

## Flyash에 의한 STS304 재료의 내침식성 평가

박해웅\*, 이의열\*\*

\* 한국기술교육대학교 신소재공학과, \*\* 안동대학교 신소재공학부

## Evaluation on erosion resistance of STS304 by flyash

H. W. Park, E. Y. Lee

Korea University of Technology and Education Materials Engineering department  
Andong National University of Matallurgical Engineering

### Abstract

Erosion due to abrasive particles contained in gas streams from boilers has been emerged as a significant problem in the coal fired power plants. Particle erosion accounted for approximately 50% of boiler failures and especially flyash erosion was responsible for 20~30% of emergency boiler shut-downs. Particularly, because of the high ash loading and high velocity, most erosion occurs in the boiler tubes and economiser tube bank where the direction of the gas stream changes to 180°. In this study, a high temperature particle erosion tester was used to evaluate erosion rate in a simulated environment. The erosion parameters such as erosion temperature, particle impact angle, particle velocity and various particle size were changed. Flyash is the combustion product of the pulverized coal, where size is ranging from 1 to 200 $\mu$ m. Flyash composed of mainly SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> has dense spherical particles and irregular particles containing numerous pores and cavities. From the erosion tests at various conditions, the maximum erosion was experienced at impact angles of 30° to 60°. In addition, erosion rate increased in proportional to velocity and temperature. And from the observation of the eroded surfaces, it was also concluded that 304 stainless steel was mainly eroded by extrusion-forging at high impact angle (90°) and by microcutting mechanism at low impact angles (30° and 45°).

### 1. 서 론

발전용 보일러 튜브는 전체 손상의 약 20~30%가 flyash에 의한 침식으로 인하여 발생하며, 특히 보일러 shutdown의 약 50%가 입자침식에 기인한다. 특히 가스흐름이 180°로 바뀌는 보일러 top 부분과 economizer tubebanks에서는 높은 ash load-

ing과 속도로 인하여 침식이 심각한 실정이다. 이러한 flyash에 의한 보일러 튜브의 입자침식으로 인한 전력손실량은 전체 발전용량의 약 2% 정도로 알려져 있으며, 이로 인해 막대한 경제적 손실이 야기되고 있다.<sup>1)</sup>

입자침식은 입자의 크기 및 형상, 입자의 충돌각도 및 속도, 소재의 경도 및 형상 그리고 주변온도

등에 영향을 받는다.<sup>2)</sup> 또한 입자침식기구는 소재의 ductility에 따라 아주 다르게 나타난다.<sup>3)</sup> 보일러 튜브의 입자침식은 앞서 서술한 바와 같이 다양하고 불규칙적으로 일어날 수 있기 때문에 돌발적인 보일러 shutdown을 초래할 수 있다. 그래서 보일러 튜브의 입자침식율을 실험적으로 측정하여 수명을 예측하는 것이 장치의 효율적인 유지 및 관리를 위하여 중요하다. 또한 실험적 침식 자료는 보일러 튜브의 침식감소를 위한 설계 개선 및 대체소재 개발을 위하여 필수적으로 요구되고 있다. 그러나 현재까지는 국내에서 입자침식시험이 거의 수행되지 못하고 있는 실정이며, 미국 등 선진국에서는 자체적인 실험을 통하여 침식상수 등의 자료를 확보하여, 보일러 튜브의 침식수명을 예측할 수 있는 computer modeling이 개발되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 보일러 튜브의 실제 침식환경과 거의 유사한 조건에서 입자침식시험을 수행하고 또한 주사전자현미경으로 침식면을 관찰하여 보일러 튜브의 입자침식기구를 조사하였다. 특히 침식율에 대한 입자속도, 충돌각도, 온도, 입자크기 및 입자농도 등의 영향을 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 입자침식시험 장치

화력발전소의 보일러 튜브의 경우, 최고 300°C 정도의 고온에서 최대 40m/s의 속도를 갖는 1-200 $\mu$ m 크기의 flyash 입자들에 의하여 침식되고 있다. 이러한 사용환경 분위기를 제공할 수 있도록 본 실험에서는 Fig. 1에서 보는바와 같이 air stream type (노즐형) 입자침식장치를 제작, 사용하였다. 주요 구성은 공기압축 및 저장장치, 압축공기 가열장치, 입자주입장치, 입자가속장치, 시편 stage, 집진장치, 연료공급장치, control unit, 그리고 냉각장치 등으로 구성되었다.

### 2.2 Flyash의 특성분석

입자침식시험 조건을 결정하기 위하여 flyash의 화학적 성분, 형상 및 입도 등을 XRD, SEM(with EDS and WDS), 입도분석장치 등으로 입자의 성분, 형상 그리고 입도 등을 분석하였다. Flyash의 분석 결과를 바탕으로 입자충돌각도, 침식온도 및 입자속도에 따른 침식율의 영향을 평가하였다.

