

# 결합재의 입도분포가 시멘트 페이스트의 유동성에 미치는 영향

이승헌\* · 황해정 · 문영범      이원준 · 김원기 · 소정섭

<군산대학교 재료·화학공학부>

<기초소재부>

## 1. 서 론

최근 건축산업은 대형화, 고층화 및 특수한 목적의 건축물 등 여러 분야에서 고성능 콘크리트의 수요가 증가 되고 있는 실정이다. 재료적인 측면에서의 고성능 콘크리트는 고강도, 고내구성, 고유동화를 지닌 콘크리트라 할 수 있다. 고강도, 고내구성을 발현시키기 위해서는 물/결합재의 비를 줄이는 것이다. 하지만 물/결합재의 비를 줄이면 유동성이 떨어지기 때문에 고성능 감수제나 AE제와 같은 유기 혼화제를 콘크리트 제조 시 첨가하는 방법이 일반적으로 알려져 왔다. 또한 플라이 애시나 고로 수쇄 슬래그 미분말 등의 혼화제를 첨가하여 결합재의 입도분포를 변화시켜 충전성을 향상시키면 유동성이 증가되는 것으로 보고되어 왔다.

유동성을 뜻하는 레올로지(Rheology)의 레오(Rheo)는 그리스어의 흐름을 뜻한다. 레올로지는, 물질에 외부로부터 기계적인 힘이 가해졌을 때, '흐른다' 또는 '변형한다' 둘의 상관관계를 다루는 학문이다. 주로 연속체를 다루는 탄성학과 유체역학과 크게 다르다는 점은, 레올로지가 유동과 변형의 배경에 있는 구조적 특성을 고려하는 것으로부터 물체의 역학적 거동을 관찰하는 것에 있다. 레올로지의 대상이 되는 영역은 매우 광범위하며 특히 공학분야에서는 구조재료의 특성을 파악하거나 화학공학에서 많이 활용되고 있으며, 또한 토목 공학에서도 콘크리트의 유동성을 파악하고자 많이 이용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 입도 분포 조정이 용이한 고로

수쇄 슬래그 미분말을 이용하여 시멘트계 분체계의 입도분포를 최적화 하는 것에 의해 충분한 유동성을 확보하여 고유동, 고강도, 고내구성에 기여할 수 있는 시멘트를 개발하는 것을 목적의 일환으로 시멘트 분체계의 입도분포 변화에 따른 유동특성을 고찰하였다.

