

다관절 복합이동 해저로봇에 적용된 탄소섬유 복합소재 프레임에 대한 진수 및 인양 조건에서의 구조해석

유승열^{*†}, 전봉환^{*}, 심형원^{*}, 이판목^{*}

* 선박해양플랜트연구소

Finite Element Analysis of CFRP Frame under Launch and Recovery Conditions for Subsea Walking Robot, Crabster

Seong-Yeol Yoo^{*†}, Bong-Huan Jun^{*}, Hyungwon Shim^{*} and Pan-Mook Lee^{*}

* Ocean System Engineering Research Division, Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering (KRISO)

(Received January 16, 2014 ; Revised February 12, 2014 ; Accepted February 12, 2014)

Key Words: Crabster(크랩스터), Carbon Fiber Reinforced Plastic(탄소섬유 강화 플라스틱), Subsea Walking Robot(해저보행로봇), Launch and Recovery(진수 및 인양), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: 본 논문은 200 미터급 다관절 복합이동 해저로봇(크랩스터, CR200)에 적용된 탄소섬유 복합소재 몸체 프레임의 구조해석에 대하여 다루고 있다. CR200의 몸체 프레임은 탄소섬유 복합소재를 이용한 강화 플라스틱으로 제작되어 가볍고 강하며, 사람의 늑골구조를 모방하여 설계되었기 때문에 외부 하중을 효과적으로 분산시킬 수 있다. 해상에서 모선과 크레인을 사용하여 CR200을 진수하거나 인양할 때, 해상 상황에 따라 모선 운동에 의한 동적 하중이 몸체 프레임에 전달되기 때문에 프레임에 대한 진수 및 인양 조건에서의 구조적 해석이 필요하다. 구조해석의 신뢰성을 확보하기 위하여 본 논문에서는 몸체 프레임의 시편시험 결과를 이용하여 구조해석을 수행하고, 기존 금속재질의 프레임 모델과 구조적 특성을 비교하여 탄소섬유 복합소재 프레임의 구조적 특성을 정량적으로 비교하였다.

Abstract: This study applied finite element analysis (FEA) to the body frame of the 200-meter class multi-legged subsea walking robot known as Crabster (CR200). The body frame of the CR200 is modeled after the ribcage of a human so that it can disperse applied external loads. It is made of carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP). Therefore, the frame is lighter and stronger than it would be if it were made of other conventional materials. In order to perform FEA for the CFRP body frame, we applied the material properties of the CFRP as obtained from a specimen test to an FE model of CFRP frame. Finally, we performed FEA with respect to the load conditions encountered when the robot is launched into and recovered from the sea. Also, we performed FEA for the frame, assuming that it was fabricated using a conventional material, in order to compare its characteristics with CFRP.

1. 서론

최근 해양탐사와 수중작업에 대한 수요의 증가로 인해 원격무인잠수정(ROV)과 자율무인잠수정(AUV) 같은 수중로봇에 대한 관심이 증가하고 있다. 기존의 ROV와 AUV는 스크류 형태의 구동기를 이용하여 이동 및 정지를 하는데,⁽¹⁻⁴⁾ 이러한

형태의 수중로봇은 우리나라 서해와 같이 강한 조류와 탁한 시계의 수중 환경에서는 정확한 위치제어가 어려워 해저면 가까이에서 정밀한 작업을 수행하는데 어려움을 가질 뿐만 아니라, 프로펠러 구동에 의한 해저생태계 교란의 우려도 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위하여 선박해양플랜트연구소에서는 수심 200 미터급 천해용 다족 보행 수중로봇인 크랩스터 (Crabster, CR200)를 개발하고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

크랩스터와 같은 다족 보행 수중로봇은 프로펠러 대신 여러 개의 다리를 가지기 때문에 강조류

† Corresponding Author, usyool@kriso.re.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Specifications of CR200

PARAMETER	VALUE
Size (m, L × W × H)	2.42 × 2.45 × 1.16
Weight (kg)	650
Frame weight (kg)	62
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



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 Conceptual pictures of the CR200 : (a) Walking on the sea floor, (b) manipulation with robot arms, and (c) To overcome strong tidal current

