

21세기 건설 극한공학의 중요성과 발전방향



글 이태식 \ 한양대학교 건설환경공학과 교수 \ 전화 031-400-5145 \ E-mail cmtsl@hanyang.ac.kr



1. 서론

인구증가, 지구온난화, 기상이변 등으로 인해 범지구적으로 공간 문제가 심각하게 대두되면서, 다음 세대의 문명 창출 및 윤택한 삶을 위한 신 공간 창출에 대한 욕구가 점차 증가되고 있다. 우리나라에 국한하여 보아도 한정된 국토와 자원으로 인해 야기되는 각종 문제들에 직면하고 있으며, 2011년에는 현재 국토가용면적(전 국토 면적의 5%, 약 5,000km²)과 동일한 규모의 신규 공간이 필요한 것으로 분석하고 있으며 이에 대응하기 위해서는 경제적, 전략적 차원에서 새로운 공간의 창출을 모색할 필요성이 대두되고 있다.

이러한 개발 공간의 제약 문제는 개발 중심의 사업을 영위하는 특성을 가진 건설 산업에서 지속적인 활동을 영위해 가는 데 적지 않은 걸림돌로 작용할 것으로 예상되고 있으며, 경우에 따라서는 산업의 사활이 걸린 문제로 대두될 수 있을 것이다. 현재 개발 가능한 곳으로는 기존에 개발 활동이 활발히 이루어지지 않았던 극지, 극서 지역을 비롯하여 해저, 지하공간과 상대적으로 미지의 영역에 속하는 우주 공간이 있다.

이들 신 공간은 그린에너지, 수자원, 신소재자원 등 다양한 자원을 대량으로 내재하고 있어 개발 시 새로운 생활공간의 창출 및 에너지원의 확보로 인간문명의 지속적인 영위가 가능할 것으로 판단되고 있다. 이들 지역은 인간의 때가 타지 않은 마지막 보고로 남아 있는 곳이 대부분이다. 개발은 지속적인 발전을 위해서는 필수 불가결한 요소이다. 단 지금까지처럼 무분별한 개발로 인한

폐해를 최소화하고 지속 가능한 개발 패턴을 지향한다면 환경보전과 개발이라는 두 마리 토끼를 잡는 것이 가능할 수도 있을 것이다. 하지만 문제는 이러한 신 공간이 극한, 극서, 극압, 극열 등 극한적인 환경(Extreme Environment)으로 대변되는 곳이라는 것이다.

따라서 건설산업의 도약뿐 아니라 인간문명을 지속시키기 위해서도 극한환경(Extreme Environment) 하의 신 공간에 대한 개발 및 연구 활동으로 의미하는 극한공학(Extreme Engineering)에 대한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

본 원고를 통해 극한공학을 알리고자 하며 이와 관련하여 본 연구진이 수행하고 있는 유인달탐사 및 달기지 건설 연구에 대해 소개하고자 한다.

2. 본론

2-1. 극한건설(Extreme Construction)

1) 극한건설이 필요한 이유

건설산업은 국토를 인간을 위한 공간으로 재창조하고 산업기반을 위한 각종 인프라 시설을 조성하는 공간창조 산업이다. 우리의 삶의 질을 향상시키기 위한 쾌적한 환경, 편리하고 안전한 도시공간을 창조하는 것이 건설 산업의 역할이라 할 수 있다. 그러나 산업혁명 이후 건설 산업 분야뿐만 아니라 다른 모든 산업 분야에서 석탄, 석유 등 화석연료 사용이 늘어나면서 250여 년 만에 대기 중 CO₂ 농도가 35% 이상 급증하고 지구 평균기온이 0.80℃ 상



[그림 1] 극한공학 및 극한환경의 특성

승하게 되었다. 결과적으로 지구해수면 상승 및 사막화 현상을 가속시켜 개발 가능한 공간을 지속적으로 축소시키는 작용을 하고 있다.

