

# 고강도 경량콘크리트의 제조 및 역학적 특성

오병환<sup>1)</sup>, 엄주용<sup>2)</sup>, 백신원<sup>3)</sup>

1) 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

2) 서울대학교 대학원 박사과정

3) 서울대학교 대학교원 박사과정

## 目 次

1. 서론	4.2. 경량 콘크리트의 배합과 운송
1.1. 연구배경	4.3. 경량 콘크리트의 타설
1.2. 연구목적 및 범위	5. 경량 콘크리트의 강도 특성
2. 경량 콘크리트의 개요 및 개 발의 역사	5.1. 압축 강도 특성
2.1. 경량 콘크리트의 개요	5.2. 인장 강도 특성
2.2. 경량 콘크리트 개발의 역사 및 현황	6. 경량 콘크리트의 내구 특성과 장기 변형특성
3. 경량 골재의 종류 및 물리적 특성	6.1. 동결 융해 특성
3.1. 경량 골재의 종류와 제법	6.2. 크리프와 건조 수축
3.2. 경량 골재의 물리적 특성	7. 경량 콘크리트의 응용
4. 경량 콘크리트의 제조 및 배합 특성	7.1. 인공경량 플라이 애쉬 골 재 콘크리트의 특성
4.1. 개요	7.2. 구조용 경량 펌핑 콘크리트
	8. 결론
	9. 참고문헌

## 1. 서 론

### 1. 1. 연구 배경

콘크리트가 일반적인 건설재료로 폭 넓게 사용되면서 부터 각종의 다양한 용도에 잘 들어맞는 콘크리트에 대한 연구가 끊임없이 수행되어 왔다. 이러한 연구들은 콘크리트

의 장점을 더욱 크게 하고자하는 측면과 또, 콘크리트의 결점을 개선시키는 측면의 두 방향으로 진행되어 왔다고 할 수 있다. 콘크리트를 고강도화하여 압축강도를 크게 개선 시킨다든지, 내구성등을 강화한 폴리머 콘크리트를 개발하는 것등이 전자에 속한다면 인장강도가 상대적으로 낮은 콘크리

트의 약점을 보완하기 위해 개발된 섬유보강 콘크리트(FRC) 등은 후자에 속한다고 볼수있다. 이처럼 다양한 연구들이 수행되면서, 콘크리트 특성중의 하나인 비교적 큰 단위중량을 줄여 좀 더 특수한 용도로 활용할 수 있는 경량 콘크리트에 관심이 기울어져왔다. 이러한 관심은 앞서 말한것에 비추어 본다면 콘크리트의 결점을 개선시켜보려는 노력의 일환이라 할 수 있다. 따라서 기존의 경량콘크리트는 콘크리트의 중량을 줄이는데 주안점을 두었다고 볼 수 있다. 이를 통해 특별히 하중을 받지 않고 단순한 중량 감소만으로도 소기의 효과를 얻을 수 있는 단열재나 방음벽 정도에 경량콘크리트를 적용시키는 방법이 논의되어 왔다. 경량 콘크리트의 이러한 한계성은 경량콘크리트가 기본적으로 강도가 낮기 때문인데, 이것은 시멘트 풀의 성능과 배합설계의 미숙에 기인한다고 볼 수 있다. 그러나 그 개발 이래로 급속히 개선되어온 시멘트 및 혼화재료의 성능과 콘크리트 배합설계의 발달로 시멘트 풀의 기본적인 성능이 월등히 좋아짐에 따라, 구조용 재료로서 경량콘크리트를 사용하는 방안이 강구되기 시작했다.

강도가 크게 떨어지지 않으면서 구조물의 자중을 줄일 수 있다면 콘크리트의 활용 범위는 상당히 넓어지게 된다. 예컨대 경량콘크리트를 사용함으로써 우선 자중의 감소에 따른 기초크기의 축소를 꾀할 수 있고, 이에 따라 단면들의 축소 또한 가능해진다. 이와같은 일련의 과정을 통해 구조물 전체의 효용(Productivity)이 커지게 되는 것이다. 이러한 기술상의 발전에 힘입어 현재에 이르러서는 고층건물의 뼈대나 슬래브, 쉘 구조물, 평판 구조물, 교량상판과 프리스트레스, 프리캐스트 제품에 이르기까지 광범위하게 쓰이게 되었다. 또, 경량 콘크리트는 단위중량이 작다는 장점외에도 단열성과 방음성이 뛰어나고, 내구성 역시 관리여하에 따라 보통 콘크리트에 비해 크게 떨어지

지 않으므로 앞으로의 활용가능성은 대단히 크다 하겠다. 그러나 내 마모성을 비롯한 몇몇 역학적 특성이 보통 콘크리트에 비해 떨어지고 배합, 타설, 관리에 상당한 기술이 요구되며, 아직은 상대적으로 생산가격이 비싸다는 문제점들이 숙제로 남아 있다. 하지만 현재의 추세가 거의 모든 종류의 구조물에 각종의 다양한 콘크리트를 적용하는 경향이므로 앞으로 경량 콘크리트의 폭넓은 활용은 필연적이라 하겠다.

외국의 경우 이미 40여년전부터 경량 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔고, 상당한 성과를 거두고 있는 것으로 보고되고 있다. 또한 국내에서도 최근 본 필자를 비롯한 몇몇 연구자에 의해 관련 논문이 발표된 바 있다.

## 1. 2. 연구의 목적 및 범위

본 연구에서는 지금까지 수행되어온 연구 결과 및 본 연구자가 수행한 연구들을 통해 경량 콘크리트의 개요를 살펴보고 경량 콘크리트가 갖는 문제점을 제시하며 이를 개선하기 위한 일련의 연구내용을 토의하고자 한다. 이를 위해 우선 경량 콘크리트의 정의와 종류 및 구성재료의 특성을 살펴보고 그 제조와 배합에 있어서의 특성을 고찰하기로 한다. 본 연구에서는 현재 가장 널리 쓰이고 있는 경량 골재 콘크리트를 중심으로 연구를 수행하였다.

## 2. 경량 콘크리트의 제반 특성

### 2. 1. 개요

경량 콘크리트란 콘크리트의 단위 중량을 줄임으로써 단면과 기초의 크기를 축소하고 이를 통해 구조물의 효용성을 높이며 단열, 방음성등의 개선과 같은 부수적인 효과를 얻고자 개발된 콘크리트를 말한다. 일반적으로 경량 콘크리트의 단위중량은 300kg/m<sup>3</sup>에서 1850kg/m<sup>3</sup>에 이르며 구조물로 사용할

경우의 기준은 ASTM C 330-77에 명시되어 있는데, 우선 비중이 기건상태에서 1850kg/m<sup>3</sup>이하이어야 하고 28일 압축강도가 167kg/cm<sup>2</sup> 이상이 되어야 한다. 하중을 받지않는 (Non-Load Bearing) 방음벽등의 경우에는 단위중량이 800kg/m<sup>3</sup>이하, 28일 압축강도는 6.9~68.7kg/cm<sup>2</sup>로 규정되어 있다. 구조물용으로 쓰이는 경량 콘크리트의 단위중량은 보통 1400kg/m<sup>3</sup>에서 1800kg/m<sup>3</sup> 사이인 것으로 알려졌다.

경량 콘크리트는 제조공법의 차이에 따라 경량 골재 콘크리트와 기포 콘크리트, 무세골재 콘크리트(No-Fines Concrete)로 분류된다. 경량 골재 콘크리트는 자연 상태의 저비중 골재나 인공적으로 비중을 낮춘 골재를 사용하여 중량을 줄인 콘크리트를 말한다. 기포 콘크리트는 공기 연행제를 사용한다든지 하는 방법을 통해 콘크리트내에 기포를 발생시켜 중량을 낮추는 콘크리트를 가리킨다. 무세골재 콘크리트란 세골재를 전혀 사용하지 않거나 또는 소량 사용하여 배합한 콘크리트인데 이 경우에는 세골재를 사용하지 않음으로써 발생하는 조골재간의 공극증가를 통해 중량을 줄이게 된다. 이 중에서 기포 콘크리트와 무세골재 콘크리트는 제조방법이나 관리상 문제가 많고 특히 상당한 강도가 요구되는 구조용 콘크리트로는 부적합한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되고 또 그에 대한 연구가 활발한 인공경량 골재 콘크리트(이하 경량 콘크리트)를 중심으로 연구를 수행하였다.

## 2. 2. 경량 골재 콘크리트 개발의 역사 및 현황

인공경량 골재의 성격에 부합되는 최초의 골재 생산은 1917년 S. J. Hayde에 의해 시작되었다. 앞으로 언급되겠지만 경량골재의 제법에는 회전로방식(Rotary-Kiln Process), 소성방식(Sintering Process), 슬래그 팽창방

식(Expansion of Slag) 등이 있는데, Hayde에 의해 개발된 인공경량 골재는 철암과 점토를 회전로 방식으로 가공한 것이었다. 이어 거의 같은 시기에 F. J. Straub에 의해 화석연료의 재를 원료로 한 경량 골재가 생산되기 시작했으며 이는 현재도 계속되고 있다. 팽창 슬래그를 사용한 인공 경량골재가 상업화되기 시작한 것은 1928년도이며 1948년에 이르러서 최초의 구조물용 경량 콘크리트가 제작되기 시작했다. 철근을 보강한 경량 콘크리트가 최초로 쓰인 것은 제1차 대전 중의 바지선 제작에서였고 이때 콘크리트 단위중량은 1760kg/m<sup>3</sup>이하였다. 이 당시(1920년대)의 또다른 사용례는 세인트 루이스의 파크 플라자호텔과 캔사스시에 있는 벨 전화 빌딩에서 찾아볼 수 있다. 1930년대에 이르러서는 샌프란시스코 오클랜드 베이브리지의 고가도로에 경량 콘크리트가 적용되기에 이르렀고 이것은 경량 콘크리트가 경제적인 교량 설계의 한 변수로 작용하게 되는데 있어서 하나의 계기가 되었다. 제2차 대전중에는 전쟁이라는 특수에 힘입어 105건의 선박제작에 적용되었다. 뒤이어 전쟁이 끝나고 그 복구 작업이 진행되면서 몇몇 학회가 활발한 연구를 수행했고 이를 통해 경량 콘크리트가 광범위하게 활용되기 시작했다. 50년대 접어들면서 경량 콘크리트의 수요는 건물뼈대 구조물, 교량상판, 프리캐스트 제품에까지 확장되었고 좀 더 가벼운 경량 콘크리트 개발에 관심이 집중되기 시작했다. 이 시기에는 특히 사하중의 감소에 따른 단면 축소효과에 대해 많은 연구가 수행되었고 상당수의 시공실적을 올렸다. 예컨대 시카고의 42층 프루덴셜 빌딩이나 달라스의 힐튼호텔등이 그것이다. 또 이 당시 고안된 공법중의 하나는 기초를 변경하지 않고서 기존 구조물위에 새로운 구조물을 경량 콘크리트로 제작하여 구조물의 효율성을 높이는 방법인데 클리블랜드의 한 건물은 이를 통해 기초의 수정이나 확대없이 기

존의 건물위로 4층을 더 쌓아 올렸다. 또, 상판이 파손된 타코마 브릿지의 경우에는 파손되지 않은 교각은 그대로 둔채 경량 콘크리트로 제작한 교량상판을 얹어 현수교를 복구한 시공례를 볼 수 있다. 이러한 기술상의 발달은 60년대에 들어서면서 더욱 확대되었고 인공경량골재를 생산하는 업체 역시 늘어났다. 그 결과 현재에 이르러서는 세계 각지의 건설현장에서 다양한 용도로 쓰이고 있다.

### 3. 인공 경량 골재의 종류 및 물리적 특성

#### 3.1. 인공 경량 골재의 종류와 제법

경량골재는 천연산과 인공골재로 대별될 수 있는데 천연산의 경우 강도가 상대적으로 낮고 생산지가 국한되어 있다는 점을 고려할 때 일반적인 건설재료로는 보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 인공 경량골재를 다루게 되며 이하 경량골재는 인공 경량골재를 말한다.

