

## 경질 코팅의 고온 입자침식 현상 연구

이의열\*, 김종하

안동대학교 신소재공학부 금속재료전공

## A Study on High Temperature Particles-Erosion of Hard Coatings

E. Y. Lee\*, J. H. Kim

Department of Materials Science and Engineering, Andong National University

(Received 16 June 2003 ; accepted 18 August 2003)

### Abstract

Many steam turbine components encounter solid particle erosion damage. It has been reported that particle erosion damage is caused by oxide scale exfoliation from boiler tubes. One of the most effective solutions to combat the erosion damage is the application of erosion resistant coatings on the turbine components. In this study, particle erosion resistance for various hard coatings such as nitride, Cr carbide and boride coatings was evaluated under the simulated erosion conditions of steam turbines. Based on the particle erosion tests, the boride coating was found to be more superior to others.

*Keywords* : erosion, boride, steam turbine

## 1. 서 론

발전소에서 사용되는 스팀터빈은 보일러 튜브에서 발생하는 산화물 고체 입자에 의해 엔진의 부품들(turbine blades, valve stem, radial seal 및 nozzles 등)에 심각한 침식 손상을 입는다<sup>1-3</sup>. 보일러 튜브 소재는 500~600°C의 온도에서 스팀과 반응하여 표면에 철산화물(주로 Cr을 약간 포함하는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)이 생성하게 된다. 생성된 철산화물은 모재와의 열팽창계수의 차이 및 열피로에 의하여 보일러 모재의 표면에서 떨어져, 고속의 스팀에 섞여 터빈의 부품들에 충돌하여 입자침식 손상을 입히게 된다. 부품의 입자침식은 엔진의 효율을 저하시키고, 엔진의 유지 보수비용을 증가시키는 등의 문제점을 발생시킨다<sup>4,6</sup>.

따라서 입자침식 문제를 감소시키기 위하여 화학적 세정 및 크로메이트 처리를 통한 철산화물 생성을 억제하는 방법과 스팀/공기를 불어넣어 철산화물 입자를 제거하는 방법 그리고 내침식성 코팅을

적용하는 방법 등이 주로 사용되고 있으나 마지막 방법이 가장 효율적인 것으로 알려지고 있다<sup>7,8</sup>. 터빈 부품의 내침식성을 향상시키기 위하여 여러 가지 경질코팅의 사용이 가능할 것이다.

본 연구에서는 스팀터빈의 모재로 흔히 사용되는 Cr/Mo강 표면에 경질코팅인 nitride 코팅, Cr carbide 코팅 및 boride 코팅을 적용하여 내입자침식성을 비교 평가하였으며, 내입자침식 시험은 실제 스팀 터빈의 입자 침식 환경과 거의 동일한 조건을 재현하는 장치가 제작되어 사용되었다.

## 2. 실험내용 및 방법

### 2.1 시편준비

경질코팅의 내입자침식성을 비교 평가하기 위하여 Cr/Mo강 모재상에 3종의 경질코팅이 적용되었으며, 침식시험에서는 모재를 포함한 아래의 4종의 시편이 사용되었다.

- ① 코팅되지 않은 Cr/Mo강(화학적 조성 : 표 1)
- ② Boride 코팅

\*Corresponding author. E-mail : eylee@andong.ac.kr

- ③ Nitride 코팅
- ④ Cr carbide(75%Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>+ 25%NiCr) 코팅

Table 1. Chemical composition of Cr/Mo steel

Element	Cr	Mo	Ni	V	N
Wt.%	10.00 -11.50	0.90 -1.10	0.05 -0.12	0.15 -0.25	0.04 -0.08
Element	C	Mn	P	S	Si
Wt.%	0.14 -0.20	0.50 -0.80	0.020	0.015	0.15 -0.50

코팅 생성 전에 모재의 시편은 직경 8 mm, 길이 6 mm 크기의 원통모양으로 가공되었으며, 시편 가공 중 생성된 응력을 제거하기 위하여 진공에서 annealing 처리되었다.

