



# 부식실험에 의한 금속용사와 도장의 복합피복방식법의 내후성능평가

김인태<sup>1</sup> · 김호섭<sup>2</sup> · 킨자오두이<sup>3</sup> · 전제형<sup>2</sup> · 안진희<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>교수, 부산대학교, 사회환경시스템공학과, <sup>2</sup>석사과정, 부산대학교, 사회환경시스템공학과,  
<sup>3</sup>박사과정, 부산대학교, 사회환경시스템공학과, <sup>4</sup>조교수, 경남과학기술대학교, 토목공학과

## Weathering Performance Evaluation of Duplex Coating Systems of Thermal Spraying and Painting using Corrosion Test

Kim, In Tae<sup>1</sup>, Kim, Ho Seob<sup>2</sup>, Kien, Dao Duy<sup>3</sup>, Jun, Je Hyeong<sup>2</sup>, Ahn, Jin Hee<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

<sup>2</sup>M.E. student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

<sup>3</sup>Ph.D student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

<sup>4</sup>Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju, Gyeongnam, 52725, Korea

**Abstract** - Thermally sprayed metals or organic coatings is often used in corrosion protection of steel structures. Duplex coating systems of thermally sprayed metal in combination with organic coating are selected as a new generic type of coatings on steel structures under the highly corrosive environments. In this study, three types of corrosion tests were carried out on four types of thermal sprayed specimens with sealing: zinc, zinc-15%aluminum alloy, aluminum and aluminum-5%magnesium alloy, four types of duplex coated specimens; thermally sprayed metals in combination with paint of acrylic urethane, and painted specimens. NORSOK M-501, Wet/dry cyclic seawater tests and outdoor exposure tests of nine types of specimens were conducted. From the corrosion test results, weathering performance of them were presented.

**Keywords** - Corrosion, Steel structure, Duplex coating, Thermal spraying, Painting, Weathering performance

### 1. 서론

대기환경하에 놓인 강구조물은 강우, 온도, 습도 등의 기후조건과 비산염분, 동결방지제 등의 환경조건에 의해 부식손상이 발생한다<sup>[1],[2],[3],[4]</sup>. 그리고 강구조물의 방식에는 도장이 널리 사용되고 있으나, 주기적으로 도장의 노화에 따른 강재의 부식손상을 방지하기 위해 재도장을 필요로 한다. 예를 들어, 우리나라 강교량의 경우에는 약 10년을 주기로 재도장을 실시하고 있다<sup>[5]</sup>.

육상에 설치된 강교량 및 강재수문 등의 강구조물은 도장의 유지관리 누적비용을 절감하기 위하여 2000년대부터 중방식 도장계를 적용하고 있으며<sup>[5]</sup>, 최근에는 아연-알루미늄용사와 같은 금속용사가 도입되고 있다. 한편, 풍력시설, 플랜트 및 장대교량 등과 같은 해상 강구조물의 경우에는 혹독한 부식환경하에 놓여 있을 뿐만 아니라, 접근이 용이하지 않아 주기적인 재도장 또는 재방식 처리가 곤란한 실정이다. 이로 인하여 고내후성 방식으로 강재표면에 금속용사 처리 후 중방식 도장계를 적용한 복합피복 방식법이 적용되고 있다.

금속용사는 아연, 알루미늄, 마그네슘 등의 금속을 용융시켜 고압공기로 분사하여 강재표면을 코팅시키는 피복 방식법으로, 금속용사 후 도장을 실시하는 금속용사와 도장의 복합피복 방식법은 유럽, 미국, 일본을 중심으로 실용화 되어 오고 있다. 우리나라의 경우에는, 한국도로공사의 '고속도로공사 전문시방서'의 2009년 개정판에는 10가지 강교도

Note.-Discussion open until October 31, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 2, 2016; revised March 15, 2016; approved on March 28, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-55-751-3293 Fax. +82-55-751-3209

E-mail. jhahn@gntech.ac.kr

장계 중 하나로 금속용사가 채택되었고, 2012년 개정판에는 모든 도장계에 대해 무기질 아연말 하도 도장 대신 아연-알루미늄 합금용사를 사용할 수 있도록 하고 있다<sup>[6],[7]</sup>. 그리고 최근 강교량의 부분 보수도장법으로 아연-알루미늄 합금용사 후 도장 처리한 복합피복방식법이 적용된 사례가 있다<sup>[8]</sup>. 국외의 경우에는 아연, 아연-알루미늄 합금, 알루미늄, 알루미늄-마그네슘 합금의 금속용사와 도장의 복합피복방식에 대한 다양한 부식 환경하에서의 실내 및 실외 부식실험이 진행되어, 그 결과가 방식설계 지침 또는 기준 등의 개정에 반영되고 있다<sup>[9]</sup>. 그러나 우리나라의 경우에는 금속용사의 내부식성에 대한 연구가 일부 진행되었을 뿐, 금속용사와 도장의 복합피복방식법에 대한 연구는 찾아볼 수 없고 해외의 기준을 선택적으로 반영하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 종래의 아연 및 알루미늄 금속용사와 도장의 복합피복방식법과 최근 적용되고 있는 아연-알루미늄 합금 및 알루미늄-마그네슘 합금의 금속용사와 도장의 복합피복방식법의 총 4종류의 복합피복방식법을 대상으로 175일간의 NORSOK M-501<sup>[10]</sup>, 250일간의 해수 Wet/Dry 사이클의 실내 부식실험과 약 3년간의 광안대교 옥외노출실험을 실시하였다<sup>[11]</sup>. 그리고 금속용사 후 실링 처리한 시편과 도장만 한 시편의 부식실험을 실시하여, 피복방식법에 따른 상대적 내후성능을 비교, 검토하였다.

