

3.7 콘크리트 내구성조사

3.7.1 개요

본 과업 대상 시설물은 3경간 연속 콘크리트 사장교로 시공되어 있으며, 다이아몬드형 주탑 2기(높이:170.7m)로 구성되어 있으며, 총연장 845m, 너비 12.5m로 시공되어 있다. 각 재료의 역학적, 물리적 화학적 특성을 감안하여 비파괴 조사를 실시하였다.

교량 구조물의 내구성 저하의 대표적인 현상은 콘크리트 탄산화, 철근부식, 균열, 강도 저하, 표면 노후화, 부재의 큰 변형, 동결융해, 누수, 건조수축 등의 현상으로 분류된다. 철근의 부식과 콘크리트의 균열은 독립된 원인에 의해 나타나는 것이 아니고, 그 밖의 열화를 일으키는 원인과도 복합적으로 관계되고 있다.

비파괴 조사는 구조물에 열화손상이 이미 현저하게 진행되었을 경우 열화의 정도 및 그 원인관계를 조사하고 보수·보강의 판정을 하며 아직 열화손상이 없거나 경미한 구조물의 비파괴 조사 실시로 향후 경향을 예측 및 예방하고 예방보전을 검토하기 위한 자료를 수집하는 것을 목적으로 한다.

비파괴 조사의 적용범위는 다음과 같다.

- 비파괴 조사를 대상으로 하는 구조물은 강·콘크리트 구조물에 한한다.
- 비파괴 조사는 구조체를 중심으로 수행한다.
- 비파괴 조사는 조사 시점의 열화상태 뿐만 아니라 구조물의 이력, 주요환경, 열화 원인을 조사하여 향후 열화손상 진행정도를 예측하고, 내용년수와 관련하여 종합적인 안전점검을 수행한다.
- 향후 유지관리 시 금회 재료시험 위치에서의 결과치를 활용하여 비교·분석할 수 있도록 비파괴 조사 위치도를 수록한다.

본 과업은 정밀안전점검이며 콘크리트의 비파괴 조사(반발경도, 탄산화 조사), 품질조사 등을 실시하여 구조물의 내구성과 사용성을 검토하고 상태평가 등의 기초 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

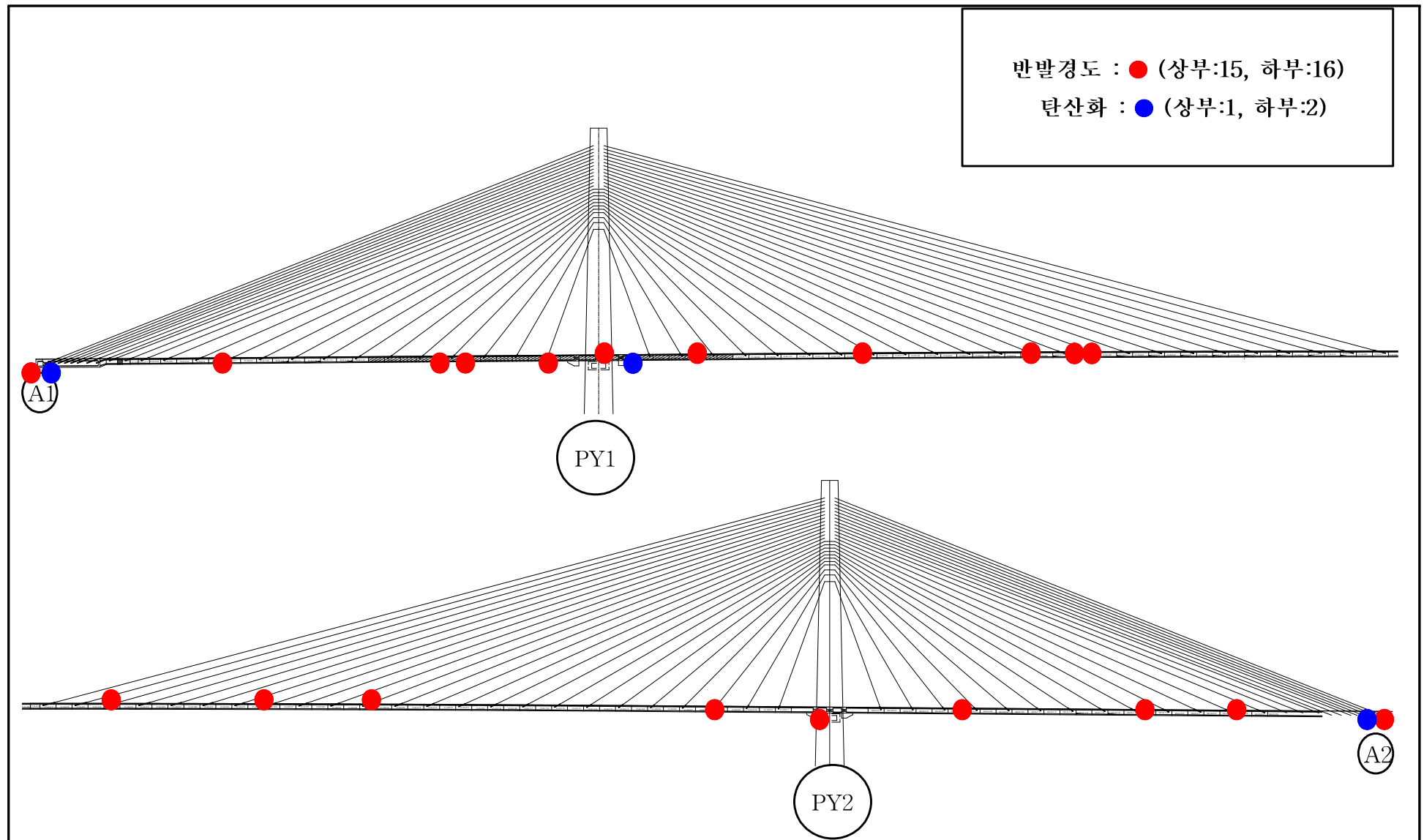
【표 3.7-1】 비파괴 조사 항목

구 분	조 사 항 목		조 사 내 용
콘크리트	강도조사	반발경도	비파괴 시험 장비로 콘크리트 강도를 조사
	탄산화 조사		콘크리트에 드릴을 이용하여 탄산화 깊이를 조사

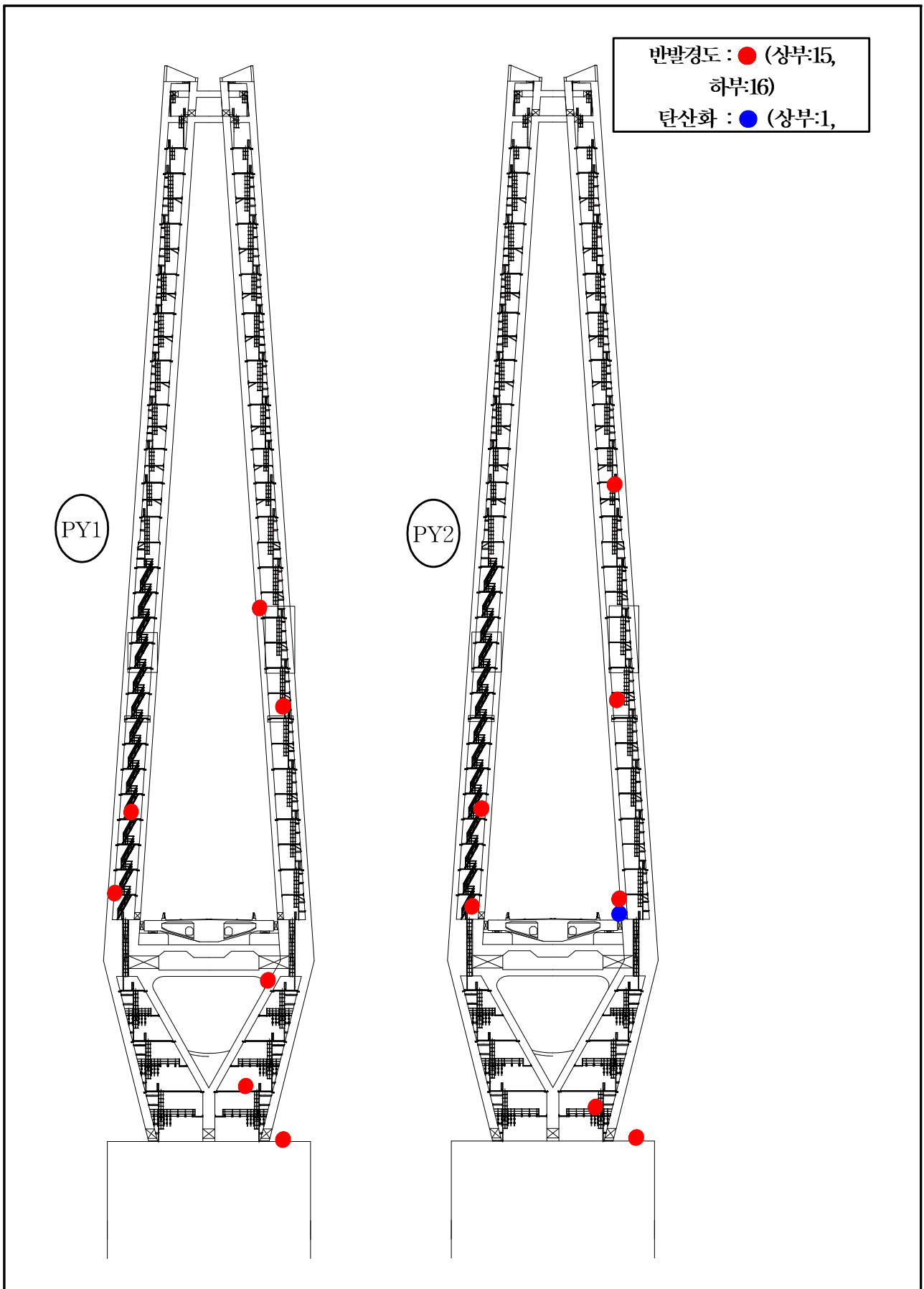
금회 정밀안전점검의 비파괴 재료시험 수량은 『시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부 지침[안전점검·진단 편]』(2021.12)에 따라 기준수량 이상으로 실시하였다.

