

# 특 집

|| 콘크리트의 아름다움 ||

## 미래문화와 콘크리트

- Civilization and Concrete for the Future -



안태호\*



김병기\*\*

### 1. 서론

시멘트, 콘크리트가 인류사에 등장한지도 몇 천년이 지나고 있으며 시멘트가 사용된 구조물로 지금까지 가장 오래된 피라미드만 하더라도 5천년의 역사를 간직한 채 인류의 문화유산으로 건재하고 있다. 이러한 시점에서 돌아켜보건대 지난 세기는 눈부신 과학발전과 더불어 시멘트·콘크리트 산업분야에 있어서도 큰 발전을 이룩한 시대로 기억되어질 것이다. 특히 건설 재료분야에 있어서는 어떠한 재료보다도 우수한 특성을 가지며 많은 응용이 되어져 왔으며 최근까지도 고강도화, 조강화, 고내구성화의 바람을 하나하나 실현하면서 인류에게 더욱더 윤택한 보금자리와 업무 환경 등을 제공하고 있는 추세이다. 그럼 새로운 천년을 맞이하고 있는 시점에서 시멘트·콘크리트 산업에서의 과학·기술은 향후 어떻게 변화되어질까? 미래에 대하여 우리는 항상 기대와 두려움의 두 가지 양면을 가지고 있다. 지구 종말론을 예언하는 사람들이 있는가 하면 과학기술이 주도하는 꿈 같은 미래 사회와 우주시대를 예언하는 과학자들도 있다. 또한 어떠한 사람들은 과학기술의 발전이 환경을 변화시켜 지구가 더 이상 살기 힘든 곳이 될지도 모른다는 이야기를 하기도 한다. 하지만 인류 역사를 돌아보면 인류는 난관을 만나면서도 지금까지 잘 극복 해왔으며, 앞으로의 미래도 지금보다는 더 발전되어진 사회가 되어질 가능성이 높다고 할 수 있다.

지난 20세기는 초기 공산주의 시대의 등장과 함께 자본주의와의 대립으로 많은 여러 나라들이 정치, 경제적으로 급변화 한 시대였다. 그러나 이러한 국가들간의 이념분쟁이 최근에는 자유주의 물결 흐름에 따라 대부분의 공산주의 나라들의 붕괴와 함께 새로운 모습의 국가로 변하고 있으며, 이러한 국가들은 과거 대립적 전쟁 승리를 이끌기 위한 과학 기술의 발전을 토대로 하여, 냉전 이후 과학, 기술 분야에 있어서 놀라운 발전을 거듭하고 있는 추세이다. 또한 1970년대 이후 미국과 소련의 우주 개발 목표는 이제 단순히 몇 국가에 국한되어진 것이 아니라 지구 이외의 새로운 공간의 활용이라는 목표아래 많은 국가들이 공동으로 참여하고 있는 추세이다. 이러한 기술 발전의 원동력에는 몇 가지 원인이 존재하는 것을 알 수 있는데 크게 인구, 자원, 환경 문제 등으로 구분 할 수 있다. 1950년에 약 25억이었던 전 세계 인구는 1990년대에 이르러 50억을 초월하게 되었고 이러한 추세로 본다면 2010년에는 세계인구는 70억 정도로 추정되어져 인구 한계에 도착할 것으로 예측되어진다. 특히 이러한 인구 증가는 선진국 인구증가율이 약 1.7 배 증가하는 데 비하여 개발도상국인 경우 평균 3배 이상의 증가율을 보이고 있어 개발도상국에서의 인구증가로 인한 거주지, 식량자원, 에너지 자원의 부족 등의 문제로 귀결되어 질 가능성이 높은 것을 예측 할 수 있다. 따라서 각국에서는 이러한 문제를 대체할 수 있는 새로운 기술의 개발에 총력을 기울이고 있으며, 이러한 시대적 흐름에 맞추어져 지금과는 다소 다른 미래문화의 흐름이 발생되어질 가능성이 높다. 우리가 공상 과학 영화 속에서 볼 수 있던 초고층

\* 정회원, 경기화학공업(주) 연구개발센터 혼화재료팀 연구원

\*\* 정회원, 경기화학공업(주) 연구개발센터 혼화재료팀 팀장

건물들과 미래 도시들은 건축 기술 발달을 통하여 실제 등장 가능성이 높아지고 있으며, 또한 생명공학의 발달은 생명 연장 및 식량문제의 해결 등을 암시하고 있다. 더욱이 미지영역이었던 달과 해양에 달기지 및 해양기지 건축물들을 시공함에 따라 새로운 인류거주지의 탄생 등이 그 예를 들 수 있다. 따라서 이러한 미래문화의 변화는 새로운 건설기술의 개발과 상당히 밀접한 관계가 있는 것을 예측할 수 있다. 또한 새로운 21세기형 신소재로서의 시멘트 재료(cement-based material) 개발은 지금까지의 시멘트, 콘크리트의 상식을 초월하는 신재료로서 미래문명사회에서 언제든지 쉽게 접할 수 있는 제품으로 다가갈 미래문화에 큰 영향을 미칠 것을 예측할 수 있다.

