

# Hydrometer에 의한 플라이애시의 분말도 평가 가능성 분석

## Analysis of Evaluation Possibility of Fly Ash Fineness Using Hydrometer

송 흥 호

한 천 구\*

Song, Heung-Ho

Han, Cheon-Goo\*

Department of Architectural Engineering, Cheong ju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 360-764, Korea

### Abstract

Due to the processing cost, there were some reports on distribution of unrefined fly ash. Hence, in this research, the possibility of fly ash quality evaluation by measuring the density of various qualities of coal ash suspensions with hydrometer. According to the experimental results, the appropriate test conditions were determined with 1,000cc capacity mass cylinder for 1,000cc of water with 100g of fly ash. From the evaluating performance of various coal ashes, based on a good correlation between fineness and quality of the coal ashes, it was possible to evaluate the quality of coal ash by measuring different density of suspension with hydrometer. In this research conditions, the suggestable measuring time of density variation was three minute for fly ash quality related with fineness.

Keywords : fly ash, quality evaluation, hydrometer, correlation, hydrometer method, fineness

## 1. 서 론

시멘트 생산 공정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>는 전 세계 CO<sub>2</sub>배출량의 약 5% 정도의 막대한 양으로서[1], 건설 산업에서는 시멘트 사용량을 줄이기 위한 노력의 일환으로 각종 혼화재를 다량 치환하여 사용하고 있다. 이중, 화력발전소에서 부산물로 발생하는 플라이애시(이하 FA)는 시멘트에 치환하여 사용할 경우 포졸란반응에 의해 장기강도 증진, 수화열 저감 및 경제성 향상 등에 이점이 있다[2].

그러나, 이러한 FA는 제품 생산시 정제처리업체의 정제 과정을 통해 고품질로 제조되어 레미콘 업체에 납품되어야 하나, 일부 정제공장에서는 원가절감 및 생산시간 단축 등의 이유로 정제과정을 거치지 않고 소위 차갈이만 하여 원분 상태로 납품하는 것이 언론에 보도된바 있다[3].

즉, FA의 정제는 여러 선별법 중 주로 공기입도 분급법에 따라 행하여짐에 결국 양호한 정제 제품을 납품하고 있는지 여부는 FA의 분말도 차이로 나타나게 된다. 따라서 FA를 사용하는 레미콘 공장에서는 정제여부를 포함한 품질상태를 수입검사 하기 위하여 분말도 시험으로 평가 하게 되는데, 이때 이용되는 분말도 시험 장치는 주로 블레인 공기 투과 장치가 사용된다. 그러나 이와 같은 블레인 공기 투과 장치는 FA 정제공장에서는 비치되어 활용하고 있으나, 레미콘 품질관리실에서는 장비비가 고가이고 조작에 숙련을 요하는 등의 이유로 비치되어있지 않으므로 주로 납품자의 시험 성적서에 의존하고 있는 것이 현실이다.

그러므로 전술한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 Figure 1과 같이 콘크리트의 품질 신속 평가법의 여러 원리 중 물리적 원리를 이용한 종전의 콘크리트 강도 조기추정법의 비중계법[4]에 이용하였던 비교적 저렴하고 취급하기 용이한 액체밀도계(Hydrometer) 와 메스실린더를 이용하여 FA의 정제여부를 포함한 FA의 분말도 품질을 간편하고 신속하게 평가하여 FA 수입검사에 효과적으로 활용할 수 있도록 함에 있어 그 가능성을 분석하고자 한다.

Received : July 26, 2016

Revision received : August 29, 2016

Accepted : December 21, 2016

\* Corresponding author : Han, Cheon-Goo

[Tel: 82-43-229-8480, E-mail: cghan@chongju.ac.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

