

디지털 이미지 분석을 이용한 Fly Ash의 원형지수 측정

이승헌[†] · 김홍주* · 배승목 · 이원준 · Etsuo Sakai** · Masaki Daimon**
군산대학교 재료·화학공학부
*기초소재(주) 기술연구소
**동경공업대학 대학원 이공학 연구과
(2002년 4월 26일 접수; 2002년 7월 16일 승인)

Circularity Measurement of Fly Ash Using Digital Image Processing

Seung Heun Lee[†], Hong Joo Kim*, Soon Muk Bae, Won Jun Lee,
Etsuo Sakai** and Masaki Daimon**

Faculty of Materials and Chemical Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

*Basic Materials Corp., R and D Center, Incheon 401-010, Korea

**Department of Metallurgy and Ceramics Science, Graduate School, Tokyo Institute of Technology,

2-12-1 O-okayama Meguro-ku, Tokyo 152, Japan

(Received April 26, 2002; Accepted July 16, 2002)

초 록

미분탄 화력발전소에서 보일러의 부하를 변화시켰을 때 전기집진기에서 단별 채취한 fly ash에 대해서 디지털 이미지 분석을 이용하여 원형지수를 검토하였다. 원형지수 측정은 다음과 같은 다섯 단계, 즉 ① 이미지 획득, ② 이미지 전처리, ③ 검출, ④ 이미지 후처리, ⑤ 측정의 단계를 거쳐 이루어 졌다. Fly ash의 평균 원형지수는 0.78~0.83의 범위를 나타냈으며, 같은 위치에 있는 호파에서 채취한 fly ash는 보일러의 부하에 관계없이 유사한 원형지수 값을 나타냈다. 그리고 첫 번째 호파에서 세 번째 호파로 갈수록, 즉 fly ash의 평균 입경이 작아질수록 원형지수는 증가하는 경향을 나타냈다.

ABSTRACT

This paper investigates circularity of fly ashes using the digital image processing. Fly ashes directly collect from electrostatic precipitator when the load of conditions of boiler are changed at a coal-fired power plant. Circularity measurement can be accomplished in five steps: ① image acquisition, ② grey image processing, ③ detection the component to measure, ④ binary image processing, ⑤ feature measurement. The mean circularity of fly ashes is in the range of 0.78 to 0.83. Fly ashes collected from the same hopper has similar circularity regardless of the load of boiler and circularity increases as going from the 1st hopper to 3rd one, namely as particle size become finer.

Key words : Fly ash, Image processing, Circularity, Electrostatic precipitator

1. 서 론

최근, 컴퓨터를 기반으로한 디지털 이미지 분석 기술은 그 활용이 날로 증가하고 있는 추세이다.¹⁻⁷⁾ 일반적으로 디지털 이미지 분석방법은 CCD 카메라 또는 스캐너를 통해 이미지를 습득하여 픽셀단위의 이미지로 저장하고, 여기에서 얻어진 이미지를 여러 가지 전처리를 통해 수정을 한 다음, 배경과의 분할 작업을 통해 측정하고자 하는 이미지를 얻어내는 방법이다.³⁻⁸⁾ 이러한 방법은 다양

하게 활용되는데, 지금까지 보고된 바에 의하면 생물학, 지리학, 기상학, 제조분야, 의학 그리고 재료공학 등 여러 분야에서 널리 활용되고 있다.¹⁻⁸⁾

이미지 분석의 방법을 적용한 콘크리트 재료분야의 연구사례를 보면, 콘크리트 미세구조에서 입자의 크기와 형태, 기공의 공극분포와 도로의 균열 결함조사, 구조적 결함조사를 위해 활용되고 있다.^{1,8)} 최근에는 이미지 분석 기술에 의해 골재의 입자크기와 모양을 측정하는 방법이 수행되어지고 있다.²⁻⁵⁾

콘크리트 혼합시 사용되는 골재의 크기와 형태에 따라 콘크리트의 성질은 크게 영향을 받기 때문에 이들의 영향을 정량적으로 파악하는 것은 중요하다. 비록 입자의 크기와 모양을 표현하는 방식에 있어서 서로 상이한 점이 있

[†]Corresponding author : Seung Heun Lee
E-mail : shlee@kunsan.ac.kr
Tel : +82-63-469-4733 Fax : +82-63-469-4892

지만, 디지털 이미지 분석에 의한 입자 크기와 모양의 측정은 그 유용성이 실증되었다.²⁻⁵⁾ 따라서 본 연구는 콘크리트의 혼화재로 널리 쓰이고 있는 fly ash의 유효이용을 도모하기 위해서, fly ash의 입자의 모양을 디지털 이미지 분석을 통해 측정하고자 한다. Fly ash는 천연적으로 발생하는 포졸란과 유사한 성질을 가지고 있어 콘크리트 혼화재로 사용되고 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 하지만 고유동 콘크리트용 혼화재로서는, fly ash의 품질의 안정과 보다 우수한 유효성을 확보하는 것이 절실히 요망되고 있다.

