



해양 원자력 발전소 이야기

A Story about Ocean Nuclear Power Plants

본 글에서 필자는 대중들에게는 다소 생소한 해양 원자력 발전소(해양원전)에 대한 이야기를 펼쳐보고자 한다. 전 세계적으로 원자력발전의 장단점과 포기과 유지에 대한 갑론을박은 끊임없다. 필자는 원자력은 상당히 위험한 면을 가지지만 포기할 수 없는 에너지원이며, 인류는 원자력의 사용을 더욱 안전하게 하기 위해 기술 개발에 전력을 다해야 한다고 생각한다.

필자는 박사학위 이후에 삼성중공업에서 2005년부터 2009년까지 근무하였다. 주요 업무는 새로운 해양구조물 상품을 개발하는 것이었다. 당시 콘크리트 부유구조물에 관심이 많았고, 이를 이용한 상품개발에 매진하였다. 그러던 중 아마도 2007년경 러시아에서 부유식 원자력 발전소용 바지선(barge)을 만들어 달라는 요청이 삼성중공업으로 왔었고, 필자는 실무자로 이 요청에 대한 기술적 검토를 하였다. 조선업의 업황이 절정기에 도달해 있던 당시로 얼마 안되는 바지를 만드는 것은 삼성중공업에 별다른 득이 되지 않았고, 바지선 건조는 하지 않은 것으로 결정하였다. 이후 러시아는 중국과 협력하여 그림 1에 보이는 부유식 원전을 건조하였다.

그러나 필자는 이런 경험을 통하여 해양원전을 처음 접하게 되었다. 러시아의 부유식 원전은 인구 규모가 작고 장거리 전력 그리드를 건설하기에 곤란한 연안



이 필 승

KAIST 기계공학과 교수



그림 1 러시아 부유식 해양원전 아카데미 로모노소프 (35MW원자로 2기 탑재)



그림 2 미국의 부유식 해양원전, 1967년 건설

도시에 전력을 공급하는 것을 목적으로 하였다. 우리나라에서 주로 사용되는 대형 육상원전은 원자로 하나에 1400 MW급으로 대도시 전력 공급에 적합하다. 부유식 원전에는 작은 규모의 원자로가 들어가는데 이를 SMR(Small Modular Reactor)라고 부른다. 우리나라도 SMART라는 세계 최고 수준의 SMR 기술을 보유하고 있다. 필자는 이를 이용한 부유식 원전 상품개발을 위해 원자력연구원과 삼성중공업의 협력을 도모했었다.

2009년 필자는 KAIST 해양시스템공학과에 교수로 오게 되었고, 해양원전에 대한 연구를 본격적으로 시작하게 되었다. 부유식 해양원전은 1967년 미국에서 처음 건설되었다. 2차 세계대전에서 사용하던 선박을 개조하여 10MW의 발전을 할 수 있도록 하였고, 1976년까지 파나마 운하 지역에 전력을 공급하였다. 이후 플로리다에 1200MW급 부유식 해양원전을 건설하다 중단하였다. 부유식의 경우 소용량의 전기를 공급하는 원전에 적합하다.

필자는 가가와트(GW)급 이상의 대용량 원전을 바다에 건설하는 것을 목표로 해양원전의 개념을 개발했다. 국내

의 주력 원전인 APR1400을 탑재하기로 했다. 그러기 위해 부유식 보다 중력식 해양구조물(GBS, Gravity Based Structures)을 이용하였다. 항만건설에서 많이 사용되는 케이슨(Caisson)도 중력식 해양구조물의 일종이다.

그림 3은 GBS에 탑재하는 해양원전의 건설 개념을 보여주고 있다. 건설 개념은 다음과 같다. (1) GBS와 원전설비(NPP)를 건조한다. 국내 조선해양산업의 생산시설을 이용하면 쉽고 빠르게 건조가 가능하다. (2) NPP의 주요 설비들은 드라이독에서 대용량 크레인을 사용하여 조립된다. GBS 해양원전이 건조되는 도중 원전이 설치될 곳의 바다에서는 GBS를 올려놓기 위한 해저면(Seabed)을 준비하는 공사를 한다. (3) 조립된 GBS 해양원전은 물에 뜰 수 있으며, 터그(Tug) 보트로 인양하여 설치장소로 이동시킨다. (4) 해양원전을 바다 바닥에 올려놓는다. 전력망을 연결하면 운영을 시작할 수 있다.



