

<Review>

MIGRATE: 유럽의 새로운 가스 하이드레이트 프로젝트

이성록

한국지질자원연구원 석유해저연구본부 가스하이드레이트연구실

요 약

최근에 전 세계적으로 대륙붕 사면과 심해저 퇴적층에 부존되어 있는 가스 하이드레이트가 미래의 유망한 천연 가스 공급원으로 주목받고 있다. 유럽에서는 천연 가스 수요가 계속해서 증가하는 반면 생산량은 점차 감소하고 있어 가스 하이드레이트에 대한 관심이 높아지고 있다. 따라서 유럽 국가의 가스 하이드레이트 연구 집단과 산업계를 통합하여 가스 하이드레이트가 환경적으로 안전하고 새로운 에너지 자원이 될 수 있도록 다학제간 지식과 기술 개발을 촉진하고자 유럽과학기술협력체(European Cooperation in Science and Technology; COST)는 Action ES1042으로서 MIGRATE (Marine gas hydrate - an indigenous resource of natural gas for Europe) 프로젝트를 출범하였다. 특별히 이 프로젝트는 유럽 해역에 부존되어 있는 가스 하이드레이트 자원의 개발 가능한 자원 부존량 산출, 생산 기술에 대한 평가 그리고 이에 수반하는 위험성 평가 등을 목적으로 하고 있으며, 궁극적으로는 유럽 해역에서 가스 하이드레이트 생산 시험을 준비하는 것이다. 이를 위해 4개의 실무 그룹을 운영하여 프로젝트의 내용을 명확하게 설정하고 이를 통해 유럽의 과학자·기술자·정책 결정자·대중과의 연계를 강조하고 있다.

주요어: 가스 하이드레이트, COST, MIGRATE, 실무 그룹

Sung-rock Lee, 2015, Marine gas hydrate - an indigenous resource of natural gas for Europe (MIGRATE): A marine gas hydrate project newly implemented in Europe. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 5, p. 525-536

ABSTRACT: Gas hydrate accumulations in continental shelf and deep sea sediments are considered as a promising resource for the future natural gas supply. In Europe, as demand for natural gas is continuously increasing and gas production is gradually decreasing, the European countries have more concerns about gas hydrates. The MIGRATE (Marine gas hydrate - an indigenous resource of natural gas for Europe), which is launched as COST (European Cooperation in Science and Technology) Action ES1042, is designed to integrate the expertise of European research groups and industries to promote development of multidisciplinary knowledge and technology on the potential of gas hydrate as an economically feasible, environmentally safe, and new energy resource. In particular, this Action aims to determine the European potential inventory of exploitable gas hydrates to assess current technologies for production, to evaluate the associated risks, and ultimately to prepare a field gas hydrate production test in European seas. European efforts to clarify the scientific programme and focus will be coordinated through 4 working groups and integrate with the scientists, engineers, policy makers, and the public.

Key words: gas hydrate, COST, MIGRATE, working group

(Sung-rock Lee, Petroleum and Marine Research Division, Gas Hydrate Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 언

2012년부터 2040년까지의 유럽의 천연 가스 생산은

매년 1.7%씩 감소할 것으로 예측되는 반면, 수요는 평균 0.6%씩 증가하는 것으로 나타나고 있다(IEA, 2014). 수요가 증가하는 요인으로는 일본의 후쿠시

‡ Corresponding author: +82-42-868-3330, E-mail: srlee@kigam.re.kr

마 원전 사고 후에 유럽의 전력 분야 비중이 원자력 에너지에서 천연 가스로 부분 전환되는 정책적 결정과 전 세계적으로도 천연 가스가 석탄을 대체할 수 있는 중요한 자원이라는 인식에 기인한다. 또한 유럽을 제외한 전 지역에서는 천연 가스 생산이 점진적으로 증가하는 것에 반하여(IEA, 2014) 유럽 국가는 에너지 자원 부존의 한계로 인하여 천연 가스 생산이 감소하는 것으로 예측됨에 따라 유럽 국가의 가스 하이드레이트에 대한 관심이 높아지고 있는 것은 당연한 것이라 할 수 있다. 가스 하이드레이트는 에너지 공급의 안정성을 증대하고 석탄 자원을 대체함으로써 CO₂ 배출을 감축할 수 있을 뿐더러 신재생 에너지를 보완하고 전력 그리드를 안정화하는데 기여할 수 있기 때문이다. 궁극적으로는 가스 하이드레이트는 수십 년 내 고갈될 유럽의 전통 에너지 자원을 대체하고, 천연 가스 수입국으로서 가스에 대한 의존도를 완화할 수 있을 것으로 평가되기 때문에 가스 하이드레이트는 미래의 유럽 에너지 시스템에서 중요한 역할을 할 것으로 보인다.

전 세계적으로도 엄청난 양의 메탄이 가스 하이드레이트의 형태로 해저 퇴적층에 부존되어 있고 최근의 자원 부존량 평가 결과도 전통형 에너지 저류층의 메탄보다 더 많은 것으로 발표되고 있다(Kvenvolden, 1988, 2001; Milkov, 2004; Makogon, 2010; Wallmann *et al.*, 2012). 일본, 한국, 중국, 인도 등 아시아 국가와 미국, 뉴질랜드 등 비유럽권 국가들이 실시하고 있는 가스 하이드레이트 자원의 탐사 결과는 이러한 결과를 잘 입증하고 있다. 생산 기술이 발전함에 따라 영구 동토층에서는 2000년대 초반부터 이미 3차례의 생산 시험이 이루어진 바 있었고(Hancock *et al.*, 2005; Yamamoto and Dallimore, 2008; Schoderbek *et al.*, 2013), 해양에서는 일본이 2013년에 난카이 해구에서 단기간이었지만 세계 최초로 생산 시험을 실시하여 가스 하이드레이트로부터 메탄을 회수할 수 있음을 입증하였다(Lee and Kim, 2014; Yamamoto *et al.*, 2014; Yamamoto, 2015). 이와 같이 비유럽 국가들의 가스 하이드레이트 연구 개발이 일부 성과를 거두고 있음에 따라 유럽 국가들은 각 국별로 수행하고 있는 가스 하이드레이트 연구 개발 프로그램을 총체적으로 연계하고 유럽 내 과학 기술자들의 교류를 활성화하여 장기적으로는 유럽 해역에서 시험 생산을 준비하는 계획을 수립하기에 이르렀다. 이를 위

해 유럽의 14개국은 2015년도에 MIGRATE (Marine gas hydrate - an indigenous resource of natural gas for Europe) 프로젝트를 출범하였다. 본 논평에서는 MIGRATE 프로젝트의 출범 배경을 비롯하여 유럽의 과학·기술 연구를 총괄적으로 지원하는 '유럽 과학기술협의체'(COST, European Cooperation in Science and Technology)의 운영, 가스 하이드레이트 연구 프로젝트인 MIGRATE의 구성, 연구 내용과 추진 방향 등에 대하여 분석하고 유럽의 이러한 동향이 다른 국가에 미칠 영향을 살펴보고자 한다.