와 같은 악조건을 극복하기에 더 유리하다. 크랩스터는 강조류 환경에서 Fig. 1(c)와 같이 해저면에 몸체를 밀착하고 로봇의 자세를 앞으로 숙여 해저면과의 접지력을 높임으로서 강조류를 극복할 수 있다. 그 동안 여러 가지 형태의 다족 보행로봇에 대한 연구가 수행되었지만, 대부분 소형이었으며 플라스틱이나 금속재질의 몸체를 가지며 육상로봇이 주를 이루었다.⁽⁸⁻¹¹⁾

수중로봇인 크랩스터는 해양탐사를 위한 장비들



Fig. 2 CR200 in the launch process

과 샘플채취 등을 위한 내부공간이 필요하여 소형차 정도의 크기와 약 650kg의 무게를 가지기 때문에, 몸체는 구조적 강도를 확보해야 하며, 다리를 통해 로봇 전체의 무게를 지탱하며 보행해야 하므로 몸체의 중량은 최소화 해야 한다. 이러한 이유로 크랩스터의 몸체는 탄소섬유 강화 플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)으로 제작하여 기존의 보행로봇과 비교하여 중량 대비 강도의 개선효과를 기대하였다.

크랩스터는 해양탐사를 위한 수중로봇이기 때문에 Fig. 2에서와 같이 항상 모선과 크레인을 통한 진수 및 인양 과정이 필요하다. 진수, 인양 과정에서 모선은 파도와 바람 등에 의해 항상 흔들리게 되고, 이러한 요동은 크레인을 통해 크랩스터에 동적 하중으로 작용하게 된다. 본 논문에서는 크랩스터에 적용된 CFRP 몸체 프레임을 해상에서 진수 및 인양 될 경우에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석의 신뢰성을 확보하기 위하여 몸체 프레임과 동일한 방법으로 제작한 시편을 이용해 재료물성치를 구하여 이를 해석에 반영하였다⁽¹²⁾. 진수, 인양 조건에서의 프레임에 대한 구조해석은 크랩스터가 보행 준비자세(Ready posture, 다리를 접은 자세)와 기준자세(Reference posture, 다리를 수평으로 펼친 자세)를 취하고 있을 때에 대하여 수행하였다. 준비자세는 다리에 의한 모멘트가 최소가 되는 조건이고, 기준자세는 다리 중량에 의한 모멘트가 프레임에 최대로 작용하는 가장 가혹한 조건이다. 또한 CFRP 프레임의 구조해석 결과는 해양환경에서 많이 사용되는 알루미늄 6061 T6 재질에 대하여 비교연구를 수행함

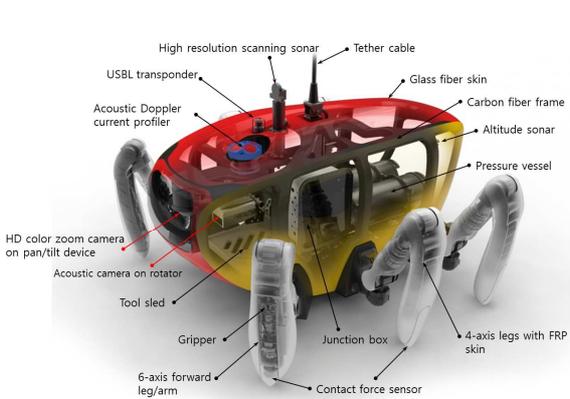


Fig. 3 Concept picture of equipped devices and body frame with the legs

으로서 구조해석 측면에서의 정량적 개선효과를 검증하고자 한다.

2. 시스템 개요

2.1 다관절 복합이동 해저로봇

다관절 복합이동 해저보행로봇 크랩스터는 기존 프로펠러 형식의 액추에이터 대신 여러 개의 관절로 이루어진 여섯 개의 다리가 장착되어 있어 해저면을 세밀하게 조사하거나 로봇팔을 이용하여 정밀한 수중작업을 수행할 수 있도록 설계되었다. 크랩스터의 다리는 4자유도를 가지는 전용다리 4개와 7자유도를 가지는 로봇팔 겸용 다리 2개로 구성되어 있으며, 해저면을 지나 바다가재처럼 걸거나 로봇팔을 이용하여 수중작업을 수행할 수 있다.

