

Lunar 콘크리트에 관한 研究現況

金 學 哲 (譯)

〈德山시멘트製造(株)企劃部 次長〉

1. 서 론

1969년에 인류가 달표면에 도착한 이래 70년대 전반에 걸쳐 달에서 가져온 돌과 모래는 약 380kg 이었다.

이것을 분석한 결과 달의 돌 성분은 대부분이 산 화물로 되어 있으며 규석, 알루미늄, 칼슘, 철 및 마그네슘 등을 비교적 많이 함유하고 있음이 밝혀졌다.

이들은 콘크리트의 주요 구성요소로서, 이것이 제기가 되어 80년대 초부터 달콘크리트에 관한 다양한 연구가 시작되었다.

당초 우주개발분야에서는 달콘크리트는 단순히 아이디어에 불과한 것으로 받아들여졌지만 그후 계속적인 연구활동에 의해 점차 그 연구분야로서의 존재를 인식하게 되었다.

그러한 시기인 1988년 3월, 레이건 대통령은 미국항공우주국(NASA: National Aeronautics and Space Administration)이 제안한 달표면 기지계획을 국가우주정책으로서 본격적으로 추진할 것을 확고히 하였다.

이것을 받아들여 ACI(American Concrete Institute)에서는 휴스턴에서 가진 추계대회에서 ACI 제125기술위원회 "Lunar Concrete"를 설립 하였다. 이 위원회는 다음의 목적하에 운영되고 있다.

① 우주에서 콘크리트 시공에 적합한 새로운 기술

에 대한 가이드 라인의 구축.

② 정보수집을 포함한 기술개발분야, 전문분야의 조사.

③ Lunar Concrete에 대한 흥미의 촉진 및 대학 교육의 추진.

④ 유인달표면기지의 건설기술에 관한 연구의 지원.

ACI 125위원회는 ASCE(American Society of Civil Engineers)와의 공동주최로 제1회 Lunar Concrete 기술 심포지엄을 1991년 3월 ACI 연차 대회에서 개최하였다.

본 보고에는 당시 발표된 논문의 개요 몇 가지를 소개한다.

2. 논문의 소개

1) 개 요

대회에서는 전부 20편의 논문이 발표되었다. 그 내용은 <表-1>과 같다.

달에서 시멘트, 혹은 콘크리트의 제조에 관한 것이 역시 많았으며 모두 9편이 발표되었다. 다음으로 달구조물의 시공과 설계, 혹은 콘크리트의 물성 등에 미치는 달 환경에 관한 논문이 4편이었다.

제1회 심포지엄인 점도 있어 콘크리트공학이라기 보다는 이른바 우주공학적인 내용의 논문도 몇 편 보였다.

이들 논문으로는 가령 상대론에 관한 것, 앞으로

우주개발의 동향에 관한 것, 아울러 금후의 연구에 필요한 우주관련의 교육과 시설에 관한 것 등을 들 수 있다.

여기에서는 <表-1>의 「제조방법」과 「달 환경의 영향」 등으로 분류된 콘크리트와 관련이 깊은 내용의 논문을 발췌하여 소개한다.

2) 시멘트의 제조에 관한 논문

앞서 언급한 바와 같이 달자원에는 시멘트의 제조에 필요한 원재료가 포함되어 있다.

따라서 어떻게 하면 효율적으로 달자원으로부터 시멘트, 혹은 시멘트적인 성질을 갖는 재료를 추출할 수 있는가가 검토의 초점이 되고 있다.

시멘트나 골재를 제조하기 위해서는 우선 최초로 그 원료가 되는 암석을 채굴할 필요가 있다. 이를 위한 굴삭장치로서 Matsumoto 등은 독특한 암석파쇄시스템을 제안하였다. 이 시스템은 달표면에서 용이하게 얻을 수 있는 태양에너지를 이용한 것으로 급격하게 암석의 표면을 뜨겁게 하여 내부에 온도응력을 발생시키고 이로부터 암석을 파쇄한다고 하는 것이다.

