

심해 압력용기 덮개판의 수중 커넥터홀 배치 최적설계[§]

이민욱* · 박성재* · 여태경* · 김형우* · 홍섭* · 조수길** · 장준용** · 이태희** · 최종수**/***†

*한국해양과학기술원 해양시스템연구부, **한양대학교 자동차공학과

Optimum Design of Underwater Connector Hole Arrangement for Deep-sea Pressure Vessel Cover Plate

Minuk Lee*, Soung-Jea Park*, Tae-Kyeong Yeu*, Hyong-Woo Kim*, Sup Hong*, Su-gil Cho**, Jun-yong Jang**, Tae Hee Lee** and Jong-Su Choi**/***†

* Ocean System Engineering Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology

** Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.

(Received May 29, 2012 ; Revised August 1, 2012 ; Accepted August 8, 2012)

Key Words: Pressure Vessel(압력용기), Optimum Design(최적설계), Deep-sea Mining Robot(심해저 채광 로봇), Underwater Connector(수중 커넥터)

초록: 심해저 장비에 사용되는 압력용기는 내장된 전자장비를 대기압 상태로 보호할 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서 해수에 노출되지 않도록 수밀성과 심해의 높은 압력을 견딜 수 있는 구조적 안전성을 확보해야 한다. 본 연구의 압력용기는 원통형이며, 중앙부의 원통형 용기와 양 끝단의 평판형 덮개부로 이루어져있다. 일반적으로 압력용기 내부 전자장비와의 통신 및 전력전송을 위해 압력용기 덮개판에 다양한 수중 커넥터를 배치 한다. 그러나 한정된 덮개판 공간에 다수의 홀이 배치되면 응력집중을 유발하여 압력용기 덮개판의 구조적 안전성에 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 구조적 안전성을 고려한 압력용기 덮개판의 홀 배치 최적화 기법에 대한 연구를 수행하였다.

Abstract: A deep-sea pressure vessel needs to protect the internal electrical equipment from the high external pressure. Thus, the pressure vessel should be designed to be watertight and structurally safe. In this study, a cylindrical-type pressure vessel comprising a hollow cylinder and cover plates at both ends is investigated. For communication between the internal electronic equipment and the external device, holes are bored on the cover plate to install underwater connectors. Considering the type of internal equipment and underwater connector specifications, multiple holes may be required. These holes can affect the structural safety of the pressure vessel cover plate. In this study, the optimum design of the hole arrangement in consideration of the structural safety of the cover plate was performed.

1. 서론

육상 광상에 비해 니켈, 코발트, 구리의 함량이 대단히 높은 심해저 망간단괴는 수심 약 3000~5000m 의 심해저에 널리 분포되어 있는 대표적인 광물자원이다. 특히, 태평양의 클라리온-클립퍼톤 해역(CCFZ)에 부존되어 있으며, 막대한 양의 망간단괴는 세계 선진 각국의 상업적 개발의 목표가

되고 있다.⁽¹⁾ 이러한 망간단괴 채광시스템 개발 연구와 파일럿 실험은 1970 년대에 선진국을 중심으로 시작되었다.⁽²⁾ 우리나라는 1994 년에 인도와 중국에 이어 7 번째로 선행투자국의 자격을 획득하고, 심해저 자원 개발을 위한 연구를 한국해양연구원 연구원이 중심이 되어 진행하고 있다. 최근 시험집광기의 개발과 근해역 실증시험을 통해 그 성과를 입증하였고, 현재는 파일럿 규모의 집광 로봇 개발과 파일럿시험을 준비하고 있는 과정으로 망간단괴의 상업생산에 한발 더 다가서 있는 상황이다.⁽³⁾

현재 개발중인 파일럿 규모의 집광 로봇은 주행 및 제어를 위해 다양한 전자시스템을 탑재하고 있

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계 학술대회(2012. 5. 10.-12., 제주 휘닉스아일랜드) 발표논문임

† Corresponding Author, jschoe@kiost.ac

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

으며, 이러한 전자시스템을 실장하기 위해 다양한 압력용기의 개발이 필요하다. Fig. 1 과 Fig. 2 는 각각 파일럿 집광로봇과, 로봇 내부에 탑재될 다양한 압력용기의 개념도를 나타낸다.⁽⁴⁾