크랩스터는 길이 2.42 미터, 너비 2.45 미터, 높이 1.2 미터의 크기를 가지며, 몸체를 약 1 미터 정도 들어 올릴 수 있다. 크랩스터의 무게는 약 650 kg 정도이고, 외부에서 공급되는 150 ~ 190 V 직류전원을 공급받아 수심 200 미터까지의 수중에서 작업을 수행할 수 있다. 크랩스터의 기구부 사양은 Table 1과 같다.

Fig. 3 은 크랩스터의 몸체 프레임과 내부에 장착되는 장비들의 구성도를 보여준다. 크랩스터에는 수중 운용을 위해 수심 별 조류의 속도를 계측하기 위한 초음파 유속계(ADCP), 로봇의 수중위치를 계측을 위한 초단기선(USBL) 리스폰더, 로봇 주위의 악시계 환경을 극복하기 위한 스캐닝 소나, 실시간 수중 관측을 위해 HD 줌 카메라와 초음파 카메라, 광학 카메라 등이 장착된다. 그리고, 해저로봇의 자세를 계측하기 위한 자세측정장치(AHRS)와 자이로 컴퍼스도 장착되며, 해저면과의



Fig. 4 Manufactured CFRP body frame of CR200

접지력을 측정하기 위해 6 개의 발 끝에 각각 힘센서를 장착하였다. 몸체의 앞쪽 하단에는 툴슬레드가 장착되어 각종 수중작업 및 샘플 채취를 위한 수납공간으로 사용된다. 몸체의 윗부분에는 루프랙을 설치하여 추가 장비를 장착할 수 있도록 하여 장비 탑재의 확장성을 확보하였다. 이러한 장비들은 Fig. 3 에서 보듯이, 모두 크랩스터의 몸체 프레임에 장착된다.

2.2 탄소섬유 복합소재 프레임

크랩스터의 운용은 극한의 환경에서 이루어지기 때문에 높은 강도와 내구성을 요구하며, 자체 부하는 최소화하여 액추에이터가 감당해야 하는 무게 부하를 줄일 수 있어야 한다. 이러한 조건을 만족하기 위해 프레임의 재료로 CFRP를 선정하였다.

프레임은 ‘C’ 자형 단면구조를 가지면서 사람의 늑골구조를 모방하여 외력을 잘 견디면서 내부에 충분한 탑재공간을 확보할 수 있도록 설계하였다. 또한, 수직 방향의 힘에 대응할 수 있도록 중앙에는 11mm 두께를 가지는 속이 빈 사각기둥 형태의 중앙 지지구조물을 설치하였으며, 다리가 고정되는 하부는 특별히 보강하여 다리의 중량을 충분히 견딜 수 있도록 하였다.

Fig. 4 는 제작된 크랩스터의 CFRP 몸체 프레임을 나타낸 것이다. 몸체 프레임은 상부, 측면부, 하부, 중앙 지지대 등 4 가지 파트로 구성된다. 복합소재는 제조방법에 따라 강성의 방향, 강도 등 재료특성이 달라지기 때문에 프레임 파트별 요구조건에 부합하도록 각 파트 프레임을 제작하였다. 예를 들어 상부 파트의 경우 횡방향(면에 대한 수직 방향)의 힘에 대한 강도 특성이 우수해야 하고, 측면 파트의 경우 종방향의 힘에 우수한 강도 특성을 가져야 한다. 프레임 파트 중 하부는 각 중 탑재장비에 의한 하중이 상시 적용되기 때문에 ‘C’ 자 형태의 프레임 구조에 두께 3mm 인 복