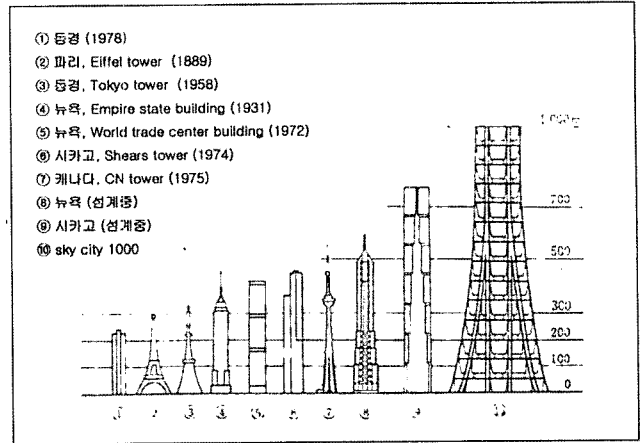


그림 1. 각 건축물들의 높이 비교

## 2. 21세기 미래의 건축 구조물

「21세기의 건설 산업 vision」은 건설 수요의 기초로서 1) 건축설비 시설의 다양화 및 고도화 2) 인류의 고령화 사회에 대한 대응 3) 고도 정보화 사회에의 적합한 건축설비 4) 복합형·집적형 시설의 증대 5) reform·refresh 수요의 증대 등으로 크게 구분할 수 있다. 특히 이러한 건설 수요의 증대에 큰 영향을 미치는 사회 요소는 1) 국민의 가치관, 의식 변화 2) 인구, 세대 구성 변화 3) 여가의 증대 4) 국제화 5) 기술혁신의 진전 6) 고도 정보화 등이 있으며, 따라서 21세기에 시공되어지는 건축물들은 이러한 시대적 욕구에 충족되어지는 형태의 다기능성을 가지는 건축구조물로 변화되어질 것이다.

우리나라는 현재 많은 기술발전을 이루고 있으나 좁은 국토면적과 국토의 비효율적 운용으로 인하여 수도권 인구의 집중 등 대단히 곤란한 상황에 직면하고 있으며, 향후 여러 형태로 새로운 미래도시 등이 기획되어질 가능성이 높을 것을 고려해 볼 수 있다. 이미 예전에는 상상할 수 없었던 대륙간을 연결하는 대규모 다리 및 해양터널 등이 선진국에서는 등장하고 있는 추세이며, 또한 그들이 생각하는 미래도시에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

### 2.1 초고층 도시

지난 20세기는 초고층 빌딩의 시대이었음 부정할 사람은 별로 없을 것이다. 1908년 미국 뉴욕에 건설된 Singer building(187 m)은 초고층 건

물의 개막을 알리는 건축물로서 그 후 1913년의 Woolworth building(241 m), 1931년의 Empire state building(381 m), 1973년의 World trade center building(417 m), 1974년의 shears tower(443 m)가 세워졌으며 이러한 초고층 빌딩은 뉴욕을 중심으로 세계 대도시로 전파되어 20세기의 도시를 상징하는 건축으로 정착을 하게 된 것이다.((그림 1) 참조)

최근에는 싱가포르 Raffles City(1986년 72층, 223 m), 홍콩 Central Plaza building(1992년 78층, 374 m), 말레이시아 페트로나스 타워(1996년 92층, 453 m), 태국 등 아시아 지역에서도 많은 초고층 건물들이 계획되어지고 있으며 중국 상하

표 1. 세계 초고층 건축물 계획안 및 Sky city 1000 과 에어로 폴리스 건축물의 구상도

순위	Project Name	소재지	높이	층수	용도	기본설계
1	X-Seed 4000	일본	4000	800	복합	대성건설
2	Try 2004	일본	2004	400	복합	대성건설
3	Acropolis 2001	일본	2001	500	복합	
4	Mile High Tower	미국	610	528	복합	F.L. Wright
5	Pyramid in Pyramid	싱가포르	1500			
6	Mother	일본	1321	220	복합	삼정건설
7	Super Pyramid	일본	1000	195		
8	Sky City 1000	일본	1000	195		
9	Bio-Nic Tower	중국	1100	200	복합	피오스설계
10	M Tower	중국	900			Norman Foster
11	Seiren 21	일본	880	180	복합	홍지조
12	Millenium Tower	일본	880	180	복합	대립조
13	DIB 200	일본	800	200	복합	록도건설
14	Aquarius	일본	800	200		
15	Chicago World Trade Center	미국	701	181	복합	
16	T-Growth	일본	700	170	복합	
17	India Tower	인도	677	224		대성건설
18	Land Mark Tower	홍콩	574	97		
19	Grand Tower	시드니	560			홍콩지하철공사
20	Lotte World II	서울	555		복합	롯데건설
21	DMC Project	서울	520		복합	
22	Taipei Financial Tower	대만	502	101		
23	Brazil Millenium Tower	브라질		103		
24	South Dear Bon	시카고	472	115	복합	SOM
25	Lotte World 2	부산	464	96	복합	롯데건설

이의 경우 101층 높이의 월드파이낸션 센터는 이미 건물을 짓기 위한 기초공사가 완료되어진 상태이다. 또한 인도의 경우 224층, 677m의 인디아 타워를 2008년 완공목표로 계획하고 있으며 이웃 일본에서도 196층 1,000m의 Sky City와 500층 2,001m에 달하는 에어로 폴리스 2001를 계획하고 있는 실정이다.(<표 1> 참조)

