한국표면공학회지
Journal of the Korean Institute of Surface Engineering
Vol. 35, No. 6, Dec. 2002
<연구논문>

Boride 코팅의 내입자침식성평가

이의열, 김종하

안동대학교 공과대학 신소재공학부

Evaluation of Particle Erosion Resistance for the Boronized Cr/Mo alloy

E. Y. Lee, J. H. Kim

Division of Materials Science and Engineering, Andong National University
388 Songchoen, Andong, Kyungbuk 760-749, Korea

Abstract

Steam turbine components of power generators are subjected to severe damages from the particle erosion by iron oxides (mainly Fe_3O_4) which are formed due to the oxidation of boiler tubes, causing high costs for maintaining and repairing. One of the practical ways to minimize the particle erosion is to apply the erosion resistant boride coating on the turbine components which is composed of boride apply. But the evaluation of its performance has not been carried out. A particle erosion tester, which can offer the erosion condition of steam turbine components, was developed to evaluate the performances of the boronized Cr/Mo alloy. The result showed that the boronized Cr/Mo alloy showed superior resistance to particle erosion to the bare Cr/Mo alloy in all test conditions.

Keywords :

1. 서 론

화력발전 스팀터빈의 부품들(노즐, 블레이드, radial seal, 노즐박스 및 조절밸브 등)은 보일러 기관에서 나오는 미세한 철산화물 입자들에 의하여 심각한 침식을 입고 있다.[1, 2] 철산화물은 부품의 Fe 성분이 고온에서 스팀과 반응하여 주로 Fe_3O_4 형태로 생성하게 된다. 금속표면에 생성된 철산화물은 부품 모재로부터 박리되어 고온, 고속의 스팀에 섞여, 터빈의 노즐, 블레이드 등의 부품에 충돌하여 국부적으로 충격하중을 가하게 됨으로써 부품의 표면을 침식하게 된다. 부품의 입자침식은 터빈의 효율을 저하시키고, 유지 및 보수비용을 증가시키며, 또한 터빈의 overhaul 기간이 늘어나는 문제점을 발생시킨다.[3, 7]

입자침식 효과를 감소시키기 위하여 사용될 수 있는 방안은 ①철산화물 생성을 억제하는 방안 ②철산화물 입자를 제거하는 방안 ③침식손상을 최소화하는 방안이 주로 제시되고 있다.[4] 이 중, 해당 금속부품에 직접 내침식 코팅을 적용하여 침식손상을 최소

E-mail : eylee@andong.ac.kr

화하는 ③방안이 가장 효율적인 것으로 알려져 있다.[4, 7] 일반적으로, 열처리를 통해 금속의 표면에 붕소(B)를 확산, 침투시킴으로써 생성되는 (Fe, X)B 및 (Fe, X)$_2$B로 구성되는 boride코팅이 탁월한 것으로 보고되고 있다(X는 모재의 합금원소).[8, 9] 그러나 실제 스팀터빈의 사용환경에서, boride코팅의 내구성 및 신뢰성 평가가 체계적으로 수행되지는 못하였다. 본 연구에서는 Cr/Mo강 표면에 확산열처리법에 의하여 생성된 boride코팅에 대하여 다양한 침식조건(침식온도, 입자속도, 입자충돌각도 및 boride의 두께)에 따른 내입자침식성을 비교, 평가하였다.

2. 실험내용 및 방법

2. 1 시편준비

입자침식시험에 사용되는 금속은 실제 화력발전용 스팀터빈의 부품에 사용되는 것과 동일한 재질인 Cr/Mo강을 사용하였으며, 사용된 Cr/Mo강의 화학적조성이 Table 1에 나타나 있다. Cr/Mo강의 표면에 boride층을 생성하기 위하여 Ekabor powder를 사용하여 pack cementation법을 적용하였으며, Cr/Mo강의 표면에 생성된 boride코팅의 단면사진이 Fig. 1에 나타나 있다. Pack cementation 온도는 900℃이며 8시간동안 처리되었다. 단면사진에서 관찰되는 것 처럼, Cr/Mo강의 표면에 생성된 boride층은 가장 바깥쪽에 생성된 (Fe, X)B와 그 바로 밑에 생성된 (Fe, X)2B, 그리고 확산층으로 뚜렷이 구분된다. X는 모재의 합금원소이며 주로 Cr이다. 이 실험에서 사용된 boride코팅의 두께는 50-85㎛이

