

무도장 내후성 강 교량의 밀폐형 박스거더 내부의 부식에 대한 고찰

마승환¹, 노영태¹, 장건익^{2*}

¹한국건설생활환경시험연구원, ²충북대학교 신소재공학과

The study on corrosion of the inner area of closed box-girder for unpainted weathering steel bridges

Seung-hwan Ma¹, young-tai Noh¹, gun-ik Jang^{2*}

¹Korea Conformity Laboratories

²Department of materials Science and Engineering, Chungbuk National University

요약 내후성 강재는 대기환경에서 내식성이 우수하여 강교량의 재료로 많이 사용되고 있다. 그러나 내후성 강은 해수와 가까운 지역, 음지 및 습도가 높은 환경에서는 안정된 녹층이 형성되지 않고, 일반녹이 발생하고 있다. 따라서 열악한 대기 환경을 가지는 일본에서는 무도장으로 사용하지 않고, 녹안정화 처리를 하고 있는 상황이다. 그러나 국내에서 건설된 내후성 강은 대부분 무도장으로 건설되었고, 견습의 주기적인 반복이 일어나기 어려운 밀폐형 박스거더형으로 건설되었다. 특히, 한강수변위에 건설된 강교량의 경우, 수분의 증발, 온도차에 의한 결로 및 우수에 의한 체수 등으로 내후성강의 부동태 피막 형성에 해로운 영향을 미치고 있다. 이에 따라, 본 연구에서는 상수도 보호구역에 무도장 내후성 강으로 건설된 교량의 밀폐형 박스거더 내부의 부식 특성을 분석하기 위하여, 육안에 의한 관찰, 셀로판 테이프 시험, 강재 두께 측정, 표면 부식 전위 측정, 채취한 녹의 전자현미경 분석 및 X선 회절 분석을 실시하였다. 분석을 통하여, 밀폐형 박스거더 내부에서 불안정녹층이 관찰되었으며, 특히, 상부 및 하부 플랜지의 경우 우수에 의한 체수, 결로 및 제설제에 의한 영향 등으로 부식 정도가 심하게 관찰되었다.

Abstract Weather proof steels are used for steel bridges due to its high corrosion resistance under atmospheric conditions. However, instead of forming stabilized rust layers, general rust occurs on weather proof steels under high humidity condition close to seawater or shady places. In Japan, therefore, they perform rust stabilization treatment instead of unpainted treatment due to severe atmospheric conditions. However, most of domestic weather proof steels were constructed unpainted in the form of closed box-girder, which makes the periodical repetition of dry and wet hard to occur. For the steel bridges constructed on the Han river, the evaporation of water, dew condensation due to temperature change, and stagnant water due to rain affect harmfully on the formation of passive film on weather proof steels. Thus, in this research, in order to analyze corrosion properties inside the closed box-girder for the unpainted weather proof steel bridge in the waterworks safety zone, multiple ways of analysis such as observation with eyes, cellophane-tape test, steel thickness measurement, surface corrosion potential measurement, electron microscope analysis, and X-ray diffraction analysis of the rust were performed. As a result, unstable rust layer was observed inside the closed box-girder, and severe corrosion was observed on the top and bottom of the flanges due to the effects of stagnant water caused by rain, dew condensation, and de-icing materials.

Key Words : Closed box girder; Corrosion ; Unpainted Weathering Steel

본 논문은 국토교통부 지원사업으로 2012년 선정된 건설기술혁신사업의 연구 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : gun-ik Jang(Chungbuk National University)

Tel: +82-43-261-2412 email: gejang@chungbuk.ac.kr

Received March 4, 2015

Revised March 31, 2015

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

1. 서론

내후성 강재는 Cr, Cu, P 등의 합금 원소를 소량(0.1 ~ 1.0 %) 함유한 저합금강으로 대기환경에서의 내식성(내후성)이 우수하다. 사용개시 초기는 붉은 녹이 생성되지만, 5년 이상 장기 사용을 통하여 표면에 안정녹층이 형성되어 이후 부식 속도가 급격히 감소하게 된다. 이러한 특성 때문에, 무도장 또는 다른 코팅 처리 없이 환경 보호 및 낮은 유지보수 비용을 이유로 강교량에 널리 적용되고 있다.[1]

