제3장 현장조사 및 시험

3.1 현장조사 개요

3.2 터널 측점분할

3.3 현장조사 결과

3.4 내구성 시험 및 측정 개요

3.5 내구성 조사 결과

제3장 현장조사 및 시험 개요

3.1 현장조사 개요

본 과업대상인 신월여의지하도로 RAMP-D는 서울특별시 영등포구 영등포동7가 94-411 일원에 위치하며 2021년 04월 15일에 준공된 신월여의지하도로 RAMP-D 구간(BOX구간 207.0m, NATM구간 467.0m) 1차로의 지하도로다.

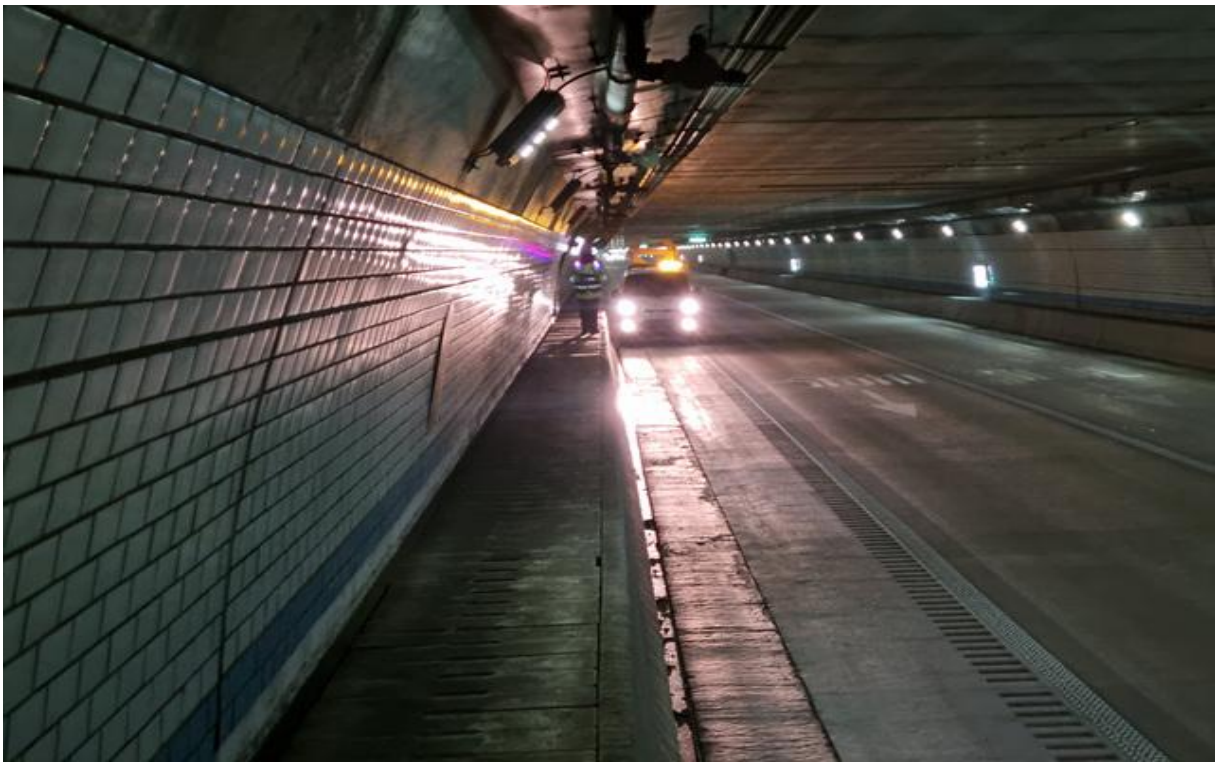
외관조사는 신월여의지하도로 RAMP-D에 발생한 허용 높이 초과 차량에 의한 풍도슬래브 충돌 사고의 영향으로 발생한 물리적, 기능적 결함을 발견하고 구조적 손상유무를 판단하기 위해 부재 전체에 대하여 가능한 근접 육안조사를 실시함을 원칙으로 하였다. 따라서, 사전 현장답사를 통해 주변 여건을 파악하여 현장 접근에 필요한 접근방법 및 장비 동원과 그에 따른 일정계획을 수립하고, 기초자료의 수집 및 분석을 통한 주요 손상을 파악하는 등의 사전 검토를 통하여 주요 손상을 파악한 후 『시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침-터널편(2026.01, 국토교통부/국토안전관리원)』의 실시요령에 따라 시설물에 내재되어 있는 위험요인이나 시설물의 기능 및 성능 저하, 상태 등을 신속·정확하게 검사·평가하는 데 주안점을 두고 외관조사 방향을 결정하였다.

본 시설물의 외관조사시에는 풍도슬래브 내부로 이동작업하여 라이닝 및 풍도슬래브 상면을 조사하고, 그 외 풍도슬래브 하면, 풍도슬래브 격벽, 측벽, BOX구간 등은 도보를 이용하여 구조물에 최대한 근접한 상태에서 조사를 실시하였다.

본 장에서는 외관조사 결과 확인된 결함과 손상 상태에 대하여 구성 부재별로 사진을 첨부하여 설명하고 발생 원인을 분석하여 보수·보강 및 유지관리 방안을 마련하는 데 참고할 수 있도록 하였으며, 충돌 사고부 근처 지점 S45~60에 대한 외관조사망도를 작성하여 향후 신월여의지하도로 RAMP-D의 점검 및 유지관리시 효율적으로 활용할 수 있도록 하였다.

3.1.1 현장조사 수행 현황

지하도로 외관조사는 조명장비, 점검차량, 카메라 등의 접근장비를 이용하여 최대한 지하도로 슬래브에 근접한 후 육안조사를 실시하였으며, 조사결과는 지보패턴, 주변구조물의 상태, 주변 지형상태 등을 고려하여 분석하였다.

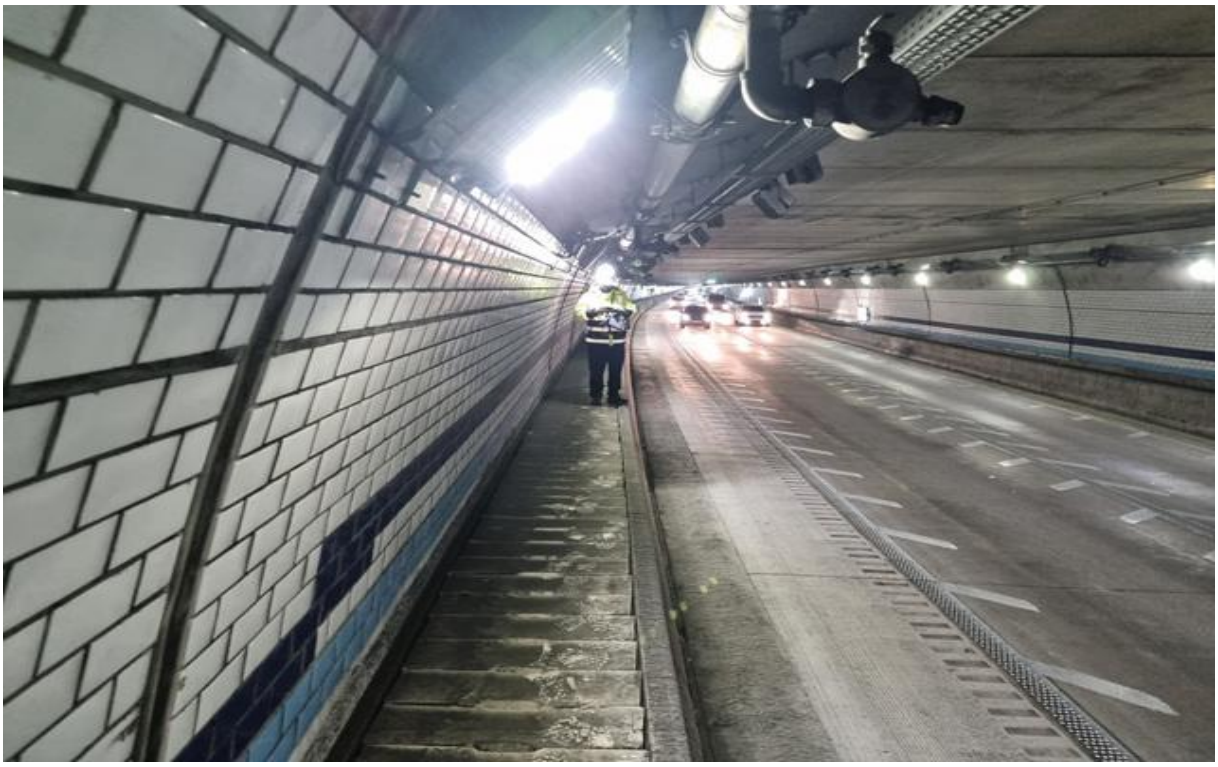


통제현황

통제현황

【사진 3.1.1】 외관조사 전경

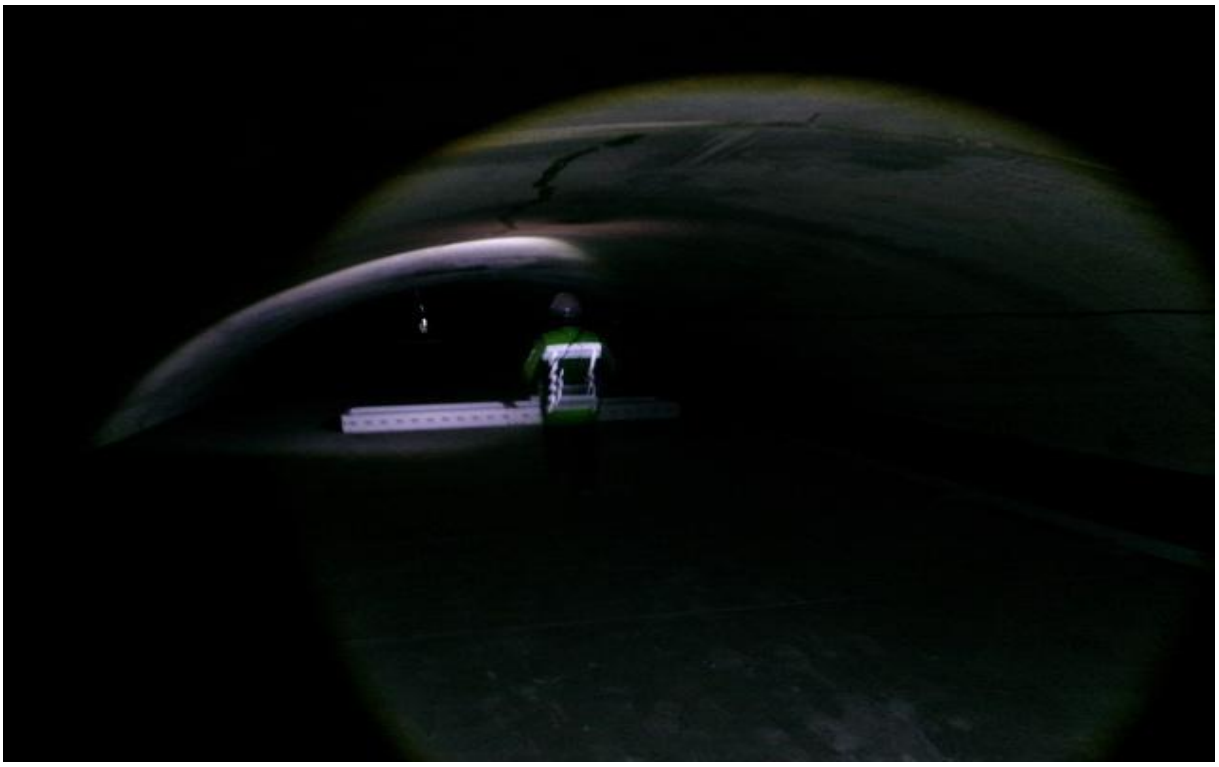
통제현황



도보점검

【사진 3.1.1】 외관조사 전경(계속)