경량골재는 그 원료와 제법에 따라 특성이 나누어진다. 우선 회전로방식(Rotary-Kiln Process)으로 만들어지는 경량 골재의 원료로는 점토(Clay), 점판암(粘板岩; Slate), 진주암(眞珠岩; Perlite), 흑요석(黑曜石; Obsidian), 운모(Vermiculite) 등이 있다. 회전로 방식은 거의 수평으로 누인 회전로에서 원료를 1000-1200℃까지 가열한 다음 이를 냉각시킴으로써 그 과정에서 가스가 흡입하게 되고 이를 통해 팽창을 유도하는 방법을 말한다. 이 경우 제조과정에서 너무 크게 만들어진 골재는 따로 쇄석하여 사용하며 플라이 애쉬등을 표면에 얹게 코팅(50-100μm)하기도 한다. 이렇게 표면을 처리한 골재는 그 형상이 구형에 가까울수록 흡수율이 작고 관리가 용이하며 가격이 상대적으로 높다. 이들 원료중에서는 혈암이나 점토가 상대적으로 더 큰 강도를 얻을

수 있는 것으로 알려져 있다. Perlites는 미주등지에서 채취되는 유리성상의 화산암을 가리키는데 900-1000℃로 가열할 경우 30-240kg/m<sup>3</sup>까지 단위중량을 낮출수 있다. 인공 경량 골재중에서 Vermiculite와 더불어 가장 낮은 비중을 얻을 수 있는 원료이지만 콘크리트로 만들었을 때의 강도가 매우 낮고 건조수축이 대단히 커서 절연체를 만드는데 주로 쓰이고 있으며, 건조가 빠르고 마감을 속히 할 수 있는 특징이 있다. Vermiculite는 미주나 아프리카 등지에서 얻을 수 있는 박편형의 원료로서 650-1000℃로 가열하면 수 배에서 30배까지 팽창하게 된다. Perlite와 마찬가지로 콘크리트의 강도가 매우 낮고 건조수축이 크지만 단열성은 우수한 편이다. 팽창고로 슬래그를 사용하여 경량골재를 만드는 경우에는 공정상 냉각과정이 포함된다. 즉, 고로에 녹아있는 상태로 남아 있는 슬래그를 꺼낼때 냉각과정을 거친다음 스팀을 가하여 제조하게 된다. 이 공정은 냉각방법의 차이에 따라 다시 둘로 나뉘는데 Water-Jet Process와 Machine Process가 그것이다. 전자의 경우는 고로에서 슬래그를 꺼낼때 스프레이로 일정량의 물을 고압 분사하여 통기성이 큰 다공질의 골재를 만드는 방법이고 후자의 경우는 녹아있는 상태의 슬래그에 물을 넣어 급속히 섞음으로써 소기의 효과를 얻는 방법을 말한다. 이상의 공정을 통해 단위중량이 300-1100kg/m<sup>3</sup> 정도인 골재를 얻을 수 있고 이를 사용하여 콘크리트를 만들었을때 콘크리트의 단위중량은 약 950-1750kg/m<sup>3</sup>이 된다. 이상에서 일반적으로 많이 쓰이는 인공 경량골재의 성능을 살펴본았는데 이를 용도별, 단위중량별로 분류하면 그림1과 같다.

산업 부산물을 가공, 경량 골재화하는 방법도 미국등지에서 논의되고 있는데 이 경우에는 용해성 염류등의 유해 물질을 분리시키는 고난도의 공정이 필요하며 내구성이

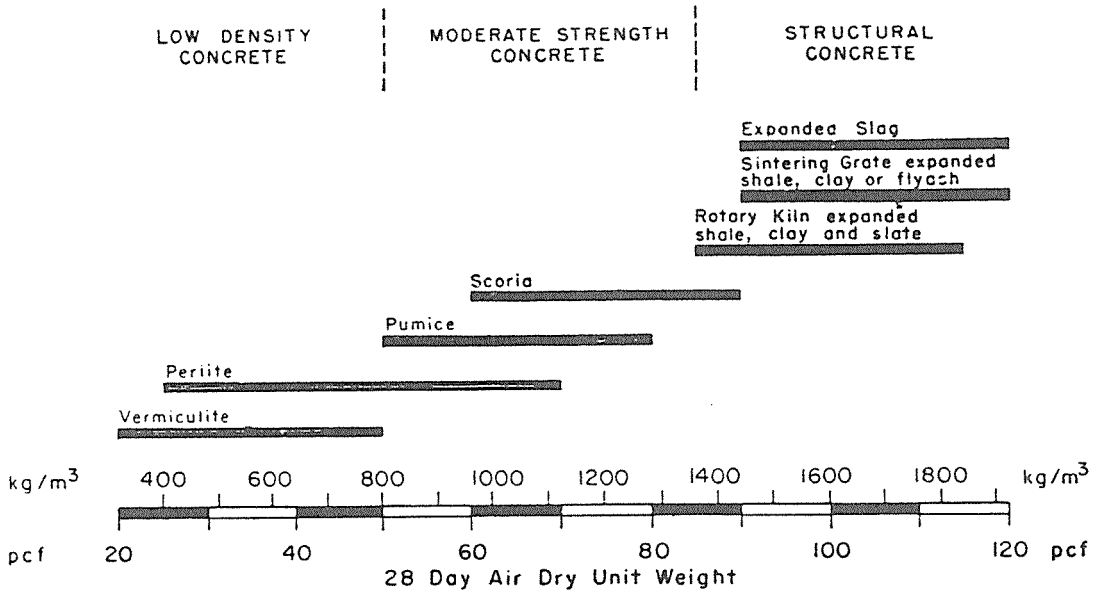


그림 1. 인공 경량골재의 용도별, 단위중량별 분류

상당히 떨어지는 재료로 알려져있어 고강도 콘크리트로는 부적합하다. 이를 사용하여 콘크리트를 제작했을때의 단위중량은 약 1100-1400kg/m<sup>3</sup> 정도이며 워커빌리티를 개선키 위해 세골재를 천연산으로 대체했을 경우의 단위중량은 1750-1850kg/m<sup>3</sup>이 된다. 화력 발전소에서 얻어지는 플라이 애쉬를 이용하여 인공 경량골재를 만드는 방법도 논의되어 왔다. 이 경우 원료에 수분을 가하여 가공하면 다공질의 구형골재를 얻을 수 있는데 이 비중은 약 1000kg/m<sup>3</sup> 내외이다.

이상에서 살펴본 경량 콘크리트중에서 슬래그를 사용한 경우, 특별히 단위 시멘트량을 증가시키지 않고도 157-249kg/cm<sup>2</sup>의 상당히 높은 콘크리트 압축강도를 얻은 예도 보고된 바 있다. 이 경우 콘크리트의 단위 중량은 1900kg/m<sup>3</sup>내외였으며 단위 시멘트량은 230-360kg/m<sup>3</sup>이었다. (그림1 참조)

### 3. 2. 경량 골재의 물리적 특성

경량골재의 형상과 표면의 거친 정도는 원료와 공정에 따라 제각기 다른 양상을 보인다. 다시 말해서 경량 골재의 형상은 정 6면체에서부터 상당히 둥근 모양까지, 또 표면의 거친 정도는 대단히 매끄러운 정도부터 거의 울퉁불퉁한 정도에 이르기까지 다양한데, 이처럼 다양한 형상과 표면은 콘크리트 배합시 다음과 같은 변수에 영향을 미친다. 워커빌리티, s/a비, 단위 시멘트량, 요구 단위수량 등이 그것인데, 따라서 이들변수를 다룸에 있어서 보통 콘크리트의 경우보다 세심한 주의가 요구된다. 경량골재는 특유의 다공성 내부구조때문에 보통골재에 비해 용적비중이 작다. 이러한 용적비중은 골재크기에 따라 변하는데 골재의 크기가 작아질수록 그 용적비중은 커지는 경향이 있다. 이러한 경량골재를 사용하여 콘크리트를 제작할 때는 콘크리트의 용적비중

이 보통 콘크리트의 1/3-2/3 정도가 되는 것이 실용적이며 바람직하다. 이보다 용적비중이 낮아질 경우에는 적정강도를 얻기 위해 더 많은 단위 시멘트량이 필요하게 된다. 반대로 용적비중이 이보다 클 경우에는 ASTM에서 요구하는 경량 콘크리트 용적비중의 기준을 넘어서게 된다. 따라서 경량 골재를 다룰 때는 이런 점들에 유의해야 한다. 경량골재의 단위중량은 앞서 말한 용적비중의 경우와 같은 이유로 보통 골재에 비해서 상대적으로 낮다. 일반적으로 두골재가 조립률과 표면 거친 정도가 같다면, 용적비중이 동일인 경우 두 골재의 단위중량은 같다고 가정할 수 있다. 그러나 실제로는 용적 비중이 같은 경우의 골재라도 그 단위중량은 상당한 차이가 난다. 이러한 차이는 골재마다 형상이 틀리고 이에 따라 건조상태의 공극이 서로 틀리기 때문에 생기는 것으로 설명될 수 있다. 예컨대 강자갈과 쇠석의 경우에는 차이가  $160\text{kg}/\text{m}^3$ 에 이르며 경량골재의 경우에는 이 차이가  $80\text{kg}/\text{m}^3$  이상인 것으로 알려져 있다. 다시 말해서 표면 상태가 거칠수록 단위중량은 낮아지므로 이 점에서는 유리하다. 그러나 이 경우에는 공극이 흡수하는 수량이 상대적으로 크고 이에 따라 여러가지 관리상의 문제점이 발생하므로, 배합시에 골재의 형상에 따른 변수를 고려하여야 한다. 경량골재의 물리적 특성을 고려할 때 가장 유의해야 할 점은 함수비와 흡수율이다. 경량골재는 다공성 구조이기 때문에 보통 콘크리트에 비해 흡수량이 월등히 많다. 예컨대 24시간 침수의 경우, 기건상태 골재중량의 5-20% 정도 흡수를 하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 평균적인 시공조건 즉, 골재를 야적한 경우의 흡수량은 24시간 침수실험의 경우에 비해 2/3 정도인 것으로 보고되고 있다. 이로 인해 전체적인 함수비는 야적한 경우가 작아지게 된다. 이러한 현상은 보통 골재와 반대인데 보통 골재인 경우 24시간

침수시의 흡수량은 마른 골재중량의 2%내 외이지만, 야적상태의 전체적인 함수비는 5-10% 혹은 그 이상이다. 이러한 함수비의 차이는 다음과 같이 설명될 수 있는데 경량 골재의 함수비는 골재 내부로 흡수되는 양이 대부분이고 보통 골재의 경우는 유동수량의 대부분이 골재 표면에 있기 때문이다. 다시 말해서, 경량골재는 물에 완전히 가라앉혀 흡수시키면 수분이 골재내부로 들어가지만 야적 상태일 때는 그 효과가 작아진다.

반면 보통 골재의 경우는 야적할 때, 골재의 표면과 사이에 수분이 많이 스며들게 되는 것이다. 이와같은 흡수량과 함수비의 특성은 배합의 설계단계에서부터 관리에 이르기까지의 전 과정에 걸쳐 유의해야 할 점이다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 경량 골재는 그 내부구조와 형상 및 표면이 보통 골재와 틀려서 특유한 물리적 특성을 갖는다. 본 연구에서는 이러한 경량 골재의 기본적인 특성이 경량 콘크리트의 제반 특성에 미치는 영향을 각 항목별로 고찰하였다.

#### 4. 경량 콘크리트의 제조 및 배합 특성

##### 4. 1. 경량 콘크리트 배합특성 개요

콘크리트의 성능은 구성재료 각각의 성능과, 이들 재료를 어떻게 배합하는가에 따라 결정된다. 따라서 구성재료중 일부가 기존의 재료특성과 틀릴 때는 그 배합설계 역시 그에 맞게 수정되어야 한다. 콘크리트의 이러한 특성 때문에 경량 콘크리트 제조에 미치는 경량 골재의 영향을 관찰하기 위해서는 골재라는 변수를 제외한 상태에서 콘크리트 성능을 통해 간접적으로 접근해야 한다. 만약 콘크리트의 배합에서 골재라는 변수를 고려하지 않는다면 콘크리트의 강도는 기본적으로 단위 시멘트량에 좌우된다고 볼

수 있다. 이와같이 골재의 영향을 무시했을 때 보통 콘크리트의 경우  $204\text{kg}/\text{cm}^3$ 의 강도를 내기 위해서는 기본적으로  $240 - 400\text{kg}/\text{m}^3$  정도의 단위 시멘트량이 요구되며 강도가  $306\text{kg}/\text{cm}^3$ 이라면 이것이  $330 - 500\text{kg}/\text{m}^3$ 이 된다고 알려져 있다. 그런데 경량 콘크리트가 보통 콘크리트의 강도에 접근하려면 그 단위 시멘트량이 약 2/3까지 증가해야 한다. 따라서 특수한 구조용 경량 콘크리트를 만들기 위해 압축강도를  $615\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 끌어올릴 경우 그 단위시멘트량이 약  $560\text{kg}/\text{m}^3$ 에 이르는 것으로 보고 되고 있다. 이처럼 강도를 높이기 위해 증가시킨 단위시멘트량을 어떻게 관리하는가 하는것이 경량 콘크리트 제조의 관건이 된다. 다음으로 문제되는 것이 콘크리트의 워커빌리티 관리이다. 경량 골재는 특성상 다공질이며 그 흡수량이 일반골재와는 비교가 되지 않을 만큼 크다. 따라서 경량 콘크리트 제조시에는 이로 인한 건조수축과 콘크리트 내부의 수분 이동에 유의하여야 한다. 경량 콘크리트는 이러한 특성때문에 워커빌리티나 Comfacting Factor가 보통 콘크리트보다 낮아지게 된다. 이러한 현상의 또다른 요인은 경량 골재가 상대적으로 가볍기 때문에 중력에 의한 효과가 작다는 것이다. 경량 콘크리트 제조시 무시할 수 없는 변수중의 또 하나는 골재의 형상과 표면의 거친정도이다. 이것은 골재를 작은 크기로 만들기 위해 분쇄하는 과정에서 가장 크게 발생하는 것으로 알려져 있다. 이상에서 살펴본 바를 정리해 본다면 경량 콘크리트 배합시의 문제점은 골재가 약하기 때문에 이를 시멘트 풀로 보강하기 위해 필연적으로 단위 시멘트량이 늘어난다는 것과 내부 구조가 다공질이라서 흡수량이 크다는 것, 또 골재의 제조 공정에서 형상과 표면이 불량해진다는 것이다. 이 중에서 단위 시멘트량은 여러 요인과 복합적으로 상호 연관을 갖는 변수이므로 단편적으로 분석할 수 없다. 따라서 이 절에서는 흡

