

[부록: 실적목록]

시험 평가 방법 및 지침서(안)

순번	제목	구분
1	도장이 없는 내후성 강교량에 적용되는 부식억제제 및 희생양극 실링재의 시험 평가 방법	기술제안
2	무도장 내후성강교량 방식 설계 지침서	기술제안
3	무도장 내후성강교량 방식 유지관리 지침서	기술제안

도장이 없는 내후성 강교량에 적용되는 내후성강, 부식억제제 및 실링재의 시험 평가 방법

Test method of weathering steel, corrosion inhibitors and sealing applied to weathering steel bridge

1 적용 범위 이 규격은 도장이 없는 내후성 강교량에 사용되는 내후성강 및 이에 적용하는 부식억제제, 실링재의 시험 평가 방법에 대하여 규정한다.

2 인용규격

다음의 인용규격은 이 표준의 적용을 위해 필수적이다. 발행연도가 표기된 인용규격은 인용된 판만을 적용한다. 발행연도가 표기되지 않은 인용규격은 최신판(모든 추록을 포함)을 적용한다.

EL610, 제설제

PNS Test Method B, Corrosion Rate as Conducted from the NACE Standard TMO169-95 (1995 Revision) and as Modified by the Pacific Northwest States

EM502-1, 제설제의 성능 평가 - 강재 부식 영향 시험 방법

ASTM F 436, Standard Specification for Hardened Steel Washers

KS A 0006, 시험장소의 표준상태

KS B 0806, 금속재료의 로크웰 경도 시험 방법

KS D 1652, 철 및 강의 스파크 방전 원자 방출 분광 분석 방법

KS D 3512, 냉간 압연 강판 및 강대

KS D 3529, 용접 구조용 내후성 열간압연 강재

KS D 3542, 고 내후성 압연 강재

KS D 9502, 염수 분무 시험 방법 (중성, 아세트산 및 캐스 분무 시험)

KS D ISO 22309, 마이크로빔 분석 - 에너지 분산 분광법(EDS)을 이용한 정량 분석

KS F 2621, 건축용 실링재 시험 방법

KS I 0051, 주사 전자 현미경 시험 방법 통칙

KS M 0016, 원자흡광 분석 방법 통칙

KS M 0032, 고주파 유도결합 플라즈마 방출분광분석 방법 통칙

KS M 1665, 산업용 아세톤

KS M 1715, 구리 및 구리 합금용 기화성 부식 억제제

KS M ISO 3696, 분석 실험용 물 - 규격 및 분석 방법

KS M ISO 6353-2, 화학 분석용 시약 - 제 2 부 : 규격 - 제 1 집

KS T 1085, 기화성 방청제

3 용어와 정의

이 규격에서 사용하는 주된 용어와 정의는 다음에 따른다.

3.1 부식억제제 (corrosion inhibitors) 용액이 금속 표면과의 반응에 의해서 현장에서 보호피복을 생성하여 부식성 인자와의 접촉을 차단하여 금속 표면을 보호하는 것. 수용성 부식억제제와 기화성 부식억제제가 있다.

3.2 내후성 강 (weathering steel) Cr, Cu, P 등의 합금원소를 소량 (0.1 % ~ 1.0 %) 함유한 저합금강으로 대기환경하에서 내식성(내후성이) 우수한 강을 말한다.

3.3 내후성 강교량 (weathering steel bridges) 도장을 하지 않고 내후성 강으로 제작된 교량을 말한다.

4 시험 환경 특별한 언급이 없는 한 KS A 0006 에 규정한 상온 5 °C ~ 35 °C, 상습 45 % ~ 85 % 의 조건에서 실시한다.

5 수용성 부식억제제의 시험 방법

5.1 수용성 부식억제제의 유해성 시험 수용성 부식억제제는 사용 및 폐기 단계에서 유해물질 배출과 관련하여 EL610에서 규정하는 다음 기준에 적합하여야 한다.

항목	납 (Pb)	비소 (As)	카드뮴 (Cd)	수은 (Hg)	크로뮴 (Cr)	구리 (Cu)	니켈 (Ni)	아연 (Zn)
기준 [mg/kg]	5 이하	2.5 이하	0.05 이하	0.05 이하	15 이하	20 이하	2.5 이하	50 이하

표 1 수용성 부식억제제의 유해물질 기준

5.1.1 시 약 사용 시약은 다음과 같다

- a) 질산 $\rho(\text{HNO}_3) = 1.4 \text{ g/mL}$, 65 % (m/m), 미량의 중금속도 함유되지 않은 등급
- b) 질산, 5 % (m/m), 미량의 중금속도 함유되지 않은 등급
- c) 염산 $\rho(\text{HCl}) = 1.19 \text{ g/mL}$, 37 % (m/m), 미량의 중금속도 함유되지 않은 등급
- d) 염산, 5 % (m/m), 미량의 중금속도 함유되지 않은 등급
- e) 표준용액 100 mg/kg 납, 비소, 카드뮴, 수은, 크로뮴, 구리, 니켈, 아연
- f) 물, KS M ISO 3696에서 규정하는 1등급의 물을 사용한다.

5.1.2 장치 및 기구 사용 장치 및 기구는 다음과 같다

- a) 유도결합 플라즈마 방출 분광 장치
- b) 원자 흡수 분광 광도계
- c) 유리제 플라스크
- d) 부피 분석용 유리제 플라스크 (25 mL)

5.1.3 분석 방법 유해성 시험의 분석 방법은 KS M 0016과 KS M 0032에서 규정하는 원자 흡수 분광 광도계(AAS)와 유도결합 플라즈마 방출분광 분석기(ICP-OES)를 이용하여 납, 비소, 카드뮴, 수은, 크로뮴, 구리, 니켈, 아연의 함량을 측정한다.

5.1.4 시료 채취량 0.1 mg의 정확도를 갖는 저울로 시료 5.0 g 을 정확히 단다.

5.1.5 시료 용액의 조제 다음 순서에 따라 시료 용액을 조제한다.

- 시료를 정확히 달아 분해 플라스크[5.1.2 c)]에 옮겨 넣고, 질산[5.1.1 b)]을 서서히 가하고 시계접시를 덮고 서서히 분해한다.
- 5.1.5 a)의 과정에서 분해가 되지 않을 경우, 염산[5.1.1 d)]을 소량 가하여 분해시킨다.
- 실온으로 냉각시킨 후 물[5.1.1 f)]로 플라스크의 벽과 시계접시를 씻어 낸다.
- 5.1.5 c)의 용액을 부피 분석용 유리제 플라스크[5.1.2 d)]에 옮겨 담고 표선까지 물을 채운다.
- 측정하고자 하는 표준용액 [5.1.1 e)]을 적당한 농도로 조제하여, 원자 흡수 분광 광도계와 유도결합 플라즈마 방출 분광기에 사용될 검정곡선용 표준용액을 조제한다.

5.1.6 원자 흡수 분광 광도계의 흡광도(AAS) 및 유도 결합 플라즈마 방출 분광기(ICP-OES)의 세기 측정

- 5.1.5 d)에서 얻어진 용액을 원자 흡수 분광 광도계(AAS) 및 유도 결합 플라즈마 방출 분광기(ICP-OES)에 주입하여 흡광도 및 세기를 측정한다.
- 시료를 넣지 않은 바탕시험을 함께 조작한다.

5.1.7 검정 곡선의 작성

- 5.1.5 e)에서 조제한 검정곡선용 표준용액을 5.1.6 a)의 조작을 시료와 병행 실시하여 얻어진 원자 흡광도 및 유도 결합 플라즈마 방출 세기를 각 원소별로 검정 곡선을 작성한다.
- 원자 흡수 분광 광도계(AAS) 및 유도 결합 플라즈마 방출 분광기(ICP-OES)에서 사용하는 권장 파장 및 권장 검정 곡선용 표준용액의 농도는 다음 표를 참고한다.

항목	납 (Pb)	비소 (As)	카드뮴 (Cd)	수은 (Hg)	크로뮴 (Cr)	구리 (Cu)	니켈 (Ni)	아연 (Zn)
검정곡선용 표준 물질의 측정 파장 (nm)	220.3 283.3	188.98	228.8	253.7	267.7 357.9	327.3 324.8	231.6	206.2

표 2 검정 곡선 작성용 표준 물질의 측정 파장

항목	납 (Pb)	비소 (As)	카드뮴 (Cd)	수은 (Hg)	크로뮴 (Cr)	구리 (Cu)	니켈 (Ni)	아연 (Zn)
검정곡선용 표준용액의 농도 (mg/L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.1	0.05	0.05	0.001	0.05	0.05	0.05	0.05
	0.5	0.1	0.1	0.005	0.1	0.5	0.1	0.5
	1.0	0.5	0.5	0.01	0.5	1.0	0.5	1.0
	5.0	1.0	1.0	0.02	1.0	5.0	1.0	5.0
	10.0	5.0	5.0		5.0	10.0	5.0	10.0
		10.0	10.0		10.0		10.0	

표 3 검정 곡선 작성용 표준 용액 농도

5.1.8 계산 5.1.6 a), 5.1.6 b)에서 얻어진 흡광도 및 방출 세기를 5.1.7에서 작성한 검정 곡선으로부터 납, 비소, 카드뮴, 수은, 크로뮴, 구리, 니켈, 아연 양을 구하고, 시료 중의 함량을 다음 식으로부터 계산한다.

$$E = \frac{A_1 - A_2}{S} \times V$$

여기에서 E : 시료 용액 중의 납, 비소, 카드뮴, 수은, 크로뮴, 구리, 니켈, 아연의 함량 (mg/kg)

A₁ : 시료 용액 중의 납, 비소, 카드뮴, 수은, 크로뮴, 구리, 니켈, 아연의 농도 (mg/L)

A₂ : 바탕 용액 중의 납, 비소, 카드뮴, 수은, 크로뮴, 구리, 니켈, 아연의 농도 (mg/L)

S : 채취한 시료량 (g)

V : 시료 용액의 채운 부피 (mL)

5.2 강재 부식성 시험 평가 부식억제제를 강재에 코팅하여, 건습조건의 반복을 통하여 부식억제제의 부식방지 성능을 평가한다.

5.2.1 시 약 사용 시약은 다음과 같다

a) 소금 KS M ISO 6353-2(R32)에 규정한 특급 염화나트륨 또는 이와 동등 이상의 것으로 한다.

b) 물 KS M ISO 3696에서 규정하는 1등급의 물을 사용한다.

5.2.2 장치 및 기구 사용 장치 및 기구는 다음과 같다

a) 강재 부식성 시험 장치 타이머가 부착된 것이어야 한다.

b) 화학분석 장치 인(P) 과 황(S)의 측정이 가능한 장비이어야 한다.

c) 유리제 플라스크 강재의 침지와 건조가 가능한 입구를 가진 것이어야 한다.

d) 강재 거치용 지지대 지지대는 그림 1과 같은 유리제로 된 것을 사용한다. 지지대의 모양 및 치수는 참고 사항으로 한다.

e) 샌드 블러스트 장비 (552 ± 69) kPa 의 압력이 가능한 장비일 것.

f) 전기식 지시 저울 0.1 mg 의 정밀도를 갖는 장비 일 것.

단위(mm)

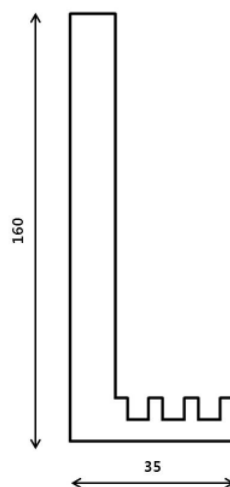


그림 1 강재 거치용 지지대 모식도

5.2.3 시 료 강재 부식성 시험에 사용되는 시료는 **ASTM F 436**의 기준에 상응하는 시료를 사용한다. 사용 기준은 다음 표와 같고, 그 형상은 **그림 2**에 따른다. 다만 시료의 형상 및 치수는 참고사항으로 한다.

항목	P (무게 분율 %)	S (무게 분율 %)	로크웰 경도 (HRC)
기준	0.050 이하	0.050 이하	38 ~ 45

표 4 강재 부식성 시험에 사용되는 강재의 기준

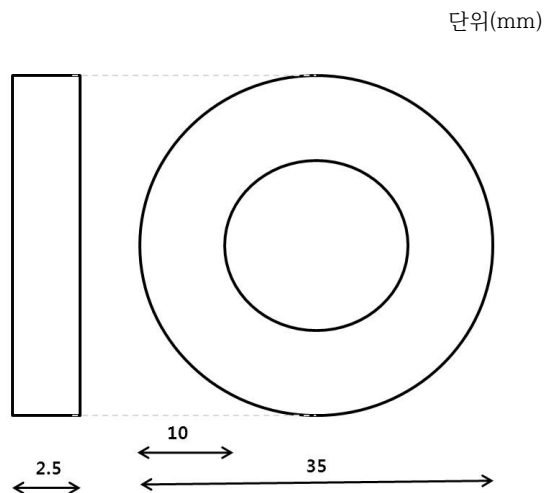


그림 2 강재 부식성 시험 시료

- 강재 부식성 시험에 사용되는 시료의 화학성분 시험은 **KS D 1652** 또는 이에 대응하는 적절한 시험 방법을 통하여 기준에 만족함을 확인한다.
- 강재 부식성 시험에 사용되는 시료의 경도는 **KS B 0806**에 따라 임의의 3 부분에 대한 평균값으로 기준에 만족함을 확인한다.
- 시료는 각 세 개씩 준비하며 표면적을 계산하여 기록한다.
- 강재 부식성 시험에 사용되는 시료는 부드러운 모래를 사용하여 (552 ± 69) kPa의 압력으로 블라스트 처리하고 **KS M 1665**에서 규정하는 아세톤으로 세척한 후 건조시킨다.
- 5.2.3 d)**에 따라 처리한 시료의 무게를 측정하여 기록한다.
- 바탕시험에 사용될 시료의 준비도 **a) ~ e)**의 동일한 과정을 진행한다.

5.2.4 시험 강재 부식성 시험은 다음과 같다.

- 수용성 부식억제제에 **KS M ISO 6353-2(R32)**에서 규정하는 소금을 무게 분율 10 %로 조제하여 유리제 플라스크[**5.2.2 c)**]로 옮긴다.
- 5.2.3**에서 준비한 세 개의 시료를 강재 거치용 지지대[**5.2.2 d)**]에 거치시킨다.
- 5.2.4 a)**에서 준비한 용액에 **5.2.4 b)**의 시료를 **5.2.2 a)**에 규정된 장비를 이용하여 10분간 침지 후, 50분간 건조하는 과정을 1 cycle로 하여 168 cycle 동안 시험한다.
- 시험 방법의 모식도는 **그림 3**과 같다.

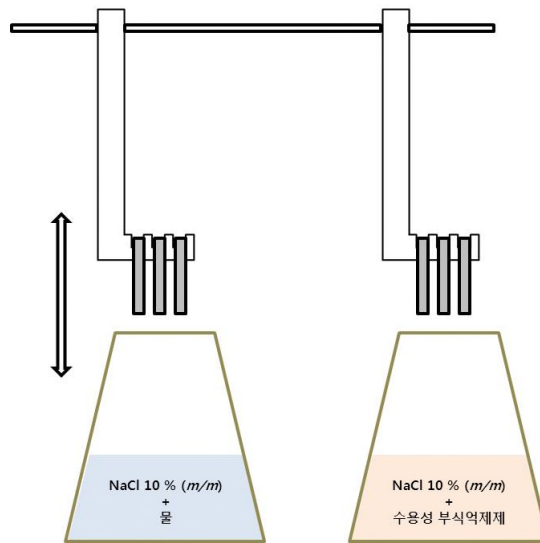


그림 3 강제 부식성 모식도

5.2.5 바탕시험 바탕시험은 수용성 부식억제제가 아닌 물에 소금을 무게 분율 10 % 로 조제하여 준비한다. 수용성 부식억제제의 강제 부식성 시험과 동시에 진행한다.

5.2.6 결과 5.2.4와 5.2.5 에 따라 시험을 완료한 시료는 다음의 순서로 결과를 산출한다.

- 시험이 완료된 강제 시료는 1 시간이상 자연 건조 시킨다.
- 건조된 시료는 5.2.3 d)에 따라 처리한다.
- 5.2.6 b)에 따라 처리한 시료의 무게를 측정하여 기록한다.

$$C_T = \frac{N_{SCI}}{N_{NaCl}} \times 100$$

여기에서 C_T : 바탕시험 대비 강재의 부식으로 인한 감량비 (%)

N_{SCI} : 수용성 부식억제제에 의한 강재의 단위 면적당 무게감량 평균값 (mg/cm^2)

N_{NaCl} : 바탕시험에 의한 강재의 단위 면적당 무게감량 평균값 (mg/cm^2)

5.3 수용성 부식억제제 NaCl 침지 시험 수용성 부식억제제에 KS M ISO 6353-2(R32)에서 규정하는 소금을 무게 분율 5 % 및 10 % 로 조제하여 강제 시료를 넣고, 28일 후 강재 표면의 부식 여부를 관찰한다.

5.3.1 장치 및 기구 사용 장치 및 기구는 다음과 같다

- 유리제 비이커 강재의 침지와 건조가 가능한 입구를 가진 것이어야 한다.
- 강재 거치용 지지대 지지대는 5.2.2 d)와 같은 것을 사용한다.
- 샌드 블러스트 장비 (552 ± 69) kPa 의 압력이 가능한 장비일 것.

5.3.2 시 약 사용 시약은 다음과 같다

- 소금 KS M ISO 6353-2(R32)에 규정한 특급 염화나트륨 또는 이와 동등 이상의 것으로 한다.
- 물 KS M ISO 3696에서 규정하는 1등급의 물을 사용한다.

5.3.3 시 료 5.2.3에 따라 처리한 강재 시료를 사용한다.

5.3.4 시험 침지 시험은 다음과 같다.

- a) 수용성 부식억제제에 KS M ISO 6353-2(R32)에서 규정하는 소금을 무게 분율 5 % 와 10 % 로 조제하여 유리제 비이커[5.3.1 a)]로 옮긴다.
- b) 5.3.3의 시료를 5.3.1 b)에 3개씩 거치시킨다.
- c) 5.3.4 a)에서 조제한 각 침지용액에 5.3.4 b)에서 준비한 시료를 침지 시킨다.
- d) 28일 후 강재 표면의 부식 발생 여부를 관찰한다.
- e) 바탕시험은 수용성 부식억제제 대신 물을 넣은 침지 용액에 대해서 시험한다.
- f) 시험 방법의 모식도는 그림 4와 같다.

5.3.5 결과 5.3.4에 따라 시험을 완료한 시료는 다음의 순서로 결과를 평가한다.

- a) 완료된 시료는 물로 서서히 닦아 낸다.
- b) 상온에서 약 1시간 정도 건조 시킨다.
- c) 강재의 부식여부를 육안으로 판단한다.
- d) 바탕시험의 부식 발생 정도와 함께 관찰한다.

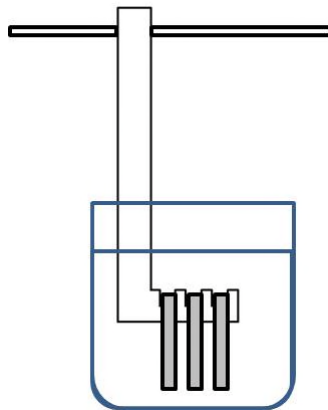


그림 4 침지 시험 모식도

5.4 수용성 부식억제제 피막 항온항습시험 강재 시료에 수용성 부식억제제를 코팅하여 항온항습 조건에서 28일 후 강재의 표면 부식 발생을 관찰하고 무게감량을 측정한다.

5.4.1 장치 및 기구 사용 장치 및 기구는 다음과 같다

- a) 강재 부식성 시험 장치 타이머가 부착된 것이어야 한다.
- b) 유리제 비이커 강재의 침지와 건조가 가능한 입구를 가진 것이어야 한다.
- c) 강재 거치용 지지대 지지대는 5.2.2 d)와 같은 것을 사용한다.
- d) 항온항습 시험 장비 온도 (35 ± 2) °C, 상대습도 (95 ± 3) % 조건이 유지되는 장비이어야 한다.

5.4.2 시험 피막 항온항습시험은 다음과 같다.

- a) 5.4.1 b)의 비이커에 수용성 부식억제제를 적당량 옮긴다.

- b) 5.2.3에 따라 준비한 강재를 5.4.1 c)의 지지대에 3개씩 거치시킨다.
- c) 5.4.1 a)의 시험 장치에 a)와 b)에 따라 준비하여 준비한다.
- d) 5.4.1 a)의 시험 장치를 설정하여 5분간 침지한 후 꺼내어 24 시간동안 상온에서 건조시킨다.
- e) 5.4.1 d)의 시험 장비를 조건에 맞게 설정한다.
- f) d)에서 준비한 시료를 e)에서 설정한 시험 장비에 넣는다.
- g) 28일 후 시험 장비에서 꺼내어 상온에서 1시간 정도 건조 시킨다.
- h) 완료된 시료의 부식 발생 여부를 육안으로 관찰하여 기록한다.
- i) 5.2.6에 따라 시료를 처리하고 무게 감량을 계산한다.
- j) 바탕시험은 블라스트처리만 완료한 강재 시료를 사용하여 실시한다.

5.4.3 결과 5.4.2 에 따라 시험을 완료한 시료는 부식 발생 여부에 대해 육안으로 관찰하고, 다음의 계산식에 따라 무게 감량 결과를 산출한다.

$$C_C = \frac{M_{SCI}}{M_{BLANK}} \times 100$$

여기에서 C_C : 바탕시험 대비 강재의 부식으로 인한 감량비 (%)

M_{SCI} : 수용성 부식억제제에 침지후 건조한 강재의 단위 면적당 무게감량 평균값 (mg/cm^2)

M_{NaCl} : 바탕시험에 의한 강재의 단위 면적당 무게감량 평균값 (mg/cm^2)

5.5 수용성 부식억제제 피막 염수분무 시험 강재 시료에 수용성 부식억제제를 코팅하여 염수분무 시험기에 장착하여 24시간동안 시험 후, 강재 시료 표면의 부식 발생 유무를 육안 관찰한다.

5.5.1 장치 및 기구 사용 장치 및 기구는 다음과 같다

- a) 강재 부식성 시험 장치 타이머가 부착된 것이어야 한다.
- b) 강재 거치용 지지대 지지대는 5.2.2 d)와 같은 것을 사용한다.
- c) 염수분무 시험 장비 온도 (35 ± 2) °C의 조건이 유지되는 장비이어야 한다. 장비에 대한 상세 사항은 KS D 9502 3 장치에 따른다.

5.5.2 시 약 사용 시약은 다음과 같다

- a) 소금 KS M ISO 6353-2(R32)에 규정한 특급 염화나트륨 또는 이와 동등 이상의 것으로 한다. 염수분무 시험에 사용하는 소금 용액은 (50 ± 5) g/L로 조제한다. 비중계를 이용하여 밀도를 측정하고 25 °C에서 1.029 ~ 1.036의 범위에 있는 것을 확인한다. 소금 용액의 pH는 6.5 ~ 7.2의 범위에 있도록 조제하여야 한다.
- b) 물 KS M ISO 3696에서 규정하는 1등급의 물을 사용한다.

5.5.3 시험 수용성 부식억제제 피막 염수분무 시험은 다음과 같이 진행한다.

- a) 5.2.3에 따라 준비한 강재 시료를 5.4.2 a) ~ d)에 따라 실시한다.
- b) a)에서 준비한 시료를 염수분무 시험 장비에 거치한다.
- c) 24시간 동안 염수분무 시험을 진행한다.

5.5.3 결과 5.5.3에 따라 시험을 완료한 시료는 부식 발생 여부에 대해 육안으로 관찰한다.

6 기화성 부식억제제(방청제)의 시험 방법

6.1 방청력 시험 기화성 방청제(부식억제제)는 KS T 1085에 따라 시험을 진행한다.

6.1.1 시험 개요 입이 넓은 병의 고무마개 중앙에 알루미늄관을 꽂고, 그 끝에 탄소강 시험편을 끼운다. 유리병 바닥 부분에 습도 조절용 글리세린 수용액을 넣고, 바닥에 기화성 방청제 분말을 바닥에 넣고, 시험체 유리병의 마개를 닫은 후, 시험편에 결로를 일으키기 위하여 알루미늄관에 냉수를 주입한다. 3시간 후, 물을 빼고, 일정시간 방치한 후에 탄소강 시험편의 녹 발생 유무를 조사한다.

6.1.2 시험편

a) 시험편의 제작 시험편은 지름 16mm, 길이 13mm의 일반 강재의 한 끝에 지름 및 깊이가 9.5 mm인 구멍을 뚫는다.

b) 시험편의 조정

- 연마 : 구멍을 뚫은 반대 끝을 연마포 또는 연마지로 연마한다.
- 세척 : 아세톤에 담그고 연마면의 오염을 깨끗한 종이 또는 풀을 먹이지 않은 깨끗한 천으로 닦아내고, 거기에 오염이 묻어나지 않을 때까지 깨끗하게 한다.
- 보존 : 즉시 시험에 사용하지 않을 경우는 포장용 실리카겔 건조제를 넣은 데시케이터 속에 보존한다. 다만, 8시간 이상 경과한 시험편은 다시 연마, 세척해야 한다.
- 재사용 : 시험편을 연마 재사용할 때, 시험편의 연마면과 구멍 바닥의 거리가 3.0 mm 이하가 되어서는 안된다.

c) 시험체

- 시험편은 구멍을 낸 쪽의 끝부분을 중앙부에 지름 약 15 mm의 구멍이 있는 #11 고무마개에 9.5 mm 삽입한다.
- 알루미늄관을 #23 고무마개의 중앙에 양끝이 같은 길이만큼 나오도록 꽂고, 고무마개 밑쪽 알루미늄관의 앞끝은 시험편에 닿을 때까지 고무마개 구멍에 삽입한다. 이 경우, #23 고무마개에는 기화성 방청제를 분무하기 위하여 유리관을 고무마개 두께만큼 꽂아 넣는다. 또한, 시험편을 취급할 때는 지문이 묻지 않도록 한다.
- 위의 알루미늄관에는 단열을 위해 시험편을 부착한 쪽의 #11 고무마개와 #23 고무마개 사이의 부분에는 고무관을, 또, 역방향으로 돌출한 알루미늄관에는 중앙에 약 15mm의 구멍을 뚫은 #11 고무마개를 #23 고무마개에 닿을 때까지 삽입한다.
- 입이 넓은 마개달린 갈아 맞추병의 바닥에 상대습도를 약 90 %로 조절하기 위해 글리세린 수용액(35 %) 10mL를 넣고, 이어서 시험편을 부착한 #23 고무마개로 마개를 한다.
- 기화성 방청제는 충분히 건조하여 막자사발로 분쇄한 것을 0.05 g을 취하여 입이 넓은 마개달린 갈아 맞추병의 밑에 균일하게 살포하고, 글리세린 수용액(35 %) 10 mL를 글리세린 수용액용 유리용기에 넣는 방법으로 채용해도 좋다.

