

## Vanadium-Boride코팅의 고온 내입자침식성 평가

이 의 열<sup>1,†</sup> · 김 종 하<sup>1</sup> · 정 세 일<sup>1</sup> · 이 선 호<sup>2</sup> · 엄 기 원<sup>2</sup><sup>1</sup>안동대학교 신소재공학부 금속재료공학과<sup>2</sup>두산중공업 기술연구소

(2015년 2월 3일 접수, 2015년 4월 29일 수정, 2015년 4월 29일 채택)

## Evaluation of High Temperature Particle Erosion Resistance of Vanadium-Boride Coating

E. Y. Lee<sup>1,†</sup>, J. H. Kim<sup>1</sup>, S. I. Jeong<sup>1</sup>, S. H. Lee<sup>2</sup>, and G. W. Eum<sup>2</sup><sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea<sup>2</sup>Corporate R&D Institute Doosan Heavy Industries & Construction Co., Changwon 642-792, Korea

(Received February 03, 2015; Revised April 29, 2015; Accepted April 29, 2015)

The components in ultra super critical (USC) steam turbine, which is under development for high efficient power generation, are encountering harsher solid particle erosion by iron oxide scales than ones in the existing steam turbines. Therefore, the currently used boride coating will not be able to hold effective protection from particle erosion in USC system and should be replaced by new particle erosion resistant coatings. One of the best protective coatings developed for USC steam turbine parts was found to be vanadium-boride (V-boride) coating which has a hardness of about 3000 Hv, much higher than that of boride, 1600~2000 Hv. In order to evaluate particle erosion resistance of the various coatings such as V-boride, boride and Cr-carbide coatings at high temperature, particle erosion test equipments were designed and manufactured. In addition, erosion particle velocity was simulated using FLUENT software based on semi-implicit method for pressure linked equations revised (SIMPLER). Based on experimental results of this work, the vanadium-boride coating was found to be superior to others and to be a candidate coating to replace the boride coating.

**Keywords :** USC steam turbine, particle erosion, vanadium-boride coating, boride coating, particle velocity

## 1. 서 론

현재 국내에서 운용되는 화력발전소용 스팀 터빈엔진은 고온과 고압의 스팀환경에서 운전되기 때문에 보일러 튜브에서 발생하는 산화물 입자의 고속충돌에 의해 터빈 부품(turbine blades, valve stem, radial seal 및 nozzles 등)들이 심각한 입자 침식 손상을 입는다<sup>1-3)</sup>. 임계온도 스팀 터빈 노즐박스의 경우, 550 °C 이상의 온도에서 최대 200 m/s의 속도를 갖는 20-200 μm 크기의 철산화물 입자들에 의하여 침식되고 있다. 스팀터빈 부품의 입자침식은 엔진의 효율을 저하시키고, 엔진의 유지, 보수비용을 증가시키는 등의 문제점을 발생시킨다<sup>4-6)</sup>. 이와 같은 입자침식에

의한 손상을 감소시키기 위하여 현재 적용되는 방법은 스팀 터빈의 부품에 침봉코팅(boride)과 같은 내입자침식성 코팅을 적용하는 것이다<sup>7,8)</sup>. 그러나 침봉코팅은 550 °C 정도의 운전온도를 갖는 기존의 임계온도 스팀터빈 분위기에서는 만족한 내입자침식성을 가지나, 증기압력 및 온도를 증가시킨 초초임계(ultra super critical-USC) 스팀 터빈 발전설비는 현재보다 50 - 70 °C 높은 온도에서 운전되기 때문에 침봉코팅의 내입자침식성이 크게 감소한다. 일반적으로 초초임계 스팀터빈은 증기 압력 및 온도가 3500 psi, 593 °C 이상에서 운전되고 있다. 실제 초초임계 발전 설비의 입자침식 환경은 아래 Table 1과 같다. 스팀터빈 부품에 사용되는 모재(12Cr강 조성과 유사)에 50 - 60 μm 두께를 갖는 침봉코팅의 620 °C에서 입자침식율은 550 °C의 경우보다 약 30 % 정도 높은 결과를 보여 주고 있기 때문에,

<sup>†</sup> Corresponding author: eylee@andong.ac.kr

**Table 1. Particle erosion conditions of USC steam turbine**

Items	Conditions
Temperature	593-649 °C
Mean Velocity of Impact Particles	200 m/s
Angles of Impact Particles	0-90°
Impact Particles	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Size of Impact Particles	20-200 μm

**Table 2. Specimens used for particle erosion tests**

Specimens	Chemical Composition(wt.%)
Base Metal (B50A365B)	10Cr-0.05C-0.05Mn-0.02P-0.015S -0.8Mo-0.3Ni-0.15V-0.2Si-0.04N- Fe(balance)
Boronized(Boride)	-
Cr Carbide Coated	75Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> +25NiCr
V-boride Coated	-

**Table 3. Pack compositions for boride and V-boride coatings**

Coatings	Pack Composition (wt.%)
Boride	5B <sub>4</sub> C-2KBF <sub>4</sub> -93Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
V-boride	60(30Fe-70V)-3NH <sub>4</sub> Cl-37Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

**Table 4. Process parameters for Cr-carbide HVOF spray coating**

Oxygen Quantity Supplied	290 l/min.
Propan Gas Quantity Supplied	86 l/min.
Feeding Rate of Powder	53 g/min.
Rate of Gun Movement	10,000 mm/min.
Repeated Times of Spray	6 Times
Spray Distance	230 mm
Spray Angle	90°
Mean Coating Thickness	180 μm

