

우주개발과 인간정주환경을 위한 달기지 건설에 있어서 콘크리트의 역할

The Role of Concrete in Universe Development and Lunar Base Construction for Human Settlement Environment



김무한*
Moo-Han Kim



김규용**
Gyu-Yong Kim

1. 서 언

21세기 초에 건설이 시작되리라 기대되고 있는 달기지(月基地)는 인류가 본격적으로 우주에 진출하여 지구 밖으로부터 지구에서 필요한 여러 가지 자원의 이용을 도모한다는 측면에서 대단히 중요한 의미를 지니고 있다. 달개발의 초기단계에는 달기지의 대부분이 지구상의 재료를 사용한 가설적인 구조물로 축조될 것으로 예상되고 있으나, 달기지가 어느 정도 자립한 기능을 갖춘 단계가 되면 더욱 항구적인 인간정주환경을 위한 구조물을 건설할 필요성이 생기게 된다. 이와 같은 구조물의 건설재료에는 콘크리트 등의 시멘트계 재료가 적합하다고 생각된다. 그 첫번째 이유는 대부분의 원재료가 달에 존재하는 자원으로부터 조달될 수 있는 것이다. 지구로부터 건설자재를 수송하는데 막대한 시간과 에너지가 필요하기 때문에 가능한 달 자원을 이용할 수 있는 재료를 사용하는 것이 바람직하다. 두번째 이유로는 가혹한 달 환경으로부터 인간정주환경 구조물의 내부를 보호하기 위해서는 콘크리트가 가지고 있는 우수한 단열성과 방사선차폐성이 유효하다는 것을 들 수 있다.

달기지에서 제조 및 사용되는 달기지 건설을 위한 콘크리트(이하 달 콘크리트)에 관한 본격적인 연구는 1980년대부터 시작될 이래 달의 자원으로부터 시멘트의 추출에 관련한 반응론적 고찰이나 달에서 제조된 콘크리트를 사용한 달 콘크리트구조물의 설계 등을 중심으로 검토가 진행되고 있다. 그러나 달 환경에 있어서 콘크리트의 특성에 관해서는 달 콘크리트의 적용성을 평가하는 경우에 있어 본질적인 문제임에도 불구하고 아직도 미진한 여러 가지 문제가 있어 많은 연구자가 급후 검토해야할 연구과제로 남아 있는 실정이다.

21세기 우리 인류최대의 꿈은 우주개발이다. 우주개발의 범위

는 아주 광범위하고 다종다양하며 일반적으로 인공위성을 쏘아 올려 통신, 방송, 기상관측 등에 이용되고 있는 정도로 우리가 알고 있으나, 지금 미국에서는 21세기에 유인 화성탐사를 실시할 계획을 발표하여 제1단계로써 21세기 초에 달기지(月基地)를 건설할 것을 검토하고 있다. 이러한 가운데 지구상에서 인간정주환경을 위한 건설 구조재료의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트가 우주개발에 있어서 과연 어떠한 역할을 할 수 있을까? 본 고에서는 달에 인간정주환경을 위한 콘크리트 구조물을 축조하는 달기지 건설계획을 중심으로 달기지 건설에 있어서 콘크리트의 역할에 관하여 고찰해 보기로 한다.

2. 달 환경과 달 표면에 인간정주환경 축조 가능성

달 환경과 달 표면에 대해서라면 1969년 아폴로 착륙과 승무원이 달 표면에 첫발을 내디뎠던 장면을 떠올리는 사람이 많을 것이다. 그이래 지구에 운반되어온 월석(月石)이나 월사(月沙)의 총량이 380kg이나 되어 그 화학성분이나 물리적 특성 등이 명쾌하게 파악되었다. 콘크리트를 구조재료로써 사용할 경우 콘크리트의 제조방법이나 시공후의 품질에 영향을 미치는 달 환경요인으로써 <표

표 1. 콘크리트의 제조공정과 달 환경과의 관계

공정	환경	자원	진공	저중력	온도차	방사선	운석
재료		○					
혼합			○	○			
운반			○	○			
타설			○	○			
다짐			○	○			
양생			○		○		
탈형			○		○		
공용			○		○	○	○

* 정희원, 충남대학교 건축공학과 명예교수
kimmh@cnu.ac.kr

** 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수

1> 과 같은 것을 들수 있으나 이러한 가혹한 달 환경에서 콘크리트를 제조하여 달 콘크리트 구조물을 축조한다면 어떻게 될 것인가? 지구상에 축조하는 경우와 비교하면서 달기지 건설에 있어서 인간정주환경조건, 달 콘크리트 제조 프로세스 및 재료의 조달, 달 콘크리트 시공방법과 건설생산, 달기지 건설을 위한 달 콘크리트의 비용편익 분석 등에 관하여 검토 분석해 보기로 한다. <사진 1>은 인간정주환경을 위한 달기지 건설계획의 한 예를 나타낸 것이다.

