

# 고유동 콘크리트의 사용재료 및 품질특성에 관하여

권 영 호

(동양대학교 건축공학과 교수, 공박, 시공/품질시험 기술사)

이 현 호

(동양대학교 건축공학과 교수, 공박)

- |                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| 1. 머리말            | 4.4 골재의 특성             |
| 2. 고유동 콘크리트의 기본개념 | 4.5 혼화제의 특성            |
| 3. 고유동 콘크리트의 연구동향 | 5. 고유동 콘크리트의 평가방법      |
| 3.1 국외의 연구동향      | 5.1 고유동 콘크리트의 특성평가     |
| 3.2 국내의 연구동향      | 5.2 고유동 콘크리트의 유동성 평가   |
| 4. 고유동 콘크리트의 재료특성 | 5.3 고유동 콘크리트의 충전성 평가   |
| 4.1 구성재료의 일반적인 역할 | 5.4 고유동 콘크리트의 간극통과성 평가 |
| 4.2 시멘트의 특성       | 5.5 고유동 콘크리트의 분리저항성 평가 |
| 4.3 혼화제의 특성       | 6. 맺음말                 |

## 1. 머리말

일반적으로 고성능 콘크리트(High performance concrete)의 정의는 나라별로 약간의 차이가 있다. 즉, 미국·유럽·호주 등에서는 콘크리트의 강도측면에서 접근을 하는 반면에, 일본과 같은 경우에는 다짐작업을 하지 않아도 施工性を 확보할 수 있는 유동성 측면에서 고성능 콘크리트를 지칭하고 있다.

고성능 콘크리트라는 용어는 1989년 11월에 개최된 미국 콘크리트학회(ACI) 심포지움에서 캐나다의 Aitcin그룹이 최초로 사용하였

다.<sup>1)</sup> 이때, Aitcin그룹은 콘크리트 압축강도가 80~100MPa인 범위에서 공기연행을 하지 않더라도 동결융해에 대한 저항성을 갖고, 조강 포틀랜드 시멘트(Type III)에 실리카 흙(6%)을 혼입한 물/결합재비 28~30% 범위의 高强度·高鹽害 抵抗성을 갖는 콘크리트를 “高性能 콘크리트”로 정의하였다. 이러한 Aitcin그룹의 고성능 콘크리트 연구는 역학적 특성, 내구성, 강도 등의 분야로 계속 추진되었다.

또한, 1990년 5월 미국의 콘크리트학회(ACI)와 국립표준 기술연구소(NIST)그룹이

공동으로 Maryland의 Gaithersburg에서 개최한 고성능 콘크리트의 워크샵<sup>2)</sup>을 통해, 고성능 콘크리트는 재료분리가 일어나지 않고 타설 및 다짐이 쉬울 것, 장기적인 역학적 특성이 개선될 것, 초기재령 강도가 높을 것, 체적안정성과 높은 韌性을 확보할 것, 그리고 열악한 환경에서 구조물의 수명을 개선할 것 등으로, 그 특성을 정의하였다.

한편, 일본에서는 1986년 2월 일본 시멘트 협회가 주최한 콘크리트 강습회에서 동경대학의 岡村 甫교수가 제창<sup>3)</sup>한 고성능 콘크리트의 의미를 정리할 필요가 있다. 여기서, 岡村그룹은 구조물의 내구성과 품질에 가장 큰 영향을 미치는 것은 人力에 의한 다짐성능이기 때문에, 다짐이 필요없는 특성을 콘크리트에 부여한다면, 高品質·高耐久性을 실현할 수 있으며, 이러한 특성을 갖는 콘크리트를 “高性能 콘크리트”라 정의하였다. 1989년 1월 Chiang Mai에서 개최된 EASEC 심포지움에서 고성능 콘크리트라는 용어를 처음 사용하였다. 따라서, 岡村그룹은 Aitcin그룹이 제시한 고성능 콘크리트와 달리 流動性 측면의 접근방법을 제시한 것으로 평가된다.

즉, 일본에서는 高流動性 콘크리트의 개념을 강조한 반면에 미국, 캐나다 및 유럽의 경우에는 高强度·高耐久性 콘크리트의 개념이 강조되었다.

본 연구에서는 고강도·고유동·고내구성의 개념중에서 고유동성 분야를 중심으로 고유동 콘크리트의 개념, 재료특성 및 유동성·충전성·재료

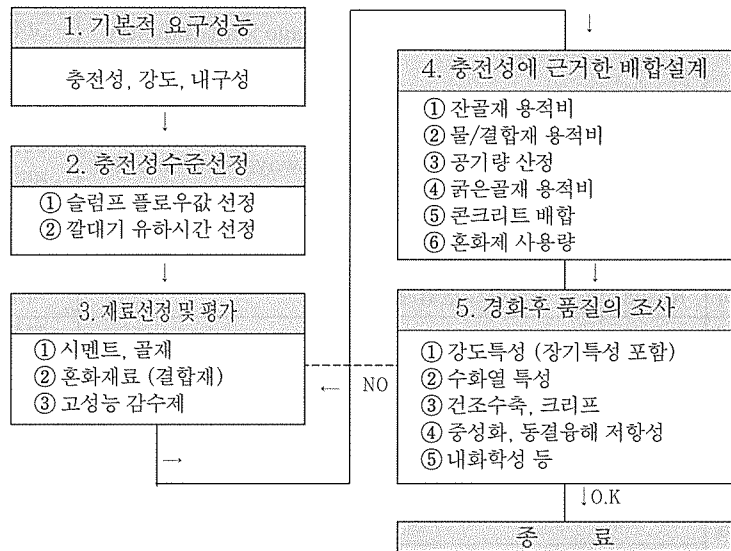
분리 저항성 등과 같은 품질성능을 평가하는 방법에 대하여 서술하고자 한다.

## 2. 고유동 콘크리트의 기본개념

고유동 콘크리트의 기본개념은 다짐을 하지 않고도 거푸집에 타설될 수 있도록 콘크리트 자체에 유동성, 재료분리 저항성 및 자기충전성을 부여하는 것으로, (1) 콘크리트의 粉價量을 증대시키는 粉價系, (2) 增粘劑를 사용하는 增粘劑系, (3) 粉價 및 增粘劑를 함께 사용하는 併用系 高流動 콘크리트로 구분할 수 있다.

또한, 고유동 콘크리트의 배합설계에서 가장 큰 특징은 기존의 콘크리트에 비해 굵은골재량이 감소되는 반면, 결합재량은 증가된다는 것이다. 따라서, 일반 콘크리트와 다른 특성의 평가 및 배합설계 방법에 대한 이해와 방안이 필요하다.

[그림 1]은 고유동 콘크리트의 요구성능 및 배합설계 순서를 나타낸 것으로, 고유동 콘크



[그림 1] 고유동 콘크리트의 요구성능 및 배합설계 순서

리트의 내구성을 지배하는 요인은 결합재(시멘트 포함)이기 때문에 보통 및 중용열 포틀랜드 시멘트를 기본으로, 충전성 및 내구성이 우수한 시멘트를 사용해야 한다. 그리고 충전성에 의거한 배합이론과 배합설계 시스템 구축, 구조물의 안전성, 내구성, 기능성을 정량적으로 평가할 수 있는 시스템 및 구조설계, 시공 시스템의 개발 등도 필요하다.

또한, 레미콘 플랜트의 제조 시스템을 개량하여, 콘크리트의 배합효율을 최적화시킬 수 있는 제조·관리 시스템화하는 방안이 필요한 실정이다. 현재, 건설업계가 당면하고 있는 과제는 건설기술자 및 작업원의 부족, 특수환경에서 건설될 공사의 증가 및 구조물의 고성능화 등과 같은 요구성능에 적절히 대응할 수 있는 기술력을 개발하고 실용화시키는 것이다.

따라서, 신뢰성이 높은 자기충전형 고유동 콘크리트의 실용화를 통해 시공 시스템의 합리화와 건설공사의 제약조건을 극복할 수 있으며, 작업원의 절감 및 기능향상, 그리고 공기단축의 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 건설공사에서 발생하는 소음, 환경문제의 해결 및 엄격한 재료설계를 통해 구조설계 및 시공계획을 동시에 고려할 수 있기 때문에, 매우 경제적이며 구조물 및 환경조건에 대응할 수 있는 방안으로 부각될 수 있을 것이다.