## 2. 실내 및 실외 부식실험

### 2.1 시편 제작

옥외 강구조물의 금속용사에는 용사 금속의 종류에 따라 아연(Zn), 아연-알루미늄 합금(Zn-Al), 알루미늄(Al), 알루미늄-마그네슘 합금(Al-Mg)의 4종류가 적용되고 있으며, 금속용사 처리 후 실링처리를 하는 것이 일반적이다. 그리고 금속용사와 도장의 복합피복방식은 이들 4종류의 금속용사 처리 후 중방식 도장시스템을 적용하는 것이 일반적이다. 이에 본 연구에서는 4종류의 금속용사 처리 후 실링 처리한 경우와 금속용사 처리 후 중방식 도장시스템을 적용한 경우를 대상으로 하였으며, 이와 비교하기 위하여 현재 강구조물의 방식법으로 널리 사용되고 있는 중방식 도장시스템으로 도장만 실시한 경우의 3가지 피복방식법을 대상으로 한다.

본 실험에 사용된 시편의 형상과 제작과정을 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 시편 제작에 있어서는 두께

3.2mm 구조용 강재 SS400을 150×70mm<sup>2</sup>으로 절단하여, Table 1의 블라스트처리 조건으로 ISO Sa 2<sup>1/2</sup>등급의 표면처리를 하였다. 그리고 Table 2에 나타낸 것 과 같이 블라스트 표면처리된 강판에 4종류의 금속용사를 실시한 후 실링(Sealing)처리한 시편(이하, TSS시편이라 칭함), 블라스트

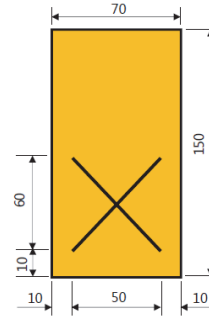


Fig. 1. Test specimen(mm)

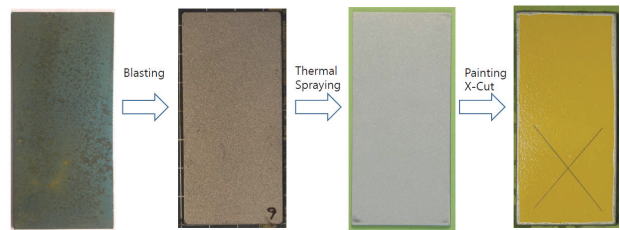


Fig. 2. Process of surface treatment and coating

Table 1. Blasting condition

Parameter	Grit size (mm)	Pressure (MPa)	Roughness of surface after blasting (um)
Grit blast	φ 0.7	0.7	60

Table 2 Surface treatment and coating of test specimens

Coating	Surface treatment and coating			
	Blasting	Thermal spraying	Sealing	Painting
TSS (Thermal Spraying and Sealing)	○	○	○	-
TSP (Thermal Spraying and Painting)	○	○	-	○
P (Painting)	○	-	-	○

표면처리된 강판에 4종류의 금속용사를 실시한 후 도장 처리한 시편(이하, TSP시편이라 칭함), 블라스트 표면 처리된 강판에 도장 처리한 한 시편(이하, P시편이라 칭함)으로 3종류의 시편을 제작하였다.

TSS시편과 TSP시편의 경우에는 Table 3에 나타난 것과 같이 금속용사의 종류에 따라 각각 4종류의 시편으로 세분화하여 제작하였다. 먼저 TSS시편은 강판의 블라스트 표면 처리 후 각각 아연(Zn), 아연-알루미늄(Zn-Al)합금, 알루미늄(Al), 알루미늄-마그네슘(Al-Mg)합금의 4종류의 금속용사 처리를 하고, 에폭시 수지(목표 건조막 두께 50 $\mu$ m)로 실링 처리하였다. TSP시편은 블라스트 표면처리 후 아연, 아연-알루미늄 합금, 알루미늄, 알루미늄-마그네슘 합금의 4종류 금속용사 처리를 하고, 에폭시 수지(목표 건조막 두께 50 $\mu$ m)와 우레탄수지(목표 건조막 두께 50 $\mu$ m)의 2코팅 도장 시스템으로 도포하였다. P시편은 블라스트 표면처리 후 금속용사를 실시하지 않고, 에폭시 수지(목표 건조막 두께 50 $\mu$ m)와 우레탄수지(목표 건조막 두께 50 $\mu$ m)의 2코팅 도

장 시스템으로 도포하였다.

금속용사는 아크 금속용사법(Arc thermal spraying)을 사용하였고, 아연(Zn)용사에는 순도 99.7%의 아연 금속 와이어를, 알루미늄(Al) 용사에는 순도 99.8%의 알루미늄 용사 금속 와이어를 사용하였다. 그리고 아연-알루미늄(Zn-Al) 합금 용사에는 순도 99.7% 이상의 아연 대 알루미늄의 중량 비율이 85:15의 합금(ZnAl15%) 와이어를 사용하였으며, 알루미늄-마그네슘(Al-Mg) 합금 용사는 순도 99.7% 이상의 알루미늄 대 마그네슘의 중량비율이 95:5의 합금(AlMg5%) 와이어를 사용하였다.

