

# 다관절 복합이동 해저로봇을 위한 탄소섬유 복합소재 프레임의 구조 해석

유승열\* · 진봉환\* · 심형원\* · 이판묵\*

\*한국해양과학기술원 해양시스템연구부

## Finite Element Analysis of Carbon Fiber Reinforced Plastic Frame for Multi-legged Subsea Robot

Seong-Yeol Yoo\*, Bong-Huan Jun\*, Hyungwon Shim\* and Pan-Mook Lee\*

\*Ocean System Engineering Research Division, KIOST, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Crabster200 크랩스터200, Subsea robot 해저로봇, Carbon fiber reinforced Plastic 탄소섬유 강화 플라스틱, Rib cage structure frame 늑골 구조 프레임, finite element analysis 유한요소해석

**ABSTRACT:** This paper describes a finite element analysis (FEA) of the body frame of a subsea robot, Crabster200 (CR200). CR200 has six legs for mobility instead of screw type propellers, which distinguishes it from previous underwater robots such as remotely operated vehicles (ROVs) and autonomous underwater vehicles (AUVs). Another distinguishing characteristic is the body frame, which is made of carbon fiber reinforced plastic (CFRP). This body frame is designed as a rib cage structure in order to disperse the applied external loads and reduce the weight. The frame should be strong enough to support many devices for exploration and operation underwater. For a reasonable FEA, we carried out specimen tests. Using the obtained material properties, we performed a modal analysis and FEA for CR200 with a ready posture. Finally, this paper presents the FEA results for the CFRP body frame and the compares the characteristics of CFRP with conventional material, aluminum.

### 1. 서 론

최근 수중작업과 해양탐사의 목적으로 원격무인잠수정(Remotely operated vehicle, ROV)와 자율무인잠수정(Autonomous underwater vehicle, AUV) 같은 수중로봇에 대한 수요가 증가하고 있다. 대부분의 ROV와 AUV는 수중에서 이동하거나 호버링(Hovering) 하기 위하여 스크류 형태의 구동기를 사용한다(Shim, et. al., 2010; Wernli, et. al., 1984; Lee, et. al., 2011; Loebis, et. al., 2004). 그러나 이러한 형태의 수중로봇들은 강한 조류가 있는 수중환경에서는 정확한 위치제어가 어려워 해저면에서 정밀한 작업을 수행하는데 어려움을 가진다. 예를 들어, 우리나라 서해의 경우, 강한 조류와 악시계 등 환경적으로 악조건을 가지는데, 이러한 환경에서 수중작업을 수행하기 위해서는 기존의 형태와는 다른 종류의 수중로봇이 필요하다. 이러한 이유로 한국해양과학기술원에서는 수심 200미터급 천해용 다족 수중로봇, 크랩스터 200(Crabster 200, CR200)을 개발하고 있다(Jun, et. al., 2011a; Jun, et. al, 2011b; Shim, et. al., 2013).

크랩스터 200과 같은 다족 보행 로봇은 여러 개의 다리를 가지기 때문에 스크류 형태의 구동기를 사용하는 일반적인 ROV나

AUV에 비해 우리나라 서해의 강한 조류와 같은 악조건을 극복하기에 더 유리하다. 강한 조류가 흐르는 지역에서 다족 보행 로봇은 Fig. 1(c)와 같이 해저면에 밀착하고 로봇의 자세를 앞으로 숙여 접지력을 높여 조류를 극복할 수 있다. 그 동안 여러 가지 형태의 다족 로봇에 대한 연구가 수행되었다. Takahashi 등은 1993년 해저탐사 목적의 6족 보행 수중로봇을 DC (Direct current) 서보모터와 기어를 이용하여 개발하였다(Takahashi, et. al., 1993). Schmucker 등은 Katharina라는 6각형의 몸체와 매니폴레이터를 가진 전체 무게 약 25kg의 6족 보행 로봇을 개발하였다(Schmucker and Inme, 1996). Weidemann 등 또한 DC 모터에 의해 구동되는 약 23kg정도의 6족 보행 로봇을 개발하였다(Weidemann, et. al., 1994).

크랩스터 200은 해양탐사를 위한 장비를 장착하고 공간을 확보하기 위해 큰 내부공간을 필요로 하고, 이로 인해 소형차 정도의 크기와 약 650kg의 무게를 가진다. 이는 기존의 다족 로봇들과는 큰 차이이며, 이러한 특징 때문에 크랩스터의 몸체는 구조적 강도를 확보하면서 더 이상의 중량 증가를 방지하기 위해 가벼운 소재여야 한다. 이러한 이유로 크랩스터 200의 몸체 프레임은 복합소재인 탄소섬유 강화 플라스틱(Carbon fiber

Received 16 July 2013, revised 4 November 2013, accepted 18 December 2013

Corresponding author Seong-Yeol Yoo: +82-42-866-3874, usyeol@kiost.ac

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

reinforced plastic, CFRP)으로 제작되어 다른 다족 보행로봇과 비교할 때 중량 대비 강도의 개선효과를 기대할 수 있다.

