

보이지 않는 바다, 심해가 품은 미래

한국해양과학기술원 제주연구소
김 동 성



극한환경 심해(Deep sea) 탐사의 역사 및 장비들

고대부터 현대에 이르기까지 바다에 대한 두려움?

❖ 알 수 없는 깊은 바다는 상상 속 괴물과 신화의 무대가 되었다

- 갑작스런 풍랑, 거대한 암초 등으로 인해 **깊은 바다에 대한 막연한 두려움**이 생김
- 이러한 인식은 **고대 그리스 사람들이 믿었던 신화**에도 잘 나타남



출처: Britannica



출처: 벌거벗은 세계사 183회

- 고대 그리스 신화에 등장하는 바다 괴수들(스칼라와 카리브디스)을 그린 그림
- **카리브리스**는 엄청난 양의 바닷물을 내뿜어 **거대한 파도 소용돌이를 발생**시키고,
- **스칼라**는 이 소용돌이로 **항로를 잃은 배들을 잡아간다고 믿음**

'진퇴양난'을 뜻하는 관용구로 "Between Scylla and Charybdis"라는 표현을 쓰기도 함

심해탐사를 어렵게 하는 요인은 뭘까?

❖ 낮은 수온

- **물은 공기보다 체온을 약 25배 정도 더 빠르게 빼앗음**
- 깊은 바닷속 **평균 수온은 2-4℃**, 인간은 **체온이 35℃ 이하로 떨어지면 저체온증** 발생
- 체온이 낮아지면, 호흡 속도가 점점 느려지며, 심정지 위험에 노출
- 0-5℃ 물에서 인간은 30-60분 내에 의식을 잃고, 생존을 기대할 수 있는 시간은 **고작 15분 내외**

❖ 어둠과 높은 수압

- 물은 공기보다 약 1,300배 정도 무거우며, **수심이 깊어질수록 수압은 증가함**
- 보통 스쿠버 장비로 잠수하는 깊이는 10-30 m 정도
- **현대식 스쿠버 장비를 이용해 세운 최고 기록**은 2014년, 이집트 다이버의 **수심 332.35 m**
- 이 깊이에 도달하는 데 14분, **다시 올라오기까지 92개 공기통 소모, 60배의 시간인 14시간** 걸림
- 이렇게 오랜 시간이 소모된 이유는 **잠수병을 예방하기 위해서**임

❖ 잠수병이란?

- 수압이 높은 심해에서는 호흡을 통해 **몸 속에 들어온 질소 기체**가 빠져나가지 못하고 **혈액 속에 녹아 들게 됨**
- 충분한 감압 없이 **급작스럽게 수면으로 상승**하면, **질소 기체가 기포로 변하고 전신의 혈액을 타고 돌아다니며 고통 유발**



출처: 벌거벗은 세계사 183회

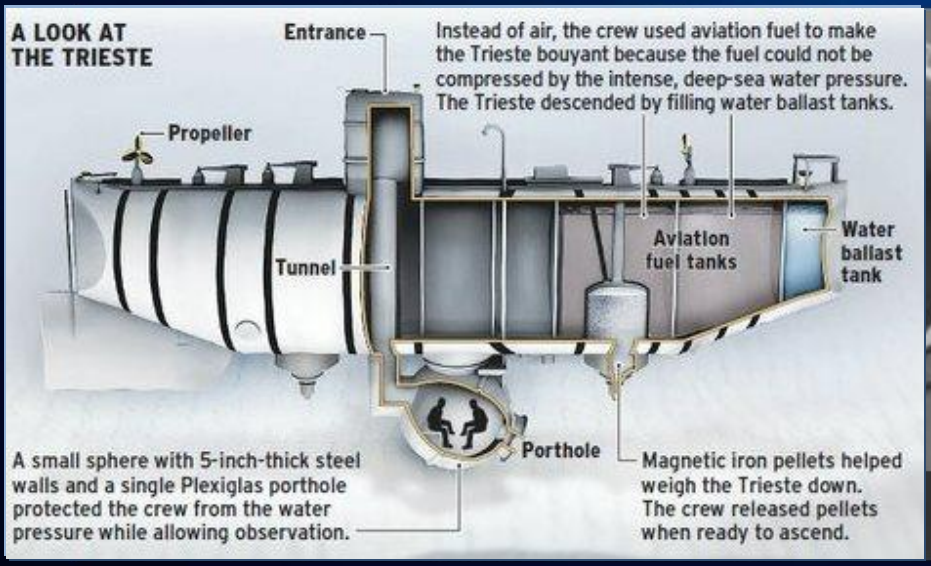
극한환경 심해 (Deep sea)



잠수구 속의 윌리엄 비브와 오티스 바턴

1930년 미국 윌리엄 비브, 오티스 바턴 ;

- 지름 134cm 잠수구
- 버뮤다 인근 수심 240m 잠수
- 1934년 윌리엄 비브 ; 수심 908m 잠수
- 1960년 트리에스테 10916m 잠수





심해잠수정 트리에스테의 자크 피카르와 돈 월시

극한환경 심해 (Deep sea)







극한환경 심해 (Deep sea)









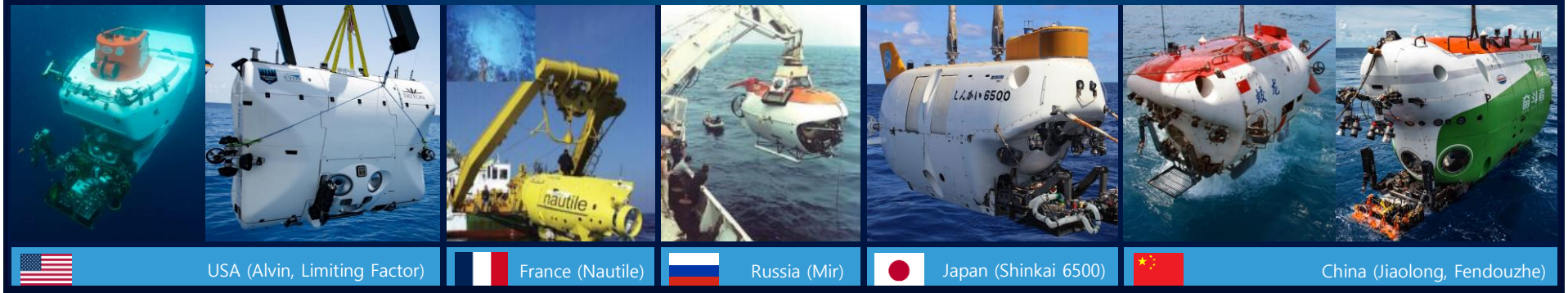
미국 탐험가 빅터 베스코보의 심해 탐사

- 1인승 심해잠수정 리미팅팩터
- 2020년 6월 26일 10,934m (가장 깊은 잠수기록)

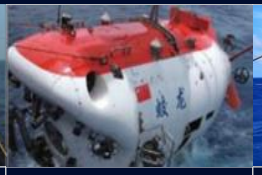
극한환경 심해 (Deep sea)

"세계의 과학탐사용 심해유인잠수정"

미·일·프·러·중국 등 5대 해양강국 개발 완료, 이어서 인도, 호주, 브라질도 가세



USA (Alvin, Limiting Factor) | France (Nautile) | Russia (Mir) | Japan (Shinkai 6500) | China (Jiaolong, Fendouzhe)

심해 유인잠수정 개발 사례							
잠수정이름(국가) / 운영기관	엘빈 II (미국) 우즈홀 해양연구소 (WHOI)	리미팅팩터(미국) 잉크피쉬 해양탐사연구기관	노틸(프랑스) 국립해양개발연구소 (IFREMER)	미르(러시아) 쉬르쇼프 해양연구소	신카이6500(일본) 해양연구개발기구 (JAMSTEC)	자오룽(중국) 중국과학부, 국가해양국, 중국대양협회	펀더우저(중국) 중국과학원, 중국국가조선공업공사
최대심도	4,500(6,500)m 급	11,000m 급	6,000m 급	6,500m 급	6,500m 급	7,000m 급	10,000m 급
개발연도	1964(2013)년	2018년	1984년	1987년	1989년	2010년	2018년
탑승인원	3명	2명	3명	3명	3명	3명	3명
특징	- 4,500회 이상 임무 수행 - 심해열수분출공 발견(1977) - 타이타닉호 조사(1986) - 6,500m급 Alvin II 건조(2013)	- 100회 이상 임무 수행 - 세계 최고수심 잠수 기록 보유 (10,939m)	- 1,500회 이상 임무 수행 - 잠항수심 6,000m	- 1,000회 이상 임무 수행 - 영화 타이타닉 촬영에 이용	- 1,500회 이상 임무 수행 - 수심 6,492m 잠수 기록	- 300회 이상 임무 수행 - 수심 7,062m 잠수 기록	- 230회 이상 임무 수행 - 수심 10,909m 잠수 기록 보유

극한환경 심해 (Deep sea)



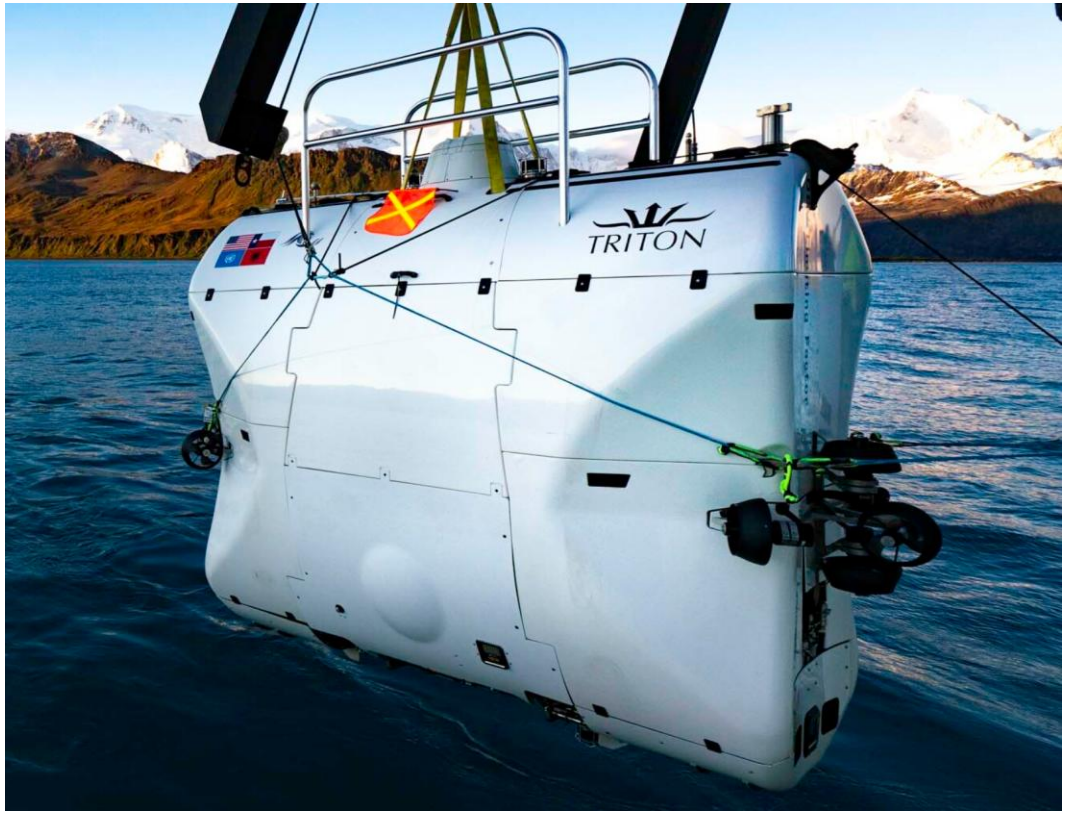




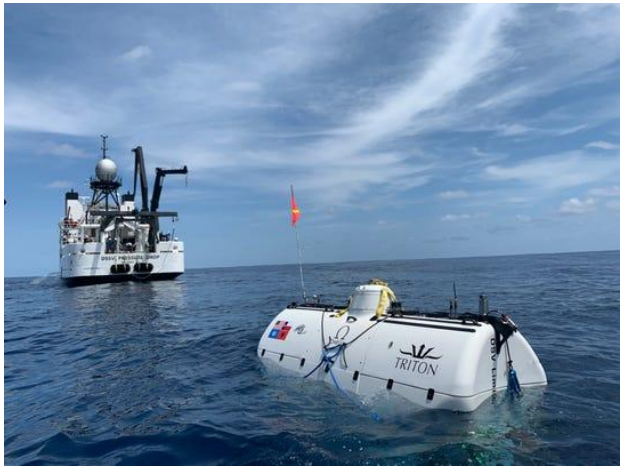
심해 유인잠수정 (HOV)



극한환경 심해 (Deep sea)









미국 심해 유인잠수정 리미팅팩터

- 티타늄 소재 잠수정
- 세계 최고 깊이(10,939m) 잠수기록 보유
- 전세계 5대 해양의 가장 깊은 지점에 모두 도달한 최초의 잠수정

극한환경 심해 (Deep sea)



