

제3장

현장조사 및 시험

3.1 개 요

3.2 외관조사

3.3 내구성 조사

3.4 내구성 조사 결과 요약

제 3 장 현장조사 및 시험

3.1 개 요

본 과업 대상 구조물인 미사터널(서울)는 서울춘천선 39.90km(이정) 지점의 경기도 가평군 설악면 미사리에 위치하며, 본 터널은 총연장 2,205m, 폭 8.2m, 편도 2차로, 높이 7.4m이며 2009년 준공 후 7년째 공용중인 NATM 형식의 1종 시설물로 분류되어 있다.

과업은 대상 터널의 물리적, 기능적 결함을 발견하고 안전성을 판단함을 목적으로 교량 부재 전체에 대하여 가능한 한 근접한 상태에서 육안조사를 실시함을 원칙으로 하였고, 사전 현장답사를 통해 주변여건을 파악하여 교통통제에 따른 외관조사 일정계획을 수립하고, 기존 자료조사를 통하여 주요 손상을 파악한 후 외관조사 방향을 결정하여 교량의 외관상태를 조사하였다. 외관조사 시 터널 내부는 교통통제 후 고소작업차 및 조명시설을 이용하여 가능한 근접하여 육안조사를 실시하였다.

【표 3.1】 외관조사 기간 및 조사현황

일 자	조사 내용	비 고
2016. 06. 22 ~ 2016. 07. 08	외관조사 실시	
교통통제 후 이동조사 및 점검차를 이용한 현장조사		
		

외관조사 범위는 터널 라이닝 및 터널 주변 등의 현 상태를 조사하였고, “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(국토해양부, 한국시설안전공단, 2010.12)”의 평가기준에 근거하여 구조물에 발생한 손상정도에 따라 등급 a~e의 5단계로 구분하여 판정하였다.

본문에서는 터널 라이닝 및 주변 시설물로 구분하여 외관조사 결과를 중심으로 수록하였으며, 비파괴 조사자료 등과 함께 구조물 상태평가 및 유지관리의 기초자료로 활용할 수 있도록 수행하였고, 외관조사망도는 “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(국토해양부, 한국시설안전공단, 2010.12)에 따라 작성하여 부록에 수록하였다.

【표 3.2】 자료검토 등을 통한 외관조사 방향

구 분	외관조사 방향
예비조사 및 자료검토 결과	• 라이닝 콘크리트 균열, 망상균열, 철근노출 등의 결함 발생 현황 • 라이닝 시공이음부 균열, 백태 등의 결함 발생 현황 • 측벽부 균열, 탈락, 파손 등의 결함 발생 현황 • 배수시설의 결함 발생 현황 • 공동구, 노면의 균열, 파손 등의 결함 발생 현황 • 입출구부 갭문, 옹벽 등의 이격, 상단 배수로 이물질퇴적, 그물망 노출 및 식생불량 등의 결함 발생 현황 ⇒ 발생 손상의 진행 및 추가 발생 여부 확인

3.1.1 부재별 외관조사 항목

【표 3.3】 부재별 조사내용

점검 부위	진단항목	진단방법
터널 내부	· 균열조사 - 위치, 균열폭, 길이, 깊이, 균열의 진행성여부 등	초음파검사법 균열측정기 육안조사
	· Joint부 조사 - 위치, 크기, 진행성, Seal재 열화 등	육안조사 균열측정기
	· 누수조사 - 위치	육안조사
	· 콘크리트 라이닝 - 콘크리트 강도 - 철근배근 탐사 및 철근부식도 측정 - 열화조사 : 파손 및 손상, 박리, 층분리 및 박락, 백태, 철근노출 - 탄산화 및 염화물 함유량 조사	표면타격법 초음파속도 레이다탐사법 철근부식도 시험 탄산화시험 염화물함유량시험 육안조사
	· 터널 계측 - 단면측량	광파측량기
	· 배수, 공동구 상태조사 - 배수 상태 - 퇴적물 상태 - 뚜껑 파손 상태	육안조사
	· 기타조사	육안조사
터널 외부	· 균열조사 - 위치, 균열폭, 길이, 깊이, 균열의 행성여부 등	초음파검사법 균열측정기 육안조사
	· 누수조사 - 위치	육안조사
	· 콘크리트 강도 - 반발경도 시험	반발경도법
	· 터널 주변 조사 - 지표조사 - 사면조사	육안조사
	· 기타조사	육안조사
기타	· 퇴적물 상태 · 시설물 이력카드 작성 여부 및 보수 이력 확인	