이러한 거대 건축 구조물들은 건설 기술의 진보로 떠받쳐져 왔으며, 이러한 건물을 소유하고 있는 도시는 산업사회의 기술이 잘 발달되어져 있다는 것을 나타내는 간접 지표로도 사용되어져 왔다. 특히 이러한 고층빌딩이 있다는 것은 정치, 경제, 사회분야에 있어 큰 영향을 미치게 되었으며 많은 경제적 부를 안겨주기도 하였다. 그러나 이러한 초고층 건물의 증가는 인구밀집으로 인하여 도시부근의 물가상승과 함께 주택난, 교통난, 대기오염, 환경오염 등 여러 도시문제를 야기 시켰으며 이러한 문제점들을 고려하여 21세기는 단순히 높은 빌딩을 만드는 것이 아니라 주거, 업무, 상권, 레크리에이션, 교육 등을 모두 통합한 고밀도화 대규모화를 특성을 가지는 초고층 도시가 세워질 가능성이 높을 것으로 보여진다. 다음의 2가지 초고층 도시는 이미 선진국에서 계획되어진 초고층 도시의 사례를 나타낸 것으로 향후 가까운 미래에 나타날 가능성이 높은 초고층 도시들에 대하여 간략하게 논하고자 한다.<sup>1), 2), 3)</sup>

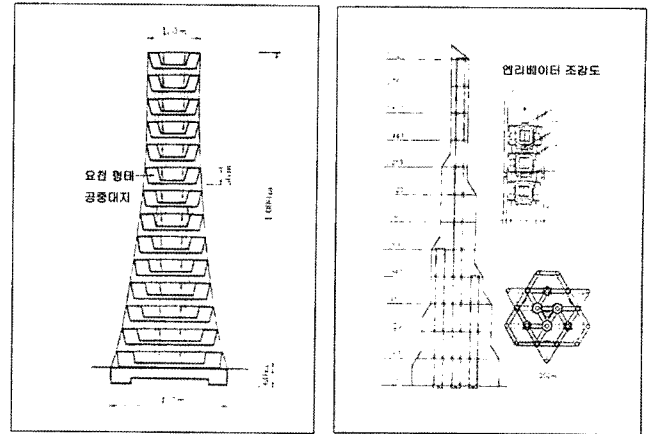
2.1.1 Sky City 1000

높이 1,000m의 초고층 빌딩인 중형 도시 「sky city-1000」은 하층에서 직경이 400m이고, 최상부에서 직경은 160m이며, <그림 2(a)>에서와 같이 위로 갈수록 가늘어지는 형태를 가지는 구조이다. Sky City에는 하부가 2 개로 갈라진 6개의 거대한 기둥이 있고 이러한 기둥이 요철 형태의 단면을 한 구조물(공중대지) 14개를 조금씩 간격을 내어 연결한 구조이다. 이러한 공중대지들은 각각 필요에 따라 여러 종류의 건축물들을 세우거나 없앨 수 있으며 인공 지반으로 구성되어져 있다.

Sky City 1000은 건물 안에서 빛이나 바람을 확보하며 높은 고층의 공포를 적게 하도록 고안되어졌으며 1개의 공중대지 인공 지반의 총면적은 평균 약 60ha이고 그 안에 주택, 상점, 사무실, 극장 등의 문화시설 및 교육시설, 공원 등의 공공시설 등을 갖출 수도 있도록 설계되어 졌다. 또한 14개의 공중대지를 합치게 되면 전체 면적은 800ha, 8km<sup>2</sup>의 크기가 되며 주거, 사무실, 상업 시설, 문화시설 등의 공공 용도로서 각각 약 200ha를 배분하면 거주자 3만 5,000명, 취업자 10만 여명이 생활하는 하나의 도시가 된다.<sup>2)</sup>

2.1.2 에어로 폴리스(높이 2,001m의 공중도시)

이웃 일본의 경우 좁은 국토와 높은 토지비용을 해결하면서 수도의 기능을 담당하도록 하는 21세기 새로운 미래도시로서 높이



(a) Sky city 1000 (b) 에어로 폴리스  
그림 2. Sky city 1000과 에어로 폴리스 건축물의 구상도

2,001m, 인구 30만을 수용할 수 있는 에어로 폴리스가 제안되어 졌다. 건물에는 인공적인 기술을 통하여 해양과도 흡사한 부분을 만들어 유효하게 이용할 수 있도록 설계하였으며, 오피스, 상업, 문화의 도시 및 관청, 국제 관련 공공 시설, 개인기업 등을 유치하여 이용할 수 있도록 하였다. <그림 2(b)>는 이러한 건축구조물의 구상도를 간략하게 나타낸 도면으로 기본적인 건축구조물의 형태는 1변 100m(폭 20m)의 정삼각형 평면이 연결되어 평면적으로 삼각형을 늘려나가는 구조의 형태를 하고 있다. 삼각형의 중심부분은 고속 엘리베이터를 장착 이동가능 하도록 하였으며, 또한 이러한 고속 엘리베이터 하강시 발생하는 에너지를 이용할 수 있도록 설계되어 졌다. 또한 냉난방에 있어 고층의 차가운 공기를 이용 냉방에 응용하기도 하며, 해수의 담수화 기술을 이용한 난방 및 용수를 사용하는 기술도 포함되어진다. 이러한 건축구조물을 가능하게 해주는 재료는 콘크리트로서 기둥은 연직 하중을 견디는  $F_c = 2,400 \text{ kgf/cm}^2$ 의 초고강도 콘크리트가 바람직하며 이외에 강관 콘크리트도 사용되어질 수 있도록 하였다.<sup>1)</sup>