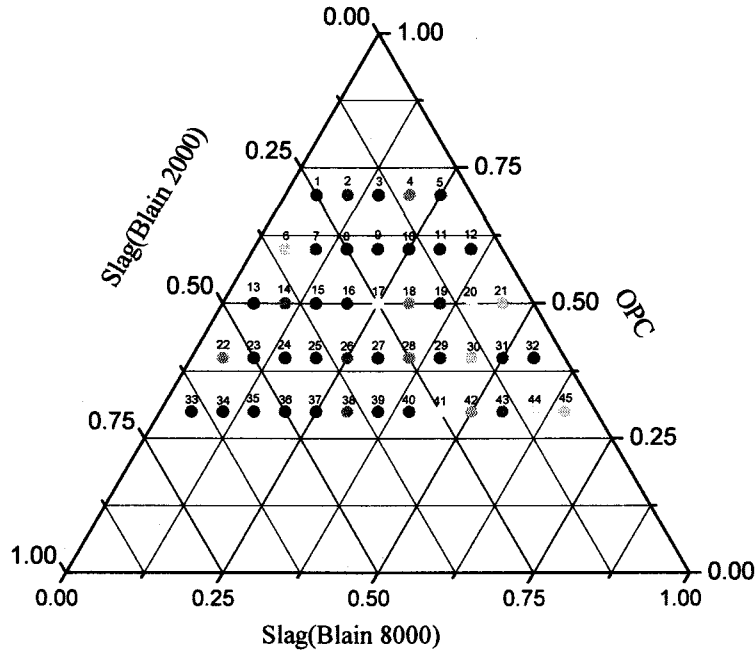
## 2. 실험 방법

### 2.1 원료

본 연구에서는 고로 수쇄슬래그를 Blaine 2000  $\text{cm}^2/\text{g}$ 으로 분쇄한 후 조립분으로 사용하였으며, 보통 포틀랜드 시멘트를 중간립, 또 고로 수쇄 슬래그를 Blaine 8000 $\text{cm}^2/\text{g}$ 으로 분쇄한 분말을 미립분으로 정하여 각 배합비에 따라 혼합하여 사용하였다. 각 시료의 배합시 밀도가 서로 다르기 때문에 부피비(vol%)로 배합하였으며, 중간립인 보통 포틀랜드 시멘트의 변화량을 30 ~ 70vol%로 고정하고, 미립분과 조립분인 Blaine 2000 $\text{cm}^2/\text{g}$ , 8000  $\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로 슬래그 미분말을 첨가하여 배합하였다. 시료에 함유되어 있는 수분을 제거하기 위하여 80℃의 건조기에서 24시간 건조하였고, 각 시료의 배합비를 <그림 1>에 나타내었다.

### 2.2 소성 점도 및 항복 강도

본 실험을 위하여 배합비에 맞게 간 시료를 계량하고, 용기에 담은 후 균일한 혼합을 위하여 상온에서 약 5분간 혼합한 후, 물/결합재=

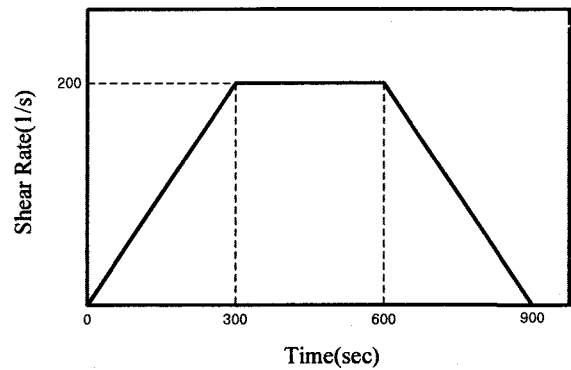


<그림 1> 결합재의 배합비

1.4vol%로 고정시켜 5분간 혼합하여 사용하였다.

소성 점도 및 항복 강도의 측정에는 concentric cylinder type의 rheometer를 사용하였다. 소성 점도 및 항복 강도는 shear rate를 조절하여 shear stress를 관찰하는 방법으로 측정하였으며, 총 3 단계의 segment로 분류하여 측정 조건을 변화시키면서 관찰하였다. 제 1 segment에서는 shear rate를 0(1/s)에서 200(1/s)까지 300초간 천천히 올리면서 shear stress의 변화를 관찰하였고, 제 2 segment에서는 200 (1/s)로 shear rate를 300초간 유지하였고, 제 3 segment에서는 shear rate를 200(1/s)에서 0(1/s)로 300초간 감소시키면서 shear stress의 변화를 관찰하였다. 각 시료에 대하여 총 15분간 측정하였으며, 측정 스케줄은 <그림 2>과 같다.

측정된 원본 데이터는 다시 shear rate의 변화에 따른 shear stress의 변화로 변환하여 유동 곡선의 형태를 파악하였으며, 제 1 segment에서 측정된 데이터를 Bingham 식에 의해 직선회귀 분석하여 소성 점도 및 항복 강도를 측정하였다. <그림 3>는 소성 점도 및 항복 강도를 측정하는 간단한 모식도이다.



<그림 2> 측정 스케줄

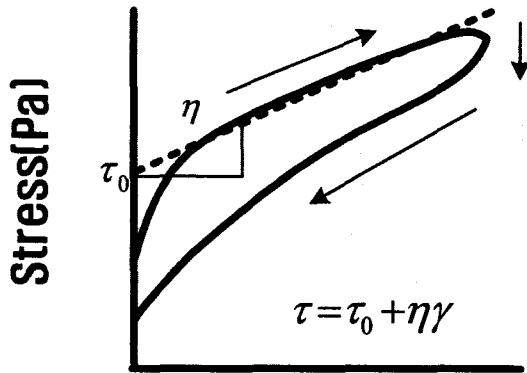
## 2.3 입도 분포 측정 및 분석

입도 분포 측정은 레이저 회절 방식의 입도 분석기를 이용하여 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 사용 시료

