

제 3 장 내구성 조사

3.1 내구성조사 시험개요

3.2 콘크리트 내구성조사

3.3 기 점검 결과와 비교

제 3 장 내구성조사

3.1 내구성 조사 시험 개요

내구성 조사는 구조물에 열화손상이 이미 현저하게 진행되었을 경우 열화의 정도 및 그 원인 관계를 조사하고 보수·보강 여부의 판정을 하며, 아직 열화손상이 없거나 경미한 구조물은 내구성 조사에 의해서 향후 열화 경향을 예측하고 예방보전을 검토하기 위한 자료를 수집하는 것을 목적으로 한다.

내구성 조사의 적용범위는 다음과 같다.

- 내구성 조사를 대상으로 하는 구조물은 콘크리트 구조물에 한한다.
- 내구성 조사는 구조체를 중심으로 수행한다.
- 내구성 조사는 조사 시점의 열화상태 뿐만 아니라 구조물의 이력, 주변환경, 열화원인을 조사하여 향후 열화손상 진행정도를 예측하고, 내용년수와 관련하여 종합적인 안전진단을 수행한다.

구조물은 하중을 안전하게 지지하고 그 기능을 원활히 발휘하여야 하며, 역학적으로 충분한 강도와 강성을 갖는 것이 필요하다. 따라서 구조의 각 부분이 균형 잡힌 안전도를 가지며, 내구성을 갖는 것이 요구된다.

3.2 콘크리트 내구성조사

3.2.1 시험내용 및 평가기준

본 과업에서 비파괴시험은 대상구조물의 Con'c 실제강도 및 배근상태, 균열깊이 측정, 탄산화깊이 측정 등을 조사하였으며, 각 시험별 내용 및 평가방법은 다음과 같다.

가. 반발경도시험

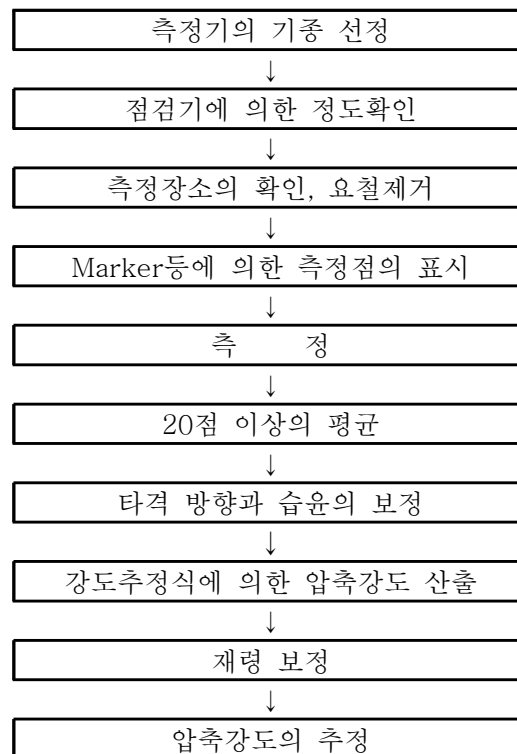
Con'c의 표면 경도를 측정하여 이 측정치로부터 Con'c의 압축강도를 비파괴적으로

추정하는 검사방법이다.

반발경도를 구하는 방법으로는 슈미트 해머(Schmidt Hammer)법이 가장 널리 사용된다. 슈미트 해머로 경화된 Con'c 표면을 타격하여 반발도(R)와 Con'c의 압축강도(F_c')와의 사이에 특정 상관 관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다.

1) 반발경도(R)

슈미트 해머로 경화된 Con'c 표면의 타격시 내부에 중추의 반동량을 반발도(R)로 표시하며, 이 반발도의 크기에 따라 Con'c의 압축강도를 추정한다.



<그림 3.2.1> 반발경도법에 의한 압축강도 추정도

외관조사 결과에 의해서 결정된 측정개소에 대해서 표면 평활작업을 하며 타격점 상호 간격은 3cm를 표준으로 종으로 5열, 횡으로 4열의 선을 그어 직교되는 20점을 타격하여 반발경도의 산술 평균값(R_m)을 구한다.