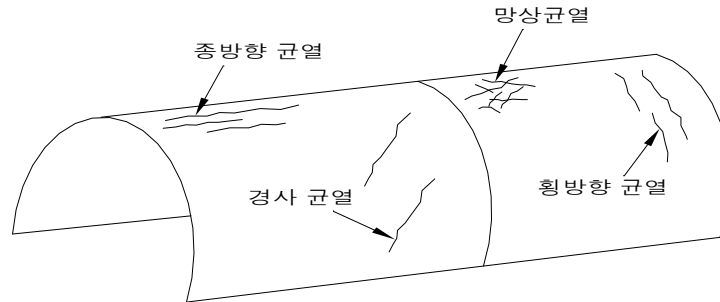
3.2 외관조사

3.2.1 주요 손상원인 분석

가. 본선 라이닝

1) 균열

본 터널의 본선 라이닝 구간에 발생한 주요 손상은 균열로써 발생 유형은 【그림 3.1】와 같다.



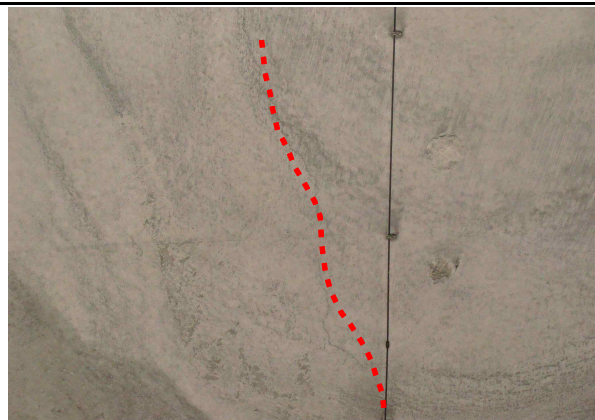
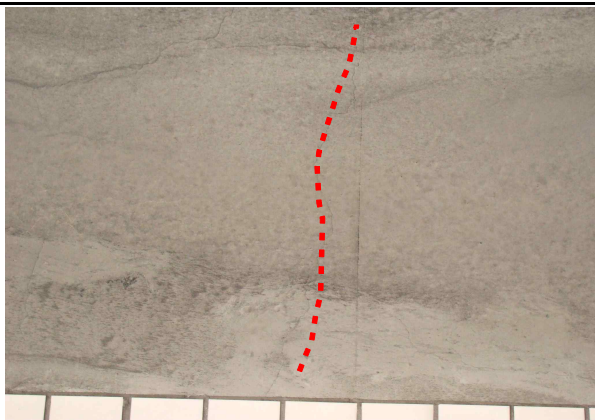
【그림 3.1】 대표적인 균열 형태

- ① 종방향균열 : 터널중심선과 평행하게 터널 천단과 어깨부에 터널 종단방향으로 발생
- ② 횡방향균열 : 터널 중심선에 직교하여 횡방향으로 발생
- ③ 경사 균열 : 터널 중심선에 경사방향으로 나타나는 균열형태
- ④ 망상 균열 : 종방향 균열이 횡방향 균열과 복합적으로 나타나는 균열형태

본 터널의 본선 라이닝 구간에서는 종방향(c.w=0.3mm미만 32개소, c.w=0.3mm이상 208개소, 균열부 백태 1개소), 및 횡방향(c.w=0.3mm미만 4개소, c.w=0.3mm이상 13개소)유형의 균열, 균열부 백태가 총 258개소에 발생한 것으로 확인되었다. 구조물의 특성상 양생 과정에서 구속·수축·경화 등 재료적인 특성에 따른 환경조건변화와 시공조건에 따른 원인이 복합적으로 작용하여 발생한 균열 및 균열부 우수유입으로 인한 결함으로 판단되며, 표면처리, 주입보수 등의 결함에 적합한 보수 조치가 필요할 것으로 사료된다.

【표 3.4】 균열에 대한 조사결과

구 분	결함내용		손상물량	단 위	개 소	원인
라이닝	종방향	균열(c.w=0.3mm미만)	35.7	m	32	·구속응력 ·건조수축 ·균열부 우수유입
		균열(c.w=0.3mm이상)	1463.4	m	208	
		균열부 백태	1.0	m	1	
	횡방향	균열(c.w=0.3mm미만)	9.5	m	4	
		균열(c.w=0.3mm이상)	24.0	m	13	

			
SPAN46(천단부)		SPAN67(좌측벽체)	
현황	c.w=0.3mm미만 종균열 및 횡균열 발생		
원인	재료적 특성에 따른 환경조건변화와 시공조건에 따른 원인이 복합적으로 작용, 균열부 우수유입		
조치방안	cw=0.3mm미만 표면보수공법 적용		

			
SPAN1(천단부)		SPAN49(천단부)	
현황	c.w=0.3mm이상 종균열 및 횡균열 발생 및 균열부 백태		
원인	재료적 특성에 따른 환경조건변화와 시공조건에 따른 원인이 복합적으로 작용		
조치방안	cw=0.3mm이상 주입보수 적용		

2) 단면결함(박리 및 파손 등)

라이닝 콘크리트에 조사된 박리, 박락, 파손 등의 단면손상에 대한 결함 발생여부를 조사한 결과 특별한 손상이 발생하지 않은 대체로 양호한 상태인 것으로 확인되었다.

