

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.9.871>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

## 수중복합 환경시험장비의 개발에 관한 연구<sup>§</sup>

김종철<sup>\*\*</sup> · 이기천<sup>\*</sup> · 최병오<sup>\*</sup> · 정동수<sup>\*</sup> · 이충성<sup>\*</sup> · 전준완<sup>\*</sup> · 이재호<sup>\*</sup> · 황경하<sup>\*</sup>

\* 한국기계연구원 신뢰성평가센터

## Development of Test Equipment for Complex Underwater Environments

Jong Cheol Kim<sup>\*\*</sup>, Gi Chun Lee<sup>\*</sup>, Byung Oh Choi<sup>\*</sup>, Dong Soo Jung<sup>\*</sup>,  
Choong Sung Lee<sup>\*</sup>, Jun Wan Jeon<sup>\*</sup>, Jae Ho Lee<sup>\*</sup> and Kyung Ha Hwang<sup>\*</sup>

\* Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials,

(Received February 6, 2015 ; Revised June 24, 2015 ; Accepted July 16, 2015)

**Key Words:** Underwater Complex(수중복합), Environment Test Equipment(환경시험장비), Temperature(온도), Water Pressure(수압), Flow Velocity(유속), Deep-Sea(심해)

**초록:** 다양한 기계부품과 센서류가 포함된 수중로봇, 무인 잠수정 등과 같은 심해장비 시스템은 수심에 따른 높은 수압과 온도, 조류 등 심해의 복합적인 극한 환경조건의 영향을 받기 때문에 실제 현장에서 사용되기 전에 제품의 신뢰성을 검증하는 것이 매우 중요하다. 이러한 복합적인 해양환경을 재현하여 제품에 대한 실증적인 시험을 할 수 있는 시험장비의 구축이 요구되는 실정이다. 본 연구를 통하여 최대수압 2.0 MPa, 수온 5~60 ℃, 최대유속 2 m/s의 복합 환경조건의 구현이 가능한 워크인 타입의 수중복합 환경시험장비를 구성하는 주요 구성품의 개발 요구사항 및 설계방안을 제시하고 이를 통해 심해장비 시스템 및 모듈 부품에 대한 제품 신뢰도를 검증할 수 있는 시험장비의 개발 내용을 제시하고자 한다.

**Abstract:** Deep-sea equipment such as underwater robots and unmanned submersible vehicles, include various machine components and sensors, and it is important that their reliabilities be tested before use in the fields. This is necessary because they are affected by complex extreme-environment conditions, such as high pressures, extreme temperatures, and tidal forces that are present in the deep sea. We require test equipment that can conduct empirical tests in conditions that mimic these complex oceanic environments. In this study, we propose specifications that should be met, and a design plan for the primary components, which should limit their use to a maximum water pressure of 2.0 MPa, water temperature of 5~60℃, and a maximum flow velocity of 2 m/s. in work-in type underwater combined environment test equipment and. We present test system development procedures to verify the reliability of products and systems used in deep-sea environments.

- 기호설명 -

t : 최소두께(mm)  
P : 최고사용압력(MPa)  
 $D_i$  : 부식여유를 제외한 동체의 안지름(mm)

R : 접시형 경관 중앙부에서의 내면반지름(mm)  
W : 경관 형상에 관한 계수  
 $\sigma_a$  : 재료의 허용인장응력(N/mm<sup>2</sup>)  
 $\eta$  : 경관의 이음효율  
a : 부식여유(mm)  
W : 가열부 총 중량(kg)  
C : 비열(kcal/m<sup>3</sup>·h·℃)  
 $\Delta T$  : 온도차(℃)  
 $\eta$  : 효율(0.2~0.5)

§ 이 논문은 대한기계학회 2014년도 추계학술대회(2014. 11. 11.-14., 김대중컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, belliron@kimm.re.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 1. 서 론

최근 다양한 해양자원의 확보를 위해 해양 선진국들을 중심으로 광물개발, 생태계 및 지질 등의 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