풍도슬래브 내부 이동점검



풍도슬래브 내부 이동점검

【사진 3.1.1】 외관조사 전경(계속)

비파괴시험

비파괴시험

【사진 3.1.1】 외관조사 전경(계속)

3.1.2 현장조사 항목

가. 터널 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 대상 시설

【표 3.1.1】터널 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 대상시설 범위

구 분	시설물명	점검 및 진단 실시범위			비 고
		정기안전점검	정밀안전점검	정밀안전진단	
기본 시설물	◦라이닝	○	○	○	
	◦갱문	○	○	○	
	◦개착터널	○	○	○	
	◦지하도로	○	○	○	
	◦지하역사1)	○	○	○	
부대 시설물	◦연직갱 및 경사갱	○		○	
	◦환기구2)	○		○	
	◦피난연락갱	○		○	
	◦연결터널(환기시설)	○		○	
	◦갱구부옹벽	○		○	
공중이 이용하는 부위	◦추락방지시설	○	○	○	
	◦도로포장	○	○	○	
	◦도로부 신축이음부	○	○	○	
	◦환기구 등의 덮개	○	○	○	

나. 상태변화 점검항목

【표 3.1.2】터널의 상태변화 점검항목

구 분	점 검 항 목
라이닝 상태	◦ 균열 ◦ 누수 ◦ 파손 및 손상 ◦ 재질열화 (박리, 층분리 및 박락, 백태, 재료분리, 철근노출, 탄산화, 염화물)
터널주변 상태 등	◦ 배수상태 ◦ 지반상태 ◦ 갱문상태 ◦ 공동구상태 ◦ 특수조건 : 추가점수 부여

【표 3.1.3】 지하도로의 상태변화 점검항목

구 분	점 검 항 목
철근 콘크리트	◦균열, 누수 ◦파손 및 손상 ◦재질열화 (박리, 층분리 및 박락, 백태, 철근노출, 탄산화, 염화물)
지하도로주변 상태 등	◦배수상태 ◦갱문상태

다. 긴급점검(정밀안전점검) 점검항목

금회 긴급점검(정밀안전점검)시 현장답사, 기존자료 등을 토대로 외관조사 방법을 결정하였으며, 부위별 점검항목별로 외관조사를 실시하였다.

【표 3.1.4】 정밀안전점검 점검항목

점 검 부 위	점 검 항 목	비고
터널내부	◦ 라이닝 등 주요변상 · 균열, 누수, 파손 및 손상 · 박리, 박락, 백태 · 철근노출 등 ◦ 하중상태의 변화 ◦ 기타조사 ◦ 반발경도법에 의한 강도조사 ◦ 탄산화 시험	
터널외부	◦ 갱문의 주요변상 · 균열, 침하 등 ◦ 공중이 이용하는 부위 ◦ 결함원인분석을 위한 지상면조사	

【표 3.1.5】 공중이 이용하는 부위 점검항목

점 검 부 위	점 검 항 목	비고
공중이 이용하는 부위	◦ 추락방지시설의 상태 ◦ 도로부 포장 및 신축이음부 상태 ◦ 환기구 등의 덮개 상태 ◦ 기타조사	

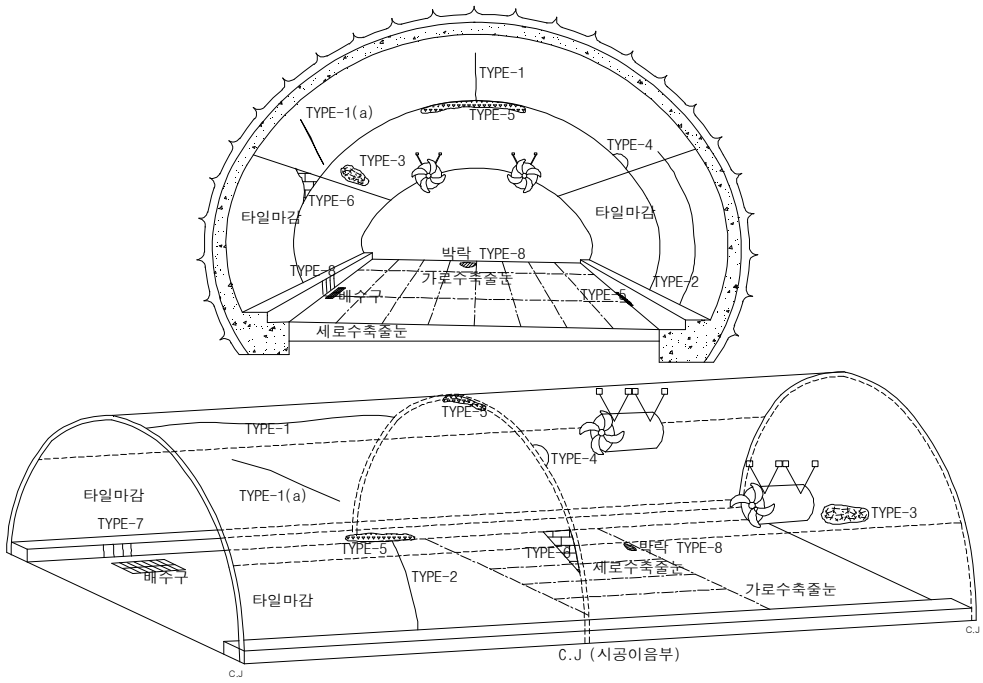
라. 부재별 주요조사 항목

본 신월여의지하도로에 발생한 주요 변상들에 대하여 대표적인 특징을 나타내면 다음과 같으며 부재별, 결함별로 세분화하여 기술하였다.

【표 3.1.6】 부재별 주요조사 항목

구 분		조 사 항 목	비 고
현장답사		•현장접근에 필요한 고소차, 사다리 등의 접근방법, 일정계획을 수립 •예비조사를 통해 신월여의지하도로에 발생된 주요 결함을 형태별로 분류 •결함 및 손상의 발생 원인을 추정하고 조사방향 결정 •현장조사 안전조치 사항	
기존자료 검토		•천단부 및 측벽부 라이닝 균열 발생 유무, 보수 유무 확인 •조인트부 반원형 균열 발생, 들뜸 및 박락, 누수 유무 확인 •공동구 균열 발생 및 진전 유무 확인 •포장부 균열 발생 및 진전 유무 확인	
NATM구간	천단부 측벽부	•천단부 및 측벽부 라이닝 균열 발생 유무, 보수 유무 확인 •조인트부 반원형 균열 발생, 들뜸 및 박락, 누수 유무 확인	
BOX구간	슬래브 벽체	•균열, 단차, 누수상태 •조인트부 누수 및 손상상태 •박리, 박락 및 변형조사	
기타구간	포장부 공동구 배수시설	•균열, 박리, 파손, 침하 유무 확인 •균열, 박리, 박락 유무 확인 •배수상태 •배수구 덮개 파손 및 망실	

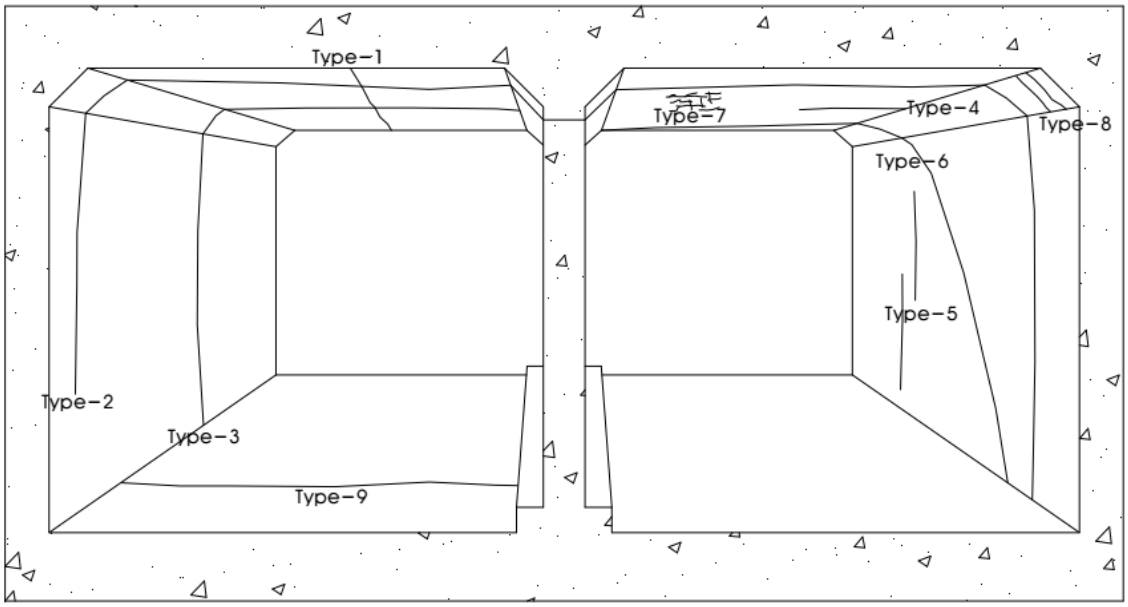
【표 3.1.7】NATM구간 주요 손상현황



NATM구간의 균열발생 현황

구분	손상내용	발생원인
Type-1	- 종방향균열 ▪구조적 균열인 경우 ▪비구조적 균열인 경우	▪이완토압, 지압작용, 지보공 편중침하 ▪건조수축, 횡방향 온도변화
Type-1(a)	- 사방향균열 ▪구조적 균열인 경우 ▪비구조적 균열인 경우	▪부등침하 ▪초기수화열, 건조수축, 온도균열
Type-2	▪횡방향균열	▪종방향구속, 건조수축
Type-3	▪망상균열	▪동결융해 및 화학작용 ▪콘크리트 비비기를 시작하여 타설까지의 시간 과다
Type-4 시공이음부 반원형균열	▪시공이음부 반원형균열	▪거푸집 조기탈영 및 시공이음부 시공 미진 ▪슬럼프가 큰 콘크리트 타설 ▪천장부 라이닝 두께 부족
Type-5	▪누수 및 공동구 하면 누수	▪시공이음 경계부에 방수결함
Type-6	▪타일마감부의 박락	▪시공이음부에 맞닿아 발생
Type-7	▪공동구 측면 파손 및 횡방향 균열	▪종방향 구속
Type-8	▪가로 및 세로수축줄눈부의 줄눈부 박락 및 노면 재료분리	▪시공미흡, 건조수축

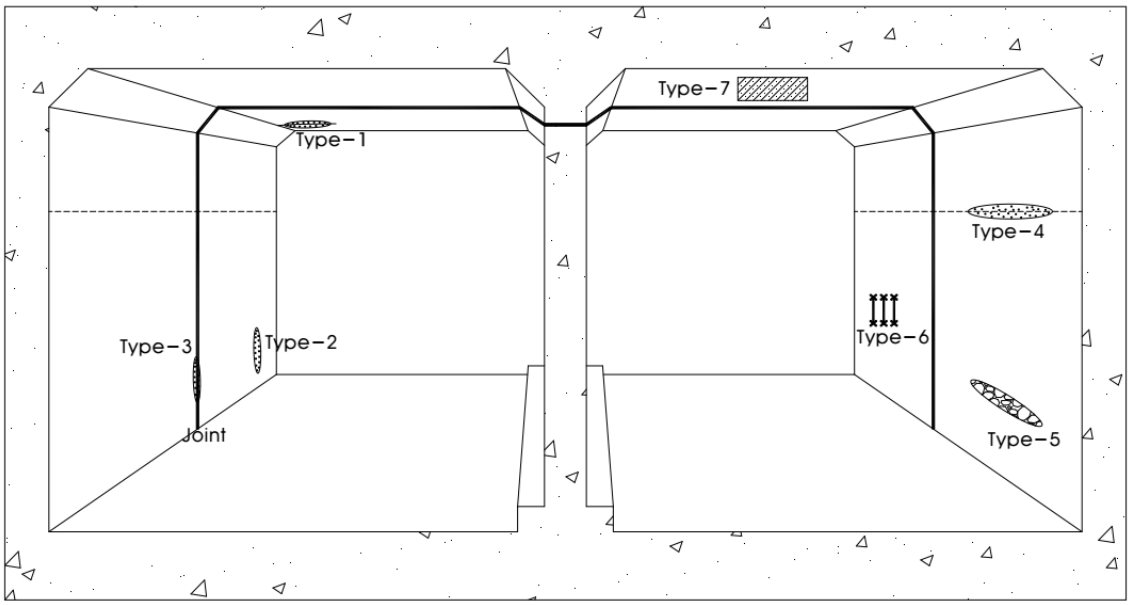
【표 3.1.8】 BOX구간 주요 손상현황(균열)