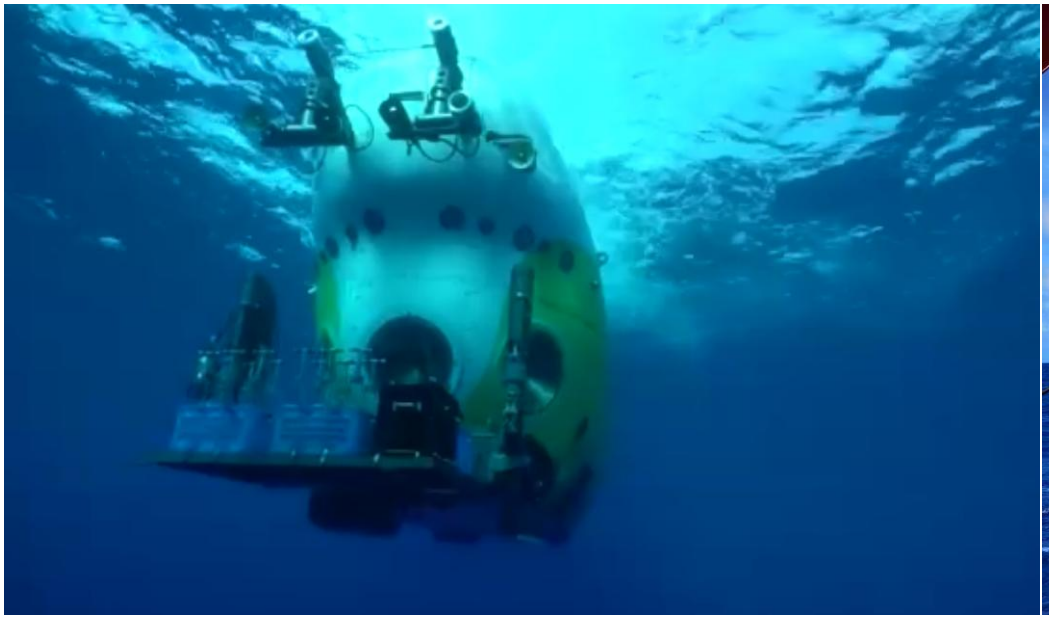




중국 심해 유인잠수정 자오룽호

- 2012년 7월 마리아나 해구에서 7,062m 잠수 성공

극한환경 심해 (Deep sea)



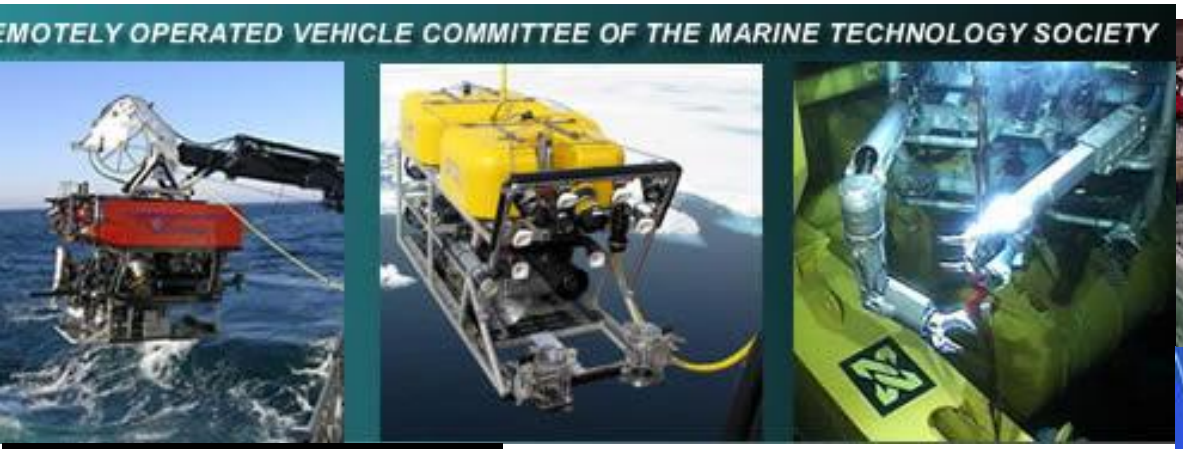




중국 심해 유인잠수정 펀더우저호

- 2020년 11월 마리아나 해구에서 10,909m 잠수 성공

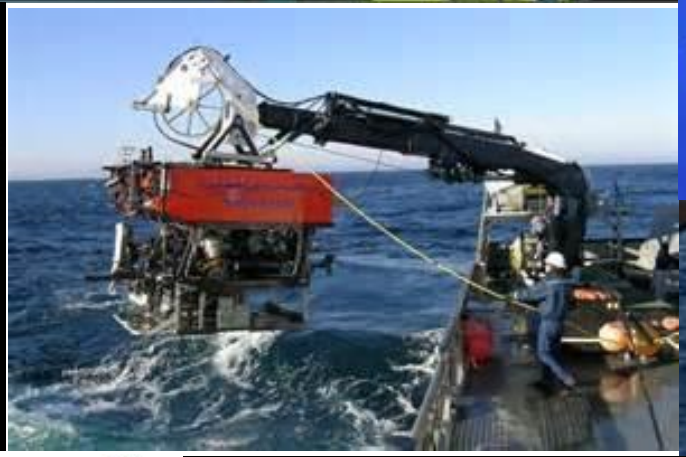
출처 :
좌 CGTN, https://news.cgtn.com/news/2020-11-09/Exclusive-World-s-first-live-streamed-Mariana-Trench-deep-dive-VhHlPFStX2/index.html
우상 China Daily, https://global.chinadaily.com.cn/a/202011/11/WS5fab1d45a31024ad0ba93447.html
우하 Chinese Academy of Sciences, https://english.cas.cn/newsroom/news/202011/t20201128_254435.shtml


EMOTELY OPERATED VEHICLE COMMITTEE OF THE MARINE TECHNOLOGY SOCIETY




Canada







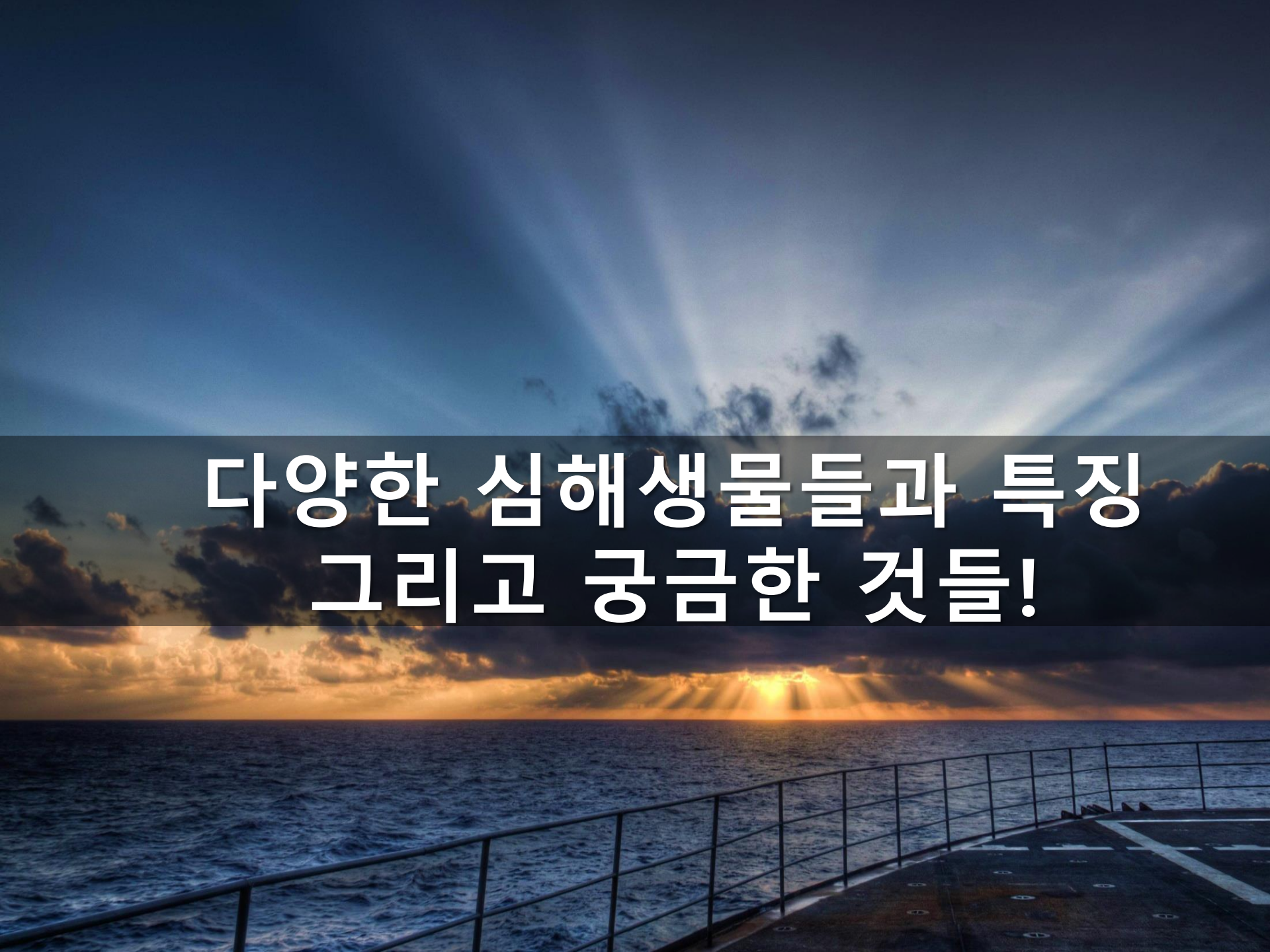

VENTANA


ROV


KORDI
MOMAF




MAGELLAN 725


다양한 심해생물들과 특징
그리고 궁금한 것들!

심해 생물들 (Deep-sea creatures)









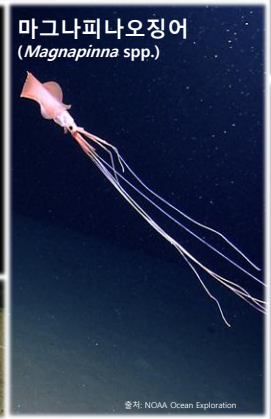


























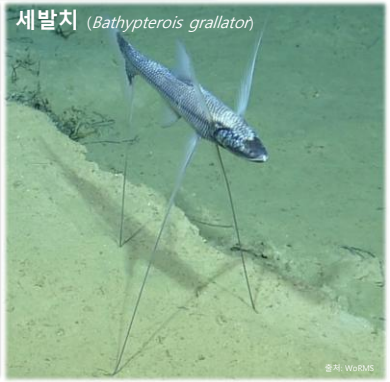






















Q. 심해 생물들은 왜 이렇게 기괴하게 생겼나요?

❖ 심해 생물의 독특한 외형은 극한 환경에 적응하도록 진화한 생존전략의 결과

제한된 먹이 공급



출처: MBC 뉴스투데이

- 자기 몸집에 비해 매우 **큰 입**과 **날카로운 이빨**을 가짐
  - 먹이를 발견했을 때 효율적으로 잡아먹는 것이 중요
- **제한된 에너지를 아끼기 위해** 몸의 구조가 변화됨
  - 불필요한 활동을 줄이고 적은 에너지로 오랫동안 살 수 있게 변화
  - 위가 크게 늘어나는 등 한 번의 먹이 섭취를 최대한 활용


출처: MBARI

빛이 거의 도달하지 않음


출처: nownews

- **심해 상부**의 경우, **희미한 빛을 최대한 활용**할 수 있도록 눈이 발달
  - 대왕오징어의 매우 큰 눈이나 배럴아이피쉬의 독특한 눈이 대표적임
- **빛이 전혀 없는 곳**은 **눈이 퇴화, 다른 감각기관 발달**
  - 눈 대신 주변의 진동이나 화학물질 감지 능력의 발달
- 일부 생물은 **생물발광(Bioluminescence)** 이용
  - 발광 기관의 위치와 구조는 생물종에 따라 다르고, 빛을 내는 목적도 다양
  - 먹이 유인, 역조명을 통한 은신, 포식자를 혼란시키기, 짝을 찾기 위함 등


출처: MBARI

높은 수압과 낮은 수온

- 몸의 구조와 생리적 기능의 변화
  - 높은 압력에서 세포막, 단백질, 효소 등이 정상적 기능할 수 있게 생리적 적응
  - 일부 심해어는 부레와 같은 기체 공간이 없거나 축소

이외에도 검은색·붉은색·투명한 몸(위장), 길고 가느다란 촉수(넓은 범위 탐색), 부드러운 몸(에너지 절약), 느린 움직임(낮은 대사율), 거대화 또는 극단적 체형(먹이 저장) 등의 특징이 나타남

Q. 심해어의 또 다른 특징은 어떤 것들이 있나요?

❖ 거대한 입 (심해앵글러피시, 블랙드래곤피시, 랜턴피시 등)