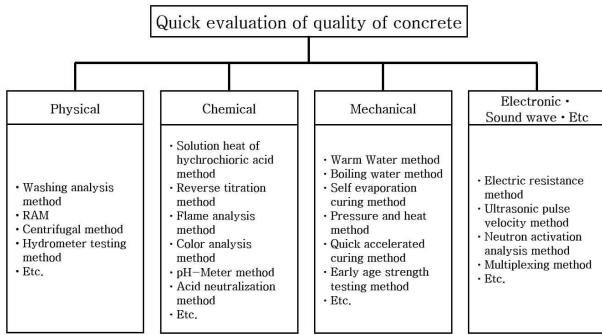


Figure 1. Quick evaluation of quality of concrete

## 2. 실험계획 및 사용재료

### 2.1 실험원리

본 연구의 Hydrometer에 의한 FA의 품질평가 실험원리는 비중계법 강도 조기추정 원리로서 그 원리를 요약하면[4] 다음과 같다. 즉, Figure 2는 단면적이 A이고 Z<sub>0</sub>만큼 떨어진 두 평행판 사이에 갇혀있는 유체를 나타내는데, 윗 판은 힘F에 의해 일정한 속도로 당겨지고 있고 사이에 유체는 판의 운동을 방해하는 점성적 힘이 존재한다고 가정 할 때, 이때 힘 F에 관한 식을 정리하면 식 (1)과 같다.

$$F = \eta \times v \times A / Z_0 \text{ ----- (1)}$$

여기서, F=물체를 이동시키는 힘

$\eta$ =점성계수

v=물체의 이동속도

A=점성체에 접하는 이동물체의 단면적

Z<sub>0</sub>=정지판과 이동물체와의 거리

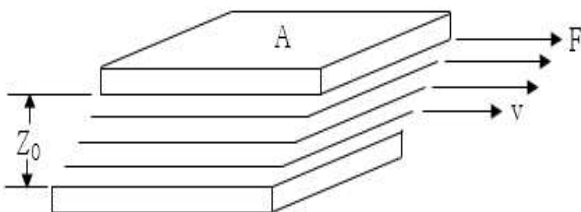


Figure 2. Viscosity fluid existing in two plate

위식을 이번에는 메스실린더 안에 담긴 혼탁액 중에 낙하하는 물체를 구형으로 가정하면 다음 식 (2)와 같이 정리된다.

$$v = g \times (\rho_1 - \rho_2) \times Z_0 / \eta \times (4r/3) \text{ ----- (2)}$$

여기서, v=물체의 낙하속도

$\rho_1$ =물체의 밀도

$\rho_2$ =액체의 밀도

Z<sub>0</sub>=메스실린더와 이동물체와의 거리

g=중력가속도

r=반지름

따라서 동일 밀도를 갖고 지름이 다른 두 물체가 동일 액체 속에서 침하한다고 가정하면, 결국 두 입자간의 침하속도 차이는 4r/3에 비례하여 즉, 입자 크기가 클수록 빠르게 침하하고, 미세립분은 천천히 침하하게 된다. 따라서 이는 분말이 큰 입자로 된 경우는 Hydrometer의 밀도 값이 빠르게 저하하고, 분말이 미소한 경우는 늦게 저하하여 일정한 시간에서는 밀도차이가 감지 될 수 있는데, 이 차이는 FA의 분말도 품질로 평가할 수 있을 것으로 추측된다.

### 2.2 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Experimental plan (series 1)

Factor	Levels	
FA Type	1 · Refined FA (Rf)	
Experiment variable	Measuring cylinder (cc)	5 · 50, 100, 250, 500, 1,000
	Binder weight (g/L)	4 · 0, 50, 100, 150
Tests	Quality evaluation	2 · Density measurement · Photography

Table 2. Experimental plan (series 2)

Factor	Levels		
Experiment variable	FA Type	5 · Refined FA (Rf) · Refined + Raw FA (Rfa) · Raw FA (Ra) · Raw + Reject FA (Raj) · Reject FA (Rj)	
	Measuring cylinder (cc)	1 · 1,000	
	Binder weight (g/L)	1 · 100	
	Tests	Quality evaluation	2 · Density measurement · Photography

먼저, 시리즈 1은 FA의 품질을 평가할 수 있는 장치 및

방법에 대하여 가능성을 분석한다. 즉, 플라이애시는 제품으로 판매되는 정제된 FA를 사용하고 실험변수로서 실험기구인 메스실린더의 용량은 시중에서 손쉽게 구할 수 있는 것으로 50, 100, 250, 500, 1,000cc의 5 수준, 또한 결합재와 물의 비율은 액체밀도계의 측정범위 내에서 효과적으로 표현될 수 있는 것을 고려하여 물 1L에 FA를 0, 50, 100, 150g를 넣는 4 수준의 총 9 수준으로 실험을 진행하였다. 액체 밀도계는 1.000부터 1.060까지 측정 가능하며, 분해능이 0.001, 전체길이는 300mm인 것을 사용한다.

