

제 3 장 내구성조사

3.1 개요

3.2 콘크리트 비파괴시험

3.3 강재 비파괴시험

3.4 내구성조사 결과 검토의견

제3장 내구성조사

3.1 개요

철근콘크리트 구조물의 내구성 저하의 대표적인 현상은 콘크리트 중성화, 철근부식, 균열, 강도저하, 표면 노후화, 부재의 큰 변형, 누수 등의 현상으로 분류된다. 철근의 부식과 콘크리트의 균열은 열화 현상이 독립된 원인에 의해 나타나는 것이 아니고, 그 밖의 열화 현상을 일으키는 원인과도 복합적으로 관계되고 있다.

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 강·콘크리트 구조물에 한한다.
- 내구성 조사는 구조체를 중심으로 수행한다.
- 내구성 조사는 조사 시점의 열화상태 뿐만 아니라 구조물의 이력, 주변환경, 열화원인 등을 조사하여 향후 열화손상 진행정도를 예측하고, 내용년수와 관련하여 종합적인 안전 진단을 수행한다.
- 구조물은 하중을 안전하게 지지하고 그 기능을 원활히 발휘하여야 하며, 역학적으로 충분한 강도와 강성을 갖는 것이 필요하다. 따라서 구조물의 각 부분이 균형 잡힌 안전도를 가지며, 내구성을 갖는 것이 요구된다.
- 본 구조물의 내구성 조사내용은 연호고가교의 안전성평가를 위한 내구성 저하 유무를 확인하기 위한 조사 및 시험을 실시하였다.
- 대상 교량인 연호고가교에 대한 내구성 조사 항목 및 측정위치는 콘크리트와 강재조사 부분으로 구분하였으며 비파괴시험의 주요 전경사진과 위치도를 명기하였다.

<표 3.1.1> 내구성 조사 항목 및 시험 수량

조사 항목		조사 내용	안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (2010. 12.)		수량
			상부구조	하부구조	
콘 크 리 트	반발경도시험	비파괴 장비와 코어강도로 콘크리트 강도 조사	· R.C: 2개소/50m · Steel: 1개소/50m	· 1개소/연장50m · 교대, 교각 개소수 (경간장 50m 이상)	25
	초음파 전달속도시험		· R.C: 2개소/50m · Steel: 1개소/50m	· 1개소/연장50m · 교대, 교각 개소수 (경간장 50m 이상)	25
	코어채취		· 과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정		3
	균열깊이조사		· 부재의 중요도를 고려 책임기술자의 판단에 따라 수량 결정		2
	염화물 함유량	코어채취시료를 이용하여 콘크리트 실내시험을 행한다.	· 3개소 이상 ¹⁾		3
	철근탐사시험	철근의 배근간격 및 피복두께 등 배근상태를 조사한다.	· R.C: 2개소/50m · Steel: 1개소/50m	· 1개소/연장50m · 교대, 교각 개소수 (경간장 50m 이상)	25
	탄산화시험	탄산화시험기를 이용하여 콘크리트 구조물의 중성화 깊이를 조사한다.	· 5경간 이내 : 4~6개소 ²⁾ · 5경간 이상 : 6~9개소 ³⁾		11
강 재 비 파 괴	U.T	강재 초음파탐상시험 (맞대기 용접부)	· 플레이트거더교: 1개소/경간별 거더 · 박스거더교: 2개소/경간별 거더		96
연장별 조정비		· 주1) 교량 상부구조에서 최소 1개소 이상 실시 · 주2) 교량 상부구조에서 최소 2개소 이상 실시 · 주3) 교량 상부구조에서 최소 3개소 이상 실시 · 연장별 조정비 교량의 정밀점검 또는 정밀안전진단 실시에서 재료시험 항목 중 경간당, 거더당 비율에 따라 기준 수량을 규정한 항목은 300m 미만의 교량을 기준으로 한 것이므로 300m 이상일 경우 연장별 조정비에 따라 기본 재료시험의 기준 수량을 책임기술자의 판단으로 조정할 수 있다. ▶ 500m:80%, 1,000m:60%, 2,000m:40%, 4,000m이상:30~20%			

콘크리트 비파괴 시험 현황



슈미트해머에 의한 반발경도 시험



초음파에 의한 강도시험



철근탐사 시험



탄산화 시험(버니어캘리퍼스 측정)



코어채취 전경



코어 압축강도 시험

강재 비파괴 시험 현황



초음파탐상시험(U.T)



초음파탐상시험(U.T)

<사진 3.1.1> 내구성 조사 주요 전경사진

3.2 콘크리트 비파괴시험

3.2.1 개 요

1) 반발경도시험

이 검사법은 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 타격시, 반발도와 콘크리트의 압축강도(F_c')와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다.

(1) 반발경도

외관조사 결과에 의해서 결정된 측정개소에 대해서 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 대해서는 RILIM 규정에 따라 각 반발경도의 값이 $R_m \pm 20\%$ 의 범위를 벗어나는 값들은 제외시키고 나머지 값들을 다시 산술평균하여 반발경도 R 을 결정한다.

(2) 보정반발경도(R_0)

보정반발경도 R_0 는 다음과 같이 측정경도 R 에 보정값 $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3$ 을 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 사하중 응력에 따른 보정값

ΔR_3 : 콘크리트의 습윤상태에 따른 보정값

(3) 압축강도의 추정

보정반발경도 R_0 로부터 압축강도(F_c)의 상관관계를 도출한 다음 식을 사용하였다. 여러가지 제안식들은 다음과 같으며, 본 과업에서는 코어압축강도와의 상관계수가 양호하고 설계기준강도에 근접한 식을 사용하여 압축강도를 추정하였다.

- 일본재료학회 (보통콘크리트)

$$F_c = -18.4 + 1.3 R_o \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (3.2)$$

- 일본건축학회 CNDT 소위원회 강도계산식

$$F_c = 0.73 R_o + 10.0 \text{ (MPa)} \dots\dots\dots (3.3)$$

(4) 28일 강도의 추정

수년이 경과한 콘크리트 구조물은 표면경도가 높기 때문에 식 (3.4)와 같이 재령 28일 강도(F_{28})로 환산한 압축강도로 수정하여 콘크리트의 설계압축강도로 추정한다. 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 보정계수 α 는 <표 3.2.1>과 같으며, 3000일 이상의 재령에 대해서는 0.63을 적용한다.

$$F_{28}' = \alpha \cdot F_c \dots\dots\dots (3.4)$$

<표 3.2.1> 재령계수 α 의 값

재령(일)	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1,000	3,000
α	1.55	1.12	1.00	0.87	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63

2) 초음파탐사시험

초음파의 투과속도가 콘크리트의 밀도 및 탄성계수에 따라서 변화하는 것을 이용하며, 이 투과속도로부터 콘크리트의 동적특성, 강도, 균열상태 등을 추정하는 방법이다. 그러나, 강도 추정의 정확도는 높지 않으며, 일반적으로 콘크리트의 강도 및 품질비교 또는 균열 깊이를 판정하는 수단으로서 이 방법을 사용하고 있다.

강도 추정에 적용할 경우에는 반발경도법과 초음파법의 조합식을 이용하는 것이 바람직하며, 이 경우에도 표면시공상태가 균질, 양호하며 균열이 없는 면에서 측정하는 경우에 가능하다.

(1) 초음파법에 의한 압축강도의 추정

초음파 전달속도를 결정하기 위해서는 재료에서 초음파가 전달되는 거리를 미리 측정하고 장비상에 나타난 초음파 전달시간을 측정한 후 식 (3.5)에 의해서 구한다.

$$\text{전달속도 (Velocity)} = \frac{\text{전달길이 (Path Length)}}{\text{전달시간 (Transit Time)}} \dots\dots\dots (3.5)$$

초음파탐사를 위한 탐촉자의 배열은 직접법, 반직접법 및 간접법이 있으며, 간접법과 직접법에서 구한 초음파 전달속도는 근사적으로 식 (3.6)과 같은 관계가 있다.

$$V_d \approx 1.05 V_i \dots\dots\dots (3.6)$$

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

V_i = 간접법(Indirect method)에 의한 초음파 속도

직접법에 의하여 재료의 초음파 전달속도를 구하는 것이 바람직하나 현장에서는 주로 간접법이 적용되므로 이 경우에는 일정거리 떨어진 5점 이상의 측점을 정하고 초음파의 전달거리(X_i)에 따른 전달시간 T_i 를 측정한다. 최소자승법에 의해서 회귀직선식을 구하여 그 기울기를 전달속도 V_i 로 한다. 회귀직선의 적정성 여부를 판단하기 위해서 회귀직선의 유의성(有意性)검정에 사용되는 결정계수(Coefficient of determination)를 식 (3.7)에 의해서 계산한다.

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{(\sum (X_i - \bar{X})(T_i - \bar{T}))^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (T_i - \bar{T})^2} \dots\dots\dots (3.7)$$

여기서, $\bar{X}$, $\bar{T}$ 는 거리 및 전달시간의 평균값

(2) 비파괴강도의 추정

본 과업에서는 r^2 값이 99% 이상이 되는 회귀직선식만을 사용하여 전달속도 V_i 를 계산하였다. 전달속도에 따른 콘크리트 비파괴강도의 추정을 위하여 초음파속도와 압축강도의 상관관계를 도출한 다음 식을 사용하였다.

- 일본건축학회 CNDT 소위원회 공동제안식

$$F_c' = 21.5 V_P - 62.0 (MPa) \dots\dots\dots (3.8)$$

(3) 조합법에 의한 압축강도의 추정

조합법은 반발경도법과 초음파법의 두 비파괴강도로부터 보다 합리적으로 콘크리트의 비파괴강도를 추정하기 위해 제안되었다. 본 과업에서는 아래와 같은 식을 사용하여 비파괴강도를 추정하였다.

- 릴램(RILEM)식

$$\log_{10} F_c = 0.03794 V_P + 0.001149 R_o + 0.04332 (MPa) \dots\dots\dots (3.9)$$

$$F_c' = 0.85 F_c$$

(4) 균열깊이의 측정

콘크리트 표면의 균열깊이는 일반적으로 $T_c - T_o$ 법으로 구한다. 이 방법은 종파용 발·수신자를 균열 개구부를 중심으로 등간격 $L/2(=X)$ 로 설치하여 균열 선단부를 회절한 초음파의 전파시간 T_c 를 구한다. 또한 부근의 균열이 없는 부분에서 발·수신자를 똑같이 거리 $L/2(=X)$ 만큼 설치하여 전파시간 T_o 를 구한다. 측정된 $T_c - T_o$ 로부터 식 (3.10)을 적용하여 균열의 깊이를 구한다.

$$C = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{(T_c^2)}{(T_o^2)} - 1} \dots\dots\dots (3.10)$$

3) 코어 압축강도시험

이 방법은 현장에서 코어를 채취하여 이로부터 콘크리트의 압축강도를 추정하는 국부파괴시험으로 비파괴시험과는 구별되지만 구조물의 실제강도를 추정하는데 신뢰도가 가장 높다.

콘크리트의 각종 물성적, 역학적시험을 실시하며, 통상 비파괴시험에 의한 강도와 비교 분석한다.

(1) 압축강도시험

① 코어크기의 영향

콘크리트구조설계기준(한국콘크리트학회·대한건축학회, '99)에 의하면 콘크리트의 압축강도용 공시체는 $\phi 150 \times 300\text{mm}$ 를 기준으로 하므로 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 코어를 채취한 경우에는 강도보정계수 0.97을 곱하여 보정한다.

② 높이/직경비의 영향

채취된 코어 공시체로 KS F 2422에 준하여 압축강도시험을 한다.

코어 공시체의 높이/직경비(h/d)가 작아질수록 겉보기 압축강도는 커진다. 공시체 높이가 직경의 2배보다 작을 경우에는 시험으로부터 얻은 압축강도에 높이 보정계수를 곱하여 공시체의 높이가 직경의 2배가되는 코어 공시체의 압축강도로 환산한다.