### 2.3 침식율 평가

본 연구에 사용된 소재는 보일러 튜브와 유사한 조성을 갖는 STS304를 사용하였다. 시편은 16mm  $\times$  18mm 크기의 dove-tail 모양으로 제작되었으며, Vickers 미소경도기에 의한 시편의 경도값은 230HV정도였다. 시편의 표면 거칠기가 침식율에 미치는 영향을 제거하기 위하여, 입자침식시험을 하기 전에 고운 연마지를 사용하여 grinding하고 어닐링을 수행했다. 어닐링 후에는 표면에 생긴 산화물 등을 제거하기 위해 1 $\mu$ m의 diamond paste로 사용하여 미세연마를 하였다. 침식시험 전 시편의 최초무게를 측정 후, 입자침식시험 과정에서 일정한 주기로 시험장치에서 꺼내어 알코올 및 아세톤으로 세척 후 시편의 무게를 측정하여 침식으로 인한 무게 감소량을 계산하였다. 침식율은 시편에 충돌한 입자의 무게에 대한 침식된 소재의 무게 (혹은 두께) 비로 규정한다.<sup>4,5)</sup> 즉,

$$\text{침식율} = \frac{\text{시편의 무게 (혹은 두께) 손실량}}{\text{충돌 입자의 무게}}$$

여기서 충돌입자의 무게는 입자충돌각도 및 시편의 단면적에 따라 달라질 것이며 다음의 식으로부터 계산된다.

$$W_i = W_t \times a \sin \alpha / A$$

여기서  $W_i$ 는 충돌입자의 무게,  $W_t$ 는 가속관에 주입된 입자의 총 무게,  $a$ 는 시편 단면적,  $A$ 는 가속관 단면적 그리고  $\alpha$ 는 입자충돌각도를 나타낸다. 침식 두께는 침식으로 인한 무게 손실량으로부터 계산된다.

입자침식율에 영향을 주는 주요한 상수는 입자속도, 입자충돌각도, 침식온도, 입자 크기 및 형상, 그리고 입자농도 등이며, 본 연구에서는 실제 보일러 튜브가 침식되는 조건에서 STS304에 대하여 침식율을 비교·측정하였다. 상세한 침식조건은 Table 1과 같다. 가속관에 주입되는 입자주입속도 (feeding rate)는 10g/min이며, 이때의 가속관내에서 유체에 대한 flyash의 부피비는  $1.4 \times 10^{-6}$ 이다. 일정한 침식조건에서 침식율을 측정하기 위하여, 1개 시편당 SiO<sub>2</sub>는 총 400g의 입자가, flyash는 총 500g의 입자가 가속관에 일정한 속도로 주입되었으며 매 100g마다 시편의 침식 손실량이 0.1mg 단위로 측정되었다.

Table 1. Various conditions for particle erosion tests

침식상수	조건	
입자충돌각도	30°, 45°, 60°, 90°	
침식온도	20°C, 300°C	
입자속도	40m/s, 70m/s	
입자크기	SiO <sub>2</sub>	50 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 200 $\mu$ m
	flyash	50 $\mu$ m이하, 50-100 $\mu$ m, 100-200 $\mu$ m

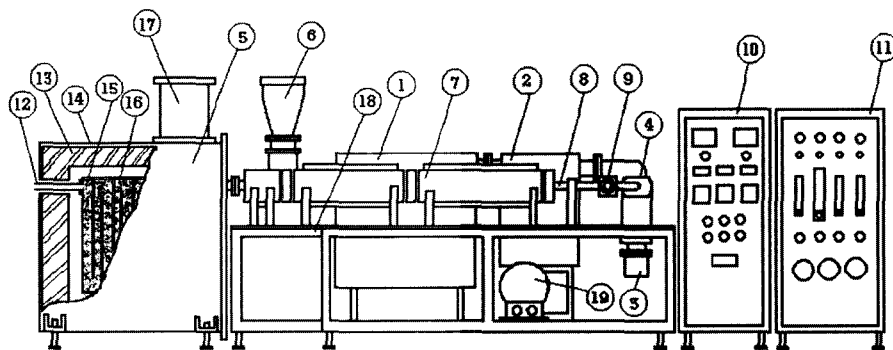
또한 입자침식시험 후에는 시편을 알콜 및 아세톤으로 초음파 세척하여, SEM (with EDS & WDS)를 이용하여 침식면을 관찰하였으며, 다양한 침식조건에서 나타난 침식면 관찰을 통하여 침식기구를 비교·분석하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 Flyash의 특성분석

발전소에서 사용되고 있는 flyash는 XRD, SEM (with EDS and WDS), 입도분석장치 등을 사용하여 화학적 성분, 형상 및 입도 등을 분석하였다. 또한 flyash의 분석결과를 바탕으로 입자충돌각도, 침식온도 및 입자속도에 따른 침식율의 영향을 평가하였다. Flyash의 입도는 대부분이 1-200 $\mu$ m (94%) 사이에 있었고, 평균입도는 32.7 $\mu$ m로 측정되었다. 침식에 영향을 미치는 10-150 $\mu$ m 범위에 분포하는 입자는 약 77%정도이며, 150 $\mu$ m이상은 3%정도로 측정되었다.