이와 관련하여 심해자원 및 해양자원개발, 해양구조물 연구 등에 사용되는 해저탐사장비 및 수중장비들은 심해와 같은 극한환경에 노출되어 사용되고 있어 보다 높은 시스템 안정성이 요구되며 관련 제품 및 부품의 신뢰성이 더욱 중요하게 요구되고 있는 실정에서 복합환경 시험장비를 이용한 시험은 시간과 비용을 절약하고 제품의 개발기간을 단축할 수 있는 장점이 있다.<sup>(1)</sup>

이에 따라 복합적인 심해환경을 모사하여 제품에 대한 실증적인 시험을 할 수 있는 시험장비의 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 심해환경 조건을 인위적으로 모사하여 수중장비 관련제품 및 부품을 시험할 수 있는 수중복합 환경시험장비의 주요 사양에 기반하여 주요 구성품에 대한 설계와 FEM 해석 결과를 바탕으로 시스템의 유효성 검증을 통한 시스템의 구성 방안을 제시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 시험장비 주요사양

일반적으로 알려진 우리나라의 연근해 수심은 약 200 m로 이에 상응하는 수압은 약 2.0 MPa 이며 이에 상응하는 압력을 재현하여 시험할 수 있도록 운전 압력을 결정해야 한다.

시험에 필요한 운전압력을 기준으로 압력용기 및 기타 부속품의 선정에 필요한 설계압력은 최대 3.0 MPa 까지 견딜 수 있는 사양으로 결정하였다.

압력용기의 형태로는 압력용기의 내부에 사람이 들어가서 시험품의 확인, 장비의 유지보수가 가능할 수 있도록 수평형으로 전면에서 도어의 개폐가 가능한 워크인(Walk-In) 방식을 적용 하였으며, 수압 시험중 내부 시험품을 육안으로 확인할 수 있도록 내부 투시창을 압력용기 좌·우측에 각각 1 개씩 적용하였다.

압력용기의 내부에 수압을 발생시키는 수압 발생시스템은 최고 2.5 MPa 압력이 토출되는 사양의 펌프와 운전압력 2.0 MPa 이하의 압력 범위

에서 원하는 수압으로 시험이 가능할 수 있도록 가변속도 모터 타입의 펌프를 적용하여 원하는 운전압력의 발생이 가능하여야 한다.

그리고 심해의 수온조건을 모사하여 시험하기 위해 5~60 °C의 온도조건으로 시험이 가능할 수 있도록 수온의 조절을 하기 위한 가열용 전기히터 및 냉각장치의 설치가 요구되며, 심해에서 발생하는 환경조건 중 유속의 흐름을 모사하기 위하여 2 m/s 이하의 유속을 발생시킬 수 있는 유속 발생장치가 필요하다.

아래 Table 1에서 시험장비의 개발에 필요한 요구사항을 정리하였다.<sup>(2~4)</sup>

**Table 1** System requirements or underwater complex environmental test equipment

Division	Main components	Specifications
Pressure vessel	Horizontal vessel	2,000 mm(ID) 3,500 mm(L)  Operating pressure (2.0 MPa) Design pressure (3.0 MPa)
	Door	Walk-In Type Quick closure door
Pressure	Pressure generating device	Maximum operating pressure (2.5 MPa)
Temperature	Electric heater	High temperature (60 °C)
	Cooling system	Low temperature (5 °C)
Flow velocity	Propeller	Maximum flow velocity (2 m/s)