그림 4 Adriatic LNG terminal (180m×88m×48m)

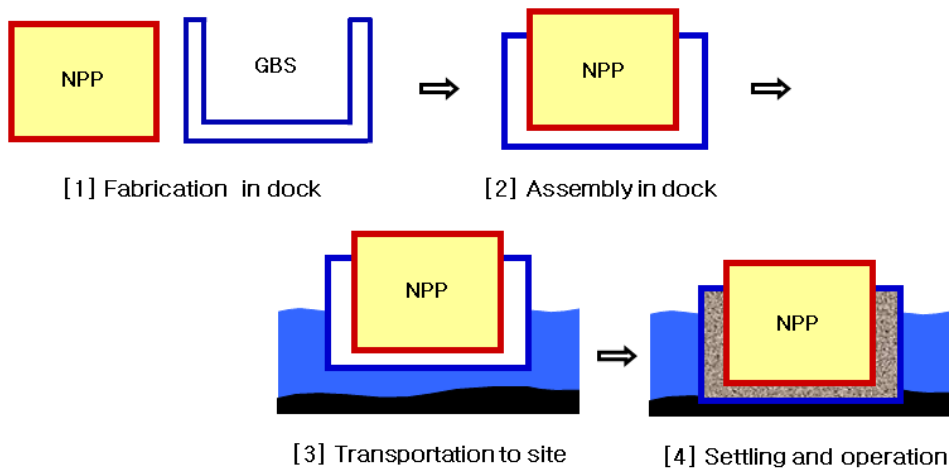


그림 3 GBS에 탑재하는 해양원전의 건설 개념 (KAIST)

그림 4는 2008년 시공된 초대형 중력식 해양구조물로, 이탈리아 근해에서 운용 중인 LNG터미널이다. 기존 육상 LNG 인수기지를 대체하며 부지매입, 환경비용 절감, 공기 단축 등 다양한 장점을 가지고 있다. 길이 180m, 폭 88m, 높이 48m이며 상부에는 플랜트 시설이 탑재되어 있고, GBS 내부에는 LNG 탱크가 들어 있다. 수심 20m 정도의 해역에 설치되어 있다. 필자는 이와 같은 형태의 GBS 구조를 활용하면 대용량 육상원전을 바다에 짓는 것도 가능하다고 판단했다.

그림 5와 6은 필자가 2011년 당시 KAIST대학원생이었던 현대중공업의 이기환 책임연구원과 한국원자력연구원의 이강현 박사와 함께 만들어 낸 GBS 탑재형 해양원전의 개념설계 그림이다. APR1400 원자로2기를 270m×110m의 GBS구조물 3개에 탑재하고 수심 25m의 해역에 설치된다. 육상 원자력 발전소의 모든 건물과 설비를 분석하여 재배치하는 작업을 한 결과이다. 우리나라는 세계 최고의 조선 산업과 원자력산업을 보유하고 있는 바 그림과 같은 해양 원전의 건설은 딱히 어려운 일은 아니라고 판단한다.

GBS 탑재형 해양원전과 육상원전에 대한 건설기간, 비용, 시공특성, 내진성능, 안전성 등도 비교하였다. 간략하게 말하면 같은 용량(1400MW원자로 2기 탑재)의 육상 및 해양원전은 비슷한 12조원의 비용이 들지만, 해양원전의 시공기간이 훨씬 짧으며 이로 인한 해양원전의 경제적 이득이 크다.

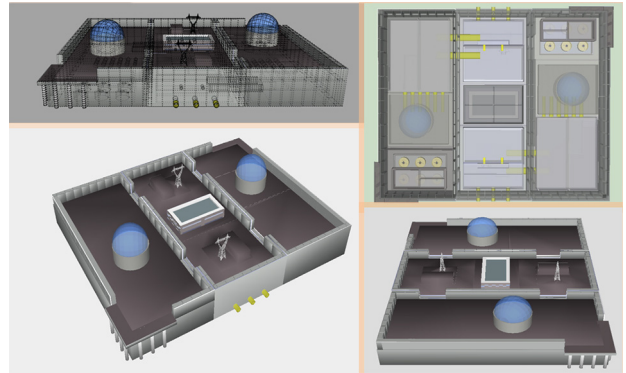


그림 5 GBS 탑재형 해양원전 개념설계 (KAIST, 1400MW원자로 2기 탑재)