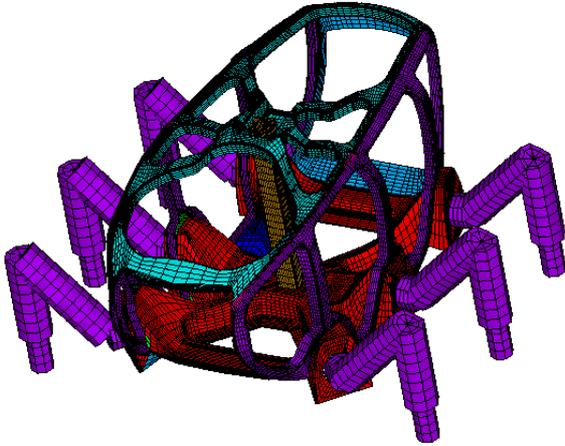


Fig. 5 Finite element model of CFRP body frame of CR200

합재 밀판을 보강하여 ‘口’ 자 형태의 이중구조로 제작하였다. 제작된 복합소재 몸체 프레임의 무게는 약 60 kg 이고, 프레임의 양쪽 측면부 하단에는 6 개의 다리가 부착된다.⁽¹²⁾

3. 복합소재 프레임의 유한요소 모델링

3.1 유한요소모델

본 논문에서는 크랩스터의 몸체 프레임에 대한 구조해석을 수행하기 위하여 Fig. 5 와 같이 유한요소모델을 이용하여 복합소재 프레임을 모델링하였다. 탄소섬유 복합소재는 약 0.2 mm 의 얇은 시트 형태로 되어 있으며, 능직(Twill)과 한결(Unidirection)직조 등의 패턴을 가진다. 크랩스터의 몸체 프레임은 이러한 얇은 시트 형태의 복합소재를 일정한 직조패턴을 가지도록 적층하여 레진과의 교합을 통해 제작되며 직조패턴에 따라 방향성을 가지기 때문에 유한요소모델을 생성하는데 있어 ANSYS 프로그램의 쉘요소를 이용하여 각 시트의 방향성을 최대한 모사하도록 모델링 하였고, 프레임의 적층 구조를 표현하기 위하여 SHELL181 요소를 사용하였다. 유한요소모델은 29,572 개의 쉘요소로 이루어져 있으며 30,515 개의 노드를 가진다. 쉘 요소는 3 차원 표면모델을 바탕으로 형상을 구성하고, 두께를 입력하여 체적을 갖도록 하였으며, 자유곡면의 표현을 위하여 ANSYS 내의 전처리기를 사용하지 않고 격자 생성 전용 프로그램(Truegrid v.2.3.4)을 이용해 유한요소모델을 작성하였다.

3.2 시편시험

본 논문에서는 크랩스터의 몸체 프레임에 대한 유

Table 2 Material properties of a single layer CFRP for the FE model⁽¹²⁾

Modified parameters	A	B	C
	Type	Type	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

한요소해석의 신뢰성을 확보하기 위하여 프레임과 동일한 방법으로 시편을 제작하여 재료물성실험을 수행하였다. 시편은 프레임과 동일한 방법으로 상부(시편 A), 측면부(시편 B), 하부 구조물(시편 B, C)에 대하여 제작하였으며, 시편 A 는 능직 탄소섬유시트, 시편 B 와 C 는 한결 탄소섬유시트를 이용하였다. 시편시험은 한국산업규격^(13,14)에 의거하여 수행하였으며 시편제작은 재료의 특성을 고려하여 워터젯 방법을 이용하였다.

시편시험 결과 각 시편의 탄성계수는 46.8 ~ 63.0 GPa 사이에서 나타났고, 인장강도는 517 ~ 667 MPa 사이에 존재하였다. 굽힘강도는 시편에 따라 1061 ~ 3641 N 으로 큰 편차를 보였는데 이는 제조 방법의 차이에서 기인한 것으로 탄소섬유의 방향성과 두께에 따라 영향을 받는 것으로 생각된다. 또한 복합소재는 연신율이 매우 낮아 인장강도를 곧 항복강도로 간주하였다. 복합소재의 밀도는 철 금속(Iron)의 18.4 ~ 20.4 % 로 측정되었다.⁽¹²⁾

본 논문에서 이용한 유한요소모델은 쉘요소를 적층하여 구축되었기 때문에, 솔리드 형태의 시편으로부터 얻어진 재료물성치를 그대로 적용하면 큰 오차를 발생한다. 오차의 원인인 레진의 영향을 포함하는 쉘요소 한 층에 대한 재료물성치를 구하기 위해서 유한요소해석 프로그램을 통해 시편실험을 모사하는 하중-변위 시뮬레이션을 수행하여 쉘요소 한 층에 대한 재료물성치를 유추하였다. 유추된 각 시편별 재료물성치는 Table 2 에 나타나 있다. 모델의 푸아송비는 0.3으로 가정하고 재료물성치 보정과정에서 반영하였다.