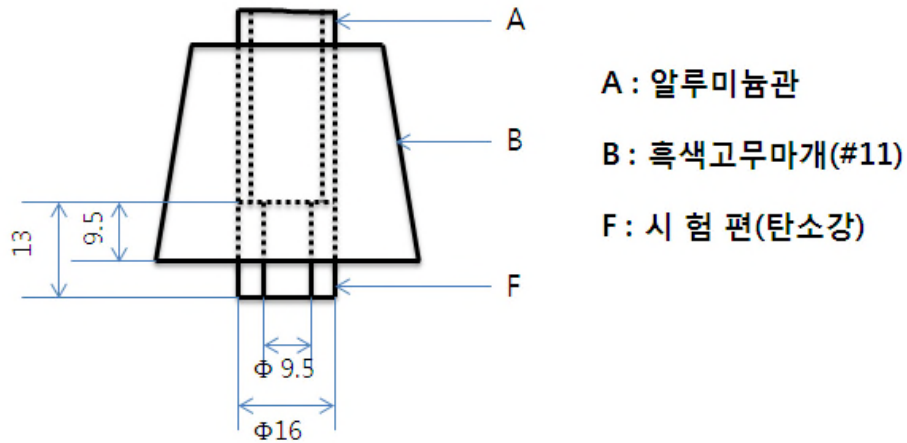


그림 5 시험편 부분의 확대 그림

6.1.3 시험 방법 시험체는 $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 로 유지한 항온장치에 넣고, H형의 기화성 방청제에 대해서는 1시간 후, L형 기화성 방청제에 대해서는 20시간 후에 $(0.0 \sim 2.0) ^\circ\text{C}$ 의 물을 알루미늄관에 채우고, 물을 주입한 3시간 후, 그 물을 제거하여 시험편 연마면의 녹 발생 유무를 확대경을 사용하여 육안으로 조사한다.

이 시험은 시험편 3개에 대하여 동시에 진행하여 3개중 2개 이상에 녹이 인정되는 경우는 녹이 발생한 것으로 판정한다. 또, 3개중 1개에 녹이 인정되는 경우는 다시 시험을 반복하여 3개 중 1개 이상에 녹이 인정되는 경우는 녹이 발생한 것으로 판정한다.

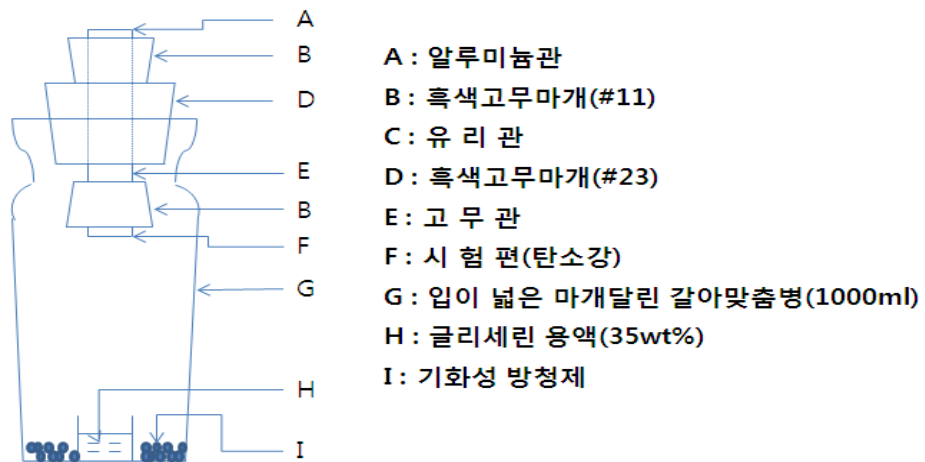


그림 6 기화성 방청성 시험장치

7 희생양극 실링재 및 성능 평가

항목	단위	기준치
슬럼프 (가로, 세로)	mm	3 이하
탄원 복원성	-	70 이상
인장특성 - 줄눈 나비의 신장률	-	200 (M100)
인장특성 - 인장능력 (23 °C)	MPa	0.4 초과
인장특성 - 인장능력 (-20 °C)	MPa	0.6 초과
파괴시 신장률	%	-
일정 신장 하에서 접착성	-	파괴되어서는 않된다
압축 가열, 인장 냉각 후의 접착성	-	파괴되어서는 않된다
확대, 축소 반복 후의 접착성	-	-
수중 침적 후의 일정 신장하에서의 접착성	-	파괴되어서는 않된다
수중 침적 후의 접착성 파괴시의 신장률	-	-
부피손실	%	10 이하

표 5 실링재 성능 평가 항목

6.1 슬럼프 시험

6.1.1 시험 기구 및 시료

a) **홈모양 용기** 알루미늄합금(KS D 6701에 규정하는 것 또는 이것에 KS D 8301에서 규정하는 황산 양극 처리 피막을 한 것)또는 내식성 금속으로 만들어진 홈모양 용기로, 길이는 (150 ± 0.2) mm로 하고, 양 끝이 열려 있으며, 아랫면의 한쪽이 (50 ± 0.5) mm 정도로 길이가 길고, 다음에 나타낸 내측 단면 치수의 어느 것을 만족하는 것으로 한다.

- 나비 (10 ± 0.2) mm · 깊이 (10 ± 0.2) mm
- 나비 (20 ± 0.2) mm · 깊이 (10 ± 0.2) mm

b) **시료의 준비** 각각의 홈모양 용기(잘 세척하여 건조된 것을 사용한다) 의 안쪽 바닥에 폴리에틸렌제 시트 1편을 깔고 꺾어서 바깥쪽에서 고정한다. 홈모양 용기의 안쪽에 미리 (23 ± 2) °C로 24시간 이상 둔 시료를 채워 넣는다. 시료를 채워 넣을 때에는 다음과 같은 점에 주의한다.

- 공기가 섞여 들어가는 것을 막는다.
- 시료를 홈모양 용기의 안쪽면에 밀어넣듯이 충전한다.
- 시료의 표면을 홈모양 용기의 윗면 및 양 끝과 동일하게 되도록 평활하게 한다.

6.1.2 시험 방법

a) 시험은 5 °C, 50 °C 및 70 °C 또는 이 중 어떤 온도에서도 가능하다. 온도별로 슬럼프(세로) 및 슬럼프(가로) 또는 이 중 어떤 조건에 대하여 시험한다.

b) 슬럼프(세로)시험체 제작 후 즉시, 시험체를 **그림 7**에 나타낸 것처럼 수직으로 매달아, 시험 온도에 24시간 놓아둔다. 각 시험체의 시료가 홈모양 용기의 홈부분 하단부터 흘러내린 앞 끝까지의 거리를 자로 측정한다.

c) 슬럼프(가로)시험체 제작 후 즉시, 시험체를 **그림 7**에 나타낸 것처럼 수평으로 하여 시험 온도에 24시간 놓아둔다. 각 시험체의 시료가 홈모양 용기의 끝부로부터 수평 방향으로 빠져나온 거리를 자로 측정한다.

d) 슬럼프(mm)를 정수값으로 끝맺음한 평균값으로 표시한다.

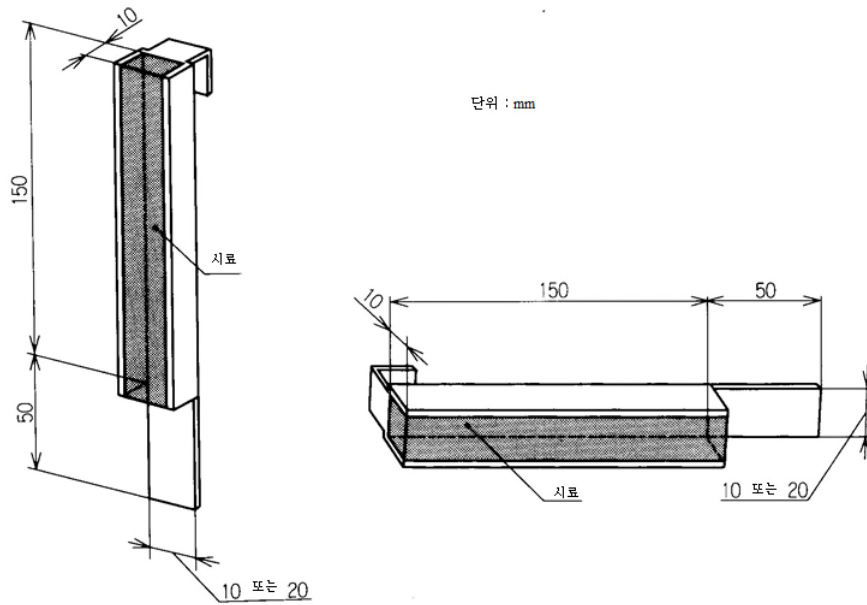


그림 7 슬럼프(세로) 및 슬럼프(가로)

6.2 탄성복원성 시험

6.2.1 시험 기구 시험기구는 다음과 같이 준비한다.

- a) **홈모양 피착체** 알루미늄합금 (KS D 6759에 규정하는 것, 또는 이것에 KS D 8301에서 규정하는 황산 양극 처리 피막을 한 것)으로 만들어진 그림 8과 같은 홈모양 피착체로서 단면 모양 12×12 mm, 두께 2 mm, 길이 70 mm인 것. 홈모양 피착체는 메틸에틸케톤(MEK) 등으로 세척하고, 깨끗한 면포 등으로 닦아낸다.
- b) 시험체 제작용 스페이서(스페이서의 재질이 시료와 접착하기 쉬운 경우에는 표면을 이형 처리한다) 치수 $12 \times 12 \times 10$ mm로, 실링재가 접착되지 않는 것.
- c) 변형 유지용 스페이서 다음과 같다
 - 신장용 스페이서 시험체를 표 6에 나타내는 초기의 줄눈 나비의 125 %, 160 % 및 200 %로 신장하여 유지할 수 있는 것.
 - 전단 변형용 스페이서 시험체를 표 6에 나타내는 줄눈 나비의 30 %의 전단 변형을 길이 방향에 더하여 유지할 수 있는 것.
- d) 이형재 시험체 제작에 사용하는 폴리테트라플루오르에틸렌(PTFE)
- e) 유리판 탭크(활석) 가루로 표면 처리한 것.
- f) 버니어 캘리퍼스 최소 단위 0.1 mm까지 측정 가능한 것.
- g) 인장 시험기 인장 속도를 (5 ~ 6) mm/min으로 조절할 수 있는 것.
- h) 공기 순환식 항온기 온도를 (70 ± 2) °C로 조절할 수 있는 것.
- i) 수조에 시험체를 완전히 담글 수 있는 것

신장률(l_1/l_0)%	신장시의 줄눈 나비(l_1) mm
125	15.0
160	19.2
200	24.0

※ 초기 줄눈 나비 12.0 mm

전단 변형률(l_s/l_0) %	전단 변형량(l_s) mm
30	3.6

※ 초기 줄눈 나비 12.0 mm

표 6 신장률 및 신장시의 줄눈 나비 및 전단 변형률 및 전단 변형량

6.2.2 시료 준비

시료는 다음에 따른다.

a) 줄눈 나비의 신장 또는 전단 변형 구분별로 3개의 시험체를 준비한다. 그림 8에 나타난 것과 같이 각 시험체에 대하여 2개의 홈모양 피착체와 2개의 시험체 제작용 스페이서로, $(12 \pm 0.3) \times (12 \pm 0.3) \times (50 \pm 0.6)$ mm의 공간을 만들고 이형재 위에 놓아둔다. 미리 $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 에 24시간 이상 놓아둔 시료를 시험체 제작용 스페이서와 홈모양 피착체의 공간에 충전한다.

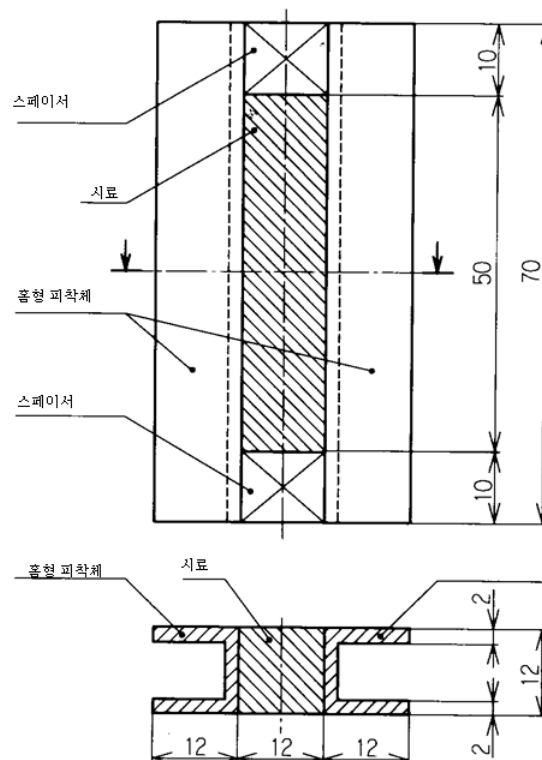


그림 8 탄성 복원성 시험체

b) 시료를 충전할 때에는 다음과 같은 점에 주의한다.

- 공기가 섞여 들어가는 것을 피한다.
- 시료를 피착면에 밀어 넣듯이 충전한다.
- 시료를 홈모양 피착제 및 시험체 제작용 스페이서의 윗면과 동일하게 되도록 평활하게 고른다.

c) 아래 그림에 나타난 것과 같이 시험체를 놓고, 시료가 경화 또는 건조하기 쉽도록 이형재를 가능한 빨리 제거한다. 시험체 제작용 스페이서는 설치한 그대로 둔다.

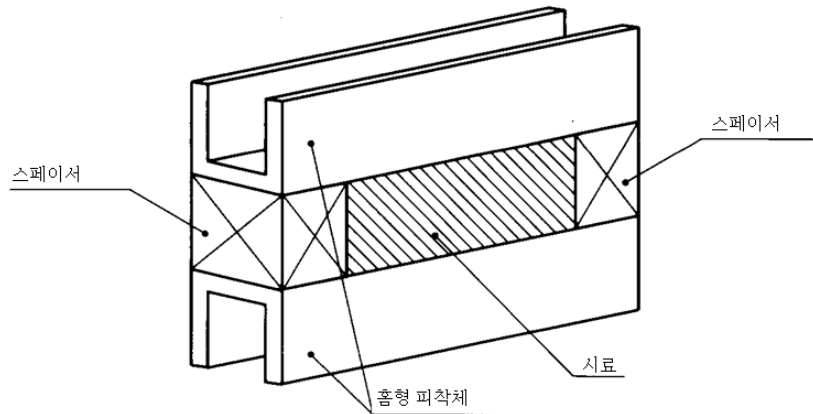


그림 9 경화 양생 중의 시험체 설치 방법

d) **시험체 양생** 인수·인도 당사자간의 협정에 의하여 시험체를 A양생 또는 B양생의 어느 조건에 따라서 양생한다. 양생 후, 시험체를 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, $(50 \pm 5)\%$ R.H. 조건에 24시간 이상 놓아둔다.

- A양생 시험체를 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, $(50 \pm 5)\%$ R.H. 조건에 28일간 놓아둔다.
- B양생(B양생은 열과 물의 영향을 알아보기 위한 조건이며, 실링재의 내구성을 평가하기 위한 것은 아니다) A양생에 따라 양생한 다음, 다음에 나타내는 사이클을 3회 반복한다.

- (1) $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에 3일간 놓아둔다.
- (2) $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 의 청정한 물속에 1일간 놓아둔다.
- (3) $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에 2일간 놓아둔다.
- (4) $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 의 청정한 물속에 1일간 놓아둔다.

6.2.3 시험 방법 시험방법은 다음과 같다.

a) 시험은 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, $(50 \pm 5)\%$ R.H.의 조건에서 실시한다.

b) 시험체로부터 시험체 제작용 스페이서를 빼내고, 초기의 줄눈 나비(10)를 시험체 양 끝부분에서 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정한다. 시험체를 인장 시험기에 설치하고 $(5 \sim 6) \text{ mm/min}$ 의 속도로 줄눈 나비가 초기 줄눈 나비의 125 %, 160 % 또는 200 %로 될 때까지 신장하고, 신장시의 줄눈 나비를 11로 한다.

전단 변형의 경우에는 줄눈 나비를 변화시키지 않고 시험체를 시료의 길이 방향으로 줄눈 나비의 30 % 정도로 어긋나게 하여 이 때의 변형량을 $1s$ 로 한다. 시험체의 초기 줄눈 나비(10) 12.0 mm에 대한 신장을 및 신장시의 줄눈 나비(11)와 전단 변형을 및 전단 변형량($1s$)을 표 6에 나타낸다.

c) 신장용 또는 전단 변형용 스페이서를 이용하여 규정 신장시의 줄눈 나비 또는 전단 변형시의 변형량으로 24시간 유지한다. 신장용 또는 전단 변형용 스페이서를 빼내고 그림 10에 나타난 것과 같이 시험체를 탭크 가루로 표면 처리한 유리판 위에 놓는다. 1시간 후, 복원시의 줄눈 나비(12)또는 전단 변형량 ($1s, 2$)을 시험체의 양쪽 끝부분에서 측정한다.

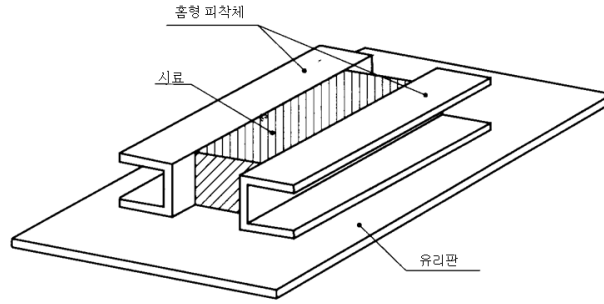


그림 10 측정시 시험체를 놓는 방법

6.2.4 시험 결과 탄성 복원성(%)을 3개의 시험체에 대하여 다음 식에 따라서 계산하고 정수값으로 끝맺음한 평균값으로 표시한다.

$$Re = \frac{l_1 - l_2}{l_1 - l_0} \times 100 \quad \text{또는} \quad Re = \frac{l_s - l_{s,2}}{l_s} \times 100$$

여기에서 Re : 탄성 복원성 (%)

0 : 초기의 줄눈 나비 (mm)

1 : 신장시의 줄눈 나비 (mm)

2 : 복원시의 줄눈 나비 (mm)

s : 전단 변형시의 변형량 (mm)

s,2 : 복원시의 전단 변형량 (mm)

6.3 인장 특성 시험 평가

6.3.1 시험 기구 시험 기구는 다음과 같다.

a) **피착체 및 시험체** 아래그림에 나타내는 치수 · 모양의 알루미늄판, 모르타르판 및 유리판 또는 이 중 어떤 것을 피착체로 한다. 또한 피착체 에서 규정하는 시험체를 이용해도 좋다. 피착체는 다음에 나타내는 것과 같은 방법으로 피착면을 깨끗하게 한다.

(1) 알루미늄판 메틸에틸케톤(MEK) 등으로 세척하고 깨끗한 면포 등으로 닦아낸다.

(2) 모르타르판 피착면을 연마지 등으로 연마하고, 부착된 분말 등은 브러시 등을 이용해서 제거한다.

(3) 유리판 메틸에틸케톤(MEK) 등으로 세척하고 깨끗한 면포 등으로 닦아낸다.

b) 시험체 제작용 스페이서 12 × 12 × 12.5 mm로 시료가 접착하지 않는 것.

c) 인장 시험기 위에서 규정한 것으로, 온도를 (-20 ± 2) °C로 조절할 수 있는 인장 시험용 항온기를 갖춘 것.

d) 저온 항온기 온도를 (-20 ± 2) °C로 조절할 수 있는 것.

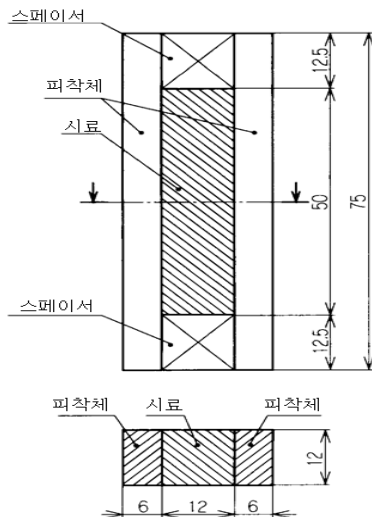


그림 11 알루미늄 및 유리 시험체

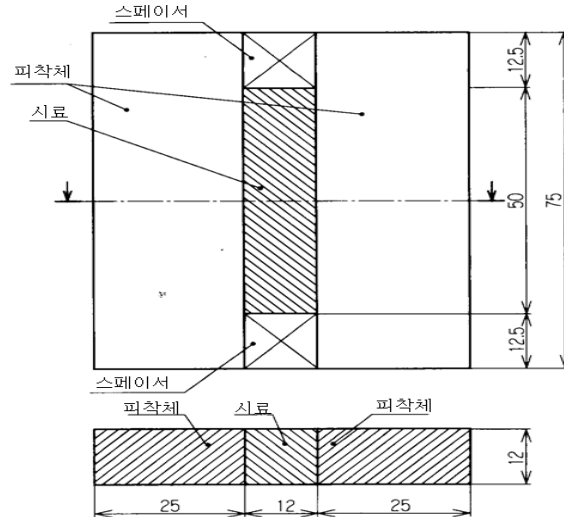


그림 12 모르타르 시험체

6.3.2 시료 준비 각 시험 온도별로 3개의 시험체를 준비한다. 그림 11 및 그림 12에 나타난 것처럼, 각 시험체는 2개의 피착체와 2개의 시험체 제작용 스페이서를 조합한 것으로 $(12 \pm 0.3) \times (12 \pm 0.3) \times (50 \pm 0.6)$ mm의 공간을 만들어 이형재 위에 놓는다. 필요에 따라서는 실링재 제조업자가 지정하는 프라이머를 사용한다. 미리 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에서 24 시간 이상 놓아둔 시료를 피착체와 시험체 제작용 스페이서와의 공간에 충전한다. 시험체 제작용 스페이서를 부착한 채, 아래그림에 나타난 것처럼 시험체를 놓고 시료가 경화 또는 건조하기 쉽게 이형재를 가능한 한 빨리 제거한다.

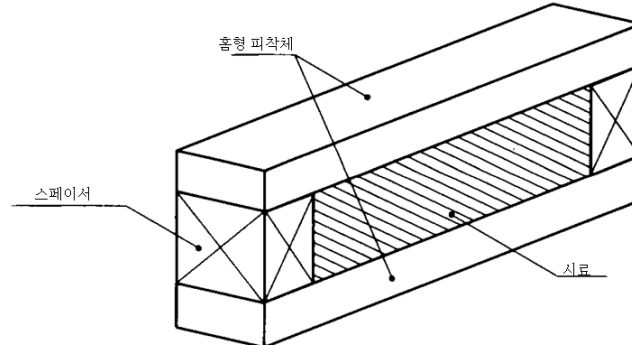


그림 13 경화 양생 중의 시험체 놓는 방법

6.3.3 시험 방법 시험 방법은 다음과 같다.

- 시험은 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 및 $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에서 실시한다. -20°C 에서 시험을 할 경우에는 시험 전에 시험체를 $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에 4 시간 이상 놓아둔다.
- 시험체로부터 시험체 제작용 스페이서를 떼어내고, 시험체를 인장 시험기에 부착하여, $(5 \sim 6)$ mm/min의 속도로 파괴할 때까지 인장하여 응력·변형 곡선을 기록한다.
- 일정 신장시의 인장 응력(N/mm²)을 소수점 이하 1자리까지 구하여 평균값으로 표시한다.
- 등급 12.5P 및 7.5의 경우에는 시험체의 변형량을 초기의 줄눈 나비로 나눈 파괴시의 신장(%)을 정수 값으로 끝맺음하여 평균값으로 표시한다.

6.4 일정 신장하에서의 인장 접착성 시험

6.4.1 시험 방법

- a) 시험은 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 및 $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에서 실시한다. -20°C 에서 시험하는 경우에는 시험 전에 시험체를 $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에서 4 시간 이상 놓아둔다.
- b) 시험체로부터 시험체 제작용 스페이서를 떼고, 시험체를 인장 시험기에 부착하여, $(5 \sim 6) \text{ mm/min}$ 의 속도로 줄눈 나비가 초기 줄눈 나비의 125 %, 160 % 또는 200 %가 될 때까지 신장한다. 신장용 스페이서를 이용하여 규정의 신장 나비에 24시간 유지한다. 전단 변형의 경우에는 줄눈 나비를 변화시키지 않은 채로 시험체를 시료의 길이 방향으로 줄눈 나비의 30% 어긋나게 한다. 전단 변형용 스페이서를 이용하여, 규정의 전단 변형량에 24 시간 유지한다. 시험체의 초기 줄눈 나비(l_0) 12.0 mm에 대한 신장률 및 신장시의 줄눈 나비(l_1)와 전단 변형률 및 전단 변형량(l_s)을 표 6에 나타낸다.
- c) 시험 종료 후, 신장용 또는 전단 변형용 스페이서를 부착한 채로 시료의 파괴 상황(접착 파괴 또는 응집 파괴)을 조사한다. -20°C 의 시험에서는 시험체를 저온 항온기에서 꺼내어 서리가 녹은 다음 조사한다.

6.5 압축 가열·인장 냉각 후의 접착성 시험

6.5.1 시험 방법 시험 방법은 다음과 같다.