### 3. 고유동 콘크리트의 연구동향

#### 3.1 국외의 연구동향

모든 산업분야가 고도로 발달함에 따라 건설

[표 1] 각국의 고성능 콘크리트 연구개발 동향

국가 및 연구기관		연구과제명	연구범위 및 내용
미국	Northwestern 대학의	신재료 개발연구	· Advanced Cement-Based Materials
	North Carolina 주립대학의	Strategic High-way Research Program	· 도로건설용 고성능 콘크리트 개발
	Chicago	Chicago joint Industry Project	· 고강도 콘크리트 구성요소, 거동연구 · 저·고탄성 콘크리트 개발
프랑스	정부기관	French National Program (New ways for Concrete)	· 기존장비와 재료생산 기술적용 · Joigny교량 600MPa 시공 계측시스템 · 65~105MPa 고성능 개발
노르웨이	Royal Norwegian Council for Scientific and Industrial Research 및 콘크리트 산업체	고성능 콘크리트 개발	· 구성재료에 의한 고성능 콘크리트 특성변화 및 설계기준 · 내구성 평가의 기준 개발
캐나다	Sherbrooke대학	NCE / HPC Network	· 고성능 콘크리트 Network 구성 · 재료개발, 구성방정식, 전단강도, 거동거동, 철근의 부착 및 정착 · 설계기준, 진단기준
일본	건설성	New RC Project	· 고강도 콘크리트 및 철근 개발 · 콘크리트 품질관리
	동경 대학	고성능 콘크리트 개발	· 다집이 필요없는 콘크리트 개발 · 혼화제(증점제)의 개발

산업도 大型化, 超高層化 및 多樣化되면서 우수한 기술과 Know-how가 요구되고 있지만, 건설시장의 인적자원 및 3D 기피현상 등에 따른 저해요인은 아직도 해결해야 할 과제이다. 특히, 이러한 영향을 가장 많이 받는 분야가 콘크리트 산업과 관련되어 있기 때문에, 이를 극복하기 위하여 선진국에서는 고성능 콘크리트에 대한 성능규정 및 기술개발에 많은 노력을 기울여 왔다. 이에 따른 각국의 고성능 콘크리트 연구동향을 정리하면 [표 1]과 같다.

[표 1]에서 보듯이 대부분의 선진국들은 국가기관의 지원 또는 國策事業의 일환으로 고성능 콘크리트의 연구그룹을 결성하여, 다각적인 연구단계를 수행하는 경향을 보이고 있다. 또한, 국가별로 콘크리트에 대한 제조기술 뿐만 아니라 성능평가 및 활용기술에 이르기까지 연구영역이 다양하고 광범위한 것으로 나타났다. 이에 대한 각국의 고성능 콘크리트의 연구동향을 정리하면 다음과 같다.

### 3.1.1 미국의 연구동향

미국의 경우에는 대부분 고강도 콘크리트를 중심으로 새로운 콘크리트의 재료개발 및 역학적 특성과 내구성, 그리고 구조적 안전성 등에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히, Northwestern대학을 중심으로 일리노이대학, 미시간대학, 퍼듀대학, 국립표준 및 기술연구소에서는 미국과학재단의 지원아래 1989년부터 5개년 동안 시멘트와 관련된 콘크리트의 재료연구를 수행하였다.<sup>4)</sup> 또한, North Carolina주립대학을 중심으로 수행한 "Strategic highway research program"에서는 도로건설에 사용되는 각종 고성능 콘크리트의 기계적 성질과 내구성에 관련된 연구결과를 축적하였다.

그리고, 시카고지역을 중심으로 수행한 "Chicago joint industry project"에서는

고강도 콘크리트의 구성요소, 역학적 특성 등에 관한 자료가 축적되었고, 탄성계수의 범위에 따른 고강도 콘크리트의 개발로 이어졌으며, 현재 많은 연구실적이 실용화되고 있다.

### 3.1.2 프랑스의 연구동향

프랑스에서는 주요 건설현장에 고성능 콘크리트를 적용하기 위하여 국책과제로 "New ways for concrete" 연구가 수행되었다. 이를 통해 콘크리트의 성능개선 및 매트릭스의 조밀화, 시멘트-페이스트와 골재 경계면의 관계 등과 같은 재료분야의 연구를 수행한 결과, 전단전이와 점성관계를 해결하였으며 펌핑 및 타설이 우수한 콘크리트를 개발하는데 성공하였다.<sup>5)</sup>

예비단계에서 길이 114m의 3경간 현장타설 Post-tension 교량을 건설하였으며, 이 교량에 60MPa의 고성능 콘크리트를 적용하였으며, 특히 PC강재가 열화될 경우에 교체할 수 있도록 External pre-stressing system이 도입되었다. 또한, 시공중의 온도거동과 사용중의 변형거동을 예측할 수 있는 시스템을 설치하여 얻어진 자료를 통해 고성능 콘크리트의 수학적 모델을 검증하는데 이용하였다. 더 나아가 65~105MPa범위의 고성능 콘크리트를 개발하는 계기가 되었다.

### 3.1.3 노르웨이의 연구동향

노르웨이의 경우, Royal Norwegian for scientific and industry research와 콘크리트 산업체가 중심으로 1986년부터 고강도 콘크리트의 개발에 착수하여 1991년에 연구를 완성하였다. 연구내용은 고강도 콘크리트의 지식확장 및 초고강도화를 기초로 구성재료의 변동에 따른 콘크리트의 영향 및 표준시험방법, 구조성능, 내구성 평가 및 설계기준의 개발 등이며, 개발된 고강도 콘크리트의 기술

을 산업체에 이전하여 실용화시키는 단계에 와 있는 실정이다.

### 3.1.4 캐나다의 연구동향

캐나다의 경우도 마찬가지로 정부의 주도로 1988년부터 광범위한 전문분야의 공동연구를 수행하기 위하여 Network of centers of excellence(NEC)를 계획하였으며, 1989년에 14개의 Network가 창설되었다. 이중에 고성능 콘크리트 분야로 창설된 것이 HPC-Network로, 이 연구과제는 Sherbrooke 대학의 Aitcin 교수그룹을 중심으로 7개 대학과 2개의 산업체가 공동으로 3개의 고성능 콘크리트 관련 연구를 4년간 수행하였다.<sup>6)</sup> 연구테마는 크게 새로운 건설재료의 개발, 고강도 콘크리트의 구조설계, 새로운 제품 및 기술개발 등으로 나누어 졌다.

새로운 건설재료의 개발은 굳지 않은 고성능 콘크리트의 성상, 계면특성, 내구성, 재료의 선택기준, 섬유종류가 강도에 미치는 영향, 경제성과 기술적인 최적화 등에 관한 요소기술로 구성되어 있다. 또한, 고강도 콘크리트의 구조설계는 구성방정식 모델, 전단강도, 기둥의 거동, 부착 및 정착, 고강도 철근, 새로운 설계기준의 개발 등을 주요 테마로 선정하였다.

새로운 제품 및 기술개발 분야는 암석이나 세라믹 재료의 대용품으로 고성능 콘크리트를 사용하는 방안, 섬유보강 콘크리트, 파괴 및 비파괴 시험, 표준시험, 구조의 계측시스템 등에 대한 연구과제로 수행되었다.

### 3.1.5 일본의 연구동향

일본에서 연구·개발된 고성능 콘크리트는 고강도 콘크리트와 고유동 콘크리트로 구분하여 정리하는 것이

이해하기 쉬운 것으로 사료된다. 즉, 고강도 콘크리트의 실용화 연구과제는 1988년부터 1992년까지 5개년 계획으로 건설성에서 국책 과제로 제시한 'New RC計劃'을 중심으로 수행되었으며, 고유동 콘크리트는 1986년에 東京大 岡村甫교수가 제창한 "다짐작업이 필요 없는 콘크리트"를 중심으로 수행되었으며, 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

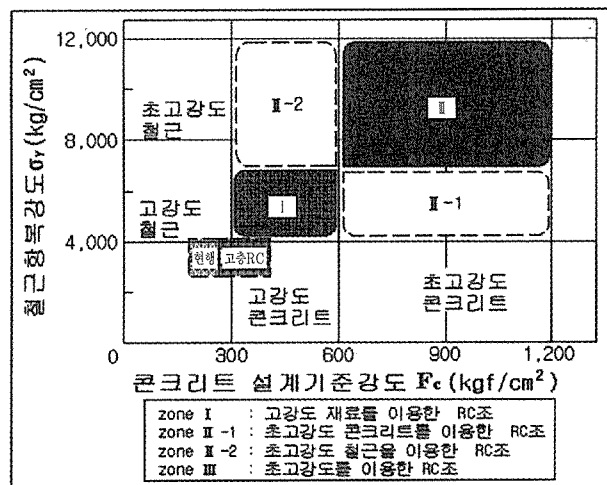
#### (1) 건설성의 New RC project

1988년 일본의 건설성이 주관하고 산·학·연 공동으로 수행한 "고강도 콘크리트와 고강도 철근을 사용한 고급 콘크리트 건물의 개발-New RC project" 과제는 다음과 같은 목적으로 착수되었다.