2. 유럽과학기술협의체(COST) 구성과 활동

COST는 유럽의 35개국이 유럽 전 지역의 과학 기술자, 학자, 연구자들의 협력을 지원하기 위해 1971년에 설립한 유럽에서 최초이자 현재까지도 가장 오랫동안 유지되고 있는 거대 연구기구로서, 이스라엘이 협력국 지위로 참여하면서 현재는 36개 회원국으로 구성되어 있다(COST Association, 2014). COST는 국가 간 협력을 통하여 과학 - 정책 결정자 - 사회의 3요소 간의 이해를 증진시키고 갈등 요인을 줄이는데 크게 기여해 왔으며, 유럽 연구 거점(ERA, European Research Area)을 조성하는 중요한 역할을 하고 있다. 회원국의 참여와 재정 지원을 결정하는 COST 회의는 장관급 회의로서 5~6년마다 개최되며, 2010년에 이어 2015년 9월에 슬로바키아에서 개최될 예정이다.

COST의 임무는 기초 과학부터 응용 기술 연구에 이르기까지 유럽 연구자들의 협력을 지원하고 유럽 국가들의 과학 기술 연구 능력을 강화하는 것이다. 즉 COST 활동은 다양한 형태의 네트워킹 수단, 예를 들면, 전문가 회의, 학술대회, 워크숍, STSM (Short-Term Scientific Mission), 훈련 과정 개설, 자료 발간 및 과학 결과의 홍보 활동 등의 경비를 지원하고 과학과 기술의 네트워킹을 이루도록 하는 것이다. COST에서는 여행 경비를 포함하여 이러한 활동에 소요되는 예산을 지원하며 연구비 자체는 지원하지 않는다. 2007년부터 2013년까지는 FP7 (Framework Programme for Research) 프로젝트와 연계하여 수행되었고 3만 명의 유럽 연구자에게 약 50억 유로의 연구비를 지원했으며, 현재도 상당수의 프로젝트가 진행 중에 있다(FP7, 2014).

2013년 9월에 COST는 유럽 최대 규모의 새롭고 혁신적인 연구 프로그램으로 도약하기 위해 'Horizon 2020: EU Framework Programme for Research and Innovation'이라는 목표를 설정하고 COST 지배 구조와 상위 기구를 통합하여 'COST Association (회장국: 스페인)'란 이름으로 재출범하였다. 'Horizon 2020'은 2014년부터 2020년까지 수행하게 된다. COST Association의 중심 기구는 과학위원회(SC, Scientific Committee)로서 새로운 프로젝트의 제출, 평가, 선정 및 승인의 주도적인 역할을 수행하며, 운영위원회(MC, Management Committee)에서는 예산 관리, 워킹그룹 구성, 조직을 관리하는 임무를 담당하고 있다. 2014년부터 2020년까지 7년 계획의 'Horizon 2020'를 위해서 유럽연합(European Union; EU)이 출연총예산은 약 800억 유로이다(European Commission, 2015). 이 중 약 20%는 민간에서 출연하는 것을 목표로 하고 있다. 'Horizon 2020' 프로그램은 과학적 수월성 분야(ES, Excellent Sciences), 산업 주도형 분야(IL, Industrial Leadership), 사회 요구형 분야(SC, Societal Challenges)를 비롯하여 전체 8개의 분야로 구성되어 있다. 에너지, 환경, 기후 변화, 건강, 수송 등은 사회 요구형 분야에 속해 있다.

COST 활동(이하에서는 'Action'으로 표시)은 최소 5개국 이상이 관심을 갖는 연구 영역에 지원되는데 각 COST Action의 예산은 프로젝트 참여국의 수에 의해 결정된다. 프로젝트 선정을 위한 외부 전문가 위원회에는 특히 여성과 신진 과학자들이 적극 참여하도록 권장하고 있다. COST는 유럽 지역 이외의 국가와도 협력 관계를 유지하고 있는데 우리나라도 27개 국제 협력국(IPCs, International Partner Countries)중의 하나이다. 1971년부터 수행하고 있는 전체 프로젝트(Action으로 칭함)의 수는 1,171개로서, 현재에 수행중인 프로젝트는 340개에 달한다. Action 안에는 2,524개의 STSM이라 불리는 단기간의 과학 임무 과제를 별도로 수행중이다. Action에 참여 중인 유럽 과학자는 45,000명, Action 별 평균 연간 예산은 13만 유로, 'Horizon 2020'의 전체 예산에서 지원되는 COST 예산은 3억 유로이다(COST Association, 2014; Cost Office, 2014a).

COST Actions 분야는 10개인데 지구 과학 분야에서는 ESSEM (Earth System Science and Environmental Management)이 유일하다. ESSEM은 변화하는 지

구 시스템의 이해·관찰·모델링·예측과 관련하여 급 성장하고 있는 과학 기술을 통하여 환경 관리를 개선하는 것이 목적이다(COST Office, 2014b). 지구 시스템 과학의 핵심은 시·공간적으로 일어나는 있는 반응들에 대한 이해도를 높이고 모델링을 통하여 예측을 함으로써 우리의 능력과 예측 시스템을 향상하는 것이다. 환경 관리의 핵심은 환경적인 이슈 즉 천연 자원 개발, 위험성 관리, 도시의 발달, 환경 정책의 수립 등과 관련된 정책적 결정을 지원하는 것이라 할 수 있다. 결국 ESSEM은 환경 훼손을 최소화하기 위해 천연 자원 관리에 필요한 과학과 기술을 강조하고 있다. ESSEM의 다른 프로젝트 예로서는 기후 변화 등 해양의 평가, 지속가능한 수자원 관리와 폐수의 재사용, 유럽의 중요 지진대의 지진 발생 모델링과 조기 모니터링 솔루션, 사막화 방지, 유럽 해양 생물 다양성 관측 시스템, 공기질 및 기상 모델링 통합 등이 있다(COST Office, 2014b).

