

고상 입자에 의한 AISI 403 스테인레스강의 고온 침식

김 종 집 · 정 종 호

한국 표준과학 연구원 소재평가센터

Solid Particle Erosion of AISI 403 Stainless Steel at Elevated Temperatures

Jong Jip Kim and Jong Ho Jung

Materials Evaluation Center, Korea Research Institute of Standards and Science, TaeJeon 305-606, Korea

The solid particle erosion of AISI 403 stainless steel was investigated at 25, 250, 450, 650 and 850°C using 40 g of angular silicon carbide particles of mean diameter 100 μ m. The erosion rate of the steel decreases up to 450°C and then increases with temperature. The increase in erosion rate at higher temperatures appears to start at the same temperature at which hot hardness test curve slope decreases sharply. At both room temperature and 850°C, erosion of this steel occurs in a ductile manner, though the eroded surfaces are remarkably different, and the values of velocity exponents are significantly reduced at 850°C. However, the role of oxidation in erosion is minor at this temperature.

Keywords : solid particle erosion, angular effect, velocity exponent, cutting, particle embedding.

1. 서 론

연료의 불완전 연소, 저품질 연료의 사용, 공기와 같이 흡입되는 소금 입자, 먼지와 모래 등의 유입으로 초래되는 고상 입자(solid particle)에 의한 고온에서의 침식은 가스 터빈을 비롯한 많은 고온 사용 첨단 부품과 다양한 내열 재료에 심각한 손상을 준다. 따라서 지금까지 내열, 내열/내식 합금에 대한 침식 및 침식-부식(erosion-corrosion) 거동의 연구가 다수 수행되어 왔으며, 그 대표적인 합금들은 Ti 합금,¹⁾ Cr-Mo강,^{2,3)} 스테인레스강³⁻⁵⁾ 및 Ni기 초합금⁶⁻⁸⁾들이다. 그러나 대다수의 연구가 재료간의 내침식성 비교 또는 일정한 조건에의 침식 속도 측정에만 국한되어 있으며, 본 연구의 대상 재

료인 AISI 403 스테인레스강을 포함한 많은 합금들의 경우, 고온에서의 상세한 침식 거동 즉, 고온에서 충격 속도, 충격 각도, 실험 온도와 시편의 기계적 성질이 침식 속도에 미치는 영향에 대한 정보는 극히 제한적으로 보고되어 있다.

또한 대다수의 연구들은 침식 입자를 압축 공기로 가속, 분사시키고 공기 분위기 중에서 실험한 결과 즉, 기계적인 침식과 부식이 동시에 일어나는 조건에서 연구한 결과들이므로, 결과의 해석이 복잡하고 기계적인 침식을 분리하기가 어려운 조건에서의 연구 결과들이다. 따라서 고온에서의 침식(erosion)과 침식-부식(erosion-corrosion)의 영향을 보다 더 정확히 조사하기 위해서는 비산화성 가스인 질소 가스로 고체 입자를 가속하고 질소 분위

기 중에서의 실험한 결과와 압축 공기에 의해 가속하고 공기중에서 연구한 결과와의 비교가 필요하다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용한 재료는 두께가 45.0mm인 상용의 AISI 403 스테인레스강 판(조성 Table 1 참조)이며, 시편은 이 판재를 1000℃에서 1.5시간 동안 오스테나이트화 처리 및 공냉한 후에 610℃에서 2시간 템퍼링 처리를 거쳐 제작하였으며, 1 μ m 직경의 diamond paste로 polishing한 후의 시편의 최종 치수는 20.0×20.0×5.0mm³이다.

