

## 심해 유인 잠수정 구형 내압 선체의 구조 해석

이한민<sup>†</sup> · 박성환 · 이재경  
한국기계연구원 시스템신뢰성연구실

### Structural Analysis for Spherical Pressure Hull of Deep Manned Submersible

Hanmin Lee<sup>†</sup>, Seong-Whan Park, and Jai-Kyung Lee

Department of System Reliability, Korea Institute of Machinery and Materials

Received 12 August 2015; received in revised form 8 October 2015; accepted 23 October 2015

#### ABSTRACT

This paper presents the results of the structural analysis and the optimization of a 6,500 m manned submersible. Nonlinear structural analysis for imperfect spheres with the maximum allowable out-of-roundness(OOR) was performed to calculate the thickness of the pressure hull. Dimensions of viewports were determined according to ASME PVHO standard. The design optimization of the spherical hull with openings was divided into two steps - the optimization of the detailed shape of the viewport reinforcements and the optimization of the viewport location in the spherical pressure hull.

**Key Words:** Deep manned submersible, Design optimization, Spherical pressure hull, Structural analysis, Viewport reinforcement

## 1. 서 론

심해 유인 잠수정은 사람이 직접 탑승하여 과학 탐사 및 심해 자원 개발을 위한 임무를 수행하는 해양 장비로써, 현재 미국, 프랑스, 러시아, 일본, 중국 등이 6,000 m급 심해 유인 잠수정을 보유하고 있으며, 최근 국내에서도 6,500 m급 심해유인 잠수정 개발을 추진하고 있다<sup>[1]</sup>. 조종사와 과학자를 포함해 2~3명이 거주하는 내압 선체(pressure hull)는 주로 티타늄 재질의 구(sphere) 형태로 제작된다. 구형 내압 선체는 심해의 엄청난 수압으

로부터 탑승자를 안전하게 보호하기 위해 충분한 강도를 가지도록 만들어져야 하며, 전체 잠수정 중량의 약 3분의 1을 차지하기 때문에 한정된 배터리로 가능한 한 오랜 시간 탐사를 하기 위해서는 가볍게 만들어지는 것 또한 중요하다. 구형 내압 선체에는 탑승자의 출입을 위한 해치, 운전 및 탐사를 위한 관측창, 각종 배관을 위한 관통구 등이 나 있어서 이들을 고려한 구조 안전성 검토가 필요하다. 따라서 심해 유인 잠수정의 구형 내압 선체는 구조적으로 안전하면서 중량을 최소화하고 탐사를 위한 시야 각을 충분히 확보할 수 있는 방향으로 설계가 이루어져야 한다.

Pan *et al.*<sup>[2]</sup>은 진원도를 고려한 비선형 유한요소 해석 결과로부터 구형 내압 선체의 붕괴 압력에

<sup>†</sup>Corresponding Author, hmlee@kimm.re.kr  
©2015 Society of CAD/CAM Engineers

대한 설계식을 도출하였다. 이 설계식을 바탕으로 관측창을 고려한 구형 내압 선체의 구조 최적설계를 수행하였으나<sup>[3]</sup>, 관측창의 위치 변화에 따른 해석은 고려되지 않았고 관측창 보강부(reinforcement)가 외부로 많이 돌출되는 형태여서 중량이나 유체 저항 측면에서 불리한 점이 있다. Pranesht *et al.*<sup>[4,5]</sup>은 진원도에 따른 붕괴 압력의 민감도 해석을 수행하였으며 면적치환법을 통해 관측창 보강부의 설계를 수행하였지만, 보강부의 구체적인 형상이 제시되지 않았고 설계변수를 고려한 최적화는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 6500 m급 심해 유인 잠수정의 구형 내압 선체에 대해 구조 안전성 관점의 체계적인 설계 절차를 구축하였다. 기존 연구에 비해 외부 돌출이 적은 관측창 보강부 형상에 대해 구조 최적설계를 수행하였고, 관측창 위치에 따른 전체 내압 선체의 구조 안전성을 검토하였다.

