

국제공동 해양 시추사업(IODP)의 등장과 지구과학에의 학술적 성과 및 한국프로그램(K-IODP)의 역할

현상민^{1)*}, 장세원²⁾, 이영주³⁾

¹⁾한국해양연구원, 해양방위연구센터, ²⁾한국지질자원연구원, 국제지질자원인재개발센터,

³⁾한국지질자원연구원, 대외협력실

Rising of Integrated Ocean Drilling Program (IODP) and its Scientific Achievement on Earth Science and Role of Korea Integrated Ocean Drilling Program (K-IODP)

Sangmin Hyun¹⁾, Se Won Chang²⁾, and Young-Joo Lee³⁾

¹⁾Marine Security Research Department, Ocean Research and Development Institute (KORDI), Ansan 426-744, Korea

²⁾International School for Geoscience Resources, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM),
Deajeon, 305-350, Korea

³⁾International Cooperation Office, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM),
Deajeon, 305-350, Korea

요 약 : 국제공동해양시추사업(Ocean Drilling Program: ODP)는 DSDP, IPOD 그리고 현재의 IODP 등의 여러 가지 이름으로 바뀌어 왔지만 공고한 국제협동을 통해 지구과학의 발전에 크게 기여하여 왔다. 약 10 년 전에 시작된 IODP는 이제 2013년부터 2단계로 진입하면서 더욱더 견고한 국제협력, 새로운 과학 영역에 대한 도전, 그리고 새로운 과학적 목표를 향해 발전해 나갈 것이다. 이 논문은 그동안 수행된 ODP탐사로 얻어진 탁월한 연구성과와 새롭게 출범되는 IODP의 구조와 새로운 과학영역을 한층 발전시키기 위해 필요한 역할에 대해 정리하였다. 특히 2단계로 접어드는 IODP에서는 현재까지 이루어지지 않았던 북극해와 같은 지역에 대한 조사와 심해 생물권(biosphere) 등 미생물 영역에 대한 연구, 기후변화에 대한 연구가 더욱 활성화 될 것으로 기대된다. 이처럼 IODP는 가맹국들의 강력한 국제협력을 통해 IODP는 앞으로도 지구과학의 발전에 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

주요어 : 국제공동 해양 시추사업, K-IODP, 심부시추, 지구과학, 기후변화, 생물권

Abstract : The ODP (Ocean Drilling Program) has been greatly contributed to the progress of Earth Science through the strong international cooperation with its name changed from DSDP (Deep Sea Drilling Program), IPOD (International Phase of Ocean Drilling) to IODP (Integrated Ocean Drilling Program). The IODP program which was launched about ten years ago will continue to develop toward the 2nd phase of scientific targets through the tight international cooperation. Distinguished scientific results from the various expedition as well as new phase of IODP structure and its important role that enhance the new scientific fields are summarized in this study. In particular, Arctic Expedition and deep-biosphere and high resolution climatic study that was not performed in previous ODP stages, will be extensively conducted in coming new 2nd IODP stages. Likewise, through strong international cooperation, it is expected

* corresponding author: Sangmin Hyun, Marine Security Research Department, Ocean Research and Development Institute (KORDI), Ansan 426-744, Korea(e-mail: smhyun@kordi.re.kr, phone: +82-31-400-7838, fax: +82-31-400-5822)

that IODP would play an important role in Earth Science developments.

Key Words : IODP, K-ODP, Deep-drilling, Earth Science, Climate changes, Biosphere

1. 서론

현재 시행되는 국제 공동 프로그램 중에서 국제 공동 해양 시추사업(Ocean Drilling Program: ODP, 이하 현재까지 수행된 DSDP, ODP, IODP를 총칭하여 ODP로 표기함)은 가장 성공적인 성과를 올리면서도 가장 오랫동안 지속되고 있는 국제 공동연구의 훌륭한 사례다(한국지질자원연구원, 2010). 이 시추사업은 지구 및 해양의 환경변화와 재해예방, 해저분지에 대한 연구, 해저의 유용자원 탐사 등 해양과 지구과학의 다양한 분야를 연구하기 위한 국제 공동 프로그램이다 (www.k-odp.re.kr). 1966년에 DSDP (Deep Sea Drilling Program)로 출범한 이 프로그램이 현재에 이르기까지 견고한 국제공동 프로그램으로 오랫동안 지속된 것은 장기간 혹은 단기간의 지구 시스템 진화에 대한 가장 중요하고 결정적인 과정을 이해하는 데는 과학적인 심해굴삭이 가장 강력하면서도 독특한 기회를 줄 수 있기 때문이었다 (Smith *et al.*, 2010). 특히 현재 진행되는 지구변화에 대한 거의 모든 기록들 즉, 지구조(tectonic), 기후변화(climate changes), 해양순환(ocean circulation), 생물권(biosphere)에 관한 기록들은 해양퇴적물에 보존되게 된다. 결국 지구역사에 관한 거의 모든 기록이 퇴적물이나 기반암에 수록되기 때문에 국제 공조를 통한 ODP 활동은 지구과학 발전에 중요하게 자리매김 된다.

1960연대에 시작된 이 시추사업은 다른 형태로 이름이 바뀌면서 계속되어 왔는데 이들은 초기의 심해굴삭프로그램(DSDP: Deep Sea Drilling Program), 해양굴삭프로그램(ODP: Ocean Drilling Program), 현재의 국제공동 해양 시추사

(IODP: Integrated Ocean Drilling Program)이 그것이다. ODP가 발족된 이래 실로 수많은 지구과학발전이 이루어졌고 현재도 더욱더 진보된 과학적 지식을 바탕으로 제 2, 제 3의 계획을 진행시키려 하고 있다. 현재 IODP프로그램에서는 24개국의 참여국으로부터 지구과학과 관련된 수많은 지질 과학자 (geoscientists), 미생물학자 (microscientists) 등 과학자들이 시추 탐험조사 (drilling expedition)에 참여하고 있다.

IODP를 통한 국제협력은 더욱 공고해 질 것으로 예상되며 또한 그렇게 됨으로써 지속적인 지구과학의 발전이 있을 것으로 판단된다. 특히 해저 퇴적환경에서 심부시추시 일어날 수 있는 폭발 위험성 등으로 인해 DSDP, ODP시기에는 수행할 수 없었던 지역에 대해서 IODP에서는 일명 라이저 장착 굴삭선 지큐(riser-equipped D/V Chikyū)를 활용하게 됨으로써 연구를 가능하게 했다. 이런 이유로 위험지역에 대한 시추와 더불어 고분해 (high resolution) 기술을 이용한 시추로 심해 생물권(deep-biosphere) 영역까지 연구영역을 넓히는 계기를 마련하게 되어 획기적인 지구과학에의 발전이 기대된다.

이 해설은 대표적 국제공동 연구 프로그램인 IODP가 지구과학 발전에 미친 영향 및 그 중요성을 감안하여 ODP의 역사와 발전, 주요성과, 새롭게 등장한 IODP의 연구성과 및 2단계로 접어드는 IODP에 대해 설명하기로 한다. 현재 IODP와 연계되어 국내에서 결성된 K-IODP도 회원국의 지위를 유지하며 2단계로 7년간(2011~2017년) 수행하기로 되어 있다. 이와 결부되어 앞으로 상당기간 수행 될 예정으로 있는 K-IODP의 나아갈 방향, IODP 국제 공동프로그램과 맞물려 있는 한국 K-

IODP의 역할 및 발전 가능성, 지구과학의 발전에 대한 기여 등에 대해 알아볼 목적으로 이 연구를 수행하였다.

