

현장조사를 통한 철도 고가교 구조물의 내구성 평가 및 결함 패턴 분석

Durability Evaluation and Defect Pattern Analysis in Railway Bridge Through Field Investigation

권성준^{1)*}

Kwon, Seung Jun

Abstract

Because of the defect in design, damage in using period, and deterioration in long term exposure to severe environmental condition, degradation of performance in RC (Reinforced Concrete) structures has occurred. This paper contains durability performance evaluation in railway bridges which covers eight districts through field investigation. For the target structures, durability performance is evaluated and the critical problems in use are derived. Additionally, service lives for the deteriorated structures are evaluated through Durability-Environment index method based on the results from field investigation, and the results are compared with those from the condition assuming the structures without defect, damage, and deterioration. The target structures which consist of RC T girder, PSC girder, RC box, and Rahmen are investigated and the critical damage patterns are derived. They are evaluated to be cracks in PSC girder end, flexural cracks in PSC girder, crack around EPT anchor, and flexural cracks in RC T girder and RC box. The reasons for the critical patterns are also investigated. This study can be utilized for the repair planning considering the different district and the structure types.

Keywords : Field investigation, Railway bridge, Durability, Service life, Crack

1. 서론

내구적이며 경제적으로 알려져 있는 RC(Reinforced Concrete) 구조물은 구조물의 시공당시의 결함, 노출환경에 따른 열화, 그리고 사용 중의 손상에 따라 목표내구수명에 이르는 동안 소요성능이 감소하게 된다. 준공당시에는 건전성을 확보하더라도 구조물의 노출환경에 따른 내구적 성능저하가 발생하게 되고, 이런 성능저하는 구조적인 성능저하로 진전됨으로서 구조적 안전성 및 사용성을 저하시키게 된다(CEB 2006, RILEM 1994). 대도시에서 건설된 고가교의 경우, 이산화탄소에 의한 탄산화에 노출되어 있으며, 사용재료에 혼입 또는 용빙제로 인한 염화물 침투로 매립된 철근이 부식하기 쉽다. 또한 주기적인 동결융해로 인해 모재 콘크리트의 건전성이 저하되

기 쉬우며, 이러한 열화의 복합작용으로 인해 피해가 가중되어 진다.

현재 내구성에 대한 평가는 외관조사에 따른 등급화, 실내외 실험에 물성 평가가 주를 이루고 있는데, 목표내구수명의 설정에 따른 정량적인 예측은 명확하게 이루어지지 못하고 있다. 또한 실태조사 평가가 이루어지더라도 대상 구조물의 외관조사, 현상태의 내하력 평가 등이 주를 이룰 뿐이며, 구간별 또는 부재별 내구성 확보기간을 제시하고 못하고 있다(Seoul Metro, 1997; 1996).

본 논문에서는 공용개시 20년이 경과한 도시 철도교를 대상구조물로 하여 8개 구간에 대한 외관조사를 수행하였으며, 실내외 실험을 통하여 문제점을 분석하였다. 또한 시공당시의 배합 및 준공상태를 가정한 후, 일본토목

1) 정희원, 한남대학교 건설시스템공학과, 교신저자

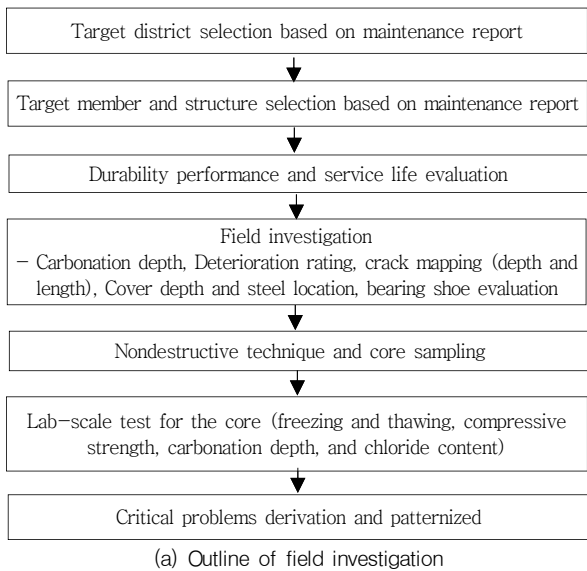
* Corresponding author : jjuni98@hannam.ac.kr 042-629-8020

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2013년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

학회(JSCE)의 내구성 설계기법을 이용하여(JSCE, 1995; Kwon et al., 1998), 내구성 확보기간을 도출하였다. 최종적으로 유지관리에 필요한 문제점을 분석하였으며, 대상구조물의 결함 및 손상을 패턴화 하였다. 본 연구는 단순한 외관조사의 등급화 및 균열 mapping의 수준에서 벗어나 내구성 확보기간의 추정 및 결함-손상 패턴화를 통하여 대상 구조물의 유지관리에 적극적으로 사용될 수 있는 정보를 제공하고 있다.

2. 대상구조물 및 실태조사 개요

대상구조물은 RC T형교, PSC 거더교, Steel 박스교, RC 박스교, 라멘교 등이 혼재되어 있는데 Steel 박스교를 제외한 콘크리트 교량을 대상구조물로 선정하였다. 전수검사는 거의 불가능하므로 기존의 유지관리 문헌 분석을 통해 열화 및 손상이 심각한 부재를 주 대상으로 선정하였다(Seoul Metro, 1996; 1997). Fig. 1에서는 실태조사의 개요 및 구조물 사진을 나타내었으며, Table 1에는 대상구조물의 형식 및 경간의 분류를 나타내고 있다.



(b) Target structures

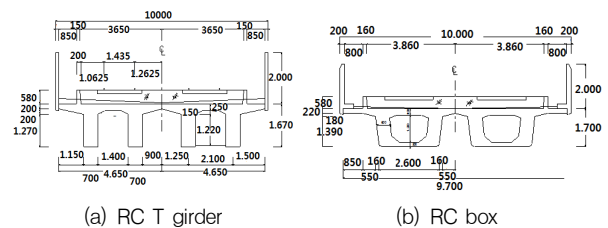
Fig. 1 Outline of this study

또한 Fig. 2에서는 상부교량의 형식 및 교각의 주요제원을 나타내고 있다. Table 1에서 A~G까지 구간을 분류한 것은 각 구간의 정거장에 따라 현장조사계획을 세울 수 있고 내구성 평가결과, 어떤 구간이 가장 보수가 시급한지 설정할 수 있기 때문이다.

외관 및 실태조사에서는 전 경간에 대한 분석이 어려우므로 조사는 기존의 진단보고서를 통하여 취약경간을 분석하였으며, 그 경간에 대하여 피복두께, 균열조사 및 실내실험을 위한 코어채취를 수행하였다. Table 2에서는 조사개소 및 실험을 위한 코어채취개소를 나타내고 있다.