달 표면과 지구상에서의 환경조건의 상이점으로는 중력, 진공, 온도 및 방사선 등을 들 수 있다. 우선 달 표면에 있어서 중력은 지구상의 약1/6로 뒤에 기술하는 바와 같이 콘크리트에 그다지

영향을 주지 않는다. 그러나 달 표면상에는 대기가 없는 진공상태이므로 액체는 곧바로 증발하게 되어, 물이 반드시 필요한 콘크리트의 수화작용이 불가하며, 액체가 곧바로 증발하므로 콘크리트의 제조나 양생에 아주 큰 어려움이 따를 것으로 예상된다. 반면에 수분이 전혀 없는 상태이기 때문에 급속의 녹 발생에 대해서는 전혀 걱정할 필요가 없다고 본다. 그리고 달 표면에서는 주간에는 137℃로 아주 뜨겁고, 야간에는 영하 190℃까지 내려가므로 아주 춥다. 지구상에서는 도저히 생각할 수 없는 이러한 온도 변화는 콘크리트 구조물에 있어서 균열발생의 원인이 될 것이다. 그 외에 은하우주선이나 태양으로부터 발생하는 전하입자인 태양풍 등의 방사선이 날아다니고 있으며 운석(隕石)의 비래(飛來)도 있다. 이중 온도, 방사선 및 운석의 영향은 콘크리트 구조물을 달 지하구조물로 건설하면 거의 해결할 수 있다고 본다.

3. 달에서의 콘크리트 제조 프로세스 및 재료조달

콘크리트 제조에 필요한 재료의 조달에 관하여 살펴보면 콘크리트는 시멘트, 잔골재, 굵은 골재, 혼화재료 등을 물과 혼합하여 제조함으로써 이들을 모두 지구로부터 운반하는 것은 막대한 비용이 소요하게 된다. 그래서 달에서 조달할 수 있는 것은 가능한 달 표면에서 조달하여 제조하는 것으로 하고 있다.

월석 분석결과로부터 월 암석의 성분 대부분이 산화물로 되어 있어 <표 2>에 나타낸 바와 같이 소위 시멘트의 주성분인 규소, 알루미늄, 칼슘, 철 등을 포함하고 있는 것으로 알려지고 있다. 월면 콘크리트 연구의 권위자인 미국의 T.D.Lin 박사가 발표한 연구 논문에 의하면 월 암석을 2,000K(약 1,727℃) 이상으로 가열하면 시중에 판매되고 있는 알루미늄 시멘트와 비슷한 성분을 가진 시멘트가 얻어질 수 있음이 보고 되고 있다. 시멘트의 제

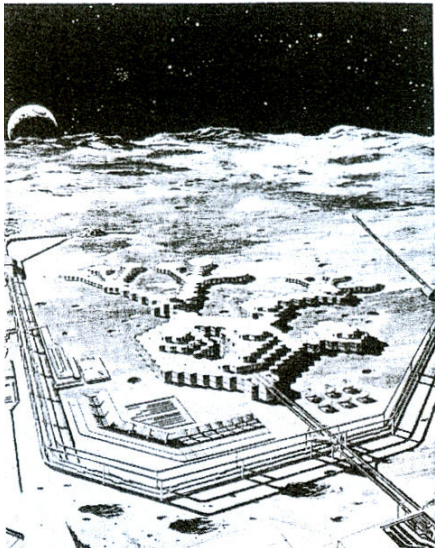


사진 1. 인간정주환경을 위한 달 기지 건설계획

표 2. 월석의 성분

성분	평원부의 토사 (10002)	고지부의 토사 (67700)	현무암 (60335)	사장암 (60015)	비정질 화산암 (60095)
SiO ₂	42.16	44.77	46.00	44.00	44.87
Al ₂ O ₃	13.60	28.48	24.90	36.00	25.48
CaO	11.94	16.87	14.30	19.00	14.52
FeO	15.34	4.17	4.70	0.35	5.75
MgO	7.76	4.92	8.10	0.30	8.11
TiO ₂	7.75	0.44	0.61	0.02	0.51
Cr ₂ O ₃	0.30	0.00	0.13	0.01	0.14
MnO	0.20	0.06	0.07	0.01	0.07
Na ₂ O	0.47	0.52	0.57	0.04	0.28

() 내는 시료 번호

조에 관해서는 이외에도 몇 개의 제안이 나오고 있다.

