

4.1 개요

4.2 재료시험 현황

4.3 시험결과 분석

제 4장 시험 및 측정

4.1 개요

대상 시설물에 대한 재료시험은 구조물 재료의 강도, 부재의 평가 및 육안검사 결과를 확인하기 위하여 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침의 규정에 의거하여 목적에 부합하는 현장재료시험 및 실내시험을 실시하며, 세부지침, 현장조사 및 도면에 근거하여 시험 항목 및 시험횟수를 결정하였다.

현장시험은 세부지침에서 규정한 재료시험 검사기준을 준용하여 현장 시험 절차에 따라 실시하고 분석하였다.

4.2 재료시험 현황

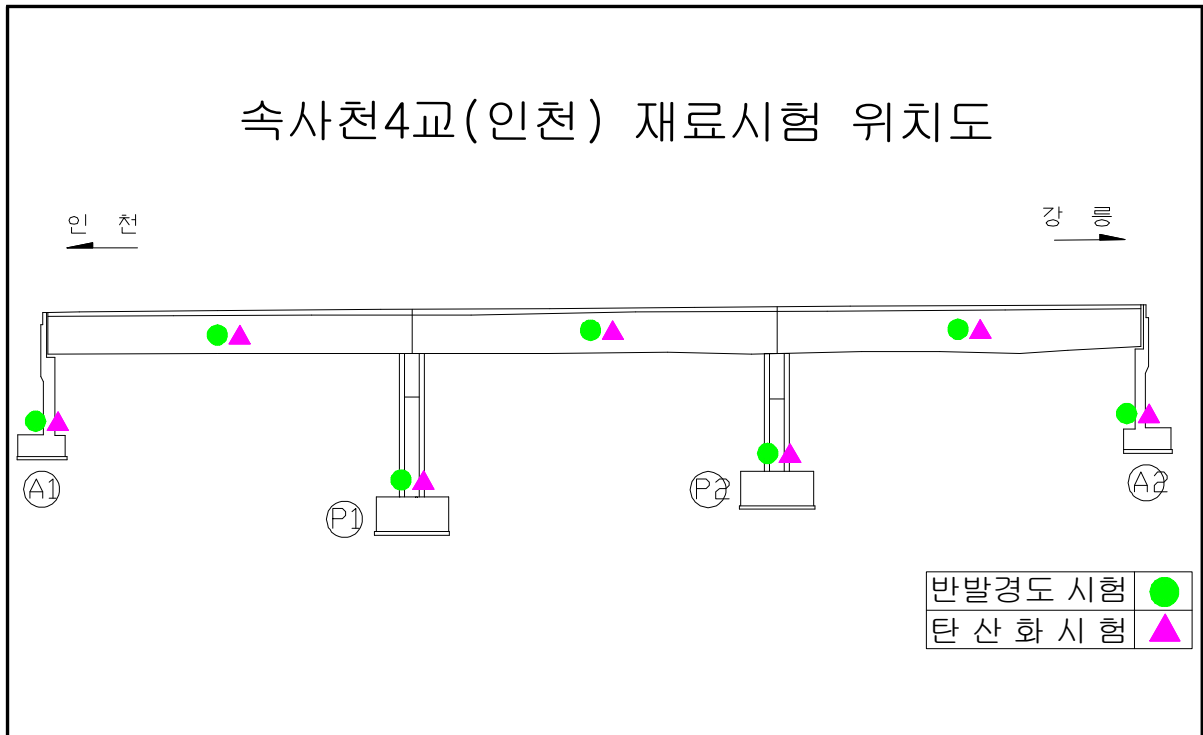
콘크리트 재료의 품질상태 및 시공오차 여부를 파악하고 분석 및 평가하기 위하여 필요한 현장시험을 수행하였으며, 금회 실시한 재료시험 수량 및 위치는 다음과 같다.

