

# 강조류 악시계 환경 탐사용 다관절 해저로봇 크랩스터 (CR200)

조수간만의 차가 크고 지형이 복잡한 우리나라 서해안은 세계적으로도 보기 드문 강조류 환경이다. 잠수부의 안전을 위협하는 이러한 환경은 수중로봇의 접근도 쉽게 허락하지 않는다. 해저로봇 크랩스터는 이러한 특수한 환경을 조사하기 위해 고안된 수중보행로봇이다. 기존의 프로펠러 방식으로 달성하기 어려웠던 문제점을 크랩스터 로봇은 게나 가재와 같은 수중 생명체를 모방하여 극복하고자 했다. 크랩스터는 게나 가재의 기능을 모방함으로써 강조류 악시계 환경에서 유용한 두 가지 특징을 얻는다. 첫째는 해저에 밀착하여 자세를 제어함으로써 조류력을 이용하여 자세를 안정화시키면서 이동할 수 있다. 둘째는 조류 속에서 동요하지 않는 안정된 자세를 바탕으로 깨끗한 초음파 영상을 얻을 수 있다. 이는 강조류 환경에서 동반되는 부유물에 의한 악시계 환경을 극복할 수 있는 중요한 수단을 제공한다. 본 고에서는 이러한 개념에 따라 설계 개발된 크랩스터 CR200의 구성과 사양을 소개하고, 여기에 사용된 핵심기술을 살펴본다. 또한, 최근 수행된 CR200의 시험 결과에 대해서도 요약 소개한다.

## ■ 전봉환

(한국해양과학기술원)

### I. 서론

바다의 평균수심은 3800m로 지구에서 생명이 살 수 있는 공간의 99%를 차지하고, 심해는 이 공간의 85%를 차지하지만, 인간은 아직 심해의 1%도 관찰하지 못하였다. 또한, 지구상에는 아직 발견되지 않은 생명의 종의 수가 1000만~3000만 종으로 추산되며 현재까지 140만종만이 발견되었을 뿐이다. 아직 발견되지 않은 대다수의 종은 바다에 살고 있다. 이는 지난 25년간 심해에서 평균 2주에 한 종 꼴로 새로운 생명이 발견되었다는 사실이 반증해 주고 있다[1]. 또한, 육상 자원의 고갈에 따라 심해 석유 및 가스시추사업은 2002년 전체 석유생산량의 2%에서 2009년 8%로 매년 증가하고 있으며 2015년에는 15%에 이를 것으로 예상된다. 이처럼 해양의 탐사가치는 거대하지만, 위험한 해양 환경은 인구가 쉽게 접근할 수 있도록 허용하지 않는다. 이러한 문제점에 대한 대안이 수중로봇이라 할 수 있다. 수중로봇은 인간을 대신하여 바다 속을 탐사해 주는 중요한 역할을 수행해 오고 있지만 해중의 탐사가치에 비하면 개발되어 있는 로봇의 종류와 수는 턱없이 부족하다.

수중로봇의 중요성은 심해 탐사와 개발에만 국한되는 것은

아니다. 우리나라 연근해 200m 이내의 수심에서 요구되어지는 해저작업은 크게 네 가지로 나누어 볼 수 있다.

첫째는 해난구조와 방제이다. 2012년 우리나라 해역에서는 총 726건의 해양사고가 발생하였으며 26척의 선박이 침몰하였다[2]. 선박이 침몰할 경우, 초기 인명 구조와 탐사작업이 필수적이고, 유류유출 등에 대한 지속적인 감시가 필요하지만 침몰선 주위의 로프와 그물 등의 장애물은 잠수정의 접근을 제한하고 있다. 2010년 3월 26일 백령도 근처 해상에서 발생한 천안함 침몰사건은 서해안 해저작업의 위험성과 어려움을 재확인 시켜준 사건이다[3].

둘째는 연안 탐사와 과학조사이다. 연안의 해저 지형 탐사와 그 결과를 이용한 해저 정밀 지형도 작성, 해저 고고학 연구와 유물 탐사, 그리고 연안 해양 생태계의 조사 연구 등도 연근해에서 이루어져야 하는 중요한 작업들이다.

셋째는 해저 교량, 플랜트 등 해저 구조물의 유지보수이다. 전국 하천과 연안에 설치된 교량과 댐 등을 비롯한 해저 구조물의 침식과 그 주위의 세굴은 이용자들의 안전을 위해 매년 조사되어야 한다. 해저 매설 케이블이나 해저에 설치되는 다양한 플랜트들의 설치와 유지보수 또한 연안에서 이루어지는 중요한 작

업들이다.

넷째는 군사적 목적으로 이루어지는 작업들이다. 해저에 설치된 기뢰를 탐색·제거 하는 일 등 해중 군사작전을 지원하는 것이다.

이상과 같은 연안의 해저작업들은 주로 잠수부와 수중로봇에 의해 이루어진다. 질소(79%)와 산소(21%)의 혼합 압축공기를 사용하는 스쿠버 장비를 이용할 경우 무감압 잠수의 한계 수심은 40m이고, 무감압 잠수 체류시간은 5분 이내이다. 또한 10℃이하의 수온에서와 1노트 이상의 조류에서는 잠수를 피하도록 권고하고 있다. 해수표면에서 생명줄을 통해 공기를 공급 받는 표면공급잠수의 경우 60m까지 잠수가 가능하고, 산소와 헬륨 혼합기체를 사용할 경우, 60~100m 수심까지 잠수한다. 그러나 이러한 잠수방식은 질소마취, 기체색전증, 감압병, 저체온증 등 잠수병에 대한 위험요소를 항상 갖고 있다[4].

우리나라 연근해에서 사용되는 수중로봇은 원격무인잠수정(ROV)과 유인잠수정이 있다. 원격무인잠수정은 침몰선 조사와 관리를 위해 캐나다 ISE에서 도입하여 운용되고 있는 한국해양과학기술원의 HYSUB와 해군에서 운용중인 기뢰제거 무인잠수정(MDV)이 대표적이며, 최근 건조된 통영함에도 중작업용 ROV를 도입하였다. 이 밖에도 여러 기관에서 소형 ROV를 도입하여 자체 운용하고 있다. 유인잠수정은 해군 SSU 구조대에서 운용하고 있는 잠수함 구난용 잠수정(DSRV)와 서브씨테크에서 운용중인 패스파인더호가 있다. 그러나 이들의 최대 속도는 2~3노트 정도로 1노트 이상의 조류에서는 작업이 어려우며, 조류가 센 우리나라 서해안에서는 그 사용이 극히 제한적이고, 시계가 나쁜 환경에서는 더욱 제한적이다. 기존 해저작업의 기술적 한계는 다음과 같이 요약된다.

- ① 안전성 : 다이버가 직접 작업에 참여하는 경우, 잠수병을 비롯한 여러 가지 위험요소에 의한 안전문제가 있다.
- ② 작업시간 : 다이버가 작업할 경우 무감압 작업시간은 21m 수심에서 30분, 40m에서는 5분으로 제한된다.
- ③ 조류 : 조류의 방향은 하루에 네 번씩 바뀌고, 우리나라 서해안은 조류에 의한 최대 유속이 3노트에서 7노트에 달한다. 다이버는 물론 수중로봇에 있어서도 조류는 가장 극복하기 어렵고 위험한 대상이다. 프로펠러를 이용하는 기존의 잠수정은 강한 조류 환경에서 불안정한 조종성과 높은 에너지 소모 등의 문제를 갖는다.
- ④ 악시계 : 서해의 특성중 하나는 짧은 시계이다. 지역과 날씨에 따라 차이가 있으나 시계가 불과 20~30cm에 불과한 곳도 많다.