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
IWt.%	0.14 −0.20	0.50 −0.80	0.020	0.015	0.15 −0.50

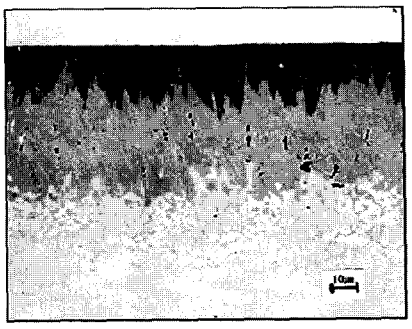


Fig. 1 Cross-sectional microphotograph of boride coating

며, boride층의 경도는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 1800-2100HV로서 코팅되지 않은 Cr/Mo강의 경도(300-400HV)에 비해 현저히 증가하였음을 알 수 있다.

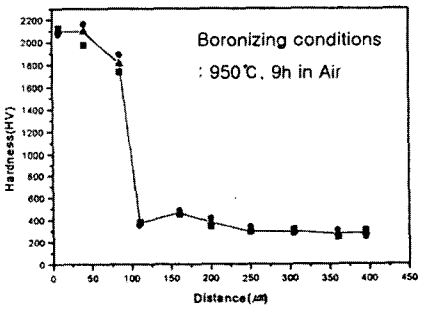
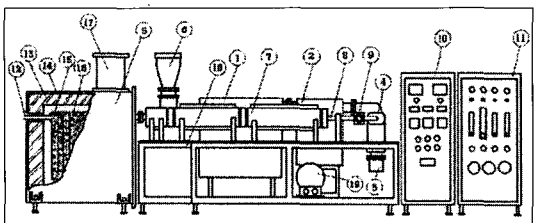


Fig. 2 Hardness contour of boride coating

2. 2 입자침식시험

입자침식시험은 실제 스팀터빈의 침식환경을 유사하게 재현할 수 있도록 자체적으로 설계, 제작한 입자침식시험기를 사용하였다.(Fig. 3) 시험에 사용된 침식입자는 실제 스팀터빈의 주요 침식입자인 Fe_3O_4(평균입도 100㎛)를 사용하였으며, 총 400g의 침식입자를 10g/min.의 일정한 속도로 주입하였다. 침식시험에서는 침식온도, 입자충돌각도, 입자속도 및 boride의 두께등을 변화시켜 침식조건에 따른 침식율을 비교, 측정하였으며 상세한 침식시험변수는 Table 2에 나타나 있다.



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	INSULATER	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

Table 2 Parameters used for particle erosion test

내 용	조 건
침식온도	20, 300, 550℃
입자충돌각도	15, 30, 60, 90°
입자속도	150, 200, 250, 300m/s
boride의 두께	50, 60, 70, 85㎛

3. 연구결과 및 고찰

3. 1 침식온도변화에 따른 침식율 비교

온도변화에 따른 내침식성을 평가하기 위하여, 90°의 입자충돌각도와 180m/s의 충돌입자속도에서, 침식시험 온도를 20℃, 300℃ 및 550℃로 변화시키면서 침식손실량을 측정, 비교하였다. Fig. 4과 Fig. 5는 코팅되지 않은 시편과 boride 코팅된 시편의 침식온도 변화에 따른 침식율을 나타낸다.

두 그림에서, boride의 침식율이 코팅하지 않은 Cr/Mo강의 침식율보다 수 배 가량 낮은 것을 알 수

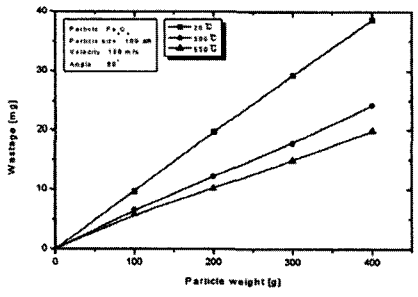


Fig. 4 Comparison of erosion rate at various temperatures for uncoated Cr/Mo steel