또한, 시리즈 2에서는 폭넓은 FA 분말도 범위를 고려하여 정분 (Rf), 원분 (Ra) 및 폐기되는 Reject (Rj)의 3수준을 기본으로 하고 Rf+Ra (Rfa), Ra+Rj (Raj)로 각각을 절반씩 혼합하는 총 5수준의 품질변화에 대하여, 시리즈 1에서 최적으로 제안된 실험방법으로 FA의 품질평가가 가능한지를 분석하고자 한다.

### 2.3 사용재료

본 연구의 사용재료로써 FA는 국내 모 FA 정제공장에서 제조 중인 것을 각 단계별로 시료를 채취하여 사용하였는데, 그 물리적 성질과 SEM 사진은 각각 Table 3 및 Figure 3~5와 같다. 이 중 Rf는 정제 처리한 양호한 품질이기 때문에 SEM 사진에서처럼 구형의 입지만 존재하며, Ra는 정제과정을 거치지 않은 원료, Rj는 정제과정 중 버려지는 것이기 때문에 굵고 거친 비정형 입자가 내부에 존재하는 것을 알 수 있다.

Table 3. Physical properties of FA

Type	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	L.O.I (%)
Rf	2.20	3 810	3.3
Rfa	2.19	3 730	5.5
Ra	2.18	3 650	7.6
Raj	2.22	3 325	6.3
Rj	2.25	3 000	5.0

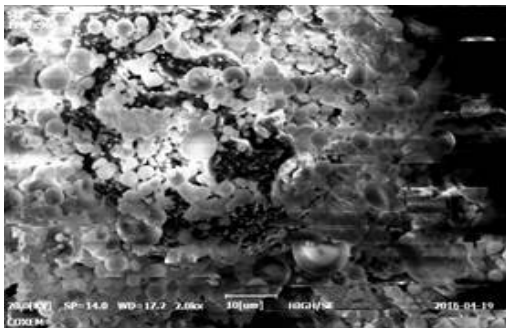


Figure 3. SEM image of refine FA

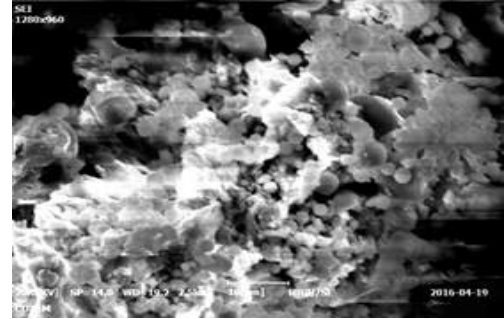


Figure 4. SEM image of raw FA

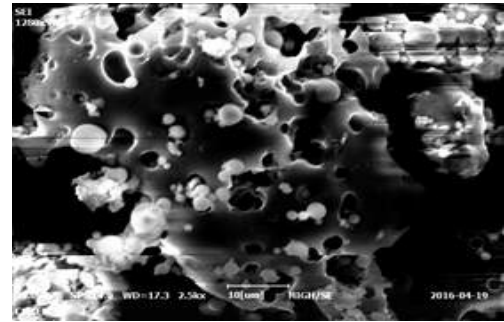


Figure 5. SEM image of reject FA

## 3. 실험방법 결정

### 3.1 개요

본 연구의 실험 방법으로 밀도측정은 Figure 6과 같다. 즉, 메스실린더에 정해진 비율만큼 FA와 물을 넣고 입구를 밀봉한 후 상하를 뒤집어 흔들어 주는 진동을 주어 1분에 15회 혼합시킨다. 혼합이 완료된 후 즉시 액체밀도계를 띄워 매 1분마다 밀도를 읽고 그에 따른 관찰과 사진촬영을 실시하였다.