Table 1. Chemical composition of AISI 403 stainless steel studied (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.12	0.24	0.58	0.030	0.014	12.27

본 연구에 사용한 고온 침식 시험기는 전에 보고한 바와 같은 시험기⁹⁾를 개조, 자체 제작한 것으로서, 압축 가스 공급기, 압력 조절 및 측정기, 입자 공급기, 가스 가열기, 고온로 및 노즐로 구성된다. 입자 공급기는 screw type이고 16 RPM에서 분당 3.65g의 입자가 공급되며, 가스 가열기는 정상 작동 범위가 900℃이고 최고 사용 온도는 1000℃이다. 고온로는 2 zone furnace로서, 고상 입자가 공급되어 통과되는 대부분의 구역 즉, 로의 상부와 시편이 위치하는 하부가 독립적으로 온도 조절이 가능하도록 하였다(Fig. 1 참조). 가스 압력은 시스템의 구성에 따라 다소 차이는 있으나, 입자의 속도가 40m/sec 정도일 경우 1.1기압 정도이고, 노즐은 직경이 5mm인 Al₂O₃ 튜브를 사용하였다. 시편과 노즐의 각도는 별도의 holder를 제작하여 조정할 수 있도록 하였고, 노즐과 시편의 거리는 10mm이다. 분사되는 입자의 충돌 속도는 압축 가스의 압력을 변화시켜 조절하였고, 속도는 rotating double discs¹⁰⁾를 사용 측정하였다.

침식 실험은 25, 250, 450, 650 및 850℃에서 평균 직경이 100 μ m인 총 40g의 탄화규소 입자를 분사하여 실시하였으며, 입자의 충돌 속도는 40, 70

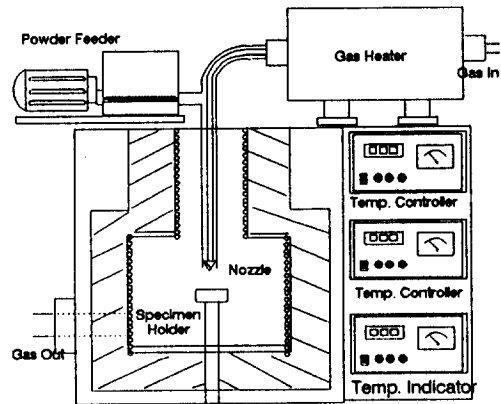


Fig. 1. Schematic diagram of the high temperature erosion tester.

및 100m/s이고, 충돌 각도는 30, 60 및 90°이다. 입자의 가속용 가스는 실험 목적에 따라 질소 또는 공기를 사용하였으며 실험 종료 후에도 실험 목적에 따라 질소 분위기 혹은 공기 중에서 로냉하였다. 침식에 의한 증량 변화를 측정하기 전에는 시편에 부착되어 있는 이물질 제거하기 위해, 에틸 알콜 용액에서 5분간 초음파 세척하였다. 이후 시편을 건조시켰으며, 시편의 증량을 10⁻⁵g의 정밀도를 갖는 저울로 측정하였다. 침식 속도는 시편의 증량 변화를 침식 실험에 사용한 탄화규소 입자의 무게로 나누어 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 AISI 403 스테인레스강은 마르텐사이트계 강으로서 전형적인 템퍼 취성을 나타내는 강종이며, 본 연구에서는 템퍼 취성을 나타내는 온도 범위를 피하여 610℃에서 템퍼링하였다. 참고로 본 재료는 전에 보고¹¹⁾한 바와 같이 2차 경화 및 충격치의 최소점, 즉 카바이드의 성장에 의한 국부적인 Cr 고갈이 520℃에서 템퍼링한 재료에서 나타났으며, 따라서 610℃에서 템퍼링한 본 연구 대상 재료의 경우 확산에 의해 기지로부터 Cr이 보충되어 충격치나 파괴 인성이 회복된 상태이며, 이 시편의 상온에서의 주요한 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2. Mechanical properties of AISI 403 stainless steel tempered at 810 °C for 2hr

Properties	Values measured at room temp.
Hardness(HRC)	33.5
Yield strength(MPa)	745.0
Tensile strength(MPa)	870.0
Strain-hardening exponent	0.09
Fracture strain(%)	20.9
CVN impact energy(kgf m)	3.4
Fracture toughness(MPa m ^{1/2})	83.4

