

플라이 애쉬 혼합 시멘트 페이스트의 유동성 평가

이 승 현 · 김 홍 주*

〈군산대학교 재료·화학공학부〉

1. 서 론

현재 콘크리트는 사회기반을 구축하는 필수 불가결한 재료이다. 적절한 재료의 설계, 시공을 함으로써 내구성이 있고 신뢰할 수 있는 구조물을 축조할 수 있다. 콘크리트는 수 Å의 물분자로부터 수 cm의 골재까지 폭넓은 크기의 분자, 입자, 물질로 구성되어 있는 다상재료이기 때문에 여러 성질을 총괄하여 유동특성을 파악하는 것은 매우 어렵다.

따라서 콘크리트를 입자의 범주로 분할하여 구성상을 축소함으로써 유동특성에 대한 정보를 얻는 것은 콘크리트의 유동특성을 해석하는데 유용하다. 물, 시멘트, 혼화재, 유기혼화제로 구성된 시멘트 페이스트는 콘크리트의 매트릭스이고 유동특성에 큰 영향을 미친다.

특히 최근에 고유동 콘크리트의 성질은 주로 시멘트 페이스트의 성질에 기인하는 경우가 많다. 고유동 콘크리트의 기술을 확립하기 위해서는 페이스트의 유동특성 제어, 향상, 이론의 정립, 기초 데이터의 축적 등을 이룩하여 페이스트의 탁월한 배합설계 기술을 확립하는 것이 무엇보다 필요하다.

시멘트 페이스트의 유동성을 개선하기 위해서는 혼화재의 존재가 필수 불가결하다. 이러한 혼화재 중에서 널리 활용되고 있는 것이 고로슬래그 미분말과 플라이 애시이다.

고로슬래그 미분말은 입자가 각진 형태를 지니고 있지만 일정한 품질의 미분말을 공급할 수 있어 특성을 제어하기가 용이하여 널리 활용되고 있다. 그러나 플라이 애시는 구형의 입자를 지니고 있음에도 불구하고 활용율이 극히 저조한 형

편이다. 활용율이 저조한 이유로는 NO_x 저감을 위해 보일러의 연소온도를 낮춤으로써 미연탄소량과 이형의 입자가 많은 플라이 애시가 배출되고, 석탄의 종류 및 연소조건이 다양하기 때문에 플라이 애시의 품질편차가 큰 것 등을 들 수 있다.

따라서 플라이 애시에 대한 활용율을 높이려면 품질을 종합적으로 평가할 수 있는 평가기술의 확립, 즉 플라이 애시의 Factor(미연탄소량, 구형율, 입도분포, 표면상태, 유리질량 등)가 콘크리트(시멘트 페이스트)의 물성(유동성, 포졸란 반응성 등)에 미치는 효과를 정량적으로 파악하여 플라이 애시의 품질을 종합적으로 평가할 수 있는 평가기술의 확립이 무엇보다 중요하다.

본 연구에서는 건설재료에 작용하는 플라이 애시의 품질을 종합적으로 평가할 수 있는 방안을 확립하고자 하는 연구의 일환으로 플라이 애시의 유동성에 관한 평가를 시멘트 페이스트를 사용하여 평가하고자 한다.

즉 플라이 애시의 각종 Factor(미연탄소량, 구형율, 입도분포, 충전율 등)가 유동성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 플라이 애시의 품질 평가기술을 확립하고자 한다.

2. 실 험

2.1 사용 재료

실험에 이용한 플라이 애시는 동일한 화력발전소에서 배출한 한 것으로, 보일러의 발전부하 및 석탄의 종류를 변화시킨 다음 전기집진기에 부착된 호퍼로부터 채취한 역청탄회이다.

A계열은 보일러의 부하가 600MW(정상부하)

일 때 발생한 플라이 애시이고 A'계열은 A계열과 같은 석탄을 사용했을 때 보일러의 부하가 300 MW에서 발생한 플라이 애시이다.