Boride 코팅 및 nitride 코팅은 각각 pack cementation법과 gas nitriding법에 의하여 만들어 졌으며, Cr carbide 코팅은 HVOF(High Velocity Oxygen Fuel)를 사용하여 만들어 졌다.

시편의 표면 거칠기가 침식율에 미치는 영향을 제거하기 위하여 입자침식시험 하기 전, 모든 시편은 0.5 μm의 diamond paste로 polishing되어 알콜 및 아세톤으로 초음파 세척되었다. 또한 침식시험 전 각각의 시편은 1/10 mg 단위로 최초의 무게가 측정되었다.

상기의 4종 시편에 대하여 단면을 따라 경도가 측정되었다(그림 1). 그림 1에서 보는 바와 같이 Cr/Mo강 모재는 400~450 HV이며, nitride 및 Cr carbide 코팅은 공히 800~850 HV 그리고 boride 코팅은 1600~1800 HV인 것으로 나타났다. Boride 코팅내에서 나타나는 경도의 변화는 표면층에는 FeB 상이 생성되었고 안쪽에는 Fe<sub>2</sub>B가 생성되었기 때문이다. 그림 2는 4종의 시편에 대하여 입자침식시험을 위한 polishing을 하기 전의 표면 모습을 보여주고 있다.

2.2 입자침식시험

본 연구에서 사용된 입자침식시험 장치는 미국 Cincinnati 대학 및 General Electric사가 보유하고 있는 시험장치를 참고하여 제작된 air stream type의 장치(그림 3)이다. 입자침식장치의 주요 구성품은 ① 공기압축 및 저장장치 ② 압축공기 가열장치 ③ 입자주입장치 ④ 입자가속관 ⑤ 시편 stage ⑥ 집진장치 ⑦ 연료공급장치 ⑧ control unit ⑨ 냉각장치 등이다.

입자속도는 LDV(Laser Doppler Velocimeter) 혹은 High Speed Photography 등으로 측정하거나 혹은 측정된 유체의 압력을 이용하여 computer modeling으로 구할 수 있다. 본 시험에서는 가속관에서 pitot tube를 이용하여 유체의 total pressure 및 static