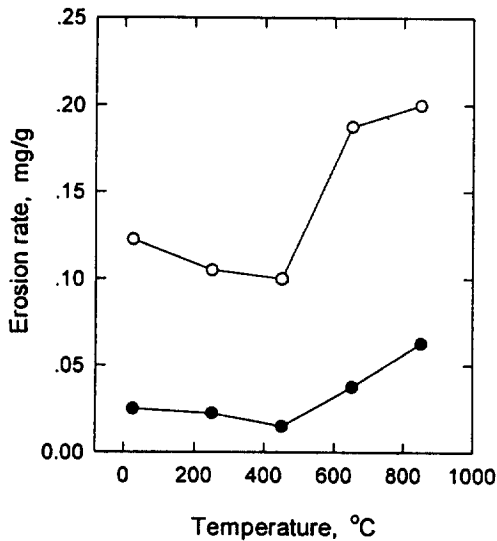


Fig. 2. Variation of erosion rate with temperature : impingement angle 90° ; V=40 (●) and 70ms⁻¹ (○).

Fig. 2는 403 스테인레스강에서의 충격 각도 90° 및 질소 가스분위기에서 측정된 시험 온도에 따른 침식 속도의 변화를 나타낸다. 충격 속도가 40 및 70ms⁻¹인 경우 공히 침식 속도는 상온에서부터 온도를 증가시키기에 따라 초기에는 감소하는 경향을 보이며, 최소점을 지나 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 이와 동일한 경향이 Fig. 3의 30°, 40ms⁻¹에서의 결과에서도 관찰되고 있다. 보통 금속 재료에서는 침식 속도의 온도 의존성은 온도의 증가에 따라 침식 속도가 계속 증가하는 재료, 저온에서는 일정한 침식 속도를 보이다가 증가하기 시작하는 재료 및 본 연구 결과에서와 같이 저온

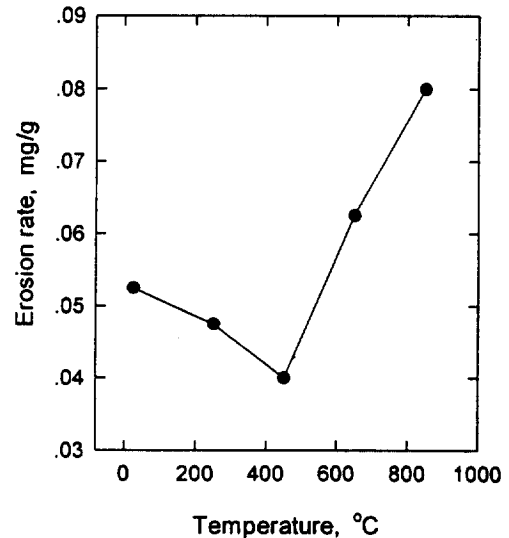


Fig. 3. Variation of erosion rate with temperature : impingement angle 30° ; V=40ms⁻¹.

에서는 감소하다가 고온에서 증가하기 시작하는 3가지의 경우가 보고⁵⁾된 바 있다.

이러한 침식 속도의 온도 의존성에 대하여는 그간 시편 재료의 기계적 성질의 함수로 해석하려는 많은 연구 결과가 보고된 바 있다.^{1,3-5)} 일반적으로 금속 재료의 경우, 온도 증가에 따라 침식 속도가 증가하는 경향은 온도 증가에 따른 경도, 강도 및 탄성 계수(Young's modulus)의 감소와 관련이 있는 것으로, 반면 온도 증가에 따른 침식 속도의 감소는 고온에서의 연성의 증가와 관련지어 설명해왔다. 경도와 침식 속도의 상관 관계 조사를 위해, 고온 경도 측정 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 경도 값은 온도가 증가함에 따라 서서히 감소하다가 450°C 이상에서 급히 감소하는 경향을 보인다. 경도 측정 결과만으로 보면 침식 속도는 온도가 증가함에 따라 연속적으로 증가할 것으로 예측되나, 실험 결과는 이러한 경향을 보이지 않아, 경도와 침식 속도는 450°C 이상에서는 무관한 것으로 나타나고 있다. 따라서 450°C 이하의 저온 부분에서의 온도 증가에 따른 침식 속도의 감소는 앞에서 언급한 바와 같이 연성의 증가로 설명할 수 있으나, 아직 403 스테인레스강의 경우 온도에 따른 연성 변화의 상세한 거동