<표 3.2.2> 압축강도의 보정계수

높이와 직경의 비(h/d)	보정계수(KS F 2422)	비 고
2.00	1.00	· h/d가 중간값일 경우 직선 보간법을 이용하여 보정계수를 구한다.
1.75	0.98	
1.50	0.96	
1.25	0.93	
1.00	0.89	

③ 매입철근 지름의 영향

코어를 가로지르는 철근이 있는 경우에는 시험결과, 5~10% 정도의 압축강도가 감소된다고 보고되고 있다. 코어 비트에 따라 약간의 차이가 있으나, 철근의 직경이 증가함에 따라 코어강도는 저하된다.

④ 재령의 영향

실체의 구조물에서는 표준 공시체의 양생조건과 동일한 양생방법을 기대할 수 없기 때문에 콘크리트 구조물이 재령이 경과함에 따라 강도가 증가한다 할지라도, 표준 양생한 공시체의 28일 압축강도보다 항상 크지는 않다. 따라서, 현장 양생한 구조물의 코어강도는 표준 공시체의 28일 압축강도와 같게 보는 것이 일반적이며, 코어강도에 대해서는 재령에 대한 보정은 하지 않는다.

(2) 비파괴강도 · 압축강도와의 보정계수

각종 비파괴강도를 이용하여 구조물의 전반적인 강도를 추정하는 경우에는 시험위치에서 채취한 코어강도를 이용하여 비파괴강도를 보정하는 것이 원칙이다. 따라서 부재 종류별로 코어 압축강도와 코어 또는 코어채취 위치에서 얻은 비파괴강도(반발경도법, 초음파법, 조합법) 간의 상관관계를 구하기 위하여 RILEM Recommendation Part 2 기준에 제시된 (식 3.11)을 사용하여 보정계수 C_t 를 구한다.

$$C_t = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{R_{pr}}{R_{sc}} \dots\dots\dots (3.11)$$

여기서, C_t : 보정계수

R_{pr} : 코어압축강도(kgf/cm^2)

R_{sc} : 비파괴강도(kgf/cm^2)

각 비파괴강도의 보정계수를 비교하여 가장 1.0에 근접하는 비파괴강도식을 선정하고, 이 식으로 계산한 강도값에 보정계수를 곱한 강도를 구조물의 비파괴강도로 한다.

3) 철근탐사시험

철근콘크리트 구조물에서 기존 구조물의 구조내력을 검토하기 위하여 구조부재의 배근 상태(철근직경, 배근간격, 피복두께 등)를 조사하기 위하여, 구조체를 손상시키지 않고 실시하는 비파괴검사 방법이다.

(1) 전자유도법

전자유도법의 원리는 Probe에서 만들어진 자계가 외부 자성물체인 철근에 의한 전자유도 작용에 의해 혼란 되는 정도를 검지 하는 것이다. 철근이 과밀하게 배근되어 있는 곳이나, 피복두께가 큰 곳은 오차가 크게 발생하는 결점이 있다.

(2) 전자파 레이더법

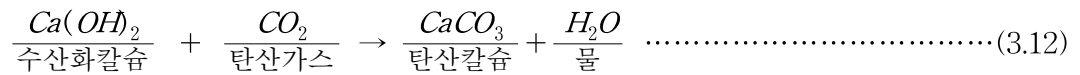
전자파 레이더의 원리는 현재 널리 사용되고 있는 레이더와 동일하게 콘크리트에 수백 MHz ~ 수 GHz의 전자파를 안테나로부터 발사시켜 콘크리트 중의 상대 유전율이 다른 물체(철근, 매설물, 공동 등)와의 경계에서 반사파를 일으키는 성질을 이용해서 반사파를 수신하여 왕복한 시간으로부터 반사 물체까지의 거리를 구하여 반사파의 영상을 해석함으로써 조사를 수행하는 방법이다.

콘크리트 중의 철근을 시각적으로 단시간에 측정할 수 있으며, 취급이 용이하다는 장점도 있어 본과업에서는 전자파 레이더법을 적용하여 배근간격, 피복두께를 측정하였다.

4) 콘크리트 탄산화시험

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) (대기중에 존재) (pH 8.5~10)

탄산화가 일어나는 메카니즘을 보면 (식 3.12) 에서 시멘트의 수화 반응에서 생성되는 수산화칼슘 $[Ca(OH)_2]$ 은 pH 12~13정도의 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, 콘크리트의 탄산화는 일반 환경 하에서도 확실하게 진행되기 때문에 매입된 철근의 부식에 따른 문제가 가장 기본적인 것이며 중요하다.

콘크리트 내부의 pH가 11 이상에서 철근은 표면에 $1 \times 10^{-6} \text{ mm}$ 두께의 수산화물 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 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 팽창하고 녹의 팽창압력에 의해 콘크리트 내부에는 균열이 발생하게 되며 철근의 부착강도 저하, 피복 콘크리트의 탈락, 철근 단면적의 감소 등 구조물의 내구성 저하를 초래하게 된다. 이러한 원인으로 녹의 진행과 함께 콘크리트 표면에 균열, 박리, 박락 등을 초래하기 때문에 콘크리트 구조물의 내구성면에서 탄산화를 파악하는 것이 중요하다.

(1) 탄산화깊이의 측정

- ① 콘크리트 표면으로부터 적자색으로 변색한 부분까지의 거리를 0.5mm 단위로 측정한다.
- ② 선명한 적자색으로 변색된 부분보다 옅은 부분에 흐른 적자색의 부분이 나타나는 경우
- ③ 선명한 적자색 단면까지의 거리를 탄산화 깊이로서 측정함과 동시에 연한 적자색 부분까지의 거리도 함께 측정한다.
- ④ 평균 탄산화깊이는 측정값의 합계를 측정 개수로 나누어 구하고, 반올림하여 소수점 이하 한 자리까지 구한다.

(2) 측정지점

- ① 공시체의 활렬면이나 절단면을 측정 면으로 하는 경우
- ② 탄산화의 상황에 따라 10~15mm 간격마다 1곳
- ③ 코어 공시체의 측면을 측정 면으로 하는 경우는 5곳 이상

- ④ 콘크리트 구조물의 깎아낸 면에서 측정하는 경우
- ⑤ 깎아낸 면의 크기에 따라 4~8곳 정도

<표 3.2.3> 페놀프탈레인 분무 시기와 측정 시기

측 정 면	청소방법 전처리법	시약의 분무시기	탄산화깊이 측정시기 (분무 후의 경과시간)
• 현장 깎아낸 면 • 코어 할렬면	Blow 뿜기	직후	직후
		3~6시간 직후	1~10분 후
		1~7일 후	1분~2일 후
	Blow 뿜기 후 물축임	직후~1일 후	직후
		2~4일 후	직후~2일 후
		5~7일 후	직후
• 임의 추출 코어 표면	물씻기 후 표면건조	1일 후	10분~2일 후
• 수중 양생 후의 할렬면	Blow 뿜기	직후~1일 후	직후
• 수중 양생 후 콘크리트 커터 절단면	물씻기 후 표면건조, 분무 전 물축임	1일 후	10분~2일 후

(3) 탄산화속도계수 산정

탄산화속도는 경과시간 t의 평방근에 비례하여 진행한다고 하는 $\sqrt{t}$ 법으로 표현된다. 탄산화깊이 C는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 『정밀점검 및 정밀안전진단 세부지침 (2010. 12)』

$$C = A\sqrt{t} \quad \text{여기서, } C : \text{탄산화깊이(mm)}$$

$$A : \text{탄산화속도계수(mm}/\sqrt{\text{년}})$$

$$t : \text{재령(년)}$$

(4) 탄산화 상태평가 기준

- ① 탄산화 깊이에 대한 평가는 철근으로부터 탄산화의 남은 깊이를 지표로 하여 탄산화에 의한 강재부식 가능성을 나타낸 것으로 탄산화에 의한 단독 열화에 대하여 적용 한다.
- ② 콘크리트 품질평가 기준인 탄산화는 직접적인 손상항목이 아닌 철근부식을 유발할 수 있는 환경에 관한 항목으로써 상태평가 기준 범위를 “a~d”로 한다.
- ③ 탄산화 조사는 상·하부구조로 구분하여 콘크리트 탄산화 깊이 측정에 따라 시행하며, 시험개소별로 평가한다.
- ④ 철근의 피복은 조사 위치에서의 실측치를 기준으로 한다.

<표 3.2.4> 탄산화 상태평가 기준

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

5) 콘크리트의 염화물 함유량 측정시험

(1) 염화물 함유량 조사

콘크리트에 포함되는 염화물은 콘크리트 성능에 크게 영향을 미치게 되므로 염화물 함유량시험은 중요하다. 경화콘크리트에서 염화물의 분석방법 자체는 굳지 않은 콘크리트와 다를 것이 없다. 그러나 굳지 않은 콘크리트는 염화물이 블리딩수에 녹아 있는 상태이나, 경화콘크리트는 가용성염분을 증류수로 용출하여 시험을 하여야 한다.

실제로 철근의 부식에 관여하는 염화물은 이른바 가용성염분이다. 일반적으로 「50℃의 온수에 녹는 염분」을 가용성염분으로 정의하고 있다. 물론 콘크리트 중에 함유되어 있는 염분의 전량을 아는 것도 중요하다. 그러나 경화콘크리트 내부의 염소화합물은 콘크리트 타설시 골재, 혼합수, 혼화재 등의 재료 또는 경화된 표면에서 해수, 빗물 등에 의해서 NaCl, KCl, CaCl₂, MgCl₂, FeCl₃, 3CaO · Al₂O₃ · CaCl₂ · 수, -12H₂O 등의 다양한 종류가 존재하고 이들 염소화합물은 염화나트륨, 염화칼슘, 염화칼륨 등과 같이 물에 쉽게 용해되어 이온상태로 강재의 부식에 직접 관여하는 것과 3CaO · Al₂O₃ · CaCl₂ · 10H₂O와 같이 시멘트 성분과 결합해서 강재 부식에 직접 관여하기 어려운 형태의 것으로 분류된다.

(2) 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 pH 11 정도 이상의 알칼리성을 유지하고 있으면 소량의 염화물이 존재해도 부식은 매우 느리지만, 콘크리트 시방서에 규정된 염화물 함유량 Cl⁻량 0.3 kg/m³ : 0.04% 정도를 넘으면 철근부식의 가능성이 커진다.

② 철근 부식 속도는 콘크리트의 알칼리성, 건습의 정도, 염화물 함유량의 다소에 따라 변화한다.

- 콘크리트가 중성화되어도 건조한 환경에서는 부식속도는 느리다.
- 중성화되고 습도가 적당하면 염화물이 침입하지 않아도 철근은 부식한다.
- 염화물 이온량이 어느 정도 이상 존재하면 콘크리트가 알칼리성이어도 철근은 부식한다.
- 중성화되고 피복두께가 얇으면서 적당히 습해 있으면 부식속도는 매우 빠르다.

③ 철근의 부식상태를 외부에서 비파괴시험으로 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 2~3년 사이에 철근길이 방향으로 균열이 발생한다.

⑤ 철근의 부식은 pitting상으로 되는 경우가 많다.

- 염화물에 의한 철근의 부식은 군데군데 pitting상으로 생기며, 철근의 단면결손이 pitting상 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.

(3) 염화물의 구성

염화물 이온의 침입에 관한 구조물의 성능조사에 있어서는 공용기간 중에 강재의 부식을 발생시키지 않는 것을 조건으로 하는 것이 알기 쉽고 또한 가장 안전측이 된다. 즉, 강재 위치에 대한 염화물 이온농도가 강재 부식발생 한계농도 이하인 것을 조사하면 좋은 것으로 하였다. 여기에서 염화물 이온 농도란 콘크리트의 액상에 대한 실제의 염화물 이온의 농도가 아니라 콘크리트 단위용적당 전 염화물량을 말한다.

