

제4장

내구성 평가

- 4.1 개 요
- 4.2 콘크리트 압축강도
- 4.3 철근 배근 조사
- 4.4 탄산화 시험
- 4.5 염화물 함유량 시험
- 4.6 균열 깊이 조사
- 4.7 강재 비파괴 시험
- 4.8 내구성 시험 종합평가

제 4 장 내구성 평가

4.1 개 요

내구성 평가는 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 적용 범위는 다음과 같다.

- 내구성 조사는 구조체를 중심으로 수행한다.
- 내구성 조사는 조사 시점의 열화상태 뿐만 아니라 구조물의 이력, 주변환경, 열화원인을 조사하여 향후 열화손상 진행정도를 예측하고, 내용 년 수 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.

과업 대상 시설물은 콘크리트 재료의 역학적, 물리·화학적 특성을 평가하기 위해 내구성 조사를 실시하였다.

콘크리트 비파괴 조사는 교량의 안전성 평가를 위한 시험과 내구성 평가를 위한 시험으로 구분하여 실시하였으며, 외관조사 내용과 함께 구조물의 상태평가, 보수·보강공법 및 유지관리 방안 제시의 기초 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

4.2 콘크리트 압축강도

4.2.1 반발경도법

가. 개 요

반발경도 시험법은 콘크리트 구조물의 압축강도를 비파괴 검사로 추정하는 방법으로, Schmidt Hammer를 이용하여 콘크리트 표면의 반발경도를 측정, 이 결과로부터 압축강도를 추정한다.

반발경도 측정은 방법이 비교적 용이하고 간편하며, 시험대상 구조물의 형상 및 크기에 관계없이 적용이 가능하다. 그러나 콘크리트 표면 상태에 국한되고 콘크리트 내부의 강도를 추정할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

또한, 콘크리트와 같은 비 균질 재료는 Schmidt Hammer를 이용하여 표면에서 국부적인 타격을 하는 경우에 반발치(R)가 타격면에 존재하는 굽은 골재의 유무, 표면요철, 먼지, 습윤상태 등에 따라 영향을 받아 측정 위치별로 결과치의 차이가 발생할 수 있다.

이러한 단점에도 불구하고 간편하면서 신속하고 구조물 전체에 대한 압축강도 추정이 가능하여, 국제적으로 표준화된 장점이 있다.

반발경도 측정은 측정위치로 선정된 부위를 그라인딩으로 표면을 매끈하게 정리한 후 3cm의 격자간격으로 평균 20회 이상 타격한다. 반발경도 측정 후에는 측정값을 산술 평균한 다음 평균값에서 $\pm 20\%$ 이상 되는 값은 버리고 나머지 값들에 대하여 다시 산술 평균치를 구하여 측정 지점의 반발치로 한다. 다만, 반발치가 분산되어 제외시킨 측정값이 4개 이상일 때는 측정 지점의 반발치는 버린다. 여기서, 측정된 반발치 값들이 많은 편차를 보이면 보편적으로 콘크리트 표면의 품질상태가 불균질한 것으로 판단될 수 있을 것이다.

나. 반발경도(R) 보정

측정된 반발치(R)를 이용하여 콘크리트의 압축강도(F_c)를 추정하는 기법은 다음과 같다.

1) 기준경도 R_0 의 보정

기준경도 R_0 은 다음식과 같이 측정된 반발경도 R에 보정치 ΔR 을 더하여 구한다.

$$R_0 = R + \Delta R$$

2) 타격방향에 따른 보정

수평방향의 타격에 의한 측정치가 안정된 값을 나타내지만 타격방향이 다른 경우에

는 반발치를 보정해 주어야 한다.

하향타격(-90°)의 경우에는 내부의 해머 중량에 의해서 실제보다 반발값이 작아지므로 (+)값으로 수정해 주어야 하며, 상향타격(+90°)의 경우에는 반대 현상에 의해서 (-)값으로 수정해 주어야 한다. 타격방향에 따른 보정계수는 【표 4.1】과 같다.

【표 4.1】 타격방향에 따른 반발경도 보정값(ΔR)

반발경도 (R)	수평과 이루는 각도			
	+90°(상향수직)	+45°(상향경사)	-45°(하향경사)	-90°(하향수직)
10	-	-	+2.4	+3.2
20	-5.4	-3.5	+2.5	+3.4
30	-4.7	-3.1	+2.3	+3.1
40	-3.9	-2.0	+2.0	+2.7
50	-3.1	-2.7	+1.6	+2.2
60	-2.3	-1.6	+1.3	+1.7

3) 콘크리트 습윤 상태에 대한 보정

콘크리트 표면이 습윤 상태에 있으면 기건 상태보다 반발치가 적게 나타나므로 완전 습윤 상태에서는 기건 상태를 기준으로 $\Delta R = +5$ 로 보정한다.

4) 콘크리트 재령에 대한 보정

수년이 경과한 콘크리트 구조물은 표면의 강도가 높기 때문에 재령 28일 압축강도로 환산수정하여 콘크리트의 압축강도를 추정한다. 콘크리트 재령에 따른 압축강도의 보정계수 n 은 【표 4.2】와 같고 3,000일 이상의 재령에 대해서는 0.63을 적용한다.

【표 4.2】 재령에 따른 시간경과계수

재 령 (일)	5	10	14	20	28	30	40	60	80
시간경과계수 (n)	1.84	1.55	1.37	1.15	1.00	0.99	0.93	0.86	0.82
재 령 (일)	100	150	200	400	500	750	1000	2000	3000
시간경과계수 (n)	0.78	0.74	0.72	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.63

다. 압축강도의 추정

기준경도 R_0 를 이용하여 압축강도(F_c)를 추정하는 식은 일반적으로 널리 사용되고 있는 일본재료학회에서 제안된 식을 사용한다.

$$F_c = n \cdot (1.3 \cdot R_0 - 18.0) \quad [\text{일본재료학회}]$$

여기서, F_c : 콘크리트 추정압축강도(MPa)

n : 시간경과계수

R_0 : 기준경도

라. 측정 결과

1) 부재별 측정 결과

【표 4.3】 부재별 반발경도 시험 결과

구분	부재명	측정압축강도 (MPa)	평균압축강도 (MPa)	설계기준강도 (MPa)	판정 (비파괴/기준)
바닥판	S1-공주방향	27.0 ~ 27.7	27.3	27.0	1.01 ≥ 0.9 O.K
	S1-대전방향	27.1 ~ 28.7	27.9	27.0	1.03 ≥ 0.9 O.K
	S2-공주방향	27.1 ~ 27.5	27.3	27.0	1.01 ≥ 0.9 O.K
	S2-대전방향	29.0 ~ 29.7	29.3	27.0	1.09 ≥ 0.9 O.K
	S3-공주방향	27.9 ~ 28.4	28.2	27.0	1.04 ≥ 0.9 O.K
	S3-대전방향	29.3 ~ 29.8	29.5	27.0	1.09 ≥ 0.9 O.K
	S4-공주방향	28.7 ~ 31.0	29.9	27.0	1.11 ≥ 0.9 O.K
	S4-대전방향	29.2 ~ 29.4	29.3	27.0	1.09 ≥ 0.9 O.K
	S5-공주방향	28.2 ~ 29.5	28.8	27.0	1.07 ≥ 0.9 O.K
	S5-대전방향	28.0 ~ 29.0	28.5	27.0	1.06 ≥ 0.9 O.K
	S6-공주방향	28.2 ~ 30.7	29.4	27.0	1.09 ≥ 0.9 O.K
	S6-대전방향	27.5 ~ 28.5	28.0	27.0	1.04 ≥ 0.9 O.K
교대	A1	22.0 ~ 22.3	22.2	21.0	1.06 ≥ 0.9 O.K
	A2	21.9 ~ 22.8	22.3	21.0	1.06 ≥ 0.9 O.K
교각	P1	25.1 ~ 26.3	25.7	24.0	1.07 ≥ 0.9 O.K
	P2	25.0 ~ 27.1	26.0	24.0	1.08 ≥ 0.9 O.K
	P3	26.2 ~ 26.6	26.4	24.0	1.10 ≥ 0.9 O.K
	P4	24.9 ~ 25.8	25.3	24.0	1.05 ≥ 0.9 O.K
	P5	24.8 ~ 26.9	25.9	24.0	1.08 ≥ 0.9 O.K

