



제 4 장 내구성 조사 및 시험

4.1 개 요

4.2 콘크리트 내구성 조사 및 시험

4.3 내구성 조사 및 시험 결과

제 4 장 내구성 조사 및 시험

4.1 개 요

본 과업 구조물의 상태평가를 적절히 수행하기 위해서는 정밀점검의 목적에 부합하는 내구성 조사 및 시험을 실시하여야 하며, 이를 통해 제3장에서 기술한 외관조사 내용과 함께 구조물의 사용성, 안전성을 검토하고 보수·보강공법 및 유지관리 방안 제시의 기초 자료로 활용할 수 있도록 한다.

내구성 조사 및 시험은 구조물의 특성을 간접적으로 측정하는 방법으로 사용장비 및 측정방법, 적용한계 등을 고려하여 사용법을 충분히 숙지한 자가 검·교정을 필한 장비를 사용하여 실시한다.

4.1.1 내구성 조사 및 시험 내용

- (1) 각 부재별 바닥판, 교대, 교각에 대해 조사를 실시하였다.
- (2) 각 항목별 시험위치 및 측정개소는 외관조사를 실시한 후 부재의 구조적인 안전성과 부재의 외관상태를 고려(손상다수)하여 선정하였다.
- (3) 내구성조사 및 시험은 『안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량편)』에 준하여 실시하였다.

【표 4.1】 내구성 조사 및 시험 내용

구 분	조 사 및 시 험 내 용
1. 반발경도시험	슈미트햄머로 반발경도를 측정하여 콘크리트 강도를 측정
2. 탄산화깊이시험	페놀프탈레인용액으로 콘크리트의 탄산화 진행깊이를 조사

4.1.2 시험 측정일자 및 조사자

【표 4.2】 내구성 조사 측정일자 및 조사자

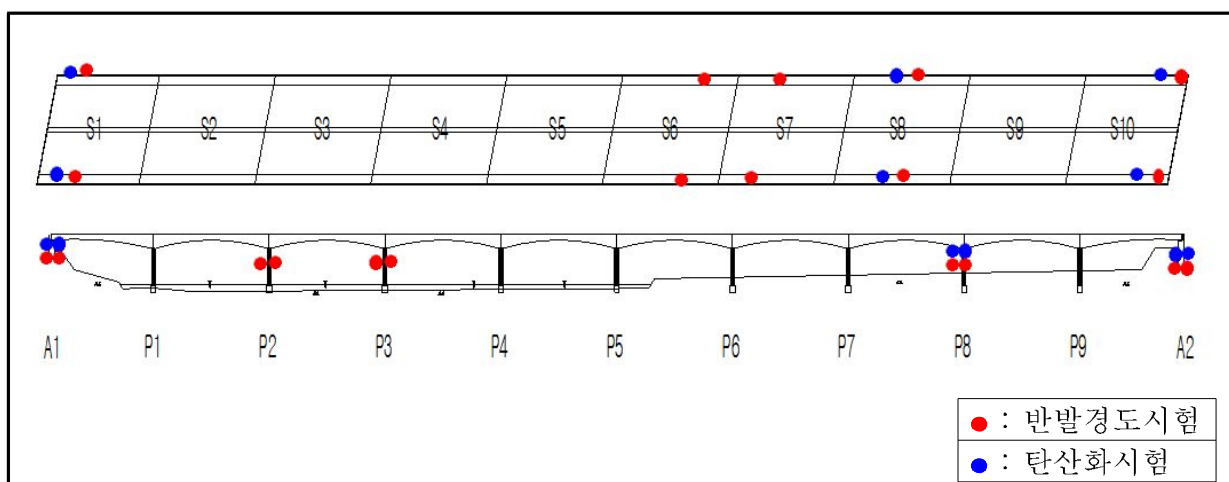
구 분	일 자	조 사 자	비 고
콘크리트 비파괴 시험	2015. 09. 15 ~ 2015. 10. 02	정 행 수 외 3명	-

4.1.3 적용 기준 및 실시 수량

본 교량에 대한 콘크리트 및 강재 비파괴 시험은 “안전점검 및 정밀안전진단 세부 지침(국토해양부, 2013.04)”에 근거하여 위치 및 수량을 결정하였으며, 구조물의 분석이 객관적이며 보편타당하게 이루어질 수 있도록 기준 수량을 모두 만족하였다.

