

Numerical Analysis and Experimental Evaluation on Formability of Membrane for LNG Storage Tank

H. G. Noh, J. Y. Jung, T. W. Ku, B. S. Kang

(Received December 9, 2010 / Revised December 17, 2010/ Accepted July 27, 2010)

Abstract

Membrane structures are widely used for LNG(Liquefied Natural Gas) storage tanks. This study presents a membrane structure based on the Mark-III type. For its development, a series of numerical simulation was conducted using ABAQUS and experimental investigation was carried out. The manufacturing process of the membrane was simulated. The thickness distribution predicted by the numerical approach agreed well with the experimental results.

Key Words : LNG Storage Tank, Membrane, Formability, Tool Design and Modification, Thickness Distribution

1. 서 론

액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas)는 사용 편리성과 더불어 환경에 대한 관심의 증가 및 사용기술의 발전에 따라 그 이용이 점차 증가하고 있으며, 이에 대응하여 기지건설 및 저장설비 확충이 계속되고 있다. LNG는 -162°C 의 극저온 및 720~820psi(약 49.6~56.5bar)의 고압 상태로 저장되며, 이러한 극저온 및 고압 액화상태로 저장될 경우 부피를 약 600배 이상 줄일 수 있어 물류비 및 저장에 드는 비용 등을 줄일 수 있는 장점이 있다[1]. 현재 운용되고 있는 LNG 운반선 전체의 약 52%는 MOSS 구형탱크가 탑재된 경우가 대다수이다. 그러나, 2000년 이후 건조된 LNG 운반선 인도물량을 기준으로 약 45%가 MOSS 구형탱크, No. 96 멤브레인(Membrane) 및 Mark-III 멤브레인 시스템이 약 32%와 약 23%를 각각 차지하고 있

다. 즉, 멤브레인 구조의 LNG 운반선을 선호하는 경향이 두드러지고 있으며, 향후 멤브레인 시스템이 적용된 LNG 운반선 건조가 주를 이룰 것으로 예측되고 있다.

LNG를 저장하기 위한 초저온 저장탱크 내부구조물(즉, 내조라 일컬어지는 Inner Tank)로 사용되는 멤브레인 구조물은 온도와 하중변화에 유연하면서도 안전하게 거동할 수 있도록 설계·제작되어야 한다. 특히, 멤브레인은 LNG 저장탱크의 최내 측에 설치되어 LNG와 직접 접촉하면서 열하중(Thermal Loading), 가스 하중(Gas Loading), 유체 정하중 및 동하중(Hydrostatic and Hydrodynamic Loading) 등의 다양한 하중 조건을 견딜 수 있도록 제작된 특수한 판재 구조물중의 하나이다. 이러한 멤브레인을 소재로는 저온에서도 우수한 인장강도와 피로강도를 가짐과 동시에 내식성과 성형성 그리고 용접성 등이 양호한 1.2mm~2.0mm 두께의 오스테나이트계

1. 부산대학교 대학원 항공우주공학과
2. 부산대학교 대학원 첨단정밀공학협동과정
3. 부산대학교 부품소재산업협력연구소
교신저자: 부산대학교 항공우주공학과, bskang@pusan.ac.kr

스테인레스강이 주로 사용된다[2].

멤브레인은 해당 구조의 난성형 특성으로 인해 극히 제한적인 연구 및 개발활동이 전개된 바 있다. 예를 들면, 프랑스의 Technigaz 社は 1960년대 초반에 다단 굽힘 성형방식을 적용한 사례가 있으며, 이는 십자형태로 교차하는 다른 크기의 주름을 가지면서 주름부의 수축을 마디부에서 흡수하는 단일 주름식 멤브레인 구조로 개발되었다[3]. 또한, 1971년에 개발된 Mark-I 구조의 멤브레인을 시작으로 하여, 1978년 개발된 Mark-III 구조의 멤브레인이 현재까지 LNG 선박용 1차 방벽 구조물로 적용된 사례가 있다. 또한, 국내의 경우 대부분 Mark-III 방식의 멤브레인 구조를 적용한 LNG 운반선 건조가 대다수를 차지하고 있으나, 대형화 추세에 따른 성능개선의 필요성이 대두되고 있다. 더군다나 Mark-III 멤브레인의 구조적 특성에 기인하는 주름부(Corrugation) 변형 등에 의한 구조적 결함 발생을 해결하기 위한 연구 및 기술수요가 증가하고 있다[4-6]. 즉, 초저온 상태의 LNG가 멤브레인형 저장탱크 내부에서 반복적 슬로싱(Sloshing) 운동과 가스 하중 등이 직접적으로 1차 방벽 구조물(즉, 멤브레인 구조물)에 작용함에 따른 반복적 하중 조건에 기인하는 것으로 알려져 있다.

더군다나 멤브레인의 주름부를 구성하는 핵심형상인 노트(Knot)의 성형을 위한 기존의 방법으로는 노트부의 성형 깊이를 고려하지 않고 중간 성형품의 요구 두께를 확보함과 동시에 과도한 국부적 응력집중 현상을 방지하기 위해 단순 1회 성형공정을 채용하는 것이 일반적이었다. 그러나, 이러한 단순 1회 성형공정의 적용으로 인해 멤브레인 노트부의 형상 오차 발생 및 장시간 사용시 외부 운용 조건에 의해 파단 발생이 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이에 따라, 멤브레인 노트부 정밀성형을 위한 보다 개선된 금형설계 및 공정설계에 대한 추가 연구의 필요성이 제기되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 Mark-III 형식의 LNG 운반선용 멤브레인에 있어서, 대형화 및 구조건전성 향상을 위한 멤브레인 성형과정에서의 해석적·실험적 연구를 수행하였다. 멤브레인 성형과정 해석에 있어서, 우선 성형공정에 대한 기본적인 공정설계와 이를 바탕으로 해석적 연구를 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수행하였고, 이로부터 얻어진 멤브레인 성형과정에서의 변형 거동과 두께 분포를 조사하였다. 또한, 해석적

연구로부터 도출된 두께 분포에 대한 적절성을 판단하기 위해 동일 형상을 가지는 멤브레인에 대한 성형 실험을 수행하였다. 멤브레인에 대한 실험적 연구 결과로부터 얻어진 두께 분포를 해석적 연구로부터 얻은 두께분포와 비교해 본 결과, 본 연구에서 적용한 멤브레인 성형공정의 적절성을 확보할 수 있었다.

