

## 미국 해양생명공학 연구동향

김 상 진  
한국해양연구원

미국의 대표적인 해양과학의 본산으로 동부에 Woods Hole 연구소(WHOI)와 서부의 Scripps 연구소(SIO)를 꼽을 수 있다. 역사가 제일 오래된 미국의 해양 선두연구기관인 이 두 곳의 연구동향이 바뀌고 있다. 이 중 하나인 서부의 SIO(Scripps Institution of Oceanography)와 동부의 매릴랜드대학 해양생물공학연구소의 연구내용 및 운영현황을 살펴보고 미국의 해양생명공학분야 최근 연구동향을 알아보기로 한다.

먼저 SIO의 조직을 살펴보면 2001회계년도 현재 총장인 Dr. Robert C. Dynes 아래에 부총장인 Dr. Charles F. Kennel가 조직을 관장하고 있다. 부총장은 해양과학분야의 부총장이자 SIO의 소장직을 맡고 있고 해양과학대학원의 학장직을 동시에 수행하고 있다. SIO 소장 아래에는 주정부 담당관 및 정부관계 총괄담당관, 정책프로그램 및 국제관계담당관 등이 보좌한다. 또한 전체적인 연구기능 및 교육기능을 담당하기 위한 조직을 연구소장이 관장하는데 모두 6부문으로 나누어 역할분담을 하고 있다. 먼저 행정담당 부소장, 해양과학 부학장, Birch 수족관 담당관, 선박 및 해양기술지원 담당관, 교육부문 및 SIO 대학원 담당 부소장, 연구담당 부소장이 있다. 이 중에 교육담당 부소장과 과학담당 부소장은 각각 Dr. M. C. Hendershott와 Dr. S. Hodgkiss가 현재 맡고 있다. 교육담당 부소장은 여러 교육그룹을 맡고 있는데 그룹의 구분은 응용해양과학, 생물해양학, 기후과학, 지질학, 지구물리학, 해양생물학, 해양화학 및 지화학, 물

리해양학으로 되어 있다. 또한 과학담당 부소장 산하에는 7개의 연구부서, 2개의 실험실, 2개의 UC 연구소, Sea grant로 나뉘어 지는데 연구부서에는 CAS(Center for Atmospheric Sciences), CRD(Climate Research Division), GRD(Geosciences Research Division), IOD(Integrative Oceanography Division), MBRD(Marine Biology Research Division), MRD(Marine Research Division), PORD(Physical Oceanography Research Division)로 나뉘어지고, 실험실에는 CMBB(Center for Marine Biotechnology and Biomedicine), MPL(Marine Physical Laboratory), UC 연구소에는 CalSpace(California Space Institute), IGPP(Institute of Physics and Planetary Physics)가 있어 조직이 매우 복잡하고 방대한 것을 알 수 있다.

2001 회계연도(2000. 7. 1 - 2001. 6. 30)의 예산총액은 약 1.5억불이고 세부현황을 살펴보면 <표 1>과 같다.

한편 SIO의 구성원을 살펴보면 <표 2>와 같다. 2000년도 현재 총원 1,692명이고 인력 구성원별로 볼 때 자원봉사자를 많이 활용하는 것이 특징이다. 이 자원봉사자들은 선박이나 실험실에서 단순작업시 활용뿐 아니라 행정부문에서도 예를 들어 외부방문자들의 연구소방문 시 안내를 맡는 등 매우 인상적인 인력활용이며 지역주민들의 연구소에 대한 사랑을 고취시키는 동시에 예산절감을 노릴 수 있는 방법임을 알 수 있다.