2. DSDP, ODP, IODP의 역사와 발전

40여년에 걸쳐 진행되고 있는 국제공동 프로그램인 ODP 및 IODP은 많은 변화를 겪으면서 발전해 왔고, 앞으로 가장 효율적으로 운영될 수 있도록 재정비 되고 있다. 1966년에 설립되고 1968년부터 1983년까지 약 15년간 수행된 1세대 DSDP는 미국 National Science Foundation(NSF)에서 시추선 drilling vessel(D/V) *Golmar Challenger*를 과학적 연구를 위해 제공했으며 이때부터 국제 협력을 통한 해양시추 프로그램은 지구시스템 연구에 중요한 역할을 담당하게 되었다. 시추선은 DSDP를 통해 관리되었으며 각 탐사에서 과학적인 계획은 ODP에 가입한 각 기관의 연합체인 JOIDES (Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling)의 지도하에 계획되었다. 이 JOIDES는 세계 각국으로부터 정부대표, 민간산업체 대표, 공공 연구기관을 대표하는 200명 이상의 과학자들로 구성되었다. IPOD(International Phase of Ocean Drilling)은 ODP의 뒤를 이어 1975년에 시작되었으며, 이 프로그램 또한 국제적 기금으로 운영되었다.

DSDP/IPOD시기는 해양퇴적물에 대한 심부시추의 본격적인 탐사기라 할 수 있다. 이 시기에는 해양분지의 형성과 진화에 대한 개념을 파악하기 위해 전 세계 해양의 모든 중요한 부분을 굴삭하게 되었는데, 전 세계 해양에 대한 굴삭은 과거에 탐사된 적이 없었던 지역에 대한 탐구의욕을 충족시키기 위한 것이라고도 할 수 있다. 또한 이 시기는 가장 중요하고 획기적인 지구과학 분야의 연구결과를 도출함으로써 지구과학 분야에 큰 진보를 가

져온 시기이기도 하다. 이 시기에 얻어진 대표적인 연구결과 중 하나는 해양지각의 연령을 파악한 것이다. 즉, 중앙해령(mid-ocean ridge)에서 만들어진 해양지각은 해구(trench)로 섭입(subduct)하게 되며 거의 모든 해양 지각의 연령은 최대 2억년을 넘지 않는다는 것이다. 이런 이유로 대륙에 분포하는 암석의 연령보다는 해양지각이 훨씬 젊은 연대를 보인다는 사실이 입증되었다. 더불어 과거 약 2억년 동안에 일어난 기후변화나 해양변화가 전 세계 해양에 중요하게 작용했음을 밝혀낸 것이라 할 수 있다(Smith *et al.*, 2010).

1980년대 초반 D/V *Glomar Challenger*호가 퇴역하게 되었을 때 국제 과학계(International scientific community)에서는 첫 번째의 과학적 심부시추에 관한 국제 심포지엄을 개최하게 되었다. 이 심포지엄에서 과학계는 해양 심부시추의 중요성을 정의하였을 뿐만 아니라 심부시추와 관련된 과학적인 연구는 장기적인 연구가 필요하며 전 지구적으로 지지 받지 않으면 국제적인 공조로 수행되는 국제규모의 심부시추는 결코 완성될 수 없다는 것을 확인하게 되었다. 여기에서 NSF는 결국 국제 과학계에 연구를 위한 굴삭선을 제공하기로 약속했는데 이 시추선이 바로 D/V JOIDES Resolution이다.

1981년에 개최된 CODOS (Conference on Scientific Ocean Drilling)에서는 ODP의 장래 계획이 세워졌다. 이 계획은 지구과학의 제 분야 중 1. 해양지각의 형성과 진과, 2. 대륙 연변부의 지구조(tectonic), 3. 해저퇴적물의 기원과 형성과정, 4. 대기, 해양, 빙상, 생물권 및 지자기의 변동에 관한 연구를 포함하는 것으로 요약했다(Taira, 1992). 이와 같이 약 15년간에 걸쳐 수행된 ODP 활동은 두 개의 주요한 주제하에서 전개되었다고 할 수 있다. 즉, 지구환경의 역학(Dynamics of Earth's Environment)과 지구심부의 역학(Dynamics of Earth's Interior)이 그것이다 (Susan *et al.*,

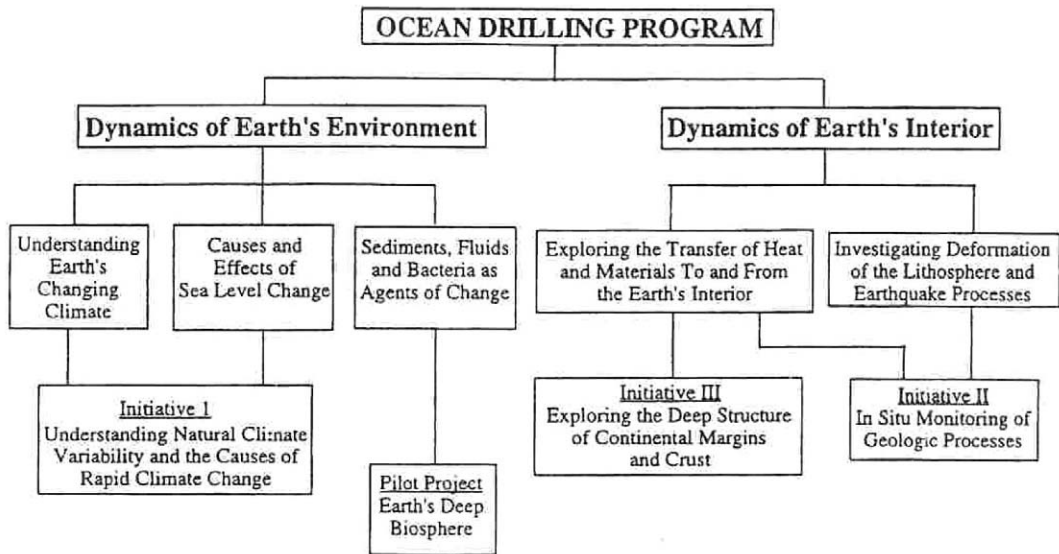


Figure 1. The major themes of the Ocean Drilling Program's 1996 long-range plan (after Susan *et al.*, 1997 and modified by Hyun *et al.*, 1998).

1997; 현상민 외, 1998). 지구환경에 대한 활동은 주로 기후변화, 해수면 변화 그리고 심부 생물권에 대한 연구를 포함하고 있다. 반면, 지구 심부의 역학에서는 지구 심부의 열과 물질 순환에 관한 탐험과 암석권 변형과 지진과정에 관한 연구를 포함하고 있다(그림 1).

국제 시추프로그램인 ODP는 IODP가 시작되는 2003년까지 약 20여 년간 가맹국들의 견고한 국제적 공조하에 세계 각지의 중요 연구지역에 대한 심해시추를 수행했다. IPOD를 포함하여 DSDP 기간에는 전 세계 대양에서 624지점에 달하는 심부 시추가 이루어졌으며(Taira, 1992) 그 결과 수많은 지구과학적 연구결과를 남겼다. 특히 이 기간에는 각 심해시추에서 얻어진 귀중한 자료를 공표하거나 추후 연구에 대비하기 위해 시료를 보관하거나 비 가맹국 과학자들의 시료요청에 대한 정책적인 면도 충분히 고려했다. 이 시기에 취득된 시추 시료는 미국의 Texas대학(Gulf Coast Repository: GCR)과 독일 Bremen대학(Bremen Core Repository: BCR)에 체계적으로 보관되어 있으며 추후 연구에

사용될 수 있도록 대비하고 있다. IODP시기에 접어들어서는 심부시추로 얻어진 퇴적물 시료에 대해 영역별로 보관장소를 정하게 되었다. 즉, GCR과 BCR과 더불어 태평양에서 얻어진 시료는 일본 KCC(Kochi Core Center)에 보관하기로 했다.