또한 전 세계 인구가 급속하게 증가하여 1850년에는 약 12억이던 인구가, 2000년에는 60억을 넘어 2025에는 83억 명으로 증가할 것으로 예측되고 있다. 이는 인구가 2배로 증가하는 시간이 약 1600년에서 약 25년으로 단축되고 있다는 점을 시사하는 것으로서 25년 후에는 지금 인간이 생활하는데 사용하고 있는 것과 같은 면적의 공간이 더 필요하다는 것이다.

그리고 원유는 39년 후, 천연가스는 59년 후, 석탄은 114년 후에 고갈될 것이라는 전망에 따라 에너지원 고갈이라는 문제도 동시에 제기되고 있다. 이에 따라 많은 산업 분야에서 저탄소 녹색 성장에 대한 기술을 개발하고 있으며, 건설 분야에서는 새로운 삶의 공간 창출을 위하여 신 공간 개척이 중요한 문제로 부각되고 있다.

가까운 시일 내에 이러한 문제점들을 해결해야만 하는 상황에 처

해 있는 우리는, 극한 건설 공학과 관련된 기술력의 보유문제에 대해서 “해야 될 것(Should do)이 아니라 해야만 하는 것(Must do)”이라는 의식으로 전환할 필요가 있다. 더 이상 극한 건설 기술의 개발이 먼 미래의 문제가 아니라 시급한 현실의 문제라는 인식전환이 필요하며 정부에서도 극한 및 우주건설에 대한 정책을 수립, 추진하고 동시에 업계의 기술력 개발을 위한 투자를 유도하는 등 극한 및 우주건설에 대해 적극적으로 대처할 필요가 있다.

2) 국내 극한건설의 기술수준

극한건설과 관련한 세부 연구 분야인 건설/환경/우주/해양/지구과학 기술 경쟁력 수준을 비교한 국가연구개발 투자우선순위 설정 연구 보고서에 따르면, 우리나라의 기술수준은 선진국 대비 평균 58.3%의 기술수준으로 약 6년의 기술격차를 보이고 있는 것으로 나타났으며, 한국과학기술평가원에서 발간한 ‘각 분야별 2000~2025년 한국의 미래기술’ 연구보고서에 따르면, 높은 세부 기술 개발 중요도(평균 77.1%)에 비해 연구개발 수준(평균

45.2%)은 턱없이 부족한 것으로 조사되었다.

전반적으로 극한공학(Extreme Engineering)과 관련한 현재 우리나라의 기술 수준은 선진국과 대비하면 매우 미흡한 실정이며, 특히 가장 높은 중요도를 보이는 것으로 조사된 우주개발 분야의 연구수준(약 20%)이 가장 미흡한 것으로 나타나고 있어 관련 연구 및 기술개발을 위한 대책이 시급히 마련돼야 할 것이다.

표 1 극한공학 세부 분야별 중요도 및 연구개발 수준

분야	과제명	중요도	연구개발 수준
우주	상업생산용 우주공장 건설	100.0	20.0%
	행성의 지하자원 탐사	100.0	20.0%
	지구 외 행성의 탐사 및 건설	88.3	23.2%
극한	극한지역에서 구조물 설계 및 시공기술	61.1	53.3%
	극한지역 건설 시 콘크리트 혼화제 개발	77.8	53.3%
	극한지역의 계획적 도시건설 기술	50.0	53.3%
극서	극서지역에서 구조물 설계 및 시공기술	61.1	53.3%
	매스콘크리트나 콘크리트 혼화제 개발	71.4	54.3%
	극서지역 계획적 도시건설 기술	50.0	53.3%
해양	해저 부유식 Pipe Line, 터널의 해석, 설계, 시공기술	76.3	54.4%
	인공섬, 해양도시의 발전소, 폐기물 처리장 건설기술	80.9	51.3%
	해양 공간 시설물 설계·구축기술	83.3	42.5%
	구조물의 열화, 손상 저감기술	91.1	55.7%
	토목구조물 손상감지시스템	91.1	55.7%
공통	대공간 구조시스템 설계기술	55.0	40.0%
	구조물의 내구성(수명) 향상 기술	90.4	47.7%
	실내 환경조절능력을 도입시킨 내장재 개발	100.0	45.0%
전체평균		77.1	45.2%

※ 2000~2005년 한국의 미래기술, 한국과학기술평가원, 과학기술정책연구원 참조

2-2. 우주건설(Space Construction)

위에서 언급한 대로 극한건설의 세부 분야 중에서 가장 중요한 분야로 우주건설 분야를 꼽을 수 있을 것이다. 또한 그 중요도에 비해 쉽게 접할 수 없는 우주건설의 특성상 현재 연구 진행상황은 많이 미흡할 수밖에 없다. 따라서 본 연구진은 우주건설 분야에 대해서 집중적으로 연구 진행을 하고 있다.

