

Al-Zn-Zr 용사코팅층의 고체입자 충돌 침식특성에 미치는 봉공처리의 영향

허호성¹ · 김성종^{2,†}

¹목포해양대학교 대학원, 전라남도 목포시 해양대학로 91
²목포해양대학교 기관시스템공학부, 전라남도 목포시 해양대학로 91
(2022년 2월 6일 접수, 2022년 2월 16일 수정, 2022년 2월 16일 채택)

Effect of Sealing Treatment on Solid Particle Impingement Erosion of Al-Zn-Zr Thermal Spray Coating Layer

Ho-Seong Heo¹ and Seong-Jong Kim^{2,†}

¹Graduate school, Mokpo national maritime university, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

²Division of marine engineering, Mokpo national maritime university, Haeyangdaehak-ro, Mokpo-si, Jeollanam-do, 58628, Korea

(Received February 06, 2022; Revised February 16, 2022; Accepted February 16, 2022)

Several technologies are employed to protect substrates from corrosion and erosion damage. In particular, arc thermal spray coating technology is widely used as anti-corrosive technology for steel and concrete structures and is applied to offshore plants and petrochemical and drilling facilities. In this investigation, solid particle impingement erosion experiments were performed on an arc thermal spraying-coated specimen using 85% Al-14% Zn-1% Zr wire rod in KR-RA steel. This study investigated the effect of fluorosilicone sealing on the erosion resistance characteristics of the thermal spray coating layer. The erosion rates of the thermal spray-coated and sealed specimens were 4.1×10^{-4} and 8.5×10^{-4} , respectively. At the beginning of the experiment, the fluorosilicone sealant was almost destroyed by the impact of the solid particles. The destruction time for the coating layer was 10 minutes for the thermal spray-coated specimen and 13 minutes for the sealed specimens, indicating that the sealed specimens had better erosion resistance characteristics to solid particle impingement.

Keywords: Thermal spraying, Solid particle impingement, Erosion, Fluorosilicone, Sealing

1. 서론

금속의 부식과 침식으로부터 수명을 연장시키기 위해 여러 기술이 적용된다. 그 대표적인 예로써 페인팅, 희생양극법, 외부전원법 등이 있다 [1]. 그리고 내식성뿐만 아니라 침식 저항성을 향상시키기 위해 유/무기 코팅제 또는 용사코팅 기술이 적용되기도 한다 [2]. 특히, 아크 열용사 코팅기술은 미국과 일본과 같은 선진국에서 해양 플랜트, 석유화학, 시추시설과 같은 철강 및 콘크리트 구조물의 방식 기술로 널리 사용되고 있다 [3]. 그 예로, 선박용 재료인 KR-RA강에 알루미늄 용사코팅과 불소 실리콘계(Fluorosilicone) 봉공재를 적용한 경우 해양환경에서의 내식성이 향상되었다 [4]. 그리고 탄소강에 알루미늄-아연 용사코팅을 적용하여 현장시험한 결과 내식성이 현저하게 개선되었으며 봉공처리에 의해

더 우수한 내식성을 나타내었다 [5]. 이와같이 용사코팅 기술을 적용한 재료의 전기화학적 특성 연구는 활발히 진행중이며, 또한 캐비테이션 침식을 연구한 사례도 있다 [6]. 그러나, 국내는 물론 전세계적으로 고체입자 충돌 침식특성 연구는 미비하다 [7].

따라서, 본 연구에서는 선박용 재료인 KR-RA강에 85%Al-14%Zn-1%Zr 선재를 고온에서 용융시켜 모재에 고속으로 분사하여 급냉 응고시켜 다양한 특성을 향상시키는 아크 열용사 기술을 적용한 시편에 대하여 고체입자 충돌에 의한 침식(Solid particle impingement erosion : SPIE) 연구를 실시하였다. 그리고, 이러한 아크 열용사 코팅층을 불소 실리콘계로 봉공하여 고체입자 충돌 침식특성에 미치는 봉공재의 효과를 연구하였다.

2. 실험방법

2.1 시편 제작

KR-RA강에 대하여 85%Al-14%Zn-1%Zr 선재를 사

[†]Corresponding author: ksj@mmu.ac.kr

허호성: 석사과정, 김성종: 교수

Table 1. Chemical composition(wt%) and mechanical properties of KR-RA steel

C	Si	Mn	P	S	Fe	Tensile strength	Yield strength	Elongation
0.1617	0.013	0.659	0.0146	0.0076	Bal	463 MPa	312 MPa	23%

Table 2. Thermal spray coating conditions

Equipment		KMS-300 Arc spray machine
Coating material		85%Al-14%Zn-1%Zr
Sealing material		Fluorosilicone
Spray traveling speed		10 cm/s
Air pressure		5~6 bar
Wire traveling speed		12 m/min
Sealing method		painting with brush
Drying method	Spray coating	Room temperature
	Sealer coating	Heating