가. 재료시험 수량 및 위치도

<표 4.2.1> 재료시험 수량

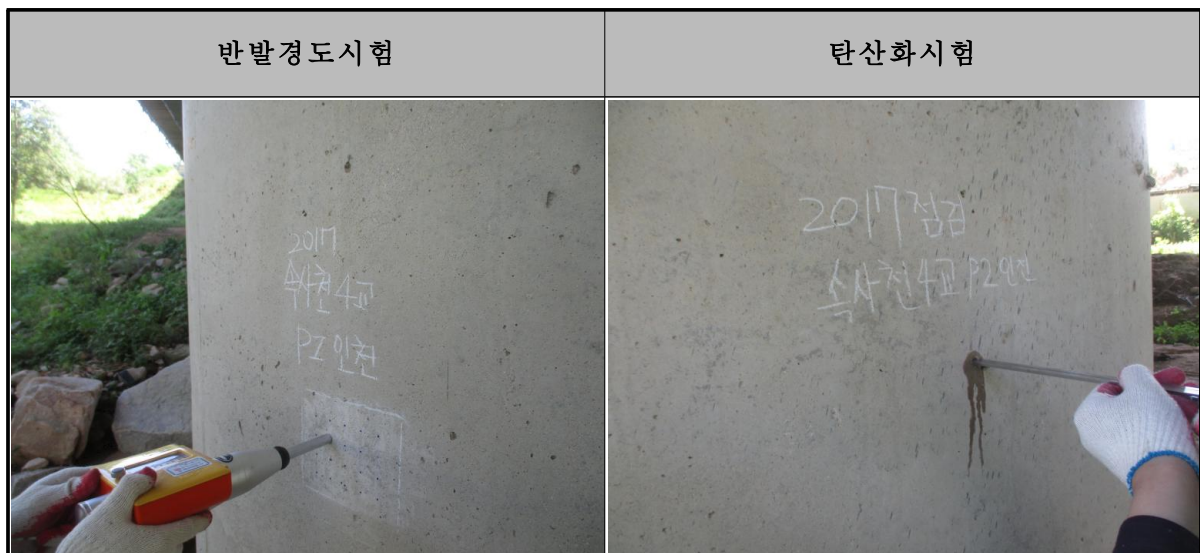
구 분		세부지침 기준	기준수량	금회수량
반발경도시험	상부	50m 마다	3	3
	하부	연장 50m마다	3	4
탄산화 깊이 측정		5경간 이내 : 2~3개소 5경간 이상 : 3~6개소	2~3	7

※ 상부·하부 반발경도시험 기준수량 산출근거 : $150\text{m}/50\text{m} = 3.0 \Rightarrow 3\text{개소}$



<그림 4.2.1> 재료시험 위치도

나. 재료시험 전경



4.2.1 반발경도 시험

시설물의 상태 평가 및 안전성 평가를 적절히 수행하기 위하여 안전점검 및 정밀 안전진단의 목적에 부합하는 현장 재료시험 및 실내시험을 실시하여야 하며 이를 위해 사전 현장조사, 도면 및 이전의 점검·진단보고서 검토 등을 통하여 필요한 시험항목 및 시험횟수를 산정하여야 한다. 대상 시설물에 대한 현장시험은 세부지침에서 규정한 비파괴 검사의 횟수, 현장 시험 절차 및 방법에 의하여 실시되었다.

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 타격하여 반발도(R)와 콘크리트의 압축강도(F_c')와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다.

본 과업에서는 보통콘크리트용 NR-type Schmidt Hammer를 이용하여 반발경도를 측정하였으며, 현장시험전 Test Anvil(Proceq, Swiss)로 초기값($R=80\pm(2)$)을 확인한 후 사용하였다.

- 시험장비 : NR-Type Schmidt Hammer(Proceq, Swiss)타격에너지 0.225kg·m
- 시험원리 : 수평방향(벽체) 또는 수직방향(슬래브)으로 평균 반발경도 측정

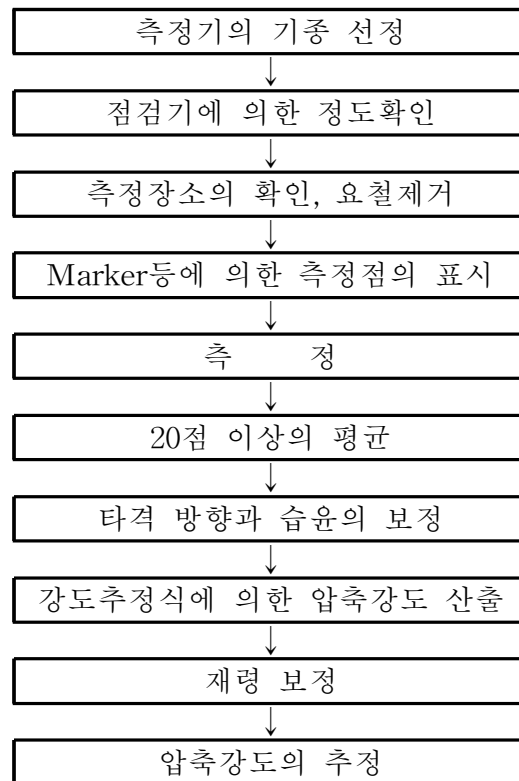
가. 반발경도(R)

슈미트 해머로 경화된 콘크리트 표면의 타격시 내부에 중추의 반동량을 반발도(R)로 표시하며, 이 반발도의 크기에 따라 콘크리트의 압축강도를 추정한다.

외관조사 결과에 의해서 결정된 측정개소에 대해서 표면 평활작업을 하여 타격점 상호간의 간격은 3cm를 표준으로 종으로 5열, 횡으로 4열의 선을 그어 직교되는 20점을 타격하여 반발경도 값의 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 R을 결정한다. 제외된 반발치가 4개 이상일 때는 측정지점의 반발경

도 값(R)은 버린다. 여기서 측정된 반발치의 값들이 많은 편차를 보이고 있으면 보편적으로 콘크리트의 품질이 불 균질하다고 평가될 수 있을 것이다.