- 심해에서는 광합성이 일어나지 않아, 천해에 비해 **먹이가 상대적으로 부족함**
- 심해어들은 보통 **마린스노우나 우연히 지나가는 생물을 사냥**함
- **사냥 성공 확률을 높이기 위해** 큰 입을 가지게 됨

❖ 눈의 진화 – 눈이 아주 크거나 없다 싶을 정도로 퇴화



- **눈이 아주 큰 생물들**은 **희미한 빛을 최대한 많이 받아들이기 위해** 눈이 발달한 것
  - ✓ 눈 지름이 25-27 cm 정도로 거의 접시만한 **대왕오징어**
  - ✓ 원통형 눈이 머리 속에 위치한 **배럴아이피시**도 몸집에 비해 눈이 큰 편
- **눈이 퇴화한 생물들**은 시각보다 **후각 등 다른 감각이나 발광 미끼 의존**하여 생활
  - ✓ **심해앵글러피시**의 경우, 눈이 아주 작은 편

❖ 투명한 몸과 반투명한 몸

- '**포식자의 눈에 얼마나 노출되는가**'와 '**몸의 기능을 어디까지 희생할 수 있는가**' 사이에서 자연선택
  - ✓ **투명**: 유리오징어, 유리새우, 배럴아이피시, Leptocephalus (붕장어 등의 유생) 등
  - ✓ **반투명 (소화관, 생식소, 신경계, 구조적 지지)**: 심해 빗해파리, 뱀파이어 오징어 등



❖ 느린 성장과 긴 수명



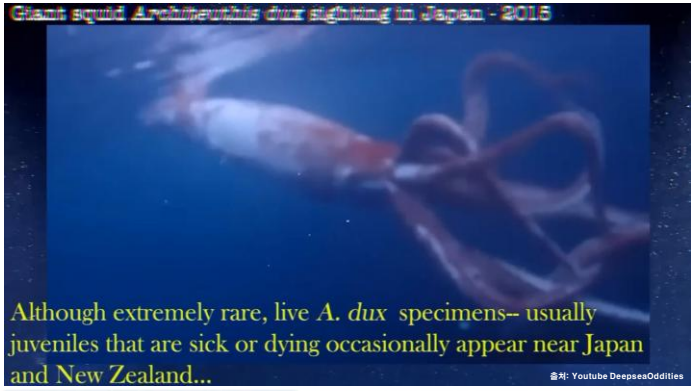
- **그린란드 상어**: 연간 수 mm 성장, 250-400년 수명
- **심해산호(흑산호, 냉수산호)**: 연간 수 mm 성장, 수백-수천년 수명
- **대왕해면**: 연간 수 mm 성장, 수박-수천년 수명 (400-2,300년, 방사성동위원소 분석결과)
- **오렌지 러피 (어류)**: 성숙 20-30세, 150-200년 수명, 이석(otolith) 연대측정으로 확인
- **아이슬란드조개 (*Arctica islandica*)**: 극도로 느린 성장, 150-300년, 최대 수명은 500년 이상, 최고기록은 507년

대왕오징어 (Giant squid, *Architeuthis dux*)

전설 속 바다괴물에서 과학적 탐구의 대상으로, 심해의 거대 두족류

- 전 세계 심해에 분포하는 **대형 두족류**, **8개의 팔과 2개의 긴 포획촉수**를 가짐
- 전체 길이는 수 m 이상, 긴 촉수 때문에 몸 길이가 과장되기 쉬워 외투막 길이와 구분해야 함
- **거대한 눈**은 **희미한 빛**과 **향고래 등 큰 접근 물체를 감지**하는 데 유리함
- 오랫동안 **사체와 위 내용물로만 알려졌으며**, **살아있는 영상은 매우 늦게 확보**되었음

생태와 삶의 방식이 여전히 수수께끼로 남아 있는 **거대한 심해 생물**







- **두 개의 긴 포획촉수와 빨판의 각질 고리를 이용**해 물고기와 오징어를 붙잡음
- 강력한 부리를 가지고 있지만, 먹이를 잘게 씹는 기관은 아니며 치설이 보조함
- **주요 천적은 향고래**, **고래 피부에 남은 빨판**이 두 생물의 상호작용을 보여주는 **중요한 생태 증거**
- 전설 속 바다괴물인 **크라켄(Kraken)의 생물학적 모델 중 하나**로 자주 언급됨
- 거대한 크기에도 불구, **성장·수명·번식행동은 여전히 충분히 밝혀지지 않음**

심해에는 아직 밝혀지지 않은 거대 생물의 생태가 존재하며, 탐사기술의 발전이 심해라는 미지의 세계를 드러내고 있음을 보여주는 상징적인 생물

배럴아이 피쉬 (Barreleye fish, *Macropinna microstoma*)

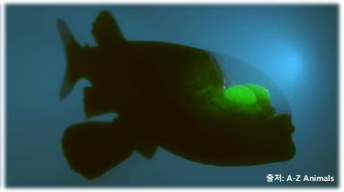
투명한 머리 안에서 눈의 방향을 바꾸며 먹이를 탐색하는 심해어

- 심해 중층에 서식하는 물고기, **투명한 방패 모양의 머리 덮개**를 가짐
- 투명한 머리 덮개는 **눈을 보호하면서 빛을 들어오게 하는 역할**
- 머리 안의 **녹색 관 모양 구조가 실제 눈**이며, **앞쪽의 검은 점은 후각기관**임
- **작은 입과 넓은 지느러미**는 느리고 정밀한 유영에 적합함

투명한 머리 속에서 눈을 회전시키는 독특한 시각 구조를 가진 생물











- **눈은 평소 위쪽**을 향해 있어, 머리 위의 먹이와 실루엣을 감시
- **먹이를 잡을 때 눈을 앞쪽으로 회전**시킬 수 있음
- **눈의 녹색 색소는 생물발광이나 약한 하향광을 여과**하는 것에 도움을 줄 수 있음
- 사이포노포어 촉수 사이 작은 먹이 훔쳐 먹을 가능성이 제기
- **그물로 포획 시, 투명한 덮개가 손상되어 오랫동안 실제 모습이 알려지지 않았음**
- **ROV 관찰을 통해 살아있는 개체의 눈 움직임과 머리 구조가 밝혀지며 기존 해부학적 오해를 바로잡음**

투명한 머리 안에서 눈의 방향을 바꾸며 먹이를 탐색하고, 심해 탐사 기술을 통해 오랫동안 알려지지 않았던 살아있는 상태의 모습과 독특한 시각 구조가 밝혀진 신비로운 심해 생물

예티크랩 (Yeti crab, *Kiwa* spp.)

몸에 발달한 털에서 세균을 길러 먹는 열수 · 냉수 생물

- 열수분출공과 냉수용출대 주변에 서식하는 **심해 갑각류**
- **집게와 다리**에는 **털처럼 보이는 수많은 강모**가 발달해 있음
- **강모의 표면**에는 **황화수소나 메탄을 이용하는 세균이 자람**
- 종에 따라 세균을 기르는 위치나 군집을 이루는 방식이 다르게 나타남

자신의 몸에서 먹이를 재배하는 독특한 생존 전략을 가진 심해의 농부







- 일부 종은 집게를 흔들어 세균에게 산소와 화학물질을 공급
- **세균 긁어 먹거나 세균이 생산한 유기물을 영양원으로 이용**
- 농장물 재배하듯 **몸 위에서 미생물을 기르는 전략**으로 비유
- 독성 물질이 있는 **분출공에 너무 가까우면 위험**하고, **너무 멀면 세균이 자라기 어려움**
- 화학물질과 산소가 **적절히 섞이는 경계층을 선택**해야 함
- 가슴 아래 세균을 기르거나 군집을 이루는 방식도 다르게 나타나는 등 **종에 따른 차이가 존재**함

먹이를 직접 찾아다니기보다 자신의 몸에서 세균을 길러 영양분을 얻는, 극한의 심해 환경에서 미생물과의 공생을 통해 살아가는 독특한 생존 전략을 가진 심해 생물

덤보문어 (Dumbo octopus, *Grimpoteuthis* spp.)

코끼리 귀를 닮은 지느러미로 심해를 헤엄치는 독특한 문어

- 심해에 서식하는 **우산문어류**, 일부 종은 수천 m 깊이에서 발견되어 가장 깊이 사는 문어류
- **머리 양쪽의 큰 지느러미가 코끼리 귀처럼 보여 덤보문어**라는 이름이 붙음
- 팔 사이에는 넓은 막이 연결되어 있으며, **팔에는 빨판과 함께 감각성 돌기인 cirri가 배열**됨
- 일반적인 문어와는 다르게 **먹물주머니가 없거나 축소**되어 있음

귀 모양 지느러미로 부드럽게 유영하는 심해의 에너지 절약형 비행사











- **지느러미를 펄럭이고 팔 사이 막을 움직여** 부드럽게 유영
- 일반 문어보다 **근육질 제트추진에 덜 의존**해 **에너지를 절약**
- 해저 위를 떠다니며 **갑각류·다모류·등각류** 등을 찾음
- 먹이를 부리로 뜯기보다 작은 **먹이를 통째로 삼키는 편**
- 암컷은 **발달단계가 서로 다른 여러 개의 알**을 가지고 **산란 가능한 기회를 분산**할 수 있음

코끼리 귀를 닮은 지느러미로 물 속을 비행하듯 헤엄치고, 에너지 소비를 최소화하는 유영 방식으로 먹이가 부족한 심해 환경에 적응한 독특한 생물

해저돼지 (Sea pig, *Scotoplanes* spp.)

심해 바닥을 걸어 다니며 해양눈을 먹이망으로 돌려보내는 독특한 해삼

- **심해성 해삼의 한 무리**, **통통하고 반투명한, 연약한 몸**을 가짐, 극피동물문·해삼강
- 수천 m 깊이의 심해 평원에 있는 **부드러운 퇴적물 위에서 주로 서식**함
- **몸 아래의 관족이 길어져 다리처럼 보이며**, 이를 이용해 해저를 걸어다님
- 긴 촉수로 먹이가 풍부한 표면층을 탐색, 심해저의 **생물교란과 영양순환에 중요한 역할**

심해 바닥의 퇴적물을 뒤집고 영양분을 순환시키는 심해저 생태계의 기술자



- 해양눈과 사체에서 유래한 **유기물이 포함된 퇴적물을 섭식**
- 신선한 유기물이 쌓인 장소에 많은 개체가 모일 수 있음
- 퇴적물을 삼키고 배설하며 **해저 표층을 뒤집고 산소가 스며들 수 있도록** 함
- 어린 게 등의 **작은 갑각류가 몸 아래에 붙어 이동하거나 포식자에게서 보호**받기도 함
- 연약한 몸 때문에 **형태가 손상되기 쉬워, 그물 표본보다 심해 영상이 생태 연구에 있어 중요**함

심해 바닥을 걸어다니며 유기물이 풍부한 퇴적물을 섭식하고, 해저 표층을 뒤섞어 영양분을 순환시키는 생태계 기술자 역할의 독특한 심해 생물

거대관벌레 (Giant tubeworm, *Riftia pachyptila*)

대표적인 열수생물(첫 발견)로 햇빛 없는 생태계의 상징

- **입도 장도 없이 '지구화학'을 먹고 사는 동물**, 환형동물문(Annelida), 다모강
- 1977년 Alvin이 첫 발견, 이후 갈라파고스 열곡과 동태평양 해령 등에서 주로 발견
- 수심 약 1,500~3,000m에서 서식, 관 포함 2~3m 크기
- **황화수소 산화세균과 세포 내 공생**을 하는 것으로 알려짐

거대관벌레는 태양 없이도 생태계가 유지될 수 있음을 보여준 대표적 생물











- 심해 열수분출공 서식 생물, 생태계에 대한 기존 상식 바꿈
- 흰색 부분은 키틴질 보호관
- 위로 나온 붉은 부분은 혈관이 밀집된 아가미깃
- **성체에는 위·입·장·항문이 없고, 몸통의 영양체라는 기관에 수많은 황화수소 산화 세균을 기름**
- 이들은 **황화수소를 산화해 얻은 에너지로 이산화탄소를 유기물로 전환시키고, 이 에너지를 거대관벌레가 받아 성장**함
- **유생은 소화관을 갖고 공생세균 없이 태어나지만, 열수분출공에 정착하면 환경 속 세균이 피부로 들어오고, 영양체가 발달하고 소화관은 사라짐**

지구 내부의 화학 에너지가 거대한 동물과 생태계를 만들 수 있음을 보여준 대표적인 생물로 지구 초기 생명의 기원과 외계 천체의 생명 가능성을 생각하게 함

뱀파이어오징어 (Vampire squid, *Vampyroteuthis infernalis*)

무서운 이름과 달리, 바다의 유기물을 재활용하는 산소최소층의 전문가

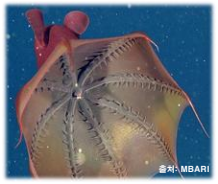
- 오징어도 문어도 아닌, **독립적인 두족류 계통**
- **검붉은몸, 푸른 눈, 눈과 팔 사이의 막** 때문에 흡혈귀 같은 이름이 붙음
- 바닷속에서도 산소가 매우 부족한 **산소최소층에 주로 서식**
- **움직임을 줄이고 주변에 떨어지는 먹이를 받아먹는 방식으로 살아감**

