

플라이 애쉬 입자의 디지털 이미지 분석

김 홍 주* · 이 승 헌

〈군산대학교 재료공학과〉

1. 서 론

컴퓨터를 기반으로한 디지털 이미지 분석기술은 주로 어떤 연구대상으로부터 이미지를 습득하여 유용한 정보를 얻는 것으로 최근에 그 활용이 날로 증가하고 있다.

일반적으로 이미지 분석방법은 CCD 카메라 또는 스캐너를 통해 이미지를 습득하여 픽셀단위의 배열로 저장하고, 여기에서 얻어진 이미지를 여러가지 전처리를 통해 수정을 한 다음, 배경과의 분할작업을 통해 측정하고자 하는 특징을 얻어내는 방법이다. 이러한 방법은 다양하게 활용되는데, 지금까지 보고된 바에 의하면 생물학, 지리학, 기상학, 제조분야, 그리고 재료공학 등 여러 분야에서 널리 활용되고 있다.

1960년대부터 비약적으로 발전한 이미지 분석 기술은 최근에 컴퓨터와 그 주변장치들의 성능이 좋아지면서, 신속 정확해지고 재현성 또한 우수하고 많은 양의 데이터를 동시에 처리하는 것이 가능해지고 있다. 또한 인간의 육안으로는 구별할 수 없는 작은 변화까지도 인지해낼 수 있는 장점을 가지고 있다.

이미지 분석의 방법을 적용한 콘크리트 재료분야의 연구사례를 보면, 콘크리트 미세구조의 입자의 크기와 형태, 기공의 공극분포와 도로의 균열 결합조사와 구조적 결합조사를 위해 활용되고 있다. 최근에 이미지 분석기술에 의해 골재의 입자크기와 모양을 측정하는 방법이 수행되었다.

콘크리트 혼합시 사용되는 골재의 크기와 형태에 따라서 그 성질은 크게 영향을 받기 때문에 이들의 영향을 정량적으로 파악하는 것은 중요한 것이다. 입자의 크기와 형태분석을 위한 이미지

분석기술의 적용은 Barksdale et al., Li et al., Yue and Morin, and Kuo et al. 등에 의해서도 시도되었다. 비록 입자의 크기와 모양을 표현하는 방식에 있어서 서로 상이한 점이 있지만 디지털 이미지 분석에 의한 입자의 크기와 모양을 측정할 수 있는 방법의 유용성이 실증되었다. 따라서 본 연구자들은 콘크리트의 혼화제로 널리 쓰이고 있는 플라이 애쉬의 유효이용을 도모하기 위해서, 플라이 애쉬의 입자의 크기와 모양을 디지털 이미지 분석을 통해 측정하고자 하였다. 플라이 애쉬는 천연적으로 발생하는 포졸란이나 시멘트와 유사한 성질을 가지고 있어 콘크리트용 혼화제로서 사용되고 있다. 하지만 고유동 콘크리트용 혼화제로서는, 플라이 애쉬의 품질의 안정과 보다 우수한 유동성을 확보하는 것이 절실히 요망되고 있다.

일반적으로 유동성 향상은 플라이 애쉬가 구형의 입자를 띠고 있어 불베어링 작용에 의해 유동성이 향상된다고 보고되었으나, 실제 플라이 애쉬를 관찰하면 엉겨붙어 있는 입자, 이형의 입자 등이 상당량 포함되어 있어, 구형입자의 함유율은 플라이 애쉬의 종류에 따라 품질의 차이가 나고, 구형입자의 함유율을 구하기가 쉽지가 않다. 플라이 애쉬의 구형입자의 함유율을 정확히 안다는 것은 플라이 애쉬 첨가 페이스트, 모르타르, 콘크리트의 특성을 규명하는데 도움이 될 뿐 아니라 플라이 애쉬 품질평가의 새로운 기준이 될 수 있다.

본 연구에서는 콘크리트용 혼화제로 사용되는 플라이 애쉬의 품질평가 방안의 하나로 디지털 이미지 분석을 통하여 플라이 애쉬의 구형율을 정량적으로 측정하는 방법에 대해서 고찰하였다.

<Table 1> Chemical compositions of fly ashes (mass%)

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

2. 실험방법

2.1 실험재료

실험에 사용한 플라이 애쉬는 동일한 탄종, 동일한 화력발전소의 전기집진기에 부착된 호퍼로부터 채취한 것으로, 보일러의 발전부하 및 전기집진기의 호퍼 위치에 따른 총 6종의 역청탄회를 사용하였다. 실험에 사용한 플라이 애쉬의 화학적 조성과 물리적 성질을 <Table 1>과 <Table 2>에 나타냈다.