일반적으로 fly ash를 첨가하는 것에 의해 시멘트 페이스트의 유효성이 향상된다는 것은 많은 연구자들에 의해 보고되었지만,⁹⁻¹¹⁾ 같은 화력발전소에서 배출한 fly ash도 입자의 특성, 입도 분포, 모양 등이 서로 다르므로 유효 특성도 변화하게 된다. 그러나 현재 이들 각각의 효과에 대해 명확하게 해석한 연구는 거의 없다. 특히 유효성 향상은 fly ash가 구형의 모양을 하고 있어 불베어링 작용에 의해 유효성이 향상된다고 보고되었으나,¹²⁾ 실제 fly ash를 관찰하면 엉겨붙어 있는 입자, 이형의 입자 등이 상당량 포함되어 있어, 구형입자의 함유율은 fly ash의 종류에 따라 차이가 나고, 또한 구형율을 구하기는 쉽지 않다. 구형입자의 함유율을 정확히 안다는 것은 fly ash 첨가 페이스트, 모르타르, 콘크리트의 특성을 규명하는데 도움이 될 뿐 아니라 fly ash 품질 평가의 새로운 기준이 될 수 있다.

본 연구에서는 콘크리트용 혼화재로 사용되는 fly ash의 품질 평가 방안의 하나로 디지털 이미지 분석을 통하여 fly ash의 원형지수를 측정하는 방법과 단별채취에 따른 원형지수의 변화를 검토하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험 재료

실험에 이용한 fly ash는 동일한 화력발전소에서 배출한 것으로, 보일러의 발전부하를 변화시킨 다음 전기 집진기에 부착된 호파로부터 채취한 역청회탄이다. A 계열은 보일러의 부하가 600 MW(정상부하)일 때 발생한 fly ash이고 A' 계열은 A 계열과 같은 석탄을 사용했을 때 보일러의 부하가 300 MW에서 발생한 fly ash이다. 입구 쪽에 위치한 호파에서 채취한 fly ash를 A-1, A'-1, 두 번째 호파에서 채취한 fly ash를 A-2, A'-2, 출구쪽인 세 번째 호파에서 채취한 fly ash를 A-3, A'-3이라 하였다. 실험에 사용한 fly ash의 화학적 조성과 물리적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타냈다.

2.2. 시료의 처리

디지털 이미지 분석을 이용하여 fly ash의 원형지수를 측정하기 위하여 fly ash 분말을 다음과 같이 처리하였다. Fly ash 분말은 입자끼리 응집이 되어 있거나 응집하려는 경향이 있기 때문에 물리적인 응집 상태를 깨뜨리기 위하여 ethyl alcohol을 용매로 사용하여 분산시켰다. 분산 방법은 10 ml 비이커에 분말을 미량 넣고 5 ml의 ethyl alcohol을 넣은 다음, 10분간 초음파 처리하였다. 분산된 현탁액은 건조기를 사용하여 50°C로 2시간 건조하였다. 건조된 분말은 carbon tape에 부착시켜 주사전자현미경(JEOL 5410, Japan)을 사용하여 관찰하였다. 모든 시료에 대해서 입자의 갯수가 400개 이상이 되도록 전자현미경의 배율을 조정하였다.

Table 1. Chemical Compositions of Fly Ashes

Fly ash	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	C	Ig. loss
A-1	63.8	24.8	4.6	2.3	0.9	0.3	1.2	0.7	0.7	1.1
A-2	62.0	25.5	4.3	2.2	1.2	0.4	1.3	0.8	0.8	1.2
A-3	59.5	26.4	4.8	2.3	1.2	1.0	1.3	0.8	0.3	1.7
A'-1	62.5	24.9	4.2	2.0	1.1	0.5	1.2	0.8	1.5	2.1
A'-2	60.9	25.4	4.5	2.3	0.9	0.6	1.2	0.8	1.3	2.1
A'-3	59.6	26.4	4.3	2.3	1.1	1.0	1.4	0.8	0.4	1.9

