

USC 화력발전소용 12wt%Cr 강의 표면처리에 따른 고체입자침식특성에 관한 연구

A Study on Solid Particle Erosion Characteristics of Surface Treated 12wt%Cr Steel for USC Power Plant

엄기원*, 이선호*, 이의열**

* 두산중공업 기술연구원

** 안동대학교 재료공학부

ABSTRACT 12wt%Cr Steel has been applied on turbine bucket and nozzle partition material of power plant. Turbine bucket and nozzle get damaged by solid particle within steam, therefore they are protected by surface treatments such as ion nitriding, boriding and chrome carbide HVOF spray coating. In this study, solid particle erosion(SPE) characteristics after these surface treatments are examined at operating temperature 540°C and 590°C of fossil power plant and the mechanism of damage was studied. Erosion of 12wt%Cr steel is originated by micro cutting and that of boriding and chrome carbide HVOF spray is originated by these mechanism - repeating collision, crack initiation and propagation. As the results of SPE test at 540°C and 30° impact angle that is the most commonly occurred in power plant, Boriding had the best SPE -resistance property, Cr₂C₃-25(Ni20Cr) HVOF spayed and Ion nitrided samples were also better than bare metals(12wt%Cr Steels). At 590°C and 30° impact angle, Boriding had also the most superior characteristic and HVOF spay sample was better than bare metal

1. 서 론

화력발전소의 과열기, 재열기 튜브 및 고온의 증기가 통과하는 파이프의 내면이 산화되어 생성된 산화물 (주로 Fe₃O₄)이 박리되어 증기를 따라 움직이면서 각종 밸브, 버켓 및 노즐(특히 HP/IP터빈 1단 버켓 및 노즐)과 충돌하면서 심하게 침식되는 현상을 발생시키는데, 이를 고체입자침식 (Solid Particle Erosion; SPE)이라 한다.¹⁾ 이러한 고체입자침식이 주로 발생하는 곳은 고온, 고압의 가스가 고속으로 흘러 들어가는 고압터빈의 1단 노즐과 버켓 그리고 증압터빈 1단 노즐과 버켓이다.

이를 방지하기 위하여 현재는 각 부위의 침식기구와 제작방법이 일치하는 표면처리 방법을 채택하여 방지하고 있다.^{2,4)} 고체입자 침식은, 연한재료에서는 충돌물체와의 충돌각이 20° -40° 사이에서 심하게 발생하고, 경한재료는 충돌각이 커질수록 침식이 점차 심하게 발생하는 경향을 띤다. 터빈에서 사용되는 12wt% Cr강의 경우는 30° - 60° 사이에서 심한 마식이 발생하고, 실제 고체와의 충돌이 60° 근처에서 주로 발생한다. 따라서 이러한 고체입자 침식을 줄이기 위해서는 경한 코팅을 하여 30° - 60° 사이에서 발생하는 마식량을 줄이면 된다. 현재 고압/증압 1단 버켓의 경우는 Cr_xC_y-NiCr분말을 고속으로 뿌어져 나오는 불꽃

속에서 용융시켜 코팅층을 얻는 HVOF코팅 (High Velocity Oxy-Fuel Coating)을 적용하여 전 표면을 코팅하도록 규정되어 있으며, 증압 1단 노즐은 다른 부품의 침식 기구와는 다르게, 버켓에 충돌한 후 튀어나온 입자가 후면(Trailing edge)부의 흡입부분 또는 벽부분과 충돌하여 발생하므로 고체입자침식이 발생하는 부위만 플라즈마 용사 또는 HVOF 방법에 의해 마식을 방지하고 있다. 화력 발전용 고압 1단 노즐의 경우는 HVOF코팅을 적용할 수 없는 구조를 하고 있어 확산코팅을 적용하고 있다. 확산코팅은 모재에 새로운 원소를 표면으로부터 확산시켜 새로운 화합물층을 형성시키거나, 특정원소가 풍부한 층을 형성시켜 목적하는 기능을 가지게 하는 방법이다. 높은 온도 및 마식에 잘 견디게 하기 위해서는 경도 및 확산층의 분해 온도가 높아야 하는데 주로 질화나 침봉 코팅이 현재까지는 가장 많이 적용되고 있다.