## 2. 잠수정 내압 선체에 대한 구조 해석

### 2.1 잠수정 내압 선체에 대한 설계 절차

심해 유인 잠수정의 구형 내압 선체에 대한 구조 최적화 절차를 확립하였다<sup>[2,5]</sup>. Fig. 1에서 보듯이, 먼저 시스템 레벨의 설계단계에서 구형 내압 선체의 안쪽 반경( $R$ ), 관측창의 내측 직경( $D_i$ )과 같은 일반적인 제원을 결정한다. 그 후, 초기 결함을 고려한 비선형 좌굴 해석을 통해 구형 내압 선체의 두께( $t$ )를 정하는 한편, ASME PVHO(Pressure Vessels for Human Occupancy)<sup>[6]</sup>와 같은 표준 규

격에 따라 관측창의 상세 형상에 대한 설계를 수행한다. 비선형 좌굴 해석을 통해 구형 내압 선체의 붕괴 압력을 찾는 방법에는 선형 좌굴 모드 기반 방법과 국부 진원도 기반 방법 등이 있다. 선형 좌굴 모드 기반 방법에서는 초기 결함이 없는 기하 모델로 선형 좌굴 해석을 수행하고 여기서 구한 첫 번째 좌굴 모드의 형상을 크기 조정하여 비선형 좌굴 해석을 위한 초기 결함을 가진 기하 모델을 생성한다. 국부 진원도 기반 방법에서는 국부 편차의 크기와 각도를 직접 포함하여 기하 모델을 생성하는 것이 다른 점이다. 선형 좌굴 모드 기반 방법은 최악의 경우를 가정한 것이고 실제로 발생할 가능성이 매우 작기 때문에<sup>[2]</sup> 본 연구에서는 국부 진원도 기반 방법을 이용하여 구형 내압 선체의 요구 두께를 결정하였다. 위와 같은 과정을 통해 전체 구의 치수와 관측창의 형상이 정해지면 관측창 주위의 보강 부위에 대한 상세한 형상 설계를 수행하고 관측창의 위치를 결정함으로써 구형 내압 선체에 대한 설계를 완성한다.

본 연구에서 최대 작업 수심은 6,500 m이며 심해 유인 잠수정 설계에 일반적으로 쓰이는 안전계수 1.5를 적용하여 97.5 MPa을 최대 압력으로 정하였다. 구형 내압 선체의 안쪽 반경은 1.05 m, 관측창은 전면부에 위치하는 대형 관측창(내측 직경 177.8 mm)과 측면에 위치하는 소형 관측창(내측 직경 127 mm) 두 종류에 대해 설계를 수행하였다.

### 2.2 초기결함을 고려한 비선형 좌굴해석

실제 구형 압력 선체는 제작 과정에서 진원도(out-of-roundness)와 같은 결함을 포함하게 되므로 설계 압력에 따라 요구되는 구의 두께를 계산하기 위해서는 초기결함을 고려하여 비선형 좌굴 해석을 수행해야 한다.

일반적으로 국부 진원도는 Fig. 2와 같이 편차의 크기( $\Delta$ )와 각도( $\alpha$ )로 정의된다. GL<sup>[7]</sup>, DNV<sup>[8]</sup>와 같은 선급 규칙에 따르면 진원도의 크기는 구의 공칭 평균 반경(nominal mean radius)의 0.5%를 초과할 수 없다고 규정하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 최대 허용 진원도를 5.25 mm로 정하였다.

국부 진원도를 포함하는 구형 압력 선체에 대한 비선형 좌굴해석을 수행하기 위하여 Fig. 3과 같은 해석 모델을 생성하였다. 구의 두께, 편차의 크기와 각도를 변화시킬 수 있는 파라메트릭 모델을 생성하였으며, 해석의 단순화를 위하여 Y축을 기