1) 우주공학에서 건설인의 역할

① 사례-1

텍사스 크기의 행성이 시속 22,000마일의 속도로 지구를 향해 돌진하고 있다. NASA는 이 행성에 800피트의 구멍을 뚫어 핵폭탄을 삽입하여 행성을 돌로 찢개 경로를 지구로부터 벗어나게 하기 위해 세계 최고의 유정 굴착 전문가인 해리 스탬퍼에게 소행성의 중앙에 구멍을 뚫고 오도록 작전을 부탁한다. 그러나 이들은 최고의 전문가임에도 불구하고 이제껏 한 번도 경험하지 못한 미지의 환경, 물질, 무중력 등을 경험하며 굴착에 어려움을 겪고 희생을 감수한다.

이는 영화 "아마겟돈"의 한 장면이다. 공상과학의 내용 같지만 실제로 지구는 이러한 소행성의 위협을 받고 있으며 인류의 발전을 위해 선진 우주개발 국가들은 미지의 환경, 특히 달을 개발하기 위해 이러한 굴착 기술 등을 연구하고 있다.

② 사례-2

머지않은 미래 "SARANG-사랑"이라는 이름의 공간에서 수영이 덩수룩한 사람이 로봇이 지켜보는 가운데 런닝머신을 달리고 있다. 그는 3년 계약으로 고용되어 달의 헬륨-3를 채취해 지구로 보내는 임무를 맡고 있으며 휴머노이드 로봇과 함께 최첨단 시설이 갖춰진 달기지에서 거주하고 있다.

이는 작년에 개봉하였던 영화 "더 문(The Moon)"의 한 장면이다. 감독의 상상력으로 창조된 공상과학 영화이나 내용 자체는 꽤 설득력이 있으며 현재 많은 국가들이 목표로 하고 있는 유인달탐사 시나리오와 흡사하다.

③ 사례-3

무한 청정에너지의 공급은 인류의 꿈이다. 무한 청정에너지의 한 대안으로 태양광 우주발전(Space Solar Power ; SSP)이 있다. 태양광 손실이 적은 우주상에 거대한 태양광 집열판을 설치하여 전기에너지를 발전하여 지구상으로 송신하는 방법이다. SSP는 현재까지 기술상의 여러 가지 제약이 있으나 환경오염이 없고 활용 가능한 에너지양이 무한대이며 사용요금이 무료이기에 화석연료의 대체제로 가장 주목을 받고 있는 방법 중 하나이다.

일본의 한 건설회사에서는 SSP 발전소를 달에 건설하여 무한 청정에너지를 사용하고자 연구를 진행하고 있다. 달의 태양을 마주보는 면의 적도에 태양집열판을 설치하고 지구를 바라보는 면에는 모아진 에너지를 극초단파와 레이저로 변환하여 지구상의 에너지 저장고로 전송하는 발전소를 건설하고 지구상에는 이를 취합하는 시설물을 건설하는 것이다. 이렇게 취득된 무공해