2003년에 시작된 IODP는 2013년에 1단계가 종료될 예정으로 있다. 이 시기에도 활발한 IODP의 발전이 있었으며 2013년부터는 2023년 까지 10년 동안 새로운 2단계 IODP시기로 진입하게 되었는데 이 기간에도 한층 더 견고한 국제적 공조하에 심해시추가 진행될 것으로 예상되고 있다. 이미 언급한 바와 같이 IODP시기에는 과학적 계획은 한층 더 세분화되고 구체적인 목적으로 바뀌게 되었다. 특히 IODP 1단계에서 3개로 구분했던 주요 연구항목은 2단계에서는 4개로 세분했으며 기후와 해양변화 등과 관련된 연구 주제에서는 해양산성화(Ocean acidification)와 같은 최근의 연구이슈를 추가하였다(표 1).

Table 1. IODP Initial Science Plan (2003-2013) and (2013-2023)

IODP Initial Science Plan (2003-2013)		
Major Themes	Details	
1. The Deep Biosphere and the Subseafloor Ocean	- The Subseafloor Ocean and various Geological Settings	
	- The Deep Biosphere, Initiative: deep biosphere	
	- Gas Hydrate, Initiative: Gas Hydrate	
2. Environmental Change, Processes and Effects	- Internal Forcing of Environmental Changes Initiative: Extreme Climate	
	- External Forcing of Environmental Changes	
	- Environmental Changes by Internal & External Change Initiative: Rapid Climate Change	
3. Solid Earth Cycles and Geodynamics	- Formation of Rifted Continental Margin, Oceanic LIPs and Oceanic Lithosphere Initiative: Continental Breakup and Sedimentary Basin Formation	
	Initiative: Large Igneous Provinces, and 21st Century Mohole	
	- Recycling of Oceanic Lithosphere into the Deeper Mantle and formation of Continental Crust Initiative: Seismogenic Zone	
4. Others	- Infrastructure, Education and Public affairs, Innovation and Technology Development, Program Operation and Management, Science Advice and Coordination etc.	
IODP Initial Science Plan (2013-2023)*		
Major Themes	Details	
1. Climate and Ocean Change: Reading the past, Informing the Future	- Determining climate sensitivity	
	- Ocean acidification and the carbon cycle	
	- Role of polar ice sheets in past and future sea-level change	
	- Regional climate variability and the hydrologic cycle	
	- Requirements and Linkage	
2. The Biosphere: Co-evolution of Life and the Planet	- Records of the Ocean Biosphere	- Marine and terrestrial ecosystem evolution
		- Extending evolutionary theory: Exploration of temporal records
		- Ocean biochemistry and the carbon cycle
	- Deep Life	- Extent and dispersal of deep life: Biomass etc.
		- Survival & evolution under stress
		- Biogeochemical impacts - Strategies, linkages and requirements
3. Deep Earth Processes	- Renewing Earth's Surface	- Deep drilling of intact fast-spread ocean crust
		- Observations of active processes
		- Heterogenous slow-spread crust
	- The Reactive Earth's crust	
	Recycling the Crust	- Arc Magmatism: Generation of continental crust
		- Subduction initiation
		- Hazards and resources
4. Earth in Motion: Geohazards, fluid flow, and active experimentation	- Geohazards: Earthquakes, landslides, and tsunamis	
	- Fluids in Motion: Agents of mechanical, thermal, chemical, and biological changes	
	- Establishing a continued presence within the subseafloor realm, and requirements & linkages	

3. IODP의 등장과 2nd Stage (Phase)

IODP가 시작되기 이전에 다수의 국제 워크숍이 열렸는데 이 워크숍들의 목적은 주로 심부시추를 통해 지구의 발전과정을 좀 더 정확히 이해하기 위한 세 개의 주요한 과학적 주제를 다루기 위한 것이다. 즉, 1) 과거의 급격한 기후변화와 극한 기후변화(extreme climate), 기후변화와 해양순환의 주기와 경계를 포함하는 환경변화에 대한 주제, 2) 고체 지구 순환 (solid earth cycle)과 지구역학 (geodynamic)에 관한 것, 즉 대륙의 붕괴 (breakup)나 퇴적분지 형성, 대규모 화성암 기원, 지구맨틀 시추, 지진과 쓰나미(tsunami)의 이해 등을 포함하는 고체 지구순환에 관한 주제를 포함하여 3) 심해 생물권(deep biosphere)과 해저면에 관한 것으로 해저면하 심부에서 발견되는 생물권과 동결 하이드레이트(hydrate)에 관한 사항 등이다(표 1; www.iodp.org).

IODP의 운영을 위한 과학계획을 협의하는데 있어서 국제 워킹그룹(International Working Group: IWG)은 이들 세 가지의 과학적 목적을 수행하기 위한 프로그램을 결정하고 정의하기 위한 자원 조달 방안을 만들었다. IWG의 가장 중심이 되는 목적은 프로그램 수행을 위한 시추능력을 향상시키는 것이라 할 수 있다. 이 목적을 위해 심해 시추는 미국에서 제공되는 새롭게 개장된 D/V JOIDES Resolution, 일본이 제공하는 JOIDES 보다 더 깊이 시추가 가능한 riser장착 굴삭선 D/V Chikyu, ECORD에서 제공하는 천해환경이나 빙상이 있는 극한환경에서 시추가 가능한 mission-specific platforms(Sovetskiy Soyuz)을 이용하여 목적에 맞게 시추를 진행한다는 것이다.

IO(Implementing Organization)은 각 platforms의 운영을 책임지고 있다. 즉, 미국의 IO는 D/V JOIDES를, JAMSTEC(Japan Agency for Marine Earth Science and Technology)에

서는 D/V Chikyu를 그리고 ECORD는 mission-specific platforms를 운영하는데 책임을 다하기로 했다. Platforms를 운영하는 비용은 각 agency에서 제공하기로 했다. 현재 24개국이 IODP의 회원국이 되었으며 미국의 NSF와 일본의 MEXT(Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology)가 IODP의 선도 agencies로 구성되었다. 유럽 17개국의 consortium 형태인 ECORD 또한 회원국으로 일조하고 있다. 중국과 한국, 오스트리아-뉴질랜드 consortium, 인도는 준회원(associated member)으로 되어 있다. IODP의 정식 회원국, 준 회원국(associated member), NSF, 문부과학성(MEXT)간에는 IODP의 운영을 위한 의정서(memorandum)가 체결되어 있어 재정적 지원을 포함한 회원국의 권리와 의무를 명시해 놓고 있다(Smith *et al.*, 2010).