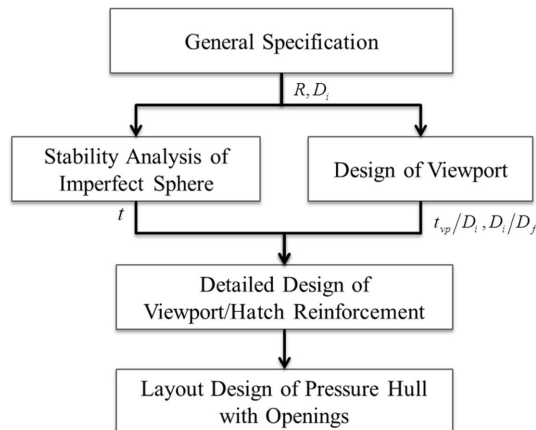


Fig. 1 Design procedure of spherical pressure hull with finite element analysis

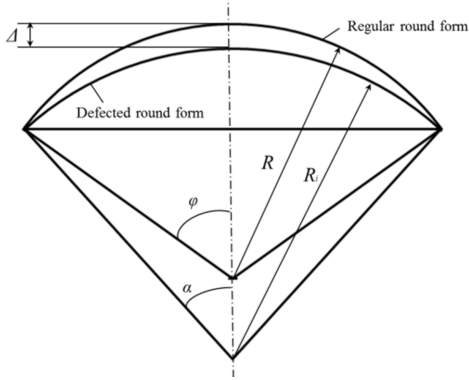


Fig. 2 Local out-of-roundness of spherical pressure hull

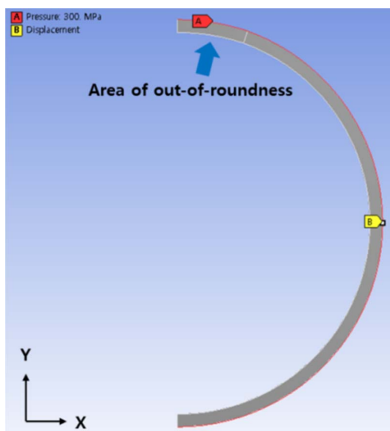


Fig. 3 Load and boundary conditions for imperfect sphere

준으로 축대칭 조건을 적용하였다. 요소는 8 절점을 갖는 고차 2D 요소인 PLANE183을 사용하였다. PLANE183 요소는 평면 응력, 평면 변형률, 축대칭 모델에 사용 가능하고, 각 노드 별로 x, y 방향의 2개의 병진 자유도를 가지며, 2차식의 형상 함수를 갖는 요소이다. 강체 운동을 방지하기 위해서 Fig. 3의 B점을 잡아 반경 방향의 자유도는 풀고 수직 방향의 자유도는 구속하는 경계조건을 부여하였다. 구의 외부 면에 0부터 설계 압력 이상의 값까지 외압을 점차 증가시키며 Newton-Rapson 방법의 비선형 해석을 수행하여 붕괴가 발생하는 압력을 계산하였다.

본 연구에서 사용한 재료 정보는 Table 1에 나타나 있다. 구형 압력 선체는 티타늄 합금 재질을 사용하였으며 비선형 좌굴해석을 위해서 이중선형(bilinear) 탄소성 재료 모델로 가정하였다.

Fig. 4는 비선형 해석 결과의 한 예로써 구의 두

Table 1 Material properties

Properties	Titanium Alloy	Acrylic
Young's modulus (E)	110 GPa	2758 MPa
Poisson's ratio (ν)	0.3	0.35
Compressive yield strength ( $\sigma_y$ )	970 MPa	103 MPa
Tangent modulus ( $E_t$ )	1250 MPa	-

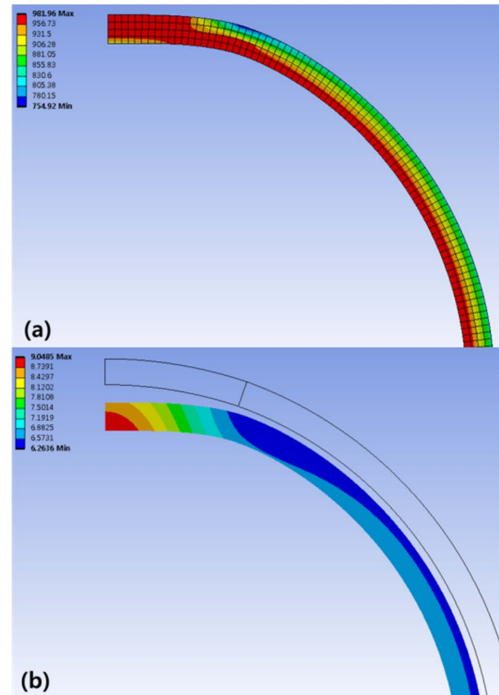


Fig. 4 (a) von-Mises stress and (b) displacement of imperfect sphere ( $t = 70 \text{ mm}$ ,  $\Delta = 5 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 20^\circ$ )

께, 진원도 편차의 크기 및 각도가 각각 70 mm, 5 mm, 20°일 때 붕괴 직전(외압 120.5 MPa)의 등가 응력과 변위를 나타낸다. 초기 결함을 부여한 부분에 큰 변형이 발생하여 붕괴에 이르는 것을 확인할 수 있다.