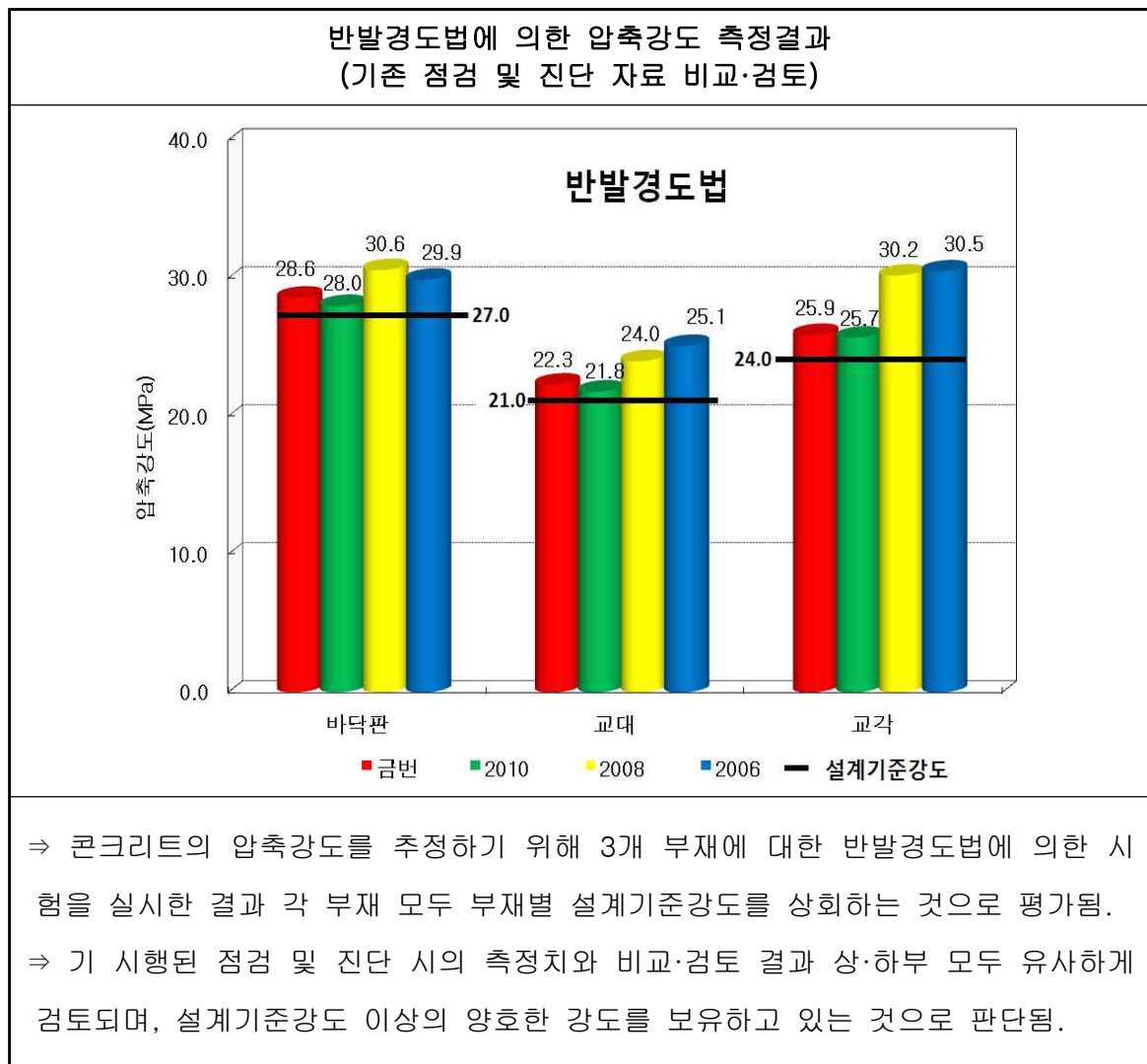
2) 측정 결과 분석

【표 4.4】 반발경도 시험 결과 분석

구분	측정압축강도 (MPa)	평균압축강도 (MPa)	설계기준강도 (MPa)	판정 (비파괴/설계기준)
바닥판	27.0 ~ 31.0	28.6	27.0	1.06 ≥ 0.9 O.K
교대	21.9 ~ 22.8	22.3	21.0	1.06 ≥ 0.9 O.K
교각	24.8 ~ 27.1	25.9	24.0	1.08 ≥ 0.9 O.K

※ 판정 기준 : $\frac{\text{비파괴}}{\text{설계기준}} \geq 0.90$: 건전

⇒ 장암교의 콘크리트의 압축강도를 추정하기 위해 3개 부재(총 38개소)에 대한 반발경도법에 의한 시험을 실시한 결과 각 부재 모두 부재별 설계기준강도를 상회하는 것으로 평가된다.



【그림 4.1】 반발경도법에 의한 압축강도 측정 결과 비교 분석

4.2.2 초음파법 및 조합법

가. 초음파 속도법에 의한 전달속도 분석

초음파의 투과속도가 콘크리트의 밀도 및 탄성계수에 따라서 변화하는 것을 이용하며, 이 투과속도로부터 콘크리트의 동적특성, 강도 등을 하는 방법이다. 강도에 적용할 경우에는 반발경도법과 초음파법의 조합식을 이용하는 방법이 있으나 초음파법에 의한 오차 범위가 크다는 것은 강도 평가에 있어서 주의가 필요한 것으로 판단된다.

1) 전달 속도의 산정

초음파 전달속도를 결정하는 방법으로 초음파가 전달되는 거리를 미리 측정하고, 초음파 전달시간을 측정한 후 다음 식에 의해서 전달속도를 구한다.

$$\text{전달속도(Velocity)} = \text{전달길이(Path Length)} / \text{전달시간(Transit Time)}$$

전달속도는 각 거리별 전달속도를 산술평균하는 방법과 회귀분석에 의한 직선의 기울기를 적용하는 방안이 있으며, 금번 조사 결과에 의하면 전반적으로 산술평균하는 경우가 약 10%이상 크게 나타난다.

본 평가에서는 회귀분석에 의한 직선의 기울기 함수를 전달속도로 정의한다.

초음파탐사를 위한 탐촉자의 배열은 직접법, 반직접법 및 간접법이 있으며, 간접법과 직접법에서 구한 초음파 전달속도는 근사적으로 다음과 같은 관계가 있다.

$$V_d \approx 1.05 V_i$$

여기서, V_d = 직접법(Direct method)에 의한 초음파 속도

V_i = 간접법(Indirect method)에 의한 초음파 속도

간접법은 일정거리를 등 간격으로 떨어진 2측점을 정하고 초음파의 전달거리(X_i)에 따른 전달시간 T_i 를 측정한다.

2) 전달 속도와 콘크리트 품질

근래의 초음파법에 의한 콘크리트 강도평가는 그 정도가 매우 낮기 때문에 강도 측정에는 한계가 있다는 견해가 크므로 콘크리트의 품질을 평가하는 데 의미를 두고 있는 실정이다.

【표 4.5】 초음파에 따른 강도 범위 및 신뢰도*

등 급	초음파 속도 (km/sec)	강도범위 (MPa)	신뢰도 (%)
I	4.5 이상	240이상	85
II	3.8 ~ 4.5	200이상	85
III	3.2 ~ 3.8	160이상	85
IV	2.1 ~ 3.2	11.5이상	85
V	2.1 이하	11.5이하	57

* 무근콘크리트의 초음파 속도법에 의한 품질등급과 강도범위 예(한국시설안전기술공단)

3) 콘크리트 압축강도 추정식

전달속도에 따른 콘크리트 압축강도의 추정을 위하여 초음파속도와 압축강도의 상관 관계를 도출한 다음 식을 일반적으로 사용한다.

$$F_c = (215V_d - 620) \times 0.1 \text{ (일본건축학회 CNDT 소위원회 공동제안식)}$$

$$F_c = (339.1V_d - 1107) \times 0.1 \text{ (한전기술연구원 제안식)}$$

여기서, F_c : 콘크리트 압축강도 (MPa)

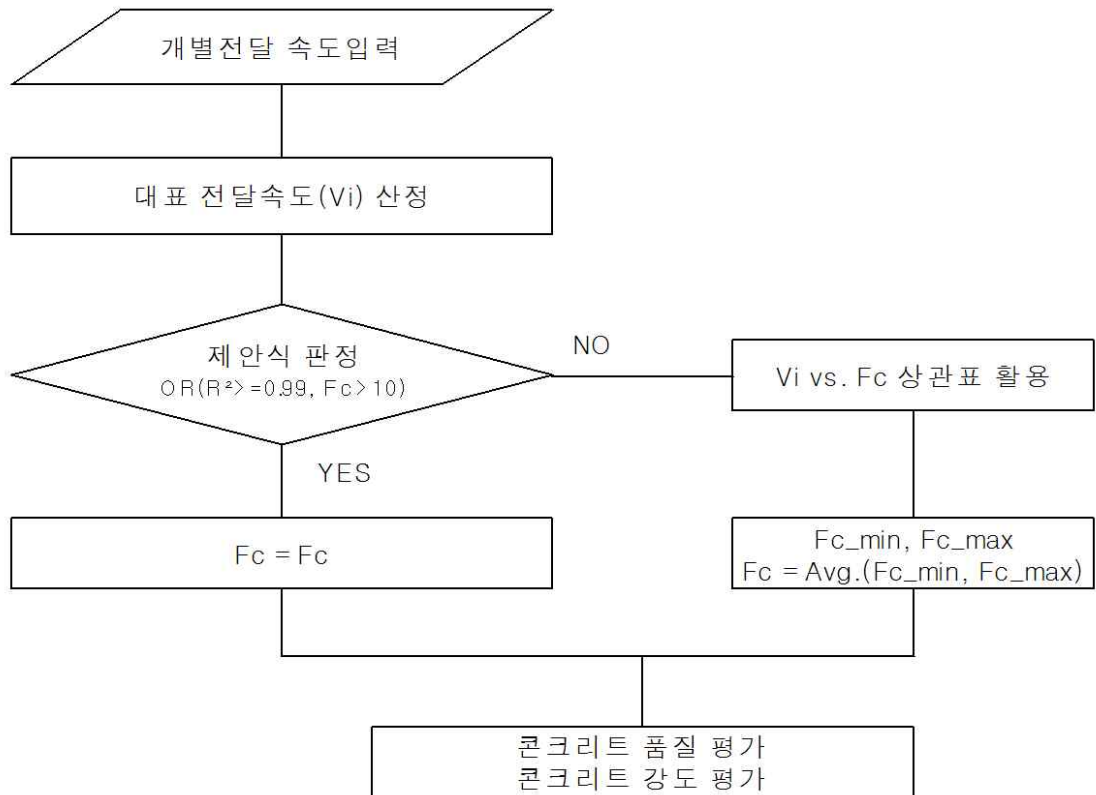
$$V_d(\text{km/sec}) \approx 1.05V_i(\text{km/sec})$$

상기 식에서 압축강도가 산출될 수 있는 전달속도(V_i)의 최대 한계는 다음과 같다.

$$\textcircled{A} \text{ 일본건축학회 식 : } V_i = 620/215/1.05 = 2.746 \text{ km/sec}$$

$$\textcircled{B} \text{ 한전기술연구원 식 : } V_i = 1107/339.1/1.05 = 3.109 \text{ km/sec}$$

따라서 상기 식에 의한 10MPa를 만족할 수 있는 전달속도는 3.189 ~ 3.390km/sec의 III등급 콘크리트 이다. 그러나 실제 현장에서 획득한 전달속도 중 어떤 경우는 상기 III등급 미만의 전달속도가 측정되므로, R.C 구조물의 초음파 속도별 강도범위자료가 제안되기 전까지는 상기 표를 활용하여 콘크리트의 압축강도 상·하한을 구하여 평가함이 타당할 것으로 판단된다.