산술평균값 R_m 에 대해 RILEM Recommendation에 따라 각 반발경도의 값이 $R_m \pm 20\%$ 의 범위를 벗어나는 값들은 제외시키고 나머지 값들을 다시 산술평균하여 반발경도 R 을 결정한다. 제외된 반발치가 4개 이상일 때는 측정지점의 반발경도값(R)은 버린다. 여기서 측정된 반발치의 값들이 많은 편차를 보이고 있으면 보편적으로 Con'c의 품질이 불균질하다고 평가 될 수 있을 것이다.

2) 보정반발경도(R_0)

보정반발경도 R_0 는 다음 (식 3.1)과 같이 측정경도 R 에 보정값 ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 를 더한 값으로 한다.

$$R_0 = R + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 \dots\dots\dots (3.1)$$

여기서, ΔR_1 : 타격방향에 따른 보정값

ΔR_2 : 압축부재의 고정하중 응력에 따른 보정값

ΔR_3 : Con'c의 습윤상태에 따른 보정값

(1) 타격 방향에 따른 반발경도의 보정(ΔR_1)

수평방향의 타격에 의한 측정치가 안정된 값을 나타내지만 타격방향이 다른 경우에는 반발치를 보정해 주어야 한다.

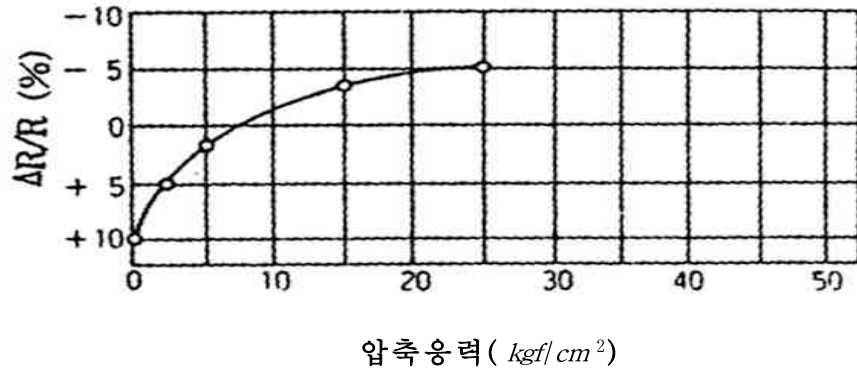
하향 타격(-90°)의 경우에는 Schmidt Hammer 내부의 해머중량에 의해서 실제보다 반동량이 작아지므로 +값으로 수정해 주고, 상향의 타격($+90^\circ$)의 경우에는 반대현상에 의해서 -값으로 수정해 주어야 한다.

<표 3.2.1> 반발경도 보정값

반발경도	보 정 값				비 고
	$+90^\circ$	$+45^\circ$	-45°	-90°	
10			+2.4	+3.2	상향수직타격 $+90^\circ$
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	+1.5	+2.2	하향수직타격 -90°
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7	

(2) 압축응력에 따른 반발경도 보정(ΔR_2)

타격방향과 직각방향으로 압축응력을 받는 부재는 압축응력이 커짐에 따라 반발경도에 의한 압축강도가 실제보다 커진다는 사실이 시험결과 입증되었다. 그 크기는 대략 압축응력이 1MPa 인 경우 $\Delta R_2 = -0.015R$, 2.5MPa 인 경우 $\Delta R_2 = -0.05R$ 이다.



<그림 3.2.2> 압축응력에 따른 반발경도의 보정곡선

(3) Con'c 습윤상태에 따른 보정(ΔR_3)

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

3) 압축강도의 추정

보정반발경도 R_o 로부터 압축강도(F_c)의 상관관계를 도출한 제안식들은 다음과 같다.

- 일본재료학회 (보통Con'c)

$$F_C = -18.4 + 1.27 R_o \text{ (MPa)} \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

- 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식

$$F_C = (7.3 R_o + 100) \times 0.1 \text{ (MPa)} \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

4) 28일 강도의 추정

시일이 경과할수록 Con'c 구조물은 표면경도가 높아지므로 (식 3.6)과 같이 재령 28일 강도(F_{28}')로 환산하여 압축강도를 추정한다. Con'c의 재령에 따른 압축강도 보정계수 α 는 <표 3.2.2>와 같으며, 3000일 이상의 재령에 대해서는 0.63을 적용한다.