<표 1> 재원별 예산액 및 비율

연방정부회계	액수 (\$)	비율 (%)	기타지원	액수 (\$)	비율 (%)
과학재단	33,162,332	22.9	주정부 일반회계	22,881,700	15.8
해군성	16,688,721	11.5	개인 기부 및 연구기금	5,602,584	3.9
NASA	13,341,893	9.2	대학회계	2,458,222	1.7
NOAA	10,009,114	6.9	California 주	1,487,168	1.0
에너지성	1,592,795	1.1	기부금	1,266,142	0.9
기타 연방정부	3,657,473	2.5	기 타	28,375,933	19.6
기타 국방성	1,521,507	1.1	소 계	62,071,750	42.8
연방유입금	2,988,170	2.1			
소 계	82,962,006	57.2	총 계	145,033,756	100

<표 2> SIO의 구성원별 인원

구성종류	인원수	구성종류	인원수
교수	92	연구원	95
기타과학자	180	기술/기능직	111
해양지원	126	과학지원	126
컴퓨터/출판/전문가	104	자원봉사자	395
대학원생	159	학부학생 staff	99
중앙행정	34	과학행정	155

SIO(Scripps Institution of Oceanography)는 300 여개 이상의 연구과제를 수행하고 있고, 미국은 물론이고 63개 국가의 과학자들과 공동연구를 수행하고 있으므로 SIO의 과학자는 24시간 언제든지 어느 대륙, 어느 대양에서 연구를 수행하고 있는 것을 발견할 수 있을 정도로 활발한 연구를 수행하고 있다는 자부심이 있다. 이곳에서는 다음과 같은 대주제에 관련된 연구를 진행하고 있다.

- The Oceans and Global Climate Change(해양 및 지구기후 변화)
- Earthquakes and Geology(지진 및 지질학)
- Marine Biotechnology and Biomedicine(해양생명공학 및 생의학)
- Marine Biodiversity and Conservation(해양 다양성 및 보존)
- Coastal Resources(연안자원)

이 중에서 본인이 관심있는 분야인 Marine Biotechnology and Biomedicine과 Marine Biodiversity and Conservation 분야에 대해 자세히 언급하기로 한다. 먼저 Marine Biotechnology and Biomedicine 분야의 연구를 위해 SIO에는 CMBB(Center for Marine Biotechnology and Biomedicine)를 조직하였고 이곳에서는 다음과 같은 주제의 연구를 수행하고 있다.

- New cures from the sea(해양으로부터 신규치료제 개발)
- Marine microbes(해양미생물)
- Marine viral genomics(해양바이러스 유전체학)
- Explaining human disease process(인체 질병과정의 이해)
- Using genetics to produce marine pharmaceuticals(유전자를 이용한 해양의약품 생산)
- Cleaning up pollutants(오염물질의 정화)
- Studies in the neurosciences(신경과학 연구)
- Next generation ultrasonic imaging(차세대 초음파영상)
- Bioluminescence(생물발광)

이중 CMBB 소장인 Felical 그룹에서는 최근 해양퇴적으로부터 신규 방선균 속을 발견하였다. *Salinospora*라고 명명된 이 신속 방선균으로부터 항생작용 뿐 아니라 항암, 항균 작용을 갖

고 있는 화합물을 분리정제하여 주변 제약회사와 공동으로 개발 연구하고 있다. 이 미생물은 수심이 깊을수록 그 수가 더 많이 분포하고 있는 것으로 밝혀져 방선균이 토양유래 세균이라는 학설을 부정하고 오히려 해양유래 세균일 가능성이 높다는 주장을 하고 있다. 이 미생물은 해양에서만 서식하는 종으로 열대, 아열대 해역에 널리 분포하고 있다. 또한 오스트레일리아 주변해역에서 발견된 연산호로부터 분리된 eleutherobin은 유방 및 난소암을 치료하는 항암제로 탁월한 효능을 나타내고 있다는 보고도 하였다. Taxol을 대체하기 위해 실험한 10,000 종 이상의 항암화합물 중 eleutherobin은 매우 높은 가능성을 나타내고 있다. Pseudopterosin은 카리브해 산호에서 발견된 화합물로서 거친 날씨로부터 피부를 보호하기 위한 크림에 사용되고 있다. 이 물질은 현재 건선, 접촉성피부병과 같은 경우의 항소염제로서 활용하기 위한 연구를 추진하고 있다. Haygood 박사는 미국 암연구소에서 수행하고 있는 임상 II상 실험 중인 bryostatin이라는 항암제 생산에 대해 연구하고 있다. 이 항암제는 해양에 서식하는 이끼벌레로부터 발견하였으나 연구가 진행되면서 많은 양의 화합물확보가 필요하나 해양생물을 무한정 채취할 수도 없어 연구진행에 차질이 많다. Haygood 박사는 California Sea Grant College 프로그램과 CalBioMarine Technologies로부터 지원을 받아 bryostatin을 경제적으로 생산할 수 있는 방법에 이용할 수 있는 미생물이나 클론을 분리하기 위한 유전자서열을 밝히는 연구를 수행하고 있다.