수량과 골재의 형상이 갖는 문제점과 기타 특성을 살펴보겠다. 우선 흡수량은 콘크리트 배합시 경량 골재를 어떤 처리없이 그냥 사용할 경우 크게 늘어나며 이에따라 워커빌리티가 급격히 감소한다. 이경우 시멘트가 골재 주위에 뭉쳐 공처럼 되는 현상이 발생하여 관리상 크게 문제가 되므로 이를 방지하기 위해 배합수의 일부를 골재와 먼저 섞어서 어느정도의 사전흡수를 유도한 후에 시멘트를 투입하는 방법이 제시되어 있다. 이같은 흡수량 관리의 문제점은 경량 골재의 흡수율과 부피를 정확하게 판단하기 힘들다는데 그 원인이 있다. 다시 말해서 경량 골재는 흡수량이 크고 그 흡수되는 비율이 일정하지 않아서 젖은 상태와 표면건조 상태의 비중을 제시하기가 대단히 어렵다는 것이다. 따라서 경량 콘크리트의 배합수량을 단순히 골재의 함수비에 기준하여 정한다는 것은 무리이다. 이때문에 경량 콘크리트의 배합수량을 결정할 때는 골재가 시간의 경과에 따라 얼마만한 수량을 흡수하는가 하는 양상에 기준하여야 한다. 경량 콘크리트의 경우 다른 변수가 적절히 조정되어 있고 앞서 말한 현상이 고려될 경우 경량 콘크리트의 Comfacting Factor는 0.8 이상, 슬럼프는  $5 - 7.5\text{cm}$  정도가 보통이다. 슬럼프가  $7.5 - 10\text{cm}$ 에 이르게 되면 경량 골재중 큰 것이 시편 상단부로 부양, 재료분리의 원인이 된다. 또 같은 이유로 진동다짐에 의한 재료분리 현상 역시 보통 콘크리트의 경우보다 심하다. 이처럼 경량 골재는 흡수량에 따른 배합설계상의 불안정함이 있기 때문에 사전처리를 통해 골재의 성질을 안정시킬 필요가 있다. 이를 위해 앞서 말한바와 같이 배합전에 일정량의 수량을 사전 흡수시킨 경우 단위 시멘트량과 워커빌리티가 동일하다면 보통 콘크리트의 강도에 비해  $5 - 10\%$  정도만 떨어진다. 동시에 내구성과 내동해성등이 개선되는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 사전에 수분에 노출 시

킨 골재를 사용할 경우 한 가지 흥미로운 점은 이 경우가 마른 골재를 그냥 배합에 사용한 경우보다 전체 흡수량은 오히려 더 크다는 것이다. 이같은 현상은 골재를 미리 수분에 노출시킬 경우(Pre-saturating), 그 수분이 단순히 골재 표면에 묻어있는 것이 아니라 표면의 공극에서 일종의 매끄러운 수막을 형성하여 더 많은 물을 빨아들이기 때문에 발생하는 것으로 짐작된다. 반대로 마른 골재를 그냥 사용할 경우, 표면에서는 급속한 흡수가 일어나지만 골재 내부는 마른상태로 남아있게 되어 골재의 성질이 나빠지는 것이다. 이상에서 살펴본 바와 같이 경량 콘크리트의 배합에서 가장 중요한 점이 흡수량의 관리이다. 그러나 현재 ACI에는 경량 콘크리트에서의 골재 흡수량이나 상대비중을 사전에 결정해야 한다는 규정이 없고 흡수조건에 대해서도 따로 명기된 바는 없다. 다시 말해서 경량 콘크리트의 배합설계를 보통 콘크리트에 기준하여 구성하게 되어있다. 하지만 경량 콘크리트를 좀 더 효율적으로 활용하기 위해서는 이러한 흡수율에 대한 세심한 주의가 요구된다.

다음으로 경량 세골재 사용시의 문제점을 살펴보면 우선 이 경우는 세골재를 만들기 위한 공정에서 골재의 형상과 표면이 나빠지고 경량 세골재 자체의 비중 또한 상대적으로 크며, 흡수율 역시 조골재보다 커서 그 양상이 바람직하지 못하다. 따라서 경량 세골재를 천연산 모래로 대체하여 콘크리트의 성질을 개선하려는 연구가 활발하고 그 성과 또한 다양한 편인데, 세골재 대체의 가장 큰 효과로는 워커빌리티의 개선과 배합수량 및 요구단위 시멘트량의 감소를 들 수 있다. 이와 더불어 블리딩과 재료분리현상 및 건조수축은 감소하고 탄성계수는 약간 증가하는 등의 바람직한 효과를 얻을 수 있다. 따라서 세골재를 천연산으로 대체하는 것이 여러면에서 효과적임을 알 수 있다. 그러나 이경우 콘크리트 단위 중량이

증가하고 Thermal Conductivity는 저하되는 등의 불리함도 아울러 발생하게되므로 적정 수준의 대체량을 구하는 것이 중요하다. 경량 콘크리트의 배합에 있어서 흡수율관리외 세골재 대체량효과 다음으로 큰 변수는 공기량 관리이다. 경량 콘크리트는 공기량이 보통 콘크리트보다 커서 최대 골재치수가 19mm인 경우에 4-8%, 9.5mm인 경우에는 5-9%에 이르는 것으로 알려져 있다. 이러한 공기량은 1%가 늘어나면 거의 10.2kg/cm<sup>3</sup>의 강도 저하를 초래하므로 배합시 반드시 고려되어야 한다.

이상에서 살펴본 유의점들이 무근 콘크리트에 적용되는 것이라면 철근 콘크리트에서 유의할 점은 철근의 부식방지이다. 경량 콘크리트는 부식의 발생요인인 염화 깊이가 보통 콘크리트에 비해 약 2배에 이르는 것으로 알려져 있다. 따라서 경량 콘크리트에 배근을 할때는 보통 콘크리트에서보다 콘크리트 두께를 좀 더 두텁게 하고 철근은 코팅하는 것이 바람직하다. 특히, 경량 골재 중에서 Clinker같은 경우는 골재속의 염분에 의해서도 부식이 발생한다. 이때문에 철근 콘크리트에서는 이를 사용하지 않는 것이 일반적이다.

#### 4. 2. 경량 콘크리트의 배합과 운송

경량 콘크리트를 취급하는데 있어서 따로 규정된 배합. 운송법은 없으며 ASTM C 4에서 볼 수 있듯이 경량 콘크리트 역시 보통콘크리트와 같은 방법으로 다루게 된다. 그러나, 골재의 흡수율을 조절하여 콘크리트의 성질을 안정시키기 위해 다음과 같은 두 가지 방안이 제시되어 있다.

우선 첫번째 방법은 마른 상태의 경량 골재를 사용하여 콘크리트를 배합한후 타설직전에 믹서의 회전 속도를 조정하는 것이다. 이 경우 골재가 흡수하는 수량이 상대적으로 낮아지며 콘크리트 배합전에 골재를 미리 적신다든지 하는 과정이 불필요하게 된



다. 이 방법에 사용되는 골재는 로속에서 건조된 상태에서 바로 배합에 들어가는 경우도 있고, 또, 어느 정도의 수분이 함유된 상태인 경우도 있다. 이처럼 이 방법은 골재의 흡수량을 무시하고 바로 배합에 들어가게 되므로 슬럼프 조절을 위해서 배합수량을 늘리게 된다. 다시 말해서 이 방안은 타설 직후에는 배합수량의 과다로 인해 슬럼프값이 대단히 크지만 곧이어 발생하는 골재의 흡수를 통해 배합수량이 감소되면서 적정한 슬럼프값을 얻을 수 있다는 가정을 바탕으로 고안된 것이다. 이 방법은 대단히 간편한 반면 배합설계의 정도가 상당히 떨어지는 단점이 있다. 다음 방법은 경량 골재를 미리 수분에 노출시켜 가능한 균일한 함수비를 갖게 하여 배합에 들어가거나 골재와 일정량의 배합수를 믹서에서 미리 섞은 후 다른 재료를 넣는 것이다. 이 방법은 레미콘 운송중의 슬럼프 감소를 최소화하기 위해 고안된 것이다. 이 경우 배합전에 골재와 미리 섞게되는 수량은 전체 배합수량의 1/2이상이다. 이상에서 살펴본 두 방법은 각각의 장단점이 있으므로 시공상의 여건에 맞추어 선정되어야 한다.

#### 4. 3 경량 콘크리트의 타설

타설 조건에 있어서 경량 콘크리트와 보통 콘크리트간에 큰 차이는 없다. 하지만 보통 콘크리트에 비해 경량 콘크리트 제작시에 가장 유의해야 할 점은 조골재와 시멘트 풀의 분리 현상이다. 이를 방지하고 좋은 품질의 경량 콘크리트를 제작하기 위한 기본적인 조건은 다음과 같은데 이는 보통 콘크리트의 경우와 큰 차이가 없다.

- (a) 배합의 유동성이 확보되는 한도내에서 단위수량을 최대한 낮춘다.
- (b) 이러한 콘크리트를 관리, 타설함에 있어서 신속을 기한다.
- (c) 적절한 경화가 이루어지도록 한다.
- (d) 관리 작업의 질을 높인다.

이상과 같은 조건을 만족시키는 경량 콘크리트는 보통 콘크리트에 비해 오히려 타설이 용이한 편이다. 타설시 유의할 점은 앞서 말했듯이 진동다짐이 지나칠 경우 재료 분리현상이 커진다는 점이다. 보통 콘크리트의 경우 시멘트 풀이 상대적으로 비중이 크지만 재료간의 중량이 균형을 맞추어 시멘트 풀이 상단부로 떠올라 마감에 쓰이게된다. 그러나 경량 콘크리트의 경우는 골재가 시멘트 풀에 비해 대단히 가벼워서 상단부로 떠올라 재료분리현상의 원인이 된다. 이상에서 살펴본 바를 통해 경량 콘크리트를 타설할 때 주의해야 할 점은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (a) 재료 분리는 다음과 같은 조건을 기준으로 방지한다.
  1. 잘 구성되고 양호한 배합을 유도한다.
  2. 될수 있는한 슬럼프를 낮춘다.
  3. 과다한 진동 다짐을 피한다.
- (b) 마감시간을 합리적으로 결정한다.
- (c) 표면으로 떠오른 블리딩 수를 완전히 제거한 후 마감한다.
- (d) 양생에 유의한다.