탄소섬유 복합소재는 알루미늄이나 티타늄과 같은 금속 재질에 비해 높은 강성밀도와 강도밀도, 재료 감쇄를 가지기 때문에, 복합소재로 만들어진 구조는 소음과 진동을 흡수할 뿐 아니라 피로균열이나 진동 감쇄 특성도 개선되어 우주선이나 비행기, 자동차, 수중로봇 등에 적용된다(Wang, et al., 2010; James and Charles, 2007). 이러한 복합소재를 몸체 프레임에 적용함으로써 크랩스터 200은 다리에 대한 부하를 줄일 수 있고 구조적 강도를 증가시킬 수 있다. 크랩스터 200의 몸체 프레임은 개방구조로 설계되어 자체 무게를 더욱 줄였으며, 사람의 근육 구조와 비슷한 형상을 가지도록 설계하여 외부로부터 적용될 수 있는 부하를 효과적으로 분산시킬 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 크랩스터 200에 적용된 탄소섬유 복합소재로 만들어진 몸체 프레임에 대하여 3차원 유한요소해석 프로그램을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 유한요소해석의 신뢰성을 확보하기 위해 몸체 프레임과 동일한 방법으로 시편을 제작하여 시편시험을 수행하였다. 시편시험을 통해 몸체 프레임에 사용된 복합소재의 재료물성치를 구하여 이를 유한요소모델에 반영하였고, 수중과 공기중의 조건에서 크랩스터 200이 보행 준비 자세를 취하고 있을 때, 몸체 프레임에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 또한 CFRP 재료특성은 해양환경에서 많이 사용되

는 알루미늄 6061 T6재질에 대하여 비교연구를 수행함으로써, 구조해석 측면에서 정량적 개선효과를 검증하고자 한다.

## 2. 시스템 개요

### 2.1 크랩스터 200

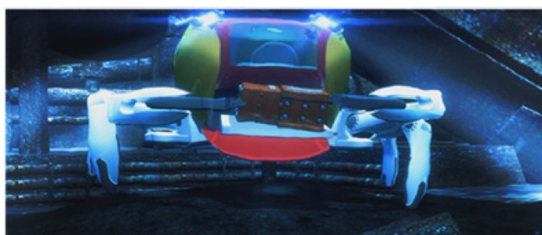
해저보행로봇 크랩스터 200은 여섯 개의 다리를 이용하여 해저면을 세밀하게 조사하거나 로봇팔을 이용하여 정밀한 수중작업을 수행할 수 있도록 설계되었다. 크랩스터 200은 전기모터로 구동되는 6개의 다리를 가지고 있으며, 6개의 다리는 각각 4~7 자유도를 가진다. 크랩스터 200은 6개의 다리를 이용하여 Fig. 1(a)에서와 같이 해저면을 게나 바다가재처럼 걸을 수 있다. 6개의 다리 중, 뒤편의 4개 다리는 보행전용 다리이고, 앞쪽의 두 개 다리는 Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 보행 뿐만 아니라 로봇팔로도 사용될 수 있다. 크랩스터 200은 수중 임무수행 중 강 조류를 만났을 때 Fig. 1(c)에서와 같이 자세를 변환하여 조류를 극복할 수 있도록 설계되었다.

크랩스터 200의 몸체는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 유체역학적 특성을 개선시키기 위하여 유선형 형태의 유리섬유 강화 플라스틱(Glass fiber reinforced plastic, GFRP)으로 덮혀 있다. 크랩스터 200은 길이 2.42m, 너비 2.45m, 높이 1.2m의 크기를 가지고 있으며, 높이는 최고 1.8m까지 올릴 수 있다. 크랩스터 200의 공기중 무게는 약 650kg 정도이고, 외부에서 공급되는 150~200V 직류전원을 공급받아 수심 200m까지의 수중에서 작업을 수행할 수 있다. 크랩스터 200 기구부의 사양은 Table 1과 같다.

크랩스터 200의 제어 및 전기 시스템은 몸체 내부에 장착된 두 개의 압력용기에 나누어 탑재되고, 두 개의 분전함이 몸체의 양쪽에 위치하여 압력용기로부터 나오는 전원과 신호선을 다리, 센서, 카메라, 조명 팬/틸트 장치 등 각 장비들로 분배한다. 크랩스터 200에는 수심 별 조류의 속도를 계측하기 위한 초음파 유속계(Acoustic doppler current profiler, ADCP), 로봇의 수중 위치를 계측을 위한 초단기선(Ultra short baseline, USBL) 리스폰더, 로봇 주위의 악시계 환경을 스캐닝하기 위한 스캐닝 소나가 장착된다(Baek, et al., 2012). 그리고 실시간 수중 관측을 위해 팬/틸트 기능을 내장한 HD 줌 카메라와 초음파 카메라가



(a) Walking on the sea floor



(b) Manipulation with robot arms, and



(c) To overcome strong tidal current

Fig. 1. Conceptual pictures of the CR200

Table 1 Specifications of CR200

Parameter	Value
Size (m), (L×W×H)	2.42×2.45×1.16
Weight (kg)	648
Frame weight (kg)	63
Max. ground clearance (m)	Over 0.5
Number of legs	6
Max. walking speed (m/sec)	0.5
Max. depth of water (m)	200
Max. endurable current (knot)	2
Power supply (volt)	150 ~ 190