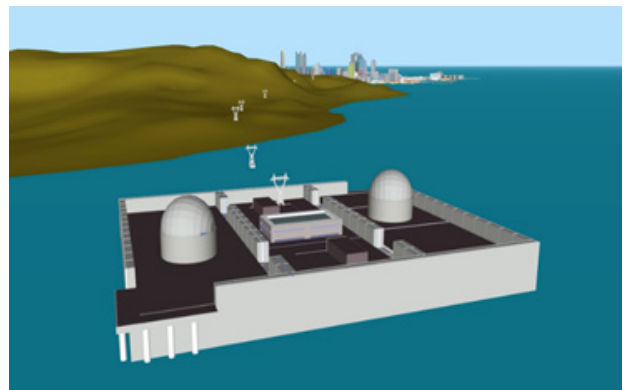


그림 6 해안가에 설치되어 있는 GBS 탑재형 해양원전 조감도 (KAIST)

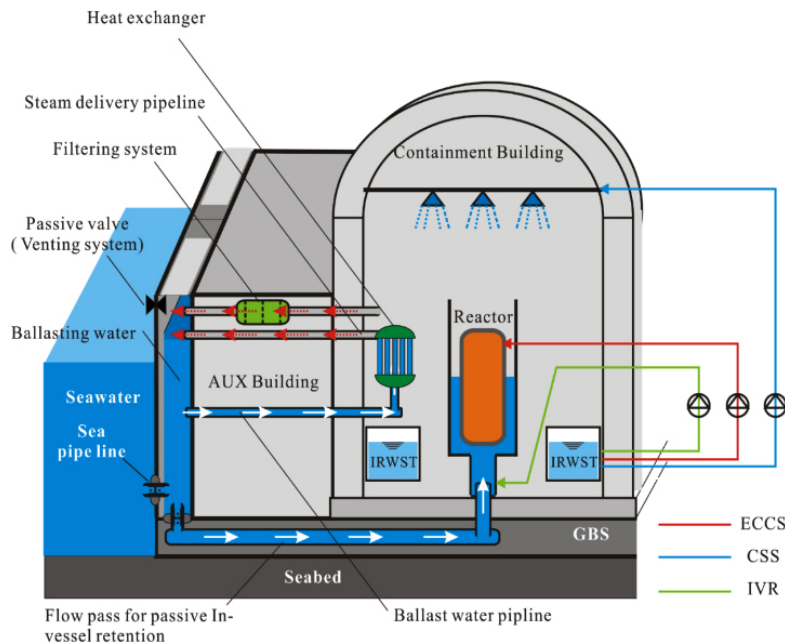


그림 7 GBS 탑재 해양원전이 피동안전 시스템 (KAIST)

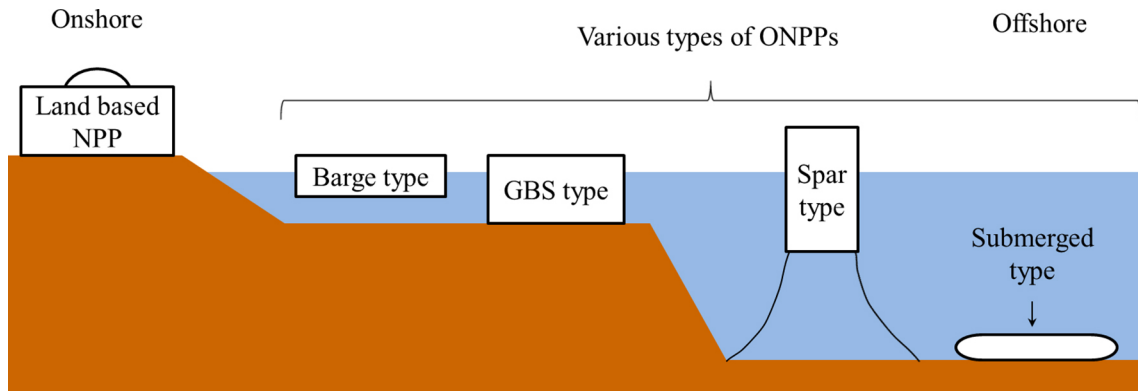


그림 8 다양한 종류의 해양원전 개념 (KAIST)

또한, 해양원전의 가장 큰 특징은 원자로가 수면 아래에 배치된다는 점이다. 중대사고 발생 시, 바다라는 무한정 큰 Heat Sink와 물의 자연순환을 이용하여 원자로를 식히는 것이 가능하기 때문에 육상원전에서 펌프가동을 위해 필요한 소외전원을 요구하지 않는다. 이는 해양원전의 피동안전시스템이 육상원전과 비교할 바 없이 우수하다는 것이다. 그림 7은 필자가 KAIST 원자력 및 양자공학과 이정익 교수와 함께 고안한 피동안전 시스템을 보여준다. 또한, 지진 시 GBS는 구조물과 바다 바닥 사이에 Base Isolation 효과를 얻을 수 있고, 바다에 놓여 있으므로 쓰나미로부터 안전하다.