【표 3.5】 단면결함에 대한 조사결과

구 분	결함내용	손상물량	단 위	개 소	원인
내부 라이닝	상태양호	-	-	-	-

			
라이닝 천단부 전경(상태양호)		라이닝 천단부 전경(상태양호)	
현황	상태양호		
원인	-		
조치방안	-		

3) 누수 및 백태

본 터널은 배수형 터널로 누수 및 백태 등 누수에 의한 손상 발생여부를 조사한 결과 특별한 손상이 발생하지 않은 대체로 양호한 상태인 것으로 확인되었다.

【표 3.6】 누수 및 백태에 대한 조사결과

구 분	결함내용	손상물량	단 위	개 소	원인
내부 라이닝	상태양호	-	-	-	-





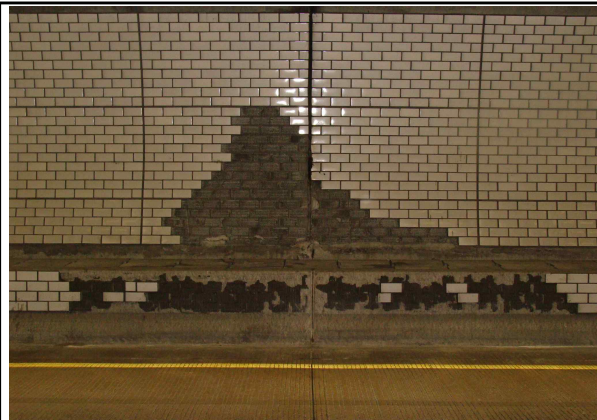
라이닝 천단부 전경(상태양호)		라이닝 벽체부 전경(상태양호)	
현황	상태양호		
원인	-		
조치방안	-		

4) 타일

터널내부의 좌·우측 벽체는 콘크리트 라이닝 시공 후 약 2m 높이로 타일마감이 시공이 되어 있는 상태이며, 외관조사 결과, 외부충격 및 몰탈의 부착 불량으로 인한 타일 탈락이 14개소 발생한 것으로 확인되었으며, 구조물의 미관개선 및 내구성 확보 차원의 타일 재설치가 필요할 것으로 사료된다.

【표 3.7】 타일부에 대한 조사결과

구 분	결함내용	손상물량	단 위	개 소	원인
내부 라이닝	타일탈락, 파손, 균열	379	EA	379	·타일 압착 시공불량 ·외부충격

			
SPAN 48 ~ SPAN 49		SPAN 104 ~ SPAN 105	
현황	타일 균열 및 탈락		
원인	타일 압착 시공불량, 외부 충격		
조치방안	타일 재설치		

나. 배수로 및 공동구

터널내부 좌·우측으로 배수구가 설치되어 있으며 배수구에서 터널 벽체 상부로 공동구가 시공되어 공용중인 시설물로서 배수로 및 공동구의 외관조사 결과 배수로는 특별한 손상이 발생하지 않은 대체로 양호한 상태이나, 외부충격에 의한 공동구 덮개 파손이 일부 발생된 것으로 조사되었다.

【표 3.8】 배수로 및 공동구 조사 결과

구 분	결함내용	손상물량	단 위	개 소	원인
공동구	덮개 파손	9	EA	9	·외부충격
배수로	상태양호	-	-	-	-

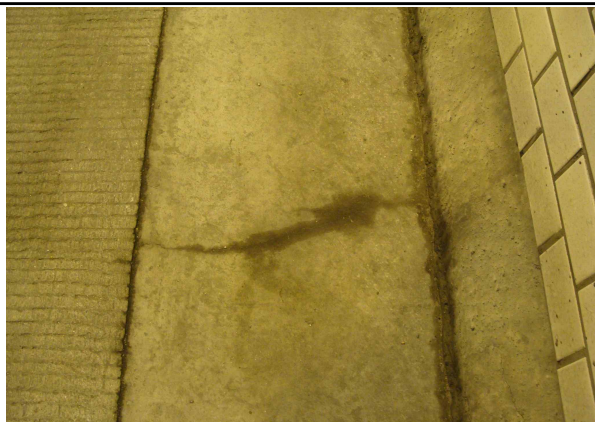
			
SPAN 223		배수구 현황(상태양호)	
현황	공동구 덮개 파손		
원인	외부 충격		
조치방안	재설치		

다. 도로부

터널 내 도로부는 콘크리트 포장으로 전체적으로 횡방향 타이닝이 시공된 상태이다, 외관조사 결과 공용기간 증가 및 차륜하중에 따른 포장부 열화, 균열이 발생하였다. 조사된 손상은 패칭보수 등의 보수를 실시 후 주기적인 점검을 통한 유지관리를 실시해야 할 것으로 판단된다.