각국의 회원국에서부터 나온 재원은 과학계획, 시추 퇴적물 시료 관리, 학술적 성과 관리, 교육, 새로운 회원국의 가입, 다른 프로그램과의 관련성 등을 포함하여 IODP 관리사무실(ODP-MI management office)에서 담당하고 있다. IODP의 총괄적 관리, 행정관련 예산은 가변적이지만 연간 200만 달러를 넘지 않는다. IODP의 모든 과학은 회원국에서 제출된 제안서(proposal)에 근거하지만 IODP의 SAS(Science Advisory Structure)의 심의를 거치게 된다. 또한 SAS 위원회의 위원 구성은 각국이 분담하고 있는 재정적 기여도 정도에 따라 결정된다.

IODP는 2013년부터 10년 동안 2단계의 IODP로 진입하게 되어있다. 이 시기에는 1단계와는 약간 다르면서도 한층 구체적인 과학계획을 세우고 있으며 이 계획을 위해 IODP의 국제적 공조는 더욱 견고해질 것으로 기대된다. 특히 현재까지 2단계 IODP의 과학계획과 SAS의 구조 등이 확정되지는 않았지만 1단계에서와는 달리 기후와 해양변화(Climate and Ocean Changes)에 속해 있는

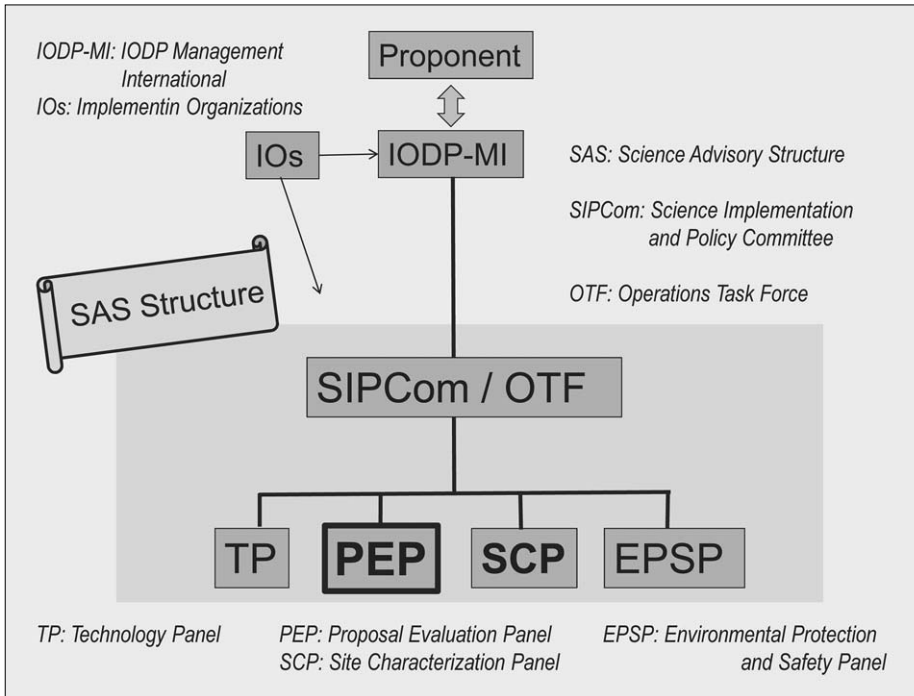


Figure 2. New SAS Structure in 2nd Phase of IODP (not opened at present). The previous SAS structure was simplified, and this new SAS will be applicable from the 2nd stage of IODP launching from 2013 year.

연구주제 중에는 기존에 언급되지 않았던 해양산성화(Ocean acidification) 등에 관한 연구 등이 추가되는 등 최근의 기후변화 관련 주제와 riser굴삭이 가능해짐에 따라 기존의 연구영역에서 다소 소외되었던 심부생물권(deep life)에 관한 연구영역을 강조하는 경향으로 지구과학적 이슈를 포함하고 있다(표 1).

IODP의 과학계획과는 별개로 IODP를 운용하기 위한 SAS구조도 많은 변화를 예고하고 있다. 기존의 많은 위원회 및 각종 패널(Panel)은 IODP 운용의 효율성을 꾀하기 위해 개편을 계획하고 있다. 예를 들어 IODP 1단계에서 심해 굴삭계획 실천하는 SAS 산하의 위원회와 패널, 즉 SPC (Scientific Planning Committee), SASEC (Science Advisory Structure Executive Committee)와 같은 위원회와 SSEP (Science Steering and Evaluation Panel), EPSP

(Environmental Protection and Safety Panel), STP (Scientific Technology Panel)과 같은 주요 패널은 그림 2에서 보는 바와 같이 일부 패널을 합병하여 효율적으로 만들거나 간편하고 구조적으로 용이한 SAS구조로 개편될 예정이다.

국제적 협의체인 IODP는 과학자들에게 몇 가지의 중요한 최근의 과학적 문제를 해결할 수 있는 기회를 주고 있다. 그 대표적인 것들은 북극해 및 북극점 부근에 대한 시추, 베링해(Bering Sea) 및 남극의 Wilkes Land 외해에 대한 시추가 그것이다. Great Barrier Reef는 과거 2만년~1만년 사이의 최종 간빙기 동안에 일어난 해수면 상승과 해수온도 상승을 연구하기 위해 시추되었다. 적도태평양을 횡단하는 transection상에서 시추를 취해 시료가 얻어졌으며, 연속적이면서 잘 보존된 퇴적물 시료는 6천 5백 만 년부터 현재까지의 기후변화와 지구조 상황을 복원하는데 도움을 줄 것이다.

시추공에 설치된 장치로부터의 관찰은 해저면하 압력변화나 온도변화 그리고 판(plate)의 운동을 보다 더 잘 이해하는데 도움이 될 것이다.

지난 2009년은 IODP에서 매우 중요한 해로 여길 수 있을 것이다. IODP 사상 처음으로 세 개의 drilling platform이 각기 다른 해양에서 동시에 시추를 진행했다. D/V Chikyu는 처음으로 난카이 섭입대(Nankai subduction zone)으로 불리는 지역에서 활성 지진대를 탐사하기 위해 처음으로 riser시추를 시도했으며, D/V JOIDES는 북서태평양의 Shatsky Rise에서 해저면상으로 대량의 화산분출에 의해 형성된 해양지각에 대해 시추를 진행하였다. 또한 mission-specific platform은 New Jersey 대륙붕에서 해수면 변화의 기작과 상승률을 알아보기 위해 시추를 진행했다. 이들 세계의 탐사(expedition)는 해양 퇴적물에 대한 심부시추를 통해 지구의 기본적 프로세스를 이해하는데 새로운 지식을 제공하고 있다(Smith *et al.*, 2010).

4. DSDP, ODP, IODP의 지구과학에의 성과와 공헌

DSDP를 계승한 ODP는 1983년에 시작되었으며, 미국 NSF와 22개국의 공조에 의해 운영되었다. JOIDES는 여전히 국제공조를 통한 위원회로 구성된 과학권고기구(SAS: science advisory structure)를 통해 과학적 계획에 대한 자문을 계속했다. ODP는 실질적으로 전 지구적인 과학적 문제를 해결하려는 목적으로 진행되는 해양심부시추의 진행구면이라 할 수 있다. 이 기간 동안 얻어진 과학적 성취는 실로 대단히 방대하고 많은 과학적 이슈를 포함하고 있다. ODP는 해수면 상승에 관한 역사적 변천과정을 정의했으며 극한 기후변화(extreme climate) 시기를 규정했다. 또한 심부

시추는 해저면 하부 해양지각을 1800 m 이상 굴삭하게 되어 과거에는 오직 ophiolites(해양 지각의 구성 section으로 융기하여 육지에 노출된 것)로 규정되었던 지각구조를 정의하게 되었다. 또한 시추된 시료는 심해저 생물권(biosphere)이 해저면하 최소 약 800 m 까지 미치고 있다는 증거를 제공했다. 심부시추는 시추퇴적물에서 유체의 흐름(fluid flow)과 심해 퇴적층에서 가스 하이드레이트의 형성과 해리(dissociation)에 관한 중요한 정보를 제공했으며 이로 인해 hydrocarbon의 탐사를 가능케 했다. 그 외 수많은 과학적 성과가 얻어졌으며 이러한 성과는 www.odplegacy.org/science-results/에 잘 수록되어 있다. 지금까지 심해시추를 통해 수많은 연구결과를 만들었지만 저자 나름대로 요약한 ODP의 중요한 연구성과를 요약해 보면 다음과 같다.