Table 2. Physical Properties of Fly Ashes

Fly ash	Collected position	Specific gravity	Blaine surface area (cm ² /g)	Mean particle size (μm)	Residue on 45 μm sieve (%)
A-1	1st hopper	2.06	2760	27.33	22.8
A-2	2nd hopper	2.22	4180	12.47	3.8
A-3	3rd hopper	2.42	7360	5.39	1.7
A'-1	1st hopper	2.08	3580	22.85	16.6
A'-2	2nd hopper	2.23	4980	11.00	6.32
A'-3	3rd hopper	2.40	7920	5.38	0.2

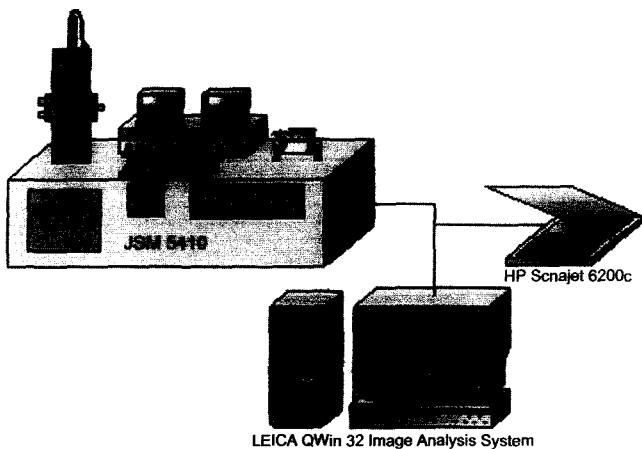


Fig. 1. Schematic diagram of processing for image analysis system.

2.3. 디지털 이미지 분석 시스템

본 연구에서 사용한 이미지 분석 시스템 구성은 Fig. 1 과 같이 주사전자현미경(JEOL 5410, Japan), 스캐너(Scanjet 6200c, Hewlett Packard Co., USA) 및 PC로 구성되어 있는 시스템을 사용하였다.

이미지 분석에 이용한 프로그램은 LEICIA QWin(Lecia image system Ltd., Germany)을 사용하였다. 이미지 분석은 ① 이미지 획득, ② 이미지 전처리, ③ 검출, ④ 이미지 후 처리, ⑤ 측정의 단계를 거쳐 이루어졌다. 일반적으로 이미지 획득은 CCD 카메라,^{2,4)} 디지털 카메라, 현미경⁷⁾과 같은 이미지 획득장치로 이미지를 캡처하고 디지털화 하는 과정으로, 본 연구에서는 이미지 획득장치로 주사전자현미경을 사용하였고, SEM 사진을 이미지분석 시스템에 입력하기 위해서 스캐너를 이용하였다. 스캐너를 이용하여 이미지를 얻을 때 조건 설정이 가능한데, 분해능은 150 dpi, 임계값은 110, 출력모드는 그레이스케일로 8 bit로 판독하여 한 픽셀이 가질 수 있는 회도를 2⁸, 즉 256가지로 제한하였다. 얻어진 이미지의 해상도는 520×400 픽셀이었으며, 이것은 실제길이 8.81 cm×6.77 cm에 해당된다.

이미지획득 장치로부터 얻어진 이미지 데이터는 이미지 분석에 맞도록 여러 단계의 이미지 전처리과정을 거쳐 수정되었다. 스캐너로부터 획득한 이미지는 노이즈나 분석의 목적에 맞지 않는 부분들까지도 포함하고 있기 때문에 곧바로 이미지 분석에 적용하기는 어렵다고 보고, 이미지 전처리 기법으로 히스토그램 균등화(Histogram equalization), 가우시안 필터링(Gaussian filtering), 형태학적 처리(Morphology transformation)를 하여, 각 회색 값의 빈도를 나타내는 히스토그램을 전 회색 값에 대해 고르게 분포시켜 회색 값이 한 곳에 집중되지 않도록 하여 시각적 대비가 좋아지게 하였다.

히스토그램 균등화에 의해 이미지의 콘트라스트는 개

선되었지만, 반면에 이미지의 잡음은 증가하게 되고, 분석 목적에 맞지 않는 인공 음영이 두드러지게 되었기 때문에 가우시안 필터링과정과 형태학적 처리를 하여 이미지를 개선시켰다. 먼저, 이미지의 잡음은 필터 커널을 이용하는 방법으로, 가우시안 필터를 이미지와 2D Convolution 연산을 통해 제거시키고, 초기 객체분류 및 물체의 구조를 명확히 하기 위한 방법으로 침식(erosion)과 팽창(dilation)을 이용하였다. 침식처리에 의해 작은 돌기와 같은 단일 픽셀들을 완전히 제거하고 그에 상응하는 팽창 처리에 의해 이미지는 원래의 이미지로 복원하였다.