방식재의 부식실험에는 조기에 노화현상을 유도하기 위하여 코팅에 초기 흠 또는 결함을 도입한 시편이 널리 사용되고 있다. 본 실험에서도 실링 또는 도장된 시편은 Fig. 1에 나타난 것과 방식 피복 표면에서 강재 표면까지 도달하는 X-cut의 인위적 결함을 도입하였다.

본 실험에 사용된 시편의 코팅방법, 기호, 부식실험 조건 별 수량을 Table 4에 정리하였다.

**Table 3.** Detail of test specimens

Type of Metalized Coating	Symbol	Comments
Zinc thermal spraying	Zn-S	TSS (Sealing with epoxy resin after thermal spraying)
Zinc-15% Aluminum alloy thermal spraying	ZnAl15-S	
Aluminum thermal spraying	Al-S	
Aluminum-5% Magnesium alloy thermal spraying	AlMg5-S	
Zinc thermal spraying	Zn-P	TSP (Painting after thermal spraying)
Zinc-15% Aluminum alloy thermal spraying	ZnAl15-P	
Aluminum thermal spraying	Al-P	
Aluminum-5% Magnesium alloy thermal spraying	AlMg5-P	
Painting	P	

**Table 4.** Number of specimens used in corrosion test

Coating	Symbol of specimens	Corrosion tests		
		NORSOK	Wet/Dry	Outdoor
TSS (Thermal Spraying and Sealing)	Zn-S	3	4	3
	ZnAl15-S	3	4	3
	Al-S	3	4	3
	AlMg5-S	3	4	3
TSP (Thermal Spraying and Painting)	Zn-P	3	4	3
	ZnAl15-P	3	4	3
	Al-P	3	4	3
	AlMg5-P	3	4	3
P (Painting)	P	3	4	3

## 2.2 부식실험조건

해양 강구조물은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 해수와의 접촉수빈도 등의 해양부식환경에 따라, 크게 대기부(Atmospheric zone), 간만대(Tidal zone), 해수중부(Immersion zone, Sea water)로 나눌 수 있다. 본 실험에서는 이와 같은 3가지 환경을 대상으로 NORSOK M-501(ISO 20340)의 복합사이클 부식촉진실험, 해수 Wet/Dry 반복 부식실험, 옥외노출 실험의 3종류의 부식실험을 실시하였다. 먼저, NORSOK M-501 복합사이클시험<sup>[10]</sup>은 혹독한 대기부식환경을 모사한 부식촉진실험법으로 Fig. 4에 나타난 것과 같이 3일간의 자외선노출/결로, 3일간의 염수분무, 1일간의 영하 20℃의 7일간이 1사이클로 구성되어 있다. 그리고 해수 Wet/Dry 반복 부식실험은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 우리나라 남해안의 해수위 변화를 모사한 것으로, 3시간의 고수위(High water level) 유지, 3시간의 고수위에서 저수위로 선형이동, 3시간의 저수위(Low water level) 유지, 3시간의 저수위에서 고수위로의 선형이동으로 12시간이 1사이클로 구성되어 있다. 마지막, 옥외노출실험은 실제 해양 대기환경을 대상으로 Fig. 6에 나타난 것과 같이 부산광역시 광안대교의 기초 위에 시편을 노출시켰다.

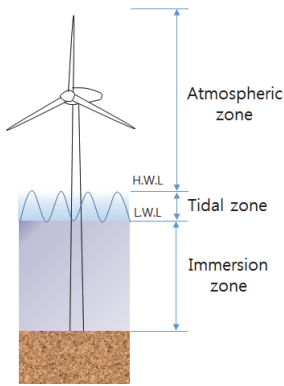


Fig. 3. Marine environment

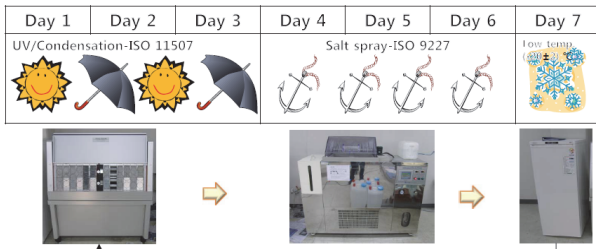


Fig. 4. Environmental condition of NORSOK test

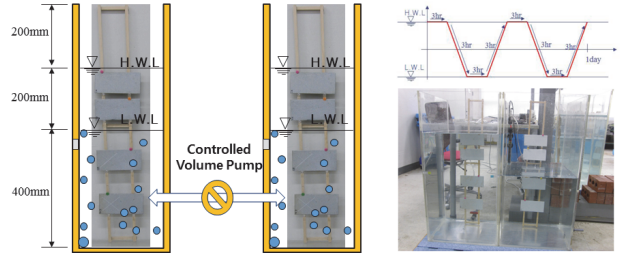


Fig. 5. Environmental condition of Wet/Dry test



Fig. 6. Environmental condition of outdoor exposure test

NORSOK 부식촉진실험은 Table 4의 9 종류의 방식법을 적용한 각각 3개씩의 시편을 175일(25사이클)간 Fig. 4의 부식촉진환경에 노출시켰으며, 실험 개시 후 5, 10, 15, 20, 25 사이클 후의 시편 표면변화를 관찰하고 실험 종료 후에는 피복을 제거하여 강재의 부식상태를 평가하였다. 그리고 해수 Wet/Dry 반복 부식실험은 부산시 광안리의 해수를 취수하여 사용하였으며, Table 4의 9 종류의 방식법을 적용한 각각 4개씩의 시편 중 2개는 Fig. 5에 나타난 간만대에 나머지 2개는 해수중에 위치시켜 250일(500사이클)간 실시하였다. 광안대교 옥외노출실험은 2013년 1월 14일 실험을 시작하여 현재 3년이 경과되었으며, 실험 개시 후 약 6개월 단위로 3년까지의 외관평가를 실시하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 실험결과 정리 개요

