

# 분체계 고유동 콘크리트의 재료별 품질성능에 관하여

권 영 호

〈동양대학교 건축공학과 교수, 공박, 시공/품질시험 기술사〉

이 현 호

〈동양대학교 건축공학과 교수, 공박〉

- |                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| 1. 머리말            | 4. 분체계 고유동 콘크리트의 수화열 특성 |
| 2. 사용재료에 따른 분류    | 5. 분체계 고유동 콘크리트의 역학적 특성 |
| 2.1 시멘트           | 5.1 강도특성                |
| 2.2 혼화재           | 5.2 건조수축                |
| 2.3 혼화제           | 5.3 자기수축                |
| 3. 굳지 않은 콘크리트의 성상 | 5.4 투수성                 |
| 3.1 유동성           | 5.5 중성화                 |
| 3.2 자기충전성 및 간극통과성 | 5.6 내동해성                |
| 3.3 재료분리 저항성      | 5.7 내염해성                |
| 3.4 공기량 및 블리딩     | 6. 맺음말                  |

## 1. 머리말

일반적으로 고유동 콘크리트는 사용되는 재료에 따라 크게 분체계(粉體系), 증점제계(增粘劑系) 및 병용계(併用系) 고유동 콘크리트로 구분할 수 있다. 여기서, 분체계 고유동 콘크리트는 초기의 연구단계에서 개발하고자 목표로 정한 것으로, 주로 고로슬래그 미분말, 플라이애쉬 등과 같은 혼화재를 시멘트의 중

량비(內割)로 사용하였지만 최근에는 석회석 미분말(Lime stone powder) 및 벨라이트계 시멘트 등을 사용하는 사례도 증대되고 있다.<sup>1)</sup>

국내에서도 플라이애쉬의 재활용과 분체계 고유동 콘크리트의 개발을 위하여 1994년 建設交通部 國策課題가 수행된 바 있으며, 이러한 연구성과를 바탕으로 많은 현장에 분체계 고유동 콘크리트를 적용하는 사례를 볼 수 있었다.<sup>2)</sup>

그러나, 분체계 고유동 콘크리트의 경우에는 재료분리 저항성(粘性)을 부여하기 위하여 시멘트 외에 혼화재를 많이 사용하기 때문에, 결합재량의 증대에 따른 수화열 및 수축의 증대, 비경제적인 강도발현(높은 압축강도) 등과 같은 문제점을 내포하고 있는 실정이다.

또한, 분체계 고유동 콘크리트는 사용재료 및 배합조건이 한정되어 있기 때문에 골재의 표면수율 변동에 따라 자기충전성에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 분체의 사용에 따른 재료의 승인 및 확인이 필요한 경우도 많다. 이러한 문제점을 해결하고 일반강도 범위에 적용하기 위한 방안으로 재료분리 저감제를 사용하는 증점제계 고유동 콘크리트가 개발되었다.

증점제계 고유동 콘크리트는 분체계 고유동 콘크리트의 단점을 개선하고 압축강도의 범위를 보다 범용화시켜 일반강도에 적용하고자 개발되었지만, 경제성 문제로 활발히 적용하지는 못한 실정이다. 이에 비해 콘크리트의 타설 깊이가 매우 깊은 대용량 LNG 저장탱크의 지하연속벽과 같은 구조물은 대부분 高强度 콘크리트로 설계될 뿐만 아니라 트레미 관으로 콘크리트를 자유낙하시키기 때문에 높은 자기충전성 및 재료분리 저항성이 요구되어 분체와 증점제를 함께 사용하는 병용계 고유

동 콘크리트를 사용하기도 한다.

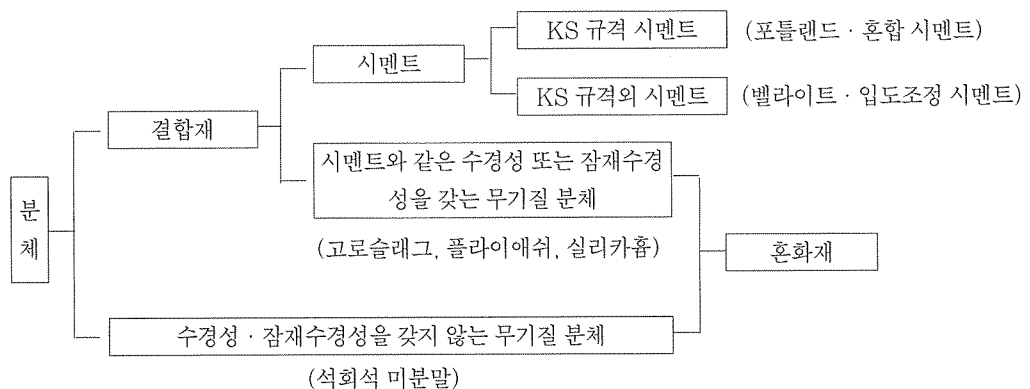
이러한 고유동 콘크리트는 사용되는 재료뿐만 아니라 콘크리트의 특성도 차이가 많기 때문에, 이에 따른 정확한 이해가 필요하며 적용하고자 하는 조건도 면밀히 검토해야 한다.

따라서, 본 고에서는 분체계 고유동 콘크리트를 대상으로 지금까지 보고된 시험결과 또는 실제 시공된 자료를 분석하여 굳지 않은 콘크리트의 성상 및 경화후의 특성, 제조·시공 등의 현상을 정리하여 이에 대한 자료를 공유하고자 한다.

## 2. 사용재료에 따른 분류

분체계 고유동 콘크리트에 사용되는 분체의 종류 및 배합은 매우 다양하지만, [그림 1]에 나타난 바와 같이 시멘트와 혼화제로 나누어 분류할 수 있다.

분체계 고유동 콘크리트는 분체를 비교적 많이 사용하여 콘크리트에 적절한 점도를 부여한 것으로, 사용된 분체의 종류 및 품질이 유동성 및 재료분리 저항성에 미치는 영향을 파악하는 것이 중요하다. 분체에 대한 용어의 정의는 명확하지 않지만, 粉體工學에서는 附着力에 따라 다소 변동이 있는 것, 100 $\mu$ m를 분체



[그림 1] 분체계 고유동 콘크리트의 사용재료에 따른 분류

와 입체의 한계로 간주하고 있다.<sup>3)</sup>

모르타르 상태에서도 100 $\mu\text{m}$ 이상의 입자는 잔골재와 같은 역할을 하기 때문에, 모르타르의 유동성을 저하시키는 경향이 있다. 따라서, 콘크리트 상태에서도 분체의 경계를 100 $\mu\text{m}$ 이하로 보는 것이 타당할 것으로 사료된다.