- a) 확대·축소의 시험 속도는 $(5 \sim 6) \text{ mm/min}$ 으로 하고, 확대·축소율은 초기 줄눈 나비의 $\pm 12.5 \%$, $\pm 20 \%$ 또는 $\pm 25 \%$ 의 어떤 것으로 한다. 전단 변형의 경우에는 그 변형률을 시료 길이의 양 방향으로 줄눈 나비의 30 %로 하고, 가열시는 냉각시의 반대 방향으로 한다.
- b) 양생 종료 후 시험체를 다음에 나타낸 확대·축소 사이클 또는 전단 변형 사이클을 실시한다.
 - 1주째 1일째: 3시간에 걸쳐서 $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 로 냉각. $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에서 규정 치수까지 확대 또는 전단 변형. $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에서 21 시간 확대 또는 전단 변형을 유지한다.
 - 2일째: 확대 또는 전단 변형 해제 후, 3시간에 걸쳐 $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 로 가열. $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에서 규정 치수까지 축소 또는 역방향 전단 변형. $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 에서 21 시간 축소 또는 전단 변형을 유지한다.
 - 3일째: 축소 또는 전단 변형 해제 후, 1일째와 같다.
 - 4일째 : 2일째와 같다.
 - 5~7일째: 축소 또는 전단 변형 해제 후, $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ · $(50 \pm 5) \%$ R.H. 에 가만히 놓아둔다.
- 2주째: 상기의 사이클을 다시 한 번 반복한다.

c) 사이클 종료 후, 시료의 파괴 상황(접착 파괴 또는 응집 파괴)을 조사한다.

d) 압축 가열·인장 냉각 후의 접착성을 파괴 상황(접착 파괴 또는 응집 파괴)으로 나타낸다.

6.6 확대·축소 반복 후의 접착성 시험

6.6.1 시료 상태

전양생 후, $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 의 공기 순환식 항온기에서 14일간 가열한 후 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ · $(50 \pm 5) \%$ R.H.로 1일간 놓아둔다.

6.6.2 시험 방법 시험 방법은 다음과 같다.

- a) 확대·축소 사이클 시험체로부터 시험체 제작용 스페이서를 떼어내고, 시험체를 시험기에 설치하여, 확대·축소 사이클을 실시한다. 시험 온도는 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 사이클 수는 100 회, 속도는 1 mm/min 으로서 확대·축소율은 $\pm 12.5 \%$ 또는 $\pm 7.5 \%$ 로 한다.

사이클 종료 후, 시험체를 떼어내어 1시간 놓아둔 다음 시료의 파괴 상황(접착 파괴 또는 응집 파괴)을 조사한다.
- b) 파괴까지의 인장 사이클 종료 후의 시험체 및 양생 종료 후의 비교용 시험체를 파괴될 때까지 인장한다. 시험 온도는 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 인장 속도는 $(5 \sim 6) \text{ mm/min}$ 으로 한다.
- c) 확대·축소 반복 후의 접착성을 파괴의 상황(접착 파괴 또는 응집 파괴)으로 나타낸다.

6.7 수중 침적 후의 일정 신장하에서의 접착성 시험

6.7.1 시험 방법 시험 방법은 다음과 같다.

- 침적 시험체를 (23 ± 2) °C의 청정한 물속에 4일간 놓아둔다. 시험체를 물에서 꺼내어 (23 ± 2) °C · (50 ± 5) % R.H. 에서 1일간 놓아둔다.
- 줄눈 나비의 신장 또는 전단 변형 줄눈 나비의 신장 또는 전단 변형은 (23 ± 2) °C에서 실시한다. 시험체 및 비교용 시험체로부터 시험체 제작용 스페이서를 떼어내고, 시험체 및 비교용 시험체를 인장 시험기에 부착하여 ($5 \sim 6$) mm/min의 속도로 줄눈 나비가 초기 줄눈 나비의 160 % 또는 200 %가 될 때까지 신장한다. 신장용 스페이서를 이용하여 규정 신장시의 줄눈 나비로 24 시간 유지한다.
전단 변형의 경우에는 시험체를 시료의 길이 방향으로 줄눈 나비의 30 %로 어긋나게 한다. 전단 변형용 스페이서를 이용하여 규정 전단 변형량으로 24 시간 유지한다.
시험체의 초기 줄눈 나비(l_0) 12.0 mm에 대한 신장률 및 신장시의 줄눈 나비(l_1)와 전단 변형률 및 전단 변형량(l_s)을 표 6에 나타낸다.
- a) 및 b)의 순서가 종료한 다음, 신장용 또는 전단 변형용 스페이서를 부착한 채로 시료의 파괴 상황(접착 파괴 또는 응집 파괴)을 조사한다.
- 수중 침적 후 일정 신장하에서의 접착성을 파괴 상황(접착 파괴 또는 응집 파괴)으로 나타낸다.

6.8 수중 침적 후의 접착성 시험

6.8.1 시험방법 시험 방법은 다음과 같다.

- 침적시킨다.
- 인장 시험은 (23 ± 2) °C에서 실시한다. 시험체 및 비교용 시험체에서 시험체 제작용 스페이서를 떼어내고 시험체 및 비교용 시험체를 인장 시험기에 설치하여 ($5 \sim 6$) mm/min의 속도로 시료가 파괴할 때까지 인장시켜 응력·변형 곡선을 기록한다.
- 시험체의 변형량을 초기 줄눈 나비로 나눈 파괴시의 신장(%)을 정수값으로 끝맺음한 평균값으로 나타낸다.

6.9 무게 및 부피 변화 시험

6.9.1 시험기구 시험 기구는 다음과 같다.

- 내식성 금속제 링 : 내식성 금속으로 만든 바깥지름 약 34 mm, 안지름 약 30 mm, 높이 약 10 mm의 금속제 링으로, 링을 매달기 위한 훅(hook) 또는 고리를 부착한다.
- 이형재 : 시험체의 제작에 사용하기 위한 물에 적신 종이 등
- 항온 항습기 : 온도 및 습도를 (23 ± 2) °C · (50 ± 5) % R.H. 로 조절할 수 있는 것.
- 공기 순환식 항온기 : 위에 규정한 것으로 약 (30 ± 5) 회/h로 환기될 수 있는 것.
- 저울 : 최소 단위가 10 mg까지 측정할 수 있는 것.
- 비중 저울 : 최소 단위가 10 mg까지 측정할 수 있는 것.
- 시험액 : 0.25 %(무게/무게) 이상의 저발포성 계면 활성제를 첨가해서 (23 ± 2) °C의 물 또는 물에 용해될 가능성이 있는 시료의 경우에는 비점 99 °C · 밀도 0.7 g/mL의 이소옥탄(2, 2, 4-트리메틸펜탄)

6.9.2 시험 방법 시험 방법은 다음과 같다.

- 시험에는 3개의 금속제 링을 준비한다.
- 금속제 링의 무게(m_1)를 대기 중에서 측정하고, 부피 측정을 위한 비중 저울로 시험액 속에서의 무게(m_2)를 측정한다. 링을 이형재 위에 놓고, 미리 (23 ± 2) °C · (50 ± 5) % R.H.로 16 시간 이상 놓아두었던 시료를 충전한다.
위 a), b) 및 c)에서 나타낸 점에 주의하며, 다만 구형 용기를 금속제 링으로 읽으면 된다.
- 재빨리 이형재를 제거하고 대기 중에서의 시험체의 무게(m_3)및 시험액 중의 시험체의 무게(m_4)를 측정한다.

d) 시험체의 무게를 측정한 다음, 시험체를 달아매고 다음의 조건에서 양생한다.

(1) $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ · $(50 \pm 5) \% \text{ R.H.}$ 에 28일간 놓아둔다.

(2) $(70 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 에 7일간 놓아둔다.

(3) $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ · $(50 \pm 5) \% \text{ R.H.}$ 에 1일간 놓아둔다.

e) 양생한 다음, 재빨리 대기 중에서의 시험체 무게(m_5)및 시험액 중의 시험체 무게(m_6)를 측정한다.

f) 무게 변화(%)를 3개의 시험체에 대해서 다음 식에 의하여 계산하고 소수점 이하 1자리에서 끝맺음한 평균값을 나타낸다.

$$\Delta m = \frac{m_5 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100$$

여기에서 Δm : 무게 변화(%)

m_1 : 시료를 채우기 전에 대기 중에서 측정한 금속제 링의 무게(g)

m_3 : 시험체 제작 직후에 대기 중에서 측정한 시험체의 무게(g)

m_5 : 양생 직후에 대기 중에서 측정한 시험체의 무게(g)

g) 부피 변화(%)를 3개의 시험체에 대해 다음의 식에 따라 계산하고 소수점 이하 1자리에서 끝맺음한 평균값을 나타낸다.

$$\Delta V = \frac{(m_5 - m_6) - (m_3 - m_4)}{(m_3 - m_4) - (m_1 - m_2)} \times 100$$

여기에서 ΔV : 무게 변화(%)

m_2 : 시료를 채우기 전에 대기 중에서 측정한 금속제 링의 무게(g)

m_4 : 시험체 제작 직후에 시험액 중에서 측정한 시험체의 무게(g)

m_6 : 양생 직후에 시험액 중에서 측정한 시험체의 무게(g)

m_1, m_3 및 m_5 : 위의 무게변화와 같다.

무도장 내후성강교량
방식 설계 지침서

<목 차>

1. 서론	329
1.1 목적	329
1.2 기본 개념	329
2. 용어정의	330
3. 무도장 내후성강의 부식 특성	331
3.1 무도장 내후성강의 안정 녹	331
3.2 취약 부위	335
4. 방식제의 특성	338
4.1 수용성 방식제 특성	338
4.2 기화성 방식제 특성	338
4.3 희생양극 실링재의 특성	340
4.4 방식제 적용의 기준 산정	340
4.4.1 수용성 방식제	340
4.4.2 기화성 방식제	341
4.4.3 희생양극 실링재	343
5. 방식설계 적용 방안	344
5.1 방식설계 주요 고려사항	344
5.2 부식량의 고려	346
6. 방식설계 적용 예시 (신양수대교)	353

1. 서론

1.1 목적

본 “무도장 내후성강 교량의 방식(防蝕) 설계 지침서”는 무도장 내후성강 교량의 설계단계에서 녹의 안정화 과정을 어렵게 하는 환경적 요인이 발생하는 곳과 취약부에 대해 의도하지 않는 부식 발생을 방지하기 위한 방식 설계에 그 목적이 있고, 기타 제반 강교량의 설계사항은 건설교통부의 “도로교 설계 기준” 및 “강도로교 상세부 설계지침”을 따른다.

1.2 기본 개념

현재, 교량의 구조 설계는 한계상태설계법을 적용하여, 설계 수명 100년 기준의 도로교설계기준(2015)을 근거로 이뤄지고 있다. 하지만, 그림 1에서 보듯, 도로교설계기준(2015)에서 방식 설계 부분은 고려치 않고 있다.

구 성
제 1 장 총 칙
제 2 장 설계 개요
제 3 장 하 중
제 4 장 구조 해석
제 5 장 콘크리트교
제 6 장 강 교
제 7 장 하부구조
제 8 장 내진설계
제 9 장 신축이음, 받침 및 방호울타리
별 권 케이블교량편
※ 세부목차는 각 장에 수록

그림 13. 도로교설계기준(2015) 구성

이는 대부분의 강구조 교량이 방청도장설계 및 적용을 통해 강재의 부식을 방지하고 있고, 최소 5년의 재도장을 통해 도장된 도막의 열화에 대비, 녹 발생으로 인한 부식 문제에 대처하고 있기 때문이다 (강교의 보수도장 지침- 도로교통연구원, 2013). 하지만 미국의 Silver bridge 붕괴 사고(1967.12.15)와 Mianus River bridge 붕괴 사고(1983.6.28)의 직접적 원인이 주요 강재 구조부재의 부식으로 조사된 바 있고, 근래 발생한 I35W bridge 붕괴 사고(2007.8.1)의 원인 중 하나로 부식이 지목된 바 있듯이, 강재의 부식 문제는 교량이 안전하게 제 기능을 하도록 설계단계에서 주의를 기울여야 하는 부분이다. 특히, 일반강에 내식성이 우수한, 구리, 크롬, 니켈 등의 합금성분을 첨가하여 자연적으로 형성된 안정 녹층으로 외부환경과 강재를 차단하여, 더 이상 부식이 진전되지 않도록 내식성을 향상시킨 무도장 내후성강은 표면도장이 불필요해 유지관리비용 절감과 환경오염방지가 가능한 강점을 가지지만, 이는 안정 녹층의 형성이 전제되어야 한다. 곧, 무도장 내후성 강교량의 기능성과 안전성을 유지하기 위해서는 부식에 대한 결함, 곧, 안정 녹의 형성에 저해가 되는 환경 요인에 노출되는 부위와 불안정 녹 발생 취약부에 대한 방식설계가 필요하다.

1.3 제한사항

본 방식설계 지침서는 2012년 5월부터 2015년 5월까지 3년에 걸쳐 진행된 국토교통과학기술진흥원의 “국내 무도장 내후성강 교량의 방식 기준 및 유지관리 지침 개발을 통한 국내 환경 대응형 방식기술 개발” 연구 결과를 토대로 개발된 수용성 부식억제제 및 기화성 부식억제제와 부수적으로 개발된 희생양극 실링재의 방식기법의 방식설계 적용에 한정된 것으로, 연구과정과 도출된 결과를 토대로 작성되었음을 명시한다.

2. 용어정의

- 내후성강(Weathering Steel): 일반강에 내식성이 우수한 Cr, Cu, Ni, Si, P 등의 합금원소를 소량(0.1~1.0%) 함유한 저합금강으로 대기환경 하에서 일반 강(鋼)에 비해 4~8배의 내식성을 갖는 강재
- 녹(Rust): 강의 표면에 생기는 수산화물 또는 산화물을 주체로 하는 화합물. 넓은 의미로는 금속이 화학적 또는 전기화학적으로 변화해서 표면에 생기는 산화 화합물을 의미한다.
- 한계상태설계법(Limit State Design): 하중 및 저항의 설계안전율을 확률 통계적으로 처리하는 구조신뢰성이론에 기초하여 일관성 있는 적정수준의 안전율을 확보하는 합리적이고 새로운 설계법으로 2012년 1월에 도로교 설계기준이 제정되었고 2015년 1월부터 의무화 됨.
- 산화피막(Oxide coating): 금속의 표면 산화에 의해 생기는 얇은 보호막으로 단단하고 다공질이어서 금속의 수명을 길게 한다.
- 희생양극(Sacrificial Anode): 더욱 전기적으로 활성화된 합금을 보호하고자 하는 금속에 연결하면, 보호하고자 하는 금속을 (-)극으로 만들어주게 되어 부식을 방지하게 되며, 이때 사용되는 전기적으로 활성인 합금을 희생양극 혹은 갈바니 양극(galvanic anode)라 칭한다.
- 부식(Corrosion): 강재에서의 가장 일반적인 형태의 노후화 현상으로서 환경적 요인에 의한 부식, 전류에 의한 부식, 박테리아에 의한 부식, 과대 응력에 의한 부식 그리고 마모에 의한 부식이 있다. 일반적인 환경에서 강재의 부식속도는 대략 1년에 0.02mm정도이다. 그러나 제철작업 등으로 염화칼슘, 황산염 등의 무기질 이온에 노출되면 1년에 0.3mm이상 부식되고, 강재단면에 구멍이 뚫리기도 한다. 부식으로 단면이 손실된 부위는 교량의 내하능력에 심각한 영향을 미치고, 피로파괴의 위험을 유발시킬 수 있다.
- 부식 억제제(Corrosion Inhibitors): 금속의 부식을 감퇴시키는 물질을 전반적으로 일컫는 용어로 ‘방청제(防鏽濟)’ 및 ‘방식제(防蝕濟)’와 같은 의미로 사용된다.
- 전위(Electrode): 전극과 이에 접하는 전해질 용액사이에 생기는 접촉 전위차로써 통상 기준전극을 기준으로 나타낸다.
- 기준전극(Reference electrode): 기준전극(비교전극)은 전위가 일정하여, 지시전극의 발생전위를 바르게 얻기 위한 전위의 기준이 되는 전극으로 칼로멜전극(Calomel electrode: $\text{Hg} \cdot \text{HgCl}_2$), 은-염화은전극(Silver Chloride electrode: $\text{Ag} \cdot \text{AgCl}_2$), 동-황산동전극(Copper-copper sulfate electrode: $\text{Cu} \cdot \text{CuSO}_4$) 및 유리전극(Glass electrode) 등이 있다.
- 교좌장치(Pot shoes): 교량의 상부구조와 하부구조의 접점에 위치하면서 상부 하중을 하부구조에 전달하는 장치로 상황변동(온도, 하중, 진동 등)에 따라 받침, 굴림, 미끄러짐의 기능을 할 수 있게 고강도, 고경도, 내마모 등이 우수한 재료로 구성된다.

3. 무도장 내후성강의 부식 특성

3.1 무도장 내후성강의 안정 녹

내후성강이 대기에 노출되면 초기에는 일반강과 유사하게 녹이 발생하지만 시간의 경과에 따라서 그 녹의 일부가 서서히 모재에 밀착하게 되어 안정녹층을 형성하고, 이 녹층이 외부 대기에 대한 보호막이 되어 도장과 같은 역할 하게 되어 더 이상의 부식 진행을 억제하게 된다. 내후성강의 녹층은 그림 1과 같이 내층 α -FeOOH와 외층 γ -FeOOH로 구성되는 2층 구조로 구성되며 내층은 상온에서 Fe-H₂O계로 열역학적으로 안정한 녹을 형성한다.

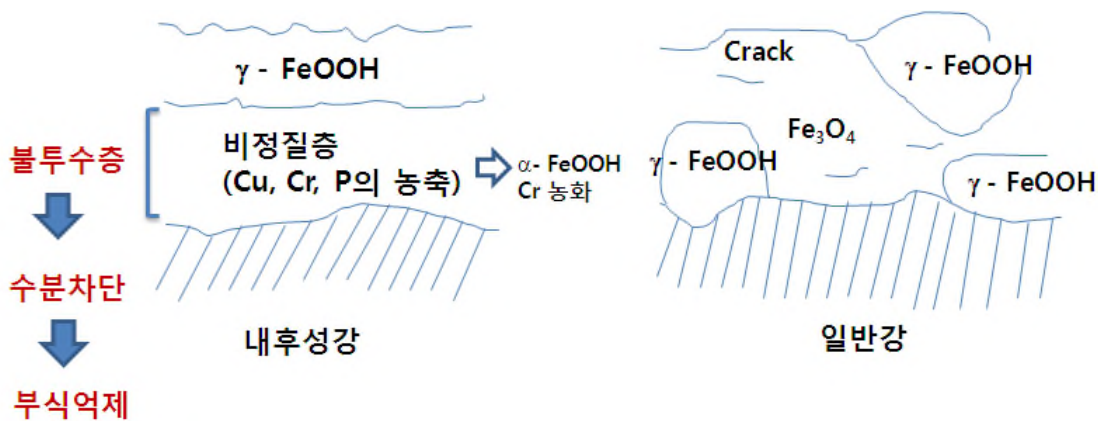
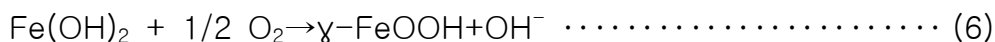
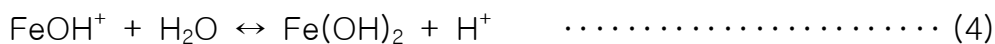


그림 1. 내후성강과 일반강의 녹단면도

내후성강의 녹 생성 반응은 철의 산화과정과 수분의 환원으로 수산화이온을 형성하는 다음의 식으로 표현된다.



이후, 철이온은 아래와 같이 수산화이온과 결합하여 수산화철을 형성하고, 녹생성 반응에 따라 강표면에는 γ -FeOOH의 녹층이 생성된다.



또한, γ -FeOOH의 용해반응과 재석출에 따라 내층에는 무정형 옥시 수산화철을 주체로 녹층이 생성되고, 장시간에 걸쳐 무정형 옥시 수산화철은 열역학적으로 안정한 α -FeOOH로 변화해 구성입자가 세밀해지고 수분을 차단함으로써 녹의 진행을 지연시킨다. 이와 같은 무도장 내후성강에 안정 녹을 형성시키기 위해서는 표 1의 조건이 필요한 것으로 알려져 있다.

표 1. 내후성강에 안정 녹을 생성시키기 위한 조건

조 건	내 용
강재 표면이 대기에 노출될 것	- 수중, 토중에서는 안정 녹 생성이 불가능 - 토사분진 상태나 초기 녹의 퇴적 또는 물이 고이는 곳에는 안정 녹 생성이 불가능
일조에 노출될 것	- 강표면이 건조와 습윤상태를 반복 - 염분 등 부식성 물질 제거 효과
강우에 노출될 것	
생성된 산화피막을 기계적으로 박리시키지 않을 것	- 안정 녹을 긁어내서는 안됨 - 발판이나 개폐기구 등에서는 안정 녹의 생성이 어려움
해수비말의 영향을 받지 않을 것	- 해수비말의 영향으로 표면이 끈적끈적한 곳에서는 초기 녹이 탈락되지 않아 강재 표면이 건조되기 어려움 - 염분은 안정 녹의 생성을 저해

그림 2와 같이 일반 강재가 시간이 경과함에 따라 부식량이 점차 증가하는데 반해, 무도장 내후성강의 경우, 보통의 주변 환경에서 안정 녹이 형성되는 5~8년 정도부터 부식의 진행이 감소하는 특징을 갖고 있다 (일본의 경우, 자동차에서 배출되는 배기가스를 고려 공장 환경을 도시 주변 환경으로 보며, 고속 도로주변의 경우 산간지역이라도 도시환경으로 간주되는 경우가 있음: 일본 도로공단의 강교도장기준 참조).

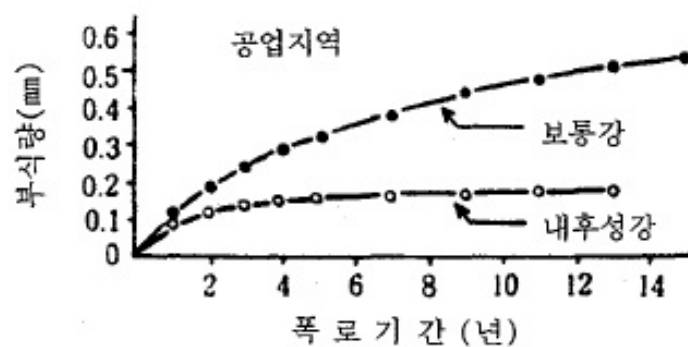


그림 2. 부식의 진행 비교 (방식기술편람 3 참조)

무도장 내후성강의 안정 녹에 인해 발생하는 강재의 부식 손실에 대해서 일본에서는 다음의 식을 일반적으로 사용하고 있다(Report on application of weathering steel to highway bridges(XX), 1993; Report on application of weathering steel to highway bridges(XV), 1992).

$$Y = AX^B \dots\dots\dots(1)$$

식(1)에서 X는 폭로기간(년)을 Y는 한쪽면의 평균 두께 감소량(mm)을 나타내며, A와 B는 환경과 강종 성분에 따라 변화하는 계수로 A는 첫 해에 생기는 부식 손실량을 B는 부식속도 지수로 실험에서 얻어 지는 값을 나타낸다. 계수 A와 B는 일본 내 41개 교량에 설치된 시편의 데이터를 토대로 산정되는 데, 시편이 설치된 부식환경의 부분적인 심각성을 나타내는 A_{SMA} 와 B_{SMA} 의 값과 이로부터 계수 A와 B를 결정하게 되며 아래의 식이 사용된다.

먼저, B_{SMA} 의 상한값과 하한값은 다음과 같이 A_{SMA} 의 값으로부터 결정되게 된다.

- (i) $A_{SMA} \leq 0.004\text{mm}$ 인 경우, $B = 1$
- (ii) $0.004\text{mm} < A_{SMA} \leq 0.003\text{mm}$ 인 경우, $B_{SMA} = -0.45711 \log_{10} (A_{SMA}/0.004) + 1.0$
- (iii) $0.03\text{mm} < A_{SMA} \leq 0.1\text{mm}$ 인 경우, $B_{SMA} = 0.765 \log_{10} (A_{SMA}/0.1) + 1.0$
- (iv) $0.1\text{mm} < A_{SMA}$ 인 경우, $B_{SMA} = 1$

또한, B_{SMA} 의 하한값은

- (i) $A_{SMA} \leq 0.004\text{mm}$ 인 경우, $B_{SMA} = 0.85$
- (ii) $0.004\text{mm} < A_{SMA} \leq 0.003\text{mm}$ 인 경우, $B_{SMA} = -0.45711 \log_{10} (A_{SMA}/0.004) + 0.85$
- (iii) $0.03\text{mm} < A_{SMA} \leq 0.1\text{mm}$ 인 경우, $B_{SMA} = 0.66937 \log_{10} (A_{SMA}/0.1) + 0.8$
- (iv) $0.1\text{mm} < A_{SMA}$ 인 경우, $B_{SMA} = 0.8$

상기의 식에 의해 A_{SMA} 값에 따라 정해지는 B_{SMA} 의 상한값과 하한값은 그림 3과 같다.

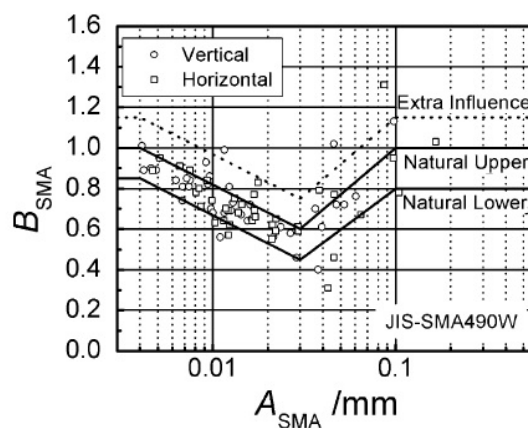


그림 3. B_{SMA} 값의 상·하한값

그림 3에서 나타난 ○와 □는 41개의 교량에 설치된 시험편에 의해 얻어진 값으로 ○은 수직으로 세워진 시험편으로부터 얻은 데이터를 □는 수평으로 누운 시험편으로부터 얻은 데이터를 나타내며, 그림에서 보듯, A_{SMA} 와 B_{SMA} 의 값은 실험 데이터를 제대로 반영함을 알 수 있다.

시험편의 데이터를 통해 얻어진 A_{SMA} 와 B_{SMA} 의 값으로부터 내후성강의 재료 구성을 고려해 계수 A와 B를 결정하는 식은 다음과 같다(Proposal for weathering alloy index and accelerated corrosion test method to select weathering steels, C. Miki et al., Doboku Gakkai Ronbunshu (J. Japan Soc. Civil Engineers) No. 738/ I-64, 2003, pp. 271-281).

$$V = 1 / \left((1.0 - 0.16[C]) \times (1.05 - 0.05[Si]) \times (1.04 - 0.016[Mn]) \times \dots (2) \right. \\ \left. (1.0 - 0.5[P]) \times (1.0 + 1.9[S]) \times (1.0 - 0.1[Cu]) \times (1.0 - 0.12[Ni]) \right. \\ \left. \times (1.0 - 0.3[Mo]) \times (1.0 - 1.7[Ti]) \right)$$

$$A/A_{SMA} = -0.144 + 4.95 V^{-1} - 13.37 V^{-2} + 15.03 V^{-3} - 5.45 V^{-4} \dots (3)$$

$$B/B_{SMA} = 0.5545 + 0.45 V^{-1} \dots (4)$$

식(2)에서 [X]는 화학조성물 가운데 X의 질량%를 나타내며, 식(2)는 $0 \leq [C] < 1.5$; $0.1 < [Si] < 5$;

$0.1 < [Mn] < 10$; $0 \leq [P] < 0.15$; $0 \leq [S] < 0.03$; $0 \leq [Cu] < 1.1$; $0 \leq [Ni] < 5$; $0 \leq [Mo] < 0.6$; $0 \leq [Ti] < 0.12$ 이고 $0.9 \leq V \leq 2.5$ 인 경우에 한해 유효하다.