ESSEM COST의 전체 145개 프로젝트 중 70년대부터 시작하여 2014년까지 종료된 과제는 109개이며 현재 수행 중에 있는 프로젝트는 36개이다. 그러나 가스 하이드레이트를 주제로 한 프로젝트는 2개에 불과하며 2009년에 시작하여 2013년도에 종료된 ES0902 프로젝트와 다음 본문에서 자세하게 언급하고자 하는 ES1405 프로젝트이다. 이미 종료된 ES0902는 PERGAMON (Permafrost and gas hydrate related methane release in the Arctic and impact on climate change)이라는 별칭으로 불리는데, 극지방 영구 동토층에서 방출되는 메탄이 기후 변화에 주는 영향을 장기 모니터링하는 연구 프로젝트이다(COST Action ES0902 Fact Sheet, 2015). ESSEM COST Action ES1405의 별칭으로 착수된 MIGRATE에 대하여 자세하게 기술하고자 하는 것이 본 논평의 주요 내용이다.

3. MIGRATE 프로젝트

3.1 MIGRATE 프로젝트 결성 배경

대륙 사면과 심해저 퇴적층에 부존되어 있는 가스 하이드레이트 자원에 대한 연구 개발은 1990년대 후반부터 미국, 한국, 일본, 중국, 대만, 인도, 뉴질랜드 등과 같은 non-COST 국가들이 자국 해역을 대상으로 활발하게 수행하고 있다. 이들 국가들의 가

Table 1. Previous and on-going projects on gas hydrates in European countries (modified from COST, 2014).

Country	Project title or name of center	Period
Germany	SUGAR: Submarine Gas Hydrate Reservoirs	2008-2017 (3 phases)
	PANORAMA: Program in the Resource Potential Analysis of the European Northern and Arctic Sea	2013-2018
	ISUP: Integrated System for Underwater Production of Hydrocarbons	2006-2009
Norway	CAGE: Excellence Centre for Arctic Gas Hydrate, Environment and Climate	center opened in 2013
Germany-Norway	PetroHydrate: Prediction of gas hydrate accumulation in the Gulf of Mexico using PetroMod	2012-2015
Germany-China	Joint Research Group on Gas Hydrates	2014-2017
Bulgaria-Ukraine	GEO-METHANE project	2012-2015
EU	HYDRATECH	2001-2004
	CRIMEA	2003-2006
	INTAS	2004-2007
	ASSEMBLAGE	2002-2005
	EU FP7 Blue Mining project	2013-2017
	EU FP7 MIDAS project	2013-2016
	EU FP7 ECO2 project	2011-2015
EU-Italy	ARCHANGE: Arctic ocean gas hydrate stability versus changing climate and geohazard	2014-2015
Italy	CLISM: Relation between climate change and gas hydrate offshore South Shetland Islands	started 2012
Italy-China	Collaboration of Mapping and Characterization of Gas Hydrates Reservoir in the South China Sea	2010-2012
Israel	Current and past potential of Nature Methane Hydrate occurrence in the Southeastern Levant	
France	Geohazards	
Turkey	Several projects for Black Sea	
UK	Landslide-Tsunami Consortium	started 2012
	Scottish CGHR: Center for Gas Hydrate Research	center est. in 2001

스 하이드레이트 자원 잠재력 평가와 메탄 가스 생산 기술 개발 노력 그리고 생산 시험을 통하여 기술적·경제적으로 완전하지는 않아도 가스 하이드레이트로부터 가스를 생산할 수 있다는 기대감은 높아져 가는 상황에 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 유럽의 천연 가스 수요는 계속 증가하고 생산은 감소하는 상황에서 일본이 2013년에 난카이(Nankai) 해구에서 세계 최초로 감압법(depressurization)을 이용하

여 가스 하이드레이트 해상 생산 시험을 성공적으로 실시한 것에 대하여 유럽 국가들은 고무적인 반응을 보이고 있다. 이에 따라 환경적으로 안전하고 경제성 있는 천연 가스를 가스 하이드레이트로부터 회수할 수 있다면 2040년 이후 유럽의 미래 에너지 시스템 중 가스 하이드레이트가 개발 가능한 에너지원으로서의 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 보고 있는 것이다. 이러한 상황과 국가적 인식이 유럽이 독자

Table 2. Management Committee (MC) of ESSEM COST ES1405 (MIGRATE) project (COST Office, 2015).

Chairs, in MC	MC member
Chair: Germany (1) Vice-chair: Norway (1)	Belgium (1), Denmark (2), France (1), Germany (2), Greece (2), Ireland (2), Israel (2), Italy (2), Malta (2), Norway (2), Portugal (2), Spain (2), Turkey (1), UK (2)

* Parenthesis indicates number of MC member from participating countries.

적인 가스 하이드레이트 연합 프로젝트를 결성한 계기가 된 것으로 보인다.

유럽은 이미 각 국가별로 또는 양자간 또는 다자간 협력에 의하여 2000년대 초부터 20여개 이상의 다양한 가스 하이드레이트 관련 연구 프로젝트를 수행하고 있다(표 1). 이 중 비교적 큰 규모의 중장기 프로젝트는 독일이 수행하고 있는 **SUBmarine GAS Hydrate Reservoirs (SUGAR)** 프로젝트로서 가스 하이드레이트의 탐사 기술 개발, 저류층 평가, 시추 기술 및 CO₂ 치환을 이용한 원천 생산 기술 개발 등에 주요 목표를 두고 2008년부터 착수되어 2단계 사업이 종료되었고 2015년부터 3단계 사업에 착수하였다(GEOMAR, 2014). 표 1에서 보듯이 비교적 장기간의 프로젝트는 대부분 독일이 주도하고 있으며, MIGRATE 프로젝트가 SUGAR 프로젝트 총괄 기관인 독일의 Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (GEOMAR)를 중심으로 발족됨으로써 유럽의 가스 하이드레이트 연구 분야에서 독일의 영향력이 커지고 있음을 보여준다. 그러나 기존에 유럽에서 수행 중인 프로젝트는 가스 하이드레이트 중의 메탄 가스가 기후 변화 및 지구 온난화와 지질 재해에 주는 영향에 더 많은 관심을 가지고 수행되었다. 즉, 환경적으로 경제적으로 사용 가능한 에너지 자원이 될 수 있는 가스 하이드레이트의 높은 자원 잠재력 평가를 위해 SUGAR 프로젝트를 제외하고는 탐사와 생산 기술 연구에는 큰 관심을 갖지 않았다고 볼 수 있다. 과거에 수행되었거나 현재 수행 중인 대부분의 유럽 국가 프로젝트는 자원 탐사와 자원 잠재력 평가 분야의 전문가가 일부 참여하고는 있었지만 본격적으로 이 분야에 집중된 연구 프로젝트는 아닌 것이다. 따라서 해양 가스 하이드레이트의 에너지 자원 잠재력 측면과 지질 재해와 기술적·경제적 생산 기술 타당성 측면에서 종합적으로 가스 하이드레이트의 미래를 평가하고 이를 위해 유럽 내의 국가간·다학제 간 협력의 선결 사항으로 새로운 프로젝