Figure 6. Density measurement

### 3.2 메스실린더 용량 결정

Figure 7은 결합재와 물의 비율을 100g/L로 고정하고

메스실린더 용량 변화에 따른 밀도를 나타낸 그래프이고, Figure 8은 그에 따른 측정 모습을 나타낸 것이다. 먼저, 메스실린더 50cc는 밀도계를 띄우자마자 Figure 8과 같이 용액이 흘러 넘쳐서 측정이 불가능하였다. 100cc 메스실린더와 같은 경우는 초기 값 1분의 경우 1.034로 시작 하였는데, 5분부터는 밀도계가 바닥에 닿아 더 이상 측정할 수 없었다. 또한 250cc메스실린더는 1.045로 시작했지만, 역시 12분에 도달하여서 1.006에서 밀도계가 바닥에 닿아 더 이상 측정할 수 없었다. 그러나 500cc 메스실린더는 1.041로 시작해서 12분경과 후 1.000에 도달하였고, 1,000cc 메스실린더같은 경우는 밀도가 1.044로 시작해서 1,000이 될 때까지 13분이 걸렸다.

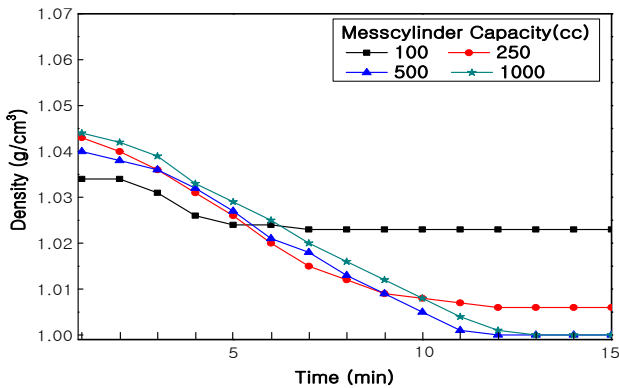


Figure 7. Density depending on messcylinder capacity change

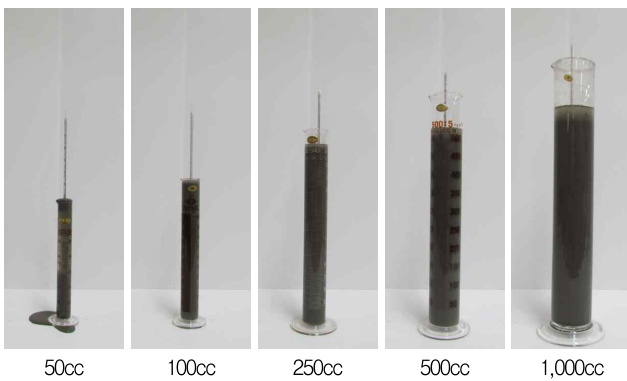


Figure 8. Density measurement depending on messcylinder capacity change

종합적으로 고찰하면 50, 100, 250cc 메스실린더의 경우는 물이 넘치거나 시간이 지나도 밀도가 1.000에 도달하지 못하여 원활한 측정이 불가능하였고, 500cc는 측정은 가능하나 밀도계가 메스실린더 벽에 근접하여 밀도 값을 읽기 힘든 단점이 있었다. 따라서 1,000cc 메스실린더가 FA 품질 평가에 가장 적합한 것으로 결정 하였다.

### 3.3 결합재량 결정

Figure 9는 메스실린더 용량을 1,000cc로 고정하고 결합재량 변화에 따른 밀도를 나타낸 그래프이다. 먼저, FA를 넣지 않은 결합재 0g/L은 시료가 없으므로 밀도가 계속 1.000으로 유지되었으며, 50g/L은 시료의 양이 적어 초기 밀도 값이 1.022로 여타의 비율보다 현저히 낮은 값이고 10분 만에 침하가 완료되어 1.000에 도달하였다. 결합재 비율 100g/L은 1.044로 시작하여 13분에 1.000에 도달하였다. 단, 150g/L은 밀도가 1.058로 가장 높은 값을 나타내었고 24분에 1.003에 도달한 후 밀도변화가 없었는데, 이는 시료의 양이 많아 그만큼 가라앉는 시간이 길어지고, 또한 비중계 하부가 침착된 FA에 장애를 받아 밀도계가 더이상 내려가지 않는 것으로 판단된다. 따라서 가장 양호하게 품질평가를 할 수 있는 결합재와 물의 비율은 100g/L로 사료된다. 참고적으로, Figure 10은 각각 순서대로 결합재량 0, 50, 100, 150g/L을 넣었을 때 비중계를 띄운 다음 측정 종료 시의 모습이다.