일본의 시공사례에 따르면, 분체계 고유동 콘크리트에 사용된 시멘트는 고로시멘트 B 중>보통 포틀랜드 시멘트>2·3성분계 시멘트>조강 포틀랜드 시멘트>벨라이트계 시멘트(저열 포틀랜드 시멘트)의 순으로 나타났으며, 또한 분체계 혼화재로는 석회석 미분말>플라이애쉬>고로슬래그 미분말>실리카흙>2성분(고로슬래그+플라이애쉬) 순으로 사용된 것으로 나타났다.<sup>4)</sup>

이러한 분체계 고유동 콘크리트에 사용되는 재료의 특성을 정리하면 다음과 같다.

## 2.1 시멘트

분체계 고유동 콘크리트에 사용되는 시멘트는 대부분 혼합 시멘트이며, 보통 포틀랜드 시멘트를 단독으로 사용하는 경우는 거의 없다. 최근에 와서 시멘트의 구성광물 중에서  $\text{C}_3\text{A}$  및  $\text{C}_4\text{AF}$  함유량이 적고  $\text{C}_2\text{S}$ (Belite) 함유량이 많은 벨라이트계 시멘트가 개발되어 고유동 콘크리트용 시멘트로 사용되기 시작하였다.

시멘트의 종류별 모르타르의 항복값을 비교한 연구결과에 따르면, 보통 포틀랜드 시멘트>조강 포틀랜드 시멘트>중용열 시멘트>벨라이트계 시멘트 순으로 항복값이 감소하는 경향을 나타내었는데, 중용열 및 벨라이트계 시멘트의 유동성이 높은 이유는 시멘트 성분 중에  $\text{C}_3\text{A}$  및  $\text{C}_4\text{AF}$ 의 間隙質相과  $\text{C}_3\text{S}$  및  $\text{C}_2\text{S}$ 의 실리카겔트 상에 대한 혼화제의 吸着舉動이 다르기 때문이다.

즉,  $\text{C}_3\text{A}$  및  $\text{C}_4\text{AF}$ 량이 많은 시멘트 입자는

혼화제의 흡착거동이 균일하지 않기 때문에, 分散作用을 발휘하지 못하는 것으로 사료된다.<sup>7)</sup> 따라서, 이러한 측면을 고려하면, 분체계 고유동 콘크리트에는 중용열 또는 벨라이트계 시멘트를 사용하는 것이 가장 적합한 것으로 평가된다.

## 2.2 혼화재

분체계 고유동 콘크리트에는 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬와 같은 혼화재를 많이 사용하는데, 특히 시멘트를 제조할 때에 혼합한 2성분계 또는 3성분계 저발열 시멘트로 사용하는 사례도 많다.

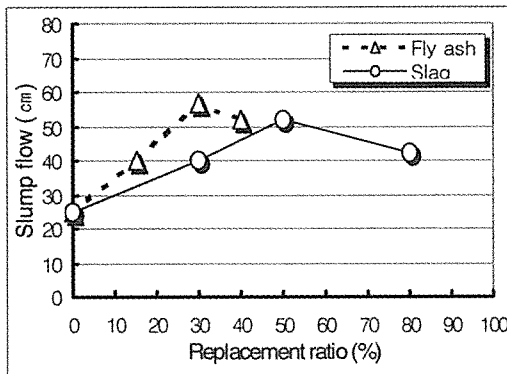
고로슬래그 미분말은 비표면적이 3,000~10,000 $\text{cm}^2/\text{g}$  범위가 비교적 많이 사용되고 있으며, 비표면적이 10,000 $\text{cm}^2/\text{g}$  정도로 매우 높은 경우에는 콘크리트의 점도가 매우 증대되기 때문에 유동성에는 나쁜 영향을 미치는 경우도 있다.

플라이애쉬는 일반적으로 비표면적이 4,500~5,000 $\text{cm}^2/\text{g}$  범위가 많이 사용되고 있지만, 최근 전기집진기의 채집회포 및 분급기로 입도를 선별할 수 있기 때문에 비표면적이 8,000 $\text{cm}^2/\text{g}$  정도인 미분말 플라이애쉬의 생산도 가능하게 되었다. 비표면적이 높은 플라이애쉬는 품질변동이 적을 뿐만 아니라 구형입자 비율이 높기 때문에, 유동성이 우수하고 블리딩이 적어 고유동 콘크리트에 적합한 것으로 나타났다.

또한, 이러한 혼화재가 모르타르의 유동특성에 미치는 영향은 종류에 따라 다르다. 예를 들면, 고로슬래그 미분말의 경우에는 물과 접촉하더라도 시멘트 입자와 같이 직접 수화반응을 하지 않는 특성과 유리질로 평활한 입자 표면을 갖기 때문에, 분말도가 높은 고로슬래그 미분말을 사용하더라도 항복값 및 소성점

도의 증대를 기대할 수 없다. 그러나, 플라이 애쉬는 입형이 구형이기 때문에 불-베어링 효과에 의한 유동성의 향상을 기대할 수 있다.

[그림 2]는 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬를 각각 혼입한 비율에 따른 분체계 고유동 콘크리트의 슬럼프 플로우를 측정한 결과이다.<sup>6)</sup>



(그림 2) 혼화제의 치환율과 슬럼프 플로우 관계

측정결과, 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬를 사용한 분체계 고유동 콘크리트에서 유동성을 개선할 수 있는 분체량에 대한 최적 치환율이 존재하는 것으로 나타났다. 즉, 분체의 입도 및 입형에 따라 다르지만, 일반적으로 고로슬래그 미분말은 45~70%, 플라이애쉬는 15~30%정도가 가장 효과적인 치환범위로 나타났다.

석회석 미분말은 주로 경화과정에서 콘크리트의 온도상승 및 경화후에 과도한 강도발현을 억제할 목적으로 사용되지만, 고유동 콘크리트의 소성점도를 증대시킬 수 있기 때문에, 재료분리 저항성을 개선시키는 효과가 있다.

### 2.3 혼화제

고유동 콘크리트는 높은 유동성과 우수한

재료분리 저항성을 동시에 만족해야 하기 때문에, 시멘트와의 적합성을 고려하여 혼화제의 선정 및 사용량이 매우 중요하다. 특히, 분체를 사용하여 재료분리 저항성을 부여하는 분체계 고유동 콘크리트의 경우에는 유동성이 확보되는 범위에서 단위수량을 가능하면 줄이는 것이 바람직하다.