Marine Biodiversity and Conservation 분야에서는 다음과 같은 연구를 수행하고 있다.

- Coral reefs and marine diversity(산호초와 해양생물 다양성)
- Food shortage in the deep(심해의 영양공급 부족)
- Monitoring the ocean food web(해양먹이사슬의 관찰)
- Kelp forests(수중 켈프림)
- Antarctic wildlife(남극 야생동물)
- Raising threatened species(멸종위기 종의 복원)
- Fish TV(Sonar를 이용한 수중생물 삼차원 영상화기술)
- Tracking changes in the California current(캘리포니아조류의 변화추적)
- Plunging plankton populations(플랑크톤군집의 감소현상)
- Plankton patches and the ocean in motion(플랑크톤 편재현상 및 해양에서의 거동 규명)
- Deep-sea exploration(심해탐사)

미국 동부 발티모어 소재 매릴랜드대학에는 생명공학분야의 집중적인 연구를 위한 hub 시스템으로 UMBI(University of Maryland Biotechnology Institute)산하에 CARB(Center for Advanced Research in Biotechnology), COMB(Center Of

**<표 3> UMBI의 2001 회계연도 예산 및 지출 규모 (2000. 7. 1. - 2001. 6. 30.)**

세입예산			지출예산		
주정부지원	\$ 16,244,159	43%	인건비	\$ 20,299,283	54%
연방정부 계약연구비	\$ 13,510,280	36%	기타 운영비	\$ 5,845,044	15%
주정부 계약연구비	\$ 3,607,450	10%	지원 및 재료비	\$ 5,645,002	15%
개인 계약연구비	\$ 2,680,619	7%	시설운영비	\$ 4,840,889	13%
판매, 서비스 및 교육활동	\$ 955,973	2%	장비 및 수리비	\$ 1,266,955	3%
기타 재원	\$ 828,692	2%			

**<표 4> 연구비 재원별 비중 (2001 회계연도)**

재원	액 수 (\$)	비 중 (%)
연방정부	13,827,039	81
법인조직	1,261,794	7
재단	900,463	5
주정부	789,221	5
기타	401,574	2

Marine Biotechnology), CAB(Center for Agricultural Biotechnology), MBC(Medical Biotechnology Center), IHV(Institute of Human Virology)와 같은 5개의 연구소를 갖고 있다. UMBI의 전체 예산규모는 위의 표와 같으며 각 연구소의 특징에 따라 생물공학연구 및 인체건강에 대한 응용, 해양환경, 농업, 단백질공학/구조생물학 분야에 연구, 훈련, 교육, 서비스 등을 수행한다. 전체 약 3,800만불의 지원예산 대부분이 주정부, 연방정부에서 지원이 되며 연방정부의 예산은 주로 연구비 형태로 주정부지원은 대부분 운영비 형태로 사용되고 있음을 알 수 있다 <표 3>. 지출예산 중 인건비 부분이 54%로 매우 높은 것이 특징이다. 또한 총 연구비의 각 재원별 금액 및 비중은 <표 4>와 같으며 80% 이상이 연방정부로부터 지원이 되는 안정된 구조를 갖고 있는 것을 알 수 있다.

UMBI 산하 5개의 연구소 중 하나인 COMB는 1985년 설립되었고 분자생물학과 분자유전학의 응용을 통한 해양자원의 보존 및 개발을 연구하는 기관으로 다음과 같은 분야에서 연구, 교육, 경제발전에 중점을 두는 목표를 갖고 있다.