위와 같은 방법으로 다양한 변수 값에 대한 해석을 수행하여 Fig. 5와 같은 관계 그래프를 구하였다. 구의 두께가 커질수록, 진원도 편차가 작을수록 붕괴 압력이 커짐을 알 수 있다.

이러한 관계를 바탕으로 최대 허용 진원도 (5.25 mm)를 가정했을 때 최대 수압(97.5 MPa) 하에서 붕괴가 일어나지 않는 구형 내압 선체의 최소 두께를 계산하면 57.58 mm 정도가 된다. 이는 개구부가 없는 온전한 구에 대해 진원도 만을 고

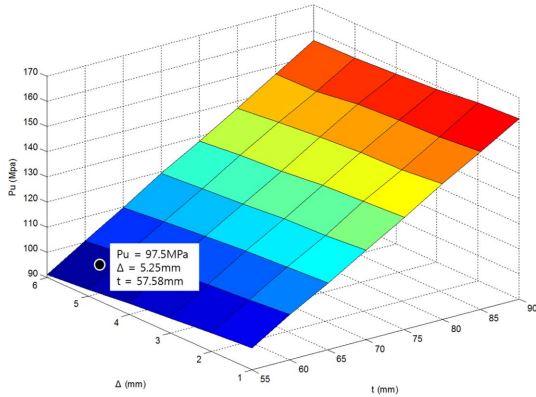


Fig. 5 Relationship of ultimate pressure with thickness and out-of-roundness of spherical hull

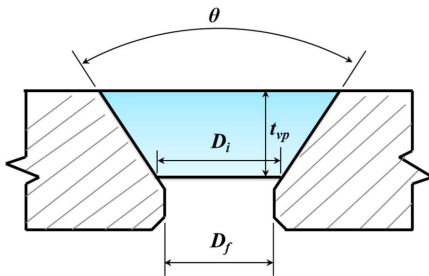


Fig. 6 Conical frustum viewport

려했을 때 계산되는 값으로써 이후 설계 과정에서 두께의 최소값으로 참고될 뿐이며, 실제 내압 선체에는 관측창과 해치 등 다양한 개구부가 존재하기 때문에 이보다 큰 두께를 갖도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 Shinkai 6500( $t = 73.5 \text{ mm}$ )<sup>[9]</sup>, Alvin II( $t = 71 \sim 72 \text{ mm}$ )<sup>[10]</sup>와 같은 기존 6500 m급 심해 유인 잠수정의 사례를 참조하여 70 mm 이상의 두께를 갖도록 설계하였다.

### 2.3 관측창 설계

본 연구에서 대상으로 하는 심해 유인 잠수정은 전면에 3개의 대형 관측창(내측 직경 177.8 mm)과 좌우 측면에 각각 1개의 소형 관측창(내측 직경 127 mm)을 갖는다. 유인 잠수정의 안전에 관한 규격인 ASME PVHO에서 제시하는 절차에 따라 관측창의 설계를 수행하였다. 안전율을 적용하기 전의 최대 수압인 65 MPa를 설계압력으로 정하고 수온은 4°C로 가정한다. Fig. 6과 같은 원뿔대 모양의 관측창을 선정하였으며, 원뿔 각( $\theta$ )은 90°로 정하고 내측 직경( $D_i$ )은 177.8 mm와 127 mm 두 경우에 대해 각각 설계하였다. 규격에서 제시

하는 테이블과 그래프로부터 관측창 내측 직경 대비 두께( $t_{vp}/D_i$ )는 0.77 이상, 보강 돌출부 직경 대비 관측창 내측 경( $D_i/D_f$ )은 1.2 이상이 되도록 설계되어야 함을 확인하였다. 즉, 대형 관측창의 경우, 두께가 136.9 mm 이상, 보강 돌출부 직경은 148.2 mm 이하가 되어야 하며, 소형 관측창의 경우, 두께가 98 mm 이상, 보강 돌출부 직경은 105.8 mm 이하가 되어야 한다.