【표 3.7-2】 비파괴 재료시험 수량

구 분	세부지침 기준		비고
	상부구조	하부구조	
반발경도시험	• 50m 마다	• 연장 50m 마다	본 교량은 300m이상 교량으로 연장비 조정
탄산화 깊이 측정	• 5경간 이내 : 3~6개소 • 5경간 이상 : 6~9개소		3개소
구분	세부지침 기준 수량산출근거		조사기준 수량
상부구조	• 50m 당 1개소 $845/50 \approx 16.9$ 개소		17EA
하부구조	• 50m 당 1개소 $845/50 \approx 16.9$ 개소		17EA
세부지침 기준 수량	• 34개소		상부: 17, 하부: 17
연장비 조정	• 300m 이상일 경우 연장별 조정비에 따라 기본 재료시험의 기준수량을 책임기술자의 판단으로 조정할 수 있다. • 직선보간에 의한 연장별 기준수량 조정비 500m 80%, 1,000m 60%, 2,000m 40%, 4000m 30~20% • 연장비 조정 - 사장교 : $\frac{60-80}{1000-500} \times 845m(\text{사장교연장}) + 60 = 66\%$ $18\text{개소} \times 66.2\% = 11.916 \approx 12\text{개소}$		
최종 산출 수량	• 24개소(상부구조 12개소, 하부구조 12개소)		
금회 시험 수량	• 상부구조 : 총 15개소 • 하부구조 : 총 16개소		



【그림 3.7-1】 비파괴시험 위치도(거더 내·외부 및 교대)



【그림 3.7-2】 비파괴시험 위치도(주탑)

3.7.2 반발경도 시험

가. 개요

반발경도시험은 콘크리트의 표면 경도를 측정하여 이 측정치로부터 콘크리트의 압축강도를 비파괴로 추정하는 검사방법이다. 반발경도를 구하는 방법으로는 슈미트 해머(Schmidt Hammer)법이 가장 널리 사용된다.

콘크리트의 표면 경도를 측정하여, 이 측정치로부터 콘크리트의 압축강도를 비파괴로 추정하는 검사방법이다.

반발경도를 구하는 방법으로는 슈미트 해머(Schmidt Hammer)법이 가장 널리 사용된다. 슈미트 해머로 경화된 콘크리트 표면을 타격 시, 반발도(R)와 콘크리트의 압축강도(F')와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다.

1) 측정기의 점검 및 교정

반발경도측정기는 엄밀한 검사를 하더라도 사용 후에 기계적인 오차가 발생하는 것이 단점이 있으므로 사전에 테스트 앤빌(Test Anvil)에 의한 정기 교정을 실시하여야 한다.

교정방법은 테스트 앤빌에 의한 반발경도측정기(N형)의 반발경도 R은 80을 기준으로 80 ± 2 의 범위를 정상으로 할 경우, 가능한 한 80 ± 1 의 범위이어야 한다. 이 범위의 값을 벗어날 경우 조정하여야 한다. 반발도가 72 정도까지 나타나고 더 이상 반발도가 올라가지 않을 경우에는 다음 식에 의하여 보정하며, 이 이상의 보정값을 필요로 하는 반발경도 측정기는 사용하지 않는 것이 좋다.

$$R = R_0 \times \frac{80}{R_a}$$

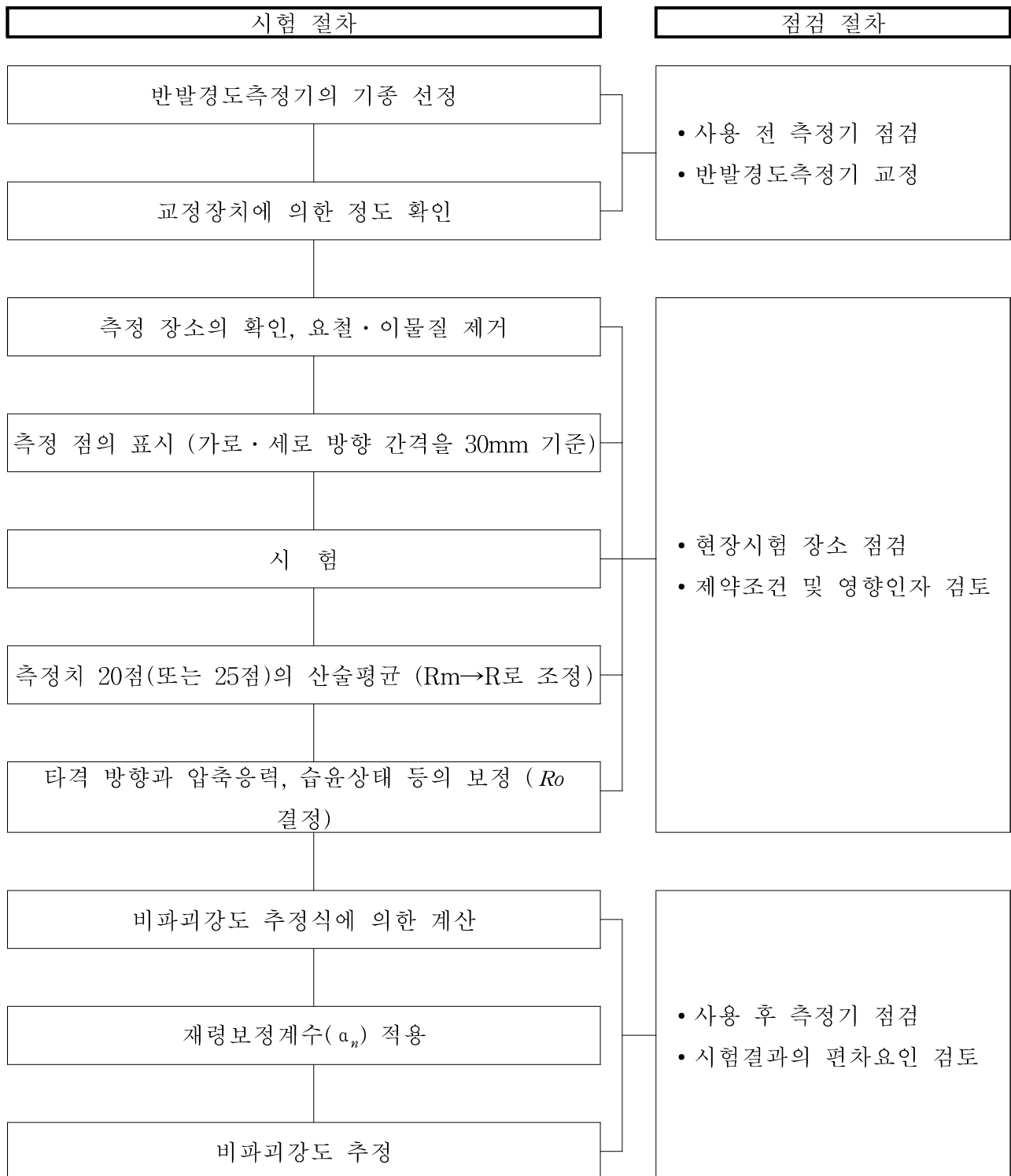
여기서, R_a : 테스트 앤빌에 따른 하향 타격 시($\alpha=90^\circ$)의 반발도

R_0 : 반발도 R의 평균값

반발경도측정기와 테스트 앤빌의 보정 특성인 액면 수치(R_a)는 제작사에 따라 교정 반발경도의 치수의 범위는 차이를 나타내므로 유의하여 사용하여야 한다. 이는 제조사가 다른 반발경도측정기와 테스트 앤빌을 혼용하여 이용할 경우에는 그 결과 값(R_a)이 상이하므로 특별한 주의가 필요하며, 무심코 이를 혼용하여 사용하였을 경우 평가된 콘크리트 비파괴강도의 신뢰성에 문제점으로 나타난다.

나. 반발경도(R)

슈미트 해머로 경화된 콘크리트 표면을 타격 시 내부에 내장된 중추의 반동량을 반발도(R)로 표시하며, 이 반발도의 크기에 따라 콘크리트의 압축강도를 추정한다.



【그림 3.7-3】 반발경도시험 및 측정기 점검 등의 절차

외관조사 결과에 의해서 선정된 측정개소에 대해서 타격점 상호간의 간격은 30mm를 표준으로 종으로 5열, 횡으로 4열의 선을 그어 직교되는 20점을 타격하여 반발경도 값의 산술평균값(R_m)을 구한다.