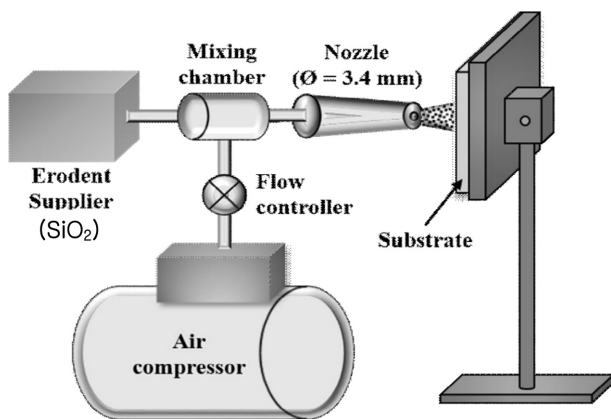


Fig. 1. Schematic diagram of solid particle impingement erosion apparatus

용하여 용사코팅을 실시하였다. 코팅 전 샌드 블라스팅 (Sand blasting) 과정을 통해 시험편 표면의 이물질 제거하였으며, 또한 코팅의 밀착성을 향상시키기 위해 조면형성제를 도포하였다. Table 1은 모재인 KR-RA강의 화학적 조성과 기계적 특성을 나타내었으며, Table 2는 용사코팅 조건과 봉공처리 조건을 나타낸 것이다. 시험 준비는 열 변형을 최소화하기 위해 냉각수가 공급되는 절단기를 사용하여 20 mm × 20 mm 크기로 가공 후 3 분간 초음파 세척을 실시하였으며 아세톤과 증류수로 추가 세척 후 진공챔버에서 24시간 건조하였다.

2.2 고체입자 충돌 침식실험

고체입자 충돌에 의한 침식실험은 ASTM G76-05 (Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets) 규정에 따라 실시하였다. SPIE 실험 개략도는 Fig. 1에 제시하였고 상세한 실험조건은 Table 3에 제시하였다. 실험에 사용

Table 3. Solid particle impingement erosion(SPIE) test conditions

Solid particle	Silica sand (SiO ₂)
Solid particle size	50 μm
Impingement angle	90°
Impact velocity	30 m/s
Solid particle feed rate	2.0 g/min
Test time	3, 6, 9, 12 min
Test temperature	25 °C
Nozzle to sample distance	10 mm

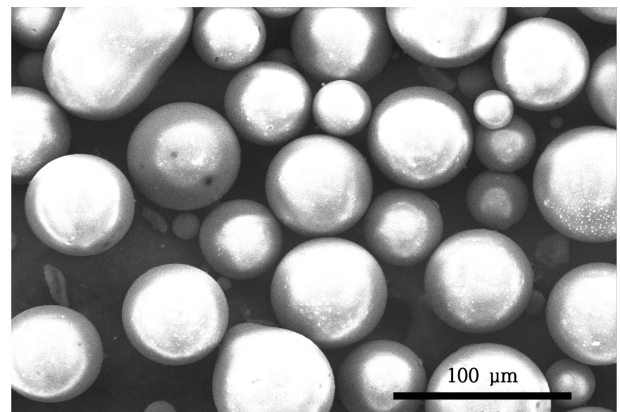


Fig. 2. Morphology of SiO₂ solid particles

된 침식실험용 고상입자는 구형의 SiO₂ 분말을 사용하였으며, 주사전자현미경(SEM) 촬영 결과를 Fig. 2에 제시하였으며 입자의 지름은 평균 50 μm로 측정되었다. SPIE 실험시간은 시험의 용사코팅층이 파괴될 때까지

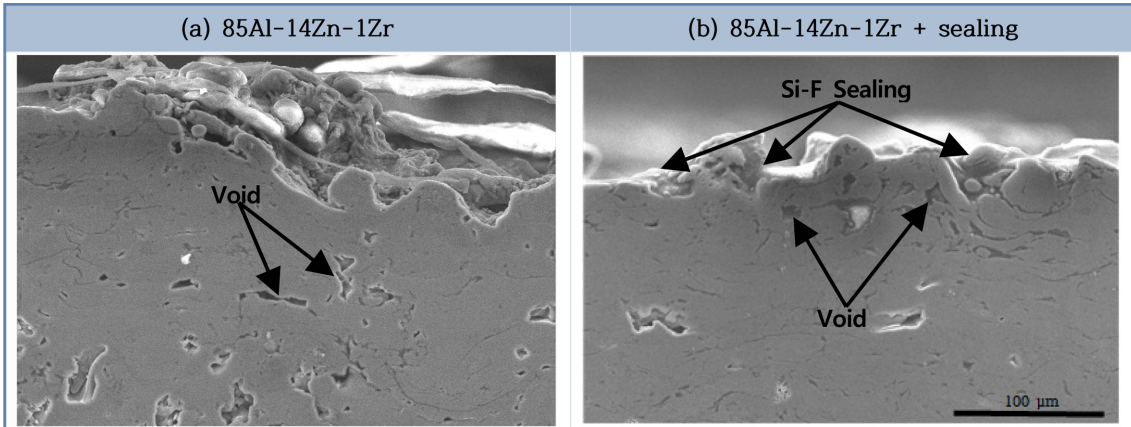


Fig. 3. Cross-sectional morphologies of 85Al-14Zn-Zr and 85Al-14Zn-Zr + sealing specimens