① New RC 구조물의 기술체계를 수립하기 위하여 고강도 콘크리트에 관련된 기존의 연구와 개발내용의 조사 및 분석

② 고강도 콘크리트와 고강도 철근을 사용한 구조물의 거동개발 및 New RC 구조물의 설계시스템 개발

이러한 New RC 과제의 연구범위를 나타 내면 [그림 2]와 같다.



(그림 2) New RC project에서의 강도개념 분류

즉, New RC 과제는 새로운 강도개념의 조합을 통하여 건설기술의 잠재성과 발전 가능성을 제시한 것이며, 각각의 Working group의 연구과제를 통하여 많은 실적을 축적하였고 현장 실용화에도 기여하게 되었다.

#### (2) 동경대학 그룹의 고성능 콘크리트 개발

1986년 일본 동경대학의 岡村甫교수는 현장에서 콘크리트를 타설할 때, 부실시공 및 구조물의 내구성을 저하시키는 요인이 인력에 의한 다짐작업의 영향으로 보고, 궁극적으로 건축구조물의 시공성 및 내구성을 향상시키기 위해서는 다짐작업이 필요없는 “自己充填性 콘크리트”를 개발하는 것이라고 규정하였다. 따라서, 이러한 성능을 갖는 콘크리트를 “高性能 콘크리트”로 명명하고 이에 대한 기본개념을 정착시켰다.

또한, 이러한 연구가 가능하였던 배경은 고성능 AE감수제의 개발, 水中不分離 콘크리트의 기술확보, 고로슬래그 미분말 등과 같은 혼화재의 상품화와 이에 대한 기초기술의 기반이 확보되었기 때문이며, 또한 중점제와 같은 특수 혼화제가 개발되어 재료분리 저항성 및 자기충전성을 콘크리트에 부여할 수 있는 여건이 조성되어 있었기 때문이다.

이러한 연구를 통해 축적된 고성능 콘크리트의 내용을 정리하면 다음과 같다.

① 표준시방서 개발 : 고성능 콘크리트의 기본특성, 시멘트와 혼화재료, 배합설계, 매스형·고급형·보급형 고성능 콘크리트의 개발

② 제조기법 개발 : 재료관리 및 시험방법, 제조 플랜트, 관리시험 방법의 개발

③ 시공기법 개발 : 거푸집 설계, 콘크리트의 타설전 검사, 펌프압송, 타설·양생, 2차 제품에 대한 시공기법의 개발

④ 설계기법 개발 : 구조물의 설계 및 내구성 조사시스템, 충전성에 기인한 배합설계 기

법, 자기충전성의 평가기법

⑤ 온도균열 설계기법 개발 : 온도균열의 조사시스템, 시멘트의 수화열 모델, 광물조성에 따른 복합적 수화열 모델, 열전도 및 수화발열에 관한 해석, 열응력 해석방법의 개발

⑥ 고성능 콘크리트의 제조·시공·품질보증 시스템의 개발

여기서 개발된 고성능 콘크리트는 다짐작업이 필요없는 자기충전성 외에도 강도 및 내구성 등이 우수한 것으로 평가되어 1990년부터 많은 현장에 실용화되고 있으며, 앞으로도 현장시공에 대한 문제점의 해결에 기여할 것으로 기대된다.

### 3.2 국내의 연구동향

#### 3.2.1 고유동 콘크리트의 이론적인 연구

국내의 高流動 콘크리트는 대우건설·忠南大를 비롯한 일부대학에서 재료 및 기초물성에 대한 연구가 진행되었으나, 정부에서 주관하는 공식적인 연구는 1994년 建設交通部 國策課題로 수행된 것을 시초로 볼 수 있다. 특히, 1988년 과학기술처의 특정과제로 시작된 고강도 콘크리트 연구도 이러한 범주에 포함시킬 수 있으며, 현재는 40~50Mpa의 고강도 콘크리트가 일부 실용화되고 있다.

그러나, 시공법 개선, 구조설계의 반영, 관련법규의 개정, 품질관리 방안 및 수화열 저감, 경시변화에 따른 워커빌리티의 확보 등은 여전히 과제로 남아있다.

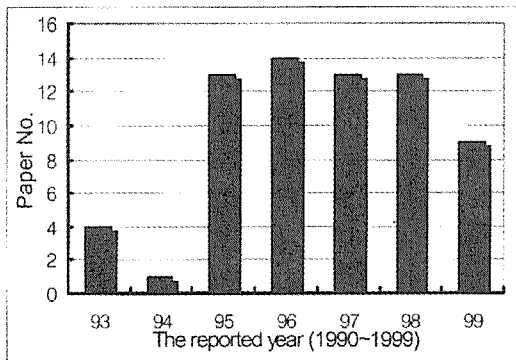
따라서, 지금까지 이룩한 고강도 콘크리트의 연구결과로 볼 때, 콘크리트의 고강도화 및 고내구화는 어느 정도 달성된 것으로 평가할 수 있으며, 이에 따른 기술축적을 바탕으로 고유동 콘크리트의 개발 및 실용화를 이룰 수 있는 여건은 형성되어 있는 것으로 평가된다.

지금까지 고유동 콘크리트와 관련된 연구는

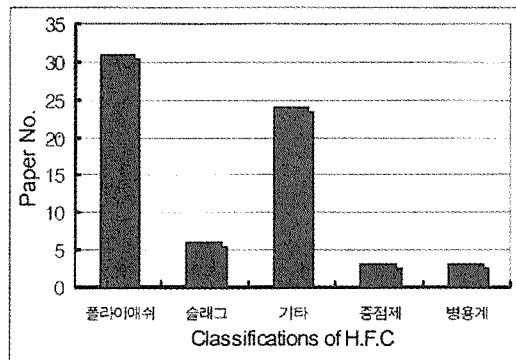
주로 분체계 고유동 콘크리트를 중심으로 진행되었으며, 분체계의 재료도 플라이애쉬가 주된 대상이었다. 그러나, 최근에 와서 증점제계 및 병용계 고유동 콘크리트에 대한 연구도 활발히 진행되고 있기 때문에, 많은 연구성과가 축적될 것으로 기대된다.

1990년부터 1999년까지 한국콘크리트학회의 학술발표 논문집에 보고된 고유동 콘크리트의 연구논문은 총 67편이며, 년도별로 발표된 논문편수는 [그림 3]과 같고, 고유동 콘크리트에 사용된 재료별로 분류하면 [그림 4]와 같다.

[그림 3]에 나타난 바와 같이 고유동 콘크리트와 관련된 연구는 1996년을 정점으로 가장



(그림 3) 년도별 발표논문 편수



(그림 4) 사용재료별 고유동 콘크리트의 분류

활발히 발표되었으나, 최근에는 연구논문편수가 감소되고 있다. 또한, [그림 4]와 같이 발표된 대부분의 논문은 분체계 고유동 콘크리트로 분류할 수 있으며, 결합제는 플라이애쉬를 사용한 배합이 46%(31편)로 가장 많았으며, 슬래그 미분말을 사용한 배합은 약 9%(7편)인 것으로 나타났다. 이외에 벨라이트 시멘트 또는 석회석 미분말을 사용한 배합은 36%(24편)을 차지하였으며, 증점제계 및 병용계 고유동 콘크리트는 각각 2~3편 정도로 연구실적이 매우 미비한 것으로 나타났다.

또한, 고유동 콘크리트의 특성별로 발표된 논문을 분류하면, 유동특성에 관한 연구가 27%(18편)로 가장 많은 부분을 차지하였고, 재료특성에 관한 연구가 22%(15편), 기초연구 및 경화특성이 각각 15%(10편), 시험시공이 9%(6편)로 나타났다. 그러나, 가장 중요한 요소기술인 배합설계 방법 및 배합요인에 대한 연구는 많지 않은 것으로 나타나, 고유동 콘크리트의 배합설계 방법에 대한 체계적인 연구가 필요하다는 것을 알 수 있다.

따라서, 플라이애쉬와 같이 특정한 분체계 고유동 콘크리트의 연구에 치중된 경향을 탈피할 필요가 있으며, 특수조건을 고려한 증점제계 또는 병용계 고유동 콘크리트의 연구도 함께 추진되어야 할 것으로 사료된다.

### 3.2.2 고유동 콘크리트의 시공사례

지금까지 국내에서 수행된 고유동 콘크리트의 현장적용은 시험시공 및 일부 특수한 구조물에 대해 소규모로 사용한 사례가 대부분으로 [표 2]와 같다.