Fig. 2에서 보는바와 같이 flyash는 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 미연분(주로 C)으로 구성되어 있으며, 주



1	DUST COLLECTOR	6	POWDER FEEDER	11	AIR CONTROL BOX	16	ALUMINA BALL
2	AIR COOLER	7	TUNNEL HEATER	12	AIR INNET	17	GAS OUTLET
3	CYCLONE	8	ACCELERATION TUNNEL	13	INSULATOR	18	FRAME
4	EXPANSION JOINT	9	SPECIMEN HOLDER	14	FRAME	19	AIR BLOWER
5	AIR HEATOR	10	ELECTRIC CONTROL BOX	15	AIR HEATING CHAMBER		

Fig. 1. A side view of the particle erosion tester

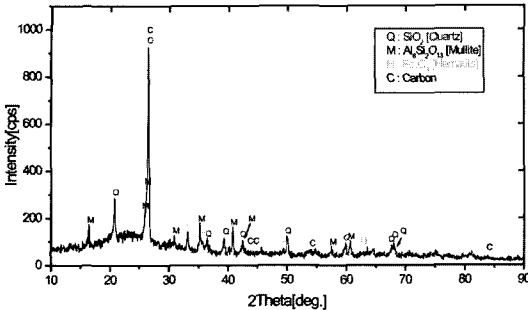
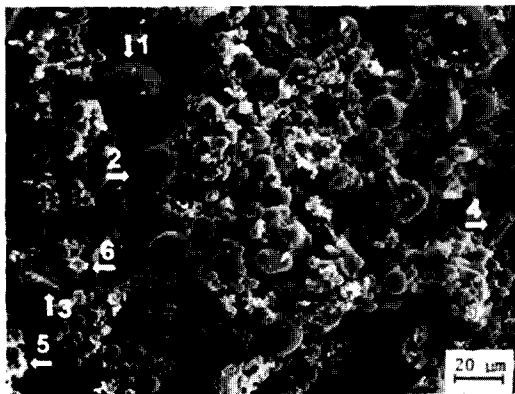
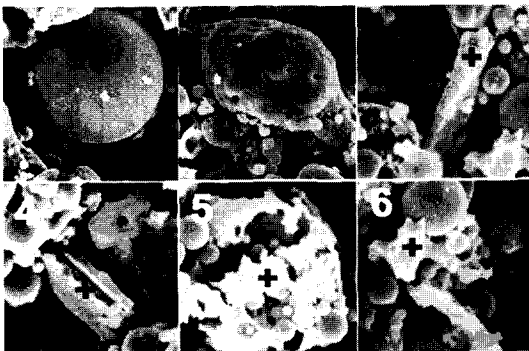


Fig. 2. Diffraction pattern of flyash

된 구성물질은 SiO<sub>2</sub>였다. Fig. 3(a)는 flyash 입자들의 전형적인 구조를 나타내고 있으며, (b)에서는 다양한 크기와 형상의 입자들에 대한 미세조직 사진을 보여주고 있다. 구형의 형상을 하고 있는 1번과 불



(a)



(b)

Fig. 3. SEM micrographs showing the various particle shape of the flyash :  
(a) BEI, (b) detail view

규칙적이고 표면에 기공을 포함하고 있는 형태를 하고있는 2번과 같은 입자들이 가장 흔하게 발견되었다. 이들 입자는 대부분 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 구성되어있다. 불규칙적이며 기공을 포함한 입자는 구형입자보다 Si의 함량이 높은 반면, Fe의 함량은 구형의 형상을 한 입자들에서 상대적으로 높게 나타났다. 그리고 불규칙적이며 기공을 포함하고 있는 2번과 유사한 형태인 3번과 같은 입자에서 Si함량이 가장 높게 나타났다. 반면에 4~6 번과 같은 형태의 입자들은 상대적으로 잘 관찰되지 않았다.

3.1 입자침식손상 평가

시험에 사용된 입자는 flyash의 성분중 50~60%를 차지하고 있는 SiO<sub>2</sub> 입자와 발전소에서 수거한 flyash 입자를 사용하여 입자충돌각도, 침식온도, 입자속도 및 입자크기 변화에 따른 입자침식율을 비교·분석하였다.

3.1.1 입자충돌각도의 영향

입자충돌각도가 입자침식에 미치는 영향을 평가하기 위하여 STS304 시편에 대하여 입자충돌각도를 30°, 45°, 60° 및 90°로 변화하면서 침식손실량을 측정하였다. 침식에 사용된 입자는 50μm SiO<sub>2</sub>와 flyash이며, 침식온도는 20℃와 300℃였다.