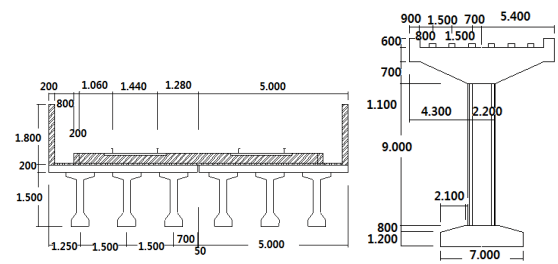
Table 1 District and the related structure type

District	Length(m)	Superstructure type and length (m)
A	997.1	· Rahmen (226.15) · RC Box (219.5) · Steel box (93.8) · PSC girder (440.5) · RC T girder (17.15)
B	853.16	· RC T girder (17.16) · PSC girder (360) · Steel box (194) · RC T girder (14.3) · Rahmen (267.7)
C	1,218	· Rahmen (227.7) · RC T girder (40.3) · PSC girder (920) · Steel box (30)
D	1,578	· RC T girder (28) · Steel box (120) · PSC girder (1260) · Rahmen (170)
E	923	· PSC girder (680) · RC T girder (12) · Rahmen (231)
F	394.35	· RC T girder (28.65) · Rahmen (205.7) · PSC girder (160)
G	301.65	· RC T girder (31.65) · PSC girder (240) · Steel box (30)
H	679.1	· Steel box (135.4) · RC T girder (78.1) · PSC girder (465.6)



(a) RC T girder

(b) RC box



(c) PSC girder

(d) T-type column

Fig. 2 Structure type and dimension

Table 2 Number of field investigation and test items

District	Crack mapping	Crack depth	Steel corrosion	Carbonation	Rebound	Cover depth
A	super 1 sub 3	super 0 sub 6	-	super 0 sub 3	super 1 sub 11	super 0 sub 3
B	super 3 sub 2	-	super 16 sub 0	super 4 sub 2	super 2 sub 6	super 0 sub 2
C	super 10 sub 9	super 55 sub 9	super 20 sub 0	super 8 sub 10	super 17 sub 29	super 14 sub 18
D	super 7 sub 2	super 3 sub 0	super 16 sub 0	super 2 sub 4	super 5 sub 11	super 7 sub 4
E	super 10 sub 3	super 28 sub 6	super 8 sub 0	super 9 sub 4	super 11 sub 3	super 6 sub 4
F	super 7 sub 9	super 0 sub 15	super 12 sub 0	super 8 sub 9	super 7 sub 18	super 5 sub 11
G	super 0 sub 3	-	-	super 0 sub 3	super 0 sub 6	super 0 sub 3
H	super 2 sub 2	-	-	super 2 sub 4	super 2 sub 4	super 1 sub 3

* super : super structure

* sub : sub structure

3. 대상구조물 현장조사 및 실내실험

3.1 현장조사 개요

현장조사를 통한 외관조사 및 비파괴 조사가 수행되었다. 탄산화 깊이 측정을 위해서는 페놀프탈레인 시약을 이용하였으며, 반발경도는 N형 슈미트햄머가 사용되었다(Bungey and Millard, 1996). 균열깊이 측정을 위해서는 Pundit 장비가 사용되었으며(Bungey and Millard, 1996), 일부 구간의 부식정도를 파악하기 위하여 HCP(Half Cell Potential)이 측정되었다(ASTM, 1999). 기존의 설계도서 분석결과, 부재별 설계강도, 피복두께는 Table 3 과 같이 요약할 수 있다.

3.1.1 A구간 현장조사 결과

국부적으로 거더저면에 백화현상이 발생하였으며, PSC 거더 단부의 균열이 발생하였다. 또한 기존 받침부의 가동단에 부식이 진전되어 고정되어 있었으며, 거더 상하부

에 균열이 (0.1~0.3mm) 다수 발생하였다. 탄산화 깊이는 9.1~16.79mm로 경미한 수준이었다. 반발경도는 슬래브에서는 23.0MPa, 교각에서는 25.2~36.5MPa 수준으로 평가되었다. 피복두께는 교각에서 173~240mm 수준으로 충분히 확보되었으며, 균열깊이는 교각에서 119~186mm로 평가되었다.

3.1.2 B구간 현장조사 결과

RC T 거더 강관보강부의 들뜸이 발견되었으며, 보강부의 표면부식, 도장박리 등이 조사되었다. 또한 기존 받침부의 가동단에 부식이 발생하였으며, PSC 거더의 균열 및 가로보의 시공불량이 조사되었다. PSC 거더의 강관보강부 역시 들뜸이 조사되었으며, 기둥하부 및 코핑부의 균열이 0.1~0.2mm폭으로 발생하였다. 철근부식도는 슬래브에서 -140~-186mV 수준으로, 탄산화 깊이는 6.43~17.62mm의 경미한 수준으로 평가되었다. 반발경도에서는 슬래브에서 30.3MPa, RC T거더에서는 18.1MPa, 교각에서는 23.0~31.6MPa로 평가되었다. 피복두께는 교각에서 101~126mm 수준으로 편차가 큰 편이었다.

3.1.3 C구간 현장조사 결과

외관조사 결과, 열화된 부재가 많이 밀집된 구간으로 세심한 유지관리가 필요한 구간이었다. PSC 거더의 측면에 균열이 발생하였으며, 슬래브에서의 백화현상이 빈번하게 조사되었다. 강관보강부의 들뜸과 기존 받침부 가동단의 부식이 심하게 평가되었다. 철근부식도는 거더에서 -21~-175mV, 슬래브에서 -10~-112mV 수준으로 평가되었으며, 탄산화 깊이는 2.23~18.39mm로 평가되었다. 반발경도는 슬래브에서 29.1~34.MPa, PSC 거더에서는 26.4~36.6Mpa, 교각에서는 21.5~38.1MPa 수준이었다. 피복두께는 슬래브에서 10~59mm, PSC 거더는 29~32mm, 교각에서는 26~193mm로 평가되었다.

균열깊이는 부재별로 RC T형 거더는 138~159mm, PSC 거더는 48~185mm, 교각에서는 37~157mm로 조사되었다.

3.1.4 D구간 현장조사 결과

주철근 피복두께가 부족한 구간이 빈번하게 조사되었으며, 거더저면에 모르타르가 탈락된 부재도 조사되었다. 받침장치에 부식이 있는 곳도 빈번하여 주기적인 교체가 필요하였다. RC T형교에서는 0.1~0.3mm의 등간격 균

Table 3 Design strength and cover depth with each member

Design strength (MPa)		Design cover depth (mm)	
Slab	24	Slab	25
RC T girder	24	RC T	55
PSC girder	35	PSC girder	45
Column	24	Column	100

열이 발생하였으며, PSC 거더에서의 강판보수부의 부식 상태가 불량하여 들뜸이 발생한 개소가 조사되었다. 철근 부식도는 슬래브에서는 $-93 \sim -170\text{mV}$ 로 평가되었으며, 탄산화 깊이는 $4.56 \sim 11.10\text{mm}$ 수준이었다. 반발경도는 슬래브에서 23.5MPa , PSC 거더에서는 $20.9 \sim 35.1\text{MPa}$, 교각에서는 $20.4 \sim 35.8\text{MPa}$ 수준으로 평가되었다. 피복두께는 슬래브에서 $23 \sim 40\text{mm}$, RC T 거더는 $50 \sim 70\text{mm}$, 그리고 교각에서는 $66 \sim 152\text{mm}$ 로 조사되었다. 또한 RC T형 거더의 균열깊이는 $104 \sim 149\text{mm}$ 로 평가되었다.