내후성 강은 1920년대에 미국에서 개발되어 주로 텍사스와 같이 건조지역에 건축물, 송전철탑의 건설에 적용되기 시작하였으며, 1960년대부터 무도장 내후성 강교량에 사용되기 시작하였으며, 현재는 전체 강교량의 45 %까지 내후성 강교량을 사용하고 있다. 국내와 자연환경이 유사한 일본은 1955년도에 내후성 강을 개발하여 1986년부터 교량의 유지관리가 어려운 산악지역의 철도 교량으로 채택하기 시작하여 1988년 일본 최초의 무도장 내후성 강 현수교를 건설하였고 이후 많은 교량들이 무도장 내후성 강으로 건설하였다. 그러나 내후성 강의 내식성은 주위 환경에 의하여 영향을 심하게 받으며, 특히, 공업지대와 해안 등의 부식성이 심한 환경과 음지, 습도가 높거나 결로가 되기 쉬운 장소에서의 무도장 사용은 충분한 타당성 검토가 필요한 상황이다. 즉, 미국과 같이 비교적 건조하고, 건습이 주기적으로 반복되는 환경에서는 내후성 강은 우수한 내부식 특성을 나타내고 있으나, 일본과 같이 해수와 가까이 있는 지역, 음지 및 습도가 높은 환경에서는 안정된 녹층을 형성하지 못하고, 일반녹이 발생하는 현상을 나타내고 있다. 열악한 부식 환경을 가지는 일본에서는 내후성 강 폭로 초기의 녹물과 녹의 비산으로 인한 오염 문제가 발생하는 등의 이유로 무도장으로 사용하는 경우는 극히 드문 실정이며, 녹안정화처리, 도장 처리를 적용하고 있다.[2]

국내에서는 1991년 내후성 강재를 생산하기 시작하면서 교량에 처음 적용하기 시작하였으며, 주로 상수원 보호구역에 집중적으로 무도장 내후성 강교량이 건설되었다. 무도장 내후성 강교량의 장점 중에서 환경 보호적 측면을 고려한 결과로 볼 수 있다. 그러나 국내에서 내후성 강으로 건설된 강교량의 경우, 특히 강교량의 박스거더가 개방형이 아닌 Fig. 1과 같은 밀폐형으로 건설되어 있어, 박스거더 내부의 우수에 의한 체수 및 높은 습도로

인하여 부식에 영향을 주고 있는 상황이다.

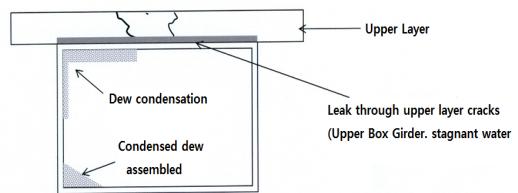


Fig. 1. Schematic of closed box girder

특히, 한강수면 위에 설치된 교량의 경우 연중 안개 일수가 많고, 다른 교량에 비하여 습도가 높아 내후성 강재의 부동태 페막 형성의 필수요소인 건습의 반복이 어려운 부식에 대해서는 불리한 환경적 요인을 가지고 있다. 내후성 강이라도 지속적으로 수분에 침적되면 가속 부식이 발생하게 되어, 강구조물의 설계 및 건설시 체수 부위가 발생되지 않도록 주의할 필요가 있으며, 외면의 경우 대기의 건조에 따라 쉽게 건조 될 수 있도록 하고, 내면의 경우 내후의 주요소인 태양과 우수의 효과가 없고 온도와 습도 변화에 따른 수분의 응축 및 증발이 반복될 수 있는 구조로 설계하여야 한다.[3]

따라서 본 연구에서는 상수도 보호구역에 무도장 내후성 강으로 건설된 교량의 밀폐형 박스거더 내부의 부식 특성을 분석하기 위하여, 육안 점검에 의한 현장조사를 실시하였으며, 박스거더 내부의 발생한 녹의 외관 관찰에 의한 분석, 셀로판테이프에 의한 녹 박리시험, 내후성강재의 두께 손실 측정, 표면부식 전위 측정, 박스거더 내부의 채취한 녹의 전자현미경 분석 및 XRD 분석에 의한 녹의 진행 상태를 조사, 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 내후성 강교량의 박스거더 내부의 내후성 강재의 안정녹 진행 상태를 분석하기 위하여 국내외 관련된 논문 및 표준을 참조하여 박스거더 내부에 발생된 녹의 진행 상황을 분석하였다.

