

밀폐 박스거더형 무도장 내후성강 교량의 부식취약부에 대한 방식대책 연구(I)

송창영^{1,†} · 이의호¹ · 이제현¹ · 박현출² · 최재석² · 노영태²

¹(재)한국재난안전기술원 방식연구소, 서울시 영등포구 여의나루로 67

²한국건설생활환경시험연구원, 서울시 서초구 남부순환로 319길 7
(2013년 1월 17일 접수, 2013년 6월 24일 수정, 2013년 6월 26일 채택)

The anti-corrosion study on the corrosion-sensitive areas of unpainted weathering steel bridges with closed box girder(I)

Chang-young.Song^{1,†}, Eui-Ho.Lee¹, Jea-Hyun.Lee¹, Hyun-chul.Park², Jae-suk.Choi², and Young-tae.Noh²

¹Korea Disaster Safety Technology Institute, 67, Yeouinaru-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul, 150-923, Korea

²Korea Conformity Laboratories, 7, Nambusunhwan-ro 319-gil, Seocho-gu, Seoul, 137-707, Korea

(Received January 17, 2013; Revised June 24, 2013; Accepted June 26, 2013)

In corrosion-sensitive areas of existing unpainted weathering steel bridges with closed box girder structures, there are some serious local corrosion problems because of rain water or dew water which can not be solved by existing maintenance methods. These problems must be controled technically because of bad. influence on the safety of bridge. This study is the first stage of developing the economic corrosion control manual for these local corrosion problems. Through the injection of tar sealant into the crevice of mock-up equipment, it was proved that the corrosive sealant can be useful to corrosion control at crevice of corrosion sensitive area.

Keywords : unpainted weathering steel, splice connection part, corrosion, corrosion sensitive area, multi-unction sealant

1. 서 론

국내에선 전체 강 교량의 약 80% 이상이 밀폐 박스 거더형 교량으로 건설되어 있고, 무도장 내후성 강 교량 건설에서도 기존의 일반 도장 교량과 같은 방식과 구조로 건설하면서, 전체적으로 도장을 실시하지 않았다. 밀폐 박스거더형 교량은 구조적으로 부식취약부에서 체수와 결로에 의해 국부 부식이 발생하며 교량의 안전 수명 단축에 큰 영향을 미치고 있다. ^{1),2)}

철근콘크리트 구조의 교량 바닥판이 반복되는 진동에 의해 부분적으로 균열이 발생할 때 빗물이 유입되어 박스 거더 상부 플랜지의 외부면에 체수 되어 철판을 부식시킨다. 이때 체수 중에 제설제로 사용되는 염화칼슘이 포함 될 때, 철판의 부식속도는 크게 증가한다.³⁾ 그리고, 상부 플랜지의 체수는 구조적으로 박스 거더간 splice 연결부 틈새를 통해 하부

플랜지까지 유입되는데 이때 splice 연결부의 틈새 내부에선 이중금속 부식전지와 산소농도전지 형성으로 상대적 양극부에서는 심한 양극반응 전지부식이 발생하게 된다. 또한, 박스 거더 하부 플랜지에서는 splice 연결부를 통해 유입되는 우수와 결로의 영향으로 용접부에서 전위차에 따른 전지부식이 발생 하게 된다. 이러한 부식문제는 건설 후 10년차와 5년차인 교량에 대해 진단전문기관에서 수행한 한강의 Y교와 한강 수계의 무도장 내후성 강 교량들에 대한 부식진단으로서 충분히 증명 되었다. Fig. 1은 도장교량인 Y교에서 박스 거더 상부 플랜지와 박스 거더간 splice 연결부의 틈새를 통해 우수가 유입되고, 또 우수가 하부 플랜지까지 유입되면서 국부 부식을 유발하는 현상을 그리고 Fig. 2는 무도장 내후성 강교량인 SY대교외 4개 교량에서 건설 후 5년 차에 박스 거더 상부 플랜지에서 유입되는 우수가 박스 거더간 splice 연결부를 통해 하부 플랜지까지 유입되는 현상의 사례를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 3은 SY대교에서 박스 거더 내부면이 우수와 결로의 영향으로 부분적으로 국부부식이 발생되고 있는 현상을 보여준다.⁴⁾