지하도로(Box Type)의 균열발생 현황

구 분	손상내용	발생원인
Type-1	종방향균열 (슬래브 중앙부 및 헌지부 발생)	• 거푸집 조기 탈형, 초과 가설하중 재하, 인장철근의 절단(절곡)위치 불량, 내하력 저하, 설계하중 이상의 초과하중 재하
Type-2	2련박스 연결 횡방향 균열	• 수화열, 건조수축, 종방향 부등침하
Type-3	1련박스 횡방향 균열	• 수화열, 종방향 부등침하
Type-4	슬래브 횡방향 균열	• 수화열, 건조수축
Type-5	벽체 수직균열	• 수화열, 건조수축
Type-6	벽체-슬래브 연결 사방향균열	• 종방향 부등침하
Type-7	망상균열	• 건조수축, 시공불량
Type-8	헌치부 균열	• 건조수축
Type-9	바닥 횡방향 균열	• 건조수축

【표 3.1.8】 BOX구간 주요 손상현황(단면결함)

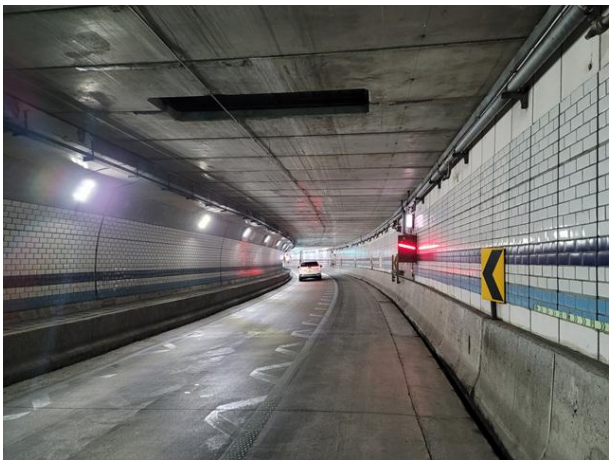
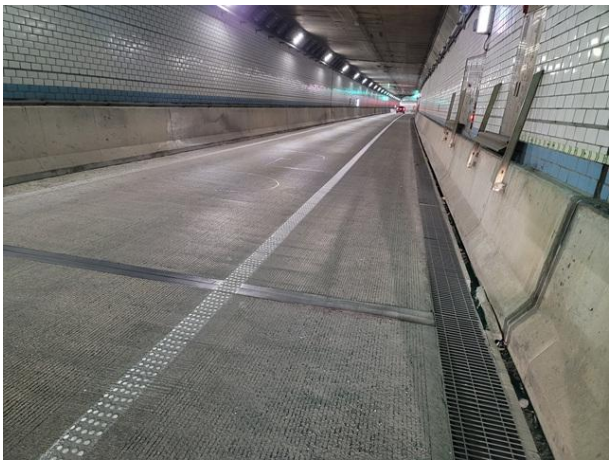


지하도로(Box Type)의 손상현황(단면결함)

구 분	손상내용	발생원인
Type-1	균열부 누수 및 백태	• 관통균열로 인한 지하수 유입
Type-2	구체(단면)을 통한 누수 및 백태	• 단면 내부의 재료분리, 공동 등의 치밀성 부족 결함부를 통한 누수
Type-3	Joint부 누수 및 백태	• Joint부 방수처리 시공 불량, 유도배수관 설치 불량
Type-4	벽체 시공이음부 백태 면상백태	• 시공이음부에 발생된 균열을 통해 누수 • 시공이음부 재료분리부(치밀성부족)를 통한 누수
Type-5	재료분리(표면)	• 시공시 다짐불량
Type-6	철근노출	• 시공시 설계피복두께 미확보
Type-7	보수부 손상 재발생	• 보수 시공 불량
Type-8	기타 손상	• 결로현상, 누수흔적, 철근 녹물흔적, 체수

3.1.3 하중상태 등 조사

본 지하도로에 대한 준공도면과 현재 부재의 상태를 확인한 결과, 대체로 준공도면과 일치하는 것으로 확인되었으며, BOX구간 및 NATM구간에 준공이후 균열보수, 누수보수 등 주기적으로 보수를 실시하였다.

	
NATM구간 천단부 전경	NATM구간 도로부 전경
	
BOX구간 슬래브 전경	BOX구간 도로부 전경

【사진 3.1.2】하중상태 등 조사

3.2 터널 측점분할

금회 긴급점검(정밀안전점검)에서의 측점분할은 아래 표와 같으며, 이 중 충돌 사고 지점인 S45~60 구간을 점검하였다.

【표 3.2.1】측점분할 자료 인천방향 RAMP-D

구분	Sheet	SPAN BOX	철근 무근	거리 (m)	누적거리 (m)	구분	Sheet	SPAN BOX	철근 무근	거리 (m)	누적거리 (m)
NATM 구간	01	S01~S04	무근	27.2	27.2	NATM 구간	13	S38~S41	철근	31.5	356.8
	02	S05~S07	무근	27.2	54.4		14	S42~S44	철근	27.0	383.8
	03	S08~S10	무근	27.3	81.7		15	S45~S47	철근	27.4	411.2
	04	S11~S13	무근	27.3	109.0		16	S48~S50	철근	27.4	438.6
	05	S14~S16	무근	27.3	136.3		17	S51~S54	철근	28.4	467.0
	06	S17~S19	무근	27.4	163.7	종점측 BOX구간	18	S55	철근	40.0	507.0
	07	S20~S22	무근	27.4	191.1		19	S56	철근	40.7	547.7
	08	S23~S25	철근	27.0	218.1		20	S57	철근	40.8	588.5
	09	S26~S28	철근	26.9	245.0		21	S58	철근	40.8	629.3
	10	S29~S31	철근	26.8	271.8		22	S59	철근	30.5	659.8
	11	S32~S34	철근	26.7	298.5		23	S60	철근	14.2	674.0
	12	S35~S37	철근	26.8	325.3		-	-	-	-	-

3.3 현장조사 결과

신월여의지하도로 RAMP-D는 기본시설물인 BOX구간, NATM구간, 풍도슬래브로 시공되어 있다. 공중이 이용하는 부위는 도로포장, 환기구 등의 덮개가 있는 상태이다.

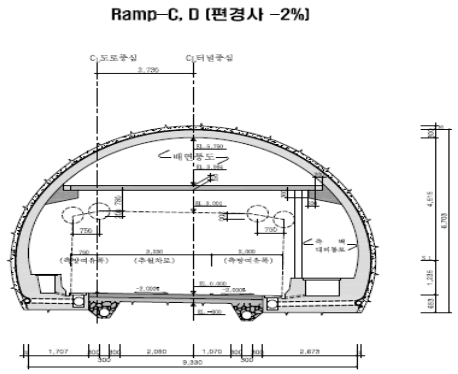
긴급점검으로 실시하는 구간은 S45~S60이고, 해당 구간에 관한 현장조사 결과는 다음과 같다.

3.3.1 신월여의지하도로 RAMP-D

가. NATM구간 천단부(S45~S54)

본 시설물의 라이닝 두께는 300㎜이며, 외관조사시 고소차를 이용해 풍도슬래브 내부에 진입 후 도보를 통한 RAMP-D의 사고 구간인 SPAN 45~54의 점검을 실시하였다. 주요 점검 사항으로는 허용 높이 초과 차량 충돌에 의한 라이닝 균열, 조인트부 박리, 파손, 철근노출 등의 단면손상에 중점을 두고 외관조사를 실시하였다.