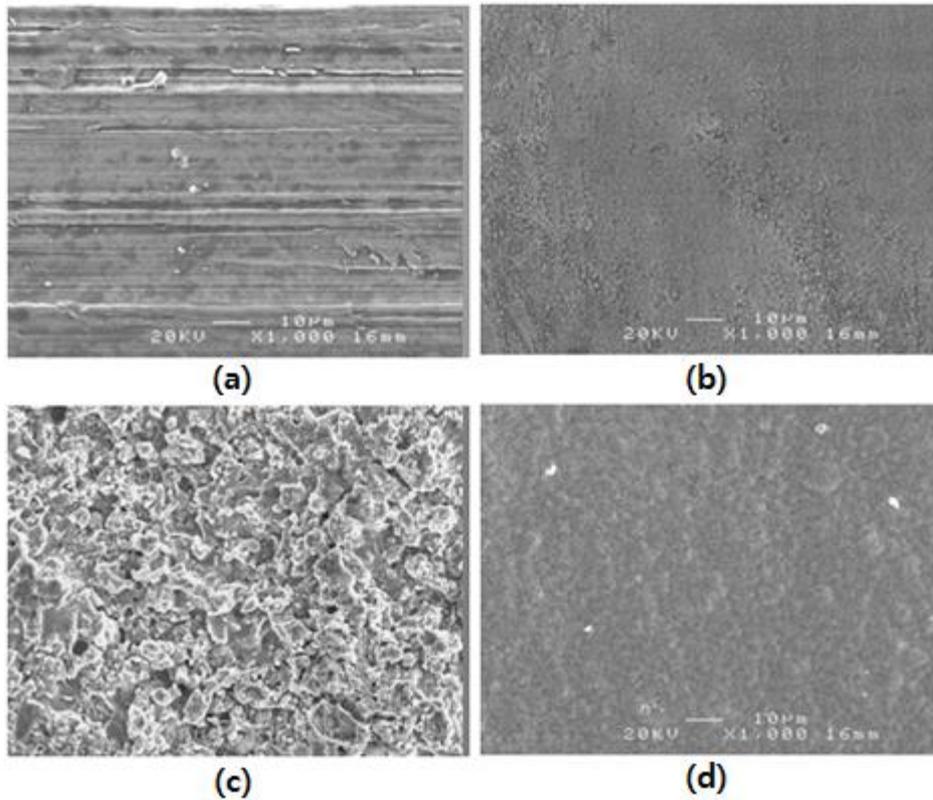
기존의 침붕코팅은 USC 터빈 부품에 적용하기에는 적합하지 않다<sup>7,8)</sup>. 따라서 초초임계 스팀터빈의 운전환경에서 우수한 내입자침식성을 유지할 수 있는 경화코팅을 개발하여 침붕코팅을 대체하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 B와 V를 순차적으로 확산한 V-boride코팅을 스팀터빈 모재 강 표면에 생성하여 내입자침식성을 침붕코팅 및 Cr-carbide 코팅 등과 비교, 평가하여, 초초임계 스팀터빈의 부품에 대

한 적용 가능성을 판단하는 실험적 근거를 확보하고자 하였다. 또한 대체코팅을 초초임계 스팀 터빈의 부품에 적용할 경우, 코팅의 신뢰성을 확보하기 위하여 스팀 터빈의 운용 환경과 거의 유사한 조건에서 내입자침식 시험이 수행되어야 하나, 아직 국내에서는 스팀터빈의 운용 조건을 거의 재현하는 실험은 수행되지 못하였다. 본 연구에서는 초초임계 스팀터빈의 입자 침식 환경과 거의 동일한 조건을 재현하는 입자침식시험 장치를 설계, 제작하여 내입자침식성을 평가하였다. 입자침식 시험에서 유체에 포함된 입자의 경우는 다량의 입자가 유동하고 실제 속도가 거의 초음속 정도이기 때문에 laser doppler velocimeter (LDV) 및 high speed photography 등의 장비를 이용한 측정이 거의 불가능하다. 입자침식 시험에서 유체의 속도는 실험적으로 측정된 유체의 압력을 이용하여 계산할 수 있으나, 입자의 속도는 계산식으로 구하는 것이 불가능하다. 유체의 속도는 pitot tube를 이용하여 유체의 수평 방향의 전체압력과 수직 방향의 정압력을 측정하여 유체의 속도를 계산할 수 있다. 입자의 속도는 계산된 유체의 속도를 바탕으로 FLUENT 프로그램을 사용하여 전산 modeling하였다. 본 연구에서는 입자침식장치를 자체 설계 및 제작하고, 유체 및 입자의 속도를 각각 계산 및 전산 modeling하여, V-boride 코팅, 침붕코팅 및 Cr-carbide 코팅 등의 내입자침식성을 비교, 평가하였으며, 향후 입자침식시험을 신뢰성 있게 수행할 수 있는 기초를 제공할 것으로 판단된다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 시편준비

내입자침식성을 비교, 평가하기 위하여 4종의 시편이 준비되었으며, Table 2에 나타나 있다. 4종의 시편 중 모재강(B50A365B강) 및 Cr-carbide 코팅 시편은 두산 중공업으로부터 제공되었으며, 침붕코팅 및 V-boride코팅 시편은 자체 제조되었다. 모재 강의 화학적 조성은 Table 2에 나타나 있다. 모재강의 표면에 침붕코팅 및 V-boride 코팅은 pack cementation 공정에 의하여 생성되었다. Cr-carbide (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr) 코팅은 High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)를 사용하여 외주 업체에서 만들어졌다. 침붕코팅 및 V-boride 코팅을 생성하기 위한 pack의 조성은 확산원소 source, 활성화제와 희석제로 구성되어 있으며, 조성은 아래 Table 3에 나타나 있다. Cr-carbide 코팅을 만든 HVOF의 공정조건은 Table 4와 같다. Pack 분말은 볼밀에서 혼합 및 분쇄되어 입도는 150 μm 이하 이다. 입자침식 시험에서 시편의 크기가 일정 크기 이상이 되면 유체의 흐름을 크게 방해할 수 있기 때문에 적정 크기의 시편이 요구된다. 그래서 시편은 직경 8 mm, 두께 8 mm 크기의 disk 모양으로 가공되었으며, 가공 중 생성된 응력을 제거하기



**Fig. 1.** Top surfaces of four specimens before erosion tests; uncoated (a), boride coated (b), Cr-carbide coated (c) and V-boride coated (d) specimens.