【표 3.9】 도로부 외관조사 결과

구 분	결함내용	손상물량	단 위	개 소	원인
도 로 부	포장 균열	47.10	m	35	·공용기간 증가 및 차륜하중

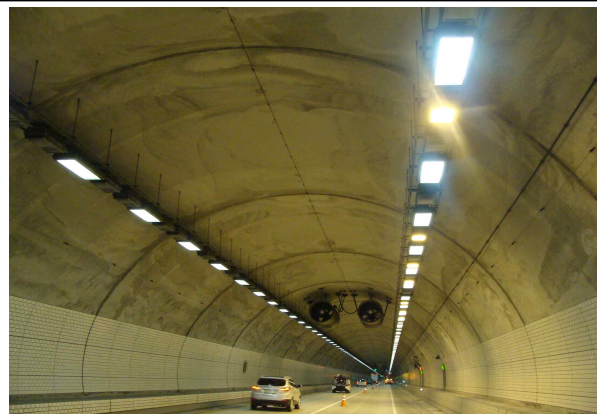
			
SPAN 220		SPAN 234	
현 황	포장면 균열		
원 인	공용기간에 따른 반복적인 차량하중		
조치방안	패칭보수		

라. 기타시설물

터널 내 부착시설물은 조명시설, 환기구 등으로 전반적으로 이상 결함 등이 없는 양호한 상태인 것으로 확인되었다.

【표 3.10】 기타시설물 외관조사 결과

구 분	결함내용	손상물량	단 위	개 소	원인
기타시설물	상태양호	-	-	-	-

			
조명설비 현황		소화전 현황	
현황	상태양호		
원인	-		
조치방안	-		

마. 입·출구부

1) 갯문

갯문의 형식은 면벽식+원통절개형으로 시공되어져 있으며, 외관조사 결과 균열, 파손, 단차 등의 손상이 없는 양호한 상태인 것으로 조사되었다.

【표 3.11】 입·출구부 외관조사 결과

구 분	결함내용	손상물량	단 위	개 소	원인
갯문	상태양호	-	-	-	-



A photograph showing the entrance of a tunnel. The tunnel is built into a hillside with a concrete structure. The road is paved and leads into the dark tunnel. There are some orange traffic cones on the right side of the road.



A photograph showing the exit of a tunnel. The road is paved and leads out of the tunnel. There are some orange traffic cones on the right side of the road. A blue sign with white text is visible above the tunnel exit.

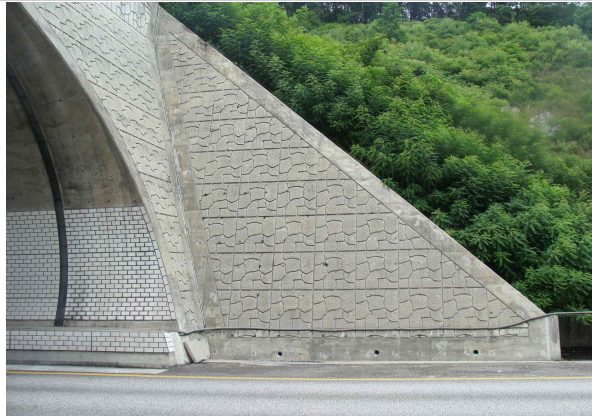
입구부 갯문 현황		출구부 갯문	
현황	상태양호		
원인	-		
조치방안	-		

2) 갱구부 사면 및 배수로, 접속 옹벽

시점부 및 종점부의 사면에 대한 외관조사 결과 노두는 관찰되지 않았으며, 지형의 변화나 사면 활동 등의 외형적 변화는 없는 것으로 조사되어 안정성에 위해한 요소는 없는 것으로 조사되었다. 또한 배수로에 대한 점검 결과 변형, 토사퇴적 등의 손상이 없는 양호한 상태인 것으로 확인되었다.

【표 3.12】 입·출구부 외관조사 결과

구 분	결함내용	손상물량	단 위	개 소	원인
사면	상태양호	-	-	-	-
옹벽	상태양호	-	-	-	-
배수로	상태양호	-	-	-	-

			
시점측 배수로 현황		시점측 접속부 옹벽 현황	
현황	상태양호		
원인	-		
조치방안	-		

3.2.2 외관조사 총괄표

외관조사 결과를 정리하면 【표 3.13】과 같다.