심해 압력용기는 높은 수압을 견디는 강도와 수밀이 보장되어야 한다. 또한 압력용기 내부의 다양한 전자장비와의 통신 및 전력전송에 필요한 케이블 연결을 고려하여 설계해야 한다. 이러한 케이블 연결을 위하여 수중 커넥터(underwater connector)를 사용하고 있으며, 일반적으로 압력용기 덮개판에 장착하여 사용한다.⁽⁵⁾ 내부 전자장비의 사양에 따라 다양한 종류 그리고 다수의 수중 커넥터가 사용될 수 있다. 수중 커넥터를 장착하기 위해서 압력용기 덮개판에 홀을 생성하는데, 많은 커넥터홀을 배치할수록 홀간의 응력집중 등으로 인한 구조적 문제가 발생 할 수 있다. 따라서 커넥터홀의 적절한 배치를 통해 홀 생성으로 인한 구조적 문제를 최소화 할 수 있는 기법 연구가 필요하다.

본 논문에서는 심해 압력용기 덮개판부의 커넥터홀 생성으로 인해 발생하는 구조적 문제를 고찰하고, 이러한 구조문제를 최소화 할 수 있는 홀 배치 최적화 알고리즘을 개발하였다. 또한 제안된 기법의 효율성 향상을 위해 간단한 구조계산식을 이용한 구조안전성 평가기법을 개발하고, 유한요소해석 결과와 비교를 통하여 정확성을 검증하였다. 이와 같이 개발된 알고리즘을 이용하여 커넥터홀 배치최적화 예제를 수행하여 제안된 알고리즘의 효율성을 검증하였다.

2. 수중 커넥터홀 배치 최적화

2.1 심해 압력용기의 구조

수심 약 5000m 의 심해에서 작동하는 집광 로봇은 약 500 bar 의 매우 높은 수압을 받는다. 대부분의 로봇 구조부는 모든 면에 균일한 정수압(hydrostatic pressure)을 받기 때문에 구조적으로 큰 문제가 발생하지 않는다. 하지만 압력용기의 경우 외부는 높은 수압을 받는 반면에 내부 공간은 탑재 장비의 보호를 위하여 대기압 상태를 유지해야 한다. 따라서 압력용기는 내외의 압력 차이를 안전하게 지지할 수 있는 구조적 안전성이 요구된다.

Fig. 3 은 파일럿 집광 로봇에 탑재될 주요 압력용기들을 나타내며, 알루미늄 재질을 사용하였으며, 지름 약 0.3m, 길이 약 1m 내외의 다양한 크기의 원통형으로 되어있다. 원통형 압력용기는 중



Fig. 1 3-D model of pilot mining robot

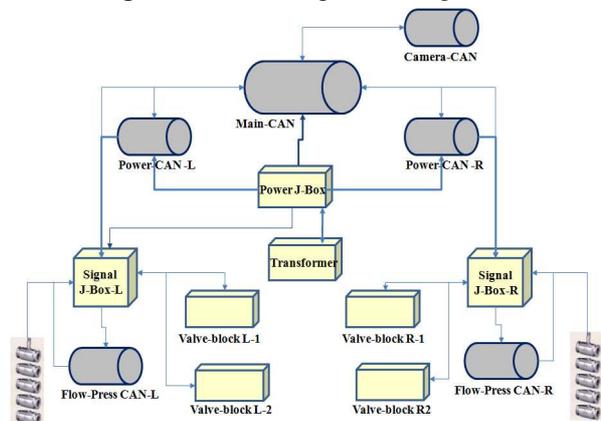


Fig. 2 Pressure vessels of pilot mining robot ⁽⁴⁾

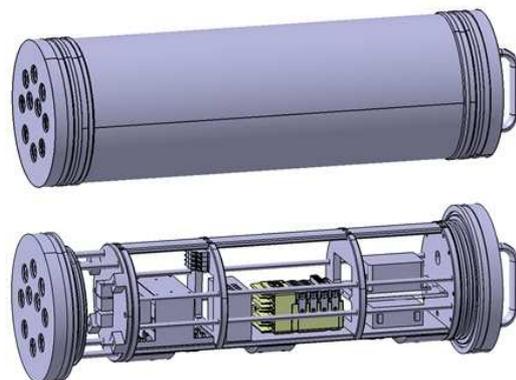


Fig. 3 Deep-sea pressure vessel of pilot mining robot

앙 원통형 실린더 부와 함께 수밀을 위해 양끝에 덮개가 반드시 필요한데, 일반적으로 반구형 덮개나 평판형 덮개 등을 이용한다. 높은 수압을 받는 압력용기의 경우, 반구형을 쓰는 것이 강도적인 측면에서 유리하나, 제작의 편의성, 공간 배치 효율, 커넥터 연결을 위한 관통부 등의 가공작업의 편리성을 위해 평판덮개를 사용하기도 한다.⁽⁶⁾