<그림 4.2.2> 반발경도법에 의한 압축강도 추정도

나. 보정반발경도(Ro)의 산정

보정반발경도 R_o 은 다음 (식 4.1)과 같이 측정경도 R에 보정값 ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 를 더한 값으로 한다.

$$R_o = R + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 \dots\dots\dots (4.1)$$

여기서, ΔR_1 : 타격방향에 따른 보정값
 ΔR_2 : 압축부재의 사하중 응력에 따른 보정값
 ΔR_3 : 콘크리트의 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 실제보

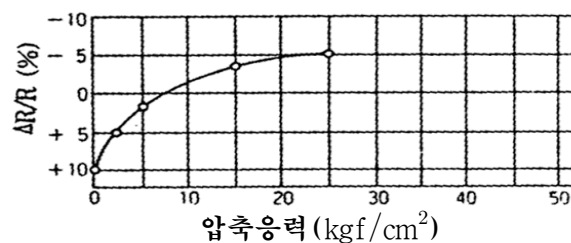
다 반동량이 작아지므로 +값으로 수정해 주고, 상향의 타격(+90°)의 경우에는 반대현상에 의해서 -값으로 수정해 주어야 한다.

<표 4.2.2> 반발경도 보정값

반발경도	보 정 값				비 고
	+90°	+45°	-45°	-90°	
10			+2.4	+4.2	상향수직타격 +90°
20	-5.4	-4.5	+2.5	+4.4	
30	-4.7	-4.1	+2.3	+4.1	
40	-4.9	-2.6	+2.0	+2.7	
50	-4.1	-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 10 kgf/cm² 인 경우 $\Delta R_2 = -0.015R$, 25 kgf/cm² 인 경우 $\Delta R_2 = -0.05R$ 이다.



<그림 4.2.3> 압축응력에 따른 반발경도의 보정곡선

③ 콘크리트 습윤상태에 따른 보정 (ΔR_3)

콘크리트는 표면 함수비에 따라 강성과 강도가 영향을 받으므로 표면이 습윤상태에 있으면 건조상태 보다 반발경도가 작게 나오게 된다. 따라서, 완전 습윤상태에서는 건조상태를 기준으로 $\Delta R_5 = +5$ 로 보정한다.

다. 비파괴강도의 평가

보정반발경도 R_0 로부터 압축강도(F_c)의 상관관계를 도출한 제안식 들은 다음과 같다.

- 일본재료학회 (보통콘크리트)

$$F_C = -18.0 + 1.27 R_o \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (4.2)$$

- 일본건축학회

$$F_C = (7.3 R_o + 100) \times 0.098 \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (4.3)$$

- 과학기술부(고강도 콘크리트)

$$F_C = (15.2 R_o - 112.8) \times 0.098 \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (4.4)$$

라. 28일 강도의 추정

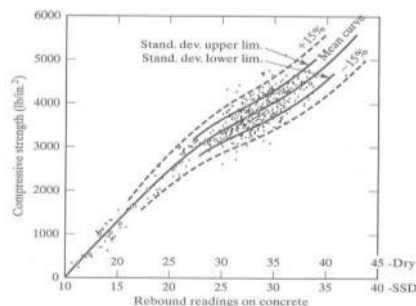
장기간 경과된 콘크리트의 표면에서 추정된 비파괴강도(F_c)를 최종 비파괴강도(F_{28})로 환산하기 위해서는 재령에 따른 표면경도의 증가영향을 고려할 수 있는 재령보정계수(α)를 이용해 비파괴강도의 추정값을 낮추어야 하며, 비파괴강도 평가결과에 대한 평균값과 표준편차의 통계처리를 통해 가장 분산정도가 적은 추정결과를 최종 비파괴강도로 평가한다. 일반적으로 반발경도를 이용한 비파괴강도의 평가 결과는 <그림 4.2.4>에서 보는 바와 같이 측정오차 $\pm 15\%$, 표준편차 $\pm 7.5\%$ 의 신뢰 수준을 갖는 것으로 알려져 있다.

$$\text{비파괴강도} : F_{28} = \alpha \cdot F_c \dots\dots\dots (4.5)$$

<표 4.2.3> 재령보정계수($F_{28} = \alpha \cdot F_c$)

재령(일)	7	15	28	30	60	100	300	500	1,000	3,000
α	1.67	1.32	1.00	0.99	0.86	0.78	0.70	0.67	0.65	0.63

단, 과학기술부 $R_o = R \times a$ ($a=6.36/t+0.7$, t :28일보다 큰 재령일수)



<그림 4.2.4> 반발경도와 비파괴강도의 상관관계(표준편차 $\pm 7.5\%$)

마. 콘크리트 반발경도 시험 결과

(1) 상부구조 시험결과 (S : 바닥판)

<표 4.2.4> 상부구조 콘크리트 반발경도 시험 결과

(단위 : MPa)

구분		추정 비파괴강도		추정 압축강도	설계강도
		재료학회	건축학회		
상부 구조	바닥판 하면 S1	28.6	28.7	28.7	27.0
	바닥판 하면 S2	29.4	29.1	29.3	
	바닥판 하면 S3	27.2	27.8	27.5	
평가		반발경도법을 이용한 압축강도를 평가한 결과, 설계기준 강도를 상회하는 것으로 나타남.			