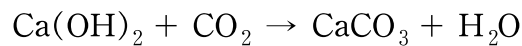
$$F_{28}' = \alpha \cdot F_c \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

<표 3.2.2> 재령계수 α 의 값

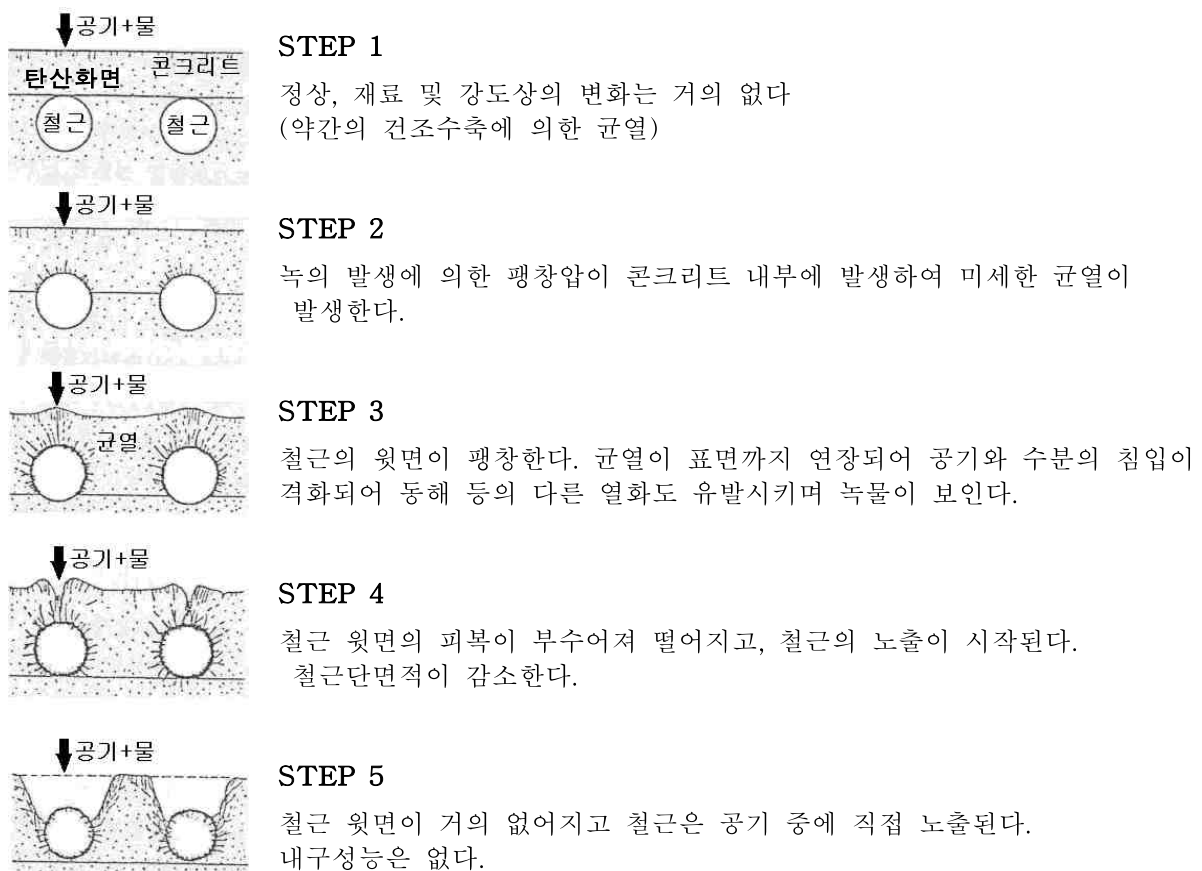
재령(일)	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1000	2000	3000
α	1.55	1.12	1.00	0.87	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.64	0.63