포식을 하는 대신 해양눈을 먹는 저산소층의 청소동물











- 큰 먹이를 사냥하는 대신 **위에서 떨어지는 사체조각, 분변, 점액 등의 해양눈을 먹음**
- 길고 가느다란 **감각 필라멘트로 입자를 모은 뒤 점액으로 뭉쳐 입으로 운반**
- 위협받으면 먹물 대신 발광점액을 내보냄

- 산소가 극히 적은 **산소최소층에서 낮은 대사율로 살아감**
- 대부분 생물은 이런 환경에서 활발히 움직이기 어렵지만, 이들은 **에너지를 적게 쓰는 느린 생활방식**을 선택
- **헤모시아닌**은 **적은 산소도 효율적으로 운반** 가능
- **아가미 표면적도 넓어** 필요한 산소를 얻는 것에 유리

지옥에서 온 흡혈동물이 아니라, 산소와 먹이와 부족한 심해에서 낭비 없이 살아가는 가장 절약적인 생물


그 외 심해생물들 설명

Q. 어둡고 춥고 먹이도 부족한데, 왜 심해에서 살아가나요?

❖ 오랜 진화 과정에서 **그 환경을 이용할 수 있도록 적응한 생물들이 살아남은 것**

심해의 특징	불리한 점	오히려 얻는 이점
어둠	광합성 불가	시각에 의존하는 포식자로부터 숨기 쉬움
저온	성장·활동이 느림	대사율이 낮아져 에너지 소비를 줄일 수 있음
먹이 부족	먹을 기회가 적음	경쟁자도 상대적으로 적고, 적은 먹이로 버티는 방향으로 적응
고압	단백질·세포막 기능에 부담	적응한 생물에게는 다른 생물이 쉽게 침입하지 못하는 환경
넓고 안정된 환경	생물 밀도가 낮음	수온·빛, 태풍이나 인공적 변화 등 환경 변화가 표층보다 상대적으로 작음
열수·냉수용출 등	황화수소 등 독성물질 존재	화학합성 미생물을 기반으로 풍부한 생태계가 형성되기도 함

Q. 심해 생물들은 평소에 무엇을 먹고 사나요?

❖ 햇빛이 거의 도달하지 않기 때문에 대부분 **표층에서 내려오는 유기물에 의존**해서 살아감

1 마린 스노우 (Marine snow)
- **플랑크톤의 사체나 배설물 등 작은 유기물이 눈처럼 가라앉는 현상**
- 심해의 해삼, 갯지렁이, 작은 저서동물들의 중요한 먹이원

2 동물의 사체
- 물고기나 오징어, 고래 등의 사체가 가라앉으면 다양한 동물들이 먹이로 이용

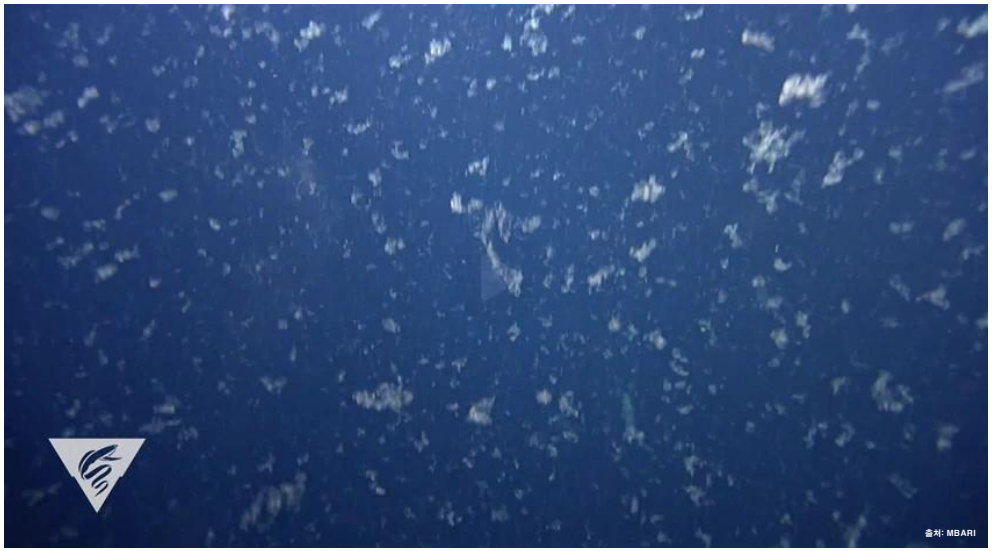
3 다른 생물을 잡아먹는 포식 활동
- 심해어와 오징어, 갑각류 등은 작은 물고기나 다른 동물들을 잡아먹고 살아감

4 화학합성에 의한 먹이 공급
- **열수분출공, 냉용출지, 고염분 해저호수** 등의 주변에서 **화학합성 생태계 형성 가능**
- 미생물이 **황화수소나 메탄 등 화학물질을 이용**해 **유기물 생산**, 일부 심해 생물과 공생

심해에는 매일 눈이 내린다 – Marine Snow

❖ ROV로 심해를 촬영하면 작은 흰 점들이 끊임없이 떨어지는 것을 볼 수 있음

- **해양눈(marine snow)**은 표층에서 만들어진 **죽은 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 배설물, 점액, 미생물, 유기물 입자** 등이 서로 뭉쳐 아래로 떨어지는 현상임



- 일부 입자는 **해저까지 내려가는 데 몇 주**가 걸리기도 함
- **표층에서 광합성으로 흡수된 CO_2의 일부를 깊은 바다로 운반**하는 biological carbon pump, 즉 **생물학적 탄소펌프의 핵심 과정**
- 심해생물에게는 **중요한 먹이원**

❖ 생물학적 탄소펌프는 지구의 CO_2를 조절하는 매우 중요한 자연 시스템 중 하나임

- 다만 **유기물이 과도하게 깊은 바다로 공급되면** 분해 과정에서 **산소가 소비되고 CO_2가 증가해 저산소화와 산성화를 악화**시킬 수 있음

**"심해에 내리는 눈은 심해 생물들의 식량이자,
지구 탄소 저장 시스템의 일부입니다."**

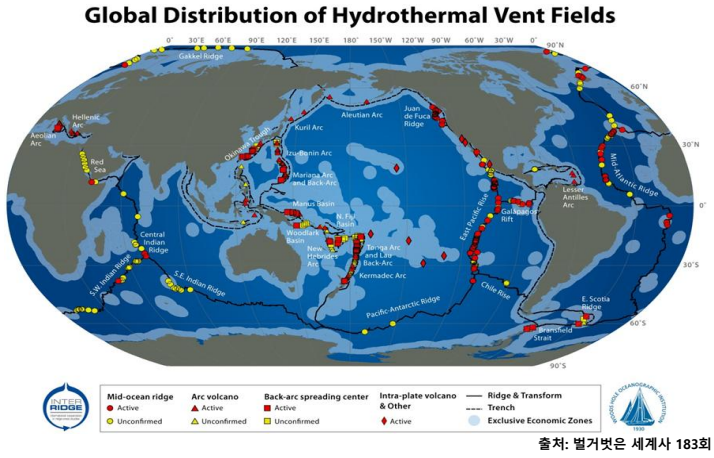

일반 심해생물 동영상 4개


열수분출공 및 열수생태계

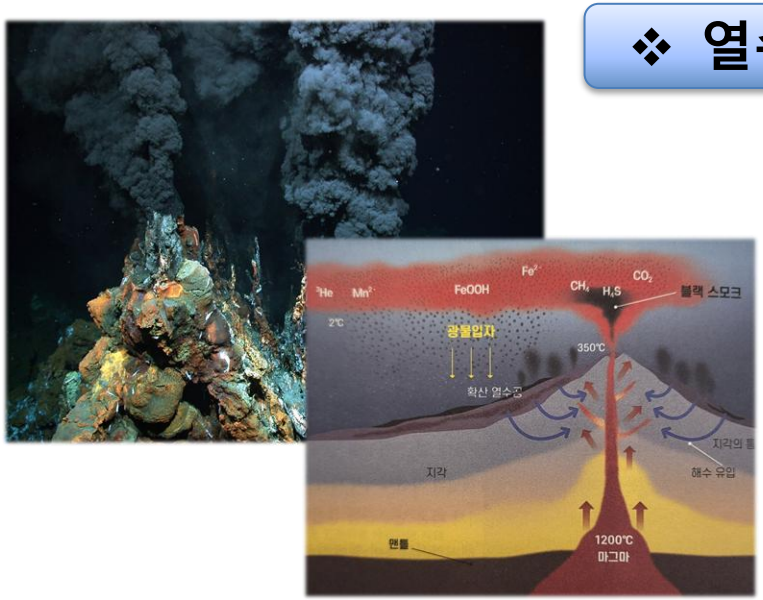
1977년, 심해 탐사 잠수정 '앨빈호'가 발견한 열수분출공

❖ 열수분출공이란 말은 뜨거운 물이 분출되는 곳이라는 뜻

- 지각 아래쪽에는 엄청난 고온의 마그마가 흐름
- 해저에서 약해진 지각 틈으로 흘러내려간 **바닷물이 마그마로 인해 뜨겁게 데워져 뿜어져 나오기도 함**
- 이러한 열수구에서 분출된 **뜨거운 물이** 심해의 **차가운 물과 섞이며 굳어진 암석**이 형성하는 독특한 퇴적층이 **열수분출공**



출처: 벌거벗은 세계사 183회



출처: 벌거벗은 세계사 183회

❖ 열수분출공의 특징

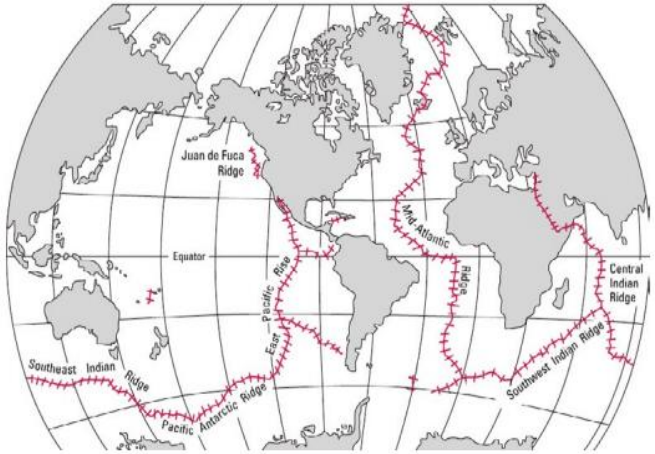
- 열수구에서 분출되는 물은 **최대 400℃**
- 어류가 서식하는 평균적인 바다 수온은 4-20℃
- 열수분출공 근처는 마그마 때문에 독성 물질인 **황화수소가 다량 분포**되어 있음
- **미생물들**이 황화수소를 포함한 열수분출공에서 배출되는 **화학물질을 분해하며 에너지를 얻음**

심해 및 열수 생태계

지구의 피부가 새로 태어나는 곳

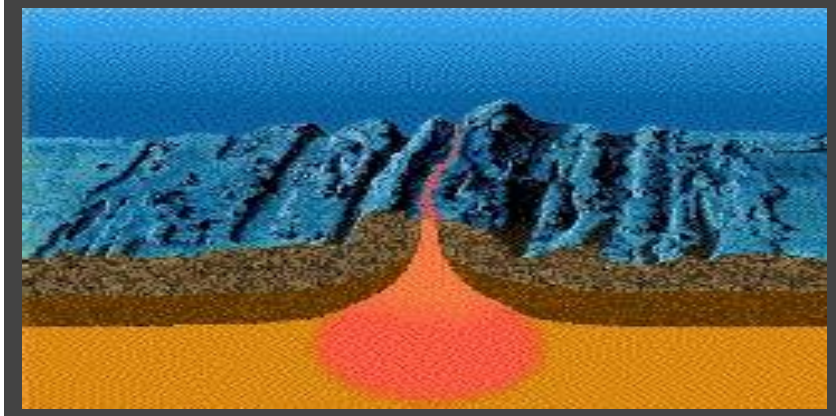
마치 야구공의 실밥처럼 지구를 감싸고 있는 대양저 중앙해령

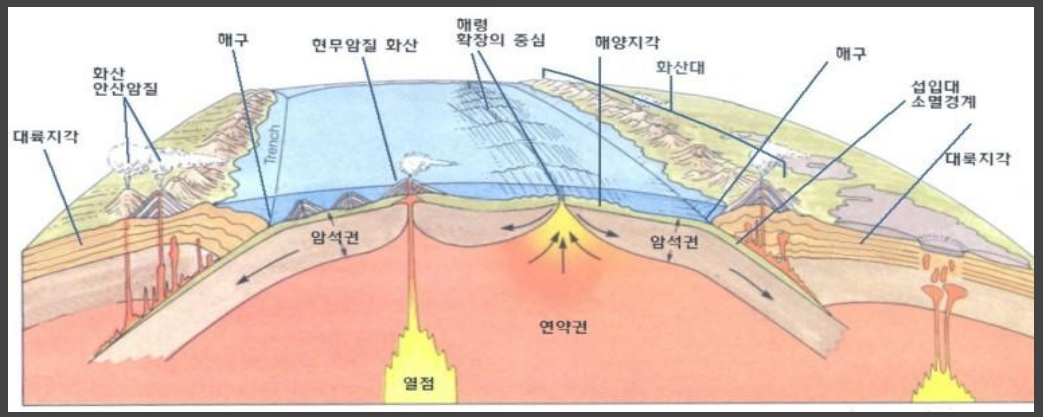




" 해저 산맥(중앙해령) 길이는 7만km"