【표 3.13】 외관조사 총괄표

구 분	결 함 내 용		손상물량	단 위	개 소	비고
본선 라이닝	종방향	균열(c.w=0.3mm미만)	35.7	m	32	
		균열(c.w=0.3mm이상)	1463.4	m	208	
		균열부 백태	1.0	m	1	
	횡방향	균열(c.w=0.3mm미만)	9.5	m	4	
		균열(c.w=0.3mm이상)	24.0	m	13	
	타일탈락, 균열, 파손		379	EA	379	
공동구	덮개파손		9	EA	9	
도로부	포장 균열		47.10	m	35	

3.2.3 기존 점검 결과와 비교 · 분석

【표 3.14】 외관조사 결과 비교 · 분석

구 분	2014년 정밀점검	2016년 정밀점검
본선 라이닝	·종균열 - c.w=0.2mm이하 : 26.00m - c.w=0.3mm이상 : 663.00m	·종균열 - c.w=0.3mm미만 : 35.70m - c.w=0.3mm이상 : 1463.40m - 균열부 백태 : 1.00m ·횡균열 - c.w=0.3mm미만 : 9.50m - c.w=0.3mm이상 : 24.00m ·타일균열, 탈락, 파손 : 379EA
공동구	·덮개 유실 : 1ea	·덮개 파손 : 9EA
도로부	·상태양호	·포장 균열 : 47.10m
총 평	■ 정밀점검 결과 '14년 정밀점검 결과에 비해 손상물량 및 손상의 종류가 다소 변화가 발생한 것으로 조사되었다. 이는 기 점검시 조사된 손상에 대한 보수가 일부 실시되었으나, 공용 기간 증가에 따른 손상이 추가로 발생하여 생긴 오차인 것으로 판단된다.	

3.3 내구성 조사

3.3.1 개요

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 콘크리트와 강재 부재로 구성되어 있으므로 각 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.

가. 시험내용 및 평가기준

1) 콘크리트 (비)파괴 시험

① 시험내용, 방법 및 개소

【표 3.15】 재료시험 및 조사 내용

구 분	조사 항목		내 용	비고
내구상태 평가	콘크리트 강도	반발경도법	슈미트 해머를 이용하여 콘크리트 강도 조사	○
		초음파 전달속도법	초음파 측정기를 이용하여 콘크리트 품질상태조사	-
		조합법	반발경도법과 초음파 전달속도법을 조합하여 콘크리트 강도 조사	-
	철근배근 조사		RC-RADAR를 이용하여 철근배근상태, 피복두께조사	○
	탄산화 시험		탄산화시험기를 이용하여 콘크리트 구조물의 탄산화 깊이 조사	○
	염화물 함유량 시험		콘크리트 시료를 이용하여 염화물 함유량 실내 시험 실시	-

【표 3.16】재료시험 측정 기준 및 실시 수량

구 분	세부지침 기준 수량		실시수량	비고
	기 준	수량		
반발경도시험	◦총수량 = (총연장 ÷ 300m)개소 2,205.0m ÷ 300m = 7개소(최소물량)	7개소	8	개소
탄산화	총연장 1,000m 이상 : 최소2개소 + 1,000m당 1개소 추가	4개소	5	개소

※ 조사 기준수량 : 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 적용
⇒ 세부지침 기준수량 이상 실시, 상세위치는 부록 시험위치도 수록

3.3.2 시험내용 및 평가기준

가. 반발경도법

1) 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 굽은골재의 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.

2) 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 R 에 보정치 ΔR 을 더하여 구한다.

$$R_0 = R + \Delta R$$

② 타격방향에 따른 보정

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

하향타격(-90°)의 경우에는 내부의 해머 중량에 의해서 실제보다 반발값이 작아지므로 (+)값으로 수정해 주어야 하며, 상향타격($+90^\circ$)의 경우에는 반대 현상에 의해서 (-)값으로 수정해 주어야 한다. 타격방향에 따른 보정계수는 【표 3.17】과 같으며, 실제 적용된 각도 보정은 아래 표에 대한 $R-\Delta R$ 상관 관계식으로부터 적용하였다.

【표 3.17】 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 3.18】과 같고 3,000일 이상의 재령에 대해서는 0.63을 적용한다.