2. 성형공정 설계

2.1 벽체 멤브레인 형상 및 기본 구조

LNG 운반선의 운용시 저장탱크 내부의 LNG는 끊임없이 슬로싱 운동을 하게 된다. 슬로싱 운동은 선박의 다양한 해상 운송 조건에서 화물창 내부에 적재된 LNG가 심하게 움직이며 화물창내의 벽면에 과도한 충격을 주는 현상을 말한다. 이 때, 방벽 구조물은 반복적 충격하중에 기인하는 열수축 등의 열변형에 대응할 수 있도록 Fig. 1과 같은 멤브레인 구조가 주로 적용되고 있다. 이 멤브레인의 주름부 형상은 면의 충격압에 따른 좌굴 및 피로파괴 등 과도변형을 최소화 하기 위한 목적으로 사용되며, 일반적으로 균일한 두께 분포를 갖는 멤브레인이 요구된다. 즉, 멤브레인 형상을 제작하기 위해 판재 성형공정을 적용할 경우 국부적으로 심한 두께 변화가 발생할 수 있으며, 이러한 국부적 두께 감소는 해당 부위에서의 결함 및 손상 발생 가능성이 높아지게 된다. 따라서, 멤브레인 성형과정에 있어서 두께 변화를 최소화 하기 위한 방법으로 주름부를 성형할 때 소재를 유입시키면서 주름부 굴곡을 형성시키는 공정이 요구되고, 이송이 가능한 분할금형 설계 및 제어 기술 등이 추가적으로 요구된다.

2.2 멤브레인용 소재 기초 물성 연구

본 연구에서는 LNG 저장탱크용 멤브레인에 주로 사용되는 판재인 냉간압연(Cold-rolled Finished)된 초기 두께 1.2mm의 SUS304L 소재를 사용하였다. 멤브레인 성형공정을 수행하기에 앞서, 적용된 소재의 기초 물성을 파악하기 위해 단순인장시험을 동적재료시험기(INSTRON 8516)를 이용하여 수행하였다. 단순인장시험에 있어서, 시험시편은 ASTM E517 규격을 기준으로 제작되었으며, SUS304L 소재에 대한 이방성 특성을 조사하기 위해 0°, 45° 및 90° 방향의 시험 시편을 각각 준비하여 해당 재료시험에 사용하였다. Table 1은

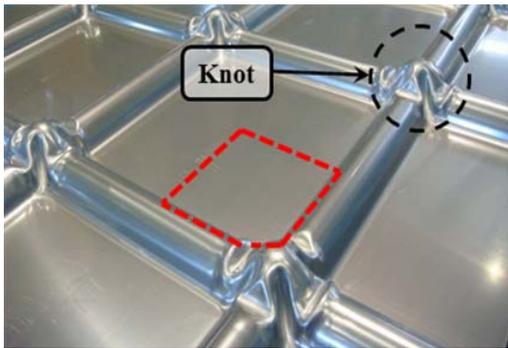


Fig. 1 Example of membrane in LNG storage tank

Table 1 Chemical composition of SUS304 (wt/%)

C	S	P	Cr	Ni	Si	Mn	Cu
0.3	0.2	0.4	17~20	9~12	1	2	1

Table 2 Mechanical properties of SUS304L

Young's Modulus (GPa)	203	
Yield Strength (MPa)	252	
Ultimate Strength (MPa)	995	
Poisson's Ratio	0.3	
Density (Kg/mm ³)	7.83×10 ⁻⁶	
Normal Anisotropy (\bar{r})	1.005	
Fracture Strain (ϵ_f)	0.586	
Flow Stress Law ($\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$)	K(MPa)	1,387
	n	0.59

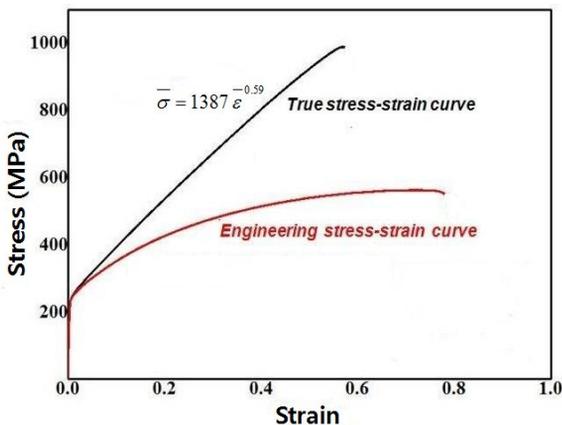


Fig. 2 Tensile test results for cold-rolled finished SUS304L with initial thickness of 1.2mm

본 연구에서 사용한 SUS304L의 화학적 조성을 나타낸 것이며, Table 2는 단순인장시험을 통해 얻어진 초기 두께 1.2mm의 SUS304L 소재에 대한 재료 기초 물성을 요약한 것이다. 또한, Fig. 2는 단순인장시험 결과로부터 얻어진 유효 응력-변형률 (True stress - True strain) 관계식을 나타낸 것이다.

2.3 금형 설계 및 성형 공정 설계

일반적으로 판재 성형공정은 단순 굽힘 공정 등의 균일한 두께 분포 확보가 중요시되는 경우와 아이어닝(Ironing) 공정 등의 인위적 두께 감소를 유도하는 경우로 구분할 수 있다[7, 8]. 멤브레인 성형공정은 전자의 경우에 해당되며, 해당 구조물의 균일한 두께 확보가 중요함과 동시에 전반적 혹은 국부적인 과도한 두께 변화를 최소화하기 위해서는 주름부 성형시 소재를 유입시키면서 멤브레인의 주름부 굴곡을 성형하는 공정이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 멤브레인 형상을 성형하기 위해서 1차 성형으로써 굽힘 공정을 적용하였으며, 2차 공정으로 멤브레인의 노트부 성형 공정을 제시하였다. 멤브레인의 성형공정에 있어서, 1차 성형 공정은 Fig. 3에 제시된 바와 같이 하부 다이에 성형 소재를 위치시킨 후, 성형펀치를 이용하여 멤브레인의 굴곡이 균일하게 성형될 수 있도록 단순 굽힘 공정을 수행하는 것으로 설계하였다. 또한, 단순 굽힘에 의한 판재의 탄성회복을 고려하기 위한 해석적 접근을 포함하는 것으로 하였다. 앞서 수행된 1차 굽힘 성형 결과를 바탕으로 멤브레인의 노트부 성형을 위한 2차 공정은 Fig. 4에 제시된 바와 같이 설계하였다. 2차 성형공정은 Fig. 4와 같이 노트부를 원활히 성형할 수 있도록 상부 펀치와 하부 나이프(Knife) 금형 및 블랭크 홀더를 이용하여 해당 공정을 수행하는 것으로 설계하였다. 앞서의 1차 성형 공정과 동일하게 멤브레인 성형에 따른 탄성회복을 고려하여 목적 형상으로서의 최종 성형품을 도출할 수 있도록 멤브레인 성형 공정을 설계하였다.

