

# 宇宙建設技術

On the Construction Technology in the Space

金 巨 煥\*  
Kim, Kun Whan

## 1. 序 言

지구는 점점 좁아지고 있다. 한정된 지구에서의 생활영역을 넓히기 위하여 지하공간개발, 초고층건설, 장대교건설, 해양개발, 극지개발 등에 세계열강들이 힘을 기울이고 있다. 그러나 이러한 노력도 멀지않아 그 한계에 부딪치게 되고 개발의 눈을 광대한 우주로 돌릴 수 밖에 없는 것은 자명한 사실이다. 1957년 10월 소련의 인류최초 인공위성의 발사로 시작된 우주개발은 1965년 7월21일 미국의 아폴로 11호가 인류최초로 달에 착륙하므로써 더욱 박차를 가하게 되었다. 현재까지 우주의 이용은 인공위성을 이용한 기상예보, 통신, 광물탐사, 위성촬영 등에 국한되어 왔으나 앞으로는 달 또는 화성의 자원 개발이나 우주의 특수한 환경을 이용한 각종 실험, 태양발전 및 송전, 신소재 및 약품생산 등에 활용할 계획이다.

이러한 우주에서의 인간활동은 인간이 상주하며 활동할 수 있는 집-구조물의 건설이 선행되어야 한다. 우주구조물은 그 재료의 선택에서 설계, 시공에 이르기까지 지구와는 다른 우주의 특수한 환경에 알맞게 계획되어야 한다. 우주구조물은 우주공간에 건설되는 우주스테이션(space station)과 달 또는 화성에 건설되는 화성구조물로 분류할 수 있으며 이들의 환경(설계 및 시공조건)은 서로 다르다. 본고에서는 현재 추진 중인 선진국의 우주개발계획을 간략히 살펴보고 우주스테이션과 달 기지 건설계획을 구조재료,

구조설계 및 시공방법을 중심으로 소개하고자 한다.

## 2. 우주개발계획

1983년 미국의 레이건 대통령은 연두연설에서 새로운 우주정책을 발표하였다. 이 정책에는 십수년 이내에 항구적인 우주기술능력을 확보하기 위하여 우주스테이션 건설을 국제협력으로 추진하는 계획이 들어 있었으며 이 계획에 유럽, 일본 및 캐나다의 참가를 요청하였다. 이 우주스테이션 그림 1을 '프리덤'(freedom)이라 명명하고 참가 각국의 역할을 표 1과 같이 분담하기로 결정하였다.

표 1 또는 그림 1에서 보는 바와 같이 스테이션 '프리덤'은 본체와 3개의 실험모듈 및 승무원이 거주할 수 있는 모듈로 구성된 거대한 우주실험시설이다. 총 소요예산은 약 20조원으로 각국의 분담은 표 1과 같다. '프리덤'의 건설은 1995년부터 시작하며 자재는 약 20회에 걸쳐 우주왕복선으로 운송하여 1998년에는 건설을 완성하고 본격적인 운용을 개시할 계획이었다.

표 1 프리덤계획의 역할분담 (1)

국 명	미 국	유 럽	일 본	캐 나 다
담당역할	실험모듈 거주모듈 스테이션 본체 구조부 극궤도 platform	실험모듈 극궤도 platform 유인지원형 freelyer	실험모듈	이동형 서비스 시설
예 산	14조 5천억원	3조 1천억원	1조 5천억원	6천억원

\* 建設技術研究院 · 構造研究室 室長 · 工博

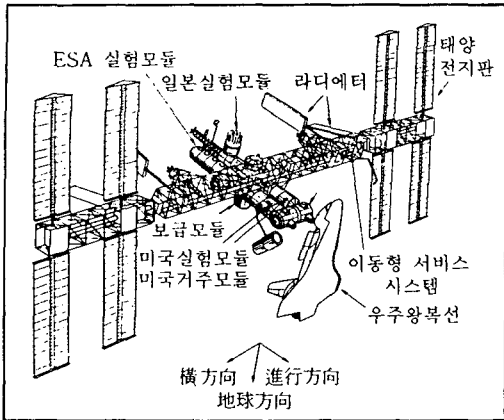


그림 1 우주스테이션 '프리덤'(1)