시스템의 개요를 <그림-1>에 나타냈다.

달의 암석과 같은 화학성분을 갖는 현무암(Basalt)의 물성치를 이용하여 열유동(전도)을 해석하고 암석의 파쇄에 필요한 에너지량, 가열의 방법과 아울러 각 기기의 용량 등을 추정하였다.

그 결과 본 시스템을 에너지 효율이 좋은 암석파쇄장치로서 이용할 수 있다는 점, 파쇄시의 암석표면온도는 가열속도에 따라 달라지는 점과 함께 이 시스템을 응용함으로써 달표면의 정지와 기존구조물의 해체 등도 가능하다는 점 등을 확인하였다.

발표논문의 내용

<表-1>

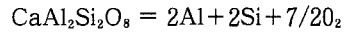
논 문 내 용	편 수	
물 리 학	1	
우 주 개 발 계 획	3	
제 조 방 법	시 멘 트	4
	콘 크 리 트	5
달 환경의 영향	시 공 및 물 성	2
	달 구조물설계	2
연 구 시 설 의 소 개	3	

Burt는 달콘크리트의 제조에 중요한 기술과제의 한 가지인 달자원으로부터의 석회(CaO)의 제조에 대해 화학적·열화학적 검토를 하였다.

그 결과 달의 고지대에 많이 분포하는 회장석(Anorthite : $CaAl_2Si_2O_8$) 으로부터 간단히 석회를 추출할 수 있음을 보여주었다. 그 공정은 우선 용융상태의 불화나트륨(NaF : 지구로부터 운반)을 전기분해하여 불소가스를 제조한다.

이어 회장석을 불소로 환원하여 산소를 추출한다. 잔류된 불소화합물을 다시 나트륨으로 환원하고 마지막으로 석회, 규소, 알루미늄 등을 추출한다.

반응에 사용하는 NaF는 공정에서 재이용한다. 이상의 반응을 간단하게 정리하면 회장석은 다음식과 같이 분해된다.



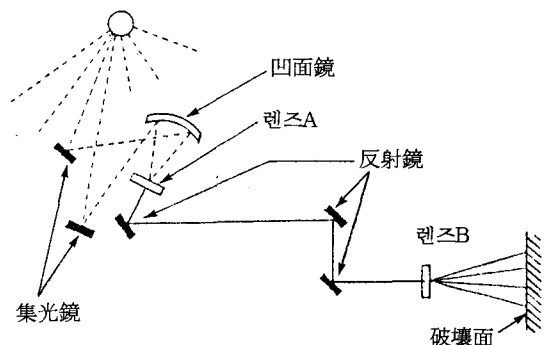
반응공정을 상세하게 다루면 회장석의 불화반응이 6개의 공정, 잔류물의 나트륨환원반응이 7개의 공정으로 되어 있다.

따라서 본 방법에서는 비교적 복잡한 공정시설을 필요로 한다는 것을 예상할 수 있다. 또한 이들 공정에는 아직 확인되지 않은 반응도 있어 향후 계속 검토할 필요가 있다.

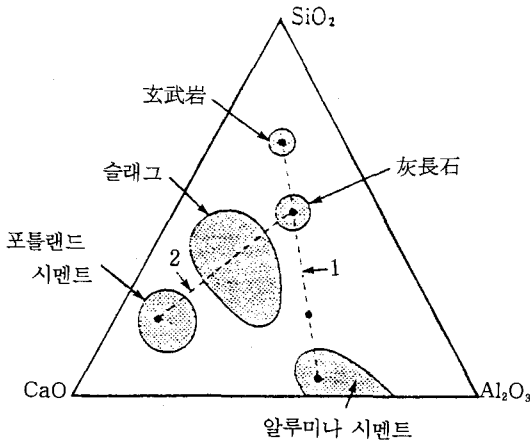
Mishulovich 등은 아폴로계획 당시에 얻은 달자원의 원소분석데이터로부터 달자원이 시멘트의 원료로 이용될 수 있음을 제안하였다.