이 보고된 바 없어 이를 확인하기는 어렵다. 그러나 일반적으로 온도 증가에 따라 연성은 증가하므로, 저온 부분에서는 침식 거동에 미치는 연성 증가의 영향이 크고, 고온 부분에서는 경도값이 아주 낮으므로, 경도 감소의 기여도가 온도에 따른 침식 속도의 변화 거동을 좌우하는 것으로 예측된다.

또 한가지 주목할 점은 침식 속도가 최저를 기록하는 온도이다. AISI 403 스테인레스강의 경우 450°C인데, Levy등³⁾은 310 스테인레스강에서 온도의 증가에 따라 침식 속도가 본 연구의 403 스테인레스강의 경우와 같이 일정 온도에서 최소점을 갖는 것으로 보고한 바 있으며, 이들은 침식 속도 최소점의 온도가 고온 인장 강도가 급격히 감소하기 시작하는 온도와 일치하는 것으로 보고하였다. 보통 고온 강도와 고온 경도의 온도 증가에 따른 변화 경향이 유사하므로, 본 연구의 결과도 이들의 결과와 유사한 것으로 해석할 수 있다. 즉, Fig. 4의 고온 경도 측정 결과에서 보는 바와 같이 450°C에서부터 고온 경도는 급격히 감소한다.

Fig. 5는 상온 및 850°C, 질소 가스 분위기에서 측정한 403 스테인레스강의 침식 속도의 충격 각도 의존성을 나타내며, 이 그림들에서 보는 바와 같이 충격 속도가 40 및 70ms⁻¹인 경우, 침식 속도는 30°에서 최대치를 나타내며 각도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 90°에서 최대 침식이 나타나는 것은 연성 재료 침식 특성의 전형적인 양상으로서, 일부 제한적인 실험 조건에서 나타나는 superalloy 경우와는 달리, 본 연구의 실험 온도 범위에서 최대 침식이 30°에서 관찰되어 침식이 주로 plowing 또는 cutting mechanism으로 진행됨을 시사하고 있다. 침식이 cutting에 의해서 일어날 경우, 30° 정도에서의 침식이 더 심한 것으로 알려지고 있다. 반면, 최대 침식이 90° 부근에서 나타나는 경우, 침식 과정에서 연속적인 고상 입자의 재료 표면에서의 충돌에 의한 추가적인 압입 변형 과정, 즉 충돌시 마다 경도가 증가하는 소성 변형층이 형성되고, 경도가 재료의 강도에 근접하게 되면, 소성 변형층이 취화되어 더 이상의 소성 변형이 일어나지 않고, 이 이후의 충돌 과정에서는 표면층이 파괴, 제거¹²⁾되는 변형 침

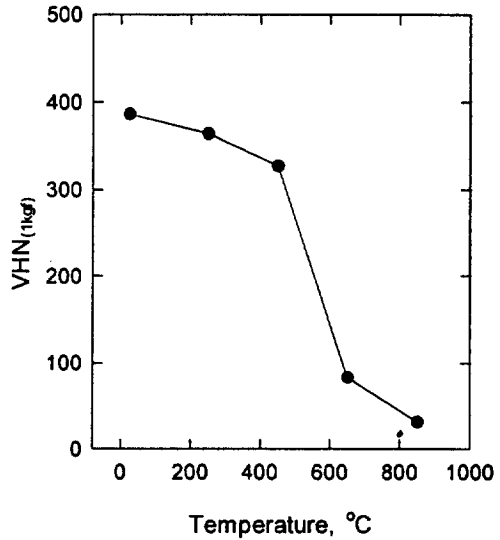


Fig. 4. Change in hardness(Vickers hardness number) of AISI 403 stainless steel with temperature.