Fig. 3 에 나타난 바와 같이 본 연구에서 개발하

고자 하는 압력용기 내부에는 집광로봇 제어 및 운용을 위한 많은 전자장비가 내장되어 있으며, 덮개판 부위에 내장된 장비와의 연결을 위해 여러 종류의 커넥터가 장착 되어야 한다. 본 연구에서는 덮개판의 제작 및 커넥터홀 등의 배치작업의 편의를 위해 평판형 덮개판을 채택하였다. 반구형 덮개부가 압축력을 받는 것에 비하여, 평판형 덮개부는 압력용기 내측에 인장력이 발생하는 것에 주의해야 한다. 즉 압축력을 받는 반구형 덮개판은 좌굴을 설계기준으로 고려한다. 하지만 평판형 덮개판의 경우 인장강도가 주요설계 기준이 되므로, 평판형 덮개판을 사용할 경우 압력용기의 실린더부나 반구형 덮개판에 비하여 두껍게 설계해야 한다.⁽⁶⁾ 덮개판부에 수중 커넥터 연결을 위한 홀가공이 필요할 경우 구조적 안정성에 더욱 문제가 발생할 수 있다. 따라서 커넥터홀의 최적배치를 통해 덮개판의 구조적 안정성을 확보하여 덮개판 두께를 최소화할 필요가 있다.

2.2 덮개판부 커넥터홀 구조안전성 평가 기법

커넥터홀을 고려하지 않았을 때 평판형 덮개판은 Fig. 4 와 같이 등분포 하중을 받는 단순지지된 원판으로 생각할 수 있다. 이러한 조건에서 원판 중심에서의 거리 r 에 위치한 지점의 하단과 상단에 발생하는 응력은 다음 식 (1)과 같다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \pm \frac{3p}{8h^2}(3+\nu)(a^2 - r^2) \\ \sigma_t &= \pm \frac{3p}{8h^2}(a^2(3+\nu) - (1+3\nu)r^2) \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 σ_r 는 반경방향응력(radial stress), σ_t 는 접선방향응력(tangential stress)을 나타낸다. 또한 p , h , a , ν 는 각각 외부 압력, 덮개판의 두께, 덮개판의 반지름, 덮개판 재료의 푸아송비를 나타낸다. 최대변위 및 최대응력은 평판 중심의 내측과 외측의 표면에서 발생하게 된다. 하지만 본 연구의 압력용기는 다양한 종류, 다수의 수중 커넥터가 장착되어야 한다. 커넥터홀 생성에 따른 구조적 안전성을 평가하기 위해서는 커넥터홀의 위치, 커넥터홀의 크기 및 홀간 거리에 따른 응력집중을 고려한 응력평가가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 Pilkey 등이 제안한 응력집중계수 중 Fig. 5 에 나타난 바와 같이 상이한 두 홀간의 인장상태에서의 집중계수 평가식을 이용하여 각 커넥터홀 사이의 응력집중을 고려하였다.⁽⁸⁾