2.2 플라이 애쉬의 처리

플라이 애쉬의 입자형상을 이미지 분석하기 위하여 플라이 애쉬 분말을 다음과 같이 처리하였다. 플라이 애쉬 분말은 입자끼리 응집이 되어 있거나 응집하려는 경향이 있기 때문에 물리적인 응집상태를 깨트리기 위하여 ethyl alcohol을 용매로 사용하여 분산시켰다. 분산방법은 10ml 정도 비이커에 분말을 미량 넣고 5ml 정도의 ethyl alcohol을 넣은 다음, 10분간 초음파 처리하였다. 분산된 현탁액은 건조기를 사용하여 50°C로

2시간 건조하였다. 건조된 분말은 carbon tape에 붙여 부착시켜 주사전자현미경 (JEOL 5410, Japan)을 사용하여 관찰하였다.

2.3 이미지 분석 시스템

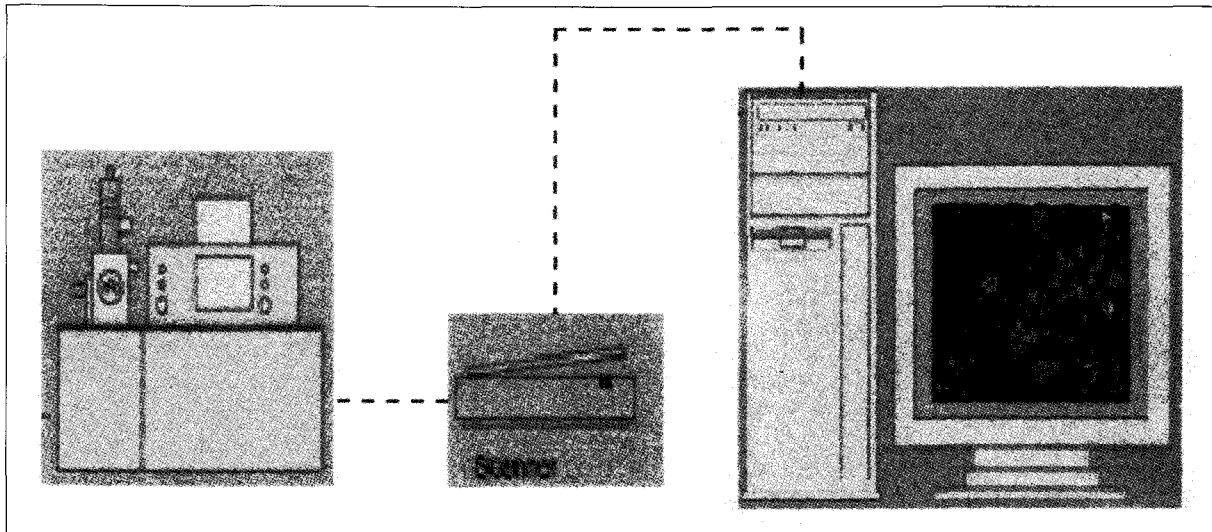
이미지 분석은 정확하고 타당한 결과를 얻기 위해서는 이미지와 관련된 모든 정보를 분석에 적합한 시스템으로 구성되어 있어야 한다. 본 실험에서 사용한 이미지 분석 시스템의 구성도를 <Fig. 1>에 나타냈다. 전자현미경에서 이미지 분석 시스템은 펜티엄 컴퓨터를 기반으로 윈도우 환경에서 운용되며, 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환해 주는 A/D Converter를 내장하고 있으며, 이미지 분석을 위한 소프트웨어가 세팅되어 있다. 주변기기는 전자현미경 이미지를 캡처할 수 있는 스캐너와 출력할 수 있는 프린터로 구성되어 있다.

이미지 분석은 ① 이미지 획득, ② 이미지 전처리, ③ 검출, ④ 이미지 후처리, ⑤ 측정, ⑥ 결과출력의 단계를 거쳐 이루어지며, 각각의 세부 항목을 아래에 설명하였다.