방식법의 노화도는 외관관찰(변색, 탈색), 노화면적, 부착력, 방식도막의 잔존두께 등으로 평가할 수 있다. 본 연구에서는 3개 또는 4개의 시편 노화도를 부식실험기간 동안 지속적으로 평가하기 위하여, 녹층의 제거 등 시편 표면에 손상을 가하는 부착력 테스트 또는 방식도막의 두께 측정을 실시하지 않고, 외관관찰 및 노화면적을 이용하여 노화도를 평가한다.



### 3.2 NORSOK 부식촉진실험 결과

4종류의 금속용사에 실링 처리한 시편(TSS시편)과 금속용사에 도장을 실시한 금속용사와 도장의 복합방식 시편(TSP시편)의 NORSOK 부식시험 사이클에 따른 시편 표면 상태를 Fig. 7과 8에 나타내었다. NORSOK 실험은 25사이클 종료 후의 노화도를 평가하는 방법으로 본 실험에서는 0(초기), 5, 10, 15, 20, 25사이클(종료)의 5사이클 간격으로 외관을 평가한다.

먼저 금속용사에 실링 처리한(TSS) 시편의 경우, 아연 용

사 후 실링(Zn-S) 시편과 아연-알루미늄 합금용사 후 실링(ZnAl15-S)시편에서는 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 5사이클에 아연의 부식생성물인 백색 녹이 발생하여 사이클의 증가에 따라 확장되어 가는 것을 알 수 있다. 특히 Zn-S시편의 경우에는 10사이클부터 X-cut 부위에서 강재의 부식에 의해 발생하는 적색 녹이 형성되어 점차 확대되어 가는 것을 알 수 있다. 그리고 ZnAl15-S 시편의 경우에는 백색 녹이 증가하지만 강재 부식에 의한 적색 녹은 확인되지 않았다. 한편 알루미늄 용사 후 실링(Al-S) 시편과 알루미늄-마그네슘 합금용사 후 실링(AlMg5-S)시편의 경우에는 0과 25사이클




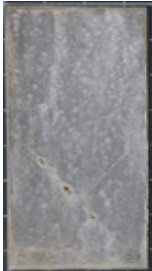







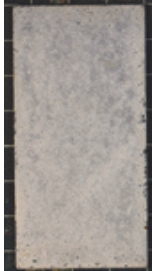












Symbol	Testing Period of NORSOK test (Cycle)					
	0	5	10	15	20	25
Zn_S						
ZnAl15-S						
Al-S						
AlMg5-S						

Fig. 7. Surface state of TSS specimens during NORSOK test

의 표면상태를 비교하면, 큰 변화가 없어, 외관평가로는 25 사이클 후에도 초기의 내후성능을 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 4종류의 금속용사에 실링 처리한 방식법(TSS

시편)을 비교하면, NORSOK 부식실험조건 25사이클 동안 아연-알루미늄(ZnAl15-S), 알루미늄(Al-S), 알루미늄-마그네슘 합금(AlMg5-S)의 희생양극작용에 의해 X-Cut































Symbol	Testing Period of NORSOK test (Cycle)					
	0	5	10	15	20	25
Zn_p						
ZnAl15-P						
Al-P						
AlMg5-P						
P						

Fig. 8. Surface state of TSP and P specimens during NORSOK test

부에서 강재의 녹은 발생하지 않았으며, 아연(Zn)의 경우에만 강재 부식이 발생함을 알 수 있다. 그리고 Al-S시편과 AlMg5-S시편의 방식법은 상대적으로 방식성능이 뛰어나고, 이와 비교하여 ZnAl15-S 시편과 Zn-S 시편의 방식성능이 떨어짐을 알 수 있다.

금속용사에 중방식 도장을 한 복합방식(TSP) 시편과 중방식 도장(P) 시편의 경우, Fig. 8에 나타난 것과 같이 4종류의 복합방식(TSP) 시편은 25사이클 후의 시편 표면형상은 초기와 거의 동일하며, X-Cut부에 금속용사의 희생양극작용으로 백색 녹이 발생하였지만, 강재의 적색 녹은 발생하지 않았다. 이에 비하여 도장만 실시한(P) 시편은 실험시작과 더불어 X-Cut를 통해 노출된 강재에 녹이 발생하기 시작하였으며 실험기간의 증가와 더불어 녹이 도막 밑으로 진전하여 X-Cut 부 주변의 도막에는 부풀음이 발생하여 주위로 확대 되어감을 알 수 있다. 도장시편의 초기, 노화된 부분 제거 후 및 도막 제거 후의 표면상태를 Fig. 9에 나타내었다.

NORSOK 부식실험 중, TSP시편 표면을 직각 자(ruler)와 함께 사진 촬영하고, AutoCAD를 이용하여 사진에서 녹이 발생된 부위에 외곽선을 긋고 그 면적을 산출하는 방법으로 각 시편 표면에서 발생한 백녹과 적녹의 면적을 계산하여 Fig. 10에 나타내었다.