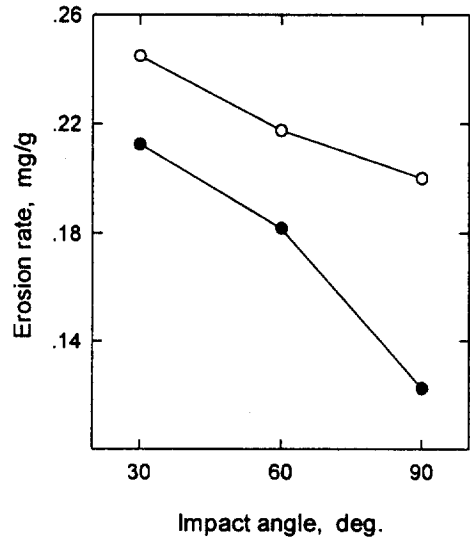


Fig. 5. Impingement angle dependence of erosion rate at room temperature (●) and 850°C (○): V=70ms⁻¹.

식(deformation erosion)이 일어나는 것으로 해석하며, 이러한 침식은 주로 취성 재료에서 관찰된다.

Fig. 6은 질소 가스 분위기, 충돌 각도 90° 침식에서의 침식 속도와 충돌 속도를 대수로 환산 도

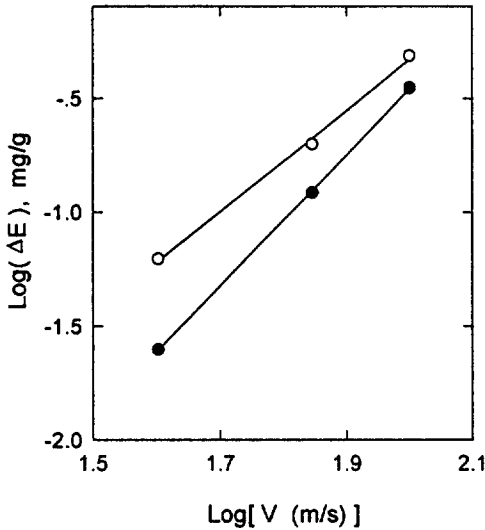


Fig. 6. Logarithm of erosion rate versus logarithm of impact velocity plot at room temperature (●) and 850°C (○): impingement angle 90°.

시한 결과로서, 이 그림에서 보는 바와 같이, 속도 지수(velocity exponent)는 상온과 850°C에서 각각 2.88 및 2.22로서 850°C에서의 속도 지수가 상온값보다 낮다. 이러한 속도 지수의 감소는 다수의 스테인레스 강에서 보고된 바 있으며, 이는 온도가 증가됨에 따라 침식 속도의 입자 충격 속도 의존성이 낮아짐을 나타낸다. Levy등은 AISI 310 스테인레스강의 경우, 800°C, N₂ 분위기에서 실험한 결과, 속도 지수가 1.23임을 보고하였으며, 이 값은 상온 값인 2.5의 1/2에 근접하는 낮은 값이다.³⁾ Zhou등도 500°C, 산화성 분위기에서 304 스테인레스강의 속도 지수가 1.8인 것으로 보고⁴⁾하였으며, 이는 일반 금속 재료의 상온에서의 속도 지수가 2.0 이상인 것을 감안하면 낮은 값이다. 이들은 또한 이러한 경향을 고온에서 예상되는 동 재료의 인성 증가와 강도 감소로 관련지어 설명하였으며, 인성 증가와 강도 감소가 일어나면 침식 과정에서 충격되는 고상 입자의 에너지가 시편 재료에 의해 더 많이 흡수되는 것으로 예측하였다. 그러나 충돌 속도가 낮은 조건에서 보다 충돌 속도가 높은 조건에서 고상 입자의 에너지가 시편에 의해 더 효율적으로 흡수되는지에 대한 구체적인 설명은 제시