본 연구에서는 초초임계(USC) 화력발전소의 온도조건(593°C, 621°C)에서 견딜 수 있는 터빈 소재 부품의 표면처리 방법 개발을 목표로 하며, 이를 위하여 기존의 화력 발전소 조건(540°C)에서 수행된 HVOF코팅과 침봉 및 질화 처리를 초초임계(USC) 조건에서 실시하여 각 코팅층의 기계적/물리적 특성과 고온에서의 고체입자 침식 특성을 비교분석 하였다.

2. 실험방법

2.1 표면처리

1) 침봉처리

페이스트 침봉처리를 위한 페이스트는 Fe_2B 만을 얻는데 유리한 B_4C 와 $Na_2B_4O_7$ 을 주성분으로 하는 EKabor™을 사용하였다. 침봉처리는 $950^{\circ}C \pm 15^{\circ}C$ ($1750^{\circ}F \pm 25^{\circ}F$)에서 총 두께 약 $70-80\mu m$ (FeB $30\mu m$ 이하)를 만족 시킬 수 있도록 유지시간을 결정하여 처리하였다

2) Cr_3C_2-NiCr HVOF코팅

Cr_3C_2-NiCr HVOF용사 조건은 아래표에 나타내었으며, 총 두께는 $200\mu m$ 를 목표로 하였다.

Cr_3C_2-NiCr HVOF spray coating 변수

산소공급량 (l/min)	290
프로판 공급량(l/min)	86
분말송급 속도(g/min)	53
GUN 이동속도(mm/min)	10,000
용사 반복회수(회)	6
용사거리 (GUN - 시편, mm)	230
용사각도($^{\circ}$)	90

3) 이온 질화

이온 질화는 $540^{\circ}C$ 침식시험에서는 12 wt% Cr강에, 그리고 $590^{\circ}C$ 와 $620^{\circ}C$ 침식시험에서는 벨브소재인 Incoloy 901(B50A305B)에 실시하였다.

2.2 고체입자 침식실험

이 장치는 공기압축기, 연료공급장치, 공기 가열장치, 입자주입장치, 입자가속관, 시험편 장착장치, 입자 냉각 및 집진장치, Contol panel로 구성되어 있다. 시험구간은 $60mm \times 60mm \times 60mm$ 크기의 정육면체 양면에 quartz windows가 부착된 형태로 제작하였으며, 시험홀더가 상단에서 삽입할 수 있도록 제작되었다. 시험의 크기가 일정 이상이 되면 유체의 흐름을 크게 방해할 수 있기 때문에 적정 크기의 시험이 요구된다. 고체입자 및 유체의 속도는 computer modeling(FLUENT)을 하여 여러 조건에서 유체 및 입자의 속도를 계산하여 사용하였으며 이 때 입자의 속도는 유체속도의 약 70 - 80%정도를 나타내었다. 발전소에서의 실제 운전조건과는 달리 고체입자를 이송시키는 매체로 공기를 사용하였고, 공기는 간접적으로 가열하였다.

3. 실험결과

3.1 코팅층의 특성 분석

그림1.은 이온질화, Cr_3C_2-NiCr HVOF용사, 침봉처리 시편의 단면 조직을 전자현미경으로 관찰한 사진이다. 이온질화(a) 및 HVOF용사(b) 시편은 각각 $40, 180\mu m$ 정도의 코팅층이 형성됨을 관찰할 수 있고, 용사층의 경우 기공이 거의 존재하지 않는 우수한 조직임을 알 수 있다. 경도는 두 코팅층 모두 $800 - 900Hv$ 정도였다(12wt% Cr강의 경도: 약 $400Hv$). Fig 6의 (c)는 침봉층을 관찰한 사진으로, $20\mu m$ 이상의 침봉조직에서 모두 나타나는 전형적인 치상구조 (tooth structure)로 총 두께가 약 $65-70\mu m$ 정도이고, B양이 적은 $(Fe,Cr)_2B$ 와 B양이 많이 포함되어 있는 $(Fe,Cr)B$ 층으로 나뉘어져 있다. FeB층은 경도는 높지만 깨지기 쉬우므로 최대한 억제해야 한다. 경도는 $1600 - 1800Hv$ 사이 존재하였다.