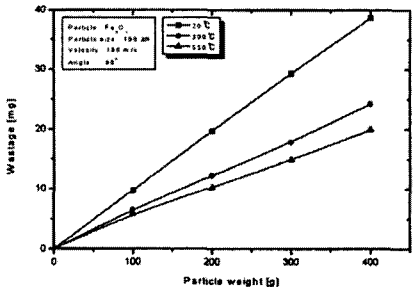
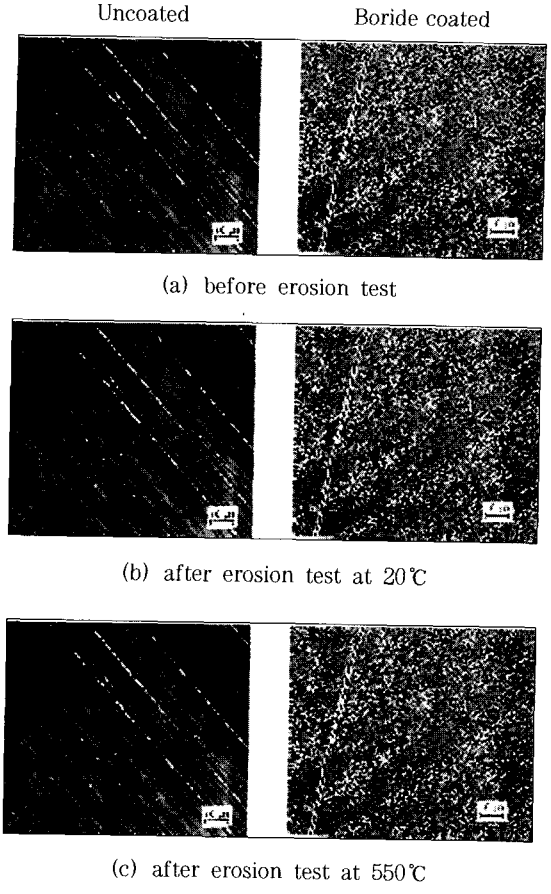


Fig. 5 Comparison of erosion rate at various temperatures for boronized Cr/Mo steel Uncoated Boride coated

있다. 특히, Fig. 4에서 코팅되지 않은 시편은 침식온도가 높을수록 침식율이 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 실험적 결과는 온도가 증가할수록 시편의 연성 및 탄성이 증가하여, 높은 온도에서는 입자에 의한 충돌에너지의 상당부분이 시편의 탄성에너지 또는 변형에너지로 전환되어 침식율이 감소하는 것으로 판단된다. Boride코팅은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 침식율이 온도에 비례하지 않는다. 300℃에서의 boride코팅의 침식율은 20℃에서의 침식율보다 작은 값을 나타내지만 전체적인 침식경향은 같다. 즉, 침식시험 초기에는 큰 침식율을 가지지만 침식이 어느 정도 진행된 후에는 침식율이 크게 낮아지며 이 후 일정한 값을 유지하는 경향을 보인다. 반면, 침식온도 550℃에서는 침식입자의 증가에 따라 침식량이 일정하게 증가하여 처음부터 일정한 침식율을 유지하고 있다. Fig. 6은 코팅되지 않은 시편과 boride코팅된 시편에 대해 입자침식시험을 행하기 전과 각각 20℃와 550℃에서 입자침식시험을 행한 후의 표면상태를 관찰한 SEM사진이다. 코팅되지 않은 Cr/Mo강의 경우에는, 고온에서 보다 심한 침식 및 변형이 일어날 뿐 전형적인 연성재료의 침식기구를 보여주고 있다.

그러나 boride코팅의 경우, 상온에서는 boride의 높은 경도로 인하여 뚜렷한 cracking & chipping 현상을 나타내고 있으며, 고온에서는 온도에 따른 boride코팅의 물리적성질의 변화로 인하여 상온에



(a) before erosion test

(b) after erosion test at 20℃

(c) after erosion test at 550℃

Fig. 6 Comparison of eroded surfaces between the uncoated and coated Cr/Mo steel

서 보다 미세한 microcracking & chipping 현상이 나타나는 것으로 관찰된다.