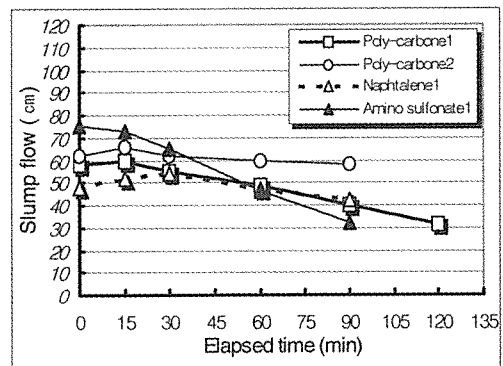
현재, 가장 많이 사용되는 고성능 AE감수제는 크게 폴리-카르보산계, 나프탈렌계, 아미노-설펜산계 및 멜라민계로 구분할 수 있다. 이러한 고성능 AE감수제를 사용할 경우에는 사용량·첨가시기 및 배합조건 등이 고유동 콘크리트의 성상에 영향을 미치기 때문에 신뢰할 수 있는 자료 또는 시험으로 확인해야 한다.

분체계 고유동 콘크리트에 미치는 고성능 AE감수제의 영향은 다음과 같다.

#### 2.3.1 슬럼프 플로우의 유지성능

분체계 고유동 콘크리트에서 슬럼프 플로우의 유지성능은 [그림 3]에 나타난 바와 같이 고성능 AE감수제의 종류에 따라 다르다.

즉, 나프탈렌계의 경우, 배합직후 슬럼프 플로우가 약간 증가하는 경향을 나타내면서 일정한 슬럼프 플로우를 유지하는 것이 많다. 아



(그림 3) 혼화제의 종류에 따른 슬럼프 플로우의 경시변화

미노-설폰산계의 경우에는 배합직후부터 서서히 슬럼프 플로어가 저하되는 경향을 보였으나, 폴리-카르본산계(2)는 슬럼프 플로어의 유지성능이 매우 양호한 것으로 나타났다.

### 2.3.2 소성점도

동일한 슬럼프 플로어에서도 고성능 AE감수제의 종류에 따라 모르타르의 소성점도가 다르다. 특히, 폴리-카르본산계는 나프탈렌계에 비해 소성점도가 대부분 낮은 것으로 나타났다.<sup>7)</sup>

### 2.3.3 블리딩 및 응결시간

고유동 콘크리트의 블리딩율과 응결시간은 고성능 AE감수제의 사용량과 관계되는데, 사용량이 증가하면 블리딩율은 증가하고 응결시간도 지연된다. 응결시간은 주성분의 종류에 따라 차이가 있으며, 특히 낮은 온도에서 저발열 시멘트에 나프탈렌계 고성능 AE감수제를 사용할 경우에는 현저한 응결지연이 발생하며, 이에 따라 블리딩율도 증가한다.

이상과 같이 고유동 콘크리트의 유동성, 재료분리 저항성, 품질의 경시변화 등에 미치는 고성능 AE감수제의 영향 및 온도의존성은 주성분 외에도 분체의 종류에 따라 다르게 나타나기 때문에, 향후 통계적인 연구와 유동성 측면에서 재료분리 저항성 및 자기충전성의 관계를 검토할 필요가 있다.

## 3. 굳지 않은 콘크리트의 성상

분체계 고유동 콘크리트에 요구되는 굳지 않은 콘크리트의 성상은 유동성, 재료분리 저항성, 자기충전성, 간극통과성 및 블리딩율, 공기량 등을 들 수 있으며, 이에 대한 특성을 정리하면 다음과 같다.

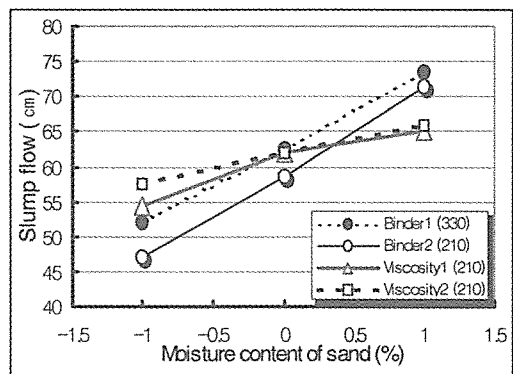
### 3.1 유동성

고유동 콘크리트의 유동성은 일반적으로 슬럼프 플로어 시험으로 평가한다. 시공사례의 슬럼프 플로어를 보면, 슬래브, 기둥과 같은 구조물은 60~65cm범위가 많고, 벽체는 65cm 범위가 많은 것으로 나타났다. 또한, 기초구조물은 50~60cm정도로 낮는데, 이러한 차이는 구조물의 형상, 크기 및 배근조건에 따라 유동성을 선정하기 때문이며, 슬럼프 플로어의 허용폭은 대부분  $\pm 5$ cm범위에 있는 것으로 나타났다.

분체계 고유동 콘크리트의 유동성 및 자기충전성은 사용되는 분체 및 혼화제의 종류와 사용량에 따라 다르지만, 골재의 품질 및 콘크리트의 배합조건과 온도에 따라라도 차이가 있다. 특히, 분체계 고유동 콘크리트는 증점제 및 병용계 고유동 콘크리트에 비해 잔골재의 표면수율 및 조립율의 영향을 많이 받는다.

[그림 4]는 잔골재의 표면수율 변동에 따른 고유동 콘크리트의 종류별 슬럼프 플로어의 측정결과를 나타낸 것이다.<sup>8)</sup>

즉, 잔골재의 표면수율이 1% 변동하면, 분체계 고유동 콘크리트는 슬럼프 플로어가 약 25cm정도로 크게 변하지만, 增粘劑를 첨가한



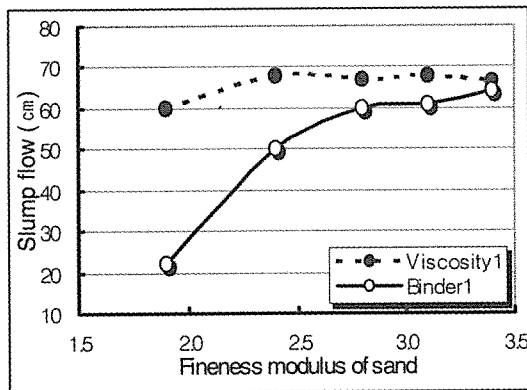
(그림 4) 잔골재의 표면수율과 슬럼프 플로어 관계

併用系 高流動 콘크리트는 변동폭이 비교적 적은 것으로 나타났다. 또한, 증점제계 고유동 콘크리트는 분체계 고유동 콘크리트에 비해 충전성능은 낮지만, 잔골재의 표면수율 변동에 대한 영향은 적은 것으로 나타났다

[그림 5]는 분체계 및 병용계 고유동 콘크리트를 대상으로 잔골재의 조립을 변동에 따른 슬럼프 플로우의 영향을 측정된 결과이다.

