

심해 무인 잠수정 프레임의 설계 및 구조해석에 관한 연구

정태환* · 노인식** · 천일용* · 이종무**

*충남대학교 선박해양공학과 대학원

**충남대학교 선박해양공학과 교수

***한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양개발부

A Study on the Design and Structural Analysis of the Unmanned Underwater Vehicle

TAE-HWAN JOUNG*, IN-SIK NHO**, IL-YONG CHUN* AND JONG-MOO LEE***

*Graduate School, Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

**Professor, Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

***Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: ROV 심해용 무인잠수정, Launcher 수중진수장치, FEA 유한요소해석, Optimal design 최적설계

ABSTRACT: This paper presents the results of the structural analysis and optimal design of frames of the UUV(Unmanned Underwater vehicle) to be operated at 6000m depth in the ocean. The structure of the UUV system can be classified into two structure, Launcher and ROV. Frame of the launcher will be made by Galvanized Steel which has high strength and corrosion-resistant but this material has high specific gravity for the object to be weight in the water. Similarly, ROV will be made by Al6061-T6, and frame of the ROV will be fix many instruments and syntactic buoyancy materials. Before fabrication of the frame, we performed sensitivity analysis - change in weight due to $\pm 1\%$ change in design variables, for easy choice by change of dimension of the frame.

1. 서 론

인간이 탐승하지 않고서도 심해의 경이로운 세계를 탐험할 수 있다는 것은 환상적인 일이다. 그러나 심해에는 빛이 도달하지 않으며, 높은 압력이 작용하므로 심해에 도달하기 위해서는 극한환경을 견딜 수 있어야 한다. 특히 자원탐사, 생물 관찰 및 해저지형 탐사 등의 과학적 목적을 위해 과학자들의 많은 연구가 이루어져 왔으며, 이미 해양 선진국인 미국, 일본, 유럽을 중심으로 심해의 극한환경을 조사하기 위한 심해용 무인잠수정이 개발되어 사용되고 있다.

심해용 무인잠수정은 사용목적과 운용방법에 따라 케이블에 의해 원격으로 작동이 되어지는 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 케이블이 없이 자율운항이 가능한 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)로 대별될 수 있는데, 해양강국으로 도약하기 위한 초석으로서 국내에서도 ROV의 개발이 진행 중에 있는데, 개발 중인 차세대 무인잠수정(UUV; Unmanned Underwater Vehicle)은 Fig. 1과 같이 선상의 모선으로부터 ROV에 미치는 조류의 영향을 최소화할 수 있도록 1차 케이블(Umbilical cable)이 수중진수장치(Launcher)에 연결되고, 수중진수장치와 ROV가 2차 케이블(Tether cable)에 의해 연결되는 구조로 되어 있다.

본 연구의 목적은 개발 중인 심해용 무인잠수정의 기본 골격을 이루며, 각종 장비를 장착하고 보호하는 수중진수장치와

ROV의 프레임 구조를 안전하게 설계하여 무인 잠수정의 시스템이 안전하게 운용할 수 있는 기초를 마련하는데 있다. 이를 위하여 구조해석을 통해 설계의 초안을 마련하고, 발생하는 응력을 감소시키면서 중량을 줄일 수 있도록 최적화하였다. 최적화된 프레임의 단면은 치수가 변화함에 따라 달라진 구조물의 응답(중량 및 변위)을 알 수 있도록 민감도를 제시하였고, 실제 생산현장에서의 설계 및 제작 상의 문제점이 없는지 검토하여 실제 생산에 초점을 맞추어 구조적 안전성을 다시 점검함으로써, 전체 시스템의 뼈대를 이루는 주요 내력 구조인 프레임의 설계가 실용적으로 쓰일 수 있도록 하였다.