나. Con'c의 탄산화조사

탄산화는 콘크리트 구조물의 열화 문제로 현재 주목받고 있는 현상 중 하나이다. 여기서 탄산화란 굳은 콘크리트와 공기 중의 탄산가스가 반응하면서 알칼리성을 잃게 되는 현상을 일컫는다. 즉 건전한 콘크리트는 경화 시멘트풀의 수산화 화합물중 약 25%를 차지하는 수산화칼슘(Ca(OH)_2)의 영향으로 pH가 12~13인 강알칼리성을 나타내나 탄산가스가 수산화칼슘과 반응하면 탄산칼슘(CaCO_3)으로 환원되면서 표면부터 콘크리트의 pH가 서서히 10 이하로 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 <그림 3.2.3>과 같다.



<그림 3.2.3> 탄산화에 의한 콘크리트 성능저하

1) 탄산화 진행에 따른 상태평가

탄산화 진행상태는 피복두께의 절대값이 클수록 탄산화 잔여 절대값이 커지므로 피복두께가 클수록 일반적으로 철근부식까지의 탄산화도달시간에 대한 여유가 크다. 피복두께와 탄산화 측정깊이를 고려한 철근 콘크리트 구조물에서의 탄산화 진행상태에 대한 상태평가 등급은 다음 <표 3.2.3>과 같다.

<표 3.2.3> 탄산화 진행상태에 따른 상태평가 등급

평가기준	탄산화 잔여 깊이	철근부식의 가능성
a	30mm 이상	탄산화에 의한 부식이 발생할 우려 없음.
b	10mm 이상~30mm 미만	향후 탄산화에 의한 부식이 발생할 가능성 있음
c	0mm 이상~10mm 미만	경우에 따라서 탄산화에 의한 부식이 발생할 가능성이 있음.
d	0mm 미만	철근부식 발생
e	-	-

2) 경과년수에 따른 탄산화 깊이의 비교분석

<표 3.2.4>는 탄산화 진행 예측식을 나타낸 것이다. 본 과업에서 예측식의 적용은 보통포틀랜드 시멘트를 사용하고, AE제와 같은 혼화제는 사용하지 않고, 골재는 일반골재로 가정하였고, 표면마감은 없는 것으로 가정하였다. 설계기준강도를 고려할 때 적절한 물-시멘트비인 55%를 가정하였다.

<표 3.2.4> 탄산화 속도식 비교

식 종류	탄산화 속도식	비 고
하마다식 (浜田式)	$t = \frac{0.3(1.15 + 3x)}{R} C^2$	x: 물-시멘트 비 R: 시멘트, 골재, 활성제의 종류에 따른 계수
키시타니식 (岸谷式)	$t = \frac{0.3(1.15 + 3x)}{R^2(x - 0.25)^2} C^2 \quad (x \geq 0.6)$ $t = \frac{(7.2)}{R^2(4.6x - 1.76)^2} C^2 \quad (x \leq 0.6)$	x: 물-시멘트 비 R: 시멘트, 골재, 활성제의 종류에 따른 계수
시로야마식 (白山式)	$t = \alpha\beta\gamma\delta\epsilon \frac{500C^2}{(x - 38)^2}$	x: 물-시멘트 비 $\alpha\beta\gamma\delta\epsilon$: 시멘트, 시공정도, 마감재, 내외 등에 따른 계수
요다식 (依田式)	$t = \alpha\beta\gamma \frac{262}{(100x - 18)^2} \times C^2 \quad (\text{실내})$ $t = \alpha\beta\gamma \frac{155}{(100x - 36)^2} \times C^2 \quad (\text{실외})$	x: 물-시멘트 비 $\alpha\beta\gamma$: 마감재, 실내외 등에 따른 계수