위하여 550 °C의 진공에서 annealing 처리되었다. 침봉코팅 및 V-boride 코팅을 생성하기 위한 pack cementation 공정에서, 침봉코팅의 경우 모재 강을 pack 속에 넣은 후, Ar 분위기에서 900 °C에서 3시간 동안 확산 열처리 하였고, V-boride코팅 생성의 경우, 모재 강에 침봉코팅을 먼저 생성한 후에 V 확산용 pack 속에서 1000 °C, 3시간 동안 확산 처리 하였다. Fig. 1에서 입자침식시험을 하기 전 4종의 시편 표면 모습을 보여주고 있다. 생성된 침봉코팅 및 V-boride 코팅의 침식면 및 상 분석은 주사전자현미경(JSM-6300, JEOL), 전자탐침미세분석기(EPMA-1600, JEOL) 및 X-선 회절기(D/MAXPAPID-S, RIGAKU)를 사용하여 수행되었다. 또한 코팅의 경도값은 미소 Vickers 경도기(MMT-X, MATSUZAWA)를 사용하여 하중 50g, 압입시간 15초의 조건으로 3 points에서 측정하여 평균값을 얻었다.

## 2.2 입자침식시험

### 1) 장치 제작 및 입자침식시험

입자침식시험 장치는 초초임계 스팀 터빈의 침식 환경 (Table 1)을 거의 재현할 수 있는 조건의 설계 기준으로 자체 제작되었다. 입자침식시험 장치는 air stream type이며, 주요 구성 장치는 ①공기압축 및 저장장치 ②압축공기

가열장치 ③입자주입장치 ④입자 가속관 ⑤시편 stage ⑥ 집진장치 ⑦연료공급 장치 ⑧control unit ⑨냉각장치 등이 고 다양한 시험 조건을 충족할 수 있다. Fig. 2의 (a), (b)는 각각 입자침식시험 장치 및 가속관내의 유동장에 대한 개략도이다. 가속관의 직경은 15.7 mm, 길이는 2.5 m 이며, 관로 내부 2 m 지점에 시편이 위치하고 있다. 가속관 내의 3 지점에서 온도 및 유체 압력을 측정할 수 있는 열전대 (thermocouple) 및 pitot 튜브가 설치되었다. 장치의 운용에서 압축공기 가열장치의 승온 능력은 800 °C까지 가열하는데 약 2시간 소요되었으며, 600 °C에서 유속을 최대 400 m/s까지 높일 수 있다. 입자가 유동하는 가속관 내에서 정상상태 (steady state)의 유속을 얻기 위하여 길이 2.5 m의 원형관으로 제작되었고, 압축공기 예열장치에서 나오는 고속의 유체 및 입자가 가속관을 통과하여 시편 stage에 이르는 동안 유체 및 입자의 온도 강하를 방지하기 위하여 가속관 주위에 항온 가열장치가 부착되었다. 실제 스팀터빈에서는 유체가 증기이지만, 장치 제작의 복잡성으로 인하여 본 실험에서는 압축공기로 대체되었다. 입자 주입장치는 수평 screw의 회전속도 (rpm)를 조절하여 평균 100 μm 크기의 입자를 0 - 100 g/min. 범위에서 일정하게 venturi관을 통하여 고속의 유체 흐름 속으로 주입할 수 있도록 제작되었