### 5. 경량 콘크리트의 강도 특성

#### 5. 1. 압축 강도 특성

강도 특성에서 경량 콘크리트와 보통 콘크리트의 가장 큰 차이점은 골재의 종류에 따라 콘크리트의 강도가 달라진다는 것이다. 다시 말해서 단위시멘트량과 슬럼프 값 같은 변수를 고정하더라도 골재의 종류에 따라 강도가 크게 달라진다는 것이다. 구조용 콘크리트라면 그 강도가 보통 210-280kg/cm<sup>2</sup>이며, 몇몇 경우는 420kg/cm<sup>2</sup> 내외이거나 혹은 그 이상까지 요구되는데 경량 콘크리트의 경우에는 상당한 종류의 골재가 "구조용"으로 분류되어 있고 또, 몇몇 종류는 "초 고강도"용으로 사용이 가능하지만

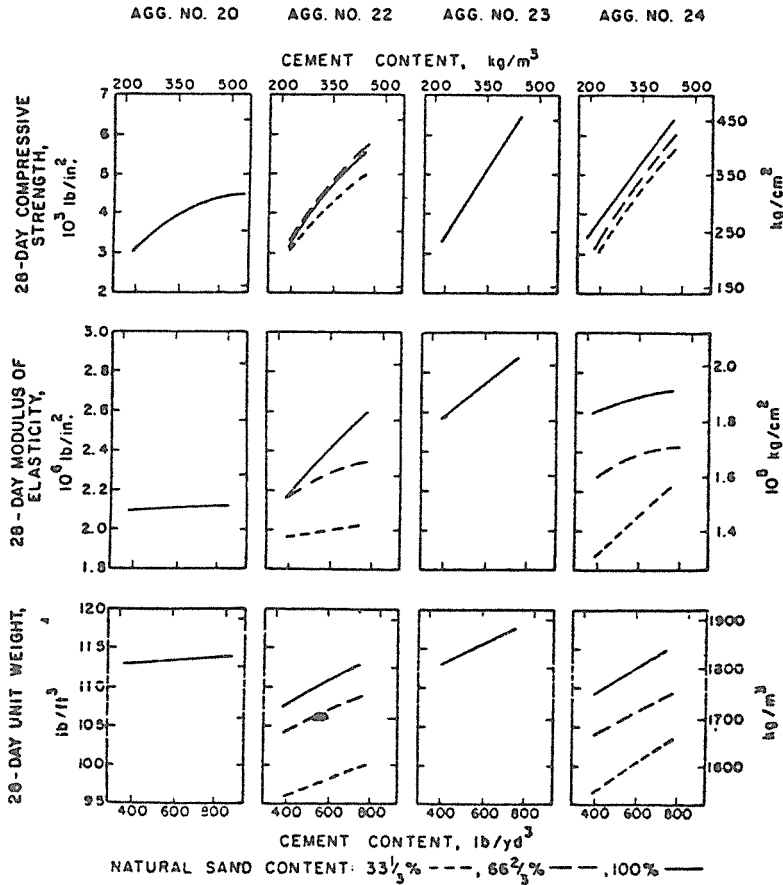


그림 2. 단위 시멘트량, 최대골재치수, 세골재 대체량에 따른 압축강도 발현 및 탄성 계수, 단위중량 변화 양상

모든 골재가 다 고강도 발현에 적합하다고는 볼 수 없다. 따라서 인공 경량 콘크리트의 경우, 대부분이 최대 골재 치수를 줄임으로써 고강도 콘크리트로 사용하게 되는데 이때의 최대 골재 치수는 대략 13mm 이하로 알려져 있다. 아래 그림2는 단위 시멘트량과 최대 골재치수 및 세골재 대체량을 변화시키고 이에 따른 압축강도 발현현상과 탄성계수 및 단위 중량변화를 도시한 것이다.

이상과 같이 최대 골재치수를 제한함으로써 강도 증진효과를 노리는 방안외에 세 골재를 천연산으로 대체하는 방안이 있다. 대

부분의 경우 세골재를 천연산으로 많이 대체할수록 압축 강도 역시 커지는 경향을 보이는데 이러한 양상은 골재의 형상이 비교적 나쁜 경우에도 별 영향을 받지 않는다. 그러나 몇몇 경우에는 세골재를 대체한 효과가 거의 나타나지 않기도 한다. 프리캐스팅 플랜트와 같은 경우에는 단시간에 고강도를 발현시키는 것이 경제적으로 유리하다. 따라서 이러한 제품 생산에 있어서는 위의 두 방안을 기본적으로 채택하고 그 외에 조강 시멘트 사용과 증기양생을 통해 소기의 효과를 얻고자하는 것이 일반적이다.

이러한 공정을 통해 생산된 경량 콘크리트는 보통 콘크리트보다 압축강도가 우수한 경우도 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 배합 변수를 잘 조정하고 몇가지 문제점에 유의해서 경량 콘크리트를 제작한다면 충분한 압축강도를 얻을 수 있다.

## 5. 2. 인장 강도 특성

경량 콘크리트의 인장강도는 압축강도에 서와 같은 이유, 즉 골재의 강도가 낮아서 시멘트 풀 파괴 이전에 골재의 파괴가 유도되는 현상 때문에 보통 콘크리트의 인장강도에 비해 상대적으로 그 양상이 불안정하

표1. 경량 콘크리트 인장강도 실험의 배합변수

Aggr egate No.	percent replac- ement of fines with sand	Total fine aggregate percent by volume	Quantities per cu yd of concrete					Percent air Roll A Meter	Plastic unit weight lb per cu ft	Slump in
			Water lb	Cement lb	Air dry aggregate lb					
					Coarse	Fine	Sand			
6	0.	0.4	479	613	572	1300	0	5.7	109.7	0.5
6	100.	53.4	386	447	773	0	1609	5.7	119.1	1.0
7	0.	59.9	472	575	610	1127	0	6.6	103.1	1.5
7	33.3	58.6	435	522	685	801	525	6.5	109.9	1.0
7	66.3	55.9	394	455	759	397	1041	6.4	112.8	2.0
7	100.	54.3	359	437	850	0	1639	5.9	121.7	3.0
14	0.	56.0	422	389	691	1112	0	5.4	96.8	2.3
14	33.3	53.0	380	381	757	720	552	5.5	103.3	2.0
14	66.7	50.0	352	380	827	349	1068	5.3	110.2	1.5
14	100.	47.0	335	372	888	0	1526	5.3	115.5	1.8
15	0.	58.5	487	545	514	1036	0	5.4	95.6	2.0
15	100.	52.8	366	433	664	0	1533	6.7	111.5	2.3
16	0.	57.2	464	416	589	1017	0	5.8	92.0	1.8
16	33.3	54.5	408	400	664	686	503	6.2	98.6	1.5
16	66.7	51.8	357	375	732	339	995	6.7	103.6	2.0
16	100.	49.3	318	352	803	0	1480	6.6	109.4	2.8
18	0.	62.4	421	472	656	1279	0	6.0	104.8	1.5
18	33.3	60.7	392	432	717	871	591	6.2	111.2	1.5
18	66.7	58.9	365	405	773	436	1179	6.1	117.0	1.3
18	100.	55.9	338	365	844	0	1709	6.3	120.6	1.0
19	0.	71.7	518	556	468	1333	0	6.3	106.5	1.5
19	33.3	69.3	478	505	551	932	594	6.3	113.3	1.8
19	66.7	67.2	430	467	626	479	1220	6.3	119.3	2.0
19	100.	64.7	393	440	704	0	1841	6.3	125.1	2.5
8	—	48.5	291	338	1671	—	1575	5.6	143.5	2.5

(a) Nominal 3000 psi concrete

Aggregate No.	percent replacement of fines with sand	Total fine aggregate percent by volume	Quantities per cu yd of concrete					Percent air Roll A Meter	Plastic unit weight lb per cu ft	Slump in
			Water lb	Cement lb	Air dry aggregate lb					
					Coarse	Fine	Sand			
6	100.	50.7	387	659	766	0	1432	5.7	120.2	4.0
7	0.	55.9	467	841	617	968	0	6.2	107.2	2.8
7	33.3	54.4	433	805	682	671	440	5.9	112.2	3.0
7	66.7	51.8	394	747	776	343	900	5.6	117.0	2.3
7	100.	50.3	352	693	830	0	1363	5.9	119.9	2.3
14	0.	54.0	383	544	706	1048	0	6.2	99.3	1.5
14	33.3	51.0	357	534	759	666	510	6.0	104.6	2.0
14	66.7	48.0	352	531	822	320	981	5.1	111.3	2.5
14	100.	45.0	325	527	885	0	1405	5.6	116.4	2.8
15	0.	53.5	475	898	505	830	0	5.7	100.3	2.8
15	100.	48.2	372	675	694	0	1333	5.9	113.8	2.5
16	0.	53.7	443	628	598	897	0	5.9	95.0	2.5
16	33.3	51.2	404	596	659	602	440	5.9	100.0	3.0
16	66.7	49.2	361	574	737	308	903	5.9	106.8	3.0
16	100.	46.7	315	538	798	0	1326	6.4	110.2	2.3
18	0.	59.3	424	696	660	1132	0	5.5	107.9	2.5
18	33.3	58.5	388	617	712	787	533	5.7	112.5	2.0
18	66.7	54.0	359	581	813	377	1018	6.0	116.6	2.0
18	100.	51.0	336	560	893	0	1486	6.3	121.3	2.0
19	0.	68.2	535	892	465	1116	0	5.2	111.4	2.5
19	33.5	65.3	481	815	547	768	490	5.8	114.8	2.8
19	66.7	63.5	432	742	626	406	1037	5.7	120.1	2.3
19	100.	61.5	395	677	705	0	1607	6.0	125.3	2.0
8	—	46.9	277	441	1657	—	1463	5.5	142.1	2.3

(b) Nominal 5000 psi concrete

다. 또, 경량 콘크리트는 골재의 팽창이 상대적으로 커서 어느정도 건조수축을 줄여주는 효과가 있음에도 불구하고 기본적인 골재 흡수량이 큰 까닭에 보통 콘크리트에 비해 건조 수축이 큰데 이것이 인장강도 발현 양상의 불안정한 또 다른 이유이다. 따라서 이러한 인장강도 발현 양상의 불안정함을 감소시키고 필요한 정도의 인장강도를 확보하기 위해 세골재를 천연산으로 대체하는

방안이 연구되어 왔다. 이러한 세골재 대체 효과는 주로 시공성과 내구성 증진에 그 목적이 있지만 강도 발현에 있어서도 상당한 효과가 있다. 특히 강도 특성에서 이 효과를 고려할때 가장 주목할만한 점은 이 효과가 양생조건에 따라 상당히 틀린 양상을 보인다는 것이다. 이처럼 양생조건에 따라 틀려지는 강도발현 양상은 압축강도에서보다는 인장강도에서 두드러진다. 따라서 경량

콘크리트의 인장강도 특성을 살펴보기 위해서는 반드시 양생조건과 세골재 대체효과를 고려해야 한다. 이러한 특성을 고찰한 연구가 Donald 등에 의해 수행된 바 있는데 이 실험에서는 몇가지 기본적인 변수를 고정하

여 경량 콘크리트의 양생조건과 세골재 대체 효과에 따른 경량 콘크리트의 인장 강도 특성을 제시하고 있다. 우선 이 실험에서는 공기량을 6%, 슬럼프를 1.87-3.75cm로 고정하고 압축강도 역시 210, 350kg/cm<sup>2</sup>의 두