(MPa)

30.0

28.0

26.0

24.0

22.0

20.0

■ 추정 압축강도

— 설계강도

28.7

29.3

27.5

S1

S2

S3

상부구조

(2) 하부구조 시험결과 (A : 교대, P : 교각)

<표 4.2.5> 하부구조 콘크리트 반발경도 시험 결과

(단위 : MPa)

구분		추정 비파괴강도		추정 압축강도	설계강도
		재료학회	건축학회		
하부 구조	교대 구체 A1	25.0	26.6	25.8	24.0
	교각 구체 P1	25.9	27.2	26.6	
	교각 구체 P2	25.4	26.8	26.1	
	교대 구체 A2	25.4	26.8	26.1	
평가		반발경도법을 이용한 압축강도를 평가한 결과, 설계기준 강도를 상회하는 것으로 나타남.			

(MPa)

■ 추정압축강도

— 설계강도

28.0

26.0

24.0

22.0

25.8

26.6

26.1

26.1

A1

P1

P2

A2

하부구조

(3) 불량부위 시험결과

<표 4.2.6> 불량부위 콘크리트 반발경도 시험 결과

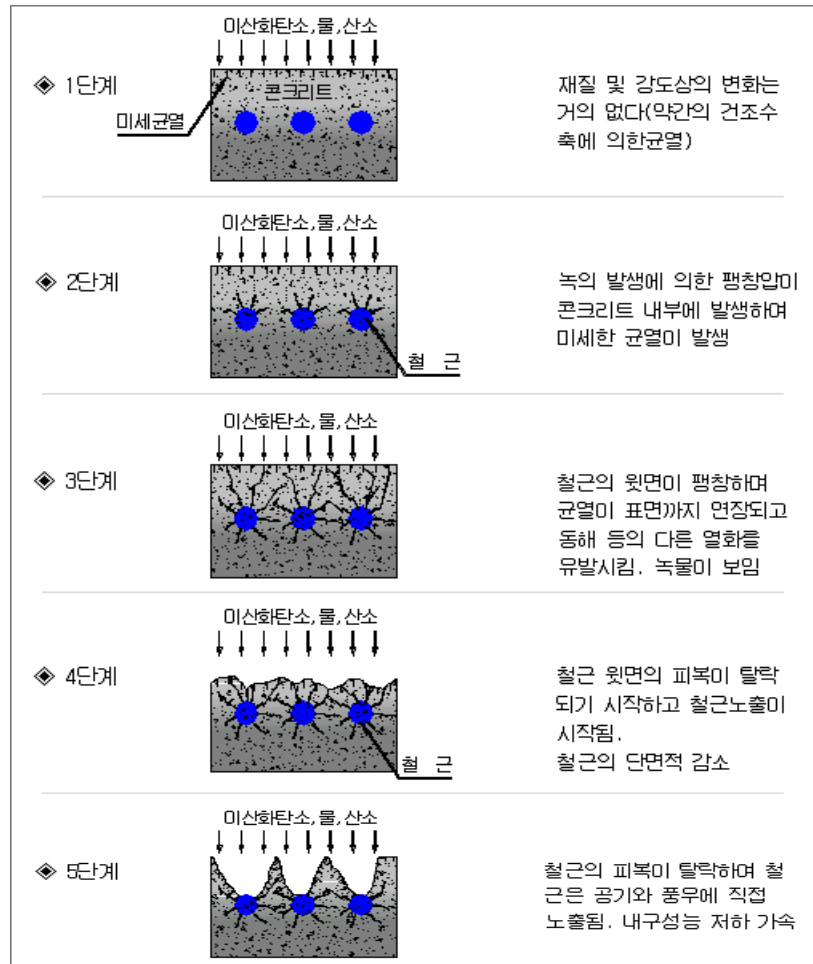
(단위 : MPa)

구분		추정 비파괴강도		추정 압축강도	설계강도
		재료학회	건축학회		
상부 구조	바닥판 하면 S1 박리	30.8	29.9	30.4	27.0
하부 구조	교각 코핑부 P2 박리	23.9	26.0	25.0	24.0
평가		반발경도법을 이용한 압축강도를 평가한 결과, 설계기준 강도를 상회하는 것으로 나타남.			