B계열은 A계열과 동일한 부하(600MW)에서 다른 석탄(역청탄)을 사용했을 때 채집한 플라이 애시이다. 배기가스의 배출방향으로 전기집진장치는 몇 개의 호파를 가지고 있어, 입구에서 제일 가까운 호파에서 채취한 플라이 애시를 A-1, A'-1, B-1, 두번째의 호파에서 채취한 플라이 애시를 A-2, A'-2, B-2, 출구쪽에 위치한 호파에서 채취한 플라이 애시를 A-3, A'-3, B-3라 하였다.

시멘트는 혼합재가 첨가되지 않은 1종 포틀랜드 시멘트(Blaine : 3,560cm³/g, 비중 : 3.15)를 사용하였으며 고성능 AE감수제는 폴리카르본산계를 사용하였다.

2.2 플라이 애시의 물리·화학적 성질 측정

구형율의 측정은 분산된 플라이 애시를 전자현미경으로 측정하고, 전자현미경 사진을 화상분석 프로그램(LEICA Qwin32)으로 화상처리 하여 (1)식에 의해 입자의 구형율을 구하였다.

$$\begin{aligned} \text{구형율(Roundness)} &= \frac{\text{입자의 투영면적에 해당하는 원의 길이}}{\text{입자의 투영 윤곽둘레를 원으로 환산한 면적}} \\ &= \frac{4 \times \pi \times \text{Area} \times 1.064}{\text{Perimeter}^2} \quad (1) \end{aligned}$$

여기서 Perimeter는 입자의 투영 윤곽둘레이며, 1.064는 Perimeter 조정계수이다. 이 수치는

이미지의 이진화에 따른 모서리의 영향을 줄이기 위한 계수이다.

플라이 애시의 입도분포는 레이저 회절방식(Microtrak-9320HRA)으로 측정하였다. 측정된 입도분포를 Rosin-Rammler 분포함수의 n값을 이용하여 평가하였다. 식 (2)에 Rosin-Rammler 분포함수를 나타냈다.

$$R(D_p) = 100 \cdot \exp(-b \cdot D_p^n) \quad (2)$$

여기서, R(D_p) : 적산체상분포량(%)

D_p : 입경(μm)

b, n : 정수

n값은 분포의 범위를 나타내는 정수로 n값이 작을수록 입도분포는 넓게 된다. 또 b는 입자의 크기를 나타내는 정수이다. 또한 미연탄소량(Horiuti Co. Chromatic C), 강열감량 및 Blaine(KS L 5106)을 측정하였다.

2.3 걸보기 점도 측정

보통 포틀랜드 시멘트에 대해서 플라이 애시의 혼합율을 체적비로 20% 혼합하고 폴리카르본산계 고성능 AE감수제를 분체중량의 2.0% 가한 후 0.92의 물/분체체적비로 3분간 혼합하여 시료로 하였다.

이 페이스트를 응력제어형 회전2중 원통점도계를 이용하여 20°C에서 전단응력 0Pa로부터 200 Pa 사이를 상승 및 하강시켜 200Pa에서의 걸보기 점도를 측정하였다.

〈표 1〉 플라이 애시의 물리·화학적 성질

플라이 애시	비표면적(cm ² /g)	평균입경(μm)	미연탄소(%)	강열감량(%)	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ (%)
A-1	2,760	27.33	0.7	1.1	88.6
A-2	4,180	12.47	0.8	1.2	87.5
A-3	7,360	5.39	0.3	1.7	85.9
A'-1	3,580	22.85	1.5	2.1	87.4
A'-2	4,980	11.00	1.3	2.1	86.3
A'-3	7,920	5.38	0.4	1.9	86.0
B-1	2,640	28.10	1.0	1.0	80.1
B-2	4,490	12.46	1.1	1.1	78.8
B-3	7,290	3.74	0.5	0.5	77.7