이러한 sky city 1000과 에어로 폴리스 두 건축물 제작 시 요구되어지는 재료들의 특성을 살펴보면 크게 3가지 특성을 가지는 재료가 요구되어지는 것을 볼 수 있다. 첫째는 고층 건물의 하중을 견디도록 튼튼하게 하기 위해서는 건물 구조 특성상 강하면서도 가벼운 건축재료가 요구되어지며, 두번째는 반영구적 건물의 특성상 고가이지만 내구성이 높은 재료를 선택하며 외장재에는 티타늄이나 세라믹재료를 이용하여 보강하는 것이다. 세번째는 시공되어진 건축공간의 온도, 습도, 조명 등을 자동으로 제어할 수 있는 환경 친화적 고기능 특성을 가지는 재료로 구분할 수 있다. 이러한 재료의 특성을 고려해 볼 때 시멘트, 콘크리트 재료는 상당히 많은 부분에서 사용되어질 가능성이 높을 것을 보여진다. 특히 고강도, 경량재료에 있어서 요구되어지는 압축강도가 1,000 ~ 1,500 kgf/cm<sup>2</sup> 이상인 것을 보아 현재 연구개발 중인 Reactive Powder Concrete(RPC)들을 응용할 수 있는

여지가 있으며, 내부의 인공 대지들은 시멘트 재료가 사용되어질 가능성이 높다. 또한 부가가치가 높은 고성능성 재료들은 시멘트 기술을 기초로 한 무기염료, 전자와 차폐 재료 등 여러 분야에서 응용 개발하여 사용되어 질 수도 있다.

## 2.2 해양 구조물

### 2.2.1 지저 해양도시

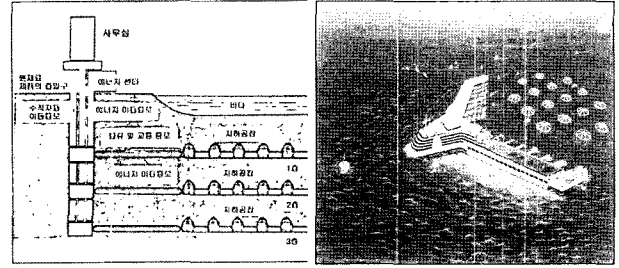
지저 해양都市는 인구 증가와 식량 부족에 의해 생기는 토지 및 식량 부족 완화 방법으로서 풍부한 어장의 지하부에 대규모인 지하 공장군을 함께 건설하는 계획이다. 각 층의 평면 규모는 약 5 km × 15 km로 하여 구형의 중심적인 지하 공간을 설계하며, 공장용 터널을 3층으로 구성, 수직 통로를 사용 이동을 하도록 한다. 이러한 지저 해양 도시는 각 층별로 에너지 비축창고, 식량 저장 창고 등이 있으며, 다른 층에서는 자동차, 기계, 금속 공업을 중심으로 하는 공업 시설영역을 만든다. <그림 3(a)>는 이러한 지저 해양도시의 구상도를 간략하게 나타낸 그림으로서 공장 터널 1개의 길이는 15 km, 단면을 30 m × 20 m로 하며, 50 m의 간격으로 총 500개 정도를 건설한다는 계획이다. 1,200 m의 수직 이동통로 및 터널의 주위에는 철근 콘크리트가 사용되도록 설계되어 있다. 특히 이러한 지하 공장지대는 무인화 시스템이 전체가 되어지기 때문에 공업 집약화에 의해 생산 효율이 높아질 가능성이 높으며 대륙붕 이용에 큰 효과가 있을 것으로 보여진다.<sup>1)</sup>

### 2.2.2 해상 구조물

초기 해양 구조물 등은 석유, 천연가스, 광물 및 해저 자원을 얻기 위하여 설계, 건축되어졌으나 앞으로 21세기에는 이러한 것 이외에도 계속적인 인구증가 등과 자원고갈 등의 원인으로 인하여 해양에 진출하는 해상 구조물 또한 출현하리라 보여진다(그림 3(b)). 특히 해상 공항 도시의 제안은 선진국을 중심으로 수없이 기획되어져 왔으며 오늘날 이미 일부에서는 시공되어지고 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 해상 공항都市는 비즈니스, 국제 문화교류, 관광 등, 국제간의 항공 수송 수요가 증대되어짐에 따라 대도시 연안에 위치하도록 설계하기 때문에 해상에서부터 도심으로의 운송 및 공간의 제약으로부터 유리한 것을 알 수 있다. 또한 국제공항이외에 그 주변에는 국제회의장, 금융기관, 상업시설 등을 24시간 운영함으로써 문화 교류, 비즈니스 활동, 정보공유의 장이 되어질 가능성이 높다.<sup>4)</sup>

일반적으로 콘크리트 구조물은 건축물의 주요 구조재료로서 오랜 기간 동안 사용되어져 왔으며 콘크리트의 강도, 내열성, 내구성, 방수성 등의 콘크리트 재료의 특징은 해양구조물에 적합한 재료임을 보여주고 있다. 따라서 향후 개발되어질 이러한 해양 건축물의 종류에는 해변에 위치한 고급호텔 및 식당 등이 있으며, 또한 부유식 인공조, 수중 주택, 해상 원자력 발전소 등이 다

양하게 고려되어지고 있다. 따라서 이러한 해양 구조물 등을 건설하기 위해서는 콘크리트를 경량성과 내구성이 크게 중요시되어질 것을 보여지는데 종래의 연구되어진 이론들과는 다른 관점에서 더욱더 심도 있게 연구되어져야 할 것으로 보여진다. 특히 수심에 따른 수압의 변화 등 여러 수중 환경에서의 콘크리트 구조물의 설계 등이 고려되어져야 하며, 이러한 해양 분위기에서 잘 유지되어질 수 있는 고성능 콘크리트의 개발 또한 시급한 것으로 보여진다.<sup>1),6)</sup>