'프리덤'계획에 이어 부시 미국 대통령은 월면기지의 건설과 화성 유인우주선 왕복을 포함한 새로운 우주개발목표를 1989년에 제시하였다. 이 계획에 의하면 우주스테이션 '프리덤'을 중계기지로 이용하도록 되어 있다. 이에 따라 '프리덤'의 규모도 확장이 불가피하여 그림 2와 같은 확장안이 계획되었다. 확장된 '프리덤'은 본래의 목적인 실험 및 거주기능 이외에도 달로 향하는 수송선과 착륙선, 특히 화성행

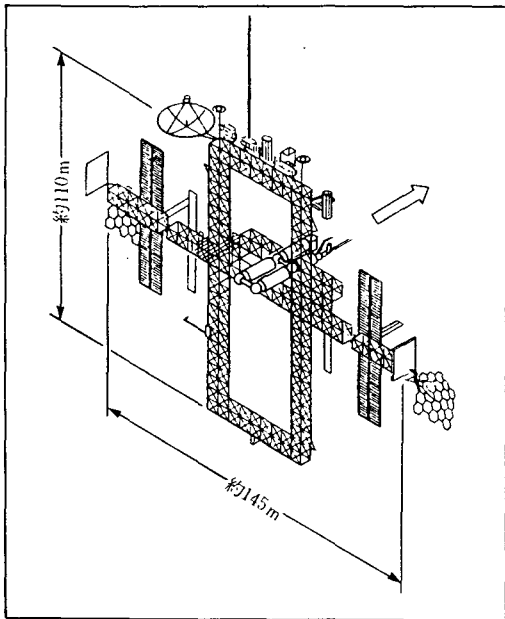


그림 2 '프리덤' 확장계획안(1)

우주선이 이곳에서 조립되며 우주선의 연료를 공급하고 정비하는 서비스 스테이션 기능을 갖고, 화성에의 장기우주비행에 대비한 생리적, 심리적 연구도 수행될 예정이다. 이러한 '프리덤'계획은 미국의 재정난에 따라 약간의 수정이 불가피하게 되었지만 참여하는 국가들은 이 계획의 실현을 위하여 신중한 협의와 교섭을 계속하고 있다.

미국의 계획과는 별도로 소련도 우주스테이션 '미르'의 건설계획을 추진하고 있었다. <그림 3> '프리덤'의 주요 구조부가 트러스 구조로 되어 있는데 반하여 '미르'는 각 모듈을 그대로 직렬 연결한 형태를 갖고 있다. '미르'의 기능은 대기권 외에서의 천체관측, 우주공간의 연구, 대기조사 연구, 지표면관찰 및 무중력환경을 이용한 다양한 실험-의학 생리학연구, 합금 반도체제조,

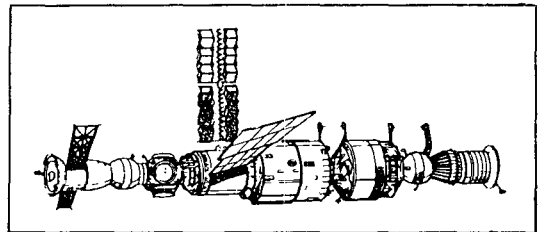


그림 3 소련의 우주스테이션 '미르'(1)

의약품 정제, 물질의 거동특성, 식물재배 등을 포함하고 있다. 소련연방이 해체된 상황에서 '미르'계획의 계속 추진여부는 불확실하다.

### 3. 우주스테이션 건설

#### 3.1 건설재료

우주공간에 건설되는 구조물은 지상의 구조물과는 다른 여러가지 환경에 노출되게 된다. 우주공간에는 대기가 거의 없어 대류현상이 발생하지 않기 때문에 태양광선을 직접 받는 부분과 그렇지 않은 부분과의 온도차가 극심하다. 또한 태양으로부터 오는 전자파와 태양풍, 은하계의 중심으로부터 오는 우주선(宇宙線)에 그대로 노출되어 있으며, 이러한 것들이 지구상에서 사용

되는 많은 구조재료의 성능을 약화시키는 것으로 알려져 있다. 지구상에는 풍부한 산소가 존재하기 때문에 구조재료의 표면에 안정된 산화물피막을 형성하여 내부에서 급격한 반응이 일어나지 않도록 보호할 경우가 많으나 우주공간에서는 산소가 전혀 없기 때문에 환원이 쉽게 일어나며 급격한 반응이 발생할 가능성이 매우 높다. 한편 우주스테이션의 재료는 모두 지구로부터 수송되기 때문에 건설비용중 운송비가 차지하는 비율이 매우 높다.