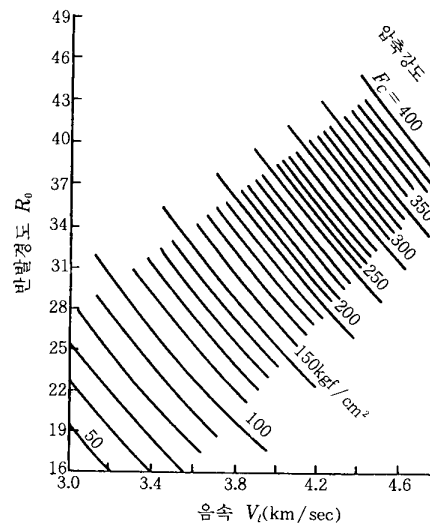
【그림 4.2】 초음파법에 의한 콘크리트 평가 흐름도

나. 조합법 개요

비파괴 검사 조합법은 콘크리트 강도와 일정한 상관관계를 갖는 2가지 이상의 비파괴 시험값을 병용해서 강도추정의 정확도를 높이기 위한 것이다. 여기서, 각종 비파괴 시험값을 조합시키는 방법은 다음과 같다.

- 1) 반발경도 + 초음파
- 2) 반발경도 + 인발내력
- 3) 초음파 + Maturity
- 4) 반발경도 + 초음파 + 인발내력

이 중에서 반발경도와 초음파의 조합법이 일반적으로 사용하고 있으며 루마니아, Rilem 등에서는 규준으로 제정되어 있다.



【그림 4.3】 반발경도(R0)의 음속(Vp)에 의한 압축강도 (Fc)의 추정도표(루마니아)

콘크리트 강도 추정은 일본 건축학회 콘크리트 비파괴 시험법 연구위원회에서 실시한 공동실험결과에 의한 비파괴 검사 조합법이 주로 사용되며 이것은 다음 식을 이용하여 콘크리트의 강도를 추정한다

㉠ 보통콘크리트 : $F_c = 8.2R_o + 269V_p - 1,094$

㉡ 경량콘크리트 : $F_c = 4.1R_o + 334V_p - 1,022$

곡천 등은 상기 식 중 보통콘크리트에 대한 공동실험결과를 다음과 같이 수정 제안하였다.

㉢ $F_c = 10.2(kR_o) + 223V_p - 960$

여기서 k = 재령에 의한 보정계수

재령 13주 이내, $k=1.0$

재령 13~26주, $k=1.0 \sim 0.9$ 사이 직선보간

재령 26주 이상, $k=0.9$

㉣ 릴렘(RILEM)식 (본 과업에 적용)

$$\log_0 F'_c = 0.3794V_p + 0.01149R_o + 0.4332$$

$$F'_c = 0.85F_c$$

본 과업에서는 슈미트햄머에 의한 반발경도와 초음파탐사에 의한 전파속도를 측정하여 상기의 식중 보통콘크리트에 해당되는 ㉣식을 적용하여 조합법에 의한 콘크리트 강도를 추정하였다.

다. 측정 결과

1) 부재별 측정 결과

【표 4.6】 부재별 조합법 시험 결과

구 분		반발경도 (R0)	속도 Vd(km/s)	압축강도 (MPa)	설계기준강도 (MPa)	판 정 (비파괴/기준)	품질 등급
바닥판	S1-공주-1	48.4	3.891	29.4	27.0	1.09 ≥ 0.9 O.K	II
	S1-공주-2	48.4	3.928	30.4	27.0	1.13 ≥ 0.9 O.K	II
	S1-대전-1	49.0	3.989	32.7	27.0	1.21 ≥ 0.9 O.K	II
	S1-대전-2	49.0	3.937	31.2	27.0	1.16 ≥ 0.9 O.K	II
	S2-공주-1	48.3	3.986	32.0	27.0	1.19 ≥ 0.9 O.K	II
	S2-공주-2	48.3	3.912	29.9	27.0	1.11 ≥ 0.9 O.K	II
	S2-대전-1	50.8	3.909	31.9	27.0	1.18 ≥ 0.9 O.K	II
	S2-대전-2	50.8	3.868	30.7	27.0	1.14 ≥ 0.9 O.K	II
	S3-공주-1	49.3	3.948	31.7	27.0	1.18 ≥ 0.9 O.K	II
	S3-공주-2	49.3	3.968	32.4	27.0	1.20 ≥ 0.9 O.K	II
	S3-대전-1	51.1	3.911	32.2	27.0	1.19 ≥ 0.9 O.K	II
	S3-대전-2	51.1	3.943	33.1	27.0	1.23 ≥ 0.9 O.K	II
	S4-공주-1	51.5	3.990	35.0	27.0	1.30 ≥ 0.9 O.K	II
	S4-공주-2	51.5	3.990	35.0	27.0	1.30 ≥ 0.9 O.K	II
	S4-대전-1	50.8	4.032	35.7	27.0	1.32 ≥ 0.9 O.K	II
	S4-대전-2	50.8	3.953	33.2	27.0	1.23 ≥ 0.9 O.K	II
	S5-공주-1	50.2	3.896	31.0	27.0	1.15 ≥ 0.9 O.K	II
	S5-공주-2	50.2	3.893	30.9	27.0	1.14 ≥ 0.9 O.K	II
	S5-대전-1	49.8	3.953	32.3	27.0	1.20 ≥ 0.9 O.K	II
	S5-대전-2	49.8	3.956	32.4	27.0	1.20 ≥ 0.9 O.K	II
	S6-공주-1	50.9	3.939	32.8	27.0	1.22 ≥ 0.9 O.K	II
	S6-공주-2	50.9	3.934	32.7	27.0	1.21 ≥ 0.9 O.K	II
	S6-대전-1	49.1	3.956	31.8	27.0	1.18 ≥ 0.9 O.K	II
	S6-대전-2	49.1	3.937	31.3	27.0	1.16 ≥ 0.9 O.K	II
	평균	49.9	3.942	32.2	27.0	1.19 ≥ 0.9 O.K	II
교대	A1-수직	41.9	3.820	23.2	21.0	1.11 ≥ 0.9 O.K	II
	A1-수평	41.9	3.864	24.2	21.0	1.15 ≥ 0.9 O.K	II
	A2-수직	42.1	3.918	25.5	21.0	1.22 ≥ 0.9 O.K	II
	A2-수평	42.1	3.897	25.1	21.0	1.19 ≥ 0.9 O.K	II
	평균	42.0	3.875	24.5	21.0	1.17 ≥ 0.9 O.K	II

※ 판정 기준 : 비파괴 ≥ 0.90 : 건전
설계기준

구 분		반발경도 (R0)	속도 Vd(km/s)	압축강도 (MPa)	설계기준강도 (MPa)	판 정 (비파괴/기준)	품질 등급
교각	P1-수직	46.3	3.824	26.2	24.0	1.09 ≥ 0.9 O.K	II
	P1-수평	46.3	3.851	26.8	24.0	1.12 ≥ 0.9 O.K	II
	P2-수직	46.7	3.873	27.7	24.0	1.15 ≥ 0.9 O.K	II
	P2-수평	46.7	3.818	26.3	24.0	1.10 ≥ 0.9 O.K	II
	P3-수직	47.1	3.827	26.8	24.0	1.12 ≥ 0.9 O.K	II
	P3-수평	47.1	3.762	25.3	24.0	1.05 ≥ 0.9 O.K	III
	P4-수직	45.8	3.830	26.0	24.0	1.08 ≥ 0.9 O.K	II
	P4-수평	45.8	3.827	25.9	24.0	1.08 ≥ 0.9 O.K	II
	P5-수직	46.5	3.805	25.9	24.0	1.08 ≥ 0.9 O.K	II
	P5-수평	46.5	3.922	28.8	24.0	1.20 ≥ 0.9 O.K	II
	평균	46.5	3.834	26.6	24.0	1.11 ≥ 0.9 O.K	II