① 이미지 획득 (Image capture and aquisi-

<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 45μm sieve (%)	Glass (mass%)
A-1	1 st field	2.06	2,760	27.33	22.8	70.6
A-2	2 nd field	2.22	4,180	12.47	3.8	76.6
A-3	3 rd field	2.42	7,360	5.39	1.7	76.8
A'-1	1 st field	2.08	3,580	22.85	16.6	65.9
A'-2	2 nd field	2.23	4,980	11.00	6.32	68.7
A'-3	3 rd field	2.40	7,920	5.38	0.2	74.1



<Fig. 1> Setup of the image analysis system

tion) - 전자현미경 사진을 스캐너를 통하여 아날로그 영상으로 입력한 이미지를 A/D converter에 의해 디지털 형식으로 변환하여 픽셀들의 배열형태로 저장한다.

② 영상전처리(Grey image processing) - 획득한 이미지는 획득과정에서 발생한 노이즈나 분석에 필요하지 않는 부분까지도 포함되어 있기 때문에 곧바로 이미지 분석에 이용하기에는 어려운 점이 많다. 이와 같이 원 이미지의 노이즈를 없애고 이미지를 분석의 목적에 맞게 바꾸는 작업을 영상 전처리라고 한다.

본 연구에서 사용된 프로그램에서 사용되는 영상전처리 기법에는 Convolution, LUT(Look up Table transform), Morphological transform 등이 있는데, LUT 변환을 통해서 히스토그램을 균등화시킨다. 이 처리후의 이미지는 획득 과정에서 발생한 스캐너의 조명 불균일에 의해 회색값

분포가 고르지 못했던 이미지의 시각적인 대비가 좋아지게 된다. 이미지의 제거는 Convolution 커널(kernel)을 사용한다. 커널은 대개 한 변이 홀수로 이루어진 정사각형을 의미한다. 그 한가지 예로 가우시안 함수형태의 값을 가지고 있는 3×3 크기의 Convolution 커널을 <Fig. 2>에 나타낸 것이다.

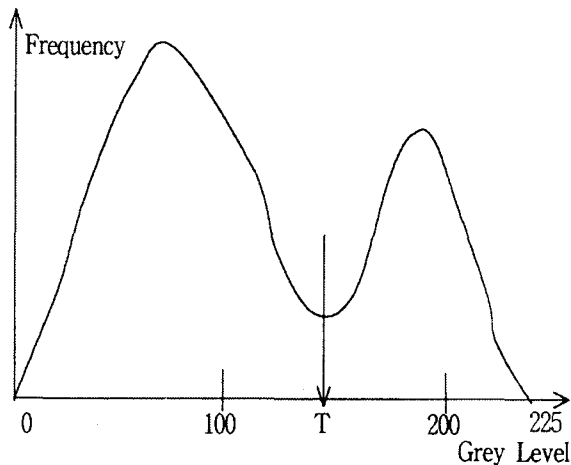
여기에 초기 객체 분류를 위해 물체의 내재된 구조를 명확히 하기 위해서 Morphology 변환을 하기도 한다. 이것은 물체의 외곽선을 물체의 가장 현저한 1-픽셀 두께의 외곽선이나 골격선을 간단하게 함으로써 최외각선의 한 픽셀을 빼던가 더하던가 하는 작업을 말한다.

Morphology 변환의 가장 보편적인 작업은 침식(erosion)과 팽창(dilation)이며, 침식연산은 배경에 대해 물체의 크기를 축소시키고 팽창연산은 침식연산의 반대로서 균일하게 물체의 크기를 확장시킨다. 이 두 연산의 적절한 조합에 의해 이미지의 노이즈와 측정에 오차를 일으킬 만한 Feature들을 제거시킨다.

③ 검출(Detection) - 이미지에서 측정의 대상이 되는 feature를 background로부터 분리하기 위해서 이진이미지로 변환하는 것을 말한다. 일반적으로 사용되는 이진화는 히스토그램을 이용한 임계값 처리(thresholding)에 의한 방법으로 <Fig. 3>에 나타내었다.

$$G = \begin{matrix} \begin{matrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

<Fig. 2> 3×3 Gaussian average kernel



$$f_i(i, j) = \begin{cases} 1 & f(i, j) \geq t \text{의 경우} \\ 0 & f(i, j) < t \text{의 경우} \end{cases}$$