산술평균값 R_m 에 대해서 RILEM Recommendation에 따라 각 반발경도의 값이 $\pm 20\%$ 의 범위를 벗어나는 값들은 제외시키고 나머지 값들을 다시 산술평균하여 반발경도 R 을 결정

한다. 여기서, 측정된 반발치의 값들이 많은 편차를 보이고 있으면 보편적으로 콘크리트의 품질이 불균질하다고 평가될 수 있을 것이다.

다. 보정반발경도(R_0)

보정반발경도 R_0 은 측정경도 R 에 보정값 $\Delta R1$, $\Delta R2$, $\Delta R3$ 을 더한 값으로 한다.

$$R_0 = R + \Delta R1 + \Delta R2 + \Delta R3$$

여기서, $\Delta R1$: 타격방향에 따른 보정값

$\Delta R2$: 압축부재의 사하중 응력에 따른 보정값

$\Delta R3$: 콘크리트의 습윤상태에 따른 보정값

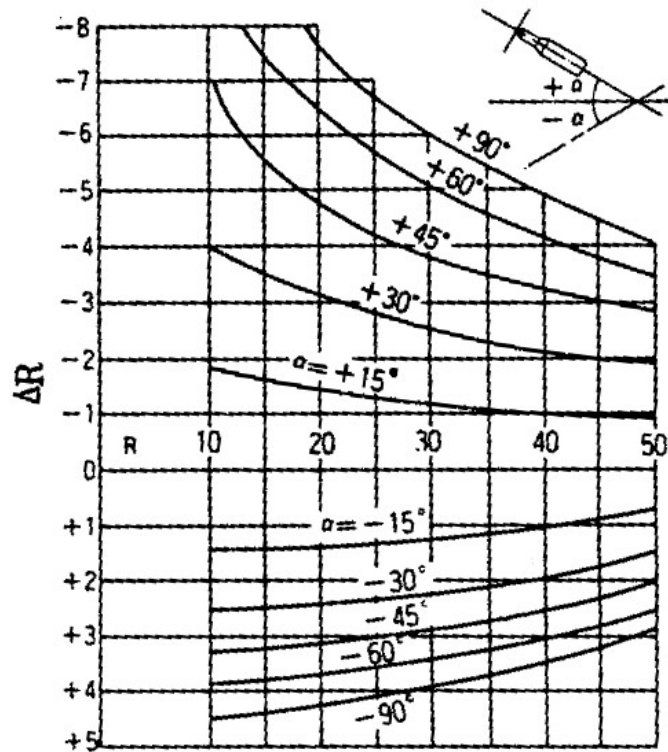
1) 타격 방향에 따른 반발경도의 보정($\Delta R1$)

수평방향의 타격에 의한 측정치가 안정된 값을 나타내지만 타격방향이 다른 경우에는 반발치를 보정해 주어야 한다. 반발경도 보정치는 다음 【표 3.7-3】과 같다.

하향 타격(-90°)의 경우에는 Schmidt Hammer 내부의 해머중량에 의해서 실제보다 반동량이 작아지므로 (+)값으로 수정해 주고, 상향의 타격($+90^\circ$)의 경우에는 반대현상에 의해서 (-)값으로 수정해 주어야 한다.

【표 3.7-3】 반발경도 보정값

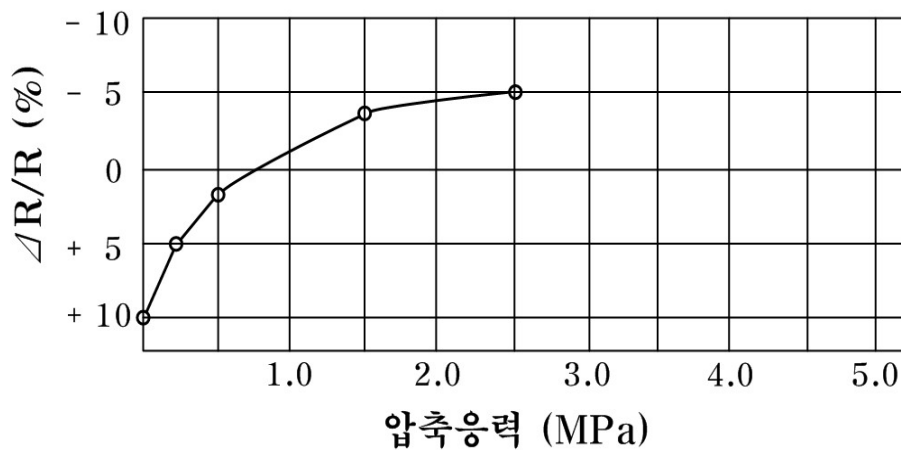
반발경도	보정값				비고
	$+90^\circ$	$+45^\circ$	-45°	-90°	
10			+2.5	+3.4	상향수직타격 $+90^\circ$ 하향수직타격 -90°
20	-5.4	-3.5	+2.4	+3.2	
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1	
40	-3.9	-2.7	+2.0	+2.7	
50	-3.1	-2.0	+1.6	+2.2	
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7	



【그림 3.7-4】 타격 방향에 따른 반발경도 보정치 곡선

2) 압축응력에 따른 반발경도의 보정(ΔR_2)

【그림 3.7-5】는 타격방향과 직각방향으로 압축응력을 받는 부재는 압축응력이 커짐에 따라 반발경도에 의한 압축강도가 실제보다 커진다는 사실이 시험결과 입증되었다. 그 크기는 대략 압축응력이 1 MPa인 경우 $\Delta R_2 = -0.015R$, 2.5 MPa인 경우 $\Delta R_2 = -0.05R$ 이다.



【그림 3.7-5】 압축응력에 따른 반발경도의 보정곡선

3) 콘크리트 습윤상태에 따른 보정(ΔR_3)

콘크리트 표면이 습윤상태에 있으면 기건상태 보다 반발도가 적게 나오게 된다. 따라서, 완전 습윤상태에서는 기건상태를 기준으로 $\Delta R_3 = +5$ 로 보정한다.

라. 압축강도 추정

1) 일반압축강도의 추정

보정반발경도 R_o 로 부터 압축강도(f_c) 의 상관관계를 도출한 제안식은 다음과 같다.

- 일본재료학회식

$$F_C = (-18.0 + 1.27R_o)(MPa)$$

- 일본건축학회식

$$F_c = (7.3R_o + 100) \times 0.098(MPa)$$

- U.S Army식

$$F_C = (-120.6 + 8.0R_o + 0.0932R_o^2) \times 0.098(MPa)$$

2) 고강도압축강도의 추정

최근 고강도콘크리트로 건설되는 현장이 증가하고 있고 고강도콘크리트 현장에서 테스트해머에 의한 강도 평가가 저평가 되는 것으로 보고 되고 있다. 따라서 고강도 콘크리트 현장에서는 다음의 제시한 추정식을 참고하여 평가할 수 있다.

- 과학기술부

$$F_C = (15.2R_o - 112.8) \times 0.098(MPa)$$

- 조효남

$$F_C = 1.973R_o - 22.804(MPa)$$

- 경부고속철도

$$F_C = 1.72R_o - 21.4(MPa)$$

- 국토안전관리원 제안식

$$F_C = \alpha(1.3343R_o + 8.1977)(MPa)$$

- 권영웅 외

$$F_C = 2.304R_o - 38.80(MPa)$$

- 한전기술연구소

$$F_C = 1.429R_o - 0.8057(MPa)$$

- Bashar S. Mohammed

$$F_C = 1.973R_o - 22.804(MPa)$$

※ 고강도 콘크리트의 강도추정식 개발연구, 2014.12-국토안전관리원 발췌

3) 28일 강도의 추정

시일이 경과할수록 콘크리트 구조물은 표면경도가 높아지므로 재령 28일 강도(F_{28}')로 환산하여 압축강도를 추정한다. 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 보정계수 α 는 【표 3.7.4】와 같으며, 3000일 이상의 재령에 대해서는 0.63을 적용한다.

$$F_{28}' = \alpha \cdot F_c$$

【표 3.7-4】 재령계수 α 값

재령(일)	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1000	2000	3000
α	1.55	1.12	1.00	0.87	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.64	0.63

마. 콘크리트 압축강도 추정 결과

육안조사로 콘크리트 표면이 양호한 부위를 선정하고, 표면 요철, 부착물, 이물질 등을 제거 후 슈미트 해머를 사용하여 반발경도를 측정하였으며, 측정결과는 타격방향, 재령 등에 의한 보정을 한 후 비파괴강도 추정에 이용하였다.

화양조발대교는 콘크리트 상부구조 부재의 압축강도가 45MPa 이상으로 국토안전관리원에서 발행한 『고강도 콘크리트의 강도 추정식 개발연구』에 수록된 고강도식(과학기술부, 권영웅 등 7개)으로 적용하였으며, 반발경도 값은 각 측정부재에 따라 타격방향, 표면의 건습상태, 재령 등에 의한 보정을 한 후 콘크리트 강도를 추정하였다.

반발경도법에 의한 콘크리트 비파괴 강도추정 【표 3.7-5 ~ 3.7-11】의 결과는 제안된 추정 압축강도 식들에 의해 도출하였으며, 비파괴강도 값은 표준편차가 비교적 적은 식을 사용하였다.