※ 판정 기준 : $\frac{\text{비파괴}}{\text{설계기준}} \geq 0.90$: 건전

2) 측정 결과 분석

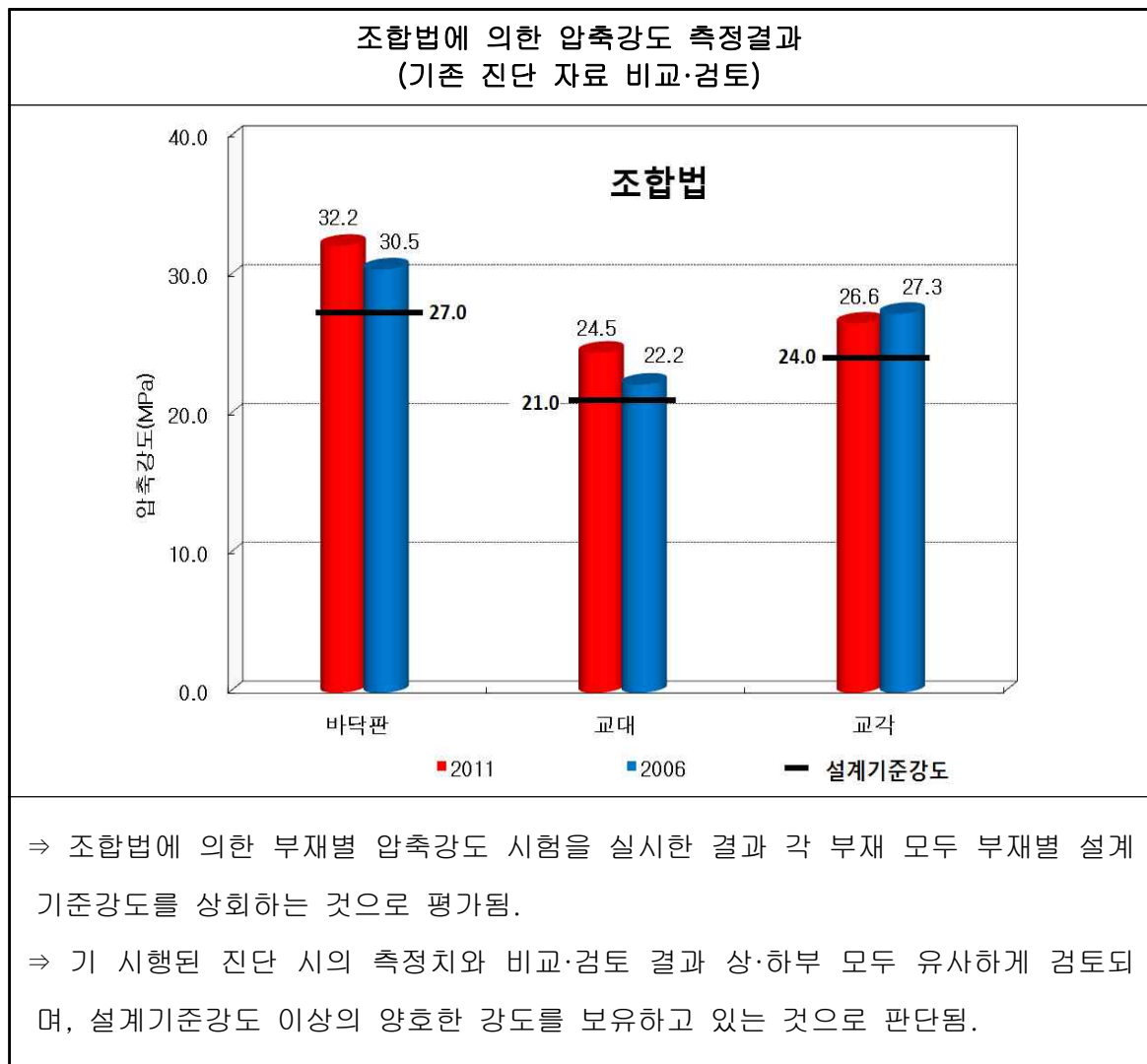
【표 4.7】 조합법 시험 결과 분석

구분	측정압축강도 (MPa)	평균압축강도 (MPa)	설계기준강도 (MPa)	판 정 (비파괴/기준)	평균전달속도 (Vd)(km/s)	품질 판정
바닥판	29.4 ~ 35.7	32.2	27.0	1.19 ≥ 0.9 O.K	3.942	II
교대	23.2 ~ 25.5	24.5	21.0	1.17 ≥ 0.9 O.K	3.875	II
교각	25.3 ~ 28.8	26.6	24.0	1.11 ≥ 0.9 O.K	3.834	II

※ 판정 기준 : $\frac{\text{비파괴}}{\text{설계기준}} \geq 0.90$: 건전

⇒ 조합법에 의한 부재별 압축강도 시험을 실시한 결과 각 부재 모두 부재별 설계기준 강도를 상회하는 것으로 평가된다.

⇒ 초음파법에 의한 부재별 평균전달속도는 3.834~3.942km/s로서 콘크리트의 품질은 양호한 II등급으로 평가된다.



【그림 4.4】 조합법에 의한 압축강도 측정 결과 비교 분석

4.2.3 코아 압축강도 시험

가. 압축강도 보정

압축강도 시험은 KS F 2405, 2412, 2422 규정에 의하여 콘크리트의 압축강도 시험 방법을 따르며, 공시체의 높이가 그 직경의 2배 이하인 경우에는, 시험으로 얻어진 압축강도에 다음 【표 4.8】 코아 길이에 따른 보정 계수에 따라 보정 계수를 곱하여 직경의 2배의 높이를 갖는 공시체의 강도로 환산한다.

【표 4.8】 코아 길이에 따른 보정계수

높이와 직경비 (h/d)	보 정 계 수	비 고
2.00	1.00	h/d가 이표에 표시된 값의 중간에 있는 경우에는 보정계수를 직선 보간법으로 구한다.
1.75	0.98	
1.50	0.96	
1.25	0.93	
1.00	0.89	

나. 콘크리트 코아의 압축강도 특성

- 1) 코아 강도의 보정을 ACI code에서는 개개의 강도는 기준강도의 75%이상, 평균 강도는 85% 이상의 수준을 확보하고 있다면 양호한 것으로 평가하고 있다.
- 2) 실제의 구조물에서는 표준공시체의 양생조건과 동일한 양생방법을 기대할 수 없기 때문에 콘크리트 구조물이 재령이 경과함에 따라 강도가 증가한다 할지라도 표준양생한 공시체의 28일 압축강도보다 항상 크지는 않다.

따라서 현장 양생한 구조물의 코아 강도는 표준공시체의 28일 압축강도와 같게 보는 것이 일반적이며, 코아 강도에 대해서는 재령에 대한 보정은 하지 않는다.

다. 콘크리트 코아의 압축강도에 영향을 미치는 인자

- 1) 기존 구조물에서 콘크리트 코아 채취 시 드릴링 작업에 의해서 코아 시료가 어느 정도 교란되기 때문에 코아 공시체의 압축강도는 동일 조건의 표준 공시체의 압축강도보다 항상 작은 값을 나타내며, 드릴링 시 토크의 세기가 크면 클수록 코아 강도는 저하되며, 드릴링 속도가 빠르면 또한 코아 강도는 작아지는데 이때 표준 공시체 강도의 약 10%정도가 감소된다.
- 2) 코아는 일반적으로 구조물의 최상단에서 가장 낮은 강도를 갖고 밑으로 깊이가 깊어질수록 코아의 강도는 증가하지만 300mm 이상의 두께에서는 더 이상의 강도증가

는 없는 것으로 보고되고 있다. 수평방향으로 코아를 채취하면 수직으로 채취한 경우보다 전형적으로 8%가량 강도가 감소한다는 사실이 실험적으로 입증되었다.

- 3) 콘크리트 코아 내부를 가로지르는 철근이 있는 경우에는 시험결과 5~10% 정도가 감소되므로 이에 대한 보정이 필요하다.

라. 측정 결과

【표 4.9】 코아 압축강도 시험 결과

구분	측정 f_c (MPa)	f_{ck} (MPa)	판정
교 대(A1)	32.4	21.0	O.K

⇒ 하부구조 교대에서 채취한 코아에 대한 일축압축강도 측정 결과 A1은 설계기준강도를 상회하는 양호한 상태로 평가된다.

4.3 철근 배근 조사

가. 개 요

크랙의 원인은 적절하지 못한 철근배근을 함으로써 인장력에 대한 콘크리트에 균열이 발생할 수 있다. 그러므로 진단대상인 구조물중 주요 구조부재별로 시공 상태를 규명하기 위한 수단으로 철근배근과 철근 피복두께를 조사하였다.

조사장비로는 Ferroskan, Covermeter, Profermeter-3, RC-Radar 등이 있으며, 본 진단에서는 RC-Radar을 사용하였다.

나. RC-Radar 원리

콘크리트에 수백 MHz의 전자파를 안테나로부터 콘크리트 표면을 향하여 발사하고 콘크리트 내부의 전도율이 다른 물체(철근이나 공동 등)에서 반사파를 일으키는 성질을 이용하여 전파의 발신과 수신을 왕복한 전파시간과 반사물체까지의 거리를 구하고 반사파의 영상을 해석하여 콘크리트 내부에 배근되어 있는 철근의 간격과 피복두께 등을 측정한다.

다. RC-Radar 현황

RC-Radar를 이용한 철근탐사는 현재 비파괴 철근탐사방법으로 가장 많이 사용되는 것으로서 레이더 탐사법에 의한 철근의 정량적 배근 검사기술이다. 기존의 자기법 등에 의한 검사로는 한계가 있는 철근의 피복두께 및 배근간격 등을 직접 육안으로 파악할 수 있으며, 지금까지의 철근 배근 검사기술로서는 가장 유력한 검사법이다.

라. 측정 원리

전자파를 안테나로부터 콘크리트를 향해 방사해 그 전자파가 콘크리트와 전기적 성질이 다른 물질(철근, 공동등)이 반사물체와의 경계면에서 반사되어 다시 콘크리트 표면에 나와서 표면가까이에 위치한 수신안테나에 도달 할 때까지의 시간으로 반사물체까지의 거리를 알 수 있다.

콘크리트중의 전자파의 속도(V)는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{C}{\epsilon\gamma} \text{ (m/s)}$$

여기서 V : 전자파 속도

C : 진공중(공기중)에서의 전자파 속도($3 \times 10^8 \text{m/s}$)

$\epsilon\gamma$: 콘크리트의 비 유전율(8~20)

또한, 반사물체까지의 거리(D)는 송신시각부터 반사파의 수신시각까지의 시간차(T)에서 다음 식과 같이 나타내어지는데 이로 인해 철근의 피복두께를 알 수 있다.

$$D = \frac{VT}{2}$$

여기서 D : 반사물체까지의 거리(m)

V : 콘크리트내 전파속도

T : 송신시각부터 수신시각까지의 시간차

마. 측정 결과

【표 4.10】 철근 배근 조사 결과

구 분	부재명	주철근					배력철근					비 고
		평균간격 (mm)		평균순피복 (mm)		사용 철근	평균간격 (mm)		평균순피복 (mm)		사용 철근	
		측정	설계	측정	설계		측정	설계	측정	설계		
바닥판	S1-공주방향	248	250	68	32	H16	302	300	74	48	H16	
	S1-대전방향	250	250	64	32	H16	200	205	86	48	H16	
	S2-공주방향	250	250	74	32	H16	291	300	78	48	H16	
	S2-대전방향	249	250	77	32	H16	199	205	88	48	H16	
	S3-공주방향	250	250	70	32	H16	302	300	78	48	H16	
	S3-대전방향	250	250	77	32	H16	201	205	94	48	H16	
	S4-공주방향	255	250	53	32	H16	296	300	61	48	H16	
	S4-대전방향	246	250	70	32	H16	198	205	96	48	H16	
	S5-공주방향	258	250	67	32	H16	300	300	75	48	H16	
	S5-대전방향	252	250	65	32	H16	304	300	78	48	H16	
	S6-공주방향	247	250	47	32	H16	209	300	56	48	H16	
	S6-대전방향	245	250	59	32	H16	163	205	65	48	H16	