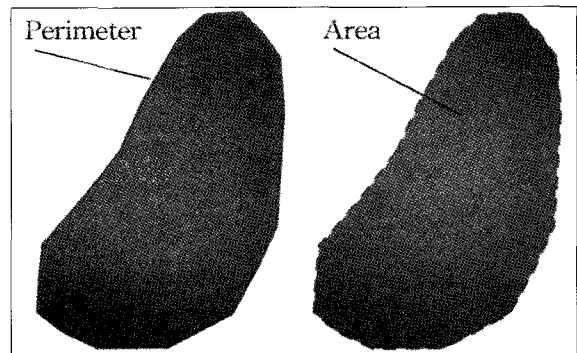
〈Fig. 3〉 The histogram of bimodal foam

여기서, t 는 임계값이며, 이진화 이미지 $f_i(i, j)$ 중에서 값 1의 부분은 대상물체를 표시하며, 값 0은 배경을 표시한다. Feature들이 임계값보다 큰 값들을 가지면 흰색의 명도값을 갖도록 설정하고, 그보다 작으면 검정색의 명도값을 갖도록 하여 background로부터 feature를 분리하는 것이다.

즉 〈Fig. 2〉의 두 개의 피크 중간의 가장 낮은 명도를 임계값으로 설정하게 되면 물체와 배경을 적당히 분리할 수 있다. 이미지의 회색 값들의 출현빈도인 히스토그램의 모양이 〈Fig. 2〉와 같이 bimodal이라면 임계값의 결정은 매우 쉬워지지만 그렇지 않은 경우가 대부분이므로 임계값의 결정이 쉽지 않다. 하지만 최근에 임계값의 결정을 쉽게 해주는 알고리즘은 많이 나와 있다.

④ 영상후처리-검출된 이미지를 대상으로 측정에 필요한 feature를 특징짓기 위해서 분할하였다. 분할은 이웃하는 feature들의 연결된 부분을 떼어내기 위해 segment 기능을 사용하고, 측정에 필요한 feature를 정의하기 위해 변 정의를 하여 측정프레임에 연결된 불완전한 feature들을 제외시킨다.

⑤ 측정(Measurements)-위와 같은 이미지 분석 과정에 의해 정의된 변량을 대상으로 feature들을 측정한다. 가장 일반적인 feature 측정 방법은 물체의 형상을 기술하는 것이며, 형상측



〈Fig. 4〉 General shape measures

정은 물리적 차원의 측정이며 이것은 feature의 외형을 특성화한다.¹¹⁾ 일반적으로 몇가지 가능한 형상 특징자들을 사용하여 이루어진다. 〈Fig. 4〉는 일반적인 형상 측정자를 보여준다.

여기서 perimeter는 feature의 외곽주변 각 화소들에 대한 화소간 거리의 합으로 투영 윤곽 둘레를 나타내며, Area는 물체 내부의 화소면적이다. 면적은 물체의 경계를 포함하는 내부 화소들의 총 개수로서 측정된다.

3.2 구형지수 측정

구형지수를 측정하기 위해서 이미지 획득은 전자현미경 사진을 스캐너(Scanjet 6200C, Hewlett-Packard Co.)의 노출조절 톨을 이용하여 feature와 background를 명암의 밝기를 조절하여 캡처하고 그것을 이미지 분석 시스템 LEICA Q Win(Leica imaging system Ltd.)의 A/D Converter에 의해 디지털화 하여 픽셀배열의 형태로 저장하였다.

획득된 이미지는 영상전처리의 LUT 변환으로 불균일한 명암분포를 조정하고, 획득시 발생된 노이즈는 Convolution의 가우시안 필터링을 통해 제거하였다.

그 다음 이진화 이미지로 만들기 위해 히스토그램을 이용하여 적당한 임계값을 설정하여 측정할 feature들을 Detection하였다.

검출된 객체들은 측정을 위해 영상후처리 작업을 하였다. 이를 통해 측정할 객체를 선택하고 특징을 추출하였다. 이와 같은 과정에 의해 정의된 변량을 대상으로 구형지수(circularity)를 다음 식 (1)에 의해 측정하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{Circularity} &= \frac{\text{입자의 투영면적에 해당하는 원의 길이}}{\text{입자의 투영면적}} \\
 &= \frac{4 \times \pi \times \text{Area} \times 1.064}{\text{Perimeter}^2} \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서 perimeter는 입자의 투영윤곽 둘레이며, 1.064는 perimeter 조정계수이다. 이 수치는 이미지의 이진화에 따른 모서리의 영향을 줄이기 위한 계수이다.