1) 판구조론(plate tectonics)과 해양지각의 연령: 우선 초기의 ODP/DSDP기간에는 이미 간단하게 기술한 바와 같이 세계 각지의 해양저에 대한 본격적인 시추가 시행된 시기라 할 수 있다. 이 시기에는 판 구조론과 같은 지구과학의 거대 주제에 대한 명확한 증거가 제시되지 않았던 시기로 이 시기의 가장 중요한 성과는 판구조론을 지지할 수 있는 해양지각의 연령을 파악한 것이다. 기존 연구결과 지중해 지역을 제외한다면 해양지각 중 가장 오래된 지각연령을 보이는 지역은 일본 동남부 지각으로 이 지각의 연령은 약 1억 8천만년(쥐라기 초)에 해당하는 것으로 판기아의 초대륙이 분리되기 시작했을 때와 유사한 것으로 알려졌다. 중앙해령에서 만들어진 해양지각은 판의 운동에 따라 해구 쪽으로 이동하며 결국 해구로 섭입하게 됨으로 가장 오래된 해양지각이라 할지라도 최대 약 2억년을 넘지 않으며 대륙지각의 연령과 비교해 보았을 때 매우 젊다는 것을 지시한다고 할 수 있다(Muller *et al.*, 2008). 중앙해령에서 거리가 멀어질수록 해양지각의 연령이 오래되고, 최대 연령이

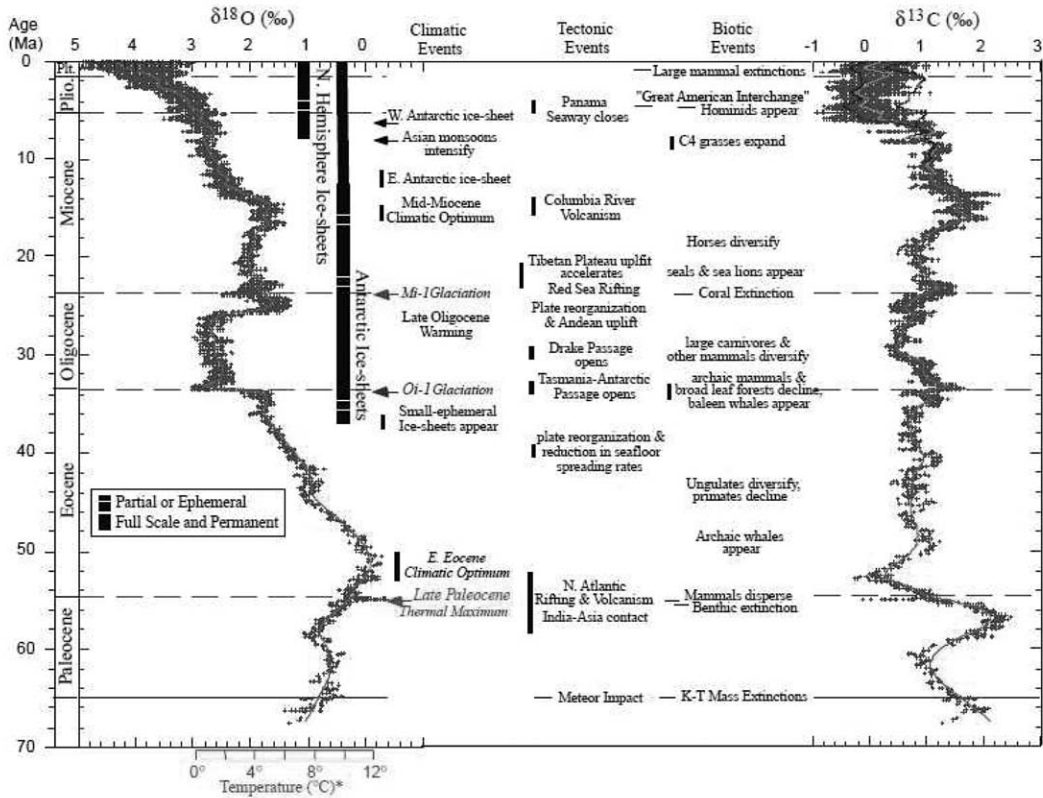


Figure 3. One of Scientific achievements, scientific results of past 65 Ma climatic changes (according to the Zachos *et al.*, 2000). Oxygen isotope of planktonic and benthic foraminifera were compiled from 40 sites of DSDP, ODP sites.

2억년을 넘지 않는다는 사실은 해저확장설(sea-spreading theory)등과 더불어 판 구조론을 강력히 지지하는 지구과학적 중요 증거로서 초기 ODP의 가장 중요한 성과중의 하나라고 할 수 있다.

2) 6천 5백 만 년 간의 지구 환경 변화: ODP 국제공동 연구가 시작되고, 60년대 중반이후에 동위원소(isotope)를 이용한 연구방법이 확립되기 시작하면서 해저퇴적물에 보존된 유공충에 대한 산소 및 탄소동위원소 측정이 이루어졌다. 세계 각지의 다양한 수심으로부터 동위원소 자료가 축적되기 시작했으며, 이를 근거로 과거 변동에 대한 기록이 도출되었다. 그림 3은 DSDP 및 ODP를 통해 얻어진 세계각지의 40개 지역에 대한 퇴적물중 유공충의 산소 및 탄소동위원소 기록을 통합한 것이다.

이 기록은 과거 65 Ma 동안에 동위원소의 극적인 변화가 많이 있었음을 지시하고 있으며 산소동위원소의 변화를 해수 온도로 환산했을 때 급격한 온도감소가 많았음을 지시하고 있다(그림 3). 특히 유공충의 산소, 탄소 동위원소 기록은 기후변화를 지시하는 사건(climatic events), 지구조와 결부된 사건(tectonic event), 그리고 생물권 변화를 지시하는 사건(biotic event)과 밀접히 관계되어 있음을 나타내고 있다 (Zachos *et al.*, 2001). 즉 지구 내외부의 모든 환경적 변화는 생물권변화, 기후변화, 대륙의 변화(대륙이동 및 조산 운동 등)와 밀접히 관계되고 있으며 각각의 요소에도 밀접한 관계가 있음을 지시하고 있다. 특히 최근에 활발하게 연구가 진행되고 있는 PETM (Pliocene Eocene

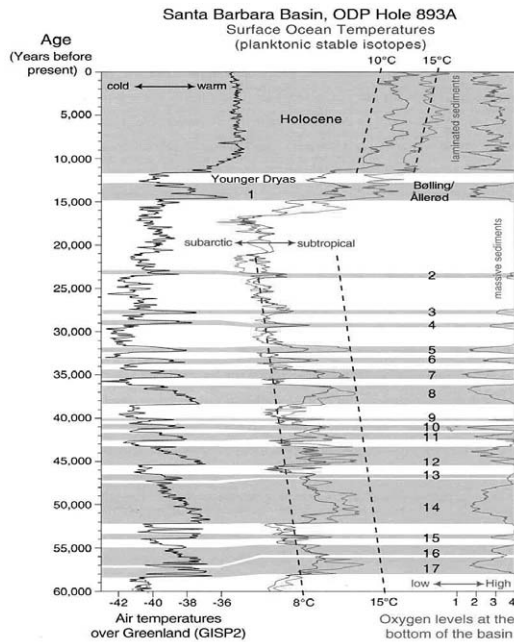


Figure 4. One of Scientific achievements, scientific results of past 60Ka ocean and climatic changes in Santa Barbara ODP Hole 893A (according to the Kennett *et al.*, 2000).