이미지 분석을 위해서는 이진 이미지(binary image)를 필요로 하기 때문에, 이미지 전처리과정에서 얻어진 이미지를 측정의 대상이 되는 입자를 배경으로부터 검출하고, 이진 이미지로 변환시키기 위한 방법으로 히스토그램을 이용한 임계값 설정(thresholding)에 의한 방법을 선택하였다.^{3,7)} 전체 이미지에서 임계값을 기준으로 회색 값이 그 이상이면 흰색의 명도 값 255를 배정하고, 그 반대의 경우엔 모두 검정 색의 명도 값 0을 배정하여, 모든 입자들이 배경과 분할되도록 임계값을 설정하였다. 모든 이미지에 대한 동일한 임계값을 정할 수 없기 때문에, 히스토그램 슬라이딩이나 스트레칭시켜 영상의 콘트라스트를 개선시켜, 한편에 몰려있는 히스토그램을 모든 영역으로 확장시킨 후에 검출하였다.

검출된 이미지를 대상으로 측정에 필요한 특징을 추출하였다. 특징추출은 이웃하는 입자들끼리 접촉된 부분을 떼어내고, 직사각형 측정프레임에 걸쳐 있는 불완전한 입자들과 인공음영을 제외시켜 정의하였다.

측정(measurements)은 위와 같은 과정에 의해 정의된 변량을 대상으로, 입자의 형상을 판단하기 위해서 각각의 객체에 대해서 원형지수(circularity)를 측정하였다. 그 결과 픽셀의 수가 8~10 이하인 경우 완전한 구인 경우에도 원형지수 0.6 이하로 나타나, 픽셀의 수는 10 픽셀로 정하고 그 보다 작거나 같은 픽셀로 구성된 입자들은 제거시켰다. 측정된 입자 수는 400~700개로 하였다.

2.4. 원형지수 측정

원형지수는 다음과 같은 식(1)에 의해서 구했다.

$$Circularity = \frac{4 \times \pi \times Area \times 1.064}{Perimeter^2} \quad (1)$$

여기서, perimeter는 형상의 외곽주변 각 픽셀들에 대한 화소간 거리의 합으로 입자의 투영윤곽둘레이며, 1.064는 perimeter 조정계수이다. 이 수치는 이미지의 이진화에 따른 모서리의 영향을 줄이기 위한 계수로 사용되었다. 면적(area)은 입자 내부의 픽셀 면적으로 입자의 경계를 포함하는 내부 픽셀들의 총 개수로 측정되었다.