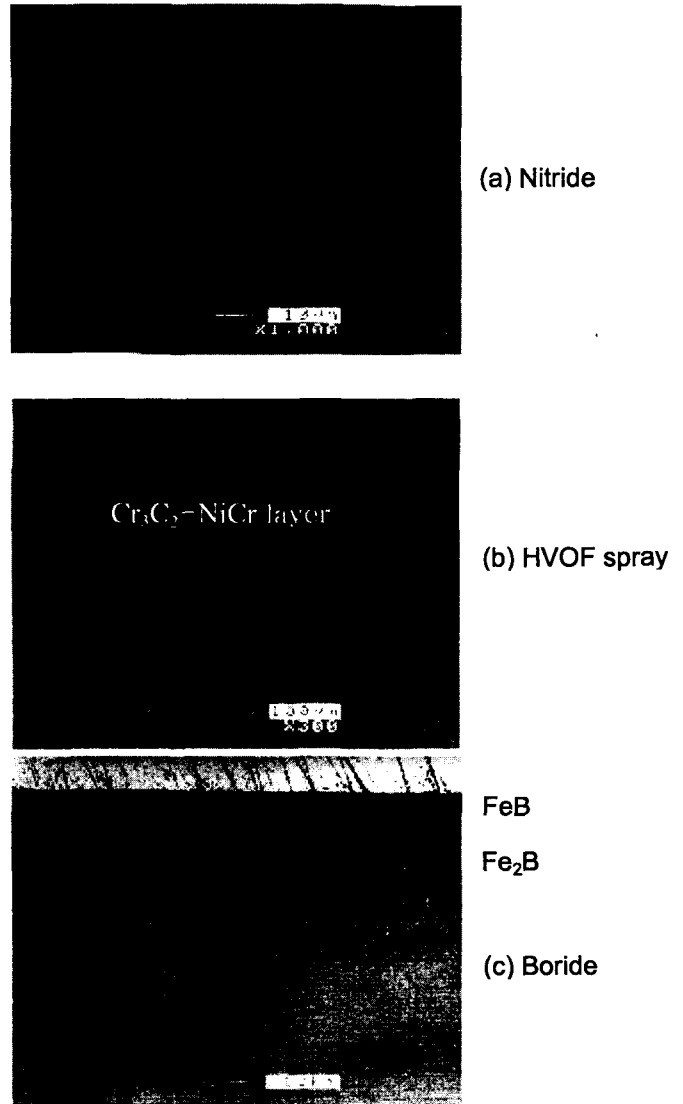


그림 1. Cross-sectional view of various coating layers

3.2 고체입자침식실험 결과

그림 2.은 540, 590, 620° C에서의 충돌각도별 침식량을 비교한 그래프이다. 540° C에서의 침식량을 비교해 보면, 12wt% Cr강 모재는 연성재료의 erosion특성과 같이 충돌각도 20° - 40° 구간에서 침식량이 가장 많으며, 각도가 커질수록 침식량이 감소함을 알 수 있고, 경질 표면처리 시편인 침봉 및 HVOF용사 시편은 충돌각도가 커질수록 침식량이 증가하며, 전 충돌각도에서 모재에 비해 침식량이 적은 것을 알 수 있다. 특히, 터빈 재료에서 가장 심한 침식이 일어나는 충돌각도 30° 에서는 침봉처리 및 HVOF용사 시편이 모재에 비해 최소 30배 이상 우수한 내침식특성을 갖는 것을 알 수 있다

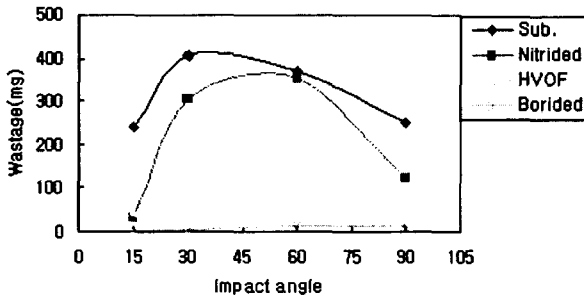


그림 2. Relations of wastage and impact angle (540° C, impact particle weight: 400g)