④ 장애물과 불규칙 해저지형 : 해저는 침몰선, 어장, 로프, 폐그물 등 각종 장애물과 암초 등 불규칙한 해저지형이 항상 존재하고 있어 다이버와 수중로봇의 작업을 방해하고 심지어는 생명을 위협한다.

⑤ 환경간섭 : 프로펠러나 캐터필러 방식의 해저로봇은 필연적으로 해저면을 교란시킨다. 해저조사의 경우, 교란되지 않은 환경에서 이루어져야 하는 조사가 많다.

기존의 천해역 해저작업 기술 중 로봇(무인잠수정)을 이용하는 기술의 가장 큰 한계는 강조류와 악시계의 극복으로 요약될 수 있다. 해미래(L3.3m×W1.8m×H2.2m)[5][6][7]의 경우 2노트의 조류에서 약 200kg의 저항력을 받으며, 200m 길이의 지름 20mm 케이블은 약 240kg의 저항력을 받는다. 이를 극복하기 위해 추력을 증가시키는 것은 전체 중량과 크기의 증가로 이어져 근본적인 해결책이 되지 못한다.

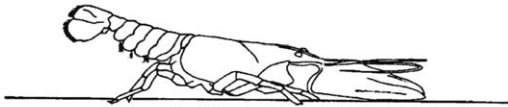
이에 기존의 프로펠러 방식으로 해결하기 어려운 문제의 해결방법을 유사한 환경에서 살아가는 생명체로부터 찾아보기로 하였다. 게는 파도에 의한 해수 유동이 존재하는 해변에서 살아간다. 파도와 함께 바닷물이 밀려들어올 때 게는 자세를 낮추어 바닥에 엎드림으로서 물살에 쓸려가지 않는다. 물살이 센 곳에 사는 가재는 머리를 낮추고 꼬리를 치켜 들어 유체 저항력을 줄이고 바닥의 접지력을 높임으로써 물살에 날려가지 않는다(그림 1)[8]. 게나 가재가 능동적으로 자세를 제어하지 않는다면 이들은 금방 뒤집어져 물살에 날려가 버리고 말 것이다. 이들을 모방한 로봇은 이들과 같이 몸의 자세를 제어하면서 이동할 수 있는 형태의 다관절 다족 보행로봇의 형태가 되었다 [8][9][10][11][12].

해저보행로봇 관련 선행연구사례로 Joseph 등은 생체모사 연구의 일환으로 가재로봇을 연구했다[8]. 가재의 기구학적 구조와 걸음걸이를 분석하였고, 인공근육 액츄에이터와 명령뉴런에 기초한 중앙제어기를 구현하였다. 개발되고 있는 로봇은 실제 작업용 보다는 생체모사 인식 및 보행 연구에 초점을 두고 있다. Tanaka 등은 해안선을 조사할 목적으로 6족 보행 로봇에 대해 연구하였다[13]. 방수형 수중관절을 개발하였고, 여러 차례에 걸쳐 로봇을 개선하여 경량화 하였다. 그러나 육상의 로봇을 수중으로 확장하는데 초점을 두고 있어 유체역학적 관점에서 외란에 대한 능동적 제어 등의 적극적인 접근은 고려하지 않았다. Christina 등은 6개의 패달을 가진 수륙양용 로봇을 개발하였다[14][15]. 패달을 이용하여 보행과 수영을 하도록 설계하였지만, 각 패달은 1자유도의 단순한 형태로 이동성에 초점을 두었고 몸체의 정교한 자세제어는 불가하였다. 국내에서는 수

a. Slow Currents



b. High Currents



c. Backward Currents

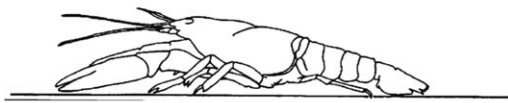


그림 1. 유체의 흐름에 대한 가재의 자세제어(8).

중보행로봇 관련 연구사례가 거의 없다. 그러나 최근 휴머노이드 로봇[16]의 다관절 다족 보행 기술이 급격히 발전하였고, 해미래가 5775m 심해 잠수에 성공하는 등 기반기술이 확보되었다[5][6][7][17].

본 연구에서 개발하려는 해저로봇의 개념은 육상의 곤충들과 같이 단순 보행기능으로만 그치는 것이 아니라, 마치 게(crab)와 가재(lobster)가 해저면에서 유체력에 대응하며 이동하고 작업하는 형태와 유사하여 로봇의 이름을 크랩스터(crabster)라고 명명하였다. 첫 번째로 개발되는 크랩스터는 우리나라 연근해 200m 수심까지의 해저를 조사하는 것이 주목적이며 특히, 조류(tidal current)가 세고 시계(visibility)가 짧은 서해안의 환경에서 작업할 수 있는 기술의 개발에 초점을 두고 있다. 본고에서는 지금까지 개발된 크랩스터의 구성과 주요기술 그리고 실험 결과를 소개한다.

## II. 크랩스터 CR200의 구성

### 1. CR200 사양과 제원

개발된 CR200의 외형은 그림 2에 나타내었다. 해저로봇의 몸체는 장비들을 탑재할 수 있도록 충분한 공간을 확보하면서 유체역학 특성을 개선하기 위해 유선형을 유지하도록 설계하였다[18]. 몸체의 외곽은 부드러운 곡면 형상을 갖는 유리섬유강화플라스틱 (Glass Fiber Reinforced Plastic; GFRP)으로 만들어진 스킨을 장착하였다[19]. CR200은 견마형이 아닌 게나 거미와 같은 형태(sprawling type)의 보행로봇이다. 몸체 아래 양 옆으로 여섯



그림 2. 다관절 해저로봇 CR200의 외형그림.

표 1. 크랩스터 CR200의 사양.

Items	Sub items	Specifications
Dimension	Length of body	2.42m
	Width in stow posture	2.45m
	Height of body	1.16m
	Max. height of robot	2.0m
	Max. weight	500kg(including payload)
Number of legs	Dedicated walking legs	4 legs with 4 DOF
	Legs with manipulator	2 legs with 6 DOF
Max. specifications	Walking speed	0.5 m/sec(1.8km/h)
	Operating depth	200 m
	Enduring speed of current	2 knots
	Power consumption	Less than 20kW
Sea states ability	Operating condition	Sea state 3
	Survival condition	Sea state 4
Low visibility inspection	Range of forward looking sonar	200m
	Range of real-time sonar	15m
Position accuracy	Absolute accuracy	Less than ±2m
	Relative accuracy	Less than ±0.1m
Control		Remote control via tether cable
Power supply		Via tether cable
Equipment	acoustic camera, scanning sonar, ADCP, CTD, AHRS, USBL, alt. sonar, tool sled, pan/tilt optical HD camera, analog cameras, contact force sensors	

개의 다리를 좌우로 각각 세 개씩 배치하였다. 공기중과 달리 수중에서 로봇은 부력을 받으므로 중력에 의한 에너지 소모를 줄이면서 안정성을 개선할 수 있다. CR200의 전체 길이는 2.42m, 폭은 다리를 포함하여 2.45m이며, 다리의 길이는 1.32m이다. 몸체의 높이는 약 1.16m이고 로봇이 일어섰을 때의 최대 높이는 2.0m이다. 공기중 총 중량은 약 600kg, 수중중량은 약 200kg이다. 기본 제원과 사양은 표 1에 정리하였다. CR200은 유속이 있는 환경에서 임무를 수행하기 위해 표 1에 나타난 것과

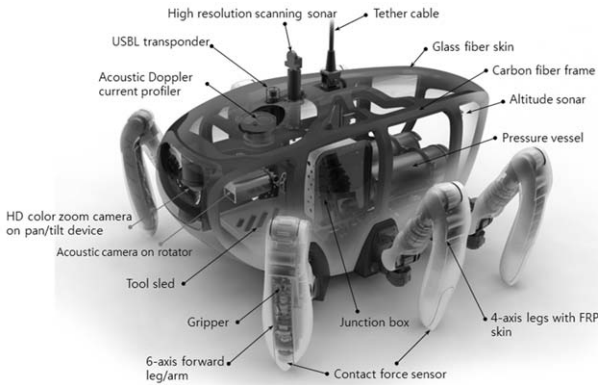


그림 3. 크랩스터 CR200의 장비 배치도.