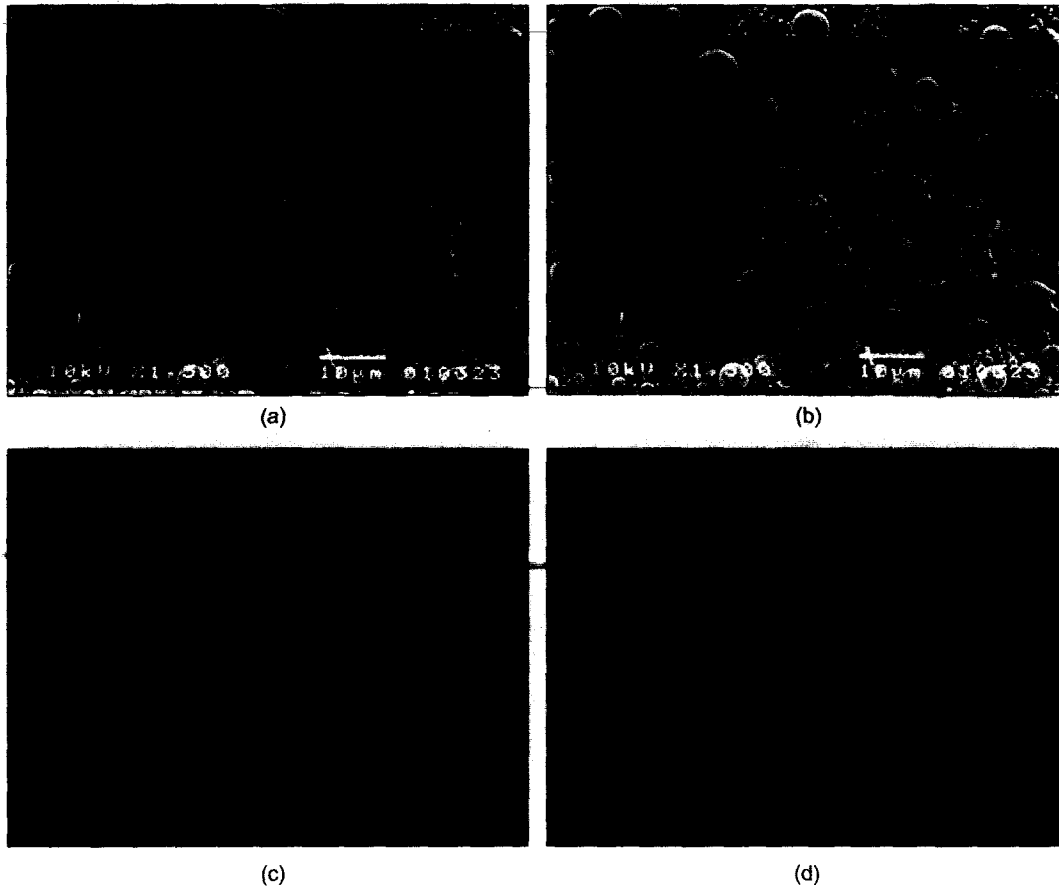


Fig. 2. Image analysis procedure. (a) Original image, (b) Image acquisition and grey image processing (c) Detection the component to measure, (d) Binary image processing.

3. 결과 및 고찰

A-3 fly ash의 입자 형상을 측정하기 위해 이미지 분석을 적용한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fly ash를 일반적으로 전자현미경으로 측정하여 보면 입자들이 엉겨 붙어 있거나 이형의 각진 입자들이 혼재되어 있어서 각각의 입자에 대한 측정은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 ethyl alcohol을 분산매로 하여 fly ash 분말을 초음파 처리하여 분산시켜 주사전자현미경으로 측정하였다. 측정 결과 (a)에서 나타나듯이 입자들이 분산되어 있음을 알 수 있다. 하지만 배경과 입자의 색상이 비슷하여 경계의 구분이 뚜렷하지 않아서 측정하기는 곤란하다. 그래서 이미지를 캡처할 때 스캐너의 밝기명암을 조절하여 얻은 이미지를 이미지전 처리과정을 거쳐 이미지내의 밝은 부분을 강조시킨 결과 (b)의 fly ash의 입자는 (a)보다 더욱 두드러져 보이고 배경은 상대적으로 어두워져서 쉽게 분할 할 수 있게 되었다. 측정에 필요한 이진화 이미지는 시료의 종류에 따른 조사광의 변동, 스캐너의 면에 따른 감도 차이 등 광학기기의 물리적 성질상 발생하는 오차 때문에 히

스토그램 슬라이딩으로 알맞은 임계값을 선택하였다. 그 후 detection 한 결과 (c)이미지내의 배경을 제외한 모든 입자를 인식 할 수 있었다. 하지만 이미지 프레임에 걸쳐 있는 입자들은 완전치 않은 입자이기 때문에 edge 검출을 통해 프레임에 걸리는 모든 입자들은 제외시킨 후 측정에 필요한 특징만을 추출하였다(d).

Fly ash 입자 형상의 특징은 입자가 구형이라는 데에 있다. 따라서 입자의 구형 정도를 측정하는 것은 fly ash의 품질 평가에 매우 중요하다. 구형의 정도는 Wadel¹³⁾에 의해 다음과 같이 구형율(sphericity)로 정의되었다.

$$\text{Sphericity} = (V_p/V_s)^{1/3} \quad (2)$$

여기서, V_p : particle volume

V_s : the volume of circumscribing sphere

또한, Barksdale¹⁴⁾ 등은 구형율은 입자의 실제 표면적과 입자와 같은 부피를 갖는 구의 표면적과의 비로 정의하였다. 그리고 Krumbein¹⁵⁾ 등에 의해 또 다른 정의로서 식(3)이 제안되었다.

$$\text{Sphericity} = [(\text{thickness} \times \text{breadth}) / \text{length}^2]^{1/3} \quad (3)$$

그러나 식(2)에서 입자의 표면적은 3차원적인 항이기 때문에 이차원적으로 표시되는 이미지 분석에 의해서는 구할 수가 없고, 식(3)에서도 2차원적인 입자(feature)에서는 두께(thickness)를 구할 수가 없다. Kwan^{2,4)} 등은 조대한 골재인 경우, 출처가 같은 조대한 골재는 유사한 형상 특성을 갖는다는 가정 하에서 다음과 같이 두께를 구했다.

$$\text{Mean thickness} = \lambda \times \text{breadth} \quad (4)$$

여기서, λ : a parameter dependent on the flakiness of the aggregate

식(4)를 식(3)에 대입하면 구형율은 다음과 같이 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\text{sphericity} = [\lambda(\text{breadth} / \text{length})^2]^{1/3} \quad (5)$$

그리고 λ 는 다음과 같은 식에서 구했다.