콘크리트 내 염화물의 구성은 수용성 염화물과 고정 염화물로 구성되어 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

강재 위치에 대한 염화물 이온의 강재부식 발생 한계농도는 콘크리트 단위용적당 양으로서 $0.3 \sim 1.2\text{kg/m}^3$ 정도이고 이값은 구조물의 설치 환경조건이나 강재부식 허용량 등의 조건에 따라서 다르다. 예를 들면 미리 염화물을 혼입한 공시체에 의한 촉진시험 등에서는 $0.3 \sim 0.6\text{kg/m}^3$ 정도이고 실제 환경의 노출실험에서는 $1.2 \sim 2.4\text{kg/m}^3$ 정도로 되어 있다. 촉진시험과 실제 환경에서 얻어지는 한계농도의 차이는 시험공시체와 실제 구조물의 덮개나 물 시멘트비의 차이 그리고 촉진 시험시에 설정되는 고온환경 등의 온도의 영향이라고 생각된다.

콘크리트 표준시방서 내구성조서편에서는 경화 콘크리트의 경우 전염화물 기준으로 실제 환경의 노출실험 결과 하한치인 1.2kg/m^3 을 강재 부식발생 한계농도로서 정하고 있다. 비록 부식환경에 따른 전염화물량이 1.2kg/m^3 를 넘더라도 부식이 발생하지 않을 가능성이 있지만 잠재적으로 부식 가능성이 높을 것으로 평가되므로 부식방지를 위한 조치가 검토되어야 할 것이다.

(5) 염화물 함유량 평가기준

콘크리트가 탄산화 되거나 염화물이 침투하게 되면 철근 주위의 산소 차단 역할을 하는 부동태막이 파손되고, 강재표면이 활성화되면 철근의 부식이 시작된다. 일반적으로 부재 단면이 작으면서 철근량이 많고 슬럼프가 큰 콘크리트를 사용하는 구조물에서는 염분에 의한 철근부식이 일어나기 쉽다. 따라서 철근의 부식방지를 위해서 굳지 않은 콘크리트의 총 염화물 이온량을 원칙적으로 제한할 필요가 있다. 그러나 이미 굳은 콘크리트의 총 염화물 이온량에 대한 검토가 염소이온 농도에 의해 이루어질 경우, 재령 28일 이후의 콘크리트에서 최대 수용성 염화물 이온농도 시험은 KS F 2713 (콘크리트 및 콘크리트의 재료의 염화물 분석 시험 방법) 또는 KS F2715(모르타르 및 콘크리트의 수용성 염화물 시험방법)에 따라 시행하고 콘크리트 구조설계기준에 준하여 다음 <표 3.2.5>의 값으로 검토할 수 있다.

<표 3.2.5> 철근부식 방지를 위한 최대 수용성 염소이온 비율

부재의 종류	콘크리트 속의 최대 수용성 염소이온(Cl-), 시멘트의 중량에 대한 비(%)
프리스트레스트 콘크리트	0.06
염화물에 노출된 철근 콘크리트	0.15
건조상태이거나 또는 습기로부터 차단된 철근 콘크리트	1.00
기타 철근 콘크리트	0.30

또한, 콘크리트 내구성 평가절차 수립 보고서와 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (2010. 12. 국토해양부)에 준하여 본 구조물에서의 염화물 함유량에 대한 콘크리트 재질열화 등급 및 손상도의 판정항목은 다음<표 3.2.6>과 같이 요약할 수 있다.

<표 3.2.6> 염화물 함유량에 대한 상태평가 등급 및 손상도의 판정

기 준	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	◦ 염화물 $\geq 2.5\text{kg/m}^3$	철근부식발생
e	-	-

3.2.2 시험결과 및 분석

1) 시험 현황

콘크리트 재료의 품질상태를 파악하고 확인하기 위하여 필요한 현장시험을 수행하였다. 콘크리트 강도는 반발경도시험과 초음파탐사시험을 수행하여 콘크리트의 비파괴 강도를 추정하고 채취한 코어의 강도와 비교하였으며, 철근배근상태, 균열깊이, 탄산화정도, 염화물 함유량을 측정하기 위한 시험을 실시하였다.

콘크리트 강도시험에 대해서는 반발경도시험과 초음파탐사시험은 각 2회를 기본으로 실시하였으며 상세 위치는 부록에 수록하였다.

<표 3.2.7> 부재별 콘크리트 비파괴시험 부위 총괄표

시험종류 부 재			콘크리트 압축강도			철근탐사 시 험	탄산화 시 험	균열깊이 시 험	염화물 함유량 시 험	도막두 께측정
			반발경도 시 험	초음파 탐사시험	코어압축 강도시험					
범물 방향	상부	2012	8	8	1	8	3	-	-	48
		2016	3	-	-	2	2	-	-	9
		2017	8	8	1	8	3	-	1	-
	하부	2012	4	4	1	4	2	1	-	-
		2016	4	-	-	3	3	-	-	9
		2017	4	4	1	4	2	1	1	-
안심 방향	상부	2012	8	8	1	8	3	-	-	48
		2016	3	-	-	2	2	-	-	9
		2017	8	8	-	8	3	-	1	-
	하부	2012	5	5	1	5	3	1	-	-
		2016	4	-	-	3	3	-	-	9
		2017	5	5	1	5	3	1	1	-
총 계	2012		25	25	4	25	11	2	-	96
	2016		14	-	-	10	10	-	-	36
	2017		25	25	3	25	11	2	2	96

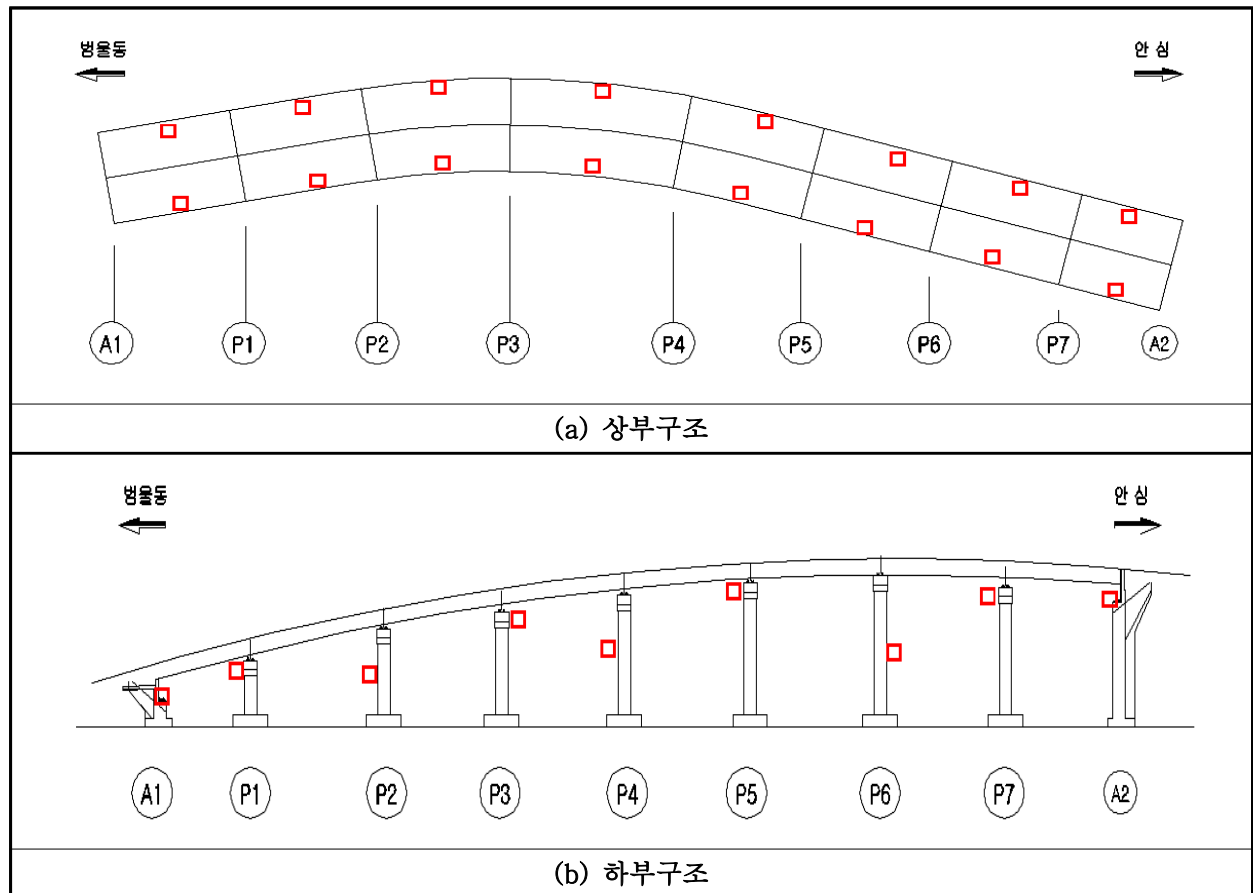
2) 비파괴시험법에 의한 압축강도

반발경도 측정은 R.C Radar로 철근의 위치를 조사하여 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 값은 각 측정부재에 따라 타격방향, 표면의 건습상태, 재령 등에 의한 보정을 한 후 콘크리트 강도를 추정하였다.

초음파탐사시험은 반발경도시험을 수행한 동일부위를 선정하여 그라인딩을 실시하고 구리스 도포를 한 후, 발신자와 수신자의 측정거리를 10cm간격으로 증가시키면서 간접법에 의한 초음파 전달속도를 측정하였으며, 이를 직접법속도로 환산하였다. 본 과업에서 대상 구조물의 콘크리트 비파괴강도를 평가하기 위하여 반발경도법, 초음파속도법 및 조합법의 시험 결과를 비교하였고, 교량별 각 시험방법에 의한 비파괴강도를 <표 3.2.8>에 나타내었고, 시험 현황 및 위치는 <그림 3.2.1>, <그림 3.2.2>와 같다.



<그림 3.2.1> 콘크리트 비파괴강도시험현황



<그림 3.2.2> 콘크리트 비파괴강도시험위치도

<표 3.2.8> 상부구조 및 하부구조 각 시험별 강도

[단위 : MPa]

위 치			보 정 발 경 도 Ro	초 음 파 속 도 km/sec	비파괴시험 방법 (MPa)				설 계 강 도 (Mpa)
					반발경도법		초음파법		
					측정치	평 균	측정치	평 균	
상 부 구 조	상부 (범물)	S1 바닥판하면	49.8	3.976	28.7	29.1	27.3	27.4	27.0
		S2 바닥판하면	51.6	3.977	29.8		27.3		
		S3 바닥판하면	49.5	3.979	28.5		27.3		
		S4 바닥판하면	51.5	3.992	29.7		27.6		
		S5 바닥판하면	50.5	3.986	29.1		27.5		
		S6 바닥판하면	51.9	3.984	30.0		27.4		
		S7 바닥판하면	49.8	3.980	28.7		27.3		
		S8 바닥판하면	49.6	3.986	28.5		27.5		

<표 3.2.8> 상부구조 및 하부구조 각 시험별 강도(계속)

[단위 : MPa]

위치			보정 반발 경도 Ro	초음파 속도 km/sec	비파괴시험 방법 (MPa)				설 계 강 도 (Mpa)
					반발경도법		초음파법		
					측정치	평 균	측정치	평 균	
상 부 구 조	상부 (안심)	S1 바닥판하면	49.2	3.992	28.3	28.9	27.6	27.5	27.0
		S2 바닥판하면	50.6	3.968	29.1		27.1		
		S3 바닥판하면	51.5	3.995	29.7		27.7		
		S4 바닥판하면	49.9	3.975	28.7		27.2		
		S5 바닥판하면	51.8	3.973	29.9		27.2		
		S6 바닥판하면	49.9	3.976	28.7		27.3		
		S7 바닥판하면	49.5	4.004	28.5		27.9		
		S8 바닥판하면	49.2	4.008	28.3		28.0		
하 부 구 조	교대	교대 A1	44.3	3.859	25.2	25.4	24.6	24.4	24.0
		교대 A2	44.7	3.840	25.5		24.2		
	교각	교각 P1	44.8	3.856	25.5	25.4	24.6	24.7	24.0
		교각 P2	44.5	3.881	25.3		25.1		
		교각 P3	44.6	3.855	25.4		24.5		
		교각 P4	44.2	3.875	25.1		25.0		
		교각 P5	44.5	3.840	25.3		24.2		
		교각 P6	45.1	3.861	25.7		24.7		
		교각 P7	44.5	3.870	25.3		24.9		

반발경도법

초음파법

설계강도(Mpa)

35.0

30.0

25.0

20.0

15.0

10.0

5.0

0.0

교량상부(범물)

교량상부(안심)

설계기준강도
27MPa

설계기준강도
27MPa

반발경도법			초음파법		설계강도(Mpa)	
30.0						
25.0						
20.0						
15.0						
10.0						
5.0						
0.0						
교량하부			설계기준강도 24MPa			

기 수행(2012년 정밀안전진단, 2016년 정밀점검) 비파괴 강도와 금회 정밀안전진단(2017년) 결과 비교는 다음 <표 3.2.9>와 같다.