그림 5. CR200의 원격제어실 내부 모습.

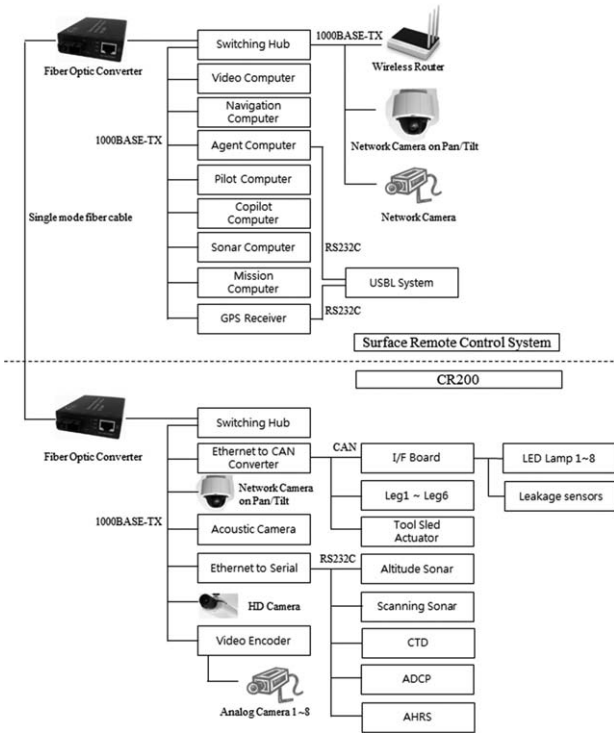


그림 4. 원격제어실과 CR200의 통신 인터페이스.

같이 다양한 센서를 장착한다. 그림 3은 CR200의 장비 배치를 보여준다.

전기 및 통신 시스템은 두 개의 압력용기에 나누어 탑재되고, 두 개의 분전함이 몸체의 양쪽에 위치한다. 분전함은 압력용기로부터 나오는 전원과 신호선을 다리, 센서, 카메라, 조명 팬/틸트장치 등 각 장비들로 분배한다[20]. 층별 유속을 측정하기 위한 초음파 유속계와 로봇의 수중위치를 측정하기 위한 초단기선 리스폰더(USBL)가 몸체의 윗 쪽에 장착되었다. 로봇 주위의 약시계 환경을 스캐닝하기 위해 몸체 최상단에 스캐닝 소나를

장착하였다. 실시간 수중 관측을 위해 HD 줌 카메라와 초음파 카메라가 설치하였고, 여덟 대의 광학 카메라와 10대의 LED 조명 등을 몸체 주위의 관측을 위해 설치하였다. 이들의 통신 인터페이스 및 원격 제어실과의 연결은 그림 4에 다이어그램으로 나타내었다.

## 2. 원격제어실

CR200에 장착된 모든 장비들은 원격제어실에서 모니터링하고 제어된다. 원격제어실은 20피트 표준 컨테이너 내에 설치되고 총 7대의 컴퓨터와 9대의 모니터 그리고 전원 및 통신 장비들로 구성된다. 리눅스와 윈도우 기반으로 CR200을 실시간 제어함과 동시에 편리한 사용자 인터페이스 기반을 제공한다. 원격제어시스템과 CR200은 광으로 통신하며 제어실 내부와 CR200 내부의 컴퓨터들은 각각 1기가 랜으로 지역 통신한다[21]. 비디오를 포함한 모든 신호는 디지털화하여 노이즈의 영향을 최소화하였다. 리눅스 기반의 에이전트 컴퓨터는 실시간 제어를 담당하고, 구조종 및 보조종 컴퓨터는 그래픽사용자 인터페이스와 조이스틱 인터페이스를 제공한다. 비디오 컴퓨터는 CR200과 모선에 위치한 모든 카메라 영상을 디스플레이하고 저장한다. 항법컴퓨터는 GPS와 USBL로부터 전달되는 CR200과 모선의 위치를 지도 위해 표시함과 동시에 목표지점과 출발점 등의 정보를 동시에 표시하여 목표지역의 조사 관측에 필요한 계획틀들을 제공한다. 소나컴퓨터는 초음파카메라와 스캐닝 소나의 이미지를 표시하고 이들 장비를 설정한다. 과학용 컴퓨터는 미래에 장착될 장비를 위한 여유 컴퓨터이다.

에이전트 컴퓨터는 CR200에 주기적으로 피드백을 요청하고 피드백 정보는 네트워크를 통해서 다른 컴퓨터와 공유한다. 피드백 데이터와 사용자 명령을 이용하여 각 다리 관절의 동작 명령

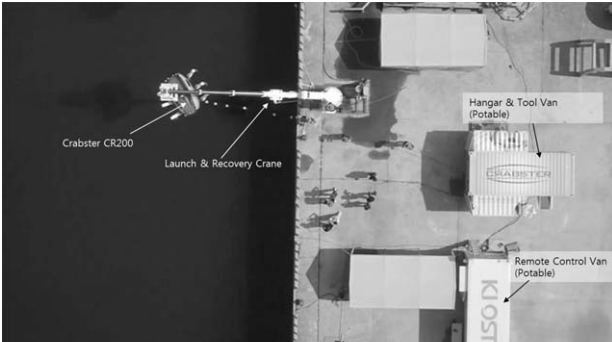


그림 6. CR200의 지원장치들.

을 생성하여 CR200에 전송한다. 제어 명령은 압력중심제어와 전복안정성[18][22] 기준에 따른 보행 알고리즘 기반으로 연산된다. 연산알고리즘은 발끝의 접촉력, 유속, CR200의 운동 정보 등으로부터 환경외력을 추정하고 자세 및 보행 안정화 제어를 100 Hz 주기로 수행한다[23][24]. 수중에 있는 CR200과 다리의 자세는 제어실 내의 가상 그래픽 모델에 재현된다. 그래픽 모델은 CR200의 자세와 관절각도 정보를 단순 디스플레이 하기도 하고 수치 모델과 연계되어 동역학 시뮬레이션 기능을 제공하기도 한다. 그림 5에 제어 및 모니터링 시스템이 탑재된 원격제어실 내부의 모습을 보인다.

### 3. 기타 지원장치

수중로봇은 주로 육상과 격리된 해상에서 모선이나 바지선에서 진수, 원격 조종 및 인양 된다. 따라서 별도의 지원장치가 필요한데, CR200은 진수/인양용 크레인과 케이블 및 윈치드럼을 전용으로 갖고 있다. 크레인은 9.8m 폴리치에서 1.3톤의 인양 용량을 가지며, 윈치는 CR200의 500m 테더 케이블을 2톤의 인장력으로 감아서 보관할 수 있다. 테더케이블은 CR200에 전원을 공급하고 원격제어실과 CR200을 광통신으로 연결해 주며 10톤의 인장력을 견디도록 설계되었다. 크레인/윈치 시스템은 이동 가능하도록 설계 제작하여 로봇과 함께 탐사 해역으로 이동한다.