### 2.4 관측창 보강부의 구조 최적화

관측창이 위치하는 구형 압력 선체 부위는 구멍이 뚫려 있어 취약한 부위이므로 관측창 주위에 보강 영역을 생성해야 한다. 본 연구에서 사용한 관측창 보강부의 형상과 설계변수는 Fig. 7에 나

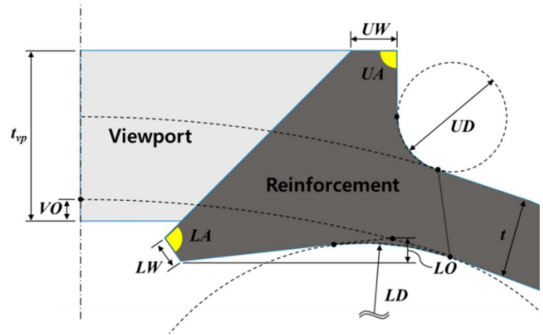
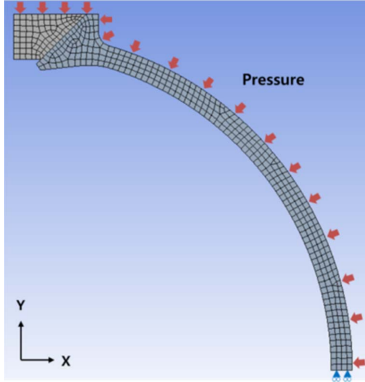


Fig. 7 Design parameters for the viewport reinforcement

Table 2 Upper and lower limit of design parameters for the reinforcement of the large viewport

DP	Explanation	Limit
$t_{vp}$	Thickness of the viewport	140~200 mm
VO	Offset of the viewport from the base circle	20 mm
UW	Width of the upper part of the reinforcement	10~70 mm
UA	Angle of the upper part of the reinforcement	70~100°
UD	Diameter of the upper fillet	100 mm
LW	Width of the lower part of the reinforcement	10~70 mm
LA	Angle of the lower part of the reinforcement	90~135°
LO	Offset of the lower part of the reinforcement	2~30 mm
LD	Diameter of the lower fillet	500 mm



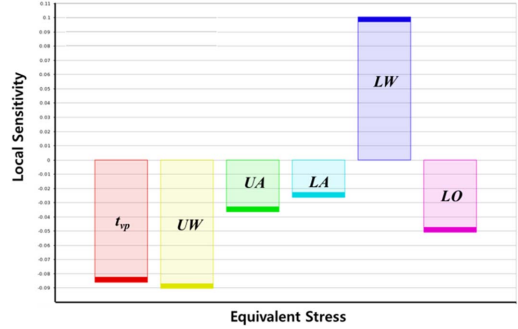
**Fig. 8** Finite element model of the viewport reinforcement

타나있다. 설계변수에 대한 구체적인 설명과 범위는 Table 2에 제시되어 있다. 관측창 설계에서 계산한 관측창의 두께( $t_{vp}$ ) 범위를 반영하였고, 보강부 형상의 크기를 제한하기 위해서 관측창의 수직 위치( $VO$ )와 위아래 필렛의 직경( $UD, LD$ ) 값을 고정하였다.

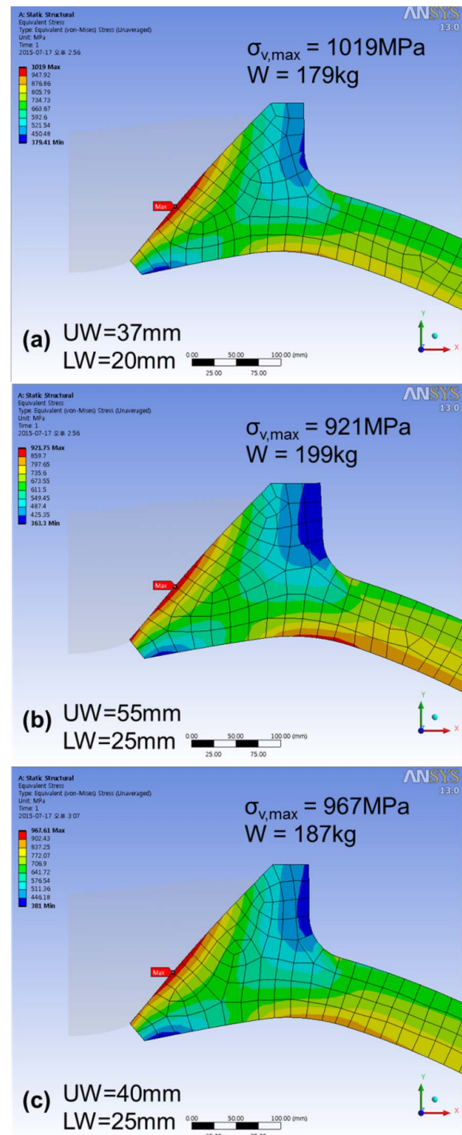
관측창 보강부 구조 최적화의 목적은 최대 등가 응력이 재료의 항복 응력을 초과하지 않는 범위에서 중량을 최소화하는 설계변수를 찾는 것이다. 이를 위해 Fig. 8과 같은 구조해석 모델을 생성하였다.