<그림-2>는 각종재료에 함유된 $CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 의 구성비율을 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 현무암과 회장석은 CaO



<그림-1> 달표면의 굴삭시스템



〈그림-2〉 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 성분도

과 Al₂O₃의 함유율이 증가함에 따라서 포틀랜드 시멘트에 가까운 재료는 회장석을 Burt가 제안한 방법으로 추출한 석회와 함께 소성하여 생성한 크링카를 분쇄하여 만들어진다.

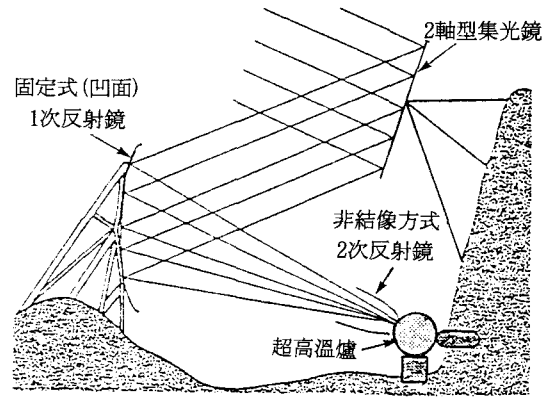
한편 알루미나 시멘트에 가까운 재료는 현무암과 회장석을 용융, 분류하여 그 잔류물을 급냉시켜 만든 광물 글라스를 분쇄하는 방법이다.

Mishulovich 등은 이러한 방법을 검증하기 위하여 지상의 현무암 및 회장석을 사용하여 시멘트를 제조하였다.

그 결과 회장석과 석회로부터 만든 소성 시멘트의 수화물은 재령 28일에서 300kg/cm² 이상의 압축강도를 나타낸다는 것을 밝혔다. 또한 현무암으로 만든 광물 글라스 분말은 고온다습의 알칼리환경에서 높은 수경성을 나타냈다. 이들의 실험결과는 달자원에서부터 시멘트제조에 실현성이 높다는 것을 보여주는 것이다.

O'Gallagher 등은 고온을 필요로 하는 재료의 가공에는 어떤 소성로 혹은 전기로 보다도 태양로를 이용하는 방법이 우수하다고 보고하였다. 특히 앞서 Mishulovich 등이 제안한 방법으로 시멘트를 제조하는데는 1,700 ~ 2,000°C의 고온을 필요로 하기 때문에 높은 레벨의 태양에너지밀도가 필요하다.

이러한 고밀도의 에너지는 비결상 방식의 반사경에 의해 얻을 수 있다. O'Gallagher씨의 생각으로는 초점거리가 긴 1차 반사경과 非結像 방식인 2차 반사경을 조합한 시스템이 가장 효율성이 좋고 종전



〈그림-3〉 달 콘크리트제조용 태양로

방식인 태양로에 비하여 3~5배의 에너지변환효율을 얻을 수 있다.

시스템의 개략도를 〈그림-3〉에 나타냈다.

본 시스템을 이용하면 가령 60m² 정도의 수광면적(직경 9m의 원형영역에 상당)이면 연간 100톤 이상의 시멘트를 제조할 수 있을 것으로 추정된다.

향후의 과제로서는 이러한 태양로 시스템에 사용하는 재료, 시멘트의 제조방법 아울러 원재료의 투입과 시멘트의 반출방법 등의 검토를 들 수 있다.

3) 콘크리트의 제조에 관한 논문

현재의 가장 일반적인 달콘크리트의 제조방법은 어느 정도 기압이 존재하는 환경에서 콘크리트의 혼련, 성형, 양생을 하는 방법이다. 지극히 당연한 방법이지만 달의 진공환경하에서는 혼련수는 급속히 확산되고 그것이 콘크리트의 물성에 막대한 영향을 미치기 때문이다. 따라서 콘크리트를 제조하기 위한 환경을 조성하는 방법이 검토의 초점이 되고 있다.