초기에 시험시공된 동광양 현장은 레미콘 공장에서 실제 고유동 콘크리트의 생산 및 운반, 타설 등의 품질관리를 확인하기 위하여 적용된 사례이며, 大宇建設技術研究所의 반력벽은 부재조건이 과밀배근 및 포스트 텐션에 따

[표 2] 고유동 콘크리트의 시공사례

현 장 명	타 설 부 재	설계강도 (MPa)	결합재 조건	레미콘 공장	비 고
동광양 현장	벽체 및 슬래브	21 (40)*	OPC+Fly ash	동양레미콘 (동광양 공장)	시험시공 (1994.12)
대우건설 기술연구소	반력벽 (14×12×2.5m)	35 (42.6)*	OPC+Fly ash	동양레미콘 (군포 공장)	과밀배근 충전성 (1995.8)
시흥 은행동 대우아파트	3D PCa	27 (39)*	OPC+Fly ash	유진레미콘 (소래공장)	고온 증기양생 (1996.8)
덕수빌딩	지하 Top down	27 (36)*	OPC+Fly ash (Crushed sand)	삼표레미콘 (성수공장)	자기충전성 (1997.8)
인천지하철 (1-10공구)	Under pinning top slab	24 (46)*	OPC+Fly ash	경인레미콘 (인천공장)	유동성 · 충전성 (1998.5)
인천LNG 저장탱크	Slurry wall (20만kl)	40 (60)*	Belite+L.S.P (중점제 첨가)	현장 플랜트	유동성 · 충전성 (1998.6)

\* 현장에서의 실제강도, OPC는 보통 포틀랜드 시멘트

른 시스템 배치 등으로 다짐곤란으로 인한 유동성 및 충전성이 요구되었기 때문에 고유동 콘크리트를 적용한 최초의 구조물로 분류할 수 있다. 또한, 시흥 은행동 대우아파트의 DWS는 고유동 콘크리트를 공장제품인 All PC에 적용한 것으로 고유동 콘크리트의汎用化를 시도한 첫 번째의 사례이기도 하다.

특히, 덕수빌딩의 Top down 공법에 사용된 고유동 콘크리트는 기둥·벽체·코아의 연결부위 충전성을 확보하여 구조물의 일체화를 확인할 수 있었으며, 인천지하철 Under pinning slab(간석오거리 역사)의 시공사례는 대량의 고유동 콘크리트를 국내 최초로 현장에 타설한 것으로 고유동 콘크리트의 현장 실용화에 기여한 프로젝트로 간주할 수 있다.

현장에 적용된 사례의 대부분은 플라이애쉬를 사용한 분체계 고유동 콘크리트로, 슬럼프 플로우의 범위는 60~70cm, 굵은골재 용적비(GV)는 50~52%, 잔골재 용적비(Sr)는 45~49%의 범위에 있으며, 경시변화 60분까지 요구되는 유동성 및 자기충전성을 만족하

는 것으로 확인되었다.

최근에 와서, 인천 LNG 저장탱크의 지하연속벽에 병용계 고유동 콘크리트가 대량으로 사용되었는데, 현대건설에서 시공한 #211, 212-TK 및 대우건설·삼성물산이 시공한 #213, 214, 217, 218-TK와 대우건설이 시공한 214, 215-TK가 있다. 고유동 콘크리트의 재료는 벨라이트 시멘트와 석회석 미분말, 그리고 중점제를 사용한 것으로 콘크리트의 재료단가가 비교적 높은 것으로 나타났지만, 현장의 타설조건에 따른 원가상승으로 판단된다.<sup>7)</sup>

#### 4. 고유동 콘크리트의 재료특성

##### 4.1 구성재료의 일반적인 역할

고유동 콘크리트를 구성하는 재료는 일반 콘크리트와 같지만, 요구되는 충전성, 유동성, 재료분리 저항성 등을 만족하기 위하여 시멘트 외에도 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 및



석회석 미분말, 그리고 증점제 등과 같은 재료를 사용해야 하며, 배합설계 및 재료특성을 평가하는 방법도 일반 콘크리트와 다르다. 따라서, 고유동 콘크리트에서 구성재료의 특성 및 역할은 [표 3]과 같이 정리할 수 있다.

[표 3] 고유동 콘크리트에서 구성재료의 역할

구성재료	분류	콘크리트에서의 역할
배합수	액체입자	· 가장 변형되기 쉽고 유동성에 기여
시멘트 및 결합재 잔골재 굵은골재	고체입자	· 콘크리트내의 배합수 이동을 구속 · 입자간의 접촉, 마찰 등의 맞물림 작용으로 변형에 대한 저항성 유지
연행공기	기체입자	· 약간의 배합수를 구속하지만, 골재입자를 지탱하는 능력은 없음
고성능 감수제	-	· 결합재 입자의 구속수와 결합력 변화

고유동 콘크리트의 변형성에 영향을 미치는 고체입자(시멘트, 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말, 석회석 미분말 및 잔·굵은골재)는 틈사이 존재하는 물의 이동을 구속하는 효과와 고체입자간의 맞물림 작용에 의해 변형에 저항하는 효과를 갖으며, 이러한 효과는 주로 입자의 크기에 따라 다르다.

즉, 결합재와 같은 미립자는 물의 이동을 구속하는 효과가 뛰어나며, 굵은골재와 같은 큰 입자는 맞물림 작용으로 변형에 저항하는 효과가 크다. 이러한 효과를 측정하는 방법은 페이스트 상태의 플로우 시험에서 얻은 구속수량과 골재의 실적을 시험으로 판정할 수 있다. 또한, 연행공기는 일반적인 고체입자에 비해 표면에 구속되는 수량 및 변형저항성이 매우 적기 때문에, 공기량 만을 의미하는 값으로 간주하는 것이 타당하다.

고성능 감수제는 고체입자의 분산성능을 개선하기 위한 화학 혼화제로, 고체입자인 결합재의 구속수량을 저감시키기 때문에 입자간의

접촉마찰을 감소시키는 역할을 한다. 이러한 효과는 결합재의 배합조건에 따라 다르지만, 주로 모르타르의 플로우 시험 및 V형 깔대기 유하시험 등으로 판정할 수 있다.

## 4.2 시멘트의 특성

지금까지 개발된 고유동 콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트에 결합재를 치환한 분체계 고유동 콘크리트이지만, 시멘트의 응결속도, 수화발열 및 화학성분 등은 중용열 또는 저열 포틀랜드 시멘트의 규준에 준하는 품질로 관리해야 한다. 시멘트의 초기 수화특성이 유사할 경우에는 결합재의 충전율이 높을수록 시멘트-페이스트의 항복값이 낮아지며, 입도분포가 크고 구형일수록 충전율이 높아진다. 이러한 특성 때문에 시멘트의 입형을 구형화시키는 것이 필요하며, 이로 인하여 시멘트-페이스트 및 모르타르의 유동성을 개선시킬 수 있다.

특히, 동일한 단위수량에서 중용열 시멘트가 보통 포틀랜드 시멘트보다 변형이 크고 유동성이 우수한 것으로 알려져 있으며, 최근에는 중용열 시멘트보다 C<sub>3</sub>S 및 C<sub>4</sub>AF 함유량이 적고 C<sub>2</sub>S(Belite) 함유량이 많은 벨라이트 시멘트가 개발되어 고유동 콘크리트의 유동성 및 변형성을 크게 개선시킬 수 있게 되었다.

중용열 시멘트 및 벨라이트 시멘트가 유동성이 우수한 이유는 시멘트에 함유된 C<sub>3</sub>A 및 C<sub>4</sub>AF의 간극질상과 C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S의 실리케이트 상의 혼화제 吸着擧動이 다르기 때문이다. 특히, C<sub>3</sub>A 및 C<sub>4</sub>AF가 많이 함유된 시멘트는 혼화제의 흡착거동이 불균일하게 되어 分散作用을 효과적으로 발휘할 수 없기 때문에 유동성에 불리한 영향을 미치게 된다. 또한, 고유동 콘크리트에 사용될 시멘트는 중용열 또는 저열 포틀랜드 시멘트의 품질규준 외에도 [표

4)에 나타낸 바와 같이 유동성 관리를 위한 구속수비 및 재령강도 등을 만족해야 한다.

[표 4] 고유동 콘크리트용 시멘트의 기준

측정 항목	기준 값
구속수비 ( $\beta P$ )	· max. 0.95
압축강도 (MPa) 재령 24시간	· min. 10
재령 28일	· min. 30
중성화 깊이 (mm)	· max. 5.0
건조수축변형 ( $\mu$ )	· max. 1,000

여기서, 구속수비( $\beta P$ )는 페이스트의 표준 플로우 시험에서 정해진 각각의 물/시멘트 용적비-플로우 면적비의 관계를 직선으로 回歸分析한 절편을 의미하며, 직선의 기울기를 변형계수( $EP$ )라 한다. 자세한 내용은 고유동

콘크리트의 배합설계에서 서술하고자 한다.

### 4.3 혼화재의 특성

고유동 콘크리트에 사용되는 혼화재는 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말, 석회석 미분말 및 실리카 흙 등이 있으며, 고유동 콘크리트의 성상에 미치는 영향은 [표 5]와 같다.