2.1 외관 관찰

무도장 내후성 강으로 건설된 강교량의 방식 상태를 평가하기 위해 먼저 육안에 의한 외관 관찰을 실시하였

다. 육안 점검에 의한 외관조사에서 안정녹의 판정기법은 현재 별도로 수집된 기준은 없다. 본 연구에서는 무도장 내후성 교량의 부식 평가에 대한 국내외 논문의 외관조사방법을 참조하였다. Table 1, Table 2에서는 외관조사에서는 녹의 색조, 녹의 조밀도, 녹의 색변화를 관찰하여 안정녹이 형성되고 있는가를 4단계로 평가하였다.[4,5]

Table 1. The evaluation of the rust color

Grade	Color
3	Dark Brown
2	Brown ~ Dark Brown
1	Red ~ Brown
0	Yellow ~ Red

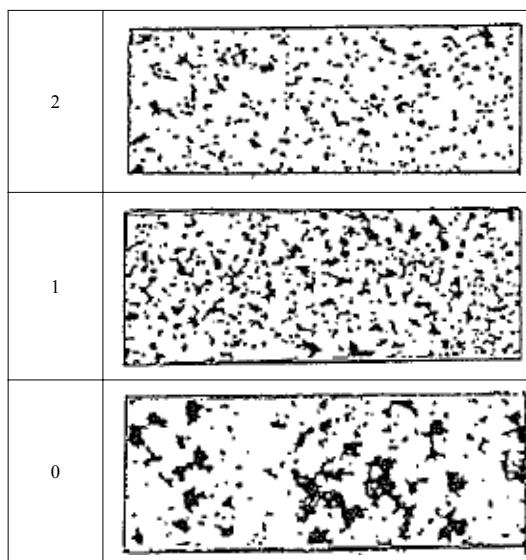


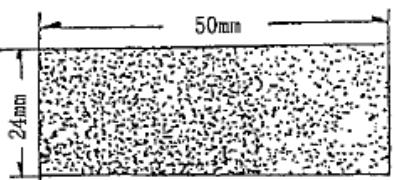
Table 2. The evaluation of the rust density.

Grade	Distribution of the rust
3	Overall distribution is dense and fine.
2	Overall distribution is dense and fine, but some lumps of the rust still exist.
1	Lumps and thin rust exist together.
0	Distribution is sloppy.

2.2 셀로판테이프 박리시험

본 연구에서는 외관조사에 의한 방법 외에 또 다른 방법으로 폭 24 mm의 셀로판테이프를 이용하여 테이프에 묻어 나오는 강재 표면의 녹입자 크기, 양 및 녹의 분포 형상에 따른 안정녹의 형성 여부를 Table 3과 같이 간접적으로 측정하였다.[6]

Table 3. The evaluation by the cellophane tape test.

Grade	Distribution of the rust
3	

2.3 박스거더 내부의 두께 측정

박스 거더 내부의 내후성 강의 부식에 의한 두께 감소 정도를 측정하기 위하여 박스거더 내부 상판, 하판 및 측판의 두께를 전기식 도막 두께 측정기를 이용하여 분석하였다.

2.4 표면 전위 시험

금속이 접하고 있는 환경에서 표면이 유지하는 전위를 말하여, 이러한 표면 전위 값을 측정하여 부식의 진행 여부를 판단할 수 있다. 표면 전위차 측정에 대한 부식 평가는 철근 부식 진단에서 많이 활용되고 있으며[7-9], 이를 내후성 강재의 표면 전위 값을 측정함에 따라 부동태 피막의 형성 정도, 부식 활성화 영역, 안정화 영역을 평가할 수 있다. 따라서 이를 응용하여 박스거더 내부의 상판, 하판 및 측판의 표면 전위값을 측정하여 녹의 진행 여부를 Table 4의 ASTM C 876-91시험방법에 Fig. 2와 같이 시험하였다.[10]

Table 4. Risk of corrosion by half-cell mapping measurements(ASTM C 876-91)

(Cu/CuSO ₄ half-cell)	Possibility of corrosion
-200 mV	low(10 %)
-200 mV ~ -350 mV	uncertain
-350 mV	high(90 %)

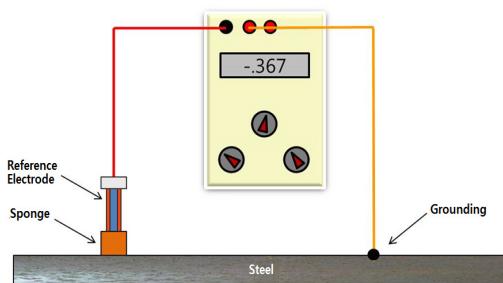


Fig. 2. Schematic diagram of surface electrical potential test

2.5 전자 현미경 시험

무도장 내후성 강 교량의 박스거더 내부의 안정녹 부분과 녹 발생 부위의 녹을 채취하여, 전자현미경 분석을 실시하였다. 채취한 녹은 전자현미경 분석을 위하여 백금 코팅한 후, 녹의 형상 및 녹 성분을 SEM-EDS (HITACHI)를 이용하여 분석하였다.