시행하였으며 3분 마다 무게 감소량, 표면거칠기 그리고 코팅층의 두께 변화를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 용사코팅된 시편과 용사코팅 + 봉공재 시편의 단면을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 두 시편 모두 용사코팅층 내부에서 기공을 확인할 수 있었다. 용사코팅 특성 상 고온 아크에 의해 용융된 입자가 모재에 급속하게 퍼지면서 이러한 용융입자들이 중첩된다. 그리고 용융입자에 포함되어 있는 기공, 공정과정 중 발생하는 미용융 입자에 의한 결함이 발생한다 [8]. 코팅층의 기공 또는 결함은 해수환경의 경우 염소 이온의 침투로 인해 내식성을 저하시키는 원인이 되므로 용사코팅된 표면에 봉공 처리를 실시하기도 한다. 알루미늄 용사코팅층에 불소 실리콘계 봉공재 사용 시 천연해수에서 부식전류밀도가 현저히 감소하였으며 이는 봉공재가 염소이온의 침투를 억제하여 내식성을 향상시킨다는 연구 결과도 있다 [4]. 봉공처리된 시편의 경우 확실하게 보이지는 않으나 용사코팅만 진행한 시편에 비해 표면의 기공을 봉공재가 실링하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 용사코팅된 시편과 용사코팅 + 봉공재 시편의 SPIE 실험 후 무게감량과 침식률을 나타낸 것이다. 용사코팅만 적용된 시편의 경우 약 10분 후, 봉공처리된 시편의 경우 약 13분 후 코팅층의 완전한 박리가 발생하였으며 침식률은 아래와 같은 식으로 계산하였다.

$$E_r = \frac{W_a}{W_e} \quad (1)$$

여기서, W_a 는 무게 감소량이며 W_e 는 고체입자의 총량 (test time × solid particle feed rate = 50 g)이다. 따라서, E_r 는 침식률이며 무게 감소량 ÷ 고체입자의 총량으로 표현한다. ASTM G-76에 의거하여 시편의 침식률은 체

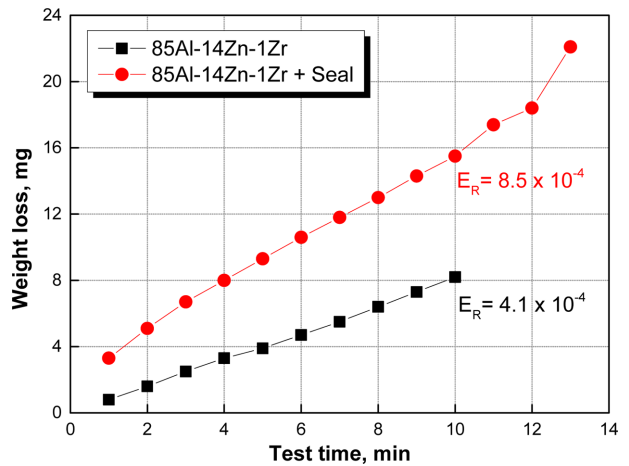


Fig. 4. Weight loss and erosion rate of 85Al-14Zn-1Zr and 85Al-14Zn-1Zr + sealing specimens with SPIE experiment time

적감소와 고체입자의 총량으로 계산할 수 있다. 그러나, 정확한 체적감소량은 계측하기 어렵기 때문에 고체입자 침식과 관련된 많은 연구에서 무게 감소량을 사용하여 침식률을 계산하고 있다 [9,10]. 용사코팅층이 모재로부터 파괴된 시점에서 무게감소량은 용사코팅된 시편과 용사코팅 + 봉공재 시편이 각각 8.2, 22.1 mg으로 계측되었으며 침식률은 4.1×10^{-4} , 8.5×10^{-4} 로 계산되었다. 침식률은 단위무게의 고체입자가 침식시킨 코팅층의 무게로 해석할 수 있으며 용사코팅만 진행한 시편의 침식률이 약 2배 정도 낮은 값을 나타내었다. 그러나, 침식률이 높음에도 불구하고 코팅층이 완전히 박리되는 시간을 기준으로 평가 시 봉공처리된 시편이 더 우수한 성능을 보여주었다.

고체입자 충돌 침식실험에 의한 용사코팅된 시편과 용사코팅 + 봉공재 시편의 표면을 관찰하기 위하여 시편의 표면 사진을 Fig. 5에 제시하였고 실험시간 3분 간격으로 표면의 손상정도를 비교하였다. 3분 경과 후 두