- 해양어패류
- 증양식 및 수산 제방법 개선
- 물고기 증식과 발달과정에 환경오염이 미치는 영향
- 해양 및 기수의 유해조류
- 유해조류의 조기검출기술 개발
- 생물정화
- 환경정화 및 회복을 위한 신기술 적용
- 미생물 전환과정
- 생산물질의 분자생물학과 분자유전학적인 기초연구
- 의약품과 같은 신규해양유래 화합물 개발
- 미생물 생산물질의 산업적 응용에 관한 적용

미생물과 산업

본 연구소는 2002년 현재 총 142명의 교수와 스태프로 구성되어 있으며 그 세부구성은 현재 미국과학재단 (NSF) 이사장인 Rita Colwell 교수를 비롯하여 17명의 교수, 66명의 방문교수 및 과학자, 대학원, 학부생 및 자원봉사자, 46명의 교수연구 보조원 및 실험실 지원인력, 11명의 행정 및 기타 지원인력으로 되어 있다. 건물은 발티모어의 내항에 위치한 1.6억불 짜리 건물인 Columbus Center내에 자리잡고 있으며 건물전체 면적의 67%인 약 18,000 m<sup>2</sup>를 차지하고 있다. COMB내에 총 334개의 연구실, 60개의 실험실, 약 1,000 m<sup>2</sup>의 도서관, 58개의 hume hoods, 22개의 저온실, 2개의 생물안정성 3등급 수준 실험실, 조직배양시설 등이 있으며 DNA, peptide 합성 및 서열분석기와 같은 첨단장비, 이미지 분석기, 모노크로날향체 생산기, 혐기성시설, 고압/고온 배양기 및 발효기, NMR 등 9백만불 이상의 과학장비와 시설을 갖추고 있으며 Columbus Center 지하층에는 연면적 약 2,000 m<sup>2</sup>의 순환식 증양식 첨단연구시설이 위치하고 있다.

COMB은 산업체, 정부, 비영리기관에 Bio-Analytical Services (BAS) 실험실이라는 전문가실험 서비스와 특수 장비를 제공하고 있다. 기업체나 외부기관들은 이와 같은 서비스의 내용으로 예를 들어 첨단 발효시설이나 그들의 생물공학적 기술 개발요구를 아웃소싱하는 효율적이고 경제적인 방법을 제공한다. 또한 COMB은 양식산업 관련 회사 혹은 기관에 자문서비스 및 협력을 하고 있다. 연구자금의 규모는 2001 회계연도에는 주정부 지원이 3.9 백만불, 연구개발비 4.1 백만불이며 2002 회계연도에는 주정부 지원이 4.1 백만불, 연구개발비 4.9 백만불이다.

주 연구분야는 증양식, 천연물 및 미생물전환, 생물정화이며 각 세부분야별 연구내용은 다음과 같다.

#### □ 증양식 연구분야

미국에서는 제어된 환경내에서 경제성있는 수산생물 양식은 매우 중요한 비중을 차지하고 있다. 지구전체의 수산물수요는 2025년까지 70%가 증가할 것으로 예상되고 있으나 세계 주요 자연 수산량은 남획, 환경파괴, 질병 등으로 인하여 지속가능한 한계에 직면하고 있는 실정이다. 따라서 이와 같은 수요량을 해결하기 위하여는 현재 증양식 양을 7배 정도 증가시켜야만 한다.

다양한 수산자원 중에서도 지역에 매우 중요한 수산자원인 게에 대한 연구를 소개한다. 청게(blue crab) 인 *Callinectes sapidus* 종은 현재 9,000 만불의 경제적 효과를 나타내고 있고 1,000 여개의 일자리를 제공하는 증양식산업의 중요한 생물종임에도 불구하고 청게의 기초생물학적인 지식이 별로 알려진 것이 없다. 지난 10년간 계수확은 지속적으로 감소되었고, 2000년도에는 최악의 상태로 Maryland 전체수계에서 43%, Chesapeake 만 전체에서는 30%로 급격하게 떨어졌다.