【표 4.3】 내구성 조사 및 시험 실시 수량

구 분		세부지침 기준		세부지침 기준 산출 수량		금회 시험 수량		비 고
		상부구조	하부구조	상부구조	하부구조	상부구조	하부구조	
콘크리트	반발경도시험	◦ 1개소/50m	◦ 1개소/50m	12	12	12	12	
	탄산화깊이시험	◦ 5경간 이내 : 4~6개소 (상부구조 2개소 이상)		2	1	6	6	

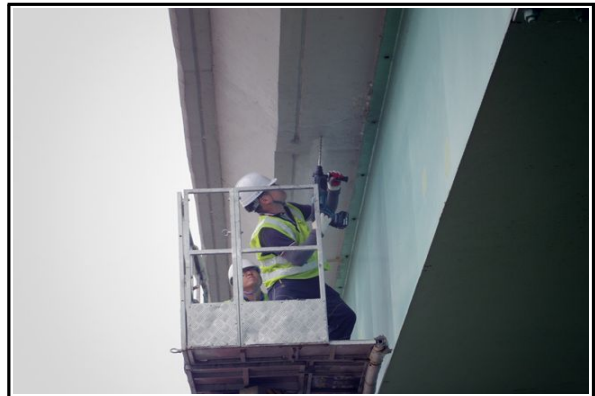


【그림 4.1】 내구성조사 및 시험 위치도

4.1.4 내구성 조사 및 시험현황



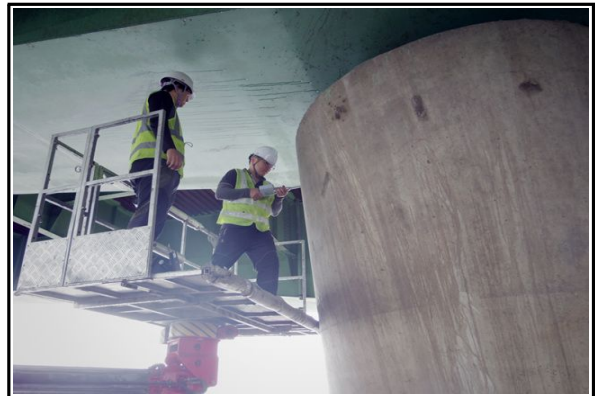
반발경도 시험(바닥판하면)



탄산화깊이 시험(드릴링)



철근탐사 시험(바닥판하면)



반발경도 시험(교각)



철근탐사 시험(교각)



탄산화깊이 시험(드릴링)