3.3 겉보기 점도측정

보통 포틀랜드 시멘트에 대해서 플라이 애쉬의 혼합율을 체적비로 20% 혼합하고 폴리카르보나제 고성능 AE 감수제를 분체 중량의 2.0% 가한후 0.92의 물/분체 체적비로 3분간 혼합하여 시료로 하였다. 이 페이스트를 응력제어형 회전 2중 원통점도계를 이용하여 20℃에서 전단응력 0Pa로부터 200Pa 사이를 상승 및 하강시켜 200Pa에서의 겉보기 점도를 평가하였다.

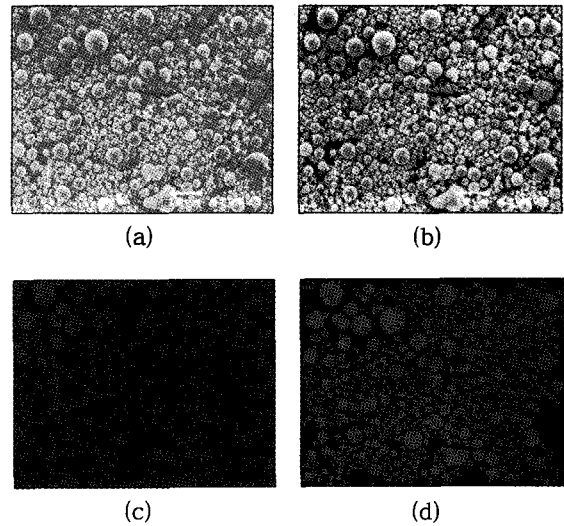
4. 결과 및 고찰

4.1 이미지 분석결과

혼화재로서의 플라이 애쉬는 시멘트 사용량의 절감, 폐자원 재활용으로 인한 자원의 절약, 그리고 폐기처리 비용의 감소 등의 경제적인 측면에서 기여도가 높은 재료이다. 그러나 플라이 애쉬는 콘크리트의 제성질을 개선하기 위한 재료로서의 효용성에 보다 큰 가치가 있다고 볼 수 있다. 즉 플라이 애쉬의 입자의 형상, 분말도, 입경분포 및 비중은 굳지 않은 콘크리트의 물성에 영향을 준다. 그래서 본 연구에서 콘크리트의 성질에 영향을 미치는 플라이 애쉬의 입자의 형상을 이미지 분석에 의해 측정하여 정량적인 결과를 얻어냈다. 플라이 애쉬의 입자형상을 측정하기 위해 이미지 분석을 적용한 결과를 <Fig. 5>에 나타내었다.

플라이 애쉬를 일반적으로 전자현미경으로 측정하여 보면 입자들이 엉겨붙어 있거나 이형의 각진 입자들이 혼재되어 있어서 각각의 입자에 대한 측정은 불가능하다.