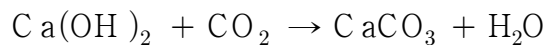
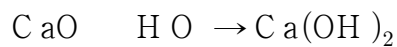
구 분	부재명	주철근					배력철근					비 고
		평균간격 (mm)		평균순피복 (mm)		사용 철근	평균간격 (mm)		평균순피복 (mm)		사용 철근	
		측정	설계	측정	설계		측정	설계	측정	설계		
교대	A1 흉벽 (G1-G2)	143	150	83	87.5	D25	304	300	101	112.5	D16	
	A1 흉벽 (G2-G3)	144	150	75	87.5	D25	300	300	102	112.5	D16	
	A2 구체 (G1-G2)	300	300	80	89	D22	296	300	103	111	D16	
	A2 구체 (G2-G3)	302	300	82	89	D22	298	300	102	111	D16	
교각	P1 기둥 전면	100	100	115	118	H29	305	300	78	89	H22	
	P1 기둥 후면	103	100	120	118	H29	302	300	103	89	H22	
	P2 기둥 전면	104	100	116	118	H29	302	300	96	89	H22	
	P2 기둥 후면	97	100	118	118	H29	296	300	85	89	H22	
	P3 기둥 전면	100	100	108	118	H29	296	300	68	89	H22	
	P3 기둥 후면	97	100	118	118	H29	306	300	87	89	H22	
	P4 기둥 전면	98	100	118	118	H29	303	300	78	89	H22	
	P4 기둥 후면	100	100	118	118	H29	299	300	78	89	H22	
	P5 기둥 전면	101	100	120	118	H29	297	300	81	89	H22	
	P5 기둥 후면	99	100	118	118	H29	306	300	80	89	H22	

⇒ 철근간격 및 피복두께는 현장 조사에 의한 실측자료이며, 준공도면과 비교·분석 결과 부재별 철근 간격 및 피복은 유사한 것으로 조사되었다.

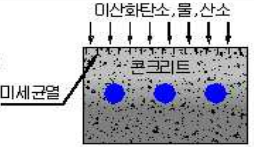
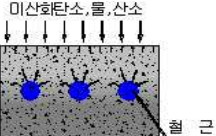
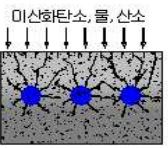
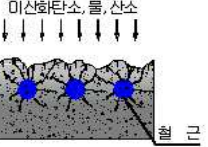
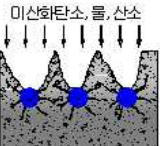
4.4 탄산화 시험

가. 개 요

탄산화란 경화콘크리트와 공기 중의 탄산가스가 반응하면서 알칼리성을 잃게 되는 현상을 말한다. 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.

◆ 1단계 	재질 및 강도상의 변화는 거의 없다. (약간의 건조수축에 의한 균열)
◆ 2단계 	녹의 발생에 의한 팽창압이 콘크리트 내부에 발생하여 미세한 균열이 발생한다.
◆ 3단계 	철근의 윗면이 팽창하며 균열이 표면까지 연장되고 동해 등의 다른 열화를 유발시키며 녹물이 보인다.
◆ 4단계 	철근 윗면의 피복이 탈락되기 시작하고 철근노출이 시작된다. 철근의 단면적이 감소한다.
◆ 5단계 	철근 윗면이 거의 없어지고 철근은 공기 중에 직접 노출된다. 내구성능 저하가 가속된다.

【그림 4.5】 탄산화에 의한 콘크리트 성능저하 과정

나. 시험 방법

금번 시험은 콘크리트의 미소구간을 드릴링 후 시험을 시행하였다.

1) 철근 위치를 파악한 후 시험 위치를 결정한다.

시험개소 · 부위 · 노면 아래조건 · 주위 환경 등에 의한 방법을 적시에 선택한 후에 분진의 비산방지책을 검토해야 한다.

2) 드릴링 한 콘크리트 표면에 콘크리트 가루를 완전히 제거한다.

다. 탄산화 깊이 측정

1) 측정 준비

㉠ 측정면의 처리가 종료된 후 바로 측정면에 시약을 분무기로 액체가 떨어지지 않을 정도로 분무한다.

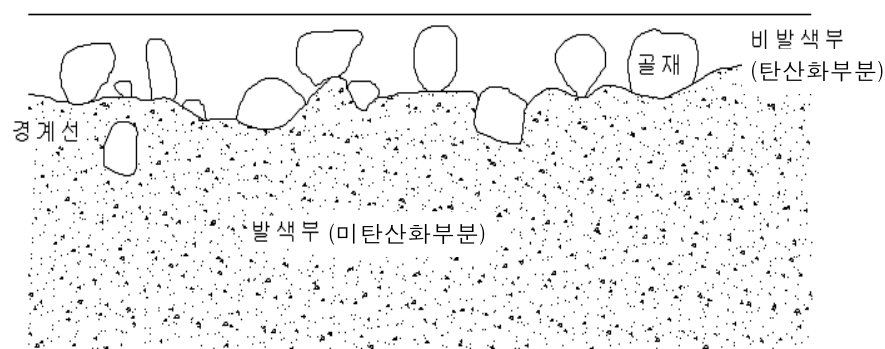
㉡ 측정면의 처리가 종료된 후 바로 측정할 수 없는 경우에는 비닐필름 등으로 측정면을 밀봉한다.

2) 탄산화깊이 측정

㉠ 콘크리트 표면으로부터 적자색으로 변색한 부분까지의 거리를 측정한다.

㉡ 선명한 적자색으로 변색된 부분보다 옅은 부분에 흐린 적자색의 부분이 나타나 는 경우 선명한 적자색 단면까지의 거리를 탄산화 깊이로서 측정함과 동시에 연한 적자색 부분까지의 거리도 함께 측정한다.

㉢ 평균 탄산화깊이는 측정값의 합계를 측정 개수로 나누어 구하고, 반올림하여 소수점 이하 한 자리까지 구한다.



【그림 4.6】 페놀프탈레인법에 의한 탄산화부분과 미탄산화 부분의 경계

3) 측정 지점

- ㉠ 공시체의 활렬면이나 절단면을 측정면으로 하는 경우 탄산화의 상황에 따라 10~15mm간격마다 1곳을 측정한다.
- ㉡ 코어 공시체의 측면을 측정면으로 하는 경우는 5곳 이상을 측정한다.
- ㉢ 콘크리트 구조물의 깎아낸 면에서 측정하는 경우 깎아낸 면의 크기에 따라 4~8곳 정도를 측정한다.
- ㉣ 상부바닥판은 상면에 포장층이 피복되어 있고 하면 내측구간은 Deck plate가 설치되어 있으며 하부바닥판 육안조사 결과 누수등의 바닥판 열화 증후가 관찰되지 않았으므로 구조물의 손상최소화를 위하여 캔틸레버 바닥판 하면에 대하여 탄산화 시험을 실시한다.

【표 4.11】 페놀프탈레인 분무 시기와 측정 시기

측 정 면	청소방법 전처리법	시약의 분무시기	측 정 시 기 (분무후의 경과시간)
·현장 깎아낸 면 ·코어 활렬면	blow 뿜기	직 후	직 후
		3~6시간 후	1~10분 후
		1~7일 후	1분~3일 후
	blow 뿜기 후 물축임	직후~1일간	직후
		2~4일 후	직후~2일 후
		5~7일 후	직 후
·임의 추출 코어 표면 ·콘크리트커터 절단면	물씻기 후 표면 건조	1일 후	10분~2일 후
·수중 양생 후의 활렬면	blow 뿜기	직후~1일 후	직 후
·수중 양생 후의 콘크리트 커터 절단면	물씻기 후 표면건조, 분무 전 물축임	1일 후	10분~2일 후

※ 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (한국시설안전공단, 2010.12)

라. 탄산화 진행에 따른 상태평가 기준

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 상태평가 등급은 다음과 같다.

【표 4.12】 탄산화 상태평가 기준

기준	탄산화 잔여 깊이	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	-	-

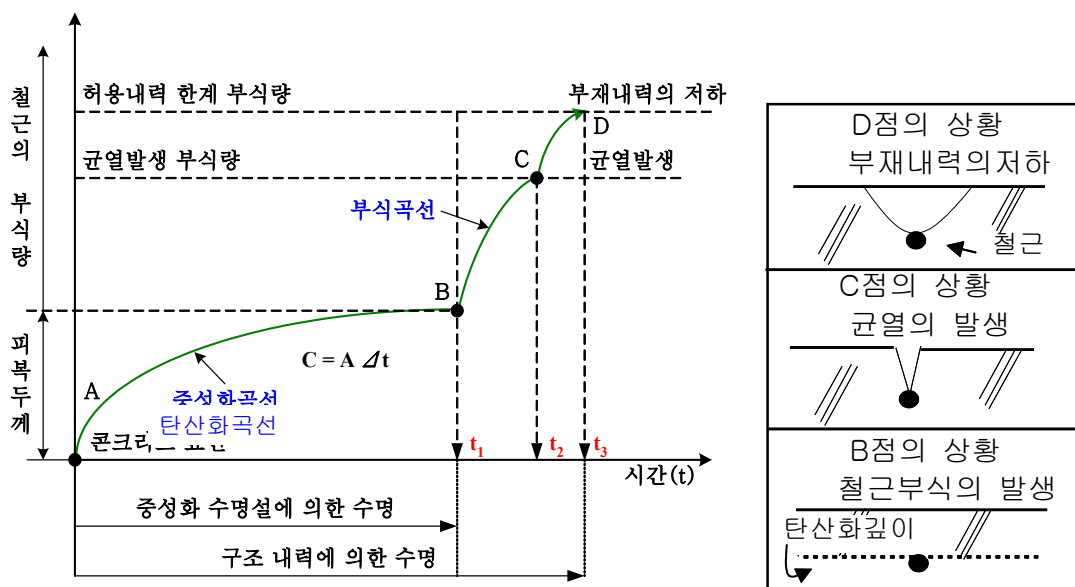
※ 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (한국시설안전공단, 2010.12)

마. 내구수명 평가

콘크리트의 탄산화가 진행하여 철근에 다다르게 되면 철근의 부식이 시작된다. 그러나 철근주변까지 콘크리트가 탄산화되었다고 해서 바로 부식이 발생하여 철근의 단면결손이 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 4.7】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 4.7】 콘크리트 내부에서의 철근부식의 개념

대기 중의 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, 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 $C = A \cdot t$ 에서 준공 후 현재까지의 경과년수 t 는 설계관련 도서로부터 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.