NATM구간 천단부 전경

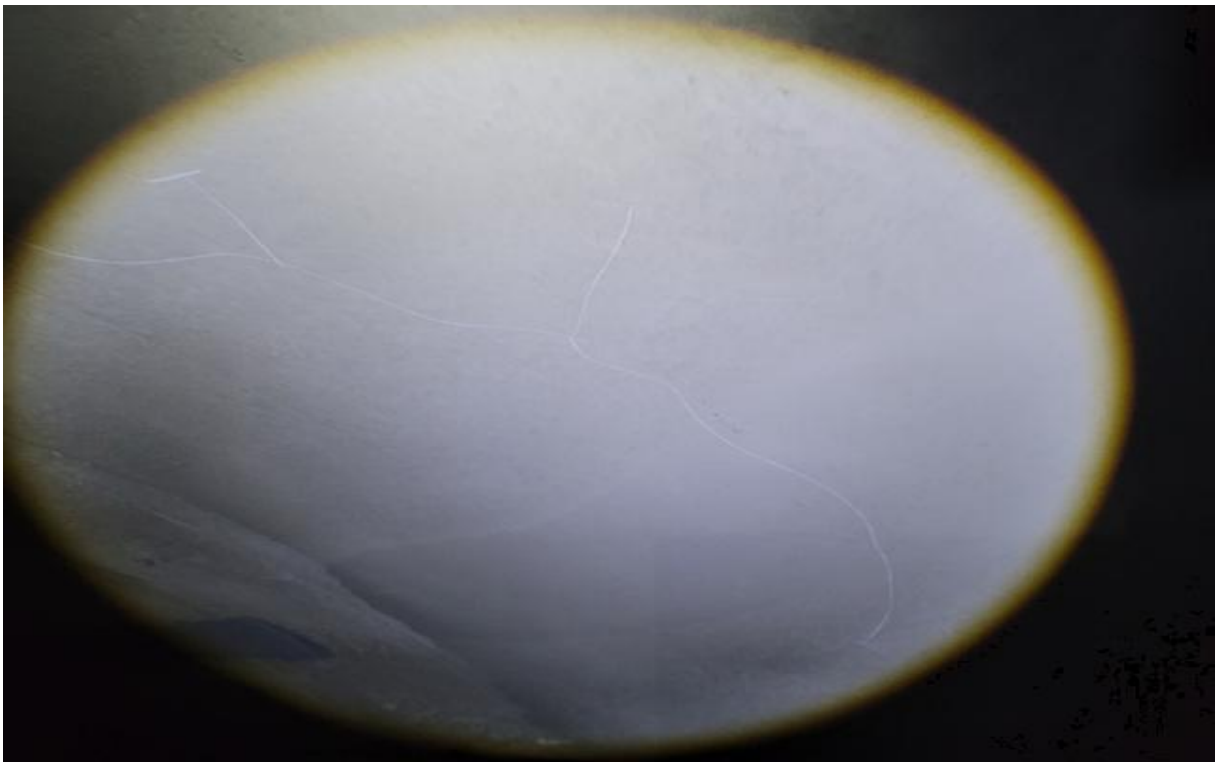


NATM구간 표준횡단면도

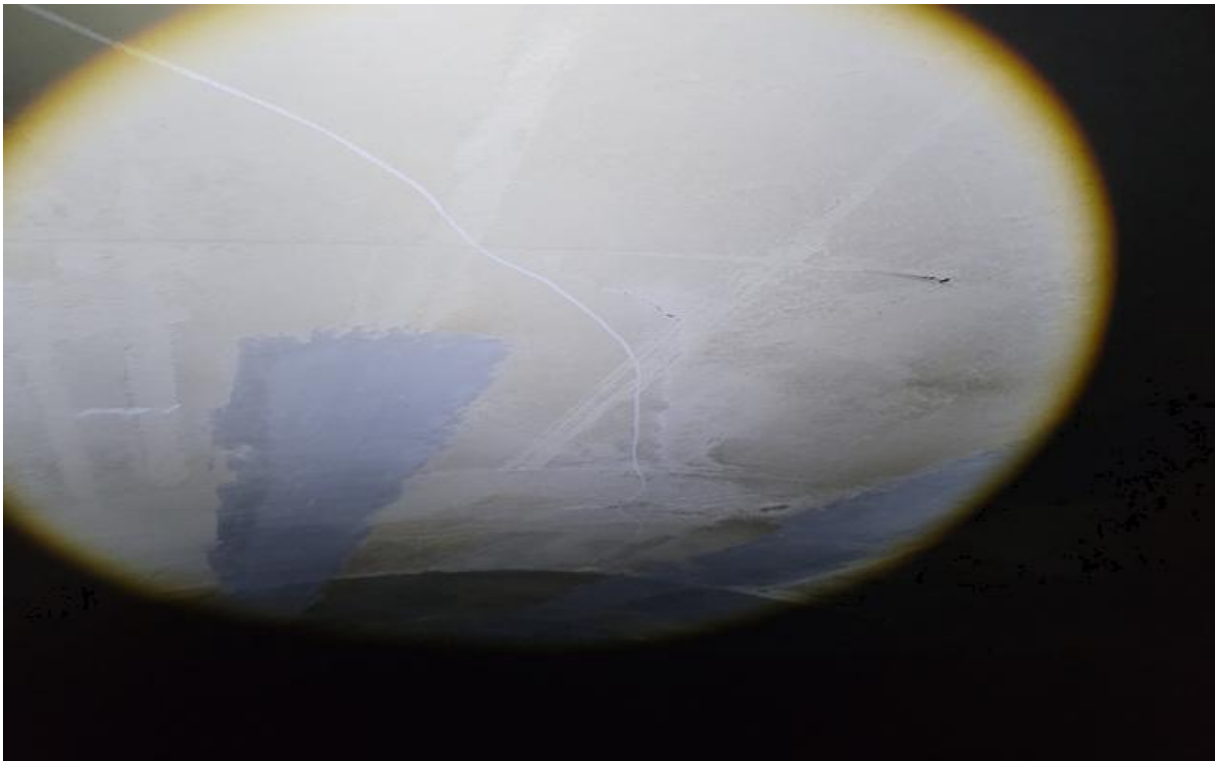
【사진 3.3.1】NATM구간 천단부 전경

1) 조사결과

NATM구간 천단부 외관조사 결과 균열(0.3㎜이상, 0.5㎜이상) 등이 조사되었으며, 기 손상인 균열은 건조수축, 온도변화, 거푸집 조기탈형 등의 원인에 의한 손상이고, 허용 높이 초과 차량의 충돌사고로 신규 균열(0.5㎜이상)이 조사되었다.



NATM구간 천단부 S52 균열(Cw=0.5㎜)



NATM구간 천단부 S51 균열(Cw=0.5㎜)

【사진 3.3.2】NATM구간 천단부 손상현황

NATM구간 천단부 S54 상태양호

NATM구간 천단부 S50 상태양호

【사진 3.3.2】NATM구간 천단부 손상현황(계속)

2) 손상 발생원인 및 대책방안

① NATM구간 천단부에 조사된 균열(0.3㎜이상, 0.5㎜이상)의 경우 건조수축, 온도변화, 거푸집 조기탈형, 차량 충격 등의 원인에 의해 발생된 비구조적 균열로 판단되며, 구조물의 내구성 증진을 위한 균열에 대한 주입보수를 실시하는 유지관리가 요구된다.

【표 3.3.1】NATM구간 천단부 외관조사 손상물량

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	개소	손상물량	조치방안	비고
NATM구간 천단부	균열(0.3㎜이상)	m	1	3.00	주입보수	
	균열(0.5㎜이상)	m	2	13.00	주입보수	

3) 사고 전・후 손상물량 비교

허용 높이 초과 차량 충돌 사고 이후 균열(0.5㎜이상)이 발생하였다.

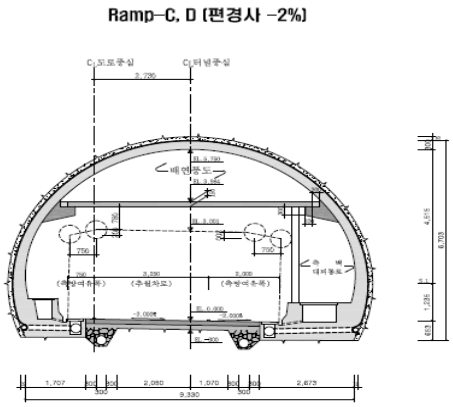
【표 3.3.2】NATM구간 천단부 사고 전・후 손상물량 비교

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	충돌 전 물량	충돌 후 물량	증감	비고
NATM구간 천단부	균열(0.3㎜이상)	m	3.00	3.00	- -	하자
	균열(0.5㎜이상)	m	4.00	13.00	▲ 9.00	차량충돌

나. 풍도슬래브 상면(S45~S54)

본 시설물의 풍도슬래브 두께는 260㎜이며, 외관조사시 고소차를 이용해 풍도슬래브 내부에 진입 후 도보를 통한 RAMP-D의 사고 구간인 SPAN 45~54의 풍도슬래브 상면 점검을 실시하였다. 주요 점검사항으로 허용 높이 초과 차량 충돌에 의한 풍도슬래브 균열, 박리, 파손, 철근노출 등의 단면손상에 중점을 두고 외관조사를 실시하였다.

풍도슬래브 상면 전경



풍도슬래브 표준횡단면도

풍도슬래브 상면 전경

풍도슬래브 상면 전경

【사진 3.3.3】 풍도슬래브 상면 전경

1) 조사결과

풍도슬래브 상면에 대한 외관조사 결과, S52~54에 집중적으로 손상이 확인되었으며 이는 허용 높이 초과 차량의 충돌 사고로 파손, 이음부 몰탈파손, 댐퍼 변형, 볼트탈락 및 파손, 등이 조사되었다.

풍도슬래브 상면 S54 파손

풍도슬래브 상면 S54 파손

【사진 3.3.4】 풍도슬래브 상면 손상현황

풍도슬래브 상면 S54 파손

풍도슬래브 상면 S54 파손

【사진 3.3.4】 풍도슬래브 상면 손상현황(계속)

풍도슬래브 상면 S54 파손

풍도슬래브 상면 S54 파손

【사진 3.3.4】 풍도슬래브 상면 손상현황(계속)

풍도슬래브 상면 S54 파손

풍도슬래브 상면 S54 파손

【사진 3.3.4】 풍도슬래브 상면 손상현황(계속)

풍도슬래브 상면 S54 파손

풍도슬래브 상면 S54 이음부 몰탈파손

【사진 3.3.4】 풍도슬래브 상면 손상현황(계속)

풍도슬래브 상면 S53 이음부 몰탈파손

풍도슬래브 상면 S53 이음부 몰탈파손

【사진 3.3.4】 풍도슬래브 상면 손상현황(계속)

풍도슬래브 상면 S53 댐퍼 변형

풍도슬래브 상면 S53 댐퍼 볼트탈락 및 파손

【사진 3.3.4】 풍도슬래브 상면 손상현황(계속)

풍도슬래브 상면 S53 파손

풍도슬래브 상면 S53 파손

【사진 3.3.4】 풍도슬래브 상면 손상현황(계속)

풍도슬래브 상면 S53 파손

풍도슬래브 상면 S52 이음부 몰탈 파손

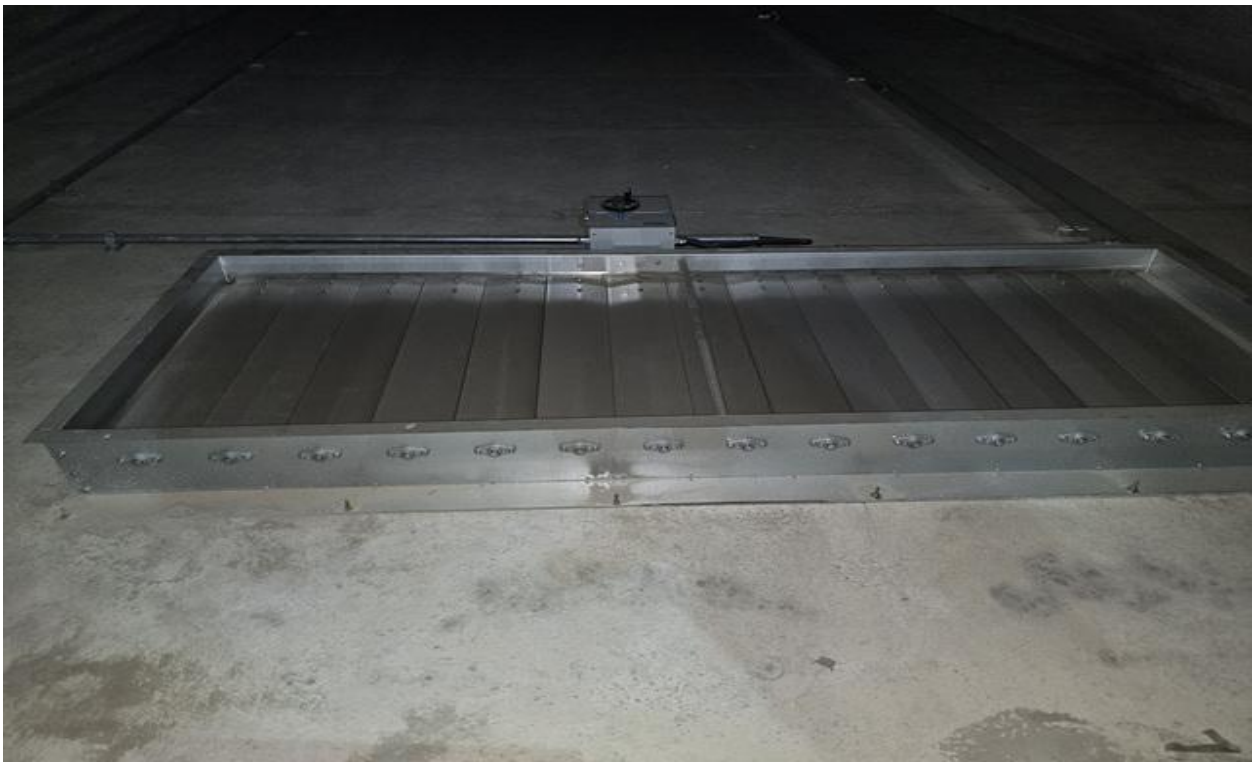
【사진 3.3.4】 풍도슬래브 상면 손상현황(계속)

풍도슬래브 상면 S52 이음부 몰탈 파손

풍도슬래브 상면 S50 상태양호

【사진 3.3.4】 풍도슬래브 상면 손상현황(계속)

풍도슬래브 상면 S48 상태양호



풍도슬래브 상면 S47 댐퍼 상태양호

【사진 3.3.4】 풍도슬래브 상면 손상현황(계속)

2) 손상 발생원인 및 대책방안

① 풍도슬래브 상면에 파손, 이음부 몰탈파손이 조사되었고, 손상은 허용 높이 초과 차량 충돌에 의한 파손으로 판단되며, 콘크리트에 미치는 영향은 적으나 내구성 확보 차원의 단면보수 등의 보수가 요망된다. 또한 추후 재손상 방지를 위해 허용 높이 초과 차량의 출입을 제한하는 시설물의 설치가 필요하다.

② 풍도슬래브 상면 댐퍼에 고정볼트 탈락 및 파손, 상면 댐퍼 변형이 손상 조사되었고, 통과 허용 높이를 초과한 차량 충돌에 의한 파손으로 판단되며, 볼트교체등의 정비가 필요하다. 보수작업시 손상의 정도가 심한 경우 댐퍼 교체가 필요한 것으로 사료된다.