Swint 등은 미국 아카데미 공학교실의 협력하에 달구조물용 콘크리트의 종류(포틀랜드 시멘트, 알루미나 시멘트), 혼련환경(1기압, 약 1/4기압), 혼화제(유동화제, 감수제) 및 보강재(없음, 강선, 알루미늄선, 글라스화이버, 달에서와 유사한 흙) 등의 요인이 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

모든 요인을 조합하면 총 80가지의 경우가 고려되었지만 여기에서는 실험계획법을 적용하여 18가지의 경우에 대하여 원주 및 각주공시체를 제작하였

고 이들의 압축강도, 곡강도, 영률계수와 포아송비를 측정하였다.

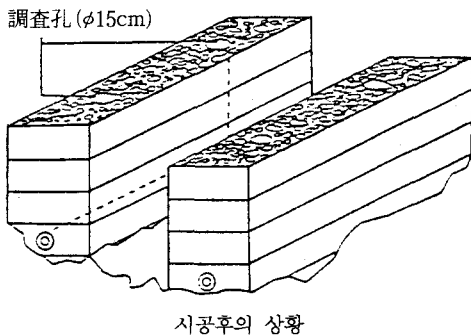
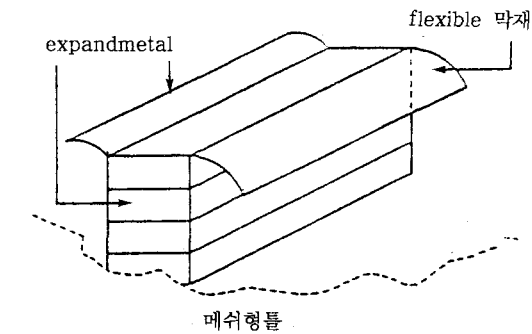
실험결과를 토대로 압축강도에 관한 예측식을 작성하여 콘크리트의 최적배합비(조합)를 선정하였다.

그 결과 알루미늄 시멘트, 저압혼련, 혼화제 사용(2종류, 혹은 어느 1종류) 및 보강재가 없는 조합이 최적임이 판단되었다. 또한 이 최적배합에 대하여 확인실험을 한 결과 압축강도의 실측치는 예측치(420kg/cm²)보다도 50kg/cm² 정도 큰 값을 나타냈다.

이 차이의 원인은 예측식에서 교호작용의 취급에 문제가 있었기 때문이라고 추측되며 향후 다시 검토할 필요가 있음이 밝혀졌다.

Kaden은 달에서 콘크리트의 현장시공에 적용 가능하다고 생각되는 여러 가지의 콘크리트의 성형·타설방법을 제안하였다. 각 방법의 개요는 다음과 같다.

① 메쉬형틀 : 달에서 사용하는 콘크리트의 형틀에는 경량이며 반복하여 이용할 수 있는 메쉬형틀이 유효하다고 생각된다.



<그림-4> 메쉬형틀을 사용한 콘크리트의 시공

<그림-4>는 메쉬형틀의 내측에 팽창성의 막재를 배치하고 그 내부에 콘크리트를 타설하여 시공한 휘칭 구조물을 나타낸 것이다. 휘칭은 구멍을 뚫어 암반에 앵커된다.

② 공기막형틀 : 고무튜브라고 불리는 달표면하의 용암동굴 내부에 공기막형틀을 배치하여 암석과의 틈, 혹은 콘크리트를 타설하여 세그먼트를 시공한다.

<그림-5>에 시공의 개념을 나타냈다. 이러한 구조물은 물자의 저장 등에 사용된다.