[†] Corresponding author: anchon1004@hanmail.net

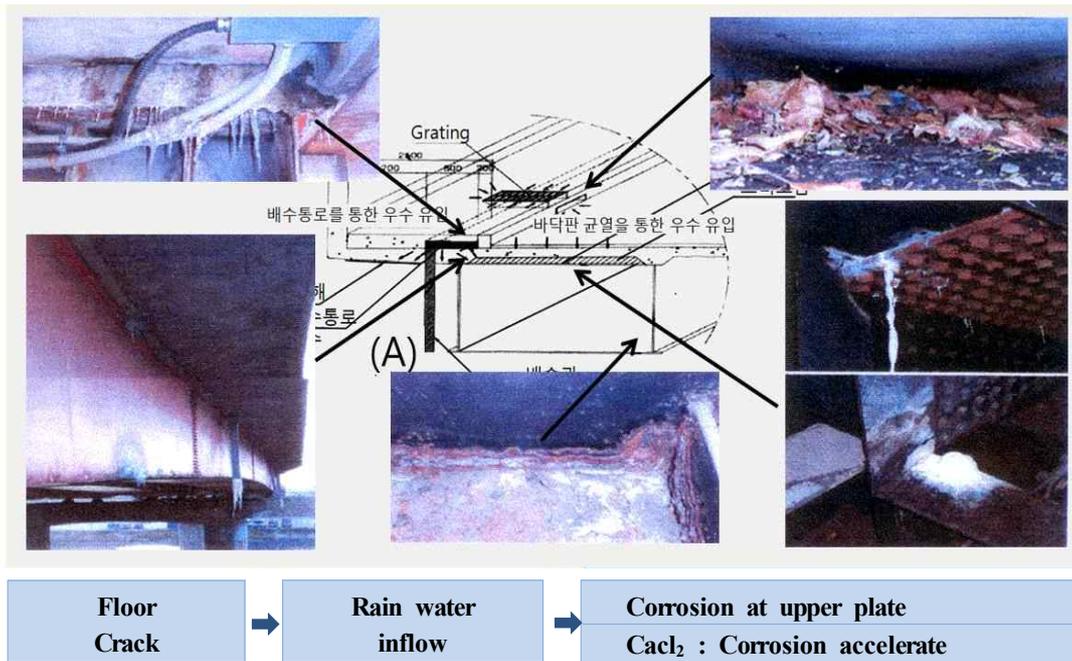


Fig. 1. The effect of rainwater flowing to upper flange through broken floor of “Y” bridge (10years used).

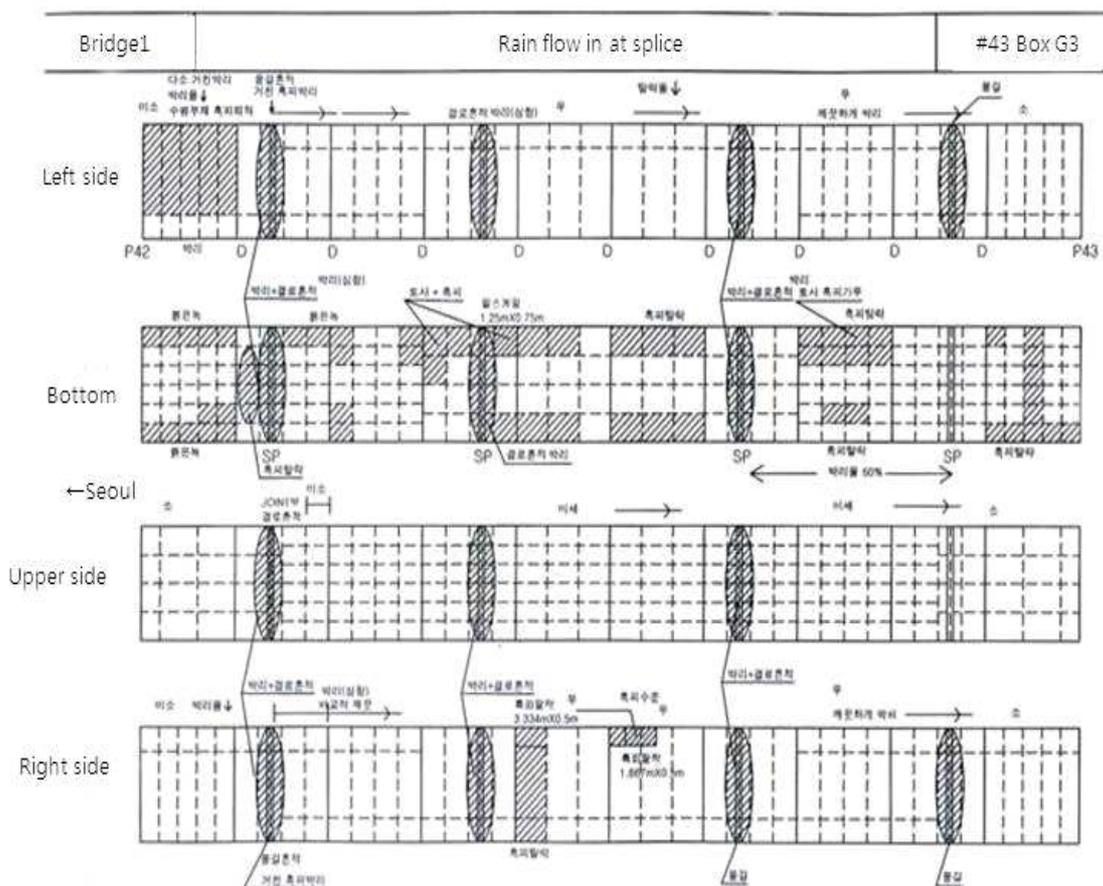


Fig. 2. An example of rain inflow through splice connection between box-girders of “SY” bridge (Weathering steel bridge which is used 5 years).

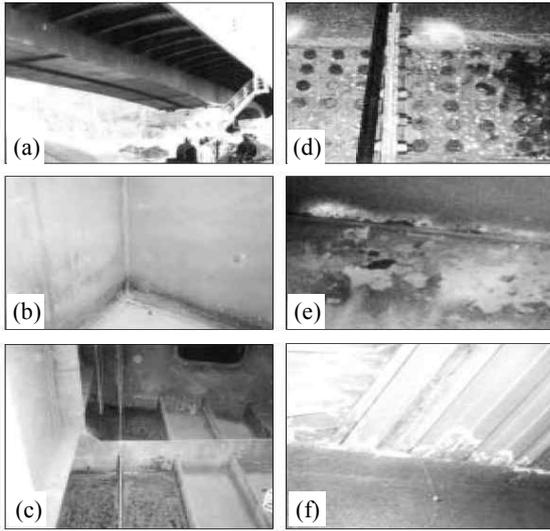


Fig. 3. Corrosion status at corrosion sensitive areas of “SY” bridge used by unpainted weathering steels (5years used).