Thermal Maximum)과 같은 지질연대 시기는 지구 역사상 가장 온난화했던 시기로 지구의 미래환경을 알아보기 위한 연구의 좋은 예가 되고 있다. 따라서 이 시기에 대한 보다 적극적인 연구는 지구의 과거환경을 이해하고 앞으로 전개될 지구환경변화를 예측하기 위해 중요한 연구라 할 수 있다.

3) Santa Barbara Basin의 지구-해양 기록-interstadial variation: 과거 수 천 만 년간에 걸친 산소동위원소 기록은 이른바 장주기(long-range)에 걸친 지구환경변화라 할 수 있다. 그러나 이와 같은 장주기 변화를 연구하는 것과 더불어 고분해(high resolution)연구가 진행되면서 지질학적으로 비교적 짧은 연대에 대한 상세한 정보를 얻게 되었다. 그림 4는 ODP 굴삭점 893A의 Santa Barbara Basin에서 얻어진 퇴적물에서 부유성, 저서성 유공충에 대한 산소 및 탄소동위원소 기록을 보여주고 있다. 비록 기록은 과거 약 6만 년 전

부터 현재까지 비교적 짧은 기간이지만 그린랜드(Greenland) 빙상코아(GISP 2)에서 얻어진 온도 변화와 상세한 비교를 했을 때 서로 밀접하게 관계되고 있음을 잘 보여주고 있다. 특히 수 천 년에 걸친 퇴적물중 유공충에 기록된 산소 동위원소의 천년단위의 상세한 변화(millennial-scale variation)는 대기온도-퇴적물 동위원소 기록들과 놀라울 정도로 잘 일치하고 있음을 보이고 있다. 이러한 사실은 지구의 기후변화를 직접적으로 지시하는 대기온도와 해양퇴적물에 기록된 동위원소 기록간에는 밀접히 관계되고 있음을 증거하는 것이라 할 수 있다. Kennett *et al.*(2000)은 이와 같은 사실을 북대서양 중층수의 변화로 해석했으며 특히 동위원소 값이 급격히 낮아지는(lighter) 시기에는 온난한 중층수의 영향으로 해저면에 저장되어 있는 methane hydrate의 안정영역이 붕괴되고, 그에 따른 메탄가스의 방출 가능성을 제시하였다. 그러나 이와 같은 methane hydrate의 안정영역의 붕괴(collapse of methane hydrate stabilization zone)와는 별도로 과거 약 6만 년 간에 걸친 기후 변화는 곧 해양변화와 밀접하게 관련되어 있음을 지시하고 있다.

우리나라 동해의 경우는 1989년에 ODP Leg 127, 128이 수행되어 총 6개 지점에 대해 시추가 이루어 졌다. 그 당시에 한국은 ODP 가맹국이 아니었기 때문에 국내학자들의 참여는 제한적이었지만 대신 다수의 일본 학자들에 의해 많은 지구과학적인 성과를 올릴 수 있었다. 특히 동해가 가지는 지정학적 위치와 그 당시까지 명확하게 밝혀지지 않았던 동해의 형성과정, 해저 기반암의 연령, 과거 수 천 만 년에 걸친 해양환경변화 및 기후변화 등에 대한 많은 연구결과를 낳았다. 그림 5는 Leg 127~128에서 얻어진 시추퇴적물의 암상을 요약한 것이며, 각 시추점의 최하부에 대한 연대측정을 통해 가장 밑에 있는 기반암의 연령을 추정했다(Tamaki, 1992). 이와 더불어 과거 수 천 만 년에

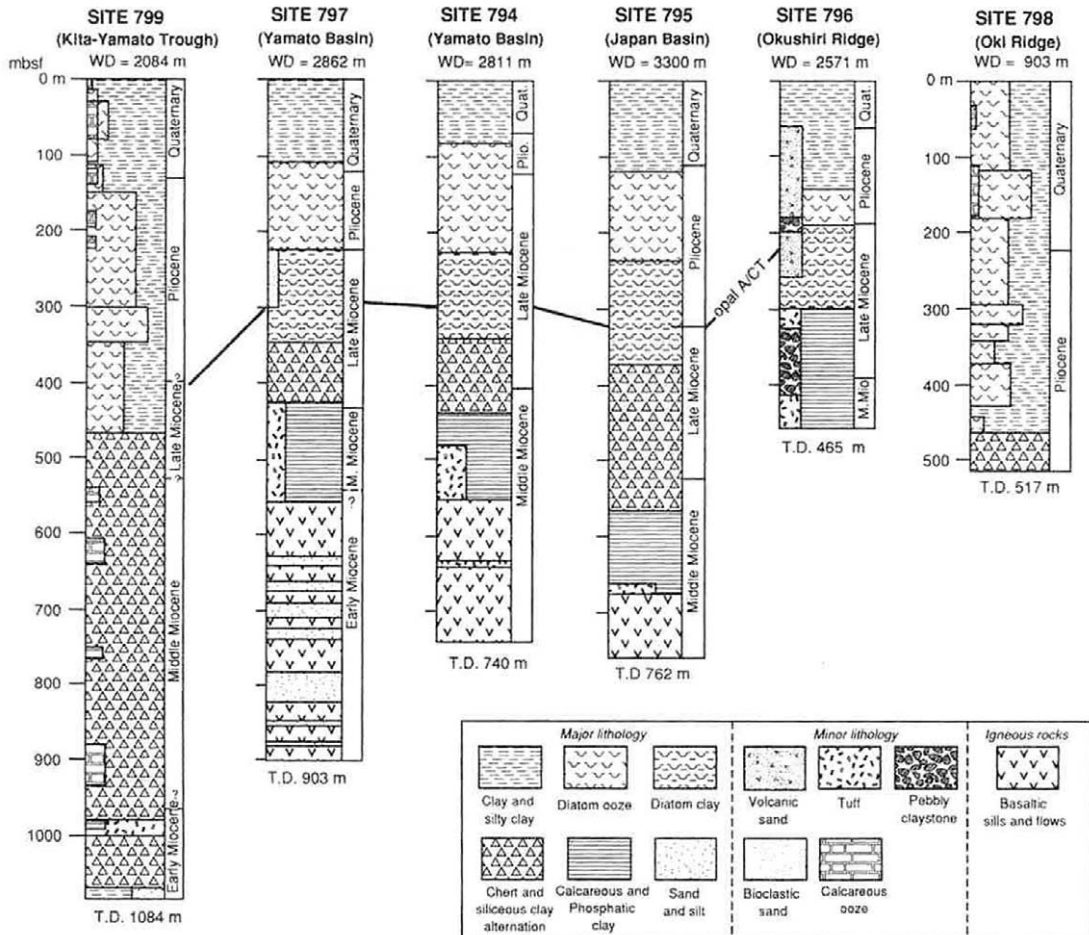


Figure 5. Drilling sites and major lithology of the deep drilled core during the Leg 127~128 from the East/Japan (Tamaki, 1992).