3.1.5 E구간 현장조사 결과

RC T거더에서의 일정한 간격의 휨균열이 균열폭 0.1mm 정도로 조사되었으며, 받침부의 가동단에 부식이 진전되어 있었다. PSC 거더에서는 복부균열이 일부 거더에 진전되어 있었으며, 외부강선보강(External Prestressing Tendon: EPT) 정착구 보강부 주위에 균열이 발생되어 있었다. 또한 이를 보강하기 위해 탄소섬유슈트가 부착되어 있었는데, EPT 주변에 기름유출로 인해 표면얼룩이 심하였다.

하부구조에서는 교각부의 수직균열 및 코핑부의 분산 균열이 다수 조사되었다. 철근 부식도는 슬래브에서 $-32 \sim -121\text{mV}$ 로, 탄산화깊이는 $12 \sim 15.5\text{mm}$ 수준이므로 조사되었다. 반발경도는 슬래브에서 $29.3 \sim 36.3\text{MPa}$, PSC 거더에서는 $31.4 \sim 40.0\text{MPa}$, 교각에서는 $20.4 \sim 24.5\text{MPa}$ 로 조사되었다. 피복두께는 슬래브에서 $19 \sim 73\text{mm}$, RC T 거더는 $46 \sim 85\text{mm}$, 교각에서는 $29 \sim 285\text{mm}$ 로 조사되었다. 균열깊이는 RC T형 거더에서 $36 \sim 119\text{mm}$, PSC 거더에서는 $23 \sim 196\text{mm}$, 그리고 교각에서는 $91 \sim 132\text{mm}$ 로 조사되었다.

3.1.6 F구간 현장조사 결과

일부 PSC 거더는 시공당시에 거더 저면에 파손부를 가지고 있었으며, 강판 보강부의 들뜸이 조사되었다. 일부 부재에 누수 및 백화가 진행되었으며, PSC 거더에서는 등간격 균열이 발견되었다. 또한 기존 받침부의 가동단 부식과 하부구조(코핑부와 교각)에서 다수의 균열이 조사되었다.

철근부식도는 슬래브에서 $-42 \sim -170\text{mV}$ 수준이었으며, 탄산화깊이는 $1.52 \sim 11.74\text{mm}$ 로 낮은 수준으로 조사되었다. 반발경도는 슬래브에서 $28.6 \sim 34.8\text{MPa}$, PSC

거더에서는 $31.3 \sim 32.9\text{MPa}$, 교각에서는 $21.3 \sim 33.2\text{MPa}$ 수준을 나타내었다. 피복두께는 슬래브에서 $55 \sim 88\text{mm}$, PSC 거더에서는 $80 \sim 102\text{mm}$, 교각에서는 $64 \sim 244\text{mm}$ 로 조사되었다. 교각에서의 균열깊이는 $26 \sim 222\text{mm}$ 의 분포를 가지고 있었다.

3.1.7 G구간 현장조사 결과

부구조는 다른 구간에 비하여 건전성을 확보하고 있었으며, 일부 하부구조(코핑부와 기둥부)에서 균열이 발생하였다. 또한 코핑부 내측면에 철근이 노출된 개소가 확인되었다. 탄산화 깊이는 $5.2 \sim 13.2\text{mm}$ 로 조사되었으며, 반발경도는 교각에서 $22.9 \sim 27.7\text{MPa}$ 로 조사되었다. 피복두께는 교각에서 $31 \sim 124\text{mm}$ 로 조사되었다.

3.1.8 H구간 현장조사 결과

인입교 구간으로 C구간과 비슷한 열화 및 결함을 보이고 있었다. 탄산화 깊이는 $3.5 \sim 8.2\text{mm}$ 로 조사되었으며, 반발경도는 PSC 거더에서는 $28.1 \sim 35.5\text{MPa}$ 를, 하부구조에서는 $21.4 \sim 28.0\text{MPa}$ 로 조사되었다. 피복두께는 PSC 거더에서 32.8mm 로, 교각에서는 $58 \sim 112\text{mm}$ 로 큰 편차를 가지고 있었다.

A~H 구간에서 도출된 강도, 피복두께, 균열깊이, 탄산화깊이 등에 대한 실태조사 결과를 측정개소수와 함께 Table 4 및 Table 5에 정리하였다.

한편 Fig. 3에서는 조사된 주요결함 및 열화의 모습을 나타내고 있다.

3.2 실내실험

3.2.1 코어의 강도평가

공용중인 구조물이므로 코어의 크기를 최소화하여 $5 \times 10\text{cm}$ 의 크기로 채취하였으며 KS 규준인 $15 \times 30\text{cm}$ 와의 비교를 위해 보정계수 1.05를 사용하였다. 하부구조에서는 코어를 채취하여 실험하였으나 상부구조는 공용중인 구조물이므로 코어를 입수할 수 없었다. 그러나 동일 배합 및 공용연수를 가진 철거예정 교량에서 상부의 코어를 채취할 수 있었으며, 이를 근거로 강도를 평가하였다. 교각 코핑부에서는 $22.3 \sim 26.7\text{MPa}$ 의 강도를 나타내었으며, 슬래브 상부는 24.0MPa , PSC 거더는 45.2MPa 를 나타내고 있었다. 설계강도를 모두 85% 이상 상회하고 있었으므로 안전성에는 큰 문제가 없을 것으로 평가되었다

Table 4 Summary of field investigation data (strength and cover depth)

District	Strength(MPa) member (mean/C.O.V./n)	Cover depth (mm) member (mean/C.O.V./n)
A	Slab (23.0/-/1) RC Column (27.8/0.28/11)	RC column (185.2/0.16/3)
B	Slab (30.3/-/1) RC T girder (18.1/-/1) RC Column (27.4/0.11/6)	RC column (113.5/0.16/2)
C	Slab (32.7/0.15/5) PSC girder (29.7/0.13/12) RC Column (30.4/0.13/29)	Slab (37.6/0.52/10) PSC girder (31.5/0.79/4) RC Column (113.4/0.46/18)
D	Slab (23.5/-/1) PSC girder (28.4/0.25/4) RC column (28.8/0.17/11)	Slab (3.2/0.38/2) PSC girder (43.2/0.84/5) RC column (116.5/0.33/4)
E	Slab (33.8/0.12/3) PSC girder (33.7/0.13/8) RC column (22.4/0.10/3)	Slab (50/0.55/3) PSC girder (63.6/0.31/3) RC column (159/0.65/4)
F	Slab (31.7/0.14/2) PSC girder (32.0/0.02/5) RC column (27.6/0.14/18)	Slab (67.3/0.27/3) PSC girder (91/0.17/2) RC column (175/0.36/11)
G	RC column (25.0/0.07/6)	RC column (75.6/0.61/3)
H	PSC girder (31.8/0.16/2) RC column (24.7/0.19/4)	PSC girder (32.8/-/1) RC column (85/0.49/3)