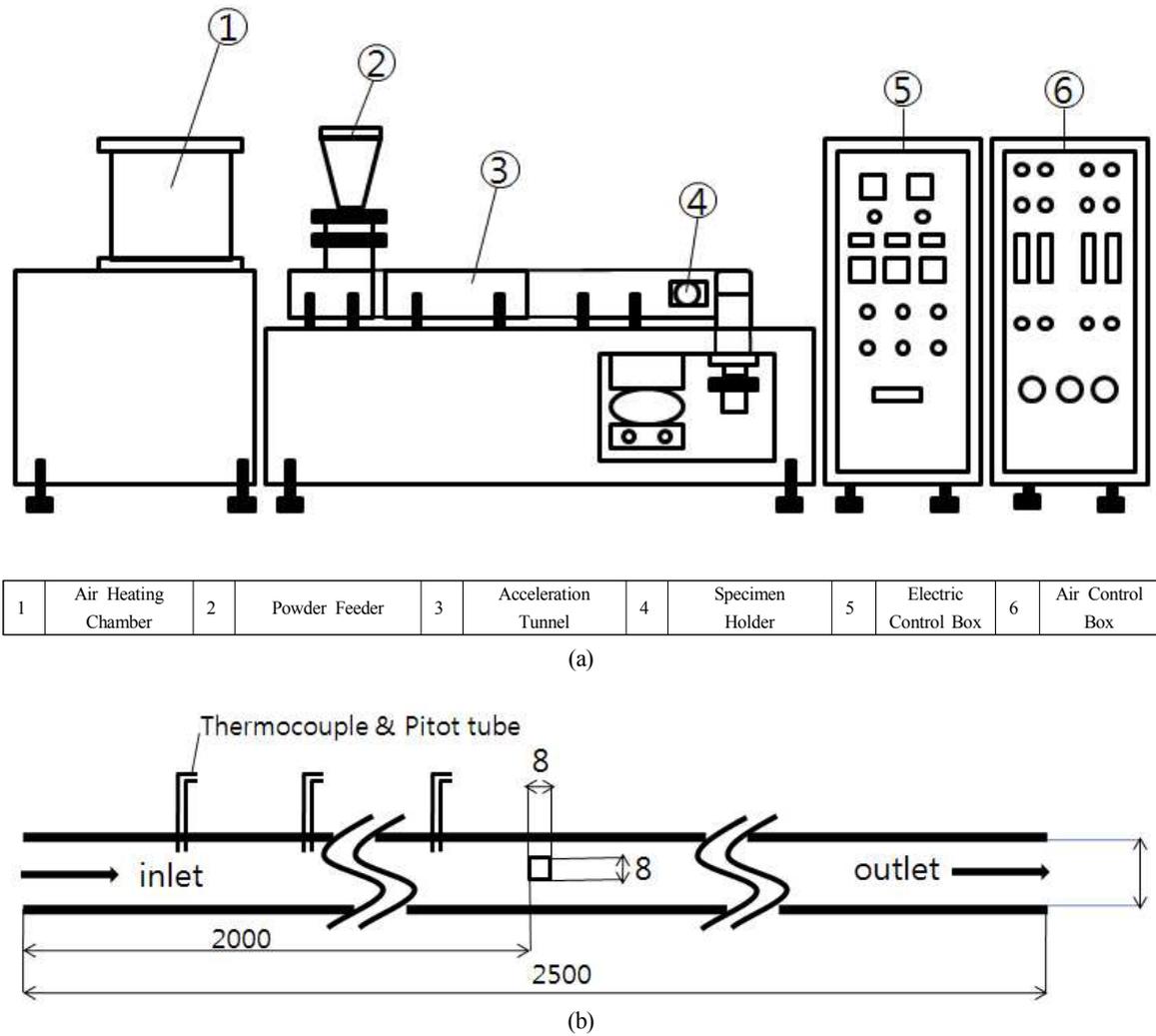


Fig. 2. Schematic diagram of particle erosion tester (a) and schematic geometry of the flow field in acceleration tube (b).

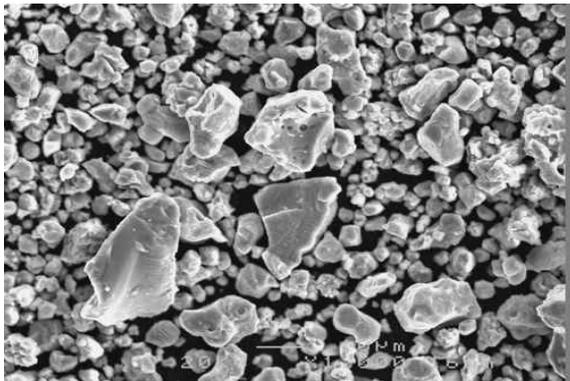


Fig. 3. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> particles used for particle erosion test.

다. 입자침식시험은 초초임계 스팀터빈 엔진의 침식환경과 거의 유사한 조건에서 수행되었으며 그 조건은 아래 Table

5와 같다. 본 실험에서 사용된 입자는 구형과 각형이 혼합된 평균 입도가 100  $\mu\text{m}$ 인 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>이며, Fig. 3에 보여진다. 입자침식시험에서 각 시편 당 총 400 g의 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 입자가 일정하게 10 g/min의 속도로 가속관에 주입되었으며, 매 100 g의 입자가 주입되었을 때마다 입자 침식에 의한 시편의 무게 손실량 (wastage)이 1/10 mg 단위로 측정되었다. 입자침식에 의한 시편의 무게 손실량은 전체 주입 입자량 (400 g)에 대한 무게 손실량으로 나타내고 있다. 본 실험의 시험온도(621  $^{\circ}\text{C}$ ) 및 시험시간(10분씩 4회) 조건에서는 4종의 시편이 내산화성을 가지지만, 실제 스팀터빈 환경에서는 입자침식과 더불어 산화가 발생할 것이다. 그러나 본 실험에서는 동일한 시험조건에서 4종의 시편에 대하여 내 입자침식성을 비교, 평가하였기 때문에 시험 중 산화 발생 여부는 고려되지 않았다.

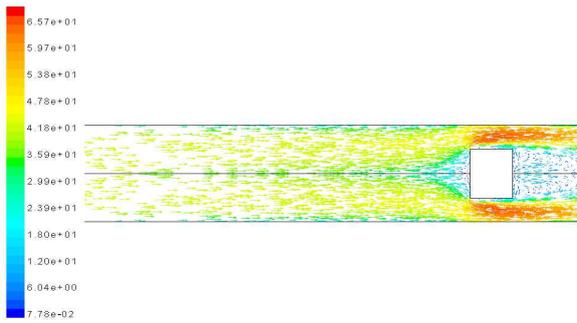


Fig. 4. Velocity vector of the flow field with the particles whose diameter is 100  $\mu\text{m}$  at flow rate of 400 l/min.

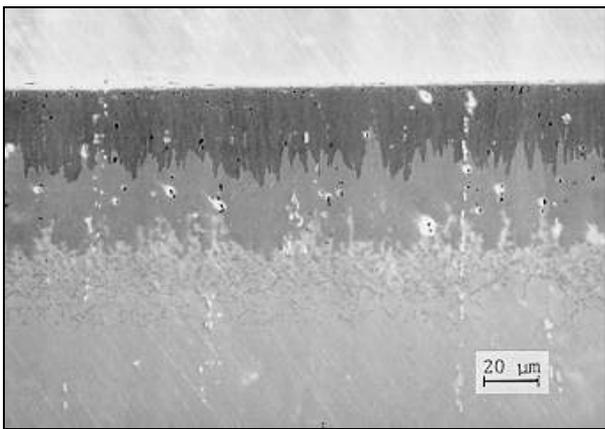


Fig. 5. Cross-sectional SEM image of boride coating.