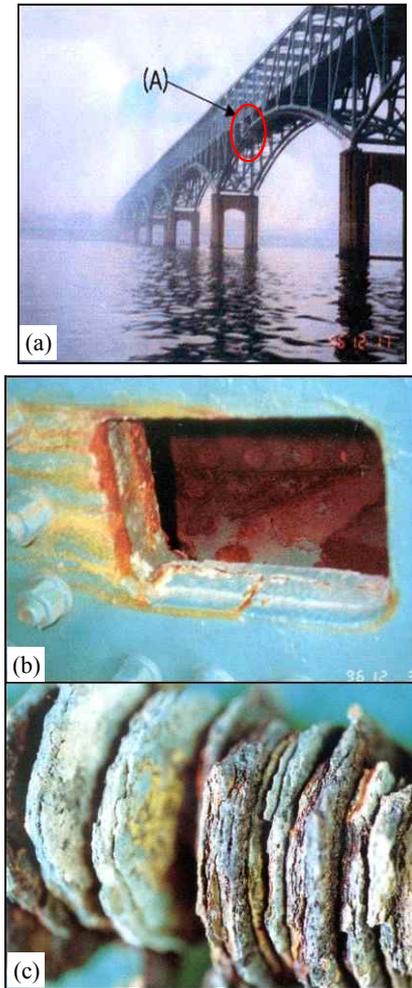


Fig. 4. An example of small anode-large cathode galvanic cell corrosion at box girder bolt connection of “D” bridge exchanged after 13years used.

이상과 같이 밀폐 박스 거더형 교량의 체수와 결로에 의한 국부부식 문제는 강교량 건설 역사가 오래된 선진국들이 여러 가지 장점이 많은 밀폐 박스거더형 교량 건설을 기피하는 이유로 분석된다. 그리고 구조적으로 결로가 형성되는 가운데 전기화학적 재료 설계에서 소양극(볼트)-대음극(구조재) 전지 구조가 되도록 설계시에는 Fig. 4에서 나타난 바와같이 건설 후 짧은 기간에 양극부에서 극심한 전지 부식으로 교량 안전에 영향을 미치는 국부부식이 발생할 수 가 있다.^{3),4)}

본 연구에선 국내의 기존 강교량에서 발생하고 있는 구조적 부식 취약부의 국부부식 문제를 분석하여 기존의 무도장 내후성 강교량의 부식취약부를 경제적으로 유지·보수할 수 있는 경제적인 방식 대책을 마련하고 이를 근거로 무도장 교량의 방식 설계 지침을 보완·개선 하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구는 구조적으로 결로 및 체수가 발생하는 밀폐 박스 거더형 교량의 부식취약부가 부동태 피막(passivation film) 형성불가로 계속적으로 부식이 진행되는 문제를 분석하여 그간 국내에서 건설한 기존의 무도장 내후성강 교량의 부식취약부에 대한 경제적인 방식관리 지침을 개발하는 연구이기 때문에 연구방법은 다음과 같다. 먼저 같은 구조의 도장교량에 대한 전문부식진단 자료를 전기화학적으로 분석하여 부식 메카니즘을 검토한 다음 국내 실정에 맞는 무도장 교량용 방식제 개발 및 적용법을 연구한다. 연구는 4단계로 구분하여 실시한다.

- 1단계: 박스거더 상부플랜지 틈새 내부의 체수부와 박스거더간 Splice 연결부 틈새의 체수영향을 분석 및 기존의 보수공법인 바닥판 철거 및 방식도장하는 공법을 대신하는 실링제 주입공법의 적용성 분석
- 2단계: 국내에서 개발 적용중인 타르계 실링제와 무기부식억제제를 무도장 강재에 적용하기 위한 기초실험으로 사용조건에 따른 방식기능 분석
- 3단계: 1, 2단계의 실험결과를 종합하여 국내의 기존 무도장 교량의 부식 취약부에 적용할 방식제 개발
- 4단계: 국내의 기존 무도장 교량 부식취약부에 적용할 방식 설계 지침 및 유지관리 지침 개발

3. 연구결과 및 고찰

3.1 박스거더 상부 플랜지 외부면의 부식특성

기존 밀폐 박스거더형 교량의 박스거더 상부플랜지 외부면은 Fig. 4(a)에서와 같이 교량바닥판의 콘크리트 슬래브와 직접 접촉하는 것과 (b)와 같이 3~4cm 정도의 간격을 두고 사이에 스티로폼을 채우는 구조로 나눌 수 있다. 1990년대 중반까지는 대체로 Fig. 7의 (b)와 같이 간격을 두는

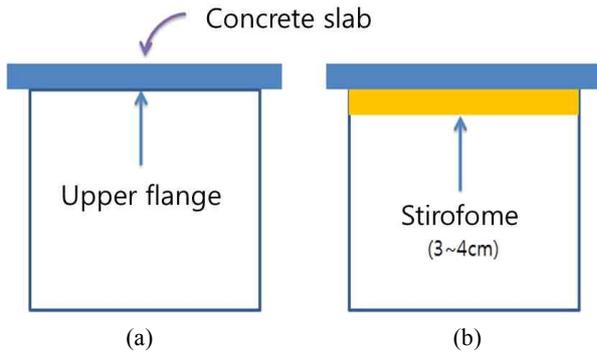


Fig. 5. The construction of concrete slab and upper flange of the existing closed box girder type steel bridges.
(a) Contact (b) Space

구조로 건설하는 사례가 많았고, 그 이후로는 (a)와 같이 접촉구조로 건설하고 있는 추세이다.³⁾

(1) 박스거더 상부 플랜지와 교량의 바닥이 접촉하는 구조
Fig. 5의 (a)와 같이 박스거더 상부 플랜지에 직접 콘크리트를 타설함으로써 철판과 콘크리트가 서로 접촉하는 구조에선 바닥판의 균열에 의한 우수 유입의 영향은 Fig. 5(b)의 구조에 비해 상대적으로는 적다.