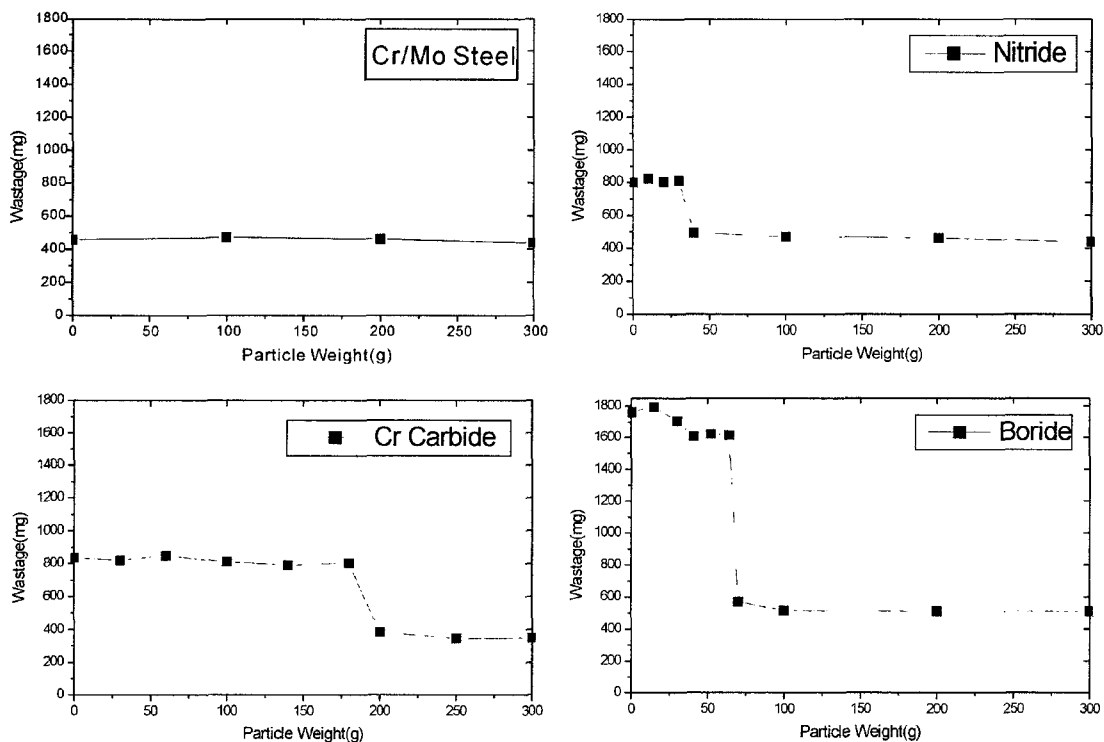


Fig. 1. The cross-sectional hardness contours for 4 specimens.

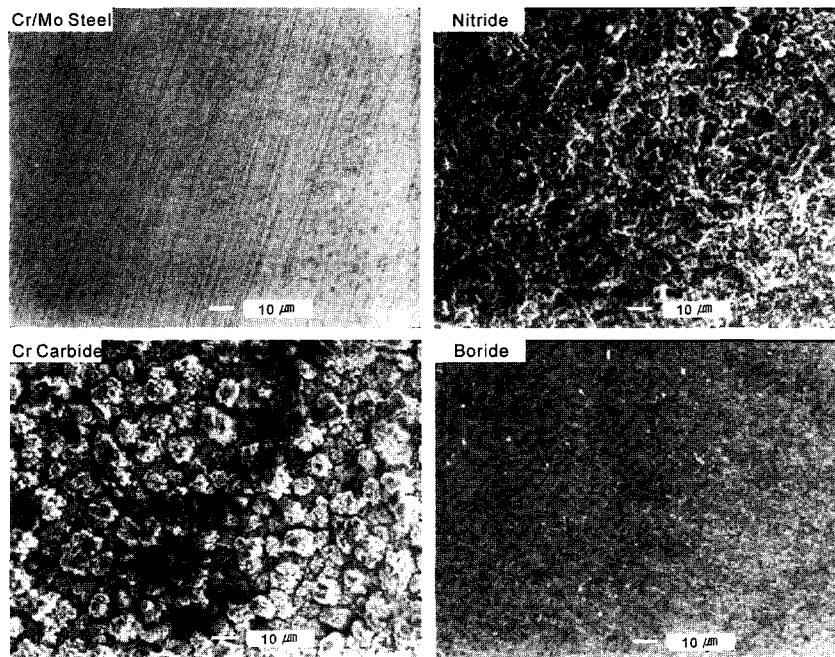
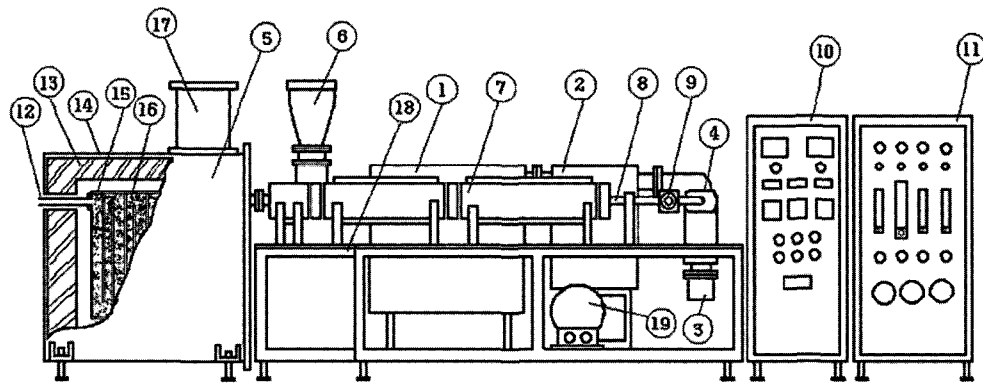


Fig. 2. Top surfaces of 4 specimens before erosion tests.



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. 3. Particle erosion tester used in this study.

pressure를 측정하여 유체의 속도를 계산하고, 상용의 “Fluent” 소프트웨어를 사용하여 입자의 속도를 modeling하였다.