CR200은 육지와 격리된 거친 해상에서 장시간 운용되는 시스템으로 자체 유지보수 지원시스템으로 격납고 및 공구실을 갖고 있다. 이들의 모습이 그림 6에 나타내었다.

## III. CR200의 주요기술

### 1. 경량화 기술

수중로봇의 설계 중량은 로봇의 구동장치 뿐 아니라 지원장치의 용량과도 연계되어 전체 시스템의 규모를 결정하는 중요

표 2. CR200 프레임 소재 시편시험 결과의 알루미늄과 비교.

Parameter	CFRP	6060 T6
Specific stiffness [Mpa/kg]	936	621
Specific strength [Mpa/kg]	11.064	2.489



그림 7. 제작된 CR200의 탄소섬유 프레임.

한 인자이다. CR200이 수중에서 임무를 수행하기 위한 충분한 패이로드를 확보하면서 육상 보행이 가능하도록 하기 위해서는 몸체의 감량이 필요했다. 무인잠수정이나 수중로봇의 제작 시에는 비강도와 내식성이 우수한 알루미늄 6061 소재가 주로 이용되고 있지만, CR200의 경우 육상 보행을 위해 필요한 추가 감량을 위해 복합소재를 도입하였다. 몸체를 지지하는 프레임은 탄소섬유강화플라스틱 (Carbon fiber reinforced plastic; CFRP)을 이용하여 내력구조의 골격 형상으로 설계·제작하였다. 프레임은 진공, 가압, 열 성형 방법인 오토클레이브 방식으로 제작하였으며, 적층방법이나 제작공법에 달라질 수 있는 강도를 확인하기 위해 시편시험과 구조해석을 수행하였다[25]. 시편시험 결과 CR200에 사용된 CFRP는 알루미늄 6061 T6에 비해 비강성은 약 1.5배, 비강도는 4.4배 높은 것으로 나타났다. 그 결과는 표 2에 정리하였고 제작된 프레임의 모습은 그림 7에 나타내었다. 시편시험결과를 바탕으로 수행된 구조해석 결과, 프레임은 4개의 고유진동주파수를 가지는 것으로 나타났고, 하중 상태에서의 변형과 응력 모두 허용치의 5% 이하로 나타났다. CR200의 프레임은 복합소재 기술을 도입함으로써 알루미늄소재를 사용할 경우에 비하여 30~40% 정도의 중량을 감소하였다. 메인 프레임 외에도 부가되는 보조 프레임과 센서 등의 장착 기구들도 카본 섬유로 제작하였다. 몸체 및 다리의 외피와 정션박스는 유리섬유강화플라스틱으로 제작하여 기존 알루미늄 대비 중량을 감소하였다.

### 2. 수중 다관절 메커니즘

강조류 환경에서 외력에 대응한 자세유지와 로봇팔 작업, 그리고 안정적 보행을 보장하기 위해 CR200은 총 30개의 관절로

표 3. 수중관절의 요구기능과 접근방법.

요구기능		접근방법
기계 분야	내압 수밀	- 모터/기어/베어링 통합 방수 관절 모듈 개발 - 모든 배선의 방수구조 내부 내장
	방식	- 방식 소재 사용 - 유적 방식에 의한 방식 효과 - 희생양극에 의한 방식 설계
	백래쉬	- 하모닉드라이브 채택
	경량화	- 구조해석 기반 최적 설계 - 경량 고강도 복합소재 채택
	유체력 특성	- 유체력특성 개선을 위한 형상 설계 - 유체력 최적화를 위한 여유 관절
전기 분야	고출력	- 저속 고토크 BLDC 모터 채택 - 해수와 기름에 의한 방열 구조
	각도 피드백	- 마그네틱타입 증분 엔코더 채택 - 전기식 절대 엔코더 채택
	제어 분야	고장 대책/ 안전 - 컴플라이언스 관절 제어 - 관절 수밀의 정상여부 모니터링

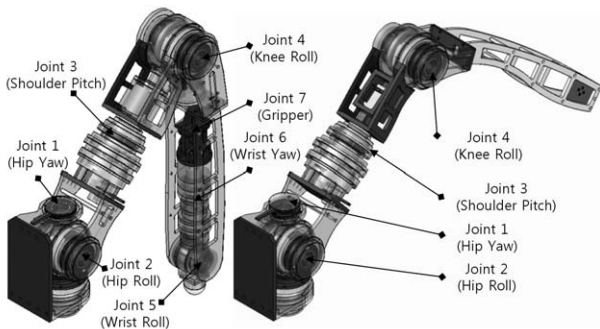


그림 8. CR200의 로봇팔겸용다리와 전용다리 설계 결과.

이루어진 여섯 개의 다리를 가진다[1]. 이들을 구성하는 수중 관절의 설계 및 제어 기술은 크랩스터의 개발에 필요한 중요한 기술 중 하나이다. 육상의 다족 또는 휴머노이드 로봇 분야에서 개발되고 검증된 관절 기술을 바탕으로 하고, 수밀, 방식 및 유체력 특성 등을 고려하여 수중 적용으로 확장하였다 [26][27][28]. CR200에서 필요한 관절의 8가지 기능과 이들을 구현하기 위한 접근 방법을 표 3에 나열하였다. CR200의 로봇팔 및 다리의 설계 결과의 3D 모습은 그림 8에 나타내었다.

### 3. 다관절을 이용한 자세제어 및 다족보행기술

CR200은 6족 로봇으로 기본적으로 정적보행이 가능하고, 앞 두 다리가 로봇팔로 사용될 경우도 4족 정적보행이 가능하다.

CR200은 해저의 불규칙한 지형에서 이동하고 조류와 같은 외란이 작용할 경우에도 전복안정성[18][22]을 유지하여야 한다. 이를 위해 COP (Center of Pressure) 기반 자세 및 보행 안정화 알고리즘을 적용하였다[29]. 임의의 외란에 대해 발끝 센서로부터 얻어지는 압력 중심을 발끝지지 다각형의 중심에 위치시키도록 제어한다. 불규칙 지형을 감지 및 극복하기 위해 여섯 개의 다리 발 끝에 접지력 센서가 장착되어 있다. 이로부터 접지 시점과 위치를 검출하고 실시간으로 보행 패턴을 보상한다. CR200의 자세제어 및 다족보행 알고리즘은 CR200에 적용하기 이전에 구현 검증하기 위해 2:1 축소 모델 LCR200을 개발하였다[30][31]. LCR200은 CR200과 기구학적 구조가 동일하지만 동특성에는 차이가 있으므로 이를 사전에 예측하기 위해 CR200의 수치모델을 제작하여 보행 시뮬레이션을 사전에 수행·검증하고 있다.

### 4. 조류하중 모델링 및 극복기술

CR200이 조류를 극복하는 원리는 게나 가재의 행동과 유사하다. 1차적으로는 유속이 상대적으로 낮은 해저에 밀착한다. 2차적으로는 조류의 방향으로 몸의 방향을 일치시키고 몸체에 작용하는 조류하중의 방향이 해저면을 향하도록 자세를 제어한다. 이를 위해 몸과 팔의 자세에 따른 조류하중을 추정해야 하며 이를 전복안정성에 반영하여야 한다. CR200의 조류하중은 전산 유체역학기술로 추정하여 모델링하였고[32], 추정된 조류하중 조건을 이용하여 조류환경에서 전복안정성을 도출하여 해석하였다[11][18]. 그림 9에 조류하중 추정결과의 한 예로서 피치각 변화에 따라 추정된 조류하중을 나타내었고, 그림 10에 이를 기반으로 전복안정성해석을 수행한 결과를 나타내었다. 이는 해저로봇의 조류극복 자세제어와 보행알고리즘에 활용된다.