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

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.

바. 측정 결과

【표 4.13】 탄산화 시험 결과

(단위 : mm)

구분	부재명	철근 피복	탄산화 깊이	잔여 피복	탄산화속 도계수(A)	예상 수명	잔존 수명	상태 등급
바닥판	S1	68.0	6.2	61.8	1.55	>100	>100	a
	S2	77.0	6.0	71.0	1.50	>100	>100	a
	S3	70.0	5.7	64.3	1.43	>100	>100	a
	S4	70.0	6.1	63.9	1.53	>100	>100	a
	S5	67.0	5.4	61.6	1.35	>100	>100	a
	S6	59.0	6.2	52.8	1.55	>100	>100	a
교 대	A1	75.0	5.3	69.7	1.33	>100	>100	a
	A2	80.0	5.2	74.8	1.30	>100	>100	a
교 각	P1	78.0	7.5	70.5	1.88	>100	>100	a
	P2	85.0	3.7	81.3	0.93	>100	>100	a
	P3	68.0	5.2	62.8	1.30	>100	>100	a
	P4	78.0	3.6	74.4	0.90	>100	>100	a
	P5	80.0	5.8	74.2	1.45	>100	>100	a

※ 측정된 예상수명과 잔존수명이 100년 이상일 경우 “>100” 로 표기

※ 잔존수명(년) = 전체수명년 - 경과년수(15년)

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

※ 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (한국시설안전공단, 2010.12) 참조

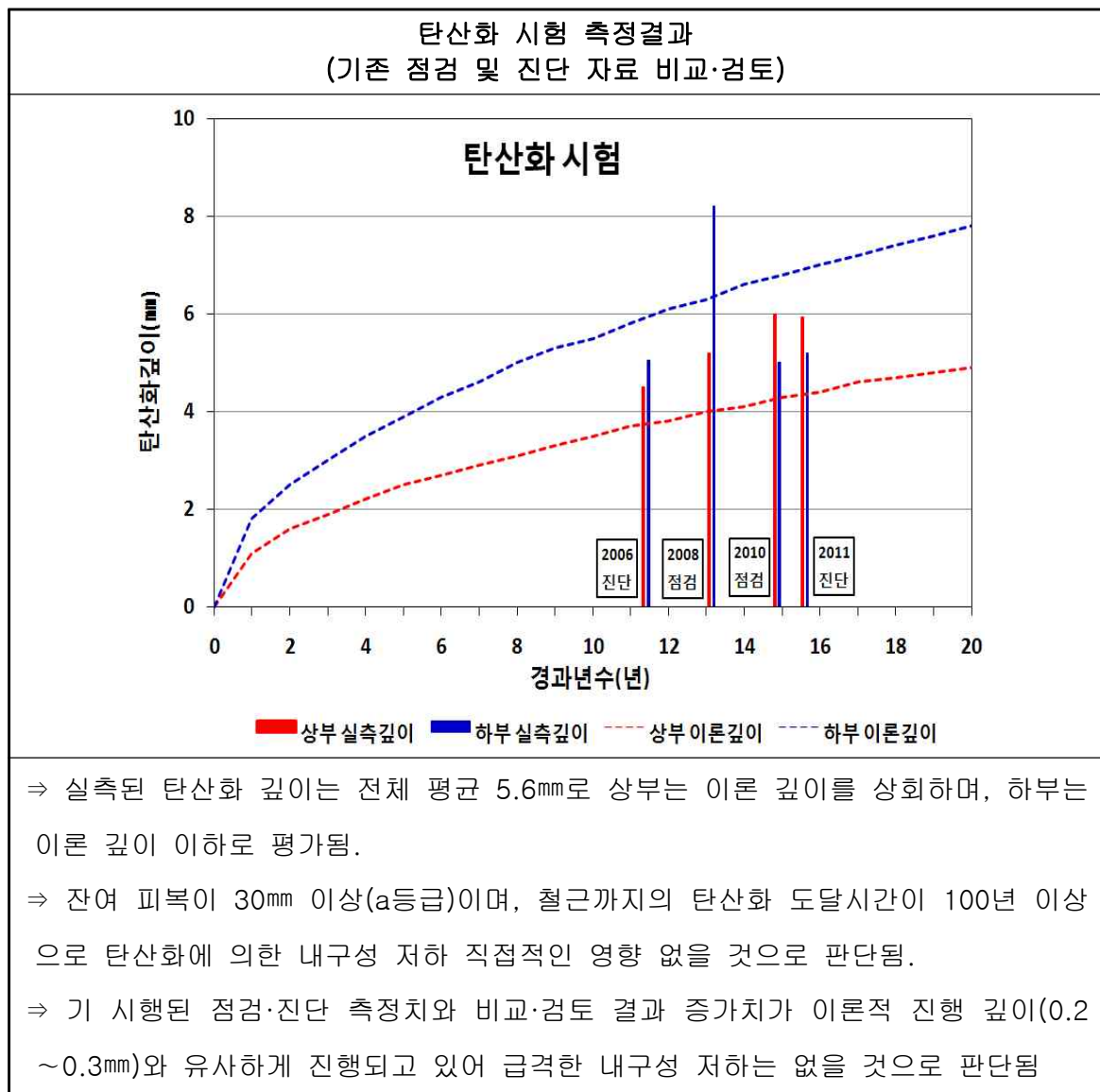
※ 철근피복 - 부록. 참조

【표 4.14】 탄산화 시험 결과 분석

(단위 : mm)

부재	철근 평균 순피복	탄산화 평균 깊이	잔여 평균 피복	평가 등급	탄산화 속도계수(A)	잔존수명
상부구조	68.5	5.9	62.6	a	1.48	>100
하부구조	77.7	5.2	72.5	a	1.30	>100

⇒ 바닥판 6개소, 교대 2개소, 교각 5개소에서 실측된 탄산화깊이는 3.7~7.5mm로서 전 부재 모두 30mm 이상의 순피복을 유지하고 있어 상태등급은 a로 판정되며, 탄산화에 의한 철근부식 등의 내구성 저하에 직접적인 영향은 없을 것으로 판단된다.



【그림 4.8】 탄산화 시험 측정 결과 비교 분석

4.5 염화물 함유량 시험

가. 개 요

경화콘크리트 내부의 염소화합물은 콘크리트 타설 시 골재, 혼합수, 혼화제 등의 재료 또는 경화된 표면에서 해수, 빗물 등에 의해서 NaCl , KCl , CaCl_2 , MgCl_2 , FeCl_3 , $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\sim 12\text{H}_2\text{O}$ 등의 다양한 종류가 존재하고 이들 염소화합물은 염화나트륨, 염화칼슘, 염화칼륨 등과 같이 물에 쉽게 용해되어 이온상태로 강재의 부식에 직접 관여하는 것과 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 와 같이 시멘트 성분과 결합해서 강재 부식에 직접 관여하기 어려운 형태의 것으로 분류할 수 있다.

철근의 녹은 다공질에 흡수성이 있어 녹이 두껍게 형성되어도 부식을 억제하는 효과는 적으며, 녹슨 부분은 원래 체적의 약 2.5정도 팽창하기 때문에 피복부분에 균열을 일으키고, 이에 따라 부식작용은 더 가속화 된다.

나. 염화물에 의한 콘크리트 내의 철근부식(물질이동)

콘크리트 중에 포함된 염화물의 일부는 시멘트에 의해 프리델씨염 등 불용성 염화물로 고정화 된다. (단위시멘트량 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 사용 콘크리트에서는 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 정도의 염화물이 고정화된다고 하고 있다). 이 불용성 염화물은 철근부식을 촉진할 염려는 없다. 즉, 철근은 콘크리트와 같은 고알칼리 환경에서는 그 표면이 부동태피막이라 불리는 치밀한 산화물피막($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$)에 의해 코팅되어 있어 부식으로부터 보호되고 있다.

그러나 불용성 염화물을 포함한 콘크리트는 탄산화가 되면 불용성 염화물은 재차 가용성 염화물로 변화되어 부식을 촉진하게 된다.

이러한 가용성 염화물은 철근부식을 촉진시키며 콘크리트 내를 수분과 함께 이동하여 콘크리트 단면내에서 부분적으로 농축되는 경향이 있다.

이와 같은 현상은 소위 물질이동 원리에 의해 설명되는데, 물질이동이란 콘크리트 내부에서의 세공용액을 통한 이온의 이동 등을 말한다. 이 현상은 탄산화 등의 작용에 의해 시멘트수화물이 화학적으로 분해된 때, 해리된 이온이 세공용액 중에서 농도구배를 갖게 되기 때문에 발생한다.

다. 염화물 함유량 기준

【표 4.15】 염화물 함유량 기준치

등급	전염화물 이온량	철근부식의 가능성
a	염화물 $\leq 0.3\text{kg/m}^3$	염화물에 의한 부식의 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	염화물 $\geq 2.5\text{kg/m}^3$	철근부식 발생
e	-	-

경화콘크리트 중의 염화물 이온함유량의 시험방법은 전위차측정법, 흡광광도법, 질산은 측정법 등의 측정법이 있다.

염해에 의한 R.C 구조물의 성능저하는 알칼리 골재반응에 의한 성능저하와 함께 구조물 내구성을 저하시키는 요인이 된다. 콘크리트내의 염화물 함유량이 어느 한계를 초과하면 철근의 부식속도가 가속화되므로 내구성을 요하는 구조물에 대하여 콘크리트 표준시방서에 콘크리트 중의 염화물 함유량 한도는 0.3kg/m^3 을 초과하지 않도록 규정하고 있으며, 한편 유해물의 함유량의 한도에서 염화물(염화물이온량 Cl^-)은 중량백분율 0.022%를 한도로 정하며, 염화나트륨으로 환산하면 약 0.04%에 상당한다.

라. 시험 방법

염분이 콘크리트 중에 어느 한도 이상 존재하면 콘크리트의 강재 부식이 촉진되어 구조물이 조기에 열화하는 원인이 된다. 이것이 소위 콘크리트의 염해라는 것이며, 이 염해의 영향을 최소한으로 억제시키기 위해 콘크리트중의 염화물 함유량에 대한 규제가 필요하고, 본 시험은 이러한 콘크리트의 염분농도를 측정하기 위한 시험이다.