트의 출범 논의가 대두된 것이다. 이러한 배경 가운데 유럽의 14개국은 2014년 11월 브뤼셀에서 양해각서(Memorandum of Understanding; MOU)를 체결하고 2015년 3월부터 2019년 3월까지 4년 계획으로 유럽의 해양 가스 하이드레이트 연구 개발을 위한 MIGRATE 프로젝트를 수행하기로 합의하였다(COST 2014). 프로젝트의 최고 결정 기구인 운영 위원회의 의장은 독일 GEOMAR의 Klaus Wallmann 박사가, 부의장은 노르웨이 트롬소대학의 Stefan Bunz 박사가 맡고 운영 위원은 14개국으로부터 총 25명으로 구성되어 있다(표 2). 운영 위원회의 주 역할은 실무 그룹 운영, 각종 회의와 워크숍 개최, STSM 운영, 프로젝트 개발과 자료 관리 등이며, 과학자와 기술자의 참여 권고 등을 포함하고 있다. 이 프로젝트의 총예산 규모는 5,200만 유로(2014년 기준)이다.

따라서 COST Action MIGRATE는 에너지원으로서의 가스 하이드레이트의 자원 잠재력에 대한 다학제적인 이해와 지식을 증진시키기 위해 유럽의 다수의 연구 기관과 기업의 전문가를 통합하도록 기획하고 있다. 궁극적인 목표로는 유럽의 개발 가능한 가스 하이드레이트 자원 잠재력 평가, 탐사·생산·모니터링의 현 기술 수준 평가, 환경 위험 요인 분석을 통해 유럽 해역에서 생산 시험을 준비하는 것이다. 2014년의 COST 양해각서(MOU)에 명시된 연구 대상 지역은 유럽 대륙 연변부 해역으로서, 흑해(Black Sea), 노르웨이 해역(Nordic Sea), 지중해 그리고 대서양을 포함하고 있다(COST, 2014).

3.2 MIGRATE 프로젝트의 목적

결국, MIGRATE는 유럽의 각국이 보유하고 있는 가스 하이드레이트 다학제적인 인적 자원과 기술을 통합적으로 운영하면서 과학자와 기술자들 간의 융합된 분야의 네트워크를 촉진하는 것이 프로젝트의 목적이다. 이러한 융합적 연구 결과가 해양 가스 하

Table 3. Scientific programmes, focus, and cooperated projects in MIGRATE (modified from COST, 2014).

Program	Scientific focus	Project cooperation
Quantification of volume and distribution of gas hydrate reservoirs	<ul style="list-style-type: none"> • Key area for methane production in Europe • Influence of GH content and physical/geotechnical properties • Learning from analysis of existing data and basin modeling • Modeling of exploitable resources • Economic feasibility of gas production from gas hydrate resources 	SUGAR, PANORAMA, GEO-METHANE, INTAS, MIDAS, Israeli and Turkish projects
Development of economically feasible and environmentally safe production technologies	<ul style="list-style-type: none"> • Development of cost competitive, safe, sustainable production • Circumstance of CO₂ infection as production technology economically and environmentally 	SUGAR, ISUP, Blue Mining
Development and assessment of cutting edge monitoring technology for production	<ul style="list-style-type: none"> • Production of cost competitive and sustainable technologies • Knowledge and subject transfer into the field to advance monitoring of gas hydrate production processes 	SUGAR, Blue Mining
Assessment of environmental challenges associated to gas hydrate exploitation	<ul style="list-style-type: none"> • Effect to the seafloor stability from gas hydrate production • Impact and extent of methane to be released into water column • Effective monitoring technologies in place 	SUGAR, GEO-METHANE, MIDAS, ARCHANGEL, INTAS, FLOWS, and so on
Design of a legal framework adapted to gas hydrate production	<ul style="list-style-type: none"> • International and European laws covering offshore production of unconventional hydrocarbon 	ECO2

이드레이트는 안전하고 경제적이고도 환경 친화적인 에너지원이 될 수 있고, 안정적 공급, 에너지 단가 저하 그리고 화석 연료로부터 CO₂를 감축하는데 기여할 것이라 판단하고 있는 것이라 할 수 있다. 아울러 후속 세대를 위해 교육 훈련, 지식 전수 기회를 제공할 뿐더러 장기적으로는 사회적 요구에 부응하여 과학·기술적 수월성과 혁신을 촉진할 것으로 기대하고 있다. MIGRATE는 표 1에 언급된 유럽에서 과거에 수행되었던 프로젝트와 현재 수행 중인 프로젝트를 모두 연계하여 선진화된 네트워크를 구성하고 과학자와 기술자간의 지식 정보 기술 교류를 활성화하고자 하는 것이다.

MIGRATE의 주 목적은 전술한 바와 같이 가스 하이드레이트를 미래의 에너지원으로서 환경적으로 경제적으로 개발할 수 있도록 다양한 분야의 전문가들이 협력하고 융합할 수 있도록 권장한다. 또 다른 목적으로는 ① 경제적으로 환경적으로 안전한 개발 기술을 촉진하기 위하여 과학 집단과 공학 집단을 연계하며, ② 진행 중이거나 계획되었던 국가

별 프로젝트에 대한 유럽의 공감대 조성 및 사회적 인식을 증대시키고, ③ 미래의 응용된 하이드레이트 프로젝트를 실현할 수 있도록 전문가 패널을 설치하고, ④ 정책 결정자와 이해 당사자들에게 가스 하이드레이트 개발 이슈를 자문하는 것이라 할 수 있다. 이를 실현하기 위한 구체적인 내용으로는,

- 공동 워크숍, 학술회의, 실무자 회의를 통하여 유럽 차원의 다학제간 과학적·기술적 협력을 촉진
- 과학적 설비, 지식, 인적 자원, 탐사선 일정 등을 잘 활용할 수 있도록 관련된 프로젝트의 과학 조사 활동 등의 조정
- 유럽의 연구 프로젝트에서 취득된 자료(탄성파, 전자, 실험적, 지질학적, 지화학적, 지반 공학적·퇴적물 물성 등)의 종합 관리
- 유럽 해역 배타적 경제 수역 내의 가스 하이드레이트 부존 지역의 분포와 자원 부존량 정량화
- 적합한 생산 사이트 선정과 모니터링 전략 수립
- 환경적으로 안전한 모니터링 시스템 구축 전략

Table 4. Major European projects to cooperate with MIGRATE (modified from COST, 2014).