【표 3.18】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

3) 압축강도의 추정

기준경도 R_0 를 이용하여 압축강도(F_c)를 추정하는 식은 일반적으로 널리 사용되고 있는 일본재료학회, 일본건축학회식을 사용한다

$$F_c = 1.27 \cdot R_0 - 18.0 \quad [\text{일본재료학회}]$$

$$F_c = (7.3R_0 + 100) \times 0.0098 \quad [\text{일본건축학회}]$$

$$F_c = 0.098 \cdot (15.2 \cdot R_0 - 112.8) \quad [\text{한국과학기술부}] : \text{고강도 콘크리트 적용}$$

여기서, F_c : 콘크리트 추정압축강도(MPa)

R_0 : 기준경도

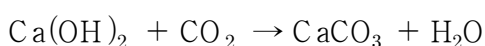
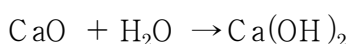
4) 압축강도의 판정

반발경도법에 의한 콘크리트 압축강도 측정치는 콘크리트의 표면을 타격하여 반발에너지로부터 얻어지는 결과 값이므로 타격면 콘크리트 표면 상태에 따라 영향을 받기 때문에 이러한 오차요인을 감안하여 『일본 국토개발기술연구센터』에서 제안된 판정기준을 적용하였다. [판정 기준 : 측정강도 / 기준강도 ≥ 0.90]

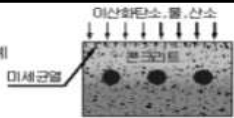
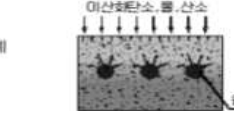
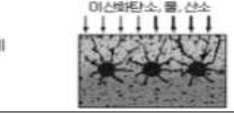
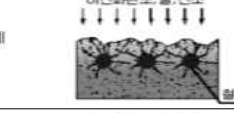
다. 탄산화 시험

1) 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($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 영향으로 pH가 12~13인 강알칼리성을 나타내나 탄산가스가 수산화칼슘과 반응하면 탄산칼슘($\text{Ca}(\text{CO}_3)$)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 3.2】 탄산화에 의한 콘크리트 성능저하 과정

2) 시험 방법

금번 시험은 콘크리트의 미소구간을 핸드그라인더를 이용하여 시편을 채취하거나, 시편이 부스러져 채취가 곤란하였던 경우에는 그라인딩 면에 직접 시험을 시행하였다.

- ① 시험 위치를 결정한 후 핸드그라인더로 측정 면 상·하 또는 좌·우로 컷팅한다.
- ② 컷팅 후 시료를 꺼낸 후 현장 또는 시험실에서 페놀프탈레인 용액을 분무하여 변색 위치를 계측한다.
- ③ 그라인딩으로 손상된 면에 에폭시 혼합재를 교반하여 충전 시킨 후 헤라를 이용하여 표면을 정리한다.

3) 탄산화 깊이 측정

① 시험면 현장 측정

- ㉠ 채취 시료가 부스러져 표면 시점이 모호하거나, 골재 등으로 인하여 조각이 많은 상태인 경우 채취면을 그라인더로 정리한 후 물이 든 분무기로 측정면에 분사하여 미세 석분을 제거 한다.

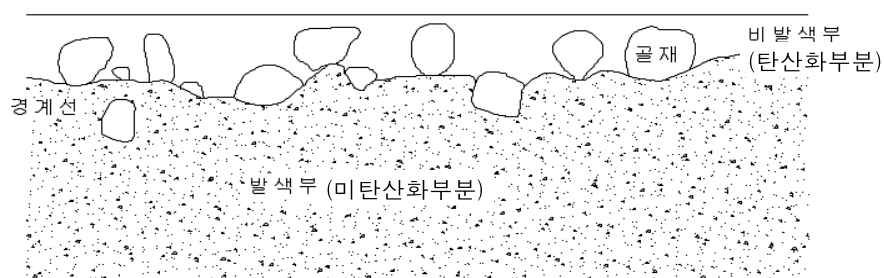
- ㉠ 표면이 건조된 후 면봉에 시약을 분무한 후 가장 최 외측면에서부터 내측방향으로 면봉을 찍어 변색 위치를 확인하여 버니어측정기를 이용하여 거리를 측정한다.
- ㉡ 그라인딩 후 물청소 없이 직접 시약을 분무하면 탄산화 영역이 명확하게 나타나며, 즉시 그 깊이를 측정할 수 있으나, 수초 후에는 잔류 석분 영향을 경계가 모호해지는 경향을 보이지만 재차 시약을 분무하면 선명한 경계를 확인할 수 있다.

② 시험실 측정

- ㉢ 채취 시료는 약 2~3mm의 두께이므로 손으로 쪼갠 후 면봉에 시약을 묻혀 쪼개진 면에 바른다.
- ㉣ 시약에 의하여 탄산화 경계가 나타나면 버니어측정기를 이용하여 거리를 측정후 사진을 촬영한다.