【사진 3.7-1】 비파괴강도 시험 현황

【표 3.7-5】 반발경도법에 의한 비파괴강도(상부구조)

[MPa]

상부구조 구분 (거더 내외부)	압축강도 추정						
	과학 기술부	권영웅	한전 기술 연구소	조효남	경부 고속철도	국토 안전 관리원	Bashar S. Mhamed
S1-내부-ES-5-바닥판 하면	45.6	56.4	50.1	55.1	47.0	52.6	50.5
S1-내부-ES-20-바닥판 하면	46.4	57.6	50.9	56.1	47.9	53.3	52.1
S2-내부-CS-4-바닥판 하면	42.4	51.5	47.0	50.8	43.3	49.7	44.5
S2-내부-CS-11-NW	40.8	49.0	45.5	48.7	41.5	48.3	41.8
S2-내부-CS-18-LW	40.4	48.4	45.1	48.2	41.0	48.0	41.1
S2-내부-CS-20-바닥판 하면	40.9	49.1	45.6	48.8	41.6	48.4	41.9
S2-내부-CS-20-RW	43.1	52.6	47.7	51.8	44.2	50.4	45.8
S2-내부-CS-29-LW	48.2	60.4	52.6	58.5	50	54.9	56
S2-내부-CS-40-바닥판 하면	42.7	51.9	47.3	51.2	43.7	50	45.1
S2-내부-CS-48-바닥판 하면	42.7	51.9	47.3	51.2	43.7	50	45.1
S3-내부-WS-5-RW	47.0	58.6	51.5	57	48.7	53.9	53.5
S3-내부-WS-20-LW	46.1	57.1	50.6	55.7	47.6	53	51.5
S3-내부-WS-30-바닥판 하면	43.1	52.5	47.7	51.7	44.1	50.3	45.7
PY2(격실1)-NW	42.4	51.5	47	50.8	43.3	49.7	44.5
S2-외부-거더-LF	46.6	57.9	51	56.4	48.2	53.5	52.5
평균	43.9	53.8	48.5	52.8	45.1	51.1	47.4
표준편차	2.4	3.7	2.3	3.2	2.8	2.2	4.6
변동계수	5.5	7.0	4.8	6.1	6.2	4.3	9.7
최대값	48.2	60.4	52.6	58.5	50.0	54.9	56.0
최소값	40.4	48.4	45.1	48.2	41.0	48.0	41.1

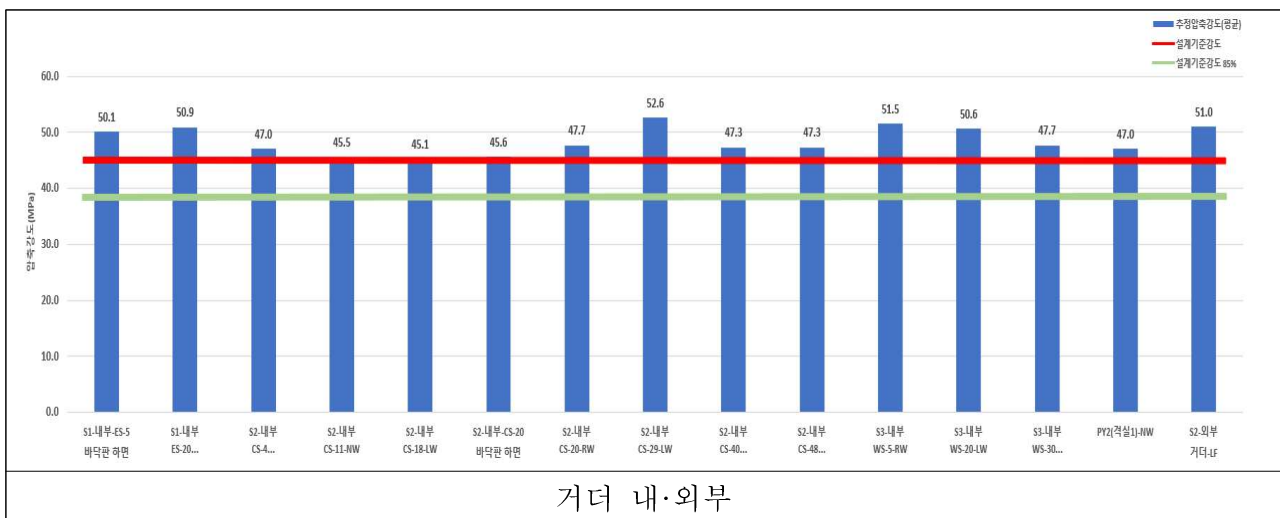
화양조발대교에서 적용된 7가지의 식 중 표준편차는 국토안전관리원 제안식이 가장 표준편차가 적으나, 현재 국토안전관리원식은 아직 추정개발연구단계의 식으로 금회 반발경도시험에서는 표준편차가 2번째로 작은 한전기술연구소의 제안식을 사용하였다.

【표 3.7-6】 설계기준 대비 강도비(상부구조)

[MPa]

상부구조 구분 (거더 내외부)	한전기술연구소 (MPa)	설계기준강도 (MPa)	강도비 (%)	비고
S1-내부-ES-5-바닥판 하면	50.1	45.0	111.3	
S1-내부-ES-20-바닥판 하면	50.9		113.1	
S2-내부-CS-4-바닥판 하면	47		104.4	
S2-내부-CS-11-NW	45.5		101.1	
S2-내부-CS-18-LW	45.1		100.2	
S2-내부-CS-20-바닥판 하면	45.6		101.3	
S2-내부-CS-20-RW	47.7		106.0	
S2-내부-CS-29-LW	52.6		116.9	
S2-내부-CS-40-바닥판 하면	47.3		105.1	
S2-내부-CS-48-바닥판 하면	47.3		105.1	
S3-내부-WS-5-RW	51.5		114.4	
S3-내부-WS-20-LW	50.6		112.4	
S3-내부-WS-30-바닥판 하면	47.7		106.0	
PY2(격실1)-NW	47		104.4	
S2-외부-거더-LF	51		113.3	

※ 추정압축강도는 『콘크리트 및 강재 비파괴시험 매뉴얼』에 수록된 고강도식(과학기술부, 권영웅 등 7개) 중 표준편차가 낮으며 추정압축강도가 다소 작은 한전기술연구원 식을 적용함.



【그림 3.7-6】 반발경도법에 의한 비파괴강도(상부구조 거더 내·외부)

【표 3.7-7】 반발경도법에 의한 비파괴강도(하부구조-주탑)

[MPa]

하부구조 (주탑)	압축강도 추정						
	과학기술부	권영웅	한전 기술 연구소	조효남	경부 고속철도	국토 안전 관리원	Bashar S. Mhamed
PY1(우)-내부-B-1	43.2	52.7	47.8	51.9	44.3	50.5	460.
PY1(우)-외부-기초상면	45.1	55.7	49.7	54.5	46.5	52.2	49.6
PY1(우)-내부-C-7	45.2	55.9	49.8	54.6	46.6	52.3	49.9
PY1(우)-내부-C-11	43.6	53.3	48.2	52.4	44.7	50.8	46.7
PY1(우)-내부-B-4	45.2	55.9	49.8	54.6	46.6	52.3	49.9
PY1(좌)-내부-C-4	44.1	54.1	48.7	53.1	45.3	51.3	47.6
PY1(좌)-내부-C-1	47.9	59.9	52.3	58.1	49.6	54.6	55.3
PY2(좌)-내부-C-4	45.4	56.1	49.9	54.8	46.8	52.4	50.1
PY2(좌)-내부-C-1	45.0	55.4	49.5	54.2	46.3	52	49.3
PY2(우)-내부-B-1	42.9	52.2	47.5	51.5	43.9	50.2	45.4
PY2(우)-외부-기초상면	41.1	49.5	45.8	49.2	41.9	48.6	42.3
PY2(우)-내부-C-18	41.6	50.3	46.3	49.8	42.4	49	43.2
PY2(우)-내부-C-9,10	44.0	53.9	48.6	53	45.2	51.2	47.4
PY2(우측)-외부-주탑출입구	45.2	55.9	49.8	54.6	46.6	52.3	49.9
평 균	44.3	54.3	48.8	53.3	45.5	51.4	48.0
표준편차	1.7	2.6	1.6	2.2	1.9	1.5	3.2
변동계수	3.8	4.7	3.3	4.1	4.2	2.9	6.6
최대값	47.9	59.9	52.3	58.1	49.6	54.6	55.3
최소값	41.1	49.5	45.8	49.2	41.9	48.6	42.3