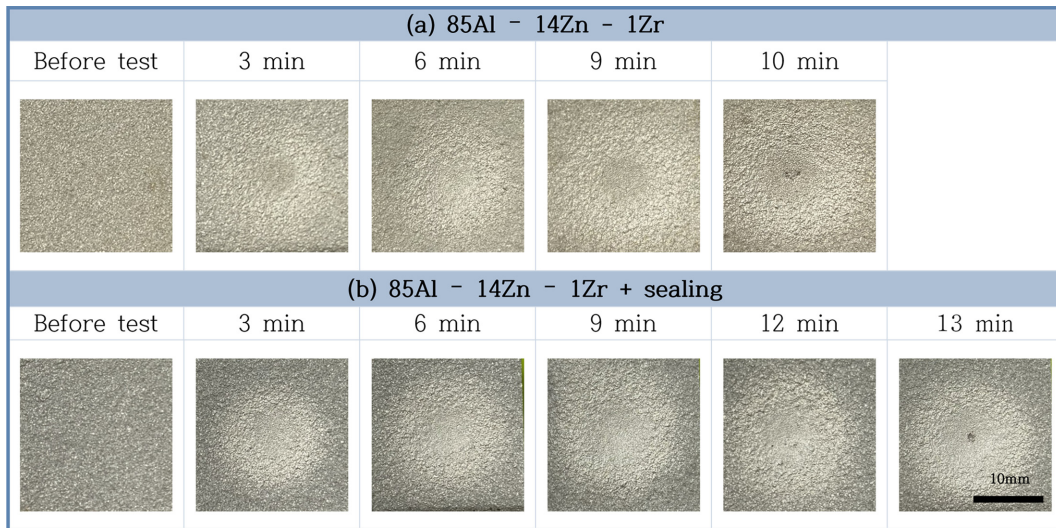
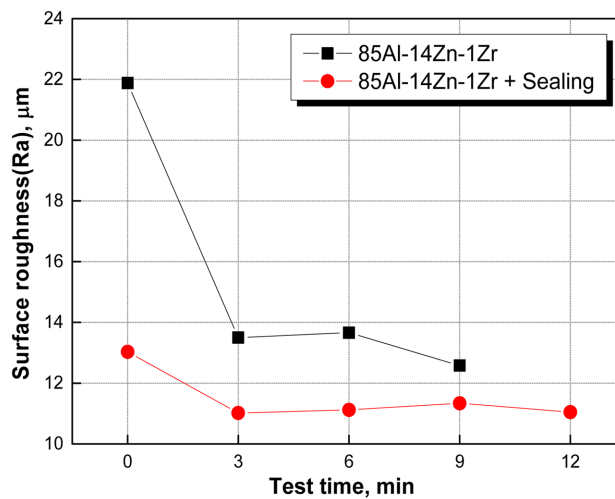
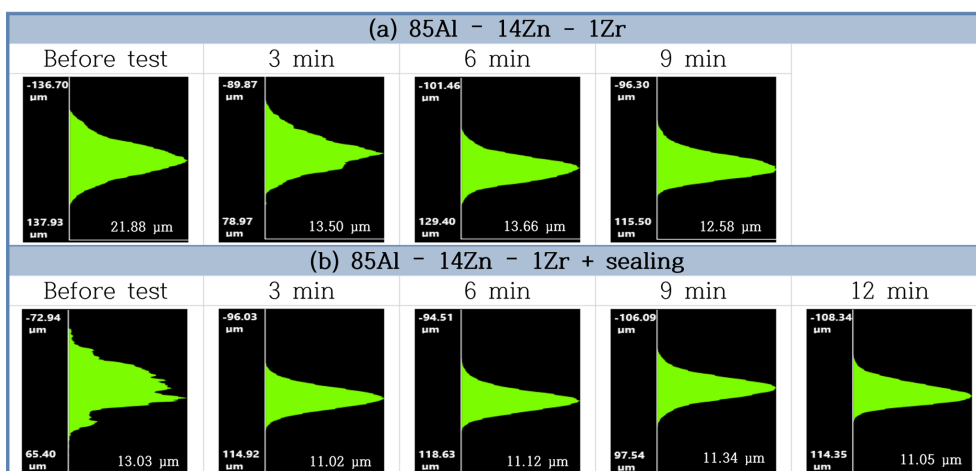


Fig. 5. Appearance of specimens after SPIE test



(a) Surface roughness after SPIE



(b) Surface roughness histogram after SPIE

Fig. 6. Surface roughness of 85Al-14Zn-1Zr and 85Al-14Zn-1Zr + sealing specimens after SPIE

시편 모두 손상부위가 시편의 중심부에 확연히 나타났으나 시간 경과에 따라 손상 정도를 육안으로는 정확히 평가할 수 없으나 용사코팅 + 봉공재 시편이 넓은 영역에서 손상되었으므로 무게 감소량이 증가한 것으로 사료된다.

Fig. 6은 3D 현미경으로 표면거칠기 분석결과를 나타낸 것이다. 용사코팅된 시편과 봉공처리된 두 시편 모두 실험 전의 표면거칠기가 가장 큰 값인 21.88, 13.03 μm 를 각각 나타내었다. 또한, 두 시편 모두 실험 3분 후 표면거칠기가 13.50, 11.02 μm 로 감소하였으나 시간 경과에 따라 표면 거칠기의 감소는 크게 발생하지 않아 Fig. 5의 표면사진과 동일한 양상을 나타내었다. 특히, 용사코팅만 실시한 시편의 경우 봉공처리된 시편보다 표면거칠기의 감소량이 더 크게 발생하였는데 이는 Fig. 7의 손상 메커니즘으로 설명할 수 있다.

Fig. 7은 용사코팅된 시편과 봉공처리된 시편의 손상 메커니즘을 나타낸 개략도 이다. 용사코팅만 시행한 시편의 경우 공정 과정 중 발생한 기공과 산화물로 인해 표면의 요철이 발생하게 된다. 그러나 고체입자의 충돌시 연성재료의 특성으로 인해 돌출된 표면에서의 소성변형과 용사코팅층의 탈리로 인해 표면이 평탄해진다. Park 등은 강재에 알루미늄을 용융도금 시킨 후 고체입자 침식 특성을 연구하였으며 침식시간이 경과 할수록 표면거칠기가 감소하는 결과를 나타냈으며 이는 본 연구결과와 일치한다 [7]. 이는 아크 열용사와 용융도금 과정 중 형성된 거친 표면과 알루미늄, 아연 그리고 지르코늄의 연성적인 특성에 기인한 결과로 사료된다. 그