(2) 박스거더 상부 플랜지와 교량의 바닥이 접촉하지 않는 구조.

Fig. 5의 (b)와 같이 박스거더 상부플랜지와 바닥이 접촉하지 않는 구조에선 교량의 바닥판이 진동으로 균열 발생시 유입되는 우수가 틈사이에 채수되면서 철판을 부식시키게 된다. 특히, 제설제를 적용하는 교량에선 Fig. 1에서와 같이 염화물의 영향까지 포함된 부식 문제까지 발생할 수가 있다. 건설 후 10년차인 도장교량 Y대교에 대한 부식진단에서 부분적으로 차이는 있었지만, 상부 플랜지의 두께 감소가 20~50% 까지 측정 되었다는 것은 대기중의 평균 부식속도인 0.01mm/year 의 약 200~500배 이상 빠른 부식율로 부식이 진행되고 있다는 것을 나타낸다. 이는 바닥판을 통해 유입되는 우수의 영향으로 분석할 수 있지만 틈새에 채우는 스티로폼과 제설제로 사용하는 염화칼슘(CaCl₂)의 영향도 작용한 결과로 분석된다. 즉 틈새에서 산소농도전지부식과 염화칼슘에 의한 염화물 부식의 영향으로 추정된다.²⁾

Table1은 본 구조로 건설된 SY대교와 P육교의 박스거더 상부 플랜지에 대해 초음파 두께측정기로 측정된 실측치를 비교하여, 부식율을 나타낸 것이다.

3.2 볼트 연결부 내부면의 부식특성

결로구조인 박스거더 내부면에서 볼트연결부는 Fig. 6에서와 같이 결로의 영향으로 이중금속 부식전지, 산소농도전지 형성으로 전지부식이 진행되고 있다.

따라서 강교량 건설역사가 오래된 나라들에서는 결로 구

Table 1. The results of thickness measurement at the box girder upper flange of “SY” and “P” bridge which is constructed with weathering steel

Bridge	Position	Original thick (mm)	Measure (mm)	Red. rate (mm)	Red percentage (%)
SY	2G1	18	16.77	1.23	6.8
	P	18	16.77	1.23	6.8
	4G1	12	10.96	1.04	8.7
	5G2	12	11.08	0.92	7.7
	6G3	18	16.81	1.19	6.7
	7G3	12	10.89	1.11	9.3
	8G3	12	10.88	1.12	9.3
	39G3	16	14.42	1.58	9.9
	41G3	10	9.25	0.75	7.5
	42G1	10	9.37	0.63	6.3
P	1-G3	18	16.80	1.20	6.6
	2-G3	12	11.32	0.68	5.6
	6-G1	16	14.81	1.19	7.4
	7-G1	20	18.50	1.50	7.5
	8-G1	24	23.15	0.85	3.5

조의 교량건설을 지양하는 가운데 볼트연결부의 판간 접촉면은 마찰계수가 큰 갈바륨등으로 방식처리를 하며, 판간 틈 발생부는 외부의 결로가 침입하지 못하게 실링처리 하고서 도장하고 있다.

이에 비해 2000년 이전에 건설된 국내의 기존 박스거더형 교량에서는 볼트연결부의 판간 접촉면에 대해서 마찰력 감소를 이유로 방식처리 하지 않고, 또 결로의 영향을 고려하지 않아 판간 틈새에 실링처리를 하지 않음으로서 Fig. 6에서와 같은 볼트연결부 내부면에서는 예외없이 심한 부식 문제가 발생하며, 교량의 안전 수명에 적잖은 영향을 미치고 있다.

더욱이 도장교량에선 외부도장면과 연결부 내부면과 같이 비도장면간에 대해 고지항 전위차계로 측정시 평균적으로 약 0.2~0.3볼트 정도의 전위차가 발생함으로, 볼트연결부 내부면은 상대적 양극반응 갈바늄 부식도 발생할 수 있다.³⁾

따라서 기존의 국내 밀폐형 박스거더 교량의 내부면 볼트 연결부는 유지관리시 반드시 볼트연결부 내부면에 부식억제제를 주입하던가, 틈새에 희생양극 기능의 실링제를 적용하여 내부면의 부식진행을 억제하는 방법이 연구되어야 한다.



Fig. 6. Galvanic corrosion because of dew water at bolt connection inside of painted box girder.

3.3 박스거더 내부 용접부의 부식특성

Fig. 7은 건설 후 10년 경과된 밀폐 박스거더교량의내부면 용접부에서 채수에 의해 발생한 갈바닉 부식현상을 나타낸다.³⁾

강의 용접부에서는 필수적으로 용접부(Weld metal), 열영향부(Heat affected zone) 그리고 모재(Base metal)가 형성되는데 이들 간에는 전위차 발생으로 수분이 접할시 상대적 양극부는 반드시 양극반응 갈바닉 부식이 발생하게 된다.

따라서 도장교량이나 무도장교량에서 박스거더 내부 용접연결부에 대해서는 설계 규정을 보완하여 전기화학적 부식문제를 억제하는 규정을 두어야 한다.