내압 선체와 관측창의 재질은 각각 Table 1에 제시된 티타늄 합금과 아크릴 재질을 사용하였다. 해석의 단순화를 위해서 Y축을 기준으로 축대칭 조건을 부여하였으며 내압선체 아래쪽 끝단에도 대칭 조건을 부여하였다. 관측창과 내압 선체 사이에는 마찰이 없는(frictionless) 접촉 조건을 가정하였다. 하중은 압력 선체 외부에 97.5 MPa의 외압을 적용하였다.

최대 응력값이 어떤 설계변수의 변화에 민감한지 파악하기 위하여 설계민감도 해석을 수행하였다. Fig. 9에서 보는 것처럼, 관측창의 두께( $t_{vp}$ ), 보강부 위아래의 폭( $UW, LW$ ) 등 보강부 면적에 직접적인 영향을 주는 인자가 최대 응력 결과에도 큰 영향을 끼침을 알 수 있다. 관측창 두께가 커지고 보강부 윗 부분의 폭이 커질수록 보강부 면적이 커져서 응력이 줄어들음을 확인할 수 있다. 보강부 아래 부분의 폭에 대해서 좀 더 구체적인 분석을 해보면 값이 증가함에 따라 다른 변수와 마찬가지로 보강부 면적을 키워 응력을 낮추는 효과가 있지만 25 mm 이상부터는 응력을 점점 높이는 작



**Fig. 9** Design sensitivity of parameters for equivalent stress



**Fig. 10** Comparison of (a) the initial, (b) the intermediate and (c) the optimum design



용을 하는 것을 확인할 수 있다.

관측창 보강부 구조 최적화를 수행하여 Fig. 10 과 같은 결과를 얻었다. Fig. 10의 (a)는 응력 조건을 만족하지 못하는 초기 설계안을, (b)는 응력 조건은 만족하지만 보강부 단면적과 중량이 커진 중간 설계안을, (c)는 응력 조건을 만족하면서 중량을 최소화하는 최적설계안을 나타낸다. Fig. 10에서  $\sigma_{y,max}$ 는 최대 von-Mises 응력을, W는 관측창 보강부의 중량을 나타낸다.

### 2.5 관측창의 위치를 고려한 구형 내압 선체의 구조 안전성 해석

내압 선체의 전체적인 사이즈와 관측창의 형상, 관측창 보강부의 최적 형상이 결정되면 관측창을 포함한 내압 선체 전체 모델에 대하여 구조 안전성을 검토한다. 본 연구에서는 전면에 대형 관측창이 3개, 좌우 측면에 소형 관측창이 각각 1개 총 5개가 나 있다. 관측창의 위치는 좌우 대칭 형태로 가정하여 1/2 모델만 고려하였다. 관측창의 위치를 결정하는 설계변수로는 Fig. 11에 볼 수 있듯이 관측창 사이의 수평 각( $\phi_1, \phi_2$ )과 각 관측창이 XZ 평면과 이루는 수직 각( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )을 사용하였다.

관측창 및 해치를 포함하는 전체 내압 선체에 대한 해석 모델은 Fig. 12에 나타나있다. 요소는 20 절점을 갖는 고차 3D 요소인 SOLID186을 사용하였다. 각 노드 별로 x, y, z 방향의 3개의 병진 자유도를 가지며, 2차식의 형상함수를 갖는 요소이다. 앞선 해석과 마찬가지로 강체 운동을 방지하기 위해서 압력 선체의 특정 점을 잡아 반경 방향의 자유도를 제외하고 나머지 자유도는 구속하는 경계조건을 부여하였다. 하중은 압력 선체 및