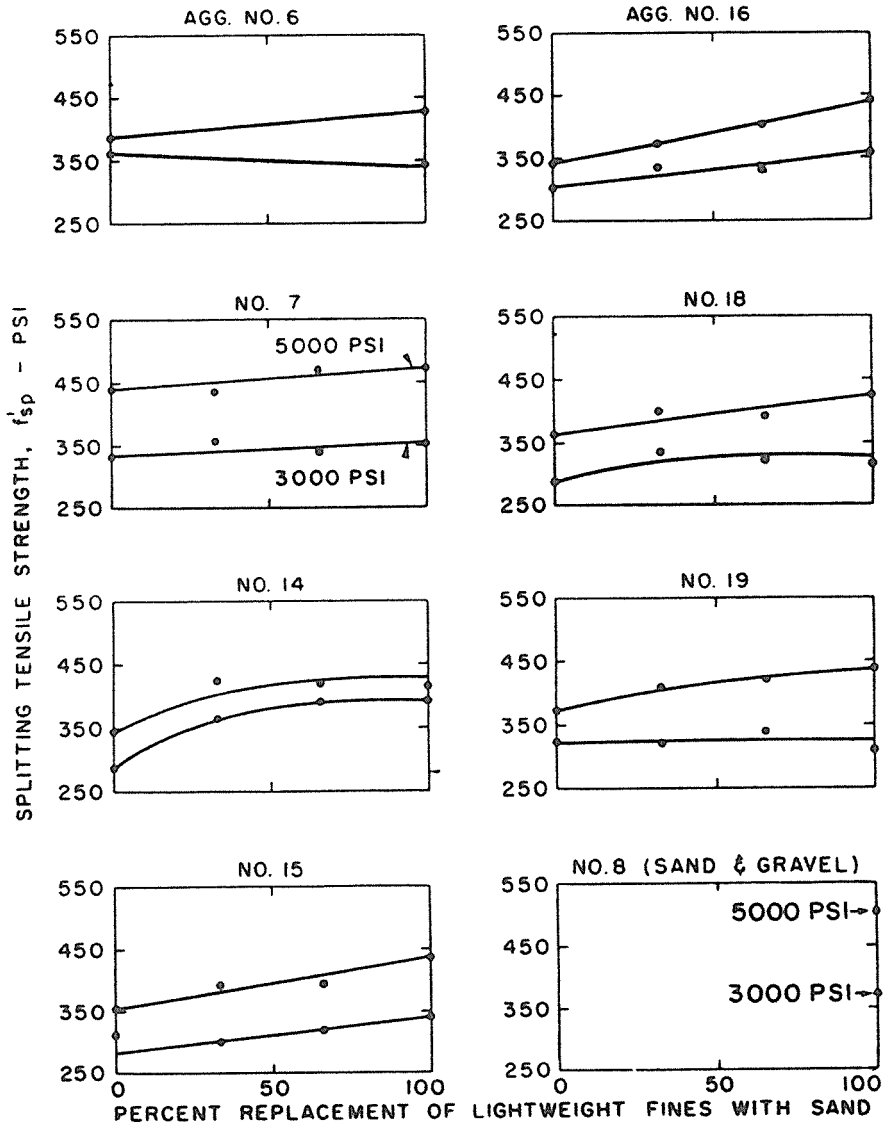


그림 3. 기건양생시의 경량콘크리트 인장강도 발현양상

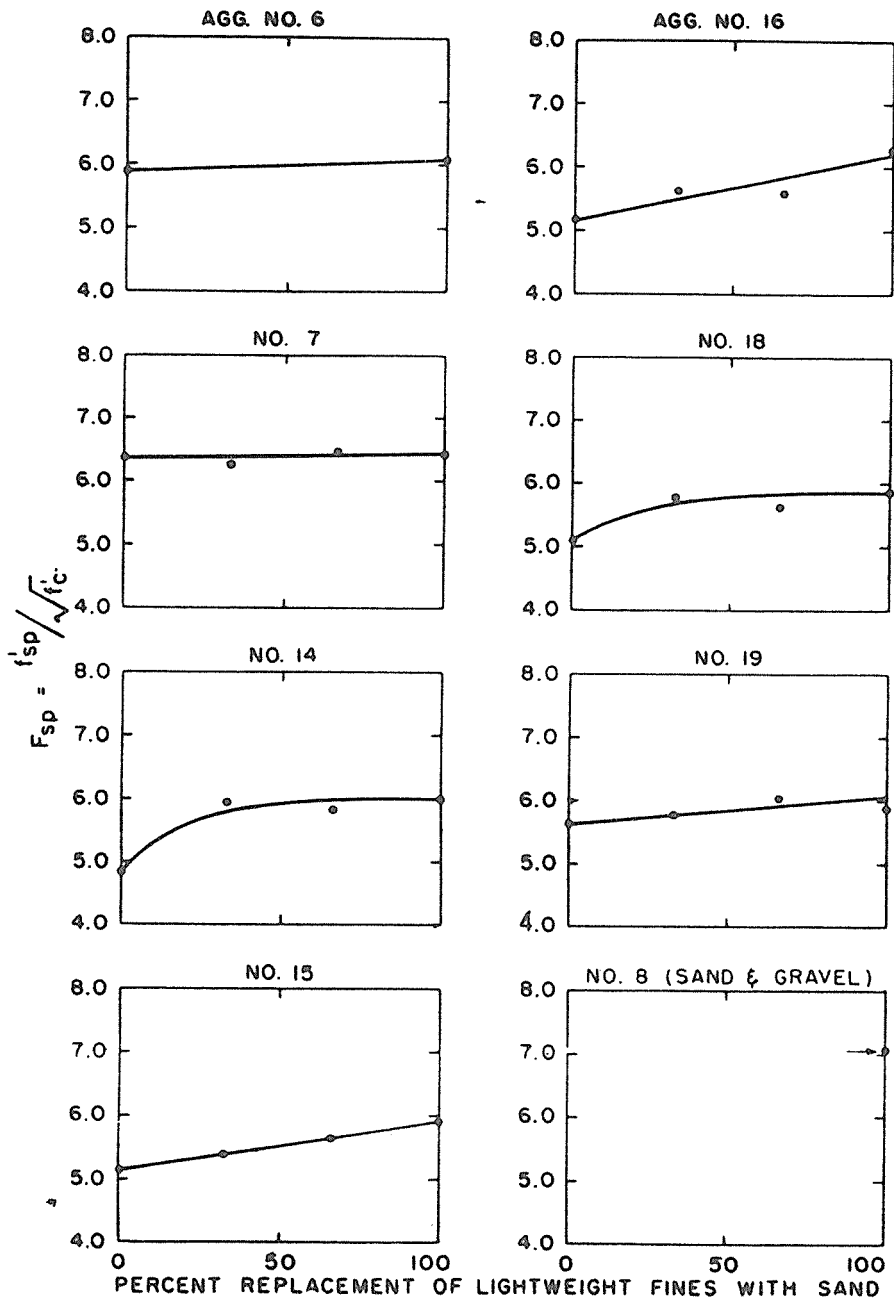


그림 4. 기건양생시의 경량콘크리트 인장강도비의 변화

종류로 고정하였다. 실험에 사용된 골재는 고로 슬래그와 점토, 혈암등이며 이들 골재를 회전로 방식과 소성방식의 두 방법으로 나누어 가공하였다. 여기에 보통 콘크리트와의 비교를 위해 엘진 콘크리트(표준 골재를 사용한 콘크리트)의 경우를 추가하였다. 세골재를 천연산으로 대체한 양은 0, 33, 66, 100%로 나누었고 양생조건은 전 시편을 7일간 수중양생한 후 두 그룹으로 나누

어 한 그룹은 습윤상태에서, 나머지는 기건 상태에서 각각 21일간 양생을 실시하였다. 표1은 위 실험의 배합변수를 보인 것이다.

실험결과 습윤양생의 경우 건조 수축이 거의 완전히 방지된 상태에서 천연산 세골재 대체량이 늘어날수록 강도 역시 증진되었지만 그 정도가 무시할 수 있을만큼 작음을 알 수 있었다. 또 세골재 전체를 천연산으로 대체했을 경우의 인장강도는 보통 콘크리트의 경우와 큰 차이가 없었다. 예컨대 압축강도가 210kg/cm<sup>2</sup> 경우 보통 콘크리트의 인장강도가 24kg/cm<sup>2</sup>였고 세골재를 전부 천연산으로 대체한 경우의 인장강도는 25kg/cm<sup>2</sup>였다. 마찬가지로 압축강도가 350kg/cm<sup>2</sup>인 경우 보통 콘크리트가 32kg/cm<sup>2</sup>의 인장강도를 나타낸 반면 경량 콘크리트의 경우 33kg/cm<sup>2</sup>로서 습윤양생시 경량 콘크리트의 인장강도가 약간 더 큼을 알 수 있다. 기건 양생의 경우는 습윤 양생의 경우와 달리 전반적인 인장강도와 전단 저항력이 상당히 떨

표2. 압축강도와 세골재 대체량 및 양생 조건의 변화에 따른 인장강도비

압축강도 세골재 대체량정도	210 kg/cm <sup>2</sup>	350 kg/cm <sup>2</sup>
0%	0.81-1.02	0.67-0.83
100%	0.94-1.04	0.78-0.99

(기건양생/습윤양생)인장강도

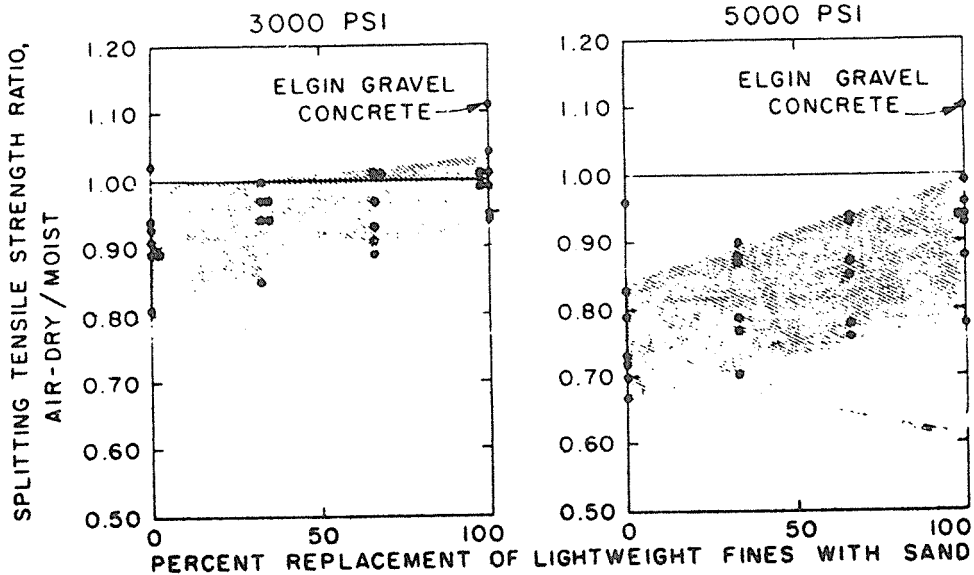


그림 5. 경량콘크리트 인장강도에 미치는 양생조건의 영향.

어지는데 이 경우에는 세골재 대체의 효과가 상당히 커서 압축강도가  $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 경우 세골재를 완전히 천연산으로 대체했을 때 보통 콘크리트에 비해 1-6%의 인장강도 저하를 보인 반면 모든 골재를 사용했을 때는 6-19%정도의 강도저하를 나타냈다. 또, 압축강도가  $350\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 경우 세골재를 전부 천연산으로 대체했을 때 약 7%의 인장강도 저하를 관찰할 수 있었다. 이처럼 기건양생의 경우 세골재 대체 효과가 상당히 두드러지지만 그 강도 증진 양상이 선형적이지는 못하다. 그림3은 기건양생시의 인장강도 발현양상을 골재종류별, 세골재 대체량별로 나타낸 것이며, 또 그림4는 인장강도를 압축강도에 대한 비로 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 압축강도의 차이에 따른 인장강도 발현 양상 역시 어떤 전형적인 관계를 나타내지는 않았다. 습윤양생과 기건양생을 직접 비교해보면 강도와 양생조건, 그리고 세골재 대체효과를 간접적으로 추정해 볼 수 있는데 표로 나타내면 표2와 같다. 이를 도시하면 그림5와 같다. 여기서 알 수 있듯이 기건 양생으로 인한 인장강도 저하는 압축강도가 클수록 심하다는 것이다. 따라서 상당히 높은 강도가 요구될 때는 습윤양생을 실시하고 세골재를 될 수 있는 한 천연산으로 대체하는 것이 바람직하다.

이상에서 살펴본 바와 같이 경량 콘크리트는 세골재 대체량이나 양생조건, 압축강도 등에 따라 인장강도가 상당히 틀려지고 이와 별도로 골재의 성능에 따라 다른 양상을 보이기도 한다. 그래서 회전로 방식으로 제조한 팽창 혈압 골재같은 경우에는 천연 골재를 사용한 콘크리트보다 인장강도가 우수하고 또 세골재를 대체한 효과가 극히 미소하다. 이처럼 경량 콘크리트의 인장강도 특성은 여러 변수와 상호 연관성을 가지므로 제작전에 충분한 검토와 분석이 필요하다.

## 6. 경량 콘크리트의 내구 특성과 장기 변형특성

콘크리트의 질을 결정하는데 있어서 강도와 함께 중요한 측면이 내구특성이라 할 수 있다. 경량 콘크리트는 제작의 변수가 많을 뿐만 아니라 개발 목적 자체가 특수한 용도에 적용하기 위한 것이기 때문에 내구성 확보에 더 많은 주의를 요한다. 이 절에서는 경량 콘크리트의 동결 융해 저항성과 건조수축 및 크리프 등의 특성을 통해 경량 콘크리트의 내구특성과 장기 변형 특성을 살펴보기로 한다.

### 6. 1. 경량콘크리트의 동결 융해 특성

콘크리트의 동결 융해 특성은 일반적인 용도라면 크게 문제 될 것이 없지만 그렇지 않을 경우에는 콘크리트의 내구성을 좌우하는 관건이 된다. 경량 콘크리트의 적용 대상이 고층 건물인 경우 동결 융해 저항성을 심각하게 고려할 필요는 없지만 교량 상판이나 외기에 노출된 평판 작업등에서는 반드시 주의를 기울여야 하는 사항이다. 동결 융해 저항성을 포함한 내구특성은 시멘트 풀의 성능에 따라 크게 좌우된다. 시멘트 풀은 단위 수량등의 변수에 영향을 받고 이러한 변수들은 골재의 비중 및 성능들과 상호 연관성을 갖게 된다. 따라서 골재의 비중이나 성능이 변할 경우 콘크리트의 내구 특성 역시 변하게 된다. 이러한 동결 융해 특성을 세골재 대체효과를 통해 고찰한 연구가 Donald에 의해 수행된 바 있는데 그 실험 자료를 중심으로 경량콘크리트의 동결 융해 특성을 살펴보기로 한다. 이 실험의 변수는 앞서 언급한 인장강도 특성 실험과 동일하다. 그림6은 경량 콘크리트에 있어서 세골재 대체량의 변화에 따라 달라지는 동



결 용해시 콘크리트의 중량감소량을 압축강도별로 도시한 것인데, 사용된 경량 골재는 팽창 혈암을 회전로 방식으로 가공한 것이다. 그림에서 알수 있듯이 압축강도가 210kg/cm<sup>2</sup>인 경우, 세골재 대체량이 커질수록 콘크리트의 중량 감소경향은 둔화된다. 그러나 그 둔화되는 정도는 천연산 세골재가 상대적으로 비중이 크기때문에 생기는 단위중량 증가보다 적게 나타난다. 그 이유는 세골재를 천연산으로 대체함으로써 단위 시멘트량과 단위 수량이 감소하는 현상 때문이며 바로 이것이 콘크리트 내구성 증진의 변수가 된다. 이 실험에서는 모든 골

재가 경량일때의 단위 시멘트량은 223kg/m<sup>3</sup>이고 세골재를 전부 천연산으로 대체했을때의 단위 시멘트량 감소는 약 11kg/m<sup>3</sup>이다. 또 이러한 단위시멘트량의 감소 때문에 단위 수량 역시 감소하는데 그 수량은 59kg/m<sup>3</sup>이었다. 이처럼 단위 수량이 줄어들므로 해서 전체적인 내구성이 증진되는 것이다. 반면 압축강도 350kg/cm<sup>2</sup>인 경우 세골재 대체에 의한 효과는 무시할 수 있을 정도로 작다. 이러한 콘크리트 단위중량 감소와 단위 수량의 상호 관계를 그림으로 나타내면 그림7과 같다.