본 연구에서의 LNG 운반선용 멤브레인에 대한 성형공정에 있어서, 앞서 제시된 1차 및 2차 성형 공정에 대한 흐름을 Fig. 5에 나타내었다. 즉, LNG 운반선의 저장탱크 내부 격실 내조용 멤브레인의 성형 공정은 1차 굽힘 공정 수행 및 탄성회복 고려, 2차 노트부 성형 공정을 수행함과 동시에 부가적으로 탄성회복 특성을 고려하여 최종 성형품을 도출하는 과정으로 본 연구에서의 멤브레인 성형과정에 대한 해석적 접근을 수행하였다.

3. 유한요소 해석

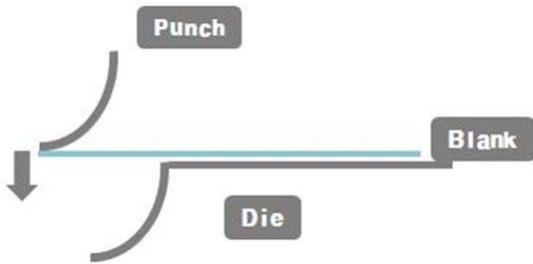


Fig. 3 Schematic view of first bending process

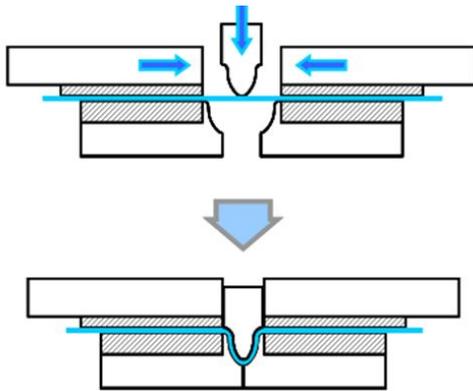


Fig. 4 Schematic view of second bending process

3.1 해석 조건

본 연구에 있어서, 멤브레인 성형 공정에 대한 해석적 연구를 수행하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 또한, 멤브레인을 판재로 주로 활용되는 초기 두께 1.2mm의 SUS304L 소재를 유한요소해석에 적용하였으며, 해석에 있어서 사용된 소재의 재료 물성은 앞서의 Table 2 및 Fig. 2에서 제시된 단순인장실험을 통해 얻어진 평균값을 사용하였다. 또한, 멤브레인 성형 과정에서의 비선형적 재료 거동 등을 묘사하기 위해 비선형 해석(Non-Linear Analysis)과 외연적분법(Explicit Method)을 적용하였다.

본 연구에서의 멤브레인 성형해석을 위한 유한요소 모델링에 있어서, 변형 소재인 판재는 두께 1.2mm의 셸 요소(Shell Element)로 모델링하였으며, 성형펀치 및 블랭크 홀더 그리고 하부 금형 등은 4-절점 강체 셸 요소(4-node Rigid Shell Element)로 구성하였다. 또한, Table 2에 제시된 바와 같이 사용된 소재는 등방성 특성을 가지는 것으로 조사되었으며, 성형 과정에 있어서 발생하는 열에 대한 효과는 무시하였다. 본 멤브레인 성형해석에