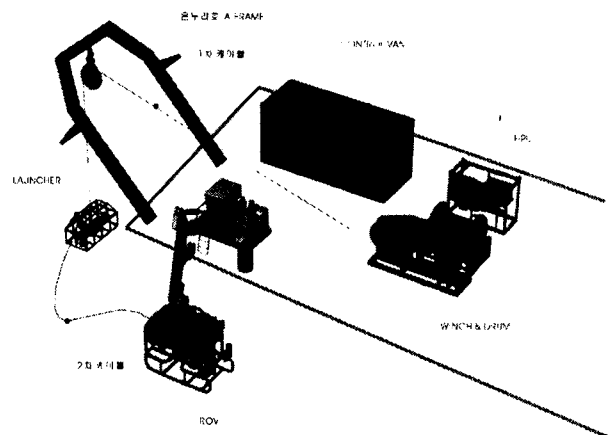


Fig. 1 Operation concept of the ROV

제1저자 정태환 연락처: 대전광역시 유성구 궁동 충남대학교

042-821-7766 s_joung@cnu.ac.kr

또한 산출된 각 부재별 민감도는 프레임의 제작에 앞서 각종 기계 및 전자장비의 선정 및 배치 변경에 따른 프레임 구조의 단면 치수 변경을 용이하게 하여 적절한 프레임을 쉽게 선택할 수 있도록 하였다.

2. 수중진수장치(Launcher)의 구조설계 및 해석

수중진수장치(Launcher)는 Fig. 1에 보는 바와 같이 선미부의 A-Frame에 의해 진수되며, 수중에서는 ROV의 수중기지로서 지원모선으로부터 ROV에 전달되는 조류의 영향을 최소화하기 위한 작업 시스템의 중심추 역할을 수행하여야 한다. ROV는 각종 장비들이 장착되어지고 수중에서 작업성이 편리하기 위해 중성의 부력이 요구되므로 내부식성이 좋으면서 가벼운 재질인 Al6061-T6계열의 것이 요구되나, 수중진수장치의 제작에 사용될 재질은 내부식성, 용접성이 우수하여 항복강도가 높은 반면 수중에서의 무게 중심추 역할을 위한 적절한 비중량을 가지는 갈바나이зд 강(Galvanized Steel)을 사용하였는데, 이에 대한 기계적 물성치를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of UUV frame

Material Properties	Density [kg/m ³]	Young's Modulus [MPa]	Poission's ratio	Yeild strength [MPa]	Tensile strength [MPa]
Galvanized Steel	7,850	210,000	0.29	250	350
Al6061-T6	2,700	70,000	0.33	270	310

수중진수장치에 작용되는 하중은 바다에 진수 중이나 이동 중 크레인에 장착되었을 때와 수중에서 작업 시 급작스런 상황에 따른 회수 시 케이블에 의해 전달되는 동적하중(Sanpping)이 작용할 수 있는데, 본 연구에서는 공기 중에 부양되었을 때의 하중을 기준으로 하여 동하중이나 충격하중에 의한 하중상태를 고려하여 안정성 평가를 하였다.

2.1 수중진수장치(Launcher) 프레임의 구조해석

구조해석을 위한 각종 전자장비 및 기계장치가 장착되어 있는 수중진수장치(Launcher)의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 사용된 프레임의 단면은 총 4가지 종류로 단순화하였으며, 구조해석용 상용유한요소코드인 ANSYS에 의한 모델링은 Fig. 3과 같다. 구조해석에 사용된 요소는 프레임의 실제 거동을 가장 유사하게 표현할 수 있는 3차원 그래픽 보요소가 사용되었다. 경계조건은 공기 중에 부양될 경우를 고려하기 위해 부양고리부에 부여하였는데, 응력이 집중되는 것을 피하기 위해 단순지지(UX, UY, UZ 고정)하여 실제 물리적 거동과 유사하도록 모델링하였는데, 프레임 전체가 강체운동을 막기 위해 선수부의 2절점에 대하여 UX, UZ을 고정하였으며, 하중조건으로 각종 장비의 중량을 적절한 위치에 부여하여 반력을 제거하였다. 작용된 하중은 총

4,356N으로서 추진기, 전자/제어 장비부, 항법장비 등이며, 프레임의 자중(약 300Kg)을 고려하기 위해 갈바나이зд 강의 밀도(ρ)와 중력가속도(g)를 부여하였다.