Table 2 Main components

1	Pressure vessel	5	Electric heater
2	Door	6	Fluid generator
3	Pump	7	Sub tank
4	Cooling unit	8	Air compressor

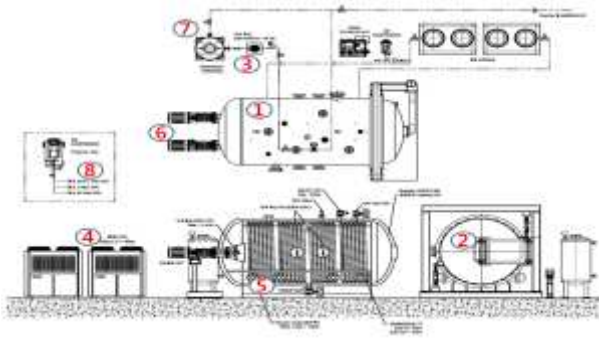


Fig. 1 System circuit diagram

## 2.2 시험장비 주요 구성품 및 다이어그램

압력용기에 채워지는 물은 일반 상수로서 용기 상부에 설치된 레벨센서에 의해 용기 내부 체적의 약 98% 정도까지 상수압으로 물이 채워지게 되면 레벨센서에 의해 자동으로 밸브를 닫게 하고 나머지 2%의 물은 가압펌프를 가동시켜 펌프에 연결된 보조탱크의 유량으로 압력용기 내부의 나머지 유량을 채우게 된다.

압력용기에 설치된 밸브를 닫은 상태에서 압력용기 내부에 남아있는 공기를 제거하고 순수하게 수압으로 시험하기 위하여 에어벤트를 설치하였으며, 시험중 설정압력 이상으로 압력이 상승하는 것을 방지하여 안전을 확보하기 위해 압력용기 상부에 안전밸브를 설치하였다.

또한, 가변모터가 연결된 가압펌프의 회전속도를 변화시켜 시험압력을 조절이 가능하도록 하였다. 시험장비의 회로는 Fig. 1과 같으며 Fig. 2는 시험장비를 구성하는 주요 구성품이다.

## 3. 주요구성품 사양 결정

### 3.1 압력용기 설계 및 해석결과

압력용기 및 압력용기 경관의 두께<sup>(5,6)</sup>는 각각 식 (1)과 식 (2)로부터 계산하였으며 내부 압력에 대한 FEM 해석을 Fig. 2와 같이 실시하였다.

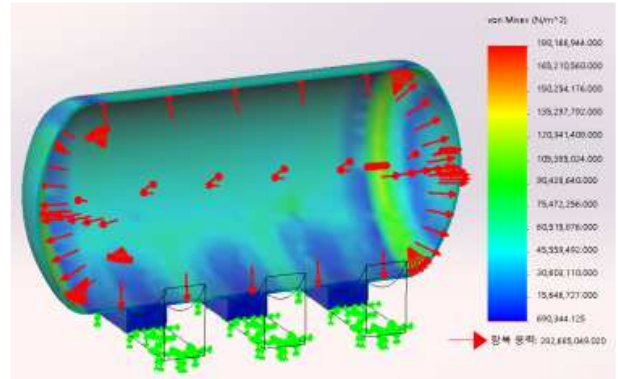


Fig. 2 Results of FEM analysis for pressure vessel

$$t = \frac{P \cdot D_i}{2 \cdot \sigma_a \cdot \eta - 1.2 \cdot P} + a, \quad (1)$$

$$t = \frac{3.0 \times 2000}{2 \times 103 \times 0.9 - 1.2 \times 3.0} + 3$$

$$= 36.01 \text{ mm}$$

$$t = \frac{P \cdot R \cdot W}{2 \cdot \sigma_a \cdot \eta - 0.2 \cdot 2P} + a, \quad (2)$$

$$t = \frac{3.0 \times 1000 \times 1.75}{2 \times 103 \times 0.9 - 0.2 \times 3.0} + 3$$

$$= 31.4 \text{ mm}$$

보일러, 압력용기용 탄소강 SB410 재료의 항복응력<sup>(2)</sup>은  $2.82e+008 \text{ N/m}^2$  이상으로써 안전율을 고려하여 설계압력 3.0 MPa 으로 해석하였다.

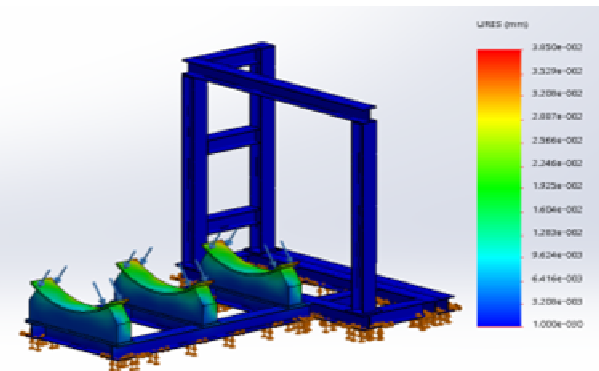
해석결과 최대응력은  $1.80e+008 \text{ N/m}^2$  으로써 압력용기에 적용한 재료의 항복응력보다 낮음을 확인하였으며, 설계된 압력용기의 두께가 충분한 강성이 확보되었음을 FEM 해석을 통해 검증하였다.