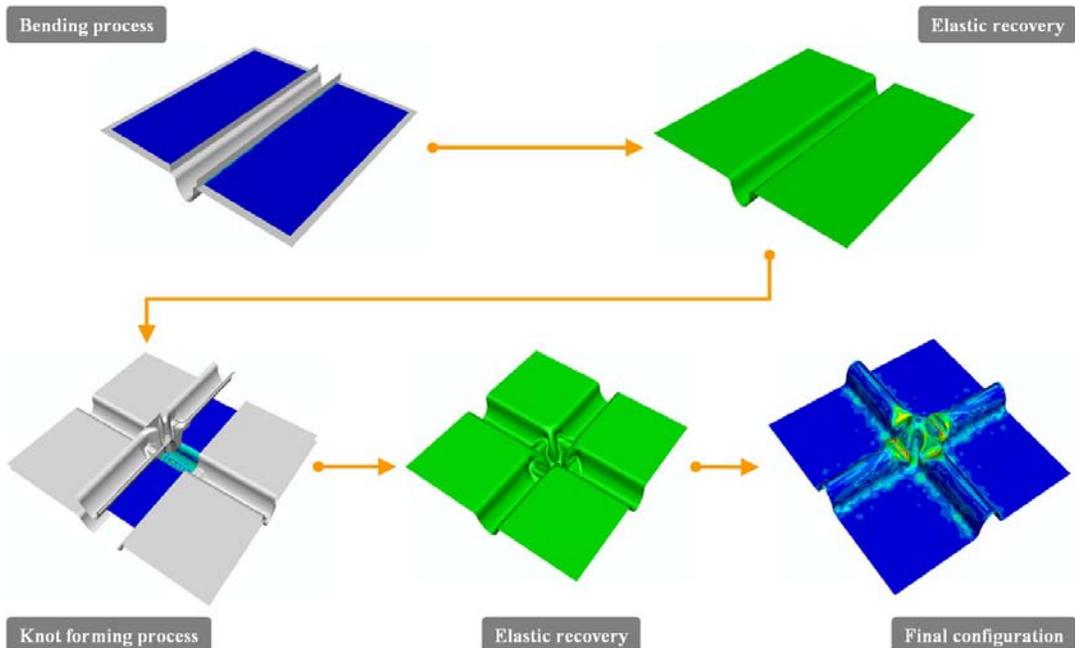


Fig. 5 Schematic view of process procedure for manufacturing membrane

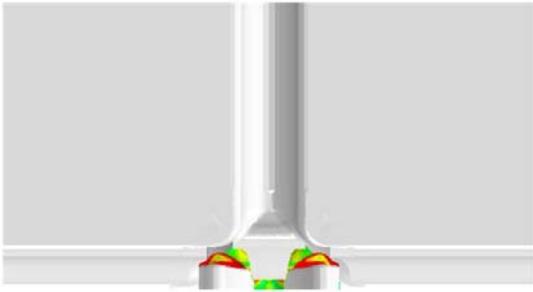


Fig. 6 Example of FE model considered knot forming sequence

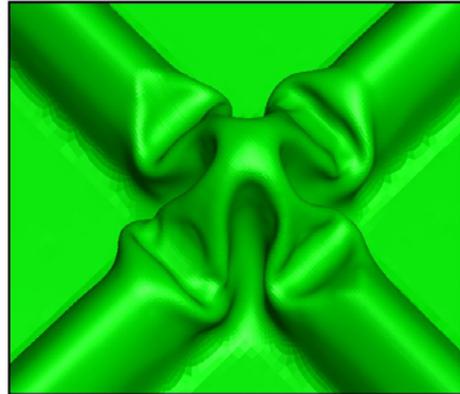
있어서, 금형 및 변형소재 사이의 마찰조건은 0.2의 쿨롱마찰계수(Coefficient of Coulomb Friction)를 적용하였다.

Fig. 6은 멤브레인 성형에 있어서, 1차 굽힘 성형된 중간 성형품을 이용한 2차 굽힘 공정의 해석적 모델로 전체 형상의 1/2 모델을 나타내고 있으나, 유한요소 해석에서는 대칭조건을 적용하여 1/4 모델을 적용하였다. 특히, 멤브레인 노트부의 주름 형상 성형에서의 중요한 성형 인자 중의 하나로 성형 절차(Process Sequence)를 들 수 있다. 즉, 상부의 성형 펀치와 하부의 성형 나이프의 블랭크 접촉 시점과 속도에 따라 주름 형상에 차이가 발생할 수 있기 때문에 성형 절차를 적절히 결정하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 3차원 목적 형상에 대한 모델링과 이를 이용한 유한요소 해석을 통해 적절한 성형 절차를 도출할 수 있는 변위제어 방법을 적용한 유한요소 해석을 수행하였다.

3.2 유한요소 해석 결과

본 연구에서는 멤브레인 성형 공정에 대한 유한요소 해석과 실험적 연구를 병행하여 수행하였다. 즉, 멤브레인 성형 해석으로부터 얻어진 결과와 성형 실험을 통해 얻어진 결과를 비교·분석하여 해당 성형 공정 설계 및 금형 설계 결과의 적절성을 확보하고자 하였다.

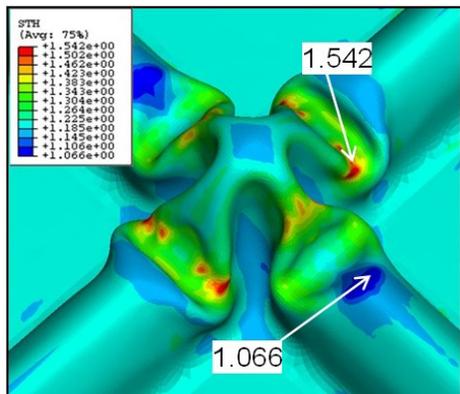
LNG 운반선의 LNG 저장탱크용 1차 방벽 구조물인 멤브레인이 해당 구조물에 적용되기 위해서는 내구성·내피로성 특성 등이 확보되어야 한다. 이러한 요구 특성을 충족시키기 위한 멤브레인 성형 측면에서의 확보 방안으로는 변형된 블랭크의 두께 분포 균일화가 우선적으로 고려되어야 하며, 성형 하중에 의한 국부적 과도 응력분포의



(a) Deformed configuration



(b) Prototype of membrane



(c) Thickness distribution (unit : mm)

Fig. 7 Deformed shapes and thickness distribution of membrane by FE simulation and experiment

최소화가 요구된다. Fig. 7은 멤브레인 성형 공정에 대한 해석 및 실험 결과를 보여주고 있다. Fig. 7(a)

는 멤브레인 성형해석을 통해 얻어진 최종 변형 형상을 보여주고 있으며, Fig. 7(b)는 동일한 성형 공정에 대한 실험으로부터 얻어진 성형 실험 결과를 나타내고 있고, 성형해석 결과가 실제 제품과 매우 유사한 형상을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나, 본 유한요소 해석에 있어서 국부적인 과도 변형에 의한 두께 변화가 크게 발생함을 Fig. 7(c)에서 알 수 있었다. 즉, 블랭크의 초기 두께가 1.20mm임을 감안할 때, 최종 성형품에서의 두께는 1.06mm~1.54mm로 분포를 가지고 있는 것으로 예측되었다. 이는 초기 두께가 1.2mm인 판재와 비교해 볼 때, 국부적인 과도 변형에 의해 두께가 약 28% 증가하는 부위와 약 12% 감소하는 부위가 존재함을 알 수 있었다. 특히, 주름부에서 두께 변화, 즉 두께 감소 측면에서의 과도 변형에 따른 멤브레인의 압축 및 인장 하중의 반복 작용에 의한 피로파단에 취약할 것으로 예측되었다. 이러한, 멤브레인 성형 공정에 대한 해석적 결과 분석을 바탕으로 설계된 금형 및 성형 절차로는 적절한 멤브레인 성형을 얻기에는 적절하지 않을 것으로 판단되었다.