Table 5 Summary of field investigation (carbonation depth and crack depth)

District	Carbonation depth (mm) member (mean/C.O.V./n)	Crack depth (mm) member (mean/C.O.V./n)
A	RC column (15.4/0.37/3)	RC column (152.3/0.21/6)
B	RC T girder (9.38/0.23/4) RC column (14.9/0.26/2)	-
C	PSC girder (3.2/0.21/4) Slab (5.6/0.28/4) RC column (12.8/0.32/10)	RC T girder (128/0.25/6) PSC girder (102/0.38/49) RC T column (133/0.35/9)
D	RC T girder (5.4/-/1) Slab (9.2/-/1) RC column (8.7/0.42/4)	RC T girder (13/0.18/3)
E	RC T girder (6.6/0.28/6) PSC girder (5.8/0.12/3) RC Column (9.8/0.22/4)	RC T girder (105/0.32/9) PSC girder (78/0.49/19) RC column (107/0.19/6)
F	PSC girder (8.52/0.36/8) RC column (8.2/0.29/9)	RC column (137/0.39/15)
G	RC column (9.6/0.41/3)	-
H	PSC girder (5.85/0.56/3) RC column (3.65/0.06/4)	-

(KISTEC, 1999). Table 6에서는 코어채취를 통한 강도 평가결과를 나타내고 있다.

3.2.2 염화물 이온 평가

KS F 2515에 의한 시험방법으로 채취된 코어 골재에 부착되어 있는 가용성 염화물 이온량을 평가하였다. 콘크

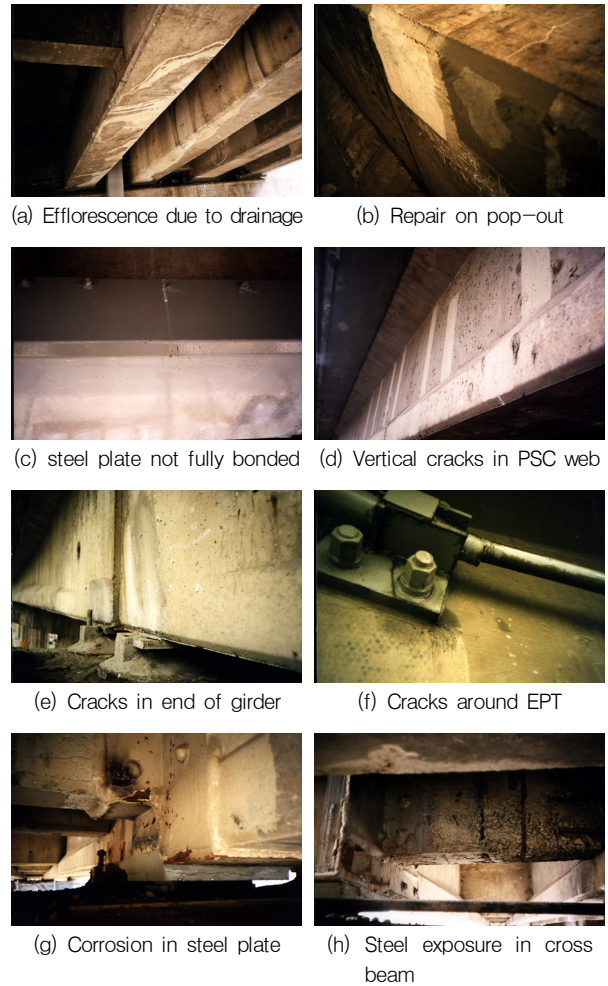


Fig. 3 Defection, damage, and deterioration in the target structures

Table 6 Compressive strength from core

Member	Core strength (MPa) (mean/C.O.V./n)
RC column	(23.2/0.10/4)
PSC girder	(45.2/-/1)
Slab	(24.0/-/1)

리트 표준 시방서에서 규제하는 0.3kg/m^3 보다 모두 낮은 값을 나타내었으며, 해사나 혼입된 염화물로 인한 철근의 부식은 예상되지 않았다. 하부구조에서 채취된 염화물 함유량은 $0.12\sim 0.20\text{kg/m}^3$ 범위였으며, 상부구조에서 채취된 코어에 대한 염화물량은 $0.10\sim 0.12\text{kg/m}^3$ 수준으로 평가되었다.

도로교의 경우 지속적인 용빙제의 영향으로 철근부식이 많이 보고되고 있으나(Koh et al., 2001), 철도교의 경우 염화물에 의한 부식가능성은 매우 낮아 보인다. 부

식가능성을 조사한 현장조사에서도 HCP값은 ASTM에서 제시한 기준과 비교하였을 때, -200mV 이상으로 매우 낮은 부식 확률을 나타내고 있다(ASTM 1999).

3.2.3 탄산화 깊이 평가

탄산화면의 산화를 막기 위해 쪼갬인장시험으로 시편을 쪼갬 뒤 1% 페놀프탈레인 시약을 이용하여 탄산화 실험을 수행하였다. 일반적으로 사용하는 Kisitani (Izumi et al., 1986)식을 기준으로 하여 20년 경과후의 탄산화 깊이를 비교하였다. Table 7에서는 교각으로부터 코어채취를 통한 탄산화 깊이 분포를 나타내고 있으며, 실태조사 결과의 평균값과 함께 Fig. 4에 나타내었다.

실태조사 결과와 마찬가지로 탄산화깊이는 예측값인 Kisitani식에 비하여 낮게 측정되었는데, 실태조건과 다르게 주기적인 강우 등으로부터 노출되어 있어 탄산화 진행이 느리게 평가된 것으로 사료된다(CEB, 1997). 또한 지면으로부터 수미터 위에 존치하여 비교적 낮은 이산화탄소의 침투로 인해 탄산화 깊이가 낮게 평가되었다.