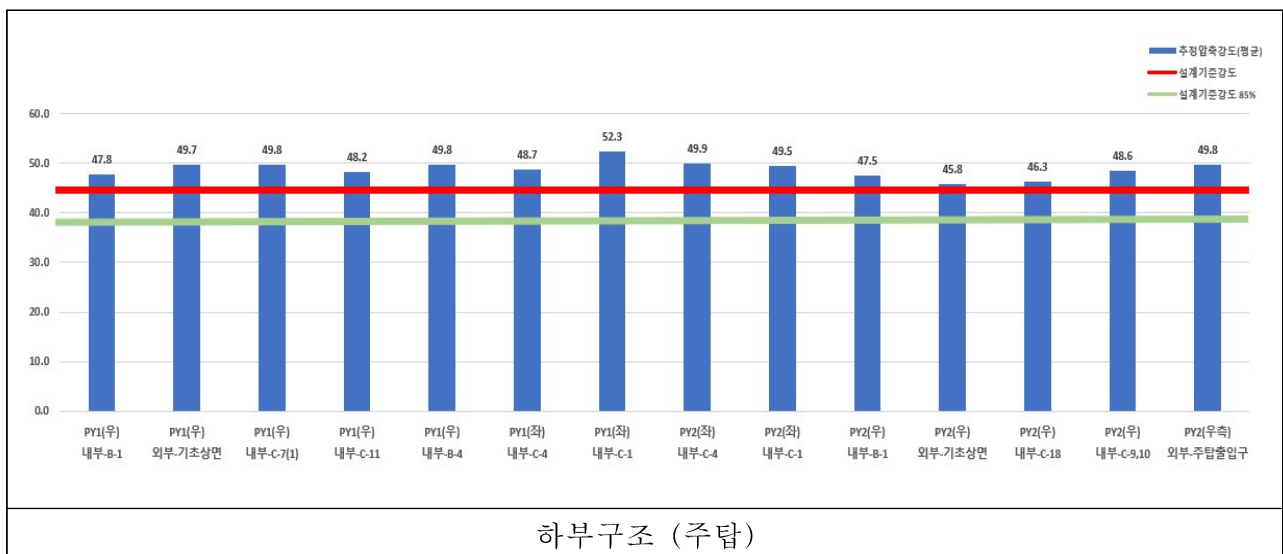
화양조발대교에서 적용된 7가지의 식 중 표준편차는 국토안전관리원 제안식이 가장 표준편차가 적으나, 현재 국토안전관리원식은 아직 추정개발연구단계의 식으로 금회 반발경도시험에서는 표준편차가 2번째로 작은 한전기술연구소의 제안식을 사용하였다.

【표 3.7-8】 설계기준 대비 강도비(하부구조-주탑)

[MPa]

하부구조 (주탑)	한전기술연구소 (MPa)	설계기준강도 (MPa)	강도비 (%)	비고
PY1(우)-내부-B-1	47.8	45	106.2	
PY1(우)-외부-기초상면	49.7	45	110.4	
PY1(우)-내부-C-7(1)	49.8	45	110.7	
PY1(우)-내부-C-11	48.2	45	107.1	
PY1(우)-내부-B-4	49.8	45	110.7	
PY1(좌)-내부-C-4	48.7	45	108.2	
PY1(좌)-내부-C-1(글라인딩X)	52.3	45	116.2	
PY2(좌)-내부-C-4	49.9	45	110.9	
PY2(좌)-내부-C-1	49.5	45	110.0	
PY2(우)-내부-B-1	47.5	45	105.6	
PY2(우)-외부-기초상면	45.8	45	101.8	
PY2(우)-내부-C-18	46.3	45	102.9	
PY2(우)-내부-C-9,10	48.6	45	108.0	
PY2(우측)-외부-주탑출입구	49.8	45	110.7	

※ 추정압축강도는 『콘크리트 및 강재 비파괴시험 매뉴얼』에 수록된 고강도식(과학기술부, 권영웅 등 7개) 중 표준편차가 낮으며 추정압축강도가 다소 작은 한전기술연구원 식을 적용함.



【그림 3.7-7】 반발경도법에 의한 비파괴강도(하부구조-주탑)

【표 3.7-9】 반발경도법에 의한 비파괴강도(하부구조-교대)

[MPa]

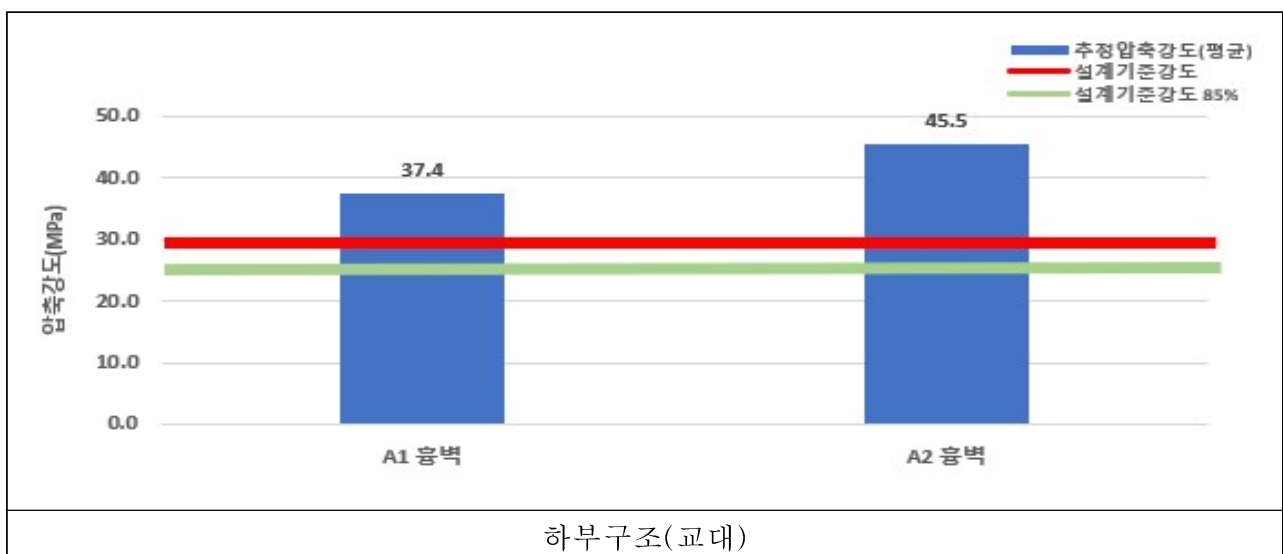
하부구조 (교대)	압축강도 추정						
	과학 기술부	권영웅	한전 기술 연구소	조효남	경부 고속철도	국토 안전 관리원	Bashar S. Mhammed
A1-홍벽	32.3	35.9	37.4	37.5	31.7	40.7	29.9
A2-홍벽	40.7	48.9	45.5	48.7	41.4	48.3	41.7
평 균	36.5	42.4	41.5	43.1	36.6	44.5	35.8
표준편차	4.2	6.5	4.1	5.6	4.9	3.8	5.9
변동계수	11.5	15.3	9.8	13.0	13.3	8.5	16.5
최대값	40.7	48.9	45.5	48.7	41.4	48.3	41.7
최소값	32.3	35.9	37.4	37.5	31.7	40.7	29.9

【표 3.7-10】 설계기준 대비 강도비(하부구조-교대)

[MPa]

하부구조 (교대)	한전기술연구소 (MPa)	설계기준강도 (MPa)	강도비 (%)	비고
A1-홍벽	37.4	30.0	124.6	
A2-홍벽	45.5	30.0	151.7	

※ 추정압축강도는 『콘크리트 및 강재 비파괴시험 매뉴얼』에 수록된 고강도식(과학기술부, 권영웅 등 7개) 중 표준편차가 낮으며 추정압축강도가 다소 작은 한전기술연구원 식을 적용함.



【그림 3.7-8】 반발경도법에 의한 비파괴강도(하부구조-교대)

【표 3.7-11】 화양조발대교의 추정강도

[MPa]

구 분		‘22년 정밀점검 비파괴강도	‘22년 평균추정 강도(A)	설계기준 강도(B)	(A/B)×100(%)
상부구조	거더내부	45.1~52.6	48.5	45.0	100.2~116.9
하부구조	주탑	45.8~52.3	48.8	45.0	101.8~116.2
	교대	37.4~45.5	41.5	30.0	124.6~151.7

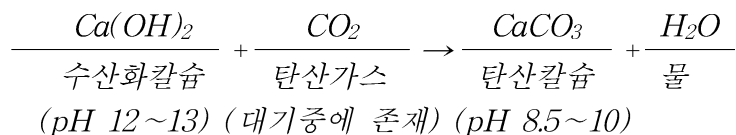
※ 추정압축강도는 『콘크리트 및 강재 비파괴시험 매뉴얼』에 수록된 고강도식(과학기술부, 권영웅 등 7개) 중 표준편차가 낮으며 추정압축강도가 다소 작은 한전기술연구원 식을 적용함.

비파괴시험에 의한 압축강도 평가결과, 상부구조의 콘크리트는 설계기준강도의 100.2~116.9%, 하부구조 주탑 및 교대는 101.8~151.7%로 콘크리트구조기준(2012)에서 제안하고 있는 구조적 설계강도 100%이상의 강도를 보여 설계기준강도를 만족하는 것으로 확인되어 콘크리트 강도에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

3.7.3 탄산화 깊이 측정

가. 개 요

탄산화는 콘크리트 구조물의 열화와 관련하여 현재 주목받고 있는 현상 중 하나이다. 여기서 탄산화란 굳은 콘크리트와 공기 중의 탄산가스가 반응하면서 알칼리성을 잃게 되는 현상을 일컫는다. 즉 건전한 콘크리트는 경화 시멘트 풀의 수산화 화합물중 약 25%를 차지하는 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 영향으로 pH가 13~12인 강알칼리성을 나타내나 탄산가스와 수산화칼슘이 반응하면 탄산칼슘(CaCO_3)으로 환원되면서 표면부터 콘크리트의 pH가 서서히 10이하로 낮아지는 현상이다.