지구 둘레의 2배 길이에 해당



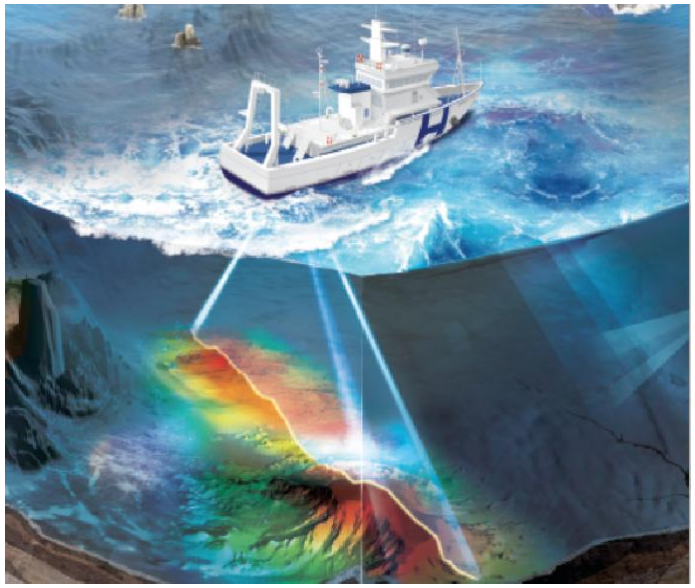


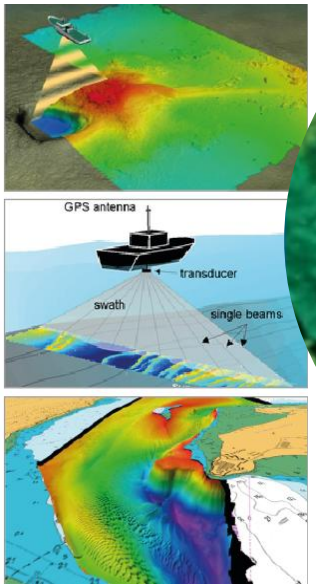
마그마 분출 → 분출된 용암이 굳어 해양지각 생성

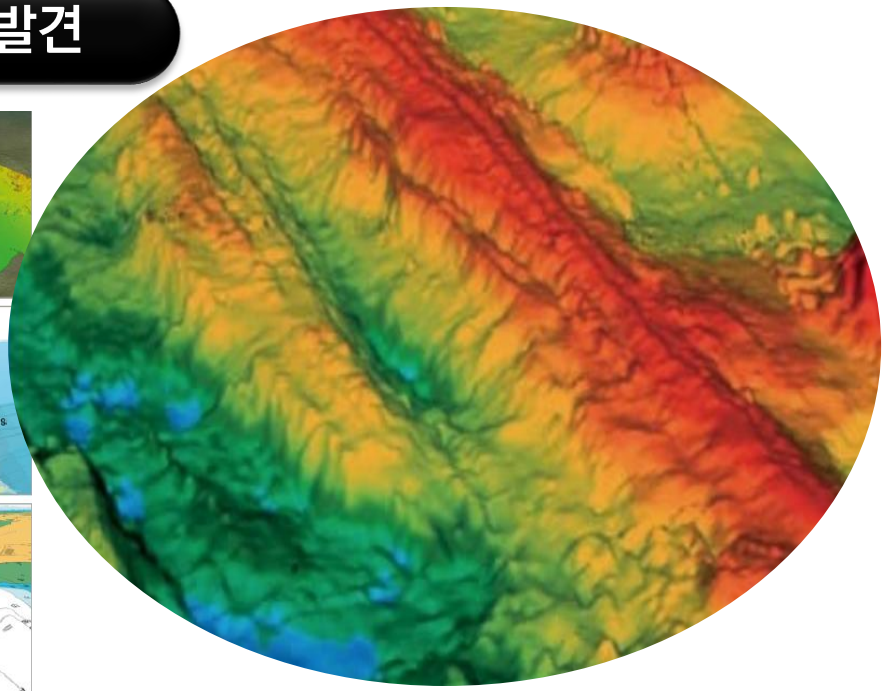
중앙해령 중심에서부터 새로운 지구 표면이 만들어짐

심해 및 열수 생태계

심해에서 지구의 피부가 새로 태어나는 곳 발견







다중빔 음향측심기(multibeam echosounder) 라는 첨단기기로 해저지형 측량

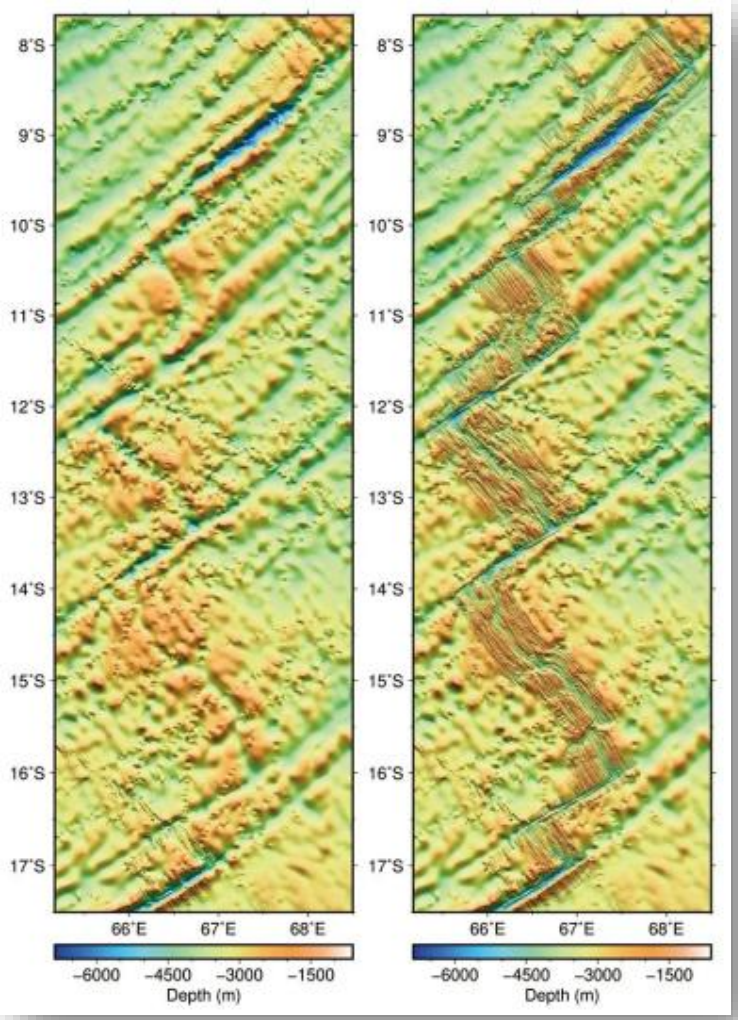
1976년 미국 유인잠수정 앨빈(ALVIN)이 갈라파고스 해저화산 조사 하는 도중,
우연히 흰색 조개껍데기 발견한 것을 계기로 ⇒ 관벌레, 새우, 오징어 등 추가 발견

사막과 마찬가지라고 여겨졌던 심해 해저화산 주변에 어마어마하게 크고 다양한 심해 생태계를 발견

심해 및 열수 생태계

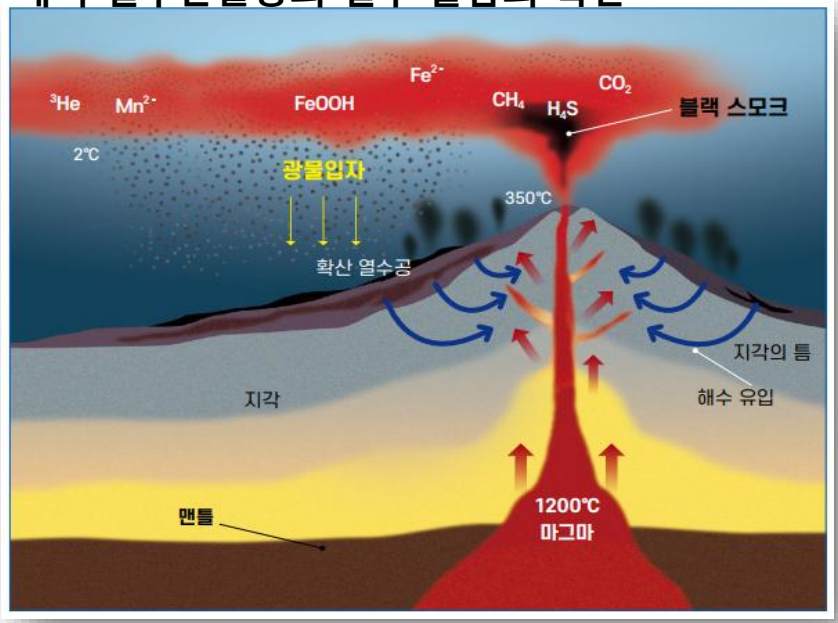
심해열수분출공 – 어디에 있고 어떻게 찾는가

중앙 인도양 해령 해역의 해저지형 자료



음향탐사 → 해저지형도 → 해령위치 확인

해저 열수분출공의 열수 플룸의 확산



열수분출공 배출 열수는 수평방향으로 퍼짐

(300℃ 이상 고온인 열수도 몇십m 이내로 식어버림 → 온도로 열수탐지 힘듦)

“ 열수 플룸 : 많은 금속원소들이 포함 ”

헬륨과 같이 보존성 뛰어난 화학추적자는

수백 km 떨어진 위치에서도 검출됨

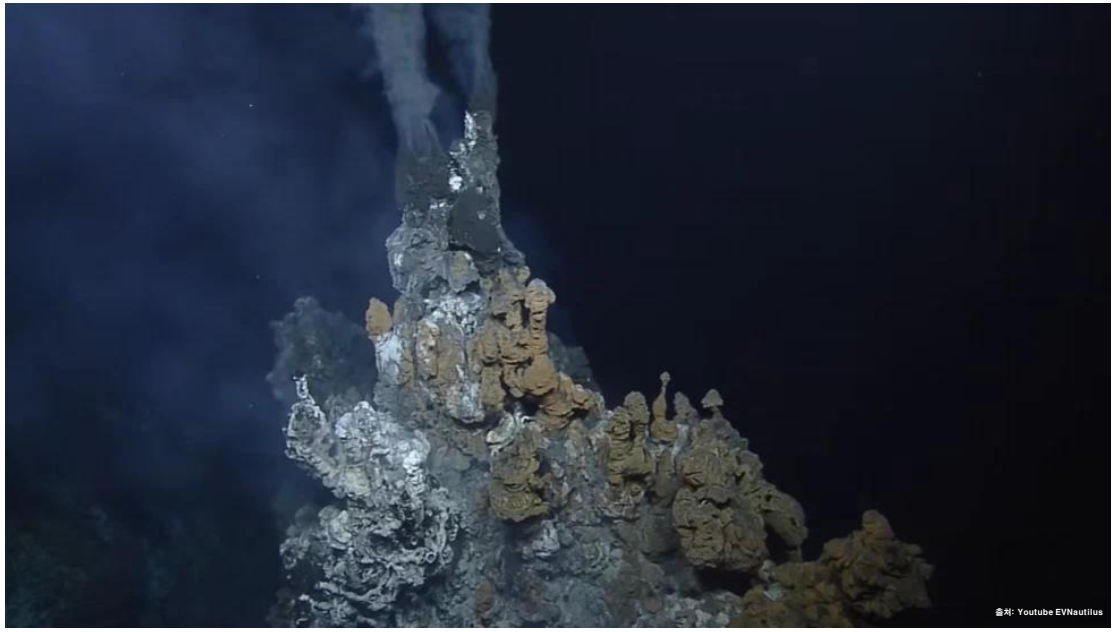
심해에서 300~400℃의 물이 솟는다 – Black Smoker

❖ **1977년 갈라파고스 심해 해저에서 열수분출공 발견으로 생물학의 상식이 흔들림**

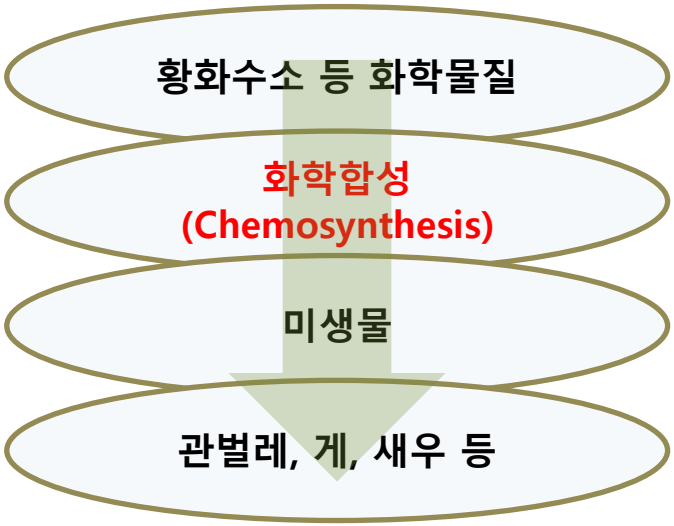
↳ **햇빛이 전혀 없는 심해 바닥에 엄청나게 풍부한 생태계가 존재하고 있었기 때문**