분체계 고유동 콘크리트의 경우, 잔골재의 조립율이 낮은 범위에서 슬럼프 플로우가 민감하게 반응하였지만, 병용계 고유동 콘크리트는 조립을 변동에 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 그러나, 굵은 골재의 조립을 변동(6.3~6.9)에 대한 슬럼프 플로우의 영향은 크지 않았다. 특히, 분체계 고유동 콘크리트의 슬럼프 플로우는 콘크리트의 온도, 배합시간 등의 영향을 많이 받는데, 배합시간이 길수록, 콘크리트의 온도가 높을수록 슬럼프 플로우의 손실이 증가하였다.

증점제계 고유동 콘크리트의 경우, 경시변화에 따른 슬럼프 플로우는 초기에 큰 편이지만 지연형 고성능 AE감수제를 함께 사용할 경우에는 분체계 고유동 콘크리트의 경시변화와 유사한 경향을 나타내었으며, 슬럼프 플로우에 관계없이 펌프압송에 의해 콘크리트의 점



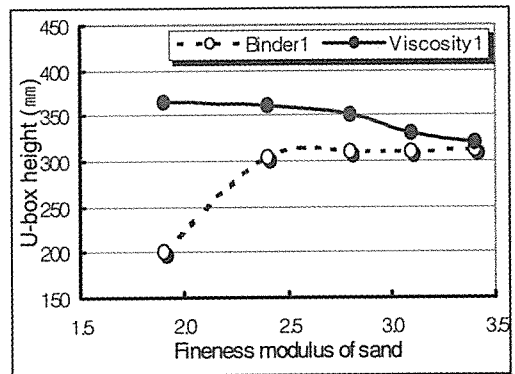
(그림 5) 잔골재의 조립을 변동과 슬럼프 플로우 관계

성이 저하되는 경향을 보였다.

### 3.2 자기충전성 및 간극통과성

고유동 콘크리트의 자기충전성 및 간극통과성은 U형 Box 충전성시험, L형 플로우 시험으로 평가하며, 경우에 따라 구조물의 배근조건 및 타설조건을 고려한 실제 모델시험으로 평가하는 방안이 제시되고 있다.

[그림 6]은 잔골재의 조립을 변화에 따라 고유동 콘크리트의 U형 Box 충전성 높이에 미치는 영향을 실험적으로 검토한 결과를 나타낸 것이다.



(그림 6) 잔골재의 조립을 변동에 따른 충전성 높이

분체계 고유동 콘크리트는 병용계 고유동 콘크리트에 비해 잔골재의 조립을 변화에 민감한 것으로 나타났는데, 이는 병용계의 경우 증점제를 첨가하여 콘크리트의 재료분리 저항성을 향상시키고 유동성을 높일 수 있기 때문에 조립율의 변화에 영향을 덜 받는 것으로 사료된다.

### 3.3 재료분리 저항성

고유동 콘크리트의 재료분리 저항성을 평가

하는 방법은 현재 50cm 슬럼프 플로워의 도달 시간, V형 및 O형 깔대기 유하시험 등으로 평가하지만, 추천하는 목표값은 구조물의 조건에 따라 차이가 있다.

분체계와 증점제계 고유동 콘크리트의 V형 깔대기 유하시간을 비교한 결과, 분체계 고유동 콘크리트는 시간이 경과하더라도 유하시간이 약간 증가하는데 비해, 증점제계는 배합직 후부터 유하시간이 크게 증대하는 것으로 나타났다.

### 3.4 공기량 및 블리딩

고유동 콘크리트의 유동성, 재료분리 저항성, 자기충전성 및 간극통과성 외에도 굳지 않은 콘크리트의 성상으로 공기량 및 블리딩이 있다. 블리딩율의 관리목표는 대부분 0~3%이며, 지금까지의 실적으로 볼 때 1~3%가 가장 많은 것으로 나타났다.

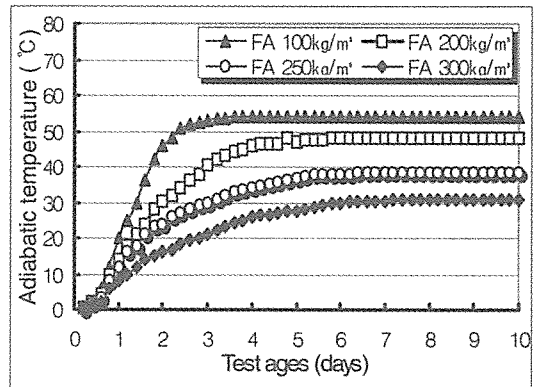
또한, 공기량의 관리값은 일반 AB콘크리트와 마찬가지로 4~5%의 범위이다. 특히, 공기량 변화에 영향을 미치는 요인으로 펌프압송을 꼽을 수 있다. 분체계와 증점제계 고유동 콘크리트에 대한 압송전후의 공기량 변화를 보면, 배관직경이 같을 경우에는 차이가 없지만, 배합조건에 따라 큰 차이가 있다.

## 4. 분체계 고유동 콘크리트의 수화열 특성

일반적으로 콘크리트의 단열온도 상승량은 단위 시멘트량에 비례하기 때문에, 분체계 고유동 콘크리트에서는 수화열의 저감을 위하여 저발열 시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애쉬 등이 많이 사용되며, 최근에는 벨라이트계 시멘트 및 석회석 미분말이 많이 사용되고 있다. 특히, 벨라이트계 시멘트는 수화열이 높은

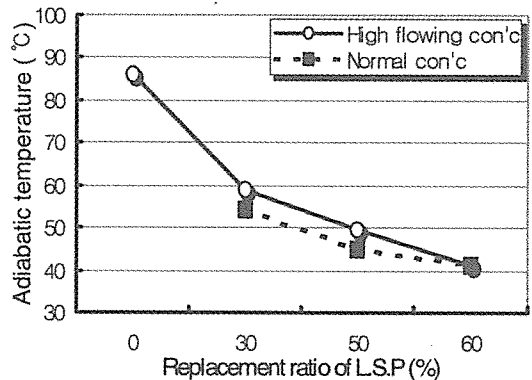
$C_3A$  및  $C_3S$ 의 함량이 적기 때문에, 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 단열온도 상승량 및 반응 초기의 온도상승 속도가 상대적으로 낮다.