고소차를 이용한 상부비파괴 시험



고소차를 이용한 하부비파괴 시험

【그림 4.2】 내구성 조사 및 시험현황

4.2 콘크리트 내구성 조사 및 시험

4.2.1 개요

(1) 반발경도시험

개 요	■ 콘크리트 표면의 반발경도를 측정하여, 콘크리트의 압축강도를 추정하는 검사방법이다. ■ 슈미트해머는 경화된 콘크리트 표면을 타격시, 반발도(R)와 콘크리트의 압축강도(f_c')와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다.																																																																
시험방법	■ 반발경도 측정은 선정된 부위에 그라인딩 작업으로 표면 정리를 한 다음 타격점 상호간의 중·횡 간격을 30mm기준으로 그어 직교되는 부위에 20점 이상을 타격하여 반발경도 값의 산술 평균값을 구하고, 각 반발경도 값이 평균값의 $\pm 20\%$ 범위를 벗어나는 값들은 제외시키고 나머지 값들을 다시 산술평균하여 반발경도를 결정 ■ 보-기둥의 모서리에서는 최소 30~60mm 이격 하고, 측정부재의 최소두께는 반발도의 영향을 고려하여 100mm이상을 원칙으로 함 ■ 측정치는 원칙적으로 정수값을 읽고, 표면 건조상태의 부위를 선정, 측정하여 건조에 따른 보정, 압축응력에 따른 반발도의 보정과 타격 방향에 대한 보정 및 재령에 따른 보정을 적용함	측정기의 기종 선정 ↓ 점검기에 의한 정도확인 ↓ 측정 장소의 확인, 요철제거 ↓ Marker 등에 의한 측정점의 표시 ↓ 측정, 20점 이상의 평균 ↓ 타격 방향, 습윤 및 재령의 보정 ↓ 강도추정식에 의한 압축강도 산출 ↓ 압축강도의 추정 <반발경도법에 의한 강도추정 흐름도>																																																															
보정방법	■ 타격방향에 따른 보정(ΔR_1) <table><tr><th rowspan="2">반발경도 (R)</th><th colspan="4">수평과 이루는 각도</th><th rowspan="2">비고</th></tr><tr><th>+90°</th><th>+45°</th><th>-45°</th><th>-90°</th></tr><tr><td>10</td><td>-</td><td>-</td><td>+2.4</td><td>+3.2</td><td rowspan="6">상향수직 : +90° 하향수직 : -90°</td></tr><tr><td>20</td><td>-5.4</td><td>-3.5</td><td>+2.5</td><td>+3.4</td></tr><tr><td>30</td><td>-4.7</td><td>-3.1</td><td>+2.3</td><td>+3.1</td></tr><tr><td>40</td><td>-3.9</td><td>-2.6</td><td>+2.0</td><td>+2.7</td></tr><tr><td>50</td><td>-3.1</td><td>-2.1</td><td>+1.6</td><td>+2.2</td></tr><tr><td>60</td><td>-2.3</td><td>-1.6</td><td>+1.3</td><td>+1.7</td></tr></table> ■ 콘크리트 재령에 따른 보정(α) <table><tr><th>구분</th><th>7일</th><th>14일</th><th>21일</th><th>28일</th><th>100일</th><th>500일</th><th>750일</th><th>1000일</th><th>2000일</th><th>3000일</th></tr><tr><td>재령(α)</td><td>1.72</td><td>1.36</td><td>1.12</td><td>1.00</td><td>0.78</td><td>0.67</td><td>0.66</td><td>0.65</td><td>0.64</td><td>0.63</td></tr></table> ■ $R_o = R + \Delta R_1$ 여기서, ΔR_1 : 타격방향에 따른 보정값		반발경도 (R)	수평과 이루는 각도				비고	+90°	+45°	-45°	-90°	10	-	-	+2.4	+3.2	상향수직 : +90° 하향수직 : -90°	20	-5.4	-3.5	+2.5	+3.4	30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1	40	-3.9	-2.6	+2.0	+2.7	50	-3.1	-2.1	+1.6	+2.2	60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7	구분	7일	14일	21일	28일	100일	500일	750일	1000일	2000일	3000일	재령(α)	1.72	1.36	1.12	1.00	0.78	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63
반발경도 (R)	수평과 이루는 각도				비고																																																												
	+90°	+45°	-45°	-90°																																																													
10	-	-	+2.4	+3.2	상향수직 : +90° 하향수직 : -90°																																																												
20	-5.4	-3.5	+2.5	+3.4																																																													
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1																																																													
40	-3.9	-2.6	+2.0	+2.7																																																													
50	-3.1	-2.1	+1.6	+2.2																																																													
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7																																																													
구분	7일	14일	21일	28일	100일	500일	750일	1000일	2000일	3000일																																																							
재령(α)	1.72	1.36	1.12	1.00	0.78	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63																																																							
압축강도 추정식	■ 방법 1 : $F_c = (-18.0 + 1.27 \times R_o) \times \alpha$ (MPa) $\Rightarrow$ 일본재료학회 추정식 ■ 방법 2 : $F_c = \{(7.3R_o + 100) \times 0.098\} \times \alpha$ (MPa) $\Rightarrow$ 일본건축학회 추정식																																																																