## 2) 유체 및 입자속도의 계산

유체의 속도를 계산하기 위하여 가속관의 3 지점에서 pitot 튜브를 사용하여 차압력(유체의 전체 압력-유체의 정압력)이 측정되었다. 유체의 흐름이 이상적이라고 가정할 때, pitot 튜브를 이용한 차압 측정으로 가속관의 한 점에서 유체의 속도가 아래 식으로 부터 계산될 수 있다. 입자의 속도는 전술된 바와 같이 계산식에 의거하여 구할 수 없기 때문에 유체의 속도를 근거하여 전산 modeling으로 구할 수 있다. 입자속도는 실험적으로 측정된 유체의 속도를 바탕으로 상용의 FLUENT 프로그램을 사용하여 Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Revised (SIMPLER) algorithm을 이용하여 구하였다. SIMPLER는 유한차분법(finite difference method)의 수치해석 방법이다. 유한차분법에 적용되는 지배방정식 및 유도식은 참고 문헌에 나타나 있다<sup>9)</sup>. 유동은 비압축성 정상상태의 축대칭 난류 유동으로 가정하였으며, 방위각(Azimuthal) 방향의 평균유동은 없다고 가정하였다. 또한 입자는 완전 구형이고, 입자와 입자간 상호 충돌은 없다고 가정하였다. Fig. 4는 직경 100  $\mu\text{m}$ 의 입자가 포함된 유체가 400 l/min으로 유입되는 경우 유체의 속도벡터를 나타낸 결과이다.

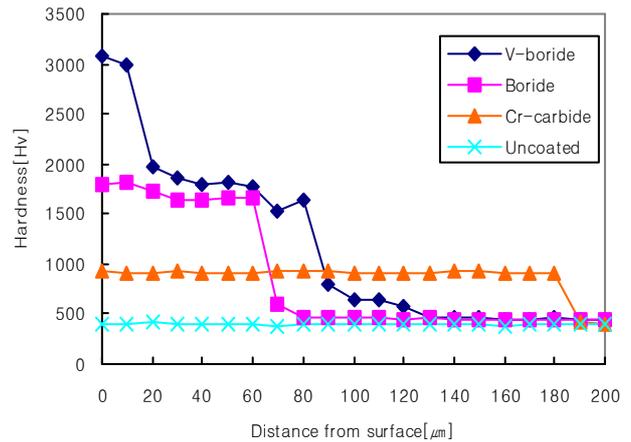


Fig. 6. Depth profile of hardness of four specimens.

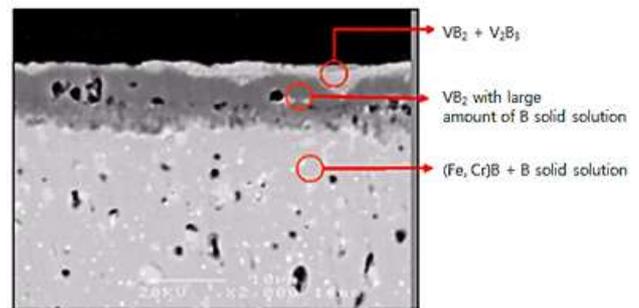


Fig. 7. Cross-sectional SEM image of V-boride coating.

$$V = 1.0967(h_v/d)^{1/2}, h_v = P_t - P_s$$

V : 유체 속도 (m/s)

$h_v$  : 차압력 ( $\text{kg/m}^2$ )

$P_t, P_s$  : 전체압력 및 정압력 ( $\text{kg/m}^2$ )

d : 유체 밀도 ( $\text{g/m}^3$ )

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 침봉코팅 및 V-boride코팅의 미세조직 및 경도

Fig. 5는 침봉코팅의 SEM 단면 사진이며, 표면에서 30  $\mu\text{m}$  두께의 검은색 영역은 (Fe,Cr)B상이며, 아래 40  $\mu\text{m}$  두께의 회색 영역은 (Fe,Cr)<sub>2</sub>B 상이다. 고합금강에 생성되는 침봉코팅의 전형적인 형상이다. (Fe,Cr)B상은 (Fe,Cr)<sub>2</sub>B상 보다 취성이 높으며, 열팽창계수가 낮기 때문에 침봉시 생성이 바람직하지 않으나, 고합금강의 경우 피할 수 없는 현상이다. 침봉코팅의 경도는 Fig. 6에서 보는바와 같이 1600-1800 Hv 인 것으로 나타난다.

Fig. 7에서 보이는 것은 모재강 표면에 생성된 V-boride코팅의 단면모습이며, 표면에서 약 10  $\mu\text{m}$  두께의 V-boride층(주로 V<sub>2</sub>B<sub>3</sub>와 VB<sub>2</sub>로 구성)과 그 아래의 약 70  $\mu\text{m}$  두께

**Table 5. Experimental conditions for particle erosion tests**

Temperature	621 °C
Impact Angles of Particles	30, 45, 60, 90°
Particle Velocity	200 m/s
Particles & Size	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , 100 μm