### 3.2 지지 구조물 설계 및 해석

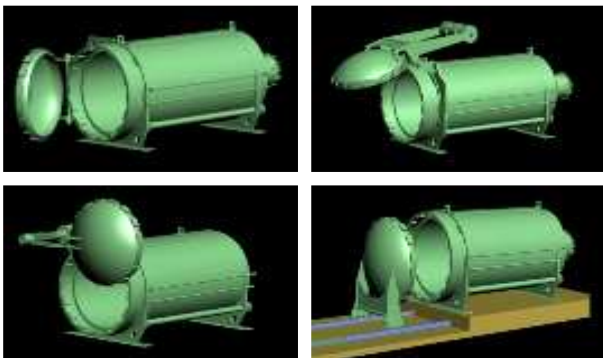
압력용기 및 압력용기 부속품, 내부에 채워지는 유체의 총 중량을 고려하여 시험장비의 구성품들이 안전하게 지지될 수 있도록 하부의 지지구조물이 설계 되어야 한다. Table 3과 같이 시험장비의 구성품 및 내부 유체를 포함한 총 중량 29.3 ton이 하부 프레임에 가해지며 FEM 해석한 결과 Fig. 3과 같이 하중에 대하여 충분한 강성을 가지고 지지할 수 있음을 검증하였다.

**Table 3** Weight of loaded components transferred to supporting structure

No	Components	Weight(ton)
1	Pressure vessel and door	15.3
2	Valves, pipe, ect.	1
3	Pressure vessel inside fluid	13
Total		29.3



**Fig. 3** Results of FEM analysis for load supporting structure



**Fig. 4** Quick closure type door for pressure vessel

3.3 급속개폐 도어 사양 결정

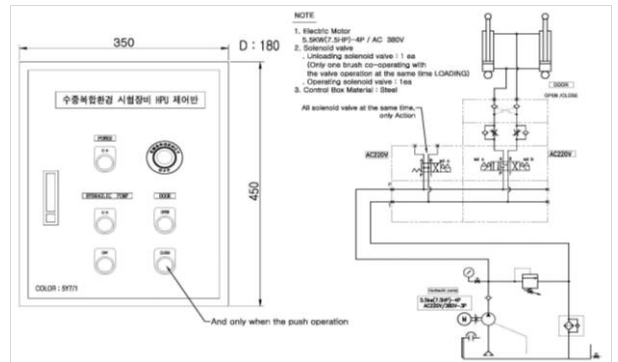
시험장비에 적용한 도어의 형태로는 Fig. 4와 같이 수평식 압력용기에 일반적으로 많이 적용되는 급속 개폐 도어(Quick closure door)<sup>4)</sup>를 적용하였다.

본 시험장비에서 적용한 급속개폐 도어의 형태는 수평형 타입으로 도어의 잇수는 총 26 개로 결정하였다.

뚜껑판, 클램프 링 등의 도어부의 부품 제작의 용이성을 위하여 뚜껑판과 클램프 링 사이에 테이퍼 형태의 썸을 적용하여 회전하면서 서로



**Fig. 5** Configuration of quick closure door



**Fig. 6** Diagram of the hydraulic clutch door

맞닿아 닫히는 형태로써 도어의 기밀에 필요한 O-Ring의 압착력을 높일 수 있도록 설계하였다.

급속 개폐 도어의 기밀을 위해 설치되는 오링의 재질은 경도 80의 바이톤 재질을 선정하였으며 도어의 개방시에 인가되는 하중을 지지하기 위하여 도어 서포트 힌지에는 테이퍼 롤러 베어링을 적용하여 정하중과 동하중을 충분히 견딜 수 있도록 설계하였다.