COMB에서는 소장인 Dr. Zohar를 비롯해 3명의 교수가 주축이 되어 Phillips Seafood, Meridian Technologies와 같은 두 개의 산업체와 공동연구를 통하여 Chesapeake 청게에 대한 종합적이고 다학제적인 연구를 수행하고 있다. 이 프로그램은 3개의 주요 목표를 갖고 있다. 첫 번째는 가장 중요한 것으로 Chesapeake 청게의 자연사에 대한 이해를 제고하는 것이다. 이들은 최신 생물학, 생물공학의 제방법들을 청게의 생활사를 포함한 기초적인 과정을 연구하고 이해하는데 응용하고 있다. 이와 같은 과정을 통해 좀더 나은 관리가 가능해지고 청게의 수확을 증가시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다. 두 번째 목표는 청게의 부화기술을 개발하는 것이다. 이들은 이미 청게의 부화서부터 수정까지 전체생활사를 이해하고 실험목적으로 수백만개의 청게유생과 수천개의 어린 게를 생산하고 있다. 세 번째는 부화시킨 어린 게를 방류하여 Chesapeake 만의 청게 밀도를 높일 수 있는 가능성을 평가하고 있다. 2002년도에는 어린 청게에 표지를 하여 방류시킨 후 생존도와 서식장소를 모니터링하고 있다. 그 외에 증양식 분야에 관련된 주요 연구내용은 다음과 같다. 어류증식, 성장 및 발달, 영양, 질병관리, drug delivery의 신기술 개발 등

#### □미생물유전체 연구

온도가 200°C 이상에 이르는 유화수소를 다량 함유한 열수가 뿜어져 나오는 심해 열수구의 발견은 과학자들이 초극한 환경에서 살수 있는 생명체를 탐구할 수 있는 재료를 제공하였다. 이와 같은 조건에서 생존이 가능한 예를 들어 113°C에서도 살수 있는 초고온미생물들은 대부분 생물체의 새로운 도메인인 고세균(Archaea)에 속하고 극한온도, 압력, 산도, 포화염농도에서도 생존이 가능한 특징을 갖고 있다.

COMB의 Robb 교수연구팀의 관심사는 어떻게 초고온미생물이 대부분의 보통 단백질의 경우 비가역적으로 unfolding되는 극한조건 하에서도 단백질을 정확하게 folding하는 조건을 유지하는지를 규명하는데 있다. 그들은 초고온 해양미생물로부터 소위 chaperones이라는 것을 연구한 결과 이것들이 보통 단백질을 열손상으로부터 보호할 수 있으며 일반적으로 많이 연구되어 산업적으로 활용되고 있는 세균인 대장균의 열 내성을 향상시킬 수도 있다는 것을 발견하였다. 또한 초고온미생물에서 물 끓는 점 이상의 온도에서만 작동되는 몇 개의 단백질을 발견하였다.

초고온미생물의 수수께끼 중 하나는 지역적으로 매우 떨어진 예를 들어 지중해와 태평양의 열수구 지역에서 분리된 것들이 동일하거나 매우 유사한 미생물종이라는 것이다. 이에 대한 설명 중 하나는 고온생물계는 지리적으로 멀리 떨어진 지역사이에서도 지하층 내에서 끊임없이 교환, 순환이 일어나기 때문인 것으로 사료된다.

또한 본 연구팀은 한 위치에서 다른 위치로 이동하는 유전자 혹은 다른 유전자에 부착시키는 등의 소위 transposons이라는 것을 찾아 초고온미생물이 중간에 유전자교환을 할뿐 아니라 한 종 내에서 그 순서를 교환할 수 있는 능력여부에 대한 연구를 수행하고 있다.

#### □유전체 기능연구(Functional Genomics)

본 연구는 Du 교수에 의해 수행되고 있으며 연구목표는 모델시스템으로 zebra fish를 이용하여 근육과 골격형성에 관여하는 genetic program을 규명하는 것이다. 이 연구결과는 수산분야뿐 아니라 의학분야에도 응용할 수 있는 잠재성을 갖고 있다. 본 연구를 통하여 근육섬유의 분화는 주변조직으로부터 신호에 의해 조절된다는 것을 밝혔고 slow 근육에 중요한 positive 역할을 하는 Hedgehog 단백질이라는 성장 factor를 발견하였다. 이와 같은 발견들은 근육과 골격질환을 치료할 수 있는 신약개발에 이용될 수 있으며 세포치료법을 위하여 수정상태의 줄기세포를 근육 혹은 골격세포로 특이하게 분화시킬 수 있는 새로운 전략을 제공할 수도 있다.