Fig. 4는 20℃와 300℃에서 입자충돌각도에 따른 침식율을 나타내고 있다. Fig. 4(a)와 (b)에서 보는 바와 같이, SiO<sub>2</sub> 입자 침식의 경우에는 20℃와 300℃에서 모두 각도가 낮을수록 침식율이 증가하였으며 특히 300℃에서 이러한 현상이 더욱 뚜렷하였다. Flyash 입자침식의 경우에는 [Fig. 4(c), (d)], 20℃에서는 SiO<sub>2</sub> 입자침식의 경우와 같이 입자충돌각도가 낮은 30°, 45° 및 60°에서의 침식율이 90°의 경우보다 높게 나타났다. 그러나 전체적인 침식률은 모든 각도에 걸쳐 SiO<sub>2</sub>의 경우보다 낮게 나타났다. 이는 SiO<sub>2</sub>에 비해 flyash의 경도가 현격히 낮고 또한 침식을 상대적으로 적게 야기하는 구형의 입자들이 많이 포함하고 있기 때문이다. Fig. 4(d)에서 보는

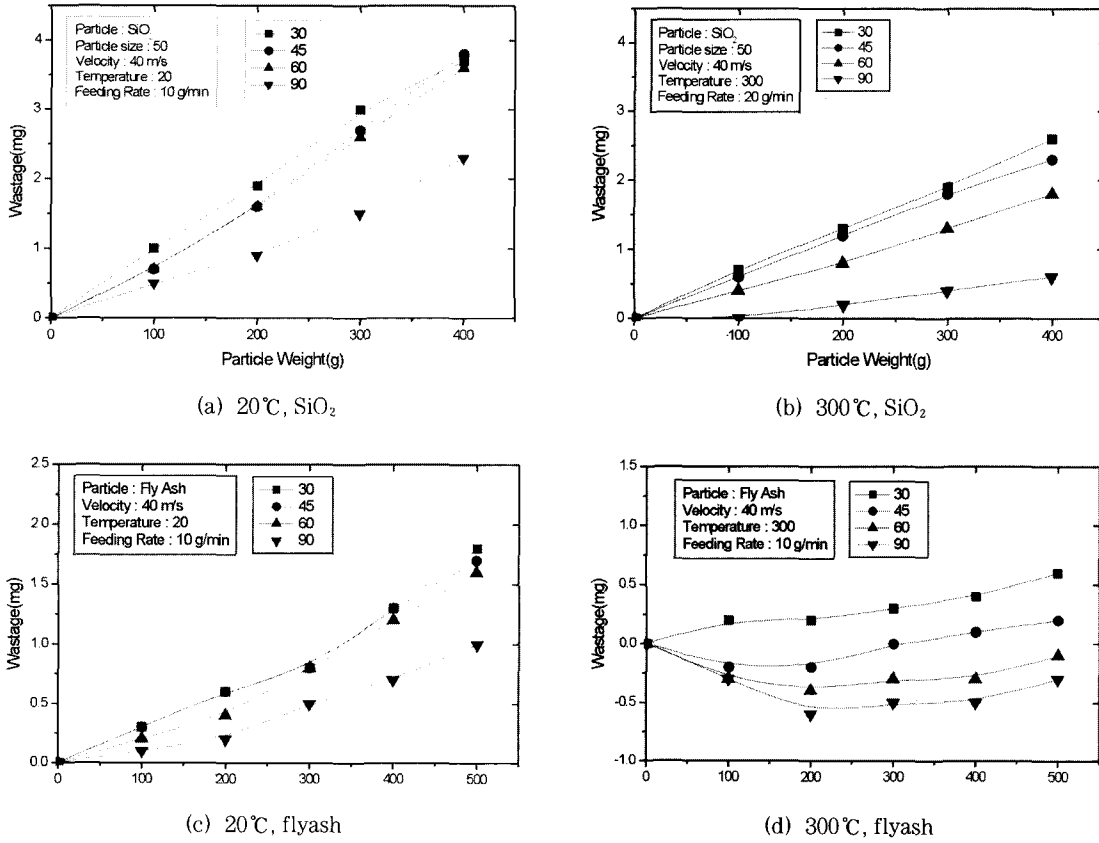


Fig. 4. Erosion rate with various impact angles at different temperatures

바와 같이 300°C에서의 flyash 침식의 경우에는 입자들의 '박힘현상'으로 시편의 무게가 오히려 증가하는 것으로 나타나 실제적인 입자침식율 측정이 불가능하였다. 특히 입자충돌각도가 증가할수록 입자 박힘현상이 심한 것으로 나타났다.