또한, 급속개폐 도어에 설치되는 클램프 링의 원활한 회전을 위하여 좌·우에 각각 1 개씩 총 2 개의 유압 실린더를 설치하여 유압 실린더의 작동으로 도어의 클램프 링이 회전하여 도어가 전면부로 개방될 수 있도록 설계하였다.

Fig. 5 및 Fig. 6는 급속 개폐 도어의 외형 및 유압 회로이다.

3.4 수압발생 장치

압력용기 내에 채워 시험에 사용하는 물은 상수로서 직접 압력용기에 연결하여 압력용기

체적의 약 98% 까지 물을 채우고 500 Liter용량의 보조탱크에서 수압을 발생시키는 가압펌프로 흡입하여 토출하는 회로의 형태로 구성하였으며, 수압 발생장치의 토출유량은 수압을 발생시키는 데 중요하지 않다.

수압발생 장치의 펌프 흡입 및 토출측의 배관 사이즈는 1 인치를 적용하였으며 최대 2.5 MPa의 압력을 토출할 수 있으면서 펌프와 연결된 모터의 회전속도로 시험압력을 조절할 수 있는 가변속도형 입형펌프를 선정하여 적용하였다.

또한, 펌프 토출측에 체크밸브를 설치하여 펌프에서 토출되는 압력이 펌프로 역류하지 않도록 하였다.

### 3.5 가열 장치

가열장치는 심해의 수온조건을 모사하기 위해 인위적으로 내부의 유체에 원하는 온도조건으로 시험하기 위해 필요한 장치로서 온도조절이 용이할 수 있도록 투입형 전기히터를 적용하였다.

히터용량(kW) =

$$\frac{W \times C \times (T_2 - T_1)}{860 \times h(\text{Hour}) \times \eta} \quad (3)$$

$$= \frac{12,000 \times 1 \times (60 - 15)}{860 \times 1 \times 0.5} \approx 1,255 \text{ kW}$$

식 (3)과 같이 12,000 kg의 압력용기 내부 상수를 1 시간 내에 60 °C 까지 상승 시키는데 약 1,255 kW의 히터용량이 필요한 것으로 계산 되었으나 내부 상수의 온도를 10 시간 동안 가열하는 용량으로 압력용기 및 기타 부속품 등 구성품의 열손실을 고려하여 160 kW의 전기히터 용량을 결정하여 적용하였다.



Fig. 7 Circulation of refrigerant piping

압력용기 내부에 상수를 채워서 시험해야 하는 시험장비의 특성상 전기 히터의 유지, 보수 및 온도의 균일한 상승을 위하여 1 대당 40 kW의 용량을 가진 4 대의 전기히터를 압력용기 좌·우에 각각 2 대씩 배치하여 시험장비에 적용하였다.

### 3.6 냉각 장치

일반적으로 상수도의 수온은 연평균 약 15 °C 정도인데 시험장비에서 요구되는 저온시험에 필요한 수온은 5 °C로서 10 °C 이상의 온도를 하강시킬 수 있는 냉각장치의 용량선정이 필요하다.

식 (4), 식 (5)에서 냉각장치의 용량을 계산하여 시험장비에 적용하였으며, 시험중 원하는 시험 온도를 일정하게 유지시키고 균일한 온도조건을 구현하기 위해 냉매순환 파이프를 각각 2 개 라인으로 압력용기 내부에 설치하여 내부 유체의 온도가 보다 균일하게 제어될 수 있도록 구성하였다.

냉각용량

$$Q = \{m(\text{kg}) \times C (\text{kcal/kg}^\circ\text{C}) \times \Delta T\} / h (\text{hour}) \quad (4)$$

내부유체 냉각에 필요한 냉각용량

$$Q_1 = 12,000 \times 1 \times (15-5) / 1 = 120,000 \text{ kcal/h}$$

압력용기의 냉각에 필요한 냉각용량

$$Q_2 = 15,300 \times 1 \times (15-5) / 1 = 168,300 \text{ kcal/h}$$

냉각장치에 필요한 총 냉각용량

$$Q_t = Q_1 + Q_2 \quad (5)$$

$$Q_t = 120,000 + 168,300 = 288,300 \text{ kcal/h}$$

압력용기에 채워지는 상수의 온도를 1 시간 내에 5 °C 까지 내리기 위해 필요한 냉각장치의 냉각용량은 식 (4), 식 (5)로부터 288,300 kcal/h 으로 계산되었다.