【표 3.3.3】 풍도슬래브 상면 외관조사 손상물량

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	개소	손상물량	조치방안	비고
풍도슬래브 상면	이음부 몰탈파손	㎡	10	6.30	단면보수	
	파손	㎡	14	1.64	단면보수	
	댐퍼 변형	m	1	0.50	정비	
	댐퍼 고정볼트 탈락 및 파손	EA	9	9.00	정비	

3) 사고 전・후 손상물량 비교

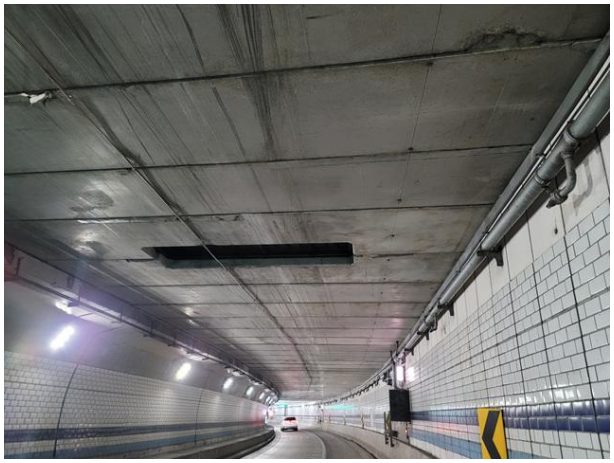
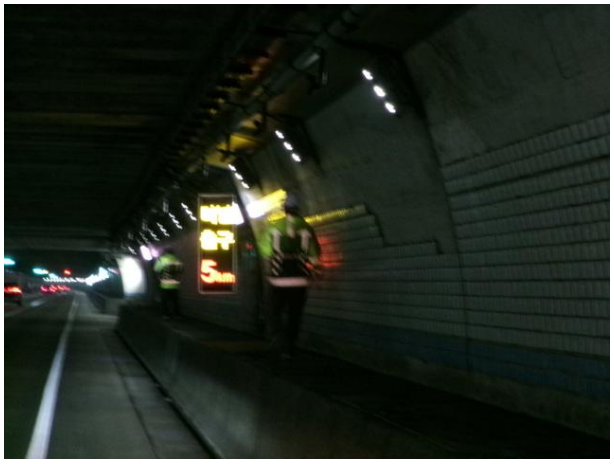
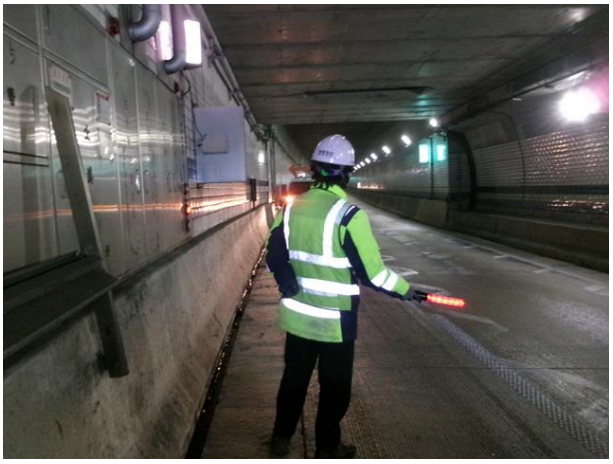
허용 높이 초과 차량 충돌 사고 이후 이음부 몰탈파손, 파손, 댐퍼 변형, 고정볼트 탈락 및 파손 등의 손상이 발생하였다.

【표 3.3.4】 풍도슬래브 상면 사고 전・후 손상물량 비교

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	충돌 전 물량	충돌 후 물량	증감	비고
풍도슬래브 상면	이음부 몰탈파손	㎡	-	6.30	▲ 3.90	차량충돌
	파손	㎡	-	1.64	▲ 1.44	차량충돌
	댐퍼 변형	m	-	0.50	▲ 0.50	차량충돌
	댐퍼 고정볼트 탈락 및 파손	EA	-	9.00	▲ 9.00	차량충돌

다. 풍도슬래브 하면(S45~S54)

본 시설물의 풍도슬래브 두께는 260㎜이며, 외관조사시 갓길 차선 통제 후 RAMP-D의 일부 구간인 SPAN 45~54의 풍도슬래브 하면 도보 및 드론점검을 실시하였다. 주요 점검사항으로 허용 높이 초과 차량 충돌에 의한 풍도슬래브 균열, 박리, 파손, 철근노출 등의 단면손상에 중점을 두고 외관조사를 실시하였다.

	
풍도슬래브 하면 전경	풍도슬래브 하면 전경
	
풍도슬래브 하면 통제 및 점검현황	풍도슬래브 하면 통제 및 점검현황

【사진 3.3.5】 풍도슬래브 하면 전경

1) 조사결과

풍도슬래브 하면에 대한 외관조사 결과, S52~54에 손상이 집중적으로 확인되었으며 이는 허용 높이 초과 차량의 충돌 사고로 파손 등이 조사되었다.

풍도슬래브 하면 S54 파손

풍도슬래브 하면 S54 파손

【사진 3.3.6】 풍도슬래브 하면 손상현황

풍도슬래브 하면 S54 파손

풍도슬래브 하면 S54 보수부 파손

【사진 3.3.6】 풍도슬래브 하면 손상현황(계속)

풍도슬래브 하면 S54 보수부 파손

풍도슬래브 하면 S54 파손

【사진 3.3.6】 풍도슬래브 하면 손상현황(계속)

풍도슬래브 하면 S54 파손

풍도슬래브 하면 S53 파손

【사진 3.3.6】 풍도슬래브 하면 손상현황(계속)

풍도슬래브 하면 S53 파손

풍도슬래브 하면 S53 보수부 파손

【사진 3.3.6】 풍도슬래브 하면 손상현황(계속)

풍도슬래브 하면 S52 상태양호

풍도슬래브 하면 S51 상태양호

【사진 3.3.6】 풍도슬래브 하면 손상현황(계속)

2) 손상 발생원인 및 대책방안

① 풍도슬래브 하면에 파손이 조사되었고, 손상은 통과 허용 높이를 초과한 차량 충돌에 의한 파손으로 판단되며, 구조물의 안전성에 영향은 없으나 손상의 진전으로 인한 콘크리트의 잔여물 낙하시 주행 차량에 피해를 줄 수 있으므로 주행차량의 안전성 확보 차원의 단면보수 등의 조치를 취하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

【표 3.3.5】 풍도슬래브 하면 외관조사 손상물량

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	개소	손상물량	조치방안	비고
풍도슬래브 하면	파손	㎡	13	1.75	단면보수	

3) 사고 전・후 손상물량 비교

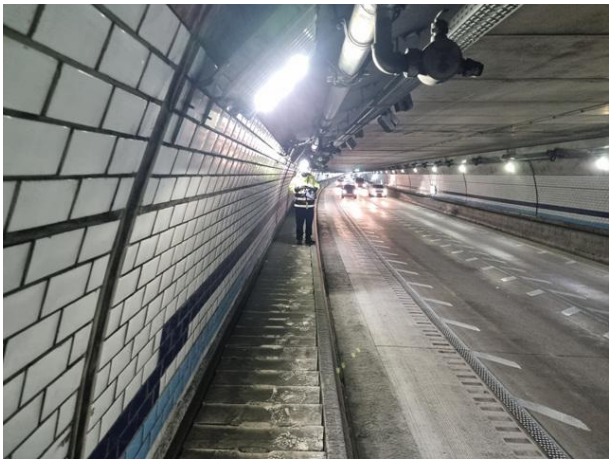
허용 높이 초과 차량 충돌 사고 이후 파손(긁힘), 파손 및 철근노출 등의 손상이 발생하였다.

【표 3.3.6】 풍도슬래브 하면 사고 전・후 손상물량 비교

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	충돌 전 물량	충돌 후 물량	증감	비고
풍도슬래브 하면	파손	㎡	0.12	1.75	▲ 1.63	차량충돌

라. 풍도슬래브 격벽(S54)

본 시설물의 풍도슬래브 격벽은 NATM구간 시점부에 위치하며, 외관조사시 갓길 차선 통제 후 RAMP-D의 사고 구간인 SPAN 54의 풍도슬래브 격벽 도보 및 드론점검을 실시하였다. 주요 점검사항으로 허용 높이 초과 차량 충돌에 의한 풍도슬래브 균열, 박리, 파손, 철근노출 등의 단면손상에 중점을 두고 외관조사를 실시하였다.

풍도슬래브 격벽 전경(2026년 상반기 긴급점검)	풍도슬래브 격벽 전경(2025년 상반기 정밀안전점검)
	
풍도슬래브 격벽 전경(2026년 상반기 긴급점검)	풍도슬래브 격벽 통제 및 점검현황

【사진 3.3.7】 풍도슬래브 격벽 전경

1) 조사결과

풍도슬래브 격벽에 대한 외관조사 결과 허용 높이 초과 차량의 충돌 사고로 격벽에 국부적인 파손이 조사되었다.

풍도슬래브 격벽 S54 파손

풍도슬래브 격벽 S54 파손

【사진 3.3.8】 풍도슬래브 격벽 손상현황

풍도슬래브 격벽 S54 파손

풍도슬래브 격벽 S54 파손

【사진 3.3.8】 풍도슬래브 격벽 손상현황(계속)

2) 손상 발생원인 및 대책방안

① 풍도슬래브 격벽에 파손이 조사되었고, 손상은 통과 허용 높이를 초과한 차량 충돌에 의한 파손으로 판단되며, 구조물의 안전성에 영향은 없으나 손상의 진전으로 인한 콘크리트의 잔여물 낙하시 주행 차량에 피해를 줄 수 있으므로 주행차량의 안전성 확보 차원의 단면보수 등의 조치를 취하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

【표 3.3.7】 풍도슬래브 격벽 외관조사 손상물량

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	개소	손상물량	조치방안	비고
풍도슬래브 격벽	격벽 파손	㎡	1	0.36	단면보수	

3) 사고 전・후 손상물량 비교

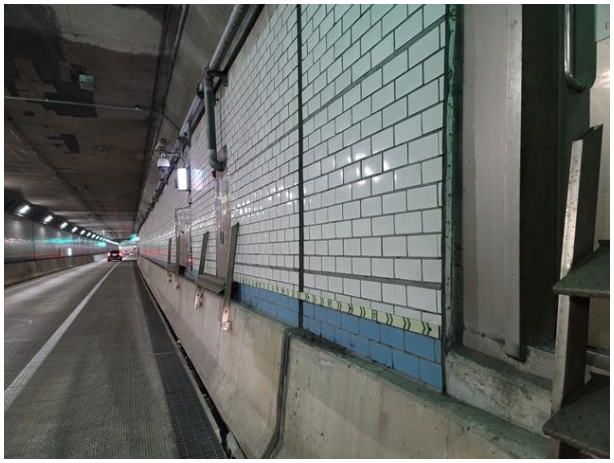
허용 높이 초과 차량 충돌 사고 이후 파손 및 철근노출 등의 손상이 발생하였다.

【표 3.3.8】 풍도슬래브 격벽 사고 전・후 손상물량 비교

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	충돌 전 물량	충돌 후 물량	증감	비고
풍도슬래브 격벽	격벽 파손	㎡	-	0.36	▲ 0.36	차량충돌

마. NATM구간 측벽부(S45~S54)

본 시설물의 NATM구간 측벽부는 미관을 고려한 타일로 표면을 마감하였으며, 측벽부 외관조사시 충돌 사고의 영향에 의한 라이닝 측벽부 타일손상, 콘크리트 파손 등에 중점을 두고 외관조사를 실시하였다.

NATM구간 측벽부 전경	NATM구간 측벽부 내부벽체 전경
	
NATM구간 측벽부 전경	NATM구간 측벽부 내부벽체 전경

【사진 3.3.9】NATM구간 측벽부 전경

1) 조사결과

NATM구간 측벽부에 대한 외관조사 결과 파손, 박리, 백태, 타일탈락, 균열 및 누수(스며있음) 등이 조사되었고, 허용 높이 초과 차량에 의한 손상이 아닌 우수유입, 수분침투, 시공미흡 등에 의한 손상으로 판단된다.