3. 결과 및 고찰

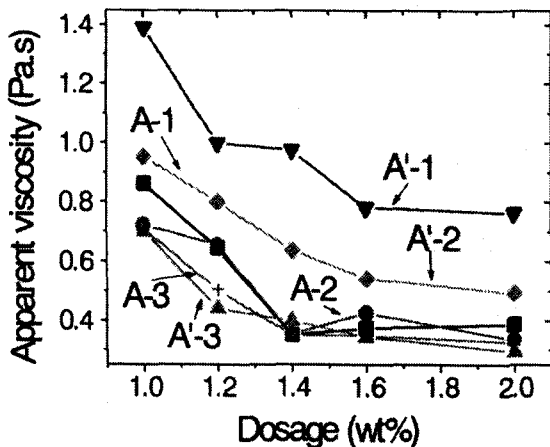
3.1 플라이 애시 각 인자의 영향

〈그림 1〉은 고성능 AE감수제의 첨가율에 따른 겔보기 점도의 변화를 나타낸 것으로써 고성능 AE감수제의 첨가량이 많을수록 겔보기 점도는 감소하는 경향을 나타냈으며 소정의 양에서 더 이상의 고성능 AE감수제를 첨가하여도 겔보기 점도는 더 이상 감소하지 않았다.

미연탄소량이 많은 A'-1과 A'-2 플라이 애시가 다른 플라이 애시보다 겔보기 점도가 컸으며 겔보기 점도가 일정한 값에 이르는 양도 1.6wt. %를 나타냈으며, 미연탄소량이 1.0wt. % 미만인 플라이 애시는 1.4wt. %에서 일정한 값, 즉 포화량을 나타냈다.

〈그림 2〉에 고성능 AE감수제의 1.6wt. % 첨가시의 유동성과 미연탄소량과의 관계를 나타냈다. 전반적으로 상관관계는 보여지지 않았고 입도분포가 넓은 B계의 플라이 애시가 유동성이 컸다. 1단에서 채취한 A-1과 A'-1을 비교하면 n값, 구형율, Blaine값이 비슷한 값이지만 미연탄소량은 0.8wt. % 차이가 있다. 그러나 유동성은 유사한 값을 나타내고 있다.

A-1과 A-2를 비교하면 미연탄소량은 유사하지만 유동성은 A-2가 약 $0.4/s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ 정도 크다. 이러한 이유는 A-2가 n값이 크고 구형율이 크기 때문인 것으로 생각된다.



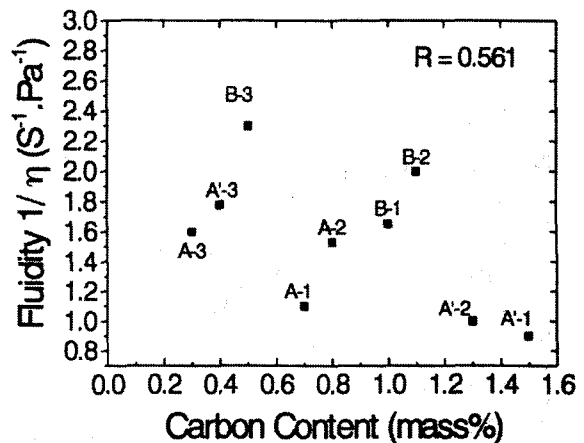
〈그림 1〉 플라이 애시 첨가 시멘트 페이스트 겔보기 점도에 미치는 고성능 AE감수제의 영향

플라이 애시의 Blaine값이 유동성에 미치는 영향에 대해서는 2가지로 생각할 수 있다. 하나는 입자크기 및 입자의 접점수에 관한 것으로 Blaine값이 클수록 입자의 배위수가 증가하여 충돌 저항이 커져서 유동성은 감소한다는 것이고 또 하나는 미분의 플라이 애시를 혼합하면 시멘트의 입도분포에서는 얻을 수 없는 최밀충진을 얻을 수 있어 시멘트 페이스트의 유동성은 증가한다는 것으로 전자와 반대되는 생각이다. 그러나 본 실험에서는 Blaine값과 유동성은 전반적으로 상관관계는 보여지지 않았다.