식 (1)과 Fig. 3 의 응력집중계수를 이용하여 각

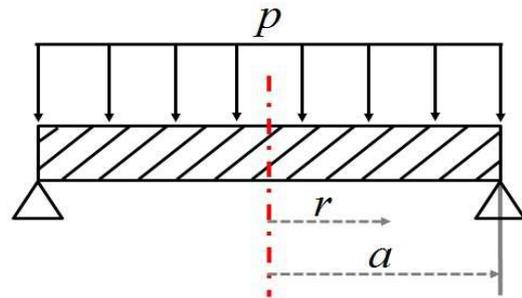


Fig. 4 Simple-supported circular plate

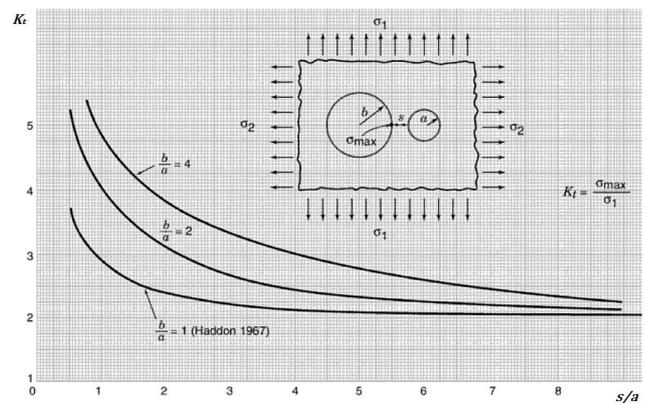


Fig. 5 Stress concentration factor K_t for biaxial tension with two circular hole of unequal diameter⁽⁸⁾

홀간의 응력을 모두 계산한 후 가장 큰 응력 값을 각 홀의 대표응력 값으로 평가하는 방법을 택하여 커넥터홀의 응력을 평가하였다. Fig. 6 와 같이 커넥터홀이 배치되었다고 가정하였을 때, 각 커넥터홀의 응력은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \max(\sigma_{ij}) \\ \sigma_{ij} &= K_{ij} \left(\frac{R_i}{R_j}, \frac{s_{ij}}{R_j} \right) \times \sigma_{h_i}(r_i), \\ (j &= 1, \dots, i-1, i+1, \dots, n) \\ \sigma_{h_i}(r_i) &= \sqrt{\sigma_{r_i}^2 + \sigma_{t_i}^2} - \sigma_r \sigma_t \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서 K_{ij} , σ_{h_i} , σ_{ij} , σ_i 는 각각 Fig.5 에 나타난 i - j 홀 간의 응력집중계수, 홀이 없다고 가정한 i 홀 위치의 응력, 응력집중계수를 고려한 각 홀간의 응력, i 홀의 대표 최대응력을 나타낸다. 그리고 R_i , r_i , s_{ij} 는 Fig. 6 에 나타난 대로 각각 i 홀의 반경 방향 위치, i 홀의 반지름 i - j 홀 사이의 최단거리를 의미한다.

식 (2)를 이용하여 덮개판 전체의 정확한 응력을 구하기는 어렵다. 하지만 응력집중으로 인하여 발생하는 홀부분의 대략적인 응력수준을 평가 할

수 있다면, 많은 시간이 소요되는 유한요소모델을 이용하지 않고 본 식을 이용한 구조안정성을 고려한 홀배치를 수행할 수 있을 것이다. 식 (2)의 정확성을 검증하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램 ANSYS 를 이용한 유한요소모델의 응력과 비교하였다. 다음 Fig. 7 과 같이 다양한 위치와 크기로 모델링된 홀의 유한요소해석 결과와 식 (2) 를 이용한 홀의 응력 결과를 Table 1 에 비교하여 나타내었다. 덮개판 중심에서 먼 H₃, H₅, H₇ 홀은 비교적 정확도가 떨어지지만, 덮개판 중심과 가까우면서 응력수준이 높은 H₁, H₂, H₄, H₆ 홀은 비교적 정확한 응력수준을 보인다. 따라서 식 (2)는 응력이 큰 덮개판 중심부의 응력을 잘 반영하므로 본 연구의 최적배치에 적합하다고 판단된다.

2.3 커넥터홀 배치 최적화를 위한 전산실험계획 기법
 덮개판의 구조적 안정성을 고려하여 커넥터를

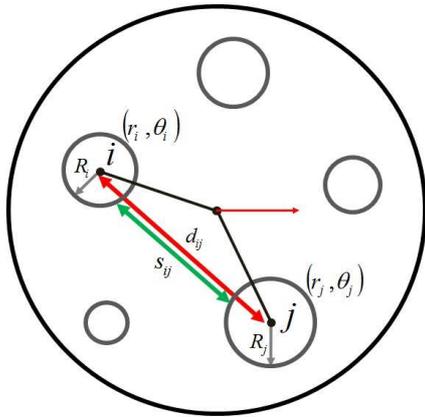


Fig. 6 Description of variables for Eq. (2)