(a) 지저 해양도시 (b) 부유식 해상 구조물

그림 3. 각 중 해양 구조물의 구상도

## 2.3 달표면 기지

최근 77세의 존 글렌 우주 비행사가 우주 왕복선 디스커버리호를 타고 지구를 134바퀴나 돌고 무사히 지구로 귀환하면서 우주여행은 한 발짝 더 우리에게 다가왔으며 21세기에는 본격적인 우주여행시대가 될 것으로 보인다. 이제 우주여행에서의 관심사는 우주정거장건설, 우주기지건설 등으로 쏠리고 있으며 국제 우주정거장 건설 작업도 시작되고 있는 추세이다. 1981년 미국 포틀랜드 시멘트 협회(PCA)의 건설 기술연구소(CTL)는 달 표면에서의 시멘트·콘크리트 구조물 건설을 제안하고, 국립항공우주국(NASA)으로부터 달의 흙을 제공받아 1986년에 보고를 하였다. 한편, 1988년 레이건 미국 대통령은 우주 정책의 일환으로 NASA의 달기지 계획을 발표하고, 이어 미국 콘크리트협회(ACI)는 Lunar cement 위원회를 발족하고 시멘트, 콘크리트, 시공 등 다섯 가지 분과위로 활동을 개시하였고 1991년에는 심포지엄을 개최하였다. 미국 토목학회(ASSE)도 Space'88을 개최하였다. 1991년 부시 미국 대통령은 오는 2010년 달에 우주기지를 건설할 계획을 발표하였다. 이러한 계획은 20여년 전 유인 달 탐사선을 발사하면서 본격적으로 시작되었으며, 현재 계속적으로 진행 중에 있다. 실제 달 표면에 기지를 건설하여 사람이 살기 위해서는 많은 양의 태양 자외선을 차단하고 외부 환경으로부터 내부를 보호해야 하기 때문에 이에 적합한 재료를 선택하는 것이 초기에 어려움으로 많이 작용하였다. 그러나 달 기지 건설은 달의 암석을 지구로 가지고 돌아오면서부터 본격적인 연구가 진행되어졌으며 달기지 건설 시 발생되는 문제들을 콘크리트 재료 사용시 거의 해결 할 수 있는 것을 확인 할 수 있었다. 최근

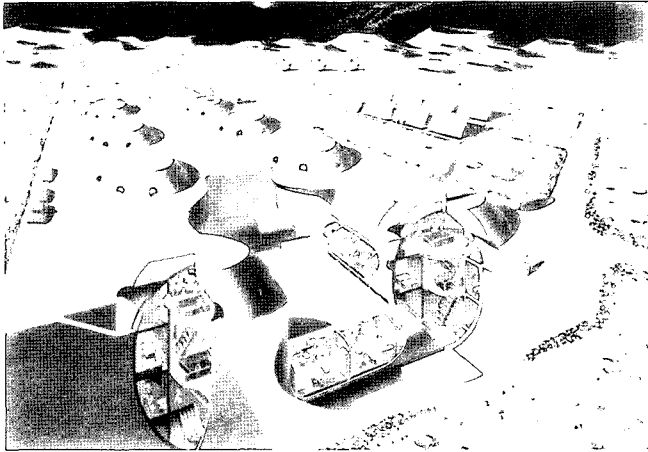


그림 4. 달 표면 기지의 구상도

에는 우주기지에 건설되어질 콘크리트 구조물의 재료를 달표면에서 직접 구하여 제조하는 방법으로 현재 달에서의 자원활용방안이 활발히 연구되어 지고 있다. 따라서 본 장에서는 이러한 미래의 달기지 건설에 대하여 알아보도록 한다.<sup>1),5),6),7)</sup>

표 2. 달암석의 화학성분 표

	Mare Soil	Highland Soil	Basalt	Anorthosite
SiO <sub>2</sub>	42.16	44.77	46	44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.6	28.48	24.9	36
CaO	11.94	16.87	14.3	19
FeO	15.34	4.17	4.7	0.35
MgO	7.76	4.92	8.10	0.3
TiO <sub>2</sub>	7.75	0.44	0.61	0.02

### 2.3.1 달의 환경

먼저 시멘트 제조, 콘크리트의 시공 등에 앞서 먼저 달의 환경과 지구환경을 비교해보면 다음과 같다. 달표면의 낮과 밤의 일교차는 큰 온도차를 보이게는 되는데 보통 낮의 경우에는 온도가 100 ~ 130°C, 밤은 -100 ~ -150°C 정도로 낮과 밤의 일교차가 무려 280°C나 발생하게 된다. 또한 낮과 밤의 기간도 지구 시간으로 각각 14.77일간 계속되며, 햇빛이 비칠 때와 비치지 않을 때의 경계는 급변하게 된다. 특히 달 표면에는 공기가 없는 진공상태이므로 따라서 액체는 순식간에 증발해 버리며 중력 또한 지구의 1/6정도 밖에 미치지 않는다. 또한 대기가 없으므로 달의 인력권 내에 들어온 우주 운석들은 연소하지 않고 달 표면에 떨어질 것이며, 태양풍, 방사선의 영향도 직접 받을 수 있게 된다.