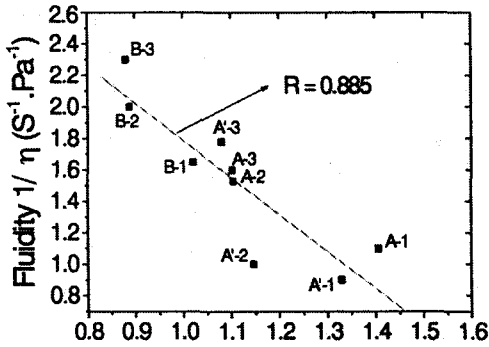
시멘트의 입도분포를 변화시키면 입자 충전성이 변화하므로 페이스트의 유동성은 변화한다. 페이스트의 충전율이 높다는 것은 응집된 입자속에 구속된 물량이 적다는 것으로, 반대로는 유동성에 관여하는 자유수의 많다는 것을 의미하므로 플라이 애시의 입자 충전율이 클수록 유동성은 크다.

분체의 충전특성은 입도분포, 입자형상 및 입자간의 상호작용에 영향을 받는다. 입도분포에 대해서는 입도범위가 넓을수록 충전율이 높다는 것은 확인되었고, 입도범위의 넓이를 나타내는 지표값으로서 Rosin-Rammler 분포식의 n값이 널리 이용되고 있다.

〈그림 3〉에 n값과 유동성과의 관계를 나타냈다. 입자형상 등 다른 요인에 의한 영향도 있으므로 어느 정도의 편차는 있지만 n값이 작을수록 즉 입도분포가 넓을수록 유동성은 증가했다.



〈그림 2〉 시멘트 페이스트의 유동성에 미치는 플라이 애시의 미연탄소량의 영향



〈그림 3〉 시멘트 페이스트의 유동성과 n값과의 관계

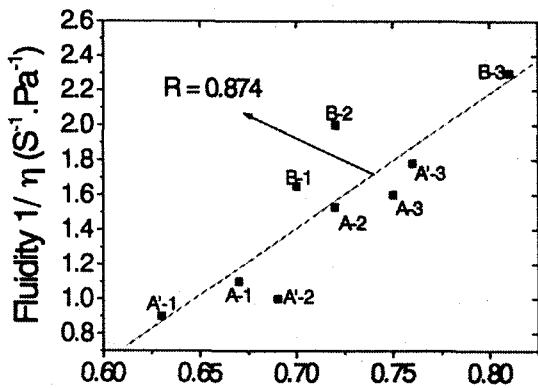
무기분체를 구상화하는 것에 의해 페이스트의 유동성은 향상된다. 구상화에 의한 유동성 향상은 충진율 향상에 의한 효과와 불베어링 작용에 의한 효과로 볼 수 있다.

〈그림 4〉에 구형율과 유동성과의 관계를 나타냈다. 구형율이 클수록 유동성은 커지는 경향을 나타냈지만 입도분포가 넓은 B계열 플라이 애시는 예상된 값보다 큰 값을 나타냈다.

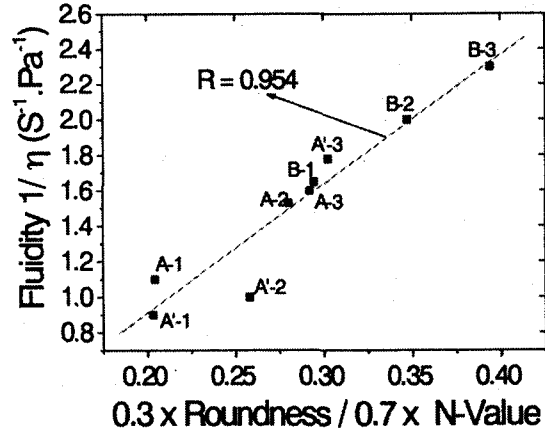
3.2 유동성 평가

플라이 애시 인자들이 페이스트의 유동성에 미치는 기여도를 알기 위해 중회귀분석을 하였다.