도장 시편의 도막 부풀음(Blistering)면적(노화면적)은 부식사이클의 증가에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 4종류의 TSP시편에는 백녹이 발생한 면적의 크기는 작지만 선형 증가하는 추세를 보였다. TSP시편 중에서 알루미늄용사 후 도장한(Al-P) 시편의 노화면적이 가장 크게 나타나지만, 이는 노화면적 산출에 백녹에 의해 얼룩진 부분이 포함된 것으로 이를 제외하면 나머지 3종류의 TSP시편과 거의 동일하였다. TSP시편의 실험 종료 후 와이어 브러쉬 또는 디스크 그라인딩으로 표면청소를 실시한 결과, X-cut부에서는 적녹이 발생하지 않았으며, 도막의 부풀음도 확인되지

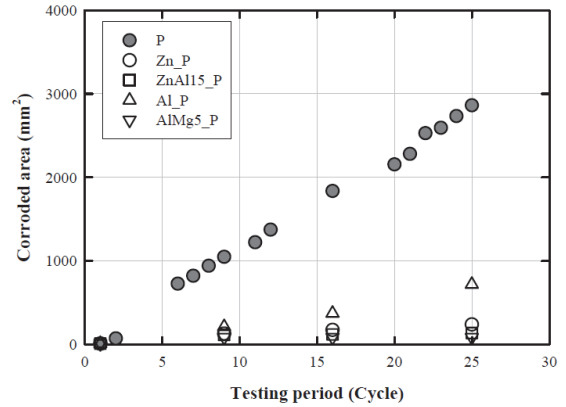


Fig. 10. Deteriorated area of TSP and P specimens

않았다. 그러나 도장(P) 시편의 경우에는 Fig. 9에 나타난 것과 같이 X-cut 주변에 녹 발생으로 인해 강재의 단면손실이 발생한 것을 알 수 있었다.

위의 결과를 정리하면, NORSOK 부식실험 25사이클 후, 알루미늄 금속용사와 알루미늄-마그네슘 합금 용사를 실시한 후 실링 처리한 방식법(Al-S과 AlMg5-S 시편)과 금속용사 후 도장 처리한 4종류의 복합방식법(Zn-P, ZnAl15-P, Al-P, AlMg5-P)의 내후성능의 변화는 거의 없으며, 중방식 도장(P) 시편에 비해 내후성능이 아주 뛰어남이 확인되었다. 이와 비교하여 아연-알루미늄 합금용사 후 실링 처리한(ZnAl15-S) 시편은 강재에 녹은 발생하지 않았지만, 금속용사의 부식에 의한 외관형상의 변화가 크게 발생하고, 아연용사 후 실링 처리한(Zn-S) 시편과 중방식 도장은 방식 피막이 손상된 경우 희생양극작용이 약화되어 강재 표면에 녹이 발생하므로 상대적으로 내후성능이 떨어짐을 알 수 있다.

### 3.3 해수 Wet/Dry 반복 부식실험 결과

4종류의 금속용사에 실링 처리한(TSS) 시편과 금속용사

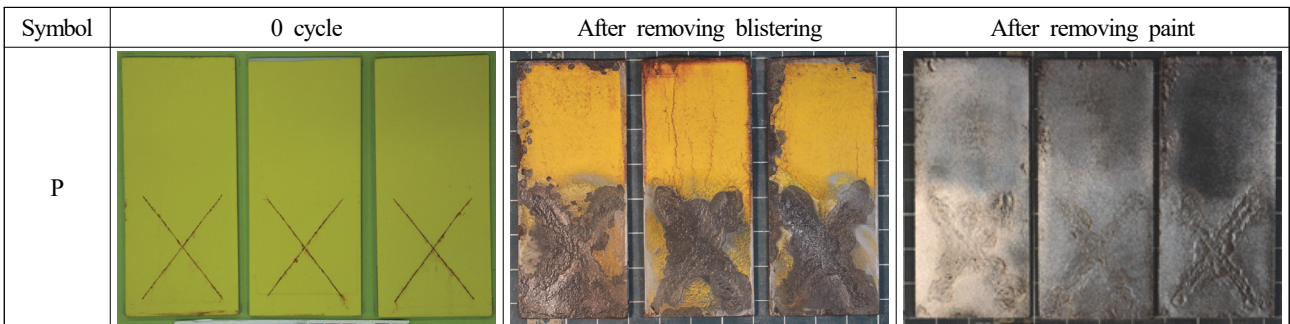


Fig. 9. Surface state of P specimens before and after NORSOK test



에 도장을 실시한(TSP) 시편의 해수 Wet/Dry 반복 부식시험 기간 0, 250, 500 사이클에 따른 시편 표면상태를 Fig. 11과 12에 나타내었다. 그리고 전술한 바와 같이 9종류의 방식법을 적용하여 각각 4개씩의 시편을 제작하였으며, 이 중 2개는 수위가 변화하는 구간(간만대)에 설치하였으며, 나머지 2개는 항상 해수중부에 있도록 설치하였다. 이들 시편 중에서 대표적인 것을 Fig. 11과 12에 나타내었다.

먼저 TSS시편이 간만대에 위치한 경우, Fig. 11에 나타낸 것과 같이 Zn-S시편과 ZnAl15-S시편에서는 아연의 부식

생성물인 백색 녹이 발생하여 부식 사이클의 증가에 따라 확장되어 가는 것을 알 수 있다. 특히 Zn-S시편의 경우에는 그 현상이 현저함을 알 수 있다. 그리고 해수중부에 위치한 경우에는 Al-S시편의 X-Cut부에 강재의 부식생성물인 적색 녹이 약간 발생한 것을 확인할 수 있다. 이외의 TSS시편에서는 실험전(0사이클)과 실험후(500사이클)의 표면상태의 변화는 확인되지 않았다.