3.2.4 동결융해 저항성 평가

채취된 코어를 대상으로 KS F 2456(급속 동결융해에 따른 콘크리트의 저항실험방법)의 B방법인 기중동결 수중융해 방법을 통해 동결융해 저항성을 평가하였다. Fig. 5에서는 Cycle수에 따른 동탄성 계수비를 나타내고 있다. 모든 시편에서 300 cycle 이후의 내구성 지수가 80

Table 7 Carbonation depth in core and prediction (after 20 years)

Prediction (Kisitani) (mm)	Carbonation depth in core from RC column (mm)			
	A1: 16.5 A2: 10.6	C1: 4.65 C2: 15.1	D1: 16.5 D2: 6.4 D3: 13.2 D4: 8.3	G1: 12.0 G2: 16.0 G3: 12.0 G4: 5.1
16.63	average			
	13.55	9.86	11.1	11.3

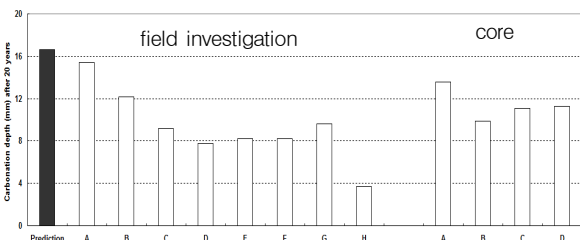


Fig. 4 Carbonation depth from field investigation and core

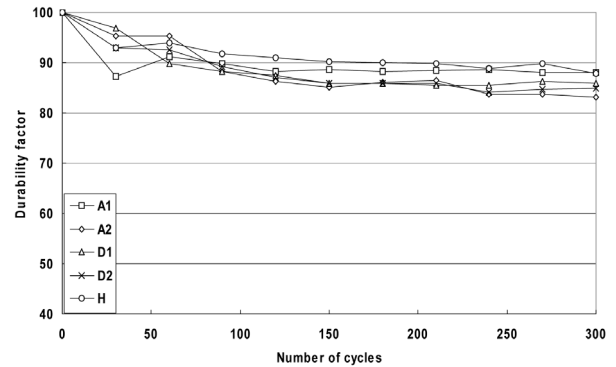


Fig. 5 Results of freezing and thawing test

이상의 값이 평가되었으므로 동결융해에 대한 영향은 크지 않을 것으로 평가되었다. 다만 배수구의 체수, 전주 이설공 이후 되메움을 하지 않은 부위 등에 대해서는 특별한 보수 조치가 필요하다고 판단된다.

4. 대상구조물의 내구성 확보기간 평가

4.1 내구성 확보기간 평가의 개요

RC 구조물의 내구수명을 평가하기 위하여 많은 연구들이 진행되어 왔다. 주요 열화인자인 염해 및 탄산화에 대하여 확률론적인 접근(Kwon et al., 2009; Stewart and Mullard, 2007) 또는 Fick의 법칙에 근거하여 염밀해를 이용한 열화인자 유입 예측 등을 주된 연구범위로 나눌 수 있다(Tang and Joost, 2007; Thomas and Bamforth, 1999). 최근 들어 공극률 및 포화도와 같은 초기재령 거동특성을 반영한 마이크로 모델링을 기본으로, 염화물 침투 또는 탄산화 모델링 등의 연구가 비약적으로 진행되고 있는 추세이다(Song et al., 2006; 2007; Park et al., 2012). 또한 대상구조물과 같이 몇 개의 구간에 걸친 RC 교각에 대하여 건전부와 취약부(타설이음부 및 균열부)의 탄산화 특성을 고려하여 확률론적인 방법으로 사용수명을 예측한 연구도 시도되었다(Kwon and Na, 2011; Kwon et al., 2007, 2008).

그러나 이러한 해석기법들은 고가교 구간과 같이 다양한 손상을 가지고 있는 많은 부재에 직접 적용하기에는 무리가 따른다. 외관조사로는 확산계수에 필요한 정보를 얻기가 쉽지 않으며, 다양한 균열 및 손상부가 전체 부재에 걸쳐서 혼재해 있기 때문이다.

본 연구에서는 1999년 일본 JSCE에서 제안한 내구지

수-환경지수 산정법을 통하여 내구성 확보기간을 평가하도록 한다. 이 기법은 기존의 연구(Seoul Subway, 1999)를 통하여 국내실정에 맞추어 보완되었으며, 내구수명 대신 내구성 확보기간이라는 용어를 사용하도록 하였다. 내구성 확보기간은 공학적 수명의 종료를 의미하는 것이 아니라 적극적인 유지관리가 필요한 시점으로 정의되었다. 내구지수 환경지수 산정법에서는 환경에 대한 열화정도를 시간의 함수로 정량화한 환경지수와 재료, 설계, 시공 분야에서 고려되는 내구적 저항치를 정량적으로 고려한 내구지수로 구성되어 있다. 목표 내구성 확보기간 동안 내구지수가 환경지수보다 큰 값을 유지하도록 고안 되어 있다.

사용기간동안 식 (1)과 같은 기본식을 만족해야 하며 내구지수에 대한 산정식은 식 (2)에, 환경지수에 대한 산정식은 식 (3)에 나타내었다.

$$\frac{D_T}{E_T} \geq r_T \quad (1)$$

$$D_T = D_0 + \Sigma \Delta D_T \quad (2)$$

$$E_T(t) = (E_0 + \Delta E_T) \cdot \sqrt{\frac{(t-10)}{40}} \quad (3)$$

여기서, D_T 는 내구지수, E_T 는 환경지수, r_T 는 내구 안전율(=1.0), D_0 는 기본내구지수(=30), ΔD_T 는 재료, 설계, 시공분야의 내구지수 증분치, E_0 는 기본환경지수(=85), ΔE_T 는 특수한 환경을 고려한 환경지수 증분치, t 는 사용기간을 의미한다. 본 방법은 정성적인 면이 있고 현재 사용하고 있지 않지만, 재료, 시공, 설계상태를 모두 고려하여 결함, 손상 등을 쉽게 내구성 확보기간에 반영할 수 있으므로 위의 방법을 사용하였다.

본 방법으로 시공상태를 가정하여 재료, 설계, 구조 분야의 항목을 산정하고, 서울시내의 환경지수 증분치를 고려하여 환경지수를 도출한 후 두 식이 동일한 값을 가질 때의 시간을 내구성 확보기간으로 정의하였다. Miyamoto (1998)은 내구지수-환경지수 산정법을 이용하여 콘크리트 철도교의 내구수명을 평가하였다. 그러나 이상적인 시공상태를 가정하였으므로 구조형식별의 내구성 확보기간의 평가는 가능하지만 동일한 형식내에서 내구성 확보기간의 차이를 제시하지 못하였다. 본 연구에서는 준공이후

Table 8 Considerations in Durability-Environment index method

Durability Index	Additional Environment index
<i>Material part</i> (116~140) : 9 items Type of cement, Absorption ratio of aggregate, Grading of aggregate, Type of admixtures, Workability and segregation, W/C ratio, Water amount, Chloride amount, Process of concrete manufacturing	Chloride attack(10~70)
	Carbonation (10~70)
<i>Design part</i> (131~147) : 10 items Level of engineer, Cover depth, Detail of steel, Additional bars, Construction joint, Shop drawing, Thermal crack index, Allowable crack width, Type of cast, Type of surface treatment	Freezing and thawing (10~50)
<i>Construction part</i> (97~160) : 9 times Level of engineering, Concrete take-in, Delivery, placing, compaction work, Surface treatment and curing, Fabrication of steel, Form work, Support work, Grout work	Sulfate attack (10~20)

건전한 상태뿐 아니라 열화도를 기준으로 현재의 균열, 결함 및 열화상태를 고려하여 내구성 확보기간을 추정하였다. Table 8에서는 내구지수와 환경지수의 산정항목을 나타내었다.