Fig. 5는 상온에서 SiO<sub>2</sub> 입자의 충돌각도 변화(0~90°)에 따른 침식율을 나타내고 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 충돌각도 30°까지는 각도가 증가할수록 침식율이 증가하나, 그 이상의 충돌각도에서는 침식율이 점점 감소하였다. 또한 입자충돌각도 30~45°에서 침식율이 최대값을 나타내었다. 이 결과는 실제 발전소 보일러관에서 침식이 가장 많이 일어나는 각도와 일치한다. 또한 재료가 연성이므로 90°에서는 입자 충돌에너지가 표면의 물질을 제거

하는데 사용하는 것 보다 표면을 변형시키는데 더 많이 소비되어 침식율이 30°에 비해 작았다. 이와

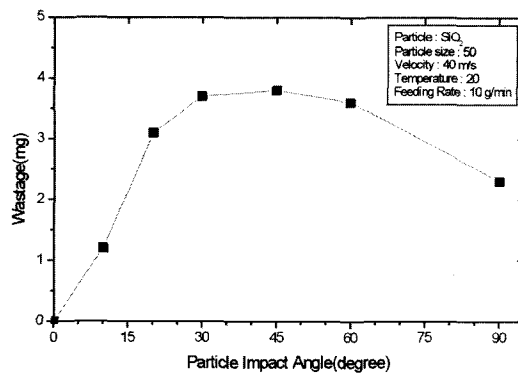


Fig. 5. Erosion rate changes with various impact angles

같은 결과는 연성재료의 입자침식에서 일반적으로 나타나는 결과와 잘 일치하고 있다.<sup>6,7)</sup>

3.1.2 침식온도의 영향

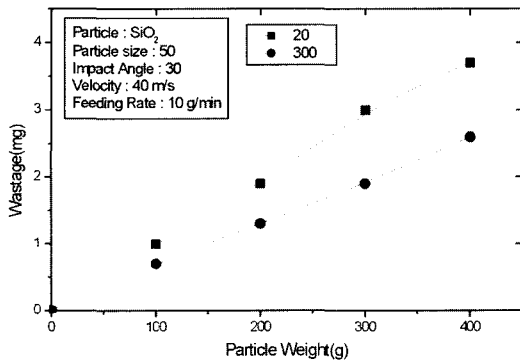
침식온도변화에 따른 침식율 평가를 위해 상온과 300°C 온도에서 SiO<sub>2</sub> 및 flyash 입자를 사용하여 침식시험을 하였다. 이 때 침식각도는 30°와 90°였으며 입자속도는 40 m/sec로 유지하였다.

Fig. 6의 (a)와 (b)는 상온 및 300°C의 온도에서 SiO<sub>2</sub>의 입자충돌각도가 각각 30°와 90°일때의 침식율 변화를 나타내고 있다. 두 각도 모두에서 침식온도가 높을수록 침식율이 감소하였다. Fig. 6(c)에서 보는바와 같이 flyash 입자가 30°에서 충돌하는 경우에도 300°C에서의 침식율이 상온에서의 침식율

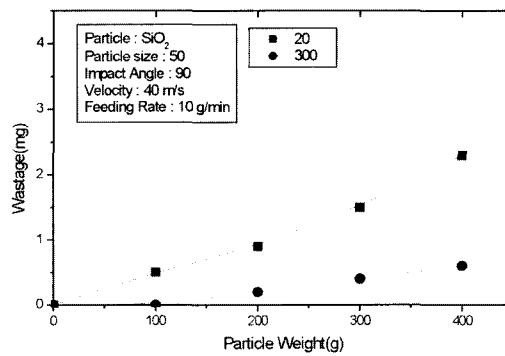
보다 감소하였다. 이러한 현상은 연성재료에서 온도가 증가할수록 소재의 연성 및 탄성이 증가하고 취성이 감소하여, 높은 온도에서는 입자에 의한 충돌 에너지의 상당부분이 시편의 탄성에너지 또는 변형 에너지로 전환되고, 이에 따라 침식율이 감소하기 때문이다.<sup>7,8)</sup> 그러나 flyash 입자가 90°에서 충돌하는 경우에는 입자박힘 현상이 심하여 시편의 무게가 증가하므로 실제 침식율 측정이 불가능하였다.

3.1.3 입자속도의 영향

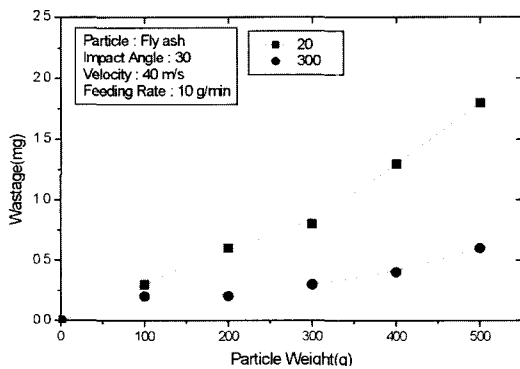
입자속도가 침식율에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 시편을 침식온도 300°C, 입자충돌각도 30°, 90°의 조건에서 입자속도를 40m/s와 70m/s로 변화시키며, 시편의 침식율을 각각 측정하였다.