따라서, 우주구조재료는 강도가 높은 것만으로는 불충분하고 우주환경에서 성능이 저하되지 않으며 가볍고도 강한, 즉 比强度(강도/비중)가 커야 한다. 비강도가 큰 재료로는 FRP(fiber reinforced plastics)나 FRM(fiber reinforced metals)과 같은 섬유강화복합재료가 대표적인 것이다. FRP는 비강도가 크고(인장강도 기준으로 보통 강재의 10배 이상)제조가 용이하여 우주구조재료로 주목을 받고 있다. 다만 FRP의 매트릭스로 사용되는 에폭시와 같은 레진이 유기화합물인 관계로 진공상태에서 분해되거나 태양풍이나 우주선에 의한 성능저하의 위험이 크므로 금속피막을 입혀 보호하는 방안이 검토되고 있다. FRM은 FRP와 같이 보강섬유를 사용하지만 매트릭스로 알루미늄이나 망간 같은 경량금속을 사용하기 때문에 안정성이 높고 비강도가 커서 이상적인 우주구조 재료로 기대되고 있다.

### 3.2 구조적 특성

우주스테이션 같이 지구의 대기권 밖이나 우주공간에 위치하는 구조물은 지구상의 구조물과는 전혀 다른 환경에 처하게 된다. 이중 가장 두드러지게 다른 점은 우주구조물에 작용하는 외력(중력, 풍압, 지진등)이 거의 뉘에 가깝다는 것이다. 지구의 주위를 도는 우주스테이션에 작용하는 공기압은 지상에서 연을 날리기에 알맞은 정도의 바람의 10만분의 1정도 밖에 되지 않으며 태양풍의 압력은 이러한 공기압의 200분의 1밖에 되지 않는다. 우주구조물은 이와 같이 외

부에서 작용하는 힘이 거의 영인 상태이기 때문에 강도와 강성이 모두 작은 매우 柔弱한 구조가 가능하다. 다만 음지와 양지부분의 온도차에 의한 영향, 우주공간을 날아다니는 운석의 조각과 먼지가 충돌할 때의 안정성을 고려하여 설계하여야 한다. 특히 우주스테이션과 같은 대형구조물에서의 온도영향은 더욱 커져서 온도에 의한 변형을 자유롭게 하는 정정구조물 같은 구조형식을 사용하여야 한다. 운석이나 먼지의 충돌 속도는 초속 10km 이상이 될 경우가 있으므로 원자력 발전소 격납건물 설계와 같이 이러한 충돌효과(missile effects)를 고려하여야 한다.

우주에서나 지구상에서나 전혀 변하지 않는 것이 있는데 이는 다름 아닌 물체 고유의 질량이며 물체가 움직일 때나 충돌할 경우의 제반 운동에 관한 법칙 역시 그대로 적용된다. 우주스테이션은 승무원의 움직임, 태양을 향하도록 되어 있는 태양전지판의 작동 등에 의한 영향을 받게 된다. 지구상에서는 무시될 수 있는 이러한 작은 움직임들도 우주스테이션에서는 큰 문제가 된다. 왜냐하면 우주 스테이션은 앞에서 설명한 바와 같이 매우 유약한 구조이며, 특히 지구상의 구조물에서 기초에 해당하는 부분이 없기 때문에 승무원의 움직임 같은 작은 힘에도 구조물에 큰 변형(위치의 이동을 포함하는)이 발생되기 때문이다. 더구나 우주구조물은 일단 진동이 시작되면 그 진동을 흡수 또는 감쇠시킬 수 있는 공기나 지반이 없기 때문에 장시간 계속될 수 밖에 없다. 그러므로 우주스테이션에서는 구조물 자체에서 진동감쇠성을 확보하여야 한다. 구조물자체에서 진동감쇠성을 확보하는 방안은 납과 같은 감쇠성이 큰 재료를 사용하는 방법이나 건물의 制震 또는 免震방법과 같은 것들이 있으며 우주구조물의 경우에도 그 근본원리에는 변함이 없다.