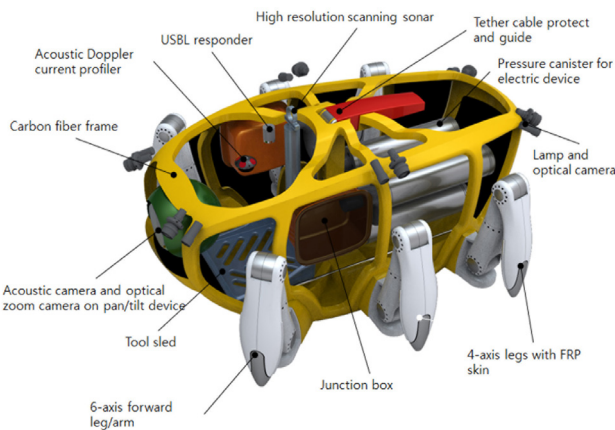


Fig. 2. Concept picture of equipped devices and body frame with installed legs

장착되고, 4대의 광학 카메라가 몸체 주위를 관측한다. 다리 관절은 전기 모터와 하모닉 드라이브에 의해 구동되고(Kang, et al., 2012), 다리는 유선형 형상의 GFRP로 씌워 유체저항을 최소화하였다. 그리고 초음파카메라와 실시간 고도를 측정하기 위한 초음파 고도계, 해저로봇의 자세를 측정하기 위한 AHRS (Attitude heading reference system)와 자이로 컴퍼스도 장착된다. 로봇이 해저에 도달했을 때 지면과의 접지력을 측정하기 위해 6개의 발 끝에 각각 힘센서를 장착하였다. 몸체의 앞쪽 하단에는 툴슬레드가 장착되어 각종 수중작업을 위해 필요한 공구를 싣고 내려가기도 하고, 수중에서 채집한 샘플을 싣고 오기 위한 용도로 사용되며 서랍과 같이 앞으로 전진 할 수 있다. 기본 장비 이외에 추가되는 장비를 수용하기 위해서 몸체의 윗 부분에는 루프랙을 설치할 수 있도록 하여 장비 탑재의 확장성을 증대시켰다. 이러한 장비들은 Fig. 2에서 보듯이, 모두 크랩스터의 몸체 프레임에 장착된다.

### 2.2 탄소섬유 복합소재 프레임

크랩스터 200의 프레임은 여러 탐사장비들과 다리들을 장착한 채 극한의 환경에서 작동하기 때문에, 높은 강도와 내구성을 가져야 하며, 자체 부하는 최소화하여 액츄에이터가 감당해야 하는 무게 부하를 줄일 수 있어야 한다. 이러한 이유로 탄소섬유 복합소재를 몸체 프레임의 재료로 선정하였다.

프레임은 'C'자형 단면구조를 가진다 동시에 늑골구조의 형태로 설계하여 수직방향의 힘을 잘 견디면서 내부에 충분한 탑재공간을 확보할 수 있도록 설계하였다. 또한, 시스템의 진수/인양 시 수직 방향의 힘을 지탱할 수 있도록 중앙에는 11mm 두께를 가지는 속이 빈 사각기둥 형태의 중앙 지지구조물을 설치하였으며, 다리가 고정되는 하부는 이중 구조로 보강하여 다리의 중량을 충분히 견딜 수 있도록 설계하였다.

Fig. 3(a)는 제작된 크랩스터 200의 복합소재 몸체 프레임을 나타낸 것이다. 몸체 프레임은 상부, 측면부, 하부, 중앙 지지대 등 4가지 파트로 구성된다. 각 파트의 복합소재는 서로 다른 방법으로 제작되어 각기 다른 구조적 특성을 가지도록 제작하였다. 예를 들어 상부 파트의 경우 횡방향(면에 대한 수직방향)



Fig. 3. Manufactured CFRP body frame of CR200(a) and Finite element model of CFRP body frame(b)

의 힘에 대한 강도 특성이 우수해야 하고, 측면 파트의 경우 종방향의 힘에 우수한 강도 특성을 가져야 한다. 그렇기 때문에 프레임의 각 파트들은 각 파트별 재료특성조건을 만족해야 하며, 복합소재의 제조방법을 달리 하여 강성의 방향, 강도 등 재료특성이 프레임 파트별 요구조건에 부합하도록 각 파트 프레임을 제작하였고, 각 파트별 프레임 두께는 3mm로 하였다. 프레임 파트 중 하부는 로봇 운용에 필요한 전자장비를 포함한 압력용기, 각종 케이블, 툴슬레드 등의 장비들이 직접 장착되어 상시 하중이 적용되기 때문에 'C'자 형태의 프레임 구조에 두께 5mm인 복합재 밀판을 보강하여 'U'자 형태의 이중구조로 제작하였다. 제작된 복합소재 몸체 프레임의 무게는 약 60kg 이고, 프레임의 양쪽 측면부 하단에는 6개의 다리가 부착된다.

### 3. 프레임의 유한요소 모델

본 논문에서는 크랩스터 200의 몸체 프레임에 대한 구조해석을 수행하기 위하여 유한요소모델을 이용하여 복합소재 몸체 프레임을 모델링 하였다. Fig. 3(b)는 구축된 몸체 프레임의 유한요소모델을 나타내고 있다. 탄소섬유 복합소재는 약 0.2mm의 얇은 시트가 여러 가지 형태의 패턴을 가지고 적층되어 특정한 부피와 형상의 프레임을 구성하게 된다. 이 때, 적층된 탄소섬유 시트는 각각 일정한 방향성을 지니도록 적층이 되기 때문에 유한요소모델을 생성하는데 있어 ANSYS 프로그램의 Shell 요소를 이용하여 각 시트의 방향성을 최대한 모사하도록 모델링 하였다. ANSYS에서 지원하는 Shell 요소의 종류는 다양하지만 재료의 적층 구조를 표현할 수 있는 Shell 요소는 제한적이다. 따라서 적층 구조를 표현하기 위하여 재료의 적층이 적용 가능한 요소인 Shell 181 및 Shell 281번을 사용하는 것이 바람직하다. Shell 181요소와 Shell 281요소는 요소의 가운데에 중앙절점이 존재하는 지에 따라 선택할 수 있으며, 해당 구조물에 대해서는 중앙 절점을 포함하지 않고, 하나의 요소가 4개의 절점으로 구성된 Shell 181 요소를 사용하여 유한요소모델을 작성하였다. 유한요소모델은 29,572개의 Shell 요소로 이루어져 있으며 30,515개의 노드를 가진다. 셸 요소는 3차원 표면모델을 바탕으로 형상을 구성하고, 두께에 대해 수치적 입력값을 적용함으로써 3차원 Solid 모델과 유사한 특성을 갖는다. 또한 자유곡면의 표현을 위하여 ANSYS 내의 전처리기를 사용하지 않고, 격자 생성 전용 프로그램(Truegrid v.2.3.4)을 사용하여 유한요



소모델을 작성하였다.