<표 1>에 본 실험에 사용된 고로 수쇄 슬래



**Shear rate(1/s)**

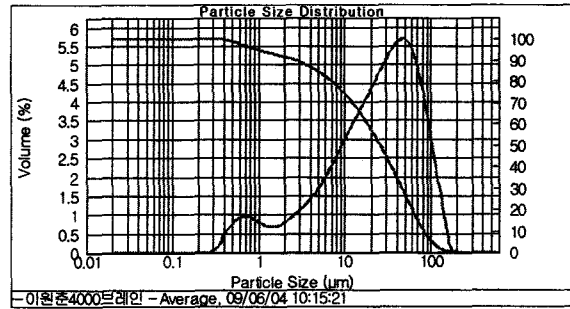
<그림 3> Bringham 유동 거동을 하는 재료의 유동 곡선

그의 화학 분석 결과를 나타내었다. 그 결과 CaO가 44.3%, SiO<sub>2</sub>가 33.3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 13.3%등으로 나타났으며, 그 외 MgO 등이 5.8%로 나타났다.

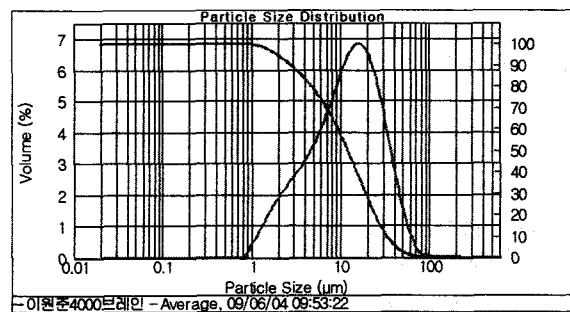
고로 수쇄 슬래그는 분쇄하여 Blaine 2000 cm<sup>2</sup>/g, Blaine 8000cm<sup>2</sup>/g으로 제조하여 조립분과 미립분으로, 보통포틀랜드시멘트는 중간립분으로 배합비에 따라 각 시료들을 혼합하였으며, 각 원재료의 입도 분포 분석결과를 <그림 4>에 나타내었다. <그림 5>은 각 원재료의 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 입도 분포분석 결과 조립분인 Blaine 2000cm<sup>2</sup>/g의 평균입경은 약 26.2μm, 중간립분인 OPC의 평균입경은 약 12.4μm, 미립분인 Blaine 8000cm<sup>2</sup>/g의 평균입경은 5.3μm으로 나타났고, 이와 비슷한 결과를 SEM 이미지에서도 확인할 수 있었다.

**3.2 유동 곡선**

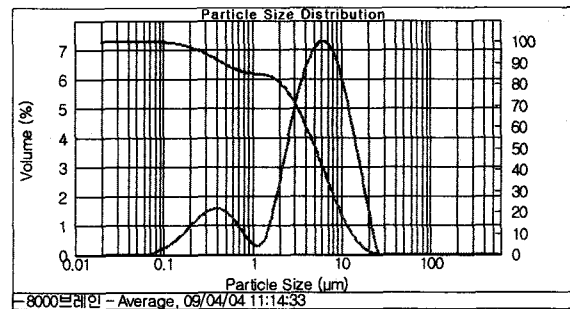
시멘트 페이스트의 유동 특성은 회전점도계에 의해 조사한 결과, 낮은 전단 속도에서는 소성