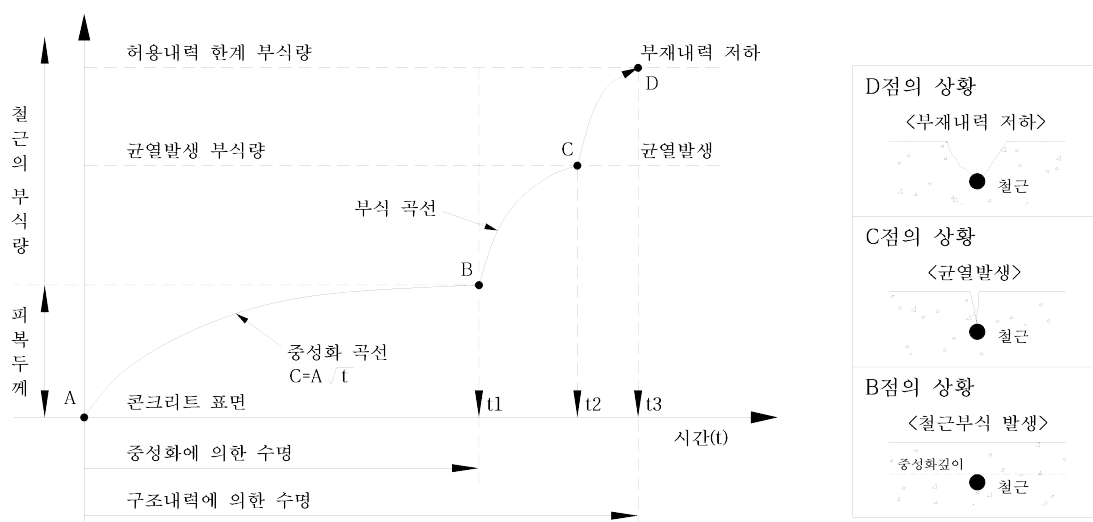
• t = 경과년수(년), C = 탄산화깊이(cm)

3) 내구수명 평가

콘크리트의 탄산화가 진행하여 철근에 다다르게 되면 철근의 부식이 시작된다. 그러나 철근주변까지 콘크리트가 탄산화되었다고 해서 바로 부식이 발생하여 철근의 단면 결손이 발생하는 것은 아니다. 또한 실내외의 환경조건에 따라 철근 부식 조건이 달라진다. 宗英雄 등의 연구에 따르면 실외에서는 탄산화영역이 철근위치에 도달하면 급속하게 철근의 부식이 발생하는 반면, 실내의 경우는 탄산화영역이 철근에 도달해도 급속하게 부식하는 경우는 없고, 탄산화영역이 피복두께를 20~30mm 지나치는 시점에서 부식이 시작된다.

콘크리트가 탄산화되어 철근의 부식이 시작되고, 수명에 이르는 개념을 <그림 3.2.4>에 나타내었다. 즉 t_1 은 탄산화영역이 철근표면에 도달하는 시점, t_2 는 그 결과 철근이 부식되고 콘크리트에 균열을 발생시키는 시점, t_3 은 부재내력이 한계에 달하는 시점을 의미한다.

지금까지 철근콘크리트 구조물의 수명은 t_1 의 시점이라고 판단되어 왔으나 실제 구조물에 적용할 경우 많은 문제점이 나타나게 된다. 전문가에 따라서는 t_1 의 시점이 반드시 철근의 유해한 부식량의 시점이라고는 생각되지 않기 때문에, t_2 의 시점을 수명으로 산정하는 것이 적절하다는 의견이 있으므로 아직까지는 명확한 수명을 판단하기가 어렵다. 또한 다양한 환경조건에 따라 t_1 에서 t_2 도달까지의 시간이 다르기 때문에 본 과업에서는 탄산화에 대한 내구수명으로서 t_1 에 도달할 때까지의 시간으로 결정하고 내구수명을 산정하였다.



<그림 3.2.4> 콘크리트 내부에서의 철근부식의 개념

대기중의 탄산가스에 의한 콘크리트 표면으로부터의 탄산화 진행을 경과시간의 함수로서 표현한 것이 탄산화 속도식이다. 탄산화가 정상상태에서 탄산가스의 콘크리트내부 확산에 따라 생긴다고 가정하면, 탄산화깊이 C 는 경과시간 t 의 평방근에 비례한다고 하는 식이 도출된다. 이것은 통상, $\sqrt{t}$ 법으로 불리며, 가장 일반적으로 사용되고 있다.