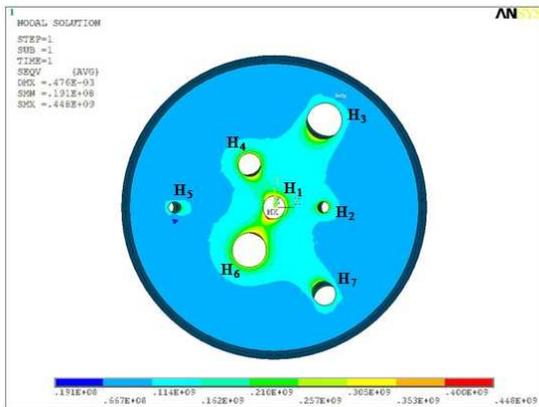


Fig. 7 Stress result of FEM for cover plate with various holes

배치하기 위해서는 식 (1)과 식 (2)에 나타난 바와 같이 응력이 높은 중심부에서 되도록 멀리 위치시키면서 응력집중을 피하기 위해 적절한 커넥터홀 간의 거리를 확보하여 배치해야 한다. 한정된 공간에서 커넥터 홀간의 거리를 적절히 확보하여 배치하기 위해서는 커넥터 홀을 덮개판에 고르게 채우는 기법이 필요하다. 전산실험계획법(DACE, Design and Analysis of Computer Experiment)의 하나인 충전(space-filling) 실험계획법은 설계공간에서 실험점을 고르게 채우는 실험계획법이다.⁽⁹⁾ 이러한 충전 실험계획법은 본 연구의 홀배치 설계개념과 잘 부합한다. 본 연구에서는 한정된 덮개판 공간에서 수중 커넥터홀의 배치를 최적화 하기 위하여 전산실험계획 기법 중 설계공간에서 실험점을 고르게 채우는 충전 실험계획법을 도입하였다. 이러한 충전 실험계획법 중 최대최소거리 실험계획법(Maximin Distance Design)을 도입하였으며, 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } \mathbf{x}_i \ (i=1,2,\dots,n) \\
 & \text{Maximize } D = \min(d_{ij}), \ (i, j=1,2,\dots,n) \\
 & \text{where} \\
 & d_{ij} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

윗 식에서 x_i, x_j 는 각 실험점의 위치좌표이며, d_{ij} 는 두 실험점 간의 거리를 나타낸다. 식 (3)는 실험점 사이의 최소거리를 최대화 하는 최적화 알고리즘으로 덮개판의 응력 및 커넥터홀 사이의 응력 집중, 커넥터홀의 크기 등의 인자들을 고려하여 배치할 수 없다. 본 연구에서는 식 (3)에 홀의 크기와 응력의 크기를 거리계산에 반영하여 다음 식 (4)와 같은 커넥터홀 배치 최적화문제를 정식화하였다.

Table 1 Comparison between stress result of FEM and Eq. (2)

| | H ₁ | H ₂ | H ₃ | H ₄ |
|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| FEM | 444.1 | 339.6 | 337.5 | 386.1 |
| Eq. (2) | 449.2 | 346.9 | 255.9 | 377.6 |
| | H ₅ | H ₆ | H ₇ | |
| FEM | 305.8 | 401.8 | 333.7 | |
| Eq. (2) | 254.6 | 442.4 | 260.0 | |

Unit : MPa

Find $\mathbf{x}_i (i=1,2,\dots,n)$
 Maximize $D = \min(d_{m_{ij}}) (i,j=1,2,\dots,n)$
 where

$$d_{m_{ij}} = d_{ij} - \left(1 + \frac{\alpha\sigma_i}{\sigma_{\max}}\right)r_i - \left(1 + \frac{\alpha\sigma_j}{\sigma_{\max}}\right)r_j \quad (4)$$

$$d_{ij} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|$$

$$\sigma_{\max} = \max(\sigma_i) (i=1,2,\dots,n)$$

식 (4)의 $d_{m_{ij}}$ 는 각 커넥터홀의 크기와 응력이 고려된 홀간의 거리를 나타낸다. 그리고 α 는 거리 조건과 응력 조건 간의 가중치를 결정하는 계수이다. α 가 0 에 가까울 수록 홀간의 거리조건, 클수록 응력조건에 가중치를 두어 홀배치가 수행된다. 식 (4)를 살펴보면, 각각의 커넥터홀 크기를 거리 계산에 반영하였으며, 각 홀의 응력을 홀 크기에 가중치 형태로 곱하여 응력이 큰 홀은 본래의 홀사이 거리보다 더욱 짧게 평가되도록 정식화 하였다. 이러한 정식화를 최대최소거리 실험계획법에 적용하여 간단하게 구조안전성을 고려한 각 커넥터홀 간의 배치최적화를 수행할 수 있다.