각 시편 별로 보정된 재료물성치는 크랩스터의 프레임의 각 파트에 적용되었으며, 하부 프레임의 경우 시편 B 와 C 의 소재가 접합된 이중구조로 제작되었기 때문에 각 시편의 재료물성을 적용하

Table 3 FEA results of the frame according to the materials

Posture	Materials	parameters	Load 100%	Load 150%	Load200%
Reference posture	CFRP	Stress [MPa]	407	523	640
		(safety margin [%])	(32.1)	(12.7)	(-6.8)
		Deform.[mm]	67.6	79.7	92.7
	Al.	Stress [MPa]	533	713	893
		(safety margin [%])	(-71.9)	(-130.0)	(-188.4)
		Deform. [mm]	19.1	22.3	25.5
Ready posture	CFRP	Stress [MPa]	377	492	610
		(safety margin [%])	(37.1)	(17.9)	(-1.8)
		Deform. [mm]	64.1	72.8	85.6
	Al.	Stress [MPa]	490	671	851
		(safety margin [%])	(-58.1)	(-116.5)	(-174.5)
		Deform. [mm]	20.8	20.5	23.7

고 두 소재가 접합되는 부분은 본드결합 조건을 적용하여 모델을 구축하였다. 중앙 지지구조물의 경우 상부 프레임과 동일한 복합소재를 사용하였지만, 시편을 제작하지 못한 관계로 시편 A의 물성을 이용하였다.⁽¹²⁾

4. 복합소재 프레임의 구조해석

4.1 진수 및 인양 조건

크랩스터는 수심 200미터 이내의 바다 속에서 운용되기 때문에 항상 모선과 크레인을 통한 진수, 인양 과정이 필요하다. 육상에서와는 달리, 해상에서의 진수 및 인양 과정에서 모선은 파도와 바람 등에 의해 항상 흔들리게 되고, 이러한 요동은 모선 위의 크레인에도 영향을 미쳐 진수, 인양되는 시스템에 동적 하중으로 작용하게 된다. 크랩스터의 진수, 인양은 프레임에 연결된 전원 공급용 테더 케이블(Tether cable)을 통해 이루어지며, 이때 발생하는 하중은 온전히 프레임에 전달된다.

파도와 바람 등에 의해 발생하는 모선의 횡동요(Roll)나 수직동요(Heave) 운동에 대한 하중을 정확히 고려하기 어렵기 때문에, 본 논문에서는 크랩스터의 진수 및 인양 시 발생할 수 있는 하중 중 가장 큰 수직방향 하중만을 고려하였다. 적용된 수직방향 하중의 크기는 미국 선급협회 규정⁽¹⁵⁾을 기준으로 정적, 동적 부하에 대하여 각 1G, 횡/종방향 부하에 대하여 1 G 를 고려하여 총 3G에 대한 하중을 적용하였고, 불안정한 해상상황을 가정하여 하중의 150%와 200% 가중조건을 추가 적용하였다. 진수 및 인양 시 크랩스터의 자세는 준비자세와 기준자세의 경우를 고려하여 다리의 하중에 의한 모멘트가 최대 또는 최소가 될 때에

대하여 해석을 수행하였다. 운용 시 크랩스터에 장착되는 여러 탐사장비는 부가질량으로 간주하여 하부 프레임에 분포하중으로 적용하였다. 크랩스터의 자중은 Table 1에서와 같이 650kg이지만, 해석을 수행할 당시 추정 무게는 약 570kg으로 계산되었다. 실제무게와 추정무게 사이의 오차는 로봇을 제작하면서 발행한 설계변경, 케이블 등의 길이 증가 등에 따른 것으로 생각되며, 해석은 570kg을 자중으로 적용하여 수행하였다. 해석 시 적용되는 하중조건은 3G의 200%까지 설정하였기 때문에 프레임의 구조적 안정성을 확인하기에 충분할 것으로 생각된다.