현재 계획중인 NASA의 우주스테이션의 경우에는 그 사용 목적중의 하나가 소중력(小重力)상태의 실험이므로 진동의 억제는 더욱 크나큰

문제로 대두되고 있다. 여기에서 소중력이라 함은 마이크로 그레비티, 즉 지구중력의 100만분의1 정도로 제진장치 없이는 승무원이 재채기만 하여도 확보될 수 없는 수준이다. NASA에서는 소중력 실험실을 전자식 서스펜션(electric suspension)에 의해 공간에 띄움으로써 진동을 제어하는 방안을, 우주스테이션의 대부분을 차지하고 있는 트러스구조는 부재의 연결부에 진동감쇠장치(damper)를 설치하는 방안을 고려하고 있다.

### 3.3. 施工

우주공간에서의 시공은 지구상의 경우와 근본적으로 마찬가지로 건설현장, 즉 우주공간의 특수한 상황을 고려하여야 한다. 제일 먼저 생각할 수 있는 것은 모든 건설재료가 지구로부터 수송되어야 한다는 점이다. 또한 건설기술자가 현장에서 장시간 체류하기 힘들며, 건설자재를 보관해둘 장소도 없다. 따라서 우주스테이션은 조립식 구조로 설계되어야 하며 시공로봇을 적극 활용하여야 할 것이다. 여기에서는 NASA에서 구상하고 있는 스테이션 ‘프리덤’의 시공계획을 소개하고자 한다.

‘프리덤’의 건설에 소요되는 자재는 약 20회의 우주왕복선 운행을 이용하여 수송할 계획이다. 우주에는 지구와 달리 지반이 없으므로 건설 초기에는 우주왕복선의 화물실을 기초로 삼아 이곳에 붙여 건설하는 방안을 구상하고 있다. 그러나, 궤도상에는 수송된 자재를 보관할 장소가 없으므로 최초 1회째에 수송된 자재(FEL=First Element Launch)로 조립된 부분만으로도 예정된 자기고유의 궤도를 운행할 수 있어야 한다. 이를 위해서 FEL에는 태양전지판, 라디에터, 궤도제어설비, 통신설비가 반드시 포함되어야 한다(그림 4).

우주로의 운송료가 고가인 것을 고려하면 가능한 최소의 자재만을 수송하여야 하며, 이를 위해서는 지상건설에 있어서 가설구조물에 해당되는 부분을 최소화시켜야 한다. ‘프리덤’의 건

설에서의 가설구조물은 우주왕복선 자체와 ‘프리덤’부분을 연결하여 만든 플랫폼이 전부이다.

초기건설계획에서는 조립작업을 우주비행사의 宇宙船外活動(EVA=Extra Vehicular Activi-

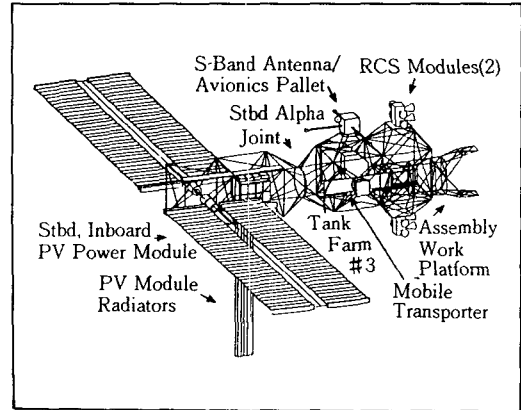


그림 4 FEL 조립계획 (1)

ty)에 많이 의존하는 것으로 되어 있었으나 검토 단계에서 로봇이 조립작업의 대부분을 수행하는 것으로 수정하고 우주비행사는 기기 및 장비의 수리, 보전 등으로 불가피한 경우를 제외하고는 EVA를 금지하도록 하였다. 자재와 장비가 아무리 고가이지만 인명에는 미치지 못하기 때문이다. EVA를 최소한도로 제한하기 위해서는 로봇이 작업하기 용이하도록 조립이 단순하게 스테이션 설계시에 고려하여야 하며 우주작업용 전용로봇을 개발하여야 한다.