또한, 고유동 콘크리트의 컨시스턴스에 미치는 혼화재의 요인은 입도분포, 입경 등과 같은 물리적 특성과 초기 수화반응 등과 같은 화학적 특성이 있으며, 이러한 요인이 고유동 콘크리트의 유동성, 자기충진성 등에 미치는 영향을 정확히 파악하여 효과적으로 이용하는 방안이 검토되어야 한다. 이러한 혼화재의 기본적인 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

[표 5] 고유동 콘크리트의 성상에 미치는 혼화재의 영향 (관련성)

평가 특성 및 현상		고로슬래그	플라이 애쉬	석회석 미분말	실리카 흙	비교 (시멘트)
유동성 (최종변형량)	슬럼프 플로우 부족	●	●	●	●	○
	SF 유지시간 미달	○	○	○	○	○
유동성 (변형속도)	변형속도 변동	○	○	○	○	◎
	변형속도 경시변동	○	○	○	○	◎
분리저항성	재료분리, 침강, 부상	◎	◎	◎	◎	◎
블리딩	블리딩, 마감성 양부	○	○	○	○	○
응결시간	응결시간, 마감성 양부	◎	●	●	●	●
공기연행성	공기연행성, 경시변동	●	◎	●	◎	●
측압	응결시간 영향	●	●	●	○	◎
펌프압송성	펌프압 증대	○	◎	○	◎	○
자기수축	자기수축 증대, 균열	◎	○	○	○	○
강도발현성	초기강도 불량, 존치	○	○	●	○	◎
발열특성	온도상승 증대, 균열	●	●	●	●	◎
건조수축	건조수축 증대, 균열	○	○	○	○	○
중성화	중성화 속도 증대, 부식	◎	◎	●	○	◎
차염성	염분침투속도 증대	○	○	●	○	○
내약품성	Scaling, 철근부식	◎	◎	○	◎	◎
알칼리반응	팽창균열, 붕괴 (AAR性)	○	○	●	○	◎

주) 평가방법 : 관련성 大 = ◎, 中 = ○, 小 = ●

### 4.3.1 플라이애쉬

플라이애쉬는 결합재의 구속수 감소 및 경화발열을 저감시킬 목적으로 사용되며, 화학적·물리적 특성은 [표 6]과 같이 KS L 5405의 품질규준에 만족하는지를 확인한 후 사용해야 한다. 또한, 플라이애쉬는 불-베어링 효과로 유동성을 개선할 수 있으며, 수화열 저감, 장기강도 증진, 건조수축 저감과 수밀성 증대, 그리고 알칼리-골재반응의 억제효과 등과 같은 내구성을 향상시킨다. 또한, 플라이애쉬는 사전에 페이스트의 플로우 시험으로 구속수비를 관리하는 것이 바람직하다. 플라이

[표 6] 플라이애쉬의 품질규준 (KS L 5405)

측정 항목	규준 값
이산화규소 (%)	· min. 45
습분 (%)	· max. 1.0
강열감량 (%)	· max. 5.0
비 중	· min. 1.95
비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)	· min. 2,400
단위수량비 (%)	· max. 102
압축강도비 (%) 재령 28일	· min. 60

애쉬는 입형이 구형이고 입도분포가 적당하면, 구속수비가 시멘트보다 매우 낮아지는 장점이 있지만, 함유된 미연탄소가 연행공기 및 고성능 AE감수제를 흡착하는 경향이 있기 때문에 공기량 관리에 유의해야 한다.

### 4.3.2 고로슬래그 미분말

고로슬래그 미분말은 시멘트의 경화발열을 저감시킬 목적으로 사용하며, 국내에서도 고로슬래그 미분말을 혼합한 고로슬래그 시멘트가 시판되고 있다. 그러나, 고로슬래그 미분말에 대한 품질규준은 아직 정립되어 있지 않기 때문에, [표 7]에 나타난 바와 같이 JIS A 6206에 따라 품질을 검토하는 것이 바람직하다.

고유동 콘크리트에 고로슬래그 미분말을 사용할 경우에도 페이스트의 플로우 시험을 실시하여 구속수비를 관리해야 한다. 고로슬래그 미분말은 배합할 때에 반응성 물질을 생성하지 않지만, 시멘트보다 미세한 입자의 비율이 크기 때문에 구속수비는 시멘트보다 약간 증대하는 경향이 있다. 분말도가 높으면 구속수비는 증가하지만, 잔골재의 경계면에 구속

[표 7] 고로슬래그 미분말의 품질규준 (JIS A 6206)

품질항목		종류	고로슬래그 미분말 분말도 (cm <sup>2</sup> /g)		
			4,000	6,000	8,000
비 중			· min. 2.8	· min. 2.8	· min. 2.8
비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)			· 3,000~5,000	· 5,000~7,000	· 7,000~10,000
활성도 지수 (%)	재령 7일		· min. 55	· min. 75	· min. 95
	재령 28일		· min. 75	· min. 95	· min. 105
	재령 91일		· min. 95	· min. 105	· min. 105
플로우 비율 (%)			· min. 95	· min. 95	· min. 90
산화마그네슘 (%)			· max. 10	· max. 10	· max. 10
삼산화유황 (%)			· max. 4.0	· max. 4.0	· max. 4.0
강열감량 (%)			· max. 3.0	· max. 3.0	· max. 3.0
염화물 이온 (%)			· max. 0.02	· max. 0.02	· max. 0.02

되는 수량은 감소하기 때문에 반드시 전체의 수량이 증대되는 것은 아니다.

고로슬래그 미분말은 배합수와 접촉하여도 시멘트 입자와 같이 직접적으로 수화되지 않으며 Glass質로 평활한 입자표면을 갖고 있기 때문에 분말도가 높은 고로슬래그 미분말을 사용하더라도 항복값 및 소성점도가 증대되지는 않는다. 고로슬래그 미분말을 고유동 콘크리트에 사용하면 유동성, 재료분리 저항성 및 자기충전성을 향상시킬 수 있으며, 수밀성·염분차염성·내해수성·내약품성을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라 알칼리-골재반응의 억제 효과를 기대할 수 있다.

#### 4.3.3 석회석 미분말

석회석 미분말은 주로 시멘트의 경화발열 저감을 목적으로 사용되며, 다른 혼화재와 마찬가지로 구속수비를 관리해야 한다. 석회석 미분말의 페이스트에 대한 구속수비는 시멘트보다 일반적으로 적지만, 잔골재의 미립부분과 상호작용을 하기 때문에 모르타르 상태에서는 구속수비가 감소되지 않는다.

석회석 미분말을 고유동 콘크리트에 사용할 경우에 석회석 미분말을 잔골재의 일부(외할)로 취급하는 사례가 많지만, 콘크리트의 유동성에 영향을 미치기 때문에 결합재로 간주한다. 석회석 미분말은 주로 콘크리트의 경화과정에서 발생하는 온도상승 및 경화후의 과도한 강도발현을 억제할 목적으로 사용되는 경우가 많지만, 소성점도를 증진시키는 효과가 있기 때문에 콘크리트의 재료분리 저항성을 개선시킨다.

특히, 석회석 미분말의 사용량이 증대하면 고성능 감수제의 사용량도 증가하고 점성도 증대되기 때문에, 결합재를 포함한 미분말의 용적을 고려하여 적합한 유동성을 갖는 범위에서 사용량을 결정해야 한다.

## 4.4 골재의 특성

### 4.4.1 잔골재의 특성

고유동 콘크리트에 사용되는 잔골재는 콘크리트에서 고체입자로 분류되며 결합재와 굵은 골재의 중간크기를 갖는 입자이다. 따라서, 잔골재는 굳지 않은 콘크리트 상태에서 배합수의 이동을 구속하는 효과와 고체입자 사이의 접촉·충돌에 따른 맞물림으로 변형에 저항하는 효과를 함께 갖는다.

이러한 효과를 잔골재 입자의 크기에 따라 구분하면, 0.06mm미만인 입자는 배합수의 이동을 구속하는 효과가 클 뿐 아니라 결합재와 유사한 작용을 하기 때문에 미립 잔골재로 정의한다. 고유동 콘크리트에 사용되는 잔골재는 기본적으로 KS F 2526의 품질규준을 만족해야 하며, [표 8]에 나타난 바와 같이 미립 잔골재로 분류되는 것은 고유동 콘크리트의 배합시험에 반영해야 한다.

[표 8] 고유동 콘크리트용 잔골재의 품질시험

체분석 시험	흡수율 시험	구속수비
· 0.09mm미만 · 0.06mm미만	· KS F 2504 · 원심력 시험방법	· 미립잔골재

또한, 입자크기가 0.15mm이상인 잔골재와 0.06~0.15mm미만인 잔골재를 분류하여 [표 9]와 같은 별도의 명칭을 사용하도록 한다.