NATM구간 측벽부 S52 내부벽체 백태

NATM구간 측벽부 S50 타일탈락

【사진 3.3.10】NATM구간 측벽부 손상현황

NATM구간 측벽부 S49 파손

NATM구간 측벽부 S47 내부벽체 파손

【사진 3.3.10】NATM구간 측벽부 손상현황(계속)

NATM구간 측벽부 S47 내부벽체 백태

NATM구간 측벽부 S47 내부벽체 백태

【사진 3.3.10】NATM구간 측벽부 손상현황(계속)

NATM구간 측벽부 S47 박리

NATM구간 측벽부 S46 타일탈락

【사진 3.3.10】NATM구간 측벽부 손상현황(계속)

NATM구간 측벽부 S46 내부벽체 균열 및 누수(스며있음)

NATM구간 측벽부 S45 타일탈락

【사진 3.3.10】NATM구간 측벽부 손상현황(계속)

2) 손상 발생원인 및 대책방안

① 측벽부에 국부적인 백태, 균열 및 누수가 조사되었고, 우수유입, 수분침투 등의 원인에 의해 발생한 손상으로 판단되며, 구조적인 손상은 아니나 내구성 확보 차원의 표면처리, 주입보수를 실시하는 것이 바람직하고, 우천시 손상의 진전 여부에 대한 주의관찰을 실시하는 것이 요구된다.

② 측벽 타일부에 타일탈락이 조사되었고 시공미흡, 부착강도 저하 등의 원인에 의해 발생한 손상으로 판단되며, 손상부는 사용성 확보 차원의 타일교체 보수를 실시하는 것이 바람직하다.

③ 측벽부 콘크리트 파손, 박리가 일부 확인되었고, 시공이음부(조인트부) 맞닿음, 거푸집탈거시 충격 등의 원인에 의해 발생된 손상으로 차량 충돌 등에 의한 손상은 아닌 것으로 판단되며, 그 정도가 심하지 않아 콘크리트에 미치는 영향은 적으나, 내구성 확보 차원의 단면보수를 실시하는 것이 바람직하다.

【표 3.3.9】 NATM구간 측벽부 외관조사 손상물량

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	개소	손상물량	조치방안	비고
NATM구간 측벽부	타일탈락	㎡	9	18.00	정비	
	박리	㎡	1	0.10	단면보수	
	파손	㎡	3	0.50	단면보수	
	백태	㎡	4	1.59	표면처리	
	균열 및 누수(스며있음)	m	1	0.50	주입보수	

3) 사고 전・후 손상물량 비교

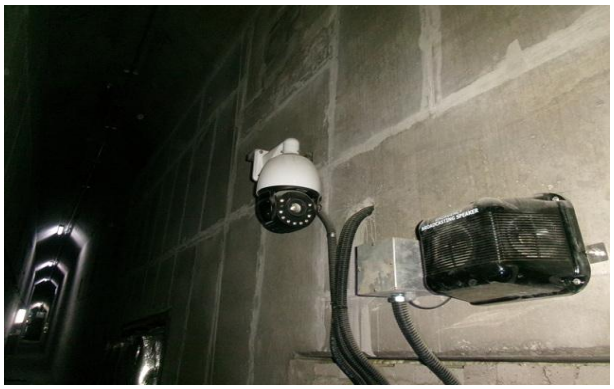
허용 높이 초과 차량 충돌 사고 이후 추가 손상은 없는 것으로 조사되었다.

【표 3.3.10】 NATM구간 측벽부 사고 전・후 손상물량 비교

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	충돌 전 물량	충돌 후 물량	증감	비고
NATM구간 측벽부	타일탈락	㎡	18.00	18.00	- -	하자
	박리	㎡	0.10	0.10	- -	하자
	파손	㎡	0.50	0.50	- -	하자
	백태	㎡	1.59	1.59	- -	하자
	균열 및 누수(스며있음)	m	0.50	0.50	- -	하자

바. 부대시설(S45~S60)

신월여의지하도로는 사고 발생시 안전 대피 및 비상연락이 가능토록 표시등, 소화시설, 제트팬 등이 설치되어 있고, 안전운전을 위해 조명시설, 배수시설이 설치되어 있는 것으로 조사되었고, 허용 높이 초과 차량 충돌에 의한 부대시설물 파손에 중점을 두고 외관조사를 실시하였다.

제트팬 전경	조명시설 전경
소화시설 전경	배수시설 전경
	
CCTV 전경	신호기 전경

【사진 3.3.11】부대시설 전경

1) 조사결과

부대시설에 대한 외관조사 결과 허용 높이 초과 차량의 충돌 사고 후 부대시설에 손상의 영향은 없는 것으로 조사되었고 유도배수관 길이 부족의 경우 시공 미흡에 의한 손상으로 판단된다.

부대시설 S57 유도배수관 길이부족

부대시설 S56 제트펜 볼트 상태양호

【사진 3.3.12】 부대시설 손상현황

부대시설 S57 비상구 표지판 상태양호

부대시설 S59 신호기 상태양호

【사진 3.3.12】 부대시설 손상현황(계속)

2) 손상 발생원인 및 대책방안

① 유도배수관 길이부족의 경우 시공 미흡에 의한 손상으로, 하면에 체수가 발생하고 있어 철근콘크리트에 영향을 미치므로 재설치 등의 정비를 실시하는 것이 바람직하다.

【표 3.3.11】 부대시설 외관조사 손상물량

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	개소	손상물량	조치방안	비고
부대시설	유도배수관 길이부족	m	1	1.50	정비	

3) 사고 전・후 손상물량 비교

허용 높이 초과 차량 충돌 사고 이후 추가 손상은 없는 것으로 조사되었다.

【표 3.3.12】 부대시설 사고 전・후 손상물량 비교

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	충돌 전 물량	충돌 후 물량	증감	비고
부대시설	유도배수관 길이부족	m	1.50	1.50	- -	하자

3.3.2 외관조사 결과

신월여의지하도로 RAMP-D S45~S60에 대한 외관조사 결과는 다음과 같다.

【표 3.3.13】 외관조사 결과

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	개소	손상물량	조치방안	비고
NATM구간 천단부	균열(0.3㎜이상)	m	1	3.00	주입보수	
	균열(0.5㎜이상)	m	2	13.00	주입보수	
풍도슬래브 상면	이음부 몰탈파손	㎡	10	6.30	단면보수	
	파손	㎡	14	1.64	단면보수	
	댐퍼 변형	m	1	0.50	정비	
	댐퍼 고정볼트 탈락 및 파손	EA	9	9.00	정비	
풍도슬래브 하면	파손	㎡	13	1.75	단면보수	
풍도슬래브 격벽	격벽 파손	㎡	1	0.36	단면보수	
NATM구간 측벽부	타일탈락	㎡	9	18.00	정비	
	박리	㎡	1	0.10	단면보수	
	파손	㎡	3	0.50	단면보수	
	백태	㎡	4	1.59	표면처리	
	균열 및 누수(스며있음)	m	1	0.50	주입보수	
부대시설	유도배수관 길이부족	m	1	1.50	정비	

3.3.3 사고 전·후 손상물량 비교 결과

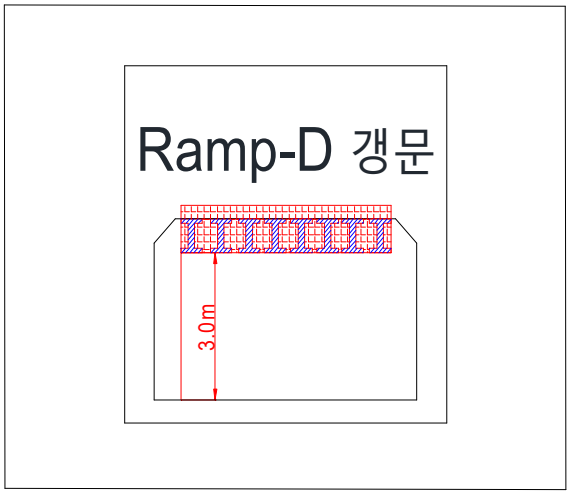
신월여의지하도로 RAMP-D S45~S60에 발생한 사고 전·후 손상물량 비교는 다음과 같다.

【표 3.3.14】 사고 전·후 손상물량 비교

구 분	결함내용 및 손상, 열화내용	단위	충돌 전 물량	충돌 후 물량	증감		비고
NATM구간 천단부	균열(0.3㎜이상)	m	3.00	3.00	-	-	하자
	균열(0.5㎜이상)	m	4.00	13.00	▲	9.00	차량충돌
풍도슬래브 상면	이음부 몰탈파손	㎡	-	6.30	▲	3.90	차량충돌
	파손	㎡	-	1.64	▲	1.44	차량충돌
	댐퍼 변형	m	-	0.50	▲	0.50	차량충돌
	댐퍼 고정볼트 탈락 및 파손	EA	-	9.00	▲	9.00	차량충돌
풍도슬래브 하면	파손(긁힘)	㎡	0.12	1.75	▲	1.63	차량충돌
풍도슬래브 격벽	격벽 파손	㎡	-	0.36	▲	0.36	차량충돌
NATM구간 측벽부	타일탈락	㎡	18.00	18.00	-	-	하자
	박리	㎡	0.10	0.10	-	-	하자
	파손	㎡	0.50	0.50	-	-	하자
	백태	㎡	1.59	1.59	-	-	하자
	균열 및 누수(스며있음)	m	0.50	0.50	-	-	하자
부대시설	유도배수관 길이부족	m	1.50	1.50	-	-	하자

3.3.4 차량 충돌에 의해 발생한 손상 대책

차량 충돌 사고로 인한 손상에 관하여 추후 재손상 방지를 위해 높이제한 위반차량의 출입을 제한하는 시설물의 설치가 필요하다.

구 분	세 부 내 용	
보수 예시		
	차량 높이 제한시설 보수예시	차량 높이 제한시설 보수예시
보수 예시		
	차량 높이 제한시설 보수 예상도	차량 높이 제한시설 보수 예상도
조사 결과	· 허용 높이 초과 차량의 진입 예방 ⇒ 허용 높이 초과 차량의 진입으로 인한 충돌 파손 등 내구성 저하 및 주행차량 안전성저하 등이 발생될 우려가 있으므로 이를 예방하기 위하여 H빔을 사용한 진입제한시설을 설치하고 유지관리가 요망된다.	

3.4 내구성 시험 및 측정 개요

3.4.1 콘크리트 내구성 조사

콘크리트 내구성조사는 구조물에 열화손상이 이미 현저하게 진행되었을 경우 열화의 정도 및 그 원인 관계를 조사하고 보수·보강 여부를 판정하며, 아직 열화손상이 없거나 경미한 구조물은 내구성조사에 의해서 향후 열화 경향을 예측하고 예방보전을 검토하기 위한 자료를 수집하는 것을 목적으로 한다.

본 내구성조사는 허용 높이 초과 차량에 의한 풍도슬래브 충돌 사고의 영향으로 발생한 내구성 변화를 조사하고 기능 및 성능 저하의 정도를 파악하기 위하여 실시하였다.