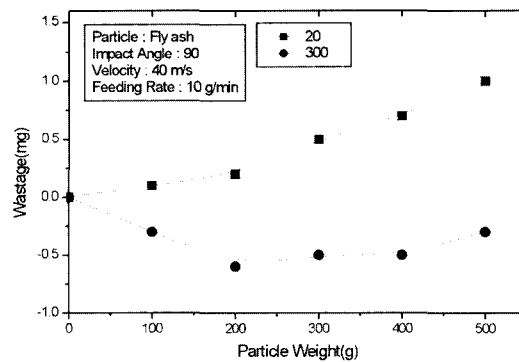
(a) impact angle 30° (SiO<sub>2</sub>)



(b) impact angle 90° (SiO<sub>2</sub>)



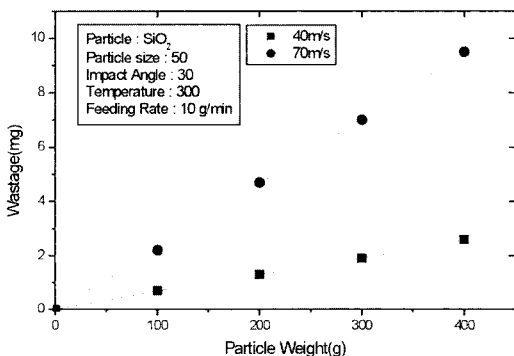
(c) impact angle 30° (flyash)



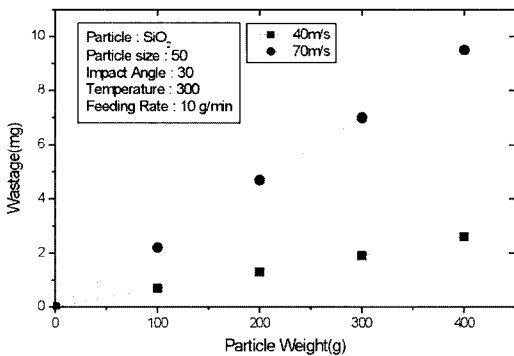
(d) impact angle 90° (flyash)

Fig. 6. Erosion rate changes with temperatures at different impact angles.

Fig. 7의 (a)와 (b)는 입자충돌각도 30°와 90°에서 SiO<sub>2</sub> 입자의 입자속도 변화에 따른 시편의 침식율을 각각 나타내었다. 입자충돌각도 30°와 90° 각각에서 입자속도가 증가함에 따라서 침식율이 증가하였다. 입자속도의 증가는 입자충돌에너지를 증가시키고, 결과적으로 침식율을 거의 직선적으로 증가시킨다.<sup>7)</sup> Flyash 입자의 경우에는 30°의 입자충돌각도에서는 입자속도가 증가함에 따라서 침식율이 증가하였으나, 90°의 경우에는 심한 입자박힘 현상으로 침식율의 측정이 불가능하였다.



(a) impact angle 30°



(b) impact angle 90°

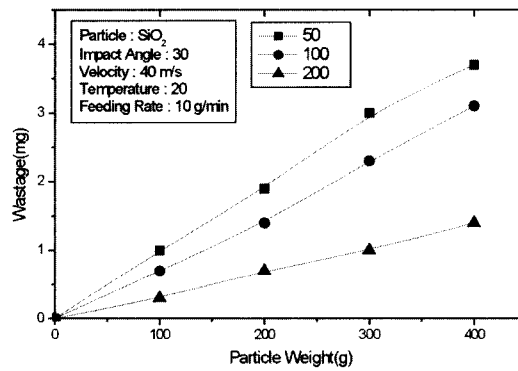
Fig. 7. Erosion rate changes with impact velocities at different impact angles

3.1.4 입자크기의 영향

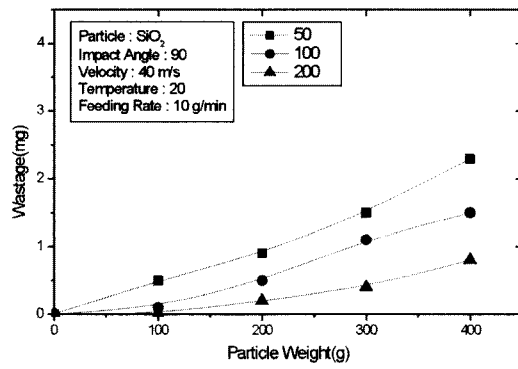
입자크기가 침식율에 미치는 영향을 측정하기 위하여, 크기가 50 $\mu$ m, 100 $\mu$ m 그리고 200 $\mu$ m이고 모양이 구형에 가까운 SiO<sub>2</sub> 입자를 사용하였다. 침식은 상

온에서 입자충돌각도 30°와 90°에서 행하였다.

Fig. 8은 입자크기 변화에 따른 침식율을 비교한 것이다. 입자충돌각도 30°와 90°에서 입자의 크기가 감소함에 따라 침식율은 증가하였다. 이러한 실험결과는 입자크기가 작을수록 시편의 단위면적당 충돌입자의 수가 증가하게 되어 침식을 야기하는 충돌에너지를 높이기 때문일 것이다. 그러나 입자크기가 10 $\mu$ m 이하정도의 입계치가 되는 경우에는 침식에 거의 영향을 주지 않는다.