#### 4. 시편시험

본 논문에서는 크래프터 200의 몸체 프레임에 대한 유한요소 해석의 신뢰성을 확보하기 위하여 프레임과 동일한 방법으로 시편을 제작하여 물성 시험을 수행하였다. 시편은 얇은 시트 형태의 카본과 레진이 혼합되어 제작되기 때문에 두 가지 재료의 물성을 모두 고려하기 위하여 인장 및 굽힘시험을 진행하였다. 시편은 프레임과 동일한 방법으로 상부(시편 A), 측면부(시편 B), 하부 구조물(시편 B, C)에 대하여 제작하였으며, 시편 A는 능직 탄소섬유시트, 시편 B와 C는 한결 탄소섬유시트를 이용하였다.

시편의 인장시험에서는 탄소섬유 복합소재의 탄성계수, 인장강도, 연신율 등을 측정하였다. 시험편은 섬유로 이루어진 재료 특성을 고려하여 워터젯 가공방법을 이용하여 한국산업규격에서 규정한 1호 시험편 형식으로 제작하였고, 만능시험기(모델 : AG, 하중 5ton)를 이용하여 시험을 수행하였다. 인장시험은 상온(17.5°C)에서 1mm/min, 5mm/min의 속도로 5개의 인장시험을 이용하여 탄성계수와 인장강도를 각각 5회 측정하고 그 평균값을 사용하였다.

굽힘시험에서는 시험편에 하중을 가하여 굽힘에 대한 저항력을 측정하였다. 시편은 한국산업규격의 굽힘시험 라호 형태로 인장시험과 동일한 방법으로 가공하였고, 시험기(모델 : H10KS, 용량 1ton)를 통해 굽힘시험을 수행하였다. 굽힘시험은 상온(17.5°C)에서 5mm/min의 속도로 5개 시험편으로부터 굽힘 저항력을 측정하고 그 평균값을 구하였다. 시편시험은 한국산업규격에 의거하여 수행하였다(KS M 3006, 2003; KS B 0804, 2001).

Table 2 는 시편시험으로부터 얻어진 복합소재의 재료물성치를 보여준다. 시편실험 결과 탄성계수는 46.8~63.0GPa 사이로 나타났고, 인장강도는 517~668MPa 사이에 존재함을 알 수 있었다. 복합소재의 연신율은 1% 내외에서 계측되었고, 굽힘강도는 시편에 따라 큰 편차를 보였다. 이는 제조 방법의 차이에서 기인한 것으로 탄소섬유의 방향성과 두께에 따라 영향을 받는 것으로 생각된다. 또한 복합소재의 항복강도의 경우 0.2% Offset 강도를 검토하였으나 연신율이 매우 낮아 산출이 불가능

하였고, 인장강도를 곧 항복강도로 판단하였다. 복합소재의 밀도는 철금속(Iron)의 18.4~20.4% 로 측정되었다.

본 논문에서 이용한 유한요소모델은 Shell 요소를 적층하여 구축되었기 때문에, Solid 형태의 제작 시편의 재료특성을 적용할 경우 오차를 발생시킬 수 있다. 오차 보정을 위하여 시편시험에서 얻어진 하중-변위 데이터를 이용하여 유한요소해석 프로그램을 통해 시편시험을 모사하였다. 모사시험은 시편과 동일한 형태로 Shell 요소를 이용한 유한요소모델을 구축하여 시편의 하중-변위 관계를 모사하도록 재료물성치를 보정하여 단일 Shell 요소의 재료물성치를 유추하였다. Fig. 4는 재료물성치 보정 후 시편시험과 시편모사시험을 통해 구해진 시편 C에 대한 하중-변위 곡선이다. 두 곡선이 정확하게 일치하지는 않지만 10 %의 오차범위 내에서 유한요소모델의 재료특성이 시편의 재료특성을 추종하고 있음을 알 수 있다. 이러한 과정을 통해 보정된 각 시편별 재료물성치는 Table 3에 나타나 있다. 시편의 재료물성은 이방성을 가지기 때문에 시편시험에서 측정된 선형 탄성계수 외에 전단 탄성계수를 추가하여 재료물성을 유추하였고, 모델의 푸아송비는 0.3으로 가정하고 선형 탄성계수와 전단 탄성계수, 하중-변위 곡선을 이용한 재료물성치 보정에 반영하였다.