4.2 유한요소해석

크랩스터의 진수 및 인양은 프레임의 중앙에 위치한 중앙 지지구조물에 고정된 테더 케이블을 통해 이루어지기 때문에, 유한요소해석은 중앙 지지구조물의 윗부분을 고정한 후 하부면에 하중조건을 적용시켜 크레인을 통한 진수 및 인양 상황을 가정하였다.

Fig. 6 과 7 은 크랩스터를 기준자세에서 진수, 인양을 할 경우 프레임의 하부면에 3G(100%)의 하중이 수직방향으로 인가되었을 때 발생하는 변형량과 응력분포를 보여준다. 해석결과 프레임의 뒤면에서 67.5mm 의 최대 변형량이 발생하였고, 진수 및 인양 시 중앙 지지구조물과 하부면의 연결부위에서 407MPa 의 최대 응력이 발생하였다. 이는 CFRP 프레임의 평균 인장강도 599MPa⁽¹²⁾의 68% 에 해당하는 응력으로 약 32 % 의 안전여유도(safety margin)를 가지고 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 CFRP 프레임에 대한 구조해석 외에 프레임의 소재를 금속소재로 대체하였을 때

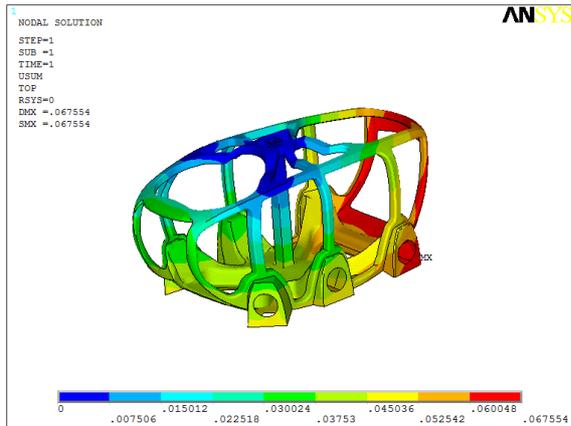


Fig. 6 Contour of deformation for CFRP body frame with reference posture(Load 100%)

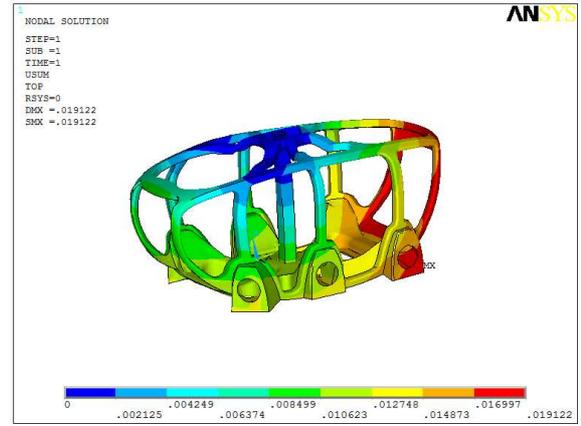


Fig. 8 Contour of deformation for Al. 6061 T6 body frame with reference posture(Load 100%)

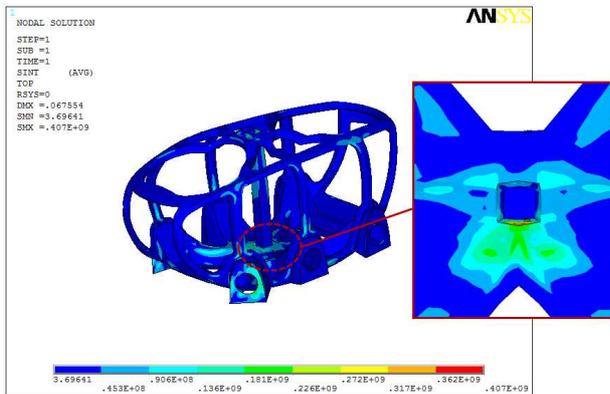


Fig. 7 Contour of stress for CFRP body frame with reference posture(Load 100%)