구분	추정압축강도 (MPa)	설계강도 (MPa)
S1 (상부구조)	27.3	27.0
P2 (하부구조)	25.6	24.0

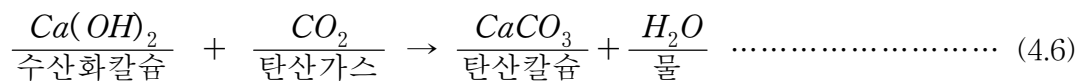
4.2.2 탄산화 잔여깊이 측정

가. 개요



<그림 4.2.5> 탄산화에 의한 콘크리트 열화 메카니즘

탄산화란 콘크리트의 탄산화(Carbonation) 과정에서 나타나는 현상으로 탄산화에 의해서 문제가 발생하는 것은 콘크리트 자체에서 생기는 것이 아니고, 콘크리트 중의 철근에 녹이 발생함으로써 문제를 일으키는 것이다.



(pH 12~13) (대기 중에 존재) (pH 8.5~10)

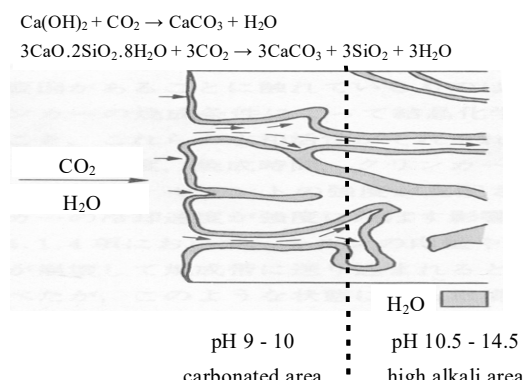
탄산화가 일어나는 메카니즘을 보면 (식 4.6)에서 시멘트의 수화 반응에서 생성되는 수산화칼슘 $[Ca(OH)_2]$ 은 pH 12~13 정도의 강 알칼리성을 나타내지만 대기중에 포함되어 있는 약산성의 탄산가스(약 0.03%)와 접촉하면 탄산칼슘과 물로 변화하고 탄산칼슘으로 변화한 부분의 pH가 8.5~10 정도로 낮아지게 된다. 따라서, 콘

크리트의 탄산화는 일반 환경 하에서도 확실하게 진행되기 때문에 매입된 철근의 부식에 따른 문제가 가장 기본적이며 중요하다.

콘크리트 내부의 pH가 11 이상에서 철근은 표면에 1×10^{-6} mm 두께의 수산화물 (γ -Fe₂O₃ · nH₂O) 부동태막을 형성하므로 산소 침입을 막아 철근의 부식을 방지하지만 탄산화에 의하여 pH가 11 보다 낮아지면 부동태막이 파괴되면서 철근에 녹이 발생하게 된다. 이러한 녹은 원래 부피의 약 2.5배에서 최대 7배까지 팽창하며 녹의 팽창압력에 의해 콘크리트 내부에는 균열이 발생하게 되며 철근의 부착강도 저하, 피복 콘크리트의 탈락, 철근 단면적의 감소 등 구조물의 내구성 저하를 초래하게 된다.

나. 탄산화 깊이의 측정

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



<그림 4.2.6> 탄산화시험(1% 페놀프탈레인용액 분무법)

다. 탄산화 판정

<표 4.2.7> 탄산화 손상도의 판정

기준	탄산화 잔여 깊이 (Xc)	철근부식의 가능성
a	· 30mm 이상	탄산화에 의한 부식발생 우려 없음
b	· 10mm ~ 30mm 미만	향후 탄산화에 의한 부식발생 가능성 있음
c	· 0mm 이상 ~ 10mm 미만	탄산화에 의한 부식발생 가능성 높음
d	· 0mm 미만	철근부식 발생

라. 평가기준

① 실험식에 의한 탄산화 깊이 추정

<표 4.2.8> 탄산화 깊이 추정식

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, 혼화제의 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, 혼화제의 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, 실내외 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

주 : 여기서, t는 X까지 탄산화되는 기간(년), C는 탄산화 깊이(cm), x(W/C)는 콘크리트의 물/시멘트비, R은 시멘트와 골재종류 및 혼화제 특성에 관련되는 탄산화 비율 상수로 천연골재를 사용한 보통시멘트는 1이며, W/C비가 불확실한 경우 0.6을 적용한다. 물/시멘트비 60%, R=1 인 경우, 간편식을 사용할 수 있으며 이때 탄산화 속도계수는 $C=3.727$ 로 정의된다.