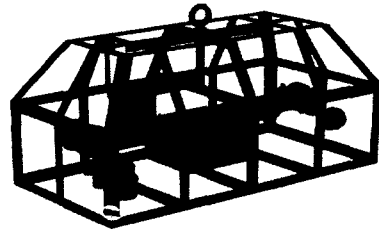


Fig. 2 Concept design of the Launcher

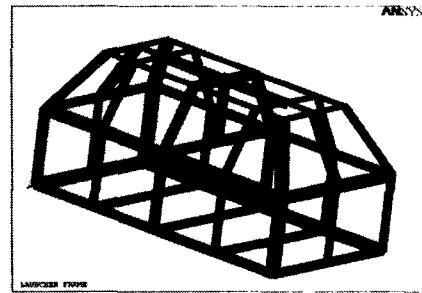


Fig. 3 Finite Model of the Launcher

구조 설계의 기준으로는 수중진수장치의 제작에 사용될 프레임 재료인 갈바나이зд 강의 항복응력인 250MPa을 취하였고, 재료 파손의 기준으로는 재료의 임의 요소에서 최대 변형을 에너지의 크기가 일정한 값에 도달 때 항복이 발생하는 즉, 유효응력이 항복강도에 도달하였을 때 재료가 항복에 의해 파손된다는 Von-Mises이론을 이용한 식 (1)과 같은 등가응력을 사용하였다.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1)$$

정적하중에 의한 구조해석을 수행한 후, 이를 기초로 충격하중, 용접에 의한 강도저하 및 예상치 않은 충돌 등에 의한 하중을 고려한 안전계수를 고려하여 안전여부를 판단하게 되는데, 본 연구에서는 시스템의 안전을 위해 최저 8이상이 필요하다고 판단하였다(노인식 등, 2004).

초기 설계 된 단면의 치수에 대한 해석결과는 Fig. 4, Fig. 5와 같다. 최대변위는 약 0.58mm로서 미미하며 프레임의 가장 하단부의 중앙 프레임에서 발생하고, 최대응력은 약 14.7MPa로서 동일한 위치이다. 전자 및 제어 장비부의 내압용기, 컨트롤러 박스 등의 하중이 하단부에 집중되어 있기 때문으로 사료되는데, 안전계수는 8이상으로서 동하중 및 충격하중, 용접성에 대한 강도저하 등을 고려하더라도 재료의 항복강도에 대해 충분히 안전

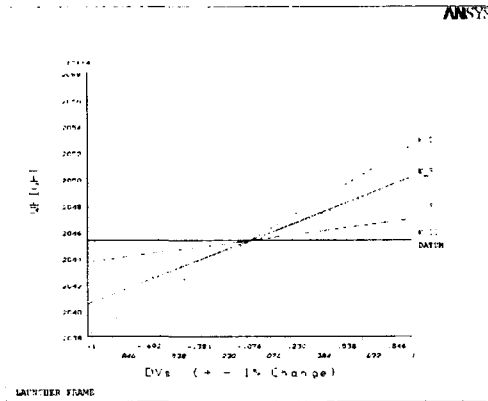


Fig. 6 Change in weight due to $\pm 1\%$ change in variable (Launcher)

3. ROV 프레임의 구조설계 및 해석

심해 무인잠수정 시스템에서 심해에서 작업을 수행하는 핵심적인 역할을 수행하는 ROV는 수중진수장치와 마찬가지로 각종 전자 장비 및 기계 장치를 설치하고, ROV의 형태를 유지할 수 있게 하는 구조부재(프레임)의 사용이 필수적이다.

ROV는 수중진수장치와 달리 수중에서 작업을 수행하여야 하는데, 작업성을 용이하게 하기 위해서는 중성의 부력이 요구된다. 따라서 Al합금과 같이 내부식성이 좋으며 강도 또한 우수한 경량의 재질이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 압출부재로서 단면의 선택이 비교적 자유로운 Al6061-T6를 선택하였으며, 기계적 물성치는 Table 1에 나타내었다.

ROV의 구조설계는 수중진수장치와 마찬가지로 공기 중에 부양되었을 때 작용되는 정적하중에 대한 구조해석의 응답(변위 및 응력)을 기초로 하여, 용접에 의한 응력감소, 예상치 못한 충격하중 등을 고려하기 위한 안전계수를 고려하여 구조시스템의 안전성을 검토하였다.