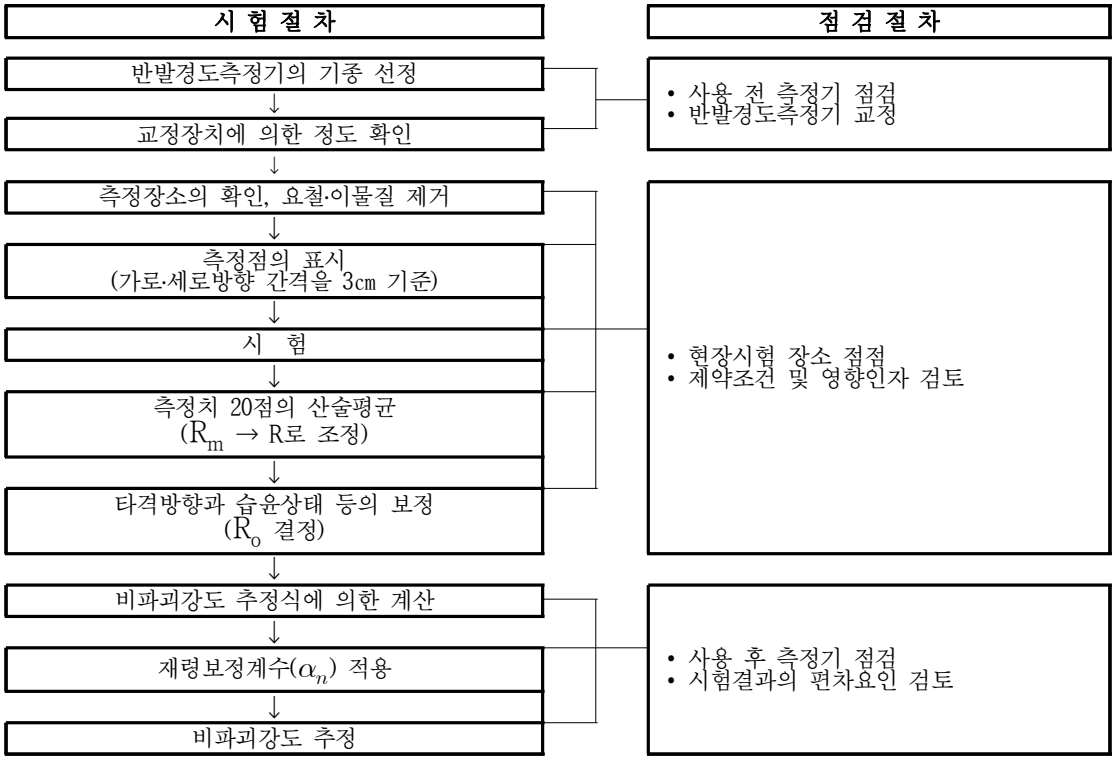
3.4.2 시험내용 및 평가기준

가. 콘크리트 강도시험

1) 반발경도시험

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, 반발경도(R)와 콘크리트의 압축강도(F_c)와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다.

① 반발경도시험 및 측정기 점검 등의 절차



【그림 3.4.1】 반발경도시험 및 측정기 점검 등의 절차

외관조사 결과에 의해 결정된 측정개소에 대해서 타격점 상호간의 간격은 3㎝를 표준으로 종으로 5열, 횡으로 4열의 선을 그어 직교되는 20점을 타격하여 반발경도 값의 산술평균값(R_m)을 구한다. 산술평균값(R_m)에 대해서는 릴렘(RILEM) 규정에 따라 각 반발경도의 값이 $R_m \pm 20\%$의 범위를 벗어나는 값들은 제외시키고 나머지 값들을 다시 산술평균하여 반발경도 R을 결정한다.

② 보정반발경도(R_o)

【표 3.4.1】 보정반발경도(Ro)

◈ 보정반발경도 : $R_o = R + \Delta R_1 + \Delta R_2$

여기서, R : 반발경도

ΔR_1 : 타격방향에 따른 보정값

ΔR_2 : 콘크리트의 습윤상태에 따른 보정값

㉠ 타격방향에 따른 보정값(ΔR_1)

- 수평방향의 타격에 의한 측정치가 안정된 값을 나타내지만 타격방향이 다른 경우에는 반발치를 보정해 주어야 함

⇒ 하향 타격(-90°)의 경우 : (+)값으로 보정

상향 타격(+90°)의 경우 : (-)값으로 보정

α / R	보 정 값			
	+90°	+45°	-45°	-90°
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	-2.6	+2.0	+2.7
50	-3.1	-2.1	+1.5	+2.2
60	-2.2	-1.6	+1.3	+1.7

㉡ 콘크리트의 습윤상태에 따른 보정값(ΔR_2)

- 콘크리트는 함수율이 증가함에 따라 반발경도가 저하됨

⇒ 측정위치가 습하고 타격의 흔적이 보이는 경우 : ΔR_2 = +3으로 보정

측정위치가 완전히 젖어 있는 경우 : ΔR_2 = +5로 보정

③ 압축강도의 추정

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

【표 3.4.2】 기존의 비파괴강도 추정 제안식(반발경도시험)

구 분	추 정 식(㎫)	비 고
일본재료학회	$F_c = -18.0 + 1.27R_o$	금회 적용(식①)
일본건축학회	$F_c = (7.3R_o + 100) \times 0.098$	금회 적용(식②)
과학기술부	$F_c = (-112.8 \times 15.2 + R_o) \div 10$	금회 적용(식③)
시설공단제안식	$F_c = 2.304 \times R_o - 38.80$	금회 적용(식④)
※ 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(2026. 01, 국토교통부/국토안전관리원)		

④ 28일 강도의 추정

시일이 경과할수록 콘크리트 구조물은 표면경도가 높아지므로 아래 식과 같이 재령 28일 강도(F_{28}')로 환산하여 압축강도를 추정한다. 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 보정계수 α는 아래【표 3.4.3】와 같으며, 2021년 08월 31일 준공이후, 800일 이상의 재령에 대해서는 0.66을 적용하였다.

$$F_{28}' = \alpha \cdot F_c$$

【표 3.4.3】 재령계수 α값

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

나. 철근탐사시험

1) 개 요

본 시험은 전자파레이더를 이용한 철근탐사 시험기(RC Radar)를 활용하여 철근콘크리트 구조물에 배근된 철근간격, 콘크리트 피복을 측정하기 위해 실시한다.

철근콘크리트 구조물의 부재 내부에 배근되어 있는 철근의 피복두께가 지나치게 작은 경우에는 콘크리트의 탄산화 등에 따른 열화손상에 대한 저항성이 저하되어 내구성이 감소할 가능성이 있으며, 피복두께가 지나치게 큰 경우에는 강도감소 등을 수반할 우려가 있으므로 철근탐사는 설계 당시와 같이 콘크리트 내에 배근되어 있는 철근의 배근상태 및 피복두께를 파악하기 위하여 실시한다. 금회, 정밀안전점검에서는 탄산화깊이 측정을 위한 피복두께측정을 위해 철근탐사를 실시하였다.

2) 측정원리

전자파레이더의 원리는 현재 널리 사용되고 있는 레이더와 동일하다. 즉, 콘크리트용 전자파레이더는 임펄스 상의 전자파를 송신안테나로부터 콘크리트 내로 방사하면 그 전자파가 콘크리트와 전기적 성질(비유전율, 도전율)이 다른 물체(철근, 매설관, 공동 등)와의 경계에서 반사한다. 이를 수신안테나로 수신하고, 그에 소요되는 왕복전파시간으로부터 반사물체까지의 거리를 계산하면 그 위치를 구할 수 있다. 원리를 아래【그림 3.4.2】에 나타내었고, 콘크리트 중의 전자파 속도는 다음 식과 같다.

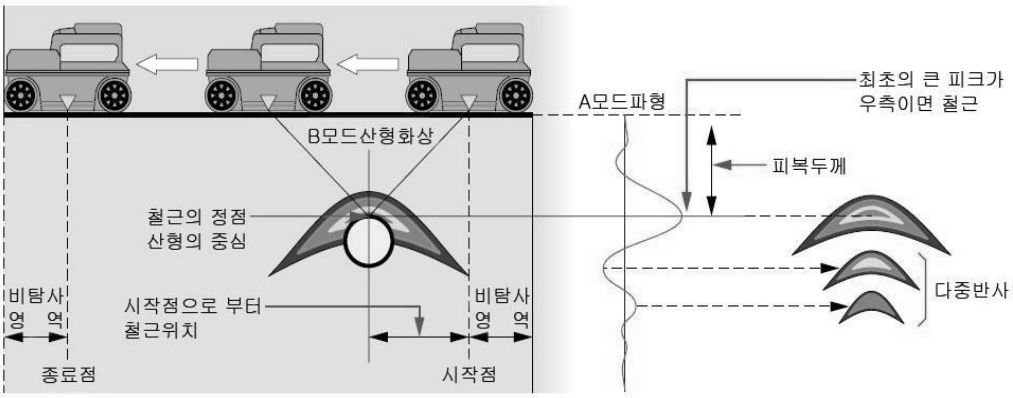
$$V = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (m/sec)$$

여기서, C : 진공 중에서 전자파의 속도(3×10^8 m/sec)

ε_r : 콘크리트의 상대유전율(6~10)

또한, 반사물체까지의 거리(D)는 송신 시각으로부터 수신 시각까지의 시간차(T)의 측정치와 콘크리트 내부의 전파속도(V)로부터 구할 수 있다.

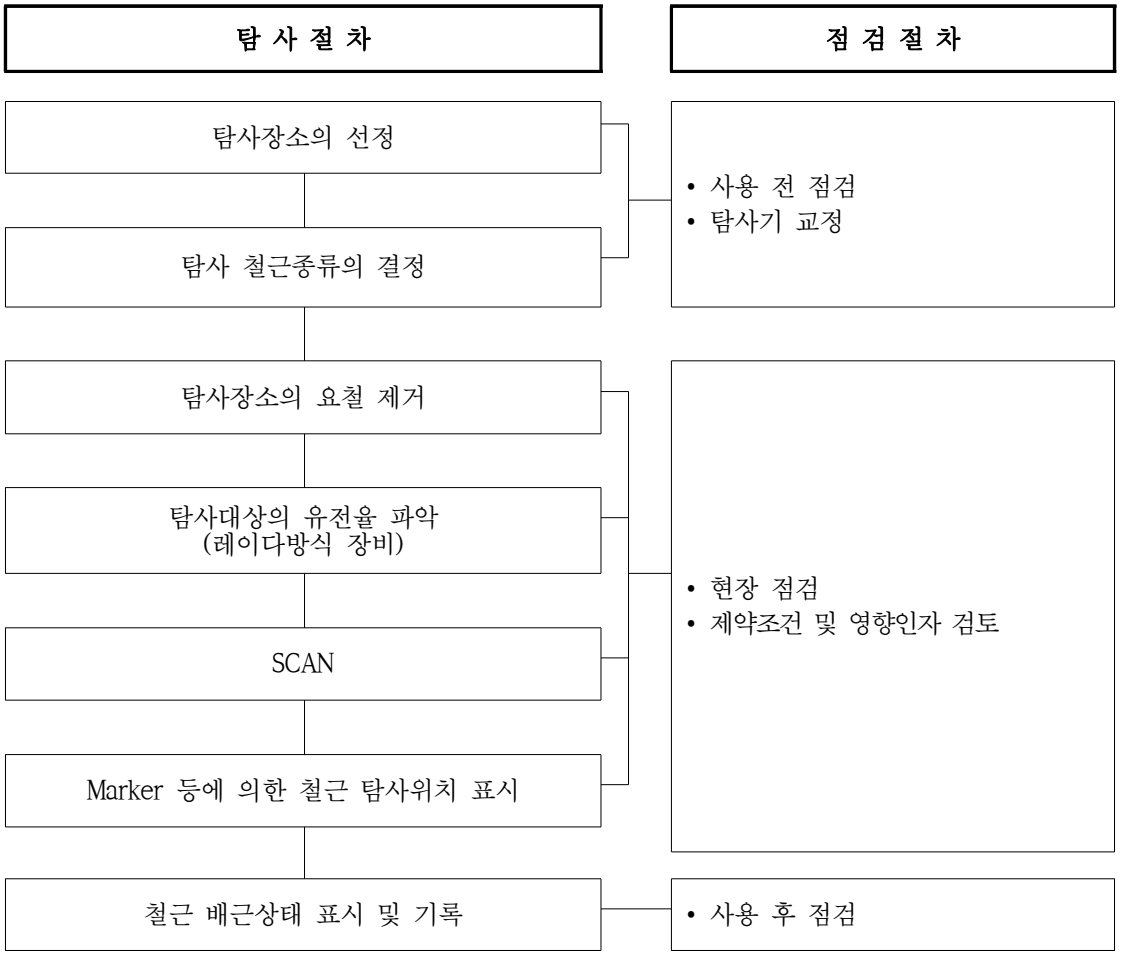
$$D = \frac{1}{2} V T \quad (m)$$



【그림 3.4.2】 철근탐사 측정원리

3) 철근탐사시험 및 장비 점검 등의 절차

철근탐사시험 방법에 대한 절차는 KS F 2734 및 KS F 2735의 규정에 준한다.