Abbr.	Project Full name	country/ organization	Mission or goal
SUGAR	SUBmarine GAs Hydrate Reservoirs (GEOMAR, 2015)	Germany/ GEOMAR	<ul style="list-style-type: none"> • develop marine methane hydrates as a new, unconventional resource of natural gas • combine its production with the safe sequestration of carbon dioxide in CO₂ hydrates below the seafloor.
MIDAS	Managing Impacts of Deep-sea reSource exploitation (MIDAS, 2015; FP7, 2014)	EU/UK Seascope Comsultants	<ul style="list-style-type: none"> • investigate the field and laboratory environmental impacts of deep-sea mining • exploitation of deep sea minerals and methane hydrates
PANORAMA	Petroleum assessment of the Arctic North Atlantic and Adjacent Marine Areas (BGR, 2013)	Germany/ BGR	<ul style="list-style-type: none"> • complete the basic information for assessment of the hydrocarbon potential by research cruises • form the source for subsequent or simultaneous analysis of possible impacts as well as ecological risk and damage potential.
ISUP	Integrated Systems for Underwater Production of Hydrocarbons (ISUP, 2011)	Germany/ KIT (Karlsruhe Inst. Tech)	<ul style="list-style-type: none"> • development of major components and sub-systems for underwater production of hydrocarbons
Blue Mining	EU FP7 (Blue Mining, 2015; FP7, 2014)	EU/ Germany, GEOMAR	<ul style="list-style-type: none"> • provide breakthrough solutions for a sustainable deep sea mining value chain • develop the technical capabilities to adequately and cost-effectively discover, assess and extract deep sea mineral deposits
ECO2	Sub-seabed CO ₂ Storage: Impact on Marine Ecosystems (ECO2, 2015; FP7, 2014)	EU/ Germany, GEOMAR	<ul style="list-style-type: none"> • assess the risks associated with storage and leakage of CO₂ below the seabed • define guidelines for the best environmental practices for management of sub-seabed storage sites
GEO-METHANE	Geophysical estimation of scalable sources and sinks of methane in the Black Sea (www.bggs.eu)	Bulgaria- Ukraina	<ul style="list-style-type: none"> • gas hydrate exploration in the Danube paleodelta levee-channel system • Geothermal study of gas hydrates from Danube paleodelta (Vasilev, 2015)
PetroHydrate	Prediction of gas hydrate accumulations using PetroMod (www.geomar.de)	Germany- Norway	<ul style="list-style-type: none"> • Prediction of gas hydrate accumulations in the Gulf of Mexico using PetroMod
CAGE	Arctic Gas Hydrate, Environment and Climate (CAGE, 2015)	Norway/ UIT The Arctic University of Norway	<ul style="list-style-type: none"> • understand how methane release impacts the marine environment and global climate system • investigate the role of gas hydrates in arctic areas, and the effects on oceans and our global climate in the future

과 가스 하이드레이트 개발의 법적 근거 검토
 - MIGRATE 참여국과 국제 연구자·공학자 간의 지식 이전을 증대
 - 참가국 연구 기관의 단기 기술 훈련, 워크숍을

통해 신진 연구자의 교류 및 활발한 회합을 주선
 - 전문가의 교류를 강화하고 새로운 시각에서의 출판물 및 특정 주제별 특별호를 발간토록 하는 것이라 할 수 있다.

3.3 MIGRATE의 과학 프로그램

과학 프로그램의 초점은 가스 하이드레이트 자원을 보유하고 있는 유럽국들이 경제적, 기술적, 환경적 과제를 해결하기 위한 종합적인 연구를 가능하게 하고 이를 적절이 조정하는 것이라 할 수 있다. 과학 프로그램은 크게 보아 5개 분야로 구분할 수 있는데 (표 3), ① 유럽 해역에서 개발 가능할 것으로 판단되는 가스 하이드레이트 저류층의 분포와 부존량 평가, ② 경제성과 환경적으로 안전한 생산기술의 개발, ③ 가스 하이드레이트 생산 시 절대적으로 필요한 모니터링 기술 개발과 평가, ④ 가스 하이드레이트 개발에 수반되는 환경적 과제의 평가, ⑤ 가스 하이드레이트 생산에 적합한 법적 제도의 설계 등이다. 이 프로그램은 기존 유럽국가에서 수행하고 있는 다른 프로젝트와도 긴밀하게 협력하고 있는데, 특히 MIGRATE가 중요하게 생각하는 협력 프로젝트는 독일의 SUGAR, EU의 FP7 Managing Impacts of Deep-sea resource exploitation (MIDAS), 불가리아-우크라이나의 Geophysical estimation of scalable sources and sinks of methane in the Black Sea (GEO-METHANE), 독일-노르웨이의 Prediction of gas hydrate accumulations using PetroMod (PetroHydrate), 그리고 노르웨이의 Arctic Gas Hydrate, Environment and Climate (CAGE) 프로젝트이다(표 4).

3.3.1 가스 하이드레이트 분포와 부존량 평가

‘유럽 해역에서 가스 하이드레이트로부터 메탄 생산이 가능할 것으로 추정되는 중요한 지역은 어디인가?’, ‘퇴적물 중 가스 하이드레이트 함량이 물리적, 지반 공학적 특성에 어떻게 영향을 미치는가?’, ‘기존 자료와 분지 모델링 자료 분석과 재처리에서 얻을 수 있는 교훈은 무엇인가?’, ‘모델링이 개발 가능한 자원을 규명하는데 어떻게 이용될 수 있는가?’, ‘유럽의 가스 하이드레이트 생산이 경제적 타당성은 있는가?’ 등이 중요한 관심사이다. 이 분야는 독일의 SUGAR, Petroleum Assessment of the Arctic North Atlantic and Adjacent Marine Areas (PANORAMA), 불가리아-우크라이나의 GEO-METHANE, EU의 International Association (INTAS) 프로그램, MIDAS 프로젝트, 이스라엘 및 터키의 프로젝트와도 협력할 계획이다. 흑해의 다뉴브 델타(Danube Delta) 심해 지역과 같은 유망한 유럽의 가스 하이드레이트 저류

층 탐사는 SUGAR, MIDAS 프로젝트와 연계하여 가스 하이드레이트 부존과 개발 가능성을 규명하고 지반 공학적인 이슈들을 평가할 예정이다. 스발바르(Svalbard) 해역의 Vestnesa Ridge의 추가 탐사도 계획하고 있다.