러나, 봉공처리를 실시한 시편의 경우 코팅층 표면의 기공을 봉공재가 실링함으로써 작은 표면거칠기 값을 나타냈다. 그리고, 고체입자 충돌 시 용사코팅층과 봉공재가 동시에 파괴되어 용사코팅만 실시한 시편보다 무게 감소량이 더 크게 발생한다. 이는 고체입자인 SiO_2 의 높은 경도값으로 인해 발생한 결과로 사료된다. SiO_2 의 경도에 관한 여러 연구에서 경도는 약 750~1200 H_v 정도이며, 이는 봉공재(Fluorosilicone resin) 경도 280 H_v 에 비해 높은 값을 가진다 [11-13]. 따라서, 봉공처리된 시편은 고체입자의 충돌에 의해 봉공재와 용사코팅층이 모두 파괴되어 무게감소량이 용사코팅만 시행한 시편보다 더 높게 나타났다.

Fig. 8은 용사코팅된 시편과 용사코팅 + 봉공재 실링된 시편의 고체입자 충돌 침식실험 후 표면을 주사전자현미경으로 촬영한 결과이다. 실험 전, 용사코팅만 시행한 시편은 많은 기공과 요철이 있음을 확인할 수 있다. 표면의 이러한 기공들은 해양환경에 적용 시 염소이온의 침투 가능성이 높아 내식성을 저하시키는 요인이 된다. 용사코팅 + 봉공재 시편의 경우 표면의 기공들을 봉공재가 밀봉하여 상대적으로 요철이 적고 평탄함을 알 수 있다. 그리고 봉공처리된 시편 표면의 국소부위에서 마이크로 크랙이 관찰되었는데 이는 봉공재에 포함되어 있는 액체 성분이 건조 과정 중 증발하면서 발생한 것으로 사료된다. 실험시간 3분 후, 두 시편은 고체입자의 충격에너지로 인해 소성변형이 발생한 파면무늬가 관찰되었다. 특히, 용사코팅 + 봉공재 시편의 경우 고체입자의 충돌에 의한 침식으로 인해 3분 이내에

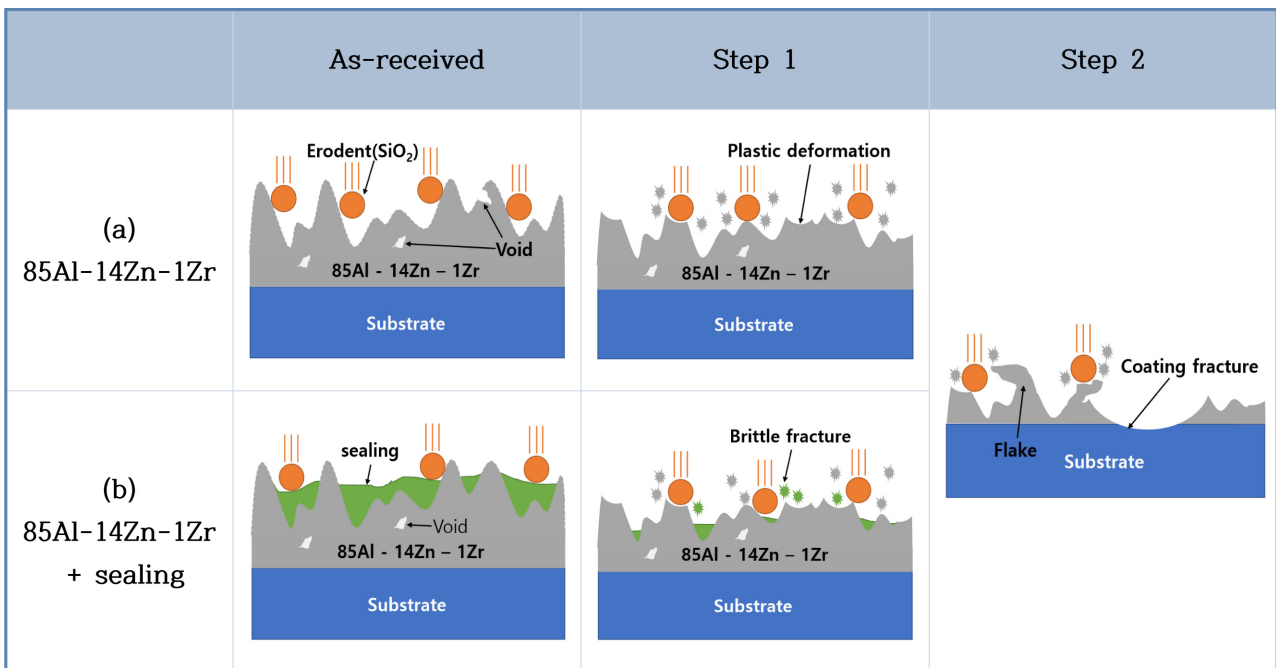


Fig. 7. Schematic diagram of fracture mechanism for thermal spray coating and sealing during solid particle impingement erosion