## 4. 月面基地建設

### 4.1 건설재료

현재까지 달 구조물의 재료로 가장 적합한 것으로 알려져 있는 것은 놀랍게도 콘크리트이다. 아폴로계획 이후 달의 환경에 관한 정보들이 밝혀지면서 월면까지 건설재료로 콘크리트는 크게 각광을 받고 있으며 미국 콘크리트협회(ACI)는 최근 SP-125 Lunar Concrete<sup>(2)</sup>를 발간하였다. 콘크리트가 달 구조재료로 관심을 모으고 있는 이유는 다름아닌 경제성이다. 콘크리트는 그 제조원가가 지구상에서도 가장 값싼 재료중의 하

나로 알려져 있다(표 2 참조). 달은 지구를 도는 우주스테이션이 건설되는 곳보다 훨씬 더 멀리 떨어져 있으므로 건설재료의 수송에 막대한 비용이 든다. 그러나 콘크리트는 매우 가벼운 수소를 제외하고는 모두 달에서 자체 공급 또는 생산이 가능하여 제조원가도 지구상에서 보다 크게 증가하지 않는 것으로 알려져 있다. 표 2에서 보는 바와 같이 달에서 제조한 콘크리트의 1m<sup>3</sup>당 소요되는 에너지는 지구에서의 유리제조에 소요되는 에너지의 10분의 1 이하이다. 이제까지 연구된 달 콘크리트의 제조방법은 다음과 같다.

아폴로의 달 암석을 분석한 결과는 표 3과 같다. 여기에서 주시할 것은 달 암석 성분的大部分, 68~99%가 시멘트의 주성분인 CaO, SiO<sub>2</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이라는 것이다. 더우기 나머지 성분들도 대부분 시멘트의 성분인 FeO와 MgO로

이루어져 있다. 여기에서 다만 문제가 되는 것은 이러한 성분들의 구성비율이 시멘트의 경우와 다르다는 점이다. 그러나 이 구성비율을 각 성분의 응고점 차이를 이용하여 몇 단계의 가열과정을 거치므로써 조정하는 방법이 연구되었다. 그림 5는 가열과정을 통하여 구성성분의 농도가 변하는 것을 보여주고 있으며 3~4단계를 거친 물질은 현재 사용하고 있는 알루미늄 시멘트(Alumina Cement)의 성분과 거의 같다.

콘크리트용 골재로는 평균 비중이 2.6인 달 표면의 암석과 흙을 분쇄하거나 체가름을 하여 그대로 사용할 수 있는 것으로 판단된다(달의 흙에는 유기성분이 없음). 달의 암석과 흙으로 달의 환경과 같은 조건하에서 제조한 콘크리트의 강도는 700kg/cm<sup>2</sup> 정도 얻을 수 있었다. 다만, 석영 성분이 많은 흙이나 암석을 골재로 사용하

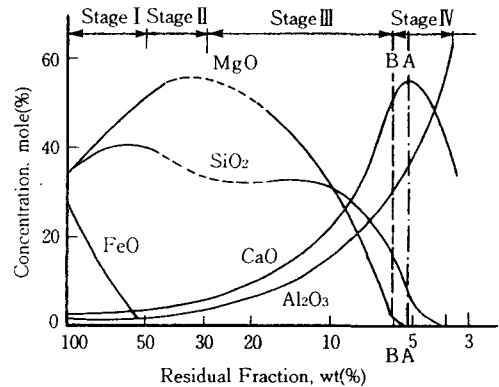
표 2 대표적인 건설재료의 특성비교(3)

Materials	Specific heat (10 <sup>-h</sup> /deg K)	Thermal conductivity (W/m K)	Energy reqd. to produce (GJ/m <sup>3</sup> )
Aluminum alloy	23	125	360
Mild steel	12	50	300
Glass	6	3	50
Concrete	10	3	3.4 (4.0)*

\* 표는 달 콘크리트 제조에 해당

표 3 月岩의 구성성분(3)

Element	Major elements, wt%				
	Mare Soil (10002)	Highland soil (67700)	Basalt rock (60335)	Anorthosite rock (60015)	Glass (60095)
SiO <sub>2</sub>	42.16	44.77	46.00	44.00	44.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub>	7.75	0.44	0.61	0.02	0.51
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.30	0.00	0.13	0.01	0.14
MnO	0.20	0.06	0.07	0.01	0.07
Na <sub>2</sub> O	0.47	0.52	0.57	0.04	0.28

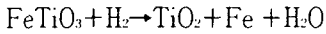


CHEMICAL COMPOSITION, WEIGHT PERCENT			
Compound	Solar Elemental Abundances		Alumina Cemet
	A-A	B-B	
CaO	42.7	40.0	36-42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	52.3	48.8	36-51
SiO <sub>2</sub>	5.0	11.0	4-9

그림 5 달 시멘트의 제조 및 성분(3)

였을 경우에 지구상에서와 같이 알카리 골재 반응을 일으킬지에 관해서는 현재 연구중이다.