또한, LNG 저장탱크 제작시 멤브레인의 주름 부분에 물려서 해당 멤브레인을 1차 방벽 구조물에 설치하는 클램핑(Clamping) 작업이 필수적이다. 이 클램핑 작업은 각 멤브레인 성형품을 저장탱크 벽체로 이송시킴과 동시에 고정 작업을 수행하는 일련의 과정으로, 클램핑 장치가 멤브레인 성형품을 수월하게 이송할 수 있도록 하는 멤브레인의 노트부 형상이 적절하게 성형되어야 한다. 그러나 Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 멤브레인 노트부분의 굴곡이 완만하지 않게 되면 클램프 지그를 물리는 과정이 매우 어렵게 된다. 따라서 Fig. 8에서 도시한 바와 같이 클램프 지그 삼입부(즉, 멤브레인 노트부 이중곡률 형성 부분) 주위의 주름을 보다 완만한 곡률을 가지는 형상으로서의 개선이 필요하였으며, 이를 위해 금형 곡률반경 수정이 추가로 이루어 졌다. 이러한 일련의 금형 수정을 바탕으로 멤브레인 성형공정에 대한 유한요소 재해석이 수행되었다. 본 재해석에 있어서 모든 경계조건은 앞서의 것과 동일하며, 단지 금형의 일부만이 수정된 모델을 적용하였다. 즉, 멤브레인 성형 공정에 있어서, 금형 일부 수정에 의해 펀치와 금형의 성형 절차가 일부 개선되어 멤브레인 성형품의 두께 분포가 보다 균일함과 동시에 클램핑 작업이 용이한 최종 형상의 멤브레

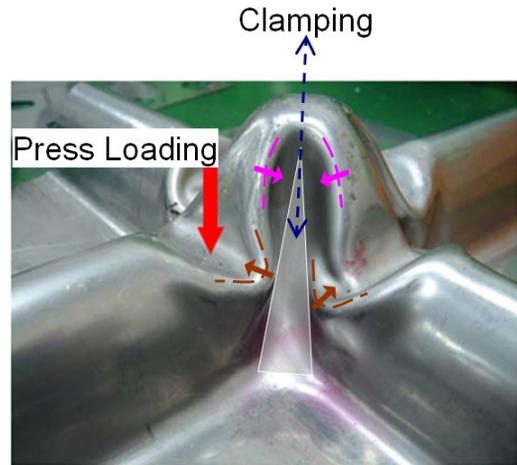
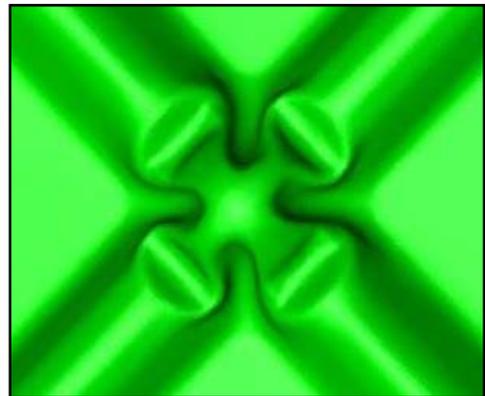


Fig. 8 Tool and process modification method for considering clamping

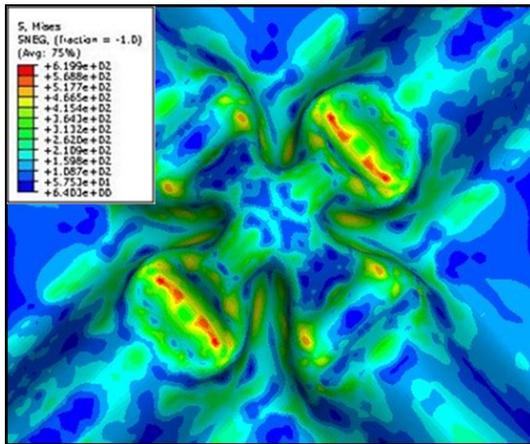


(a) Deformed configuration

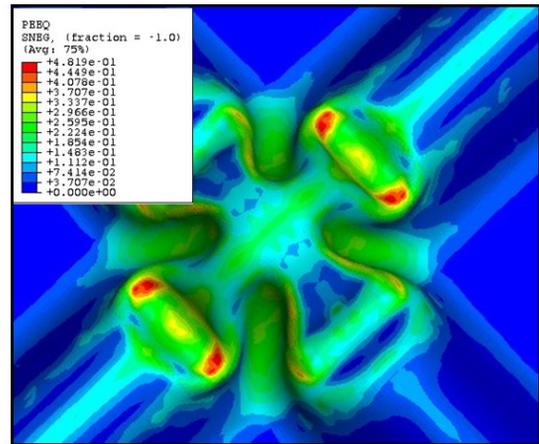


(b) Prototype

Fig. 9 Deformed configurations by FE simulation and experiment using modified tool



(a) Effective stress (MPa)



(b) Effective strain

Fig.10 Distribution of effective stress and effective strain obtained from FE simulation using modified tool

인이 성형될 수 있도록 하였다. Fig. 9는 수정된 금형이 적용된 경우의 멤브레인 성형 해석 결과에서의 변형 형상과 실험으로부터의 성형 결과를 각각 나타낸 것이다. Fig. 9에서 알 수 있듯이, 노트부의 이중곡률 형상이 Fig. 7과 Fig. 8에서 도시된 형상에 비해 보다 완만한 형상으로 성형됨을 알 수 있었다. 또한, Fig. 10은 개선된 금형이 적용된 경우의 멤브레인 성형 공정에 대한 해석 결과로써의 유효응력 및 유효변형률 분포를 나타낸 것이다. 본 해석 결과를 살펴보면, 멤브레인 중앙 노트부를 기준으로 외곽 주름부(즉, 굽힘공정에 의해 블랭크가 접쳐지는 부위)에서 국부적인 응력 집중이 발생함(최대 유효응력 약 619MPa)을 알 수 있었고, 해당 응력집중 부위의 주변에서 약 0.48 수준의 최대 유효변형률이 예측되었다.

4. 멤브레인 두께 분포

앞서 언급한 최대 유효응력 분포 부위에서 국부적인 두께 증가가 Fig. 11에서와 같이 약 1.396mm로 예측되었다. 이는 본 연구에서 적용된 SUS304L 소재의 초기 블랭크 두께인 1.20mm와 비교할 경우 약 0.196mm(약 16%)의 두께가 증가하는 것으로 조사되었으나, 금형 수정전의 두께 증가량인 약 0.34mm(약 28%) 보다는 두께 증가가 현저히 줄어들었음을 알 수 있었다. 또한, 국부적 두께 감소 측면에 있어서, 약 1.15mm의 최소 두께가 Fig. 11에서와 같이 예측되었으나, Fig. 7에서의 최소 두께인 1.06mm보다는 두께 감소량이 약 0.09mm 완

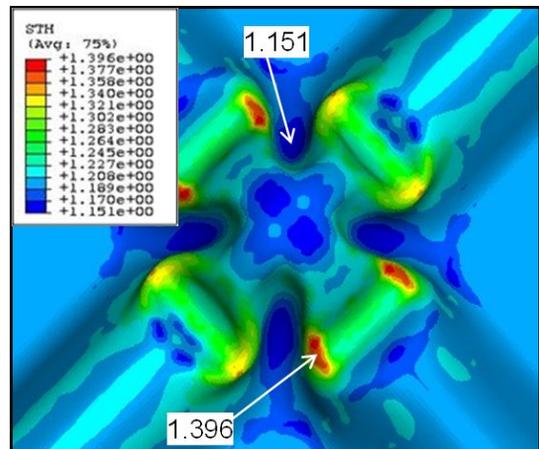


Fig.11 Thickness distribution obtained from FE analysis by using modified tool(unit : mm)

화되는 것으로 조사되었다.