[그림 7]은 플라이애쉬의 치환량을 100~300kg/m<sup>3</sup>에서 4단계 변화시킨 고유동 콘크리트의 단열온도 상승량에 대한 시험결과(재령 10일)를 나타낸 것이다.<sup>9)</sup>

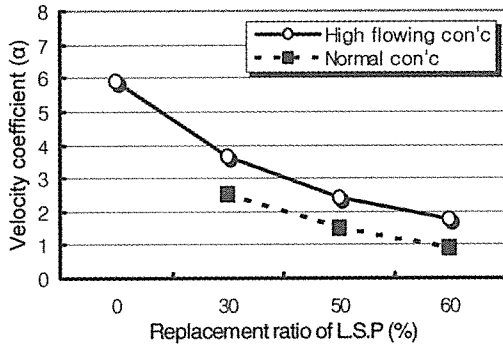


[그림 7] 플라이애쉬의 치환량에 따른 단열온도 시험결과

[그림 7]에서 보듯이 플라이애쉬의 치환량이 증가할수록, 최종 단열온도 상승량 및 온도상승 속도가 감소되는 경향을 보였다. 또한,



[그림 8] 석회석 미분말의 치환율에 따른 최종 단열온도 상승량



[그림 9] 석회석 미분말의 치환율에 따른 수화속도

잠재수경성이 없는 석회석 미분말을 사용한 콘크리트의 단열온도 시험결과는 [그림 8] 및 [그림 9]와 같다.

시험결과, 석회석 미분말의 치환율에 따른 최종 단열온도 상승량 및 수화속도는 거의 각각 직선적으로 감소되는 것을 알 수 있었다.<sup>10)</sup> 따라서, 수화열의 저감효과가 있는 혼화재를 고유동 콘크리트에 사용한 경우, 단열온도 상승곡선은 일반적으로 초기의 발열지연을 고려한 (식 1)에 가깝지만, 벨라이트계 시멘트를 사용한 경우에는 장기재령에 있어서 벨라이트의 수화거동을 고려할 필요가 있다.

$$T = K \cdot [1 - \exp(-\alpha \cdot t^\beta)] \dots \dots \dots \text{(식 1)}$$

여기서, T는 단열온도 상승량(°C), t는 재령(일) 및 K, α, β는 실험상수를 의미한다. 온도응력을 해석할 경우에는 단열온도 상승량의 추정식 외에도 열팽창 계수와 초기재령의 콘크리트 품질에 관한 자료가 필요하다.

## 5. 분체계 고유동 콘크리트의 역학적 특성

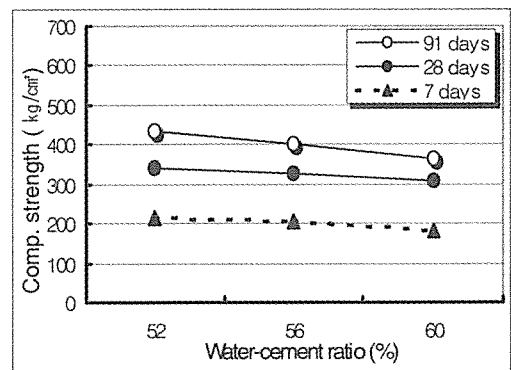
### 5.1 강도특성

#### 5.1.1 압축강도

분체계 고유동 콘크리트는 일반적으로 물/시멘트비가 낮은 반면에 고성능 AE감수제의 사용량이 많기 때문에, 응결시간은 약간 증대하지만 압축강도는 일반 콘크리트에 비해 약간 증대하는 경향이 있다. 최근, 강도발현이 우수한 벨라이트계 시멘트 및 석회석 미분말을 사용하는 사례가 증대되고 있기 때문에, 분체계 고유동 콘크리트에서도 강도영역을 확장시킬 수 있게 되었다. 또한, C<sub>2</sub>S 함유율이 높은 중용열 포틀랜드 시멘트 및 벨라이트계 시멘트의 경우, 재령 28일 이후에도 높은 강도증진을 기대할 수 있다.

플라이애쉬를 사용한 분체계 고유동 콘크리트의 경우, 초기재령의 강도발현은 비교적 낮지만, 재령 91일 후에는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 것과 유사한 강도수준을 확보할 수 있다. 또한, 플라이애쉬의 치환율 0~50%인 범위에서 치환율과 강도발현은 (-)관계를 갖기 때문에 강도범위를 조정할 수 있다.

고로슬래그 미분말을 사용한 분체계 고유동 콘크리트의 경우, 치환율과 장기강도는 (+)관계를 갖기 때문에, 고로슬래그 미분말의 치



[그림 10] 석회석 미분말에 따른 물/결합재비와 강도발현



환율을 증대시키면 강도발현은 증대하는 경향이 있다.

석회석 미분말은 潛在水硬性이 거의 없기 때문에, 석회석 미분말을 사용한 분체계 고유동 콘크리트에서는 석회석 미분말을 제외한 결합재에 대하여  $\sigma$ -W/B의 관계가 성립되며, [그림 10]에 나타난 바와 같이 석회석 미분말의 치환율(150kg/m<sup>3</sup>)에 따라 요구강도를 조정할 수 있다.

또한, 석회석 미분말을 시멘트의 外割(Addition method)로 첨가한 분체계 고유동 콘크리트의 경우에는 석회석 미분말에 의한 공극의 충전효과와 결합재의 분산효과로 인하여 강도가 증진된다.<sup>11)</sup>

### 5.1.2 인장 및 휨강도

분체계 고유동 콘크리트의 사용재료 및 배합조건이 인장강도에 미치는 영향에 대한 연구자료는 거의 없지만, 500~900kg/cm<sup>3</sup>범위에서 압축강도가 증가함에 따른 인장강도의 증가비율은 현재에 사용되는 식을 만족한다. 실험값에 의한 인장 및 휨강도 산정식은 (식 2)와 같다. 여기서,  $f_c$ 는 압축강도이며, 단위는 kg/cm<sup>2</sup>이다.

$$\begin{aligned} \text{인장강도}(f_t) &= 1.94 \cdot (f_c)^{0.464} \\ \text{휨강도}(f_b) &= 1.99 \cdot (f_c)^{0.554} \dots\dots\dots (\text{식 2}) \end{aligned}$$

### 5.1.3 구조체 강도

고유동 콘크리트의 구조체 강도는 표준양생 공시체의 강도와 비교할 때 약 90~120% 정도이지만, 일반 콘크리트에 비해 수직방향의 타설높이와 수평방향의 유동거리가 크기 때문에 구조체의 수직방향 또는 수평방향에 대한 강도의 균일성이 문제가 될 수 있다.