콘크리트 제조에 꼭 필요한 물을 만드는 방법으로는 산소와 수소를 화합하는 방법이 유력시되고 있다. 놀랍게도 달에는 무궁무진한 산소가 표 3에서와 같이 산화물의 형태로 존재하고 있다. 이러한 금속 산화물을 수소로 환원시키면 금속과 물이 얻어진다. 예를 들어 NASA의 Agosto는 ilmenite( $FeTiO_3$ )를 이용하여 고가의 재료인 이산화티타늄과 철 그리고 물을 제조하는 방법을 제안하였다.



이 반응에 필요한 수소는 액체수소( $H_2$ ), 메탄( $CH_4$ ), 또는 암모니아( $NH_3$ )의 형태로 지구에서 수송하는 방안이 고려되고 있으나 식물재배에 탄소(C)와 질소(N)가 필수적인 원소임을 감안하면 메탄과 암모니아가 더 유력하다.

마지막으로 콘크리트를 효율적으로 이용하기 위해서 보강용 철근이 필요하다. 달에는 철이 많기 때문에 궁극적으로는 제철공장이 건설될 것이지만 초기의 달기지 건설에는 철근이 아닌 강섬유 또는 유리섬유의 사용이 유력시되고 있다.

달기지 건설재료로서 콘크리트의 장점은 경제성이외에도 높은 열 및 방사선 차단성, 운석의 충돌에 대한 높은 내충격성, 온도변화에 대한 안전성, 구조물을 연결부분없이 일체화시킬 수 있는 점들을 들 수 있다.

#### 4.2 구조설계

달의 환경중 지구와 특히 다른 점으로는 진공, 저중력, 방사선, 온도차가 큰 점과 자전주기가 긴 점들을 들 수 있다. 진공상태는 풍하중, 설하중 등이 없어 구조물에 이로우나 구조물내의 內壓에 의한 하중을 받게 된다. 또한 운석 등이 떨어질 때 마찰손실이 없어 구조물에 큰 손상을 입힐 수도 있다. 대류작용이 없는 달에서

의 양지와 음지 온도차는 매우 심하여  $120^{\circ}C$ 의 고온에서  $-170^{\circ}C$ 의 저온에까지 이른다. 달에서는 자기장이 지자기의 100분의1정도로 매우 약하며 지구의 반 알렌대에 해당하는 보호층이 없기 때문에 우주선의 중성자나 하전입자가 직접 달 표면에 도달하게 되므로 이를 효과적으로 방지할 수 있도록 구조물을 설계하여야 한다. 또한 달의 중력은 지구의 6분의 1밖에 되지 않으므로 구조물의 재료강도가 지구에서와 같다고 가정하면 휨재의 경우 그 支間을 지구에서 보다 2.5( $=\sqrt{6}$ )배로 길게할 수 있다.