그림 3.(a)의 590° C에서의 침식량을 비교해 보면 충돌각도 30° 에서는 540° C에서와 같이 침봉 및 HVOF용사 코팅 시편이 모재에 비해 침식량이 월등히 적으나, 90° 에서는 모재는 침식량이 감소하는 반면, 침봉 및 HVOF용사 코팅 시편은 침식량이 증가함을 알 수 있다. 이는 처리 온도의 상승으로 인한 경질 표면층의 높은 충돌에너지에 의해 박리가 쉽게 발생하는 erosion특성에 기인한 것으로 사료된다. 그림 9.(b)의 620° C에서는 시험 온도가 고온인 관계로 12wt% Cr강 모재의 경우 심한 입자박형 현상이 발생하여 실험을 수행할 수 없었고, 다른 표면처리 시편도 이러한 이유로 particle weight이 100g의 경우에만 실험을 할 수 있었다. 이 경우에도 충돌각도 30° 에서는 침봉 시편, HVOF 용사 시편, 그리고 이온 질화 시편의 순으로 내침식성이 우수하게 나타났다.

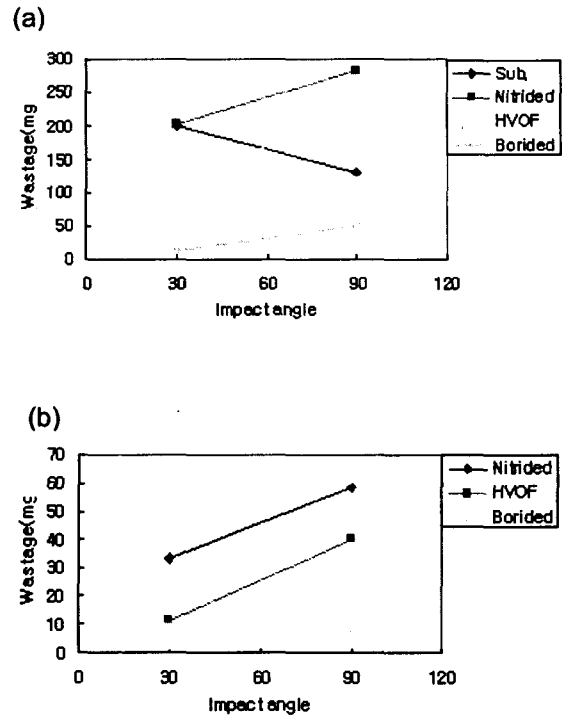


그림 9. Relations of wastage and impact angle (a): 590° C, impact particle weight: 400g (b): 620° C, impact particle weight: 100g

4. 결 론

12wt% Cr강에 이온질화, Cr₃C₂-NiCr HVOF 용사코팅, 침봉처리를 한 시편을 각각 540, 590, 620° C에서 충돌속도 300m/sec로 고체입자 침식시험을 한 결과는 다음과 같다.

- 1) 12wt% Cr강 모재의 경우 30° - 60° 구간에서 많은 침식이 발생하는 전형적인 연성 침식현상을 나타내었으며, 이는 고속의 입자에 의해 재료가 절단되어 나가는 Micro-cutting에 의한 것으로 사료된다.
- 2) 540° C에서는 침봉처리 시편이 가장 우수한 내침식성을 갖는 것으로 나타났으며, Cr₃C₂-NiCr HVOF 용사코팅, 이온질화 그리고 12wt% Cr강 모재의 순으로 우수한 내침식성을 갖는 것으로 나타났다. 특히, 터빈에서의 충돌조건인 30° -60° 사이에서는 침봉처리 시편이 모재보다 30-90배의 우수한 내침식 특성을 갖는 것으로 나타났다.
- 3) 590° C에서도 30° 구간에서는 540° C에서와 같이 침봉처리 시편 및 Cr₃C₂-NiCr HVOF 용사코팅이 우수한 내침식 특성을 가졌으나, 충돌각도가 커질수록 모재에 비해 침식량이 크게 증가하였다.