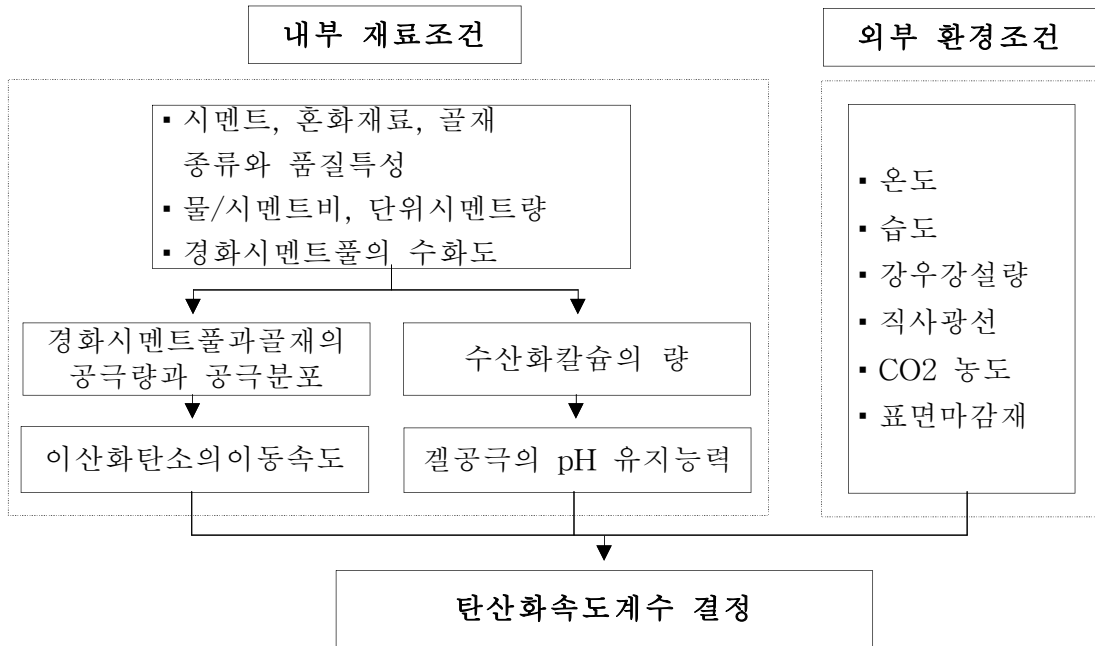
$$\bullet \text{ W/C}=60\% : D(\text{cm}) = \frac{1}{\sqrt{7.2}} \sqrt{t(\text{year})} = 0.3727 \sqrt{t(\text{year})}$$

$$D(\text{mm}) = 3.727 \sqrt{t(\text{year})} \dots\dots\dots(4.7)$$

② 탄산화 속도계수의 영향인자

탄산화의 진행속도는 콘크리트의 모세공극으로의 이산화탄소 이동속도와 겔공극의 pH 유지능력에 의해 결정된다. 경화시멘트풀에 존재하는 겔공극 내부의 pH 유지능력은 수산화칼슘의 양으로 결정되므로 물/시멘트비, 단위시멘트량, 단위수량, 경화시멘트풀의 수화도(degree of hydration) 등의 영향을 받는다.

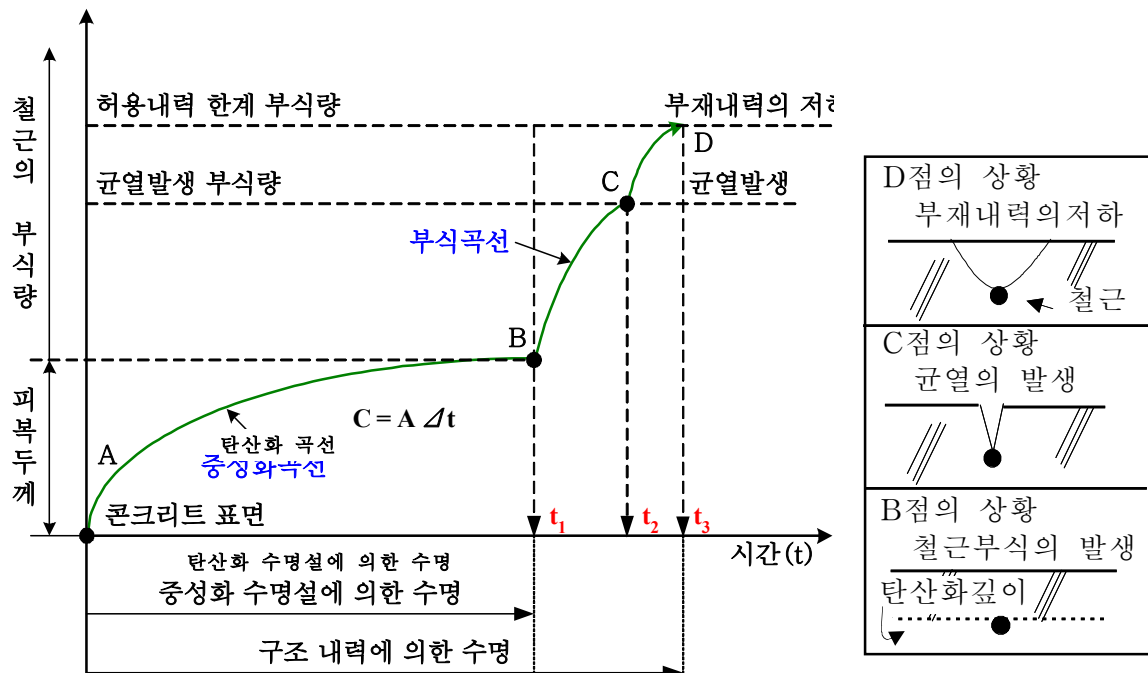
탄산화속도계수의 평가시 고려하여야 하는 영향인자를 내부 재료조건과 외부 환경조건으로 구분하여 정리하면 다음과 같다.