4.2 해당구역별 내구성 확보기간의 도출

내구지수-환경지수 산정법을 적용하기 위하여, 기존의 설계도서 및 해당 구조물 유지관리 조사서를 분석하였다. 시공시의 정보 및 관련 고려사항을 확보하였으며, 균열폭, 피복두께 감소 등 외관조사를 통하여 얻어진 결과를 활용하였다. 또한 본 구조물이 속해있는 지역의 동해일수와 이산화탄소 농도 등을 고려하여 환경지수 증분치(ΔE_T)를 18로 산정하였다.

내구지수-환경지수 산정법을 통하여 도출된 내구성 확보기간에 대하여 상부구조물을 Table 9에, 하부구조물을

Table 9 Service life in superstructure

District	Minimum (year)	Maximum (year)	Average service life (year)
A	31.2	41.7	39.1
B	28.3	32.8	31.8
C	21.1	39.8	31.1
D	20.2	39.2	30.8
E	28.4	41.2	31.0
F	29.1	41.8	35.3
G	29.1	41.6	34.1
H	21.1	40.6	31.9

Table 10에 나타내었다. 또한 각 구역의 최소 내구성 확보기간을 상하부로 구분하여 Fig. 6에 나타내었다.

전체적으로 하부구조가 상부구조에 비해 내구성 확보기간이 높게 평가되었는데 피복두께가 상부구조보다 크며 균열폭이 작은 것이 주원인으로 평가되었다. 한편 상부구조에서는 C, D, H 구간에서 내구성 확보기간이 20.2~21.1년으로 평가되었는데 여기서 도출된 내구성 확보기간은 구조물의 사용수명이나 구조적인 위험성을 제시하는 시간이 아닌 보수필요시기로 정의되고 있다(Seoul Subway, 1999). 상부구조형식별 내구성 확보기간의 변화는 Table 11에 나타내었는데, PSC 거더의 경우 RC 구조물에 비해 피복두께가 작으면서도 균열이 존재한 것이 가장 낮은 내구성 확보기간을 보인 이유이다. 내구성 확보기간의 도출을 통하여 공용중인 구조물에 대하여 집중적인 보수순서를 정할 수 있다. 평가결과 상부구조물은 D, H, C, B, E, F, G, A로 보수, 보강 순서를 가지는 것이 합리적이며, 하부구조는 D, A, C, B, E, H, F, G로 보수, 보강순서를 갖도록 하는 것이 바람직하다. 특히 D구간에서는 상하부 모

Table 10 Service life in substructure (cold joint and coping)

District	Minimum (year)		Maximum (year)		Average service life (year)	
	Coping	Cold joint	Coping	Cold joint	Coping	Cold joint
A	38.5	47.8	57.8	48.9	55.8	48.8
B	47.2	40.2	57.0	49.0	54.7	47.3
C	38.7	44.7	57.0	49.0	54.4	48.6
D	38.7	32.6	57.0	49.0	55.6	48.1
E	47.2	40.2	57.0	49.0	55.9	48.5
F	57.0	49.0	57.0	49.0	57.0	49.0
G	52.2	49.0	57.0	49.0	56.7	49.0
H	47.2	44.7	57.0	49.0	56.1	48.3

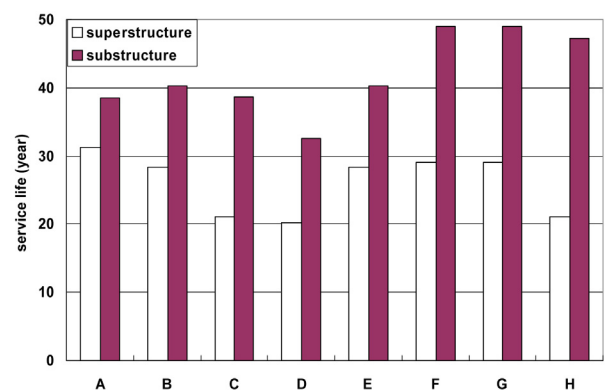


Fig. 6 Service life variation (minimum)

두 내구성이 취약하게 나타났으므로, 공용연수를 고려하여 최우선으로 보수·보강계획을 수립하는 것이 바람직하다.

언급한대로 위의 내구성 확보기간의 추정 결과는 구조물의 현재 균열상태 및 열화정도가 초기부터 있었다고 가정할 경우인데, 이상적인 준공상태를 가정했을 경우 내구성 확보기간은 증가하게 된다. 콘크리트의 품질저하는 없는 것으로 가정하고 PSC거더의 경우 휨균열을 인정하지 않는 점, RC구조물에서도 허용 균열폭을 넘지 않는 점을 고려하면 현재의 상태보다 증가된 내구성 확보기간을 예상할 수 있다.

Fig. 7에서는 상부, 하부구조의 내구성 확보기간의 변화를 나타내고 있는데, 각각 최소 내구성 확보기간과 이상적인 준공상태인 경우를 비교한 것이다. PSC 거더교의 경우 가장 큰 34.4년의 차이를 보이고 있다. 이는 PSC 거더교가 균열폭을 인정하지 않고 배합의 w/c(물-시멘트비) 및 단위수량이 낮으므로 내구적으로 유리하게 평가되었다. 적절한 시공과 유지관리가 병용된다면 가장 긴 내구수명을 확보할 수 있을 것이다. RC 구조물인 경우 비교적 큰 차이를 보이지는 않았다. 하부구조에서도 적절한 콘크리트의 품질관리, 타설이음면 처리, 그리고 균열이 없다고 가정했을 경우, 타설이음부와 코핑부에서 각각 20.3년, 22.7년의 내구성 확보기간의 증가를 나타내고 있다.

Table 11 Service life variation with different superstructure type

Type	Min. service life (year)	Max. service life (year)	Average service life (year)
RCT girder	25.7	41.8	35.4
PSC girder	20.2	40.1	32.1
RC box	31.2	41.7	38.6

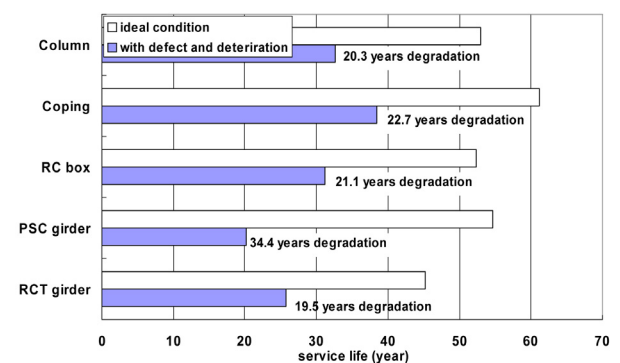


Fig. 7 Changes in service life considering ideal condition

5. 대상 구조물의 문제점 분석 및 결함 패턴화

5.1 형식별 문제점 분석

대상구조물의 형식은 라멘교, RC 박스교, RC T형교, PSC 거더교로서 한 구간에 여러 형식이 혼용되어 있는데 본 연구를 통하여 다음과 같은 형식별 문제점을 발견할 수 있었다. 이런 문제점은 재료, 시공상 문제 뿐 아니라 설계단계에서 고려되지 못한 부분도 있으므로 내구성을 위한 설계(배수, 단면의 형상)와 정확한 시공 그리고 사용 중의 유지관리가 반드시 수행되어야 한다.