침식율은 시편에 충돌한 입자의 무게에 대한 침식된 소재의 무게(혹은 두께)비로 규정한다. 즉, 침식율 = 시편의 무게 손실량/충돌입자의 무게이다.

여기서 충돌입자의 무게는 입자충돌 각도 및 시편의 단면적에 따라 달라질 것이며 아래의 식으로부터 계산될 수 있다.

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

$W_i$  : 충돌입자의 무게

$W_t$  : 가속관에 주입된 입자의 총무게

$a$  : 시편 단면적

$A$  : 가속관 단면적

$\alpha$  : 입자충돌각도

입자침식시험은 실제 스팀터빈의 최대 침식환경과 동일한 조건에서 수행되었으며 아래와 같다.

침식온도 : 590°C  
 입자충돌각도 : 30° 및 90°  
 입자속도 : 300 m/s  
 침식입자 : 평균입도 100 μm의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

입자침식시험에서 1개 시편 당 총 400 g의 입자가 가속관에 일정한 속도(10 g/min)로 주입되었으며, 매 100 g의 입자가 주입되었을 때마다 시편의 침식손실량이 1/10 mg 단위로 측정되었다.

### 3. 연구결과 및 고찰

코팅되지 않은 Cr/Mo강 모재를 포함하여 4종의 시편에 대하여 입자충돌각도를 30°와 90°로 변화하면서 침식율을 각각 측정하였다. 그림 4는 입자충돌각도 30°에서 측정된 침식율을 나타내고 있다. 입자충돌 각도가 30°인 경우에는 boride 코팅, Cr carbide 코팅, nitride 코팅 그리고 코팅되지 않은 Cr/Mo 강 순서로 침식율이 높아지고 있다. Nitride 코팅을 제외하고는 3종의 시편 침식량은 입자주입량에 따라 linear하게 증가함을 보여주고 있다. Nitride 코팅의 경우, 입자 주입량 200 g 이후 침식율이 상대적으로 크게 증가하는 이유는 코팅이 부분적으로 파단되어 떨어져 나간 현상 때문이다.

그림 5는 입자충돌각도 90°에서 측정된 4종의 시편의 침식율을 나타내고 있다. 코팅되지 않은 Cr/Mo강을 제외한 3종의 경질코팅은 입자충돌각도 90°에서의 침식량이 30°에서의 침식량보다 증가하였음을 보여주고 있다. 이러한 현상은 경질코팅과 Cr/Mo강의 침식기구가 다르기 때문이다. 즉, 경질코팅의 경우, 입자충돌각도 90°에서는 입자의 지속적인 충돌에 의하여 코팅의 표면에 미세균열이 먼저 발생하며, 계속된 입자들의 충돌에 의하여 균열이 성

장 및 상호 연결되어 결국은 미세한 조각으로 떨어져 나가는 방식인 microcracking & chipping에 의하여 침식되었다. 그러나 입자충돌각도가 낮은 30°인 경우에는 코팅 표면이 수많은 입자들에 의하여 미세하게 깎여나가는 microcutting & chipping에 의하여 침식이 주로 일어났다. 그래서 경질코팅의 경우, 낮은 입자충돌각도에서는 microcutting에 의한 침식이 주로 일어나지만, 높은 충돌각도에서는 microcracking & chipping이 주요한 침식기구가 되었다. 그러나 상대적으로 연성인 Cr/Mo강의 경우에는 낮은 입자충돌각도에서는 주로 microcutting과 사출/단조(extrusion & forging)에 의한 침식이 동시에 일어나는 반면, 높은 입자충돌각도에서는 주로 사출/단조에 의한 침식기구가 지배하기 때문이다. 즉, 고온에서 연성을 갖는 입자들에 의하여 Cr/Mo강의 표면에 움푹 들어간 자국(craters)이 먼저 생기게 되며, 그 후 지속적인 입자충돌로 인하여 자국으로부터 사출효과에 의하여 얇은 판이 튀어나오게 되며, 이 얇은판은 연속적인 입자충돌로 인하여 단조화되어 균열이 발생하며 결국은 조각으로 떨어져 나가는 소위, 사출/단조 침식기구에 의하여 손상되었다.