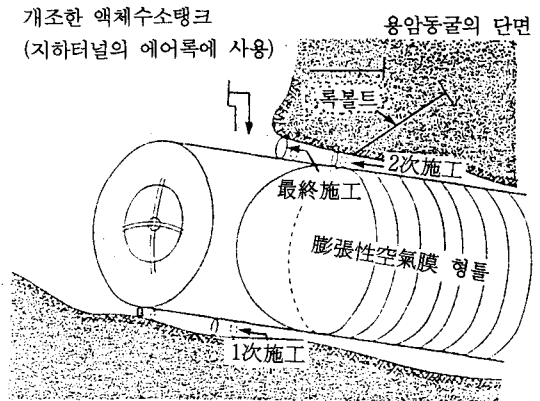
③ 프리캐스트 콘크리트 : 시공의 용이성과 함께 건조 수축량이 비교적 적어 프리캐스트 콘크리트는 통상의 콘크리트에 비해 달에서의 이용에 적합하다고 생각된다. 이외에 Kaden은 화이버 글라스제의 foam 타이어 프리캐스트 콘크리트 등도 적용가능하다고 한다.

Bunea는 GFRP(디메칠이소프타레이트·글라스 단섬유 로드)의 달콘크리트에 대한 적용성과 그 제조방법에 관한 제안을 하였다.

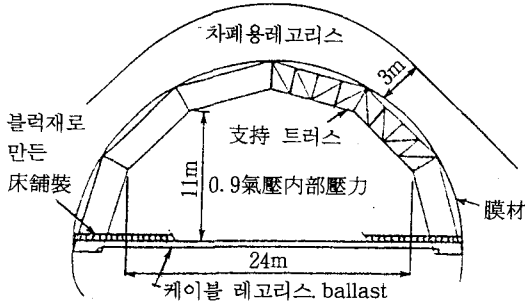
이것은 달콘크리트의 보강재에 대해 기술한 다소의 논문중 한 가지다. GFRP는 달에 대량으로 존재하는 규소로부터 제조할 수 있을 뿐더러 그 강도가 철근과 거의 같고 더욱이 경량이라는 특징을 갖고 있다.

그런 이유로 Bunea는 프리캐스트 콘크리트 부재로 GFRP를 사용할 것을 제안하였고 GFRP의 효과에 대한 이론적, 실험적인 검토를 하였다.

실험에서는 GFRP 로드, 혹은 GFRP 로드와 글라스 화이버에 의해 보강된 I형, T형 및 직사각



<그림-5> 공기막형틀에 의한 용암동굴의 콘크리트



〈그림-6〉 가압조립시설의 개요

형의 보를 사용하여 이들의 역학적 특성을 조사하였다.

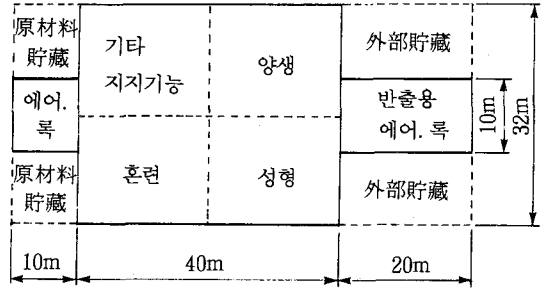
하중으로서 그 상부에 스페이스 셔틀급의 우주기가 이·착륙할 것을 가상하여 스케일을 1/10로 하여 실험하였다. 실험의 결과를 기초로 GFRP 보강 콘크리트부재의 달구조물에 대한 적용성을 나타냈다.

Drake는 〈그림-6〉에 나타난 바와 같은 대형의 가압조립시설을 제안하였다. 이것은 본래 달개발의 초기에 필요한 시설로서 고안된 것이지만, 본 논문에서는 이 시설이 다시 다음의 단계 즉 달자원을 이용하는 단계에서도 유용하다는 점을 강조하고 있다.

이 시설을 달콘크리트의 제조공장으로 이용함으로써 내부의 작업원은 우주복을 입을 필요가 없고 또한 콘크리트부재의 제조와 양생을 비교적 용이하게 할 수 있다는 것이 주된 특징이다.