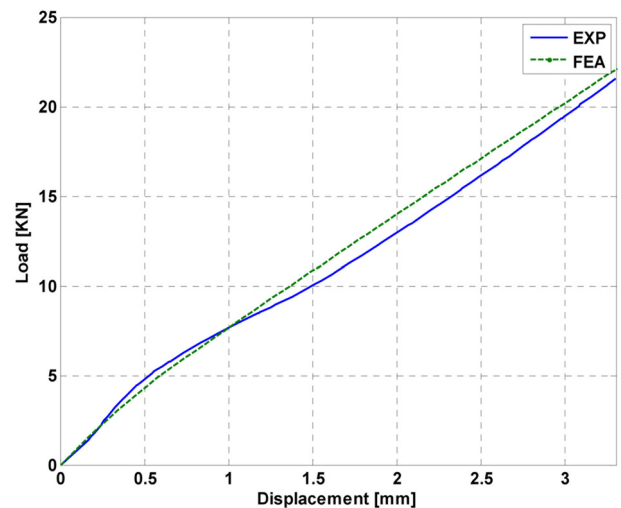


Fig. 4 Load-displacement graph of CFRP sample C

Table 2 Material properties of CFRP from specimen test

Parameters	A Type	B Type	C Type
Modulus of Elasticity [GPa]	46.8	57.6	63.1
Tensile strength [MPa]	517	613	668
Yield strength [MPa]	517	613	668
Elongation [%]	0.95	1.0	1.2
Bending strength [N]	1061	1255	3641
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1452	1577	1604
Thickness [mm]	3	3	5

Table 3 Material properties of a single layer CFRP for the FE model

Modified parameters	A Type	B Type	C Type
Modulus of elasticity in x, y, z [GPa]	18.2	18.2	18.2
	5.6	5.6	5.6
	5.6	5.6	5.6
Shear modulus of elasticity in xy, yz, xz [GPa]	8.9	20.6	18.2
	1.46	1.91	5.46
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3

각 시편별로 보정된 재료물성치는 CR200 복합소재 프레임의 각 파트에 적용되었다. 시편 A는 상부 프레임, 시편 B는 측면부 프레임에 적용되었고, 하부 프레임의 경우 시편 B와 C의 소재가 접합된 이중구조로 제작되었기 때문에 각 시편의 재료물성을 적용하고 두 소재가 접합되는 부분은 본드결합 조건을 적용하여 모델을 구축하였다. 중앙 지지구조물의 경우 상부 프레임과 동일한 복합소재를 사용하였지만, 두께가 11mm로 약 4배 가량 차이가 난다. 중앙 지지구조물에 대한 시편은 제작하지 못한 관계로 시편 A의 물성을 이용하였다.

### 5. 프레임의 유한요소해석

크랩스터 200은 다족 로봇으로서 해저면에서 보행을 통해 이동을 하며, 해저 탐사나 해저 작업 수행을 위하여 여러 가지 자세를 취해야 한다. 이 때 6개의 다리가 움직이면서 다양한 형태의 부하가 프레임에 인가될 수 있다. 본 논문에서는 프레임의 고유진동해석과 여러 부하조건 중 크랩스터 200의 기동 전 준비자세를 취했을 경우 발생하는 부하조건에 대하여 수중과 육상 조건을 적용하여 프레임에 대한 구조해석을 수행하였다.

시편시험과 시뮬레이션을 통해 보정된 재료물성을 이용하여 몸체 프레임의 고유진동 해석을 수행하였다. 이 때, 프레임에 장착되는 장비들은 모두 분포하중으로 고려하여 해석에 포함하였다. Fig. 5~7은 몸체 프레임의 고유진동모드를 나타낸 그림이다. 복합재료 몸체 프레임 모델은 Shell 요소로 구성되었기 때문에 6개의 강제모드를 가지고 있으며, 7번째 모드부터 프레임의 유연모드가 된다. 6개의 강제모드들은 모두 0Hz 부근에 존재했으며, 첫 번째 유연모드는 20.7Hz에서 나타났고 Fig. 5와 같은 모습으로 프레임의 전방부위에서 최대 변형이 일어났다. 두 번째 유연모드 역시 첫 번째 모드와 같은 전방부위에서 변형이 일어났으며(Fig. 6) 고유진동 모드 주파수는 27.6Hz였다. 세 번째 유연모드는 28.9Hz에서 나타났으며 Fig. 7에서와 같이 프레임의 후방부위에서 변형을 보였다. 몸체 프레임의 고유진동 유연모드는 1~3차까지 30Hz이하에서 관찰되었고, 프레임의 유연모드에 대한 고유진동해석 결과는 Table 4에 정리되어 있다. 프레임의 고유진동해석을 통해 크랩스터 200의 공기중 운용 시 다리의 모터기동 속도를 30Hz이상으로 설정해야 안전하게 로봇을 운용할 수 있을 것으로 생각되며, 수중에서는 물의 감쇠 특성(Damping) 때문에 고유진동모드의 주파수는 더 낮아질 것으로 생각된다.

크랩스터 200의 보행 준비자세는 Fig. 2와 3(b)에서 볼 수 있듯이 다리를 접고 있는 형태이고, 몸체 안쪽에는 각종 탐사 장비 및 전기 전자 장비들이 장착되어 있다. 프레임의 유한요소해석에서 탑재되는 장비들은 모두 분포하중으로 고려하였고, 다리는 접혀있는 형상에 대하여 모멘트를 구하여 프레임에 부하로 인가하였다. 프레임의 유한요소해석에 있어서 수중과 육상의 가장 큰 차이점은 부력과 수압이다. 수중 해석 시 부력은 프레임에 장착되는 각종 장비들과 다리들의 수중 무게를 계산하여 고려하였고, 수압은 수심 10m 당 1bar의 수압이 작용하기 때문에 20bar가 적용되었지만, 프레임의 개방형 구조로 인해