<그림 4.2.7> 탄산화속도계수의 영향인자

③ 내구수명 평가

콘크리트가 탄산화 되어 철근의 부식이 시작되고, 수명에 이르는 개념을 다음 그림에 나타내었다. t_1 은 탄산화영역이 철근표면에 도달하는 시점, t_2 는 그 결과 철근이 부식되고 콘크리트에 균열을 발생시키는 시점, t_3 는 부재내력이 한계에 달하는 시점이다.



<그림 4.2.8> 탄산화와 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 것이 도출된다. 이것은 통상, $\sqrt{t}$ 법으로 불리며, 가장 일반적으로 사용되고 있다.

$$\bullet C = A \sqrt{t} \dots\dots\dots (4.8)$$

여기서, C : 탄산화깊이(mm), A : 탄산화 속도계수(mm/년), t : 재령(년)

④ 경과년수에 따른 수명 평가

본 과업에서 탄산화에 의한 수명 평가는 경과년수와 탄산화깊이와의 관계를 통해 탄산화 속도계수를 역추적하여 탄산화가 철근에 도달하는 시간을 계산하였다. 앞서 언급한 식 $D = A \sqrt{t}$ 에서 준공 후 현재까지의 경과년수 t_0 는 설계도로부터 구할 수 있고 탄산화 깊이 D 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.

$$\bullet t_d = \frac{D_c^2}{A^2} - t_0 \dots\dots\dots (4.9)$$

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 경과시간(year)이다.

마. 탄산화 깊이 측정 시험의 결과분석

본 과업에서는 실측 피복에서 탄산화 잔여깊이를 평가 하였으며 경과년수와 재료 조건에 근거하여 도출한 이론 탄산화깊이와 비교·평가 및 기 조사자료와 함께 분석 하여 재령에 따른 탄산화 깊이를 정량화 하는데 중점을 두었다.

<표 4.2.9> 탄산화 잔여깊이를 통한 상부구조 내구성 평가

위 치		탄산화 깊이(mm)	피복두께 (mm)	잔여깊이 (mm)	현장 속도계수 (mm/√년)	등급
상부 구조	바닥판 하면 S1	11.0	50	39.0	2.6	a
	바닥판 하면 S2	8.0	50	42.0	1.9	a
	바닥판 하면 S3	12.0	50	38.0	2.8	a
평가	▶ 경과년수 : 18년 ▶ 이론깊이 : 15.81mm, 이론속도계수 : 3.7mm/√년 ▶ 실제 잔존수명 : 약 100년 ▶ 분석결과, 전체적으로 탄산화 잔여깊이가 30mm이상으로 철근부식의 우려가 없는 'a등급'으로 양호한 상태임. ▶ 주기적 유지관리 필요함.					

(mm)

Location	Carbonation Depth (mm)	Remaining Depth (mm)
바닥판 하면 S1	11.0	39.0
바닥판 하면 S2	8.0	42.0
바닥판 하면 S3	12.0	38.0