〈그림-7〉에 시설의 시공 예를 나타냈다. 외부에 저장된 시멘트 등의 원재료는 시설내부로 운반되며 지상과 같은 환경으로 계량, 혼련, 성형 및 양생을 할 수 있다. 충분한 강도가 나온 프리캐스트 콘크리트 부재는 그 후 에어록을 통해 외부로 운반된다.

Hwang 등은 프리캐스트 콘크리트부재의 특수한 제조방법을 제안하였다. 이것은 플라이 애쉬를 혼입하여 공극률을 최소로 하도록 조정된 경련 콘크리트를 사용하는 것이다. 수 백톤급의 힘과 진동으로 콘크리트를 3분간 다져 굳히고 그것을 1~2일간 양생함으로써 균질한 고품질의 콘크리트를 얻을 수 있다는 방법이다. 이 제조방법은 자동화가 가능하므로 장래 달기지 건설에 유효한 수단이 될 것으로 생



〈그림-7〉 콘크리트부재의 조립시공 예

각된다.

4) 시공 및 물성에 관한 논문

프리캐스트 콘크리트 부재를 가압전용공장에서 제조하여 사용하는 방법이 가장 실현성이 높은 달콘크리트의 이용방법이라고 생각된다.

Kanamori 등은 이 부재의 특성에 미치는 진공환경의 영향을 조사하기 위해 모르타르를 사용한 실험적인 검토를 하였다.

실험에서는 공기중에서 제작한 공시체를 장기간 물속에서 양생한 후 그것을 진공환경에 노출시켰을 때의 물성변화를 조사하였다.

그 결과 진공환경에서 시멘트계 재료를 사용하기 위해서는 건조수축으로 발생하는 균열에 대하여 어떤 대책을 강구할 필요가 있음을 밝혔다.

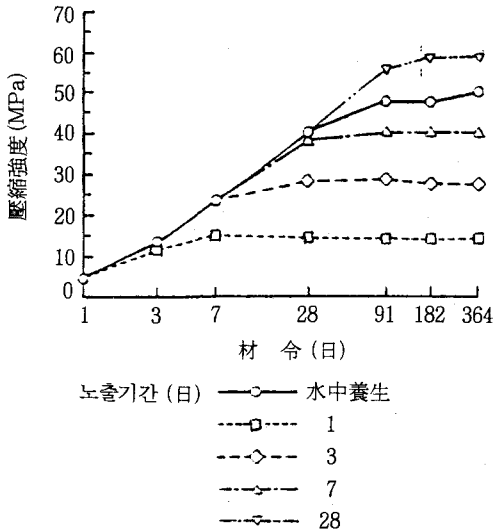
한편 진공에 노출된 공시체에는 〈그림-8〉에 나타난 바와 같이 물속에서 양생한 공시체보다 높은 강도를 나타낸 것도 있었기 때문에 반드시 진공 환경이 시멘트계 재료의 강도에 나쁜 영향을 미친다고 할 수는 없다는 것도 밝혔다.

본 논문에서는 달에서 콘크리트의 적용방법에 대한 제안을 하고 있다.

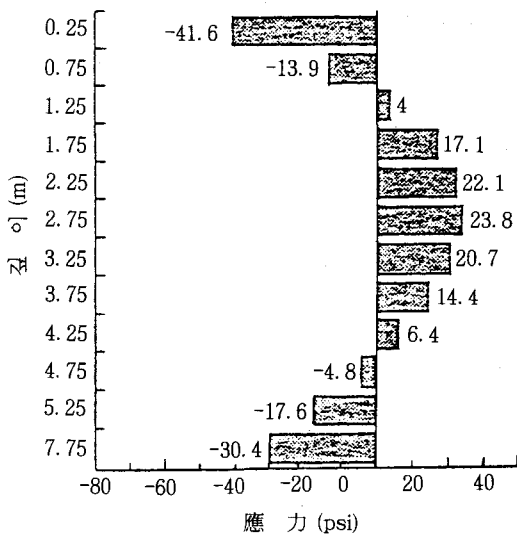
CTL (Construction Technology Laboratories) 의 Lin 등은 NASA로부터의 위탁연구로 수행한 실험에서 ① 시멘트가 달의 회상석과 현무암으로부터 제조할 수 있다는 점 ② 달의 모래를 골재로 사용하여 700kg/cm² 이상의 강도를 갖는 모르타르를 제조할 수 있다는 점 ③ 골재와 시멘트의 혼합물에 증기를 주입함으로써 콘크리트 시공이 간편해지며 필요한 물과 기계의 수량을 최소화할 수 있다는 점 등을 밝히고 있다.