TSP시편의 경우, Fig. 12에 나타낸 것과 같이 500사이클(250일) 경과 후 X-Cut에서 적녹의 발생은 확인되지 않았



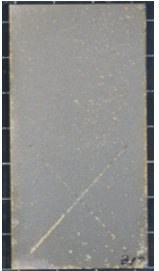

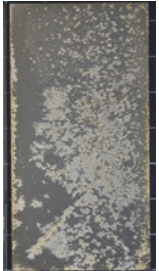



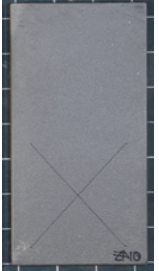
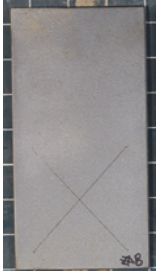






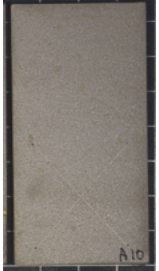
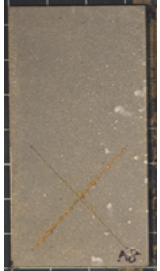






Symbol	Testing Period of Wet/Dry test (Cycle)					
	0		250		500	
	Tidal zone	Under sea	Tidal zone	Under sea	Tidal zone	Under sea
Zn_S						
ZnAl15-S						
Al-S						
AlMg5-S						

Fig. 11. Surface state of TSS specimens during Wet/dry test









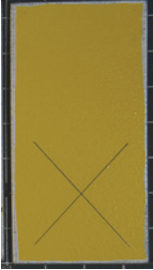

















Symbol	Testing Period of Wet/Dry test (Cycle)					
	100		300		500	
	Tidal zone	Under sea	Tidal zone	Under sea	Tidal zone	Under sea
Zn_p						
ZnAl15-P						
Al-P						
AlMg5-P						

Fig. 12. Surface state of TSP specimens during Wet/dry test




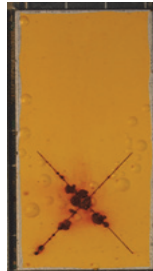

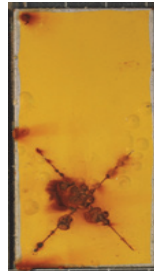
Symbol	Testing Period of Wet/Dry test (Cycle)					
	100		300		500	
	Tidal zone	Under sea	Tidal zone	Under sea	Tidal zone	Under sea
P						

Fig. 13. Surface state of P specimens during Wet/dry test

지만, ZnAl15-P 시편을 제외하고 나머지 3종류의 TSP시편은 X-Cut 주변에서 도막의 부풀음이 발생하였다. 간판대와 해수중부를 비교하면 해수중부에서 더 많은 도막 부풀음이 발생하였다. P시편은 Fig. 13에 나타난 것과 같이 X-Cut부에 적녹이 발생하여 녹층이 형성되었으며, 도막 부풀음도 발생하였다.

위의 결과를 정리하면, 해수 Wet/Dry 부식실험 500사이클(250일) 후, TSS시편의 경우 백녹이 발생하거나 X-cut부에서 적녹이 발생하였지만, 알루미늄-마그네슘 합금 용사 후 실링 처리한(AlMg5-S) 시편은 시험 초기의 표면상태가 변화되지 않은 가장 양호한 내후성능을 가지고 있음을 확인하였다. 그리고 TSP시편의 경우, 아연-알루미늄 합금 용사와 도장의 복합방식(ZnAl15-P) 시편이 표면상태의 변화 없이 가장 양호한 내후성능을 나타내고 있으며, 나머지 3종류의 복합방식(TSP) 시편은 도장(P)시편과 동일하게 도막의 부풀음이 확인되었으나, X-Cut부의 적녹은 발생하지 않았다.

### 3.4 광안대교 옥외노출실험 결과

광안대교 기초 위의 옥외노출 시험지는 해상에 위치하고 있고 비래염분이 발생하므로 해양 대기환경으로 분류할 수 있다. 4종류의 금속용사에 실링 처리한(TSS) 시편과 금속용사에 도장을 실시한 금속용사와 도장의 복합방식(TSP) 시편의 옥외노출시험은 2013년 1월 14일에 시작하였으며, 현재 3년을 경과하고 있으며 현재의 외관상태를 Fig. 14에 정리하였다.

TSS시편과 TSP시편의 경우, X-Cut부의 적녹의 발생 및 표면상태의 변화가 없이 양호한 상태를 유지하고 있으나, P시편의 경우에는 X-Cut부에서의 적녹의 발생이 확인되었다. 3년 경과한 현재, TSS시편과 TSP시편의 노화현상은 확인되지 않은 양호한 상태를 유지하고 있으며, 향후 지속적인 옥외 노출시험을 통하여 그 결과를 제시하고자 한다.