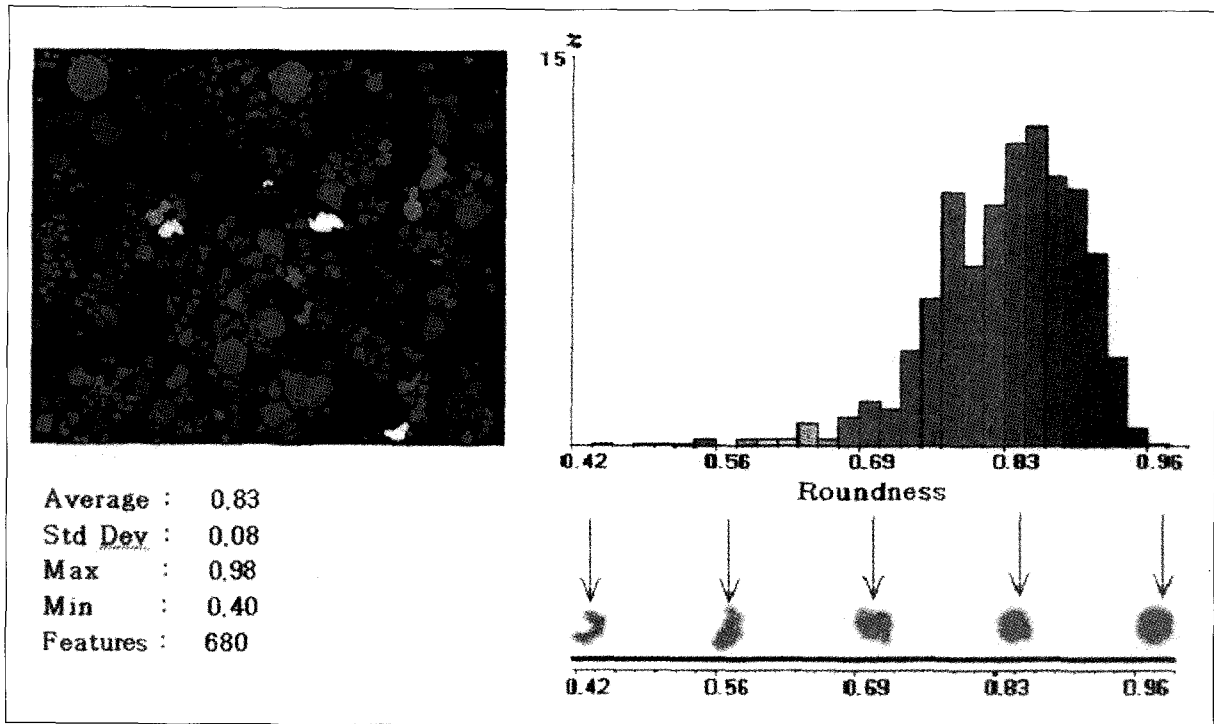
따라서 본 연구에서는 플라이 애쉬의 분말을



<Fig. 5> Image analysis procedure : (a) original image, (b) Image aquisition and grey image processing, (c) Detection the component to measure, (d) Binary image processing

에틸 알콜을 분산매로 하여 초음파 처리하여 분산시켜 주사전자현미경 측정을 한 결과 (a)에서 보듯이 입자들이 분산되어 있음을 볼 수 있다. 하지만 배경과의 입자의 색상이 비슷하여 경계의 구분이 뚜렷하지 않아서 측정을 하기에는 어려웠다. 그래서 이미지를 캡처할 때 스캐너의 밝기명암을 조절하여 얻은 이미지를 영상전처리하여 이미지내의 밝은 부분을 강조시킨 결과 (b)의 플라이 애쉬의 입자는 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 임계값은 히스토그램 슬라이딩으로 알맞은 임계값을 선택하여 detection 한 결과 (c) 이미지내의 배경을 제외한 모든 입자를 인식할 수 있었다. 하지만 이미지 프레임에 걸리는 입자들은 완전치 않은 입자이기 때문에 egde 검출을 통해 프레임에 걸리는 모든 입자들은 제외시켜서 측정에 필요한 특징만을 추출하였다(d).

이상과 같이 이미지 분석과정에 의해 정의된 입자들을 대상으로 구형지수를 측정한 결과를 <Fig. 6>에 나타내었다.



〈Fig. 6〉 Feature histogram of roundness

구형지수란 feature가 얼마나 구형에 가까운가를 표현하는 유도변량으로 입자의 투영면적에 해당하는 원의 길이를 입자의 투영 윤곽둘레를 원으로 환산한 면적을 나눈 값으로 완전한 구형일 경우에 구형지수는 1의 값을 갖고, 구형의 모양에서 멀어질수록 작은 값을 갖는다.