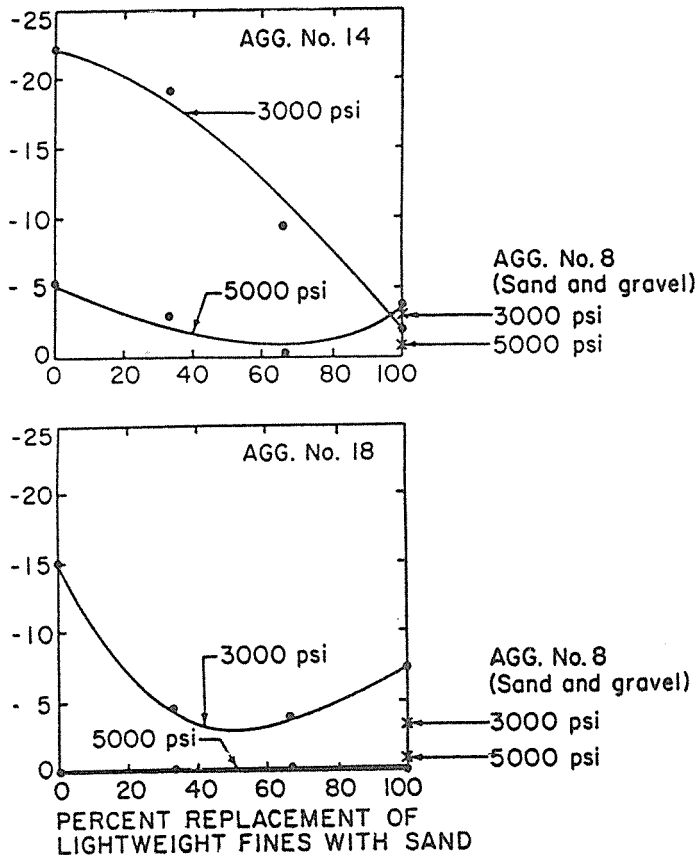


그림 6. 동결 용해를 받는 경량콘크리트의 중량변화 양상

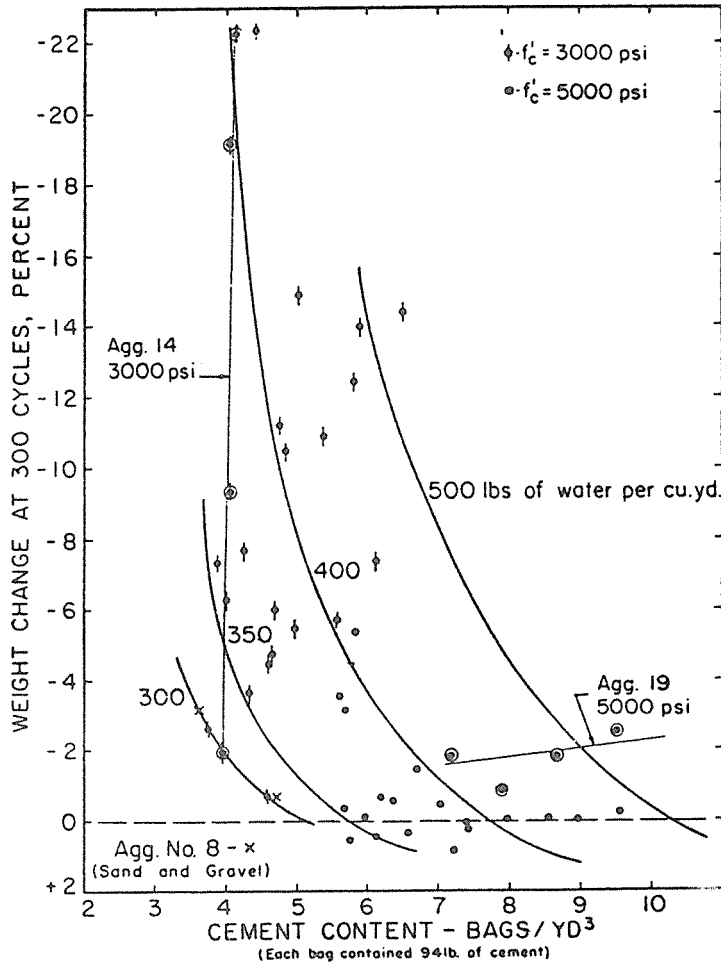


그림 7. 경량콘크리트의 동결융해 저항성에 영향을 미치는 단위수량 및 단위시멘트량과 콘크리트 중량변화와의 상관 관계

위 그림에서의 곡선은 콘크리트의 컨시스턴스를 악화시키지 않기 위해 요구되는 단위 수량이다. 또 Y축은 콘크리트의 단위중량 감소효과를, X축은 콘크리트 제작에 필요한 단위시멘트량을 나타낸다. 예컨대 여기서 콘크리트의 컨시스턴스 확보에 필요한 단위수량이  $237\text{kg}/\text{m}^3$ 이라면 이때의 단위시멘트량이  $335\text{kg}/\text{m}^3$  정도가 되면 중량감소를 우려할 필요가 없는 배합이라는 것을 뜻한다. 이상으로 세골재를 천연산으로 대체하

였을때의 콘크리트 제작변수의 변동과 그에 따른 내구특성을 살펴보았는데 이러한 내구특성을 좀 더 일반화하기 위해 도입되는 것이 내구성 지수(Durability Factor)이며, 내구성 지수 DF는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$DF = PN/M$$

여기서 P는 N에서의 상대 동탄성계수이고 N은 300사이클, 혹은 P가 60%에 이를 때의 사이클을 나타내며 M은 300 사이클이

다. 다음 표3은 이러한 내구성 지수를 강도별, 콘크리트 종류별로 평균하여 나타낸 것이다.

이상의 결과를 정리하면 우선 비교적 낮은 강도의 콘크리트일 경우 세골재를 천연산으로 대체하는 것이 동결 용해 저항성을 증진시킨다. 이경우 경량 조골재량은 증가하고 세골재의 전체 부피는 감소하며 단위수량과 단위시멘트량 역시 감소된다. 여기서, 단위 시멘트량의 감소가 어느정도 불리한 점으로 작용하지만 전체적인 내구성은

증진된다. 반면 상당히 높은 강도의 콘크리트의 경우에는 세골재 대체에 따른 콘크리트의 단위 중량 변화도 심하지 않고 내구성 증진효과 역시 크지 않다. 그러나 비교적 강도가 큰 콘크리트에서도 세골재 대체는 여러면에서 바람직하다. 따라서 경량 콘크리트의 내구성을 증진시키는 방안은 세골재를 대체하거나 단위 시멘트량을 늘리는 방안으로 압축된다. 그러나 여기서 반드시 짚고 넘어가야 할 사항은 경량 콘크리트의 용도이다. 요구되는 강도를 얻기 위해 전체

표3. 경량 콘크리트의 강도별 내구성 변화.

Aggregate No	Percent replacement of fines with sand	fc' psi	Percent air Roll A Menter	Expansion at 300 cycles percent	Change in weight at 300 cycles percent	Relative dynamic E at 300 cycles percent	Durability factor (ASTMC290)
6	0.	2950	5.7	0.186(175)	-14.4(150)	50(250)	50
6	100.	3060	5.7	0.060	-11.2(200)	79	79
6	100.	5020	5.7	0.016	-0.4	95	95
7	0.	2760	6.6	0.291(175)	- 7.4(250)	29(200)	40
7	33.3	2890	6.5	0.162(225)	- 5.7(275)	46(250)	50
7	66.7	2700	6.4	0.118(250)	-10.5(200)	60(275)	55
7	100.	2930	5.9	0.034	-4.7	89	89
7	0.	4750	6.2	0.034	0.0	95	95
7	33.3	5030	5.9	0.031	0.0	94	94
7	66.7	5240	5.6	0.028	0.0	96	96
7	100.	5290	5.9	0.020	+0.1	97	97
14	0.	2760	5.4	0.058	-22.3(150)	89	89
14	33.3	2890	5.5	0.059	-19.2(175)	89	89
14	66.7	3700	5.3	0.040	- 9.3(225)	92	92
14	100.	3500	5.3	0.019	-1.9	84	84
14	0.	5770	6.2	0.015	-5.3(275)	80	80
14	33.3	5860	6.0	0.019	-3.1	87	87
14	66.7	6000	5.1	0.020	-0.3	91	91
14	100.	5470	5.6	0.029	-3.5	92	92
15	0.	3210	5.4	0.032	-12.4(175)	85	85
15	100.	3340	6.7	0.016	-0.7	93	93
15	0.	5230	5.7	0.020	-0.2	99	99
15	100.	5280	5.9	0.020	+0.9	98	98

Aggregate No	Percent replacement of fines with sand	fc' psi	Percent air Roll A Menter	Expansion at 300 cycles percent	Relative dynamic E at 300 cycles percent	Change in weight at 300 cycles percent	Durability factor (ASTMC290)
16	0.	2550	5.8	0.047	-22.4(125)	80	80
16	33.3	3010	6.2	0.020	- 7.7(250)	87	87
16	66.7	3150	6.7	0.016	- 6.3(250)	91	91
16	100.	2980	6.6	0.016	-2.6	92	92
16	0.	5130	5.9	0.014	-1.4	93	93
16	33.3	4870	5.9	0.016	-0.5	94	94
16	66.7	5450	5.9	0.010	+0.5	97	97
16	100.	5040	6.4	0.020	+0.6	99	99
18	0.	2860	6.0	0.083	-14.9(175)	82	82
18	33.3	3090	6.2	0.040	-4.4	86	86
18	66.7	2980	6.1	0.028	-3.6	92	92
18	100.	2760	6.3	0.021	- 7.3(225)	91	91
18	0.	5250	5.5	0.020	+0.3	97	97
18	33.3	4990	5.7	0.018	+0.4	97	97
18	66.7	4990	6.0	0.024	-0.6	97	97
18	100.	5010	6.3	0.021	-0.1	97	97
19	0.	3050	6.3	0.046	-14.0(100)	76	76
19	33.3	2990	6.3	0.040	-10.9(125)	79	79
19	66.7	3010	6.3	0.024	-5.4(250)	86	86
19	100.	2910	6.3	0.020	-6.0(250)	93	93
19	0.	4730	5.2	0.031	-2.5	89	89
19	33.3	4950	5.8	0.026	-1.8	95	95
19	66.7	4790	5.7	0.028	-0.8	92	92
19	100.	5030	6.0	0.026	-1.8	96	96
8	-	3040	5.6	0.033	-3.2	88	88
8	-	4710	5.5	0.032	-0.7	98	98

All tests terminated after 300 cycles. Numbers in parentheses are at which assumed failure criterion was exceeded

세골재를 천연산으로 대체했을 경우 콘크리트의 단위중량은 약 263kg/m<sup>3</sup> 정도 증가하는 반면 세골재를 고정시키고 단위 시멘트량을 늘려서 압축강도를 증진시킬 경우의 콘크리트 단위중량 증가는 단지 15 - 46kg/m<sup>3</sup> 정도에 불과하다. 따라서 동결 용해를 반복해서 받는 환경에 경량 콘크리트를 적용할 경우에는 콘크리트 단위 중량, 시공여건, 경제

성, 구조물의 용도에 따른 내구성 정도등을 모두 고려하여 제작 변수를 결정해야 한다.