### 2.3.2 달에서의 시멘트·콘크리트의 제조

달의 암석을 분석한 결과, 성분은 대부분이 산화물이며 시멘트의 주성분인 규소, 알루미늄, 칼슘, 철분을 함유하고 있는 것을 연구결과 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 달의 암석을 응용하여 시멘트 및 콘크리트를 제조할 수 있는 가능성을 보여주고 있

는데 실제로 이러한 달의 암석을 2,000 K(1,727°C) 이상으로 가열하면 알루미늄 시멘트와 비슷한 시멘트가 얻어질 수 있다고 보고되고 있다. 또한 골재의 경우 달의 표면에는 비중이 2.6 정도의 고운 모래가 있는 것으로 보고되고 있으며 이 모래와 달 표면의 암석을 분쇄하면 골재도 공급이 가능하다.

물의 경우에는 최근보도에 따르면 NASA의 무인 달 탐사기로 60억 톤 규모의 얼음이 존재하는 것을 확인하였다고 하며 가능하다면 이러한 재료를 응용하여 콘크리트를 제조할 수도 있다. 또한 응용 가능한 물이 없을 경우 수소와 산소로 직접 합성하여 공급할 수도 있으며 수소 1g으로부터 물 9g을 얻을 수 있으므로 효율은 나쁘지는 않은 편에 속한다. 또한 달 암석에는 철분도 함유하고 있어 콘크리트 보강재 제조에도 큰 어려움이 없을 것을 추정되어지며 여기에 소모되어지는 에너지는 태양열의 활용으로 충당된다. 이렇듯 원자재가 달에서 조달이 가능하다는 것은 달에 콘크리트 우주기지 건설의 가능성을 한층 밝게 해주고 있다.

달 환경 하에서의 시멘트·콘크리트 품질에 대한 연구 결과에 따르면 진공 및 지구의 1/6 저중력 하에서 모르타르 강도는 지구 상 강도의 약 90%를 유지하며 무중력 상태 하에서도 수화반응에는 지장이 없음이 밝혀졌다. 한편 진공상태에서 반죽한 콘크리트는 급격한 내부수분 증발로 조직이 다공화하여 강도 강하를 보였으나 적당한 수증양생과 수증양생후의 건조효과를 이용하면 충분한 압축강도를 갖는 콘크리트를 얻을 수 있을 것으로 보인다. 최근에는 DM/SI법(Dry-Mix/Steam-Injection method)도 제안되어지기도 하였다. 달 표면에서의 온도차는 콘크리트에는 가혹한 조건이다. 앞서서도 언급하였지만 극심한 일교차는 콘크리트 구조물에 많은 영향을 미칠 수가 있는데 따라서 이러한 구조물에 사용되어질 콘크리트는 경화 후에도 이 열 충격에 견딜 수 있어야 하는 특성 또한 요구되어진다. 철근 콘크리트의 경우 철근과 콘크리트 사이의 열 전도도 차이 등을 고려한 설계상 배려가 필요할 것으로 보여지며 특히 철근을 대체할 수 있는 유리·세라믹섬유 강화 콘크리트도 고려해 볼 만 하다.

결론적으로 달 기지의 설계에 있어서 온도 변화 및 일교차, 저중력 및 진공 그리고 방사선이나 태양풍 등의 달 환경을 고려한 설계가 준비되어야 하며 이러한 조건들을 만족시켜 주는 재료는 시멘트 콘크리트 재료가 가장 근접할 수 있음을 보여 주고 있으며, 따라서 이러한 조건에 만족하는 새로운 콘크리트를 개발하는 것이 21세기 콘크리트 기술자들이 나아가야 할 새로운 방향으로 보여진다.

## 3. 미래의 콘크리트 기술

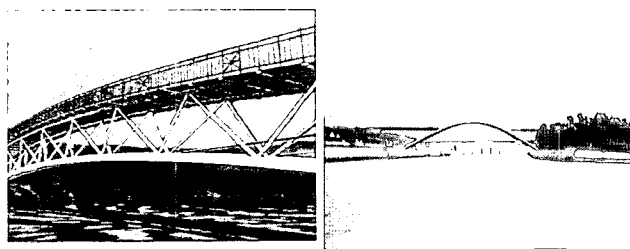
지금까지 21세기에 세워질 가능성이 높은 건축물들에 관하여 이야기하였다. 그러나 이러한 초고층 건물, 해양 구조물, 우주 구조물 등은 공통적으로 콘크리트 재료의 개발 없이는 모두 불가능

한 이야기로서 기존의 콘크리트 지식으로서는 접근하기 어려움 점이 많다. 특히 최첨단 기술과 함께 건설되는 이러한 구조물들은 그 구조물 자체가 대단히 지능화 되어 있는 구조물로서 CIM(Computer Integrated Manufacturing) 방식이 도입될 가능성이 높다. 따라서 본 장에서는 이러한 구조물들의 시공하기 위해 요구되는 콘크리트 재료들과 미래의 콘크리트 기술에 있어서 요구되는 특성에 대하여 알아보도록 한다.

### 3.1 미래의 시멘트, 콘크리트 재료

#### 3.1.1 초고강도 콘크리트 재료(압축강도 2,000 kgf/cm<sup>2</sup>의 실용화)

미래 건축물들의 경우 초고강도 콘크리트의 실용화가 예상된다. 특히 대륙을 잇는 긴 교량, 해저 터널, 초고층 건물들은 요구되어지는 콘크리트의 압축강도가 2,000 kgf/cm<sup>2</sup> 이상인 것을 알 수 있는데 향후에는 일반적으로 이러한 강도를 가지는 콘크리트가 주로 사용되어질 것으로 보여진다. 현재 선진국의 경우에는 Reactive Powder Concrete(이하 RPC)라 하여 슬럼프 플로우 200 mm 이상에서 일반양생의 경우 28일 압축강도가 약 2,000 kgf/cm<sup>2</sup>를 발현하며, 90 °C에서 2일간 양생한 경우 3일 강도가 무려 2,400 kgf/cm<sup>2</sup>까지 발현하는 RPC를 제조하는데 성공하여 이미 실용화하여 토목 및 건축 구조물에 적용을 시도하여 성공적으로 결과를 얻은 것이 보고되고 있다. 그 중 대표적인 예로서 <그림 5(a)>의 캐나다 Sherbrooke 인도교 및 Monaco의 기차역 등이 있으며, <그림 5(b)>의 선유 인도교는 국내에서도 시공되었다. 향후 이러한 RPC 구조물들은 계속적으로 증가되어지리라 보여지며, 차세대 콘크리트로서의 가능성이 상당히 높은 것을 알 수 있다.<sup>8),9),10)</sup>