국내의 무도장 내후성강재 (SMA400W, 490W, 570W)가 $[C]=0.18$; $[Si]=0.65$; $[Mn]=1.25$; $[P]=0.035$; $[S]=0.01$; $[Cu]=0.5$; $[Ni]=0.3$; $[Mo]=0.05$; $[Ti]=0.1$ 의 질량% 조성으로 이뤄졌을 경우, $V \approx 1.324$ 가 되며 $A/A_{SMA} \approx 0.6702$; $B/B_{SMA} \approx 0.8945$ 로 산정된다. 곧, $V=1.324$ 인 경우, 식(1)은 $Y = 0.6702 A_{SMA} X^{0.8945 B_{SMA}}$ 로 표현될 수 있고, 대표적인 A_{SMA} 값에 (0.002; 0.004; 0.03; 0.1; 0.2) 따른 B_{SMA} 의 상한값과 하한값은 표2와 같다.

표 2. B_{SMA} 의 상한값과 하한값

$A_{SMA} = 0.002$	$A_{SMA} = 0.004$	$A_{SMA} = 0.03$	$A_{SMA} = 0.1$	$A_{SMA} = 0.2$
상한값: 1 하한값: 0.85	상한값: 1 하한값: 0.85	상한값: 0.6 하한값: 0.45	상한값: 1 하한값: 0.8	상한값: 1 하한값: 0.8

이에 따른, 안정녹에 의한 부식 손실량은 그림4와 같이 예측되며, 그 예측값은 첫 해에 생기는 부식 손실량 A_{SMA} 값(더욱 정확히는 부분적인 시험체 측정값)에 의해 크게 의존함을 알 수 있다.

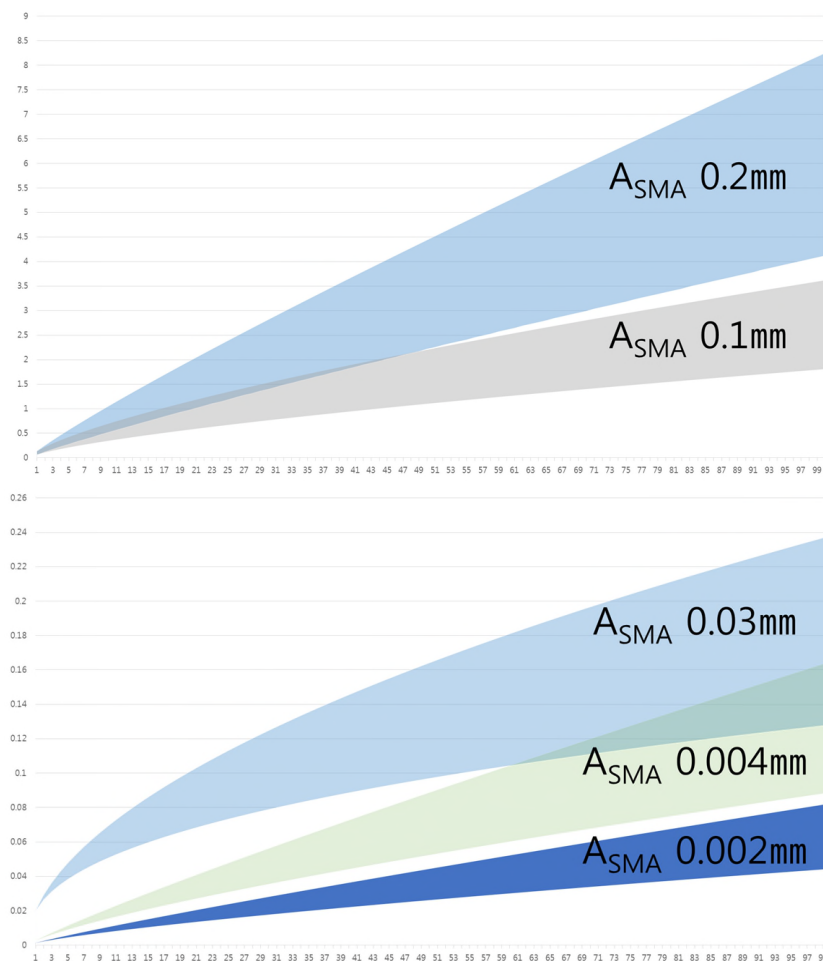


그림4 부식 손실량 산정(가로 X축: 년수, 세로 Y축: mm)

3.2 취약 부위

앞의 안정 녹 형성의 환경적 조건에 비춰, 무도장 내후성 강재 교량의 부식 취약부는 크게 그림 5에서 보듯 다음과 같다.

- (1) I-단면 부재에서 하부 플랜지의 상·하면, 하부 플랜지와 복부의 용접부
- (2) 박스거더의 내부, 하부 플랜지 하면과 그 돌출부 및 연결부
- (3) 부재들이 교차하는 격점부
- (4) 거더 단부 및 지점 부근, 교량 받침부, 교대 및 교각의 교좌장치면
- (5) 볼트 이음부
- (6) 내부 힌지부, 핀-행어 연결부
- (7) 신축이음장치, 배수장치 및 그 인접부
- (8) 용접 불량부위

무도장 내후성 강재 교량의 대표적인 취약부에 대한 상세는 표 2와 같고, 일반 강교의 부식 취약부와 크게 다르지 않음을 알 수 있다.

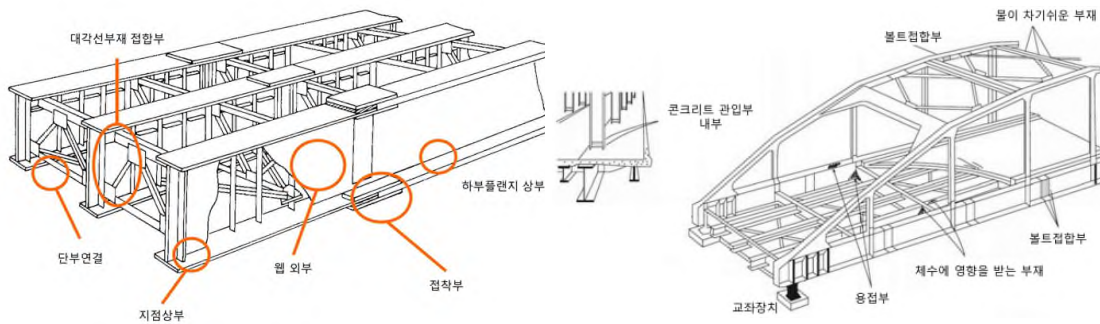


그림 5 강재 교량의 부식 취약부

표 2-1. 무도장 내후성 강재 교량 부식 취약부

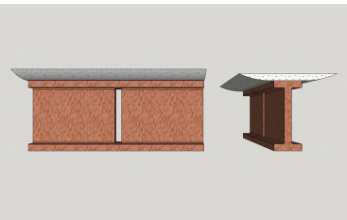
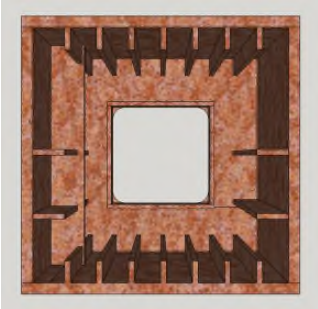
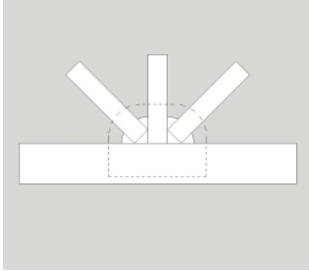
		
상판에 접하는 상부플랜지 부근	박스거더 내부	부재가 교차하는 격점부

표 2-2. 무도장 내후성 강재 교량 부식 취약부

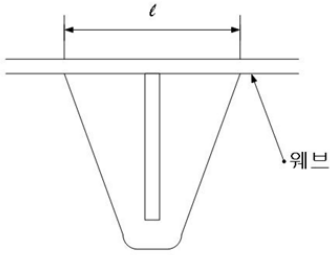
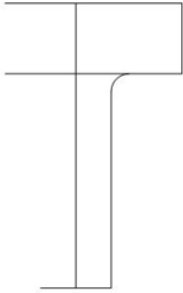
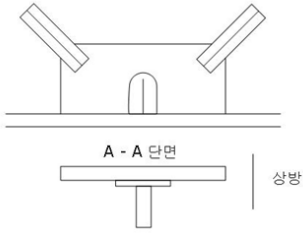
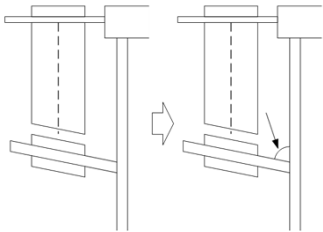
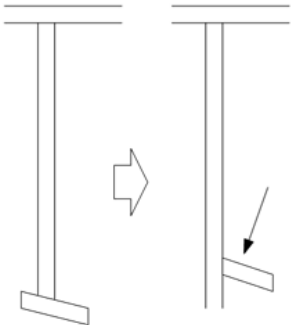
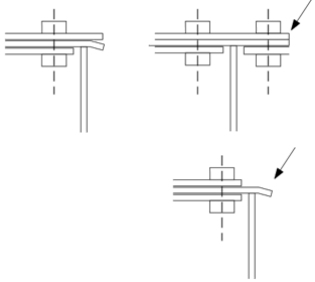
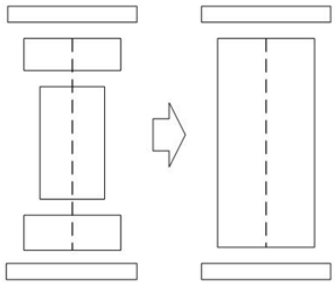
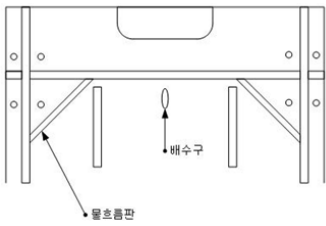
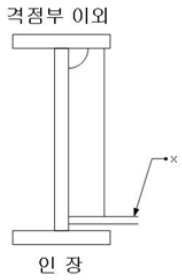
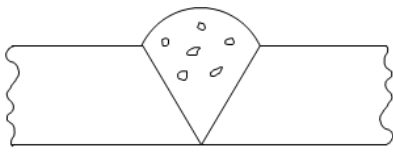
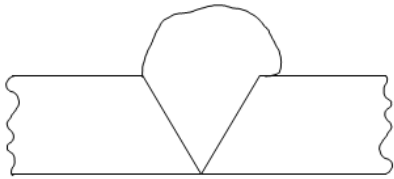
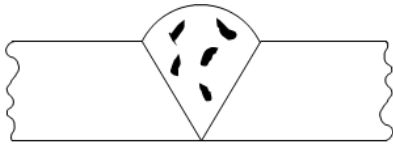
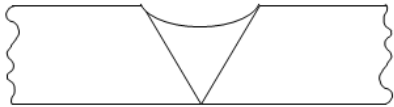
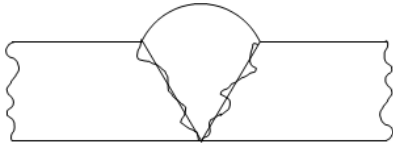
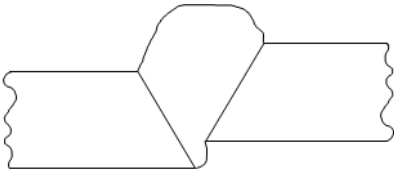
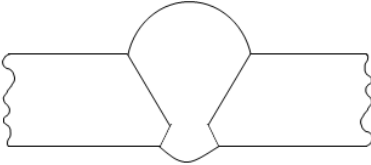
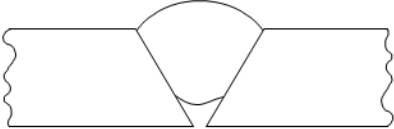
		
연결판 스캘럽	거더 끝부분	가로구조 강재 접합부
		
스캘럽	웨브	밀착이 불완전한 접합부
		
주거더 복부판 볼트이음	박스거더 끝부분	하부플랜지 인장응력부

표 2-3. 무도장 내후성 강재 교량 부식 취약부

 Porosity	 Excess convexity
 Slag inclusions	 Excess concavity
 Lack of fusion	 Poor fit-up
 Burn-through	 Incomplete penetration

4. 방식제의 특성

이 장에서는 ‘도장이 없는 내후성강교량 박스거더 내부 최적방식기술 및 유지관리지침(안)개발’ 연구를 통하여 개발된 방식제의 특성과 방식설계 시, 개발된 방식제의 적용을 위한 기준 산정에 관해 기술하였다.

4.1 수용성 방식제 특성

‘도장이 없는 내후성강교량 박스거더 내부 최적방식기술 및 유지관리지침(안)개발’ 연구를 통하여 개발된 수용성 방식제의 조성은 표 3과 같다.

표 3. 개발된 수용성 방식제의 조성

에폭시 코팅제	증류 수	1-methoxy-2- propanol	분 산 제	소 포 제	증 점 제	칼슘 인산염 계 방청제	탄산 칼슘	발 수 제	접 착 개 선 제
65%	9%	5%	0.75%	0.75%	1.5%	5%	10%	2%	1%

본 수용성 방식제는, 유해성 평가 결과 친환경의 수용성 부식억제제로 인체에 무해한 특징을 갖는다 - 표 4의 한국환경산업기술원 친환경 인증기준(EL 610)에 의한 유해성 시험결과 개발된 수용성 방식제는 이와 같은 유해성분이 불검출되었다. 또한, 내후성 강교량의 부식을 촉진할 수 있는 NaCl에 대한 영향을 평가하는 방법으로 실시한 5%, 10%의 NaCl 침지 시험 결과를 통하여 그 성능이 검증되었다. 특히, 여름철 부식이 촉진될 수 있음을 고려하여 35℃, 95% 상대습도(Relative Humidity)의 항온 항습 조건에서 시험한 결과에서도 강재의 부식이 지연됨을 확인하였다.

표 4. 유해원소 기준 (EL 610)

항목	납 (Pb)	비소 (As)	카드뮴 (Cd)	수은 (Hg)	크롬 (Cr)	구리 (Cu)	니켈 (Ni)	아연 (Zn)
기준 (mg/kg)	50이하	2.50이하	0.050이하	0.050이하	15이하	200이하	2.50이하	500이하

4.2 기화성 방식제 특성

기화성방청제/방식제 VCI(Volatile Corrosion Inhibitor)란, 그림 6에서처럼, 가정에서 방청제로 널리 사용되는 나프탈렌과 같이 상온에서 기화하여 금속표면에 얇은 피막을 형성하여 녹을 방지하는 방청제이다.

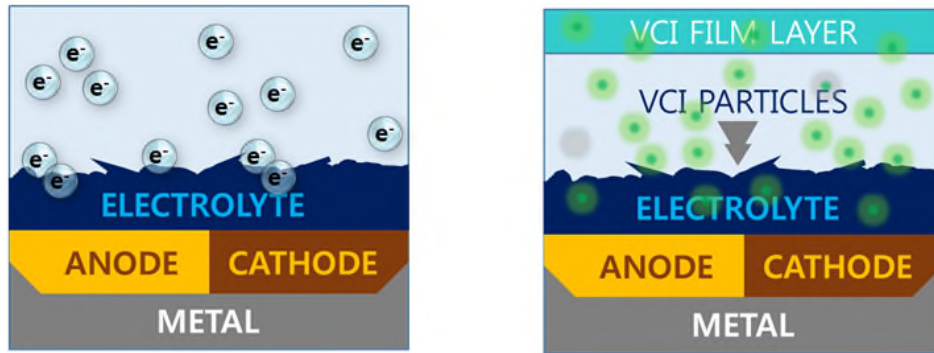


그림 6. 기화성 방식제 원리

이러한 VCI는 밀폐된 환경에서 방청입자가 기화되어 방청대상 금속표면에 보호막을 형성하여 금속전자가 OH^- 및 O^- 과의 접촉을 차단하거나 기화가스가 수분에 녹아 들어가 금속의 산화/환원반응이 일어나지 못하게 함으로 방청력을 발휘하게 된다. 곧, 기화된 VCI분자가 밀폐된 공간 안에서 포화상태를 이룰 수 있을 만큼의 밀폐도가 필요하고, 밀폐된 공간내의 VCI분자들은 금속면에 쌓여 부식을 방지하게 된다. 응용 제품으로 VCI(기화성방청제)를 종이에 도포한 기화성방청지, 유제를 이용한 기화성방청유 등이 있다. 이러한 기화성 부식억제제는 방청유와 도금에 의한 방청, 실리카겔에 의한 습기제거 등에 대체할 수 있는 제3의 방식 제품으로 일반적인 특징은 표 5와 같다.

표 5. 기화성 부식억제제의 일반적인 특징

제 품	특 징
기화성 부식억제제	1. 철·주철 외에 동·아연 등의 비철에도 유효. 2. 즉시 효과를 발휘하며 장기간 방청. 3. 취급이 간단(포장 내에 간단히 집어넣음). 4. 기화된 가스는 손에 닿지 않는 세밀한 부분까지 도달, 방청효력유지. 5. 반복사용이 가능. 6. 구리스·기름 등에 의한 방청과 비교하여 외관이 깨끗함. 7. 공정개선에 의한 원가절감. 8. 프레온(Freon) 등의 탈지용제가 불필요 하며 프레온 규제에 대응.

개발된 기화성 부식억제제는 상시 표 5의 특징을 갖고 있고, 아질산염 나트륨(sodium nitrite, SN) 및 유기계 첨가제(영업비밀)와 유기산염계 방청제로 구성되며 그 조성은 표 6과 같다.

표 6. 개발된 기화성 부식억제제의 조성

SN (함량%)	유기계 첨가제 (함량%)	유기산염계 방청제(함량%)
30	10	60

4.3 희생양극 실링재의 특성

내후성강은 내후성강과 비교해 전위가 높은 금속(동, 동합금, 스테인레스, 크롬도금 등)과 접촉 시 이온화되어 녹이 발생하게 되며, 이러한 반응은 점차적으로 진행되어 의도되었던 안정녹의 형성을 방해하게 된다. 이에 ‘도장이 없는 내후성강교량 박스거더 내부 최적방식기술 및 유지관리지침(안)개발’ 연구에서는 아연도금볼트와 피스의 접합을 고려해 발생할 수 있는 안정녹 형성방해에 대처하기 위해, 접합부에 적용되는 기존 실링재에 희생양극성능을 첨가하기 위해 Zinc powder를 첨가한 희생양극 실링재를 개발하였다. 희생양극성능을 위해 첨가된 Zinc powder는 HALOX사의 SZP-391로 도장재의 하도로 주로 사용되며, 표 7과 같은 물리적 특성을 갖는다. 개발된 희생양극 실링재는 50 microns의 실링재 두께 기준으로 SZP-391 5%의 양이 적용되었고, 표 8에서 보듯 일반 실링재의 성능평가 항목 모두를 만족시키는 것으로 확인되었다.

표 7. SZP-391의 물리적 특성

용융점(℃)	습도(%)	용융성	밀도	산도(pH)	평균입자크기(μm)
1540	1.1	0.02%	3.3	6.5-9.5	< 5

표 8. 개발된 희생양극 실링재의 성능

시 험 명	요구 성능	희생양극 실링재 성능
슬럼프(가로, 세로)	3 이하	거의 없음
탄성 복원성	70 이상	약 93
인장특성-줄눈 나비의 신장률	200 (M ₁₀₀)	200 (M ₁₀₀)
인장특성-인장능력 N/mm ² 23℃	0.4 초과	약 0.7
인장특성-인장능력 N/mm ² -20℃	0.6 초과	약 0.9
일정 신장 하에서 접착성	파괴되면 않됨	파괴되지 않음
압축 가열, 인장 냉각 후의 접착성	파괴되면 않됨	파괴되지 않음
수중 침적 후의 일정 신장 하에서 접착성	파괴되면 않됨	파괴되지 않음
부피 손실 %	10 이하	약 4

4.4 방식제 적용의 기준 산정

4.4.1 수용성 방식제

기존 강재교량의 도장방식의 사양 가운데, 에폭시 마감이 적용되는 경우는 특수환경(해안, 공장, 대기오염의 도심지역)으로 표 9의 기준이 적용된다.

표 9. 일반 강재교량의 에폭시 도장

구 분	공 정		도료명칭 또는 방법	도막두께 (μm)	도장 횟수
교량내부	1차 표면처리		SSPC-SP10	-	-
	샴 프라이머		무기질 아연분말 샴프라이머	20	1
	2차 표면처리		SSPC- SP10	-	-
	공장도장	제1층	무기질 아연분말도료	75	1
		제2층	미스트 코트	100	1
		제3층	후막형 에폭시계 도료		1
	계			175	-
교량내부 볼트 및 연결판	표면처리	연결판	SSPC-SP3	-	-
		볼트	화성피막처리	-	-
	현장도장	제1층	에폭시 프라이머	75	1
		제2층	후막형 에폭시계 도료	100	1
	계			175	-

표 9에서 무기질 아연분말 샴프라이머 도료는 도장재의 접착제 역할을 하며, 표면처리 SSPC-SP10과 SSPC-SP3는 표면처리 정도를 나타내는 것으로, SSPC-SP10은 블라스팅을 통해 강재 표면에서 95% 정도의 기름, 그리스, 먼지, 녹 등을 제거한 정도를 SSPC-SP3는 수공구(그라인딩, 와이어 브러쉬 등)를 통한 표면 청소 상태를 의미한다.

일반 강재 교량의 도장(상도-표 9의 후막형 에폭시계 도료를 의미)의 평균 수명은 약 10년 정도로 보고된 바 있고 (강교 보수용 상도 도장의 내후성 평가, 2012년 한국공업화학회), 무도장 내후성 강교의 경우, 무도장 내후성 강의 녹의 안정화를 활용함을 고려했을 때, 수용성 방식제의 코팅 두께는 표 9의 상도 두께 100 μm 보다 작은 두께가 적용가능하며, 100 μm 의 코팅두께는 보수적으로 적절할 것으로 보인다. 특히, 교량내부의 볼트 및 연결부의 경우, 별도의 희생양극 실링재를 사용하고, 일반 강교의 경우 표면처리 정도와 현장도장임을 감안해 50 μm 의 수용성 방식제 코팅 적용이 적절한 것으로 판단된다.

4.4.2 기화성 방식제

개발된 기화성 방식제는 약 12~15g/m³의 사용기준에 따라 사용한다- 다음의 Climate chamber test를 통해 1.5g의 기화성 방식제가 125l 공간의 금속 부식을 억제하는 효과가 있는 것으로 확인하였다.



그림 7. Climate chamber tests

4개의 1010 steel 시편 8개를 준비해, 그림 7과 같이 4개의 시편은 125l 밀폐된 공간에 위치시킨 후 온도에 따라 가습조절이 가능하게 100ml의 25% 글리세린 용액과 기화성 방식제(방청제)를 위치시킨다 (밀폐된 공간에서는 습도 조절이 되지 않음). 또한, 비교 시편 4개는 항온항습실의 125l 공간에 위치시

킨 후, 각 chamber에 12 시간 동안 (i) 3시간 25°C (항온항습실 상대습도 95%), (ii) 6시간 55°C (항온항습실 상대습도 95%), (iii) 3시간 25°C (항온항습실 상대습도 98%)의 사이클 조건을 부여해 각 시편의 부식 정도를 살펴본다.

기화성 방식제가 위치한 곳의 시편은 그림 8과 같이 아무런 변화가 없는 반면, 비교 시편은 그림 9와 같이 녹이 발생함을 알 수 있다.