걸친 동해퇴적물을 습득하게 됨으로써 동해 퇴적물에 기록된 다양한 기록으로 부터 동북아시아의 기후변화 양태, 해양 환경변화 등 동해에 관한 전반적 연구결과를 많이 도출해 낼 수 있었다. Tada *et al.*(1999)은 ODP Leg 127~8에서 얻어진 심부 시추 퇴적물을 이용하여 동북아시아의 육지기록과 해양기록에 관한 관계와 문순진화에 대한 연구결과를 발표하였는데, 이 발표는 최근에 많은 연구가 진행되고 있는 동북아시아 기후변화 연구의 대표적인 사례라 할 수 있으며 계속하여 기후변화나 해양환경변화를 고분해로 연구할 수 있는 계기를 만

들었다고 할 수 있다.

위에서 간략하게 언급한 DSDP, ODP, IODP의 연구성과 외에도 ODP는 수 많은 연구결과를 배출했다. 지구 역사상 가장 온난했던 백악기(Cretaceous: ca. 140~65 Ma)의 대규모 화성암 분출(LIPs: Large Igneous Provinces)기록과 해수면 변화(sea level change), 과거 대규모로 진행되었던 해양 무산소 사건(OAE; Ocean Anoxic Event)에 대한 연구 등 ODP를 통한 과학적 연구는 실로 지구과학의 발전을 선도했다고 할 수 있다(그림 6).

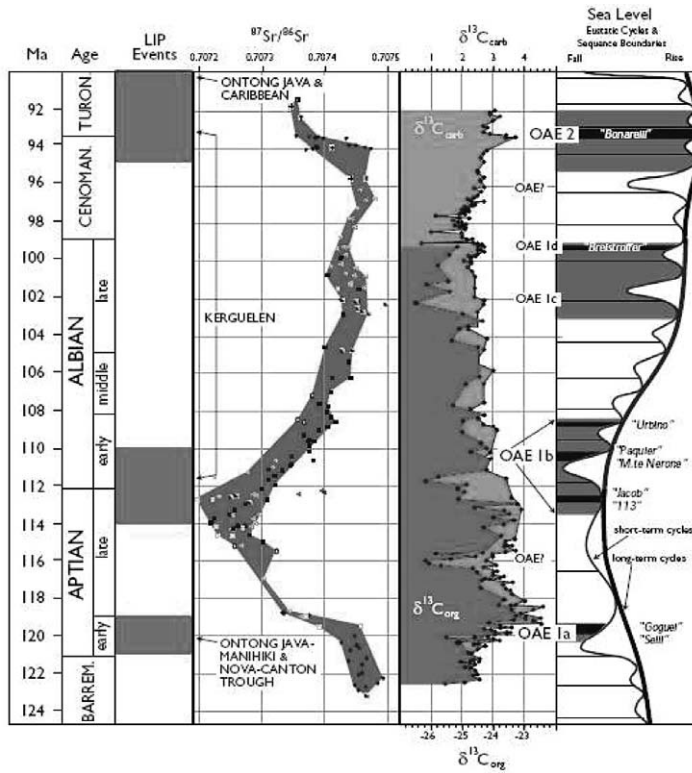


Figure 6. The mid-cretaceous record of major black shale and Oceanic Anoxic Events (OAEs) in the context of the carbon isotope record, changing global sea level and seawater chemistry, and emplacement history of Large Igneous Provinces (LIPs) (according to the Init. Sci. Plan, 2003-2013).

5. K-ODP, K-IODP의 발전

한국은 1996년 정식으로 ODP 가맹국이 됨으로써 그동안 지속적으로 ODP 활동을 지속하여 왔다. 가입을 계기로 한반도 주변의 지구과학 연구영역에서 국제 공조를 통해 전 지구적으로 연구범위의 확대를 꾀하게 되었다. 가맹국이 된다는 것은 우리나라의 대표로 승선하여 국제 공동 연구에 동참한다는 의미에서 ODP 가맹국의 의미가 있다고 할 수 있다. 한국이 ODP 가맹국이 됨으로써 국내 학자들의 승선기회가 주어졌고 전 지구적인 시료를 가지고 국제 공동연구에 참여할 수 있는 기회가 주어졌으며 그로 인해 그동안에 많은 승선 연구를 통해 지구과학에의 발전을 이루었다. 이와 같은 국내연구

진의 승선연구는 지구과학 연구의 연구영역 확대는 물론 보다 선진 외국의 과학기술을 접하고 익힐 수 있는 기회를 통해 국내 지구과학 발전을 가져오는 계기가 되었다고 할 수 있다.

한국은 1996년에 ODP 가맹국이 됨에 따라 ODP 분담금을 비롯한 많은 문제를 해결해야 할 기구가 만들어 졌다. ODP 기금은 정부기금으로 운영되며 ODP 가맹과 더불어 파생되는 모든 문제는 한국지질자원연구원에 사무국을 설치함으로써 현재까지 진행되고 있다. 효율적인 K-IODP의 운영을 위해 한국지질자원연구원내에 K-ODP 사무국과 상임위원회 및 과학위원회를 설치했다. 상임위원회는 최고 의결기구로서 관련 출연연의 연구원장을 비롯한 국내 저명 과학자로 구성되며 각종 안건의 최종

의결기구로서 역할을 하게 되었다. 이와 더불어 일반적 과학적 문제 해결을 위해서 국제 저명학자들이 참여하여 K-ODP 과학위원회(K-ODP Sicom; Korea Ocean Drilling Program)가 구성되었다. 이 위원회를 통해 자국의 지구과학 발전을 위한 국제 과학자의 ODP 승선연구자 선발, 연구계획서 제출 등 K-ODP와 관련된 많은 사항을 결정하게 된다. 현재 K-IODP의 Sicom에 소속된 위원은 국공립 대학 및 정부출연 연구원에 근무하고 있는 전문 과학자로 구성되어있으며 지구과학 전 분야에 걸쳐 약 20명에 달한다.

K-ODP는 지난 1996에 시작되었고 IODP의 출범과 함께 K-IODP로 개칭하여 지속적으로 국제 협력을 추진하여 왔다. ODP가 IODP로 개칭되면서 K-ODP도 K-IODP로 개칭되었고 한국지질자원연구원내에는 K-IODP의 사무국이 확대 발족되었고 국내과학위원회를 비롯한 많은 국내 과학자들의 승선연구기회를 맞고 있다. 한편, K-IODP도 IODP의 2단계 진입과 보조를 같이하여 새롭게 2단계로 진입하며 회원국의 자격을 유지하면서 지구과학 발전에 공헌할 것으로 기대되고 있다. 현재 K-IODP는 국내과학자들의 적극적인 승선연구를 유도하기위해 노력하고 있으며 승선후에는 연구의 연속성을 유지하기 위해 일정부분 재정적 지원을 하기위해 노력하고 있다. 또한 국내 과학자가 주도가 되는 심부시추 제안서를 작성하기 위해 고심하고 있으며 앞으로 이러한 제안서 작성, 자국의 영토내에서 과학적 흥미를 유도할 수 있는 주제를 발굴하여 심부시추를 하려는 목표를 가지고 있다.