- ① 용접부(Weld metal)의 전위가 열영향부나 모재에 비해 상대적 음극(Cathode)이 되도록 용접봉의 재료설계 규정 보완
- ② 용접부에 대해서는 부식전지의 회로 구성을 차단하는 고절연성의 무기도료 적용 또는 희생양극기능의 방식도장하는 규정 보완

그리고 기존의 교량에 대해서는 용접부에 대해 비파괴 시험을 통해 부식진행상태를 분석하여, 보강용접하거나, 절연처리시 교량의 안전수명을 향상 시킬수 있기 때문에 이에 대한 지침이 보강되어야 한다.

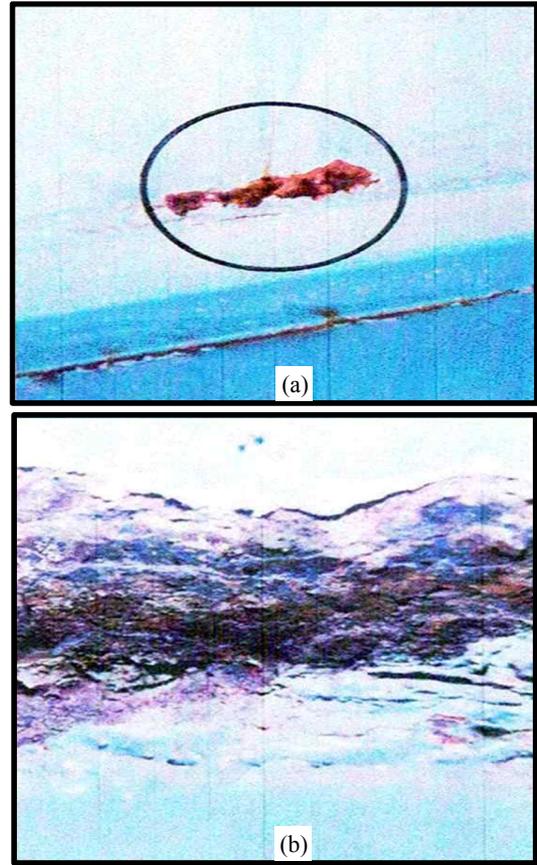


Fig. 7. Galvanic corrosion because of dew water at welded area of box girder.

3.4 무도장교량 박스거더 내,외부면의 부식특성

무도장 내후성강은 합금성분인 Cr, Cu, Ni, Si등의 영향으로 건, 습이 반복되는 대기중에는 5~10년 정도에서 합금성분의 부동태 피막(passivation film) 형성으로 부식진행이 억제된다.

그러나 여름철과 같이 고습도가 계속 유지되거나, 해안지대와 같이 부동태 피막을 파괴하는 염화물이 많이 있을 경우에는 부동태 형성이 어렵기 때문에 무도장 교량 건설 역사가 오래된 나라들은 설계 규정에서 이러한 문제를 고려하여 건설 제한 사항으로 두고 있다.

예로서 해안에서 2km 이내에선 건설을 제한하거나 염화칼슘을 제설제로 많이 사용하는 지역에서의 건설 제한 등이다. Fig. 8, 9는 건설 후 5년차인 무도장 교량 SY교량에서 박스거더 내, 외부면에 대해 고저항 전위차계에 의한 전위측정으로 부동태 피막형성 상태를 조사한 결과와 측정 시기별 전위변화를 나타낸 것이다.³⁾

Fig. 8의 전위측정결과 및 전위변화 에서와 같이 박스거더 외부면은 부동태 피막이 90%이상 형성되고 있는데 반해, 내부면에서는 결로의 영향으로 부동태 피막형성이 거의 이루어지고 있지 않다.⁶⁾