#### □천연물 및 미생물전환 연구분야

해양환경은 지구표면적의 3/4을 차지하고 있고 지구상 생명체의 80% 이상이 서식하고 있으며 아직 전인미답의 천연보고로 남아있다. 해양환경의 생물체는 증식, 통신과 아울러 포식자, 감염, 경쟁으로부터 자신을 보호하기 위한 기작을 보유하고 있다. 해양생물은 서식환경의 특이한 물리학적, 화학적 조건 때문에 육상생물과는 상이한 특성의 다양한 분자화합물과 생물과정을 나타내고 있다. 따라서 해양식물, 동물 및 미생물로부터 발견되는 천연물질은 매우 귀중한 자원으로서 이는 다시 생물공학연구를 통하여 다양한 의약품, 의약연구용 물질, 산업용효소, 농산용 제품과 전환과정, 신규에너지원, 생물정화기술 등과 같은 것들을 개발하는데 적용될 수 있다. 현재까지 해양생물종의 1% 미만이 신규화합물 탐색대상으로 활용되었다는 주장을 하는 Hill 박사는 sponge 공생미생물로부터 다양한 신규생리활성물질을 탐색하여 제약회사와 공동으로 신약개발을 추진하고 있다.

#### □생물정화 분야

유독 환경오염물질 분해미생물의 사용은 유독화합물 처리 및 정화에 높은 잠재력을 나타내고 있다. 화학적 물리적 처리방법에 기초한 기술에 비교하여 생물정화기술은 경제성, 효율성, 환

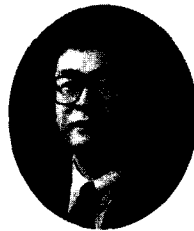
<표 5> COMB의 주요 연구분야 및 실적 요약

주요 연구분야 및 실적
· Development of a DHA-based nutritional supplement for aquaculture and animal feeds
· Development of a recombinant fish growth hormone system
· Development of a process for culturing marine finfish in closed-loop recirculating tank systems
· Development of hormonal kit to manipulate spawning in cultured fish
· Discovery of the hormone in the fish brain most relevant to spawning
· Development of technology to spawn striped bass year-round
· Development of a method for culturing in vitro the parasite known as Dermo, one of two pathogens that has caused mass mortalities of the Chesapeake Bay oyster
· Establishment of the state-of-the-art Aquaculture Research Center
· Leadership in the effort to develop a molecular testing method to detect Pfiesteria in the Chesapeake Bay
· Isolation of the cDNAs encoding all the key steroidogenic enzymes in fish
· Co-development of a rapid, on-site diagnostic test kit for detecting Vibrio cholerae 01 and 0139, the bacteria that cause cholera
· Transference of the growth hormone gene from rainbow trout into carp, creating the first successful transgenic fish in the United States
· Isolation of a substance that enhances oyster production
· Development of a marine-based adhesive that spawned two companies in Maryland
· Investigating the use of microbially-produced surfactants to replace chemical solvents used in shoe manufacturing

경친화성 면에서 우월할 뿐 아니라 에너지 소비율도 낮으며 민감한 생태계에 덜 피해를 미치는 등의 장점이 있다. 이 분야는 Sowers 박사가 주축이 되어 주로 해양퇴적도 오염물질인 PCB의 혐기적 탈염소화 과정에 대한 연구를 수행하고 있다. 즉 PCB 탈염소화 유전자의 probe 개발, 미생물 PCB 탈염소화과정의 생화학 및 proteomics, 지구의 염소순환과정을 중점적으로 연구하고 있다. 그 외에도 methanogenic archaea의 유전자 조절기작, 극한환경미생물의 생물전환 등에 관한 연구가 진행 중이다.

이 외에 COMB의 주요 연구분야 및 실적에 대한 요약은 <표 5>와 같다.

Spring  
UCSD, SIO. Research Overview  
UMBI. 2002. 2001 Annual Report



김 상 진  
1971-1977 서울대 미생물학과 학사, 석사  
1985 독일 Kiel 대학교 박사  
1985-1990 KIST 선임연구원  
1990-현재 KORDI 미생물연구실 책임연구원

**참고문헌**

CMBB, SIO, UCSD. The new frontier in biomedicine  
UCSD. 2002. SIO Explorations (Annual report fiscal 2001). 8(4)