해저로봇의 다리가 수중에서 움직일 경우 받게 되는 유체력을 효과적으로 이용하는 기술 또한 해저로봇의 성능향상에 필수적인 기술이다[33]. 링크에 작용하는 유체력은 전산유체역학 해석이나 실험에 의해 얻을 수 있고, 이를 이용한 최적화 및 제어 기술이 필요하다[17]. CR200의 다리 링크에 작용하는 유체력은 전산유체역학 해석에 의해 얻어졌다[32]. 유체력의 최소(최대)로 하기 위한 관절 경로는 유전자 알고리즘에 의해 계산하여 유체력을 이용하는 유영 동작의 생성에 활용하였다[17][34].

### 5. 악시계 극복기술

우리나라 서해안의 시계는 날씨에 따라 50cm가 채 안되는 경우도 많다. 짧은 시계 환경을 탐사하기 위한 장비를 갖추고 이

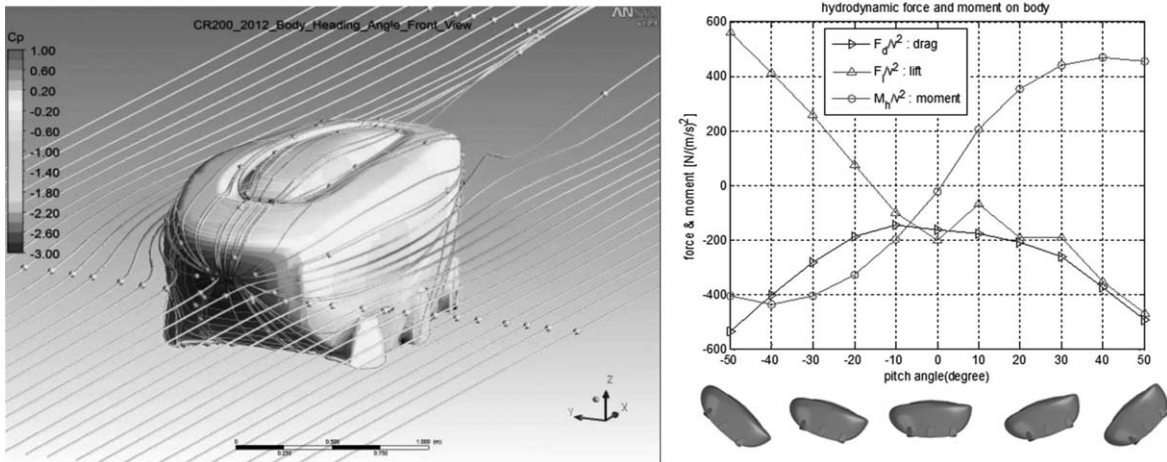


그림 9. 몸체의 전산유체역학해석 및 피치각도에 따른 결과 예.

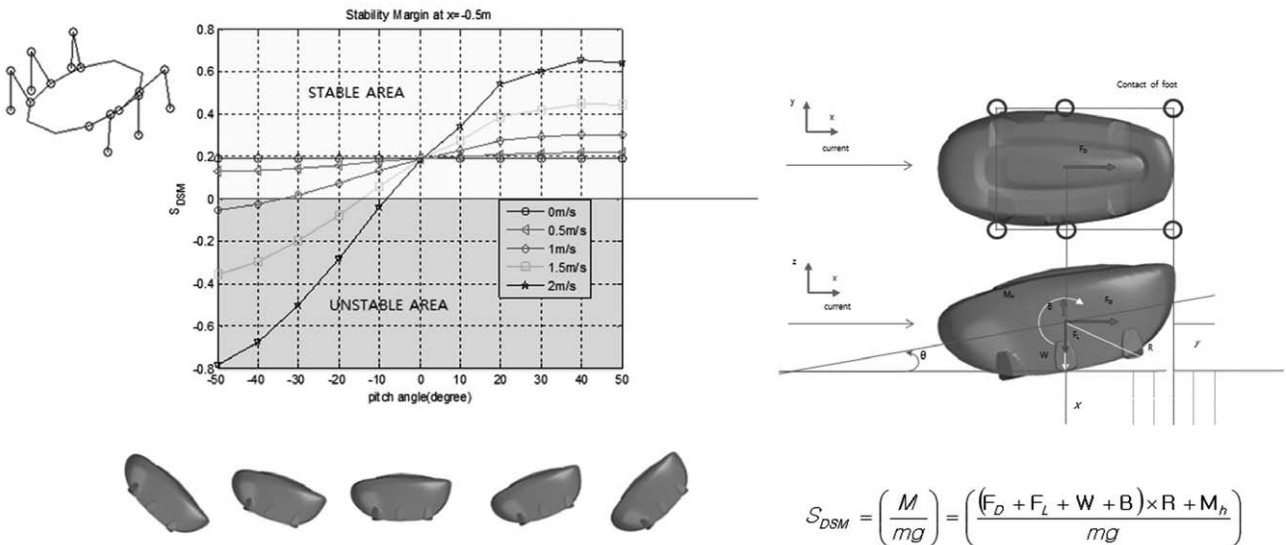


그림 10. 유체력을 고려한 전복안정성 해석 예.

를 효과적으로 활용하는 것 또한 해저로봇의 중요한 기술 중 하나이다. CR200은 10대의 광학카메라 이외에도 음향을 이용한 두 종류의 시각 장비를 장착하고 있다. 첫째는 스캐닝 소나로 최대 150m 반경의 해저 이미지를 준 실시간으로 얻는 장비이며 또 하나는 초음파 카메라로 15m까지 실시간 영상을 얻는 장비이다. 이들 초음파 장비는 크랩스터 플랫폼에서 제공하는 안정된 자세 및 자유도와 연계하여 보다 깨끗한 이미지를 얻는 것이 가능하고, 얻어진 이미지는 모자이킹 등 후처리를 거쳐 사용자들에게 제공된다.

스캐닝 소나를 이용한 악시계 극복 개념은 CR200에 장착될 초음파 스캐닝 소나를 이용한 사전 시험을 통하여 확인하였다 [35][36]. 그림 11은 스캐닝소나를 이용하여 거제 장목 부두 해저

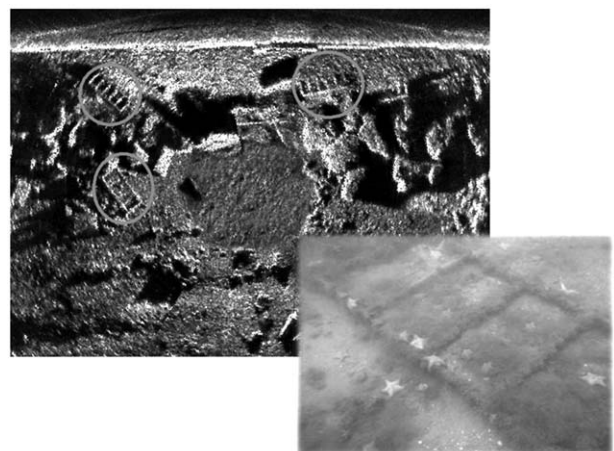


그림 11. 스캐닝 소나를 이용한 해저식별 시험.



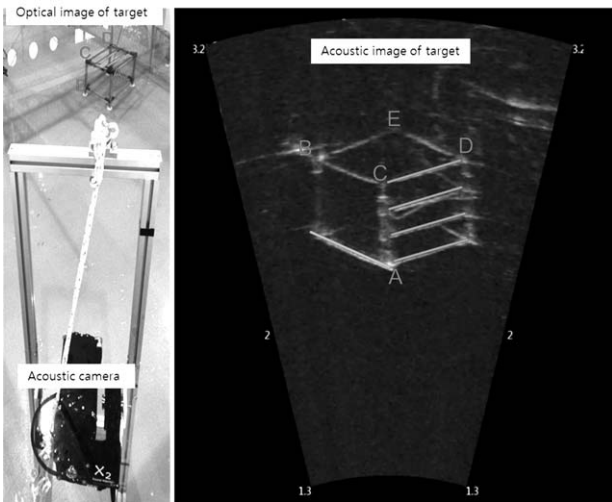


그림 12. 광학영상과 초음파 영상의 비교.