- 해수가 해저 암석 틈으로 들어가 마그마에 의해 뜨거워진 뒤 다시 분출함
- **일부 열수는 340℃ 이상, 다른 열수계에서는 400℃를 넘기도** 함
- 깊은 바다에서는 **높은 수압으로 인해 물이 쉽게 끓지 않음**
- **검은 연기처럼 보이는 것**은 연기가 아닌 **철, 황 등 황화광물의 미세한 입자**임





❖ **햇빛과 광합성 없이도 돌아가는 생태계**

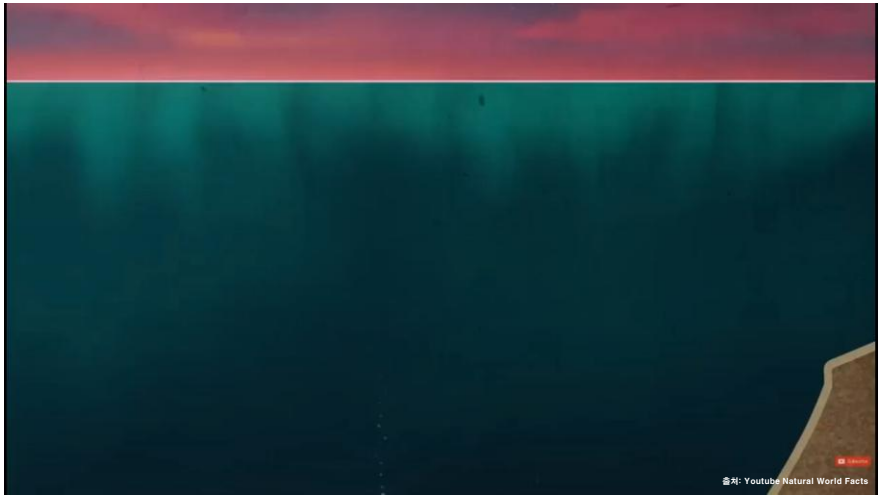


"햇빛이 전혀 없는 곳에서도 생태계는 만들어질 수 있다는 것을 심해 열수구가 보여줬습니다."

해저에서 솟아오르는 메탄–Cold Seep and Methane Hydrate

❖ 냉용수대 (Cold Seep)

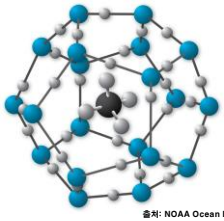
- **해저 퇴적층 속 메탄, 황화수소 등의 물질이 해저면으로 천천히 스며 나오는 곳**
- 이름의 'cold'는 얼음처럼 차갑다는 뜻이 아닌, 뜨거운 hydrothermal vent와 달리 **분출액의 온도가 주변 해수와 크게 다르지 않다는 의미**임
- **때로는 메탄 기포가 보이지만, 기포 없이 용존 상태로 스며 나오는 곳도 존재함**







❖ 불타는 얼음 (Methane hydrate)



- 물 분자가 격자를 만들고 그 안에 메탄이 갇힌 **얼음처럼 생긴 고체**임
- **낮은 온도, 높은 압력의 심해 퇴적층**에서 만들어짐

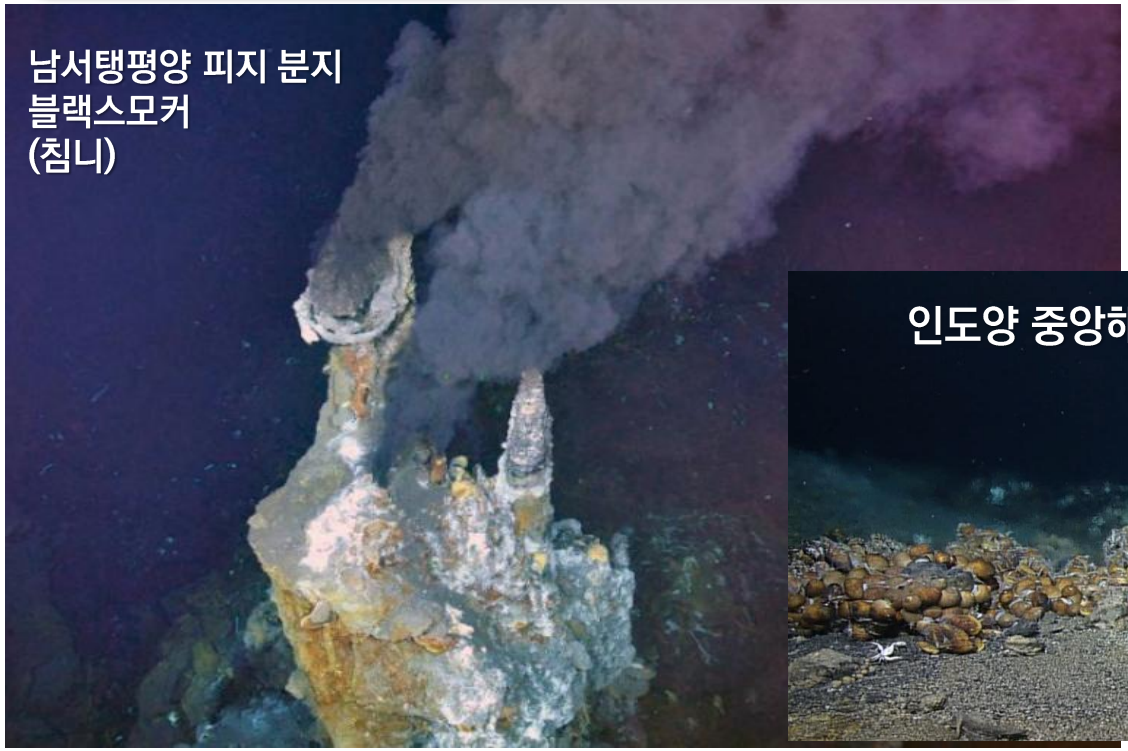
✓ **심해 ROV 영상에서는 메탄 기포가 퇴적물에서 나오면서 표면에 hydrate가 형성되는 모습도 관찰됨**

✓ **이 곳 역시 메탄이나 황화수소를 이용하는 미생물을 기반으로 홍합, 관벌레 등이 살아가는 화학합성 생태계가 형성되어 있음**

**"심해 바닥에서는 천연가스가 얼음처럼 존재하고,
어떤 생물은 그 메탄을 기반으로 살아갑니다."**

심해 및 열수 생태계

심해열수분출공 – 어디에 있고 어떻게 찾는가





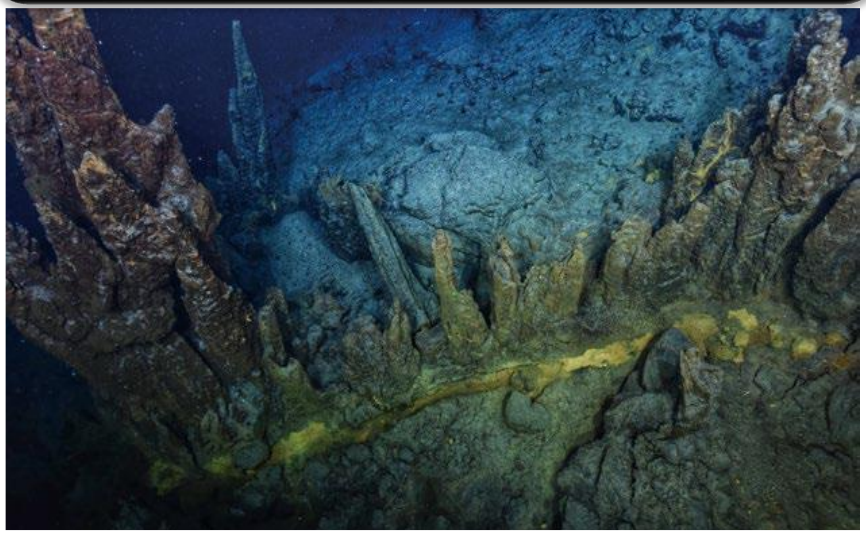
심해의 열수분출공은 ‘온도 & 성분’에 따라

블랙스모커, 화이트스모커와 확산성, 비활동성으로 분류

* 블랙스모커 : 온도 350 ℃ 정도를 이루며 금속 황화물과 망간이 풍부
* 확산성 열수분출공 :100℃ 이하 열수가 천천히 유출, 생물다양성이 풍부함