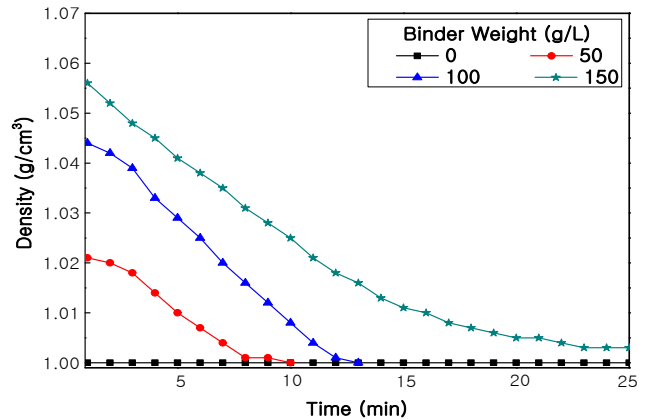


Figure 9. Density depending on time change

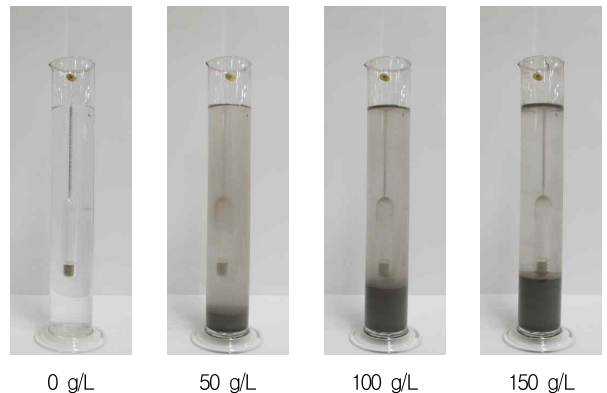


Figure 10. Density measurement depending on binder weight (During the completion of the measurement)

## 4. 플라이애시 품질평가

### 4.1 개요

전 3장에서 메스실린더 용량과 결합재량을 정하고 액체밀도계를 이용한 품질평가의 가능성을 확인한 바 있다. 따라서 본장에서는 시리즈 2로서 다양한 품질의 FA를 Hydrometer로 밀도를 측정하고 그 결과를 비교·분석하였다.

### 4.2 원료별 밀도변화

Figure 11은 결합재와 물의 비율을 100g/L, 메스실린더의 용량을 1,000cc로 고정시켰을 때, FA 종류 변화(분말도변화)에 따른 밀도 값 변화를 나타낸 그래프이다. 먼저 정분인 Rf는 분말도 값이 큰, 즉 입자가 미세하기 때문에 천천히 가라앉아 22분에 완전히 침하하였고, 그 반대로 Rj는 분말도 값이 작아, 즉 입자가 크고 거칠어 빠르게 가라앉아 7분 만에 밀도가 1.00이 되는 것을 확인할 수 있었다.