$$\lambda = M / [\rho \times \sum (\text{breadth} \times \text{area})] \quad (6)$$

여기서, M : the total mass of aggregate sample
 ρ : the density of aggregate sample

그러나 평균입경이 100 μm 이하인 미세한 시료인 경우, 전자현미경에 의해 입자를 관찰하기 때문에 사진 안에 있는 입자들의 질량을 알 수가 없어 λ 의 값을 구할 수가 없으므로 식(6)에 의해 구형율을 구할 수가 없다. 하지만, fly ash 입자의 많은 양이 구형에 가까운 형태를 지니고 있기 때문에 이차원적으로 원인 경우 구의 형태를 지니고 있다. 따라서 본 실험에서는 구형율 대신에 원형지수로 표시하여도 간접적으로 입자의 구형정도를 알 수 있으므로 원형지수를 측정하였다. 원형지수란 형상이 얼마나 원에 가까운가를 표현하는 유도변량으로, 입자의 투영면적에 해당하는 원의 길이를 입자의 투영 윤곽둘레를 원으로 환산한 면적으로 나눈 값으로 완전한 원일 경우에 원형지수는 1의 값을 갖고, 원의 모양에서 멀어질수록 작은 값을 갖는다.⁸⁾

A-3 fly ash의 원형지수를 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 측정된 시료는 석탄화력발전소의 전기집진장치의 세번째 호퍼에서 채취한 것으로, 평균입경이 5.39 μm 로 매우 작은 입자들로 구성되어 있고, 미연탄소량도 0.3 wt%로 매우 낮은 값을 갖는다. 또한 빈도분포 그래프를 보면 구형지수의 값은 0.40부터 0.98까지이지만 평균 0.83으로 구형에 가까운 입자들이 많은 비대칭 분포를 보이고 있다. 색상을 통해서 간접적으로 측정이미지와 비교해서 구형에 가까운 입자들을 육안으로 식별할 수 있었다. 하지만 fly ash의 종류가 다르면 기하학적 변량의 측정치는 해

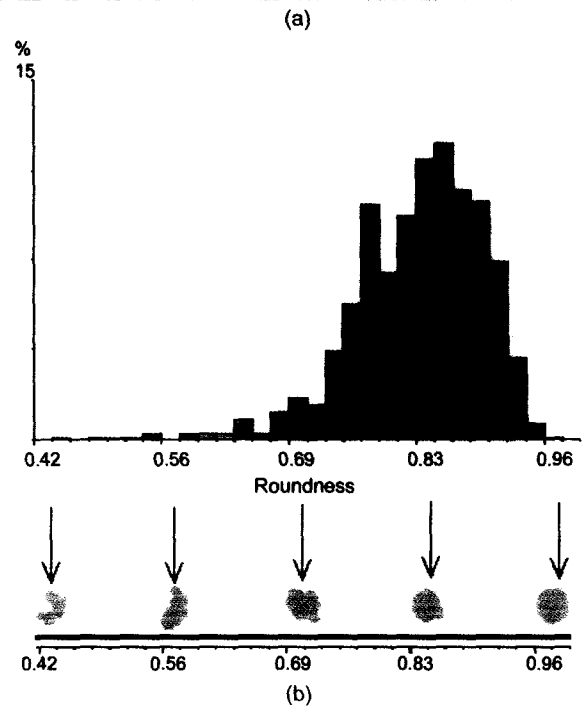


Fig. 3. Final results : (a) Feature measurements result of digital image analysis of fly ash A-3, (b) Distribution of the circularity.

상도에 따라 다르고, 특히 perimeter는 크게 달라지게 된다. 따라서 여러 종의 시료를 측정하는 경우는 같은 조건에서 얻은 측정치를 비교하여야 이미지 분석에 있어서의 오차를 줄일 수 있게 된다.

Figs. 4, 5는 위와 같은 방법으로 fly ash 6종을 이미지 분석한 결과를 나타낸다. 보일러의 연소조건에 따라 A 계열과 A' 계열로 분류하고 다시 전기집진기의 호퍼 위치에 따라 3가지 종류로 분류하여 측정하였다. Figs. 4와 5에서 괄호 안의 값은 각각의 평균 입경을 나타내었다. 측정된 입자의 수는 400~700개의 범위에서 측정하였으며,