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. 이와 같이 탄산화에 의한 철근콘크리트 성능저하 과정은 다음과 같다.

	STEP 1 정상, 재료 및 강도상의 변화는 거의 없다. (약간의 건조수축에 의한 균열)
	STEP 2 녹의 발생에 의한 팽창압이 콘크리트 내부에 발생하여 미세한 균열이 발생한다.
	STEP 3 철근의 윗면이 팽창한다. 균열이 표면까지 연장되어 공기와 수분의 침입이 격화되어 동해 등의 다른 열화도 유발시키며 녹물이 보인다.
	STEP 4 철근 윗면의 피복이 부수어져 떨어지고, 철근의 노출이 시작된다. 철근단면적이 감소한다.
	STEP 5 철근 윗면이 거의 없어지고 철근은 공기 중에 직접 노출된다. 내구성능은 없다.

【그림 3.7-9】 탄산화에 의한 콘크리트 성능저하

탄산화 현상은 자체적으로는 콘크리트의 물리적 또는 기계적 성능저하에 큰 영향을 미치지 않으나, C-S-H(규산칼슘 수화물)의 결합조직 약화에 따른 강성저하, 탄산화 된 콘크리트의 취성화, 미세 공극용액의 알칼리 농도변화, 철근표면의 부동태 알칼리 피막파손 및 철근부식 등의 손상을 부수적으로 동반하므로 구조물의 내구성 등을 감소시키는 주요 인자로 알려져 있다. 이와 같이 탄산화에 의한 철근 콘크리트 성능 저하 과정은 【그림 3.7-9】와 같다.

나. 탄산화 속도에 미치는 요인

탄산화 속도에 영향을 미치는 요인으로는 환경조건(대기 중의 탄산가스농도, 온도, 습도, 마감재 등)을 주원인으로 하는 외적요인 및 콘크리트 자체의 성능, 품질(함수율, 강도, 시멘트의 종류, 배합조건, 시공조건 등)을 주원인으로 하는 내적요인에 의해 복합적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 대표적인 원인을 정리하면 다음과 같다.

【표 3.7-12】 탄산화 속도에 영향을 미치는 요인

구분	영향 인자	탄산화 속도
내적 요인	시멘트의 종류	• 수화반응이 느릴수록 탄산화 속도가 빠름 • 조강 포틀랜드시멘트 < 보통 포틀랜드시멘트 < 중용열 포틀랜드시멘트
	골재의 종류	• 투기성이 큰 골재일수록 탄산화 속도가 빠름 • 강모래, 강자갈 < 강모래, 화산골재 < 화산골재
	계면활성제 종류	• 동일 물-시멘트비, 동일 슬럼프라면 탄산화 속도와 무관함
	압축강도	• 압축강도가 낮을수록 탄산화 속도가 빠름
	물-시멘트비	• 물-시멘트비가 증가하면 탄산화 속도가 빠름
	시공 정밀도	• 다짐이 불충분할수록 탄산화 속도가 빠름
	콘크리트 결함부	• 균열부위, 이음부, 손상부위 등에서 탄산화 속도 빠름
환경 조건	온도	• 온도상승 시 탄산화 속도 빠름 • 20~50℃ 사이에서는 영향이 크지 않음
	이산화탄소 농도	• 농도가 클수록 탄산화 속도 빠름 • 탄산가스농도 3~10% 사이에서 상승비율이 큼
	습도	• 상대습도 50~70%에서 탄산화속도가 최대
	실내, 실외	• 실내의 탄산화속도가 빠름.

다. 탄산화 속도식

대기 중의 탄산가스에 의한 콘크리트표면으로부터의 탄산화의 진행을 경과시간의 함수로서 표현한 것이 탄산화 속도식이다. ‘탄산화가 정상상태에서 탄산가스의 콘크리트내부 확산에 따라 생긴다고 가정하면, 탄산화깊이 C는 경과시간 t의 평방근에 비례한다’라고 하는 다음의 식이 도출된다. 이것은 통상, $\sqrt{t}$ 법으로 불리며, 가장 일반적으로 사용되고 있다.

$$C = A \times \sqrt{t}$$

여기서, C : 탄산화깊이 (mm)
A : 탄산화속도계수 (mm/ $\sqrt{t}$)
t : 재령(년)

- 탄산화 속도계수 = 탄산화 깊이 / $\sqrt{\text{재령(년)}}$
- 수명예측(년) = (철근피복 / 탄산화 속도계수)²
- 잔존수명예측(년) = 수명예측년수 - 경과년수

라. 탄산화깊이의 측정

본 과업에서는 일반적으로 현장에서 간편하게 이용되는 페놀프탈레인법 (페놀프탈레인은 pH 지시약의 일종으로 1% 알칼리용액)을 이용하여 콘크리트의 탄산화 진행 정도를 측정한다.

콘크리트 구조물에서의 탄산화 시험은 구조체에서 채취한 코어 또는 구조체 안전 (내하력 등)에 영향을 미치지 않는 부위를 선정 일부분을 파손하여 노출된 대상 측정면에 가능한 한 빨리 분무하여 탄산화 깊이를 측정하며, pH 8.2~10.0 이상의 알칼리층에서 보라색으로 발색하며 중성층에서는 무색으로 나타나게 되는데, 탄산화 진행 깊이의 측정은 콘크리트 표면에서 발색점까지의 깊이를 버니어 캘리퍼스를 사용하여 측정한다.

마. 탄산화 상태 평가 기준 및 결과

탄산화 상태평가 기준은 다음과 같다.

【표 3.7-13】 탄산화 상태평가 기준

기 준	탄산화 잔여깊이	철근부식의 가능성
a	30mm이상	• 탄산화에 의한 부식발생 우려 없음.
b	10mm이상 ~ 30mm미만	• 향후 탄산화에 의한 부식발생 가능성 있음.
c	0mm이상 ~ 10mm미만	• 탄산화에 의한 부식발생 가능성 높음.
d	0mm미만	• 철근부식 발생
e	-	-



【사진 3.7-2】 탄산화 시험전경

바. 탄산화 깊이 측정결과

1) 화양조발대교 탄산화깊이 측정결과

본 구조물에서는 측정위치에 타정공구 및 드릴을 이용하여 국부적으로 파손시킨 면에 페놀프탈레인 용액의 지시약을 살포하여 색의 변화로 콘크리트의 탄산화 진행 깊이 정도를 측정하였다.

【표 3.7-14】 탄산화깊이 측정 결과

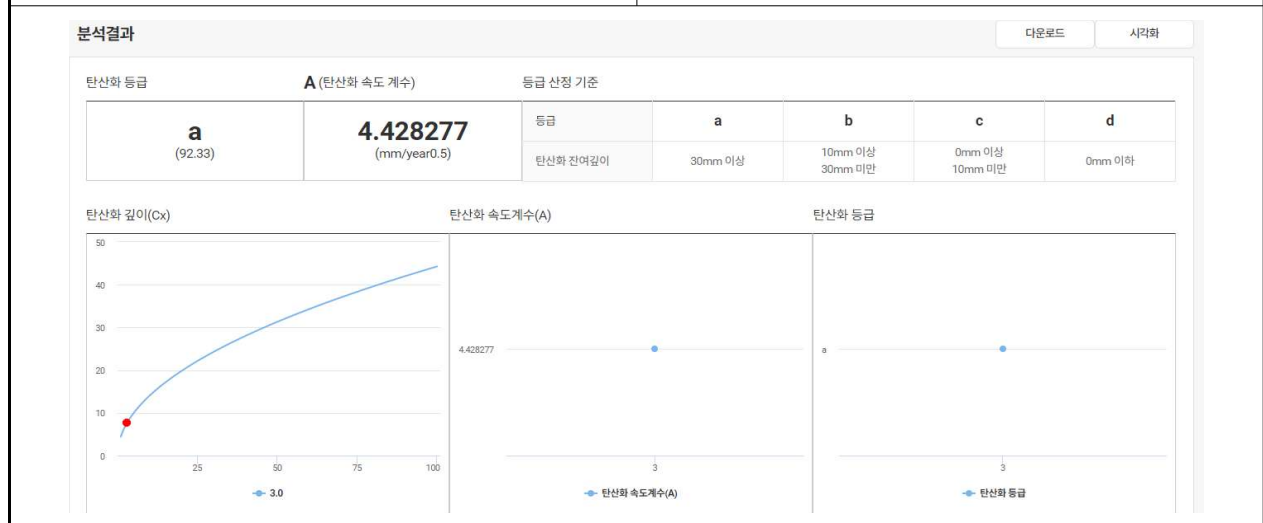
구분	위치	탄산화 깊이 (mm)	피복두께 (mm)	잔여깊이 (mm)	속도계수 (A)	잔존수명 예측(년)	등급	비고
화양 조발 대교	A1 홍벽	7.67	100	92.33	4.95	100년 이상	a	
	S2 거터 외부	4.33	95	90.67	2.31	100년 이상	a	
	PY2(우측) 외부	1.00	150	149.0	0.50	100년 이상	a	