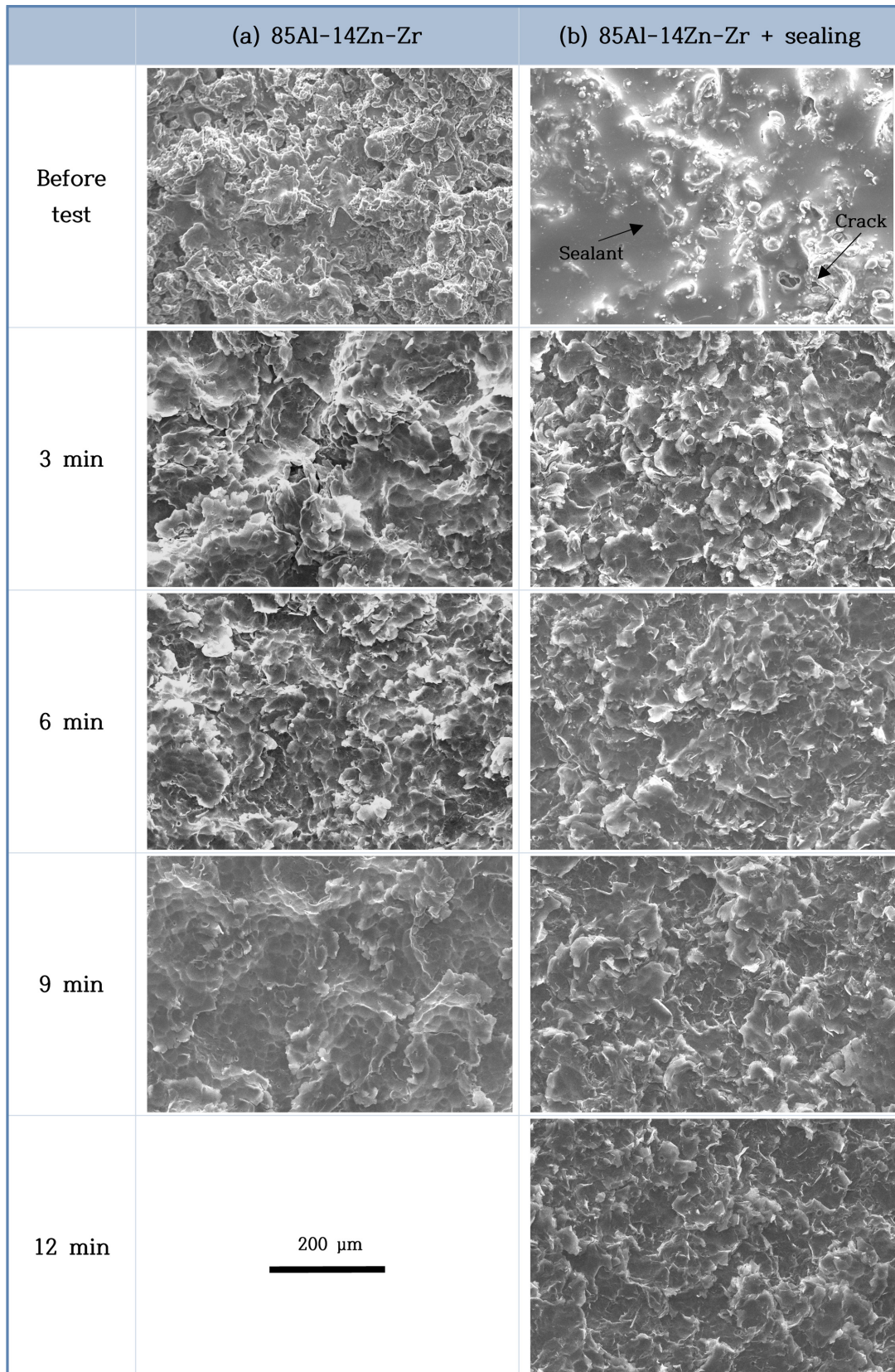
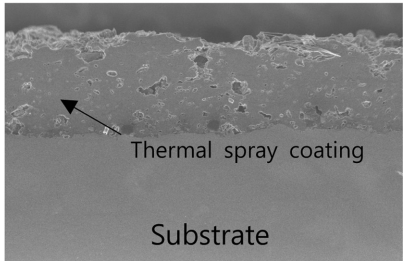
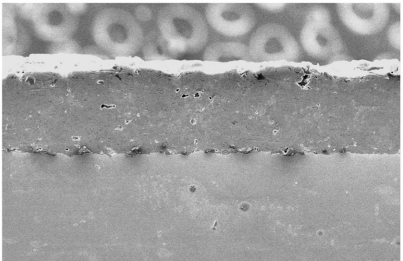
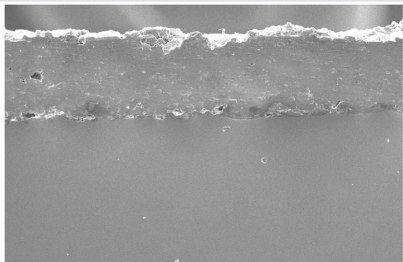
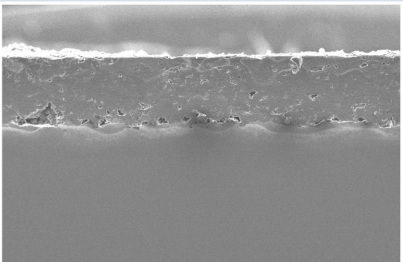
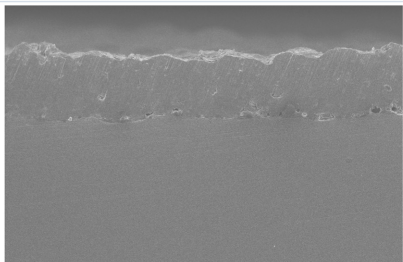
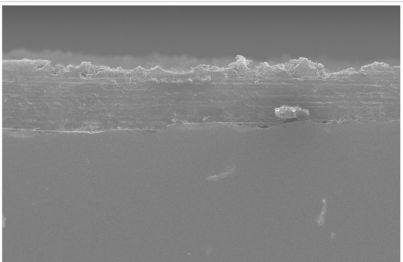
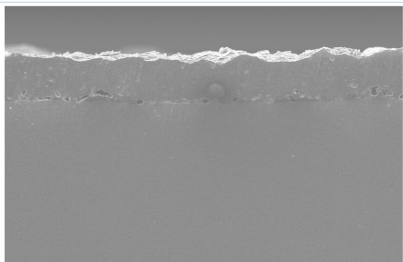
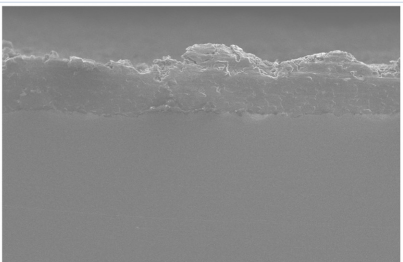
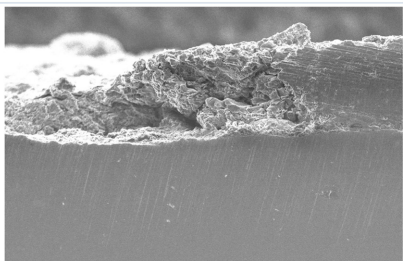
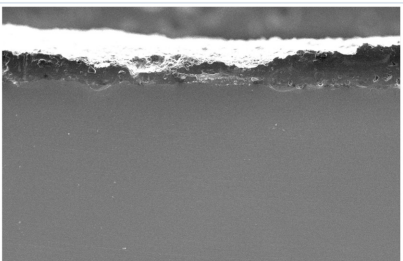
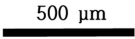
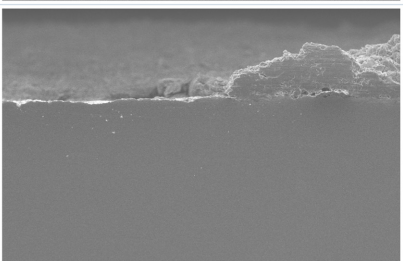
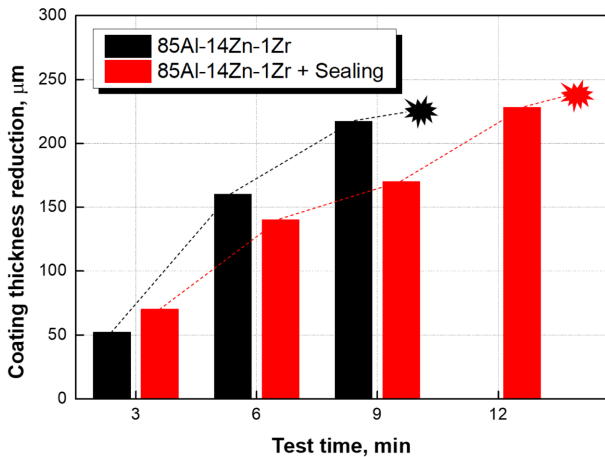