3.3.2 경제적 · 안전한 생산 기술 개발

‘저비용의 안전하고 지속 가능한 생산 기술을 개발할 준비가 되어 있는가?’, ‘어떤 상황에서 CO₂ 주입에 의한 생산 기술이 경제적으로 환경적으로 바람직한 기술인가?’ 등에 관한 이슈가 주 대상이다. 이 프로젝트는 독일의 SUGAR, Integrated Systems for Underwater Production of Hydrocarbons (ISUP), EU FP7 프로젝트인 Blue Mining과 협력할 예정이다.

3.3.3 획기적인 생산 모니터링 기술 개발과 평가

‘저비용의 안전하고 지속가능한 모니터링 기술을 개발할 준비가 되어 있는가?’, ‘가스 하이드레이트 생산 과정을 모니터링하기 위해 어떠한 지식과 기술이 현장에 적용되어야 하는가?’ 하는 것이 주요 이슈이며 SUGAR, Blue Mining 프로젝트와 협력하게 된다.

3.3.4 가스 하이드레이트 개발 시 환경적 과제의 평가

‘가스 하이드레이트 생산이 해저면 안정성에 영향을 미칠 것인가?’, ‘생산 기간 중 메탄이 어느 정도 수층에 누출되고 해양 및 해저 생태계에 미치는 영향은 무엇인가?’, ‘현장 적용 가능한 효율적인 모니터링 기술은 있는가?’ 등이 주요 이슈이다. 이 분야와 협력하게 될 프로젝트는 상당수 있는데, SUGAR, GEO-METHANE, MIDAS, EU-이탈리아 프로젝트인 Arctic ocean gas hydrate stability versus changing climate and geohazard (ARCHANGE), COST Action인 Impact of Fluid circulation in old oceanic Lithosphere on the seismicity of transform-type plate boundaries: new solutions for early seismic monitoring of major European Seismogenic zones (FLOWS), 프랑스의 Geohazard, 이스라엘의 E/V Nautilus NA019 탐사 그리고 종료된 INTAS 프로젝트 등이다.

3.3.5 생산의 국제 및 유럽 법규 설계

‘비전통 탄화 수소 자원의 해양 생산을 국제법과

Table 5. Summary of mission of the Working Groups (WGs) in MIGRATE (modified from MIGRATE, 2015).

WG1: Resource assessment Leader: Prof. Tim Minshull (UK)	<ul style="list-style-type: none"> • assess interpretation techniques and methods for the characterization of gas hydrate accumulations, particularly in sand-rich deposits • evaluate basin modeling approaches for the simulation of gas hydrate accumulation • compile a database of gas hydrate reservoirs in European waters • produce a map showing the distribution of gas hydrates in Europe 	WG3: Environmental challenges Leader: Umberta Tinivella (Italy)	<ul style="list-style-type: none"> • assess the slope stability and suitable precursors during gas production from hydrates • develop a generic strategy for environmental baseline studies and the environmental monitoring program for the planned production test • evaluate national legal frameworks regulating offshore oil & gas production and gas production from hydrates
WG2: Exploration, production and monitoring technologies Leader: Prof. Assaf Klar (Israel)	<ul style="list-style-type: none"> • review existing technologies and identify key areas to develop gas hydrates • assess and employ reservoir modeling tools for the numerical simulation • identify suitable technologies to minimize geo-technical risks, to maintain well stability, and manage sand mobilization during the production process • develop a technical outline for the production test • estimate costs for the planned production test 	WG4: Integration, public reception and dissemination Leader: Klaus Wallmann (Germany)	<ul style="list-style-type: none"> • internal project communication, management and dissemination of results • mining and pooling of existing data related to gas hydrates in Europe • dialogue with stake-holders and policy makers • networking with national gas hydrate programs in Europe and all over the world • selection of a promising target site for a field production test

유럽법은 어떻게 다루고 있는가?’가 주요 이슈이며, EU FP7 프로젝트인 Sub-seabed CO₂ Storage: Impact on Marine Ecosystems (ECO2) 와 협력하게 된다.

3.4 실무그룹(WG, Working Group)

MIGRATE는 자원 잠재력 평가, 탐사·생산·모니터링 기술, 환경적 도전, 사회적 인식 통합 및 확산이라는 큰 목적을 달성하기 위해 4개의 실무 그룹(WG, Working Group)을 운영하고 있다(표 5).

3.4.1 WG 1: 자원 평가(Resource assessment)

WG 1은 영국 사우스햄튼 대학의 Tim Minshull 교수를 주축으로 지구물리, 퇴적학, 지질학, 지화학, 모델링 분야의 전문가가 참여하여 유럽의 대륙 연변부 해역에서 산출되는 다양한 가스 하이드레이트 자료를 평가하는 것을 주 활동으로 하고 있다. 그러나 유럽에서의 가스 하이드레이트 탐사 자료는 많지 않기 때문에 석유와 가스 자원 탐사에서 취득된 방대한 자료를 재처리하고 평가를 통해 가스 하이드레이트 부존 가능성을 예측할 수 있을 것으로 판단하고 있으며 궁극적으로는 유럽 해역에서의 가스 하이드

레이트 부존 지도를 생산하는 것이 주요한 내용이다.

3.4.2 WG 2: 탐사, 생산 및 모니터링 기술(Exploration, production, and monitoring technologies)

WG 2는 이스라엘 기술연구소 토목공학과 Assaf Klar 교수를 중심으로 환경적으로 안전하고 사용 가능한 자원이 될 수 있도록 탐사, 생산, 모니터링 기술 개발 전문가를 참여시킬 계획이다. 심부 퇴적층을 대상으로 하고 있는 현재까지의 전통형 에너지 자원 개발 기술은 해저면 아래 수 백 m 이내의 천부에 부존하고 있는 가스 하이드레이트 개발에는 적합하지 않다. 따라서 유럽의 연구 기관과 산업체가 개발하고 있었던 기존 기술 외에 혁신적인 기술 개발을 추가적으로 수행하도록 한다. 이에 가스 하이드레이트의 부존 예측을 위한 분지 모델링 소프트웨어 개발, 3D 탐사 분해능을 대폭 향상시키는 탄성파 및 전자기 탐사 시스템 개발, 해저면 200 m까지 시추 가능한 이동식 저비용의 시추기 개발, 환경 모니터링을 위한 수중 음향 시스템과 센서 개발 등을 포함한다. 이러한 추가적인 기술 개발을 통하여 현장 적용 시 환경 모니터링과 생산 비용도 줄이고 안전한 생산을

할 수 있도록 하며, 궁극적으로는 이러한 기술들을 이용해 유럽 해역의 최적의 장소에서 가스 하이드레이트 생산 시험에 착수하는 것이다.