<표 3.2.9> 기 수행 비파괴강도 및 금회 비파괴강도 비교표

[단위 : MPa]

구간			반발경도	초음파속도	설계강도	비고
연호고가교	상부 (범물)	바닥판 하면	26.6	27.6	27.0	2012(진단)
			30.7	-		2016(점검)
			29.1	27.4		2017(진단)
	26.4		27.0	2012(진단)		
	30.1		-	2016(점검)		
	28.9		27.5	2017(진단)		
	하부	교대	26.5	27.8	24.0	2012(진단)
			24.8	-		2016(점검)
			25.4	24.4		2017(진단)
		교각	23.7	27.8	24.0	2012(진단)
			28.1	-		2016(점검)
			25.4	24.7		2017(진단)

3) 코어 압축강도

(1) 코어의 외관상태

채취한 코어의 직경은 $\varnothing 100\text{ mm}$ 이며, 외관 특성은 <표 3.2.10>과 같다. 코어 외관에서 상부구조 콘크리트의 굵은 골재는 강자갈과 쇠석골재로 구성되어 있다.

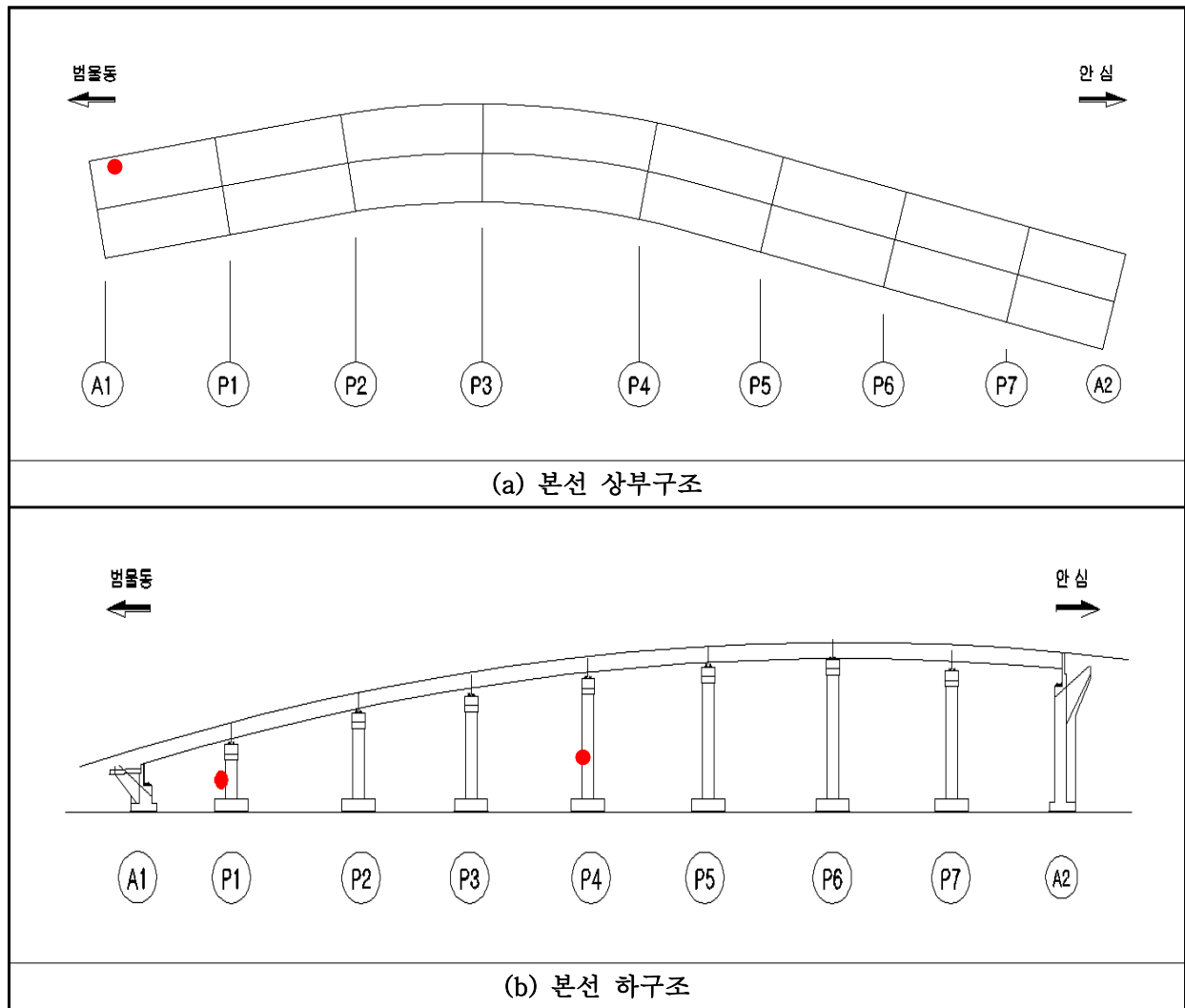
<표 3.2.10> 코어의 압축강도 시험결과

위치			시험·검사방법	보정압축강도 (A)	설계기준강도(B)	A/B (%)	비고
본선	상부	S1	KS F 2422 - 2007	24.3	27.0	90.0	코어압축강도
	하부	P1-1		36.7	24.0	152.9	코어압축강도
		P1-2		36.8	24.0	153.3	코어압축강도

평균(MPa)		설계기준강도(MPa)	
40			
35			
30			
25			
20			
15			
10			
5			
0			
	S1	P1-1	P1-2



코어 압축강도 시험현황



<그림 3.2.3> 코어채취 위치도

<표 3.2.11> 코어강도 결과 요약

[단위 :MPa]

구 분			시험압축강도 (A)	설계기준강도 (B)	$(A/B) \times 100(\%)$	비고
연호고가교	상부	S8	40.4~44.3	27.0	150~164	2012년
		S1	24.3	27.0	90	2017년
	하부	P6-2	33.7	24.0	140	2012년
		P7-1	42.7	24.0	178	
		P1-1	36.7	24.0	153	2017년
		P1-2	36.8	24.0	153	

<표 3.2.11>의 결과와 같이 설계기준강도에 전반적으로 양호한 품질 분포를 나타내고 있으며, 종합적인 비파괴강도 분석결과 설계기준강도를 만족하는 것으로 평가되었다.

또한, <표 3.2.12>는 2012년과 2016년도 정밀안전진단, 정밀점검 결과의 추정치와 금회 실시한 정밀안전진단 콘크리트 추정 비파괴강도를 비교하였다.

<표 3.2.12> 콘크리트 추정 비파괴강도 비교

[단위 : MPa]

구 분			추정 비파괴강도			평균 추정비파괴강도			설계 기준 강도
			2012년	2016년	2017년	2012년	2016년	2017년	
연호 고가교	상부	바닥판 (범물)	24.5~30.3	29.8~31.1	27.3~30.0	27.1	30.1	28.3	27.0
		바닥판 (안심)	21.6~29.1	29.3~32.3	27.1~29.9	26.7	30.6	28.2	27.0
	하부	교 대	26.2~28.3	24.1~25.5	24.2~25.5	27.2	24.8	24.9	24.0
		교 각	19.9~30.3	27.3~27.5	24.5~25.5	25.8	27.4	25.1	24.0

※ 상기 표에서 보는 바와 같이 상·하부구조의 비파괴 강도는 양호한 것으로 분석되었다.

5) 철근탐사시험

(1) 개 요

철근의 피복두께가 부족할 경우에는 콘크리트의 탄산화 등에 따른 열화손상에 대한 저항성이 저하되어 내구성이 감소할 가능성이 있으며, 피복두께가 지나치게 큰 경우에는 강도감소 등을 수반할 우려가 있다.

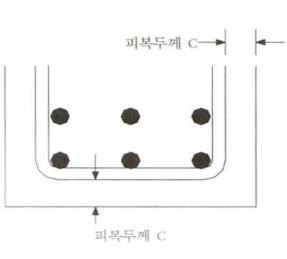
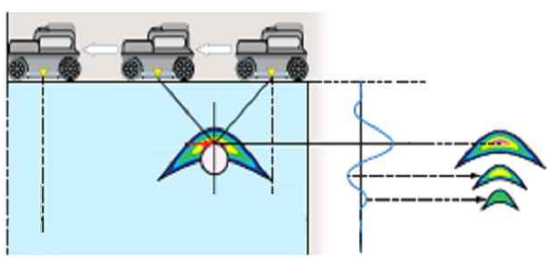
철근탐사시험은 콘크리트 내에 배근 되어 있는 실제 철근의 배근상태 및 피복두께를 비교·검토하기 위하여 실시하였으며, 본 시험에서는 R.C Radar를 이용한 전자파 레이더법을 사용하여 각 구조부재에 대하여 시험을 수행하였으며<표 3.2.13>과 같이 도로교설계 기준(2008년)의 최소 피복두께 허용오차에 대한 현황을 나타내었으며 철근의 측정피복은 아래의 그림에서 보는 바와 같이 철근의 최외단을 나타내는 것이며 철근탐사시험 결과는 <표 3.2.14>와 같으며 위치도는 <그림 3.2.4>와 같다.

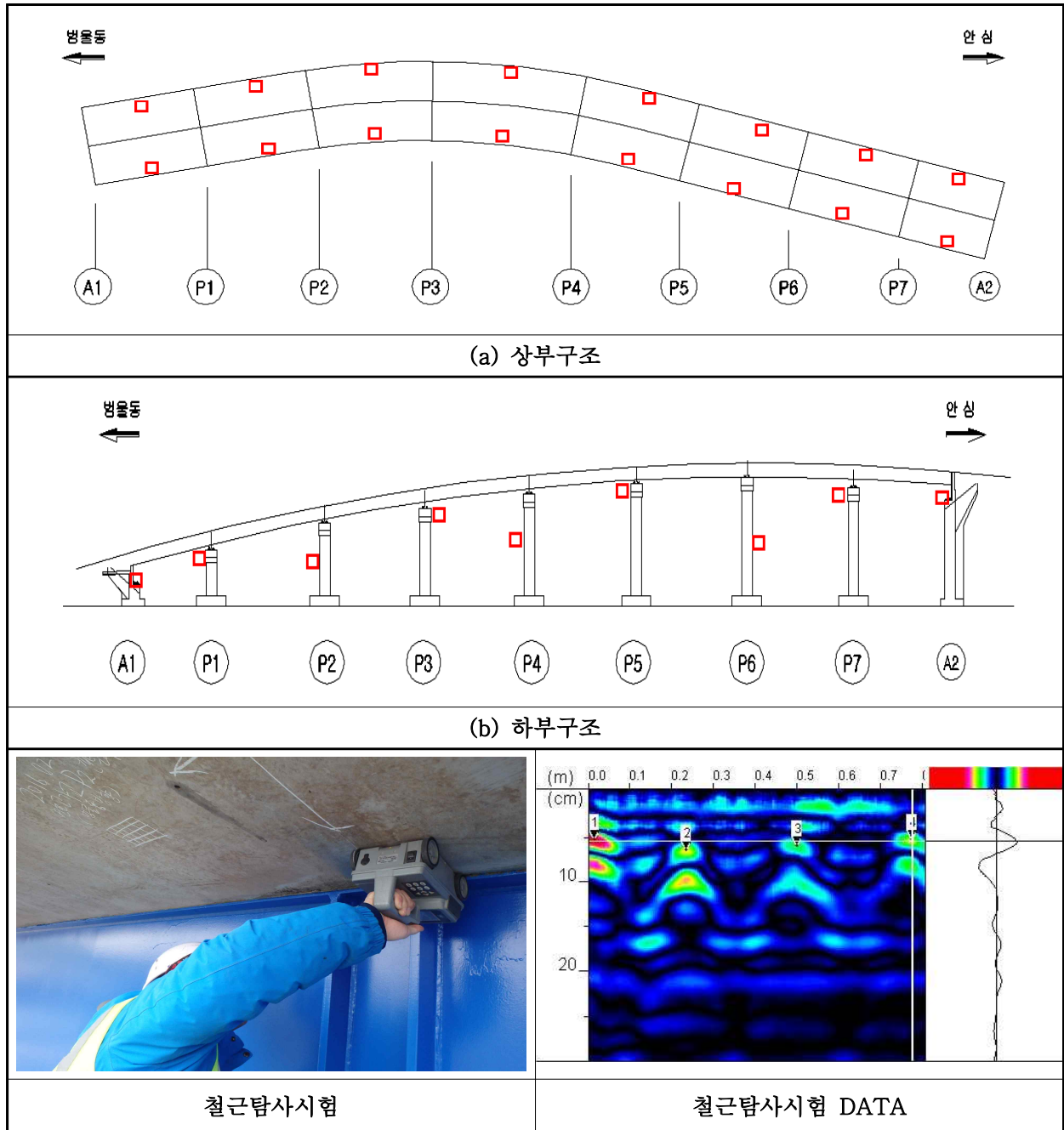
또한, 철근배근도<그림 3.2.5~그림 3.2.8>을 첨부하여 철근 배근간격 및 피복두께를 비교토록 하였다.