에서 여러 개의 사다리를 식별한 예를 보인다. 우측 아래에 함께 도시된 사진은 실제 잠수부가 내려가서 확인을 위해 촬영한 광학영상이다. 초음파 카메라를 이용한 실험에서는 수조에서 육면체 프레임의 인식 실험을 진행하였다. 그림 12에는 광학영상과 초음파 카메라 영상을 비교하여 도시하였다. 초음파영상은 광학영상에서 보이는 것과는 다름에 주의해야 한다[37].

#### IV. CR200 시험결과

설계 개념에 따라 제작된 CR200은 2013년 6월24일부터 7월12일까지 한국해양과학기술원 남해연구소에서 시험을 진행하였다. 본 장에서는 수중시험 이전에 진행된 공기중 시험과 입수후 진행된 수중시험을 나누어 소개한다.

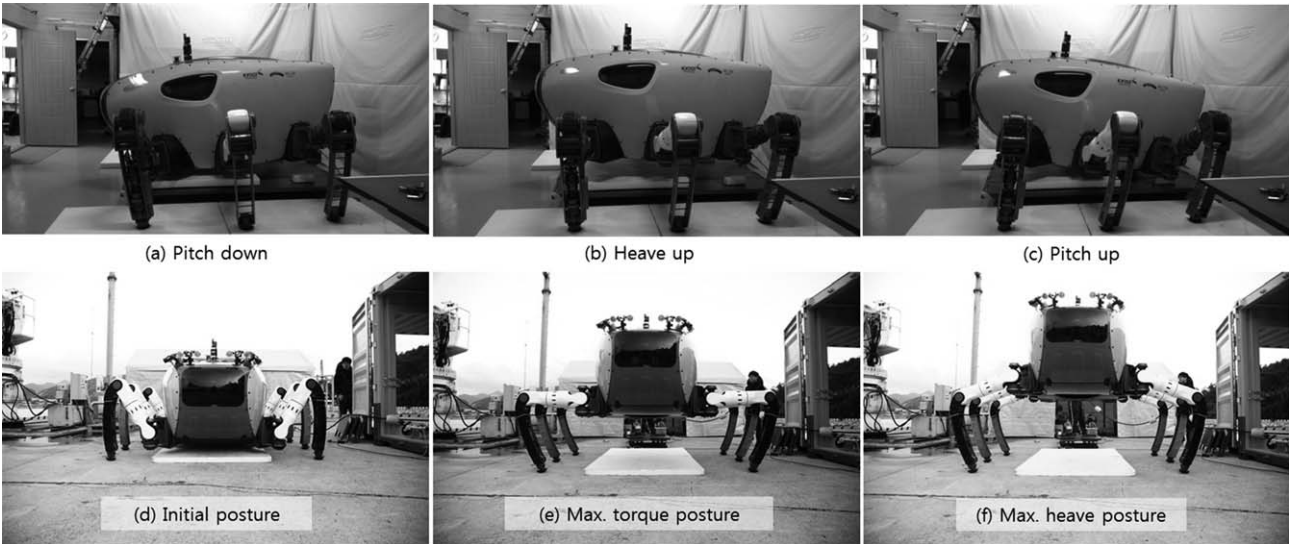


그림 13. CR200의 자세제어 시험.

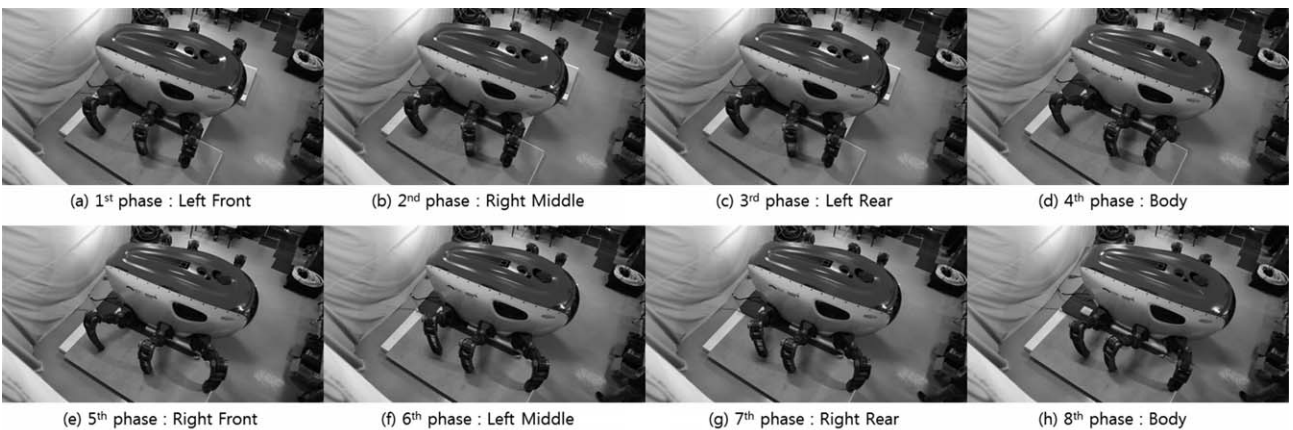


그림 14. CR200의 이산 8상 걸음새 제어.



### 1. 공기중 시험

공기중 시험은 크랩스터의 개념에 따라 개발된 CR200의 기능이 잘 동작되는지 확인하는 과정으로 수행되었다. 공기중 시험에서 가장 주목할 것은 30개의 수밀 관절로 이루어진 6개의 다리와 팔이 설계 성능을 제대로 발휘하느냐와 통합제어 알고리즘이 장비들 간의 통신 상에서 문제없이 잘 동작하는지의 여부였다. 먼저 6족 지지 상태에서 몸체의 자세를 변화하는 실험을 수행하여 모든 관절이 정격운전 범위 내에서 자세 변환 임무를 수행할 수 있음을 확인하였다. 그림 13은 몸체의 피치(pitch)각도와 수직방향(heave) 위치 제어 시험 중에 있는 CR200의 모습을 나타낸다. 수직방향 자세제어 변화과정에서 무릎관절의 최대 토크점이 있다. 보행 실험은 크랩스터의 최초 보행방법으로 선정된 6족 불연속 8상 걸음세 제어 방법을 사용하였다[38]. 이 걸음세는 전복안정성을 가장 높게 유지할 수 있고, 무엇보다 보행과정에서 조작자의 판단을 개입시킬 수 있어 미지의 영역을 탐사하기에 가장 적합한 방법이다. 그림 14는 육상에서 수행된 이산 8상 보행과정을 나타낸다. 앞 두 다리가 로봇팔로 사용되는 경우에 대해 10kg의 중량을 들어 올리는 가반하중 시험을 수

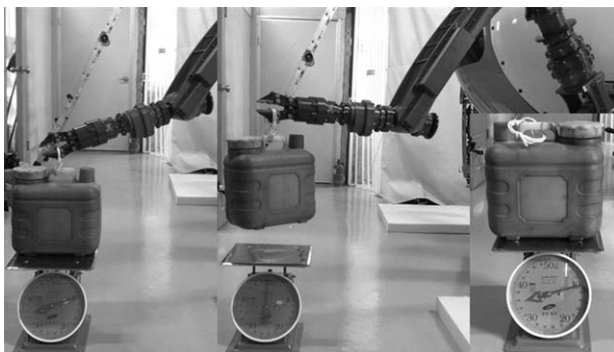


그림 15. 로봇팔 10kg 가반하중 시험.