3.4.3 WG 3: 환경문제(Environmental challenges)

WG 3는 이탈리아 National Institute of Oceanography and Experimental Geophysics (OGS)의 Umberta Tinivella 박사를 중심으로 구성되어 있으며, WG 2와 긴밀한 협력이 필요한 그룹이다. 가스 하이드레이트 저류층에서 메탄을 생산하는 경우에 유체 자체가 독성 물질을 함유하지 않고 생산 과정 중에도 압력이 안정적으로 유지되기 때문에 폭발(blow-out) 가능성이 매우 낮고 다른 심해 조업에 비해 환경적 위험성은 그다지 심각하지 않다. 그러나 해저면 안정성에 영향을 미쳐 해저면에 설치된 구조물 손상이나 대륙 사면 경사면에서의 메탄 누출과 퇴적층 붕락으로 인하여 해저 산사태가 발생하고 메탄이 수층에 방출되어 해저 생태계에 영향을 주는 환경적 위험성은 존재할 수 있다. 가스 하이드레이트 저류층 상부의 덮개 역할을 하는 퇴적층의 두께도 불과 수백 m에 불과하기 때문에 생산 과정에서 메탄이 누출될 가능성도 배제할 수 없다. 따라서 이 그룹에서는 하이드레이트부터 메탄을 생산할 때 발생 가능한 특정한 환경 위험성으로부터 환경적으로 안전한 모니터링 전략을 수립하고, 석유·가스 개발에 적용되는 환경 법적 조항이 가스 하이드레이트 생산에 수반되는 환경 위험성 해소를 위해 어떻게 적용되어야 하는지를 평가하는 일이다.

3.4.4 WG 4: 통합 및 대중 소통(Integration, public reception, and dissemination)

독일 GEOMAR의 Klaus Wallamnn 박사를 중심으로 구성된 WG 4는 다른 그룹에 비해 특별한 임무를 수행하는데 가스 하이드레이트 개발 이슈의 사회적 공감대를 얻는 임무를 수행한다. 가스 하이드레이트를 천연 가스 자원으로 사용할 수 있는지에 대하여는 과학적, 기술적, 경제적으로 많은 의문점이 제기되어 왔다. 위의 3개 WG에서 제기되는 이러한 다양한 의견을 과학적 기술적 측면에서 종합하고 소통하여 과학적 이해도를 제고하고 사회적 영향에 대하여 인식시키는 것은 매우 중요하다. 따라서 WG 4에서는 일반 대중, 비정부기구(NGO), 정책 결정

자, 민간 기업, 공공 기관을 상대로 다양한 경로를 이용하여 소통 전략을 개발하고 이를 실행에 옮기는 것을 주 활동으로 하고 있다.

3.5 기대 효과

유럽은 MIGRATE 프로젝트를 통해 가스 하이드레이트 분야의 다양한 과학 연구 집단과 기술 분야 전문가를 연계함으로써 강력한 연구 체제를 구축하게 될 것이고, 국제 유가의 하락과 셰일 가스와의 비전통 에너지 생산으로 인해 한계에 있는 자국의 연구 활동을 촉진할 것으로 기대된다. 또한 장기 협력 체제 구축과 신진 과학자의 교육 훈련, 전반적인 이슈에 대해 인식을 제고함으로써 사회적으로 중요한 혁신적·과학적·기술적 주제에 대한 견인차 역할이 가능할 것으로 보인다. 동시에 미국, 일본, 한국 등의 비유럽권 국가와도 기존의 협력을 강화하여 주요 경험 사례를 공유하는 것도 효과적이라 판단된다.

이해 당사자와 정책 결정자들은 가스 하이드레이트 자원 평가, 환경적인 과제, 향후 개발되어야 할 생산 기술 등에 대한 신뢰할 만한 평가 자료를 접하게 될 것이며, MIGRATE 프로젝트를 통해 얻어지는 유럽 해역의 자원 잠재력 평가 결과는 유럽의 향후 에너지 전략 수립에 통합되어 활용될 것으로 기대한다. 이에 따라 MIGRATE는 전 세계의 가스 하이드레이트 분야에서 유럽의 역할을 증대시키고 혁신적인 가스 하이드레이트 연구 개발 결과를 창출할 것으로 기대하고 있는 것이다.

4. 결 론

육상 영구 동토 지역에서 3회에 걸쳐 실시된 생산 시험과 2013년 세계 최초로 일본이 실시한 해양 생산 시험 결과는 가스 하이드레이트 연구 개발에 투자하고 있는 국가들에게 성과를 공유하고 향후 연구 개발 정립에 많은 교훈을 준 것으로 평가할 수 있다. 수 차례의 생산 시험 사례가 가스 하이드레이트의 개발로 직결되는 것은 아니며 현재까지 알려진 기술에 의하여 생산이 가능함을 실증 규모 정도에서 입증한 정도에 지나지 않는다. 특히 해양에서는 장기 생산 시험을 통해서 환경적으로 안전하고 경제적 가치가 인정되는 혁신적 생산 기술 개발을 위한 노력은 계속 될 것으로 보인다. 유럽뿐만 아니라 다른 나

라들도 현재의 기술을 뛰어 넘는 새로운 기술 개발에 깊은 관심을 보여 주고 있기 때문이다.

유럽 국가들은 가스 하이드레이트를 개발 가능한 미래의 새로운 에너지로 평가하기보다는 메탄이 기후 변화에 미치는 영향, 지질 재해와의 연관성에 보다 많은 관심을 집중하고 자국 또는 국가 간 공동연구를 수행하였다. 그러나 유럽 내의 천연 가스 수요가 계속해서 증가하고 생산량은 감소하는 추세에 따라 미래의 에너지 자원 확보의 필요성을 공감하게 되었다. 따라서, 유럽국은 각 국별로 수행하던 가스 하이드레이트 관련 프로젝트에서 진일보한 형태의 MIGRATE 프로젝트를 시작하고 가스 하이드레이트를 미래의 새로운 에너지원으로 평가하기 위한 협력 체제를 구축하였다. 이를 통해 다학제 간 연구 집단의 교류와 과학자-기술자-학계-산업계-정책 결정자-대중과의 네트워킹을 연계함으로써 가스 하이드레이트의 중요성에 관한 사회적 공감대 조성을 강조하고 있다. MIGRATE 프로젝트에서 추구하는 방향은 유럽 해역에서 개발 가능할 것으로 판단되는 가스 하이드레이트 저류층의 분포와 자원 부존량 평가를 통하여 생산 시험을 준비하고, 경제성으로 환경적으로 안전한 혁신적 생산 기술 개발, 생산 시 필요한 모니터링 기술 개발과 환경적 과제의 평가 그리고 가스 하이드레이트 생산에 적합한 법적 제도의 설계 등이다.