<(a) Blaine 2000cm<sup>2</sup>/g>



<(b) Blaine 4000cm<sup>2</sup>/g>



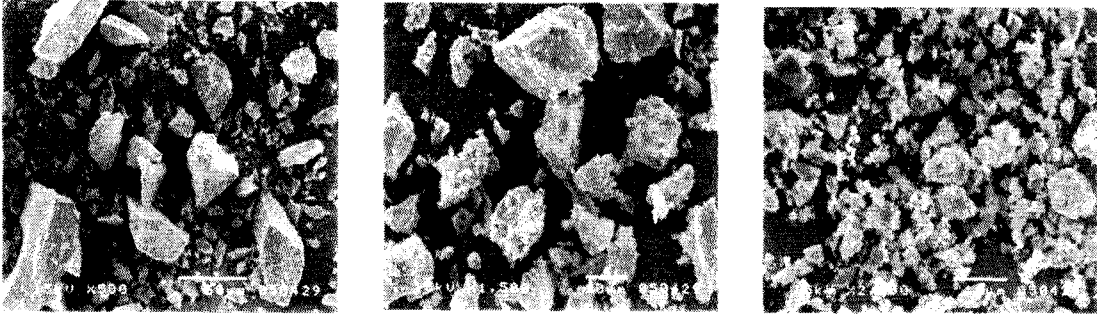
<(c) Blaine 8000cm<sup>2</sup>/g>

<그림 4> 출발원료의 입도분포 측정결과

유동을 하지만, 높은 전단속도에서는 시멘트 페이스트의 구조가 파괴되어 수성 유동과는 다른 형태를 보이는 것을 확인할 수있었다. <그림 6>에는 본 실험에서 측정된 각 배합비에 따른 시료들의 유동 곡선 중 대표적인 것을 나타냈다.

<표 1> 고로 수쇄 슬래그의 화학분석 결과 (wt.%)

성분	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig. loss
함유량(wt%)	44.3	33.3	13.3	0.3	5.8	0.2	0.6



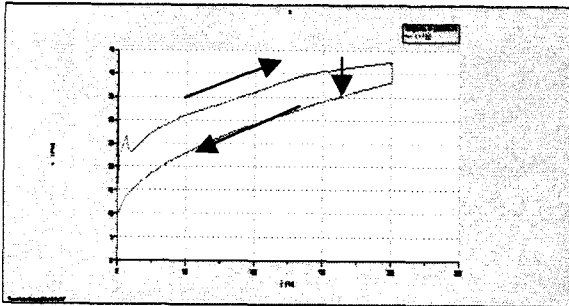
<그림 5> 출발 원료의 SEM 이미지

45개의 시료들의 유동 곡선을 살펴 본 결과 시멘트 페이스트의 유동 곡선은 4가지로 분류할 수 있었다. 각각의 형태를 나타내는 조합비를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

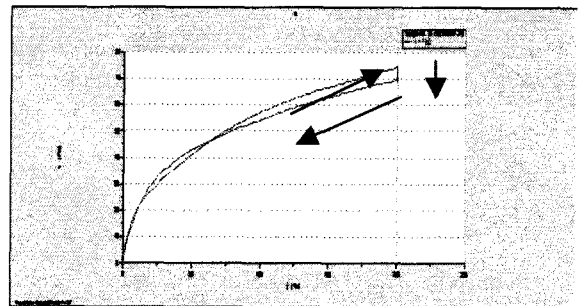
- (1) Type 1 : 조분의 양이 5~35vol%, 미분의 양이 35~65vol%일 경우 주로 발생
- (2) Type 2-a : 조분의 양이 30~40vol%, 미분의 양이 20~30vol%일 경우 주로 발생

- (3) Type 2-b : 조분의 양이 40~5vol%, 미분의 양이 10~15vol%일 경우 주로 발생
- (4) Type 3 : 조분의 양이 55~65vol%, 미분의 양이 5~10%일 경우 주로 발생

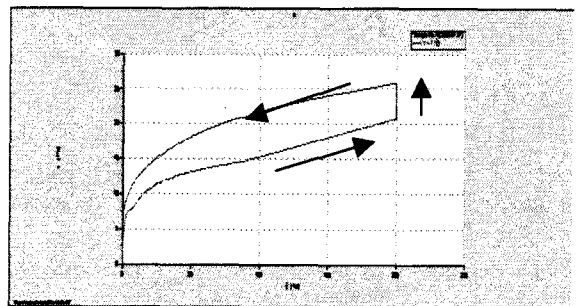
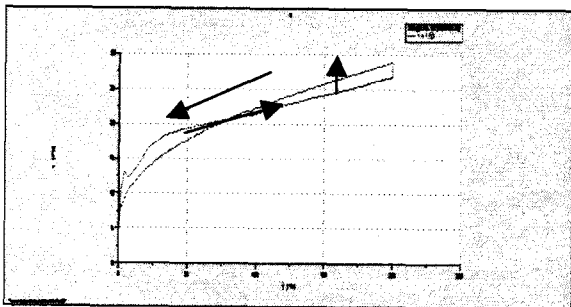
유동 곡선을 해석해 보면 Type 1에서 Type 2-a, 2-b로 유동 곡선이 변형 될 때 소성 점도가 최적의 값을 나타내는 것으로 나타났으며, 또