Fig. 8. Surface morphologies of 85Al-14Zn-1Zr and 85Al-14Zn-1Zr + sealing specimens after solid particle impingement erosion

	(a) 85Al-14Zn-1Zr		(b) 85Al-14Zn-1Zr + sealing
Before test		Before test	
3 min		3 min	
6 min		6 min	
9 min		9 min	
10 min fracture		12 min	
	 500 μm	13 min fracture	

(a) Cross-sectional morphologies



(b) Thermal spray coating reduction

Fig. 9. Cross-sectional morphologies of 85Al-14Zn-1Zr and 85Al-14Zn-1Zr + sealing specimens after solid particle impingement erosion

붕공재가 많이 파괴되었음을 확인할 수 있다. 3분 이후부터 실험시간 경과에 따라 표면에서의 큰 차이는 발견되지 않았다.

Fig. 9는 용사코팅된 시편과 용사코팅 + 붕공재 시편의 고체입자 충돌 침식실험 후 측면을 촬영하여 코팅층의 두께를 분석한 결과이다. 용사코팅만 시행한 시편의 경우 실험시간 3, 6, 9분 후 코팅두께 감소량은 각각 52, 160, 217 μm로 측정되었으며 용사코팅 + 붕공재 시편의 경우 실험시간 3, 6, 9, 12분 후 코팅두께 감소량은 각각 70, 140, 170, 228 μm로 측정되었다. 실험시간 경과에 따라 두께 감소량이 증가하였으며 침식 시간 3분까지는 용사코팅 + 붕공재 시편의 두께감소량이 더 높게 나타났으나 이후 용사코팅만 시행한 시편의 두께감소량이 크게 나타났다. 이는, 불소 실리콘 붕공재가 실험 초기 고체입자의 충격으로 인해 우선적으로 파괴되어 발생한 결과로 사료된다. 용사코팅만 실시한 시편의 경우 고체입자 충돌에너지에 의해 소성변형이 발생하면서 코팅층의 파괴가 진행되는 데 이는 전형적인 연성재료의 파괴거동이다 [14]. 붕공처리된 시편의 경우 붕공재가 실험 초기에 먼저 파괴된 후 용사코팅층에 압축잔류응력이 누적되면서 코팅층의 파괴가 진행된다. 그 결과 코팅층이 박리되는데 더 많은 시간이 소요됨을 확인할 수 있었다.