[표 9] 고유동 콘크리트의 배합설계상 잔골재의 분류 및 취급

입자크기	잔골재의 분류	배합설계상 취급
· 0.06mm미만	· 미립 잔골재	· 분체
· 0.06~0.15mm미만	· 잔입자 잔골재	· 굵은입자 잔골재
· 0.15mm이상	· 굵은입자 잔골재	

주) Sand stabilizer를 통과한 잔골재 (미립 잔골재량 = 0으로 취급)

미립 잔골재는 배합시에 결합재로 취급하기 때문에, 전체 잔골재에서 미립 잔골재량을 관리하는 것이 매우 중요하다. 미립 잔골재의 관리는 0.06mm체를 통과한 입자량으로 산정하며, 통과량을 일정한 범위에서 관리할 필요가 있다. 또한, 입자크기가 0.09mm이하인 잔골재는 자체 흡수량에 영향을 주기 때문에, 변화가 클 경우에는 물/결합재 용적비를 수정할 필요가 있다. 이러한 양이 2%이하일 경우에는 구속수비가 거의 결합재와 같기 때문에 배합설계를 하는데 고려하지 않아도 되지만, 2%이상일 경우에는 미립 잔골재의 구속수비를 결합재와 동일한 방법으로 산정하여 배합설계에 반영해야 한다.

#### 4.4.2 굵은골재의 특성

굵은골재는 콘크리트내에서 대부분 큰 고체 입자로 분류되기 때문에, 주로 입자간의 접촉·충돌에 따른 맞물림으로 변형에 저항하는 효과가 크다. 또한, 굵은골재의 입형과 입도분포가 고유동 콘크리트의 자기충전성에 미치는 영향이 크기 때문에, 고유동 콘크리트의 배합설계를 할 때 이러한 영향을 실적으로 반영하는 것이 바람직하다. 특히, 실적율의 관리와 아울러 체가름 시험으로 조립율을 관리해야 한다.

고유동 콘크리트용 굵은골재는 기본적으로 KS F 2526의 품질규준을 만족해야 하며, 단위용적중량 및 실적율 시험은 KS F 2505, 조립율은 KS F 2502의 체가름 시험에 따른다.

## 4.5 혼화제의 특성

### 4.5.1 고성능 감수제의 특성

고성능 감수제의 품질은 [표 10]과 같이 ASTM C 494의 F Type 규준을 만족해야 한다. 고성능 감수제의 효과에 관한 기존의 연구는 대부분 콘크리트의 유동성, 경시변화에 대한 것이며, 분리지항성 및 부착성에 관한 연구는 많지 않다.

고성능 감수제는 콘크리트내의 결합재 입자의 분산상태를 변화시켜 유동성을 향상시키는 화학 혼화제로 고유동 콘크리트에 필수적인 재료이다. 고유동 콘크리트의 자기충전성, 분리지항성 및 유동성을 동시에 만족하기 위해서는 혼화제를 사용하여 물/결합재비를 저감시키거나 증점제를 사용하여 배합설계를 하지만, 어떤 경우에도 고성능 감수제를 사용해야 한다.

고성능 감수제를 사용한 모르타르와 페이스트의 유동성은 온도의 영향을 많이 받기 때문에, 이러한 온도의존성은 사용량에 따라 매우 다르다. 따라서, 경시변화에 따른 슬럼프 플로우에 대한 평가방안도 함께 해결해야 할 과제이다.

### 4.5.2 증점제의 특성

고유동 콘크리트에 사용되는 증점제는 [표 11]에 나타난 바와 같이 셀룰로오스계, 폴리아크릴 아미드계, 그리고 발효에 의한 다당류 폴리머(바이오 폴리머)로 크게 나눌 수 있다.

[표 10] 고유동 콘크리트용 고성능 감수제의 품질규준 (ASTM C 494)

단위수량 (%)	응결시간(hr:min)		압축강도(% : min)			휨강도(% : min)			길이 변화율 (%)	상대내구성 지수
	초결	종결	3일	7일	28일	3일	7일	28일		
max. 88	1:00 earlier nor 1:30 later		125	115	110	110	100	100	max. 135	min. 80

(표 11) 고유동 콘크리트용 증점제의 종류 및 특성

증 점 제 의 특 성				결합재량	단위수량	W/B	
종 류	주성분	중합도(cP)	첨가량(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )	(%)	
셀룰로오스계	수용성	10,000	0.2~0.6	300~450	170~190	40~60	
아크릴계	폴리아크릴 아마이드	-	6	400~450	170~185	40~50	
바이오 폴리머	다당류 폴리머	70,000	0.5~2.0	500	160~175	30~34	
	수용성	200~400	0.35	540~580	175	30~32	
기 타	무기증점제	흡수 폴리머	-	22	440~470	175	37~40
	특수혼화제	수용성 고분자	-	1.8~6.0	310~630	185	30~60

증점제를 사용하면 잔골재의 표면수율 및 골재의 입도변동에 따른 고유동 콘크리트의 품질변동 및 결합재량을 저감시키는 효과가 있다. 그러나, 이러한 효과는 증점제의 종류, 증점 메카니즘, 레오로지 특성(항복값 및 소성점도) 등에 따라 다르다.

셀룰로오스계, 아크릴계 및 수용성(바이오 폴리머)은 물에 녹아서 점성을 증대시키는 특성이 있지만, 수용성은 다른 것에 비해 항복값이 높고 점성계수가 낮다.

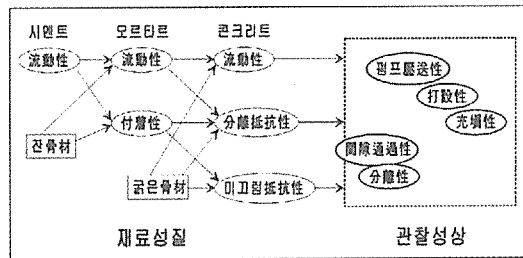
다당류 폴리머는 물에 용해되지 않고 膨潤된 겔입자로 존재하기 때문에, 항복값이 비교적 높고 소성점도가 낮다. 또한, 셀룰로오스계 증점제를 사용한 전단시험에서 첨가율이 증대하면 내부 摩擦角이 작아져 潤滑性이 높아진다.

## 5. 고유동 콘크리트의 평가방법

### 5.1 고유동 콘크리트의 특성평가

유동성, 분리저항성, 간극통과성 및 충전성은 고유동 콘크리트의 성능을 평가하는 중요한 특성으로, 이는 사용재료의 특성, 배합조건, 거푸집 형태, 배근조건 등의 영향을 많이 받는다. 따라서, 고유동 콘크리트의 유동성 및 재료분리 저항성은 재료적 측면에서 평가하고, 간극통과성 및 충전성은 타설부재 및 배근

조건에서 평가하는 것이 바람직하다. 이러한 관점에서 시멘트-페이스트, 모르타르 및 콘크리트의 컨시스턴시와 관련된 고유동 콘크리트의 특성을 평가하면 (그림 5)와 같다.



(그림 5) 컨시스턴시와 관련된 고유동 콘크리트의 특성 평가

즉, 재료적 측면에서 볼 때, 시멘트-페이스트 상태에서는 유동성을, 잔골재가 첨가된 모르타르 상태에서는 유동성 및 부착성을, 굵은 골재가 사용된 콘크리트 상태에서는 유동성, 분리저항성 및 미끄럼 저항성을 평가하고, 부재 및 배근조건을 고려한 현장에서는 간극통과성, 분리저항성 및 펌프압송성, 타설성, 충전성 등을 평가하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

지금까지 제안된 고유동 콘크리트의 평가방법은 [표 12]와 같다.

여기서, 유동성은 콘크리트 재료의 변형특

[표 12] 고유동 콘크리트의 컨시스턴시 평가방법

평가특성	측정항목	하중	평가시험	비고
유동성 (변형저항성)	최종 변형량	자중	- 슬럼프 플로우 - L형 플로우, Box형	- 자중에 따른 횡흐름 거리 측정, 항복값에 좌우
		외력	- 슬럼프 플로우	- 외력으로 항복값, 점성의 영향을 받음
	변형속도	자중	- 슬럼프 플로우 - L형 플로우 속도 - V-Lot 유하시험	- 동일항복값에서 점성비교 - 속도측정의 오차 큼 - 초기속도 측정연구 필요
		외력	- 球인발시험 - 전단 Box 시험	- 하중 및 변형제어로 측정 - 항복값, 소성점도 측정
분리저항성	골재량	자중	- 체가름 시험 - 배근 Box 시험	- 골재분리의 정량화 가능 - 육안으로 측정가능
		외력	- 진동 침강시험	- 제어진동 시험 (효율적)
간극통과성	유량 유동속도	자중	- V-Lot, 배근 Load 및 Box 유하시험 - 배근 L형 플로우	- 변형저항성, 분리저항성 - 시험장치 크기영향 - 수직형 및 수평형
충전성	충전상황	자중	- 장애물 설치한 거푸집 충전시험	- 최종 평가시험 (실물크기) - 정량적 평가 곤란

성을 나타내는 변형저항성의 의미로 사용되며, 콘크리트를 균일한 빙함(Bingham)流 · 로 가정할 때 항복값 및 소성점도와 같은 유동정수(레오로지)로 표현할 수 있다. 유동성 평가시험에는 항복값(연도)의 영향을 받는 슬럼프 및 슬럼프 플로우 시험과 항복값 및 소성점도(점도 또는 점성)의 영향을 받는 L형 플로우(속도계측) 시험 및 V형 깔대기 유하시험 등이 대표적이다.