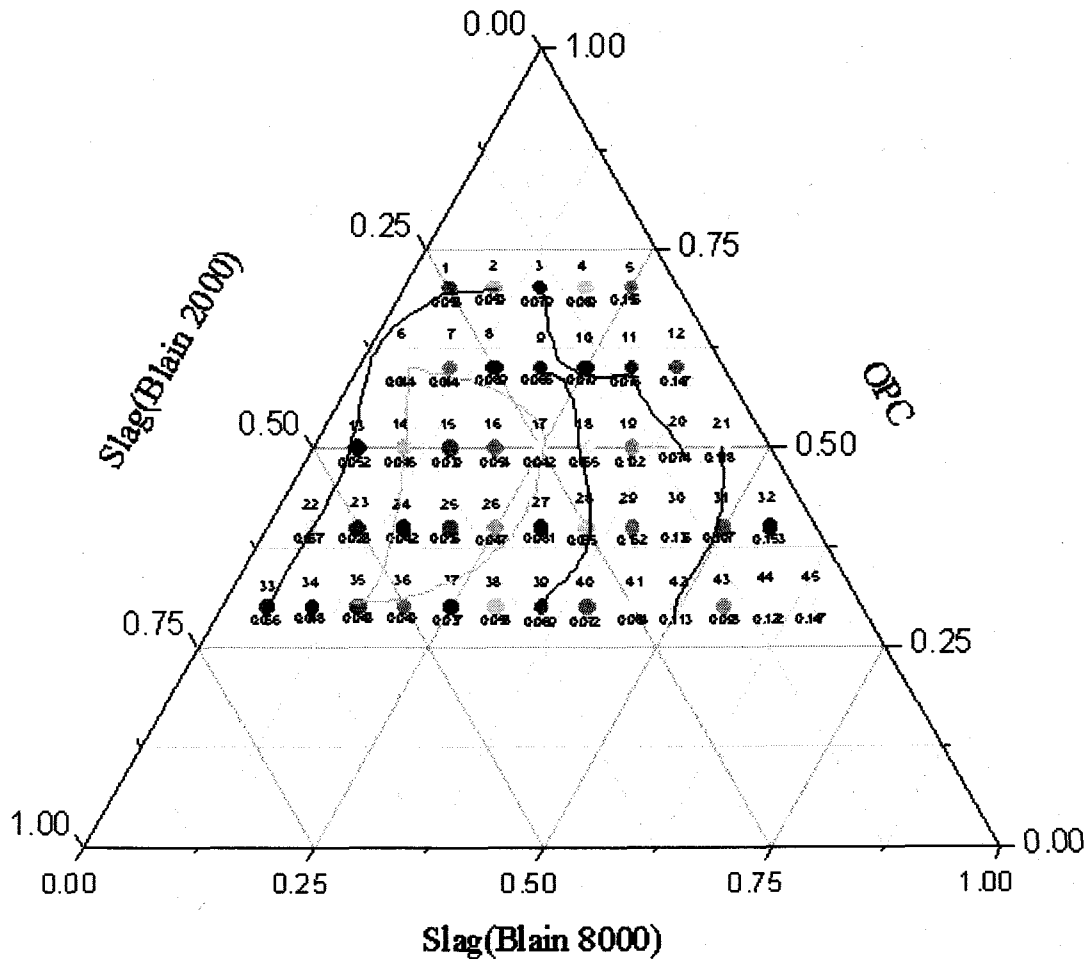
(a) Type 1



(b) Type 2-a



<그림 6> 4종의 유동 곡선



<그림 7> 각 시료들의 소성 점도 측정결과

한 유동 곡선의 Type 이 위와 같이 변화하면서 항복 강도값 또한 작게 변화하는 것을 발견할 수 있었다.