또한 달 표면에는 비중이 2.6 이상인 입도가 작은 모래가 덮여 있으므로 이러한 모래나 달 표면상의 월석을 가공하면 콘크리트 용 골재를 비교적 용이하게 공급할 수 있다. 시멘트와 물의 수화 반응에 의해 콘크리트가 응결-경화되므로, 문제는 물인데 월면 상에서 물의 존재가 확인되지 않고 있다. 그런데 물은 수소와 산소를 합성하여 만들 수 있다. 전술한 바와 같이 월석은 그 대부분이 산화물이므로 산소의 확보는 충분히 가능하다. 그러나 수소는 월면 모래 중에 30 ppm 정도 밖에 존재하지 않으므로 지구로부터 운반하지 않으면 안된다. 그러나 수소는 가장 가벼운 분자이므로 수소 1g으로 9g의 물을 합성할 수 있으므로 수소를 지구로부터 운반하여 물을 합성하는 것은 결코 효율성이 떨어지는 것은 아니다. 수소의 운반은 효율을 고려하여 액체 상태로 지구로부터 운반하여 그 수소를 달 표면에 풍부한 아루메나이트($FeTiO_3$)와 반응시켜 환원하면 물이 이산화티탄(TiO_2), 철(Fe)과 함께 얻어질 수 있다.

이와 같이 주요한 콘크리트용 재료는 다 얻어졌으나 아루메나이트($FeTiO_3$)로부터 물을 제조할 때 철(Fe)도 추출될 수 있으므로 이를 콘크리트 보강재료로 이용할 수 있고, 월석으로부터 유리를 제조할 수 있으나 품질이 좋은 철근이나 유리가 용이하게 생산될 수 있는 것은 아니기 때문에 월면 기지건설의 초기단계에서 이들의 보강재는 지구로부터 운반하지 않으면 안되리라고 생각된다. <그림 1>은 달에서의 콘크리트 제조 프로세스의 개요를 나타낸 것이다.

4. 달 콘크리트의 시공 및 건설생산

다음에 월면상에서 콘크리트의 시공방법과 품질과의 관계를 살펴보면 월면상에서 콘크리트를 제조할 것을 상정하여 저중력 및 고진공 환경에서 콘크리트를 제조할 경우의 콘크리트 품질에 관

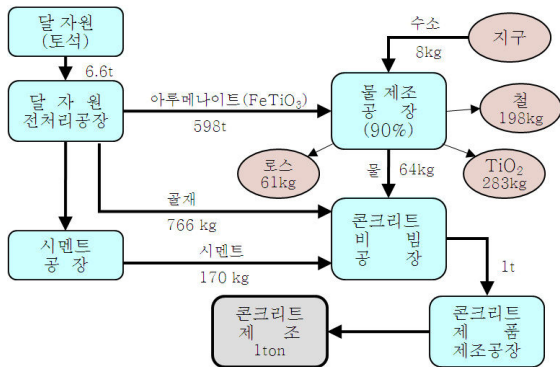


그림 1. 달 콘크리트의 제조프로세스

한 연구가 진행되고 있다. 당연한 일이지만 지구상에서 저중력 환경을 장시간에 걸쳐 유지하는 것이 곤란하기 때문에 1g로부터 1,000g까지 중력 가속도를 준 상태로 모르타르를 경화시켜 가속도와 강도와의 관계를 조사하여 그 결과를 가지고 저중력 환경 하에서의 강도를 예측할 수 있다. 이 연구에 의하면 1/6g에 있어서 모르타르의 강도는 지구상의 약 90%가 된다는 결론을 도출하였다. 즉 저중력 환경이 시멘트계 강도에 미치는 영향은 그다지 크지 않다고 생각해도 좋다. 진공상태가 콘크리트의 물성에 미치는 영향을 검토 분석 할 목적으로 모르타르를 사용하여 수행한 실험 결과인 <그림 2>에 의하면, 비빈 콘크리트를 진공상태에서 폭로하면 급격하게 내부로부터 물이 증발되어 불완전한 수화 반응에 의해 콘크리트의 조직이 다공질화 되고 강도는 극단으로 저하하게 된다. 이것은 콘크리트를 비빈 후, 수 시간 경과한 후에 진공 환경 중에 폭로한 경우에도 마찬가지다. 또한 비빈 다음 7일까지 수중양생한 후 진공환경중에 폭로한 경우에는 폭로개시 후의 급격한 강도저하는 일어나지 않지만 강도가 거의 증가하지 않는다. 진공 폭로로 인해 수분이 증발하여 수화반응이 정지했기 때문이다. 즉 소정의 강도가 확보될 때까지 충분히 수중양생을 할 필요가 있다.