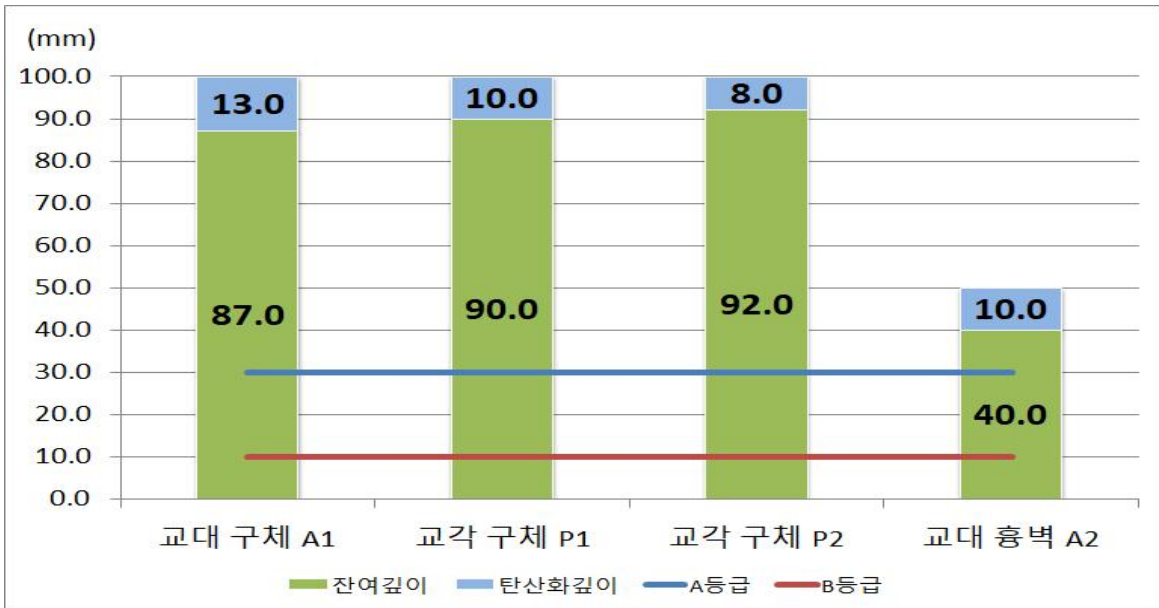
바닥판 하면 S1 바닥판 하면 S2 바닥판 하면 S3

잔여깊이(mm) 탄산화 깊이(mm) A등급 B등급

<표 4.2.10> 탄산화 잔여깊이를 통한 하부구조 내구성 평가

위 치		탄산화 깊이 (mm)	피복두께 (mm)	잔여깊이 (mm)	현장 속도계수 (mm/√년)	등급
하부 구조	교대 구체 A1	13.0	100	87.0	3.1	a
	교각 구체 P1	10.0	100	90.0	2.4	a
	교각 구체 P2	8.0	100	92.0	1.9	a
	교대 홍벽 A2	10.0	50	40.0	2.4	a
평가	▶ 경과년수 : 18년 ▶ 이론깊이 : 15.81mm, 이론속도계수 : 3.7mm/√년 ▶ 실제 잔존수명 : 100년 이상 ▶ 분석결과, 전체적으로 탄산화 잔여깊이가 30mm이상으로 철근부식의 우려가 없는 ‘a등급’으로 양호한 상태임. ▶ 주기적 유지관리 필요함.					

(mm)



구체	탄산화깊이 (mm)	잔여깊이 (mm)
교대 구체 A1	13.0	87.0
교각 구체 P1	10.0	90.0
교각 구체 P2	8.0	92.0
교대 홍벽 A2	10.0	40.0

■ 잔여깊이 ■ 탄산화깊이 — A등급 — B등급

바. 기시험 결과와 비교

<표 4.2.11> 기 점검결과 탄산화 진행 깊이 비교

구분	탄산화 진행 깊이 (mm)	
	전차('15)	금차('17)
바닥판	10.2	8.0~12.0
하부구조	9.2~11.4	8.0~13.0
평가	탄산화 측정 깊이가 8.0~13.0mm 진행된 상태이나 탄산화에 영향을 받을 수 있는 철근 피복 잔여깊이가 30.0mm이상으로 철근부식의 우려가 없음.	

4.3 시험결과와 분석

<표 4.3.1> 내구성평가 결과

시험명	시험부위	건전부위	불량부위	설계기준	평가
반발 경도 (MPa)	바닥판 하면	27.2~29.4	27.3	27.0	양호
	하부구조	25.0~25.9	25.6	24.0	양호
탄산화 깊이 (mm)	바닥판 하면	8.0~2.0 (잔여깊이 : 38.0~42.0)		잔여깊이 ≥ 30mm	a등급
	하부구조	8.0~13.0 (잔여깊이 : 40.0~92.0)		잔여깊이 ≥ 30mm	a등급
종합 평가	· 반발경도 시험 - 시험분석 결과 설계기준강도 이상으로 양호한 수준 유지함. - 열화 및 손상부위 근접한 부분의 반발경도 현장확인 결과, 건전 부위 측정치와 비교시 강도의 저하가 크게 나타나지 않음. (불량부위 부근의 콘크리트 추정압축강도 양호)				
	· 탄산화 시험 - 탄산화 잔여 피복두께 30mm이상 확보. (상태등급 : a등급) - 이론 속도 계수(3.7mm/√년) > 실제 탄산화 속도 계수(1.9~2.8mm/√년) ▶ 탄산화 진행 속도가 이론치보다 천천히 진행됨. ▶ 경과년수 : 18년(1999년 준공, 이론깊이 : 15.81mm) - 전차 용역과 비교 시 잔여피복두께는 30mm 이상을 유지하며, 지속적인 유지관리 요함.				