시험방법은 현장에서 채취한 시료를 최소 24시간 이상 증류수가 담긴 비이커에 담아 두었다가 염소이온 표준액 0.1% 및 0.5%를 각각 교정 용기에 담아서 측정전극을 교정한 다음 시료를 담은 비이커에 측정전극을 약 2분간 담근 후 표시치가 안정된 후 눈금을 읽는다.

마. 측정 결과

【표 4.16】 염화물 함유량 시험 결과

시료구분	시험 위치	전염화물 함량(%)	환산염화물 함량(kgf/m³)	등급	비 고
바닥판 S6 (공주방향)	표면부위	0.0989	2.237	-	KS F 2713 - '02
	중앙부위	0.0359	0.812	-	
	철근부위	0.0252	<u>0.569</u>	b	
바닥판 S6 (대전방향)	표면부위	0.0260	0.589	-	
	중앙부위	0.0185	0.418	-	
	철근부위	0.0162	<u>0.367</u>	b	
교대 A2	표면부위	0.0666	1.508	-	
	중앙부위	0.0303	0.687	-	
	철근부위	0.0246	<u>0.557</u>	b	

⇒ 바닥판 및 교대에서 채취한 코아에 대한 염화물함유량 시험 결과 현재 부재별 철근 위치에서의 염화물함유량은 0.367~0.569kg/m³로, 경화된 콘크리트의 임계발청농도 (1.2 kg/m³ : 전염화물) 이하로 나타나 염해에 의한 직접적인 철근의 부식 요인은 없는 것으로 판단된다.

4.6 균열 깊이 조사

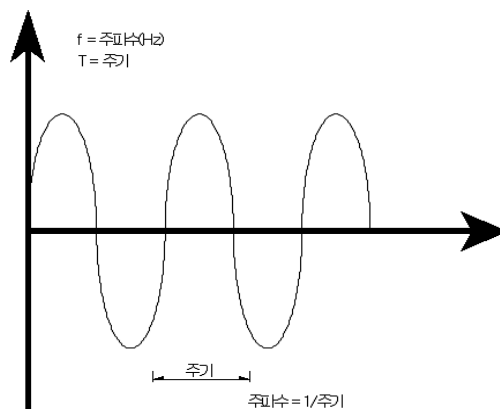
가. 초음파 개요

음파(혹은 진동파)의 특성을 표현할 때 주파수(혹은 진동수)와 주기가 사용된다. 주파수란 1초 동안에 진동하는 횟수를 말하며, 단위는 Hz(혹은 CYCLE/ SEC, CPS)가 사용된다. 주기란 음파의 한 사이클에 소요되는 시간으로서 단위는 SEC가 사용된다. 주파수와 주기는 아래의 식과 같이 역수의 관계이며, 【그림 4.9】에 주파수와 주기의 개념을 나타내었다.

$$f = 1/T$$

여기서, f = 주파수(Hz)

T = 주기



【그림 4.9】 주기와 주파수

이 세상에 존재하는 모든 음파 중에서 인간이 감지할 수 있는 음파의 주파수(가청주파수) 범위는 20~20,000Hz이다. 가청주파수 이상의 주파수를 갖는 음파를 초음파라 하며, 보통20~10,000kHz 범위의 초음파가 탐사에 이용되고 있다.

나. 초음파의 진동 양식

물체는 작은 질량의 입자가 모이고 그 입자들은 탄성적으로 상호 연결되어 있는 것으로 생각된다. 따라서 하나의 입자가 진동하면 그 움직이는 탄성에 따라 다음 입자에 전해지며, 또 그 다음으로 파급되어 간다.

이러한 진동의 양상에 따라 다음과 같은 성분들이 조합되어 파를 구성한다.

- 종 파(LONGITUDINAL WAVES, PRIMARY WAVES)

- 입자의 진동방향과 파의 진행방향이 동일하며, 음속이 가장 빠르다.
- 횡 파(TRANSVERSE WAVES, SECONDARY WAVES, SHEAR WAVES)
 - 입자의 진동방향과 수직으로 음파가 전달된다. 동일한 재질에 대해서 대략 종파 속도의 1/2정도의 속도를 가진다.
- 표면파(SURFACE WAVES, RAYLEIGH WAVES)
 - 표면부근에 에너지가 집중되어 있는 특수한 파로서 표면을 따라 전달된다.
 - 음속은 횡파의 90% 정도이다.

다. 균열 깊이 측정 개요

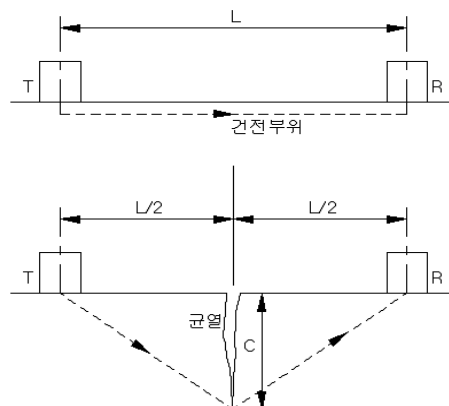
본 조사 대상인 콘크리트 구조물에 발생한 균열의 깊이는 부재 손상 없이 조사목적 달성을 위해 초음파를 이용하여 구조물의 결함여부를 판정하는 PUNDIT 시스템을 사용하였다.

균열의 깊이를 측정하기 위해서는 기본적으로 발·수신자의 배치를 균열부근 동일면에 설치하나, 검출파의 종류(중파, 횡파, 표면파)와 검출항목(전파시간, 주파수, 위상) 등에 따라 많은 방법이 있으나, 본 과업에서는 Tc-To법을 사용하여 균열 깊이를 측정하였다.

Tc-To법은 종파용 발·수신자를 개구부를 중심으로 등 간격 L/2로 설치하였을 때 균열 선단부를 회절한 초음파의 전파시간 Tc와 균열이 없는 부분에서의 발·수신자의 거리 L에서의 전파시간 To로부터 다음 식에 의거 균열의 깊이를 구하는 방법이다.

$$c = \frac{L}{2} \times \left(\frac{T_c}{T_0} \right) - 1$$

여기서, c : 균열 깊이 L : 발·수신자의 거리
 T_c : 균열부에서의 전파시간 T_O : 건전부에서의 전파시간



【그림 4.10】 Tc-To법을 이용한 균열 깊이의 측정

라. 측정 결과

【표 4.17】 균열 깊이 조사 결과

구분	부 재	균열폭 (mm)	수신거리 (cm)	통과시간(μ s)		균열깊이 (mm)	철근 순피복 (mm)	비 고
				To	Tc			
바닥판	S2-대전방향	0.2	20	68.70	70.43	22.60	77	피복 미만
	S5-대전방향	0.2	20	68.13	68.67	12.54	65	피복 미만
교각	P2 코핑	0.2	20	58.53	59.57	18.87	85	피복 미만
평균						18.00	75.7	피복 미만

⇒ 바닥판, 교각에 발생한 균열에 대한 깊이 조사 결과 측정된 균열 깊이는 대체로 철근피복 이하로 특별한 문제는 없는 것으로 판단되나, 내구성 확보 및 상태평가를 고려하여 보수가 요망된다.

4.7 강재 비파괴 시험

4.7.1 초음파탐상법

가. 개 요

강재 초음파시험기(UT : Ultrasonic Testing)를 이용한 탐상방법은 여러 가지 방법이 있으며 시험대상물이나 시험목적에 의해 시험방법이 선정된다. 초음파시험에 쓰이는 초음파는 펄스파로서 몇 μ s(1μ s= 1×10^{-6} s)정도의 짧은 시간 내의 진동을 시험체로 보낸다. 초음파 펄스를 보내는 순간부터 초음파 펄스를 수신하는 순간까지의 경과시간을 측정함으로써 결함이나 후면 등의 반사원까지의 거리 즉 결함의 위치를 알 수 있다.

현재 일반적으로 사용되는 초음파시험은 펄스파를 이용한 반사법으로 시험체의 내부에서 반사되는 반사원의 면적 즉 결함의 면적이 크면 그것에 비례하여 커지는 에코우의 높이로 결함의 크기를 추정할 수 있게 된다.

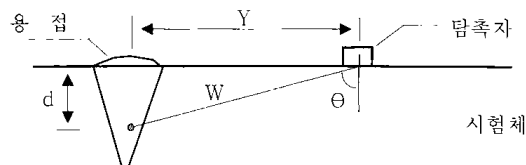
강재 비파괴검사의 최종적인 목적은 재료 또는 부품 등이 사용 중에 파괴되는가 안되는가의 여부를 판단하기 위해 결함의 유무, 결함의 크기 및 형태를 정확히 파악하는 데 있듯이 초음파 검사도 주로 결함의 검출에 사용된다. 수문, 교량, 철골 구조물 등의 이

음부는 대부분 용접으로 접합되어 있으며, 이러한 여러 분야에서 휴대용 초음파 시험기를 이용한 용접부 조사가 광범위하게 시행되고 있다.

나. 탐상 원리

초음파를 시험체 내에 전달하여 초음파 진행경로 상에 존재하는 결함으로부터 반사하는 초음파 신호를 수신하여 탐상기 CRT 스크린상에 나타난 에코파영을 분석함으로써 결함의 유무 및 결함정보를 알아내는 검사방법이다.

초음파시험법의 종류는 크게 수직법과 사각법으로 구분되며, 수직법은 탐촉자를 시험체에 접촉하여 수직으로 초음파를 전파시켜 검사하는 방법으로 통상적으로 판재 및 봉재, 주·단강품 결함검사와 부재의 부식두께 측정 등에 이용되며, 경사각법은 시험체에 임의의 일정각으로 초음파를 전파시켜 검사하는 방법으로 주로 용접부 검사에 적용된다.