재료분리 저항성과 간극통과성은 명확하게 구별하기 어렵지만, 철근이 배근된 시험체에 고유동 콘크리트를 통과시킨 후 굽은골재의 변화량을 조사하는 것이 재료분리 저항성의 평가방법이며, 또한 굽은골재의 분리현상 뿐만 아니라 통과속도를 정량화시킨 것이 간극통과성의 평가방법으로 제안되고 있다.

따라서, 재료분리 저항성은 점성이 높은 콘크리트일수록 우수한 반면에 간극통과성은 변

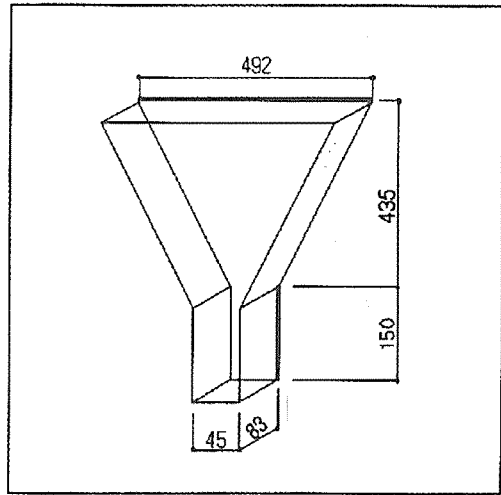
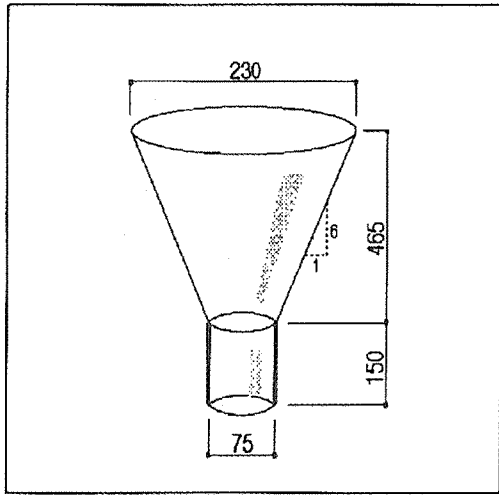
형저항성과 분리저항성이 균형을 이루는 영역에서 우수한 특성을 갖는다. 이러한 간극통과성 시험을 실용적으로 종합 평가한 것이 充填性試驗이다.

여기서는 기존에 제안된 평가시험 장치를 토대로 고유동 콘크리트의 유동성, 분리저항성, 간극통과성 및 충전성에 대한 특성을 정리하고자 한다.

## 5.2 고유동 콘크리트의 유동성 평가

G.H Tattersall이 제안한 회전날개형 시험법은 굳지 않은 콘크리트의 시료에 날개를 회전시켜 토크(Torque)와 회전수로부터 컨시스턴시를 측정하는 것이다.

즉, 굳지 않은 콘크리트를 빙함의 유체로 가정하여 항복값과 소성점도를 측정하는 것으로 원통형 용기에 시료를 채운 후 4개의 날개를



(그림 6) V형 깔대기 유하시험 장치 (○형 및 □형)

회전시켜 회전수( $N$ )와 토크를 측정하며, (식 1)로부터 콘크리트의 항복값 및 소성점도를 산정한다.

$$T = A + B \times N \dots\dots\dots (\text{식 1})$$

여기서,  $T$ 는 토크( $\text{kg} \cdot \text{cm}^2$ ),  $A$ 는 항복값( $\text{kg} \cdot \text{cm}^2$ ),  $B$ 는 소성점도( $\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{min}$ )를 의미한다. 회전날개형 시험법은 유동성을 명확하게 구분할 수 있기 때문에 점성이 큰 고유동 콘크리트에 적용하는 것이 바람직하다.

또한, 고유동 콘크리트의 유동성, 간극통과성을 평가할 수 있는 대표적인 시험법은 V형 깔대기 유하시험으로 [그림 6]과 같다.

시험장치는 형상에 따라 ○형 및 □형으로 구분되지만, 형상에 관계없이 기본적으로 유동속도에 따른 콘크리트의 걸보기 점도를 평가한다. 배출구의 크기와 굵은골재의 최대 크기, 굵은골재량에 따른 맞물림 현상 및 유동속도로 간극통과성, 충전성을 평가할 수도 있다.

시험장치에 투입된 콘크리트가 초기에 갖는 위치에너지는 면의 마찰력과 콘크리트의 변형으로 소비되며, 여기서 변환된 운동에너지가 流下速度로 표시된다.

따라서, 토출구의 크기는 통과할 때 필요한 변형에너지를, V형 깔대기의 높이는 위치에너지를, 句配는 변형 및 마찰에너지를 결정하는 요인이 된다. 또한, 유하시간은 단위수량 변화에 따른 물/시멘트비의 변동을 명확하게 파악할 수 있기 때문에 압축강도와 같은 콘크리트의 경화상태를 예측할 수 있다.

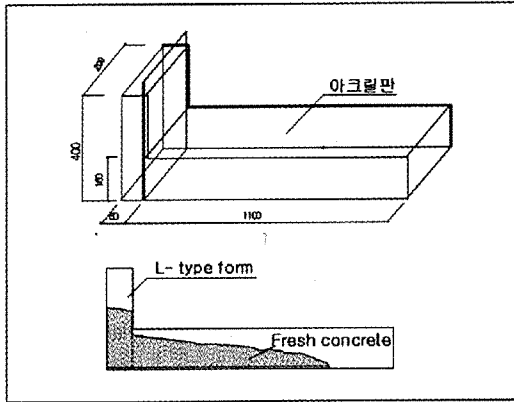
고유동 콘크리트의 유동성을 신속하게 측정하기 위한 시험법으로 [그림 7]과 같은 L형 플로우 시험장치가 제안되었다. 즉, 시험장치의 수직부에 콘크리트를 채운 후 칸막이 판을 끌어올릴 때 콘크리트가 수평부로 이동한 거리( $L_f$ ), 이동을 정지할 때까지의 시간( $t$ ) 및 연직부 콘크리트의 침하량( $LS$ : L형 슬럼프)을 측정하는 시험방법이다. 여기서, 측정된 L형 플로우 속도( $L_f$ )는 빙함 유체의 속도구배를 나타내는 (식 2)에서 추정된 것으로 剪斷應力이 일정한 조건에서 점성을 대표하는 변수이다.

$$\tau = \eta \times \gamma \dots\dots\dots (\text{식 2})$$

여기서,  $\tau$ 는 전단응력,  $\eta$ 는 점성계수, 그리고  $\gamma$ 는 변형속도를 의미한다. 따라서, L형 플



로우는 슬럼프와 같이 항복값을 나타내는 지표이기 때문에, 고유동 콘크리트의 유동성 평가에도 활용할 수 있다.



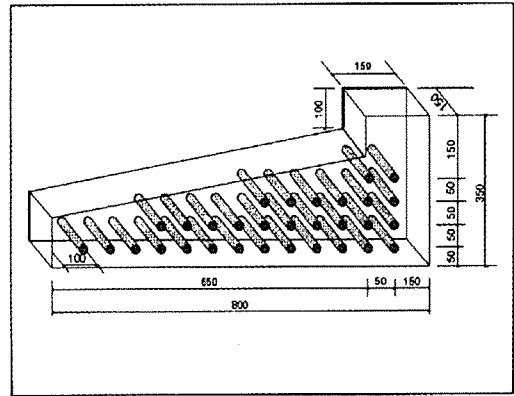
(그림 7) L형 플로우 시험장치

또한, 수직부와 수평부 사이에 철근을 배근하여 콘크리트의 간극통과성을 평가할 수도 있으며, 철근격자를 설치하여 충전성을 평가하는 방법도 있다. 이는 3차원으로 철근격자를 제작하여 L형 플로우 장치의 수평부에 설치한 것으로 격리판을 제거할 때 콘크리트가 수평부 철근을 통해 충전되는 것을 평가할 수 있다.