(2) 평가 기준

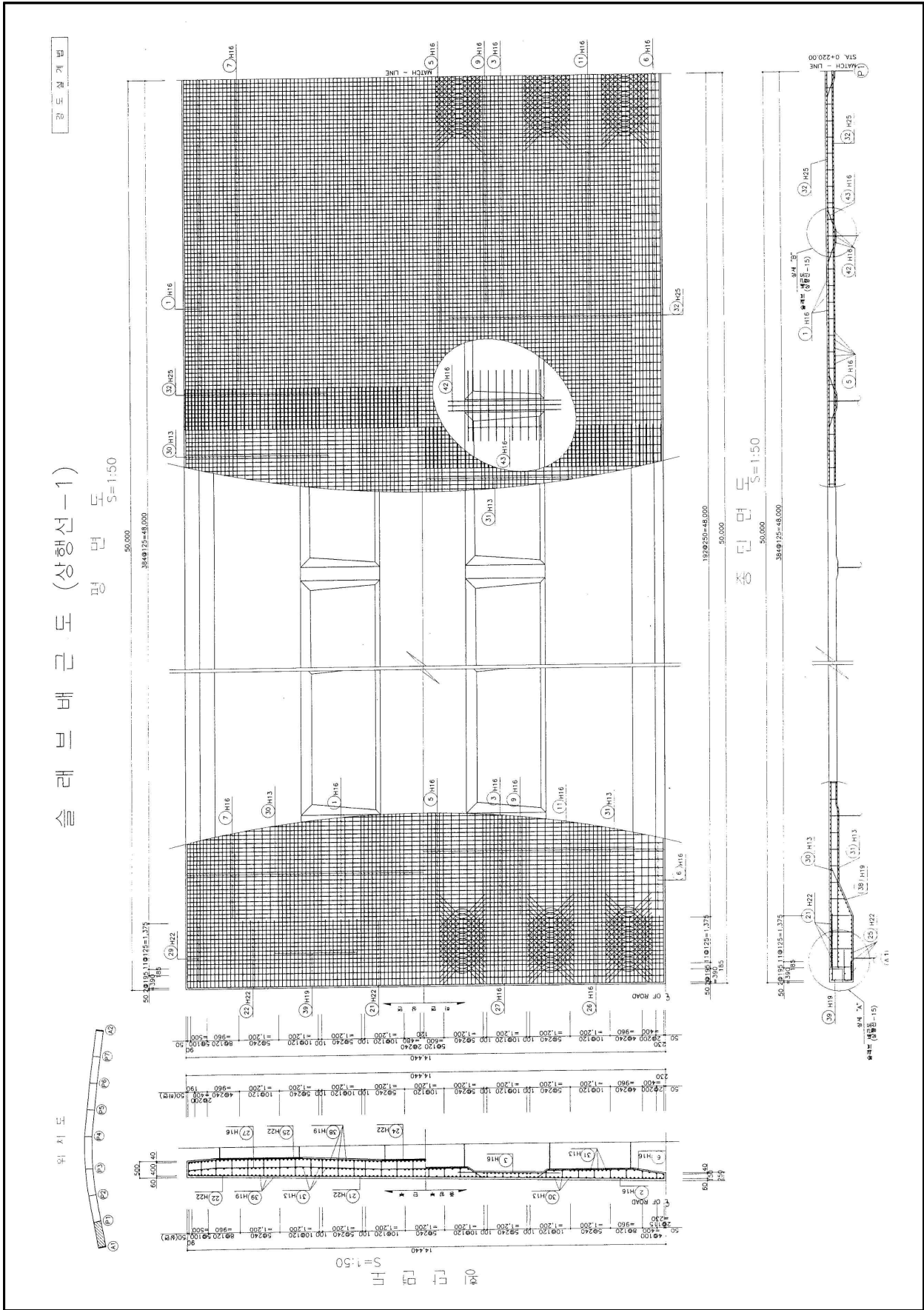
- 철근의 피복두께 및 배근상태를 준공도면과 비교하여 적정성 여부를 판단한다.
- 실측된 철근배근 간격과 피복두께는 평균적인 개념으로 판단함이 바람직하다.

<표 3.2.13> 도로교설계 기준(2008년)의 최소 피복두께 및 허용오차

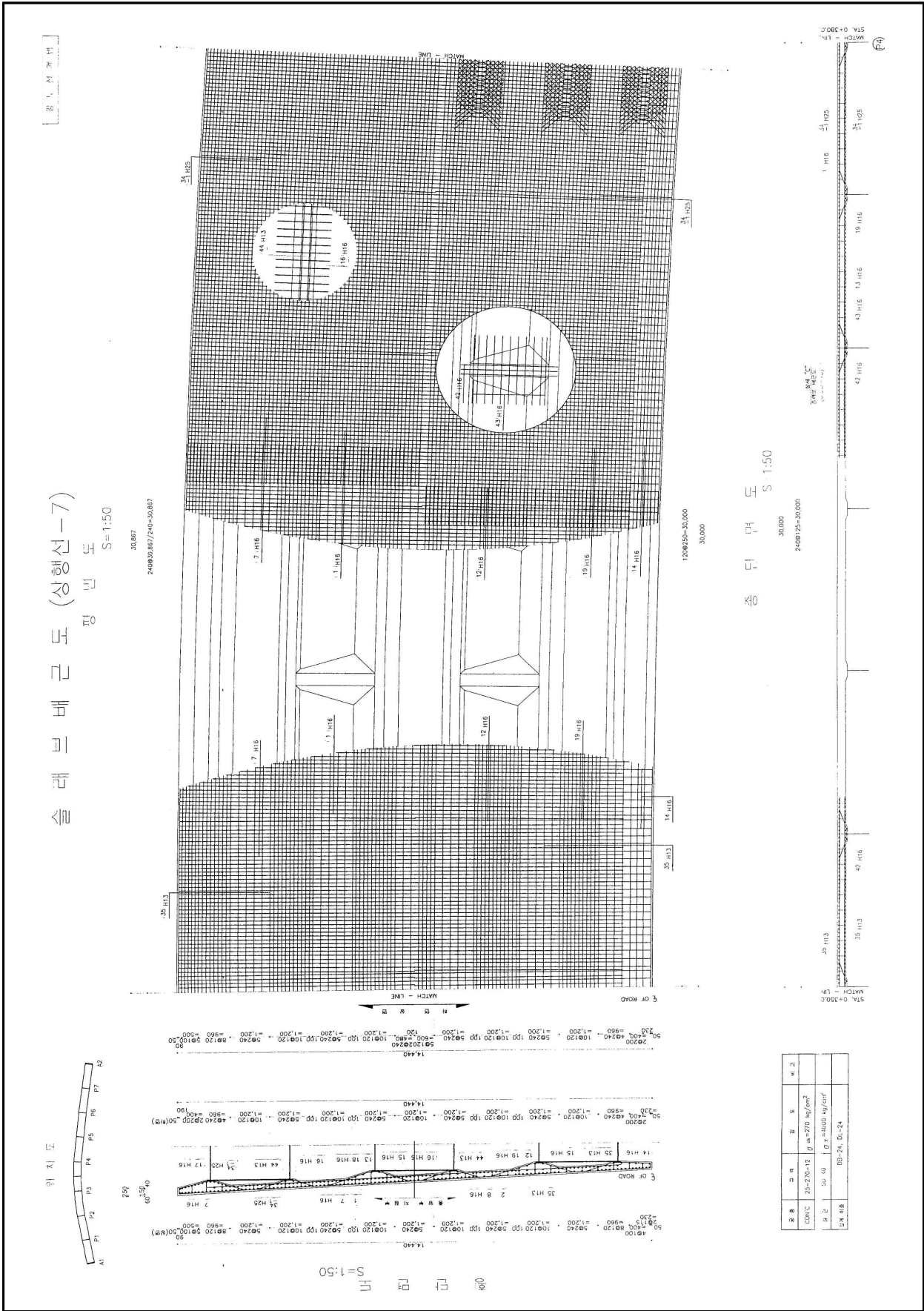
부 위		피복두께(mm)
수중에서 타설하는 콘크리트		100
흙에 접하여 콘크리트를 친 후 영구히 흙에 묻혀 있거나 수중에 있는 콘크리트		80
흙에 접하거나 외기에 노출되는 콘크리트	주철근	60
	스터럽, 띠철근, 나선철근	40
기상조건이 양호한 곳에서의 콘크리트 바닥판 슬래브	상단철근	50
	하단철근	30
부식에 대한 적극적인 방지책이 없고 제빙염에 자주 노출되는 콘크리트 바닥판 슬래브	상단철근	70
	하단철근	30
콘크리트가 흙에 접해있지 않거나 외기에 노출되어 있지 않은경우	주철근	40
	스터럽, 띠철근, 나선철근	30
콘크리트를 타설할 때부터 흙에 접해 있거나 또는 영구적으로 흙에 접해 있는 콘크리트 파일		60
		