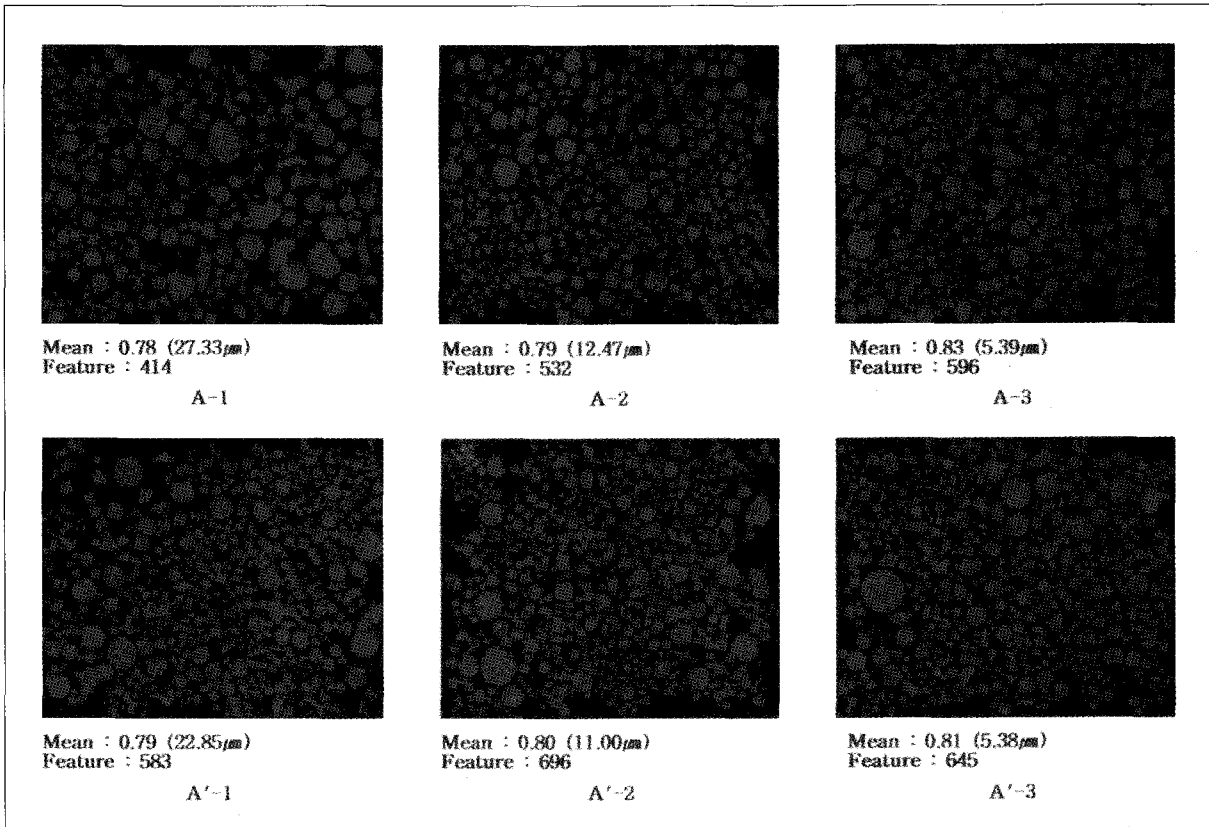
예비실험을 위해 측정한 시료는 석탄화력발전소의 전기집진 장치의 마지막 호퍼에서 채취한 것으로, 평균입경이 $5.39\mu\text{m}$ 로 매우 작은 입자들로 구성되어 있고, 미연탄소량도 0.3%로 매우 낮은 값을 갖는 것으로, 구형지수의 값은 0.40부터 0.98까지이지만 평균 0.83으로 구형에 가까운 입자들이 많음을 알 수 있다. 또한 빈도분포 그래프를 보면, 구형에 가까운 쪽으로 비대칭 분포를 보이고, 색상을 통해서 간접적으로 측정 이미지와 비교해서 구형에 가까운 입자들을 육안으로 식별할 수 있었다.

하지만 같은 종의 플라이 애쉬라고 하더라도 기하학적 변량의 측정치는 해상도에 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 된다고 생각한다.

〈Fig. 7〉은 위와 같은 방법으로 플라이 애쉬 6종을 이미지 분석한 결과를 보여준다. 보일러의 연소조건에 따라 A와 A'로 분류하고 다시 전기집진기의 호퍼 위치에 따라 3가지 종류로 분류하여 측정하였다. 그림에서 괄호안의 값은 각각의 평균입경을 나타내며, 측정결과 보일러의 부하에 관계없이 동일한 위치에서 채취한 플라이 애쉬의 구형지수는 유사한 값을 가지고 있고, 제1집진단에서 제3집진단으로 갈수록 증가하였다.

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 CO_2 , H_2O 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. 따라서 미세한 입자로 구성된 제3단의 플라이 애쉬가 유리질의 양이 많다.



<Fig.7> Image analysis result of fly ashes

플라이 애쉬 중의 원래 석탄에 함유된 α-quartz가 연소에 의해 점토 중의 Al₂O₃ 성분과 반응하여 mullite를 형성하고 잔량이 회분에 존재하는 것으로, 연소과정에서 열이력 등을 받아 표면이 연마된 각진 형태를 갖는다. 이것은 구형입자에 비해 입자크기가 크다. 따라서 α-quartz의 양이 많은 큰 입자로 구성된 제1집진단보다는 유리질의 양이 많은 미세한 입자로 구성된 제3집진단에서의 구형지수가 커진다고 생각된다.

이상과 같은 결과로 볼 때 플라이 애쉬의 평균입경과 구형지수의 값은 서로 상관관계가 있는 것으로 생각된다. 또한 평균입경은 콘크리트의 분말도 평가항목인 45μm 체잔분이 적을수록, 블레인 비표면적 값이 증가할수록 작아지는 경향을 통해 분말도와 구형지수와의 관계를 예상할 수 있었다.