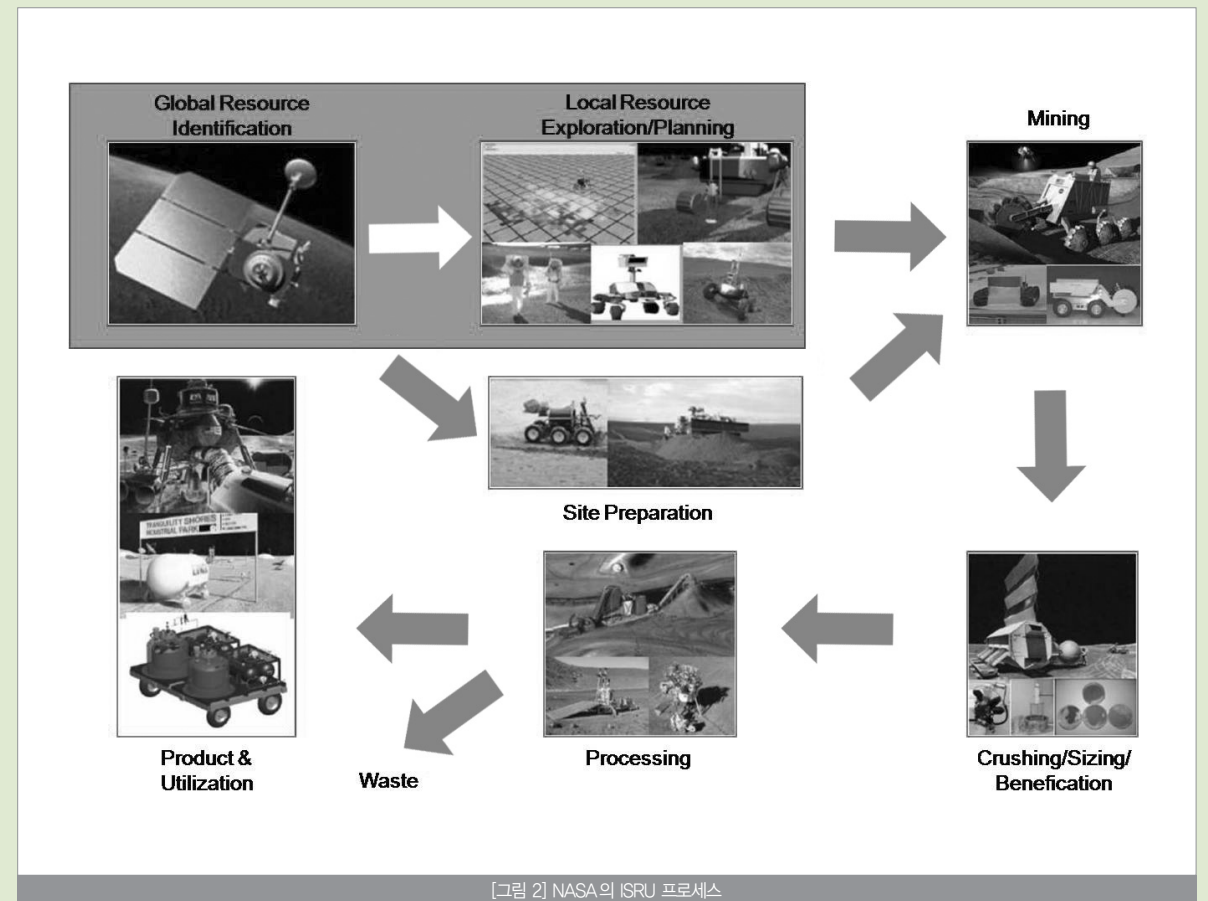
태양에너지는 지구상의 자연과 인류의 삶을 풍요롭게 할 것이다. 이 프로젝트는 일본의 한 건설회사의 미래 프로젝트 중 하나로서 제안되었다. 창의적인 아이디어와 고도의 우주 기술이 조합된다면 인류와 우주의 미래를 위해 꼭 성공해야 할 프로젝트다.

위의 사례들은 우리와 관계없을 수백 년 후에나 이루어질 공상과학의 한 장면 같지만 관심을 갖고 보다 구체적으로 들여다보면 꽤 설득력이 있으며 인류의 번영을 위해 필수적인 활동들이다.