측정현황	이론 피복	실측 피복



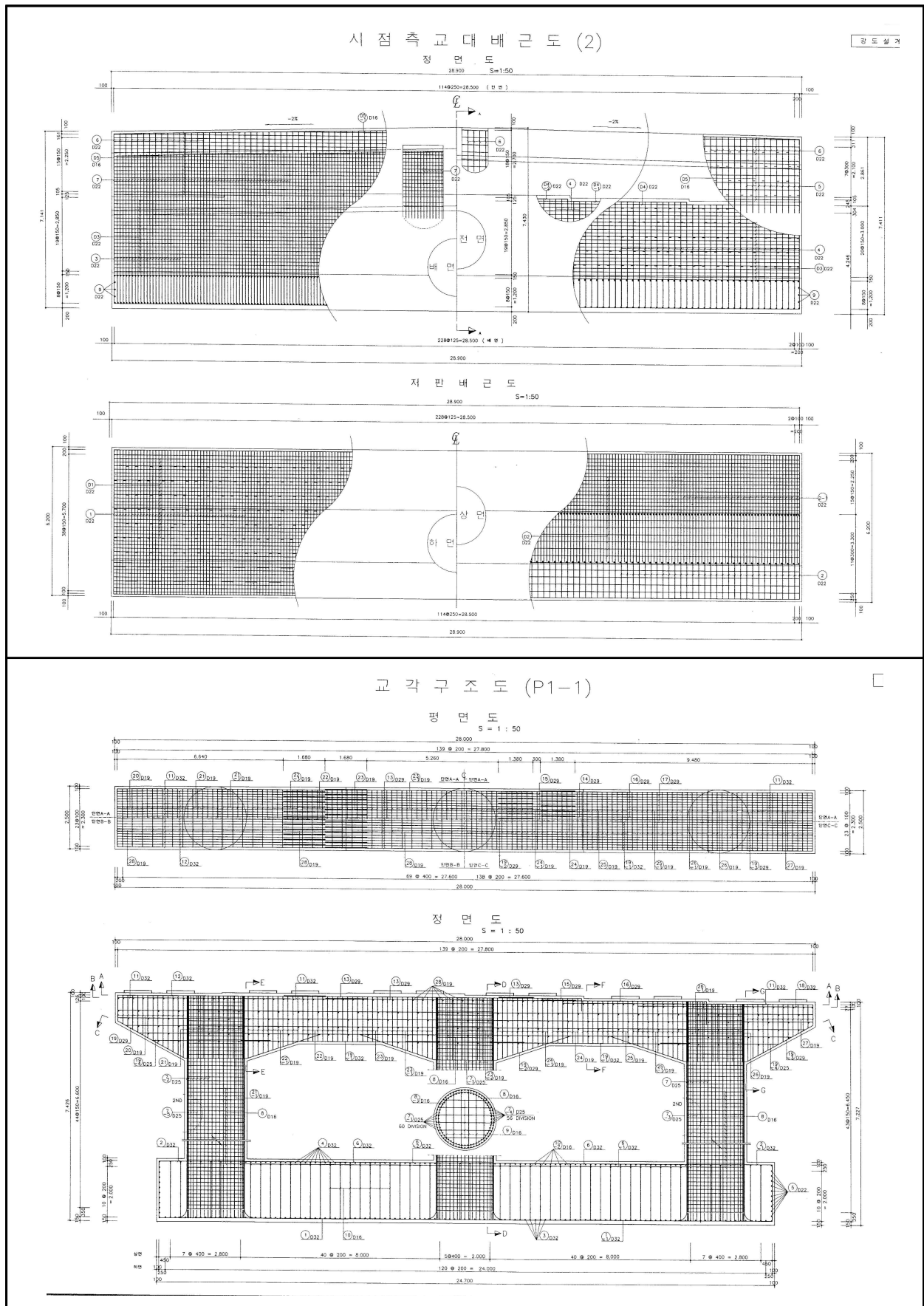
<그림 3.2.4> 철근탐사시험 위치도



<그림 3.2.5> 배근도(슬래브)



<그림 3.2.5> 배근도(슬래브)-계속



<그림 3.2.6> 배근도(교대, 교각)

<표 3.2.14> 철근탐사시험 측정자료

[단위 : cm]

위치			철근배근 방향	피복두께		배근간격			비고
				실측값	설계	실측값	설계	철근직경	
상 부 구 조	범물	S1 바닥판	주철근	33.5	40	233	250	H16	
		S2 바닥판	주철근	35.7	40	239	250	H16	
		S3 바닥판	주철근	35.0	40	242	250	H16	
		S4 바닥판	주철근	39.8	40	245	250	H16	
		S5 바닥판	주철근	32.0	40	243	250	H16	
		S6 바닥판	주철근	42.5	40	246	250	H16	
		S7 바닥판	주철근	42.4	40	252	250	H16	
		S8 바닥판	주철근	42.3	40	236	250	H16	
	안심	S1 바닥판	주철근	53.5	40	245	250	H16	
		S2 바닥판	주철근	43.0	40	246	250	H16	
		S3 바닥판	주철근	45.3	40	259	250	H16	
		S4 바닥판	주철근	53.8	40	244	250	H16	
		S5 바닥판	주철근	50.0	40	244	250	H16	
		S6 바닥판	주철근	42.5	40	245	250	H16	
		S7 바닥판	주철근	46.2	40	236	250	H16	
		S8 바닥판	주철근	44.2	40	229	250	H16	
하 부 구 조	A1		주철근	72.0	50	133	125	D22	
	P1		주철근	70.0	100	201	200	D19	
	P2		주철근	73.0	100	193	200	D19	
	P3		주철근	75.0	100	127	120	D25	
	P4		주철근	94.3	100	135	120	D25	
	P5		주철근	80.0	100	203	200	D19	
	P6		주철근	145.0	100	125	120	D25	
	P7		주철근	90	100	152	120	D25	
	A2		주철근	58	50	134	125	D22	

철근탐사 결과를 요약하면 <표 3.2.15>과 같으며, 측정치가 위치별보다소 차이가 있는 것으로 일부 확인되었으나, 콘크리트 타설시 철근배근 위치의 국부적인 이동 현상으로 추정된다.

<표 3.2.15> 철근탐사시험 결과

[단위 : cm]

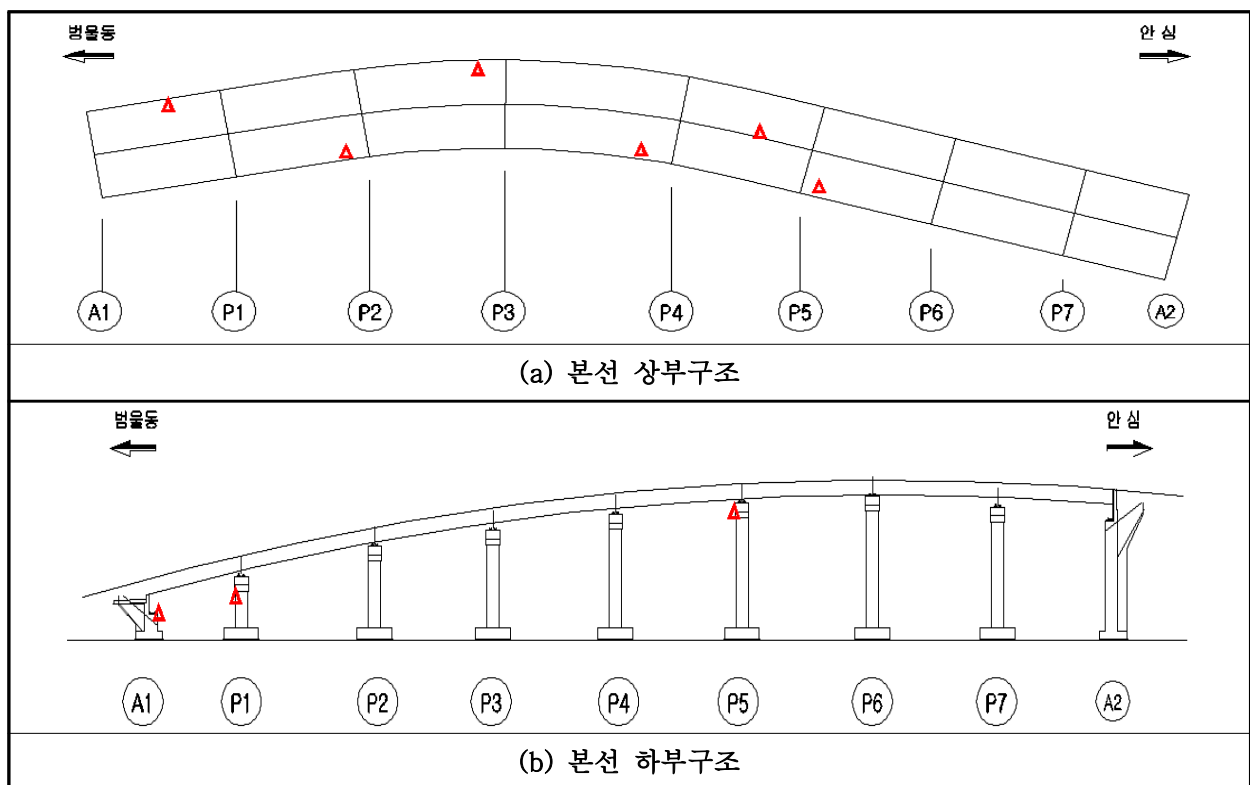
구분			철근배근 방향	피복두께		배근간격		비고
				범위	설계도면	범위	설계도면	
연 호 고 가	상부 구조	범물	주철근	32.0~42.5	40	233~252	250	
		안심	주철근	42.5~53.8	40	229~259	250	
	하부구조		주철근	58.0~145.0	50~100	125~203	120~200	

6) 탄산화시험

탄산화시험은 페놀프탈레인 용액을 지시약으로 사용하여 측정하며, 알칼리성 콘크리트에서는 붉은색으로 변하고 콘크리트의 탄산화가 진행된 면에서는 무색으로 변화가 없으므로 무색의 깊이가 곧 탄산화 진행 깊이가 된다.

본 교량에 대한 탄산화시험은 코어 채취기에 의하여 채취된 코어 시편과 드릴링에 의한 국부 파손면에 페놀프탈레인 용액을 분무기로 살포하여 콘크리트 표면에서부터 착색 경계선까지의 깊이를 측정하여 탄산화 진행정도를 분석하였다.

탄산화시험 위치도 및 현황은 다음 <그림 3.2.7>과 같으며 측정결과를 정리하여 다음 <표 3.2.16>, <표 3.2.17>에 나타내었다.



<그림 3.2.7> 탄산화시험 위치도 및 현황



<표 3.2.16> 탄산화 깊이의 측정결과

[단위 : mm]

시 험 위 치				탄산화 깊이 (3EA)	최대탄산화 깊이 (A)	최소철근 피복두께 (B)	탄산화 잔여깊이 (B-A)	탄산화 속도계수 (a)	경과 년수 (t)	평가 등급
상부 구조	범물	S1 바닥판	1	12.5	12.5	34.1	21.6	3.227	45年	b
			2	13.0						
			3	12.0						
		S3 바닥판	1	11.0	10.7	35.5	24.8	2.754	82年	b
			2	10.0						
			3	11.0						
		S5 바닥판	1	12.0	11.7	32.2	20.5	3.012	47年	b
			2	12.0						
			3	11.0						
	안심	S2 바닥판	1	15.5	14.8	43.9	29.1	3.830	58年	b
			2	15.0						
			3	14.0						
		S4 바닥판	1	12.0	11.5	52.7	41.2	2.969	100年	a
			2	12.5						
			3	10.0						
		S6 바닥판	1	15.0	14.5	43.5	29.0	3.752	61年	b
			2	15.6						
			3	13.0						
하부 구조	교대 A1		1	12.0	11.8	74.5	62.7	3.055	100年	a
			2	12.5						
			3	11.0						
	교각 P1		1	8.5	8.5	71.5	63.0	2.195	100年	a
			2	9.0						
			3	8.0						
	교각 P5		1	12.5	11.5	78.5	67.0	2.969	100年	a
			2	10.0						
			3	12.0						

탄산화깊이 측정 결과 상부구조에서 최대 14.8mm, 하부구조가 최대 11.8mm까지 탄산화가 진행된 것으로 측정되었으며 상부구조(S4) 및 하부구조(A1, P1, P5)는 탄산화 진행 정도에 따른 탄산화 잔여깊이가 최소 “30mm이상”으로 탄산화에 의한 부식 발생우려가 없는 “a등급”으로 평가되었고, 상부구조(S4)탄산화 진행 정도에 따른 탄산화 잔여깊이가 최소 “10mm이상~30mm미만”으로 탄산화 상태평가는 “b등급”으로 평가되어 향후 탄산화에 의한 부식방생 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

<표 3.2.17> 탄산화깊이 측정결과 비교

[단위 : mm]