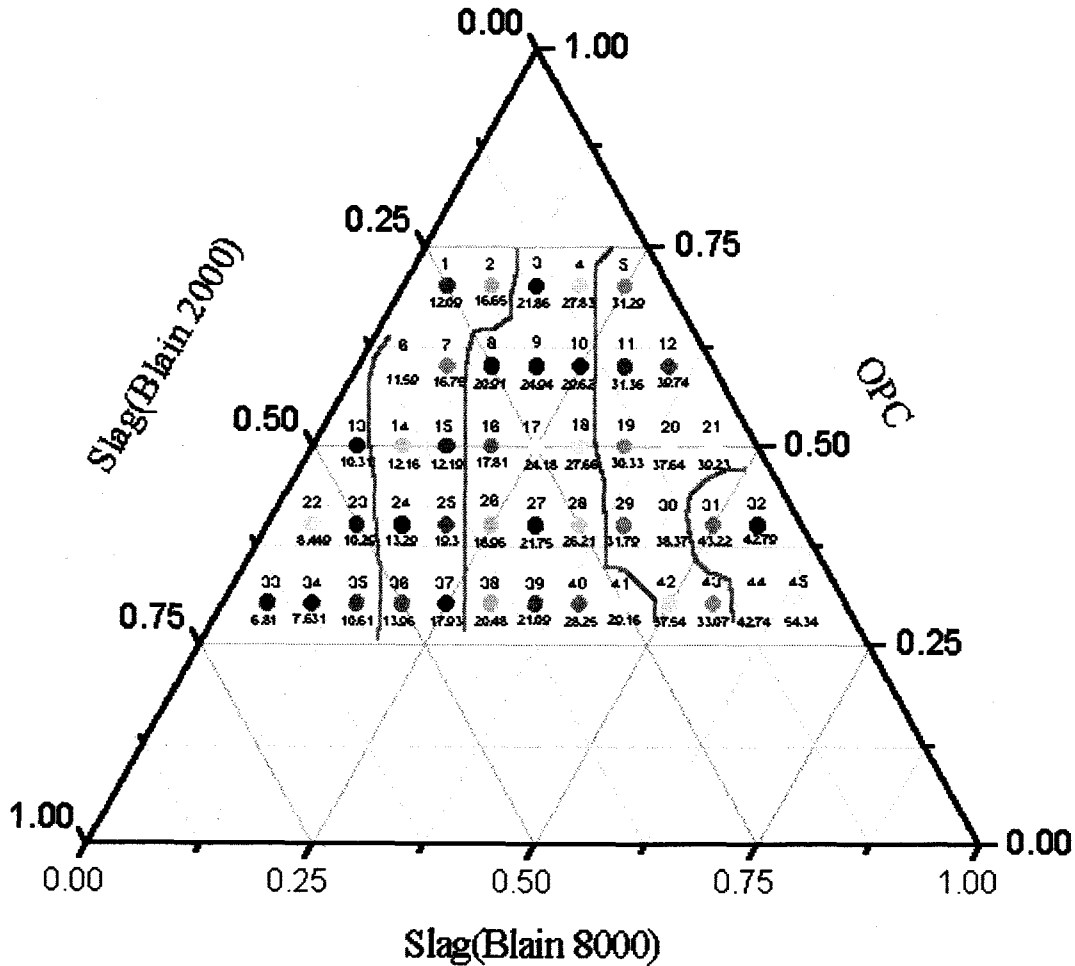
### 3.3 소성 점도 및 항복 강도

소성 점도는 총 3 단계의 segment 로 측정된 유동 곡선 중 제 1 segment 구간을 Bingham 식을 이용하여 직선회귀분석하여 획득할 수 있었으며, 그 결과를 간단한 그림으로 <그림 7>에 나타내 보았다.