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

위의 식에서 계수 A 는 탄산화속도 계수라고 하며, A 의 수치가 큰 만큼 탄산화 속도가 크게 된다. 계수 A 는 콘크리트의 재료적 요인 및 환경조건에 의해 정해지는 복잡한 함수이다.

본 과업에서 탄산화에 의한 수명 평가는 경과년수와 탄산화깊이와의 관계를 통해 탄산화 속도계수를 역추적하여 탄산화가 철근에 도달하는 시간을 계산하였다. 앞서 언급한 식 $C = A\sqrt{t}$ 에서 준공 후 현재까지의 경과년수 t 는 설계도로부터 구할 수 있고 탄산화 깊이 C 는 현장조사를 통하여 얻을 수 있으므로 탄산화 속도계수 A 를 계산할 수 있다. 이에 따라 다음 식을 통하여 현재로부터 탄산화가 철근에 도달하는데 걸리는 시간을 추정할 수 있다.

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

여기서, t_d 는 현재로부터 탄산화가 철근에 도달하는데 걸리는 시간, D_c 는 현장조사로부터 얻어진 철근까지의 피복두께(mm), A 는 탄산화시험으로부터 계산된 계수, t_0 는 현재의 구조물 경과시간이다.

3.2.2 시험 현황

대상 구조물에 대한 콘크리트의 품질상태, 강도 등을 파악하기 위하여 필요한 현장시험을 수행하였다.

콘크리트 강도는 반발경도시험을 수행하여 콘크리트의 비파괴강도를 추정하고, 철근탐사시험을 통해 탄산화시험에 필요한 피복두께를 실측하여 자료를 수집하였다.

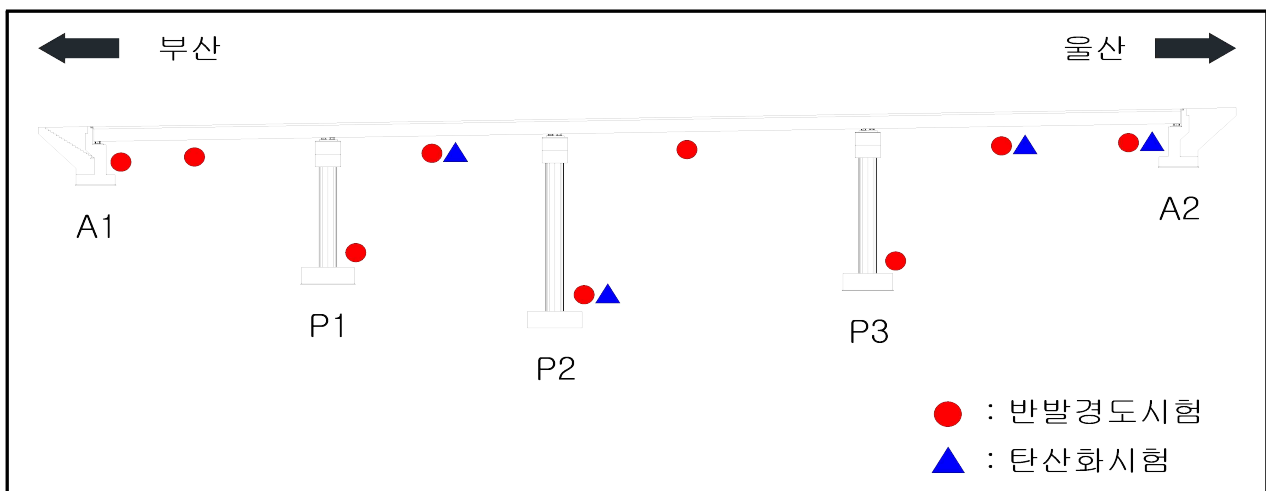
반발경도시험, 철근탐사시험 등은 시험과정에서 콘크리트 부재에 전혀 손상을 주지 않으므로 가급적 단면력이 크게 발생하는 부위로서 구조물을 대표할 수 있는 위치를 선정하여 콘크리트의 품질확보 정도를 확인할 수 있도록 하였다. 비파괴시험 성과물은 부록에 수록하였다.