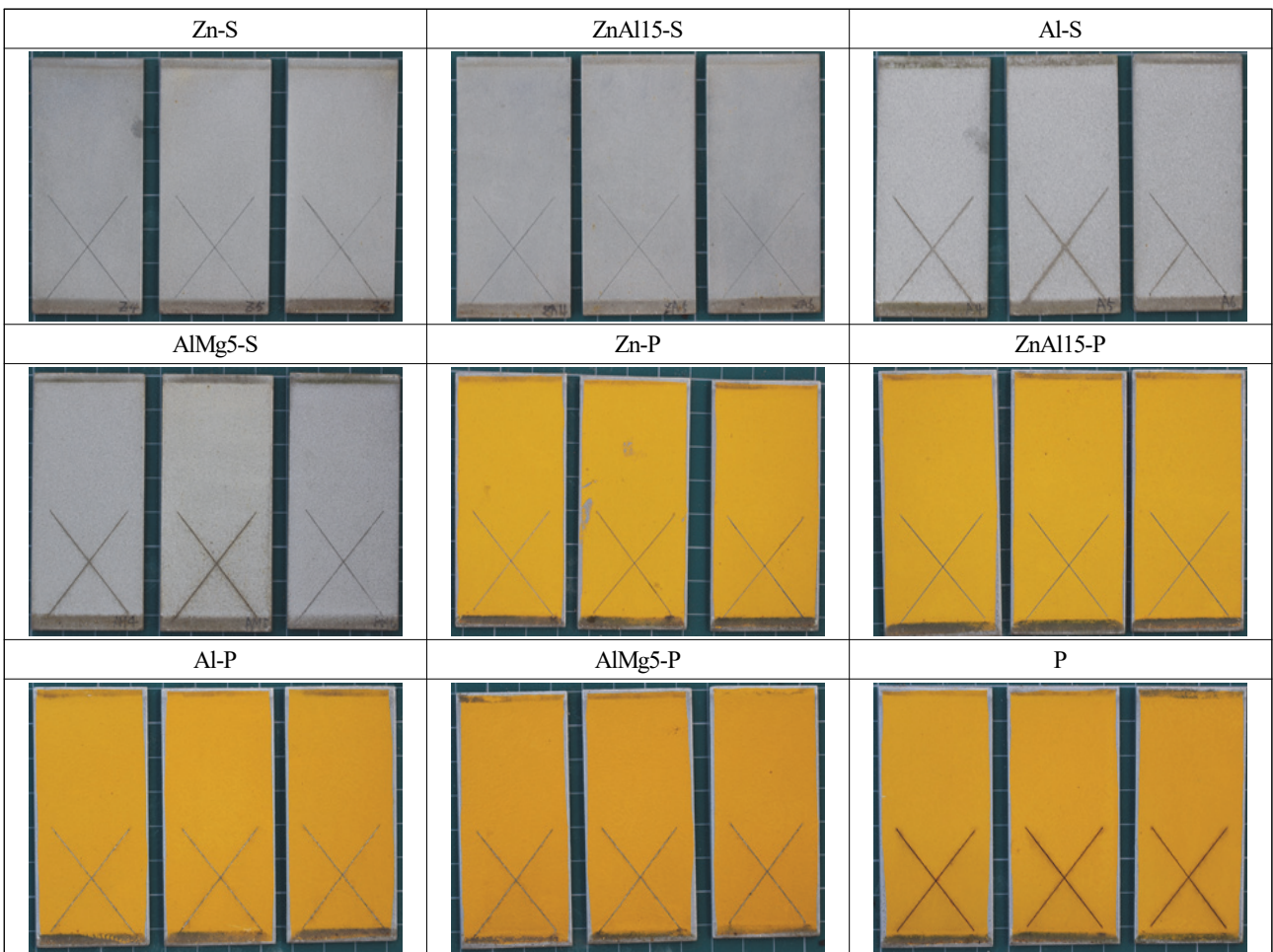


Fig. 14. Surface state of specimens exposed outdoor at Feb. 24, 2016

#### 4. 결론

본 연구에서는 강판에 아연, 아연-알루미늄합금, 알루미늄, 알루미늄-마그네슘합금 금속용사 처리를 하고 실링 한 (TSS) 시편, 금속용사 처리 후 중방식 도장한(TSP) 시편, 중방식 도장처리만한 도장(P) 시편을 이용하여, 175일간의 NORSOK M-501 부식촉진실험, 250일간의 해수 Wet/Dry 사이클의 실내 부식실험과 3년간의 광안대교 옥외노출실험을 실시하였다. 그 결과 외관관찰을 통해 각 방식법의 상대적인 내후성능을 비교 검토하였다.

주요한 결과를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 혹독한 대기부식환경을 모사한 NORSOK 부식촉진실험 결과, 알루미늄 금속용사와 알루미늄-마그네슘 합금 용사를 실시한 후 실링 처리한 방식법과 금속용사후 도장 처리한 4종류의 복합방식법의 표면상태의 변화는 거의 없으며 중방식 도장에 비해 내후성능이 아주 뛰어남이 확인되었다. 이에 비하여 아연-알루미늄합금 용사 후 실링 처리한 방식법은 강재에 녹은 발생하지 않았지만, 금속용사의 부식에 의한 백색 녹층이 형성되었고, 아연 용사 후 실링 처리한 방식법과 중방식 도장은 강재에 녹이 발생하여 상대적으로 내후성능이 떨어짐을 알 수 있다.
- (2) 간만대와 해수중부를 모사한 해수 Wet/Dry 반복 부식 실험 결과, 금속용사 후 실링 처리한 시편의 경우 백색 녹이 발생하거나 X-cut부에서 적색 녹이 발생하였지만, 알루미늄-마그네슘 합금 용사 후 실링 처리한 시편은 시험 초기의 표면상태가 변화되지 않는 가장 양호한 내후성능을 가지고 있음을 확인하였다. 그리고 금속용사 후 중방식 도장을 한 시편의 경우, 아연-알루미늄 합금 용사와 도장의 복합방식 시편이 표면상태의 변화 없이 가장 양호한 내후성능을 나타내고 있으며, 나머지 3종류의 복합방식 시편은 도장 시편과 동일하게 도막의 부풀음이 확인되었으나, X-Cut부의 적녹은 발생하지 않았다.
- (3) 실제 해양 부식환경에서의 약 3년간의 노출 실험 결과, 4종류의 금속용사 후 실링 처리하거나 중방식 도장한 시편은 노화현상이 확인되지 않은 양호한 상태를 유지하고 있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2014R1A2A1A11054579).