## 6. 2. 경량 콘크리트의 크리프와 건조수축

보통 콘크리트에서와 마찬가지로 크리프와 건조수축 특성은 경량 콘크리트 내구성에 많은 영향을 미친다. 특히 경량 콘크리

트는 골재의 특성상 함수비가 커서 크리프와 건조 수축이 상대적으로 큰 편이며 그 양상 또한 불균일하다. 따라서 세골재를 대체하여 이를 줄여보려는 방안이 논의되어 왔는데 그 결과는 다음과 같다. 우선 크리프의 경우 압축강도 210kg/cm<sup>2</sup>인 시편에서 천연 세골재 대체량을 0에서 100%까지 변화시켰을 때 크리프는 10에서 40%까지 감소함을 알 수 있었다. 이 경우 크리프계수는 1.87에서 1.43까지 변화하여 보통 콘크리트보다 높았다. 압축 강도가 350kg/cm<sup>2</sup>인 시편의 경우에는 세골재 대체량 변화에 따라

0 - 30%의 크리프 감소를 나타내서 압축강도 210kg/cm<sup>2</sup>인 경우에 비해 대체효과가 떨어졌으나 크리프계수는 1.26에서 1.0사이로 보통 콘크리트(1.03)보다 약간 높았다. 경량 콘크리트의 경우 골재가 팽창하는 경향이 있어서 건조수축을 상당량 줄이는 효과가 있지만 골재자체의 흡수율이 크기 때문에 그 효과가 상쇄된다. 건조수축의 경우 역시 압축 강도에 따라 그 양상이 틀려지는데 비교적 낮은 강도일 경우에는 보통 콘크리트보다 작게, 또 상대적으로 강도가 큰 콘크리트일 경우에는 좀 더 크게 나타나는

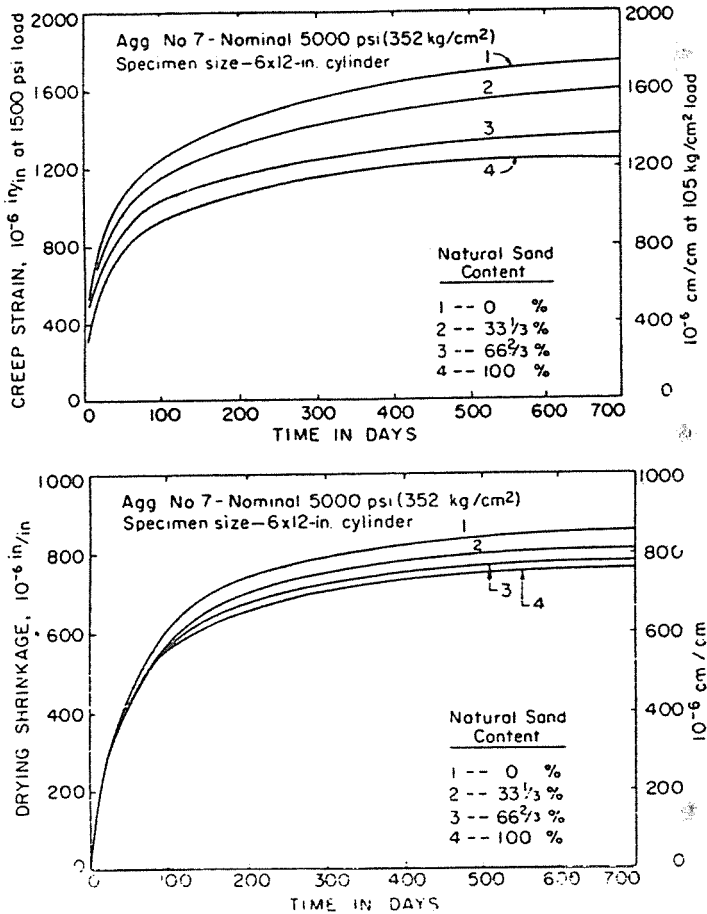


그림 8. 세골재 대체량변화에 따른 경량콘크리트의 크리프 및 건조수축 감소정도

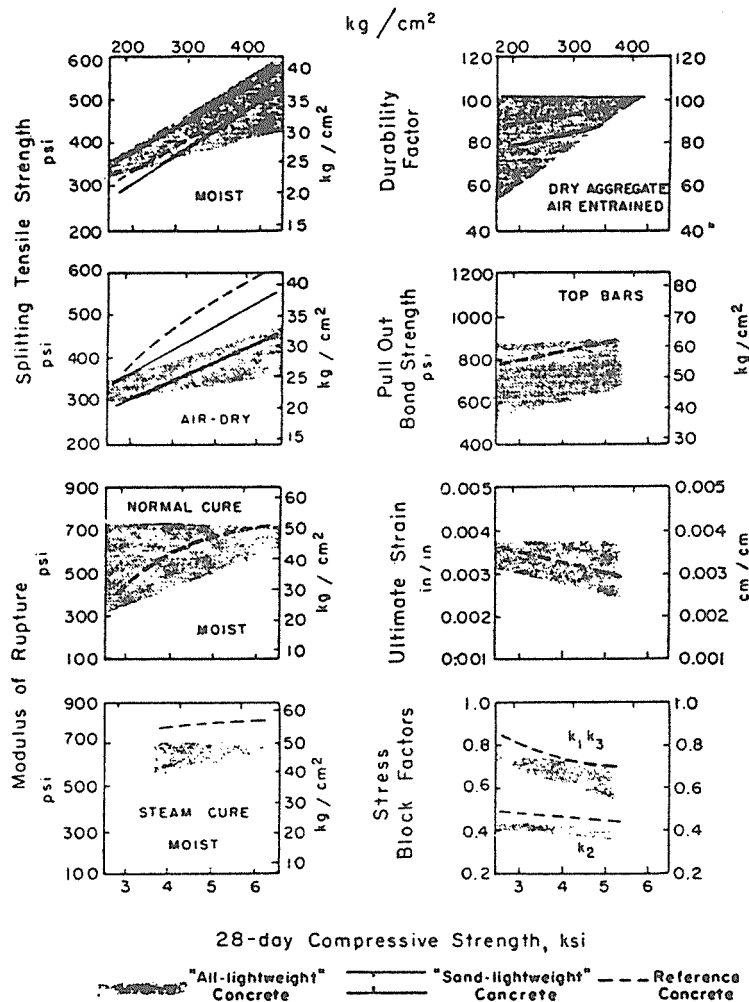


그림 9. 경량콘크리트의 강도특성 및 내구특성

것이 일반적이다. 세골재를 천연산으로 대체할 경우에 건조수축의 감소 현상 역시 크리프의 경우에서와 마찬가지로 비교적 낮은 강도일때가 좀 더 커서 약 10 - 35%의 건조수축 감소를 나타내고 강도가 클 경우에는 그 감소정도가 3 - 30%였다. 다음 그림 8은 세골재 대체량 변화에 따른 크리프 및 건조수축 감소정도를 보인 것이다.

이처럼 세골재를 대체했을 때 크리프와 건조수축이 감소하는 것은 세골재가 천연산

으로 대체됨으로 해서 조골재의 부피가 늘어나고 또 그것은 세골재와 시멘트 풀량의 감소를 유발하기 때문인 것으로 짐작된다. 따라서 적정량의 세골재 대체가 크리프와 건조수축을 감소시키는데 효과적임을 알 수 있다.

이상에서 경량 콘크리트의 강도특성과 내구특성을 살펴 보았는데 이를 종합적으로 도시하면 그림9와 같다.

## 7. 경량 콘크리트의 응용

이절에서는 그다지 일반적이지는 못하지만 그 활용 가능성이 상당히 큰 인공경량 플라이애쉬 골재 콘크리트의 특성을 살펴보고, 다음으로 초고층 건물이나 고유동성이 요구되는 구조물에 경량 콘크리트를 적용하기 위한 경량 펌핑 콘크리트의 연구를 통해 경량 콘크리트의 활용방안을 고찰하기로 한다.

### 7. 1. 인공경량 플라이애쉬 골재

#### 콘크리트의 특성

플라이애쉬를 저렴한 혼화재로 활용하는 방안은 꾸준히 연구되어 왔고 그 성과 역시 상당히 크다. 그러나 플라이애쉬를 가공하여 골재로 쓰려는 논의는 비교적 근년에야 제기되었고, 그 이유로는 천연 골재가 점점 고갈되는 것과 산업 부산물을 재활용하여 환경 훼손을 방지해 보려는 노력등을 들 수 있다. 플라이 애쉬 경량 골재는 기울어진 회전로에서 원료를 둥글게 뭉쳐 부풀리는 제법으로 만들게 되는데 이때 세골재는 크기가 비교적 작은 조골재를 분쇄하여 만든다. 전체 골재를 플라이애쉬 골재로 쓸 경우에는 세골재의 입도때문에 콘크리트로 제작했을때 콘크리트의 표면과 내부 구조가 매우 거칠고 성형이 어려운 단점이 있다. 따라서 이 경우에는 일반적으로 공기 연행체를 상당량 쓰게 되는데, 세골재를 천연산으로 전량 대체 했을때는 보통 콘크리트를 만들때와 같은 정도의 공기 연행체만으로 충분한 효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 전체 세골재를 천연산으로 대체한 경우 콘크리트의 단위 중량은 1485 - 1795kg/m<sup>3</sup> 정도이다. 여기서, 공기량을 5 - 7%, 슬럼프를 5 - 8cm, 단위 시멘트량을 223 - 558kg/m<sup>3</sup>으로 조정하고 세골재 대체량을 0, 33, 66, 100%로 변화시켜 실험을 수행한 연

구를 중심으로 경량 플라이애쉬 골재 콘크리트의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 이 경우 압축강도는 210kg/cm<sup>2</sup>와 350kg/cm<sup>2</sup>의 두 종류로 고정한 것이다. 우선 압축강도에 있어서는 세골재를 대체하면 약간의 강도증진을 보였지만 그 정도가 크지 않았고 몇몇 경우는 별다른 증진효과를 관찰할 수 없었다. 활렬 인장 강도는 22 - 28kg/cm<sup>2</sup> 정도로서 보통 콘크리트에 비해 압축강도 210kg/cm<sup>2</sup>인 경우 84 - 104%, 350kg/cm<sup>2</sup>인 경우 68-79% 정도를 얻을 수 있었다. 크리프의 경우에는 압축 강도 210kg/cm<sup>2</sup>인 경우가 350kg/cm<sup>2</sup>인 경우에 비해 상대적으로 더 크게 나타났고 세골재를 더 크게 나타났고 세골재를 100% 천연산으로 대체했을 경우 33% 대체시보다 10 - 30%의 건조 수축 감소를 나타냈다. 경량 플라이애쉬 골재의 경우 동결 용해성등의 내구성이 특히 우수하여 300 사이클의 동결 용해 실험후의 내구성 지수가 91에서 101에 이르렀다. 이상에서 살펴본 바와 같이 경량 플라이애쉬 골재 콘크리트는 몇가지 단점이 있지만 이를 적절히 보완할 경우 상대적으로 뛰어난 경제성과 더불어 충분한 개발 가능성이 있다고 본다.