2.6 XRD 시험

무도장 내후성 강 교량의 박스거더 내부의 안정녹 부분과 녹 발생 부위의 녹을 채취하여, X-ray diffraction (XRD, Rigaku)을 이용하여 분석을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 외관 관찰 및 셀로판 테이프 시험

무도장 내후성 강 교량의 조사결과, 외부 표면에는 부동태 피막이 전체적으로 흑갈색이고, 녹의 조직이 미세하고 치밀한 안정녹층을 형성하고 있었다. 이는 내후성 강의 부동태 피막을 형성하기 위한 조건인 주기적인 건·습 반복의 결과로 부동태 피막층이 형성되었다고 판단된다. Table 5, 6 및 Fig. 3~10은 36경간과 37경간의 박스거더 내부의 위치별 외관평가 결과를 나타내었다.

Table 5와 같이 박스거더 내부는 각각 위치별로 안정녹과 불안정녹이 혼재되어 있음을 알 수 있었다. 박스거더 내부의 오른쪽과 왼쪽 측면 부위는 일부 안정녹층이 형성되어 있었으나, 결로 및 우수의 유입으로 체수 되기 쉬운 상부와 바닥은 국부적으로 불안정녹층이 형성되었다. 관찰된 녹입자는 크고, 거칠며, 색상 또한 붉은 색을 띠고 있었다. 박스거더 내부의 하부 플랜지에서는 총상

박리녹이 다수 발견되었고, 박리된 흑피가 다량으로 관찰되었다. Fig. 3에서는 안정적인 부동태 피막이 형성된 36경간의 좌측면을 나타내었다. Fig. 4, 5는 36경간의 바닥면과 상부면의 상태를 나타내고 있으며, 바닥면과 상부면이 모두 녹이 치밀하지 않는 일반녹이 형성되어 있음을 보여준다. 이는 결로 및 우수에 의한 영향으로 불안정녹이 형성되었다고 판단된다. Fig. 6~8은 37경간의 상부, 하부, 측면의 사진을 나타내었다. 결과는 상부면과 하부면은 모두 불안정녹층이 진행되고 있었으며, 일부 좌측면과 우측면은 안정녹층이 관찰되었다. Fig. 9, 10은 셀룰러 테이프에 의한 시험한 결과를 나타내고 있으며, 안정녹층과 불안정녹층에 대한 테이프 시험 결과를 나타내었다.

Table 5. The evaluation results of the box girder(inner)

Check List	Area	density grade	color grade	celloph. tape test	General Evaluation	Site
Evaluation of the box girder (inner)	Upper	2	2	1	unstable, red-brown	36th Span G2
		1	1	1	unstable, red	
		1	2	2	unstable, red-brown	
	Bottom	1	1	1	unstable, red	
		1	2	1	unstable, red-brown	
		2	1	1	unstable, red-brown	
Right	3	2	3	unstable, red-brown		
	3	3	3	Stable, black-brown		
	2	2	2	unstable, red-brown		
	3	2	2	Stable, black-brown		
Left	3	3	2	Stable, black-brown		
	2	2	2	unstable, red-brown		

Table 6. The evaluation results of the box girder(Inner)

Check List	Area	density grade	color grade	celloph. tape test	General Evaluation	Site
Evaluation of the box girder (inner)	Upper	1	1	1	unstable, red	37th Span G2
		2	2	2	unstable, red-brown	
		2	1	2	unstable, red-brown	
	Bottom	1	2	1	unstable, red-brown	
		2	1	1	unstable, red-brown	
		1	2	1	unstable, red-brown	
	Right	2	2	2	unstable, red-brown	
		2	3	2	unstable, red-brown	
		3	3	3	Stable, black-brwon	
	Left	2	2	2	unstable, red-brown	
		2	3	3	Stable, red-brwon	
		3	2	3	Stable, black-brwon	



Fig. 3. Box girder (36th span, left)

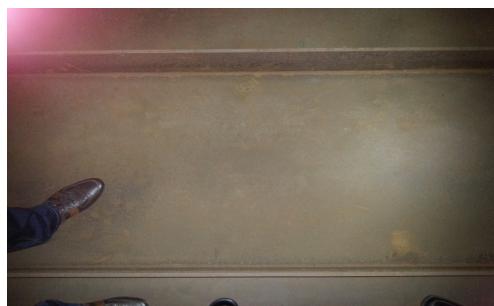


Fig. 4. Box girder (36th span, bottom)



Fig. 5. Box girder (36th span, upper)



Fig. 6. Box girder (37th span, upper)



Fig. 7. Box girder (37th span, left)



Fig. 8. Box girder (37th span, bottom)



Fig. 9. Box girder (36th span, left)



Fig. 10. Box girder (37th span, bottom)

3.2 박스거더 내부 강재 두께 측정

무도장 내후성 강 교량의 불안정녹 및 층상 박리 등의 현상이 나타남에 따라 강재의 두께 손실이 예측되어, 현장 측정한 36경간과 37경간에 대한 두께 측정을 Table 7와 같이 실시하였다.