이러한 일련의 금형 일부 수정과 유한요소 재해석 결과를 바탕으로 멤브레인의 두께 분포 측면에서 결과를 보다 면밀하게 분석하기 위해, Fig. 12에서와 같이 멤브레인의 노트부 중심에서 초기 블랭크의 압연방향(Rolling Direction)을 기준으로 세 방향(0°, 45°, 90°) 및 노트부의 이중곡률이 존재하는 두 방향에 대한 두께 분포를 조사하였다. 이때, 멤브레인 성형시 요구되는 최대 및 최소 두께 오차의 범위가 초기 블랭크 두께의 ±10% 수준임을 감안하여 멤브레인의 두께 변화에 대한 분석을 수행하였다. 멤브레인 성형 해석 결과를 바탕

으로 멤브레인의 각 단면에서의 두께 분포를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13(a)에서의 두께 분포를 살펴보면, 상당히 고른 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

또한, 멤브레인 성형 공정의 두께 분포의 요구 조건인 $\pm 10\%$ 의 두께 오차 범위를 만족하는 것을 알 수 있었으며, 특히 멤브레인 피로파단의 주된 원인이 되는 국부적 과도 두께 감소 측면에서의 두께 분포 또한 상당히 고른 분포를 보이고 있음을 알 수 있었다. 이와 더불어, 멤브레인 성형시 요구되는 이중곡률 주름부(D-D' 단면과 E-E' 단면)에서의 두께 분포를 조사하였다. 단면 D-D'과

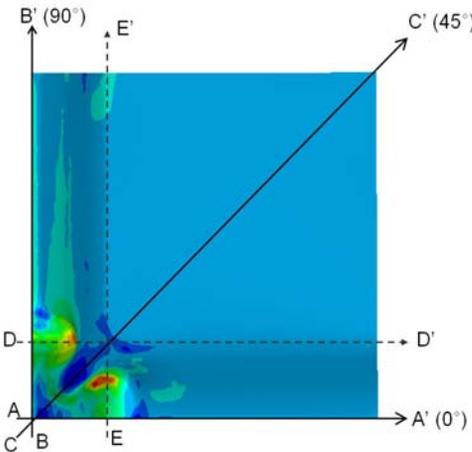
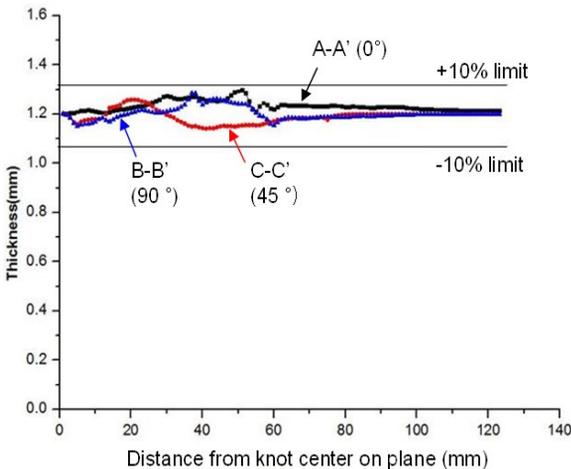


Fig.12 Thickness measuring direction of membrane

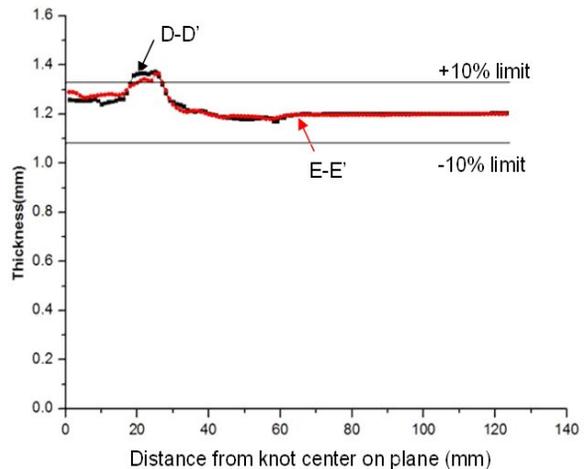
E-E'에서 멤브레인 주름부 중심의 두께분포를 Fig. 13(b)에 나타내었으며, 멤브레인 노트의 이중곡률 부에서 두께가 초기 두께와 비교해서 약 15% 정도 증가하는 것으로 나타났으나, 과도 두께 감소는 발생하지 않는 것으로 예측되었고, 이를 통해 본 연구에서의 해석적 결과는 타당한 것으로 판단되었다.

앞서 언급된 유한요소 해석을 통한 멤브레인의 두께 분포 예측 결과를 실험적으로 검증하기 위해 멤브레인을 시제작하여 해당 부위의 두께를 측정하였다. 멤브레인 시제품에 대한 두께 측정에 있어서, 측정 단면은 Fig. 12과 Fig. 14에서 제시된 두께 측정 단면인 A-A' 및 B-B' 단면을 기준으로 하였다. 두께 측정에 사용된 장치는 3차원 광학측정장비를 활용하였다. 시제작된 멤브레인의 두께 측정에 있어서, 두께 변화가 주로 발생하는 멤브레인의 노트부를 중심으로 두께를 측정하였다. 이때, A-A' 단면(0° 방향)으로 21개의 위치에서 두께를 측정하였으며, B-B' 단면(90° 방향)으로 23개의 위치에서 두께를 측정하였다.