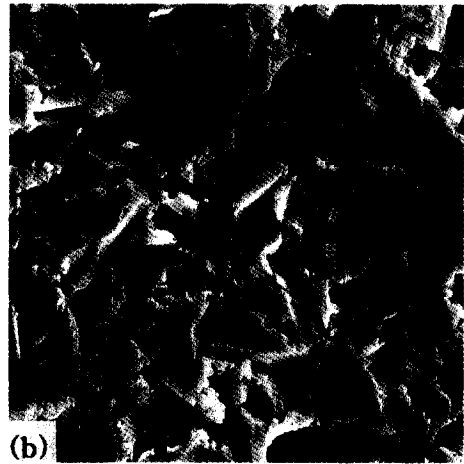
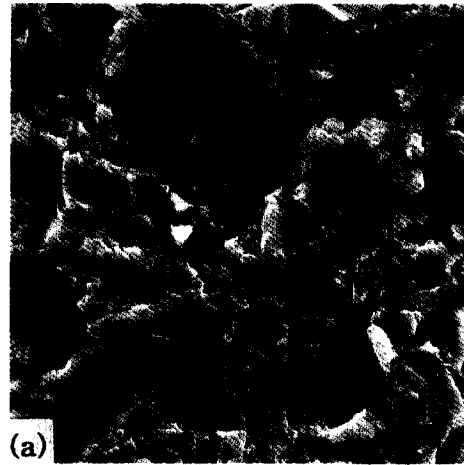


Fig. 7. SEM micrographs of typical surfaces eroded at room temperature at impingement angles of (a) 30° (2490X) and (b) 90° (2480X).

되지 않았다.

Fig. 7은 상온, 70m/s, 질소 가스 분위기, 30 및 90°에서 침식시킨 시편 표면의 주사 현미경 사진들이다. 이 그림들에서 보는 바와 같이, 30°에서는 앞에서 언급한 바와 같은 cutting에 의한 연성 침식이 일어났음을 알 수 있다. 즉 침식에 의해서 생긴 crater의 일부에서 내부에 siding mark가 관찰(화살표 표시)되고, 고상 입자가 충돌 후 빠져나간 방향으로 연속적인 충돌에 의해서 대부분 제거되는 하였으나, crater 내부에 lip들이 생성되어 있다. 90°에서 침식된 면에서는 이에 비해, V자형의

압입(indentation) 자국이 30°에서 보다 더 깊게 파여 있고, 압입 자국 사이의 면들에서 각인 흔적과 sliding mark가 불분명하다. 그러나 취성 침식의 흔적들인 cleavage facet이나 균열들은 관찰되지 않으며, 따라서 ductile한 침식이 일어났음을 알 수 있는데, 이러한 결과는 앞에서의 충돌각 의존성으로 부터 예측되는 침식 거동에 상응하는 결과이다.