※ 콘크리트 및 강재 비파괴시험 매뉴얼(한국시설안전기술공단, 2006.12) 참조

※ 콘크리트 내구성 평가절차 수립(국토해양부, 시설안전기술공단, 1999.12) 참조

※ 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(국토해양부, 한국시설안전공단, 2013.04) 참조

(2) 탄산화깊이 시험

개요

- 경화콘크리트는 표면에서 서서히 탄산화 하여 pH값은 12~13에서 8~10이하로 감소한다. 이 과정을 콘크리트의 탄산화라고 한다.

$$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$$

$$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$$

- 콘크리트는 탄산화에 의해 직접적으로 성능이 저하되는 것은 아니며, 단지 탄산화가 문제가 되는 이유는 탄산화가 피복두께를 넘어서 철근의 표면에 도달하게 되면 철근표면을 감싸고 있던 부동태 피막이 파괴되면서 철근표면에 부식이 시작되기 때문이다.

재질 및 강도상의 변화는 거의 없다(약간의 건조수축에 의한 균열)

녹의 발생에 의한 팽창압이 콘크리트 내부에 발생하여 미세한 균열이 발생

철근의 윗면이 팽창하여 균열이 표면까지 연결되고 동해 등의 다른 열화를 유발시킬, 녹물이 보임

철근 윗면의 피복이 탈락되기 시작하고 철근노출이 시작됨. 철근의 단면적 감소

철근의 피복이 탈락하여 철근은 공기와 풍수에 직접 노출됨. 내구성능 저하 가속

<탄산화에 의한 콘크리트 성능저하 과정>

측정 방법

- 코어 공시체 표면 또는 햄머드릴을 이용하여 직경 1~2cm 정도의 구멍을 뚫고 청소 후에 페놀프탈레인 용액을 분무하여 탄산화 깊이를 측정 또는 채취된 코어에 시험
- 페놀프탈레인 1%용액 : 페놀프탈레인 1g + 에탄올 90cc(순도 95%) + 증류수 = 100ml로 제조

시험 순서

- ① 탄산화시험 위치 선정
- ② 페놀프탈레인 1% 용액을 적신 원형시험지 준비
- ③ 페놀프탈레인용액을 적신 원형시험지를 드릴 밑에 두고 드릴링 시작
- ④ 원형시험지가 변색되는 시점에 드릴링 멈춤
- ⑤ 드릴링된 깊이(mm) 측정, 평균값 선정

평가 기준

<탄산화 상태평가 기준>

평가 구분	a	b	c	d	e
탄산화 잔여 깊이	30mm 이상	10 mm 이상 ~ 30mm 미만	0 mm 이상 ~ 10mm 미만	0mm 미만	-
철근부식의 가능성	탄산화에 의한 부식발생 우려 없음	향후 탄산화에 의한 부식발생 가능성 있음	탄산화에 의한 부식발생 가능성 높음	철근부식 발생	-

내구 수명 평가

- t_1 : 탄산화가 철근표면에 도달하는 시점
- t_2 : 철근 부식, 콘크리트 균열 발생 시점
- t_3 : 부재내력이 한계에 달하는 시점

- 탄산화속도 식 : $C = A\sqrt{t}$
여기서, C : 탄산화깊이(mm)
: 경과년수(년)
: 탄산화 속도계수(mm/)
- 탄산화가 철근에 도달하는 시간(t_d) :

$$t_d = \frac{D_c^2}{A^2} - t_0$$

여기서, D_c : 철근까지의 피복두께(mm)

t_0 : 현재의 구조물 경과시간(년)