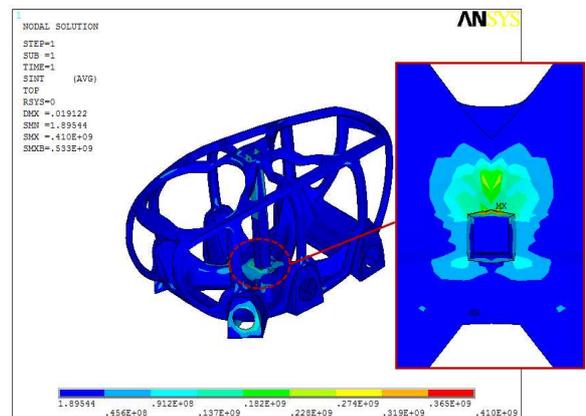


Fig. 9 Contour of stress for Al. 6061 T6 body frame with reference posture(Load 100%)

어떠한 변화가 있는지 비교해석을 수행하였다. 금속 소재는 항부식성이 우수하여 수중로봇 및 수중 구조물에서 많이 사용되는 알루미늄 6061 T6 로 정하고 동일한 조건에서 구조해석을 수행하였다. Fig. 8 과 9 는 동일한 조건의 해석에서 프레임의 재질을 알루미늄으로 바꾸었을 경우에 대한 결과이다. 하중 100 % 에 대하여 533 MPa 의 최대응력과 19.1 mm 의 최대 변형량이 발생하였고, 최대응력은 중앙 지지구조물의 하부면 연결부위에서, 최대 변위는 프레임의 뒤편에서 발생하였다. 이는 알루미늄 6061 T6 의 최대 인장강도인 310 MPa 을 초과하는 응력으로서 프레임이 하중을 견디지 못하는 것으로 간주할 수 있다.

Table 3 은 크랩스터의 진수, 인양 조건에 대하여 각 자세 별로 CFRP 와 알루미늄 6061 T6 로 재질이 적용된 프레임의 구조해석을 수행한 결과를 나타낸다. 표에서 보는 바와 같이 CFRP 프레임의 경우 하중의 150 % 까지 자세 별로 12.7 ~ 37.1 % 의 안전 여유도를 가지는 것으로 나타났다. 하지만 하중 200 % 에서는 안전 여유도가 자세에 따라 각각 -6.8%, -1.8%로 나타나 재료의 허용응력을 초과하기

때문에 구조적 안정성을 확보할 수 없었다. 변형량의 경우 자세 별로 64.1~79.7mm의 범위에서 존재하였고, 하중 200%의 경우 이미 허용응력을 초과하였기 때문에 큰 의미는 없는 것으로 생각된다. 알루미늄 6061 T6를 이용하여 수행한 비교해석의 경우 하중 100%에서 이미 허용응력을 초과하는 결과를 나타냈다. 이 결과로 볼 때, 크랩스터의 운용을 위해서는 프레임의 소재를 CFRP로 선정하는 것이 체적과 중량 대비 강도 측면에서 유리하며, 알루미늄 6061 T6의 소재를 이용하여 제작할 경우 설계 변경이 필요할 것으로 생각된다. 하지만 프레임의 설계를 변경하여 알루미늄 계열의 소재를 사용한다 할지라도, 설계 변경으로 인한 프레임 무게 증가나 구조변경은 액추에이터 용량 증가와 유체역학을 고려한 외관설계의 변경 등 추가적인 문제를 야기할 것으로 생각된다.