Fig. 8은 850℃, 70m/s, 질소 가스 분위기, 30 및 90° 조건에서 침식시킨 시편 표면의 주사 현미경 사진들이다. 이 그림들에서 보는 바와 같이, 30°에서는 상온에 실험한 시편에 비하여, 압입 흔적 및 sliding mark가 불분명하게 나타나며, 압입 흔적들 사이의 면들이 비교적 평탄하다. 90° 침식의 경우, 30°에서와 마찬가지로 상온에 비해 압입 흔적은 불분명하나, 깊게 파인(사진에서 검게 나타나는) crater들이 관찰되고 있다. 또한 침식 과정에서 생긴 lip들이 잘게 부서진 조각들이 다수 관찰되고 있어서, 제한된 범위에서 취성 파괴가 일어났음을 알 수 있다. 이외에도 고상 입자(SiC)들이 crater 내부에 박혀있음(화살표 표시)을 관찰할 수 있었는데, 이는 850℃, 90° 침식에서 충돌 입자가 재료 표면에 박혀있는 상태인 particle embedding이 용이하게 일어남을 나타낸다. 이러한 particle embedding은 시편의 중량을 크게 증가시키지 않으면서 침식의 진행에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Particle embedding이 일어난 부위는 다른 부위와 기계적 성질이 다르므로, particle embedding으로 재료 표면 일부가 용기되면, 이 부위는 이후의 계속적인 고상 입자와의 충돌에 의해서 쉽게 파괴되어 제거되는 것으로 보고되고 있다.¹³⁾ 따라서 상온에 비해 850℃에서 압입 흔적의 깊이가 더 얕고, 불분명하여도, particle embedding은 850℃에서 침식 속도를 증가시키는 요인으로 작용했을 가능성이 크다. 또한 이러한 particle embedding은 850℃, 30° 조건에서도 일어났을 것으로 예측되나, 파면 사진에서는 관찰되지 않는데, 이는 30° 충돌 조건에서는 고상 입자에 의해 재료 표면에 평행하게 작용하는 수평 분력 또는 운동 에너지에 의해 이후의 충돌 과정에서 박혀있는 particle이 제거되었기 때문으로 생각된다.

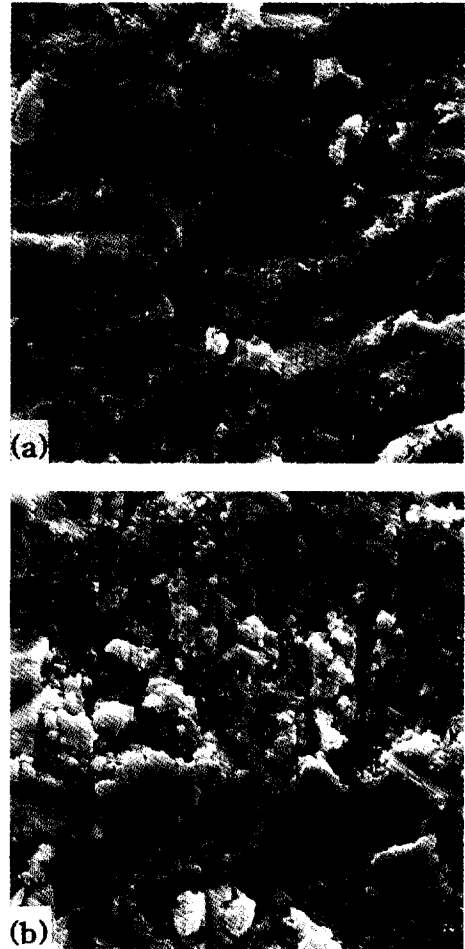


Fig. 8. SEM micrographs of typical surfaces eroded at 850℃ at impingement angles of (a) 30° (2500X) and (b) 90° (2530X).

침식과 산화의 상호 작용 효과를 조사하기 위하여, 850℃ 및 90° 조건에서 질소 가스 대신 공기로 입자를 가속시키고 산화성(공기) 분위기에서 침식 실험을 실시하였다. 그 결과, 침식 속도는 40 및 70m/s에서 각각 0.06 및 0.19 mg/g으로서, 질소 가스 분위기에서 보다 약 5% 정도 감소하였으며, 100m/s에서는 큰 차이가 없었다. 이러한 속도 차이에 의한 경향은 다른 연구들의 결과, 즉 입자 충돌 속도가 낮은 경우 산화층의 영향이 더 커지는 결과와 유사하나, 공기와 질소 가스 분위기에서의 침식 속도 차이가 작은 것은, 수종의 오스테나