<콘크리트 내부에서 철근부식의 개념>

※ 콘크리트 및 강재 비파괴시험 매뉴얼(한국시설안전기술공단, 2006.12) 참조

※ 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(국토해양부, 한국시설안전공단, 2013.04) 참조

4.2.2 반발경도시험

대상구조물의 콘크리트 압축강도를 평가하기 위하여, 슈미트 해머를 이용한 반발경도법을 실시하였으며, 시험결과는 설계자료와 비교·분석하였다.

(1) 반발경도법에 의한 콘크리트 압축강도 추정결과

반발경도법에 의한 압축강도 추정은 각 측정부재에 따라 타격방향에 의한 보정을 한 후 콘크리트 압축강도를 추정하였고 일본재료학회와 일본건축학회 계산식을 사용하여 두식의 평균으로 설계강도와 비교하였다.

【표 4.4】 반발경도법에 의한 콘크리트 압축강도 추정결과

구분	부재	측정 위치	추정강도(MPa)		평균 (MPa)	설계강도 (MPa)	강도율 (%)	비 고
			재료학회	건축학회				
상부 구조	바닥판	S1 운동장방향	28.4	28.6	28.5	27.0	105.6	
		S1 포스코방향	30.2	29.6	29.9		110.7	
		S6 운동장방향	29.4	29.1	29.3		108.5	
		S6 포스코방향	29.8	29.3	29.6		109.6	
		S7 운동장방향	28.2	28.5	28.4		105.2	
		S7 포스코방향	28.1	28.4	28.2		104.4	
		S8 운동장방향	28.9	28.8	28.9		107.0	
		S8 포스코방향	26.9	27.7	27.3		101.1	
		S10 운동장방향	28.6	28.7	28.7		106.3	
		S10 포스코방향	34.1	31.8	32.9		121.9	
하부 구조	교대	A1 운동장방향	28.3	28.5	28.4	24.0	118.3	
		A1 포스코방향	28.5	28.6	28.6		119.2	
		A2 운동장방향	28.7	28.7	28.7		119.6	
		A2 포스코방향	28.3	28.5	28.4		118.3	
	교각	P2 운동장방향	28.3	28.5	28.4		118.3	
		P2 포스코방향	28.5	28.6	28.6		119.2	
		P3 운동장방향	28.1	28.4	28.3		117.9	
		P3 포스코방향	27.9	28.3	28.1		117.1	
		P8 운동장방향	27.7	28.1	27.9		116.3	
		P8 포스코방향	28.4	28.6	28.5		118.8	

주) 강도율(%) = (추정강도/설계강도) × 100

반발경도법에 의한 압축강도 추정 결과 상부구조의 강도율은 101.1~121.9%, 하부구조는 116.3~119.6%로 측정되어, 전 구간 모두 설계강도 이상으로 콘크리트의 품질상태는 양호한 것으로 판단된다.

(2) 시험 보고서

【표 4.5】 반발경도 시험보고서

구 분	섬안큰다리교
시험일자	2015. 09. 30 ~ 10. 01.
시험시간	09:00~18:00
구조물에서 시험 영역의 위치	바닥판, 교대, 교각
시험 대상 구조물 또는 표본에 대한 설명	비교적 양호한 상태 (구조적 손상 없음)
콘크리트의 설계 조건	바닥판 : fck=27.0MPa, 교대·교각 : fck=24.0MPa
시험 위치의 표면 상태	양호
시험시의 온도	기온 : 20.3℃ ~ 20.6℃
콘크리트의 재령	재령:3000일 이상
콘크리트 내부함수 상태	기건 상태
반발경도측정기의 종류 및 제품 번호	종류:NR-TYPE, 제품번호: 28191
반발경도측정기의 타격 방향	90°, 0°