본 연구의 배치최적화 문제는 커넥터 홀이 1 개씩 추가될 때마다 2 개의 설계변수가 추가되는 문제이다. 즉 n 개의 커넥터를 배치하는 문제라면 2n 개의 설계변수를 가진 문제가 된다. 본 연구의 압력용기 덮개판은 약 10 개 이상의 커넥터가 배치되어야 한다. 이러한 문제는 다수의 국부 최적해가 존재할 가능성이 매우 높으며, 민감도기반의 최적설계기법을 이용하게 되면 국부최적해로 수렴할 확률이 매우 높다.

따라서 본 연구에서는 전역최적화 기법 중 하나인 차분진화 알고리즘(differential evolution algorithm,

DE algorithm)을 사용하여 배치최적화를 수행하였다. 차분진화 알고리즘은 통계적 임의 탐색법인 유전 알고리즘(genetic algorithm, GA)과 유사한 알고리즘이다. 하지만 차분진화 알고리즘은 매 세대마다 만들어지는 벡터의 차분을 이용하여 최적화를 진행하기 때문에 수렴속도와 수렴의 강건성 면에서 GA 보다 뛰어난 결과를 보인다는 연구결과가 있다. 또한 연산과정에서 개체들을 벡터로 표현하기 때문에 유전 알고리즘과 같은 코딩(coding)과정이 필요 없을 뿐만 아니라 적은 수의 제어인자로 최적화 과정을 조절할 수 있다는 특징이 있다.⁽¹¹⁾

본 연구에서는 상용 수치해석프로그램 Matlab 을 이용하여 다음 Fig. 8 과 같이 커넥터홀 배치 최적화 프로그램을 구현하였다. 본 프로그램은 덮개판의 물성치, 지름, 필요한 커넥터의 홀크기와 개수 등을 입력하면 최적화된 커넥터홀 배치와 식 (2)에 의해 계산된 응력 값을 결과로 제공한다.

3. 예 제

기존의 최대최소거리 실험계획법 식 (3)을 이용한 홀 배치 최적설계 결과와 본 연구에서 제시한 식 (4)를 이용한 홀 배치 최적설계 결과를 다음 예제를 통하여 비교한다.

본 예제의 덮개판은 반경 125mm, 두께 80mm 의 크기를 가지며, 소재는 AL7075 계열의 알루미늄합금 ($\sigma_y=480$ MPa)이다. 또한 안전성을 고려하여 외부로부터 가해지는 600bar 의 압력을 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 외곽부의 커넥터홀 가공 여유 및 제작 편의를 위해 각 홀의 중심점은 반경 85mm 를 넘지 않도록 한다. 이와 같은 압력용기 덮개판에 다음과 같은 두 가지 조건에서 홀을 배치하는 예제를 수행하며, 이를 Table 2 에 정리하여 나타내었다.

Example 1. 동일한 크기를 가진 커넥터홀 10 개 (15mm×10)를 최적 배치하라.

Example 2. 3 가지의 각각 다른 크기를 가진 커넥터홀 10 개(15mm×5, 18mm×4, 21mm×1)를 최적 배치하라.

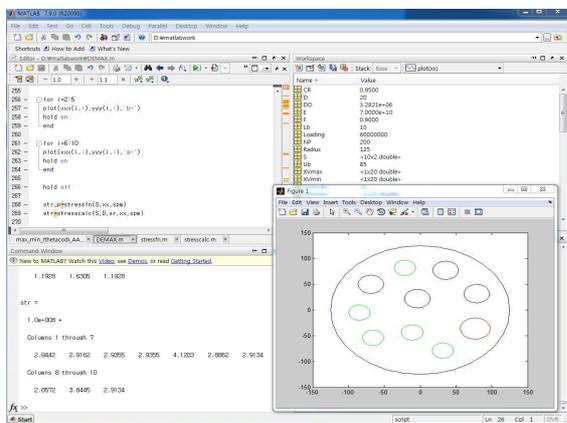


Fig. 8 Illustration of optimum connector holes arrangement program using Matlab

Table 2 Description of examples

| | description | remark |
|-----------|--|----------------------------|
| Example 1 | Find optimum arrangement for 10 connector holes | 15mm×10 |
| Example 2 | Find optimum arrangement for three kinds of 10 connector holes | 15mm×5 18mm×4 21mm×1 |