그림 5에서 보는 바와 같이 입자충돌각도 90°에서는 코팅되지 않은 Cr/Mo강의 침식율이 nitride와 Cr carbide 코팅보다 낮은 것으로 나타난다. 이러한 현상은 앞서 기술하였듯이 주어진 시험조건에서 microcracking & chipping에 의한 경질코팅 침식량이 사출/단조에 의한 Cr/Mo 강 침식량보다 크기 때문이다. 그러나 boride 코팅의 경우에는 입자충돌각도 30°와 90°에서 가장 우수한 내입자침식성을 나타내고 있다. 결론적으로 스팀터빈의 최대 침식조건에서 boride 코팅이 가장 우수하고 안정된 내입자침식 특성을 나타내었다.

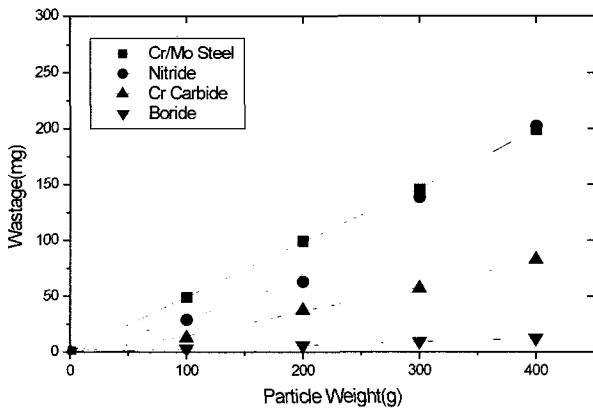


Fig. 4. Particle erosion rates of 4 specimens tested at impingement angle of 30°.

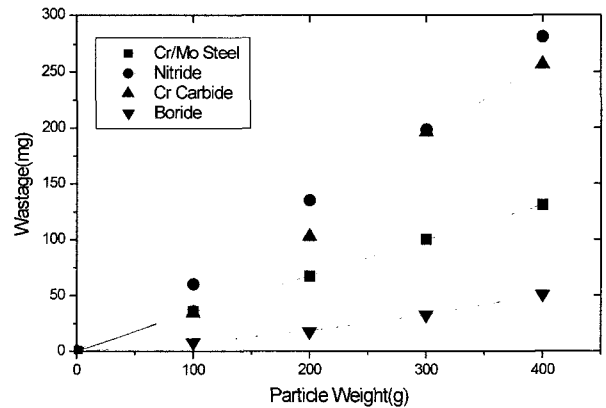


Fig. 5. Particle erosion rates of 4 specimens tested at impingement angle of 90°.