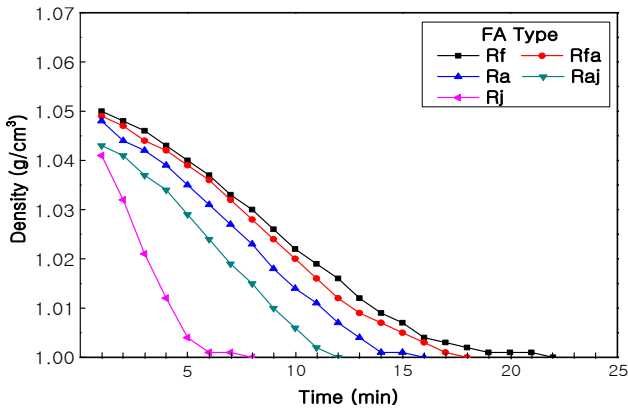


Figure 11. Density depending on FA type

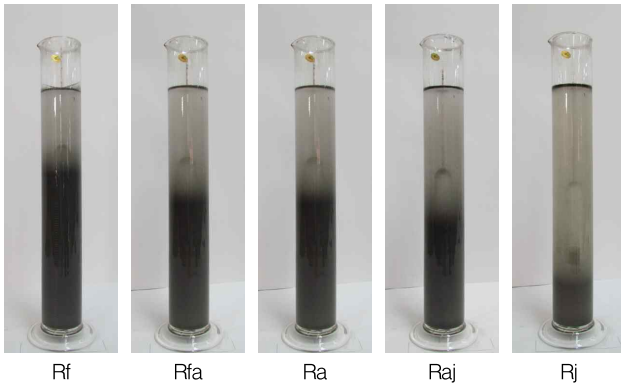


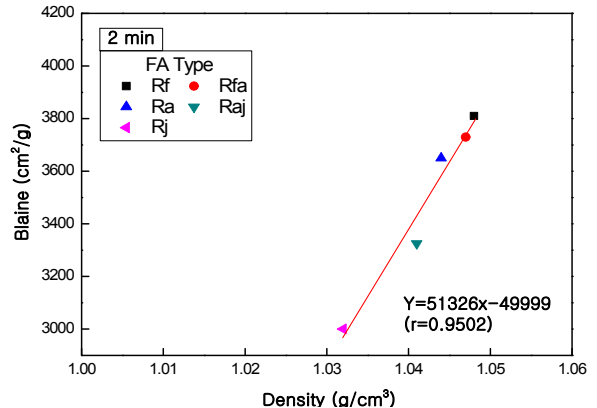
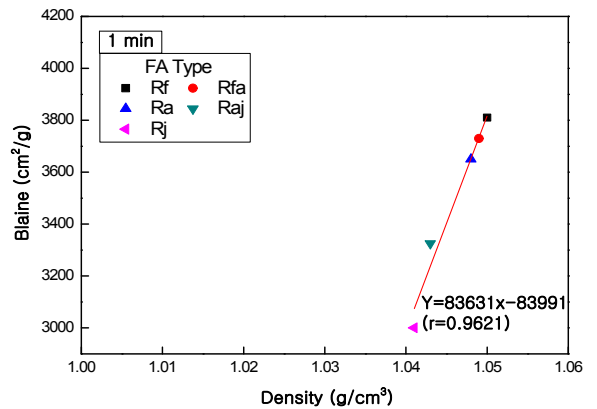
Figure 12. Density measurement depending on FA type (8min)

여타의 FA들은 Rfa, Ra, Raj의 순으로 가라앉았는데,

이는 분말도, 즉 입자크기의 영향인 것으로 사료된다. 따라서 분말도와 밀도의 연관성을 회귀식으로 분석하면 품질추정이 가능할 것으로 판단된다. 참고로, Figure 12는 FA 종류 변화에 따른 8분 경과한 후의 모습이다.

### 4.3 밀도와 품질

Hydrometer의 밀도로 FA의 품질을 평가 할 수 있을지를 분석하기 위해 Figure 13은 1분부터 5분까지의 혼탁액 밀도와 분말도의 상관관계를 비교한 것이다. 전술한 바와 같이 분말도가 클수록 혼탁액의 밀도가 증가하였다. 이는 분말도가 큰 경우 양질의 작은 구형 입자 분포가 많아 이러한 결과가 얻어진 것으로 판단된다. 단, 본 실험의 경우는 FA의 품질변수가 5 수준으로 적기 때문에 통계학적으로 큰 의미는 없지만, 상관성은 비교적 양호한데, 즉 1분의 상관계수는 0.9621, 2분은 0.9502, 3분은 0.9199, 4분은 0.8766, 5분은 0.8882로 시간이 지날수록 상관성이 감소하는 경향을 보였다. 그러나 초기 밀도 값은 절대값 차이가 크지 않기 때문에 오차가 내재되기 쉬움에 따라 3분의 밀도 값으로 FA의 분말도 품질을 평가하면 상관성과 신뢰성이 높은 양호한 방법인 것으로 판단된다.