#### 참고문헌(References)

- [1] 김인태, 伊藤義人(2007) 부식촉진실험을 이용한 강교용 무도장 강재의 부식내구성 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제19권, 제1호, pp.79-86.  
Kim, I.T., and Itoh, Y. (2007) Corrosion Durability Evaluation of Uncoated Structural Steel Using Accelerated Exposure Tests, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.1, pp.79-86 (in Korean).
- [2] 김인태, 貝沼重信, 정진환(2008) 콘크리트에 접해있는 강재의 국부부식과 피로손상, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제2호, pp.313-321.  
Kim, I.T., Kainuma, S., and Cheung, J.H. (2008) Local Corrosion and Fatigue Damage of Steel Plates at the Boundary with Concrete, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.2, pp.313-321 (in Korean).
- [3] 김인태, 전상혁, 허정옥, 정진환(2009) 지하철 공사현장 환경하의 가시설 강재의 부식두께감소량 추정, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제3호, pp.301-310.  
Kim, I.T., Jeon, S.H., Hur, J.O., and Cheung, J.H. (2009) Evaluation of Corrosion Thickness Loss of Temporary Steel Members Exposed to a Subway Construction Site, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.3, pp.301-310 (in Korean).
- [4] 김인태, 장홍주, 정지영(2010) 가시설 부식 강재의 잔존 인장 내하성능 평가에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제5호, pp.399-409.  
Kim, I.T., Chang, H.J., and Cheung, J.Y. (2010) An Experimental Study on the Evaluation of Residual Tensile Load-Carrying Capacity of Corroded Steel Plates of Temporary Structure, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.5, pp.399-409 (in Korean).
- [5] 이찬영(2010) 국내 고속도로의 강교도장 현황, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제22권, 제5호, pp.9-12.  
Lee, C.-Y. (2010) Present Condition of Steel Bridge Coating in Korean Highway, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.5, pp.9-12 (in Korean).



- Korean).
- [6] 이찬영, 장태순, 이승용(2015) 고성능 강교도장 적용 전망, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제27권, 제2호, pp. 24-28.  
Lee, C.-Y., Chang, T.-S., and Lee, S.-Y. (2015) Prospect for Application of High Performance Steel Bridge Coatings, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.2, pp.24-28 (in Korean).
- [7] 한국도로공사(2012) 고속도로공사 전문시방서: 총칙편/토목편, 한국도로공사.  
Korea Expressway Corporation (2012) *Expressway Construction Guide Specification: General Rules & Civil Engineering*, KEC, Korea (in Korean).
- [8] 이찬영, 정민, 박진원, 이일용, 장수동(2015) 부식환경을 고려한 강아치고 부재별 보수도장 사례, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제27권, 제2호, pp.29-33.  
Lee, C.-Y., Jung, M., Park, J.-W., Lee, I.-Y., and Jang, S.-D. (2015) Case Study on Maintenance Coatings for Steel Arch Bridge Considering Corrosion Environment of Bridge Members, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.2, pp.29-33 (in Korean).
- [9] Øystein, K.O. (2010) *Coating Systems for Long Lifetime: Thermally Sprayed Duplex Systems*, SINTEF Report No. A14189, SINTEF Material Technology, Norway.
- [10] Standards Norway (2012) *Surface Preparation and Protective Coating (NORSOK M501, 6th Ed.)*, Norway.
- [11] 김인태, 이명진(2013) 금속용사와 도장의 복합 방식법의 부식촉진실험, 한국강구조학회 2013년 학술발표대회 논문집, 한국강구조학회, pp.211-212.  
Kim, I.T., and Lee, M.J. (2013) Accelerated Weathering Test of Duplex Coating Systems of Thermal Spraying and Painting, *Proceeding of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.211-212 (in Korean).

---

**요 약 :** 금속용사 또는 도장은 강구조물의 방식에 널리 사용되고 있다. 금속용사와 도장의 복합피복방식법은 혹독한 부식환경하에 놓인 강구조물의 새로운 일반적 피복방식법으로 선택되고 있다. 본 연구에서는 아연, 아연-15%알루미늄 합금, 알루미늄, 알루미늄-5%마그네슘 합금의 4종류 금속용사 후 실링 처리한 시편, 4종류 금속용사 후 중방식 도장한 시편과 도장한 시편에 대해 175일간의 NORSOK M-501 부식촉진실험, 250일간의 해수 Wet/dry 반복 부식실험, 3년간의 해양환경 옥외노출실험을 실시하였다. 그 결과, 외관관찰에 근거하여 각 방식법의 내후성능을 비교, 검토하였다.

**핵심용어 :** 부식, 강구조물, 복합피복방식, 금속용사, 도장, 내후성능

---