그림 6은 T. D. Lin<sup>(3)</sup>이 제안한 반경 32m

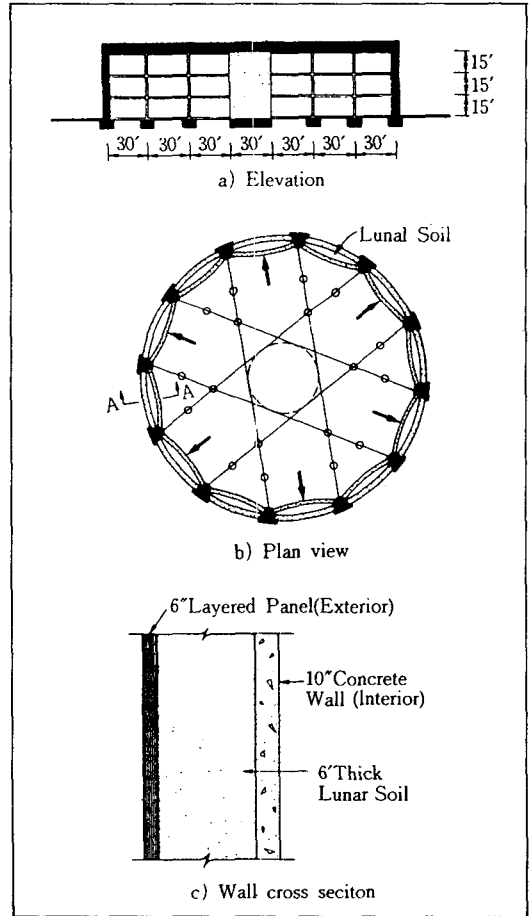


그림 6 달기지 계획안(3)

(105ft), 3층 규모의 달기지 구조설계안이다. 중앙의 원통형 탱크는 외벽이 손상을 입어 공기가 유출될 경우 또는 태양 폭풍 발생시의 대피소로 사용된다. 지붕은 우주선과 운석의 충돌에 의한 피해를 막기 위하여 2~6m 두께로 흙을 덮는다. 철근의 사용을 억제하기 위하여 내압을 안으로 향한 아치형의 벽판이 압축력으로 받아 기둥에 전달시키며 기둥은 강선으로 서로 연결되고 고정된다. 벽의 원주방향으로도 강선을 배치하여 원주방향응력(hoop stress)에 저항한다. 벽체 외부의 두께 15cm(6in) 판넬은 비내력벽으로 내측판넬과의 사이에 흙을 채워 내부구조의 급격한 온도변화를 방지한다.

제안된 달기지의 유효 사용면적은 8,360m<sup>2</sup>이며 약 250ton의 강재와 12,200ton의 콘크리트가

소요된다. 콘크리트 제조에 필요한 시멘트는 약 1,500ton, 물은 약 490ton정도이며, 물제조에 필요한 수소의 무게는 55ton 정도이다.

### 5. 結 言

우주는 더이상 外界가 아니다. 우주는 인간이 상주하며 생존을 유지해 나아갈 수 있는 희망의 신대륙이다. 머지 않은 장래에 가까운 우주공간이나 달 또는 화성에서도 현재 지구상에서 이루어지고 있는 모든 인간활동들이 그대로 이루어질 것이다. 신대륙 우주는 무한하다. 이 무한한 건설시장에 참여하기 위해서는 지금이라도 국가 차원의 정책수립과 관련 연구조에서의 요소기술 개발에 관심을 기울여야 하겠다. ☺

94-7次 智山の

## 日本 土木工事現場 研修團

● 基本 日程

● 全日程 同時通譯 및 解說進行

日 時		訪 問 現 場 및 主 要 內 容
7/10 (日)	11:45 13:05 ~ 18:00	Seoul 發 ——— JAL 966 ———> 廣島 着 (Hiroshima) ▶ Orientation(全日程 協議 및 訪問現場 紹介) ▶ 廣島 平和公園 및 文化園 見學
7/11 (月)	09:00 ~ 17:00	▶ 溫井(NUKUI) DAM 建設現場 - Compacted Roller Dam ▶ 溫井 水路 Tunnel 建設現場
7/12 (火)	08:30 ~ 18:30	▶ 來島(KURUSHIMA) 大橋 建設現場 - 四國과 本州를 잇는 本四架橋로써 來島 第3大橋(1,030m), 來島 第2大橋(1,020m)의 橋脚工事 現場을 Ferry Boat에 乘般하여 見學 • 移動 / 廣島 發 ———> 今治 到着
7/13 (水)	08:30 ~ 19:00	▶ 瀨戶大橋(斜張橋) 見學 - 四國과 本州를 잇는 本四連結橋로써 全長 9,367m, 世界最大規模 道路鐵道併用橋(橋梁建設 Video 上映 및 現場見學) • 移動 / 今治 發 ———> 岡山 到着
7/14 (木)	09:00 ~ 17:30	▶ 大狹 NATM Tunnel 建設現場 - 直接 設計를 擔當했던 藤原正弘 技術士의 案內 및 設計解說 ▶ 岡山大橋 or 吉備高原都市 建設現場
7/15 (金)	08:30 ~ 12:00 12:30	▶ 技術評價會 및 資料收集 岡山 發 ——— KE 725 ———> Seoul 着 (Okayama)