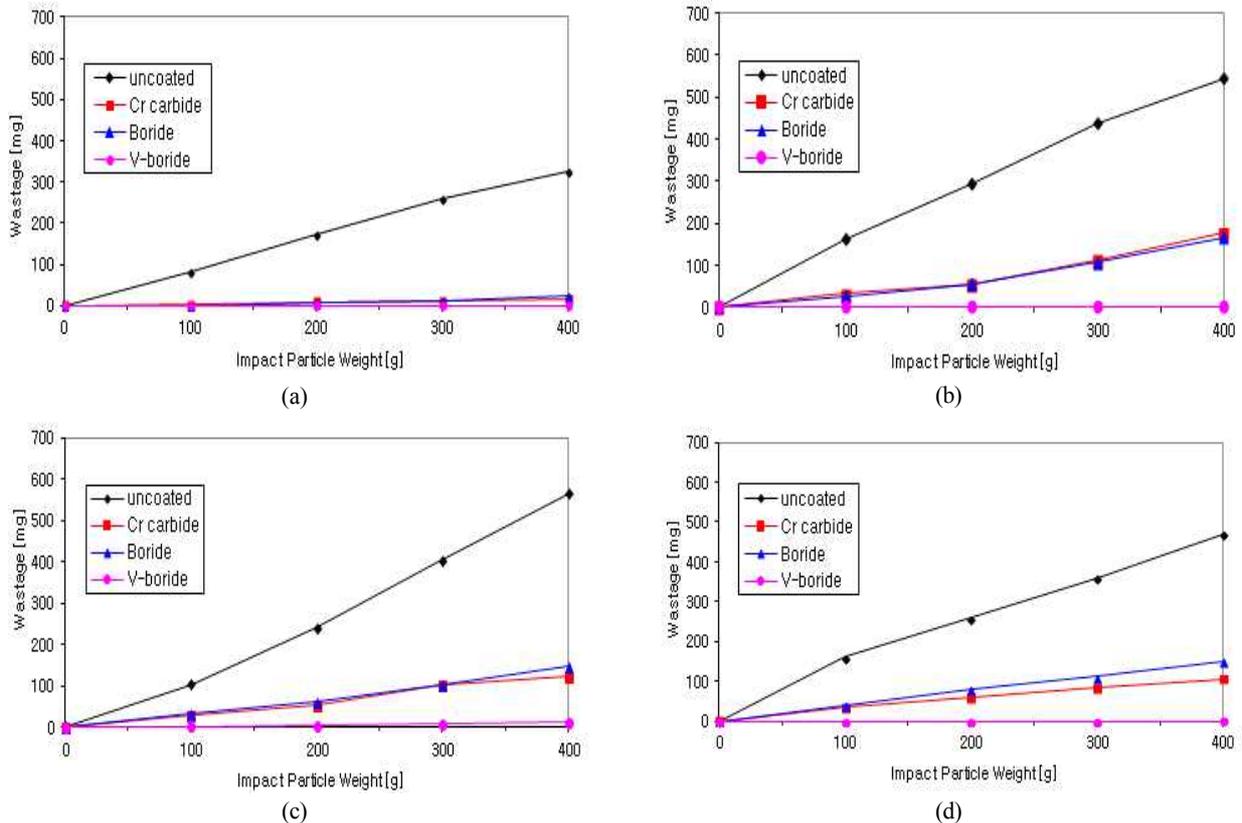
의 (Fe,Cr)<sub>2</sub>B 상으로 된 침봉층으로 구성되어 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 V-boride 층은 표면에서부터 1-2 μm 두께의 (VB<sub>2</sub> + V<sub>2</sub>B<sub>3</sub>) 층과 9-10 μm 두께의 VB<sub>2</sub> 상과 B 고용체상이 혼합되어 있으며, V-boride 층 아래의 침봉층은 약 70 μm 두께의 (Fe,Cr)<sub>2</sub>B 상(약간의 B 고용체상 포함)으로 구성되어 있다.

또한 V-boride코팅을 포함한 4종의 시편에 대하여 단면을 따라 측정된 비커스 경도는 Fig. 6에 나타나며, 코팅되지 않은 모재강은 약 400 H<sub>v</sub>, Cr carbide 코팅은 약 900 H<sub>v</sub>, boride 코팅은 1600 ~ 1800 H<sub>v</sub>인 것으로 측정되었다. 이에 비해 V-boride코팅은 표면에서 약 10 μm까지 약 3000 H<sub>v</sub>의 매우 높은 경도를 유지하였으며, 그 아래 약 80 μm 까지는 침봉코팅과 비슷하거나 약간 높은 경도를

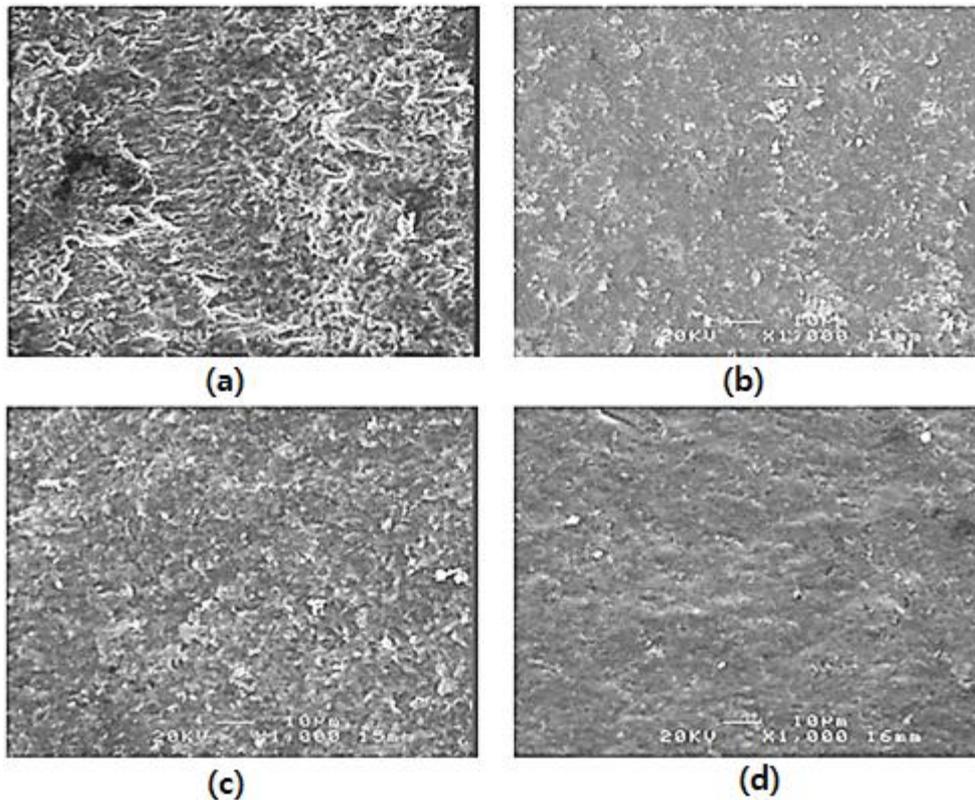
보여주고 있다. 전술한 바와 같이 모재의 표면에 생성된 V-boride 층은 B의 침입확산과 V의 치환확산으로 생성된 V<sub>2</sub>B<sub>3</sub>와 VB<sub>2</sub>로 인하여 높은 경도를 나타내고 있다. V-boride 코팅이 침봉코팅의 두께보다 비교적 얇은 것은 V의 확산계수가 B보다 상대적으로 낮기 때문이다.