도출된 문제점은 RC T형교의 횡균열, RC 박스교의 횡균열, PSC 거더 단부균열, EPT 보강부 균열, PSC 거더 횡균열 등으로 도출되었다.

5.1.1 RC T형교의 문제점 및 해당구간

구간 B, C, D, H에서 주로 발생하였는데, 일정한 간격과 폭으로 횡균열이 발생하였으며, 균열의 길이는 거더의 50% 높이까지 진전한 균열도 있었다. 원인은 거더 복부의 수평보강철근의 부족으로 평가되었으며, 일부 부족한 피복두께의 영향도 간과할 수 없다. 균열은 경간중앙부와 거더 측면에 주로 발생하였으며, 부식으로 가동단이 고정된 부재에서는 균열이 더욱 진전할 가능성이 있는 것으로 조사되었다.

5.1.2 RC 박스교의 문제점 및 해당구간

구간 A에서 발생하였으며, 전경간에 걸친 일정한 간격과 폭(0.3mm)의 균열이 발생하였다. 박스내부의 체수도 유지관리상의 문제점으로 분석되었으며, 균열의 원인은 박스 복부의 수평보강철근의 부족과 진동에 대한 휨강성 부족으로 판단되었다. 박스 내부균열은 판단이 어려우므로 점검구를 개설하여 육안에 의한 내부 확인이 필요하다.

5.1.3 PSC 거더교의 문제점 및 해당구간

A 구간에서 주로 발생된 균열폭은 크지 않지만 균열깊이가 깊은 균열이 PSC 거더 단부에서 발생하였다. 기존에 보수된 단부균열의 보수방법의 효율성이 없는 것으로 평가되었는데, 이는 받침장치의 가동불량, 단부의 수평방향 보강철근 및 단부 스티럽의 배근 오류 등으로 유추할 수 있다. 또한 D구간에 발생한 외부강선보강(EPT) 정착단의 균열은 시공시 마찰력을 초과하는 긴장력을 도입했

거나 거더 콘크리트의 강도 저하가 주원인으로 조사되었다. 외부강선보강 거더에는 균열폭 0.1mm, 길이 380mm 인 단부저면을 통과하는 균열이 발생하였다.

또한 PSC 거더의 횡균열이 C,D 구간에 많이 발생하였는데, 이는 거더 콘크리트의 강도부족과 피복두께를 확보하지 못한 부재가 있기 때문이다. 받침부 가동단의 성능 저하 역시 균열에 영향을 주었으며, 복부의 균열폭은 RC T형교와 마찬가지로 복부로 갈수록 커지는 형태였다. 이는 콘크리트 경화시 비구조적으로 발생한 균열(긴조수축)이 긴장력 도입시 폐합되었다가 공용중 진전된 것으로 예상된다.

5.2 결함부 패턴화

본 절에서는 5.1절의 교량 형식별 문제점을 요약하여 결함을 패턴화하였다. Table 12에서는 결함부 패턴화를 그림과 함께 제시하였다.

Table 12 Defect pattern in railway bridge

Pattern	Reasons	Schematic figure
Cracks in PSC girder end	-Bad condition of shoe (roller) -Bad design of lateral steel in girder end -PSC girder and stirrup in girder end -Cracks in the roller shoe	
Cracks in PSC girder (flexural)	-Insufficient concrete strength and cover depth -Cracks in web and bottom of PSC girder	
Cracks around EPT installation	-Inducing of excessive prestressing force beyond shear friction stress -Impact and vibration during EPT installation -Vibration of girder due to train -Cracks around EPT anchoring	
Cracks in RC box girder	-Insufficient reinforcement in lateral direction -Cracking due to hydration heat and drying shrinkage and propagation due to vibration -Cracks in bottom and web in RC box girder	
Cracks in RC T girder	-Insufficient reinforcement in lateral direction -Insufficient cover depth in bottom of box -Cracks in bottom and web in RC T girder	

5.3 장기 내구성 확보방안 및 결함패턴에 따른 보수

5.3.1 장기 내구성 확보방안 도출

본 연구결과에 따라 휨균열에 대한 보수는 일반적인 균열보수 보수방법을 취해도 유지관리에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나 열화가 심한 PSC 구간에서는 콘크리트 도상 경량화 및 방음판 경량화를 통하여 고정하중을 감소시키는 것이 효과적인 유지관리를 위하여 적용 가능할 것으로 판단된다. 가장 지배적인 열화인 탄산화에 대해서는 피복두께까지 아직 미탄산화 영역이 많았으므로 건전부를 제외한 균열부 및 타설이음부에 대한 탄산화 방지공법 등이 필요한 것으로 나타났다.

5.3.2 결함 패턴에 따른 보수방안 도출

균열이 발생한 개소에 대한 보수는 필수적이며 지속적인 유지관리가 필요하다. 그러나 PSC 거더 단부에 발생한 균열에 대해서는 강판 자켓보강 등을 통하여 균열의 진전을 억제하는 보강안이 필요한 것으로 판단된다. 또한 외부강선 보강구간에 대해서는 응력집중에 의한 균열의 진전이 발생할 수 있으므로 지속적인 관리가 필요하다. 공용중인 구조물이므로 표면접착방식(탄소섬유, 유리섬유)의 보강이 이방향으로 접착되어 PSC 거더 측면에 지압에 의한 추가균열이 발생되지 않도록 해야한다.

6. 결론

공용중인 고가교 구조물에 대한 현장조사를 수행한 결과, 설계당시의 결함, 사용중 손상, 그리고 장기간의 사용을 통한 열화에 대하여 내구성 평가를 수행하였다. 본 연구내에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 8개 구간의 대상 구조물의 현장조사와 실내외 시험결과를 수행한 결과 주요 열화인자는 탄산화 및 동결융해로 조사되었다. 부분적으로 단면손실이 있는 부분을 제외하고는 탄산화 및 동결융해로 인한 구조물 성능저하 영향은 없는 것으로 나타났다.
- (2) 내구지수-환경지수 산정법을 이용하여 전 구역 고가교의 내구성 확보기간을 도출하였다. 상부구조에 대해서는 RC T형교에서는 25.7년, PSC 거더교는 20.2년, RC 박스교에서는 31.2년의 최소 내구성 확보기간을 추정하였다. 하부구조에서는

코핑부에서 38.5년, 교각 타설이음부에서는 40.2년의 최소내구성 확보기간을 추정하였다.