5. 결론

본 논문에서는 수심 200 미터급 다관절 복합이동 해저로봇 크랩스터에 사용된 탄소섬유 복합소

재 몸체 프레임에 대하여 진수 및 인양 조건에서 구조해석을 수행하였다. 구조해석의 신뢰성을 확보하기 위하여 프레임의 제작방법과 동일한 방법으로 시편을 제작하여 인장시험과 굽힘시험을 수행하여 탄소섬유 복합소재의 재료물성치를 구하였다. CFRP 프레임의 제작 특성상 셀요소를 이용하여 프레임의 유한요소모델을 구축하였고, 시편시험에서 얻어진 재료물성치를 이용하여 진수 및 인양 시의 하중조건에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 진수, 인양 시의 하중조건은 동적, 정적 부하조건을 포함하여 정의하였고, 불확실한 해상상황을 고려하여 기본 하중조건의 200 % 까지 적용하여 구조해석을 수행하였다. 또한, 기존의 ROV, AUV 에서 많이 사용되는 알루미늄 계열의 재료를 적용하여 동일한 하중조건으로 비교해석을 수행하여 탄소섬유 복합소재의 프레임이 구조적 우수성을 검증하였다. 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.

참고문헌 (References)

- (1) Shim, H.W., Jun, B.H., Lee, P.M., Baek, H. and Lee, J.H., 2010, “Workspace Control System of Underwater Tele-operated Manipulators on an ROV,” *Ocean Engineering*, Vol. 37, pp. 1036~1047.
- (2) Wernli, R. and Jaeger, J., 1984, “ROV Technology Update from an International Perspective,” *Proceeding of the MTS/IEEE OCEANS 84*, pp. 639~645.
- (3) Lee, P.M., Jun, B.H., Park, J.Y., Shim, H.S. Shim, Kim, J.S., Jung, H.S. and 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*, Vol. 1, No. 2, pp. 60~67.
- (4) Loebis, D., Sutton, R., Chudley, J. and Naeem, W., 2004, “Adaptive Tuning of Kalman Filter via Fuzzy Logic for an Intelligent AUV Navigation System,” *Control Engineering Practice*, Vol. 12, No. 12, pp. 1531~1539.
- (5) Jun, B. H., Shim, H.W. and Lee, P.M., 2011, “An Approximation of Generalized Torques by the Hydrodynamic Forces Acting on Legs of Underwater Walking Robot,” *International Journal of Ocean System Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 222~229.
- (6) Shim, H.W., Jun, B.H. and Lee, P.M., 2013, “Mobility and Agility Analysis of a Multi-legged Subsea Robot System,” *Ocean Engineering*, Vol. 61, pp. 88~96.
- (7) Jun, B.H., Shim, H.W., Park, J.Y., Kim, B.H., Lee, P.M., Kim, W.J. and Park, Y.S., 2011, “A New Concept and Technologies of Multi-Legged Underwater Robot for High Tidal Current Environment,” *Proc. of IEEE Symposium on Underwater Technology (UT), and 2011 Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)*, pp. 1~5.
- (8) Takahashi, H., Iwasaki, M., Akizono, J., Asakura, O., Shiraiwa, S. and Nakagawa, K., 1993, “Development of an Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection,” *the Report of the Port and Harbor Research Institute*, Vol. 31, No. 5, pp. 313~357.
- (9) Schmucker, A. and Inme, T., 1996, “Hexagonal Walking Vehicle with Force Sensing Capability,” *Proceedings of the International Symposium on Measurement and Control in Robotics (ISMCR)*, pp. 354~ 359.
- (10) Weidemann, H.J., Pfeiffer, F. and Elize, J., 1994, “Sixlegged TUM Walking Robot,” In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1026~1033.
- (11) Lin, P., Komosuglu, H. and Koditchek, D., 2005, “A Leg Configuration Measurement System for Full-Body Pose Estimates in a Hexapod Robot,” *IEEE Trans. On Robotics*, Vol. 21, No. 3, pp.411~422.
- (12) Yoo, S., Jun, B., Shim, H. and Lee, P., 2013, “Finite Element Analysis of Carbon Fiber Reinforced Plastic Frame for Multi-legged Subsea Robot,” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 27, No. 6, pp. 65~72.
- (13) Korean Industrial Standards M 3006, 2003
- (14) Korean Industrial Standards B 0804, 2001
- (15) Rules for Building and Classing : Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities, American Bureau of Shipping, 2010.