3. 2 입자속도 변화에 따른 침식율 비교

화력발전용 보일러에서 스팀터빈으로 유입되는 입자는 주로 철산화물(대부분 Fe_3O_4)이며, 입자의 입도는 20㎛~250㎛이고, 입자의 최대속도는 300 m/s인 것으로 알려져 있다.[3,4] 입자유동속도에 따른 시편의 침식율을 측정하기 위하여, 침식온도 300℃, 입자충돌각도 90°의 조건에서 입자속도를 150m/s, 200m/s 그리고 250m/s으로 변화시키면서 코팅되지 않은 Cr/Mo강과 boride코팅된 Cr/Mo강의 침식량을 비교, 측정하였다. Fig. 7 및 8는 코팅되지 않은 Cr/Mo강과 boride코팅된 Cr/Mo강의 입자유동속도에 따른 침식율을 각각 나타내고 있다. 두 그래프를 비교 해보면, boride의 내입자침식성이 코팅되지 않은 Cr/Mo강에 비해 10배 이상까지 향상되었음을 알 수 있다. 한편, 코팅되지 않은 시편과 boride 코팅된 시편 모두 입자유동속도가 증가할수록 침식율이 증가하고 있다. 이것은 입자유동속도가 증가할수록 입자충돌에너지가 증가하기 때문이다. Fig. 7와 8에서 보는 바와 같이 코팅되지 않은 시편의 경우, 3가지 입자유동속도에서 충돌입자량에 따라 침식량이 일정하게 증가하는 반면, boride 코팅된 시편의 경우, 앞에서 언급했듯이 입자침식 초기에는 침식율이 높게 나타나지만 침식이 진행되면서 보다 낮은 침식율과 함께 안정된 침식경향을 보여준다.

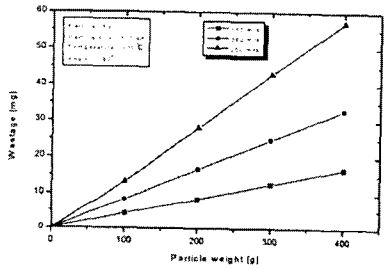


Fig. 7 Comparison of erosion rate at various particle velocities for uncoated Cr/Mo steel

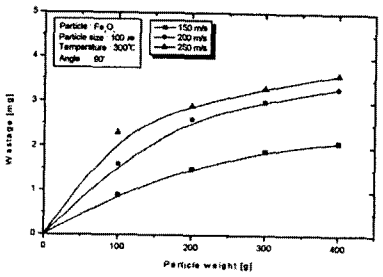


Fig. 8 Comparison of erosion rate at various particle velocities for boronized Cr/Mo steel

3. 3 입자충돌각도 변화에 따른 침식율

Boride코팅과 코팅되지 않은 Cr/Mo강에 대하여, 입자충돌각도를 각각 15°, 30°, 60° 및 90°로 변화시키면서 침식율을 측정하였다. Fig. 9과 10은 코팅

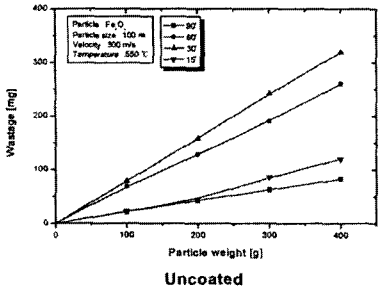


Fig. 9 Erosion rates of uncoated Cr/Mo steel at various particle impact angles

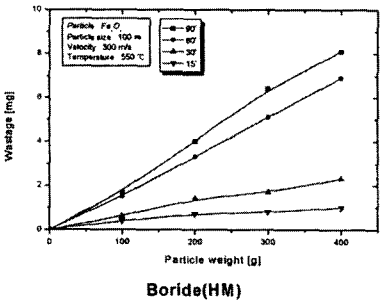


Fig. 10 Erosion rates of boronized Cr/Mo steel at various particle impact angles

되지 않은 Cr/Mo강과 boride코팅된 Cr/Mo강의 입자충돌각도 변화에 따른 침식율을 나타내고 있다. Fig. 9에서 보는 것처럼, 코팅되자 않은Cr/Mo강은 입자충돌각도가 60°및 30°에서의 침식율이 15°와 90°에서의 경우보다 크게 나타나고 있다. 반면, boride코팅은 높은 입자충돌각도(60, 90°)에서의 침식율이 낮은 입자충돌각도(15, 30°)의 경우보다 크다는 것을 Fig. 10에서 알 수 있다. 이러한 현상은 입자충돌각도에 따라 입자의 충돌력과 침식기구가 다르기 때문인 것으로 판단된다.

3. 4 Boride두께변화에 따른 침식율 비교

Boride코팅 두께변화에 따른 침식율을 비교 평가하기 위해, 50, 60, 70, 85㎛ 두께의 boride층을 가진 시편에 대하여, 침식온도는 20℃와 550℃, 입자유동속도는 180 m/s 와 300m/s, 그리고 입자충돌각도는 90°로 하여 침식시험을 행하였다.