이트계 스테인레스강 및 크롬-몰리브덴강에서 보고된 산화성 분위기에서의 침식 속도 저하와 대조적인 경향이다. 이러한 차이는 본 연구의 침식 실험 조건에서는 입자 충돌 시작전 및 충돌 도중에 생성된 산화층이 연속적으로 충분히 성장하지 못하여 보호막으로서의 역할을 하지 못한 것에 기인한다. 결과적으로 본 연구의 실험 조건에서는 산화층에 의해서 좌우되거나(oxide dominated) 침식 보다는 주로 모재에 의해 좌우되는(substrate dominated) 침식¹⁴⁾이 일어나는 것으로 생각된다. 실제로 침식 실험과 동일한 조건에서 입자를 충돌시키지 않고 중량 변화를 측정한 결과, 403 스테인레스강의 산화에 의한 중량 증가는 $0.03\text{mg}/\text{cm}^2$ 에 불과하였다. 따라서 산화-침식 상호 작용의 적절한 측정, 분석을 위해서는 산화 시간 또는 침식 실험 시간을 늘리거나, 입자의 충돌 속도가 더 낮은 조건에서의 연구가 필요한 것으로 생각된다.

4. 결 론

AISI 403 스테인레스강의 고상 입자 침식 특성을 상온 및 850℃까지의 온도 범위에서 SiC 입자를 사용, 조사한 주요한 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 침식 속도는 상온에서부터 온도를 증가시키기에 따라 초기에는 감소하는 경향을 보이고, 최소점(450℃)을 지나 다시 증가하는 경향을 나타내며, 최소점은 고온 경도가 급격히 감소하는 온도와 일치하였다.

2) 침식 속도의 충돌 각도 의존성을 조사한 결과, 상온 및 850℃에서 공히 30°에서 최대 침식 속도를 나타내어, 연성 침식 거동을 보여 주었다.

3) 속도 지수는 상온과 850℃에서 각각 2.88 및 2.22로서 850℃에서의 속도 지수가 상온값 보다

낮아서 침식 속도의 충돌 속도 의존성이 낮아졌다.

4) 850℃의 침식에서는 particle embedding이 관찰되었으며, 이는 고온에서의 침식에 큰 영향을 주었다.

5) SiC 40g을 분사시켜서 실험한 본 연구의 조건(850℃, 90° 및 충격 속도 40m/s 이상)에서는 고온 산화가 침식에 미치는 영향이 크지 않았다.

References

1. N. Gat and W. Tabakoff, *J. Test and Eval.*, **8**(4) 177 (1980).
2. A. Levy and Y. F. Man, *Wear*, **111**, 135 (1986).
3. A. V. Levy, J. Yan and J. Patterson, *ibid*, **108**, 43 (1986).
4. J. Zhou and S. Bahadur, *Proc. Conf. on Corrosion and Particle Erosion at High Temperature*, TMS, p. 315 (1989).
5. T. Singh and G. Sundrajan, *Metal. Trans.*, **21A**, 3187 (1990).
6. A. V. Levy and P. Crook, *Wear*, **151**, 337 (1991).
7. J. R. Nicholls and D. J. Stephenson, *ibid*, **186-7**, 64 (1995).
8. S. Chinnadurai and S. Bahadur, *ibid*, **186-7**, 299 (1995).
9. S. B. Jeon, S. H. Nahm, J. J. Kim, J. J. Lee, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, **23** (2), 11 (1990).
10. A. W. Ruff and L. K. Ives, *Wear*, **35**, 195 (1975).
11. J. J. Kim, S. J. Cho, H. Moon, B. S. Han and H. K. Chang, *J. Mat. Sci. Lett.*, **9**, 1 (1990).
12. I. Finnie, *Wear*, **186-7**, 1 (1995).
13. L. K. Ives and A. W. Ruff, *ASTM STP 664* ASTM, p. 5 (1979).
14. D. J. Stephenson and J. R. Nicholas, *Corros. Sci.*, **35**, 1015 (1993).