Table 3 Comparison of maximum stresses for each example

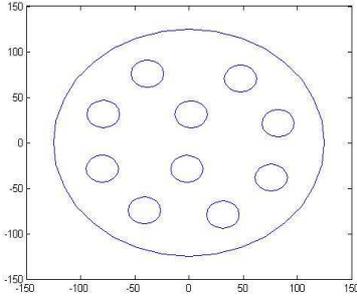
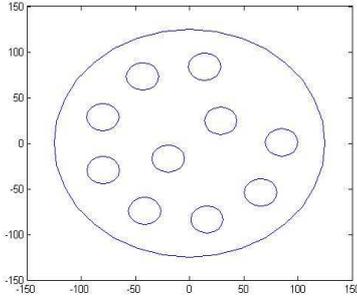
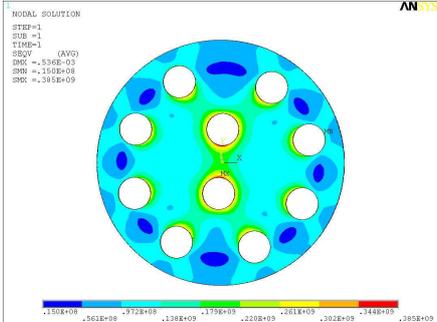
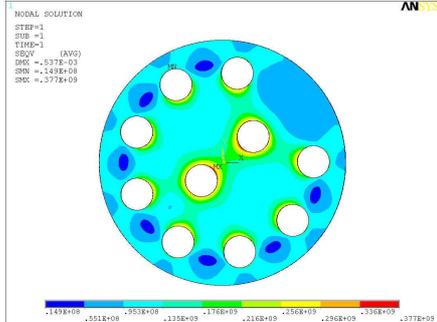
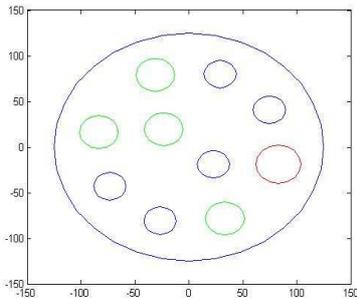
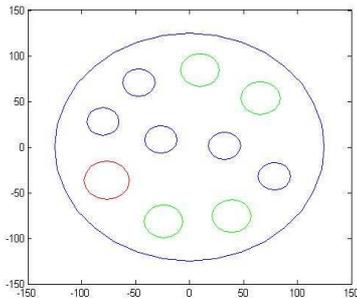
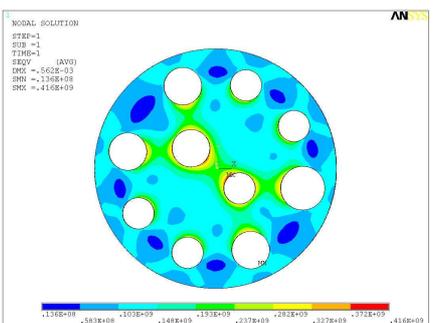
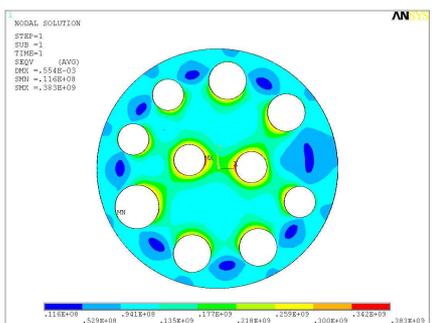
| | | Maximin method | Proposed method |
|-------|-------------------------------|---|--|
| Ex. 1 | Hole arrangement using Matlab |  |  |
| | Max. stress | 406 MPa | 398 MPa |
| | FEM analysis using ANSYS |  |  |
| | Max. stress | 385 MPa | 377 MPa |
| Ex. 2 | Hole arrangement using Matlab |  |  |
| | Max. stress | 429 MPa | 409 MPa |
| | FEM analysis using ANSYS |  |  |
| | Max. stress | 416 MPa | 383 MPa |

Table 3 에 각 예제의 홀배치 결과에 따른 최대 응력과 상용 유한요소프로그램 ANSYS 를 이용한 검증 결과를 나타내었다.