더구나 직경 약 36m, 높이 약 22m의 프리캐스트 콘크리트 구조물에 관한 해석으로부터 그 내부를 1기압으로 가압하더라도 문제가 없다는 것을 확인하였다. 이 연구 프로젝트에서는 시공중에 발생하는 콘크리트판넬 내부의 온도응력에 대해 검토하였다.

두께 약 15cm, 초기온도 -40°C인 콘크리트 판넬의 상면온도를 변화시켜 차분법에 의한 두께방향의



〈그림-8〉 모르타르 공시체의 강도변화



〈그림-9〉 태양으로 조사된 콘크리트판넬 내부의 온도응력 분포 (30시간 경과시)

1차원 온도해석을 하였다.

〈그림-9〉는 태양의 조사개시후 30시간 경과한 시점에서 판넬내부의 온도응력 분포를 나타낸 것이다.

해석의 결과 판넬에 발생하는 인장응력의 최대치는 2kg/cm² 정도가 되어 시공중의 콘크리트 판넬에 온도균열이 발생할 확률은 낮다고 결론지을 수 있다.

5) 달구조물 설계에 관한 논문

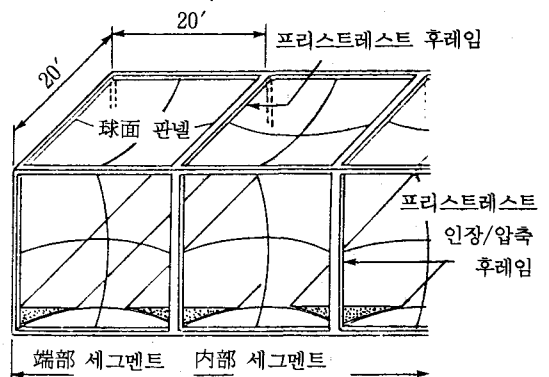
달의 구조물에는 그 내부에 압력이 작용하여 자중의 영향이 적다는 특징이 있다. 또한 달자원을 대부분 사용한다는 것, 달에서 콘크리트는 귀중한 재료라는 특징이 있다.

이러한 사고에서 Chow 등은 〈그림-10〉과 같은 박막의 shell 구조물을 제안하였다. 이것은凸형의 프리스트레스트 콘크리트 판넬(약 6m×6m)을 조합한 구조물로 내부의 압력은 판넬의 압축응력으로 후레임에 전달된다.

후레임도 프리스트레스트 콘크리트로 되어 있고 그 내부에 배치된 인장재가 최종적으로 내부의 압력을 유지하도록 되어 있다. 각 판넬의凸형에는 구형 혹은 원통형상이 적당하다고 생각된다.

제안한 구조물에 관해서는 다시 상세한 검토가 필요하지만 이 논문에서는 달의 구조물을 설계하기 위한 새로운 개념을 제시하였다.

한편 Swanson은 다양한 종류의 달표면 관측시설에 대하여 검토하고 그것들의 건설에 필요한 몇 가지의 검토과제를 명시하였다. 달에서 천문관측



〈그림-10〉 프리스트레스트 콘크리트 구조물

은 달의 특수 환경, 가령 1/6g, 오랜 관측시간, 야간의 낮은 온도환경 등으로 지구에서의 관측에 비해 상당히 높은 정밀도를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

이러한 시설은 레고리스라고 불리우는 모래층 위나 높은 산 위 등 지상의 경우에 비하여 입지조건이 나쁜 곳에 배치되지만 관측에는 높은 정도가 요구되며 이러한 시설의 기초에는 콘크리트를 이용하는 것이 적당하나 실제 건설을 시작하기 전에 현지에서 충분한 조사와 실험을 할 필요가 있다는 점을 제안하고 있다.