그림 16. 수중시험을 위해 첫 입수하는 CR200.

행하였다. 그림 15에 로봇팔의 가반하중 시험 장면을 나타내었다. 그 외 CR200에 장착되는 모든 장비의 통신 시험을 수행하여 수중시험 전 동작 점검을 성공적으로 마쳤다.

### 2. 수중시험

CR200의 입수후 시험은 2013년 7월 3일부터 10일 까지 거제장목의 한국해양과학기술원 남해연구소에서 수행하였다. 그림 16은 크레인에 의해 바다로 입수하는 CR200의 모습을 나타낸다. 입수 후 다음과 같은 순서로 CR200의 수중작동 상태와 기능을 확인하였다. 1) 30개의 다리관절을 비롯한 내압수밀 장치들의 수밀성, 2) 스캐닝 소나를 이용한 CR200 100m 반경 내 지형 및 구조물의 식별과 CR200 자세 변화에 대한 영향 분석, 3) 초음파카메라를 이용한 15m 전방 물체 식별, 4) 광학카메라 및 LED 조명을 이용한 해저 물체 식별, 5) GPS 및 USBL연동 수중 위치 추적, 6) CTD (Conductivity Temperature Depth) 데이터 취득, 7) 6족을 이용한 몸체의 자세제어 및 보행 이동, 8) AHRS (Attitude Heading Reference System)를 이용한 자세의 계측. 그림 17은 스

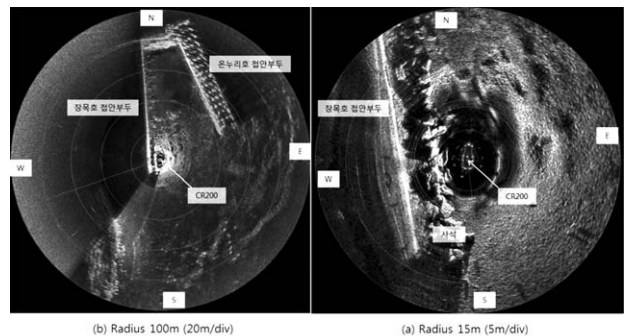


그림 17. CR200에 장착된 스캐닝 소나 취득 영상.

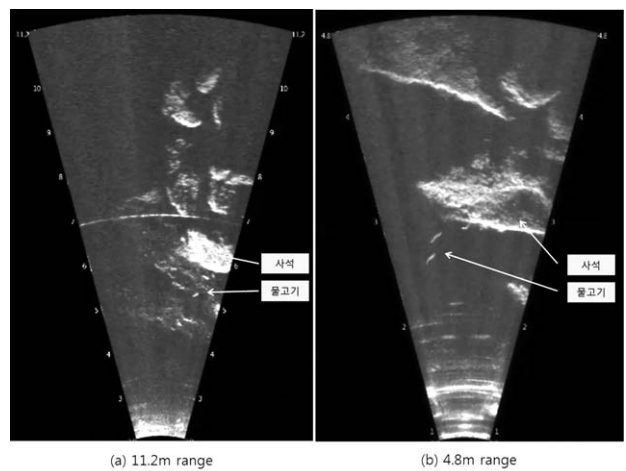


그림 18. CR200에 장착된 초음파 카메라 영상.



그림 19. CR200 광학 카메라 영상.

캐닝 소나를 이용하여 CR200의 주변을 스캐닝한 영상이다. 100미터 반경영상(a)에서 온누리호가 접안하는 부두와 부두를 떠받치는 파일 등 해저 구조물의 모습이 선명하게 나타났다. 15미터 반경 영상(b)에서는 CR200 자신의 모습과 서쪽으로 장목호 접안 부두의 기초공사로 축조된 해저 사석들의 모습이 선명하게 나타나 있다. 그림 18에 나타낸 초음파 카메라 영상에서는 스캐닝 소나 영상에서 확인했던 사석과 함께 그 주위로 물고기가 헤엄치는 모습이 선명하게 관찰되었다. 그림 19에 나타난 광학 이미지 영상에서는 사석에 부착된 수중 부착물과 불가사리 그리고 물고기의 종류(블락)를 식별할 수 있었다. 이때의 시계는 약 1.5m 정도로 추정된다. 프로펠러의 소음과 유동으로 물고기를 근접 관찰하기 어려웠던 기존 잠수정에 비해 CR200은 물고기의 근접 관찰이 훨씬 수월했다. CR200의 첫 수중시험에서 크랩스터의 기본기능과 성능이 설계대로 잘 작동한다는 것과 초음파와 광학 영상 장비를 조합한 악시계 환경 극복 개념이 실제로 효과적임을 확인할 수 있었다.

## V. 결론

우리나라 서해안은 지형이 복잡하고 조수간만의 차가 커서 조류가 세고(강조류) 시계가 나쁜(악시계) 해양환경조건을 갖고 있다. 이러한 환경은 인간이 작업하기에는 무척 위험한 환경이며, 현재까지 인간을 대신해서 작업할 수 있는 로봇은 거의 전무하다. 이에 대한 대안으로 개발된 CR200은 첫 수중시험에서 설계된 개념의 타당성을 일부 입증하였다. 향후, 강조류 환경과 최대수심(200m) 운용 시험이 수행될 예정이며, 보다 다양하고 진보된 제어방법이 CR200 플랫폼에 적용될 예정이다. 시험이 완료된 후 CR200은 다음과 같이 활용될 계획이다.

### ① 해저 침몰선박의 조사 · 관찰

- 2노트까지의 강조류 환경에서 해저에 밀착 이동함으로써

침몰선박을 찾고 접근하여 스캐닝 소나를 이용하여 정확한 해저 위치와 상태를 확인한다. 근접하여 광학 또는 음향 이미지를 촬영하며 필요한 샘플을 회수한다.

### ② 해저 구조물과 세굴 조사

- 교각, 댐, 보 등 해저 구조물의 균열 상태와 세굴 상태를 조사한다. 초음파 스캐닝 장비를 이용하여 탁도가 높은 영역에서도 조사 · 관찰을 수행 한다.

### ③ 해저 쓰레기 실태 조사

### ④ 해저 지형의 매핑

### ⑤ 천해역 해양과학 조사

- 200m 이내의 해저환경에서 다족 보행으로 이동함으로써 해저의 교란을 최소화하면서 해양 물리, 화학, 생물, 지질 등의 연구에 필요한 과학조사 데이터와 생물, 토양, 해수 등의 샘플을 채취한다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부에서 지원한 “다관절 복합이동 해저로봇 개발” 과제에서 수행한 연구결과와 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Claire Nouvian, *The deep : The extraordinary creatures of the abyss*, University of Chicago Press, 2010.
- [2] 해양안전심판원, 해양사고통계, 2013.
- [3] 편집위원회, 천안함 피격사건 백서, 인쇄의 창, 2011.
- [4] 한국산업잠수기술인협회, <http://www.kcda.or.kr>.
- [5] P. Lee, B. Jun, K. Kim, H. Choi, J. Li, C. Lee, S. Ryu, H. Baek, S. Hong, Y. Lim, D. Kim, S. Cho, D. Park, B. Gu, J. Lee, H. Jung, S. Yoon, C. Park, M. Choi, and Y. Seo, “Sea trials and experimental results of the deep-sea unmanned underwater vehicles, Hemire and Henuvy,” *Proc. of International Symposium on Underwater Technology*, 2007, Tokyo, pp. 276-284, April 2007.
- [6] P. M. Lee, B.H. Jun, and Y.K. Lim, “System design and development of the 6000m class deep-sea ROV Hemire,” *2nd International Conference of USYS*, pp.1-6, 2008.
- [7] B. H. Jun, P. M. Lee, and S. M. Kim, “Manipulability analysis of underwater robotic arms on ROV and application to task-oriented joint configuration,” *J. of Mechanical Science and Technology*, vol. 22, no. 5, pp. 887-894, 2008.
- [8] A. Joseph, “Underwater walking,” *Arthropod Structure &*