식 (3)을 이용한 커넥터홀 배치는 홀 중심간의 거리만을 고려하기 때문에 덮개판 중앙부의 홀 거리가 비교적 가깝게 배치되며, 큰 홀이 중앙부에 배치되는 것을 알 수 있다. 반면 본 연구에서 제시된 기법을 이용한 배치결과는 중앙부에 배치된 홀 사이의 거리가 비교적 멀며, 두 번째 예제에서는 작은 크기의 홀이 중앙에 배치되고 큰 홀은 가장자리에 배치된 것을 볼 수 있다. 각각의 최대응력 비교 결과 본 연구에서 제시한 홀배치 최적화기법이 더 좋은 결과를 보임을 알 수 있다. 또한 유한요소프로그램을 통한 최대응력 검증결과와 유사한 경향을 보이며, 오차 5% 내외로 신뢰할 만한 결과임을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서 수행한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 심해 압력용기 덮개판부의 커넥터홀을 고려한 구조안전성을 평가 기법을 개발하고 상용 유한요소해석프로그램과의 비교를 통해 개발된 방법의 신뢰성을 검증하였다.

(2) 충전실험계획법을 응용하여 홀부의 응력을 고려한 심해압력용기 덮개판 커넥터홀 최적배치 알고리즘을 개발하였다.

(3) 개발된 알고리즘을 이용하여 커넥터홀 배치 최적화를 수행하고, 기존 충전실험계획법과 비교하여 개발된 알고리즘의 우수성을 보였다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 지원으로 수행된 “심해저 광물자원 통합채광시스템 개발연구” 과제의 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Mckelvey, V.E., 1986, “Subsea Mineral Resources,” US Geological Survey bulletin No. 1689-A.
- (2) Hong, S., 1995, “A Study on the Technological Development for the Deep Seabed Mining and the Protection of the Deepsea Environment : A Study on Mining Technology of Deep Seabed Manganese Nodules,” *Annual Report, BSN350-1907D*, pp i-iii.
- (3) Choi, J.S., Yeu T.K., Kim H.W., Park S.J., Yoon S.M. and Hong S., 2010, “Performance Analysis of Deepsea Manganese Nodule Test Miner in Inshore Tests,” *Ocean and Polar Research*, Vol 32, pp. 463~473.
- (4) Yeu, T.K., Park, S.J., Yoon, S.M. Kim, H.W., Choi, J.S. and Hong S., 2011, “Conceptual Design of Electrical and Electronic System for Pilot Mining Robot,” *KSOE 2011 Autumn Conference*, pp. 30~33.
- (5) Newell, C. and Brown, G., 2005, “ Underwater Optical and Electrical Connector Systems, Technical Innovations,” *Proc. of 2005 Offshore Technology Conference*.
- (6) Joung, T.H., 2006, “A Study on the Design and Manufacture of a Deep-sea Unmanned Underwater Vehicle Based on Structural Reliability,” *Ph. D. Thesis*, Chungnam National University, pp. 13~26
- (7) Ugural, A.C., 1981, “Stresses in plates and shells,” *McGraw-Hill Book Company*, New York
- (8) Pilkey, W. D. and Pilkey, D. F., 2008, “Peterson's Stress Concentration Factors,” *John Wiley & Sons*, New York.
- (9) Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J. and Wynn, H.P., 1989, “Design and Analysis of Computer Experiments,” *Statistical Science*, Vol. 4, No. 4, pp.409~435.
- (10) Johnson, M. E. and Moore, L. M., Ylvisaker, D., 1990, “Minimax and maximin distance designs,” *J Stat Plan Inference*, 26(2), pp. 131~148.
- (11) Jung, J.J. and Lee, T.H., 2003, “Global Optimization Using Differential Evolution Algorithm,” *Trans. of KSME(A)*, Vol. 27, No. 11, pp.1809-1814.