수직방향의 경우, 하부에서 채취한 코아강도가 상부의 강도보다 약간 높은 것으로 나타

났는데, 이는 고유동 콘크리트가 일반 콘크리트보다 측압이 높기 때문에 자중에 의한 다짐 효과의 영향으로 사료된다. 그러나, 지하연속벽의 경우, 높이에 따라 강도차이는 크지 않는 것으로 나타났다.<sup>12)</sup>

수평방향의 경우, 유동거리에 따라 자기충전성이 다르기 때문에, 강도 및 탄성계수가 다른 경우가 많다. 따라서, 콘크리트의 유동성, 재료분리 저항성 및 자기충전성에 따라 강도 및 품질의 편차가 발생할 수 있기 때문에 유의해야 한다.

### 5.1.4 탄성계수

고유동 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 단위 굽은골재량이 적고 각종 혼화재가 사용되기 때문에, 정탄성계수가 약간 감소하는 경향이 있다. 일반적으로 압축강도 700~1,000 kg/cm<sup>2</sup>인 범위에서는 강도증가에 따른 정탄성계수의 증가비는 토목학회 표준식에 비해 낮지만, ACI식 및 혼화재의 종류를 고려한 New RC식에 가깝다. 또한, 단위 페이스트량과 정탄성계수/압축강도비의 평방근의 관계는 (-)관계를 갖는 것으로 확인되었다.

## 5.2 건조수축

분체계 고유동 콘크리트는 단위 페이스트량이 많고, 물/결합재비는 일반적으로 낮다. 이러한 배합조건의 측면에서 전자는 건조수축을 증대시키는 요인으로 작용하지만, 후자는 건조수축을 저감시키는 요인으로 작용한다. 따라서, 이러한 요인의 영향에 따라 분체계 고유동 콘크리트의 건조수축이 결정된다.

단위수량이 동일한 경우, 분체계 고유동 콘크리트의 건조수축량은 일반 콘크리트와 거의 같거나 작지만, 사용되는 시멘트 및 혼화재의 종류와 배합조건에 따라 건조수축량이 매우

다르기 때문에, 사전에 충분히 검토해야 한다.

또한, 분체계 고유동 콘크리트의 장기적인 건조수축은 일반 콘크리트와 거의 같지만, 건조초기에는 약간 큰 경향이 있다. 이러한 원인은 명확하지 않지만, 분체를 많이 사용함에 따른 매트릭스의 세공구조와 강도발현의 영향에 의한 것으로 사료된다. 특히, 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬는 각각 잠재수경성이 다르기 때문에, 포졸란 반응의 진행에 따른 세공구조의 변화도 다르게 나타난다.

따라서, 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬와 같은 혼화재를 사용할 경우에는 잠재수경성 및 포졸란 반응에 영향을 주는 초기재령의 양생조건에 대해 사전에 검토할 필요가 있다.

### 5.3 자기수축

콘크리트는 수분의 공급이 없는 상태에서도 경화가 진행되어 약간씩 체적이 감소하게 된다. 이러한 체적감소의 원인은 시멘트가 물과 화학반응을 하여 생성된 수화생성물의 체적이 반응에 기여한 시멘트와 물의 원래 용적보다 감소되기 때문으로 알려져 있다. 시멘트-페이스트의 실질적인 체적수축은 10% 이상으로 비교적 크지만, 콘크리트에 혼합된 골재가 페이스트의 수축을 구속하기 때문에 시멘트 경화체 내부에는 매우 미세한 공극이 분산적으로 발생하며, 따라서 콘크리트 전체의 체적수축(自己收縮)은 매우 작기 때문에 기존의 일반 강도 콘크리트에서는 거의 문제가 되지 않았다.

그러나, 결합재량이 많은 분체계 고유동 콘크리트는 고성능 AE감수제의 사용에 따라 결합재의 수화확정도가 향상되기 때문에 자기수축도 증가할 가능성이 있을 것으로 사료된다.

따라서, 지금까지 연구된 기존의 결과를 토대로 고유동 콘크리트의 자기수축에 관한 특

성을 정리하고자 한다.

#### 5.3.1 자기수축 메커니즘

최근, 시멘트 및 혼화재료의 종류가 다양화되고 있으며, 부배합 콘크리트의 사용사례도 증가하고 있기 때문에 이 분야에 대한 연구의 필요성이 증가되고 있다. 기존의 연구를 통해 자기수축의 메커니즘을 정리하면 다음과 같다.

시멘트와 물의 반응으로 생성되는 수화생성물의 체적은 반응전의 체적에 비해 감소하게 된다. 이러한 체적감소는 시멘트의 수화반응식에 의해 산정된 수축율과 실측값을 비교해 볼 때, 거의 일치한다.

즉, 콘크리트의 자기수축은 외부에서 수분의 공급 및 확산이 없는 상태에서도 시멘트의 수화에 따라 체적이 감소하는 현상을 말한다. 이러한 현상은 시멘트의 수화생성물의 체적이 반응전의 물과 시멘트 체적의 합보다 감소하여, 시멘트 경화체가 실질적으로 건조상태로 되는 자기수축에 따른 것으로 이러한 구동력은 자기수축에 의해 세공중에 물이 존재하지 않는 공극의 발생으로 형성되는 메니스 가스 발생하는 負壓으로 사료된다.

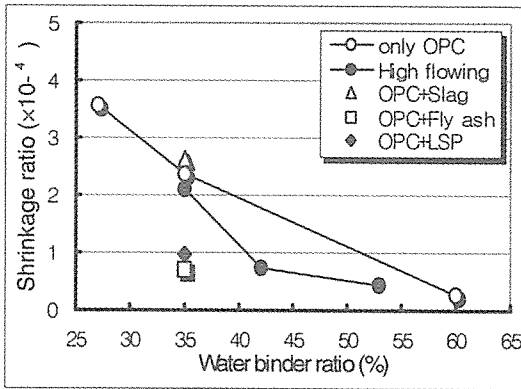
이러한 부압은 세공반경에 반비례하기 때문에, 일반 콘크리트와 같이 세공구조가 비교적 큰 경우에는 별로 크지 않다. 따라서, 일반 콘크리트에서는 골재의 구속정도에 비해서 자기수축의 應力水準이 낮기 때문에 콘크리트 전체로 볼 때, 큰 수축은 발생하지 않는다.