멤브레인 시제작을 통한 두께 분포 측정 결과를 Fig. 15에 각각 나타내었다. Fig. 15(a)는 Fig. 12 및 Fig. 14에서의 A-A' 단면에 대한 두께 분포 측정 결과를 나타낸 것이고, Fig. 15(b)는 B-B' 단면에 대한 두께 분포를 도시한 것이다. Fig. 15에서 나타난 바와 같이, 각 두께 측정 위치에서의 두께를 살펴보면, A-A' 단면에서는 두께가 1.098mm~1.318 mm 범위로 조사되었으며, B-B' 단면에서는 1.158



(a) Thickness distribution



(b) Thickness distribution along cross-section D and E

Fig.13 Distribution of thickness obtained from FE simulation using modified tool

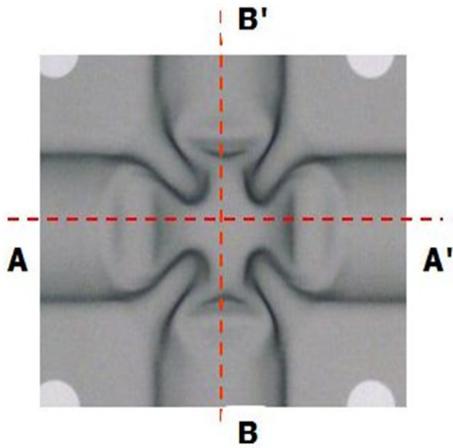
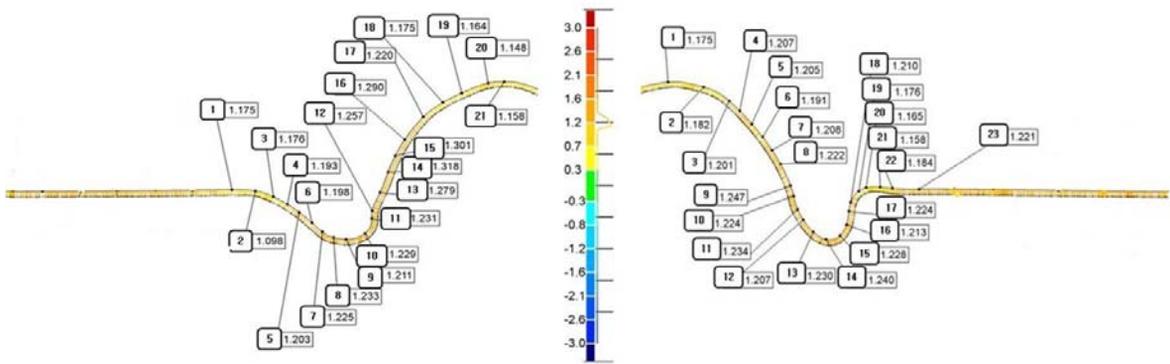


Fig.14 Measurement direction of membrane thickness using optical 3D digitizing system

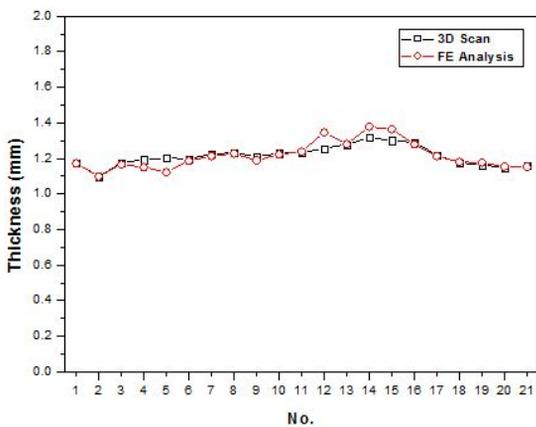
mm~1.247mm 사이의 두께가 측정되었다. 이는 멤브레인의 초기 블랭크 두께 1.2mm와 두께 오차 범위인 $\pm 10\%$ 을 고려할 때, 1.08mm~1.32mm 수준의 요구 두께 분포를 만족하는 것으로 조사되었다. 또한, 앞서의 멤브레인 성형공정에 대한 유한요소 해석을 기반으로 한 두께 분포 예측 결과와 실험을 통한 두께 측정 결과를 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16(a)는 A-A' 단면에서의 두께 분포를 비교한 것이고, Fig. 16(b)는 B-B' 단면에 대한 두께 분포를 나타낸 것이다. 이로부터 LNG 운반선 저장탱크 1차 방벽용 멤브레인 구조물의 성형 공정에 대한 유한요소 해석 결과는 실험 결과와 매우 유사한 두께 분포를 보이고 있음을 알 수 있으며, 이는 본 연구에서의 해석적 그리고 실험적 접근 방법이 적절함을 의미한다고 할 수 있다. 더군다나,



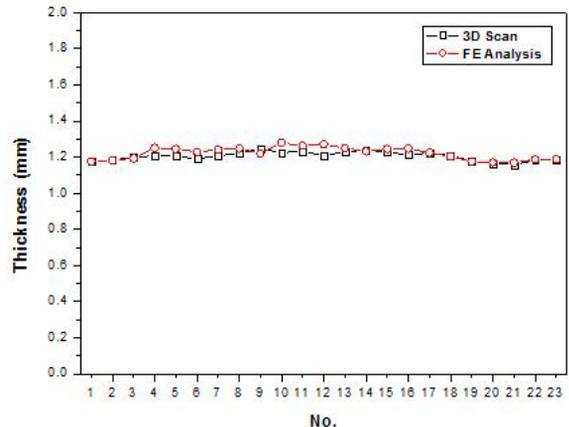
(a) Cross-section A-A'

(b) Cross-section B-B'

Fig.15 Experimental results on thickness distribution along cross-section A-A' and B-B'



(a) along cross-section A-A'



(b) along cross-section B-B'

Fig.16 Comparison of thickness distribution between FE simulation and experiment on each direction

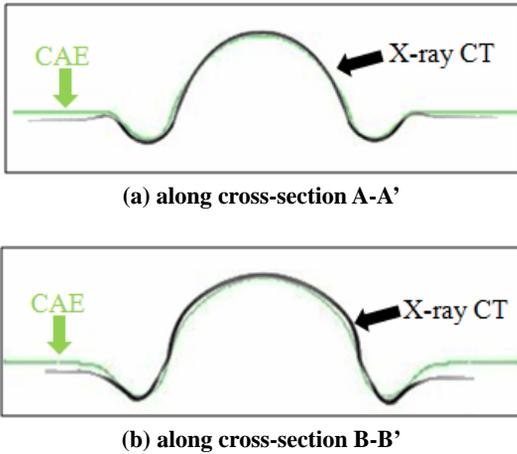


Fig.17 Comparison of deformed configuration between FE simulation and experiment by using X-ray CT apparatus