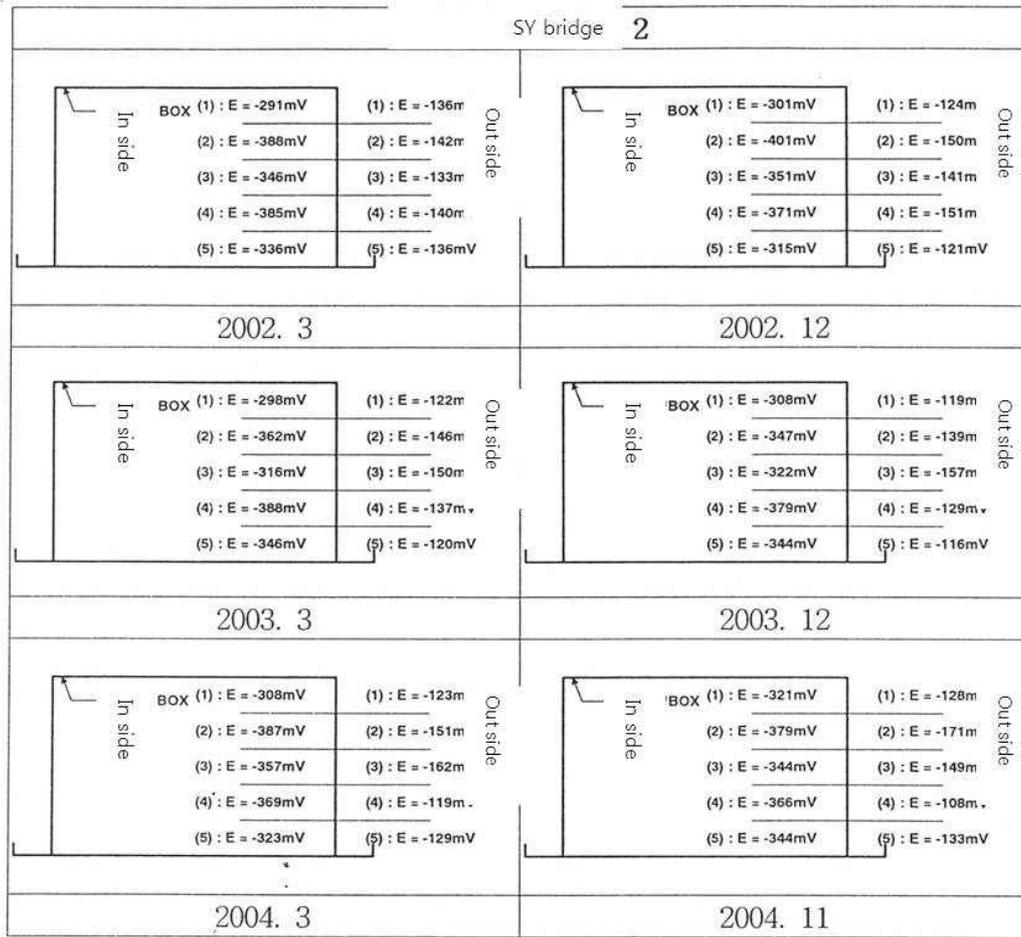


Fig. 8. The potential and potential variation with time at inner and outer surfaces of box girder which constructed with weathering steel("SY" bridge).

여기서 부동태 피막형성 기준전위는 현재까지 발표된 자료가 없는 가운데 2003년 강구조학회에서 기존의 무도장 교량에 대한 부식진단 결과 보고서에서 부동태 피막전위 측정 자료를 근거로 잠정적으로 규정한 -100mV CSE를 기준한다.³⁾

그리고 Fig. 9에 보는 바와 같이 박스거더간 Splice 볼트 연결부에서는 부분적으로 전지부식도 감지되고 있다. 따라서 박스거더 내부면에 대해서는 부분적인 방식처방 및 기화성 부식억제제 등으로 전면에 대해 부식을 억제하는 방법 연구도 요구된다.

3.5 박스거더 상부 플랜지 외부면 틈새에 적용 가능한 방식재 주입식 방식대책 실험 및 분석

Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3에서와 같이 기존의 밀폐 박스거더 교량의 박스거더 상부플랜지 외부면은 밀폐 틈새 구조로서 사람의 손이 미치지 못해 기존의 보수공법으로서는 부식 문제를 개선할 수 없다.

이런 가운데 건설 후 10년차인 도장교량 Y대교에선 부분적으로 차이가 있지만 상부 플랜지의 두께 감소가 20~50% 정도 측정되어 상판을 철거 후 중방식도장하는 공법을 계획하게 되었고, 건설 후 5년차에 무도장 교량 SY교량과 P육교에서 Table1에서와 같이 상부 플랜지의 두께 감소율이 최대 9.9%까지 측정되었다.

따라서 Y대교의 비경제적인 보강계획에 병행해, 상판을 철거하지 않고, 틈새에 녹전환재 주입 후 친금속성 실링재 주입 공법을 개발하여 다음과 같은 적용성 실험을 실시 하였다.

즉 Y대교를 모델로 한 Mockup 장치에서 바닥판과 상부 플랜지간 틈새에 타르게 실링재 주입 공법이다.

(1) Mock up 제작(Fig. 10, Fig. 11 참조)

- 상부철판과 아크릴판을 지지하는 받침대 설치
- 상부에 철판(4m X 2m)을 올리고 가장자리는 실링처리
- 스티로폼을 철판위에 올리고, 실링재 주입시 유실을 방지하기 위해 지점토로 전면 실링

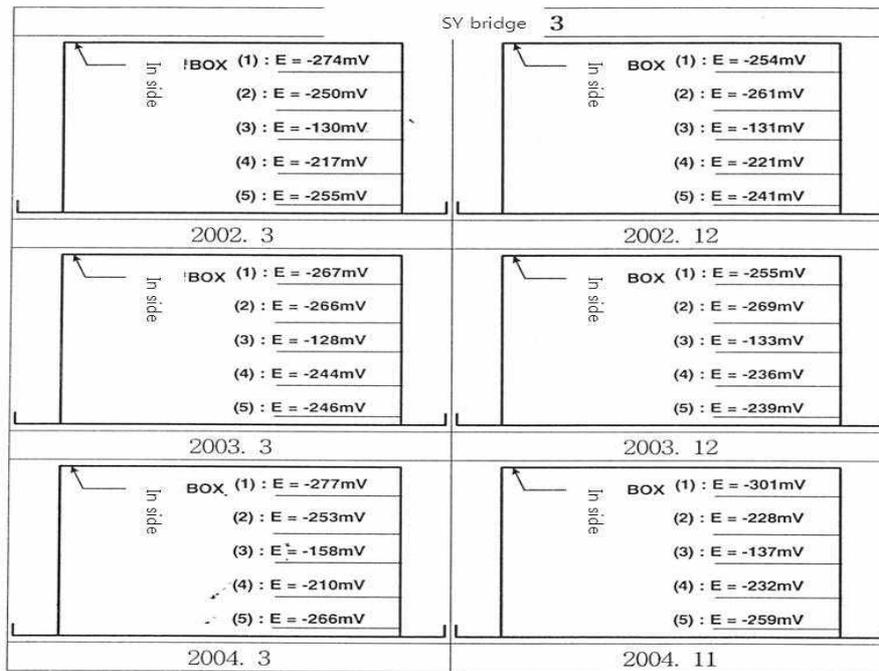
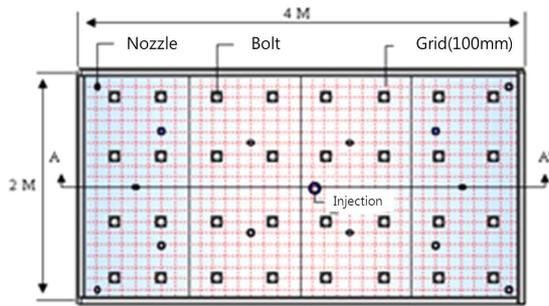
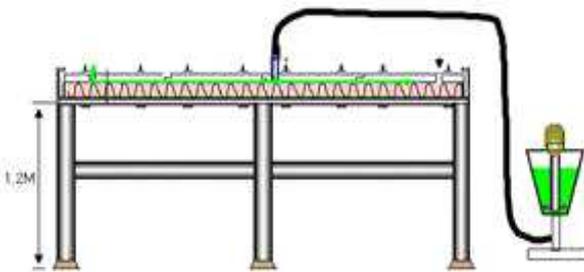