또한 비빈 다음 28일간 수중 양생한 콘크리트를 진공중에 폭로한 경우에는 수중양생을 계속한 경우보다 20% 정도의 강도증가를 보이고 있다. 이것은 물질의 강도는 그 함수율에 따라 변화하여 일반적으로 함수율이 작을 때 크게 되는 현상을 건조효과라고 부르고 있는데 이 성질을 이용하여 달에서도 충분한 수중양생을 행하면 비교적 높은 압축강도를 얻을 수가 있음을 시사하고 있다.

5. 달기지 건설을 위한 달 콘크리트의 경제성 분석

지금까지 월면에 콘크리트구조물을 건설하기 위한 기술적인 측면만을 검토하였으나, 경제성의 검토도 어느 정도 진행되고 있는

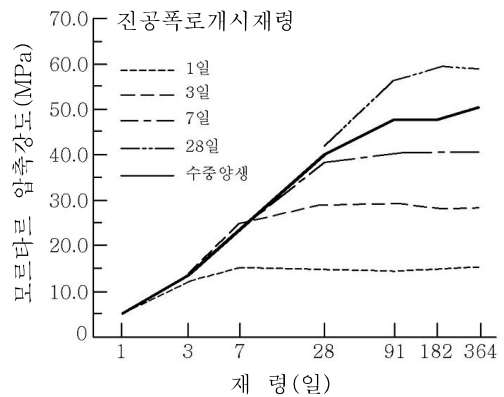


그림 2. 진공폭로 개시재령에 따른 모르타르 압축강도의 경시변화

실정이다. 물론 많은 가정을 포함하고 있는 것은 당연하지만 분석결과에 한 예에 의하면 콘크리트 질량 1톤당의 제조비용은 콘크리트가 2만 9천 달러, 철근이 7만 9천 달러이다. 여기에는 ① 콘크리트용 재료 및 부재를 지구로부터 운반하는 비용, ② 공장 부재를 조립하는 비용, ③ 물의 제조에 필요한 수소를 지구로부터 운반하는 비용, ④ 콘크리트용 재료의 제조, 콘크리트의 비빔, 타설, 양생 등이 포함되어 있다. 지구로부터 달까지의 질량 1톤당의 운반비용이 330만 달러인 것을 고려하면 달 현장에서 콘크리트의 제조비용은 아주 엄청난 셈이다. 상술한 바와 같이 지구로부터 달까지의 여러 가지 재료의 운반을 포함한 제비용이 너무 많기 때문에 원소나 재료에 따라서는 화성으로부터 운반하는 것이 경제적인 가능성이 있어 여러 가지 면에서 검토되고 있다.

6. 결 언

전술한 바와 같이 21세기에 살고 있는 우리 인류 최대의 꿈은 우주개발이다. 달에 인간정주환경을 위한 달 콘크리트구조물의 축조 가능성을 지구상에 축조하는 경우와 비교 검토하면서 인간정주환경조건, 달 콘크리트 제조공정 및 재료의 조달, 콘크리트

시공방법과 건설생산, 달기지 건설을 위한 달 콘크리트의 비용편익 분석 등에 관하여 검토, 분석하여 보았다. 여하튼 달기지 건설 계획에 있어서 인간정주환경을 위한 달 콘크리트구조물의 건설은 꿈같은 이야기가 아니고 지금 미국에서 현재 진행되고 있으며, 연구계획에 의하면 2010년대에 이러한 인류 최대의 꿈이 실현될 가능성이 클 것으로 보고되고 있다. □

참고문헌

1. T. D. Lin et al., "Concrete for Lunar Base Investigation", *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, Vol.2, No.1, 1989.
2. S. Matsumoto et al., *Concrete Structure Construction on the Moon, Lunar Bases and Space Activities in the 21st Century*, Houston, 1988.

담당 편집위원 :

권기주(한국전력공사 전력연구원) kyeunkjoo@kepco.co.kr

◇◇◇ 원고 모집 안내 ◇◇◇

「콘크리트학회지」는 콘크리트 관련 학문과 기술에 대한 정보를 제공하기 위해 발행되고 있습니다. 본 학회지를 통해서 연구 결과, 경험한 사례 등을 콘크리트 관련 기술자들과 함께 나누길 원하시는 분은 다음과 같은 형태로 참여하실 수 있습니다. 여러분의 옥고를 기다리겠습니다.

- 원고 주제 : 포토에세이(사진, 서예, 시 등), 특집기사, 기술기사, 공사기사, 원로와의 대화, 해외번역기사, 해외연구소 소개, 국제학술대회 참가기, 현장탐방, 논문, 우리회사소개 등
- 원고 분량 : 글씨크기 11pt, 줄간격 160%, A4용지 4매 ~ 6매 내외
- 보내실 곳 : kke@kci.or.kr