③ 탄산화깊이 결정

- ㉤ 콘크리트 표면으로부터 적자색으로 변색한 부분까지의 거리를 측정한다.
- ㉥ 선명한 적자색으로 변색된 부분보다 얇은 부분에 흐린 적자색의 부분이 나타나는 경우 선명한 적자색 단면까지의 거리를 탄산화 깊이로서 측정함과 동시에 연한적자색 부분까지의 거리도 함께 측정한다.
- ㉦ 평균 탄산화깊이는 측정값의 합계를 측정 개수로 나누어 구하고, 반올림하여 소수점 이하 한 자리까지 구한다.



【그림 3.3】 페놀프탈레인법에 의한 탄산화부분과 미탄산화 부분의 경계

4) 탄산화 진행에 따른 상태평가 기준

탄산화 진행상태는 피복두께의 절대값이 클수록 탄산화 잔여 절대값이 커지므로 피복두께가 클수록 일반적으로 철근부식까지의 탄산화 도달시간에 대한 여유가 크다. 피복두께와 탄산화 측정 깊이를 고려한 철근 콘크리트 구조물에서의 탄산화 진행 상태에 따른 상

태평가 등급은 다음과 같다.

【표 3.19】 탄산화 상태평가 기준

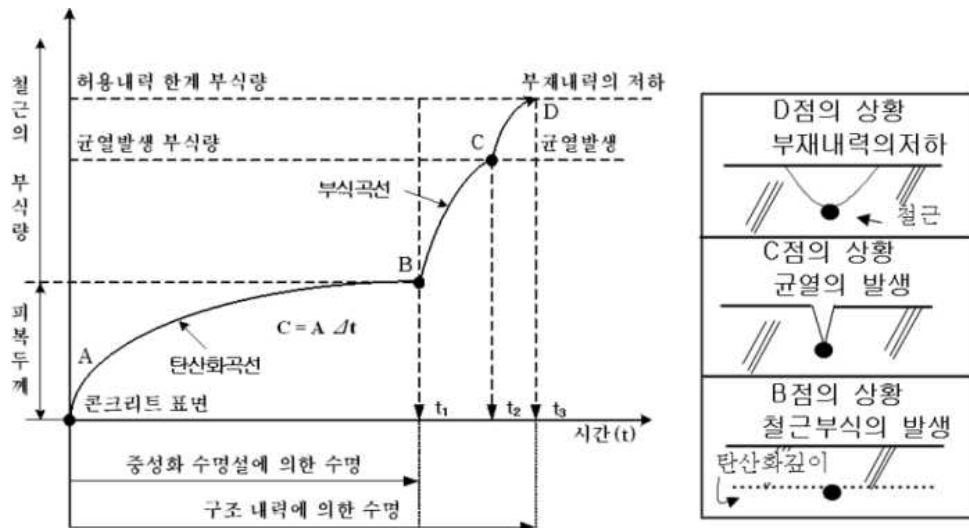
기 준	탄산화 잔여 깊이	철근부식의 가능성
a	·30mm이상	·탄산화에 의한 부식발생 우려 없음
b	·10mm이상 ~ 30mm미만	·향후 탄산화에 의한 부식발생 가능성 있음
c	·0mm이상 ~ 10mm미만	·탄산화에 의한 부식발생 가능성 높음
d	·0mm미만	·철근부식 발생
e	-	-

5) 내구수명 평가

콘크리트의 탄산화가 진행하여 철근에 다다르게 되면 철근의 부식이 시작된다. 그러나 철근주변까지 콘크리트가 탄산화 되었다고 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 탄산화 되어 철근의 부식이 시작되고, 수명에 이르는 개념을 【그림 3.4】에 나타내었다. 즉 t1은 탄산화영역이 철근표면에 도달하는 시점, t2는 그 결과 철근이 부식되고 콘크리트에 균열을 발생시키는 시점, t3은 부재내력이 한계에 달하는 시점을 의미한다.

지금까지 철근콘크리트 구조물의 수명은 t1의 시점이라고 판단되어 왔으나 실제 구조물에 적용할 경우 많은 문제점이 나타나게 된다. 전문가에 따라서는 t1의 시점이 반드시 철근의 유해한 부식량의 시점이라고는 생각되지 않기 때문에, t2의 시점을 수명으로 산정하는 것이 적절하다는 의견이 있으므로 아직까지는 명확한 수명을 판단하기가 어렵다. 또한 다양한 환경조건에 따라 t1에서 t2 도달까지의 시간이 다르기 때문에 본 과업에서는 탄산화에 대한 내구수명으로서 t1에 도달할 때까지의 시간으로 결정하고 내구수명을 산정하였다.