Fig. 9. The potential variation with time at bolt connection of box girder inner surface (“SY” bridge).

- 가압아크릴판은 확산범위 측정을 위해 100mm 간격으로 Grid 표시
- 가압볼트는 50cm간격으로 천공하여 고무와서, 철판와서를 적용



(a)



(b)

Fig. 10. The mock-up of box girder upper flange.
(a) Plane view (b) Sectional view



Fig. 11. Mock up of Y bridge.

(2) 실링제 주입실험

실링제 주입공법의 신뢰성을 확인하기 위해 실제 조건보다 가혹한 조건으로 실시하였다. 즉, 바닥판과 박스거더 상부 플랜지간 틈을 실제 상황에 비해 10% 이하로 조정하여 가혹조건에 하에서 실시하였다

Table 2는 실링제 주입실험에서 주요제원을 Fig. 12는 주입장치를 나타낸다.

Table 2. The specification of sealant injection experiments

Power	330V	Volume	70 ℓ
Drive	2.2 kW	Tatal Length	1,000 mm
RPM	35 ~ 160 RPM *	Total Width	750 mm
Trans Pressure	13 ~ 20 bar *	Total Height	1,550 mm
Trance Distance	15 ~20 m *	Total Weight	156 kg
Discharge volume	3 ~ 20 ℓ/min *		



Fig. 12. Sealant injection equipment.

① 실링제 주입성능 시험 방법

Fig. 13은 Table 2의 제원에 따른 Mock up 장치에서 실링제를 주입하는 시험절차를 나타낸다.

실험온도는 상온(20℃ 전후)에서 실시하였고, 주입압력은 조절이 가능하지만 Table 2에서와 같이 일반적으로 채택 가능한 범위에서 실시하였다.