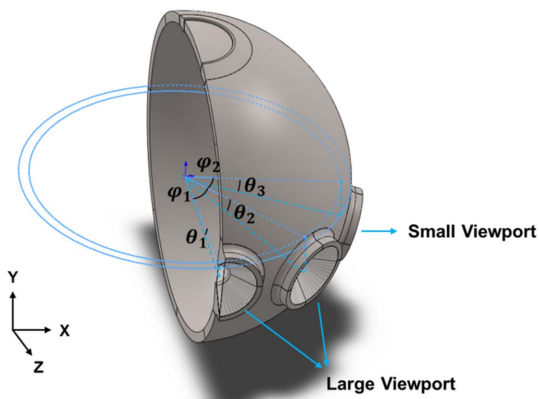


Fig. 11 Design parameters for the viewport location

관측창, 해치 외부 면에 97.5 MPa의 수압을 적용하였다.

관측창의 위치는 운전자와 과학자가 내압 선체 내 어디에 위치하는지, 어떤 자세를 유지하며 외부를 관측하는지, 상하좌우의 시야 각을 얼마만큼 확보해야 하는지 등에 따라 결정되어야 하며, 구

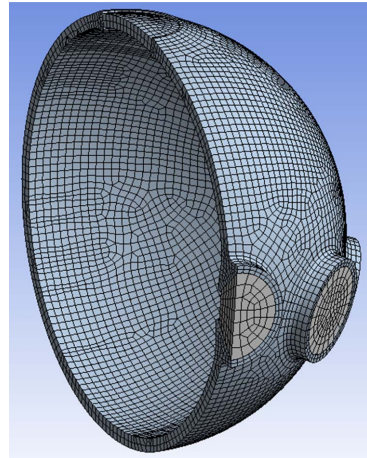


Fig. 12 Finite element model of the spherical pressure hull with viewports and a hatch

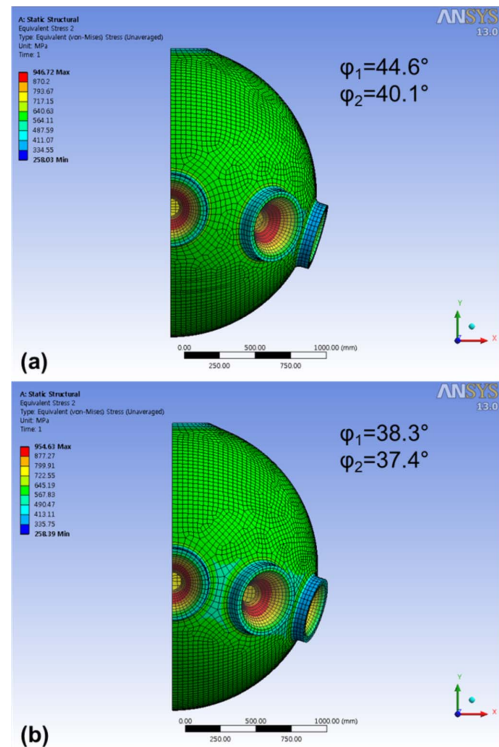
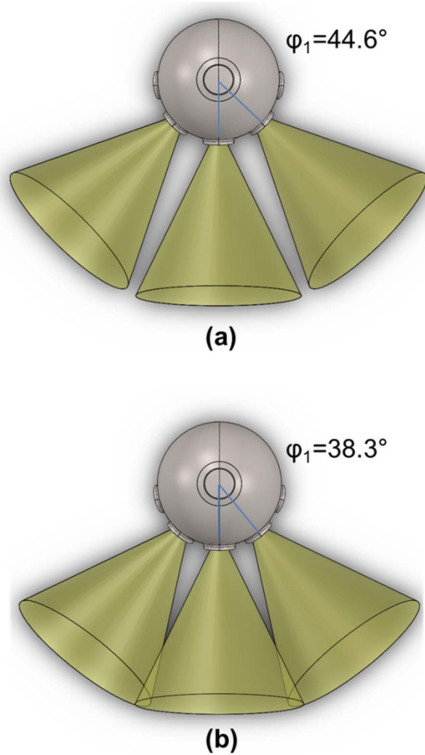


Fig. 13 Comparison of the initial and the optimum design



**Fig. 14** Field of view of the initial and the optimum design

조 안전성과 제작성 등을 동시에 고려하여 정해야 한다. Fig. 13(a)와 같이 관측창 사이의 각이 벌어지는 경우 최대 응력이 낮아져서 구조적으로 안전하지만 전면부 관측창의 시야각이 서로 겹치지 않아 사각지대가 발생할 수 있는 문제가 있다. Fig. 13(b)의 경우에는 관측창 사이의 거리가 좁아져서 최대 응력이 다소 높아지기는 하나 구조적으로 문제가 발생하는 수준은 아니며 전면부 관측창의 시야각이 서로 중첩되어 충분한 시야각을 확보할 수 있다.