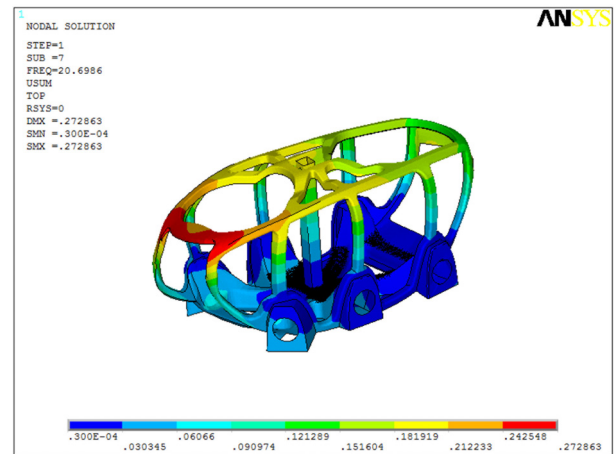


Fig. 5. 1st flexible mode of CFRP body frame

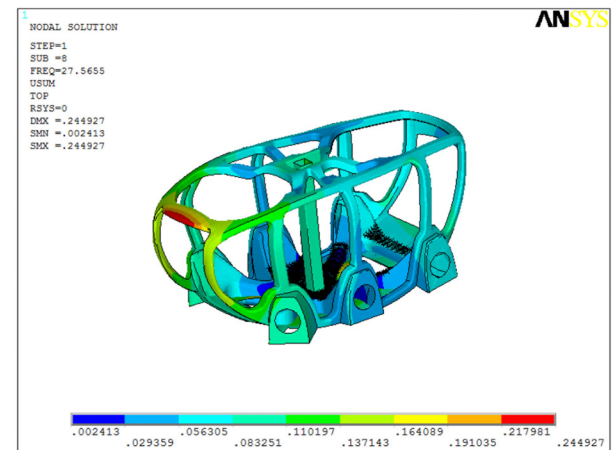


Fig. 6. 2nd flexible mode of CFRP body frame

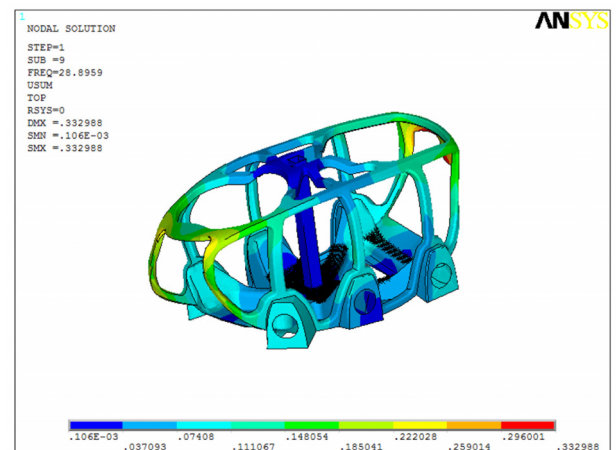


Fig. 7. 3rd flexible mode of CFRP body frame

구조해석에 있어서 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 육상에서 크랩스터 200이 보행 준비 자세를 취하고 있을 때 프레임에 대한 구조해석 결과를 보여준다. 전체적으로 프레임에 작용되는 응력은 작게 나타났으며, 최대 응력은 프레

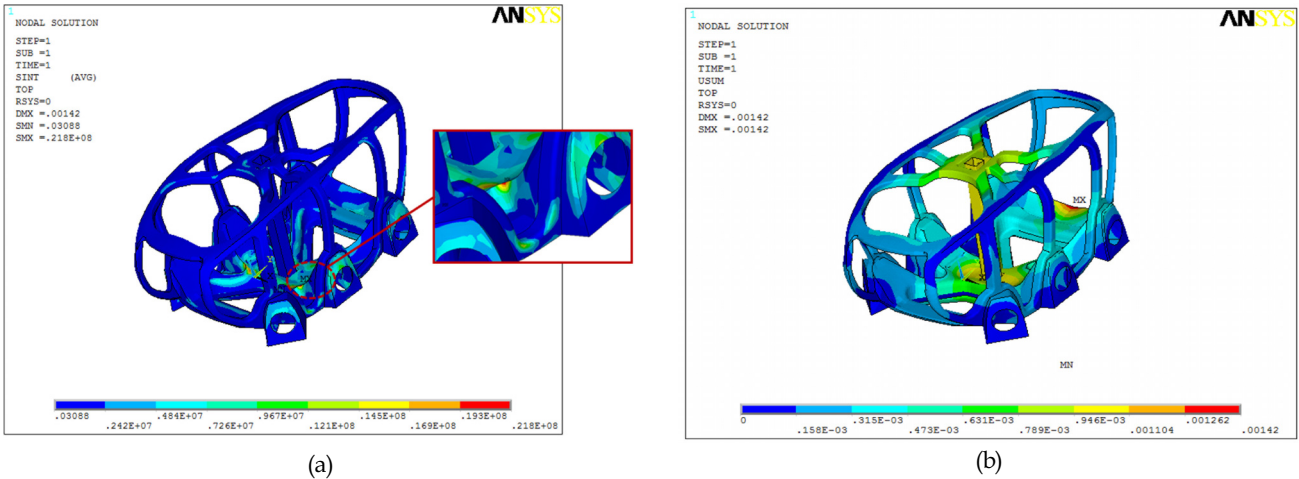


Fig. 8. Contour of stress(a) and deformation(b) for Finite element model of CFRP body frame in the air case