Y : 입사점-결함거리, d : 결함깊이, W : 초음파 이동거리, θ° : 굴절각(입사각)

【그림 4.11】 맞대기용접부 경사각 시험 개요도

일반적으로 용접부의 경사각 시험에서는 용접부 내부에 존재하는 기공, 슬래그, 용합불량, 용입부족 등의 결함과 함께 균열에 대한 조사가 실시되고 있으며, 각각의 결함으로부터 반사한 에코파형의 펄스형태(펄스폭과 높이), 결함까지의 진행거리, 초음파 입사각도, 에코의 반사패턴 등을 종합적으로 분석하여 결함의 입체적인 위치를 산출하고 결함 종류 및 길이 등을 측정한다.

강재 초음파시험기에 의한 검사는 압전현상을 이용하여 고주파(0.1~25MHz) 초음파 빔을 검사부재에 침투시켜 반사된 에코를 판독함으로써 부재를 검사한다.

다. 탐상 결과

【표 4.18】 용접부 초음파 탐상 시험 결과

확인 번호 IDENT. NO.	각도 Angle (°C)	빔거리 Sound Path(W)	결함깊이 Depth From Surface(D)	최대 DAC,dB Area	결함길이 Defect Length(L)	등급 Class	Results		비 고
							Accept	Reject	
S1-G1-UT01	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S1-G1-UT02	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S2-G1-UT03	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S2-G1-UT04	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S3-G1-UT05	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S3-G1-UT06	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S4-G1-UT07	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S4-G1-UT08	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S5-G1-UT09	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S5-G1-UT10	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S6-G1-UT11	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S6-G1-UT12	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S1-G2-UT01	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S1-G2-UT02	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S2-G2-UT03	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S2-G2-UT04	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S3-G2-UT05	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S3-G2-UT06	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S4-G2-UT07	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S4-G2-UT08	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S5-G2-UT09	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S5-G2-UT10	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S6-G2-UT11	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S6-G2-UT12	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S1-G3-UT01	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S1-G3-UT02	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S2-G3-UT03	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S2-G3-UT04	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S3-G3-UT05	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S3-G3-UT06	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S4-G3-UT07	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S4-G3-UT08	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S5-G3-UT09	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S5-G3-UT10	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S6-G3-UT11	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		
S6-G3-UT12	70	NO	RECORDABLE	INDICATION		1	V		

⇒ 맞댐용접부에 대한 초음파 탐상 결과 용접부에는 특별한 결함이 없는 양호한 상태로 조사되었다.

4.7.2 강재 도막두께 측정 시험

가. 개 요

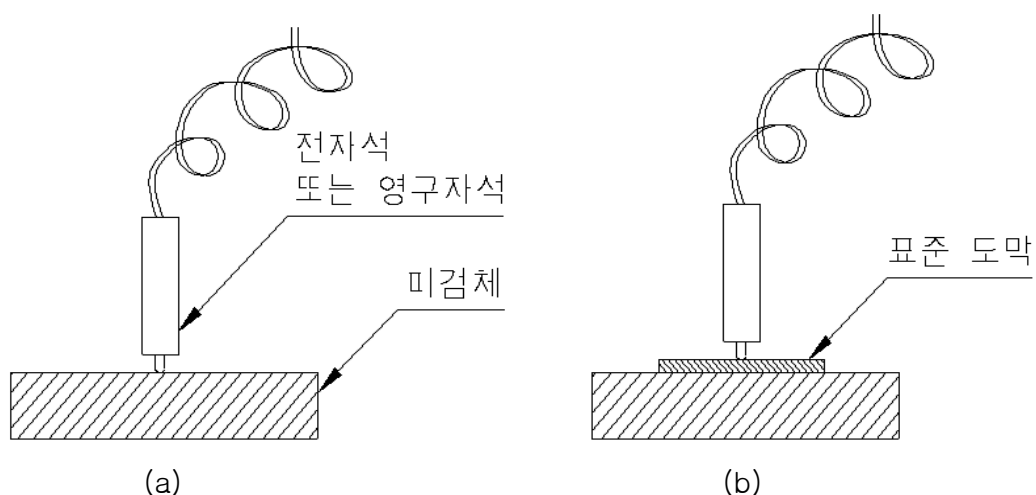
도막두께는 도막두께 측정기를 사용하여 일정한 두께를 가진 표준판에 교정한 후 강재에 기도장된 도막의 두께를 측정하는 것이다. 측정결과는 기존에 적용한 두께를 기준으로 하여 정상적으로 도장작업이 수행되었는지의 여부 및 감소 여부를 판단한다.

나. 측정 방법

도막두께 측정은 전자석 또는 영구 자석을 이용하여 피검체(자성체)에 도포된 도막의 두께를 측정하는 검사방법으로 페인트 도막 및 기타 코팅에 적용된다. 이해를 돕기 위하여 도막두께 측정의 원리를 아래에 요약, 서술하였다.

【그림 4.12(a)】와 같이 도막이 도포되지 않은 피검체(자성체)에 전자석 또는 영구자석을 접촉시켜 지시계의 눈금을 영점(Zero) 조정한다. 영점 조정 후 【그림 4.12(b)】와 같이 확인하고자 하는 두께와 유사한 표준 도막을 이용하여 각 도막의 두께에 따른 자력차를 이용하여 검사하는 방법이다.

도막두께를 교정 후 측정부위에 접촉시켜 전자석 또는 영구자석의 자력차를 수치로 나타내어 측정부위의 도막두께를 확인한다. 이러한 원리를 이용하여 검사하는 것이 도막두께 측정이다. 위의 도막두께 측정법은 자성체에 한하여 실시하며 피검체가 비자성체일 경우는 측정이 불가능하므로 다른 측정법이 요구된다.



【그림 4.12】 도막두께 측정법

다. 평가 기준

본 교량의 설치환경은 일반환경의 도시지역으로 강재의 부식이 경미하다고 예측되는 지구이다. 일반환경의 영구구조물이므로 외부 GEB 및 내부 GIB 계열의 도장을 사용하였다. 일반환경의 중방식 도장계열은 다음표의 내용에 따라야 한다.

【표 4.19】 일반환경용 중방식 도장

구 분	도장 계열	공 정		도료명칭 또는 방법	추천도막 두께(μm)	도장 횟수	비고
교 량 외 부	GEB	1차 표면처리		SSPC - SP10			
		샴 프라이머		무기질 아연말 샴프라이머	20	1	
		2차 표면처리		SSPC - SP10			
		공장 도장	제1층	무기질 아연말도료	75	1	
			제2층	미스트 코트	80	1	
			제3층	후막형 에폭시계도료		1	
		공장/현장도장	제4층	폴리 우레탄계도료	30	1	
			제5층	폴리 우레탄계도료	30	1	
		계			215		
교 량 내 부	GIB	1차 표면처리		SSPC - SP10			
		샴 프라이머		무기질 아연말 샴프라이머	20	1	
		2차 표면처리		SSPC - SP10			
		공장 도장	제1층	무기질 아연말도료	75	1	
			제2층	미스트 코트	100	1	
			제3층	후막형 에폭시계도료		1	
		계			175		

※도로교 표준시방서(2005)

다. 측정 결과

【표 4.20】 도막 측정 시험 결과

구분				도막두께 (μm)							평 균 (μm)	표준편차 (μm)	추정설계 기준(μm)
내 부	G1	S1	좌측복부	178	200	198	196	199	201	194	195	8.8	175
	G1	S2	우측복부	165	176	175	184	185	176	196			
	G2	S5	좌측복부	183	185	186	188	184	189	175			
	G2	S6	우측복부	181	189	183	196	179	198	187			
	G3	S5	좌측복부	179	182	189	182	180	182	173			
	G3	S6	우측복부	173	194	196	176	195	174	192			
외 부	G1	S3	좌측복부	224	227	215	240	233	218	225	226	9.8	215
	G1	S4	우측복부	225	241	221	222	231	237	202			
	G2	S1	좌측복부	236	231	228	223	233	218	231			
	G2	S6	우측복부	241	238	217	224	240	230	231			
	G3	S5	좌측복부	223	203	230	243	223	231	222			
	G3	S6	우측복부	219	234	224	249	215	224	219			

⇒ 강재 주형 내·외부 도장부에 대한 도막두께 측정 결과 도로교 표준시방서 기준에 의한 검토 결과 기준치를 상회하는 것으로 조사되었다.

4.8 내구성 시험 종합평가

【표 4.21】 시험 종합평가

구 분			조 사 결 과			평 가
			측정위치	측정치	평가 기준	
내 구 성 시 험 항 목	콘 크 리 트	비파괴 압축강도	바닥판	28.6MPa	27.0MPa	양 호
			교 대	22.3MPa	21.0MPa	
			교 각	25.9MPa	24.0MPa	
		콘크리트 품질상태	바닥판	3.942km/s	II 등급	양 호
			교 대	3.875km/s	II 등급	
			교 각	3.834km/s	II 등급	
		조합법	바닥판	32.2MPa	27.0MPa	양 호
			교 대	24.5MPa	21.0MPa	
			교 각	26.6MPa	24.0MPa	
		코어강도	교 대	32.4MPa	21.0MPa	양 호
		탄산화	상부구조 (바닥판)	5.4~6.2mm (평균 5.9mm) ⇒ 잔여피복 : 62.6mm	30.0mm	a등급
			하부구조 (교대, 교각)	3.6~7.5mm (평균 5.2mm) ⇒ 잔여피복 : 72.5mm	30.0mm	a등급
	강 재	염화물함량 (철근부위)	바닥판	0.367~0.569kg/m³	1.2kg/m³	b등급
			교 대	0.557kg/m³	1.2kg/m³	b등급
		균열 심도	바닥판	1.3~2.3cm	6.5~7.7cm	피복 미만
			교 각	1.9cm	8.5cm	피복 미만
		초음파 탐상법	STB 주형	용접부 결함 미검출		양 호
		도막두께	STB 내부	195 μ m	175 μ m	양 호
			STB 외부	226 μ m	215 μ m	양 호

⇒ 장암교에 대한 내구성 평가 결과 콘크리트 구조물의 강도, 탄산화, 염화물 함량 및 강재 주형의 용접부 결함, 도막두께 등은 대체로 양호한 것으로 평가되나, 균열 등의 국부적인 손상이 발생한 상태이므로 적절한 보수 및 정기적인 점검 등을 통한 유지관리가 요망된다.