시야각 중첩 여부는 Fig. 14와 같이 원뿔 형태의 시야각을 모델링하여 중첩 여부를 확인하였다. 가시거리를 3 m로 가정했을 때 초기 설계안은 시야각이 중첩되지 않는 반면, 최적 설계안은 시야각이 중첩되는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 6,500 m급 심해 유인 잠수정의 구형 내압 선체에 대한 체계적인 설계 절차를 제

시하였고, 각 과정에서 구조 안전성을 검토한 결과와 최적 설계안을 제시하였다.

향후에는 다양한 타입의 형상을 고려한 관측창 보강부 최적설계를 수행하고, 내압 선체 내부의 장비와 탑승자의 위치를 고려하여 시야각에 대한 요구사항을 구체화해서 내압 선체 전체 모델에 대한 최적설계를 완성할 예정이다. 또한, 시제를 제작하고 내압 실험을 수행하여 설계안에 대한 검증을 수행할 예정이다.

### 감사의 글

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(심해 유·무인 잠수정 기술 개발 및 운용 인프라 구축 과제).

### References

1. Jin, S., Lim, S., Park, S. and Yoo, S., 2014, Measuring the Scientific Benefits from the Deep-sea Human-operated Vehicle Project: A Choice Experiment Study, *Ocean and Polar Research*, 36(3), pp.277-288.
2. Pan, B.B., et al., 2010, Further Study on the Ultimate Strength Analysis of Spherical Pressure Hulls, *Marine Structures*, 23(4), pp.444-461.
3. Pan, B.B. and Weicheng C., 2012, Structural Optimization for a Spherical Pressure Hull of a Deep Manned Submersible Based on an Appropriate Design Standard, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(3), pp.564-571.
4. Pranesh, B., et al., 2013, Manufacturing Imperfection Sensitivity Analysis of Spherical Pressure Hull for Manned Submersible, *Marine Technology Society Journal*, 47(6), pp.64-72.
5. Pranesh, B., et al., 2014, Structural Reinforcement of Viewports in Spherical Pressure Hull for Manned Submersibles, *Marine Technology Society Journal*, 48(3), pp.17-24.
6. PVHO, Safety Standard for Pressure Vessels for Human Occupancy, 2007, ASME.
7. Rules for Classification and Construction, 1-Ship Technology, 5-Underwater Technology, 2-Manned Submersibles, 2009, GL.
8. Rules for Certification/Classification of Submersibles, 1988, DNV.
9. Nanba, N., Morihana, H., Nakamura, E. and Watanabe, N., 1990, Development of Deep Submergence Research Vehicle "SHINKAI6500",

*Technical Review of Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.*, 27(3), pp.157-168.

10. Walden, B.B. and Brown, R.S., 2004, A Replace-

ment for the Alvin Submersible, *Marine Technology Society Journal*, 38(2), pp.85-91.



**이 한 민**

1998년 KAIST 기계공학과 학사  
2000년 KAIST 기계공학과 석사  
2005년 KAIST 기계공학과 박사  
2005년~현재 한국기계연구원 선임 연구원

관심분야: Design Optimization of Structure and Mechanism, Vibration Energy Harvesting



**박 성 환**

1983년 서울대학교 조선해양공학 학사  
1985년 서울대학교 조선해양공학 석사  
1996년 히로시마대학 구조공학 박사  
1985년~현재 한국기계연구원 책임 연구원

관심분야: Design Optimization of Structure and Mechanism, Structural Analysis by FEM, Structural Safety Assessment



**이 재 경**

1995년 아주대학교 컴퓨터공학과 학사  
1997년 아주대학교 컴퓨터공학과 석사  
2008년 충남대학교 컴퓨터공학과 박사  
1997년~현재 한국기계연구원 책임 연구원

관심분야: Human-Machine Interaction, Digital Human Modeling, PHM-based Data Analytics