Mean : 0.76 (27.33 μm)
Feature : 414

(a) A-1



Mean : 0.82 (12.47 μm)
Feature : 532

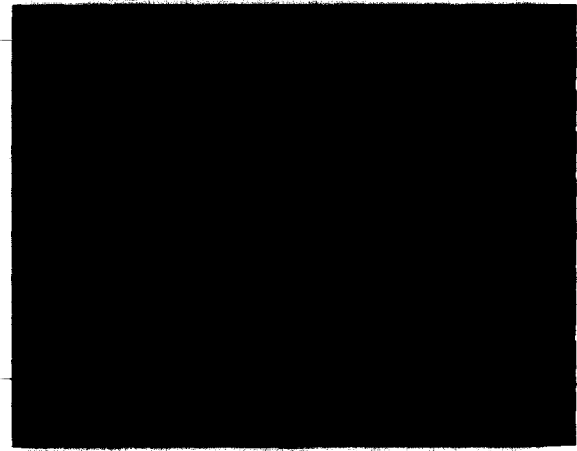
(b) A-2



Mean : 0.82 (5.39 μm)
Feature : 596

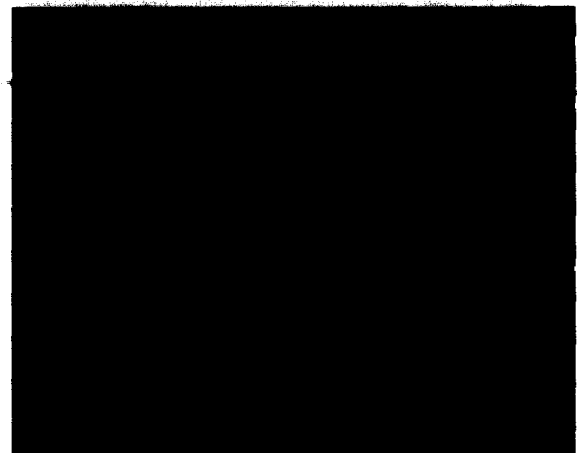
(c) A-3

Fig. 4. Result of the image analysis for fly ash A series.



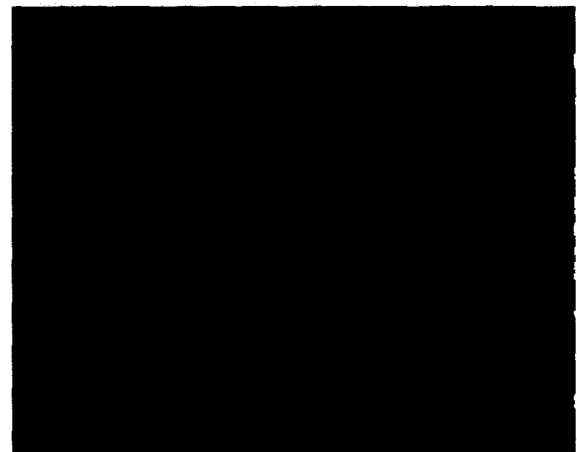
Mean : 0.78 (22.85 μm)
Feature : 583

(a) A'-1



Mean : 0.79 (11.00 μm)
Feature : 696

(b) A'-2



Mean : 0.80 (5.38 μm)
Feature : 645

(c) A'-3

Fig. 5. Result of the image analysis for fly ash A' series.

평균 원형지수는 0.78~0.83의 값을 나타냈다. Blaine 값은 2,790 cm^2/g 에서 7,360 cm^2/g 정도 차이가 났지만 원형지수는 0.05 정도 밖에 차이가 나지 않았다. 측정결과 보일

러의 부하에 관계없이 동일한 호파에서 채취한 fly ash의 원형지수는 유사한 값을 가지고 있고, 첫 번째 호파에서 세 번째 호파로 갈수록, 즉 fly ash의 분말도가 증가할수

록 원형지수는 증가하는 경향을 나타냈다.

보일러에서의 미분탄 연소과정을 보면 200 mesh 이하로 관리된 미분탄은 연소온도가 1600°C 이상으로 되며, 비연소 물질은 일부의 결정을 제외하고 용융되어 표면장력에 의해 구형의 입자가 된다. 이러한 입자는 연소시 발생한 CO₂, H₂O 등의 가스에 의해 이동되어 냉각되면서 보일러로부터 빠져나온다. 입자의 최소 유동화속도 및 이동속도는 밀도보다는 입경에 크게 의존하므로, 작은 입자는 최소 유동화속도 및 이동속도가 커서 냉각속도가 빠르게 된다.¹⁶⁾ 따라서 세 번째 호파에서 채취한 fly ash가 분말도가 좋다.⁹⁾ 석탄에 함유된 α-quartz는 연소에 의해 점토 중의 Al₂O₃ 성분과 반응하여 mullite를 형성하고 잔량이 회분에 존재하는 것으로, 연소과정에서 열이력 등을 받아 표면이 연마되어 각진 형태를 갖는다. 이것은 구형 입자에 비해 입자가 크다.^{9,10)} 따라서 α-quartz의 양이 많고 큰 입자로 구성된 첫 번째 호파보다는 유리질의 양이 많고 미세한 입자로 구성된 세 번째 호파에서 채취한 fly ash가 원형지수가 크다고 생각된다. 이상과 같은 결과로 볼 때 fly ash의 분말도와 원형지수의 값은 서로 상관관계가 있는 것으로 생각된다.