분말도는 일반적으로 포졸란 활성도와 콘크리트의 워커빌리티(Workability)에 영향을 미치고, 비표면적의 값이 크거나 45μm 체잔분이 적을수

록 높아지며, 분말도가 높을수록 평균입경이 작아지므로 콘크리트의 수밀성이 좋아지고 워커빌리티가 향상된다. 그러므로 평균입경이 작아질수록 구형지수의 값은 증가하므로 구형지수가 높은 플라이 애쉬가 콘크리트의 수밀성과 워커빌리티에 좋은 영향을 주리라고 예상할 수 있다.

즉 콘크리트에 플라이 애쉬를 혼화제로 첨가하면 워커빌리티가 좋아지고 유동성이 좋아진다는 것은 플라이 애쉬의 입자가 구형으로 입자 상호간의 영킴을 방지하며 유동성을 증대하고, 유동시 블베어링 작용에 의한 마찰이 적게 되어 유동성이 향상된다고 본다.

5. 결 론

전기집진기에서 단별 채취한 플라이 애쉬를 디지털 이미지 분석을 이용하여 입자의 형상을 측정 한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 플라이 애쉬의 입자의 형상을 이미지 분석에

- 의해 측정하여 정량적인 결과를 얻어냈다.
2. 석탄의 종류와 보일러의 부하에 관계없이 동일한 위치에서 채취한 플라이 애쉬의 구형율은 유사한 값을 가지고 있고, 제1집진단에서 제3 집진단으로 갈수록 증가하였다.
 3. 이미지 분석에 의한 구형지수 측정을 콘크리트 용 혼화제로 사용되는 플라이 애쉬의 품질평가 기술의 하나의 지표로 생각된다.

〈REFERENCES〉

1. K. Y. Kang, J. G. Roemer, D. Ghosh, "Microstructural characterization of cemented carbide samples by image analysis techniques", Powder Technology 108, pp. 130~136 (2000).
2. C. F. Mora, A. K. H. Kwan, H. C. Chan, "Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing", Cement Concrete Research 28, pp. 921~932 (1998).
3. A. K. H. Kwan, C. F. Mora, H. C. Chan, "Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing", Cement Concrete Research 29, pp. 1403~1410 (1999).
4. C. F. Mora, A. K. H. Kwan, "Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing", Cement Concrete Research 30, pp. 351~358 (2000).
5. C. H. Kim, T. J. Kang, "A study on the automatic recognition of weave pattern by digital image analysis", Journal of the Korean Fiber Society Vol. 33, No. 7, 1996.
6. Anna-Lena Persson, "Image analysis of shape and size of fine aggregates", Engineering Geology 50, pp. 177~186 (1988).
7. F. Podczec, S. R. Rahman, J. M. Newton, "Evaluation of a standardised procedure to assess the shape of pellets using analysis", International Journal of Pharmaceutics 192, pp. 123~138 (1999).
8. Joame M. R. Fernlund, "The effect of particle form on sieve analysis : a test by image analysis", Engineering Geology 50, pp. 111~124 (1998).
9. Ray E. Ferrell, JR. and Allison W. Drew, "Quantification of fly ash in concrete by image analysis techniques : a preliminary investigation", Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 136, pp. 99~106 (1989).
10. 천인국, 윤영택, "영상처리 기초편", 기한재, pp. 11~294 (1990).
11. Gregory A. Baxes, "Digital image processing : principles and application", 권준식 외 8인 공역, 에드텍, pp. 3~436 (2000).
12. 한국콘크리트학회 저, "콘크리트 혼화재료", 지우당, pp. 186~216 (1997).
13. R. T. Hemming. Speciation in Size and Density Fractionated Fly Ash, Materials Reserch Society Symposium Proceedings, Vol. 85, pp. 81~98 (1996).
14. D. Kuni and O. Levenspi. Fludization Engineering, Butterworth Heineman Series in Chemical Engineering, Academic press, p. 6 (1944).
15. R. T. Hemming E. Berry. On the Glass in Coal Ashes-Recent Advances, Materials Reserch Society Symposium Proceedings, Vol. 113, pp. 3~38 (1998).
16. 오성원, 석탄회 처리 현황과 대책, 석탄회 활용 국제 워크숍, 한국전력공사, pp. 1~16 (1996).
17. 한국전력공사, 석탄회-이용가치와 재활용 기술, pp. 31~81 (1994).