(3) 기 점검 및 진단 콘크리트강도 비교·분석

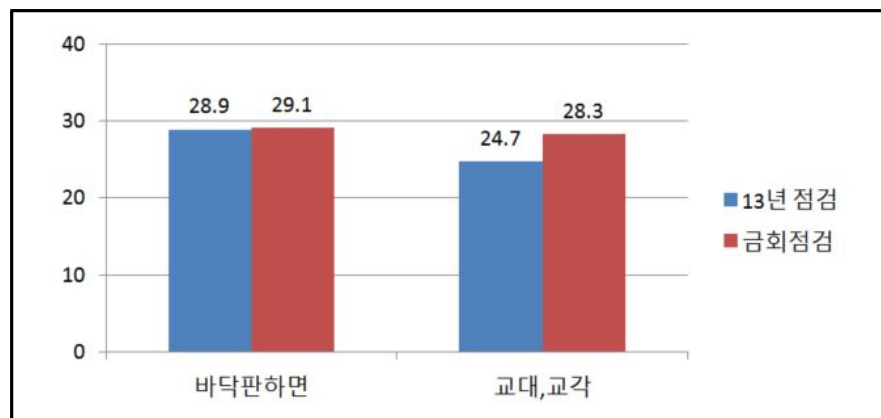
① 비파괴강도

본 교량에 대한 기 점검·진단의 추정압축강도 결과와 금회의 추정압축강도를 비교·분석한 결과 다음과 같다.

【표 4.6】 기 진단 추정압축강도 결과 비교

구분	반발경도법(MPa)		설계강도	비 고
	2013년 안전진단	금회 정밀점검		
바닥판 하면	28.9	29.1	27.0	
교대, 교각	24.7	28.3	24.0	

주) 전차와의 비교는 각각의 측정위치가 일치하지 않아 부재별 측정치의 평균값으로 비교하였다.



【그림 4.3】 기 진단 추정압축강도 자료 비교·분석

② 비교·분석 결과

기 진단에서 실시한 반발결도시험 결과를 금회 측정치와 비교·분석한 결과, 전반적으로 비슷한 콘크리트 강도를 보이고 있는 것으로 분석되었으며, 설계기준강도를 상회하는 양호한 상태로 조사되었다.

4.2.3 탄산화깊이 및 콘크리트 내구수명 추정

(1) 탄산화 깊이 추정

탄산화깊이 시험은 구조물에 매입된 철근을 부식시킬 수 있는 탄산화의 영향을 파악하기 위한 시험으로, 시험용액을 이용하여 콘크리트의 탄산화 진행깊이를 조사한 후 실측한 피복두께 대비 잔여피복두께를 파악하여 구조물의 내구성을 판단하고 상태평가 및 유지관리방안의 기초자료로 활용하였다.

(2) 탄산화 깊이 측정결과

【표 4.7】 탄산화깊이 시험결과

구분	부재	위치	탄산화깊이 (mm)	실측피복 (mm)	잔여피복 (mm)	평가결과
상부 구조	바닥판	S1 운동장방향	15.0	41.0	26.0	b
		S1 포스코방향	15.0	41.0	26.0	b
		S8 운동장방향	17.0	40.0	23.0	b
		S8 포스코방향	17.0	40.0	23.0	b
		S10 운동장방향	12.0	40.0	28.0	b
		S10 포스코방향	14.0	40.0	26.0	b
하부 구조	교대	A1 운동장방향	28.0	108.0	80.0	a
		A1 포스코방향	30.0	108.0	78.0	a
		A2 운동장방향	33.0	103.0	70.0	a
		A2 포스코방향	29.0	103.0	74.0	a
	교각	P8 운동장방향	23.0	90.0	67.0	a
		P8 포스코방향	27.0	90.0	63.0	a

주) 상기 피복두께 측정값은 금회 및 전회, 설계값 중 최소값을 적용함.