<표 3.2.5> 콘크리트 비파괴시험 총괄표

구분	세부지침 기준		기준수량		금회 시험수량	
	상부구조	하부구조	상부구조	하부구조	상부구조	하부구조
반발경도시험	• 1개소 / 50m마다		3	3	5	6
탄산화 깊이측정	• 5경간 이내 : 2~3개소 ¹⁾ • 5경간 이상 : 3~6개소 ²⁾		3		2	2
철근탐사시험	• 탄산화 깊이측정 시 실측 철근 피복측정		-		2	2

주1) 교량 상부구조에서 최소 1개소 이상 실시

주2) 교량 상부구조에서 최소 2개소 이상 실시



<그림 3.2.5> 비파괴시험 위치도

3.2.3 시험결과 및 분석

가. 반발경도시험

반발경도시험은 철근탐사 후 철근이 없는 부위를 선정 한 후, 콘크리트 표면의 요철, 부착물, 분말 등을 그라인딩으로 제거하고 실시하였으며 표면에 곰보, 공극, 노출된 자갈 등이 있는 부위들은 측정위치에서 제외했다. 또한, 반발경도 측정값은 각 측정부위에 따라 타격방향, 표면의 건습상태, 재령 등에 의한 보정을 한 후 콘크리트 강도를 추정하였다.

반발경도 시험법에 의한 비파괴강도는 상부구조 및 하부구조에 대하여 실시하였으며 그 결과는 다음 표와 같다.

<표 3.2.6> 당사천교(울산1) 콘크리트 비파괴 강도 측정결과(바닥판) [단위 : MPa]

시 험 위 치	비파괴시험	반발경도법	
	반발경도 (R_0)	일본재료학회	일본건축학회
바닥판 S1	48.6	28.1	28.5
바닥판 S2 (건전부)	47.5	27.2	28.0
바닥판 S2 (비건전부)	48.7	28.1	28.6
바닥판 S3	48.4	27.9	28.4
바닥판 S4	47.3	27.1	27.9
평균(MPa)		27.6	28.2
표준편차		0.5	0.2
변동계수		1.8	0.7
M A X		28.1	28.6
M I N		27.1	27.9

<표 3.2.7> 당사천교(울산1) 콘크리트 비파괴 강도 측정결과(하부구조) [단위 : MPa]

시 험 위 치	비파괴시험	반발경도법	
	반발경도 (R_0)	일본재료학회	일본건축학회
교대 A1	44.1	24.4	26.4
교대 A2	43.6	24.0	26.2
평균(MPa)		24.1	26.3
표준편차		0.2	0.1
변동계수		0.8	0.3
M A X		24.4	26.4
M I N		24.0	26.2
시 험 위 치	비파괴시험	반발경도법	
	반발경도 (R_0)	일본재료학회	일본건축학회
교각 P1 (건전부)	48.5	28.0	28.5
교각 P1 (비건전부)	48.3	27.8	28.4
교각 P2	47.6	27.2	28.0
교각 P3	48.9	28.3	28.6
평균(MPa)		27.8	28.3
표준편차		0.4	0.2
변동계수		1.4	0.7
M A X		28.3	28.6
M I N		27.2	28.0

<표 3.2.8> 당사천교(울산1) 콘크리트 비파괴 강도 측정결과

[단위 : MPa]

부재	종류	시험압축강도 (A)	설계기준강도 (B)	(A/B)×100 (%)
상부구조	바닥판	27.9 ~ 28.6	27.0	103 ~ 106
하부구조	교대	26.2 ~ 26.4	24.0	109 ~ 110
	교각	28.0 ~ 28.6	27.0	104 ~ 106

콘크리트 비파괴 시험결과 바닥판 추정 비파괴 강도는 27.9~28.6MPa, 교대 추정 비파괴 강도는 26.2~26.4MPa, 교각 추정 비파괴 강도는 28.0~28.6MPa로서 설계기준강도 (바닥판 : 27.0MPa, 교대 : 24.0MPa, 교각 : 27.0MPa) 이상을 확보하고 있는 것으로 측정·검토되었다.



a. 표면요철제거



b. 압축강도 측정

<사진 3.2.1> 반발경도시험 현황

나. 탄산화시험

본 구조물에서는 측정위치에 타정공구 및 드릴을 이용하여 국부적으로 파손시킨 면에 페놀프탈레인 용액을 지시약으로 사용하는데, 이는 알칼리성 콘크리트의 탄산화가 진행된 면에서는 무색으로 변화가 없는 무색의 깊이가 곧 탄산화 진행 깊이가 된다. 구조물의 내구성에 영향이 없는 부위에는 코어시편을 채취하여 탄산화 깊이를 측정하였으며, 측정결과는 다음 표와 같다.