지난 2009~2010년은 국내 K-IODP의 활동이 가장 두드러졌던 시기로 여겨질 수 있다. K-IODP의 1단계가 종료되면서 2단계 진입을 위한 대외 홍보활동을 비롯하여 2009년에 독일 Bremen에서 개최된 INVEST (IODP New Venture in Exploring Scientific Targets)에 국내 학자들이 다수 참가하여 앞으로 전개될 IODP의 각종 연구

주제에 관한 의견과 과학 동향을 파악할 뿐만 아니라 IODP의 각 패널회의 적극적으로 참가 하는 등 K-IODP의 연구활동 증진을 위한 많은 노력이 있었다. 특히 2010년에는 지난 몇 년 동안 한일 과학자들의 IODP연구협력 결과를 결집하는 한·일간의 포럼을 통해 국내 과학자들이 주축이 된 IODP 연구계획서(Proposal, 777-APL: Ancillary Project Letter)를 제출하게 되었다. 이 연구계획은 북태평양 아열대 지역의 서편강화류(western boundary current)와 적도태평양 수온과의 관련성을 연구하고 이들 기록들이 과거 제4기 동안 어떻게 진화해 왔는지를 파악하는 내용으로 되어있다. 이 제안서는 현재 심사중에 있지만 앞으로도 이와 같이 국내 과학자들이 주도적으로 참여하여 IODP에 연구 계획서를 제출하려는 계획을 세우고 있다. 특히 국내영역에서 국내의 지구과학 발전을 선도할 수 있는 심부시추에 관한 제안서 제출과 심부시추가 성공적으로 시행되어 지구과학 발전에 기여되길 기대한다.

6. IODP, K-IODP의 금후 전망 및 결론

2009년 9월 독일 Bremen에서는 세계 각지에서 온 600명 이상의 과학자들의 해양 심부시추 (IODP)를 통한 새로운 비전과 주요 과학적 목표를 개략적으로 설정하기 위해 모였다. 이 INVEST 미팅이 있는 후에 새로운 과학계획이 수립되었고 이 계획에 따라 앞으로의 IODP의 골삭이 진행될 것이다. 새롭게 수립된 과학계획은 주로 4개의 연구 주제를 포함하고 있다(표 1). 즉 1)기후변화와 해양 변화-과거를 알고 미래를 알린다. 2) 생물권: 생명과 혹성의 공존, 3)지구 심부 과정, 그리고 4)지질 재해 등을 포함하는 움직임은 지구가 그것이다 (www.iodp.org/).

과학계획과 병행하여 국제적 워킹그룹(IWP+;

International Working Group Plus)도 발족되었다. 이 IWP+는 현재의 IODP멤버로 구성되며, 과학계(science community)와 IODP-MI를 대표한다. 이 그룹은 새로운 프로그램 원칙을 규정하는 역할을 하며, 더욱이 IWP+는 어떻게 장기적이고 안정적인 과학 프로그램을 운용할 것인가에 대한 많은 lessons를 두고 있으며 이를 이용하여 수많은 해양 심부시추를 성공적으로 수행하게 할 강력한 국제 공조를 이끌어 내기 위한 것이다(Smith *et al.*, 2010).

IODP가 출범한지 10년이 경과했고 2단계의 IODP가 2013년에 출범하게 될 것이다. 이 새로운 IODP에서는 새롭게 요구되는 학문적 영역에 대한 다양한 요구를 충족시키기 위해 세계 각지에서 많은 심부시추가 진행될 예정이다. 이미 기술한 바와 같이 1단계에서 제기된 다양한 굴삭계획은 새롭게 재편될 것으로 생각되고 있다. 그 중에 특히 최근에 관심을 끄는 지역은 북극해 지역에 대한 시추로 많은 제안서가 제출되고 있으며 북극해의 시추는 지구의 기후변화에 대한 많은 과학적 궁금증을 해결하는데 중요한 정보를 공할 것으로 생각되고 있다(Smith *et al.*, 2010).

K-ODP는 2011년부터 7년간 2단계 K-ODP로 진행될 예정으로 있다. K-ODP 및 1단계 K-ODP기간에는 IODP에 대한 재정적 기여도가 크지 않았다. 그에 따라 국내 과학자의 승선기회가 많지 않았던 것도 사실이다. 그러나 2단계 K-ODP로 진입하게 되면서 재정적 기여도가 커지고 그에 따라 보다 많은 국내과학자의 승선기회가 주어질 것으로 판단된다. 따라서 다양한 분야에서 승선기회를 가지게 됨으로 지구과학의 제 분야에 걸쳐 풍부한 연구결과를 도출해 낼 수 있을 것이며 국내 지구과학의 발전을 가져오게 될 것으로 기대된다.

사 사

이 연구에 많은 자료와 기회를 준 한국 K-ODP 사무국에 감사드린다. 또한 원고를 읽어 여러 가지 부족한 부분을 지적해주신 익명의 심사위원에게도 감사드린다. 이 논문은 국제공동 해양 시추사업 (PM56760)의 도움으로 작성되었다.

참고문헌

- 한국지질자원연구원, K-ODP 성과보고서, 2010, 87p.
 현상민, Minoru, I., Jansen, E. and Raymo, M. E., 1998, 국제심해굴삭계획(ODP)의 학술적 성과와 북대서양의 고해양학(ODP Leg 162), 한국지구과학회지, 19, 260-268.
<http://www.iodp.org/isp>
<http://www.k-odp.re.kr>
 Integrated Ocean Drilling Program Initial Science Plan (IODP Ini., Sci., Plan), 2003-2013. 2001, Earth, Ocean and Life. International Working Group Support Office 1755, Washington, DC, USA, 110p.
 International Ocean Discovery program Science Plan for 2013-2023, 2011, Illuminating Earth through the seafloor sampling, observation, and experimentation, Washington, DC, USA, 108p.
 Kennett, J. P., Cannariato, K. G., Hendy, I. L. and Behl, R. J., 2000, Carbon isotopic evidence for methane hydrate instability during Quaternary Interstadials, Science, 288, 128-133.
 Muller, R. D., Sdrolias, M., Gaina, C. and Roest, W. R., 2008, Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 9, Q04006, doi:10.1029/2007GC001743.

- Smith, D. K., Exon, N., Barriga, F. J. A. S. and Tatsumi, Y., 2010, Ocean Drilling: Forty Years of International Collaboration, EOS, 91, 393-394.
- Susan, E. H., Katherine, K. E. and Maria, M., 1997, Recent Changes in the Ocean Drilling Program, EOS, 78, 525-526.
- Taira, A., 1992, Scientific achievement of Ocean Drilling Program (ODP) and its contribution on the Earth Science, Chikyu Monthly, 6, 8-16 (in Japanese).
- Tada, R., Irino, T. and Koizumi, I., 1999, Land-Ocean linkages over orbital and millennial time scale recorded in late Quaternary sediments of the Japan Sea, Paleoclimatology, 6, 499-518.
- Tamaki, K., 1992, Achievement of Deep Sea Drilling Leg 128, 128 from Japan Sea, Chikyu Monthly, 6, 238-244 (in Japanese).
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. and Billups, K., 2001, Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present, Science, 686-693.

투 고 일 2011. 6. 28

심 사 일 2011. 7. 1

심사완료일 2011. 8. 14