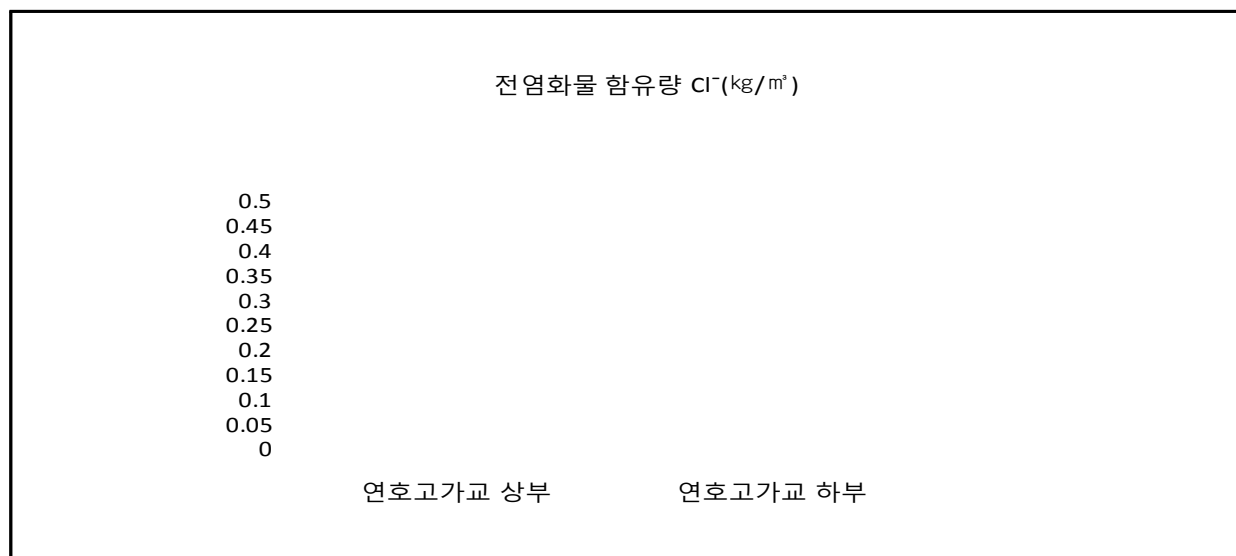
구 분		2012년	2016년	2017년	비 고
		탄산화 깊이	탄산화 깊이	탄산화 깊이	
상부구조		10.0~14.0	1.5~10.5	10.7~12.5	
하부구조	교대	11.0	1.0~8.0	11.8	
	교각	8.0~11.0	12.5~17.5	8.5~11.5	

8) 염분함유량 시험

염해에 의한 구조물의 성능저하는 강재부식 등 구조물에 심각한 문제를 일으킬 수 있으므로 철근콘크리트 구조물의 염해에 대한 평가는 매우 중요하다. 염화물 함유량 분석은 철근 위치에서 평가하며, 평가개소는 시험개소별로 실시한다. 본 과업대상 구조물에서 채취한 코어시편에 대한 염분함유량 분석결과는 <표 3.2.18>과 같다.

<표 3.2.18> 염분함유량 분석결과

구분	시료채취위치	전염화물 함유량		전염화물 이온량(kg/m ³)	상태평가 등급
		Cl ⁻ (%)	Cl ⁻ (kg/m ³)		
1	연호고가교 상부	0.0200	0.4526	a : 염화물 ≤ 0.3 b : 0.3 < 염화물 < 1.2 c : 1.2 ≤ 염화물 < 2.5	b
2	연호고가교 하부	0.0028	0.0634	d : 염화물 ≥ 2.5 e : -	a



<그림 3.2.8> 염분함유량 분석그래프

경화된 콘크리트의 염화물함유량 평가시 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(2010. 12)을 토대로 전염화물에 의하여 측정된 결과 <그림 3.2.8>과 같이 채취한 코어 시편의 수용성 염화물량 분석결과, 콘크리트 중의 환산 염화물 함량이 철근 위치에서 “0.3 < 염화물 < 1.2”의 범위로 측정되어 염화물이 함유되어 있으나, 부식발생 가능성이 낮은 상태인 b 등급으로 조사되었다.

3.3 강재 비파괴시험

3.3.1 개요

공용 중 교량에 있어서 강재 재료 조사는 강구조 주요 부재에 대한 제작상태 및 결함의 분포 현황을 조사하고 그 결과를 분석하여 교량 전체 내구성 평가에 요구되는 기초자료를 제공하기 위하여 실시한다.

조사 대상 부재는 본 교량의 주부재인 Steel Box Girder, 인장응력이 작용하는 결함 발생 취약부로 선정하였으며, 용접이음 형태에 따라 강재 재료시험 방법을 구분하여 시행하였다. 시험의 종류 및 범위는 다음과 같다.

- 초음파탐상시험 : Steel Box Girder 하부플랜지 맞대기 용접부

<표 3.3.1> 일반적인 강재비파괴시험 방법의 개요

검사방법	대 상 결 합	장 점	단 점
육안검사	·표면결함 ·수치의 적부 여부	·별도의 특수장비의 이용없이 조사 가능	·미세균열 감지 불가능
초음파탐상 시험(UT)	·주로 내부결함 -균열, 용입부족, 용합불량, 기공, Slag 혼입 등 ·부재 두께측정 가능	·면상결함 검출 용이 ·편면에서 탐상 가능 ·시험결과와 응답성 양호 ·후판 탐상가능	·표면상태 영향을 받음 ·박판 탐상은 부적합 ·결함 종류판별 곤란 ·숙련이 필요

3.3.2 초음파탐상시험(UT:Ultrasonic Testing)

1) 개요

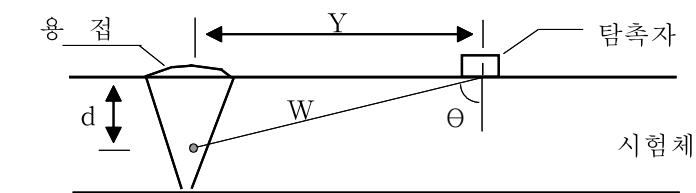
가청 주파수 이상의 주파수를 갖는 초음파(주로 1~10MHz)를 시험체 내에 전달하여 초음파 진행경로 상에 존재하는 결함부로부터 반사하는 초음파를 탐상기 CRT상에 에코파 형으로 나타냄으로써 결함의 유무 및 결함정보를 알아내는 검사방법이다.

초음파법의 종류는 크게 수직법과 사각법으로 구분되며, 수직법은 탐촉자와 시험체의 접촉면에 수직방향으로 초음파를 전파시키는 검사방법으로 통상적으로 판재 및 봉재, 주·단강품 결함 검사와 부재의 부식두께 측정 등에 이용되며, 사각법은 시험체에 임의의 일정각으로 초음파를 전파시켜서 검사하는 방법으로 주로 강구조물 용접부 검사에 적용된다.

2) 방법(사각법)

일반적으로 강교 용접부의 사각탐상에서는 주로 용접부 내부에 존재하는 기공, 슬래그, 융합불량, 용입부족 등의 결함과 균열에 대한 조사가 실시되고 있으며, 각각의 결함부로부터 반사한 에코파형의 펄스형태(펄스폭&높이), 반사체(결함)까지의 진행거리, 초음파 입사각도, 에코의 반사패턴 등을 종합적으로 분석하여 결함의 입체적인 위치를 산출하고 결함 종류 및 길이 등을 측정한다.

본 시험에서는 70°로 초음파를 입사하였다.



$$\text{계산식 } Y = W \cdot \sin \theta$$

$$d = W \cdot \cos \theta$$

여기서 Y : 입사점-결함거리

d : 결함깊이

W : 초음파 이동거리

θ° : 입사각(70°)

<그림 3.3.1> 초음파탐상(사각법)시험 개요도

3) 특 성

- (1) 시험체가 두꺼워도 검사가 가능하다.
- (2) 불연속의 위치를 정확히 알 수 있다.
- (3) 검사결과를 바로 알 수 있다.
- (4) 균열 등의 면상 결함의 검출에는 방사선투과검사보다 유리하다.
- (5) 시험체 한면에서의 탐상이 가능하다.
- (6) 결함의 종류 및 형상, 크기를 식별하기 어렵다.
- (7) 금속 조직의 영향을 많이 받는다.
- (8) 검사자의 기량에 의해 검사 결과가 영향을 받는다.
- (9) 검사 결과의 기록보존이 어렵다.

4) 평 가

초음파 탐상검사 방법 및 결함지시에 대한 등급분류는 <표 3.2.2>와 같다.

<표 3.3.2> 결함의 등급분류

영역		M검출 레벨은Ⅲ, L검출 레벨은 Ⅱ와Ⅲ			Ⅳ		
판 두께		18 이하	18 초과 ~ 60 이하	60 초과	18 이하	18 초과 ~ 60 이하	60 초과
등급	1 류	6mm 이하	t/3 이하	20mm 이하	4mm 이하	t/4 이하	15mm 이하
	2 류	9mm 이하	t/2 이하	30mm 이하	6mm 이하	t/3 이하	20mm 이하
	3 류	18mm 이하	t 이하	60mm 이하	9mm 이하	t/2 이하	30mm 이하
	4 류	3 류를 초과하는 것					

5) 합 · 부 판정기준

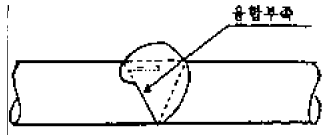
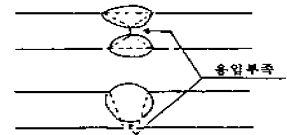
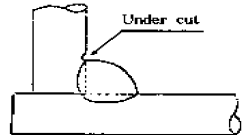
강도로교 용접 및 도장요령(1998. 건설교통부 제정) 기준

<표 3.3.3> 용접부 결함의 합 · 부 판정기준

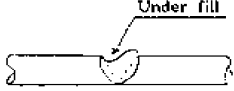
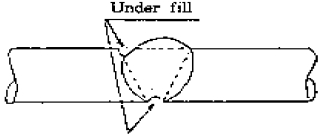
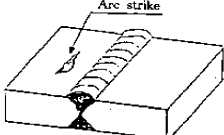
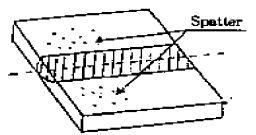
검 사 부 위	합 격 기 준	비 고
인장 및 교변하중이 작용하는 부재의 용접부	2 급 이 상	KS-B-0896
압축 및 전단응력이 작용하는 부재의 용접부	3 급 이 상	

3.3.3 용접부에 발생하는 결함

<표 3.3.4> 용접부에서 발생하는 대표적인 결함

결 함 내 용	설 명	비 고
균열 Crack	용접부의 작은 단면에 걸리는 하중이 금속의 응력값을 초과할 때 발생한다. 균열은 모재 또는 용접금속에서도 나타나며 다른 결함, Notch 등과 함께 나타나기도 한다.	
용합부족(LF) Lack of fusion	그림과 같이 용접 금속과 모재사이가 완전하게 용합이 되지 아니한 상태.	
용입부족(IP) Incomplete Penetration	그림과 같이 용융금속의 두께가 모재두께 보다 적게 용입이 이루어진 상태.	
언더 컷 Under cut	용접사 기량 또는 용접조건 불량 등의 원인에 의하여 그림과 같이 움푹패인 형상으로, 도로교 표준시방서 15.3.3의 (12)에 의하면 0.3~0.8mm 까지 허용됨.	

<표 3.3.4> 용접부에서 발생하는 대표적인 결함(계속)

결함내용	설명	비고
언더 필 Under fill	용융금속이 덜 채워진 형상. 	
아크 스트라이크 Arc strike	용접을 시작할 때 용접봉을 모재쪽에 대고 Arc를 발생시킴으로 인하여 모재가 움푹 패인 현상으로 응력집중의 원인이 됨. 	
기공 Porosity	이물질이나 수분에 의해 용접부 내부에 가스가 발생되어 용접금속 외부로 빠져 나오지 못하고 내부에서 기포를 형성한 상태.	
블로 홀 Blow hole (Pit)	이물질이나 수분의 존재에 의하여 발생된 가스가 용접비드 표면에 빠져 나오면서 발생된 작은 구멍.	
용접Bead 상태불량 -과대한 용접 덧붙임 -Bead 표면의 과대한 요철	도·시(표 15.3.7)에 의하면 용접 Bead 폭 B에 따라 용접 덧붙임 높이 h값이 규정되어 있으며, 이 규정을 초과하는 덧붙임, 용접 Bead 표면의 과대한 요철 등이 발생. 	
스패터 Spatter	용접시 용융 Pool로부터 모재쪽으로 튀겨 나온 조그마한 금속 알갱이를 말한다. 	
슬래그 혼입 Slag Inclusion	용접봉 피복 등이 용접 금속내에 혼입된 상태. 용접 내부의 슬래그는 강도를 저하시키며, 표면의 슬래그는 도장박리의 원인이 됨.	