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

여기서, C : 탄산화깊이(mm) → 탄산화 잔여깊이

A : 탄산화 속도계수

t : 콘크리트 타설 후 경과된 시간(년)

<표 3.2.9> 탄산화 깊이의 측정결과

시험위치	탄산화 깊이(mm) (C)	공용년수 (t)	탄산화 속도계수 (A)	탄산화 잔여깊이 (mm)	잔존수명 (td)	이론 탄산화깊이 (mm)
바닥판 S2	5.5	7	2.08	33.5	100년이상	6.42
바닥판 S4	6.8	7	2.57	47.2	100년이상	6.42
교대 A2	8.3	7	3.14	87.7	100년이상	6.42
교각 P2	7.4	7	2.80	112.6	100년이상	6.42

※ A = 탄산화깊이 / √(경과년수 : 7년)

※ 잔존수명 = (탄산화 잔여깊이 / A)²

※ 이론깊이:岸谷式에 의한 탄산화 이론깊이(w/c : 0.55, R : 1 적용)

※ 철근의 피복두께는 실측 최소피복두께 적용(부록첨부)

본 과업에서 탄산화에 의한 수명 평가는 경과년수와 탄산화깊이와의 관계를 통해 탄산화 속도계수를 역추적하여 탄산화가 철근에 도달하는 시간을 계산하였다. 앞서 언급한 식 $C = A\sqrt{t}$ 에서 준공 후 현재까지의 경과년수 t는 설계도로부터 구할 수 있고 탄산화 깊이 C는 현장조사를 통하여 얻을 수 있으므로 탄산화 속도계수 A를 계산할 수 있다. 측정결과 이론 탄산화깊이(6.42mm)보다 일부 큰값으로 측정되었으며, 모든 측정 부재에서 현재로부터 탄산화가 철근에 도달하는데 걸리는 시간을 추정한 결과 100년 이상으로 탄산화에 의한 철근부식은 없을 것으로 판단된다.



a. 탄산화시험부 천공



b. 탄산화시험부 변색 확인



c. 탄산화시험부 깊이측정



d. 철근탐사 측정

<사진 3.2.2> 탄산화시험 현황

3.3 기 점검결과와 비교

가. 압축강도

<표 3.3.1> 기 점검결과와 압축강도 비교

[단위:MPa]

구 분	상부구조	하부구조		비 고
	바닥판	교대	교각	
2019년 정밀안전점검	28.0 ~ 29.1	25.5	28.0 ~ 28.2	
2021년 정밀안전점검	28.2 ~ 29.9	27.2 ~ 27.6	28.9 ~ 29.2	
금회 정밀안전점검	27.9 ~ 28.6	26.2 ~ 26.4	28.0 ~ 28.6	

기 실시한 정밀안전점검과의 압축강도 비교결과 측정위치, 표면요철 및 습윤상태 등에 의한 미소한 차이는 있으나 압축강도의 저하는 없는 것으로 검토되었다.

나. 탄산화깊이

<표 3.3.2> 기 점검결과와 탄산화 비교

[단위:mm]

구 분	상부구조	하부구조	비 고
2019년 정밀안전점검	3.5 ~ 4.5	4.5 ~ 5.7	
2021년 정밀안전점검	5.7 ~ 7.1	8.1 ~ 8.7	
금회 정밀안전점검	5.5 ~ 6.8	7.4 ~ 8.3	

기 실시한 정밀안전점검과의 탄산화깊이 비교결과 “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2022.12)” 건전성 평가기준(탄산화 잔여깊이 30mm이상 : a등급)에 준하여 탄산화에 의한 철근 부식의 가능성은 없는 것으로 판단된다.