3.1 ROV 프레임의 구조해석

심해에서 작업을 수행하게 될 ROV의 형상은 Fig. 7과 같은데, 카메라, 유압장치, 항법 및 통신장비 등이 장착되어 있으며, 하단 부에는 심해저에 착륙 시, 모래나 진흙 등이 장비에 미치는 영향을 최소화하기 위한 받침대(Toolsled)가 장착되어있다. ROV는 받침대를 제외한 프레임만으로도 충분한 안전성을 가져야 한다.

ROV는 모선의 선측에서 수중진수장치와 분리하여 진수하게 되는데, 경계조건은 진수 시 발생하는 응력을 계산하기 위해 부양 고리부에 단순지지조건(UX, UY, UZ고정)을 부여하였다. 하중조건으로는 ROV에 장착되는 각종 기계 및 전자 장비와 부력체의 중량 및 프레임 자체 무게를 부여하였는데 예상되는 중량은 약 2.7ton으로서 Table 3에 나타내었다.

구조설계의 기준으로서 사용될 알루미늄 합금(Al6061-T6)의 항복응력 270MPa로, 재료의 파단 기준은 von-Mises 등가응력을 취하였다.

구조해석 결과, Fig. 8에 보는 바와 같이 최대 변위는 약 4.6mm로 선수부에 발생하는데, 선수부에 장착되는 로봇팔(매니플레이터)때문인 것으로 사료된다. 또한 ROV 프레임의 최대응력은 Fig. 9에 보는 바와 같이 약 66MPa로서 부양고리 연결부에 발생하며, 설계 기준인 알루미늄 항복응력 270MPa에 대하여 안전계수가 4로서 앞서 정한 용접성으로 인한 강도저하, 충격에 의한 동하중 등을 고려한 안전계수 8에는 못 미치고 있다. 따라서 최적설계로 안전계수를 8이상으로 높이며, 중량을 줄이는 시도를 하였다.

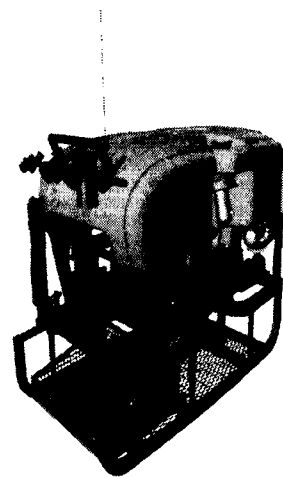


Fig. 7 Concept design of the ROV

Table 3 Weight and evaluated Ballast of the ROV

Item	Weight (in air, kg)	Weight (in s/w, kg)
1. Structure(Frame)	334.40	159.01
2. Payload	200.00	200.00
3. Propulsion	232.50	150.00
4. Hydraulics	216.30	159.90
5. Electrical & Control	527.60	79.23
6. Navigation & Instrumentation	172.00	112.56
7. Auxiliary Equipment	146.10	105.17
* Weight w/o Buoyant	1,828.90	965.87
* Foam	919.90	-965.87
Total Weight(kg)	2,748.80	0.00

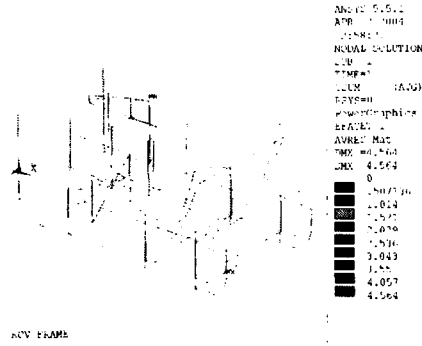


Fig. 8 Displacement of the ROV(Initial design)