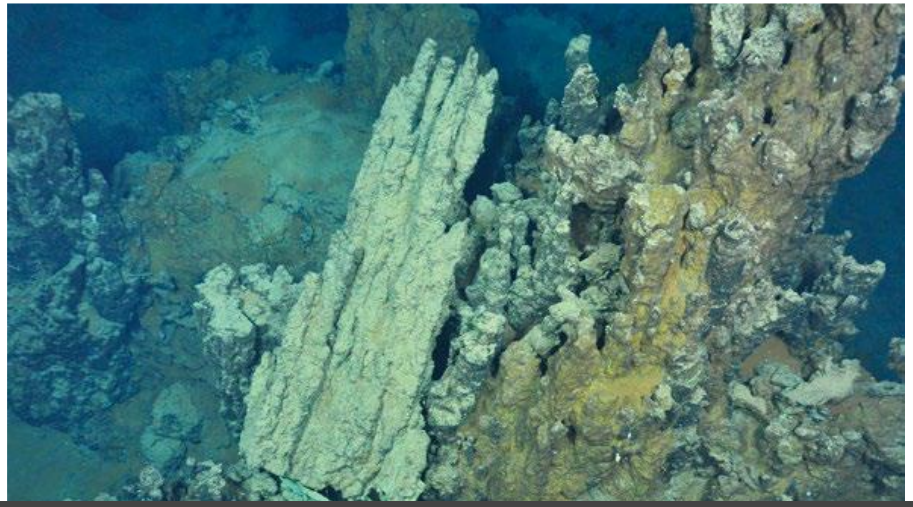
심해 및 열수 생태계

열수의 공급이 끊긴 죽은 침니 지역



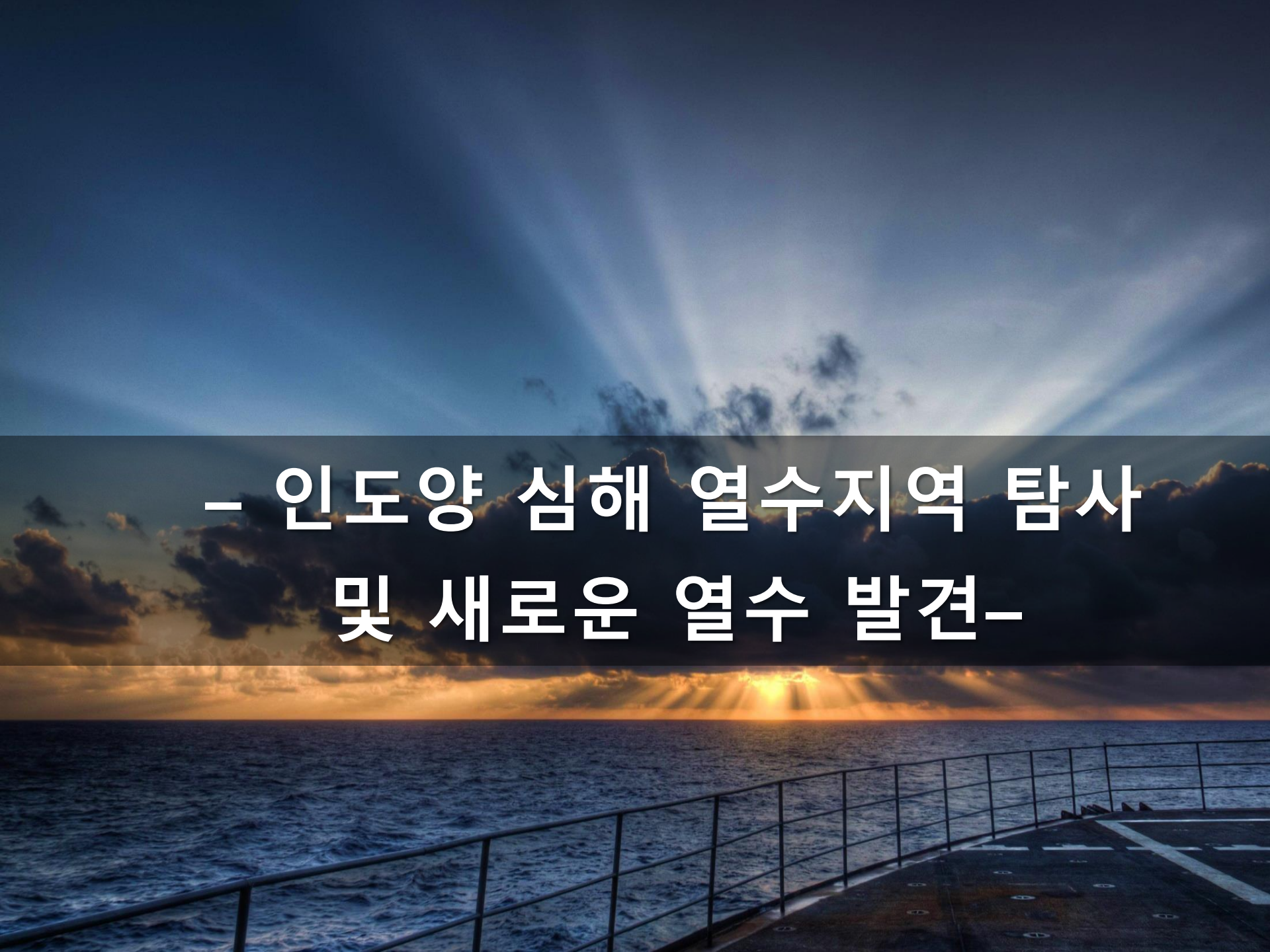






열수가 더 이상 분출되지 않아 열수생물이 서식하지 않는 죽은 침니 지역

블록버스터 재난 영화 속 사람이 사라져 폐허가 된 유령도시 같은 모습


– 인도양 심해 열수지역 탐사
및 새로운 열수 발견–

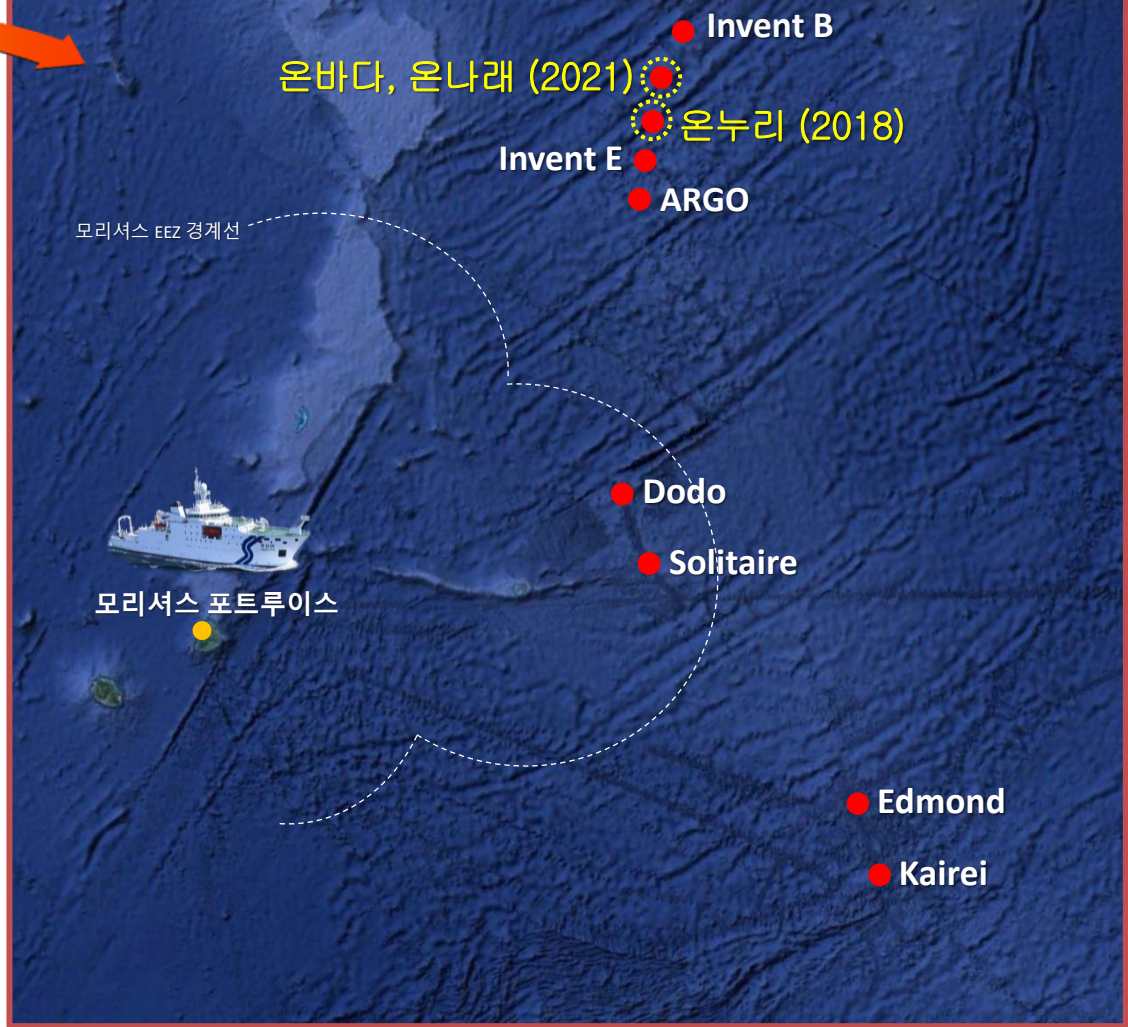
심해 및 열수 생태계

심해 열수분출구 – 인도양 열수공 탐사





2017년	• 탐사기간 : 2017년 7월 25일 ~ 8월 18일 • 탐사정점 : Solitaire, INVENT E, INVENT B
2018년	• 탐사기간 : 2018년 6월 9일 ~ 7월 4일 • 탐사정점 : 온누리, Edmond, Solitaire
2019년	• 탐사기간 : 2019년 6월 15일 ~ 7월 13일 • 탐사정점 : 온누리, Solitaire, Dodo, INVENT E, INVENT B
2021년	• 탐사기간 : 2021년 10월 11일 ~ 11월 18일 • 탐사정점 : 온바다, 온나래, 온누리, INVENT E, INVENT B
2022년	• 탐사기간 : 2022년 5월 28일 ~ 6월 20일 • 탐사정점 : 온누리, Solitaire, Dodo, INVENT E, INVENT B
2023년	• 탐사기간 : 2023년 4월 18일 ~ 5월 10일 • 탐사정점 : 온바다, 온나래, 온누리, ARGO, Kairei



심해 및 열수 생태계

심해 열수분출구 – 인도양 열수공 탐사

탐사에 활용된 주요 장비

〈이사부호〉



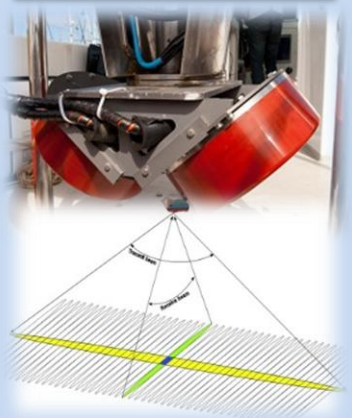
〈CTD〉



〈CTD-TOYO〉



〈Multi-beam Sonar〉



〈무인잠수정〉



〈Deep-sea Camera〉



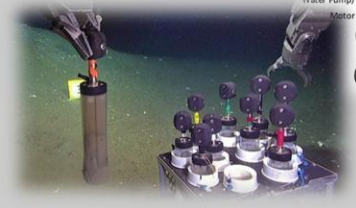
열수 분출공 탐지



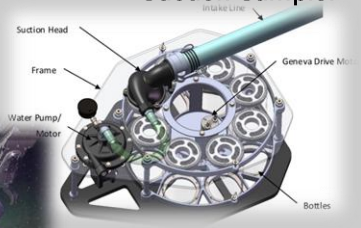
〈TV grab〉

생물 및 퇴적물 시료 채집

Push corer



Suction Sampler



〈Multiple corer〉



〈Box corer〉





심해 및 열수 생태계

심해 열수분출구 – 인도양 열수공 탐사

주요 장비 – 무인잠수정 ROPOS

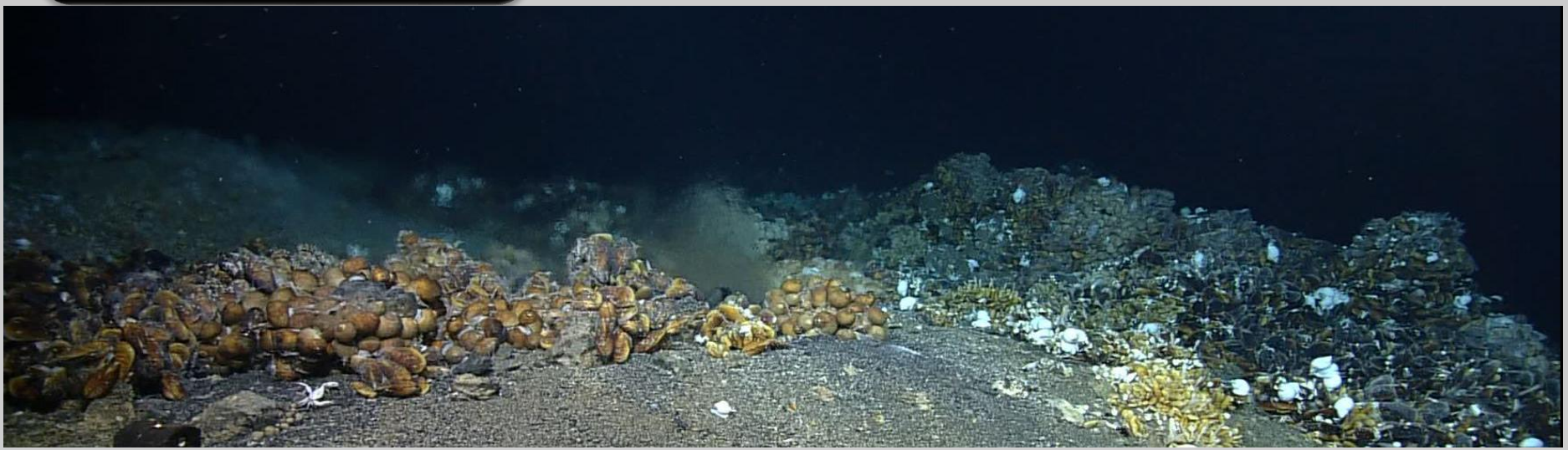


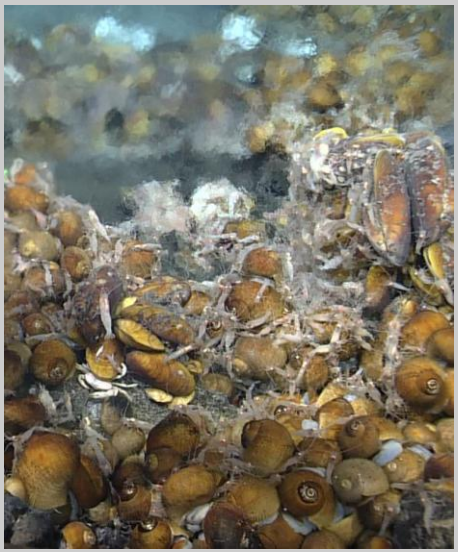
무인잠수정 ROPOS 투하 모습

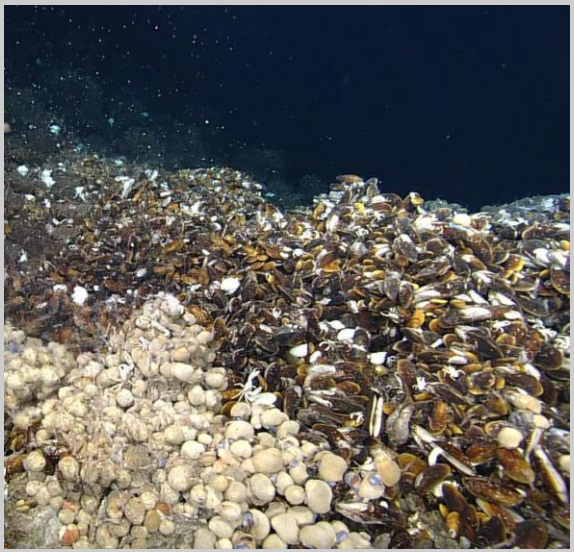
심해 및 열수 생태계

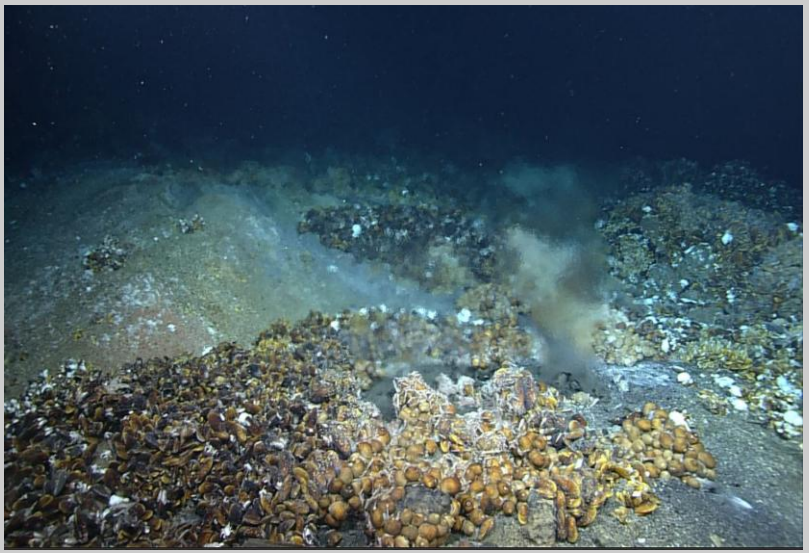
심해 열수분출구 – 인도양 열수공 탐사

“온누리” 열수 해역 사진











책임 저자 김동성

한국해양과학기술원(KIOST) 책임연구원
일본 도쿄대학교 석·박사 | 해양과학기술전문대학원 교수
과기부 과학기술정책연구회 위원 | 국가과학기술위원회 기초연구진행협의회 위원
해양수산부 제2, 3기 기술자문위원회 해양분야 자문위원