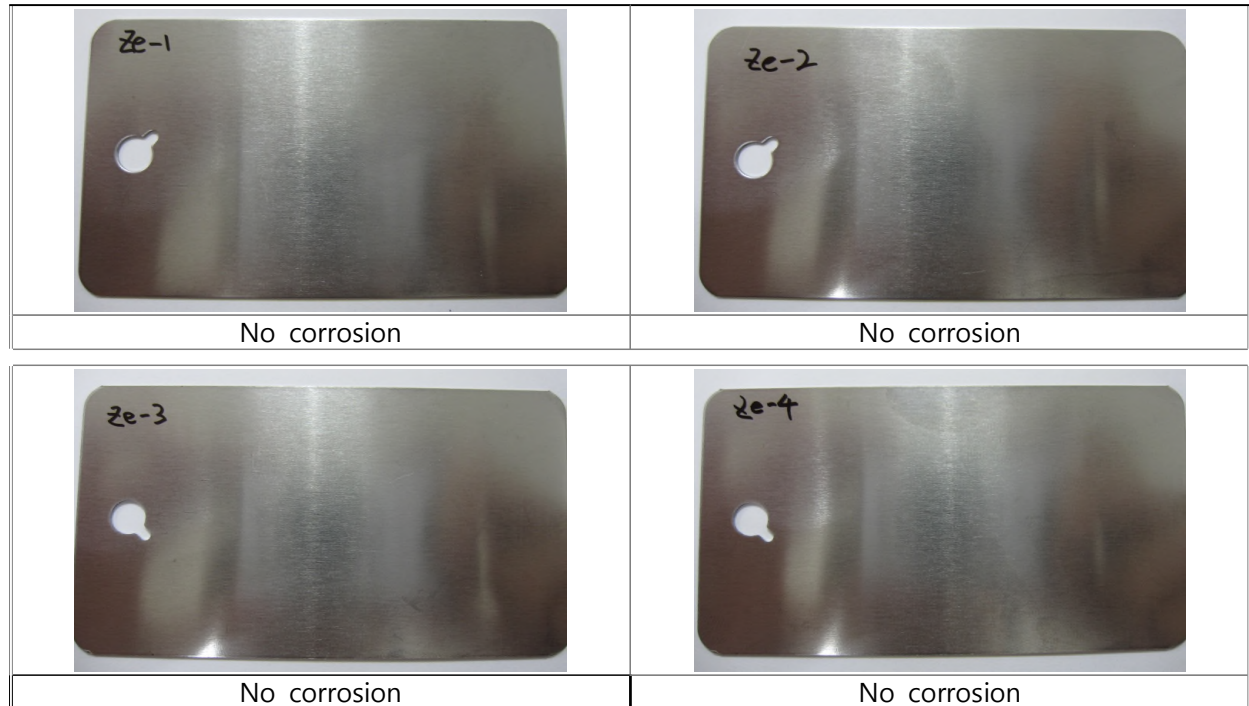


그림 8. 시편(기화성 방식제)

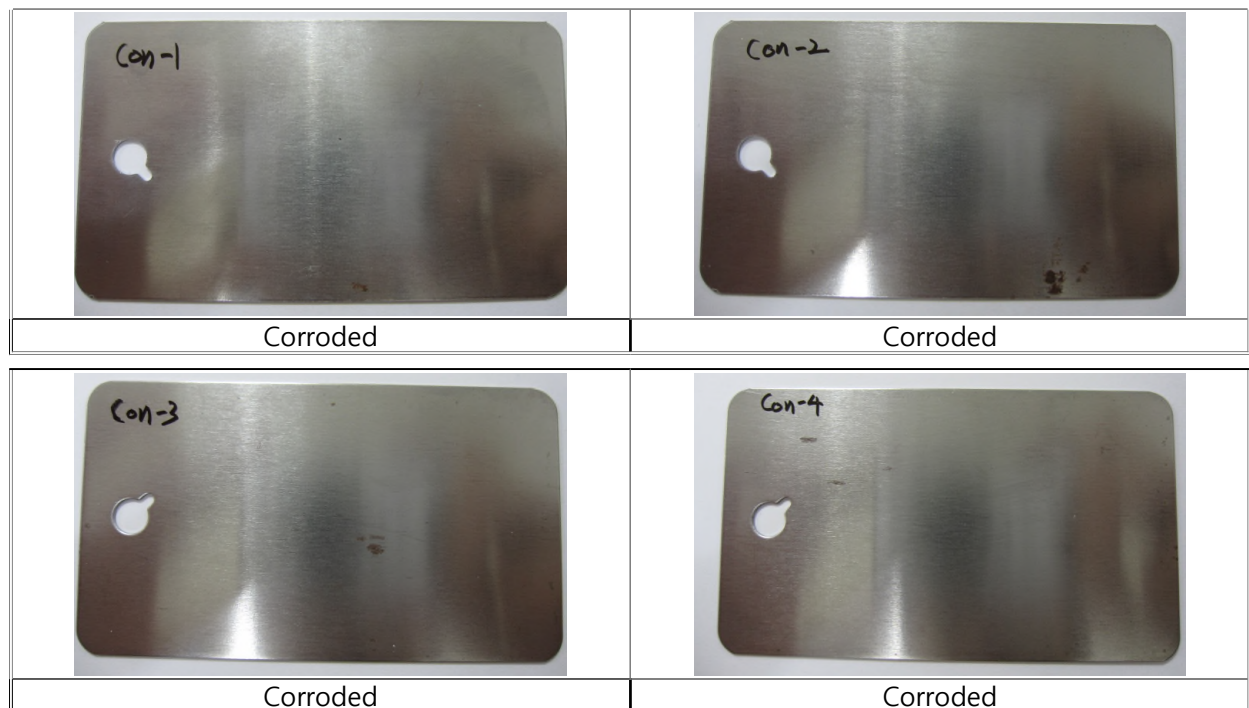


그림 9. 비교 시편

4.4.3 희생양극 실링재

개발된 희생양극 실링재는 KS F 4910 규격에 따른 건축자재 시방서에서 명시한 “실링재 줄눈 깊이는 6~10 mm 정도가 되도록 충전한다”는 내용을 따라 최소 깊이 6mm를 확보토록 설계한다.

KS F 4910의 최소 6 mm의 기준은 미국 “ASTM C1193: Standard guide for use of joint sealants”의 Step 3에 명시된 일반적으로 사용되는 실란트 연결부의 온도영향에 따른 움직임에 대한 분석결과에 기반한 것으로, ASTM에서는 표 10의 항목으로 구분지어 연결부의 온도변화에 따른 움직임 변위를(movement) 명시하고 있다.

표 10. ASTM의 joint movemet 분석

Description	Movement
Minimum joint width at the maximum mid summer temperature	3/4 inch (20mm)
Maximum joint width at the minimum mid winter temperature	1 inch (25mm)
Total joint movement summer to winter	1/4 inch (6mm)
Total joint movement expressed as % of minimum joint width	33%

곧, 표 10에서 보듯, 여름과 겨울의 연결부의 변위를 고려하면 실링재의 최소 깊이는 최소 6mm를 넘어야 함을 알 수 있다.

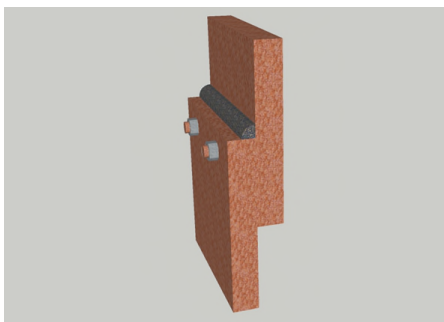
개발된 희생양극 실링재는 기존의 실링재에 전기적인 희생양극의 특성을 갖도록 Zinc powder를 첨가하여 접합부위의 부식을 방지하고자 하는 것으로 기존 실링재의 최소 깊이 요구조건에 맞는 설계가 바람직하다.

5. 방식설계 적용 방안

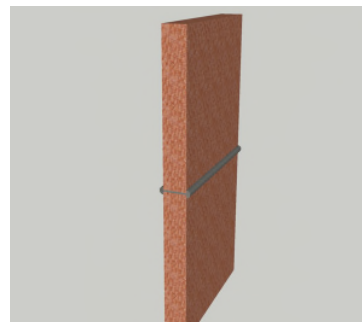
5.1 방식설계 주요 고려사항

Handbook of corrosion engineering (P. Robert, 2012)에서는 방식설계의 가장 중요한 세 가지로 (1) 완전하고 문제없는 배수, (2) 용접부의 완전한 밀봉, (3) 점검의 용이를 언급한 바 있고, Uhlig's corrosion handbook (R. Revie, 2011)에서는 무도장 내후성 강교의 방식설계 고려사항으로 다음의 11가지를 제시하고 있는 데, 앞의 세 가지 원칙과 더불어 무도장 내후성 강교량의 방식설계에 필수적으로 고려되어야 할 사항으로, 이를 활용한 구조상세 변경 방안은 그림 10과 같다.

- (1) 우수의 완전한 배수
- (2) 하부 I-beam의 플랜지 부를 미세하게 기울임
- (3) 박스 거더 하부 플랜지의 외장 길이 최소화
- (4) 인접 하부 플랜지 간의 이격거리 확보
- (5) 덧댐 플레이트 아래 볼트의 마찰 접합부의 물의 침입을 최소화
- (6) 익스팬션 조인트 부위의 물샘을 방지
- (7) 교량 면으로 슬래브 물의 침입 방지
- (8) 체수를 고려 박스 거더 내부면의 도장
- (9) 익스팬션 조인트로부터 물의 침입 방지
- (10) 안정 녹층의 형성을 촉진시키기 위해 강재 표면 청소
- (11) 기름, 그리즈, 모르타르 등의 외부 이물질 침입 최소화

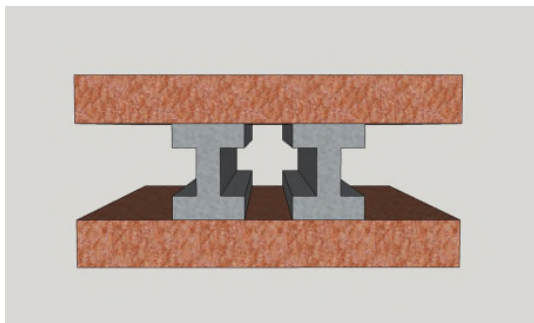


변경 전

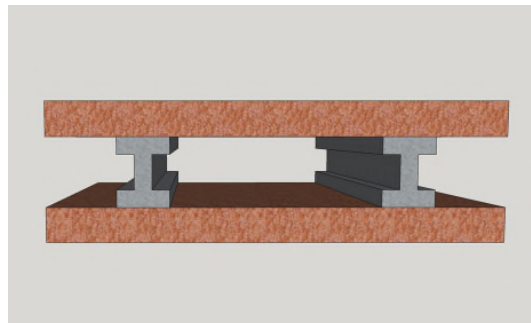


변경 후

연결방법을 변경하여 오염물이 쌓이는 것을 방지

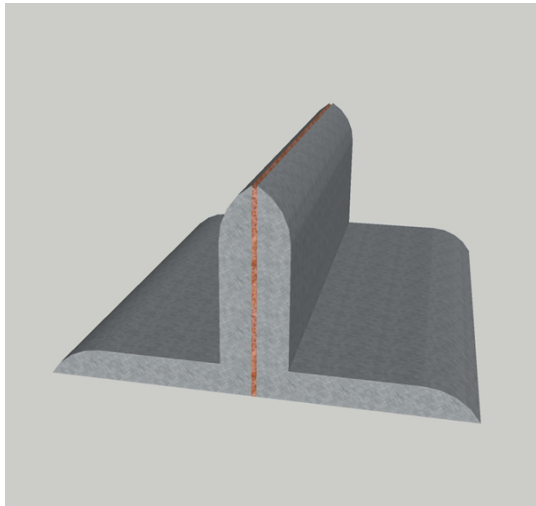


변경 전

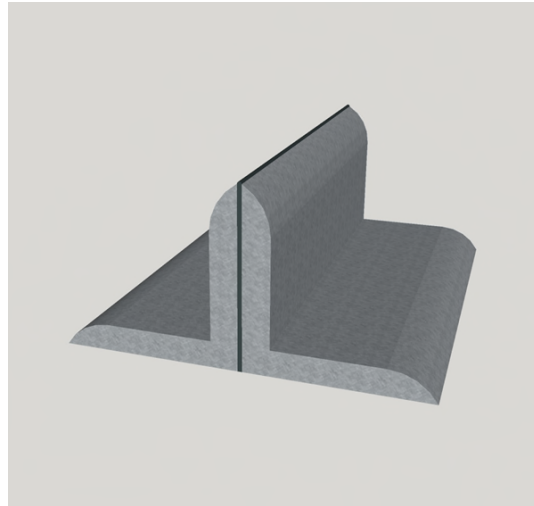


변경 후

지지간격을 넓혀 보수가 용이하도록함

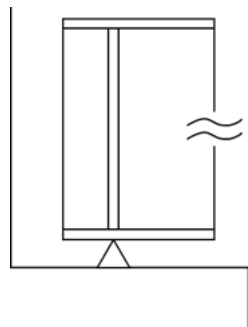


변경 전

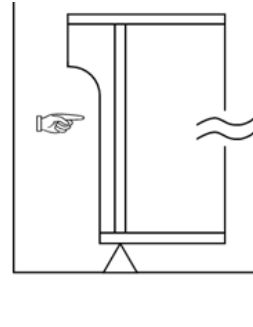


변경 후

부재 사이의 이음선을 메워 틈새에 발생 하는 부식을 방지

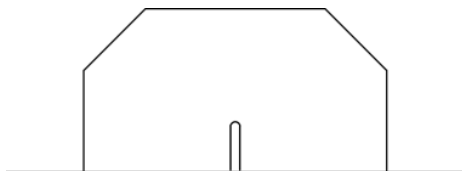


변경 전

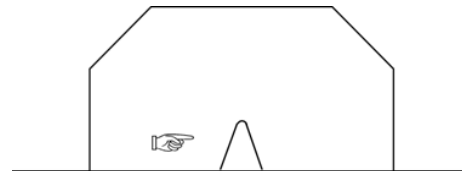


변경 후

주각 단부의 통기성을 개선

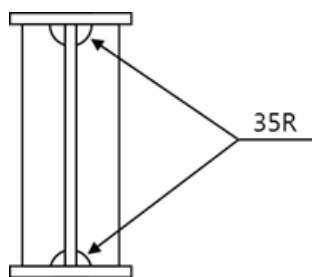


변경 전

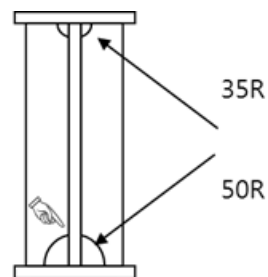


변경 후

체수를 방지하기 위해 스칼랩의 크기를 조정

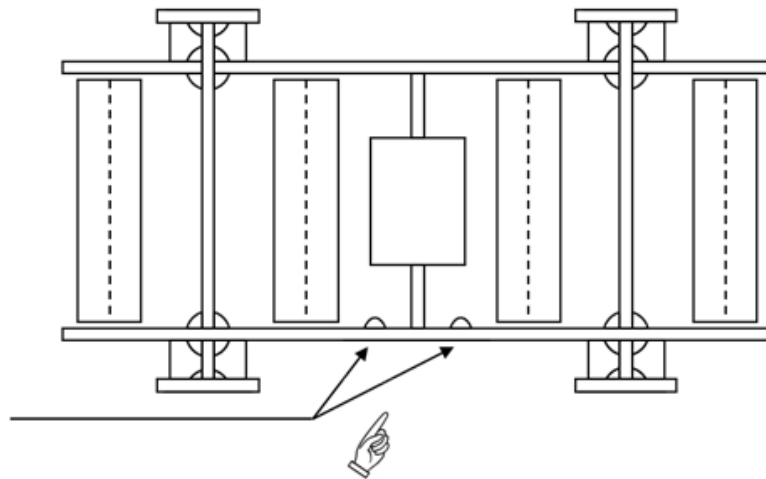


변경 전



변경 후

먼지 쌓임을 방지하기 위해 하부 스칼랩 크기 조정



체수방지를 위한 횡방향 유공(50R)

그림 10. 방식설계 원칙을 활용한 구조상세 변경방안

5.2 부식량의 고려

개발된 방식제를 실제 무도장 내후성 강교량의 방식설계에 적용키 위해서는 구조 부위별 강의 부식량에 따른 두께 손실에 대한 산정이 선행되어야 한다. 각 나라의 부식량 산정 기준을 살펴보면 대기 환경 요건에 따른 변수 한 개를 기준으로 일괄적으로 적용하고 있다(독일 기준: DAST Richtlinie 007 Lieferung, Verarbeitung und Anwendung wetterfester Baustähle. Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Köln, Germany, 1993., 영국 기준: BD 7/01 Weathering steel for highway, structures (British standard. UK, 2001., 미국 기준: Technical Advisory T 5140.22: Uncoated Weathering Steel in Structures. Department of Transportation Federal Highway Administration (FHWA), USA, 1989., 네덜란드 기준: Fischer, M., Merkblatt 434: Wetterfester Baustahl. Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf, Deutschland, 2004. ISSN 0175-2006, 벨기에 기준: The Use of Weathering Steel in Bridges, European Convention for Constructional Steelwork, Publication No 81, Brussels, ECCS, Belgium, 1995. 등). 일례로, 영국의 기준을 살펴보면, 표 11과 같으며, 여기서 나타난 대기의 부식 정도는 표 12와 같다. 곧, 환경의 조건이 심각할 경우, 노출되는 각 면에 따라 1.5 mm의 부식을 박스거더 내부의 경우 0.5 mm의 부식을 구조물의 생애에 걸쳐 고려하고 있고, 구조설계에 의해 산정된 부재의 두께에 부식량을 고려한 두께 손실을 더해 무도장 내후성 강교량의 방식설계가 이뤄지고 있다.

표 11. British standard (2001)

Atmospheric corrosion classification (ISO 9223)	Weathering steel environmental classification	Corrosion allowance (mm/exposed face)
C1, C2, C3	Mild	1.0
C4, C5	Severe	1.5
None	Interior (Box Girders)	0.5

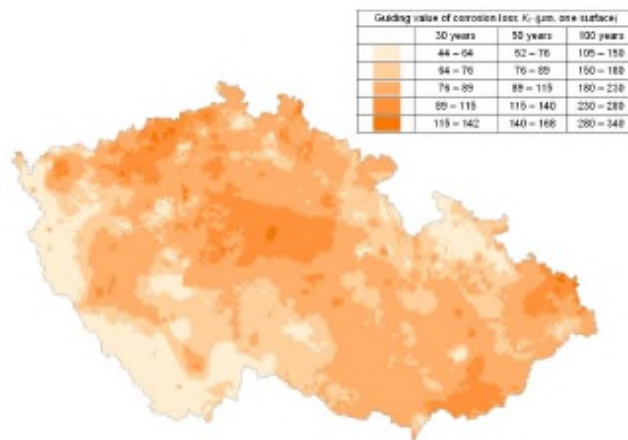
표 12. Classifications of C1 ~ C5

Environmental category	Typical environment
C1	Interior environments only
C2	Atmospheres with low levels of pollution. Mostly rural areas
C3	Urban and industrial atmospheres with moderate sulphur dioxide pollution Coastal areas with low salinity
C4	Industrial areas and coastal areas with moderate salinity
C5-I	Industrial areas with high humidity and aggressive atmospheres
C5-M	Coastal and offshore areas with high salinity

내후성 강교량의 위치별/부재별 부식량의 과학적인 산정을 위해, 2012년 12월 프랑스 파리에서 개최된 제3회 토목공학 국제 컨퍼런스에서 발표된 "Experimental Testing of Corrosion Process on Weathering Steel Bridges (V. Krivy and K. Vavrusova)"의 해석모델은 내후성 강재의 재료별(무도장/도장), 구조부재의 노출된 위치, 외기 노출정도, 시공 유지관리 등의 4가지 변수와 지역의 환경 특성을 고려해 내후성 강교량의 부식량 산정을 아래 식과 같이 제안하였다.

$$K_{T_d} = K_T \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 (\mu m) \quad (7)$$

식(7)에서, K_{T_d} 는 부위별 부식량의 산정값을 K_T 는 지역의 환경 특성을 고려한 설계 부식 손실값을 나타내며, 체코의 경우, 그림 11과 같이 30년, 50년, 100년의 세 가지 수명에 근거해, 지역별 부식 손실값을 제시하였다.



Map of the guiding values of corrosion loss

그림 11. K_T 값의 제시 (체코의 경우)

또한, 식(7)에서, 변수 α_1 은 무도장 내후성장인 경우 1.2의 값을 택하고(도장 내후성장인 경우 1.0), 구조 부재의 표면 위치 및 장소에 관한 변수 α_2 와 구조설계와 시공 유지관리를 고려한 변수 α_4 의 값은 각각 표 13과 표 14의 값을 택하며, 외기 노출과 관련된 변수 α_3 는 직접적으로 젖는 표면의 경우 1.0, 간접적으로 젖는 표면의 경우 0.8, 염화물에 의해 간접적으로 젖는 표면의 경우 1.3, 박스 구조물의 내부 표면의 경우 0.2의 값을 택할 것을 체코 내 현존하는 내후성 강교의 실험을 통한 조사와 평가를 근거로 제시하였다.

표 13. 변수 α_2 의 값 선정 기준

표 면	α_2	예 시
수직면	1.0	보의 웨브
수평면	1.1	플랜지의 상하부, 데크 플레이트
물이 새는 표면	2.0	데크 조인트 근접부로 제설제가 사용되지 않는 부위 - 보수적인 접근으로, 데크 조인트의 높이의 1.5배 내에 있는 부위 - 데크 조인트의 파손으로 부위가 찢지 않는 조건이면 $\alpha_2 = 1.0$
제설제 사용으로 염화영향을 받은 표면	4.0	데크 조인트 근접부로 제설제가 사용되는 부위 - 보수적인 접근으로, 데크 조인트의 높이의 1.5배 내에 있는 부위 - 데크 조인트의 파손으로 부위가 찢지 않는 조건이면 $\alpha_2 = 1.0$
웹과 플랜지의 용접되는 fillet	1.5 ¹⁾	웹과 플랜지간의 용접부
주 ¹⁾ 웨브와 플랜지 fillet이 새는 물에 영향을 받으면 $\alpha_2 = 3.0$ (제설제 없는 경우) 혹은 $\alpha_2 = 6.0$ (제설제가 쓰인 경우)		

표 14. 변수 α_4 의 값 선정 기준

구조설계와의 부합도	시공 유지관리	α_4
Yes	Yes	1.0
Yes	No	1.5 ¹⁾
No	Yes	
No	No	2.5 ¹⁾
주 ¹⁾ 이 값은 적절치 않은 상세 구조 혹은 필요한 유지관리가 이뤄지지 않을 경우, 변동이 가능함		

V. Krivy와 K. Vavrusova의 방법에 근거해 산정한 무도장 내후성강교의 변수별 부식량을 도로교설계 기준(2015)의 설계수명 100년을 고려해, 부식 손실값 $K_T = 350 \mu m$ 와 $\alpha_1 = 1.2$ 으로 산정하면 표 15와 같다.

표 15. 무도장 내후성강교 변수별 부식량 산정값

α_2	α_3	α_4	부식량 (μm)	α_2	α_3	α_4	부식량 (μm)
1	0.2	1	84	2	0.2	1	168
		1.5	126			1.5	252
		2.5	210			2.5	420
	0.8	1	336		0.8	1	672
		1.5	504			1.5	1008
		2.5	840			2.5	1680
	1	1	420		1	1	840
		1.5	630			1.5	1260
		2.5	1050			2.5	2100
	1.3	1	546		1.3	1	1092
		1.5	819			1.5	1638
		2.5	1365			2.5	2730
1.1	0.2	1	92.4	4	0.2	1	336
		1.5	138.6			1.5	504
		2.5	231			2.5	840
	0.8	1	369.6		0.8	1	1344
		1.5	554.4			1.5	2016
		2.5	924			2.5	3360
	1	1	462		1	1	1680
		1.5	693			1.5	2520
		2.5	1155			2.5	4200
	1.3	1	600.6		1.3	1	2184
		1.5	900.9			1.5	3276
		2.5	1501.5			2.5	5460
1.5	0.2	1	126	※ 표 10의 기준에 나타난 부식량(500 μm ~1500 μm)과 비교해, 여기서 산정된 값은 최소 0.27배에서 최대 6배까지 더욱 세밀한 부식량 산정기준을 제시하고, 이는 향후, 구조 부재의 위치별/노출 환경별 부식량 예측의 기초자료로 활용될 수 있는 장점이 있다.			
		1.5	189				
		2.5	315				
	0.8	1	504				
		1.5	756				
		2.5	1260				
	1	1	630				
		1.5	945				
		2.5	1575				
	1.3	1	819				
		1.5	1228.5				
		2.5	2047.5				

5.3 불안정 녹의 부식

앞의 4.2절에서 살펴본 무도장 내후성 강교량의 부식량에 대한 산정 기준과 제안 방법에 따라 산정된 부식량은 녹의 안정화 (stabilization of rust)를 고려한 것으로 불안정 녹 형성에 따른 부식특성이 고려되어 있지 않다. 하지만, 그림 12 ~ 그림 13의 N. Toshimiya와 K. Kazusi (2010, 塩害を受ける耐候性鋼板を使用した橋梁の調査研究, 野工業高等専門学校紀要第 44 号)의 일본 내 무도장 내후성 강교량에 대한 부식 상태 조사에서 보듯, 녹의 안정화가 형성되지 않았을 경우 발생하는 불안정 녹의 부식 정도는 설계나 산정식에 따른 부식량과 비교해 매우 심각함을 알 수 있다.

국내 무도장 내후성 강의 조성과 다소 차이는 있겠지만, 일본 내후성 강의 경우, 박리되거나 녹의 안정화가 되지 않았을 경우까지 포함하여 녹의 부식 등급을 표 16과 같이 평가할 것을 제안한 바 있다 (H. Kihira et al., 2004, Nippon Steel Technical Report No. 90).

표 16. Rust rating classification suggested by weathering steels of bridge technology committee in Japan Iron and Steel Federation

Rating	Status	Typical appearance	Rust thickness
5	Normal	Thin rust due to very low corrosion rate	Less than 200 μm
4		Attached rust particles of less than 1 mm in horizontal size	Less than 400 μm
3		Attached rust particles of 1 mm- 5 mm in horizontal average size	
2	Observation needed	Rust like fish scale	From 400 μm to 800 μm
1	Unexpected	Thick and/or delaminated rust	More than 800 μm

주지할 부분은 표 16의 녹의 부식 등급이 9년 이상의 외기 노출 조건 하의 판단기준이라는 점이다. 이는 9년 이상의 시간경과에 따라 불안정 녹에 의한 부식량은 더욱 심각해지고, 박리로 인한 구조 부재의 두께 감소는 매우 클 수 있음을 의미한다. 곧, 부식량 관리기준과 산정량을 통한 방식설계에 있어, 불안정 녹의 부식에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다.

2004년 10월 미국 뉴욕 주 시라큐스에서 개최된 “11th Statewide Conference on Local Bridges”의 무도장 내후성 강재 부분의 발표에서 B. McMahon과 R. McFadden은 뉴욕 주의 무도장 내후성 강교 분석을 통해, 녹의 부식에 의한 단면손실의 이상적인 속도로 100 $\mu\text{m}/\text{year}$ 을 제시한 바 있다. 이는 앞의 표 11과 표 15의 교량의 생애에 걸쳐 고려되는 설계 부식 허용량 값에 더해, 녹의 안정화가 실패했을 경우에 대비한 방식 유지관리의 지표를 제공한다.



神田川橋



ボルト接合部腐食状況

그림 12. 일본의 무도장 내후성 강교의 부식 사례 I (일본) -塩害を受ける耐候性鋼板を使用した橋梁の調査研究, 野工業高等専門学校紀要第 44 号, 2010



下フランジ損傷状況



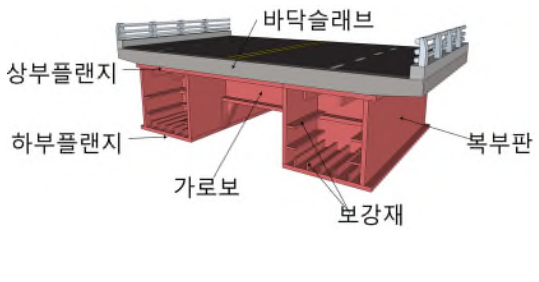
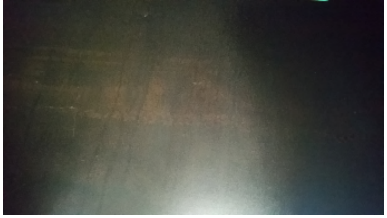
平瀬橋上田市側

그림 13. 일본의 무도장 내후성 강교의 부식 사례 Ⅱ (일본) -塩害を受ける耐候性鋼板を使用した橋梁の調査研究, 野工業高等専門学校紀要第 44 号, 2010

6. 방식설계 적용 예시 (신양수대교)

이 장에서는 ‘도장이 없는 내후성강교량 박스거더 내부 최적방식기술 및 유지관리지침(안)개발’ 연구에서 현장 샘플 시공이 이뤄진 신양수대교에 대해, 개발된 방식제와 희생양극 실링재를 가상으로 방식설계 적용하였을 경우에 대해 기술하였다 (주요 부위에 대한 방식설계는 그림 7의 내용을 따라 방식설계). 본 연구과제의 기본 방향인 내후성 교량의 밀폐된 내부 방식에 초점을 맞춰, 박스거더 내부에 대한 방식설계를 중점적으로 고려하였으며, 그 적용 예시는 표 17 ~ 표 18과 같다.