시멘트-페이스트의 자기수축은 시멘트를 구성하는 각종 광물의 수화반응으로 형성된 수화생성물의 종류에 따라 다르며, 특히 間隙質 중에서  $C_3A$ 의 수화반응은 자기수축과 밀접한 관련이 있다. 즉,  $C_3A$ 의 함유율이 높으면 자기수축에 의한 변형이 증가하게 된다.<sup>13)</sup> 이에 비해  $C_3S$ 와  $C_2S$ 와 같은 실리게이트의 수화

반응은 자기수축과 거의 관련이 없다.

또한, 보통 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 미분말을 사용한 경우에는 자기수축 변형이 증가되며, 플라이애쉬 및 석회석분을 사용한 경우에는 자기수축 변형이 감소되는 경향이 있다.

배합조건에 따른 영향을 검토하면, 단위수량 및 결합재량이 증가할수록, 물/결합재비가 감소할수록 자기수축에 의한 변형은 증가하는 경향이 있다. [그림 11]은 물/결합재와 자기수축에 의한 변형의 관계를 나타낸 것이다.<sup>14)</sup>



(그림 11) 물/결합재비에 따른 자기수축 변형의 관계

실험결과, 물/결합재비가 감소할수록(즉, 단위결합재량이 증가할수록), 자기수축에 의한 변형이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 자기수축에 의한 변형이 균열을 발생시킬 수 있기 때문에 내구성에 미치는 영향을 검토해야 한다.

### 5.3.2 자기수축에 영향을 미치는 요인

시멘트-페이스트의 시험에서 자기수축 변형에 영향을 미치는 요인을 정리하면 다음과 같다.

① 물/시멘트비가 낮을수록 자기수축에 의

한 변형은 증가된다.

② 조강 시멘트를 사용하면, 초기재령에서의 수축변형은 증가된다.

③ 고로 시멘트 1급을 사용하면, 장기재령에서의 수축변형은 증가된다.

④ 중용열 시멘트를 사용하면, 수축변형은 매우 감소된다.

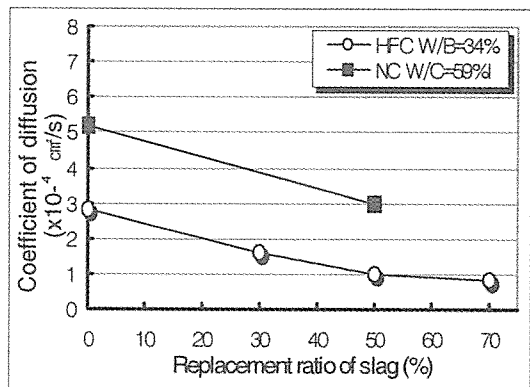
또한, 모르타르 및 콘크리트의 시험에서 자기수축 변형에 영향을 미치는 요인을 정리하면 다음과 같다.

① 골재의 체적 및 탄성계수가 증가할수록, 수축변형은 감소된다.

② 모르타르 및 콘크리트를 시멘트-페이스트와 골재의 2상 재료로 가정하고, 길이변화에 관한 기존의 複合側(Hobbs model)을 사용하면 페이스트의 수축변형으로부터 모르타르 및 콘크리트의 수축변형을 예측할 수 있다.

## 5.4 투수성

[그림 12]는 고로슬래그 미분말을 치환에 따른 확산계수를 나타낸 것이다.<sup>17)</sup>



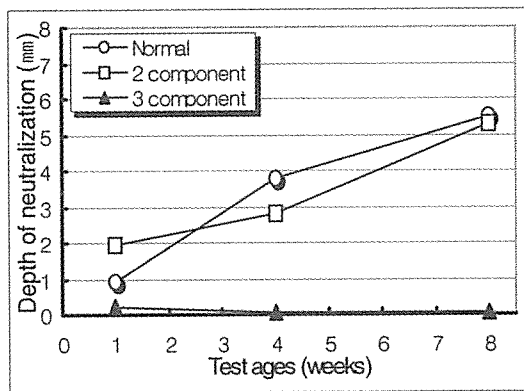
(그림 12) 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 투수성

고유동 콘크리트의 확산계수는 물/결합재

비가 낮기 때문에 세공조직이 치밀할 뿐만 아니라 불리딩이 거의 없기 때문에 일반 콘크리트에 비해 우수하다. 그러나, 플라이애쉬 및 석회석 미분말을 치환한 고유동 콘크리트의 수밀성은 약간 감소되는 경향이 있다. 따라서, 사용재료 및 배합조건을 적절히 선정하면, 높은 수밀성을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

### 5.5 중성화

분체계 고유동 콘크리트는 각종 혼화재를 사용하기 때문에 수산화 칼슘의 농도는 낮지만, 물/결합재비가 낮은 경화체의 내부조직은 치밀할 뿐만 아니라 적은 불리딩으로 골재하부의 공극이 감소되기 때문에 중성화 속도는 [그림 13]에 나타난 바와 같이 물/시멘트비가 55%인 일반 콘크리트와 같거나 낮다.



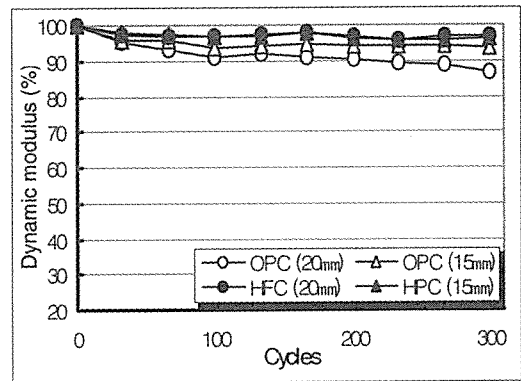
(그림 13) 분체계 고유동 콘크리트의 중성화 특성

그러나, 플라이애쉬를 사용한 분체계 고유동 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 중성화 속도가 증대되는 경향이 있기 때문에 플라이애쉬의 치환율을 선정하는데 유의해야 하며, 또한 포졸란 반응이 장기간에 걸쳐 진행되기 때문에 양생기간의 영향도 고려해야 한다.

한편, 불활성인 석회석 미분말을 사용한 분체계 고유동 콘크리트는 미분말의 미세공극 충전효과 및 불리딩의 감소로 인하여 중성화 속도는 동일한 물/시멘트비의 일반 콘크리트에 비해 작은 것으로 나타났다.