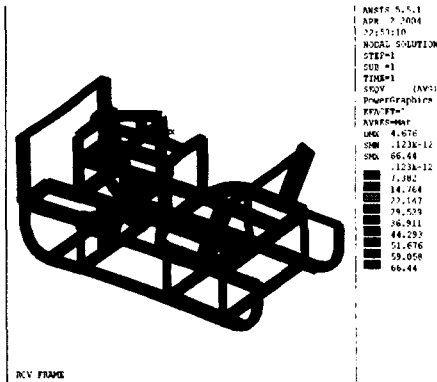


Fig. 9 Stress result of the ROV(Initial design)

3.2 ROV 프레임의 최적설계 및 민감도 해석

총 7개의 단면 부재가 사용된 ROV의 단면 최적화를 위하여 수중진수장치와 마찬가지로 사용된 부재의 두께 및 높이, 폭을 설계변수로 하고, 변위를 제한함수, 중량의 최소화를 목적함수로 취하였다. 또한 프레임의 단면 최적화를 위한 최적설계는 상용구조해석코드인 ANSYS에서 제공하는 Sub-program method와 First-order method를 사용하여 수행하였는데 수행된 결과를 Table 4에 나타내었다. 앞 절에서 수행된 수중진수장치와 마찬가지로 SET 1은 초기 설계안에 대한 구조해석이며, SET 2는 최적화한 결과를 나타내고, SET 3은 SET 2를 정수화한 것이다. 또한 변위와 무게에 대한 민감도 값을 좌측칸에 정리하였으며, 이 값을 Fig. 10에 각 설계 변수의 $\pm 1\%$ 변화 시 무게의 변화량으로 나타내었다.

최적설계의 결과 인 SET 2을 생산현장에서 가공 및 선택이 편리하도록 정수화한 SET3에 의한 프레임의 최대응력은 약 61MPa로서 초기설계안 보다 약 5MPa이 낮아졌고, 중량은 245Kg으로서 86Kg이 감소하였다. 설계기준인 Al6061-T6의 항복응력에 대하여 안전계수가 약 4.5로서 앞서 제시한 안전계수 8에는 미치지 못하지만, Fig. 11에서 보는 바와 같이 부양 고리부를 제외한 전체적인 응력분포는 27MPa이하로 안전계수가 8이상으로 안전함을 알 수 있다. 따라서 전체적인 안전계수를 높이기 위해서는 부양고리부의 보강이 필요한 것으로 사료된다.

Table 2 Comparison of initial design, optimum design and redesign (ROV)

D.V.	민감도 (변위)	민감도 (무게)	SET1	SET2	SET3
T1	0.1355	0.4224e7	7.00	4.00	4.00
T2	0.0591	0.1638e7	7.00	6.41	6.00
T3	0.2578	0.5542e7	9.00	6.00	6.00
T4	0.2212	0.1793e7	7.00	7.85	8.00
W1	0.0278	0.3079e6	80.00	62.90	63.00
W2	0.0065	0.9405e5	80.00	86.15	86.00
W3	0.0224	0.1776e6	80.00	83.69	84.00
W4	0.0211	0.9405e5	40.00	51.18	51.00
W5	0.0272	0.1776e6	120.00	127.61	128.00
Displacement [mm]			-4.56	-5.04	-5.06
von-Mises stress [MPa]			66.44	62.44	61.31
Weight [kg]			331.56	245.32	244.59

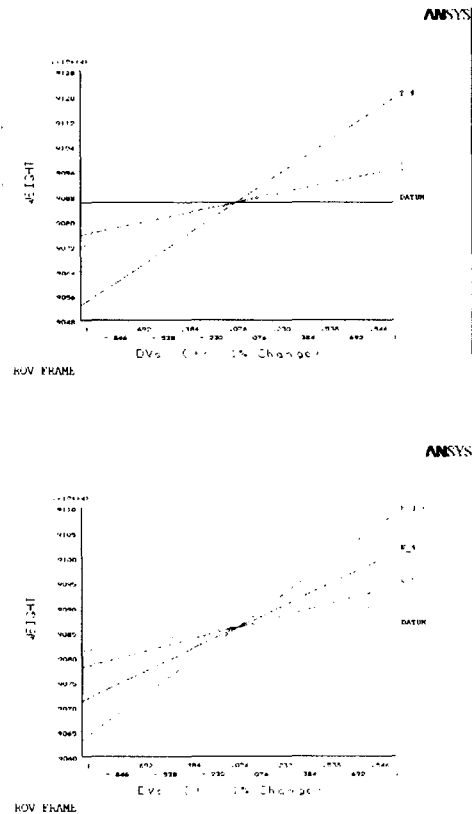


Fig. 10 Change in weight due to $\pm 1\%$ change in variable (ROV)