### 7. 2. 구조용 경량 펌핑 콘크리트

경량 콘크리트를 일반화하기 위한 기존의 연구는 주로 콘크리트 강도증진에 힘써왔다고 볼 수 있다. 그러나, 구조용 콘크리트를 폭 넓게 사용되기 위해서는 반드시 시공성이 확보되어야 한다. 따라서 경량 콘크리트를 다양하게 적용하기 위해 경량 펌핑 콘크리트를 제작하려는 논의는 비교적 일찍부터 (60년대 초반) 시작 되었다. 그러나 이러한 초기의 시도는 모두 실패했는데, 그 이유는 적절한 유동성을 얻기위해 일반적인 용도에서 보다 더 많이 들어간 배합수가 펌핑을 위해 압력을 가하는 과정에서 경량 골재의 공극사이로 들어가 콘크리트의 전체적인 소

성을 저하시키기 때문이었다. 이를 방지하기 위해 제안된 방법이 골재를 배합전에 침수시켜 배합때 골재가 물을 빨아들이는 것을 방지 해보려는 것이었다. 그러나 이 방법은 전체적인 배합수량만 20%넘게 증가시키고 펌핑의 개선효과는 거의 없었다. 또 이에 따라 단위 중량이 커지고 강도는 떨어지며 건조수축이 증가하는 등의 여러 문제점이 발생하였다. 이러한 문제점 때문에 펌핑 콘크리트에 맞는 경량골재 처리방법이 다각도로 연구되었고 현재 두가지의 방안이 제시되어 있는데, 열처리 방식(Hydro Thermal Process)과 진공흡수방식(Vacuum Saturated Method)이 그것이다. 우선 열처리 방식은 고열을 통해 가공되는 골재, 특히 팽창혈암을 원료로 하는 방식인데, 로속에서 1100℃의 고열을 통해서 나온 혈암을 사전에 결정된 온도에 노출시켜 냉각한 다음 물에 담가 식히고 나서 켄베이어를 통해 운반, 저장하는 것이다. 이 제법은 다음과 같은 가정을 기초로 고안된 것인데  $PV/T = \text{Constant}$ 가 그것이다. 여기서 P는 압력, V는 체적, 그리고 T는 온도를 나타낸다. 즉, 온도가 떨어지면 동일 압력하에서 체적이

줄어들게 되는데 경량 골재의 경우 골재의 내부구조상 원형을 유지하므로 온도차에 의해 줄어드는 체적이 골재 내부의 공극으로 형성이 되는 것이다. 예컨대 온도가 700℃에서 25℃를 떨어질 경우 체적은 약 30%까지 줄어들게 된다. Atlantic Research Corporation의 한 실험결과를 보면, 조골재 치수를 48mm에서 12.7mm까지로 두어 콘크리트를 제작했을때 그 단위 중량을 680kg/m<sup>3</sup>까지 낮추었다. 이 경우 로속에서 골재를 꺼냈을때의 온도는 900℃였고 침수를 시작하기전에 25℃까지 온도를 낮추었다. 이어 2분에서 48시간까지 경우를 달리하여 침수를 실시하였다. 골재가 최대로 흡수를 하는 경우는 골재의 온도가 로속에서 꺼냈을때 600-700℃에서 발생하였고 이 범위의 온도는 오히려 어떤 열충격을 골재에 주게되어 골재 구조를 파괴하는 것으로 보고되고 있다. 이 경우에는서는 적정온도를 채택하여 골재를 가공한 경우의 강도에 비해 약 절반가까운 강도 손실을 나타내고 있다. 따라서 이 제법에 있어서는 적정한 온도 차이를 선정하여 냉각하는 것이 가장 중요하다. 이러한 온도차이 등의 관리가 잘 이루어진 경우

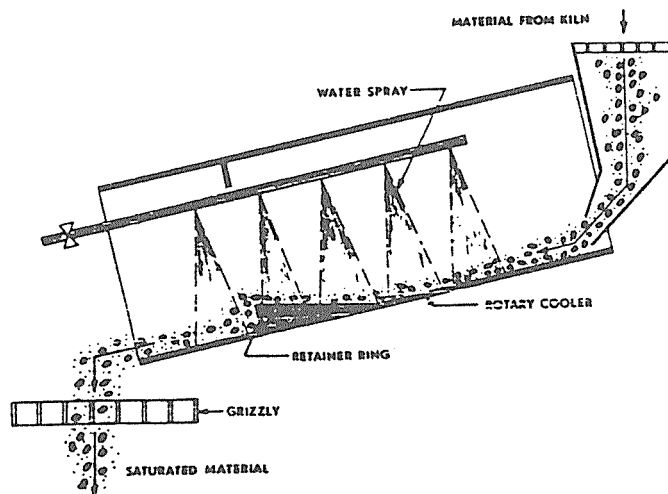


그림 10. 경량 펌핑콘크리트용 경량골재 생산 공정(열처리 방식)



단위 시멘트량 390-445kg/m<sup>3</sup>을 써서 압축강도가 350kg/cm<sup>2</sup> 이상이며 펌핑 성질이 대단히 우수한 콘크리트를 제작할 수 있는 것으로 알려져 있다. 아래 그림10은 열 처리방식의 경량 골재 생산라인을 보여주고 있다.

진공 흡수방식에는 우선 상단부에 해치와 진공 밸브가 달려 있고 하단부에 물을 공급하는 관과 밸브가 달린 탱크가 필요하다. 그 공정을 살펴보면 제일 먼저 탱크에 마른 상태의 골재를 넣고 상단부 해치를 닫는다. 다음으로 수분공급 밸브와 진공을 푸는 밸브를 닫고 진공 펌프를 가동하여 진공이 유지된 상태에서 수분 공급 밸브를 열어 수분을 공급한다. 일단 골재가 전부 물 속에 잠기면 진공 펌프를 멈추고 진공을 푼 다음 남은 물을 뺀다. 이 경우 마른 골재 34m<sup>3</sup>을 처리하는데 걸리는 시간은 35 - 50초로 알려져 있다. 조골재 치수를 4.8mm에서 12.7mm로 두었을때 함수비가 41.9%로 증가함을 알 수 있다. 이를 현미경등으로 정밀 관찰한 결과 골재의 내부조직상 문제가 없고 수분이 들어갈 수 있는 총 공극은 49.4%에 이르는 것을 알 수 있다. 이러한 펌핑 콘크리트의 성능은 골재 조립률이 2.92이고 공기량이 4%인 NO.4 골재를 적정량의 감수제와 더불어 배합했을 경우 10cm 내외의 슬럼프를 얻을 수 있고 이에 따라 지름 10cm인 관을 통해 수평 60 - 70m, 수직 40 - 50m를 펌핑 할 수 있는 정도이다. 제작 변수를 적절히 조정하면 경우 122m까지 펌핑한 시공례도 보고되고 있다. 이 제법은 그러나 골재 관리상에 상당한 기술을 요하는데 온대지방일 경우 탱크의 보존에 유의해야 하는 등 주위를 기울여야 한다. 이 경우에는 진공을 유지하기 위해 외기의 차단이 필요하다. 또 한대 지방일 경우에는 공극수가 동결이 되는 것을 방지해야 한다. 다음으로 각 경우 공히 진공을 유지하는데 유의해야 하는데 공기량이 2%이상일 때에는 침수가 어려운 경우가 있기 때문이다.

이상의 몇가지 기술상 문제점에만 유의하면 경량 콘크리트는 대단히 우수한 펌핑 성질을 가질수 있다고 본다.

## 8. 결 론

본 연구는 근년들어 수요가 급증하고 있는 경량 콘크리트의 제반 특성을 여러 연구와 실험을 통해 비교, 분석하고 경량 콘크리트의 고강도화에 대한 토의를 통해 그 가능성을 고찰하였다.

(1) 경량 골재의 성능은 단위 중량, 흡수율, 골재의 형상과 강도, 표면의 거친 정도등으로 평가될 수 있으며, 이러한 성능은 골재에 따라 상당한 차이가 있다. 이 차이는 경량 골재를 사용하여 콘크리트를 제작하였을 때 콘크리트의 강도와 워커빌리티 및 내구성에 직접적인 영향을 미치며 콘크리트의 마감과 성형에도 관계가 있다. 따라서 경량 골재 콘크리트를 제작할때는 구조물의 용도와 시공여건에 맞는 경량 골재의 선택이 중요하다.

(2) 경량 콘크리트의 가장 큰 특징은 중량 감소에 있지만 지나치게 이에 치중할 경우 적정강도를 얻기 위해 단위 시멘트량을 증가시켜야 하므로 경량 콘크리트의 용적비중은 보통 콘크리트의 1/3 - 2/3정도가 되는 것이 바람직하다.

(3) 경량 골재는 보통 골재에 비해 흡수율이 대단히 크고 흡수양상이 불균일하므로 이를 적절히 관리하는것이 중요하다. 경량 골재의 과도한 흡수를 방지하기 위해 배합전 골재 흡수등의 방안이 제시되어 있는데 이는 경량 골재의 흡수 특성등을 파악한 후에 적절히 선정되어야 한다.

(4) 경량 골재는 공정의 차이에 따라 골재형상과 표면의 거친 정도가 달라진다. 골재의 형상이 구형일수록 또, 표면이 매끄러울수록 콘크리트 제작시의 단위 중량은 어

느정도 증가하지만 흡수량이 줄어들고 강도 발현양상이 균일해지는 잇점이 있다. 따라서 경량 골재의 형상과 표면의 거친정도는 구형일수록 또, 매끄러울수록 양질의 콘크리트 제작이 가능해진다.

(5) 경량 세골재는 보통 경량 조골재를 췌석하여 사용하게 되는데 이경우 형상과 표면이 불량해진다. 이에 따라 흡수량이 증가하고 그 양상이 불균일해지는 문제점이 있으므로 시공여건에 맞추어 최대한 천연산 세골재로 대체하는 것이 바람직하다. 이와 같은 세골재 대체는 워커빌리티를 개선시키고 배합수량과 단위시멘트량을 감소하는 잇점이 있다.

(6) 경량 콘크리트는 골재의 특성상 공기량이 상대적으로 크다. 이러한 공기량은 특히 강도 발현에 영향을 미치므로 이에 대한 적절한 관리가 필요하다.

(7) 경량 콘크리트를 철근 콘크리트에 적용할 때는 철근의 부식 방지에 유의해야 한다.

(8) 경량 콘크리트를 타설할때는 특히 재료분리에 유의해야 하는데 이를 위해 적절한 슬럼프 관리가 필요하며 지나친 진동 다짐을 피해야 한다. 또 타설시에는 마감시간과 마감때의 블리딩수 제거등에 유의해야 한다.

(9) 경량 콘크리트의 강도는 세골재 대체량과 양생조건등을 적절히 선택하여 관리할 경우 구조물용 콘크리트로 범용적인 활용이 가능하다.

(10) 경량 콘크리트는 시멘트 풀의 성능에 따라 내구성에 있어서 차이가 생기는데 비교적 내구성이 큰 콘크리트의 제조가 가능하다. 동결 융해 저항성은 경량 콘크리트의 단위 중량등과 밀접한 관계가 있으므로 동결 융해를 반복해서 받는 구조물의 경우에는 콘크리트의 용도, 단위중량, 시공여건, 경제성등을 모두 고려하여 제작 변수를 결정해야 한다.

(11) 플라이 애쉬를 경량 골재화하여 콘크리트를 제작하였을때 골재의 입도가 불균일하고 흡수율이 큰 단점이 있지만 경제성등을 고려해 볼때 앞으로의 활용가능성은 대단히 크다고 본다.

(12) 경량 펌핑 콘크리트 제작을 위한 경량 골재 처리공정이 제시되었는데 여러 변수가 적절히 조정되었을 경우 수직 40-50m, 수평 60-70m정도의 펌핑 성능을 확보할 수 있다.

## 9. 참고 문헌

1. Kong, F. K. "Diagonal Cracking and Ultimate Loads of Lightweight Concrete Deep Beams" ACI, August 1972, PP. 513-521
2. Ignacio. Martin. "Environment Effect on Thermal Variations and Shrinkage of Lightweight Concrete Structures" ACI, March 1972, PP. 179-184
3. Helms S. B. "Corrosion of Steel in Lightweight Concrete Specimens" ACI, December 1968, PP. 1011-1016
4. Robert G. M. "Shrinkage Cracking Characteristics of Structural Lightweight Concrete" ACI, October 1970, PP. 769-777
5. William E. Reilly. "Hydrothermal and Vacuum Saturated Aggregate for Pumped Structural Concrete "ACI, July 1972, PP. 428-432
6. Kong F. K. "Web Reinforcement Effects on Lightweight Concrete Deep Beams" ACI, July 1971, PP. 514-520
7. Yaser Atan. "Structural Lightweight Concrete under Biaxial Compression" ACI, March 1967, PP.182-186
8. Don L. I. "Shear Capacity of

- 
- Lightweight Concrete Beams" ACI, October 1967, PP. 634-643
9. Melvin R. R. "Path Dependent Biaxial Compressive Testing of an All Lightweight Aggregate Concrete" ACI, December 1972, PP. 758-765
  10. Cameron M. "Special Techniques for Producing High Strength Concrete" ACI, December 1970, PP. 996-1002
  11. Neville A. M. "Properties of Concrete" Pitman Publishing Ltd 1981
  12. Donald W. P. "Fly Ash Aggregate Lightweight Concrete" ACI Summary Paper, ACI, March 1971, PP. 213-215
  13. Donald W. P. "Sand Replacement in Structural Lightweight Concrete-Freezing and Thawing Tests" ACI, November 1967, PP. 735-744
  14. Donald W. P. "Sand Replacement in Structural Lightweight Concrete-Splitting Tensile Strength " ACI, July 1967, PP. 384-392
  15. Donald W. P. "Sand Replacement in Structural Lightweight Concrete-Creep and Shrinkage Studies " ACI February 1968, PP. 131-139
  16. Milton H. W. "Lightweight Aggregate Particle Shape Effect on Structural Concrete "ACI, March 1974, PP. 134-138
  17. Ledbetter W. B. "Bond and Tensile Capacity of Lightweight Aggregates " ACI, December 1970, PP. 958-962
  18. ACI Committee 213. "Guide for Structural L. A. C. " ACI, August 1967, PP. 433-467
  19. 오병환, 엄주용, 이성민, "고강도 경량콘크리트의 강도특성에 관한 실험적 연구 " ACI한국분회 학술발표 논문집, 1987, PP. 87-110
  20. 오병환, 엄주용, 이경복, "고강도 플라이애쉬 콘크리트의 강도특성에 관한 실험적 연구" ACI 한국분회 학술발표 논문집, 1988, PP. 107-113