4. 결 론

동일한 화력발전소에서 보일러의 부하 및 전기집진기 호파의 위치에 따른 fly ash의 원형지수를 측정한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이론적으로 측정 오차를 감소시키기 위해서는 측정 frame안에 500개 이상의 입자가 분산되어야 하는데, ethyl alcohol을 이용한 시료처리로 이것이 가능하였다.

2. 화력발전소 보일러의 부하에 관계없이 동일한 위치에서 채취한 fly ash의 평균 원형 지수는 전반적으로 0.78~0.83의 범위를 나타냈다.

3. 제1집진단에서 제3집진단으로 갈수록, 즉 fly ash의 입자가 작아질수록 원형지수는 증가하는 경향을 나타냈다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 군산대학교 새만금환경연구센터의 지원에 의해 수행된 결과의 일부로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. K. Y. Kang, J. G. Roemer and D. Ghosh, "Microstructural Characterization of Cemented Sample by Image Analysis Techniques," *Powder Tech.*, **108** 130-36 (2000).
2. C. F. Mora, A. K. H. Kwan and H. C. Chan, "Particle Size Distribution Analysis of Coarse Aggregate Using Digital Image Processing," *Cem. Concr. Res.*, **28** [6] 921-32 (1998).
3. A. K. H. Kwan, C. F. Mora and H. C. Chan, "Particle Shape Analysis of Coarse Aggregate Using Digital Image Processing," *Cem. Concr. Res.*, **29** [12] 1403-10 (1999).
4. C. F. Mora and A. K. H. Kwan, "Sphericity Shape Factor and Convexity Measurement of Coarse Aggregate for Concrete Using Digital Image Processing," *Cem. Concr. Res.*, **30** [3] 351-58 (2000).
5. A-L. Persson, "Image Analysis of Shape and Size of Fine Aggregates," *Eng. Geology*, **50** 177-86 (1988).
6. F. Podczeczek, S. R. Rahman and J. M. Newton, "Evaluation of a Standardized Procedure to Assess the Shape of Pellets Using Analysis," *Int. J. of Pharm.*, **192** 123-38 (1999).
7. J. M. R Fernlund, "The Effect of Particle Form on Sieve Analysis : A Test by Image Analysis," *Eng. Geology*, **50** 111-24 (1998).
8. R. E. Ferrell and A. W. Drew, "Quantification of Fly Ash in Concrete by Image Analysis Techniques : A Preliminary Investigation," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **136** 99-109 (1989).
9. S. H. Lee, E. Sakai, M. Daimon and W. K. Bang, "Characterization of Fly Ash Directly Collected from Electrostatic Precipitator," *Cem. Concr. Res.*, **29** [11] 1791-97 (1999).
10. S. H. Lee, E. Sakai, K. Watanabe, T. Yanagizawa and M. Daimon, "Properties of Classified Fly Ashes by Using Electrostatic Precipitator and the Modification of Fly Ashes by the Removal of Carbon," *J. Soc. Mat. Sci. Jpn.*, **48** [8] 837-42 (1999).
11. S. Nagataki, E. Sakai and T. Takeuchi, "The Fluidity of Fly Ash-Cement Paste with Superplasticizer," *Cem. Concr. Res.*, **14** [5] 631-38 (1984).
12. S. Hosino, Y. Ohba, E. Sakai and M. Daimon, "Relation between the Properties of Inorganic Powders and the Fluidity of Cement Pastes," *JCA Proceedings of Cement & Concrete*, **50** 186-91 (1996).
13. H. Wadel, "Volume, Shape and Roundness of Quartz Particles," *Geology*, **43** 250-80 (1935).
14. R. D. Barksdale, M. A. Kemp, W. J. Sheffield and J. L. Hubbard, "Measurement of Aggregate Shape, Surface Area and Roughness," *Transportation Reserch Record*, **1301** 107-16 (1991).
15. W. C. Krumbein, "Measurement of Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles," *Sediment Petrol*, **11** 64-72 (1991).
16. D. Kumio and O. Levenspiel, *Fluidization Engineering*, pp. 61-91, Butterworth-Heinemann, Boston, 1991.