후 기

본 연구는 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 2004년도 "차세대 심해용 무인잠수정 개발 과제"의 위탁 연구 결과의 일부분이며, 연구에 도움을 주신 관계자 여러분에게 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- 노인식, 정태환, 천일용 (2004). 심해 무인잠수정의 내압장치 구조해석, 한국해양연구원 보고서.
- 이재환, 허유정, 정태환, 이종무 (2002). "심해용 무인잠수정 프레임 구조설계", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp 302-306.
- American Bureau of Shipping (1990). "Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities", pp 5-1 - 6-22.
- Ashok K. Belegun, Tirupathi R. Chandrupatla (1999), Optimization Concepts and Applications in Engineering.
- (주)태성에스엔이 (2002). "ANSYS Training Manual Design Optimization"
- 이재환 외 (1995). "차체구조 설계 민감도해석 연구", 충남대학교 연구보고서.
- 이재환 외 (1995). "민감도 해석을 이용한 중장비 구조물 최적화 기법의 연구 및 적용", 충남대학교 연구보고서.

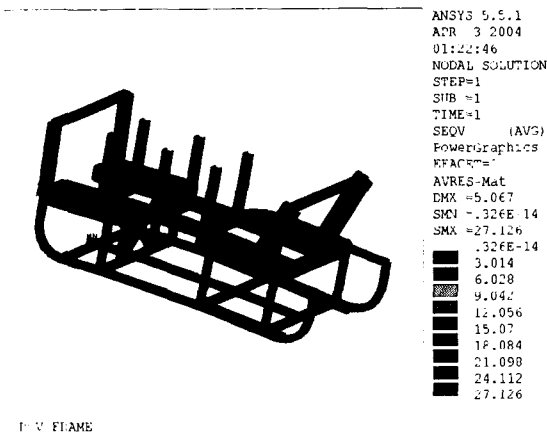


Fig. 11 Stress result of the ROV (Optimum design)

4. 결 론

본 연구에서는 6,000m급 차세대 심해용 무인잠수정의 기본 골격을 이루는 수중진수장치 및 ROV의 프레임에 대한 구조해석을 수행하여 구조적 안전성을 검토하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수중진수장치에 사용될 프레임의 경우, 단면의 최적화 과정을 통해 기준 안전계수(8)를 만족시키는 제한함수의 범위에서 중량을 약 116kg(42%) 줄였다.

2. 최적화 된 ROV 프레임의 최대응력은 약 61MPa로서 초기 설계안 보다 7.5%인 약 5MPa이 낮아졌고, 중량은 245Kg으로서 약 26%인 86Kg이 감소하였다. 설계의 기준인 알루미늄 합금 (Al6061-T6)의 항복응력에 대하여 안전계수는 약 4.5로서 설계기준 안전계수(8)에는 미치지 못하지만, 부양고리부를 제외한 응력 분포는 27MPa(안전계수 10이상)이하이므로 부양고리부의 보강이 이루어진다면 전체 시스템은 안전할 것으로 사료된다.

3. ROV의 선수부에 장착될 로봇팔의 하중으로 인해 집중 응력이 발생할 것으로 예상되는 연결부에 필요한 판의 두께는 최소 26mm이상이다.

4. 각 프레임의 단면의 치수 변화량에 대한 구조해석의 응답(변위)와 중량의 민감도 값을 산출하여 설계의 변경 시 예측이 가능한 지침을 제공하였다.

이러한 설계의 개념은 심해용 무인잠수정 뿐 만 아니라 외부의 하중을 견디는 프레임의 단면 설계에 있어서 전체 시스템이 안전하게 작동하도록 설계됨과 동시에 실제 제작에서 생산자가 쉽게 선택하여 가공하기 쉽도록 하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.