일반 강재의 경우 대기 환경에서의 부식 속도는 0.01 mm/year 의 부식 손실률을 나타내고 있으며, 내후성 강재의 경우 내식성이 일반 강재에 비하여 5 ~ 10 배 정도로 우수하여, 도심 지역에서의 평균 부식률이 0.01 mm/yr 정도로 보고되고 있다.[3] 이는 건설 후 10 년 차인 내후성 교량에 대한 부식 진단에서 부분적인 차이는 있지만, 상부 플랜지 두께가 0.9 mm 까지 감소한 것으로 보면 상판에 유입되는 우수의 영향 및 겨울철의 제설 제로 사용되는 염화칼슘(CaCl_2)의 영향도 작용한 결과로 분석된다. 이는 일반강의 부식속도와 유사하며, 박스거더 내부의 녹이 우수의 체수 및 염화칼슘 등의 영향으로 부동태 피막층으로 형성되지 못하고, 일반강의 녹처럼 진행되고 있다고 판단된다.

Table 7. The results of actual thickness of the box girder(Inner)

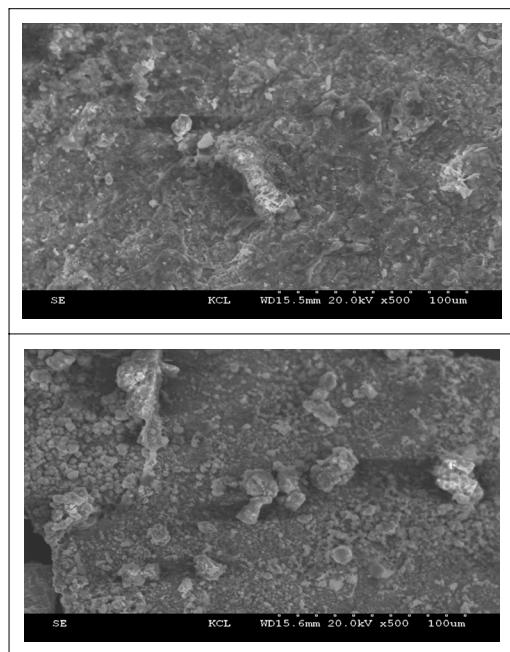
Site	Area	Thickness of drawing (mm)	Actual thickness (mm)	Thickness variation(mm)	Thickness variation(%)
36th Span G2	Upper	12	11.12	0.88	4.27
		12	11.25	0.75	4.38
		12	11.16	0.84	4.30
	Bottom	12	11.24	0.76	4.37
		12	11.20	0.80	4.33
		12	11.12	0.88	4.27
	Right	12	11.59	0.41	4.66
		12	11.42	0.58	4.52
		12	11.55	0.45	4.63
	Left	12	11.52	0.48	4.60
		12	11.37	0.63	4.48
		12	11.46	0.54	4.55
37th Span G2	Upper	12	11.35	0.65	4.46
		12	11.15	0.85	4.29
		12	11.07	0.93	4.23
	Bottom	12	11.36	0.64	4.47
		12	11.27	0.73	4.39
		12	11.32	0.68	4.43
	Right	12	11.43	0.57	4.53
		12	11.51	0.49	4.59
		12	11.60	0.40	4.67
	Left	12	11.46	0.54	4.55
		12	11.56	0.44	4.63
		12	11.30	0.70	4.42

3.4 표면 전위 시험

한강 수면위에 건설된 내후성 강 교량의 표면전위를 측정하여 Table 8에 나타내었다. 전위 값에 따른 부식 정도를 보면 36경간과 37경간 모두 상부 및 하부 플랜지에서 표면 전위가 -350 mV 이상의 전위값을 나타냈으며, 이는 부식 가능성이 매우 높아 활성화가 진행되고 있는 것으로 판단된다. -200 mV ~ 350 mV 사이 값으로 측정된 영역에서도 대체로 전위값이 높게나와 부식의 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 표면 전위 측정 결과와 육안 측정 결과가 대체로 일치하고 있음을 보여주고 있는 것으로 판단되며 부식 가능성이 매우 높은 부위에는 적절한 방식대책이 필요할 것으로 판단된다.