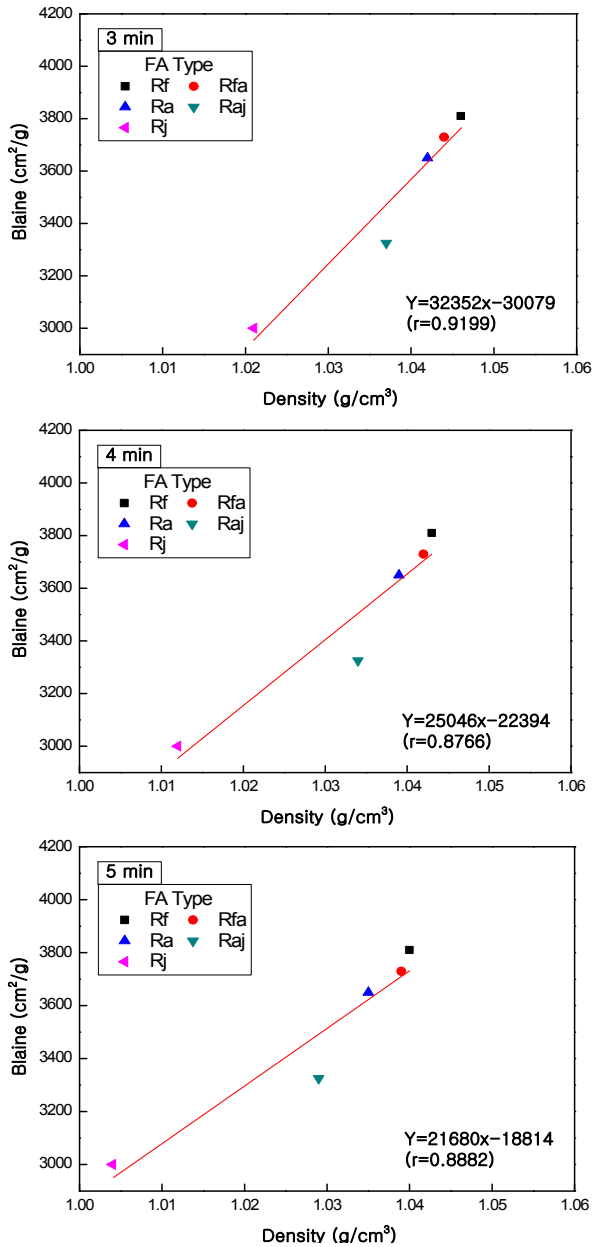


Figure 13. Relationship between density and blaine

4.4 종합분석 및 고찰

본 연구는 콘크리트 강도 조기 추정법에 활용되었던 Hydrometer 법의 원리를 이용하여 FA의 분말도 평가 가능성을 분석하였다. 분석결과 종전의 분말도 측정 방법인 블레인 공기투과장치와 본 제안 방법 간에는 Table 4와 같이 충분한 데이터로 신뢰성검증이 필요한 것만을 제외하고는 FA 수입검사서에서 본 제안 안이 양호할 수 있음을 알 수 있었다.

단, FA에 대한 분말도 규정은 KS L 5405 2종의 경우에 3,000cm<sup>2</sup>/g 이상으로 규정 되어 있음에 품질에 문제가 있는

원분뿐만 아니라 Reject 된 FA까지도 2종에 합격으로 평가 받을 수 있는 상황이다. 따라서 정제된 양호한 FA를 실무에 활용하기 위해서는 FA 분말도의 품질규격을 3,000cm<sup>2</sup>/g에서 3,500cm<sup>2</sup>/g으로 상향 조정할 필요성이 있다.

이럴 경우는 본 시험방법의 3분 밀도 값으로서 1.038 이상으로 관리하게 되면 양호한 FA의 분말도 품질이 확보될 수 있을 것으로 사료된다.

Table 4. Comparison between current method and suggesting method

Division	Blaine air-permeability apparatus method	Hydrometer method
Principle	Evaluating the specific surface of powder by measuring the different penetrating speed of gas through the powders	Inducing fineness of powder by measuring the density of suspension due to the different falling speed of the particles
Tool cost (won)	2,300,000	100,000
Experiment time	less than 10 minute	less than 10 minute
Feasibility	needed expert	no expert
Related standard	KS L 5106	Cumulating data is required because the suggesting method is new

5. 결론

본 연구에서는 레미콘 공장에서 FA 수입 검사서 액체밀도 계와 메스실린더를 이용하여 FA의 분말도 품질평가의 가능성을 분석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실험방법 결정에서 메스실린더 용량은 50~1,000cc의 5수준에 대하여 검토하였는데, 1,000cc 메스실린더가 품질평가에 가장 적합 한 것으로 판단되었다.
- 2) 결합재량의 결정은 0~150g/L의 4수준으로 실험을 진행하였는데, 가장 양호하게 품질평가 할 수 있는 결합재량은 100g/L로 판단되었다.
- 3) 결합재량은 100g/L, 메스실린더 용량은 1,000cc로 하여 FA의 품질평가를 진행하였는데, 먼저 분말도가 큰 Rf는 천천히 침하하였고, 반대로 Rj와 같은 경우는 빠르게 침하하였으며, 나머지 FA들은 Rfa, Ra, Raj의 분말도 순이었다.