- Development*, vol 33, pp 347-360, 2004.
- [9] 전봉환, 심형원, 김방현, 박진영, 박정홍, 백혁, 이관목, 임용곤, “새로운 개념의 해저로봇 CR200 개발계획,” 한국해양공학회 2010년도 추계학술대회 논문집, pp. 73-78, 2010.
- [10] B. H. Jun, H. Shim, J. Y. Park, B. Kim, and P. M. Lee, “A new concept and technologies of multi-legged underwater robot for high tidal current,” *Proc. of Underwater Technology, 2011 IEEE Symposium on and 2011 Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, April 2011.
- [11] B. H. Jun, H. Shim, B. Kim, J. Y. Park, H. Baek, P. M. Lee, W. J. Kim, and Y. S. Park, “Preliminary Design of the Multi-Legged Underwater Walking CR200”, *Proc. of the IEEE/OES Oceans 2012*, Yeosu, Korea, 2012.
- [12] <http://www.youtube.com/watch?v=SwbAnGcolBY>
- [13] T. Tanaka, H. Sakai, and J. Akizono, “Design concept of a prototype amphibious walking robot for automated shore line survey work,” *Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04*, pp. 834-839, 2004.
- [14] Christina, G., Meyer, and N., Martin, B., “Simulation of an underwater hexapod robot,” *Ocean Engineering*, vol. 36, pp. 39-47, 2009.
- [15] M. Theberge, and G. Dudek, “Gone swimming [seagoing robots]”, *IEEE spectrum*, vol. 43, no. 6, pp. 38-43, 2006.
- [16] I. -W. Park, J. -Y. Kim, J. H. Lee, and J. H. Oh, “Mechanical design of the humanoid robot platform, HUBO,” *Advanced Robotics*, 2007.
- [17] B. H. Jun, J. Lee, and P. M. Lee, “Repetitive periodic motion planning and directional drag optimization of underwater articulated robotic arms,” *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 4, no. 4, pp.24-52, 2006.
- [18] 전봉환, 심형원, 박연석, 김우진, “해저보행로봇 CR200의 설계와 조류환경에서의 안정성 검토,” 2012년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp.1730-1734, 2012.
- [19] 전봉환, 심형원, 김방현, 강한구, 백혁, 박진영, 이관목, 김정엽, 김우진, “해저보행로봇 CR200 프로토타입의 핵심기술 구현,” 2012 한국수중로봇기술연구회 추계학술대회 논문집, pp. 53-56, 2012.
- [20] 박진영, 이경목, 심형원, 김방현, 이관목, 전봉환, “200m급 천해용 다관절 해저 로봇의 전기전자 시스템의 설계,” 2012년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, 대구, pp. 1715-1718, 2012.
- [21] B. Kim, S.W. Park, P.M. Lee, and B.H. Jun, “Design of Communication and video system for a multi-legged subsea robot,” *Proc. of the IEEE/OES Oceans 2011, Santander*, Spain, 2011.
- [22] E. Garcia and P.G. Santos, “An Improved energy stability margin for walking machines subject to dynamic effects,” *Robotica*, vol. 23, pp. 13-20, 2005.
- [23] 김방현, 박성우, 이관목, 전봉환 (2010). “해저보행로봇 CR200의 실시간 제어를 위한 소프트웨어 타이머의 성능 평가,” 한국컴퓨터종합학술대회 논문집, pp. 227-229, 2010.
- [24] B. Kim, H. Shim, S. Y. Yoo, B. H. Jun, S. W. Park, and P. M. Lee, “Operating software for a multi-legged subsea robot CR200,” *Proc. of the IEEE/OES Oceans 2013*, Bergen, Norway, 2013.
- [25] S. Y. Yoo, B. H. Jun, H. Shim and P. M. Lee, “Finite element analysis of carbon fiber reinforced plastic body frame for seabed robot,” *Proc. of the IEEE/OES Oceans 2013*, Bergen, Norway, 2013.
- [26] H. W. Shim, B. H. Jun, G. M. Kang, S. Y. Yoo, G. M. Lee, and P. M. Lee, “Development of underwater robotic arm and leg for seabed robot, CRABSTER200,” *Proc. of the IEEE/OES Oceans 2013*, Bergen, Norway, 2013.
- [27] H. Kang, H. Shim, B.H. Jun, and P.M. Lee, “Design of underwater link and joint for the development of multi-legged underwater robot “CR200”,” *Proc. of MTS/IEEE Oceans 2011*, Yeosu, Korea, 2012.
- [28] 강한구, 심형원, 전봉환, 이관목, “해저 보행 로봇 CR200을 위한 매니플레이터 기능을 갖는 다리 개발,” 제어로봇시스템학회논문지, vol.19, no.8, pp.709-717, Aug. 2013.
- [29] 김정엽, “6족 보행로봇 LCR200의 CoP 제어기 설계,” 2013년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp. 1768-1771, 제주 ICC, 2013.
- [30] J. Y. Kim and B. H. Jun, “Design of six-legged walking robot, Little Crabster for underwater walking and operation,” *to be appeared in Advanced Robotics*, 2013.
- [31] J. Y. Kim and B. H. Jun, “Mechanical design of six-legged walking robot little crabster,” *Proc. of MTS/IEEE Oceans 2011*, Yeosu, Korea, 2012.
- [32] 박연석, 김우진, 전봉환, “다관절 해저로봇 ‘Crabster’에 적용하는 조류하중 산정 및 유동해석,” 한국해양공학회지 26

권 제5호, pp. 47-54, 2012.10.

[33] 전봉환, 이지홍, 이판목, "수중로봇팔이 동역학 모델링과 동적 조작도 해석", 제어자동화시스템공학회논문지, 제11권 8호, pp 688-695, 2005.

[34] B. H. Jun, H. Shim, and P. M. Lee, "Approximated generalized torques by the hydrodynamic forces," *International Journal of Ocean System Engineering*, vol. 1(4), pp. 222-228, 2011.

[35] 백혁, 전봉환, 박성우, 이판목, "MS-1000 센서를 이용한 해저면 맵핑", 선박해양기술, vol. 51, pp. 65-72, 2011.6

[36] 백혁, 김보람, 박진영, 전봉환, 이판목, "수중 구조물의 3차원 프로파일링 결과와 CR200 연동 운용전략", 2013년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp. 1751-1754, 제주 ICC, 2013.

[37] J. Y. Park, G. M. Lee, H. Shim, H. Baek, P. M. Lee, and B. H. Jun,

"Head alignment of a single-beam scanning SONAR installed on a multi-legged underwater robot," *Proc. of the OCEANS 2012 IEEE*, Hampton Roads, 2012.

[38] Pablo Gonzalez de Santos, Elena Garcia and Joaquin Estremera, *Quadrupedal Locomotion*, Springer, 2006.

저 자 약 력



전 봉 환

- 1994년 부경대 기계공학과 졸업.
- 1996년 동 대학원 석사.
- 2006년 충남대학교 메카트로닉스공학 박사.
- 1996년~현재 한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소 해양시스템연구부 책임연구원.
- 관심분야 : 무인잠수정 설계, 로보틱스 수중응용.