내부의 유체의 온도를 낮추는데 필요한 냉각시간을 10 시간 기준으로 하여 압력용기, 배관 기타 부속품등 구성품의 냉각 여유를 고려하여 1 대당 15,000 kcal/h의 냉각용량을 가진 냉각장치 2 대를 적용하였다.

### 3.7 유속 발생장치

물의 흐름으로 인하여 심해 환경조건에서 발생되어 제품에 미치는 영향을 시험장비에서 재현하



Fig. 8 Flow generator system



Fig. 9 Data acquisition program



Fig. 10 Layout of test equipment

여 시험하기 위해 전기모터를 구동하여 프로펠러를 회전시켜서 유속을 발생시키는 방식을 Fig. 8과 같이 고안하였다.

전기모터에 연결된 샤프트를 통해 압력용기 내부에 장착된 프로펠러 2대를 회전시켜 압력용기 내부에 유속을 발생시키는 형태로 유속 발생장치를 구성하는 전기모터는 가변속도형 전기모터이며, 전기모터의 회전속도를 변화시켜 시험자가 원하는 유속을 제어하여 압력용기 내부에서 발생

되는 유속을 변화시킬 수 있도록 설계하였다.

### 3.8 데이터 취득 프로그램

시험중 계측하게 되는 시험압력 및 시험온도등 각종 데이터를 실시간으로 모니터링하고 저장할 수 있도록 Labview 프로그램을 사용하여 Fig. 9와 같이 프로그래밍 하였다.

### 3.9 시험장비 구성

시험장비의 주요 구성품에 대하여 개발 요구사항 검토 및 선정, 설계 및 FEM 해석을 통한 유효성 검증 및 용량 선정의 과정을 거쳐 최종적으로 압력용기, 급속개폐 도어, 수압 발생장치, 가열 장치, 냉각 장치, 제어반 및 기동반, 기타 유틸리티 등으로 구성된 시험장비를 개발하였으며 장비의 외형은 Fig. 10과 같다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 심해 해양 환경에서 발생하는 수압 및 수온, 유속의 환경조건을 복합적으로 수중환경을 모사하여 시험할 수 있는 시험장비의 주요 구성품에 대한 개발 요구사항과 이를 만족하는 시험장비를 개발하였다.

본 연구를 통하여 개발된 시험장비를 활용하여 수중로봇 주행구동용 서보모터 및 수산양식용 EPP 부자에 대한 수압 시험을 수행하였다.

앞으로 시스템의 지속적인 안정화 작업을 통하여 수중로봇, 무인 잠수정 등과 같은 심해장비 시스템 및 수중 모터류, 수중 센서류, 스쿠버장비 등 수중환경에서 사용되는 다양한 제품의 시험조건에 만족할 수 있도록 보완해 나갈 예정이다.

또한, 시험장비의 실제 운용을 통해 취득한 시험절차 및 결과를 활용하여 향후 복합적인 수중 환경조건에서의 시험이 필요한 제품에 대한 신뢰성을 검증할 수 있는 시험법을 개발할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 “부품소재 신뢰성기반구축사업 기계류 부품분야 (MO3130)”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Lee, S. G., Choi, H. J., Oh, S. W. and Lee, S.

- H., 2012, "A Case Study on the Hydrostatic Test Using Hyperbaric Chamber," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, pp. 1563~1564.
- (2) KS B 0076:2004, Glossary of Terms Used in Construction of Pressure Vessels.
- (3) KS B 6750:2012, Pressure vessels-General Requirement for Design and Construction.
- (4) KS B 6731:1995, Quick Closure for Pressure Vessels.
- (5) Harvey, J.F., 1985, Theory and Design of Pressure Vessels.
- (6) Moss, D. R., 2004, Pressure Vessel Design Manual, Elsevier.