최근 전 세계의 많은 연구자들이 해양원전에 대하여 관심이 많다. 그림 8은 지금까지 전 세계에서 논의되고 있는 다양한 형태의 해양원전을 정리하여 보여준다. 바지선에 원자력 플랜트를 탑재하는 형태는 항만 내와 같이 정온화된 수역에 설치한다. 미국 MIT에서는 Spar 구조물을 활용한 수심이 깊은 지역에 설치할 수 있는 부유식 해양원전을 설치하는 것을 제안하였다(그림 9 참조). 잠수함과 비슷한 모양을 가지고 완전히 잠수시켜 바다 바닥에 놓은 형태는 프랑스의 DCNS사에서 제안하였다(그림 10 참조). 모두 작은 용량의 원전을 탑재할 수 있다. 필자가 KAIST에서 제안한 GBS 형태만이 육지에서 사용되는 GW급의 대용량 원전을 탑재할 수 있다.

필자는 GBS에 탑재하는 해양원전뿐만 아니라 부유식 해양원전에 대한 연구도 하였다. 그림 11은 필자가 김재민, 이채민 박사과 개발한 부유식 해양원전을 보여주고 있다. TLP(Tension Leg Platform)에 원자력 발전설비를 탑재하였다. 오일산업에서 사용되는 일반적인 TLP와는 다르게 수면 하부의 부력 탱크가 매우 크며, 이 공간에 원자력 설비들이 들어가게 된다. 한국원자력연구원에서 개발한 100

MW의 SMR(Small Modular Reactor)인 SMART를 탑재한 설계를 하였다. TLP 구조물 상부에는 연료를 교체할 수

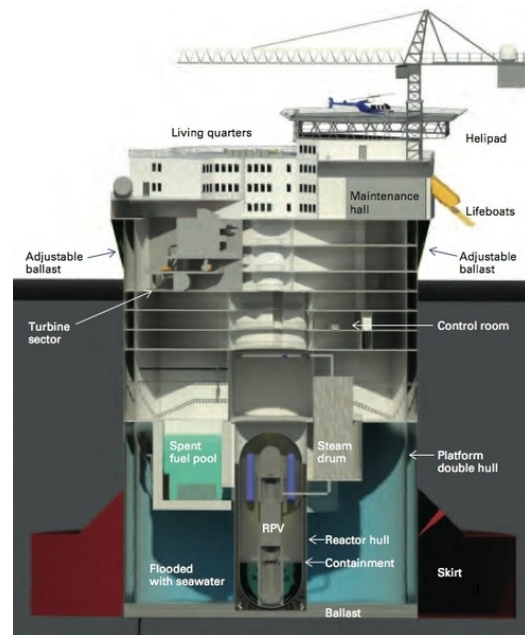


그림 9 Spar 구조물을 이용한 부유식 해양원전 (MIT)



그림 10 잠수형 해양원전 Flexblue (DCNS)

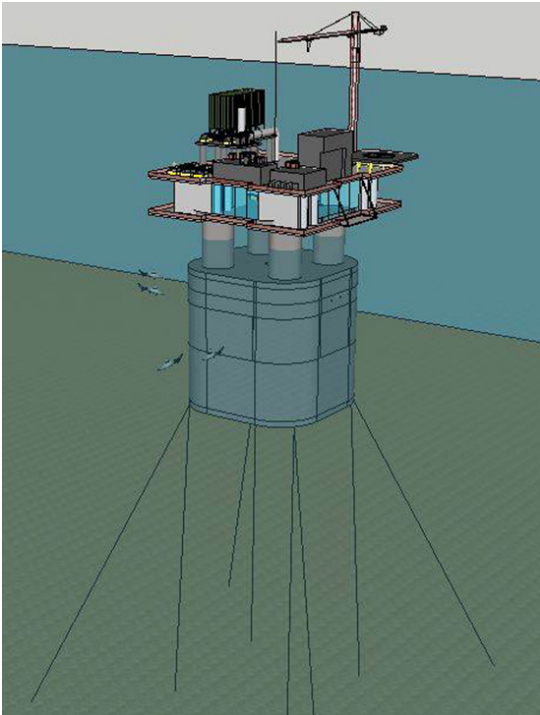


그림 11 TLP 구조물에 탑재한 부유식 해양원자력 발전소 (KAIST, 100MW)

있는 크레인 설비와 주거시설을 갖추었다. 해양파에서의 운동해석을 실시하여 구조물의 안전성을 평가하였다.