(a) 캐나다 Sherbrooke 인도교 (b) 서울의 선유 인도교

그림 5. RPC 재료가 사용되어진 교량

RPC 콘크리트의 기본 개념은 DSP(Densified system containing homogeneously arranged ultra-fine particle : 시멘트와 초미립자 혼합을 통하여 경화체 공극을 감소시켜 압축 강도를 증진시키는 원리) 개념과 섬유 첨가에 의한 연성의 증가를 기본 개념으로 하여 제조되어진 콘크리트로서 이러한 두 가

지 개념을 상호보완 함으로써 압축강도 및 내구성에 있어서 우수한 콘크리트가 제조 가능하게 되어진다는 원리이다. <그림 6>은 RPC 콘크리트에 있어서 DSP 개념을 보여주고 있는 좋은 SEM (주사전자 현미경)사진으로써 일반적인 콘크리트와 비교하여 콘크리트가 상당히 치밀한 것을 볼 수 있다. 이러한 효과는 RPC 콘크리트 재료 중 미분말인 실리카폼, quartz powder 등에 의하여 콘크리트의 내구성을 향상시키게 되는데 일반 보통 콘크리트가 200 나노미터 정도의 모세 공극으로 되어있는 것에 비해 RPC 콘크리트의 경우 2 나노미터 이하의 연결되지 않은 공극들로 이루어져 지는 것을 보아 알 수 있다. 또한 RPC 콘크리트 제조시 첨가되어지는 섬유는 일반 콘크리트에서 보기 힘든 우수한 연성을 보여주게 되는데 섬유를 첨가하지 않을 때 보다 압축강도 및 연성이 크게 향상되어진다고 보고되고 있다(<그림 7> 참조). 특히 같은 배합설계 비에서도 고온 고압 양생일 경우 압축강도가 크게 향상되어진다고 보고되고 있는데 상온에서 170 MPa의 강도를 가지는 경우 90 °C에서 양생하면 230 MPa의 압축강도가 발현된다고 한다. 또한 배합비를 변경하여 400 °C에서 양생할 경우 490 ~ 680 MPa 정도까지도 강도가 발현되어질 수 있으며, 여기에 강섬유 첨가시 800 MPa 까지도 가능하다고 한다. RPC 콘크리트는 위에서 언급한 것과 같이 일반 콘크리트 및 고성능 콘크리트의 한계를 넘어서 steel 재료와 유사한 경향을 보이고 있으며, steel 재료를 사용하는 부분에 있어서 RPC 콘크리트를 사용한다면 상당한 비용이 절감되는 효과도 가져올 것으로 보여진다. 일반적으로 RPC 콘크리트 제조 시 강섬유를 사용하지 않는다면 \$ 500/m<sup>3</sup> 정도의 비용이 요구되어지지만 강섬유를 사용할 경우 \$ 1,400/m<sup>3</sup> 정도의 가격인상이 부분적으로 증가되어진다. 그러나 이것은 steel 재료의 가격이 \$ 5,500/m<sup>3</sup> 인것을 고려해 볼 때 상당한 경제성이 있는 것으로 보여진다. 결론적으로 이러한 RPC 콘크리트는 일반적인 고강도 콘크리트를 제조하는 여러 방법들을 복합적으로 응용하여 steel과 유사한 강도 및 특성을 가지는 콘크리트로서 향후 많은 분야에서 활발히 사용되어질 것으로 보여진다.

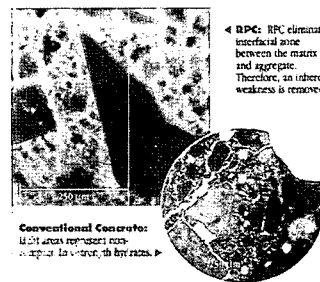


그림 6. 일반 콘크리트와 RPC 콘크리트의 미세구조

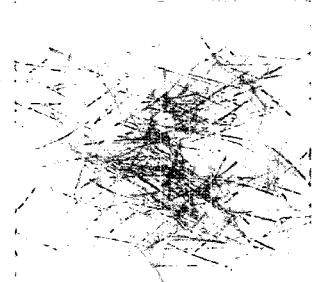


그림 7. RPC 콘크리트에 사용되는 fiber(length: 13mm Diameter: 0.20mm)

3.1.2 기능성 재료로서의 시멘트 재료

포틀랜드 시멘트는 여러 광물이 혼합되어져 생성되어진 가루로서 물과 반응하면 굳어지는 수경성을 가지고 있다. 특히 구성 성분인 calcium silicate와 calcium aluminate의 양이 달라지면, 수화반응속도나 수화발열량이 달라지면서 강도 발현성도 변화되게 되는데 향후 발전되어질 cement based material은 구성광물들의 비를 서로 다르게 하여 시멘트의 반응속도나, 화학적 수축을 제어하고, 고도의 내구성과 고강도를 갖게 하는 등 각각의 기능에 적합한 여러 종류의 시멘트가 개발되어질 것이다