**3.2 입자침식시험 결과**

4종의 시편들에 대하여 Table 5에 나타난 침식시험조건 즉, 621 °C의 온도와 200 m/s의 속도를 가지는 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 입자를 30°, 45°, 60°와 90°로 다양하게 입자충돌각도를 변화시키면서 침식량을 측정하였다. Fig. 8에서는 각각의 입자충돌각도에서 측정된 입자 침식량을 나타내고 있다. 입자충돌 각도가 30°인 경우, V-boride코팅을 비롯한 침봉코팅, Cr carbide 코팅과 같은 경화코팅을 갖는 시편은 공히 침식이 거의 일어나지 않은 반면, 코팅되지 않은 모재강은 상당한 침식량을 보여주고 있다. 30°의 충돌 각도에서 3 종류의 경화 코팅이 침식되지 않은 이유는 낮은 입자 충돌 각도로 인하여 입자의 충돌 에너지가 크지 않고 코팅 표면의 경도가 높기 때문이다. 입자 충돌 에너지가 상대적으로 큰 충돌 각도 45°인 경우에는 코팅되지 않은 모재강이 가장 많은 침식량을 나타내고 있으며, 침봉코팅과 Cr carbide 코팅 시편은



**Fig. 8.** Erosion wastage of 4 specimens tested at various impingement angles: (a) 30°, (b) 45°, (c) 60° and (d) 90°.



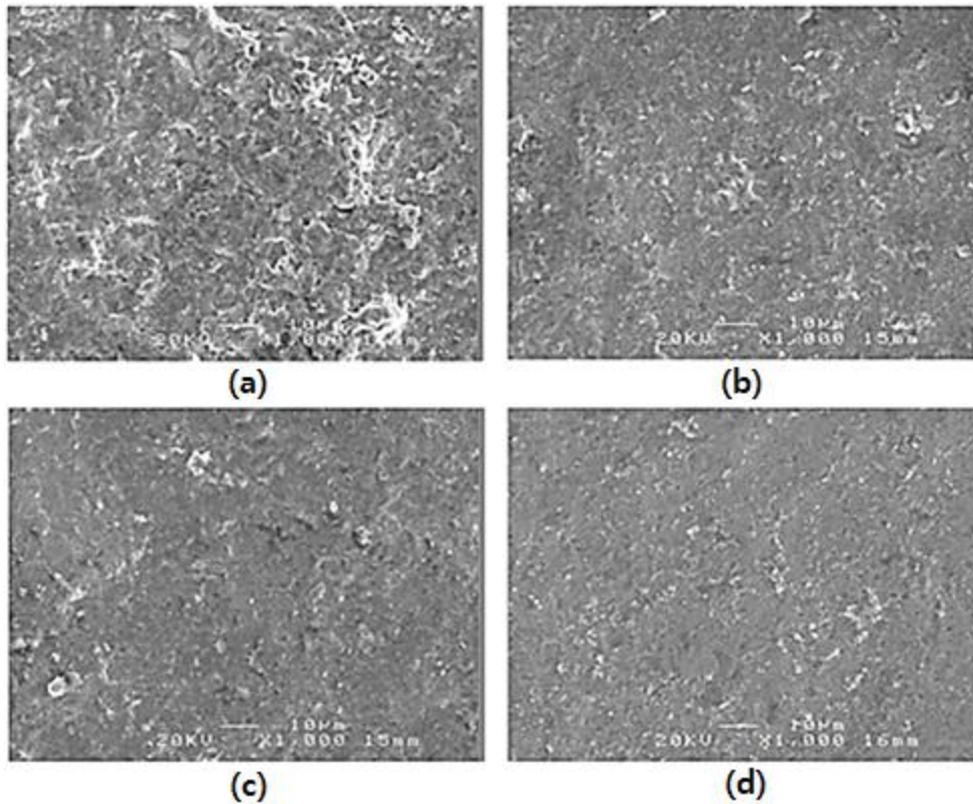
**Fig. 9.** Eroded surfaces of four specimens tested at impingement angle of 30°: uncoated (a), boride coated (b), Cr-carbide coated (c) and V-boride coated (d) specimens.