- (3) 내구성 확보기간 평가결과 상부구조물은 보수순서는 D, H, C, B, E, F, G, A로 나타났으며, 하부구조는 D, A, C, B, E, H, F, G로 나타났다. 특히 D 구간에서는 상하부 구조물 모두 내구성이 취약하게 나타났으므로, 공용연수를 고려하여 최우선으로 보수계획을 수립하는 것이 바람직하다.
- (4) 구조물의 형식에 따른 문제점을 분석하여 RC T형교의 횡균열, RC 박스교의 횡균열, PSC 거더 단부균열, EPT 보강부 균열, PSC 거더 휨균열 등 5가지로 결함을 패턴화하였다. 본 구조물 특성상, C,D 구간에 집중된 PSC 거더의 단부균열과 E구간에서 발생한 EPT 보강부의 균열이 중요한 보수, 보강대상으로 판단되었다.

참고문헌

1. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete: C 876-91, Book of ASTM Standards, Section 4, Philadelphia, PA, USA, 1999, pp.1-6.
2. Bungey, J. H., Millard, S. G., Testing of Concrete in Structures, Blackie Academic & Professional, 1996, pp.38-42.
3. CEB Task Group 5.1, 5.2, New Approach to Durability Design, CEB, Sprint-Druck, Stuttgart, 1997, pp.53-62.
4. CEB-FIP. Model Code for Service Life Design. The International Federation for Structural Concrete (fib), Task Group 5.6, 2006, pp.16-33.
5. Izumi, I., Kita, D., Maeda, H., Carbonation, Kibodang Press, 1986, pp.28-64. (in Japanese)
6. Japan Society of Civil Engineering, Guidelines for Durability Design for Concrete Structures(Draft), Concrete Library, 1995, pp.12-58. (in Japanese)
7. KISTEC, Guidelines for Crack Evaluation and Repair/Restrengthening for Reinforced Concrete Structure-Technical Report, 1999, pp.125-138. (in Korean)
8. Koh, K. T., Rue, G. S., Lee, J. S., Kim, D. K., Kim, S. W., Lee, J. H., "An Experimental Study on the Deterioration of Concrete Due to De-icing Salts", Proceeding of KCI, Spring Conference, vol. 13, No. 1, 2001, pp.973-978. (in Korean)
9. Kwon, S.-J., Na, U. J., "Prediction of Durability for RC Columns with Crack and Joint under Carbonation based on Probabilistic Approach", International Journal of Concrete Structures and Materials, vol. 5, No. 1, 2011, pp.11-18.
10. Kwon, S.-J., Na, U. J., Park, S. S., Jung, S. H., "Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-Aged Crack : Probabilistic Approach for Chloride Diffusion", Structural Safety, vol. 31, No. 1, 2009, pp.75-83.
11. Kwon, S.-J., Park, S. S., Nam, S. H., Cho, H. J., "A

- Study on Survey of Carbonation for Sound, Cracked, and Joint Concrete in RC Column in Metropolitan City”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 11, No. 3, 2007, pp.116-122. (in Korean)
12. Kwon, S.-J., Park, S. S., Nam, S. H., Lho, B. C., “A Service Life Prediction for Unsound Concrete under Carbonation through Probability of Durability Failure”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 12, No. 2, 2008, pp.49-58. (in Korean)
 13. Kwon, S.-J., Song, H.-W., Byun, K. J., “Proposal of Durability Performance-Based Design System for Concrete Structures”, Proceeding of KSCE, vol. 1, No. 1, 1998, pp.307-310. (in Korean)
 14. Miyamono, Y., Durability Evaluation for Rail Road Bridge Concrete(Draft), 1998 pp.1-28. (in Japanese)
 15. Park, S.-S., Kwon, S.-J., Jung, S. H., “Analysis Technique for Chloride Penetration in Cracked Concrete Using Equivalent Diffusion and Permeation”, Construction and Building Materials, vol. 29, No. 2, 2012, pp.183-192.
 16. RILEM, Durability Design of Concrete Structures. Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, 1994, pp.28-52.
 17. Seoul Metro, Technical Report for Safety Inspection, 1997.8, pp.108-512. (in Korean)
 18. Seoul Metro, Technical Report for Safety Inspection, Line 1-4 Civil Structure, 1996.8, pp.28-62. (in Korean)
 19. Seoul Subway, Guidelines for Design, Construction, and Maintenance for Subway RC Structure-Chapter 5, 1999, pp.77-134. (in Korean)
 20. Song, H.-W., Kwon, S.-J., “Permeability Characteristics of Carbonated Concrete Considering Capillary Pore Structure”, Cement and Concrete Research, vol. 37, No. 6, 2007, pp.909-915.
 21. Song, H.-W., Kwon, S.-J., Byun, K. J., Park, C. K., “Predicting Carbonation in Early-Aged Concrete”, Cem and Concrete Research, vol. 36, No. 5, 2006, pp.979-989.
 22. Stewart, M. G., Mullard, J. A., “Spatial Time-Dependent Reliability Analysis of Corrosion Damage and The Timing of First Repair for RC Structures”, Engineering Structures, vol. 29, No. 7, 2007, pp.1457-1464.
 23. Tang, L., Joost, G., “On The Mathematics of Time-Dependent Apparent Chloride Diffusion Coefficient in Concrete”, Cement and Concrete Research, vol. 37, No. 4, 2007, pp.589-595.
 24. Thomas, M. D. A., Bamforth, P. B., “Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly Ash and Slag”, Cement and Concrete Research, vol. 29, No. 4, 1999, pp.487-495.

Received : 05/25/2012
 Revised : 09/26/2012
 Accepted : 10/04/2012

요 지

설계시의 결함, 사용 중의 손상, 극한 환경에 장기간 노출에 따른 열화로 인해, 콘크리트 구조물의 성능은 감소된다. 본 논문은 8개 구역을 가진 대도시 철도 고가교에 대한 현장조사를 수행하고 내구성 평가를 수행한 연구이다. 대상 구조물에 대하여, 현장 조사를 수행하여 내구성능을 평가하였으며, 사용상의 문제점을 도출하였다. 또한 내구지수-환경지수 산정법을 이용하여 현 상태의 상부구조 및 하부구조에 대한 내구성 확보기간을 평가하였으며, 이상적인 준공상태를 가정한 조건으로 도출된 내구성 확보기간과 비교하였다. 대상 구조물은 RC T형교, PSC 거더교, RC 박스교, 라멘교 등이 포함되어 있었으며, 각 구조형식에 따른 문제점을 분석하였다. PSC 거더의 단부균열, PSC 거더의 휨균열, 외부강선보강 정착부 균열, RC 박스의 휨균열, RC T형교의 휨균열을 주된 문제점으로 평가되었으며, 이를 패턴화하여 원인을 제시하였다. 본 연구는 각 구간의 열화에 따른 보수시기의 계획에 효과적인 자료로 사용되어질 수 있다.

핵심 용어 : 현장조사, 고가교, 내구성, 내구성 확보기간, 균열