3.3.4 시험현황

1) 과년도 강재시험 요약

본 교량은 2012년도에 수행한 정밀안전진단에서 강박스거더에 대한 강재시험이 실시되었으며 그 결과를 간단히 요약하면 다음과 같다.

① 초음파탐상검사(UT)

강박스거더 하부플랜지 맞대기용접부 96개소를 조사하여 ‘KS B 0896’의 판정기준에 의거 모두 불합격 결함은 조사되지 않았다.

2) 금회 조사현황

금회 강재조사는 강박스거더 맞대기 용접부를 대상으로 용접결함 및 용접내부의 결함성상 여부를 확인하기 위하여 실시하였으며, 과년도 조사되지 않은 부위를 중점 선정하여

초음파탐상 검사를 실시하였다. 조사수량은 정밀안전진단 세부지침에서 정한 경간별 거더 당 2개소 총 96개소를 실시하였다.

강재 비파괴검사 수량 및 조사 부위는 <표 3.3.5>와 같다

<표 3.3.5> 강재비파괴시험 수량

구 분	단 위	수 량	시험대상
초음파탐상검사(UT)	개소	96	거더 하부플랜지 맞대기용접부

3.3.5 시험결과 및 분석

1) 초음파탐상시험(U.T)

강박스거더 하부플랜지 맞대기용접부 96개소에 대한 초음파탐상 실시 결과 ‘KS B 0896’의 판정 등급기준에 의거 판정되어 전체 불합격 결함은 조사되지 않은 양호한 것으로 판정되었다.(초음파탐상 검사보고서 부록 수록)

<표 3.3.6> 맞대기용접부 경간별 결함 내역(U.T)

구분		하부플랜지		
		조사 개소	불합격 개소	결함종류 및 개소
범물방향	G1	16	0	-
	G2	16	0	-
	G3	16	0	-
안심방향	G4	16	0	-
	G5	16	0	-
	G6	16	0	-
합 계		96	0	-



<사진 3.3.1> 맞대기용접부 결함조사(UT)

2) 강재도장 도막두께 측정

강재에 있어서 도장의 상태 및 도막의 두께는 구조물의 내구성능을 판단하는 기준이 된다. 도장막의 부족은 강재의 부식을 촉진시키고 결과적으로 내구성능을 저하시키는 요인으로 작용한다. 본 측정은 강거더의 도막두께를 측정하여 현재의 도장상태를 확인하고 내구성능의 저하여부를 판단하고자 실시하였다.

① 시험장비

ELCOMETER

② 시험방법

도막두께는 도막두께 Gauge 를 사용하여 일정의 Standard 두께를 가진 필름에 교정한 후 강재에 기 도장된 부위의 두께를 측정하는 것이다.

Gauge 를 이용한 측정법은 다음과 같다.

- Wet Thickness Gauges

도료가 굳지 않은 상태에서 도장막 두께를 측정하는 방법으로 비교적 오차가 크고 도료의 종류에 따라 조금씩 방법이 달라지는 단점이 있다.

- Dry Film Thickness Gauges

도장막을 통과시킨 자력 또는 저항값 감소율을 측정하여 도장두께를 산출하는 방법이며, 접촉식으로 Probe를 도장막표면에 접촉시키면 디지털 혹은 아날로그 방식으로 두께가 표시된다. 현재 가장 많이 사용되는 장비이다.

- Tooke Scratch Gauges

정해진 각도의 칼날로 도장막을 직선으로 그어 잘려진 면의 단면길이를 휴대용 현미경으로 도장막을 측정하는 방법이다.

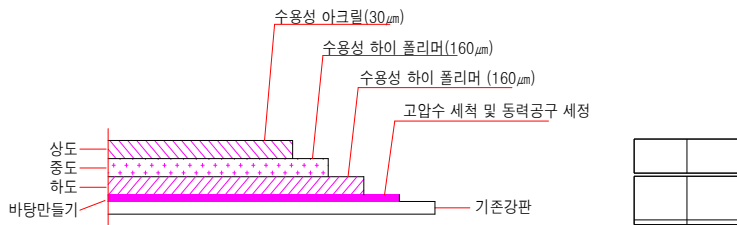
③ 측정기준

일반적으로 강교에 사용되는 도장계열은 일반환경과 특수환경에 따라 다르게 시공되며 일반환경용에도 재래식 도장과 중방식 도장으로 구분되고 특수환경용 도장은 우레탄 계마감 중방식 도장과 자연건조형 불소수지 마감 중방식 도장 등 다양한 재료를 이용한 도장이 실시되고 있다.

대상 구조물의 주요 구조부재인 거더는 일반환경용 중방식 도장으로 추정되며 이에 대한 도장시방을 도로교표준시방서(한국도로교통협회, 1999) 제6장 도장편의 일반환경용 중방식 도장을 측정기준으로 정하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

<표 3.3.7> 일반환경용 도장(중방식 마감)

구분	도장 계열	공정	도료명칭 또는 방법	도막두께 (μm)	도장횟수	비고
교량 외부	GEB	1차 표면처리	SSPC SP10			
		전처리 프리미어	무기질 아연말 샵프라이머	20	1	
		2차 표면처리	SSPC SP10			
		공장 도장	제1중 무기질 아연말도료	75	1	
			제2중 미스트 코트	60	1	
			제3중 염화고무계 도료		1	
		공장도장/ 현장도장	제4중 염화고무계 도료	60	1	
		계		195		
교량 내부	GIB	1차 표면처리	SSPC SP10			
		전처리 프리미어	무기질 아연말 샵프라이머	20	1	
		2차 표면처리	SSPC SP10			
		공장 도장	제1중 무기질 아연말도료	75	1	
			제2중 미스트 코트	75	1	
			제3중 역청질계 도료		1	
		계		150		



④ 시험결과 분석

도막두께 측정은 경간별, 거더별로 접근이 용이한 구간 및 점검차를 이용한 내·외부에 측정하였으며, 범물방향 거더 외부는 274~339 μ m, 내부는 208~284 μ m로 측정되었으며, 안심방향 거더 외부 262~345 μ m, 내부는 245~292 μ m로 측정되어 일반환경용 중방식 도장계열 기준과 비교할 때 거더 내·외부 모두에서 기준 도막두께(외부 195 μ m, 내부 150 μ m) 이상의 두께를 확보하고 있는 상태이다.

<표 3.3.8> 강거더 내·외부도장 도막두께 측정치

[단위 : μ m]

측정위치		두께측정(μ m)	두께검토(%)	설계두께(μ m)	비고	측정위치		두께측정(μ m)	두께검토(%)	설계두께(μ m)	비고
외부 (범물)	G1-S1	295	151	195		외부 (안심)	G4-S1	268	179	195	
	G2-S1	297	152				G5-S1	289	193		
	G3-S1	290	149				G6-S1	296	197		
	G1-S2	298	153				G4-S2	304	203		
	G2-S2	294	151				G5-S2	345	230		
	G3-S2	292	150				G6-S2	316	211		
	G1-S3	301	154				G4-S3	290	193		
	G2-S3	289	148				G5-S3	315	210		
	G3-S3	281	144				G6-S3	262	175		
	G1-S4	305	156				G4-S4	273	182		
	G2-S4	339	174				G5-S4	325	217		
	G3-S4	289	144				G6-S4	320	213		
	G1-S5	333	171				G4-S5	304	203		
	G2-S5	283	145				G5-S5	318	212		
	G3-S5	329	169				G6-S5	290	193		
	G1-S6	297	152				G4-S6	295	197		
	G2-S6	280	144				G5-S6	326	217		
	G3-S6	302	155				G6-S6	351	234		
	G1-S7	312	160				G4-S7	346	231		
	G2-S7	327	168				G5-S7	310	207		
	G3-S7	314	161				G6-S7	263	175		
	G1-S8	310	159				G4-S8	294	196		
	G2-S8	274	141				G5-S8	345	230		
	G3-S8	286	147				G6-S8	304	203		

<표 3.3.8> 강거더 내·외부도장 도막두께 측정치(계속)

[단위 : μm]

측정위치		두께측정 (μm)	두께검토 (%)	설계두께 (μm)	비고	측정위치		두께측정 (μm)	두께검토 (%)	설계두께 (μm)	비고
내부 (범물)	G1-S1	238	159	150		내부 (안심)	G4-S1	245	163	150	
	G2-S1	226	151				G5-S1	262	175		
	G3-S1	248	165				G6-S1	283	189		
	G1-S2	242	161				G4-S2	258	172		
	G2-S2	246	164				G5-S2	284	189		
	G3-S2	264	176				G6-S2	272	181		
	G1-S3	295	197				G4-S3	256	171		
	G2-S3	246	164				G5-S3	255	170		
	G3-S3	229	153				G6-S3	253	169		
	G1-S4	248	165				G4-S4	285	190		
	G2-S4	232	155				G5-S4	274	183		
	G3-S4	266	177				G6-S4	261	174		
	G1-S5	246	164				G4-S5	283	189		
	G2-S5	227	151				G5-S5	292	195		
	G3-S5	264	176				G6-S5	298	199		
	G1-S6	280	187				G4-S6	279	186		
	G2-S6	284	189				G5-S6	257	171		
	G3-S6	263	175				G6-S6	292	195		
	G1-S7	275	183				G4-S7	246	164		
	G2-S7	264	176				G5-S7	258	172		
	G3-S7	259	173				G6-S7	266	177		
	G1-S8	243	162				G4-S8	293	195		
	G2-S8	203	135				G5-S8	265	177		
	G3-S8	208	139				G6-S8	276	184		

3.4 내구성조사 결과 검토의견

3.4.1 콘크리트 비파괴시험

- 1) 콘크리트 비파괴시험 결과 반발경도, 초음파속도 및 코어압축강도를 조합하여 측정한 비파괴 강도는 대체로 양호한 것으로 평가되었으며, 철근배근 측정 결과, 철근탐사 측정치가 위치별로 다소 차이가 있는 것으로 일부 확인되었으나, 콘크리트 타설시 철근배근 위치의 국부적인 이동 현상으로 추정된다.
- 2) 탄산화 시험결과 대체로 양호한 것으로 조사되어 피복부족으로 인한 철근부식의 우려는 적을 것으로 판단된다.
- 3) 또한, 상부구조 및 하부구조에 대한 염분함유량 시험 결과 염화물이 함유되어 있으나, 부식발생 가능성이 낮은 상태인 b등급, a등급으로 조사되었다.

3.4.2 강재 비파괴시험

- 1) 본 교량에 대한 초음파탐상시험(UT) 결과 'KS B 0896'의 판정 등급기준에 의거 전 개소 모두 불합격 결함이 없는 양호한 것으로 판정되었다.
- 2) 도막두께 측정은 경간별, 거더별로 접근이 용이한 구간 및 점검차를 이용한 내·외부에 측정하였으며, 범물방향 거더 외부는 274~339 μ m, 내부는 208~284 μ m로 측정되었으며, 안심방향 거더 외부 262~345 μ m, 내부는 245~292 μ m로 측정되어 일반환경용 중방식 도장계열 기준과 비교할 때 거더 내·외부 모두에서 기준 도막두께(외부 195 μ m, 내부 150 μ m) 이상의 두께를 확보하고 있는 상태이다.

3.4.3 결론

콘크리트 내구성 및 강재 비파괴 시험 결과, 설계기준에 준하여 품질상태가 양호하게 조사되었으며, 강재 또한, 불합격 결함이 없는 상태로 전반적으로 양호하게 조사되어 연호고가교에 대한 품질상태는 지속적인 유지관리가 이루어진다면 내구성 및 사용성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.