3. 결 론

이상 제1회 Lunar Concrete 기술심포지엄에서 발표된 논문중 특히 콘크리트에 관련된 13편을 소개하였다.

이 분야의 연구는 역사가 짧고 우주에 관한 지식과의 경계영역에 있으므로 이 논문의 집필자에게는 소위 “콘크리트”를 전문으로 하는 독자에게는 논점이 불명확한 논문도 많았던 점은 없었나 하는 생각이 든다.

현실문제로서 달에서 콘크리트를 제조하여 사용하는 것에 의문을 갖는 사람도 적지 않다. 그 주된 이유는 콘크리트가 달에 존재하지 않는 물을 필요로 한다는데 있다.

필자의 실험 계산으로는 콘크리트 1톤을 제조하기 위하여 지구로부터 운반해오지 않으면 안되는 것은 약 8kg의 수소이다. 이것은 콘크리트 질량의 1% 이하로 나머지의 99% 이상은 달자원을 이용하는 것이 된다.

물론 이 수소로부터 물을 제조하는 공장과 달자원으로부터 시멘트를 제조하는 공장 혹은 콘크리트의 혼련, 성형, 양생 등을 하는 시설도 필요하다.

이처럼 향후 달콘크리트의 가능성을 논하기 위해서는 본 보고에 기재한 기술적 측면뿐만 아니라 재료와 시설에 관련된 경제성 검토도 중요할 것이다.

달콘크리트를 대상으로 한 연구는 다소 우려되지만 일본에서는 거의 이루어지고 있지 않다. 금회 발표된 20편의 논문중 대부분은 미국의 연구자에 의하여 쓰여진 것으로 일본에서 제출된 논문은 2편에 그쳤다.

미국의 우주개발에 과거의 실적 및 이에 배가된 자원이 우주에 대한 미국, 일본간 의식의 차이를 부가시키고 있다는 느낌이 든다. 그렇지만 달콘크리트는 현재로서는 목전의 이익에 사로잡히지 않는 자유스런 발상에 의한 연구를 할 수 있는 분야의 하나라는 점도 명확하다. 향후 활발한 활동을 기대한다.

〈參考文獻〉

- 1) Matsumoto, S., Yoshida, T. and Takagi, K. : Cementitious Material Extraction from Lunar Resources
- 2) Burt, D.M. : Lime Production from Lunar Anorthite
- 3) Mishulovich, A. et al. : Lunar Cement Formulation
- 4) O'Gallagher, J.J. and Lin, T.D. : A Novel Solar Concentrator for Very High Temperature Processing of Lunar Cement
- 5) Swint, D.O. and Schmidt, S.R. : Optimizing Lunar Concrete
- 6) Kaden, R.A. : Methodology for Forming and Placing Lunar Concretes
- 7) Bunea, S.P. : Concrete Reinforced with GFRP in Lieu of Conventional Steel
- 8) Drake, R.M. : Production of Lunar Concrete in a large Pressurized Assembly Facility
- 9) Hwang, C.L. et al. : Precast Segments Made with Compacted Dry Mix for Lunar Construction
- 10) Kanamori, H., Matsumoto, S. and Ishikawa, N. : Long-Term Properties of Mortar Exposed to a Vacuum
- 11) Lin, T.D. et al. : Stresses in Concrete Panels Exposed to the Sun on the Moon
- 12) Chow, P. and Lin, T.Y. : Lunar Concrete Construction Requires New Value System and Concepts
- 13) Swanson, P.N. et al. : Astronomical Observatories on the Lunar Surface; A New Challenge for Civil Engineers

〈資料 : 콘이워)트工學 No. 4, 1993〉