해양원전이 우리나라에서 현실화된다면 다음과 같은 엄청난 파급효과가 있을 것으로 판단한다. (1) 원자력 분야 원천기술 확보를 통한 원자력 기술 선도, (2) 새로운 형태의 원자력 수출상품을 개발하여 세계 시장 개척하고 대한민국의 #1 수출상품/신성장동력으로 국부에 기여, (3) 육상 원전의 토지 매입/수용과 환경제약 극복으로 원전 시공에 따른 사회적 비용 절감, (4) 국내 일자리 창출과 관련 부품/플랜트 산업 육성 효과, (5) 원자력, 해양플랜트, 건설기술의 융합으로 새로운 진입장벽 구축.

본 기사를 통해 필자의 해양원전에 대한 연구를 소개하였다. 바다에 원자력 발전소를 짓는다는 것이 현실적이지 않다고 생각하는 독자들도 있을 것이다. 누구나 원자력 발전이라고 하면 육상에 건설된 원전을 상상하게 된다. 그러나 인류 최초의 상용원전이 잠수함에 먼저 적용되었고, 이미 5000기 이상의 원전을 바다에서 운영해 왔다는 점을 알고 있는 사람은 거의 없다. 필자는 해양원자력 발전은 우리나라의 미래 먹거리가 될 수 있는 중 차대한 사업이 될 것이라고 생각하고 있다. 10여년 전에 필자와 동료 연구자들에 의하여 뿌려진 아이디어의 씨앗들은 지금 조선해양 및

중공업사, 한수원, 원자력연구원 등에서 끊임없이 논의되고 있다. 향후 20년 안에 우리는 해양원전을 만나보게 될 것이다.

참고문헌

1. Lee KH, Kim MG, Lee JI, Lee PS. Recent advances in ocean nuclear power plants, *Energies*, 2015, 8(10), 11470-11492.
2. Hirdaris SE, Cheng YF, Shallcross P, Bonafoux J, Carlson D, Prince B, Sarris GA. Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion, *Ocean Engineering*, 2014, 79, 101-130.
3. Zav'yalov SN, Sozonyuk VA. Marketing studies, possibilities for commercialized floating nuclear heat and power plants on the internal and external markets, *Scientific and Application Conference on Floating NHPP*, 2008, 3-10.
4. Fadeev Y. KLT-40S Reactor Plant for the Floating CNPP FPU, *IAEA Interregional Workshop on Advanced Nuclear Reactor Technology for Near-Term Deployment*, Vienna, Austria, 2011.
5. Jurewicz J, Buongiorno J, Golay M, Todreas N. Spar-type Platform Design for the Offshore Floating Nuclear Power Plant, *Proceeding of NUTHOS-10*, Okinawa, Japan, December 14-18, 2014.
6. Kolmayer A. Blue submarine; The Flexblue® offshore nuclear reactor, *Power engineering international*, 2011, 19, 126-131.
7. Haratyk G, Lecomte C, Briffod F. Flexblue®: a subsea and transportable small modular power plant, *Proceedings of ICAPP 2014*, Charlotte, USA, April 6-9, 2014.
8. Lee K, Lee KH, Lee JI, Jeong YH, Lee PS. A new design for offshore nuclear power plants with enhanced safety features, *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 254, 129-141.
9. Kim MG, Lee KH, Kim SG, Woo IG, Han JH, Lee PS, Lee JI. Conceptual studies of construction and safety enhancement of ocean SMART mounted on GBS, *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 278, 558-572.
10. Lee C, Kim J, Lee KH, Lee PS. Ocean nuclear power plants (해상 원자력 발전소). *KAOSTS 2019 춘계학술대회*, May 2019.

11. Lee PS, Lee C, Lee KH, Kim JM, Lee K. New concepts for ocean nuclear power plants. Plenary lecture in World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Material Research (ACEM18), 2018.
12. Lee C, Lee PS. Concept design of TLP-type ocean nuclear power plant. The fourth KAIST-SJTU- U.Tokyo symposium. 2017.
13. Lee KH, Lee PS, Kim MG, Lee JI. Concept design and safety features of nuclear power plants mounted on gravity based structures. Invited in the 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10), 2014.
14. Kim MG, Kim SG, Woo IG, Han JH, Lee PS, Lee JI. Preliminary studies of ocean smart construction and safety enhancement. International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP), 2013.
15. Lee KH, Lee JI, Woo IG, Han JH, Lee PS. Concept design of SMART mounted on GBS. International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP), 2013.
16. Lee KH, Lee KH, Lee PS. A new concept of ocean nuclear power plant (ONPP). Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 2011.
17. Lee C, Kim J, Cho S. A new design concept for ocean nuclear power plants using tension leg platform. Structural Engineering and Mechanics, 2020, 76, 367-78. 