고성능 감수제의 개발은 고유동, 고강도 콘크리트에 이어 초고강도 콘크리트를 제조 할 수 있도록 만들었으며, 시멘트에 PVA를 혼합하여 물·시멘트 비를 0.15 정도로 작게 하고 물 밀로 혼련 성형하여 만든 MDF 시멘트 재료는 높은 휨강도를 갖는 등 과거의 시멘트 재료의 성질을 초월한 새로운 재료로서의 기능을 보이고 있다. 특히 이러한 MDF 시멘트는 현재 선진국에서 응용하여 방탄재료 및 자동차 등을 제작 응용해보고 있는 단계이며 머지않아 시멘트로 제작되어진 자동차를 탈 수도 있을 것이다. 또한 calcium phosphate계의 화합물은 수화하여 hydroxyapatite를 생성하며 경화하는 성질이 있어 bioceramics로 활용되고 있으며, 인공치아, 뼈, 인공 장기 등도 제조하여 실제 적용하는 시대가 오고 있다. 이런 시멘트 재료의 고기능화는 지금까지의 건설재료와 같은 대량 소비재적인 경우와 소량 다품종을 대상으로 하는 것으로 구별되며 advanced cement-based materials and chemically bonded ceramics란 새로운 재료로서의 영역으로 대두되고 있다.

따라서 21세기에는 단순한 건설재료로서의 시멘트·콘크리트뿐만 아니라 초고강도를 가지는 엔지니어링 콘크리트, 생체 적합성 시멘트, intelligent 기능을 갖는 시멘트, 콘크리트 등 많은 영역에서 우리 생활과 더욱더 친근하게 다가올 수 있을 것이다.<sup>11)</sup>

4. 맺음말

요즘은 하루 만 지나고 나면 새로운 기술이 나타나고 이미 알고 있던 기술들은 옛 기술로 잊혀지고 있는 그러한 시대에 접어들면서 혹자는 시멘트·콘크리트 재료를 경시하는 경우도 있으며 21세기에는 무엇인가 새로운 재료가 나타날 것을 기대하는 사람들도 있다. 그러나 인류사를 돌이켜 보면 인류의 발달과 함께 사용되어지고 개발되어진 시멘트·콘크리트 재료에는 많은 과학적 지식과 엄청난 정보가 숨겨져 있으며, 인류의 욕구에 따라 새롭게 거듭 나면서 일반 건설재료부터 오늘날 최첨단 신소재 재료로 까지 변화되고 있는 실정이다. 특히 21세기 우리가 추구하는 장미빛 문화는 이러한 시멘트, 콘크리트 재료의 개발이 없이는 불가능하며 오히려 더욱 윤택한 인류생활과 문화를 영위케 하는 재

료로서 발전되어질 가능성이 높다. 따라서 이러한 21세기를 이끌어 가는 콘크리트 기술자로서 더욱 더 넓은 활동 영역을 개척하여 시멘트 콘크리트의 참모습을 보여주어야 할 당사자가 바로 우리들 시멘트·콘크리트인 이라는 사명감을 가지고, 21세기를 향한 새로운 시멘트, 콘크리트 재료 개발, 새로운 기술 개발 그리고 완벽한 시공에 박차를 가해야 할 것으로 보인다. □

참고문헌

1. 武田泰一, “未來文明とコンクリート”, 콘크리트工學, Vol.28, No.7, July 1990, pp.103~109.
2. 米澤數男, “未來文明とコンクリート(縦型都市構想)”, 콘크리트工學, Vol.28, No.7, July 1990, pp.110~114.
3. Sung-Woo Shin, “The promotion plan of HSC-HPC in Korea Construction Industry”, Proceeding of International Seminar on Better Quality of Concrete and Competitiveness of the Construction Industry”, Jan 2003, pp.133~177.
4. 小林理市, “未來文明とコンクリート(海洋構造物)”, 콘크리트工學, Vol.28, No.7, July 1990, pp.115~118.
5. 松本信二, 金森洋史, “未來文明とコンクリート(月面基地におけるコンクリートの利用)”, 콘크리트工學 Vol.28, No.7, July 1990, pp.119~123.
6. G.D. Nasser : The next frontier-building permanent bases on the moon, PCI Journal, Vol.34, No.4, Jul.~Aug. 1989, pp.51~59.
7. S. Matsumoto, et al : Concrete structure construction on the moon, Lunar bases and space activities in the 21st century. Houston, Apr. 1988.
8. Oliver Bonneau, Cladue Polulin, Jerome Dugat, Pierre Richard, and Pierre-Claude Aitcin, “Reactive powder concretes : from theory to practice”, Concrete International, April 1996.
9. Pierre-Claude Aitcin, Mohamed Lachemi, Regis Adeline, and Pierre Richard, “The sherbrooke reative powder concrete footbridge”, structural engineering International 2/98, pp.140~144.
10. P. Richard and M. H. Cheyreyzy, “Reactive powder concretes with high ductility and 200 ~ 800 MPa compressive strength”, ACI International workshop on high strength concrete, Bangkok, November 1994.
11. Center for advanced cement-based materials, “cementing the future”, ACBCM, vol.12, No.2, spring
12. 김병기, “콘크리트 미래”, 한국콘크리트학회 2002년 제3회 기술강좌·고강도 콘크리트 제조/설계/시공 기술, 2002. 10. 9~10, pp.233~267.