Fig. 11은 침식온도 20℃, 입자유동속도 180m/s 입자충돌각도 90°의 조건에서 다양한 boride코팅두께를 갖는 시편에 대하여 침식율을 측정한 결과를 보여주고 있다. 상기조건에서는 코팅두께가 50㎛에서 85㎛로 증가할수록 침식율이 증가하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 12는 침식온도 550℃, 입자유동속도 300 m/s, 입자충돌각도 90°의 조건에서 각각 50㎛, 60㎛, 70㎛ 그리고 85㎛ 두께의 boride 코팅에 대하여 입자침식시험 한 결과를 나타내고 있다. 550℃에서 시험된 코팅두께 범위 (150~85㎛)에서, 70㎛ 정도의 코팅두께가 가장 내침식성이 우수한 반면, 85㎛ 두께의 코팅이 가장 침식율이 높은 것으로 나타나고 있다. 이러한 이유는 현재의 실험결과로는 규명하기 어려우나, boronizing 열처리 후 잔류응력과 코팅내의 $(Fe, Cr)B$상과 $(Fe, Cr)_2B$ 상간의 열팽창계수 차이에 의하여 발생하는 응력 등이 코팅두께와 관련이 있을 것으로 추정된다.

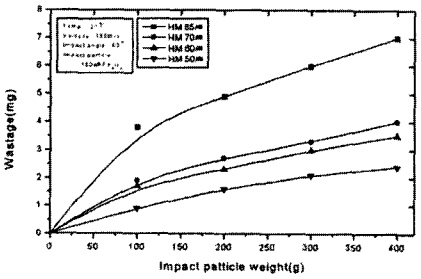


Fig. 11 Erosion rates with coating thickness (test temp. : 20℃)

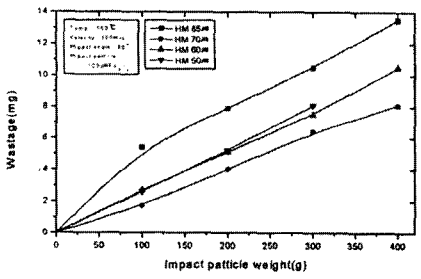


Fig. 12 Erosion rates with coating thickness (test temp. : 550℃)

4. 결 론

본 연구에서는 코팅되지 않은 Cr/Mo강과 boride 코팅된 Cr/Mo강에 대한 입자침식시험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Cr/Mo강은 boronizing을 통해 수배의 경도증가와 약 5-15배의 내입자침식성의 향상을 보여준다.

2) 코팅되지 않은 Cr/Mo강은 온도가 증가할수록 침식율이 감소하며, 모든 온도에서 침식율이 linear하게 증가하는 반면, boride코팅의 경우 20℃와 300℃에서는 parabolic한 침식율 변화를 나타내며 550℃에서는 linear한 침식율 변화를 보여주고 있다.

3) 코팅되지 않은 Cr/Mo강과 boride 코팅된 시편 모두, 입자유동속도가 150m/s에서 250m/s로 입자충돌 속도가 증가할수록 침식율이 증가한다.

4) Cr/Mo강은 입자충돌각도가 15°와 90°일 때보다 30°및 60°에서 높은 침식율을 나타내는 반면, boride코팅은 입자충돌각도가 15°에서 90°로 증가함에 따라 침식율도 함께 증가하는 경향을 나타낸다.

5) 상온에서는 boride층의 두께가 두꺼울수록 내입자침식성이 감소하나, 고온(550℃)에서는 침식경향이 일정치 않은 가운데, 70㎛의 두께에서 가장 우수한 내입자침식성을 보여준다.

received day : 2002. 7.15
accepted day : 2002.11.13

참고 문헌

1. W. Tabakoff, M. Metwally, A. Hamed : Transactions of the ASME, 117 (1995) 146
2. R. Chatterjee-Fischer : Proceedings of the Eight International Conference on Chemical Vapor Deposition, Paris, (1981) 508
3. R. Chatterjee-Fischer and O. Schaaber : Proceedings of Heat Treatment, Stratfordupon-Avon, Metals Society, London, (1978) 27
4. K. C. Goretta and A. C. Thompson : Materials Science and Engineering, (1993) 17
5. A. V. Levy : Surface and Coatings Technology, 36 (1988) 387
6. M. Jiang and K. C. goretta : EPRI Journal, (1990) 30
7. S. Usmani and S. sampath : Research Summary, (1996)
8. B. Venkataraman, G. Sundarajan : Surface and Coatings Technology, 73 (1995) 177
9. A. Levy and G. Hickey : Wear, 108 (1986) 61