【그림 4.4】 탄산화 진행깊이 및 잔여깊이 측정결과

본 구조물의 탄산화깊이 시험결과, 바닥판은 12.0~17.0mm로 측정되었으며, 교대, 교각은 27.0~33.0mm로 측정되었다. 탄산화진행 정도에 따른 잔여피복두께는 바닥판하면은 30.0mm 미만(평가 : b)으로 측정되었고, 하부구조는 모두 30.0mm 이상으로 양호한 상태(평가 : a)로 평가되었다. 이에 따른 콘크리트의 내구수명을 다음과 같이 분석하였다.

(3) 탄산화진행 정도에 따른 콘크리트의 내구수명 예측

본 구조물의 탄산화깊이에 따른 탄산화속도를 계산하여 측정부위에 대한 내구수명을 예측하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 섬안큰다리교 준공년도 : 1995년 (경과년수 : 20년)
- 탄산화 속도계수(A) = 탄산화깊이 / $\sqrt{\text{경과년수(년)}}$
- 수명예측(년) = (실측피복두께 / 탄산화속도계수)²

【표 4.8】 탄산화깊이에 의한 콘크리트 내구연한

시험 위치		탄산화 깊이(mm)	실측피복 두께(mm)	평가	탄산화속도 계수(A)	수명예측 (년)	비 고
바닥판	S1 운동장방향	15.0	41.0	b	3.35	60	
	S1 포스코방향	15.0	41.0	b	3.35	60	
	S8 운동장방향	17.0	40.0	b	3.80	36	
	S8 포스코방향	17.0	40.0	b	3.80	36	
	S10 운동장방향	12.0	40.0	b	2.68	108	
	S10 포스코방향	14.0	40.0	b	3.13	69	
교대	A1 운동장방향	28.0	108.0	a	6.26	163	
	A1 포스코방향	30.0	108.0	a	6.71	135	
	A2 운동장방향	33.0	103.0	a	7.38	90	
	A2 포스코방향	29.0	103.0	a	6.48	130	
교각	P8 운동장방향	23.0	90.0	a	5.14	169	
	P8 포스코방향	27.0	90.0	a	6.04	108	

※ ∞ : 탄산화 예측수명년수와 잔존수명년수가 1000년이상인 경우

콘크리트의 내구수명을 분석해본 결과, 내구연한(탄산화진행이 최외측 철근까지 도달하는데 걸리는 시간)은 상부구조에서 일부 36년이 예측되었지만, 일부 구간에서 피복두께가 얇은 것으로 측정되어 발생한 결과로 판단되며, 탄산화 시험 결과 상·하부 구조 모두 탄산화에 의한 철근부식의 우려는 없는 것으로 판단되나, 본 자료는 이론적인 것이므로 여러 환경적인요소에 대비하여 향후 정밀안전진단 및 정밀점검 시에 지속적으로 탄산화 시험을 실시하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

(4) 탄산화 시험보고서

【표 4.9】 탄산화 시험 보고서

구 분		섬안큰다리교
경과년수		20년
사용 골재의 종류		확인되지 않음
측정면의 종류		드릴링에 의한 콘크리트면
시약		페놀프탈레인 1%용액
측정기구		버니어 캘리퍼스
시약분무 후 측정시간		직 후
탄산화 깊이	측정값	비파괴위치도 참조
	평균값	21.7mm
	최대값	33.0mm