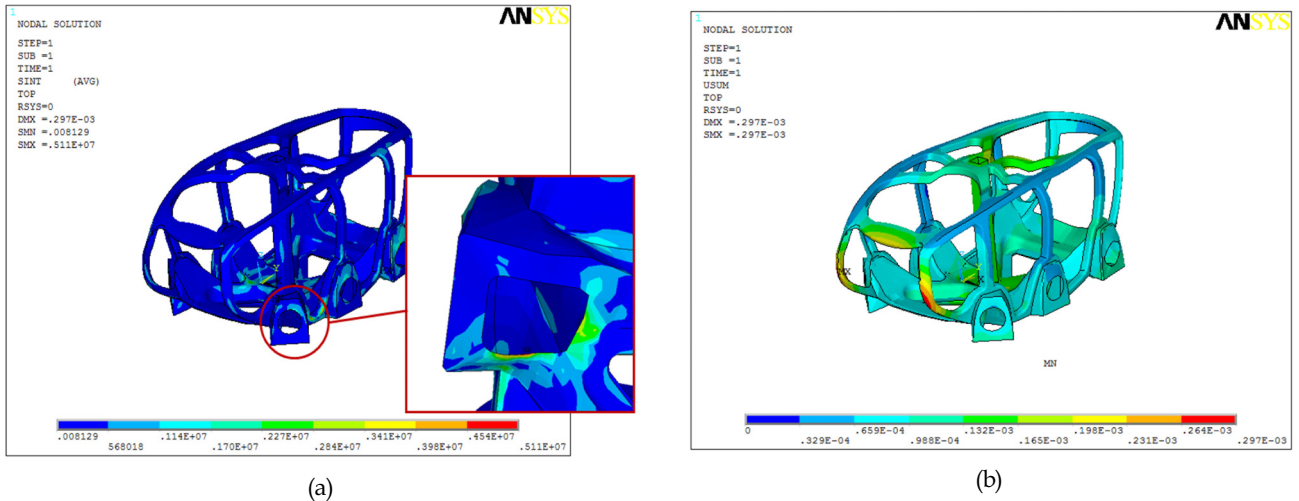


Fig. 9. Contour of stress(a) and deformation(b) for Finite element model of CFRP body frame in the underwater case

임의 하부에서 21.8MPa, 최대 변형량은 1.4mm에 불과하였다. 이 때, 프레임 하부에서 발생한 최대 응력은 재료의 최대 인장 응력에 대하여 약 3.64% 정도이다.

Fig. 9는 수중에서 동일한 자세를 취하였을 경우에 대한 구조 해석 결과를 보여준다. 수중에서 프레임에서 발생하는 최대 응력은 5.1MPa이며 프레임의 하부에서 발생하였으며, 이는 최대 허용응력의 0.85%에 해당한다. 최대 변형량은 0.3mm로 관찰되

었고 프레임 하부에서 발생하였다.

육상과 수중 조건에서 기본자세에 대하여 구조해석을 수행한 결과 최대 허용응력 대비 각각 3.64%, 0.85%의 응력이 발생하여 두 가지 환경에서 모두 프레임의 구조적 안정성을 확인하였다. 두 가지 경우에 대하여 발생한 최대 응력과 최대 변형량은 Table 4에 정리하였다.

## 6. 고 찰

본 논문에서는 탄소섬유 복합소재로 제작된 프레임에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 수행 결과 공기중과 수중에서 프레임에 발생하는 최대 응력은 최대 인장응력 대비 3.64%, 0.85%로 나타났다. 수중에서 발생하는 응력이 공기중에서 보다 작은 이유는 프레임에 장착되는 각종 장비들과 다리들이 부력에 의해 무게가 줄어들어 프레임에 적용되는 하중이 감소했기 때문이다.

유한요소해석 결과를 살펴보면 아주 작은 응력이 프레임에서 발생하여 과설계의 우려가 있다. 하지만, 해석을 통해 프레임에

Table 4 Results of Finite Element Analysis of CFRP

	Parameters	Value
Flexible mode frequency[Hz]	1 <sup>st</sup> mode	20.7
	2 <sup>nd</sup> mode	27.6
	3 <sup>rd</sup> mode	28.9
Air condition	Max. deformation [m]	1.4×10 <sup>-3</sup>
	Max. stress [MPa]	21.8
Underwater condition	Max. deformation [m]	0.30×10 <sup>-3</sup>
	Max. stress [MPa]	5.1

**Table 5** Comparison between CFRP frame and Aluminum frame

Parameter	CFRP	Aluminum
Frame mass [kg]	62.97	110.90
Average stiffness [Gpa]	55.8	68.9
Average density [kg/m <sup>3</sup> ]	1544	2700
Average tensile strength [Mpa]	599	310
Specific stiffness [MPa/kg]	886.14	621.28
Specific strength [MPa/kg]	9.51	2.79

발생한 최대 응력은 정적 부하에 의한 응력이다. 실제 로봇의 운용에는 정적 부하 뿐 아니라 동적 부하 혹은 예상치 못한 순간 부하 등이 작용할 수 있기 때문에 단순히 정적 부하 조건의 결과만으로 과설계를 판단하기에는 무리가 있을 것으로 생각되며 추후 동적 부하 조건이나 순간 부하 조건 등을 고려한 프레임의 구조해석을 수행할 예정이다.