Table 8. The results of electric potential test of the box girder(Inner)

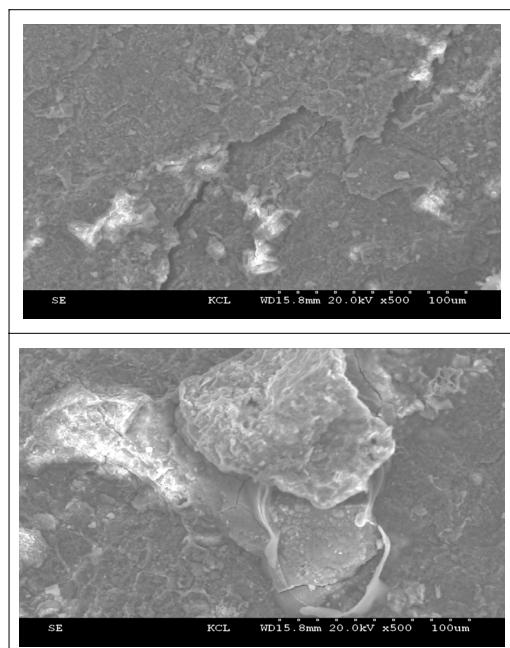
Site	Area	Electrical Potential (mV)	Possibility of corrosion
36th Span G2	Upper	-370	High
		-285	uncertain
		-360	High
	Bottom	-360	High
		-368	High
		-312	uncertain
37th Span G2	Right	-261	uncertain
		-259	uncertain
		-310	uncertain
	Left	-285	uncertain
		-360	High
		-285	uncertain

**Fig. 11.** SEM Images from stable rust area

3.5 전자현미경 시험 및 XRD 분석

현장에서 치밀하게 녹층이 형성된 부위(안정화녹층)와 불안정 녹층이 형성된 부위를 예리한 커터 칼로 긁어 분쇄하여 분말 시료를 만들었다. 얻어진 녹 분말 시료를 진공 테시케이터에서 96 시간 건조한 후, 백금 코팅한 다음 Fig. 11~14와 같이 전자현미경 분석을 실시하였다.

전자현미경에 의한 미세조직 분석 Fig. 11에서는 비교적 안정된 녹을 형성하고 있는 부위의 미세조직을 나타낸 것으로 치밀하고 균열이 거의 없는 안정한 녹층을 형성하고 있었으며, Fig. 12의 불안정녹이 형성된 부위의 미세조직은 전체적으로 입자의 크기가 크고, 어떤 부위는 녹층이 벌크 형태로 탈락되어 있었으며, 균열 부위가 관찰되었다. 또한, 안정녹층과 불안정 녹층의 EDS 분석 결과는 Fig. 13, 14와 같이 주성분인 Fe, O가 주원으로 분석되었으며, 이는 녹 성분의 대부분이 FeOOH, Fe₃O₄로 구성되어 있어, 주성분인 Fe, O만 검출된 것으로 판단된다.