4. 결론

Al-Zn-Zr 용사코팅층의 고체입자 충돌 침식특성에 미치는 붕공처리의 영향에 관한 연구결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 85%Al-14%Zn-1%Zr의 아크열용사 결과, 코팅층 내부와 표면에 기공과 결합이 관찰되었으며 붕공처리에

의해 표면의 기공들은 밀봉되어 표면거칠기가 감소하였다.

2. 용사코팅만 진행한 시편과 붕공처리한 시편의 무게감소량은 8.2, 22.1 mg, 침식률은 4.1×10^{-4} , 8.5×10^{-4} 을 각각 나타내었다.

3. 용사코팅 재료인 알루미늄, 아연, 지르코늄의 연성적인 특성과 초기에 고체입자의 충돌에너지로 인해 표면에 파면 무늬가 형성되었다.

4. 코팅층이 파괴되는데 소요되는 시간은 용사코팅만 진행한 시편은 10분, 붕공처리한 시편은 13분을 나타내어 붕공처리가 고체입자 충돌에 의한 침식저항성이 더 우수한 특성을 나타냈다.

본 연구는 지름이 약 50 μm인 구형의 SiO₂ 고체입자를 90°각도로 충돌시켜 용사코팅층에 미치는 붕공처리의 영향을 연구하였다. 고체입자에 의한 침식은 고체입자의 종류, 모양, 크기 그리고 충돌각도에 따라서 다양한 결과를 나타낸다. 따라서, 다양한 변수를 고려하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

1. E. S. Diaz and R. Adey, Predicting the coating condition on ships using ICCP system data, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **62**, 727 (2005). Doi: <https://doi.org/10.1002/nme.1185>
2. Y. T. Shen, K. D. Remmers and C. W. Jiang, Effects of ship hull and propeller on rudder cavitation, *Journal of Ship Research*, **41**, 172 (1997). Doi: <https://doi.org/10.5957/jsr.1997.41.3.172>
3. E. Sadeghi, N. Markocsan and S. Joshi, Advances in corrosion-resistant thermal spray coatings for renewable energy power plants. part I: effect of composition and microstructure, *Journal of Thermal spray Technology*, **28**, 1749 (2019). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00938-1>
4. M. S. Han, S. J. Lee, S. K. Jang and S. J. Kim. Electrochemical and cavitation characteristics of Al thermal spray coating with F-Si sealing, *Corrosion Science and Technology*, **9**, 317 (2010). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2010.9.6.317>
5. S. Kuroda, J. Kawakita and M. Takemoto, An 18-year exposure test of thermal-sprayed Zn, Al, and Zn-Al coatings in marine environment, *Corrosion*, **62**, 635 (2006). Doi: <https://doi.org/10.5006/1.3280677>
6. I. C. Park and S. J. Kim, Cavitation damage behavior of inconel 625 coating layer by arc thermal spraying method in sea water, *Journal of the Korean institute of surface engineering*, **48**, 349 (2015).
7. I. C. Park and M. S. Han, Solid particle erosion properties of hot-dip aluminized economizer steel tube, *Corro-*

- sion Science and Technology*, **20**, 384 (2021). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.6.384>
8. B. M. Kim and S. Y. Hwang, Principles and applications of thermal spraying techniques, *The Korean Welding and Joining Society*, **20**, 443 (2002). Doi: <http://koreascience.kr/article/JAKO200211921173226.page?&lang=en>
 9. S. Tortuero, M. A. Garrido, P. Poza and J. Rodriguez, Evaluating the erosion resistance of Ti6Al4V coatings deposited by cold spray, *Wear*, **454-455**, 203337 (2020). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203337>
 10. K. H. Kim, D. H. Choi and H. J. Kim, A study of damage on the pipe flow materials caused by solid particle erosion, *Corrosion Science and Technology*, **13**, 130 (2014). Doi: <https://doi.org/10.14773/cst.2014.13.4.130>
 11. B. Flitney, Extending the application of fluorosilicone elastomers, *Sealing Technology*, **2005**, 6 (2005). Doi: [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(05\)00519-2](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(05)00519-2)
 12. X. Ren, Z. Peng, Y. Hu, C. Wang, Z. Fu, W. Yue, L. Qi and H. Miao, Abrasive wear behavior of TiCN cermets under water-based slurries with different abrasives, *Tribology International*, **66**, 35 (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.04.002>
 13. A. K. Gupta, T. K. Dan and P. K. Rohatgi, Aluminium alloy-silica sand composites: preparation and properties, *Journal of Materials Science*, **21**, 3413 (1986). Doi: <https://doi.org/10.1007/BF02402980>
 14. D. AQUARD and E. FONTANI, Erosion of ductile and brittle materials, *Meccanica*, **36**, 661 (2001). Doi: <https://doi.org/10.1023/A:1016396719711>