- 4) 혼탁액의 밀도와 분말도의 상관관계를 1~5분에 대하여 비교 분석하였는데, 1분과 같이 초기일수록 상관성이 양호하여 Hydrometer에 의한 FA의 품질평가 가능성을 입증할 수 있었다. 그러나 1분이나 2분의 경우는 측정값 간에 절대값 차이가 크지 않아 오차가 내재되기 쉬움에 따라 3분의 밀도 값으로 FA의 분말도 품질을 평가하는 것을 제안한다.
- 5) 현재의 단계에서 KS L 5405 (플라이애시) 2종의 분말도  $3,000\text{cm}^2/\text{g}$  이상인 품질규정은 정제하지 않은 원분은 물론이고 버려지는 Reject Ash도 합격할 수 있음에  $3,500\text{cm}^2/\text{g}$  이상으로 개정하는 것이 요구된다. 따라서 이 경우는 본 연구의 Hydrometer 3분 밀도 값으로 1.038 이상을 관리하게 되면 양호한 FA 품질이 확보될 수 있을 것으로 판단된다.

이상을 종합하여 볼 때 FA의 정제여부 및 분말도 품질 평가 방법에 관한 레미콘 수입 검사에서 본 방법에 대한 많은 실험 데이터의 보충으로 효율성만 입증된다면 고가이고 조작에 숙련을 요하는 블레인 공기투과장치보다 바람직한 대안이 될 것으로 사료된다.

## 요 약

일부 플라이애시 정제공장에서는 생산시간 단축, 원가절감 등의 이유로 정제과정을 생략하고 플라이애시를 유통시킨 예가 보고된바 있다. 따라서 본 연구에서는 메스실린더 속에 FA와 물을 넣고 혼탁액화 시킨 다음 액체밀도계를 띄워 밀도를 측정하는 방법 (비중계법)으로 FA의 품질평가 가능성을 분석하고자 하였다. 연구결과, 시리즈 1 실험방법의 결정으로 메스실린더 용량은 1,000cc 이고, 물 1,000cc에 대한 FA의 질량은 100g인 조건일 때가 최적의 방법이 됨을 알 수 있었다. 시리즈 2의 실험에서는 정분, 원분, 리젝트 애시 등 다양한 분말도를 가진 FA의 종류변화에 상기 액체 밀도계의 밀도 값을 적용 하였다. 실험연구결과 FA의 정제 여부 및 분말도 품질변화에 따른 분말도와 액체밀도계의 밀도 값 간에는 상관성이 우수하여 FA 품질평가가 가능함을 알 수 있었다. 이때 측정시간은 3분의 액체밀도계 밀도 측정값으로 FA의 분말도 등 품질을 평가하는 수입검사 방법이 최적임을 알 수 있었다.

**키워드** : 플라이애시, 품질평가, 액체밀도계, 상관관계, 비중계법, 분말도

## References

1. Kwon EH, Ahn JC, Park DC. Evaluation of reduction of CO<sub>2</sub> emission achieved by using low-carbon recycled cement with cementitious waste powder. Proceedings of The Korea Institute of Building Construction, 2014 May 29-30; Gyeongju, Korea, Seoul (Korea): The Korea Institute of Building Construction; 2014. p. 250-1.
2. Cho HD, Jaung JD. An experimental study on strength development of micro grinding fly-ash mortar - effect of alkali activator and high temperature curing on the compressive strength of concrete. Journal of The Korea Institute of Building Construction, 2010 Feb;10(1):39-47.
3. Jung DH. Thermal power plant of Cinders 'Car replacement' with Random distribution [Internet]. Korea: MBC NEWS; 2014 Oct 14 [cited 2017 Mar 31]. Available from:[http://imnews.imbc.com/replay/2014/nwdesk/article/3541649\\_18451.html](http://imnews.imbc.com/replay/2014/nwdesk/article/3541649_18451.html).
4. Han CG. Study on the early estimation of concrete strength [Dissertation]. [Chungnam (Korea)]: Chungnam university; 1988. 251 p.