특이한 것은 위의 사례들이 우주공학자, 기계공학자, 물리학자, 천체물리학자 등이 중심이 되어야 할 것 같지만 건설인의 역할이 매우 중요하다는 점이다. 사례-1, 2, 3의 경우 미지의 토양에서 굴착, 채굴, 시설물의 건설이 이루어져야 한다. 이 경우 지구상의 환경과 전혀 다른 곳이기에 토양 물성치 조사 및 이에 걸맞은 시공법이 개발되어야 하며 시험을 통해 표준을 개발하여야 한다. 현재까지 우주탐사란 항공우주 및 물리학자들의 역할이 컸지만 다른 행성에 인류가 발을 디디기 시작하면 이를 탐사하고 분석 및 시공할 수 있는 건설인의 역할이 클 수밖에 없다.

2) In Situ Resource Utilization(ISRU)

현재 여러 선진 국가들에서 달, 화성, 그리고 더 깊은 우주를 탐사하기 위해 여러 계획을 활발하게 추진하고 있으며 유인탐사를 위한 달기지 건설이 이러한 계획들의 최종 목표이다. 그러나 우주선으로 1kg의 자원 및 장비를 달로 보내기 위해서는 약 1억 원의 비용이 발생하기에 달의 현지자원을 활용(In Situ Resource Utilization ; ISRU)하여 달에서 사용할 에너지, 자재, 물, 산소 등을 개발하는 연구가 필수적이다. 척박한 달에서 가장 풍부하게 발견할 수 있는 자원으로는 달의 표토(Regolith)가 있으며 이는 집, 도로, 다리 등을 건설하는데 쓸 수 있고 보유 원소에 따라 다양한 자원을 추출 및 가공할 수 있기에 현재 ISRU 연구의 핵심이다. 그러나 달 표토가 유용하기만 한 것은 아니다. 아폴로호의 우주인들은 달 표토에 대해 예상치 못한 어려움을 경험했다. 미세입자로 구성되어 있는 달 표토는 어느 곳에서도 먼지를 발생하였으며 입자가 매우 작기에 장비의 엔진 및 여러 부품에 침투하여 고장의 원인이 되었다. 이렇듯 달의 표토는 유인달탐사를 위한 중요 자원이지만 지구상의 그것과는 다르기에 성공적인 달기지 건설을 위



[그림 2] NASA의 ISRU 프로세스

해서는 달 표토뿐만이 아닌 달의 극한적인 환경에서 장기간 제 기능을 발휘할 수 있는 특수한 건설장비 및 시스템이 요구된다.

3) 달 복제토

달에서의 탐사와 건설 시 발생할 수 있는 대재앙적인 상황을 피하기 위해서는 달과는 환경이 다른 지구에서 모든 장비들을 시험해야 한다. 이를 위해서는 달의 환경과 유사한 특징을 가진 모의시험 환경을 만들어 다양한 시험을 선행하여야 한다. 1/6g, 진공 등의 다양한 환경의 모사도 중요하나 ISRU 시험의 가장 핵심이 되는 달 표토의 모사가 가장 중요하다. NASA와 중국은 달 토양과 유사한 특성을 가진 달 복제토를 시험에 사용하기 위해 이에 적합한 지구상의 토양을 찾기 위해 상당한 노력을 기울였으며, 이를 바탕으로 달 토양과 물리적, 화학적으로 유사한 특성을 나타내는 달 복제토를 만들고자 노력을 기울였다.

현재 널리 인증 받은 달 복제토는 약 10개로 미국, 일본, 중국, 캐나다 4개국에서 개발되었다. 최근에 본 연구진이 개발한 KOHLS-1도 해외 연구진들로부터 주목받고 있다. 이 중 미국

NASA에서 개발된 JSC-1이 가장 널리 사용된다. 다음 <표 2>는 이들에 대한 간략한 소개이다.

표 2 현재 개발된 달 복제토

명칭	개발자	샘플 채취 지역
JSC-1	NASA Johnson Space Center	Mare
MLS-1	University of Minnesota	Mare
CAS-1	Chinese Academy of Science	Mare
MKS-1, FJS-1	Shimizu Corporation 외	Mare
KOHL-1	Hanyang University	Mare

4) 본 연구진 연구현황

현재 달 복제토 KOHLS-1을 경주-포항지역의 현무암을 채취하여 개발하였다. 물리적인 특성이 달 토양과 유사한지 검증하기 위해 복제토의 내부마찰각, 점착력, 밀도 등을 측정하였고 물성치가 달 토양과 상당히 유사하게 나타났다. KOHLS-1 보다 먼저 개발

된 달 복제토는 상당수 존재하지만 달 복제토를 개발한 5번째 국가라는 점과 한국의 토양을 이용하여 개발하였다는 점에서 해외 전문가들로부터 주목받고 있다.