### 5.6 내동해성

[그림 14]는 석회석 미분말(L.S.P)을 사용한 분체계 고유동 콘크리트의 동결융해 저항성을 나타낸 것이다.



(그림 14) L.S.P를 사용한 고유동 콘크리트의 동결융해 저항성

즉, 요구되는 공기량(4% 이상)을 확보할 경우, 분체계 고유동 콘크리트의 동결융해 저항성은 큰 문제가 되지 않는다. 분체계 고유동 콘크리트는 물/결합재비가 낮아 비교적 높은 압축강도를 얻을 수 있고 세공조직도 치밀하기 때문에, 요구되는 공기량을 확보하면 양호한 동결융해 저항성을 확보할 수 있다.

특히, 고로슬래그 미분말을 사용한 분체계 고유동 콘크리트는 공기를 연행하지 않더라도 양호한 동결융해 저항성을 확보할 수 있다.

한편, 플라이애쉬를 사용할 경우에는 미연

탄소의 AE제 흡착작용으로 공기량의 경시변화가 크기 때문에, 배합직후에 공기량을 확보 하더라도 시간에 따라 공기량이 감소하여 동결융해 저항성이 저하되는 경우도 있다.

## 5.7 내염해성

분체계 고유동 콘크리트는 물/결합재비가 낮고 세공구조가 치밀하며 낮은 블리딩으로 골재하부의 공극이 일반 콘크리트에 비해 감소하기 때문에, 鹽害浸透에 대한 저항성이 양호하다. 그러나, 플라이애쉬를 사용한 분체계 고유동 콘크리트는 표면의 염분농도가 증가할 수 있기 때문에, 충분한 양생관리가 요구된다.<sup>16)</sup>

## 6. 맺음말

지금까지 레미콘 공장에서 제조·생산되어 현장에 공급된 고유동 콘크리트는 거의 대부분 플라이애쉬를 사용한 분체계 고유동 콘크리트인 것으로 나타났다. 물론, 경제성 및 자원 재활용 측면을 고려한다면 아직도 플라이애쉬를 사용하는 것이 경쟁력이 있는 것으로 사료되지만, 앞에서도 언급하였듯이 결합재량의 증대에 따른 수화열 관리, 수축성, 중성화 속도 및 공기량 흡착성능 등은 해결해야 할 문제점으로 사료된다.

또한 국내의 레미콘 여건을 고려하면, 플라이애쉬의 수급에는 큰 문제점이 없기 때문에, 앞으로도 플라이애쉬를 재활용하는 방안으로 분체계 고유동 콘크리트의 제조·생산을 적극적으로 추진할 필요가 있을 것으로 사료된다.

본 고에서 정리한 분체계 고유동 콘크리트에 대한 일반적인 특성에 따르면, 결합재량이 많기 때문에 발생하는 문제점, 즉 비경제적으로 높은 압축강도, 공기량 관리 등에 따른 개선

방안이 필요할 것으로 본다. 그러나, 고유동 콘크리트의 범용화 차원에서 본다면 플라이애쉬를 사용한 분체계 고유동 콘크리트가 재료 특성은 물론 경제성 측면에서도 경쟁력이 있는 것으로 평가된다.

앞으로도 증점제계 및 병용계 고유동 콘크리트의 특성과 배합설계 방법을 정리하여 콘크리트 기술의 발전에 조금이라도 도움이 되었으면 한다. 즉, 어떤 조건하에서도 수요자의 Needs에 적극적으로 대처할 수 있는 계기가 되길 바라며 본 고를 갈음하고자 한다.

## 참고문헌

- 1) 權寧鎬., “粉體種類에 따른 超流動 콘크리트의 레오로지 特性에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표 논문집 제10권1호, 1998.5, pp.3~8
- 2) 權寧鎬., “Top Down工法에 超流動 콘크리트의 現場適用”, 대한건축학회 논문집, 제13권 10호, 1997.10, pp.355~362
- 3) 神保元二., ブルーボックス “粉・の科學”, 講談社, 1990.
- 4) 土木學會 高流動 콘크리트 연구小委員會 內部資料., “資料收集分科委員會 콘크리트의 工事例調査”, 1995.
- 5) 名和豊春·深谷泰文·鈴木清孝., “高비-라이트 시스템を用いた高流動·高强度 콘크리트に関する研究”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.143~148, 1993.
- 6) 三浦律彦·近松龍一·清木茂., “高速流動 콘크리트に関する研究”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.185~190, 1991.
- 7) 吉野公·平田英樹., “混和材料が高流動 콘크리트의 워카빌리티에及ぼす影響”, 土木

- 
- 學會 第50回年次學術講演會講演概要集, V-523, pp.1046~1047, 1995.
- 8) 河井徹・吉川章三・村上邦夫., “タイプ別高流動コンクリートの特性比較に関する實驗的研究”, 高流動コンクリートシンポジウム論文報告集, 土木學會コンクリート技術シリーズ No.10, pp.77~80, 1996.
- 9) 中村芳弘・伊藤秀敏・藤木洋一., “石炭灰と碎砂を用いた高流動コンクリートのフレッシュ性狀と斷熱溫度上昇”, 土木學會 第50回年次學術講演會講演概要集, V-524, pp.1048~1049, 1995.
- 10) 横内靜二・福留和人・坂本守・喜多達夫., “石灰石粉を混入したコンクリートの基礎特性”, コンクリート工學年次論文報告集, Vol.15, No.1 pp.333~338, 1993.
- 11) 田中健治郎・金澤克義・有馬勇., “二成分系低發熱型高流動コンクリートの基礎物性について”, コンクリート工學年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.57~62, 1992.
- 12) 竹田宣典・近松龍一・十河茂幸・芳賀孝成., “薄肉RC壁に自由落下で打設できる超流動コンクリートの検討”, コンクリート工學年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp. 125~130, 1992.
- 13) 官澤伸吾・田澤榮一., “セメント系材料の自己收縮に及ぼすセメントの化學組成の影響”, コンクリート工學年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.699~704, 1996.
- 14) 安田正雪・阿部道彦・桃谷智樹., “各種高流動コンクリートの收縮性狀とひび割れに関する一實驗”, コンクリート工學年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.147~152, 1996.
- 15) 古賀康男・笠井英志・飛坂基夫., “高流動コンクリートの力學特性・耐久性に関する研究(その10)”, 日本建築學會大會學術講演梗概集(北海道), pp.299~300, 1995.
- 16) 中島良光・佐藤文則・出頭圭三., “高流動コンクリートの耐久性に関する研究”, 第2回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集, JCI-C35, pp.131~136, 1994.