**Fig. 12.** SEM Images from unstable rust area

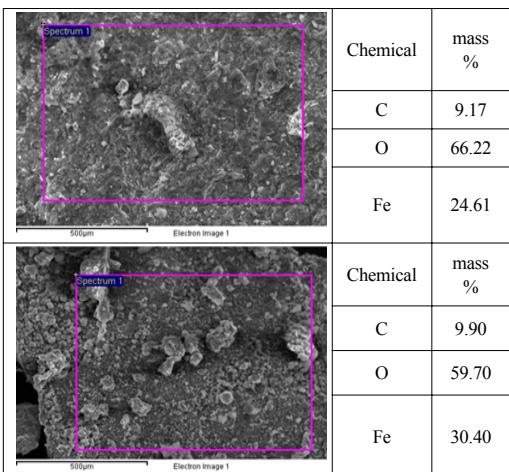


Fig. 13. EDS analysis from stable rust area

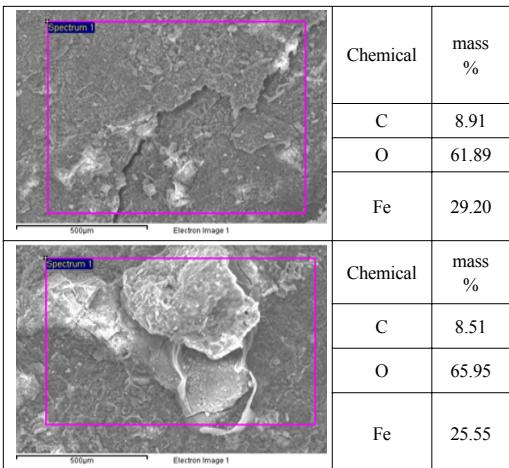


Fig. 14. EDS analysis from unstable rust area

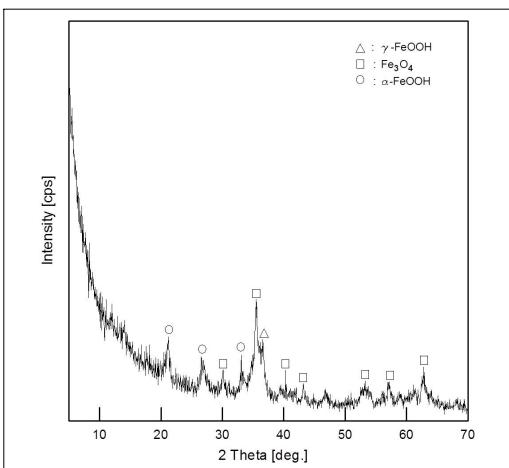


Fig. 15. XRD Analysis from stable rust area

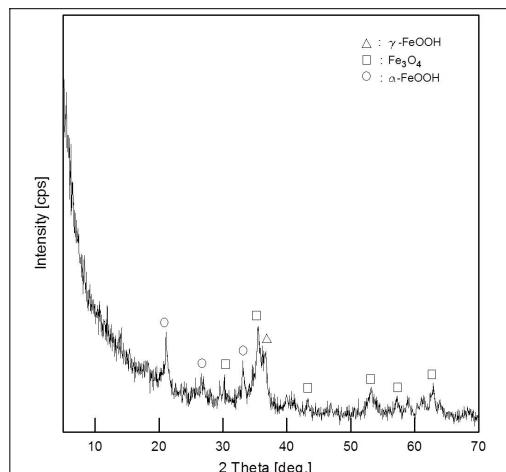


Fig. 16. XRD Analysis from unstable rust area

XRD 분석결과 Fig. 15, 16과 같이 안정녹층과 불안정녹층 모두 α -FeOOH, γ -FeOOH 및 Fe_3O_4 등이 나타남을 알 수 있었다. 내후성강재가 무도장으로 대기 중에 노출되어 안정된 산화피막 층이 형성되기 위해서는 장소에 따라 5 ~ 10년 정도의 시간이 요구되지만 내후성강의 녹층은 수년정도에서 합금원소를 함유한 비결정질인 내층과 외층 γ -FeOOH으로 되는 2층 구조를 가진 준안정녹층을 경유하여 수년간의 대기부식을 통해 최종 안정녹층을 형성하게 된다.[11-13] 그 안정녹층은 내층 α -FeOOH, 외층 γ -FeOOH로 부터 2층 구조를 만들고, 전자는 상온의 $\text{Fe}-\text{H}_2\text{O}$ 계로 열역학적인 안정한 최종 녹으로 생성된다. 그러나 대기 환경의 영향 등으로 이러한 반응이 촉진되거나 과다하게 일어날 경우 불안정한 녹층을 형성하게 된다. Fig. 15, 16와 같이 XRD 분석결과 나타나는 원소들의 차이가 없는 것은 약 10년 정도 대기 환경에 노출되어 안정녹 및 준안정녹 모두 동일한 원소를 포함하는 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 무도장 내후성 강으로 건설된 강교량의 박스거더 내부의 부식 특성을 분석하기 위하여 외관 관찰, 셀로판테이프 시험, 강재 두께 측정, 표면 전위 측정, 현장에서 채취한 녹 분말 전자현미경 분석 및 XRD 분석을 실시하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 밀폐형 박스거더 내부의 외관 관찰 및 셀로판테이프 시험 결과 다수의 불안정 녹 층 형성 부위가 관찰되었다.
- 2) 불안정녹층의 경우 녹이 치밀하지 못하고, 입자가 크며, 소지와의 접착력이 약해 떨어지는 것으로 분석되었다.
- 3) 강재 두께 측정 결과, 두께 감소가 매우 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 특히, 상부 및 하부 플랜지 부위가 양측면 부위보다 빠르게 감소함을 알 수 있었다. 이는 특성상 건습의 주기적인 반복의 어려움 등으로 안정녹이 형성되지 못하고, 불안정녹층이 형성된 결과라고 판단된다.
- 4) 강재의 표면 전위 측정 결과는 외관 관찰 결과 및 두께 측정 결과와 대체로 일치하였고, 상부 플랜지 및 하부 플랜지의 부식 전위 값이 높게 측정되었으며, 이를 통하여 부식이 활발히 진행되고 있다고 판단된다.
- 5) 현장에서 채취한 녹층의 미세조직 분석 결과 안정녹층은 비교적 치밀하고, 불안정녹층의 경우 입자의 크기가 크고, 균열 및 탈락되어 있는 것으로 분석되었다. 성분분석결과 검출되는 원소는 주원소로 Fe, O가 분석되었으며, 이는 녹의 주성분이 FeOOH, Fe₃O₄로 구성되어 있기 때문으로 분석된다. 향후 무도장 내후성 강교량의 방식 및 유지보수에 대한 기초 자료로 도움이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] Mathay Wl. Highway structures design hanbook. American Institute of Steel Construction Inc, 1993
- [2] Tsuneyasu Watanabe, "Weathering Steel", Corrosion Control, Vol. 1, pp 11~19, 1980.
- [3] Park, Jeong Real and Kim, Kyoo Young, "Long-term corrosion-resistance of an uncoated weathering steel and its on-line and in-situ measurements", journal of the korea institute for structural maintenance and inspection, Vol 16, No. 4, pp.415~423, 2004.
- [4] Yoshikazu Saito and Isamu Kano, "The Study of rust stability about the unpainted weathering steel offshore bridge 20 years since constructed", Corrosion Control, Vol. 6, pp. 193~199, 1991.
- [5] Hiroaki Goto, Yoshimi Naitoh, Masaki Fujishiro, Susumu Moriya, Motohiro Yamamoto and Makoto Saito, "The review of repair method by painting of the weathering steel bridge(||)", Corrosion Control, Vol.5, pp.31~41, 2010.