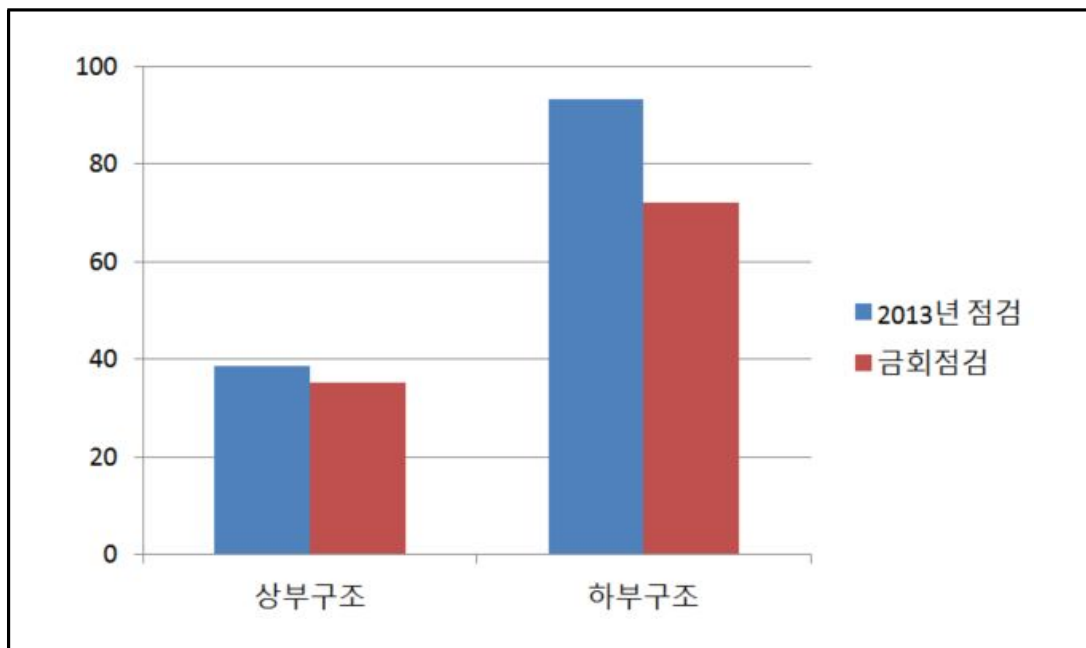
(5) 기 점검 및 진단 탄산화시험 결과 비교·분석

금회 측정한 탄산화깊이와 전회 진단(2013년 진단) 탄산화진행에 따른 잔여피복두께를 비교하여 그 경향을 분석한 결과, 전 시험부재에서 모두 양호한 상태로 평가되었으며, 측정값이 기 점검결과와 다소 상이하나 이는 시험위치 및 수량의 차이로 인한 것으로 판단된다.

【표 4.10】 기 진단 탄산화시험 결과비교

시험 위치		2012년 점검		금회 진단	
		평균깊이	잔여피복	평균깊이	잔여피복
상부구조	바닥판	4.9	38.6	15.0	25.3
하부구조	교대/교각	8.3	93.3	28.3	72.0

주) 전차와의 비교는 각각의 측정위치가 다소 일치하지 않아 부재의 평균값으로 비교하였다.



【그림 4.5】 부재별 탄산화깊이에 의한 콘크리트 잔여피복두께 비교

4.3 내구성조사 및 시험 결과

4.3.1 콘크리트 내구성조사 및 시험 결과 분석

【표 4.11】 콘크리트 내구성조사 및 시험 결과 분석

구 분	시험 결과				결과 분석	
압 축 강 도 시 험 (MPa)	구분	부재명	반발경도법(MPa)	설계강도(MPa)	• 콘크리트 강도조사 결과, 모두 설계기준강도(상부구조 : 27.0MPa, 하부구조 : 24.0MPa)를 상회하는 것으로 분석됨	
	상부	바닥판	29.1	27.0		
	하부	교대, 교각	28.3	24.0		
탄산화 시 험 (mm)	구분	부재명	탄산화깊이	잔여피복	내구연한	• 탄산화에 의한 잔여피복두께는 상부구조(평가 : b), 하부구조(평가 : a)으로 보통 및 양호한 상태로 평가됨
	상부	바닥판	12.0~17.0	23.0~28.0	36년 이상	
	하부	교대, 교각	27.0~33.0	63.0~80.0	90년 이상	