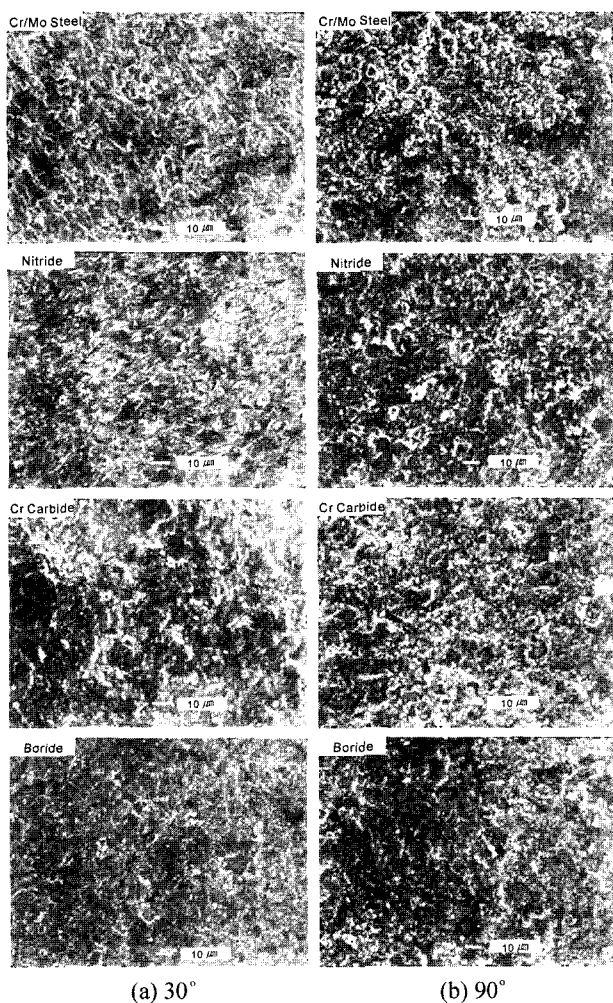


Fig. 6. Eroded surfaces of 4 specimens tested at impingement angles of 30° and 90°.

그림 6은 4종의 시편에 대하여 입자충돌각도 30°와 90°에서 침식된 표면을 나타내고 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이 Cr/Mo강의 경우, 입자충돌각도 90°에서의 표면이 30°에서의 표면보다 거친 것으로 관찰되고 있다. 이러한 현상은 앞서 기술한 바와 같이, 30°에서는 주로 microcutting과 사출/단조에 의한 침식이 혼합되어 일어난 반면, 90°에서는 주로 extrusion-forging에 의하여 침식되었음을 보여주고 있다. Nitride 코팅의 경우에는 30°에서는 microcutting에 의하여 침식이 일어났으나, 90°에서는 microcracking & chipping에 의하여 침식되었다는 것을 보여주고 있다. Cr carbide 코팅은 30°에서는 microcutting과 microcracking & chipping의 혼합 침식기구에 의하여 손상되었으며, 90°에서는 주로 microcracking & chipping에 의하여 주로 침식된 것으로 보여진다. Boride 코팅의 경우는 30°에서는 주로 microcutting에 의하여 침식되었고 90°에서는 microcracking & chipping에 의하여 침식이 일

어났으나, 침식 정도는 미미한 것으로 보여진다.

표 2에서는 4종의 시편에 대하여 입자충돌각도 변화에 따른 주요 침식기구의 요약이 나타나 있다.

Table 2. Summary of erosion mechanisms for 4 specimens

시편 종류	입자충돌각도	
	30°	90°
Cr/Mo 강	Microcutting + 사출/단조	사출/단조
Nitride 코팅	Microcutting & Chipping	Microcracking & Chipping
Cr Carbide 코팅	Microcutting + Microcracking	Microcracking & Chipping
Boride 코팅	Microcutting	Microcracking & Chipping

#### 4. 결 론

코팅되지 않은 Cr/Mo강, nitride 코팅, Cr carbide 코팅 그리고 boride 코팅의 4 시편에 대하여 스팀 터빈의 최대 침식조건에서 내입자침식성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 코팅되지 않은 Cr/Mo강은 입자충돌각도 30°에서의 침식율이 90°에서의 침식율보다 크다.
2. Nitride 코팅, Cr carbide 코팅 그리고 boride 코팅은 공히 입자충돌각도 30°에서의 침식율이 90°에서의 침식율보다 작다.
3. 4종의 시편 중에서 boride 코팅의 내입자침식성이 가장 우수하였다.

#### 참고문헌

1. W. Tabakoff, M. Metwally, A. Hamed, Transactions of the ASME, 117 (1995) 146-148.
2. B. Formanek, Materials Science Forum, 163 (1994) 317-322.
3. Chatterjee-Fischer. R, and Schaaber. O, Proceedings of Heat Treatment, Stratford-upon-Avon, Metals Society (1976) 27-30.
4. K. C. Goretta and A. C. Thompson, Materials Science and Engineering, 56 (1993) 7-10.
5. A. V. Levy, Surface and Coatings Technology, 36 (1988) 387-406.
6. M. Jiang, K. C. goretta, EPRI Journal (1990) 30-37.
7. A. V. Levy, J. Yan and J. Patterson, Wear, 108 (1986) 61-76.
8. B. Venkataraman, G. Sundarajan, Surface and Coatings Technology, 73 (1995) 177-184.