실험 결과, 실험에 사용된 모든 시료들은 Thixotropy 거동을 나타내었으며, <그림 7>에서 알 수 있듯이 소성 점도가 최적의 집합을 얻을 수 있었다.

조합 비율이 미분이 15~20vol%이고, 중간립분이 40~50vol%, 조분이 35~40vol%로 혼합한 시료들의 유동성이 증가한다는 결론을 얻을 수 있었다. 일반적으로 시멘트 또는 콘크리트를 혼합하기 위해 사용된 물은 시멘트 입자 사이의 공극을 채우거나 상호 입자간에 윤활 작용으로 사용되지만 입도분포가 넓어짐에 따라서 유동성에 필요한 자유수의 양이 증가하고, 구속수의 양이 줄어들기 때문에 유동성은 증가한다. 본 실험에서 입도 분포가 넓어짐에 따라서 유동성이 증가하는 경향을 확인 할 수 있었으며, 충전율이 좋은 넓은 입도분포를 가진 시료들이 최적의 소성 점도 값을 나타내는 것을 발견 할 수 있었다.

<그림 8>는 각 배합비에 따른 항복 강도치를



<그림 8> 각 시료들의 항복강도 측정결과

나열하고 비슷한 값을 갖는 배합비별로 나눈 것이다. 결과를 살펴보면, 삼각형의 상태에서 마치 직선으로 선을 그은 듯이 확실하게 구분되어진다.

즉, 미분이 5~10vol%, 조분이 60~65% 일 때의 항복 강도 값이 작게 나타났다. 하지만 그 이외의 범위의 시료들은 높은 항복 강도 값을 나타냈는데, 이는 유동성과 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다. 소성 점도 측정 결과와 항복 강도 측정 결과를 비교하여 살펴보면 최적의 소성 점도를 갖는다고 생각된 시료들 즉, sample No. 6, 7, 14, 15, 16, 17, 24, 25, 26, 35, 36 들이 모두 항복 강도 값이 작게 나온 경향을 나타냈기 때문이다.

#### 4. 결 론

입도 분포 조정을 위해 미분으로서 고로 슬래그 미분말  $8000\text{cm}^2/\text{g}$ , 중간립분으로서 보통 포틀랜드 시멘트  $3400\text{cm}^2/\text{g}$ , 조립분으로서 고로 슬래그 분말  $2000\text{cm}^2/\text{g}$ 을 사용하여 시멘트를 제작한 후 유동성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 결합재를 첨가하여 입도분포를 변화시킨 시멘트 분체계 페이스트의 유동곡선은 4가지 형태로 분류 할 수 있었다.
2. 혼합비율이 미분이 15~20vol%, 중간분이 4

0~50vol%, 조분이 35~40vol%일 때 유동성이 우수한 경향을 나타냈다.

3. 항복 강도는 미분의 양이 작고(약 5~10vol%), 조분의 양이 많을 경우(약 60~65vol%)에 감소하는 경향을 보였다.

### < 참고 문헌 >

- 1) M. E. Woods and I. M. Krieger, Rheological Studies on Dispersions of Uniform Colloidal Spheres, Non-Newtonian Flow and Heat Transfer, Wiley, New York, 1967, pp. 205~230.
- 2) 平井英二, 科學技術者のためのレオロヂク?, 丸善, 1978, pp. 1~18.
- 3) 竹田邦雄, コロイド化學の基礎, 化學同人, 1992, pp. 113~119.
- 4) R. L. Hoffman, Discontinuous and Dilatant Viscosity Behavior in Concentrated Suspensions, Theory and Experimental Tests, J. Colloid. Interface. Sci. 46(3) pp. 491~506.
- 5) J. S. Chong, E. B. Christiansen and A. D. Bear, Rheology of Concentrated Suspensions. J. Appl. Polym. Sci. 15. pp. 2007~2202.
- 6) 이승현, 시멘트 콘크리트의 유동성, 시멘트, 163, 2003, pp. 59~62.
- 7) Wang Aiquin, Zhang Chengzhi, Zhang Ningsheng, The Theoretic Analysis of the Particle Size Distribution of Cement System on the Property of Cement, Cement Concrete Research, 29, pp. 1721~1726.