2) 시설물 내구성 예측 서비스를 활용한 내구성 예측

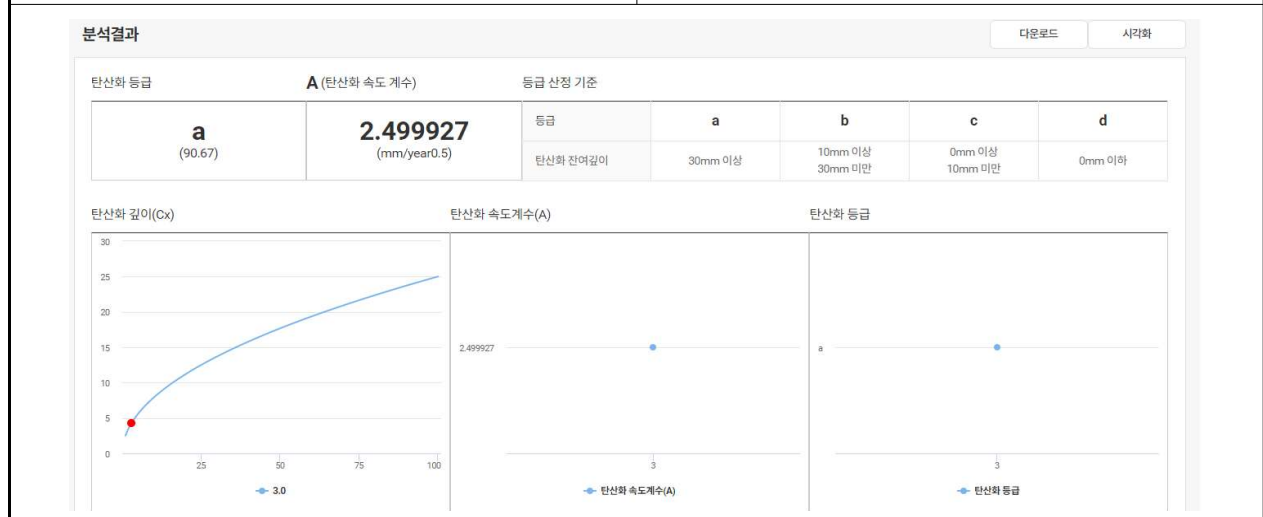
국토안전관리원에서 시행하고 있는 시설물 내구성 예측 서비스를 활용하여 공용년수 증가에 따른 탄산화의 향후 추이를 예측해 보았다. 화양조발대교의 상하부 구조를 대상으로 하였으며, 내구성 예측 서비스를 활용하여 100년 후 탄산화 깊이 및 탄산화 속도계수를 예측하였다. 그 결과는 다음과 같다.

【표 3.7-15】 탄산화 시험에 의한 내구성 예측(계속)

화양조발대교 - A1 흉벽	
설계 피복두께(mm)	100
탄산화 진행깊이(mm)	7.67
잔여깊이(mm)	92.33
탄산화 속도계수	4.95
공용년수	3년
잔존수명	100년 이상
평가	a



화양조발대교 - S2 거더 외부	
설계 피복두께(mm)	95
탄산화 진행깊이(mm)	4.33
잔여깊이(mm)	90.67
탄산화 속도계수	2.31
공용년수	3년
잔존수명	100년 이상
평가	a



【표 3.7-15】 탄산화 시험에 의한 내구성 예측

화양조발대교 - PY2(우측) 외부	
설계 피복두께(mm)	150
탄산화 진행깊이(mm)	1.0
잔여깊이(mm)	149.0
탄산화 속도계수	0.50
공용년수	3년
잔존수명	100년 이상
평가	a

탄산화 등급		A (탄산화 속도 계수)	등급 산정 기준			
a (149)	0.57735 (mm/year0.5)	등급	a	b	c	d
		탄산화 잔여깊이	30mm 이상	10mm 이상 30mm 미만	0mm 이상 10mm 미만	0mm 이하

탄산화 깊이(Cx)

탄산화 속도계수(A)

탄산화 등급

3) 점검의견

콘크리트 탄산화깊이 측정결과 각 부재에 대하여 a 등급으로 평가 되었다.

본 교량은 콘크리트 탄산화 진행은 미소한 것으로 판단되며 철근부식의 우려는 없는 양호한 상태로 분석되었다. 또한 탄산화속도계수를 통한 잔존수명은 100년 이상으로 평가 되었으며 종합적인 판단 결과 콘크리트의 전반적인 내구성은 양호한 것으로 조사되었다.

3.7.4 염화물 함유량 조사

콘크리트가 탄산화 되거나 염화물이 침투하게 되면 철근 주위의 산소 차단 역할을 하는 부동태막이 파손되고, 강재 표면이 활성화되면 철근의 부식이 시작된다. 일반적으로 부재의 단면이 작으면서 철근량이 많고 슬럼프가 큰 콘크리트를 사용하는 구조물에서는 염분에 의한 철근 부식이 일어나기 쉽다.

염화물에 의하여 발생하는 콘크리트의 염해는 강재부식 등 구조물에 심각한 문제를 일으킬 수 있으므로 콘크리트 구조물의 건전성 평가 시 염해에 대한 평가가 필요하다. 염화물 함유량 분석은 주철근 깊이까지 깊이별로 단계를 구분하여 염화물 분포를 파악함을 원칙으로 한다.

가. 염화물에 의한 성능저하 특성

철근의 녹은 다공질에 흡수성이 있어 녹이 두껍게 형성되어도 부식을 억제하는 효과는 적으며, 녹슨 부분은 원래체적의 약 2.5~7배 팽창하기 때문에 피복 부분에 균열을 일으키고, 이에 따라 부식 작용은 더 가속화된다.

- 1) 염화물 함유량이 어느 한계를 넘으면 철근의 부식속도가 가속화된다.
 - 콘크리트가 치밀하고 pH11 정도 이상의 알칼리성을 유지하고 있으면 소량의 염화물이 존재해도 부식은 매우 느리지만, 콘크리트 시방서에 규정된 염화물 이온량 0.3kg/m^3 , 염화나트륨 함유량 0.04% 정도를 넘으면 철근부식의 가능성이 커진다.
- 2) 철근 부식 속도는 콘크리트의 알칼리성, 건습의 정도, 염화물 함유량의 다소에 따라 변화한다.
 - 콘크리트가 탄산화 되어도 건조한 환경에서는 부식속도는 느리다.
 - 탄산화 되고 습도가 적당하면 염화물이 침입하지 않아도 철근은 부식한다.
 - 염화물 이온량이 어느 정도 이상 존재하면 콘크리트가 알칼리성이라도 철근은 부식한다.
 - 탄산화 되고 피복두께가 얇으면서 적당히 습해 있으면 부식속도는 매우 빠르다.
- 3) 철근의 부식 상태를 외부에서 비파괴 시험으로 정확하게 판정하는 것은 어렵다.
 - 자연전위 변화로부터 철근의 부식 정도를 추정하는 방법이 개발되어 있지만 철근량이 많은 실제 구조물의 경우는 측정이 곤란하다.
- 4) 철근이 상당히 부식되고 나서 콘크리트 표면에 균열이 발생한다.
 - 염화물 이온에 의한 부식은 구조물 준공 후 빠르면 2~3년에 철근에 따라 균열이 발생한다.
- 5) 철근의 부식은 피팅(pitting)상으로 되는 경우가 많다.
 - 염화물에 의한 철근의 부식은 군데군데 피팅상으로 생기며, 철근의 단면결손이 피팅상 부식의 부분을 대상으로 한다.

6) 염화물 이온을 경화한 콘크리트로부터 제거하는 것은 어렵다.

- 콘크리트에 존재하는 염화물 이온을 제거하기 위한 방법으로 전기영도법 등을 고려할 수 있으나, 실용화되어 있지 않다.

7) 염화물에 의해 철근이 부식되어 콘크리트에 균열이 생긴 후 부식의 진행을 외부에서 정지시키는 것은 곤란하다.

- 염화물에 의해 철근이 부식되어 생긴 균열에 에폭시(Epoxy)수지를 주입하거나, FRP로 직접 씌우거나 해도 교량의 콘크리트 등에는 외부로부터 물이 침입하거나, 콘크리트 중에 산소와 수분이 어느 정도 존재하기 때문에 부식을 정지시키는 것은 불가능하다.

나. 염화물의 구성

콘크리트 내 염화물의 구성은 수용성 염화물과 고정 염화물로 구성되어 있다. 이 2종류의 염화물을 일컬어 전염화물이라고 하며 현재는 철근의 임계발청농도를 전 염화물을 기준으로 정하고 있다.

1) 수용성 염화물(가용성 염화물)

- 세공용액, 시멘트, 수화물 층간에 용해되었거나 흡착되어 있는 염화물
- 온수에 의해 추출

2) 고정화된 염화물

- 시멘트 수화물과 화학적으로 결합하여 고정화된 염화물
- 질산용액에 의해 추출

다. 염화물 함유량 기준

경화콘크리트 내부의 염화물에 의한 철근부식을 방지하기 위한 허용기준은 ACI 기준과 국내 콘크리트구조설계기준에 의하면 염화물에 노출된 철근콘크리트의 경우 수용성 염화물 함유량은 사용한 시멘트 중량의 0.15% 이내가 되도록 규정하고 있다.