기획 감수 최영호

해군사관학교 인문학과 명예교수 | 고려대학교 박사
제3기 대통령 직속 지속가능발전위원회 연구위원
한국해양과학기술원 자문위원 | 고려대 민족문화연구원 선임연구원

저자(목차 순으로 정리)

이상묵

서울대학교 지구환경과학부 교수 | 미 매사추세츠공과대학(MIT) 박사
제1, 2기 대통령 직속 국가정보화전략위원회 위원
InterRidge 국제중앙해령연구협의체 회장

김종욱

한국해양과학기술원 책임연구원 | 서울대학교 지구환경과학부 이학박사
인도양 해저열수광상 과제 연구책임자

민원기

한국해양과학기술원 선임연구원 | 인하대학교 해양생물학 박사
DSBS(Deep-Sea Biology Society), CBE(Chemosynthetic Based Ecosyterns) 회원

박정우

서울대학교 지구환경과학부 교수 | 호주국립대학교 박사

최사랑

서울대학교 지구환경과학부 박사과정 | 서울대학교 지구환경과학부 석사

심민섭

서울대학교 지구환경과학부 교수 | 미 매사추세츠공과대학 박사
미 노스웨스턴대학교 및 미 캘리포니아공과대학 연구원

이희승

한국해양과학기술원 책임연구원 | 서울대학교 화학과 박사
과학기술연합대학원대학교 KIOST스쿨 대표 교수

최기영

한국해양과학기술원 선임연구원 | 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사

오제혁

한국해양과학기술원 기술원 | 한양대학교 생명과학과 박사

서연지

한국해양과학기술원 선임연구원 | 미 신시내티대학교 박사
과학기술대학원대학교 전임교원

주세종

한국해양과학기술원 책임연구원 | 미 메릴랜드 주립대(칼리지 파크) 박사
국제해저기구(ISA) 법률기술위원 및 북태평양해양과학기구 한국정부 대표

원용진

이화여자대학교 생명과학전공 에코과학부 교수
미국 럿거스대 박사 | 동물분류학회 및 통합생물학회지 편집위원

장숙진

이화여자대학교 생태과학 전공 이학석·박사
이화여자대학교 에코과학연구소 박사후 연구원
인하대학교 해양과학기술연구소 박사후 연구원

유옥환

한국해양과학기술원 책임연구원 | 전남대학교 박사
한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 겸직교수

강수민

한국해양과학기술원 학·연협동학생연구원 | 한국해양대학교 석사

노현수

한국해양과학기술원 동해연구소 책임연구원
서울대학교 생명과학부 이학박사 | 동해환경연구센터 센터장

김영옥

한국해양과학기술원 책임연구원 | 일본 도호쿠대 박사 | 한국원생생물학회 회장 역임
제4기 국가과학기술자문회의 심의위원

최정민

한국해양과학기술원 기술원 | 부경대 수산생명의학과 박사

김민주

한국해양과학기술원 기술원 | 과학기술연합대학원대학교 KIOST스쿨 박사과정 수료

강정훈

한국해양과학기술원 책임연구원 | 서울대학교 지구환경과학부 이학박사
한국해양학회 생물분과 이사

강태욱

국립공원공단 국립공원연구원 해양연구센터 연구원
인하대학교 해양과학·생물공학과 박사

김태원

인하대학교 해양과학과/바이오메디컬·엔지니어링 부교수
서울대학교 생명과학부 박사
현 PICES Bio committee 위원 및 생명다양성재단 이사

조봉호

인하대학교 바이오메디컬·엔지니어링 박사 수료
인하대학교 바이오메디컬·엔지니어링 석사

신희재

한국해양과학기술원 책임연구원 | 일본 도쿄대학교 박사
과학기술연합대학원대학교 교수 | Marine Drugs 편집위원

김지훈

한국해양과학기술원 기술원
과학기술연합대학원대학교 KIOST스쿨 박사과정

임동일

한국해양과학기술원 책임연구원 | 서울대학교 박사
한국지구과학회 이사 역임 | 한국해양학회 학술이사

권개경

한국해양과학기술원 책임연구원 | 서울대학교 박사
과학기술연합대학원대학교 전임교원

김윤재

한국해양과학기술원 책임연구원 | 성균관대학교 유전공학 박사

신아영

한국해양과학기술원 해양생태연구센터 연구원
인하대학교 해양과학·생물공학과 석사

정민규

한국해양과학기술원 해양생태연구센터 학·연협동학생연구원
부경대학교 해양생물학과 석사과정

TVN 「벌거벗은 세계사」

183회 "해저 2만리! 깊은 바닷속은 왜 전쟁터가 되었나? "



TVN 「벌거벗은 세계사」

183회 "해저 2만리! 깊은 바닷속은 왜 전쟁터가 되었나? "



EBS「취미는 과학」

73회 "심해, 그 깊은 곳에 어떻게 생명이 사나?"





EBS「취미는 과학」

73회 "심해, 그 깊은 곳에 어떻게 생명이 사나?"



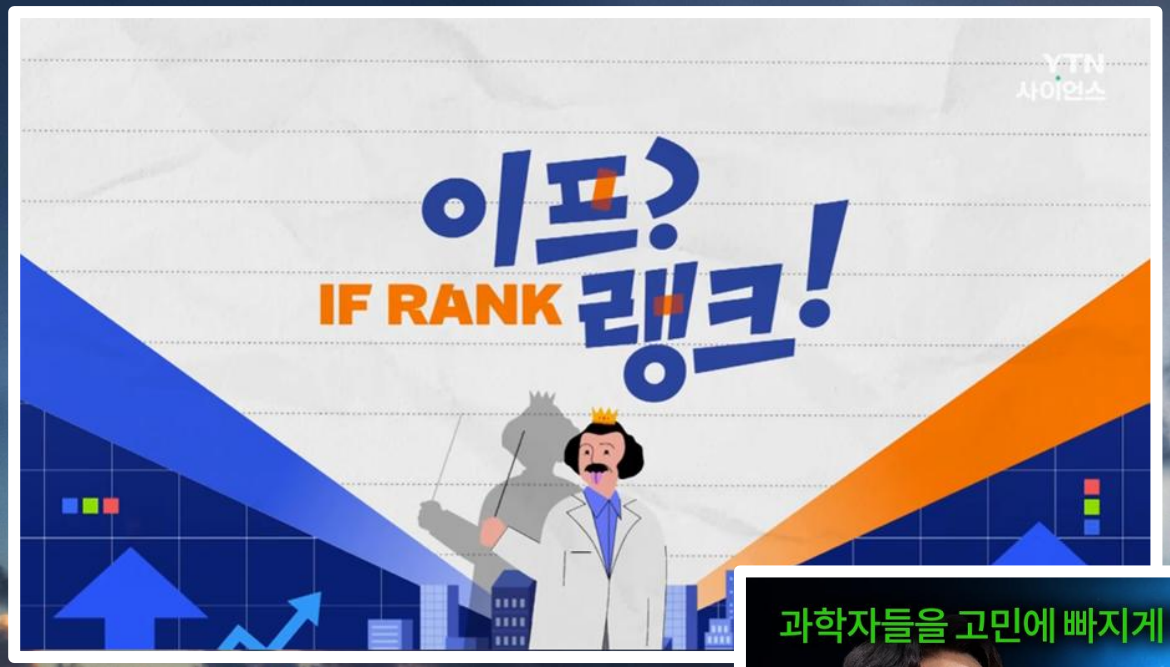




YTN「이프?랭크!」

Ep. 29

"심해 6,000m에서 발견된 외계 생명체의 정체 "







우리나라의 잠수정 개발

심해 열수 생태계

국내의 과학탐사용 잠수정

해양250 (유인잠수정)



- 1986년 개발, 2008년 기 퇴역
- 모선 : R/V 이어도

해미래 (무인잠수정)



- 2006년 개발
- 천안함 파편탐색(2010)
- 동해 메탄수화물 언덕 발견(2013) 등

- 2007년 “심해유인잠수정 개발을 위한 기획 조사연구” 수행
- 2015년 현재 해양수산부 지원으로 “심해 유·무인잠수정 기술 개발 및 운용 인프라 구축” 연구사업 수행 중

  연구기간 1단계(2013~2017년), 총 연구비(280억 원),

  주관/협동/위탁 기관(한국해양과학기술원/선박해양플랜트연구소/한국기계연구원 등)

심해 열수 생태계

우리나라의 심해유인잠수정 개발 계획

- 심해 환경보다 더 어려운 환경에서 난항



심해 열수 생태계

수중건설로봇 개발

우리 기술로 개발된 수중건설로봇 3종

URI-L

Underwater Robotics It's Light work class ROV



유압 매니퓰레이터 | 수중 입체 음향 시스템 | 센서 융합 기반 햅틱 시스템

작업수심	2,500m	무 게	1.5톤
크 기	2.0m × 1.3m × 1.5m		



수중 환경조사 및 맵핑 | 수중구조물(파일) 시공 및 작업 지원 | 절단, 청소 등

URI-T

Underwater Robotics It's Trencher



300마력 유압시스템 | 600마력 수중 워터젯 시스템 | 선상관제 체계 기술 | 수중유압 작업툴

작업수심	2,500m	무 게	20톤
크 기	6.5m × 5m × 4.5m		



워터젯 노즐을 이용한 해저면 굴착 | 케이블 컷팅 및 그리핑 | 매설된 케이블 및 파이프라인 탐지

URI-R

Underwater Robotics It's Rocker



3D작업환경 시각화 기술 | 듭체인지

작업수심	500m	무 게	35톤
크 기	13.2m*3.5m*3.4m		



암반조건에서 해저케이블 및 파이프라인 매설 | 트랜치 커팅 | 되메우기, 토공, 고르기 | 굴곡이 있는 지반의 암파쇄

2 국내 수중모빌리티 개발 현황

국내 개발 1호 민간잠수정





해양 250

- 한국해양연구소(현, KRISO)에서 3인승 유인잠수정 해양250 개발
- 취항 1986년, 퇴역 1996년
- 최대허용수심 250m
- 중량 : 9.5t
- 탑승인원 : 3인

잠수정 기술 연계 단절상태

잠수함 개발 현황



3,000톤급 도산 안창호함 - 군용잠수함

- 잠수정/잠수함 분류 기준 : 배수량 500t 기준
- 대한민국 군용 디젤잠수함의 경우 세계 최고 수준의 건조기술 보유
- 국내 잠수함 조선소는 소형 유인잠수정 개발 기술은 미보유 상태
- 민간 유인잠수정의 특성에 따른 별도의 기술 필요 : 소형 생명유지장치, 관측창, 비상탈출장치, 수중로봇팔, 능동소나 등
- 군 잠수함 대비 배수량 및 건조비용이 100배 이상 작아 기존 민간업체들이 관심없음

군/민간 잠수정 기술은 상이함

현 국내 운영중인 민간유인잠수정



제주, 65인승 관광잠수정

- 제주도 관광잠수정 최대 운항 수심 : 45m
- 탑승인원 : 65인
- 주 거동은 수직이동에 준함.
- 수상 지원선박과 테더케이블이 연결되어 있으며, 비상탈출장치 미탑재
- 자유로운 수중 이동 및 안전관련 기술이 제한적인 상태

현 국내 잠수정으론 원활한 수중이동 불가





수중 모빌리티 외형(안)

- 수중모빌리티 현재 별칭 : 해리온 300
- 승선인원 : 총 3명(파일럿 1 + 승객 2)
- 최대 운영수심 : 300m
- 중량 : 6t 내외 (in Air)
- 연속 운영가능 시간 : 6시간 (순항조건)
- 전원 구성 : 주 파워팩 + 비상전원장치
- 생명유지장치 작동 시간 : 미션시간 + 100시간
- 미션툴 : 로봇팔, 4k 광학카메라, 2D 이미징소나, 레이저 거리계, 수중음향위치추적기 등