② 실링제 주입성능 분석

Table 3은 실링제 주입시간에 따른 주입깊이와 면적을

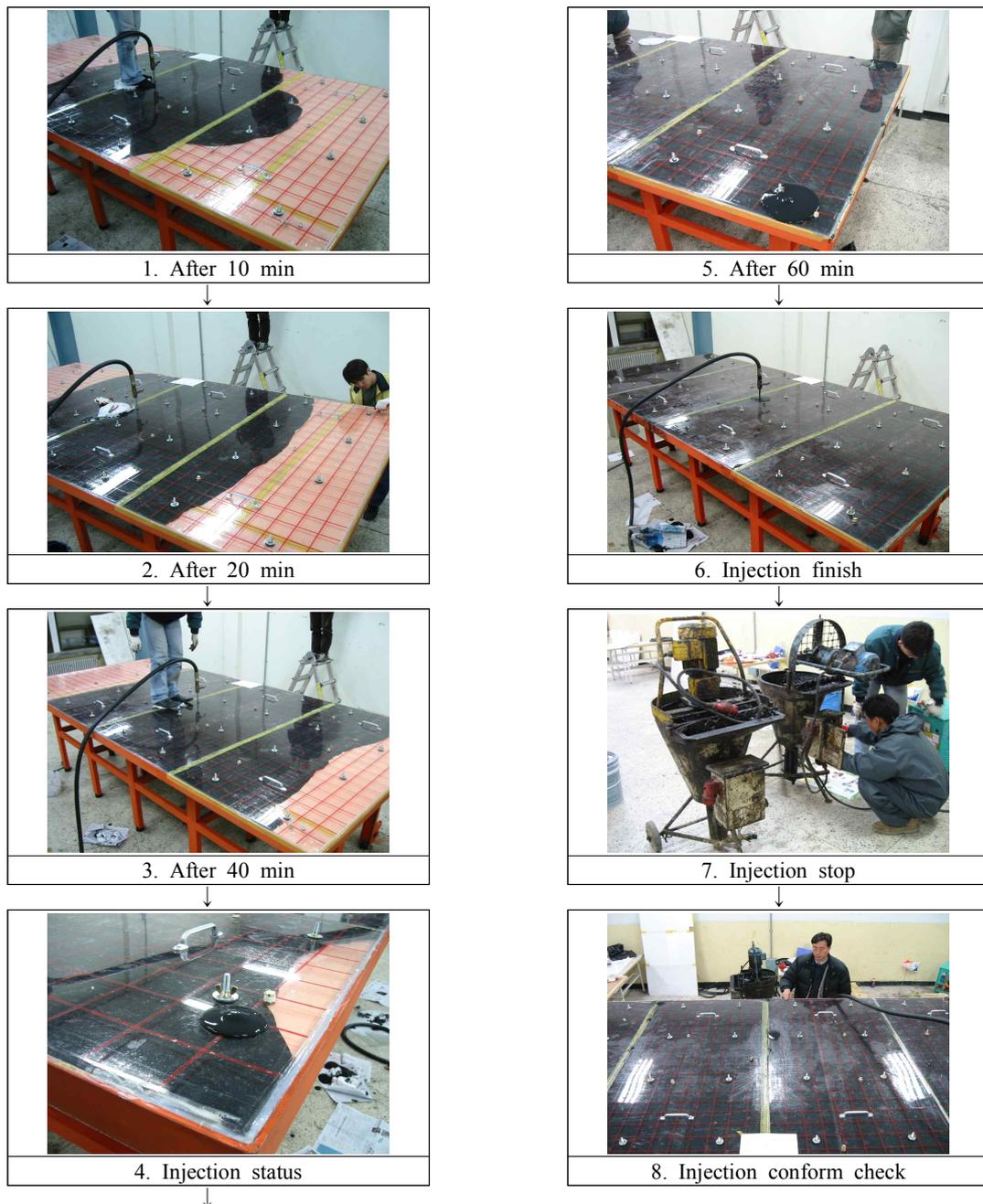


Fig. 13. Sealant injection experiment.

Table 3. The injection length and injection area with sealant injection time

Injection Time (min)	Length (m)	Area (m ²)	Remark
0	0	0.00	Redail spread
1	0.40	0.50	Redail spread
2	0.70	1.54	Redail spread
5	1.05	3.46	Redail spread
10	1.30	5.31	Redail spread
20	1.60	6.40	Line spread
30	1.80	7.20	Line spread
40	1.90	7.60	Line spread
50	1.95	7.80	Line spread
60	2.00	8.00	Line spread

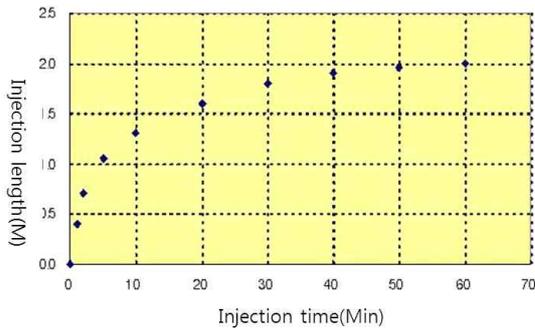


Fig. 14. The relation between injection time and injection range.

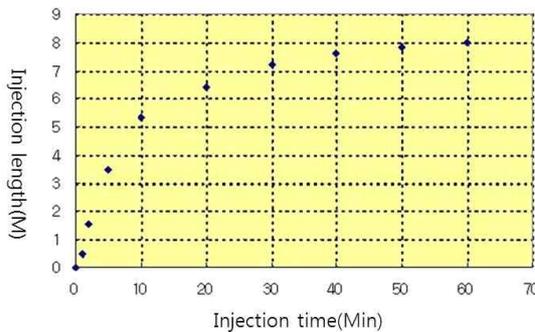


Fig. 15. The relation between injection time and injection area.

측정한 결과고, Fig. 14, 15은 주입시간과 주입길이 간의 관계, 주입시간과 주입면적간의 관계를 나타낸 것이다.

Table 3. Fig. 14, 15에서 나타낸 바와 같이 실제 교량의

박스거더 상부플랜지와 동일한 조건의 장방향 Mock up을 제작하고, 틈의 간격은 10%이하의 가혹조건으로 실시한 실링제 주입실험 등을 통해 다음의 소결론을 얻을 수 있다.

- 점도가 타르계 실링제보다 낮은 수용성 부식억제제(녹 전환제)의 주입은 실용성이 증명된다.
- 실제상황에 비해 가혹한 조건에서 실링제 주입 실험결과 는 실제 교량에서 실링제 주입이 가능하다는 것이 증명 된다.

4. 결 론

이상의 밀폐 박스거더 교량의 부식특성, 부식진단 사례 및 박스거더 상부 플랜지 외부면 틈새에 대한 타르계 실링제 주입실험을 통해 다음의 결론을 도출할 수 있다.

- (1) 밀폐형 박스거더 구조의 강교량에서 부식취약부는 박스 거더 상부플랜지 외부면의 체수발생부, 결로구조인 박스 거더의 내부면 볼트연결부 그리고 용접부 등이다.
- (2) 무도장교량의 박스거더 내부면에선 결로의 영향으로 부 동태 피막형성이 어렵다.
- (3) 박스거더 상부플랜지 외부면 틈새에는 부식억제제 주입 과 실링제 주입이 가능하며, 실링제 주입으로 철면에 친금속성, 내식성 실링제가 수분의 접촉을 차단시 부식을 방지할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 지원 사업으로 2012년에 선정된 건설기술혁신사업의 연구 지원으로 수행되었기에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. E. H. Lee, Corrosion and Corrosion Protection manual of Korea ,DongHwa Technoiogy p.220 (1998).
2. E. H. Lee, Anti-corrosion Manual for Unpainted Wethering steel bridge, Kicem p 190 Construction (GOV.) (2005).
3. KICAT & E. H. Lee, Stop! Bridge breakdown, Gas explosion, Soil contamination p.46 (2005).
4. KICAT, The principal of Corrosion and Corrosion protection p.24 (2000).