- [6] Andreas Momber, Hydroblasting and Coating of Steel Structures, Elsevier Science Ltd, pp.121~123, 2003.
- [7] Song, Ha-won, Lee, Chang-Hong and Lee, Kewn-Chu, "A study on corrosion potential of cracked concrete beam according to corrosion resistance assessment", journal of the korea institute for structural maintenance and inspection, Vol 13, No. 1, pp.97~105, 2009.
- [8] Oan-chul Choi, Young-su park and Hyung-yun Ryu, "Corrosion Evaluation of Epoxy-Coated Bars by Electrochemical Impedance Spectroscopy", journal of Concrete Structrues and Materails, Vol 2. No.2, pp.99~105, 2008.
- [9] DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/IJCSM.2008.2.2.099>
- [10] Lan Chung, Seung-ho Cho, Young-sook Roh and Joong-ko Kim, "Relationship between Corrosion Level of Rebar Embedded in Concrete Corrosion Potential and Current Density Measured by Non-destructive Test Method", journal of Corrosion and Protection, Vol.3, No.2, pp.87~94, 2004.
- [11] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete": C876-91, ASTM: Philadelphia, 1991.
- [12] T.Misawa, K. Asami, K. Hashimoto and S. Shimodaira, "The Mechanism of Atmospheric Rusting and the Protective Amorphous Rust on Low Alloy Steel", Corros. Sci., Vol. 14, No. 4, pp279, 1974.
- [13] DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-938X\(74\)80037-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-938X(74)80037-5)
- [14] J.T. Keiser and C.W. Brown, "Characterization of the Passive Film formed on Weathering Steels", Corros. Sci., Vol. 23, No. 3, pp251, 1983.
- [15] DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X\(83\)90106-3](http://dx.doi.org/10.1016/0010-938X(83)90106-3)
- [16] Hiroaki Goto, Yoshimi Naitoh, Masaki Fujishiro, Susumu Moriya, Motohiro Yamamoto and Makoto Saito, "The review of repair method by painting of the weathering steel bridge(||)", Corrosion Control, Vol.5, pp.31~41, 2010.

마 승 환(Seung-hwan Ma)

[정회원]



- 2007년 2월 : 전남대학교 금속공학과(공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 재료공학과(박사과정)
- 2008년 8월 ~ 현재 : 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원

<관심분야>
금속재료, 표면처리

노 영 태(young-tai Noh)

[정회원]



- 2001년 8월 : 연세대학교 금속공학과(공학석사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 신소재공학과(박사과정)
- 2014년 5월 ~ 현재 : 금속재료기술사, 표면처리기술사
- 2001년 11월 ~ 현재 : 한국건설생활환경시험연구원 책임연구원

<관심분야>
금속재료, 표면처리

장 건 익(gun-ik Jang)

[정회원]



- 1988년 12월 : 미국 University of Utah, 재료공학과(공학석사)
- 1992년 5월 : 미국 Michigan State University, 재료공학(공학박사)
- 1993년 2월 ~ 1994년 9월 : 한국 과학기술원 연구원
- 1994년 9월 ~ 1995년 9월 : 한국 원자력연구소 선임연구원
- 1995년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 신소재공학과 정교수

<관심분야>
전자 재료, 무기 재료