달 복제토를 바탕으로 달과 유사한 토양환경을 모사하였으며 앵커 관입 깊이 및 앵커 직경에 따른 인발력을 측정하는 시험을 진행 중에 있다. 흥미로운 점은 연구 초기에 참고하였던 지구상의 앵커 거동과는 다른 모습을 보인다는 점이며 이에 대한 모델링을 하고자 한다. 이는 현재 국가과제로 수행하고 있는 난지역 탐사로버의 일환으로 로버를 통한 달탐사 시 샘플 채취를 위한 시추, 용암굴 조사를 위한 탐사 장비 설치, 크레이터 내부 탐사 등에 여러모로 적용될 수 있다. 또한 달 복제토와 바인더를 혼합 가열하여 달 콘크리트를 개발하였으며 이를 바탕으로 우주선 착륙장, 달 탐사를 위한 도로, 달기지 건설 등에 응용하는 연구를 하고 있다. 발사체 개발에 전력을 기울이고 있는 한국에서 건설인으로 달 건설을 연구한다는 것에 많은 어려움이 있었으나 2004년부터 기울여 온 노력들이 작년부턴 결실을 맺기 시작하였다. 교육과학기술부의 National Space Laboratory의 과제 등을 연구하고 있으며, 달기지 건설에 가장 앞선 연구를 하고 있는 NASA와 캐나다 ISRU 팀의 2010년 하와이 Field Test에 미래 협력자로 초대받아 국제적인 네트워크를 구축하여 한국의 건설기술자들이 참여할 수 있는 길을 마련하였다. 그리고 지난 3월 14일에 있었던 ISRU 관련하여 가장 큰 행사인 2010 ASCE Earth & Space Conference에서 한양대 장병철 박사과정 학생이 논문 "달 앵커링 시스템"을 발표하여 최우수 발표상을 Blaine D. Leonard 미국토목학회(ASCE) 회장에게 받았다. 이렇듯 달기지 건설은 우주에 대한 관심과 창의성 그리고 이를 실현하고자 하는 노력과 예산이 있다면 우리의 기술로 이루어질 수 있다.

3. 결론

그 동안 건설업의 발전을 위해 우리 건설인들이 걸어온 길을 보면 매우 보람차다. 그러나 우리가 나아갈 길의 서막이 이제 겨우 지났을 뿐이다.

몇 년 전부터 시작된 경제위기로 건설경기가 매우 어려우나 이 위기를 기회로 우리의 건설업을 널리 알리고 선진화 하여야 하며 우리만의 강점을 갖추어야 외국의 선진업체들과 경쟁이 가능하며 이를 바탕으로 해외시장 진출이 가능하다.

이에 단순히 건축/토목/플랜트의 영역에서만 건설업을 바라볼 것만이 아니라 앞에서 언급한 극한공학과 같이 다양한 공학 및 타 분야와 연관된 새로운 개념의 건설사업을 찾고 연구 개발해야 한

다. 전통적인 건설 분야보다 진일보된 초대형 부유체, 초고층 구조물 등의 공학 복합적 분야뿐 아니라 극지, 극한, 극서 지역 등 미개척 분야에서의 건설, 우주개발 및 탐사를 위한 우주건설 등 우리 건설인들이 진출할 분야는 다양하다.

가격 및 노동력으로 승부를 보던 과거의 시대는 이제 막이 내렸으며 현재의 건설 분야는 테마가 너무 한정되어 있다. 극한공학에 관심을 갖고 참여를 함으로써 향후 복합 다학제적인 건설사업 테마의 다양성 확보 및 연구개발을 활성화하여 우리의 도약을 위한 장기적인 로드맵을 준비하여 건설사업의 미래를 대비하여야 한다. S



[그림 3] 달 탐사 연구 현황