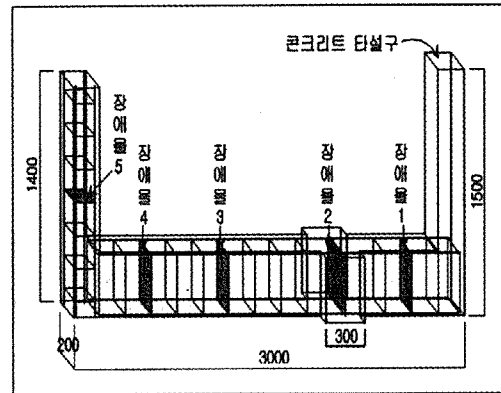
### 5.3 고유동 콘크리트의 충전성 평가

고유동 콘크리트의 충전성은 [그림 8]과 같이 배근부와 주변부에 콘크리트가 충전되는 상황으로 평가할 수도 있지만, 이를 정량적으로 나타내는 것은 어렵다. 이외에도 [그림 9]와 같이 장애물을 설치한 모의부재 시험장치로 고유동 콘크리트의 유동상태, 간극통과성 및 반대편의 역충전 상황을 평가하기도 한다.

이 시험은 타설구에 고유동 콘크리트를 주입하면, 주입된 콘크리트가 자중 및 유동성,



(그림 8) 과밀배근 충전성 시험장치



(그림 9) 모의부재 충전성 시험장치

자기충전성에 의해 다짐을 하지 않고도 수평부로 유동한 후, 반대편 수직부로 역충전하게 된다. 따라서, 장애물을 통과한 고유동 콘크리트의 특성(재료분리 저항성 및 균일성) 및 역충전 높이를 측정하여 고유동 콘크리트의 특성을 종합적으로 평가하는데 활용할 수 있는 시험장치이다.

### 5.4 고유동 콘크리트의 간극통과성 평가

고유동 콘크리트의 간극통과성을 평가는 주

로 실험실에서 최적배합을 결정할 때 이용된다. 대부분의 시험장치는 중력에 의해 콘크리트를 유동시키며, 콘크리트가 간극을 통과한 후 시험장치에 따라 수직하향으로 유동시키는 체 형식, 수평방향으로 유동시키는 플로우 형식, 수직상향으로 유동시키는 Box 형식이 있다. 그러나, 간극통과성 시험장치는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- (1) 시험방법이 簡便할 것
- (2) 廣範圍한 범위의 콘크리트를 평가할 수 있을 것
- (3) 사용되는 頻度 및 再現性이 있을 것

콘크리트의 간극통과성에 영향을 미치는 요인은 간극의 간격, 개구율 및 콘크리트에 작용하는 압력 등이 있으며, 이러한 영향을 종합적으로 고찰하여 실험을 통해 전단력과 통과지표를 함께 해석하는 것이 필요하다. 참고로, 전단력 및 통과지표가 클수록 고유동 콘크리트의 간극통과성은 양호하다.

또한, 간극통과성을 평가하기 위하여 L형 플로우 시험장치에 철근을 횡배근형 또는 중

배근형으로 설치하여 고유동 콘크리트의 간극 통과성을 평가하기도 한다. 평가방법은 통과한 콘크리트의 비율을 측정하는 방안과 수직부의 콘크리트가 낙하한 높이를 측정하는 방안이 있으며, 철근간극을 통과하기 前後의 굽은골재 체가름으로 평가하는 방안 등이 있다.

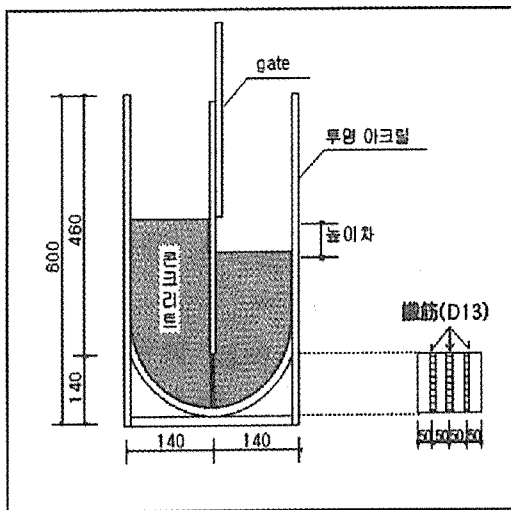
고유동 콘크리트의 간극통과성 시험은 [그림 10]과 같이 U형 Box 충전성 장치의 중앙부에 격리판을 설치하고 한쪽에 콘크리트를 채운 후 격리판을 제거하여 콘크리트가 반대편으로 충전되는 상황으로 평가한다.

이 시험장치의 중앙부에는 D13철근을 50mm 간격으로 설치하고 철근간극을 통과한 콘크리트의 충전높이(H : JSCE 300mm 이상) 또는 충전된 높이차이로 간극통과성을 평가한다. 이때, 간극을 통과한 콘크리트의 시료를 채취하여 체가름으로 씻기시험을 한 후에 골재량으로 간극통과성 및 균일성을 함께 평가하는 것이 바람직하다.

이러한 평가방법은 비교적 간편하기 때문에 고유동 콘크리트의 배합조건을 선정하는데 효과적이며, 시험후 양편의 시료를 채취하여 모르타르/골재의 체적비를 비교하면 고유동 콘크리트의 재료분리에 대한 저항성을 평가할 수 있다.

### 5.5 고유동 콘크리트의 분리저항성 평가

고유동 콘크리트의 분리저항성을 평가하기 위하여 사용되는 부착시험법은 고강도 콘크리트와 마찬가지로 물/시멘트비가 낮은 콘크리트의 재료분리를 평가할 목적으로 사용된다. 재료분리는 페이스트-단위수량, 페이스트-잔골재 및 모르타르-굽은골재의 분리로 구분할 수 있으나, 고유동 콘크리트에서는 모르타르와 골재의 메카니즘으로 간주하여 모르타르 매트릭스를 流動學(Rheology)적으로 파악하



(그림 10) U형 box 충전성 시험장치

는 것이 바람직하다.

또한, 고유동 콘크리트의 분리저항성은 2l의 용기에 콘크리트를 5분간 5mm체에 통과시킨 후 모르타르의 중량을 측정하여 (식 3)에서 정의한 분리지표(SI)로 평가하는 방법도 있다.

$$SI(\text{분리지수}) = \frac{\text{체를 통과한 모르타르 중량}}{2l \text{ 콘크리트내의 모르타르중량}} \times 100(\%)$$

.....(식 3)

모르타르 매트릭스의 항복값과 분리지표(SI)의 상대관계에서 분리지표는 항복값이 증가할수록 급격히 감소하며, 항복값이 어느 이상이 되면 분리지표값은 0에 접근하기 때문에 재료분리가 발생하지 않는 것으로 본다.

## 6. 맺음말

지금까지 고유동 콘크리트의 기본개념, 연구동향, 사용재료의 특성 및 품질의 평가방법에 대하여 서술하였다. 고유동 콘크리트가 국내에 소개된 이래 많은 연구가 추진되었고 현장에서 적용하는 단계에 이르렀지만, 아직도 명확하게 개념을 정립하지는 못한 실정이다. 본 연구에서는 고유동 콘크리트의 보급화 및 상용화를 목적으로 "고유동 콘크리트의 사용재료 및 품질특성"을 정리하였으며, 향후에 고유동 콘크리트의 배합설계 방법 및 분체계·병용계·증점제계 고유동 콘크리트의 일반적인 특성을 정리하여 고유동 콘크리트의 기술을 공유·보급화하는데 기여하고자 한다.

이러한 일련의 과정을 통하여 전국 어떤 조건하의 레미콘 공장에서도 수요자의 Needs에 적극적으로 대처할 수 있기를 바라며, 콘크리트 기술의 선진화에 도움이 되었으면 하는 바

램으로 본고를 갈음하고자 한다.

## 참고문헌

- 1) Gagine, R., Pigeon, M. and A · tcin, P.C. "Deicer salt scaling resistance of high performance concrete", Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete, ACI SP-122, 1989.11
- 2) Carino, N.J., and Clifton, J.R., "Outline of a national plan on high performance concrete ; Report on the NIST/ACI Workshop, May 16~18, 1990." NISTIR 4465, NIST Gaitherburg, Dec. 1990, pp.62
- 3) 岡村 甫., "新しいコンクリート材料への期待", セメント・コンクリート, No.475, 1986.9
- 4) Strategic high way research program, "Research plans", Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., May. 1989
- 5) YVES Malier, "High performance concrete from material to structure", E & FN Spon, 1992
- 6) P.C. A · tcin, "The use of superplasticizers in high performance concrete", High Performance Concrete, France, E & FN SPON, 1992
- 7) Yeong-ho Kwon, "A study on the mix design and quality factors of the combined high flowing concrete using high belite cement", KCI Concrete Journal Vol.14 No.3, Sep. 2002, pp.121~129