(a) impact angle 30°



(b) impact angle 90°

Fig. 8. Erosion rate changes with various particle sizes at different impact angles

3. 2 침식표면 관찰 및 분석

침식시험에 사용된 STS304소재에 대한 침식면은 주사전자현미경 (SEM) 을 사용하여 소재의 침식면을 관찰하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 시편의 표

면 거칠기가 침식율에 미치는 영향을 제거하기 위하여 침식시험 전에 시료의 표면을 미세 연마처리하고 어닐링을 수행하였다. 또한 어닐링 후 표면에 생긴 산화물 등을 제거하기 위하여 diamond paste를 이용하여 미세연마를 하였다.

Fig. 9는 침식시험 전 시편으로서 표면이 평평하고 매우 매끄러운 상태를 보여주고 있다. Fig. 10은 침식온도 20°C, 입자속도 40 m/s 조건에서 SiO<sub>2</sub> 입자가 30°와 90°의 각도로 충돌하여 침식된 표면을 보여주고 있다. Fig. 11은 입자온도가 300°C, 입자속도가 70 m/s로 증가된 상태에서 입자충돌각도 30° 및 90°에서의 침식 표면을 나타내고 있다. Fig. 10과 Fig. 11에서 보는 바와 같이 상온에서 침식된 표면은 300°C에서 침식된 표면보다 상당히 거칠며 날카롭게 나타났다. 또한 침식속도가 증가함에 따라 표면에 생기는 crater의 크기도 증가하였다. 또한 Fig. 10과 Fig. 11에서 30°와 같이 낮은 입자충돌각도에서는 재료의 표면이 microcutting에 의해서 침식이 일어나는 반면에 90°에서는 변형(extrusion-forging)에 의해 침식이 발생하고 있다.<sup>6)</sup> 이러한 입자침식각도의 변화에 따른 침식기구의 변화는 flyash 입자에 의한 침식에서도 관찰되었다. 입자충돌각도가 45° 보다 작은 경우에는 microcutting에 의해서 주로 침식이 일어나고, 90°인 경우에는 주로 extrusion-forging 기구에 의해서 침식

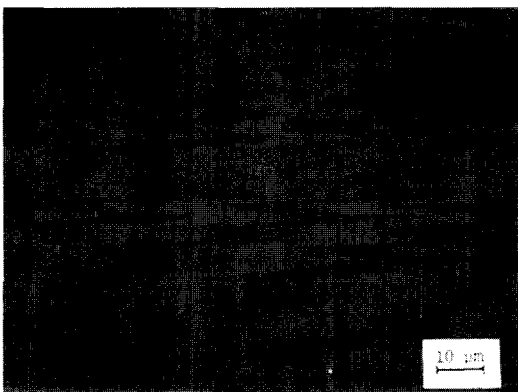
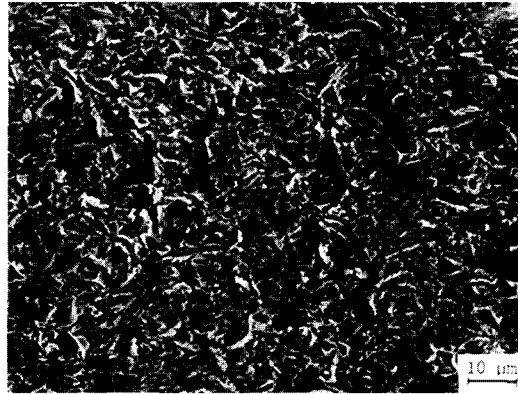
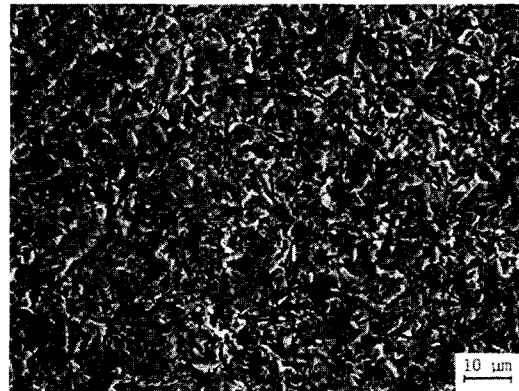