유럽에서의 이러한 융합 협력 체제 구축을 통해 MIGRATE 프로젝트가 성공적으로 수행될 경우, 전세계 가스 하이드레이트 연구 개발 분야에서 유럽의 역할은 증대될 것이며 혁신적인 연구 결과는 가스 하이드레이트 연구 개발의 후발 국가에게 파급 효과가 클 것으로 기대된다. 가스 하이드레이트를 미래의 신에너지 자원 측면에서 평가하고 연구 개발을 수행하고 있는 아시아 국가들도 MIGRATE 프로젝트에 대한 면밀한 분석을 통해 범아시아권이 공동 참여할 수 있는 새로운 협력 기구의 구상도 필요할 것으로 판단한다. 이미 아시아 국가들은 자국의 해역에서 자원 탐사, 자원 부존량 평가, 생산 기술 개발 등에서 상당한 기술력을 확보하고 있기 때문에 국가 간 이해 관계를 떠나 서로의 강점 기술을 공유하고 공동 연구를 확대하고자 하는 새로운 전기가 필요하다. 이는 심해의 가스 하이드레이트로부터 환경적으로 안전하고도 경제적인 방법에 의해 가스를 생산하

고자 하는 목표를 달성하기 위하여는 막대한 자본, 다학제 간 과학 기술자, 현장 적용 가능한 기술력이 투입되어야 하고 축적된 기술을 서로 공유하고자 하는 노력이 절대적으로 필요하기 때문이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 2015년도 주요 사업인 '가스 하이드레이트 개발 생산 연구(15-1143)'와 '가스 하이드레이트 환경영향 분석 연구(15-1142)'의 지원으로 수행된 것이다. 심사 과정에서 유익한 조언을 주신 전북대학교 양우현 교수님과 익명의 심사 위원에게 감사드린다.

REFERENCES

- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), 2013, Cruise Report BGR 13-2 Project: PANORAMA-1: Geophysics, Microbiology. 131 p.
- Blue Mining, 2015, <http://www.bluemining.eu>
- CAGE, 2015, Centre for Arctic Gas Hydrate, Environment and Climate. <https://cage.uio.no/about>
- COST, 2014, COST 091/14, Memorandum of Understanding. 23 p.
- COST Action ES0902 Fact Sheet, 2015, PERGAMON. 7 p.
- COST Association, 2014, COST brochure: Growing ideas through networks. 8 p.
- COST Office, 2014a, COST 2014-2015: About COST, How to join a COST Action. 256 p. <http://www.cost.eu>
- COST Office, 2014b, COST 2014-2015: About COST, How to join a COST Action. COST Action ESSEM, 56-79. <http://www.cost.eu>
- COST Office, 2015, Action ES1405 Fact Sheet. 5 p.
- ECO2, 2015, Best practical guidance for environmental risk assessment for offshore CO₂ geological storage; WP14: lead beneficiary no 16 (DNVGL), 49 p. <http://www.eco2-project.eu>
- European Commission, 2015, Horizon 2020 (The EU Framework Programme for Research and Innovation). <http://ec.europa.eu/program/horizon2020> (October 23, 2014).
- FP7, 2014, <http://ec.europa.eu/research/fp7> (October 23, 2014).
- GEOMAR, 2014, SUGAR Project. <http://www.geomar.de> (January 15, 2014).
- Hancock, S.H., Dallimore, S.R., Collett, T.S., Carle, D., Weatherill, B., Satoh, T. and Inoue, T., 2005, Overview of pressure-drawdown production-test results for the

- JAPEX/JNOC/GSC *et al.* Mallik 5L-38 gas hydrate production research well. In, S.R. Dallimore, T.S. Collett (Eds.), Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada Bulletin 585, 16 p.
- IEA (International Energy Agency), 2014, Natural gas market outlook: World Energy Outlook 2014. OECD/IEA, Paris.
- ISUP, 2011, Integrated Systems for Underwater Production of Hydrocarbons, <http://www.impac.de>
- Kvenvolden, K.A. and Lorenson, T.D., 2001, The global occurrence of natural gas hydrate. *Geophysical Monograph*, 124, 87-98.
- Kvenvolden, K.A., 1988, Methane hydrate - A major reservoir of carbon in the shallow geosphere?. *Chemical Geology*, 71, 41-51.
- Makogon, Y., 2010, Natural gas hydrates - A promising source of energy. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2, 49-59.
- Lee, S.R. and Kim, S.J., 2014, Onshore and Offshore Gas Hydrate Production Test. *Economic and Environmental Geology*, 47(3), 275-289.
- MIDAS, 2015, Managing impacts of deep sea resources exploitation. <http://www.eu-midas.net>
- MIGRATE, 2015, <https://www.migrate-cost.eu/home>
- Milkov, A., 2004, Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there?. *Earth-Science Review*, 66, 183-197.
- Schoderbek, D., Farrell, H., Hester, K., Howard, J., Raterman, K., Silpngarmert, S., Martin, K.L., Smith, B. and Klein, P., 2013, "Oil & Natural Gas Technology: ConocoPhillips Gas Hydrate Production Test: Final Technical Report". United States Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, DE-NT0006553-Final-Technical-Report. 204 p.
- Vasilev, A., 2015, Geothermal study of gas hydrates from Danube paleodelta - BEEZ of the Black Sea. 7th BgGS National Conference With International Participation "GEOPHYSICS 2015".
- Yamamoto, K., 2015, Overview and introduction: Pressure core-sampling and analyses in the 2012-2013 MH21 offshore test of gas production from methane hydrates in the eastern Nankai Trough. *Marine and Petroleum Geology*, 1-14
- Yamamoto, K. and Dallimore, S.R., 2008, Aurora-JOGMEC-NRCAN Malik 2006-2008 gas hydrate research project progress. NETL Newsletter 'Fire in the Ice', 8, 1-5 (Issue 3).
- Yamamoto, K., Terao, Y., Fujii, T., Ikawa, T., Seki, M., Matsuzawa, M. and Kanno, T., 2014, Operational overview of the first offshore production of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough, OTC25243. In: 2014 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 5-8 May 2014.
- Wallmann, K., Pinero, E., Burwicz, E., Haeckel, M., Hensen, C., Dale, A. and Ruepke, L., 2012, The Global Inventory of Methane Hydrate in Marine Sediments: A Theoretical Approach. *Energies*, 5, 2440-2409; doi:10.3390/en5072449.

Received : August 28, 2015

Revised : October 3, 2015

Accepted : October 13, 2015