표 17. 수용성 방식제 및 기화성 방식제 적용 예

	
박스거더 내부	
S.S.P.C. Steel Surface Preparation Standards  SP-6 Commercial Blast Cleaning Complete removal of all visible oil, grease, dirt, dust, mill scale, rust, paint, oxides, corrosion products and other foreign matter, except for spots and discolorations. Spots and discolorations shall be limited to no more than 33% of each area of nine square inches. Usual methods for cleaning: compressed air nozzle blasting or equipment with centrifugal wheels. Equivalence: NACE 3# • Swedish Standard # SA-2 	
SSPC-SP6를 기준으로 수용성 방식제 코팅의 바탕면 표면처리(출처: www.tboake.com)	SSPC-SP6 기준에 따른 표면처리예

수용성 방식제 코팅

- 강재 표면처리 후 수용성 방식제를 100 μ m 두께로 도포한다.
- 재료 손실률을 고려해 코팅 소요량의 약 2배의 수용성 방식제 도포한다.
- 밀폐된 박스거더 내부 작업 시 반드시 환기설비 설치 및 호흡기 보호장구를 착용한다.
- 시공환경은 주변 온도 10℃ 이상, 상대습도 85% 이하를 권장한다.
- 코팅면이 한 곳에 집중되거나 부족하지 않도록 균일하게 시공한다.
- 재료가 충분히 혼합도록 교반기를 사용해 약 4~5분간 교반 후 사용하며 교반후 3시간 이내에 코팅한다.
- 필요시, 수용성 방식제는 물로 희석하되 사용량을 주재료의 1/4이하로 제한한다.

※ 시공능력에 따라 100 μ m두께는 2회(회당 50 μ m/2회)에 나누어 도포가능하며 반드시 1회 도장면의 건조를 확인한 후 시공하여야 한다(약 1시간 30분 후).



수용성 방식제 코팅시 기화성 방식제를 거치하여, 방식 성능을 확보한다.

<표 18. 희생양극 실링재 적용 예>

	희생양극 실링재
1. 볼트 이음부	
	마스킹 테이프 희생양극 실링재 용접 접합부
2. 용접 접합부	
- 볼트 이음부 및 용접 접합부의 희생양극 실링재 마감은 현장에서 실시 ※ 희생양극 실링재 두께는 설계지침에 따라 최소 6mm에서 최대 10mm로 시공한다.	

무도장 내후성강교량
방식 유지관리 지침서

< 목 차 >

1. 총 칙	358
1.1 목적	358
1.2 제한사항	358
2. 용어정의	358
3. 점검 일반사항	360
3.1 점검목적	360
3.2 주요 점검항목	360
3.3 주요 점검부위	360
3.4 점검계획 및 기록	361
3.5 점검빈도	362
3.5.1 정기점검	363
3.5.2 정밀점검	363
3.5.3 긴급점검	363
4. 부식진행의 조사와 평가	364
4.1 현장조사	364
4.1.1 육안조사	364
4.1.2 투명 셀로판 테이프를 사용한 조사	364
4.1.3 전위에 의한 부식 조사	368
4.1.4 부식에 의한 강재의 판 두께 감소량 조사	370
4.2 현장시료에 의한 조사	370
4.2.1 전자 현미경 시험 (Scanning Electron Microscope)	370
4.2.2 X-Ray Diffraction(XRD) - X선 회절 분석법	371
5. 재료적 특성	373
5.1 무도장 내후성강판의 특성	373
5.2 수용성 방식제 특성	378
5.3 기화성 방식제 특성	379
5.4 희생양극 실링재의 특성	379
6. 유지관리 및 보수	381
6.1 일반사항	381
6.2 유지관리	381
6.3 보수방법	381
6.4 세부 시공	383
6.4.1 표면처리	383
6.4.2 수용성 방식제 적용	385
6.4.3 기타사항	385

7. 국내외 유지관리 현황 387

7.1 미국의 무도장 내후성강교량 유지관리 387

7.2 일본의 무도장 내후성강교량 유지관리 388

7.3 국내 일반강 교량 내부도장 사양 388

1. 총 칙

1.1. 목적

본 “무도장 내후성강교량 방식(防蝕) 유지관리 지침서”는 “시설물의 안전관리에 관한 특별법” (약칭: 시설물안전법) 제13조 및 같은 법 시행령 제13조의 규정에 의한 “시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 지침(국토교통부고시 제2013-200호)“의 점검기준 및 규정과 “재난 및 안전관리기본법” 제 27조 및 같은 법 시행령 제32조의 “특정관리대상시설 등의 지정 및 관리 등에 관한 지침” 규정에 의거 교량 점검자가 점검과 관련된 사항을 숙지할 수 있도록 하며, 교량 관리책임자가 무도장 내후성강 교량의 방식과 관련된 유지관리 업무를 원활히 수행할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

1.2. 제한사항

무도장 내후성 강교량의 기능성과 안전성을 유지하기 위해서는 부식에 대한 결함을 확인하여 결함정도에 따른 적절한 보수공법과 보수시기 등을 판단하여 신속한 보수가 실시될 수 있도록 하고, 지속적인 유지 관리를 하여야 한다. 이를 위해서는 부식 진행 확인 및 다양한 방식기술과 각 방식기술의 실제적인 적용 등에 대한 폭 넓은 이해가 필요하고, 국내의 경우 이를 집대성한 총 6권의 방식기술편람이 간행된 바 있다 (건설교통부, 1998).

본 유지관리 지침서는 2012년부터 2015년까지 3년간 진행된 국토교통과학기술진흥원의 “국내 무도장 내후성강 교량의 방식 기준 및 유지관리 지침 개발을 통한 국내 환경 대응형 방식기술 개발” 연구 결과를 토대로 개발된 수용성 부식억제제 및 기화성 부식억제제와 부수적으로 개발된 희생양극 실링재의 방식기법의 적용 기법에 한정된 것으로, 연구과정과 도출된 결과를 토대로 작성되었으며, 여기서 기술하지 않은 사항에 대해서는 일반 강교량의 점검 및 유지관리 지침과 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 지침에 따른다. 한편, 녹안정화처리를 실시한 내후성강 교량에 대해서는 표면처리 피막이 완전히 벗겨진 후에는 무도장 내후성강 교량이 되지만 그 피막이 남아 있는 동안은 표면처리 성질에 따른 점검 및 유지관리가 필요함을 명시한다.

2. 용어정의

- 유지관리(Maintenance) : 시설물과 부대시설의 기능을 보존하고 이용자의 편익과 안전을 도모하기 위하여 일상적으로 또는 정기적으로 시설물의 상태를 조사하고 손상부에 대한 조치를 취하는 일련의 행위
- 결함(Defect) : 계획, 설계 및 시공단계에서 목표와는 다르게 비정상적으로 축조되어 부정적으로 작용하는 불안전한 초기하자상태 예) 용접불량, 볼트체결불량, 국부부식, 전면부식 등
- 손상(Damage) : 구조물에 외적 또는 내적으로 작용하는 물리적인 힘에 의하여 불안전하게 된 상태 예) 균열, 파손, 변형, 침식 등
- 열화(Deterioration) : 자연력 및 인위적작용을 받는 구조물이 시간이 경과됨에 따라 물리적, 화학적으로 변질, 변형 되어가는 현상 예) 염해, 화학적(황산염) 침식 강재부식 등
- 상태평가(Assessment) : 결함, 손상, 열화의 정도를 포함한 시설물의 상태를 평가하는 행위
- 비파괴시험(Non-destructive test) : 구조물을 손상시키지 않고 필요한 자료를 간접적으로 측정 또는 추정하는 시험
- 내구성(Durability) : 구조물이 처해있는 환경조건에 대한 재료자체의 내적인 저항능력

- 내하력(Load carrying capacity) : 외적인 하중조건에 대한 구조물의 내적인 저항능력
- 보수(Repair) : 구조물의 비정상적인 상태를 원래 상태로 수리하는 행위
- 보강(Strengthening) : 영구적인 구조의 변경 또는 부분적 교체를 통하여 원래 이상으로 기능을 향상 시키는 행위
- 부식(Corrosion): 강재에서의 가장 일반적인 형태의 노후화 현상으로서 환경적 요인에 의한 부식, 전류에 의한 부식, 박테리아에 의한 부식, 과대 응력에 의한 부식 그리고 마모에 의한 부식이 있다. 일반적인 환경에서 강재의 부식속도는 대략 1년에 0.02mm정도이다. 그러나 제철작업 등으로 염화칼슘, 황산염 등의 무기질 이온에 노출되면 1년에 0.3mm이상 부식되고, 강재단면에 구멍이 뚫리기도 한다. 부식으로 단면이 손실된 부위는 교량의 내하능력에 심각한 영향을 미치고, 피로파괴의 위험을 유발시킬 수 있다.
- 블라스트(Blasting): 압착공기나 고속 보일러의 원심력에 의해 보내어지는 고속 모래나 쇼트, 그리트, 동슬래그, 니켈슬래그 등의 연마재를 금속표면에 압착공기나 원심력으로 분무하여 녹이나 흑피를 제거하는 방법으로 사용하는 입자 종류에 따라 샌드블라스트, 슛블라스트 등으로 분류한다.
- 부동태(Passivity): 산이나 약제의 부식에 침해받지 않는 상태. Stainless 표면에는 니켈, 크롬, 강이 일체가 된 견고한 산화피막이 형성되어 물, 산소, 부식 촉진 물질 등의 침투를 막으며, 이러한 산화 피막을 부동태 피막이라 한다.
- 주요 구조부재: 교량의 내하력, 내구성 측면을 고려한 거더, 가로보, 세로보, 바닥판, 받침대 등의 부재를 의미한다.
- 내후성강(Weathering Steel): 일반강에 내식성이 우수한 Cr, Cu, Ni, Si, P 등의 합금원소를 소량(0.1~1.0%) 함유한 저합금강으로 대기환경 하에서 일반 강(鋼)에 비해 4~8배의 내식성을 갖는 강재
- 희생양극(Sacrificial Anode): 더욱 전기적으로 활성화된 합금을 보호하고자 하는 금속에 연결하면, 보호하고자 하는 금속을 (-)극으로 만들어주게 되어 부식을 방지하게 되며, 이때 사용되는 전기적으로 활성인 합금을 희생양극 혹은 갈바니 양극(galvanic anode)라 칭한다.
- 활성(Active): 열역학적으로 반응경향이 큰 금속이 환경물질과 반응하여 용해되는 상태를 말한다.
- 부식억제제(Corrosion Inhibitors): 금속의 부식을 감퇴시키는 물질을 전반적으로 일컫는 용어로 ‘방청제(防鏽濟)’ 및 ‘방식제(防蝕濟)’와 같은 의미로 사용된다.
- 흑피(Mill Scale): 열간처리 강재의 표면에 있는 청흑색의 산화철 피막.
- 녹(Rust): 강의 표면에 생기는 수산화물 또는 산화물을 주체로 하는 화합물. 넓은 의미로는 금속이 화학적 또는 전기화학적으로 변화해서 표면에 생기는 산화 화합물을 의미한다.
- 피팅(Pitting): 금속 표면에 생기는 점 또는 패인 모양을 한 구멍(pit)에 발생하는 부식을 공식(pitting)이라 한다.

3. 점검 일반사항

3.1 점검목적

주기적 점검과 보수를 통해 교량의 기능과 안정성을 확보하고 형식적인 사후관리가 아닌 예방관리를 통해 유지관리 비용을 최소화하며, 이를 일관성 있게 실시함으로써 유지관리의 효율을 극대화시키는 것을 그 목적으로 한다.

3.2 주요 점검항목

무도장 내후성강 교량의 부식 상태 점검은 다음 4가지 사항을 고려해 수행한다.

- (1) 층상박리녹 및 피팅의 발생 유무
- (2) 내후성 강재의 녹면에 접하는 부분의 누수 유무
- (3) 내후성 강재 상의 체수 유무
- (4) 내후성 강재 상의 불순물 퇴적 유무

상기 주요 점검항목은 주로 녹 상태의 좋고 나쁨에 관한 것으로, 일반 강교량 도장의 열화 및 부식의 점검에 해당되는 것이다.

무도장 내후성 강재는 강재 성분 중에 포함되어 있는 Cu, Cr, Ni, Si, P 등 합금원소의 영향에 의해 강재표면의 녹을 치밀하게 안정화시켜 더 이상의 부식을 방지하는 녹 안정화 메카니즘을 갖는다. 하지만, 녹 안정화 과정은 환경조건에 따라 다르기는 하나, 5년 이상의 장기간이 소요되며, 주위 환경의 변화로 기 형성된 녹 안정화 상태가 국부적으로 파괴될 수도 있으므로 녹 안정화가 된 후에도 점검은 필요하다.

녹 안정화를 비파괴 시험처럼 수행하여 판정하는 방법은 아직까지 알려진 바 없으나, 녹이 안정화되지 못하고 층상박리녹이 발생할 때 녹층은 과립 형상이나 얇은 조각 형상을 띄게 되며, 환경 여건이 매우 안 좋은 경우 검은 색상의 두터운 층상박리녹이 발생하게 된다. 또한, 녹 안정화 판정과 더불어 구조물로서의 기능에 영향을 미치는 판두께의 감소 유무와 누수로 인해 무도장 내후성 강재 표면의 체수상태와 불순물 퇴적 요인에 대해 점검을 해야 하는 데, 이는 내후성강 부재 면에 퇴적되어 있는 다량의 진흙, 먼지 찌꺼기, 염화칼슘 등의 부식 가속화 요인이기 때문이다.

3.3 주요 점검부위

무도장 내후성강 교량에서 녹상태의 양호 여부에 대해 중점적으로 점검해야 하는 부분은 일반 강교량의 도막 열화 손상이 발생하기 쉬운 부분과 동일하며, 이는 크게 다음과 같다.

- (1) I-단면 부재에서 하부 플랜지의 상·하면, 하부 플랜지와 복부간의 용접부
- (2) 박스거더의 내부, 하부 플랜지 하면과 그 돌출부 및 연결부
- (3) 부재들이 교차하는 격점부
- (4) 거더 단부 및 지점 부근, 교량 받침부, 교대 및 교각의 교좌면
- (5) 볼트 이음부
- (6) 내부 힌지부, 핀-행어 연결부
- (7) 신축이음장치, 배수장치 및 그 인접부
- (8) 배수 구멍

무도장 내후성강 교량에서 발생하는 부식문제는 안정화 녹 형성에 방해가 되는 누수 및 체수로 인한 경우가 많으며, 누수 문제는 거더간 또는 거더-교대간 신축이음부, 병렬교에서 콘크리트 바닥판이 접한 경우 등에 발생하는 것이 대다수이다. 이런 누수부의 발견은 우천 시 실시하는 것이 효율적이나 임의로 물을 뿌려 수행할 수도 있고 부식 문제가 발생할 수 있는 구조형태 및 부위와 그 발생 원인은 표 1과 같이 정리될 수 있다. 표 1에서 보는 바와 같이, 배수와 통풍이 불리하고 누수, 결로현상, 밀폐된 환경에 인한 체수 등 녹 안정화에 불리한 여건은 일반 강교량에서 도장의 열화 손상이 발생하기 쉬운 부분과 대체로 일치함을 확인할 수 있다.

표 1. 무도장 내후성강 교량 안정화 녹 형성의 문제점 및 발생 원인

구조 부위	문제점	발생 원인
박스거더	박스거더 내부 체수	환기구 우수 유입 교통 비산수 유입 단부 밀폐되지 않음
	박스거더 내부 결로	박스 내외부 온도차 안개 및 다습한 기후
	연결부 부식	신축이음부 누수 교통 비산수, 오물 유입
트러스	격점부 토사 및 습기	먼지 및 토사 퇴적 물 고임
보	과립상 녹층	교량 하부 교통 비산수 영향
	신축이음부 근처 층상 박리녹	신축이음부 누수
브레이싱	수평 거셋판, L형강, 브레이싱 부식	먼지 및 토사 퇴적물 고임
	브레이싱재와 거셋판, 거셋판과 복부판의 틈새 부식	틈새로 먼지, 토사, 물 유입 단속 용접
볼팅 및 용접부	볼트 이음부 틈새 부식 및 녹물치	틈새로 먼지, 토사, 물 유입
	용접 이음부 틈새 부식 및 녹물치	단속 용접
신축이음부	조인트 누수, 밀봉처리 누락	토사 침입, 시공 불량

3.4 점검계획 및 기록

점검 전, 충분한 사전계획과 준비를 통해 점검자의 안전과 사용자의 불편을 최소화하도록 하며, 고려되어야 할 사항은 다음과 같다.

- 점검의 종류, 범위, 항목, 방법, 장비, 시간, 소요 인원, 점검자의 자격
- 과거의 점검 및 보수 이력
- 대상 교량의 설계 및 시공 자료
- 대상 교량의 구조적 특성 및 부재 점검 계획
- 교량의 규모 및 점검의 난이도
- 교통량 및 교통통제에 따른 영향
- 점검 장비의 접근성

- 점검시의 기상상태
- 대상 교량의 주변 환경
- 타 기관 또는 필요한 경우 사용자와의 협조 및 공지사항
- 기타 관련 사항

특히, 스틸-박스거더교 내부 밀폐공간 등 주요부위의 점검은 주의를 기울일 수 있도록 계획을 수립해야 하며, 점검을 실시한 후에는 점검 결과를 기록, 보관하여야 한다.

점검의 결과는 합리적인 유지관리를 위해 필수적인 자료이므로 다음의 사항에 유념해 작성토록 한다.

- 기록 사항에는 녹의 상태와 강재의 상태를 포함한다.
- 각 상태는 부재의 위치별로 구분하여 기록한다.
- 녹 안정화에 관계되는 중요 환경 요인인 제설제 살포의 유무, 누수 및 체수 유무, 전회 점검과 비교 특이할 만한 환경 변화 등에 관한 사항을 기록한다.

여기서, 녹 안정화 추적을 위해 매 점검주기마다 녹과 강재의 상태변화를 확인할 수 있는 컬러사진으로 기록토록 하고, 녹의 진행 방향에 대해 확인토록 부재의 위치를 구분하여 기록한다. 또한, 교량 건설 당시에는 없었으나 사용 중에 황산화물을 다량 배출하는 산업시설이 새로이 건설되거나 특이할 만한 기후변화에 대해서도 대처할 수 있도록 이에 대한 기록을 명시한다.

3.5 점검빈도

무도장 내후성강 교량의 부식 점검빈도는 원칙적으로 일반 강교량의 점검주기와 같은 빈도로 실시한다. 이는 녹 상태가 악화되지 않는 한 무도장 내후성강 교량이라 해서 일반 강교량 이상으로 점검 내용이 복잡해지는 것이 아니기 때문이다. 통상, 교량의 정기점검은 반기별 1회 이상, 정밀점검은 2년에 1회 이상 실시하며, 구조물의 노후화와 안전성을 평가하는 정밀 안전진단도 구조물의 등급에 따라 주기적으로 실시되고 있다. 점검주기 및 주요조사 항목은 표 2와 같다.

표 62. 점검 주기 및 주요조사 항목

점검종류	점검주기	주요조사 항목
정기 점검	시설물의 준공일 또는 사용 승인일로부터 6개월에 1 회 이상 실시	· 박리, 박락, 균열, 사용하중, 누수 등에 관해 전 회 점검 시와 변형, 변위 발달상태 · 도보에 의해 전 구간 육안조사
정밀 점검	A 등급: 3년에 1회 이상 B/C 등급: 2년에 1회 이상 D/E 등급: 1년에 1회 이상	· 설계도서 검토 · 형상검사(규격, 변위, 변형, 침하 등) · 상태검사(파열, 손상, 부식, 균열, 누수, 열화 등) · 현장시험, 측정
긴급 점검	필요시	· 손상의 정도, 보수의 긴급성, 보수작업의 규모, 부재의 내하력, 사용제한 여부 등
정밀 안전 진단	A 등급: 6년에 1회 이상 B/C 등급: 5년에 1회 이상 D/E 등급: 4년에 1회 이상	· 구조물의 노후화, 손상정도, 초기 및 점검상태로 부터의 변화 확인 · 구조해석 및 안전성 평가

3.5.1 정기점검

정기점검은 경험, 전문성 및 기술을 갖춘 점검자에 의한 점검으로 시설물의 기능상태를 판단하고 시설물이 현재의 사용요건을 계속 만족시키고 있는지 확인하는 것을 그 목적으로 한다. 관리주체는 정기점검 실시결과 필요한 경우 결함의 정도에 따라 긴급점검 또는 정밀점검을 실시하는 등 필요한 조치를 취하여야 한다.

3.5.2 정밀점검

정밀점검은 시설물의 현 상태를 정확히 판단하고자 이전에 기록된 상태로부터의 변화를 확인하고, 면밀한 조사와 측정, 시험장비를 통해 구조물의 기능을 종합적으로 점검하는 것으로 다수의 전문가를 통해 실시토록 한다.

이전의 정기점검 및 정밀점검 실시결과에서 발견된 결함의 진전 및 신규발생을 파악하여 시설물의 주요 부재별 상태를 평가하고 시설물 전체에 대한 상태평가 결과를 도출, 중대한 결함의 경우에는 해당 부위에 대하여 별도의 안전성평가를 실시하여 조치토록 한다. 정밀점검 실시결과 결함이 광범위하게 발생하는 등 정밀 안전진단이 필요하다고 판단될 경우에는 점검자는 관리주체에게 즉시 보고하여야 하며, 관리주체는 이에 근거해 정밀 안전진단을 실시하여야 한다.

3.5.3 긴급점검

긴급점검은 관리주체가 필요하다고 판단한 때 또는 관계행정기관의 장이 필요하다고 판단하여 관리주체에게 요청한 때에 실시하는 정밀점검 수준의 점검으로 실시 목적에 따라 손상점검과 특별점검으로 구분하여 진행토록 한다.

4. 부식진행의 조사와 평가

4.1 현장조사

4.1.1 육안조사

외관에 의한 조사는 크게, 녹의 색조와 녹의 조밀도를 관찰하여 안정녹의 형성을 표 3~표 4와 같이 4 단계 기준을 정립, 이에 근거해 평가한다. 이러한, 육안 점검에 의한 녹의 평가는 정밀적인 시험방법과 더불어 수행되는 것으로, 안정녹의 형성을 육안으로 판단할 수 있는 근거를 제공하는 데 의의가 있다.

표 3. 녹의 색조에 의한 외관조사 평가 예

평 가	강재표면의 외관
3	흑갈색
2	갈색부터 흑갈색
1	적색부터 갈색
0	황색부터 적색

표 4. 녹의 조밀도에 의한 외관조사 평가 예

평 가	강재표면의 외관
3	전체적으로 치밀한 녹의 분포
2	치밀한 녹에 두껍고 큰덩어리의 녹이 혼재(混在)
1	두꺼운 녹에 가늘고 얇은 녹이 혼재
0	조잡한 녹인 분포

4.1.2 투명 셀로판 테이프를 사용한 조사

폭 24mm의 투명 셀로판 테이프를 사용하여 테이프에 묻어 나오는 강재표면의 녹입자 크기와 양을 기준으로 안정녹의 형성 여부를 간접적으로 측정하는 방법으로, 표 5와 같이 4단계의 평가기준을 적용하여 안정녹의 형성 여부를 파악한다. 이 또한, 정밀한 시험방법과 더불어 수행되는 것으로, 안정녹의 형성을 육안으로 판단할 수 있는 근거를 제공하는 데 의의가 있으며, 사진 1~사진 3은 양수대교에 실제 이 방법을 적용하여 평가한 예시이다.