중회귀분석시 독립변수간에 높은 상관관계가 있을 경우 잘못된 중회귀분석식을 유도할 수 있어 Blaine값과 미연탄소값을 제외하였다. 그 이유로는 Blaine값은 플라이 애시의 시멘트 혼합에 의해 시멘트의 입도분포를 변화시켜 충진율에 관여하므로, 이것은 n값에 포함되어 있다.



〈그림 4〉 시멘트 페이스트의 유동성과 구형율과의 관계



〈그림 5〉 시멘트 페이스트의 유동성에 미치는 플라이 애시의 구형율/n값의 영향

본 실험에서 사용한 플라이 애시는 미연탄소량이 1.5wt.% 이하이고 고성능 AE감수제의 첨가량도 포화량이므로, 미연탄소의 형상 및 크기에 의한 영향은 구형율과 n값에 반영되어 있으므로 독립변수로서 간주하지 않았다. 그 결과 다음과 같은 식을 얻었다. 기여도는 n값이 69.1%, 구형율이 30.9%이었다.

$$Y = 3.33X_1 - 1.84X_2 + 4.15 (R = 0.012) \quad (3)$$

여기서, Y : 페이스트의 유동성

X₁ : 플라이 애시의 구형율

X₂ : 플라이 애시의 n값

따라서 미연탄소량이 적고, 혼화제의 첨가량이 충분했을 때, 플라이 애시의 유동성 평가지수로서 (0.3×구형율)/(0.7×n값) 식을 사용할 수 있다. 이 값과 유동성과의 관계를 〈그림 5〉에 나타냈다. (구형율/n값)의 비가 클수록 유동성은 증가하고 있고, 단독의 경우보다 높은 상관관계를 나타내고 있다

4. 결 론

전기집진기에서 단별 채취한 플라이 애시를 이용하여 고성능 AE감수제의 첨가량이 포화량일 때 페이스트의 유동성에 미치는 플라이 애시의 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고성능 AE감수제의 첨가량이 포화량이고, 미연탄소량이 적은 경우 페이스트의 유동성에 미

- 치는 플라이 애시의 인자로서는 입도분포와 구형율이 큰 영향을 미친다.
- 2) 플라이 애시의 인자에 대해서 유동성에의 기여도는 중회귀분석으로 검토한 결과 입도분포가 69.1%, 구형율이 30.9%이었다.
 - 3) 고성능 AE감수제의 첨가량이 포화량이고, 미연탄소량이 적을 경우 플라이 애시의 유동성 평가지수로서 $(0.3 \times \text{구형율}) / (0.7 \times n\text{값})$ 식을 사용할 수 있다.

〈참 고 문 헌〉

1. D. Shindo, M. Matsuoka, et al, The Effect of Materials Quality on Properties of Super Workable Concrete, Proceeding of the JCI, Vol. 14, No. 1, pp. 78~83, 1992.
2. N. Miura, R. Chikamatu and S. Sogo, A Study on Quality Evaluation on High Performance of Concrete Works, Proceeding of JCI Symposium on Super Flowable Concrete, pp. 9~16, 1993.
3. 김진근, 한상훈, 박연동, 노재호, 초유동 콘크리트의 재료특성에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회, 학술발표회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 55~62, 1995.
4. R. T. Hemming, Speciation in Size and Density Fractionated Fly Ash, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 85, pp. 81~98 (1996).
5. 오병환, Fly Ash 콘크리트의 강도 및 역학적 특성과 활용, 석탄회 활용 국제 워크숍, 한국전력공사, pp. 87~112, 1996.