상대적으로 적은 침식량을 보여주고 있다. 반면 V-boride 코팅된 시편은 침식량이 거의 측정이 되지 않을 정도로 우수한 내입자침식성을 보여주고 있다. 입자충돌각도가 60°인 경우는 Fig. 8에 나타난 바와 같이, 코팅되지 않은 모재강이 가장 많은 침식량을 나타내며, 상대적으로 침식량이 적은 침봉코팅과 Cr-carbide 코팅된 시편은 거의 동일한 침식 정도를 보이고 있다. 반면, V-boride 코팅된 시편은 타 시편에 비해 가장 적은 침식량을 보여주어 가장 우수한 내입자 침식성을 보여주고 있다. 입자 충돌 에너지가 가장 높은 충돌각도 90°에서 수행된 침식시험에서는 입자 충돌각도 60°에서 나타난 침식량의 경향과 비슷한 현상을 나타내고 있다. 즉, V-boride 코팅된 시편은 침식량이 거의 측정되지 않을 정도로 우수한 내입자침식성을 보여주고 있으나 다른 경화 코팅은 상대적으로 많은 침식량을 보여주고 있다. 이와 같이 V-boride코팅은 기존의 다른 경화코팅(침봉코팅, Cr-carbide 코팅)에 비하여 초초임계 환경의 모든 입자 충돌 각도에서 침식량이 거의 없을 만큼 매우 우수한 내입자침식성을 보여주고 있다. 결론적으로 V-boride 코팅은 기존의 침봉코팅을 대체하여 초초임계 스팀터빈 부품에 적용할 수 있는 가능성을 실험적으로 보여주고 있다.

### 3.3 침식면 분석 결과

입자 충돌각도에 따른 침식기구를 이해하기 위하여 입자 침식시험이 수행된 시편들의 침식면을 관찰하였다. Fig. 9 과 Fig. 10은 각각 입자 충돌에너지가 비교적 작은 30°와 충돌에너지가 큰 90°에서 입자침식시험을 행한 4종의 시편들에 대한 침식면을 각각 보여주고 있다.

코팅되지 않은 모재강의 경우, 30°와 같은 낮은 입자충돌 각도에서는 수많은 입자들에 의하여 미세하게 깎여나가는 소위 microcutting에 의한 침식기구를 나타내고 있다. 반면, 90°의 충돌 각도에서는 입자들에 의한 반복적인 충돌로 인하여 craters가 생기고, 반복적인 입자 충돌로 craters로부터 얇은 판(platelets)이 튀어나오게 되며, 이 얇은 판이 연속적인 입자충돌로 인하여 단조화(forging)되고 균열이 발생하여 결국은 얇은 조각으로 떨어져 나가게 된다. 즉, 고온 연성을 가지는 모재강의 경우, 90°의 충돌 각도에서는 압출-단조 기구(extrusion-forging mechanism)에 의하여 침식이 일어남을 보여주고 있다. 그러나 Cr-carbide 코팅, 침봉코팅 및 V-boride 코팅의 침식은 입자 충돌 각도 30° 및 90° 공히 충돌되는 입자에 의하여 코팅 표면에 미세 균열이 먼저 발생하고, 계속된 입자들의 충돌에 의하여 균



**Fig. 10.** Eroded surfaces of four specimens tested at impingement angle of 90°: uncoated (a), boride coated (b), Cr-carbide coated (c) and V-boride coated (d) specimens.

열이 성장 및 상호 연결되어 결국은 미세한 조각으로 떨어져 나가는 방식인 microcracking & chipping과 microcutting에 의하여 침식이 일어난 것으로 나타난다. 이는 전형적인 경화 소재의 침식기구와 동일하다.

#### 4. 결 론

1. Pack cementation법에 의하여 모재강(B50A365B강)에 생성된 침봉코팅은 (Fe,Cr)B 및 (Fe,Cr)<sub>2</sub>B 상으로 구성되어 있으며, V-boride 코팅의 경우 표면에는 주로 V<sub>2</sub>B<sub>3</sub>와 VB<sub>2</sub> 상이며, 그 아래는 (Fe,Cr)<sub>2</sub>B 상의 침봉층으로 구성되어 있다.
2. V-boride코팅은 표면경도가 약 3000 H<sub>v</sub>로써 1600-2000 H<sub>v</sub>의 경도 값을 가지는 침봉코팅에 비해 매우 높은 경도를 보여주었다.
3. V-boride코팅은 초초임계 스팀 터빈 조건에서 수행된 입자침식시험에서 침식이 거의 일어나지 않아, 기존의 침봉코팅을 대체할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.
4. 코팅되지 않은 모재강은 입자 충돌각도 30°인 경우 주로 microcutting, 90° 충돌 각도에서는 주로 압출-단조 침식기구에 의하여 침식되며, Cr-carbide, 침봉코팅 및

V-boride 코팅의 경우에는 두 충돌 각도에서 주로 microcracking & chipping과 microcutting에 의하여 침식되었다.

5. 자체 설계 및 제작된 설비와 입자속도에 대한 전산 modeling을 통하여 스팀터빈의 운용 환경과 유사 조건에서 입자침식시험이 가능함을 보여주었다.

#### 후 기

이 논문은 2012 학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

#### References

1. W. Tabakoff, M. Metwally, A. Hamed, *J. Eng. Gas Turbines Power*, **117**, 146 (1995).
2. R. Chatterjee-Fischer, *Proceedings of the Eight International Conference on Chemical Vapor Deposition*, p. 508, *Electrochemical Soc.*, Paris (1981).
3. R. Chatterjee-Fischer and O. Schaaber, *Proceedings of Heat Treatment*, p. 27, Stratford-upon-Avon Metals Society, London (1976).
4. K. C. Goretta and A. C. Thompson, *Mater. Sci. Eng. A*, **161**,

- L7 (1993).
5. A. V. Levy, *Surf. Coating Tech.*, **36**, 387 (1988).
  6. S. T. Wlodek, *Electr. Power Res. Inst. Rep.*, **CS-5415**, 30 (1987).
  7. S. Usmani and S. Sampath, *JOM*, **48**, 51 (1996).
  8. B. Venkataraman and G. Sundarajan, *Surf. Coating Tech.*, **73**, 177 (1995).
  9. J. S. Vandergraft, *Introduction to Numerical Computation*, 149, Academic Press, New York (1983).