그러나 이 평가 기준은 공용구조물에서 재령 28~42일 이내 수용성염화물량을 측정하여야 하며, 이것은 공용기간 동안 추가로 침투할 염화물을 고려한 안전측인 허용기준이므로 안전 점검과 같이 준공 후 일정기간이 지나서 구조물의 염화물 함유량에 대한 평가를 수행할 경우에는 적절하지 못한 기준으로 판단되며, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2021.12)에 의거 굳은 콘크리트의 염화물에 의한 철근부식을 방지하기 위한 기준으로 전염화물이온(Cl^-) 함유량을 기준으로 규정하고 있으며, 강재가 부식될 수 있는 부식발생 한계 염화물량은 전염화물을 기준으로 $2.5kg/m^3$ 로 규정하고 있다. 본 과업에서도 이를 토대로 전염화물량을 측정하여 평가하였다.

【표 3.7-16】 염화물 상태평가 기준

기준	전염화물 이온량	철근부식의 가능성
a	염화물 $\leq 0.3\text{kg/m}^3$	염화물에 의한 부식이 발생할 우려 없음
b	$0.3\text{kg/m}^3 < \text{염화물} < 1.2\text{kg/m}^3$	염화물이 함유되어 있으나, 부식발생 가능성 낮음.
c	$1.2\text{kg/m}^3 \leq \text{염화물} < 2.5\text{kg/m}^3$	향후 염화물에 의한 부식발생 가능성 높음.
d	$2.5\text{kg/m}^3 \leq \text{염화물}$	철근부식 발생
e	-	-

라. 시험자료의 NaCl(%)를 염화물 이온량으로 환산

- NaCl(%) → Cl-(%) 로 환산

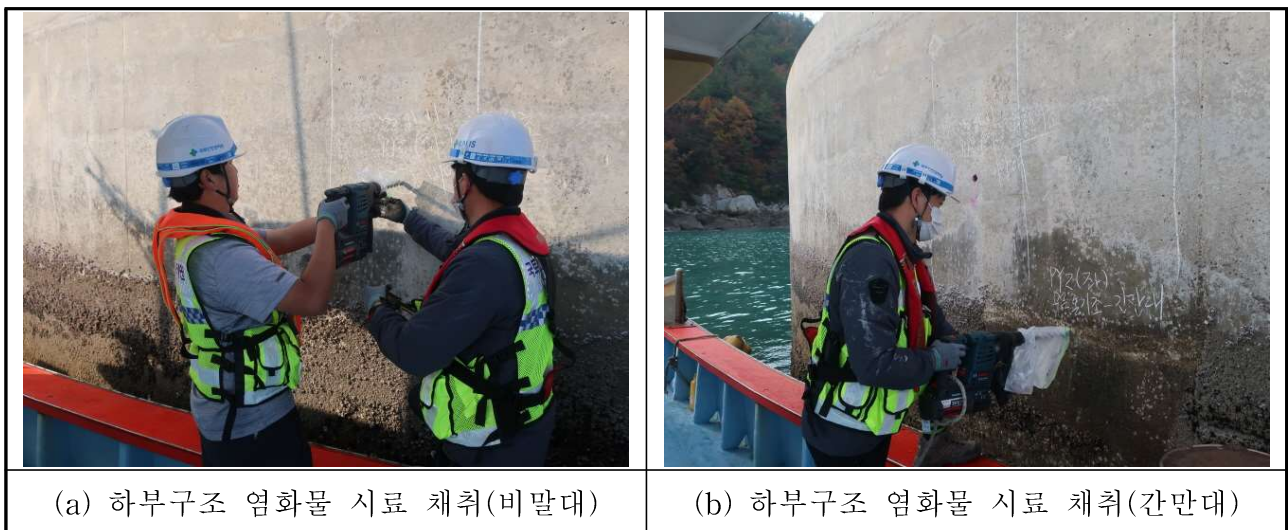
$$\begin{aligned}
 \text{Cl-}(\%) &= \text{NaCl}(\%) \times \text{Cl-분자량} / (\text{Na+ 분자량} + \text{Cl- 분자량}) \\
 &= \text{NaCl}(\%) \times 35.45 / (22.98 + 35.45) \\
 &= \text{NaCl}(\%) \times 0.60681
 \end{aligned}$$

- Cl-(%) → Cl- 이온량으로 환산

$$\text{Cl-이온량}(\text{kg/m}^3) = \text{Cl-}(\%) / 100 \times 2,300(\text{kg/m}^3, \text{무근콘크리트 단위중량})$$

마. 시험방법

본 교량의 전염화물시험은 하부구조에서 시행하였으며 콘크리트 분말시료를 20mm씩 깊이별로 나누어 채취하였다. 염화물 함유량 측정시험은 질산은 적정법에 의해 콘크리트 시료에 포함된 전염화물 이온량(Cl-)을 측정하는 시험을 수행하였다. 또한, 금회 정밀안전점검에서는 밀물과 썰물의 영향을 받는 간만대에 대한 염화물함유량 시험을 실시하여 염화물에 대한 영향을 검토하였다.



【사진 3.7-3】 염화물 시편 채취 현황

바. 시험결과

1) 염화물 함유량 측정 및 현장분석 결과

본 과업대상 구조물에서 채취한 콘크리트 시료에 대한 깊이별 전염화물 이온(Cl-) 함유량의 결과는 【표 3.7-17】과 같다. 경화된 콘크리트의 염화물함유량 평가 시 「안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2021. 12.)」을 토대로 철근위치에서 전염화물에 대하여 측정된 결과 하부구조 부재별 측정부위(전 개소)에서 염화물이 함유되어 있으나 부식발생 가능성이 낮은 상태인 “b” 등급으로 측정되었다.

【표 3.7-17】 염화물 함유량 분석 결과

시료채취 위치		깊이(mm)	염화물 함유량		염화물상태평가기준 (kg/m ³)	등급	피복 두께 (mm)
			Cl-(%)	Cl-(kg/m ³)			
하부 구조	PY2 좌측 (비말대)	0~20	0.8964	20.284	a : 염화물≤0.3 b : 0.3<염화물<1.2 c : 1.2≤염화물<2.5 d : 염화물≥2.5 e : -	b	150
		20~40	0.1607	3.636			
		40~60	0.0399	0.903			
		60~80	0.0356	0.805			
		80~100	0.0200	0.452			
		100~120	0.0179	0.404			
		120~철근	0.0164	0.372			
	PY2 좌측 (간판대)	0~20	0.7775	17.595		b	150
		20~40	0.2618	5.923			
		40~60	0.1001	2.264			
		60~80	0.0954	2.160			
		80~100	0.0709	1.604			
		100~120	0.0596	1.350			
		120~철근	0.0340	0.769			

2) 시설물 내구성 예측 서비스를 활용한 내구성 예측결과

국토안전관리원에서 시행하고 있는 시설물 내구성 예측 서비스를 활용하여 공용년수 증가에 따른 염화물 함유량의 향후 추이를 예측해 보았다. 장보고 대교의 하부구조를 대상으로 하였으며, 내구성 예측 서비스를 활용하여 염화물 함유량을 통한 내구성을 예측해 보았다. 그 분석결과는 다음과 같다.

【표 3.7-18】 염화물 함유량에 의한 내구성 예측

위 치 별	염화물 함유량에 따른 내구성 예측	분석결과
화양조발대교 PY2 좌측 (비말대)		b등급
화양조발대교 PY2 좌측 (간판대)		b등급

3) 점검의견

현재 시행 중인 시설물 내구성 예측 서비스는 설계피복두께와 실측피복두께의 수치를 동일하게 입력한 경우에만 분석 결과 도출이 가능하다. 내구성 예측 서비스의 시스템 상으로는 실측피복두께를 분석을 할 수 없으며 추후 실측피복두께로 분석할 수 있도록 시스템이 갖춰진 이 후 철근탐사를 수행하여 분석한다면 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

3.7.5 종합의견

화양조발대교의 상부구조 비파괴강도는 100.2~116.9%, 하부구조는 101.8~151.7%로 전 구간에서 설계기준 압축강도를 상회하는 것으로 측정되어 콘크리트 강도 저하에 따른 내구성에 문제는 없을 것으로 판단된다.

콘크리트 탄산화깊이 측정결과 각 부재에 대하여 a등급으로 평가 되었다. 본 교량은 콘크리트 탄산화 진행은 미소한 것으로 판단되며 철근부식의 우려는 없는 양호한 상태로 분석되었다. 또한 탄산화속도계수를 통한 잔존수명은 100년 이상으로 평가되었으며 종합적인 판단 결과 콘크리트의 전반적인 내구성은 양호한 것으로 조사되었다.

염화물 함유량에 따른 내구성 예측 서비스는 설계피복두께와 실측피복두께의 수치를 동일하게 입력한 경우에만 분석 결과 도출이 가능하다. 내구성 예측 서비스의 시스템 상으로는 실측피복두께를 분석을 할 수 없으며 추후 실측피복두께로 분석할 수 있도록 시스템이 갖춰진 이 후 철근탐사를 수행하여 분석한다면 보다 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

염화물 함유량 측정 결과 상·하부구조 측정부위(전 개소)에서 “b”로 평가되었다. 향후 염화물에 의해 철근의 부식발생 가능성이 낮은 상태이므로 주기적인 점검을 통해 관리하는 것이 바람직하다고 판단된다.