멤브레인 성형에 있어서, 최종 성형품의 변형 형상에 대한 적절성을 조사하기 위해 X-ray CT 장비를 이용한 단면 형상을 조사하였다. 이로부터 얻어진 멤브레인 시제품의 단면 형상을 해석 결과로부터의 단면 형상과 비교해 본 결과, Fig. 17에서 제시된 바와 같이 멤브레인 성형시 해석결과와 실험결과에 있어서 적절한 변형 결과를 보임을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소 해석 기법을 이용하여 LNG 운반선의 LNG 저장탱크용 1차 방벽 구조물로 주로 적용되는 멤브레인의 성형 공정을 3차원 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS를 활용하여 해석하였다. 멤브레인 성형 공정에 대한 해석적 접근에 있어서, 유효응력 분포 및 유효변형률 분포 그리고 두께 분포를 조사하여 초기 설계된 금형의 일부 수정이 필요함을 알 수 있었으며, 금형의 개선을 바탕으로 한 멤브레인 성형 공정에 대한 유한요소 재해석을 수행하였다. 특히, 멤브레인 구조물에 있어서 중요 형상인 노트부 성형을 위한 기존의 단순 1회 성형공정을 총 2회 성형공정으로 세분화함으로써 멤브레인 중간성형품 및 최종 성형품에 대한 두께 균일화를 달성할 수 있었고, 이에 따른 국부적 응력 집중 완화 및 파단 특성을 개선할 수 있었다.

또한, 본 연구에서의 해석적 접근에 대한 결과

를 검증하기 위해 멤브레인을 시제작하여 주요 부위에 대한 두께를 측정하였으며, 그 측정결과를 해석 결과와 비교·분석하였다. 이러한 체계적인 접근을 통해 본 연구에서 제시한 해석적 연구 결과는 실험적 접근을 근거로 한 상호 비교 결과로부터 유효함과 동시에 실용화 가능한 멤브레인 성형 공정임을 제시하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과들을 요약하면 다음과 같다.

(1) 유한요소 재해석을 통한 멤브레인 성형 해석 결과, 초기 유한요소 해석 결과에서의 국부적 과도 두께 증가 및 두께 감소 현상을 현저히 완화시킬 수 있었다.

(2) 두께 분포 측면에 있어서, 유한요소 재해석 및 멤브레인 시제작을 통한 두께 측정 결과로부터 얻어진 두께 분포는 멤브레인의 오차 허용 범위인 초기 블랭크 두께 기준 $\pm 10\%$ 의 범위를 만족함을 알 수 있었다.

(3) 유한요소 재해석에 있어서, 멤브레인 이중곡률부에서 국부적으로 과도 두께 증가가 약 15% 나타났으나, 이는 멤브레인의 특성인 내피로·내구성 확보 측면에서 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단되었다.

(4) X-ray CT 장비를 이용한 변형 형상을 측정하여 유한요소 재해석 결과와 비교해 본 결과, 멤브레인의 단면 형상에 있어서 해석 및 실험 결과로서 유사한 변형 결과를 보임을 알 수 있었다. 이를 통해, 본 연구에서의 금형 수정에 따른 유한요소 재해석 및 일련의 성형 실험 결과 등이 유효함을 알 수 있었다.

(5) 다양한 형상 및 곡률 분포를 요구하는 멤브레인의 원활한 성형을 위해서는 성형 절차의 적절한 조화도 건전한 멤브레인 성형에 도움이 될 수 있음을 알 수 있었다.

(6) 본 연구에서는 LNG 운반선의 저장탱크 1차 방벽용 멤브레인의 성형 공정에 대한 유한요소 해석 기법을 이용한 해석적 접근과 실험적 연구를 병행하여 수행하였으며, 각 결과들에 대한 비교·분석을 통해 그 타당성을 제시하였다.

(7) 본 연구에서 도출된 각 결과들은 실제 멤브레인 성형 공정으로의 적용이 현실적으로 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한

국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다(No. 20104010100540). 또한 본 연구는 2008 년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업(No. R0A-2008-000-20017-0) 및 국가핵심연구센터사업(No. R15-2006-022-02002-0)의 부분적 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] C. K. Kim, Y. S. Lee, B. S. Cha, Y. G. Kim, I. S. Yoon, S. H. Hong, 1997, Numerical analysis on the stress behaviours due to geometry effects of the membrane corrugation, J. Korean Inst. Gas, Vol. 1, No. 1, pp. 21~26.
- [2] J. K. Kim, C. S. Kim, D. S. Kim, I. S. Yoon, 2000, Fatigue crack growth behavior of membrane material for LNG storage tank at low temperatures, Trans. Kor. Soc. Ocean. Eng., Vol. 14, No. 1, pp. 23~28.
- [3] M. Kawahara, M. Kurihara, T. Ohta, M. Tanaka, N. Umekawa, M. Kawashima, 1984, Fatigue strength and safety assessment of membrane components, Nippon Kohan Technical Report, Vol. 42, pp. 11~18.
- [4] Y. G. Kim, I. K. Jun, I. S. Yoon, Y. W. Lee, S. H. Honh, C. K. Kim, 1994, Finite element analysis of membrane for LNG storage tank, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 18, No. 10, pp. 2797~2804.
- [5] H. S. Kim, 2001, The evaluation of mechanical properties and fatigue life for domestic 304 stainless steel used as membrane material in LNG storage tank, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.(A), Vol. 25, No. 10, pp. 1644~1650.
- [6] B. T. Oh, Y. K. Kim, I. S. Yoon, H. S. Seo, S. H. Hong, 2002, The development of KOGAS membrane for LNG storage tank, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.(A), Vol. 26, No. 6, pp. 1203~1208.
- [7] T. W. Ku, H. Y. Kim, W. J. Song, B. S. Kang, 2008, Process design and finite element analysis of rectangular cup used for Ni-MH battery with high aspect ratio, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 3, pp. 107~181.
- [8] T. W. Ku, J. W. Park, S. C. Heo, B. S. Kang, 2010, Experimental study on non-axisymmetric rectangular cup using multi-stage deep drawing process, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 4, pp. 253~262.