또한, 본 논문에서는 시편시험을 통해 얻어진 탄소섬유 복합소재의 재료특성을 기존의 ROV, AUV에서 많이 사용되는 알루미늄 계열의 재료와 비교를 해 보았다. 비교 대상은 크랩스터 200에서 다리관절에 사용되었고, 항부식성이 좋아 수중 구조물 제작에 주로 사용되는 알루미늄 6061 T6 재료를 선정하여 재료의 탄성과 강도특성을 질량에 정상화(Normalize)하여 비교를 수행하였다. 이 때, CFRP 프레임의 강성과 강도는 각 파트별 수치의 평균값을 이용하였다. 구조해석 수행 결과 탄소섬유 복합소재의 강성밀도(Specific stiffness)와 강도밀도(Specific strength)가 각각 1.43배, 3.82배 강하고, 밀도는 평균 약 43% 작아 알루미늄 6061 T6에 비해 가볍고 높은 강도를 지니는 것으로 나타났다. 비교결과는 Table 5에 정리되어 있다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 수심 200 미터급 다관절 복합이동 해저로봇 크랩스터 200에 사용된 탄소섬유 복합소재 몸체 프레임에 대하여 구조해석을 수행하였다. 프레임의 구조해석은 해저로봇이 육상에 있을 경우와 수중에 있을 경우에 대하여 각각 수행하였다. 구조해석의 신뢰성을 확보하기 위하여 프레임의 제작방법과 동일한 방법으로 시편을 제작하여 인장시험과 굽힘시험을 수행하여 탄소섬유 복합소재의 재료물성치를 구하였다. 탄소섬유 복합소재 프레임의 제작 특성상 Shell 요소를 이용하여 프레임의 유한요소모델을 구축하였고, 시편시험에서 얻어진 재료물성치를 적용하여 프레임의 고유진동해석과 육상, 수중에 있을 때에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과 프레임의 고유진동모드는 30Hz이하에서 관찰되었다. 육상 및 수중에서의 해석에서는 재료 최대 허용응력의 3.64%, 0.85%의 응력이 발생하는 것으로 나타나 탄소섬유 복합소재 프레임은 육상, 수중 두 경우에서 모두 정적 안전성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 이는 수중 구조물의 제작에 주로 사용되는 비철금속과 비교할 때

탄소섬유 복합소재의 중량 대비 강성과 강도 모두 우수한 것을 확인하였다. 본 논문의 결과는 향후 탄소섬유 복합소재를 이용한 수중 로봇이나 수중 구조물을 설계할 때 중요한 참고자료로 활용될 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부에서 지원하는 “다관절 복합이동 해저로봇 개발” 과제로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝힙니다.

## References

- Baek, H., Jun, B.H., Kim, B.R., Shim, H.W., 2012. Operating Strategy and Experimental Study on High Resolution Scanning Sonar of Multi-legged Seabed Robot to Overcome the Low Visibility Environment. KAOSTS Spring Proc. 1704-1710.
- James, T., Charles, E., 2007. The Deepglider: A Full Ocean Depth Glider for Oceanographic Research. Oceans2007, 1-7.
- Jun, B.H., Shim, H.W., Lee, P.M., 2011a. An Approximation of Generalized Torques by the Hydrodynamic Forces Acting on Legs of Underwater Walking Robot. International Journal of Ocean System Engineering, 1(4), 222-229.
- Jun, B.H., Shim, H.W., Park, J.Y., Kim, B.H., Lee, P.M., Kim, W.J., Park, Y.S., 2011b. A New Concept and Technologies of Multi-legged Underwater Robot for High Tidal Current Environment. Proceedings of IEEE Symposium on Underwater Technology (UT), and 2011 Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC), 1-5.
- Kang, H.G., Shim, H.W., Jun, B.H., Lee, P.M., 2012. Design of the Underwater Link-Joint System for the Multi-Legged Underwater Robot 'CR200'. Proc. of MTS/IEEE OCEANS, 1-6.
- Korean Industrial Standards KS M 3006, 2003
- Korean Industrial Standards KS B 0804, 2001
- Lee, P.M., Jun, B.H., Park, J.Y., Shim, H.S., Shim, Kim, J.S., Jung, H.S., Yoon, J.Y., 2011. An in-situ Correction Method of Position Error for an Autonomous Underwater Vehicle Surveying the Sea Floor. International Journal of Ocean System Engineering, 1(2), 60-67.
- Loebis, D., Sutton, R., Chudley, J., Naeem, W., 2004. Adaptive Tuning of Kalman Filter via Fuzzy Logic for an Intelligent AUV navigation System. Control Engineering Practice, 12(12), 1531-1539.
- Schmucker, A., Inme, T., 1996. Hexagonal Walking Vehicle with Force Sensing Capability. Proceedings of the International Symposium on Measurement and Control in Robotics(ISMCR), 354-359.

- Shim, H.W., Jun, B.H., Lee, P.M., 2013. Mobility and Agility Analysis of a Multi-legged Subsea Robot System. *Ocean Engineering*, 61, 88-96.
- Shim, H.W., Jun, B.H., Lee, P.M., Baek, H., Lee, J.H., 2010. Workspace Control System of Underwater Tele-operated Manipulators on an ROV. *Ocean Engineering*, 37, 1036-1047.
- Takahashi, H., Iwasaki, M., Akizono, J., Asakura, O., Shiraiwa, S., Nakagawa, K., 1993. Development of an Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection. *The Report of the Port and Harbor Research Institute*, 31(5) 313-357.
- Wang, Y., Sun, M., Zheng, Z., Zhu, S., 2010. Finite Element Modeling of Carbon Fiber Reinforced Polymer Pressure Vessel. *International Conference on Educational and Network Technology*.
- Weidemann, H.J., Pfeiffer, F., Elize, J., 1994. Sixlegged TUM Walking Robot. *Proceedings of the IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, 1026-1033.
- Wernli, R., Jaeger, J., 1984. ROV Technology Update from an International Perspective. *Proceedings of the MTS/IEEE OCEANS 1984*, 639-645.