Fig. 9. Top surface of the STS304 specimen before erosion tests



(a) impact angle 30°

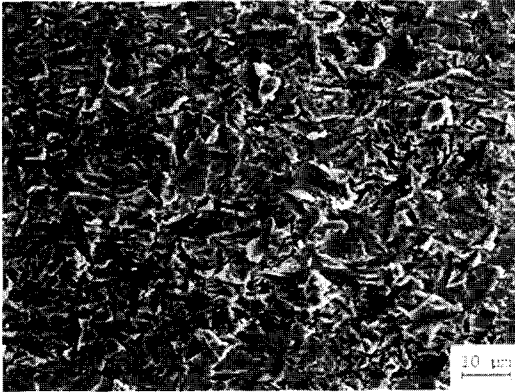


(b) impact angle 90°

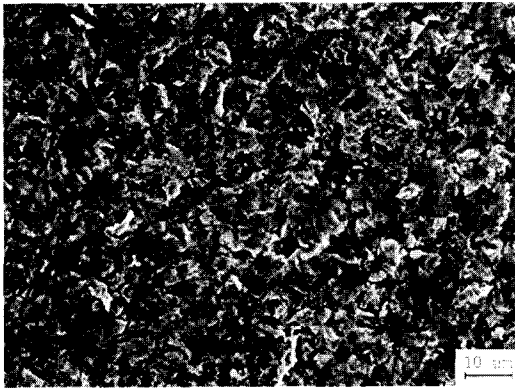
Fig. 10. Eroded top surface of the sample with 50 $\mu$ m SiO<sub>2</sub> at 20°C, 40m/s particle velocity, at different particle impact angles

이 발생되었다. 입자충돌 각도가 60°인 경우에는 microcutting과 extrusion-forging 기구에 의한 침식이 동시에 발생하였다. 다만, flyash 입자는 SiO<sub>2</sub> 입자에 비하여 보다 경도가 작고 입자의 형상이 보다 구형이기 때문에 flyash에 의하여 침식된 표면은 SiO<sub>2</sub>의 경우보다 crater의 깊이도 얇고 extrusion 정도도 적었다. 일반적으로 입자침식은 입자의 각진 정도(angularity)에 의해서도 크게 영향을 받는다. Steel grit의 경우 각진 입자의 침식율이 둥근 구형의 입자의 침식율보다 4배 가량 높은 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 실험에서는 SiO<sub>2</sub> 및 flyash 입자





(a) impact angle 30°



(b) impact angle 90°

Fig. 11. Eroded top surface of the sample with  $50\mu\text{m}$   $\text{SiO}_2$  at  $300^\circ\text{C}$ ,  $70\text{ m/s}$  particle velocity at different impact angles

모두에서 입자충돌각도가 높은 상태 ( $90^\circ$ )에서는 변형 (extrusion-forging)에 의하여 표면이 얇은면 (platelet)으로 떨어져나가는 방식으로 침식되는데 반하여 입자충돌각도가 낮은 ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ) 경우에는 상기의 변형과 미세절단 (microcutting)이 동시에 일어나 표면이 침식되는 것으로 관찰되었다.

#### 4. 결 론

1) Flyash는  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 주요 구성성분으로서 그 중에서도  $\text{SiO}_2$ 가 가장 많이 존재하였으

며, 주로 치밀한 구형입자와 기공을 포함하는 불규칙한 모양의 입자들로 구성되어 있다.

2)  $\text{SiO}_2$ 에 의한 입자침식을 비교시험에서 입자충돌각도  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ 에서의 침식율이  $90^\circ$ 에서의 침식율보다 상대적으로 높았다. 온도가 높을수록 침식율이 감소했고, 입자충돌속도에 비례하여 침식율이 증가하였다.

3) Flyash에 의한 입자침식을 비교시험에서 상온에서는 입자충돌각도  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ 에서의 입자침식율이  $90^\circ$ 에서의 침식율보다 상대적으로 높았고,  $300^\circ\text{C}$ 에서는 시편표면에 입자의 박힘 현상으로 인해 실제적인 침식율 측정이 불가능하였다.

4) 입자충돌각도  $90^\circ$ 에서는 주로 extrusion-forging 기구에 의하여 침식이 되었고, 낮은 입자충돌각도에서는 주로 microcutting에 의하여 침식이 발생하였다. 충돌각도  $60^\circ$ 에서는 두 가지 침식기구가 복합적으로 동시에 발생하였다.

#### 후 기

본 연구의 일부는 안동대학교 기성희 연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

#### 참고문헌

1. A. N. Kitchen ; Flyash Erosion Prediction in Economisers, (1990), 1
2. W. Tabakoff ; Investigation of Metals Erosion in High Temperature Particle Flows, Proceedings, Corrosion/Erosion of Coal Conversion System Materials Conference, Berkely, California, January 24 - 26, (1979), 700
3. W. Tabakoff ; Mesurement of Particle Rebound Characteristics on Materials Used in Gas Turbines, AIAA-89, (1983), 1

4. K. C. Goretta and A. C. Thompson; Mater. Sci. Techno., 36 (1988), 407  
Eng., (1993), L7
5. S. A. Shirazi, J. R Shadley, B. S. McLaury, E. F. Rybicki; J. Pressure Vessel Technol., 117 (1995), 45
6. Y. Y. Liu and Natesan; Surface and Coatings Techno., 36 (1988), 407
7. W. Tabakoff, M. Metwally and A. Hamed; J. Eng. for Gas Turbines and Power, 117 (1995), 146
8. B. Wang; Wear, 199 (1996), 24