표 5. 셀로판 테이프법에 의한 평가방법

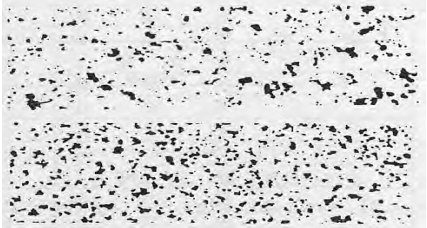
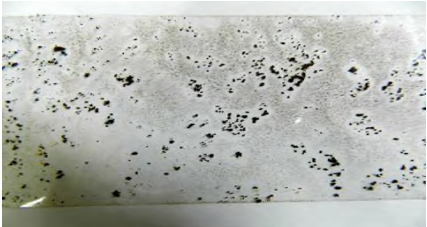
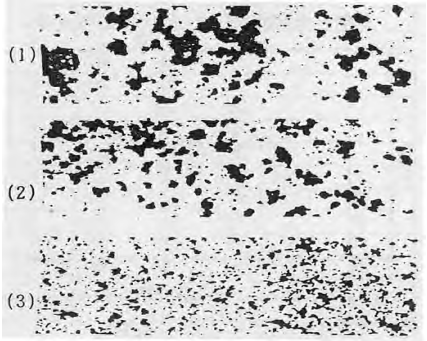
종류 평가	녹의 상태	녹의 표본
3	안정녹이 형성되고 있는 상태이며 가는 녹이 분산해 있다. 색은 흑갈색이다.	
2	녹이 안정화 방향으로 향하고 있는 상태. 가는 녹입자에 약간 큰 입자의 녹이 존재한다. 색은 흑갈색이다.	
1	불안정 녹층이 형성되어 가는 상태. 큰 입자의 녹에 약간 가는 녹입자가 존재한다. 색은 적갈색부터 약간 흑갈색에 가깝다.	
0	불안정 녹의 형성이 진행중인 상태. 녹입자는 조잡하여 박리되기 쉽고 붉은 녹이 많이 존재해 있다. (1) 큰 녹입자는 박리되기 쉬운 조잡한 것으로 색은 암갈색이다. (2) 큰 녹입자는 (1)과 같고 붉은 녹의 가는 입자가 많이 보인다. (3) 가는 녹은 박리되기 쉬운 붉은 녹으로 불안정 녹 형성의 초기 단계	

사진 1



위치	37경간	현황	셀로판테이프 평가
----	------	----	-----------

사진 2



위치	36경간	현황	안정녹 셀로판테이프 평가
----	------	----	---------------

사진 3



위치	37경간	현황	불안정녹 테이프 평가
----	------	----	-------------

표 6. 신양수대교의 예시(육안조사 및 셀로판 테이프 조사)

교량명 점검항목	위 치	녹의 조작성	녹의 색조	셀로판테이프에 의한 평가	종합평가	비 고
박스 거더 내부 육안평가	상부	2	2	1	불안정녹, 적갈색	36경관 G2
		1	1	1	불안정녹, 붉은녹	
		1	2	2	불안정녹, 적갈색	
	하부	1	1	1	불안정녹, 붉은녹	
		1	2	1	불안정녹, 적갈색	
		2	1	1	불안정녹, 적갈색	
	우측면	3	2	3	불안정녹, 적갈색	
		3	3	3	안정녹, 흑갈색	
		2	2	2	불안정녹, 적갈색	
	좌측면	3	2	2	안정녹, 흑갈색	
		3	3	2	안정녹, 흑갈색	
		2	2	2	불안정녹, 적갈색	
	상부	1	1	1	불안정녹, 붉은녹	37경관 G2
		2	2	2	불안정녹, 적갈색	
		2	1	2	불안정녹, 적갈색	
	하부	1	2	1	불안정녹, 적갈색	
		2	1	1	불안정녹, 적갈색	
		1	2	1	불안정녹, 적갈색	
	우측면	2	2	2	불안정녹, 적갈색	
		2	3	2	불안정녹, 적갈색	
		3	3	3	안정녹, 흑갈색	
	좌측면	2	2	2	불안정녹, 적갈색	
		2	3	3	안정녹, 적갈색	
		3	2	3	안정녹, 흑갈색	

4.1.3 전위에 의한 부식 조사

표면 전위 측정법은 부식 조사의 주요 자료로 제시할 수 있으나 부식 속도 평가에는 다소 미흡한 방법이다. 하지만, 철근의 부식 진단에는 필수적으로 사용되며, 무도장 교량의 표면 부동태 피막 형성 정도, 부위별, 표면 색깔, 변색 정도별 그리고 구조별(용접부, 볼트이음부) 표면의 전위 측정을 통해 부식 진행을 예측할 수 있다.

무도장 강재의 표면전위 측정방법은 그림 2와 같이 고저항 전위측정기의 (+)단자와 측정대상물을 전기적으로 연결한 상태에서 (-)단자에 연결한 비교전극으로 철 표면의 전위를 측정하며, 이때, 측정면의 표면은 녹가루 등의 오물을 제거하여야만 한다.

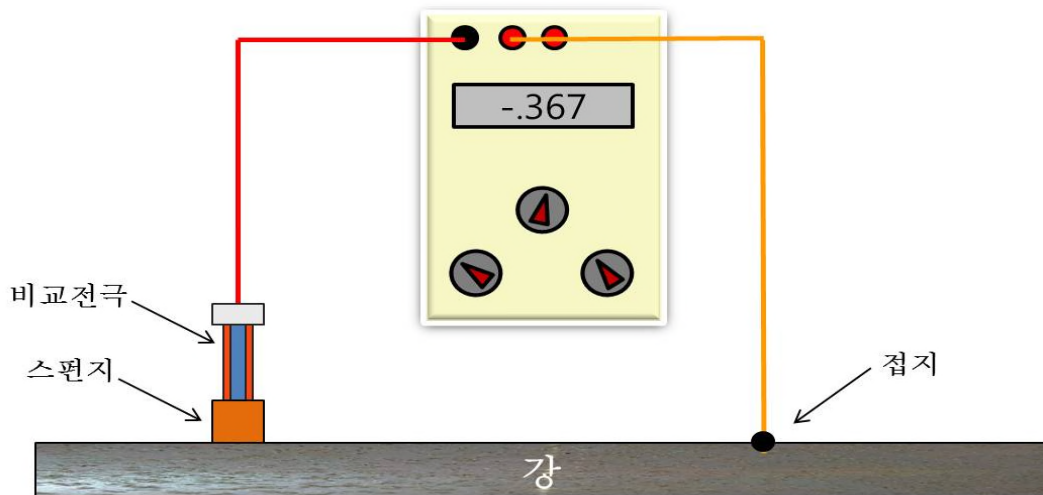


그림 2. 무도장 강재의 표면전위 측정방법

참고로 표면전위 측정법에 의한 부식의 진행을 ASTM C 876-91에서는(American Society for Testing and Materials) 표 7과 같이 해석하고 있고, 양수대교의 경우 표면전위 측정법과 3.1.1~3.1.2의 육안평가와 셀로판 테이프를 활용한 조사와 함께 표 9와 같이 부식의 진행을 조사한 바 있다.

표 7. 부식의 위험에 대한 계측결과 (표면전위 측정법)

전위차	부식 가능성
200 mV	low (10%)
200 mV ~ -350 mV	uncertain
350 mV	high (90%)

표 8에서 표면전위측정법에 따른 양수대교의 부식상태 분석은 앞서 언급한 육안검사와 셀로판 테이프 검사를 종합적으로 고려한 것으로 표면전위값에 대한 부식 평가기준을 표 9와 같이 정립하여 도출한 것이다.

표 8. 양수대교의 예시 (표면전위측정법)

교량	위치	전위(mV)	부식평가
36 경관	상부	-330	부식활성영역
		-285	안정녹
		-310	부식활성영역
	하부	-350	부식활성영역
		-358	부식활성영역
		-312	부식활성영역
	우측면	-261	안정녹
		-259	안정녹
		-310	부식활성영역
	좌측면	-285	안정녹
		-310	부식활성영역
		-285	안정녹
37 경관	상부	-335	부식활성영역
		-299	안정녹
		-325	부식활성영역
	하부	-355	부식활성영역
		-332	부식활성영역
		-285	안정녹
	우측면	-320	부식활성영역
		-265	안정녹
		-250	안정녹
	좌측면	-274	안정녹
		-242	안정녹
		-310	부식활성영역

표 9. 표면전위값에 대한 부식 평가 기준

전위차(mV)	부식평가
1000이상	안정녹층형성
100 ~ -300	안정녹층형성 진행 영역
300이하	부식 활성 영역(안정녹층 형성불가)

4.1.4 부식에 의한 강재의 판 두께 감소량 조사

실제 교량에 적용하는 강재의 판 두께 감소량 조사는 아직 확립되어 있지 않으나 편의적으로 다음과 같이 조사한다.

- 측정개소의 녹을 와이어 브러쉬를 이용해 제거한다.
- 전자 도막 두께 측정계를 사용하여 강재 표면에 잔존하는 녹의 층 두께를 가능한한 양면에서 측정한다.
- 마이크로미터 등을 이용해 잔존 녹층을 포함한 판두께를 측정하고, 판 두께로부터 녹층 두께를 제외하여 본래 강재 두께를 구한다(10 μ m 단위까지).
- 제작 시 강재두께 측정결과 및 설계도면을 활용해 원 두께 값으로 이용하고, 없으면 강재 두께의 KS 하한치를 이용하여 그 값으로부터 측정된 본래의 강재 두께를 빼고 2로 나누어 한 쪽 면당의 부식량을 추정한다.

안정화 녹층이 생성된 경우에도 판두께는 감소하므로 환경조건이 양호한 지역도 0.1~0.2mm 정도의 녹이 발생하게 되는 데, 기존 연구에 의하면, 강재판 두께 감소량이 한 쪽 면당 0.4mm 까지는 교량 수명에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보고된 바 있으므로 이 값을 허용 감소량의 기준으로 사용할 수 있다.

4.2 현장시료에 의한 조사

4.2.1 전자 현미경 시험 (Scanning Electron Microscope)

사진 4와 같이 녹 발생 부위를 위치별, 구조부재별로 녹을 채취하여, 그림 3에 도시된 전자현미경을 통해 분석을 하는 시험으로, 1.5mm이하의 고화질의 화상으로 사진 5~사진 6과 같은 자료를 제공함으로써 녹의 정밀한 형상관찰에 폭넓게 이용되고 있다.

사진 4		
		
박스거더 복부: 안정녹	박스거더 상부: 불안정녹	부위별 녹 채취 시료

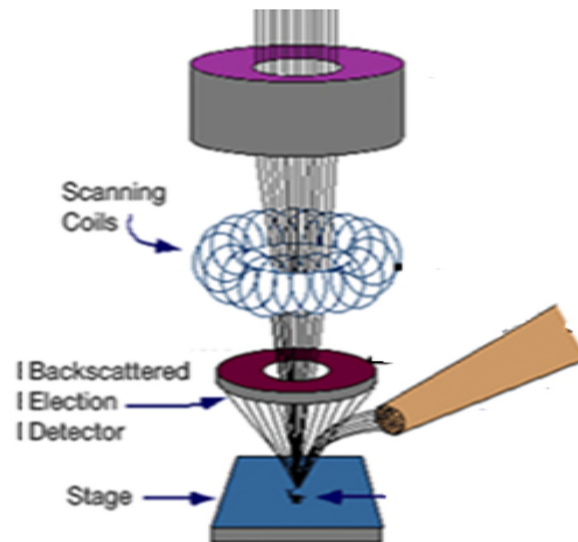


그림 3. SEM을 활용한 녹의 분석

사진 5

36경간 안정녹	37경간 안정녹

사진 6

36경간 불안정녹	37경간 불안정녹

4.2.2 X-Ray Diffraction(XRD) - X선 회절 분석법

X선을 녹의 결정에 부딪히게 하면 그 중 일부가 회절을 일으키며 그 회절각과 강도는 물질마다 고유한 값을 나타내게 되어, 시료를 구성하는 결정성 물질의 종류(동정)와 양(정량)에 관한 정보를 알 수 있다. 그림 4와 같이 X선 회절 분석기를 활용해 높은 정밀도의 동정 및 정량을 측정하기 위해서는 시료를 분

쇄하여 분말 시료를 만들어 사용하게 되는 데, 양수대교의 경우, 얻어진 녹 분말 시료를 진공 테시케이 터에서 96시간 정도 건조한 후, 백금 코팅하여 그림 5와 같이 안정녹층과 불안정녹층을 분석한 바 있 는 데, 그림과 같이 XRD 분석결과 나타나는 원소들의 차이가 없는 것은 약 10년 정도 대기 환경에 노출되어 안정녹 및 준안정녹 모두 동일한 원소를 포함하기 때문이다.

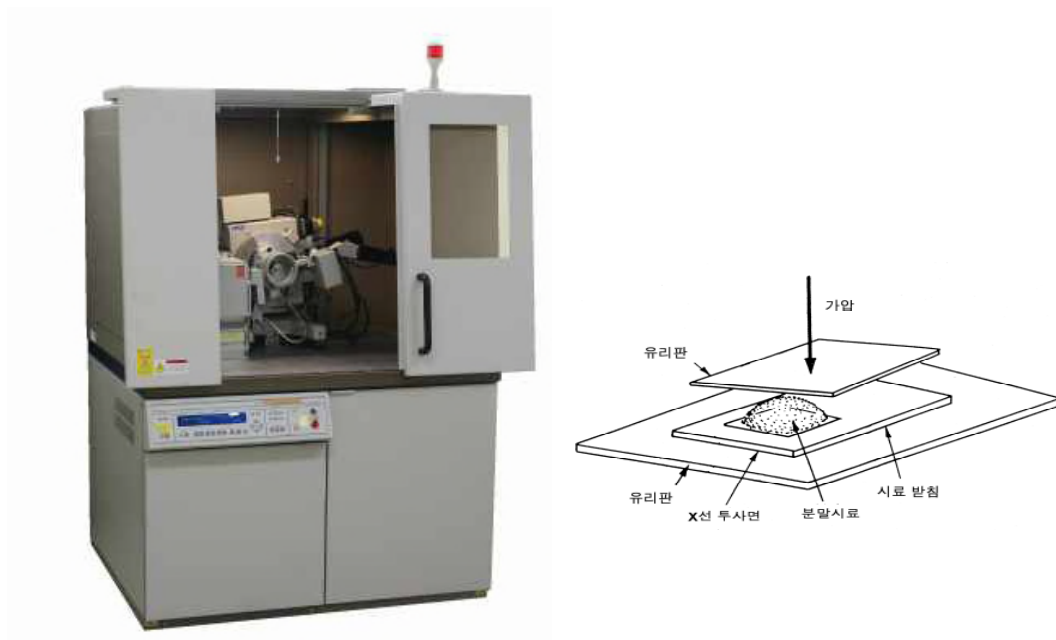


그림 4. X선 회절 분석기와 분말시료

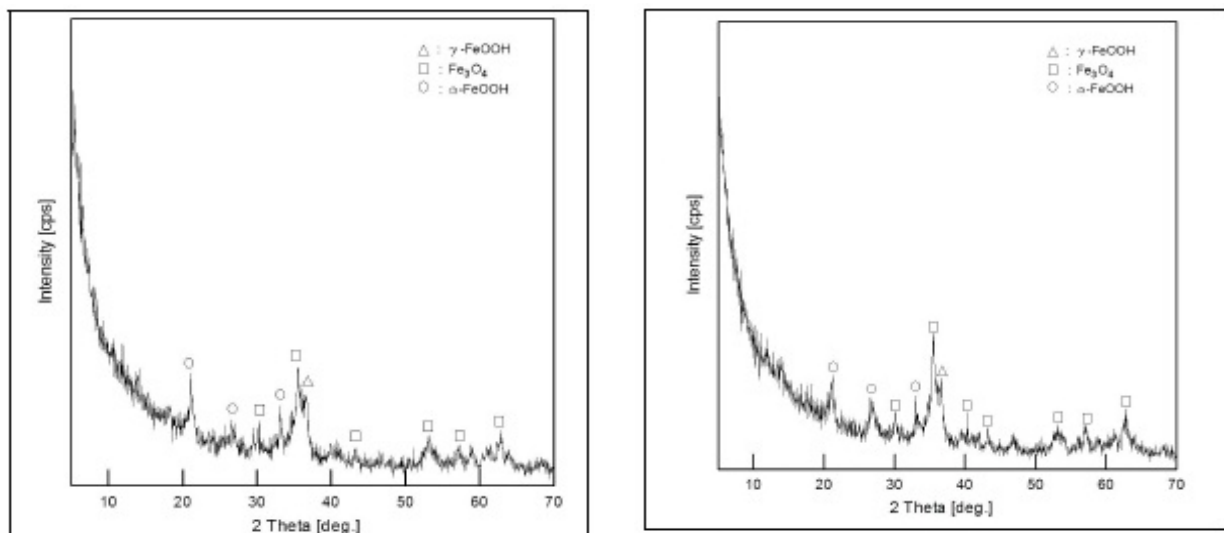


그림 5. XRD 시험 결과 예시(양수대교 왼쪽-준안정녹, 오른쪽-안정녹)

5. 재료적 특성

5.1 무도장 내후성강판의 특성

무도장 내후성 강재는 일반강에 내식성이 우수한 Cr, Cu, Ni, Si, P 등의 합금원소를 소량(0.1~1.0%) 함유한 저합금강으로 대기환경 하에서 일반강에 비해 4~8배의 내식성을 갖는 강재이다. 내후성강이 대기에 노출되면 초기에는 일반강과 유사하게 녹이 발생하지만 시간의 경과에 따라서 그 녹의 일부가 서서히 모재에 밀착하게 되어 안정녹층을 형성하고, 이 녹층이 외부 대기에 대한 보호막이 되어 도장과 같은 역할 하게 되어 더 이상의 부식 진행을 억제하게 된다. 내후성강의 녹층은 그림 6과 같이 내층 α -FeOOH와 외층 γ -FeOOH로 구성되는 2층구조로 구성되며 내층은 상온에서 Fe-H₂O계로 열역학적으로 안정한 녹을 형성한다.

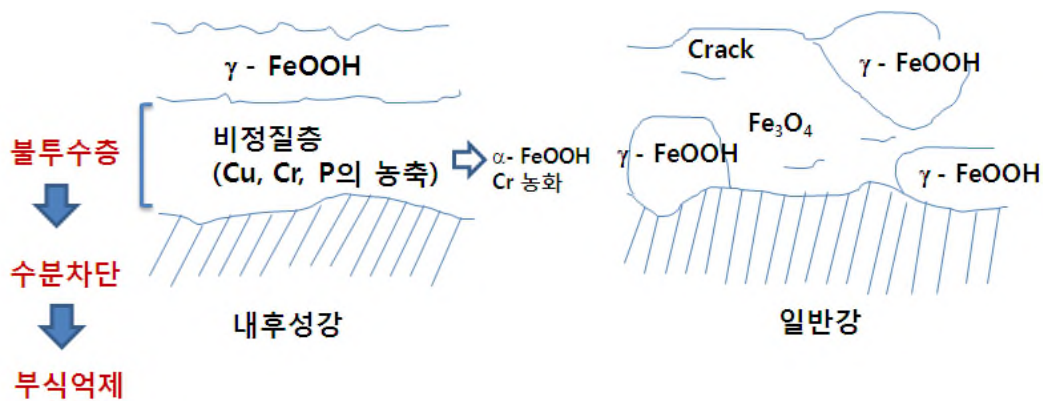
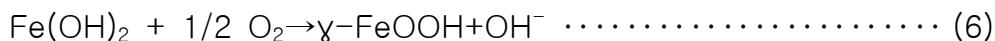
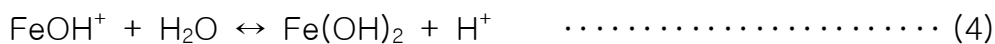


그림 6. 내후성강과 일반강의 녹단면도

내후성강의 녹 생성 반응은 철의 산화과정과 수분의 환원으로 수산화이온을 형성하는 다음의 식으로 표현된다.



이후, 철이온은 아래와 같이 수산화이온과 결합하여 수산화철을 형성하고, 녹생성 반응에 따라 강표면에는 γ -FeOOH의 녹층이 생성된다.



또한, γ -FeOOH의 용해반응과 재 석출에 따라 내층에는 무정형 옥시 수산화철을 주체로 녹층이 생성되고, 장시간에 걸쳐 무정형 옥시수산화철은 열역학적으로 안정한 α -FeOOH로 변화해 구성입자가 세밀해지고 수분을 차단함으로써 녹의 진행을 지연시킨다.

안정 녹을 형성시키는 합금성분의 효과는 내후성강 개발과정에서 이뤄진 많은 연구로 표 10과 같이 알려져 있다.

표 10. 내후성강의 합금성분 효과

원 소	효 과
C	미소량 첨가 시 내후성에 거의 영향 없음 (다량 첨가시 재질의 열화 우려 있음)
Si	Cu와 함께 내후성 개선에 효과
Mn	내후성 효과 미미
P	합금원소 중 내후성 효과가 가장 큰 재질이나 용접성을 고려 통상 0.15%이하로 첨가되며, 일반적으로 Cu와 함께 사용
S	유해원소로 0.04% 이하의 미소량이 사용됨
Cu	내후성강의 기본 원소로 반드시 첨가되며 0.2~0.4% 범위로 사용되며 통상 다른 원소와 조합되어 사용됨
Cr	다량 첨가시 강의 내후성 향상됨 보통 0.4~1% (최고 1.3%) 첨가되며 이 범위 내에서는 Cu와 병용해야 효과적임
Ni, Mo	다량 첨가시 내후성 향상
Al	효과 거의 없음

이런 내후성 강재는 표 11과 같이 1977년에 KS D 3529 규격으로 최초로 제정된 후, 1980년에 도장용 내후성강과 무도장 내후성강을 구분하는 내용으로 개정되었으며, 현재, 사용 규격인 KS D 3529 (2013)에 이르렀고, 그 화학 성분과 기계적 성질은 각각 표 12, 표 13과 같다.

표 11. 용접 구조용 내후성 열간 압연 강재의 변천

연도	강재종류	변경내용
1977	SMA 41A, 41B, 41C SMA 50A, 50B, 50C SMA 58	1977년 KS D 3529 제정
1980	SMA 41AW, 41BW, 41CW SMA 41AP, 41BP, 41CP SMA 50AW, 50BW, 50CW SMA 50AP, 50BP SMA 58W, 58P	도장용 내후성강(P)과 무도장 내후성강(W)로 구분
1984	SMA 41AW, 41BW, 41CW SMA 41AP, 41BP, 41CP SMA 50AW, 50BW, 50CW SMA 50AP, 50BP, 50CP SMA 58W, 58P	KS D 3515
2002	SMA 400AW, 400BW, 400CW SMA 400AP, 400BP, 400CP SMA 490AW, 490BW, 490CW SMA 490AP, 490BP, 490CP SMA 570AW, 570BW, 570CW SMA 570AP, 570BP, 570CP	SI 단위계로 변환
2013	SMA 400AW, 400BW, 400CW SMA 400AP, 400BP, 400CP SMA 490AW, 490BW, 490CW SMA 490AP, 490BP, 490CP SMA 570W SMA 570P	ISO 5952 부합화 인용규격 추가 및 삭제 - KS B 0817/0831 추가, 0804 삭제 규격서식 KS A 0001에 부합

표 12. 용접 구조용 내후성 열간 압연 강재의 화학 성분

종류와 기호		화학성분								
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	기타
SMA400 A, B, C	W	0.18 이하	0.15~ 0.65	1.25 이하	0.035 이하	0.035 이하	0.30 ~ 0.50	0.45 ~ 0.75	0.05 ~ 0.30	- 각 종류 모두 내후성 에 유효한 원소인 Mo, Nb, Ti, V, Zr 등을 첨가하여도 좋 다. - 다만, 이들 원소의 총계는 0.15%를 넘 지 않는 것으로 한 다
	P	0.18 이하	0.55 이하	1.25 이하	0.035 이하	0.035 이하	0.20 ~ 0.35	0.30 ~ 0.55	-	
SMA490 A, B, C	W	0.18 이하	0.15~ 0.65	1.40 이하	0.035 이하	0.035 이하	0.30 ~ 0.50	0.45 ~ 0.75	0.05~ 0.30	
	P	0.18 이하	0.55 이하	1.40 이하	0.035 이하	0.035 이하	0.20 ~ 0.35	0.30~ 0.55	-	
SMA570 A, B, C	W	0.18 이하	0.15~ 0.65	1.40 이하	0.035 이하	0.035 이하	0.30 ~ 0.50	0.45 ~ 0.75	0.05~ 0.30	
	P	0.18 이하	0.55 이하	1.40 이하	0.035 이하	0.035 이하	0.20 ~ 0.35	0.30 ~ 0.55		
비고 필요에 따라 위 표에 언급한 것 이외의 합금 원소를 첨가할 수 있다.										

표 13. 용접 구조용 내후성 열간 압연 강재의 기계적 성질

종류	항복강도 N/mm2						인장 강도 N/mm2	연신율		
	16이하	16초과 40이하	40초과 75이하	75초과 100이하	100초과 160이하	160초과 200이하		두께	시험편	%
SMA 400 A, B, C	245 이상	235 이상	215 이상	215 이상	205이상	195이상	400~540	5 이하	5호	220이 상
								16 이하	1A호	170이 상
								16 초과	1A호	210이 상
								40 초과	4호	230이 상
SMA 490 A, B, C	365 이상	355 이상	335 이상	325 이상	-	-	490~610	5 이하	5호	190이 상
								16 이하	1A호	150이 상
								16 초과	1A호	190이 상
								40 초과	4호	210이 상
SMA 570 A, B, C	460 이상	450 이상	430 이상	420 이상	-	-	520~720	16 이하	5호	190이 상
								16 초과	5호	260이 상
								20 초과	4호	200이 상
비고 필요에 따라 위 표에 언급한 것 이외에 합금원소를 첨가 할 수 있다.										

5.2 수용성 방식제 특성

철의 녹 발생과, 진행이 철표면의 국부전지반응에 기인한다고 판단할 때 이를 멈추기 위해 이론적으로 음극반응을 정지시키거나, 금속 표면을 고저항체 피막으로 전기화학적 회로의 구성을 방해하는 방식으로 부식을 억제 한다. 이때 표면을 고저항체 피막을 통하여 부식을 억제하는 방식 중 그 분류에 따라 구분되는 수용성 부식억제제를 말한다.

본 지침서는 ‘도장이 없는 내후성강교량 박스거더 내부 최적방식기술 및 유지관리지침(안) 개발’ 연구를 통하여 개발된 수용성 방식제를 기준으로 하며 개발된 수용성 방식제의 조성은 표 14와 같다.

표 14. 개발된 수용성 방식제의 조성

에폭시 코팅제	증 류 수	1-methoxy-2- propanol	분 산 제	소 포 제	증 점 제	칼슘 인산염계 방청제	탄산 칼슘	발 수 제	접 착 개 선 제
65%	9%	5%	0.75%	0.75%	1.5%	5%	10%	2%	1%

본 수용성 방식제는, 유해성 평가 결과 친환경의 수용성 부식억제제로 인체에 무해한 특징을 갖는다. 참고로 수용성 방식제에 대한 유해성 평가 기준은 표 15의 한국환경산업기술원 친환경 인증기준(EL 610)이며 시험결과 개발된 수용성 방식제는 이와같은 유해성분이 불검출되었다.

표 15. 유해원소 기준

항목	납 (Pb)	비소 (As)	카드뮴 (Cd)	수은 (Hg)	크롬 (Cr)	구리 (Cu)	니켈 (Ni)	아연 (Zn)
기준 (mg/kg)	50이하	2.50이하	0.050이하	0.050이하	150이하	200이하	2.50이하	500이하

또한, 내후성 강교량의 부식을 촉진할 수 있는 NaCl에 대한 영향을 평가하는 방법으로 실시한 5 %, 10 % 의 NaCl 침지 시험 결과를 통하여 그 성능이 검증되었다. 특히, 여름철 부식이 촉진될 수 있음을 고려하여 35 ℃, 95 % R.H.의 항온 항습 조건에서 시험한 결과에서도 강재의 부식이 지연됨을 확인하였다.

5.3 기화성 방청제 특성

기화성방청제VCI(Volatile Corrosion Inhibitor)란, 가정에서 방청제로 널리 사용되는 나프탈렌과 같이 상온에서 기화하여 금속표면에 얇은 피막을 형성하여 녹을 방지하는 방청제이다. VCI는 제2차 대전 중에 연구가 시작되어 그 뛰어난 효과를 발견한 미군이 제일 먼저 로켓트와 유압기기 및 병기 등의 군용금속제품에 사용하기 시작하였으며, 이러한 응용 제품으로 VCI(기화성방청제)를 종이에 도포한 기화성방청지, 유제를 이용한 기화성방청유 등이 있다. 이러한 기화성 부식억제제는 방청유와 도금에 의한 방청, 실리카겔에 의한 습기제거 등에 대체할 수 있는 제3의 방식 제품으로 일반적인 특징은 표 16과 같다.