【그림 3.4】 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 C는 경과시간 t의 평방근에 비례한다고 하는 식이 도출된다. 이것은 통상, $\sqrt{t}$ 법으로 불리며, 가장 일반적으로 사용되고 있다.

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

위의 식에서 계수 A는 탄산화속도 계수라고 하며, A의 수치가 큰 만큼 탄산화 속도가 크게 된다. 계수 A는 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 t는 설계도로부터 구할 수 있고 탄산화 깊이 C는 현장조사를 통하여 얻을 수 있으므로 탄산화 속도계수 A를 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), A는 탄산화시험으로부터 계산된 계수, t_0 는 현재의 구조물 경과시간이다.

3.3.3 시험결과 및 분석

1) 콘크리트 강도시험

본 교량의 콘크리트 비파괴강도시험(반발경도시험)은 총 8개소 실시하였으며 검토결과, 콘크리트 라이닝 평균강도가 25.8MPa로 설계기준강도(24MPa)의 107.5%로 나타나 허용 기준치(JICE, 설계기준강도의 90% 이상)를 만족하는 양호한 상태로 조사되었다.

【표 3.20】 부재별 콘크리트 비파괴강도 시험결과

시험위치	비파괴시험	반발경도법			설계기준강도
	반발경도 (R_0)	① 식	② 식	평균	
SPAN 20(LW)	44.6	24.7	26.7	25.7	24.0
SPAN 50(LW)	44.2	24.4	26.5	25.5	
SPAN 80(LW)	46.2	26.0	27.5	26.8	
SPAN 110(LW)	44.1	24.3	26.5	25.4	
SPAN 140(LW)	44.3	24.5	26.6	25.6	
SPAN 169(LW)	44.5	24.6	26.7	25.7	
SPAN 205(LW)	45.1	25.2	27.0	26.1	
SPAN 241(LW)	44.2	24.4	26.5	25.5	

【표 3.21】 비파괴강도 시험결과 분석

구 분	부 재	평균강도(A) (MPa)	설계기준강도(B) (MPa)	A/B ×100(%)
미사터널(서울)	콘크리트 라이닝	25.8	24.0	107.5%



반발경도시험

반발경도시험

2) 탄산화시험결과

탄산화 깊이 측정은 총 5개소에서 실시하였다. 실측한 최소 피복두께와 탄산화 깊이를 비교한 결과, 전 부재 모두 탄산화 잔여깊이가 30.0mm이상으로 측정되어 상태등급은“a”로 평가되었다. 철근까지의 탄산화 도달시간은 시험개소 모두 100년 이상으로 측정되어 탄산화로 인한 내구성 저하 가능성이 없는 양호한 상태로 분석되었다.

【표 3.22】 탄산화 깊이 측정결과 및 평가

부재명	탄산화 깊이 (mm)	실측 피복두께 (mm)	탄산화 잔여깊이 (mm)	평가결과	탄산화 속도계수 (A)	잔존수명 (년)	비고
SPAN 10(C)	1.6	-	-	a	0.60	>100	
SPAN 95(C)	1.8	-	-	a	0.68	>100	
SPAN 169(C)	2.6	-	-	a	0.98	>100	
SPAN 205(C)	2.0	-	-	a	0.76	>100	
SPAN 241(C)	3.5	-	-	a	1.32	>100	

부재	탄산화 깊이 측정	탄산화 깊이측정을 위한 드릴링
SPAN 241 (LW)		

3) 고 찰

비파괴강도는 전반적으로 설계강도 이상을 확보하고 있는 것으로 평가되었고, 콘크리트 탄산화에 의한 콘크리트 내구성은 대체로 양호한 것으로 판단된다.

금회 점검결과, 비파괴 강도, 탄산화 깊이 시험결과, 모두 양호한 수준으로 측정되었다.

3.4 내구성조사 결과요약

【표 3.23】 내구성조사 결과요약

시 험 명		시험부위	시험 결과		비 고
			'16 정밀점검	설계값	
콘크리트	비파괴 강도 (MPa)	좌측 벽체	25.4~26.8 (25.8)	24.0	·설계기준강도 이상을 만족하는 양호한 상태임
	탄산화 깊이(mm)	좌측 벽체	1.6~3.5	잔여깊이 30mm이상	·상태등급 a등급
종합평가	- 비파괴강도는 전반적으로 설계강도 이상을 확보하고 있는 것으로 평가됨. - 탄산화깊이 측정은 최소 100년 이상의 잔존수명을 확보하고 있는 상태로 탄산화에 의한 철근의 부식은 없을 것으로 판단됨. - 금회 점검결과, 비파괴 강도, 탄산화 깊이 시험결과, 대부분 양호한 수준으로 측정됨.				