표 16. 기화성 부식억제제의 일반적인 특징

제 품	특 징
기화성 부식억제제	1. 철·주철 외에 동·아연 등의 비철에 유효. 2. 즉시 효과를 발휘하며 장기간 방청. 3. 취급이 간단(포장 내에 간단히 집어넣음). 4. 기화된 가스는 손에 닿지 않는 세밀한 부분까지 도달, 방청효력유지. 5. 반복사용이 가능. 6. 구리스·기름 등에 의한 방청과 비교하여 외관이 깨끗함. 7. 공정개선에 의한 원가절감. 8. 프레온(Freon) 등의 탈지용제가 불필요 하며 프레온 규제에 대응.

개발된 기화성 부식억제제는 상시 표 16의 특징을 갖고 있고, 아질산염 나트륨(sodium nitrite, SN), 유기계 첨가제(영업비밀)과 유기산염계 방청제로 구성되며 그 조성은 표 17과 같다.

표 17. 개발된 기화성 부식억제제의 조성

SN (함량%)	유기계 첨가제 (함량%)	유기산염계 방청제(함량%)
30	10	60

5.4 희생양극 실링재의 특성

내후성강은 내후성강과 비교해 전위가 높은 금속(동, 동합금, 스테인레스, 크롬도금 등)과 접촉시 이온화되어 녹이 발생하게 되며, 이러한 반응은 점차적으로 진행되어 의도되었던 안정녹의 형성을 방해하게 된다. 이에 ‘도장이 없는 내후성강교량 박스거더 내부 최적방식 기술 및 유지관리지침(안)개발’ 연구에서는 아연도금볼트와 피스의 접합을 고려해 발생할 수 있는 안정녹 형성방해에 대처하기 위해, 접합부에 적용되는 기존 실링재에 희생양극성능을 첨가하기 위해 Zinc powder를 첨가한 희생양극 실링재를 개발하였다. 희생양극성능을 위해 첨가된 Zinc powder는 HALOX사의 SZP-391로 도장재의 하도로 주로 사용되며,

표 18과 같은 물리적 특성을 갖는다. 개발된 희생양극 실링재는 50 microns의 실링재 두께 기준으로 SZP-391 5%의 양이 적용되었고, 표 19에서 보듯 일반 실링재의 성능평가 항목 모두를 만족시키는 것으로 확인되었다.

표 18. SZP-391의 물리적 특성

용융점(℃)	습도(%)	용융성	밀도	산도(pH)	평균입자크기(μm)
1540	1.1	0.02%	3.3	6.5-9.5	< 5

표 19. 개발된 희생양극 실링재의 성능

시험명	요구 성능	희생양극 실링재 성능
슬럼프(가로, 세로)	3 이하	거의 없음
탄성 복원성	70 이상	약 93
인장특성-줄눈 나비의 신장률	200 (M ₁₀₀)	200 (M ₁₀₀)
인장특성-인장능력 N/mm ² 23℃	0.4 초과	약 0.7
인장특성-인장능력 N/mm ² -20℃	0.6 초과	약 0.9
일정 신장 하에서 접착성	파괴되면 않됨	파괴되지 않음
압축 가열, 인장 냉각 후의 접착성	파괴되면 않됨	파괴되지 않음
수중 침적 후의 일정 신장 하에서 접착성	파괴되면 않됨	파괴되지 않음
부피 손실 %	10 이하	약 4

6. 유지관리 및 보수

6.1 일반사항

주요 구조부재 전체에서 층상박리녹이 발견되는 경우는 환경여건이 무도장 내후성강 교량에 적합하지 않는 것으로 교량 전체를 무도장 사용에서 도장 사용으로 변경하는 방향을 조속히 검토토록 한다.

주요 구조부재 일부분에서 층상박리녹이 발견될 시, 누수 등의 부식원인이 다른 구조적 손상을 일으킬 수 있기 때문에, 층상박리녹이 발생한 부근에 이와 같은 손상이 없는지를 확인해야 하며, 다른 구조적 손상이 발견되는 경우 이를 즉시 복구할 수 있도록 조치하여야 한다. 구조적 손상이 완전히 복원한 후에는 염분을 제거하기 위해 청소를 하는 것이 바람직하다.

주요 구조부재 전체에서 거친 녹이 발견되는 경우에는 특별히 대응할 필요는 없으며, 손상의 일종으로 취급하지 않는다. 이는 환경조건에 의한 것으로 후속 점검을 통해 지속적인 관리되어야 할 부분이다.

6.2 유지관리

무도장 내후성강 교량의 원활한 녹 안정화에 방해가 되는 사항에 대해서는 다음과 같이 조치한다.

- 누수 및 체수 부위는 보수한다.
- 퇴적된 토사는 청소, 제거한다.
- 박리되어 퇴적된 흑피는 청소, 제거한다.
- 제설제 염분으로 오염되어 녹 안정화가 원활하지 않을 것으로 우려되는 강재 표면은 고압 호수로 씻어 낸다.
- 배수구 및 배수 홈통을 청소하여 체수 상황을 지양하고 배수 성능을 향상시킨다.
- 볼트 이음부 및 불연속 용접 이음부에서 틈새 부식이 발견되는 경우 틈새를 실링재 등을 사용하여 밀봉한다.

6.3 보수방법

점검에 의해 확인된 문제의 정도에 따라 표 20과 같이 보수를 하도록 조치한다.

표 20. 점검결과에 따른 보수 방법

점검 결과	내 용	보수 방법
전면 보수	- 점검 부위 대부분에서 안정녹의 형성이 되어있지 않고 총상박리 녹이 발생되어 있는 경우 - 주변환경의 영향이 매우 우려되는 경우 (예: 염분 습지, 인접지역 황산화물 산업지역 위치 등) - 부식속도에 따른 교량의 안정성이 위험한 경우 (예: 강재 판손실이 단면기준 0.4mm에 육박할 때)	표면처리를 실시한 후, 수용성 방식제를 사용해 주요 구조부재 전체를 100 μm 두께로 코팅하고 기화성 방식제도 거치시킨다. 또한, 접합부와 누수가 우려되는 부위에 대해서는 희생양극실링재로 밀봉한다.
부분 보수	다음의 경우에 해당되며 점검 부위 대부분에서 안정녹의 형성이 되어있지 않고 총상박리녹이 발생되어 있는 경우 - 부식이 쉬운 환경에 노출되어 있는 강교의 시·종점이나 신축이음부 주변 - 심각한 국부 부식의 징후가 있는 부위 - 수분 및 퇴적물이 빗물이나 바람에 의해 자연적으로 제거되지 않는 부위	부식표면에 대해서는 표면처리 후, 수용성 방식제로 50 μm 두께로 코팅하되, 해당 부위가 접합부인 경우, 기계적 시공보다는 붓을 사용하여 시공하며 희생양극실링재로 밀봉한다(주로, 외기에 노출된 부분으로 기화성 방식제 효과가 없으므로 이의 사용을 금지).
양호	- 점검 부위 대부분에 안정/준안정 녹이 형성되었고, 특이할 만한 점이 없는 경우	녹 안정화과정을 위해 이물질 제거를 위한 청소 활동 및 동절기 후에 제설제 함유된 염분 제거를 위한 고압 살수 청소

전면 보수와 부분 보수를 실시한 부위는 향후에도 문제발생소지가 큰 위치이므로, 지속적인 점검이 필요하며, 최초 보수 후 5년 이내 표 21과 같이 관리를 하여야 한다.

표 21. 보수 부위의 향후 관리

종 류		원 인	내 용
전면 보수		- 주요 구조부재의 교체 - 전체 손상면적이 50% 이상일 경우 - 기타 표 17의 전면 보수에 해당하는 경우	수용성/기화성 방식제와 희생양극실링재로 전면 보수한다.
수용성 방식제 부분 코팅	전면 재코팅	- 개소 손상면적이 50% 이상일 경우 - 여러 부재에 걸쳐 손상이 발생한 경우 - 기타 표 17의 부분 보수에 해당하는 경우	한 개소를 전면으로 재코팅한다. 예) 하부 플랜지 한면
	국부 재코팅	- 방식재 코팅면의 국부 균열 - 방식재 코팅면의 일부 박리 - 코팅의 두께가 50μm 이하인 경우 - 기타 국소 부위 안정녹 형성이 어려운 경우	부분적으로 심하게 손상된 부위만 재코팅한다.

6.4 세부 시공

앞서 설명된 보수방법은 아래에서 설명되는 세부 시공으로 이뤄지며, 표면처리는 수용성 방식제를 통한 코팅막의 내구성에 영향을 주는 가장 중요한 시공이다. 곧, 내후성 강재의 표면조도(surface roughness)는 대체적으로 100~200 μ m로 내후성 강재가 안정녹을 형성치 못하고 부식되었을 경우, 그 표면에는 125~375 μ m 정도의 깊이를 갖는 다수의 구멍이 존재하게 되고, 이들 구멍에는 염분을 함유한 다양한 화학적인 오염원이 들어있게 된다. 이렇듯 심각하게 부식된 경우, 그 표면조도와 수많은 구멍으로 인해 표면에 발생된 모든 녹과 기타 오염원을 제거하는 것은 어려우며, 일반적으로 보수보강의 블라스팅에 통용되는 SSPC-SP6가 수용성 방식제 코팅의 바탕면 표면처리의 기준으로 설정되었다.

6.4.1 표면처리

표면처리 시공에는 크게 기계적 표면처리와 화학적 표면처리로 나눌 수 있고, 기계적 표면처리는 다시 블라스팅, 그라인더 등을 활용한 동력공구 표면처리와 무동력 수공구를 활용한 표면처리법으로 분류할 수 있다. 화학적 표면처리는 주로 인체와 환경에 유해한 염화탄화수소를 활용하는 바탕면 표면처리 방법으로 여기서는 고려되지 않았으며, 각각의 기계적 표면처리법은 표 22-표 24에 나타난 바와 같다.

표 22. 블라스팅 표면처리법 (기계적 표면처리)

내용	기름, 먼지, 녹 등 이물질들을 완전히 제거하고 적당한 조도를 만들어 주는 표면 처리법
처리방법	- 깨끗하고 건조한 압축 공기를 브라스트에 사용한다. 습기나 기름을 제거하는 장치를 브라스트 장비에 반드시 포함한다. - 압축된 공기, 브라스트 노즐, 연마재를 포함한 브라스트 장비로 작업하며 작업 후에는 먼지와 연마재를 잘 제거한다. - 젖은 연마재를 사용하는 표면처리 방법을 사용할 수도 있으나, 표면처리 후에는 물기를 완전히 제거한다. - 브라스트 처리후 4시간 이내에 코팅 한다.

표 23. 동력공구 표면처리법 (기계적 표면처리)

내용	용제 세척 후 동력공구를 이용하여 기존도막 및 오염물질을 제거하는 표면처리법
처리방법	- 동력공구를 사용하여 녹 및 기존도막을 제거한다. - 들뜬 흑피, 녹, 코팅을 제거할 때는 회전하거나 충격을 가하는 동력공구를 사용하며 과도한 표면처리는 피한다. - 손상부위 및 주변 도막까지 제거한다.

표 24. 수공구 표면처리법 (기계적 표면처리법)

내용	무동력 수공구를 사용하여 강구조물의 이물질들을 처리하는 방법으로 들떠 있는 흑피, 녹, 도료 및 다른 유해물질 등을 제거한다. 이때 흑피, 녹, 도료가 무딘 연마재용 칼로 긁어서 제거되지 않으면 고정된 것으로 보고 제거하지 않는 표면처리법.
처리방법	- 녹이나 용접 슬래그를 제거할 때는 충격을 가하는 수공구를 사용한다. - 들뜬 흑피, 녹, 도료를 제거 할때는 와이어, 연삭기, 스크레이퍼 나 다른 충격을 가하지 않는 수공구를 사용한다. - 손상부위 및 주변 도막까지 제거한다.

SSPC-SP6의 블라스팅 기준은 그림 7과 같으며, 관리자는 바탕면에 대한 확인을 철저하게 관리 감독하여야 하며, 작업 후, 청소상태 또한 확인토록 한다.

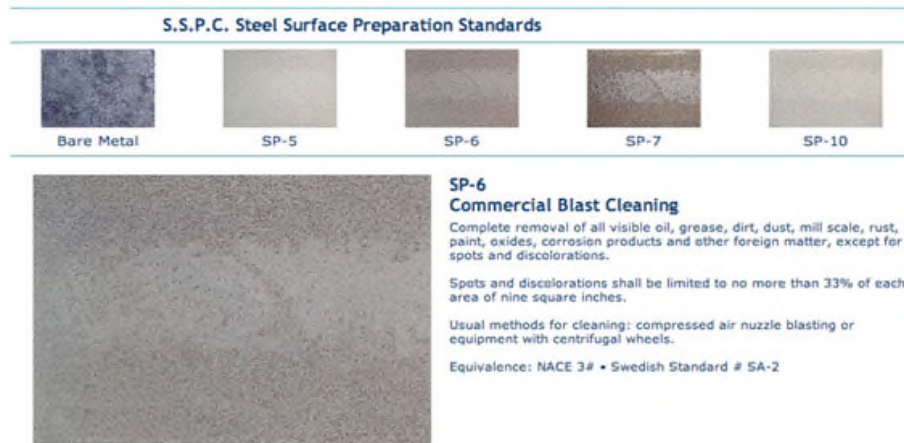


그림 7. SSPC-SP6의 표면처리

6.4.2 수용성 방식제 적용

이상 바탕면이 처리된 무도장 내후성 강재표면은 수용성 부식억제재를 도포하여 코팅한다. 보수유형에 따라 전면 코팅은 에어브러쉬와 같은 동력공구를 사용하여 코팅면을 균일하게 도포하며, 국부 코팅 및 접합부 등의 취약부위는 붓이나 롤러를 사용할 수 있고 다음과 같이 코팅한다.

- 강재의 표면을 표면처리 후 직접 코팅할 때에는 수용성 방식재를 100 μ m 두께로 도포한다.
- 국부 손상 등의 이유로 코팅면을 보강할 때에는 수용성 방식재를 50 μ m 두께로 도포한다.
- 시공 시, 재료의 손실률을 감안해 소요량의 약 2배의 수용성 방식제를 도포하며, 시공 능력에 따라 100 μ m 두께의 경우, 2회에 걸쳐 도포할 수 있고 이때에는 1회 도장면의 건조를 확인한 후 시공하여야 한다(1시간 30분 후, 시공 권장).
- 밀폐된 환경의 경우 환기설비 설치를 통해 작업할 수 있어야 하고, 반드시 호흡기 보호장구를 착용토록 한다.
- 시공 시 주위 온도는 10 $^{\circ}$ C 이상, 상대습도 85% 이하가 적합하며, 코팅이 한 곳에 집중되거나 적게 되지 않도록 균일하게 시공한다.
- 시공성을 고려, 재료가 충분히 혼합될 수 있게 교반기를 사용해 4~5분간 교반한 후 사용하며, 필요시, 물로 희석하되 주재료의 1/4 이하로 그 사용을 제한한다.
- 교반 후 3시간 이내에 코팅을 하도록 한다.

6.4.3 기타사항

기화성 방식제와 희생양극실링재는 표 20-표 21에 제시된 보수 방법에 따라 시공하며, 특히, 희생양극실링재를 시공할 경우, 다음에 유의한다.

볼트이음부 및 용접접합부에 희생양극실링재 시공시 다음에 유의한다.

- 시공시 외기 온도가 영하로 내려가면 시공을 중단하고 영상 5 $^{\circ}$ C 이상에서 작업하는 것을 원칙으로 한다.
- 실링 작업 후에는 주의 표지판을 부착하여 미경화 상태의 실링재를 보호한다.

- 피착면 외에 실링재가 묻는 것을 방지하며, 가장자리의 선을 깨끗이 나타내기 위해 마스킹 테이프를 사용한다.

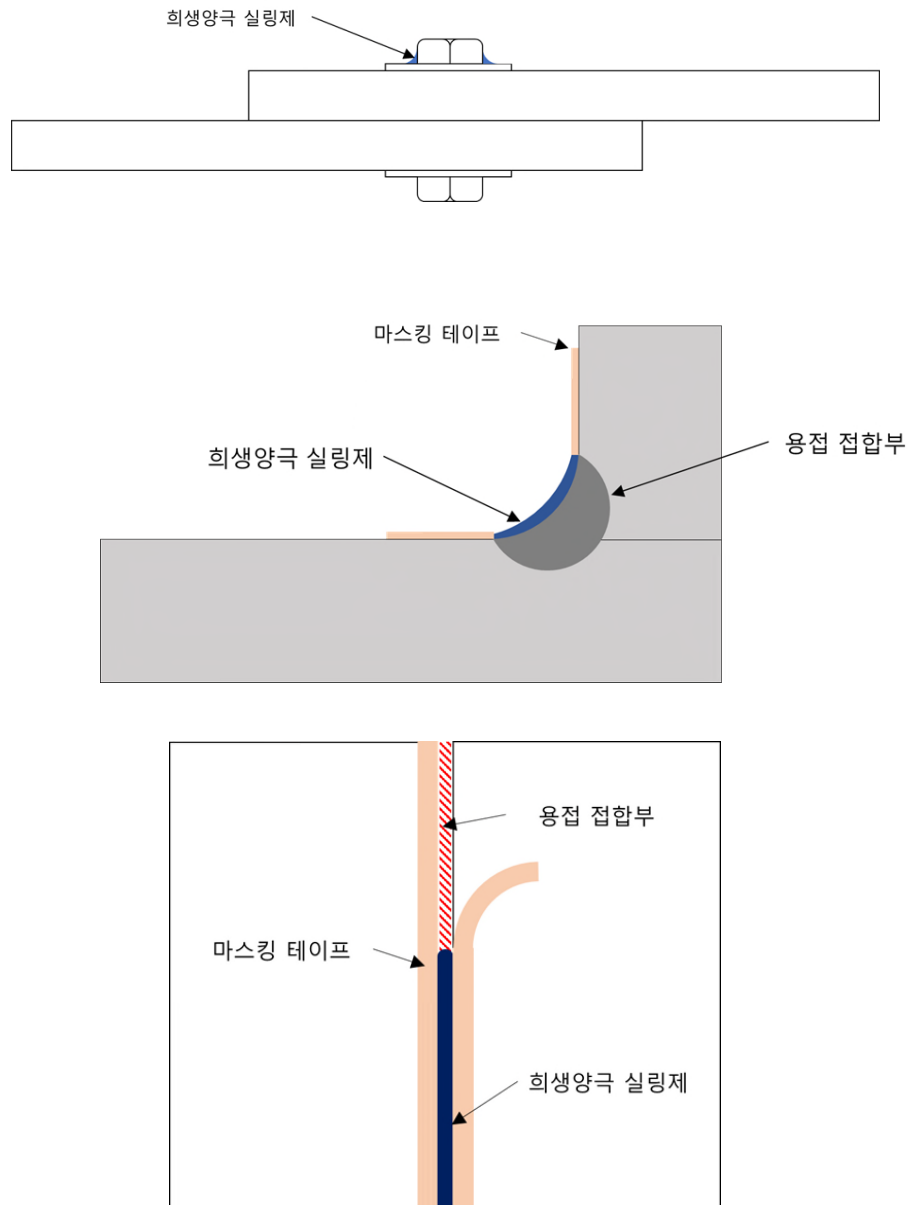


그림 8. 희생양극실링재 시공방법

7. 국내외 유지관리 현황

이 장에서는 무도장 내후성강 교량의 미국과 일본의 유지관리 현황과 국내 일반 강재를 사용한 교량의 내부도장 종류별 상세 사양 제시를 통해, “국내 무도장 내후성강 교량의 방식 기준 및 유지관리 지침 개발을 통한 국내 환경 대응형 방식기술 개발” 연구과제를 통해 도출한 수용성 방식제, 기화성 방식제 및 희생양극 실링재가 적용된 본 지침서 이외의 무도장 내후성강 교량 부식과 관련된 보수방법에 대해 살펴보았다.

7.1 미국의 무도장 내후성강교량 유지관리

무도장 내후성강교량의 적용과 관련해, 미국은 연방도로국(FHWA-Federal Highway Administration)의 Technical Advisory 5140.22 (Uncoated Weathering Steel in Structures, 1989), NCHRP(National Cooperative Highway Research Program)의 Guidelines for the Use of Weathering Steel in Bridges(NCHRP report 314, 1989), AISI(American Iron and Steel Institute)의 연구보고서 2편(Performance of Weathering Steel Bridges-A First Phase Report, 1982; Performance of Weathering Steel in Highway Bridges-A Third Phase Report, 1995) 및 SSPC(Steel Structures Painting Council)의 Maintenance Coating of Weathering Steel (Field Evaluation and Guidelines, 1995)를 살펴보면 내후성강은 유지관리가 필요없는 재료가 아니며, 다음과 같이 주기적인 유지관리가 필요함을 명시하고 있다.

- (1) 불순물을 압축공기 분사 또는 진공청소기 등으로 제거
- (2) 젖은 불순물 및 특히 염분으로 오염된 강재 표면은 고압수로 씻어냄
- (3) 우천시 누수부를 찾아내거나 바닥판에 물을 뿌려 조인트 부의 누수부를 찾거나 배수부 위의 누수를 찾아냄
- (4) 배수시스템, 드립플레이트 등을 설치하여 상부구조 및 교대로부터 흘러내리는 물의 방향을 유도
- (5) 배수구 및 배수홈통을 청소
- (6) 볼트 간격이 넓거나 불연속 용접부는 에폭시 주입 또는 밀봉 용접으로 틈새를 막음
- (7) 심하게 부식된 부위는 보수도장을 실시함

상기에 명시된 방법 중에서 전체적 혹은 국부적으로 녹의 안정화가 되지 않는 부식 발생에 대해서 실시하는 보수 도장(remedial painting)은 내후성 강재의 표면처리 정도를 near-white blast cleaning (SSPC-SP10)으로 규정하여 모든 녹의 잔유물을 제거하는 것을 원칙으로 하되, 현실적인 면을 고려해 녹의 잔유물이 보이지 않는 정도의 처리를 수행하도록 권장하고 있으며, 에폭시 징크리치 프라이머(epoxy zinc-rich primer), 에폭시 폴리아마이드 중도(epoxy polyamide intermediate coat), 우레탄 혹은 비닐 상도(urethane or vinyl topcoat) 등의 중방식 도장을 규정하고 있다. 또한, 연속된 각 부재,

불연속적인 용접부재, 신축이음부의 연결판과 복부판 사이에 주로 형성되는 틈새 부식에 대비해 다음의 방법을 통한 보수방법을 고려하고 있다.

- ① 부재의 해체 → 블라스팅 → 접촉면 도장 → 부재의 재결합
- ② 틈새 및 모서리에 메폭시 주입
- ③ 모서리를 용접으로 봉인

7.2 일본의 무도장 내후성강교량 유지관리

건설성토목연구소와 강재구락부 및 일본교량건설협회의 공동연구인 耐候性鋼材の橋への適用に関する共同研究報告書(1993) 및 耐候性鋼橋の適用環境評価手法の高度化に関する研究(2014)에서는 무도장 내후성강 교량에도 점검 및 유지관리가 필요함을 명시하고 있으며, 그 점검빈도를 원칙적으로 일반 강교량과 같게 하되 무도장 내후성강 교량의 제 1회째 점검은 준공 후 2~3년 내에 하도록 권장하고 있다.

무도장 교량의 부식점검은 1) 층상 박리녹의 유무 2) 강재 표면의 체수 유무 3) 강재표면 부착물 및 퇴적물의 유무와 4) 배수장치의 누수 유무 등에 대한 육안점검을 녹 발생이 쉬운 1) 플레이트 거더교의 플랜지 상하면 2) 거더 단부 및 지점부 3) 부재의 교차부 및 연결부 4) 배수장치 등을 중점적으로 점검하도록 하며, 손상개소에 대해서는 블라스트 표면 처리가 가능한 경우 SP 6의 표면처리를 (일반 블라스트 세정) 곤란한 경우는 SP 5의 표면 처리 후에 중방식 도장을 실시하도록 되어 있다 (1층에는 도막이 두꺼운 에폭시 수지 징크 리치 페인트, 2층 이후에는 변성에폭시 또는 탈 에폭시 수지계 도료를 사용한 특수환경도료를 사용).

7.3 국내 일반강 교량 내부도장 사양

국내의 일반 강교량의 내부도장 형식별 구체적인 사양은 <표 25>와 같이 정리될 수 있다.

표 25. 일반강 교량 내부도장 종류별 상세 사양

구분	공종	규격	표면 처리	제1층	제2층	제3층	두께(μm)
수용성 징크 실리게이트	내부(공장)	공정	SSPC SSPC10	무기질 아연도료	미스트 코트	수용성 실리게이트	
		두께		75		100	175
	내부 볼트 및 연결판(현장)	공정	SSPC SPC3	에폭시계 도료	수용성 실리게이트		
		두께		75	100		175

에폭시계	내부(공장)	공정	SSPC SPC10	무기질 아연도료	미스트 코트	후막형 에폭시계도료	
		두께		75		100	175
	내부 볼트 및 연결판(현장)	공정	SSPC SPC3	에폭시계 도료	후막형 에폭시계도료		
		두께		75	100		175
세라믹계	내부(공장)	공정	SSPC SPC10	무기질 아연도료	미스트 코트	세라믹계	
		두께		29		180	200
	내부 볼트 및 연결판(현장)	공정	SSPC SPC3	세라믹	세라믹	세라믹 우레탄	
		두께		60	60	60	180
역청질계	내부(공장)	공정	SSPC SPC10	무기질 아연도료	미스트 코트	역청질계 도료	
		두께		75		75	150
	내부 볼트 및 연결판(현장)	공정	SSPC SPC3	염화고무 M10 도료	역청질계 도료		
		두께		75	75		150
우레탄계	내부(공장)	공정	SSPC SPC10	무기질 아연도료	미스트 코트	우레탄	
		두께		75		100	175
	내부 볼트 및 연결판(현장)	공정	SSPC SPC3	에폭시계 도료	우레탄		
		두께		75	100		175
불소수지 징크 신나계	내부(공장)	공정	SSPC SPC10	무기질 아연도료	미스트 코트	불소수지	
		두께		75		100	175
	내부 볼트 및 연결판(현장)	공정	SSPC SPC3	에폭시계 도료	불소수지		
		두께		75	100		175

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개 하여서는 아니됩니다.