【그림 3.4.3】 철근탐사시험 및 장비 점검 등의 절차

4) 탐사조건 및 적용한계(RC Radar의 경우)

① 탐사조건

- 적용 가능한 조건
  - 탐사심도 200㎜이내
  - 탐사대상 철근지름이 ø6㎜이상
  - 콘크리트의 질이 균일한 곳
  - 철근이 안테나 진행방향과 직교인 경우
- 적용 곤란한 조건
  - 표면에 금속 등 전파를 반사하는 것이 있고, 그 밑의 철근 등을 탐사하는 경우
  - 100㎜이하의 피치로 배근되어 있는 경우
  - 철근이 안테나의 진행방향과 평행인 경우

② 적용한계

- 탐사대상 물체의 표면에 금속 등 전파를 반사하는 것이 있고, 그 밑의 철근 등을 탐사하는 경우
- 철근이 안테나의 진행방향과 평행인 경우
- 비유전율에 따라 피복두께의 차이가 있으므로 탐사 대상물의 비유전율을 추정하기 어려움
- 철근직경과 복철근 및 경사철근의 판독 불가능
- 탐사대상 표면에 요철이 많은 장소는 탐사결과의 신뢰성 저하
- 안테나의 사용으로 좁고, 짧은 위치의 탐사 불편

다. 탄산화깊이 측정

1) 개 요

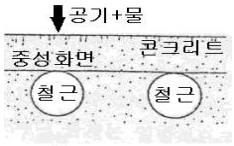
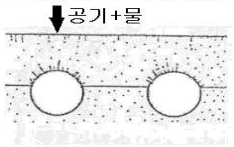
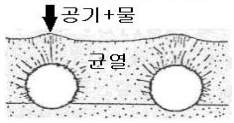
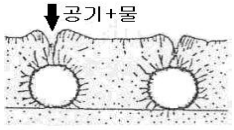
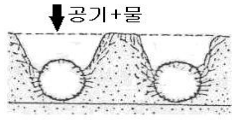
탄산화란 콘크리트의 탄산화(Carbonation) 과정에서 나타나는 현상으로 탄산화에 의해서 문제가 발생되는 것은 콘크리트 자체에서 생기는 것이 아니고, 콘크리트 중의 철근에 녹이 발생함으로써 문제를 일으키는 것이다.

$$\underset{\text{수산화칼슘}}{Ca(OH)_2} + \underset{\text{탄산가스}}{CO_2} \rightarrow \underset{\text{탄산칼슘}}{CaCo_3} + \underset{\text{물}}{H_2O}$$

(pH 12~13) (대기 중에 존재) (pH 8.5~10)

탄산화가 일어나는 메카니즘을 보면 시멘트의 수화반응에서 생성되는 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)은 pH 12~13정도의 강알칼리성을 나타내지만 대기 중에 포함되어 있는 약산성의 탄산가스(약 0.03%)와 접촉하면 탄산칼슘과 물로 변화하고 탄산칼슘으로 변화한 부분의 pH

가 8.5~10 정도로 낮아지게 된다. 따라서, 콘크리트의 탄산화는 일반환경 하에서도 확실하게 진행되기 때문에 매입된 철근의 부식에 따른 문제가 가장 기본적이며 중요하다. 콘크리트 내부의 pH가 11이상에서 철근은 표면에 1×10^{-6}㎜ 두께의 수산화물($\gamma-Fe_2O_3\cdot nH_2O$) 부동태막을 형성하므로 산소 침입을 막아 철근의 부식을 방지하지만 탄산화에 의하여 pH가 11보다 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 구조물의 내구성면에서 탄산화를 파악하는 것이 중성하다.

	STEP 1 • 정상, 재료 및 강도상의 변화는 거의 없음 (약간의 건조수축에 의한 균열)
	STEP 2 • 녹의 발생에 의한 팽창압이 콘크리트 내부에 발생하여 미세한 균열이 발생
	STEP 3 • 철근의 윗면이 팽창함 • 균열이 표면까지 연장되어 공기와 수분의 침입이 격화되어 동해 등의 다른 열화도 유발시키며 녹물이 보임
	STEP 4 • 철근 윗면의 피복이 떨어지고, 철근의 노출이 시작됨 • 철근단면적이 감소함
	STEP 5 • 철근 윗면이 거의 없어지고 철근은 공기 중에 직접 노출됨 • 내구성능은 없음

【그림 3.4.4】 탄산화에 의한 콘크리트 성능저하

2) 탄산화 속도에 영향을 미치는 요인

탄산화 속도에 영향을 미치는 요인으로는 환경조건(대기 중의 탄산가스 농도, 온도, 습도, 마감재 등)을 주원인으로 하는 외적요인 및 콘크리트 자체의 성능·품질(함수율, 강도, 시멘트의 종류, 배합조건, 시공조건 등)을 주원인으로 하는 내적요인에 의해 복합적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 대표적인 원인을 정리하면 다음과 같다.

【표 3.4.4】 탄산화 속도에 영향을 미치는 요인

구분	영향인자	탄산화 속도
내적 요인 내적 요인	시멘트의 종류	• 수화반응이 느릴수록 탄산화 속도가 빠름 • 조강 포틀랜드시멘트 < 보통 포틀랜드시멘트 < 중용열 포틀랜드시멘트
	골재의 종류	• 투기성이 큰 골재일수록 탄산화 속도가 빠름
	계면활성제 종류	• 동일 물-시멘트비, 동일 슬럼프라면 탄산화 속도와 무관함
	압축강도	• 압축강도가 낮을수록 탄산화 속도가 빠름
	물-시멘트비	• 물-시멘트비가 증가하면 탄산화 속도가 빠름
	시공 정밀도	• 다짐이 불충분할수록 탄산화 속도가 빠름
	콘크리트 결함부	• 균열부위, 이음부, 손상면위 등에서 탄산화 속도가 빠름
외적 요인	온도	• 온도 상승시 탄산화 속도가 빠름 • 20~50 ° C 사이에서는 영향이 크지 않음
	이산화탄소 농도	• 농도가 클수록 탄산화 속도가 빠름 • 탄산가스 농도 3~10% 사이에서 상승비율이 큼
	습도	• 상대습도 50~70% 에서 탄산화 속도가 최대
	실내, 실외	• 실내의 탄산화 속도가 빠름

3) 탄산화깊이의 측정

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

콘크리트 파단면에 1% 페놀프탈레인 용액을 도포한 후 색의 변화를 관찰하는 방법으로 강알칼리성일수록 짙은 보라색을 띠며 pH 9이하에서는 무색을 나타낸다. 탄산화 진행 깊이의 측정은 콘크리트 표면에서 발색점까지의 깊이를 버니어캘리퍼스 등으로 측정한다.

4) 탄산화를 고려한 잔존수명 예측

탄산화 속도는 경과시간(t)의 평방근에 비례하여 진행한다고 하는 $\sqrt{t}$법으로 표현된다. 탄산화(C)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, C : 탄산화깊이(㎜)

A : 탄산화 속도계수(㎜/ $\sqrt{년}$)

t : 재령(년)

여기서 구해진 탄산화 속도계수(A)를 실제 탄산화깊이와 경과년수를 이용하여 역추적으로 구한 후 탄산화가 철근에 도달하는 시간을 계산하면 콘크리트의 탄산화에 의한 잔존수명을 예측할 수 있다.

수명예측(년) = (철근피복 / 탄산화 속도계수)^2

잔존수명예측(년) = 수명예측년수 - 경과년수

5) 평가기준

탄산화 상태평가 기준은 다음과 같다.

【표 3.4.5】 탄산화 상태평가 기준

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

3.5 내구성 조사 결과

본 과업의 내구성조사는 『시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(2026. 01, 국토교통부/국토안전관리원)』에 근거하여 시험방법, 시험빈도 및 평가방법 등을 실시하였으며, 콘크리트 내구성조사를 위해 콘크리트 강도시험(반발경도시험), 철근탐사시험, 탄산화깊이 측정 등을 실시하였으며, 각 부재별 콘크리트 비파괴시험 현황은 다음과 같다.

【표 3.5.1】 신월여의지하도로 RAMP-D 콘크리트 비파괴시험 현황

항 목	기준수량		실시 수량 (개소)	비 고
측점분할	• 5~20m 간격(책임기술자 조정 가능)	-	-	
반발경도시험	•총수량 = (총연장÷300m)	3	10	
탄산화깊이 측정	- 철근콘크리트 구조물 • 총연장 1,000m미만 = 2개소 • 총연장 1,000m이상 = 최초 2개소 + 1,000m당 1개소 추가	2	2	
철근탐사시험		-	-	

반발경도시험(단면정리)

반발경도시험

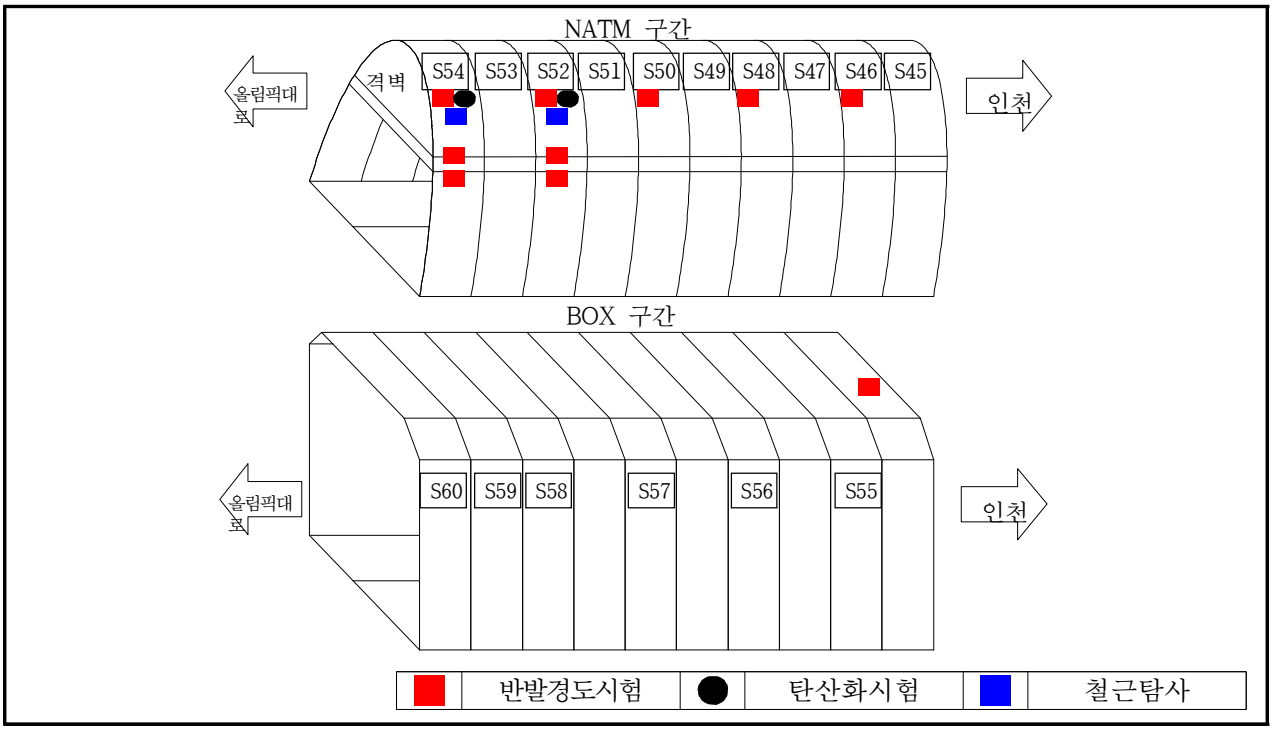
탄산화 깊이 측정(드릴링)

탄산화 깊이 측정(페놀프탈레인)

탄산화 깊이 측정

철근탐사시험

【사진 3.5.1】 콘크리트 내구성조사 전경



【그림 3.5.1】 신월여의지하도로 RAMP-D 콘크리트 내구성조사 위치도

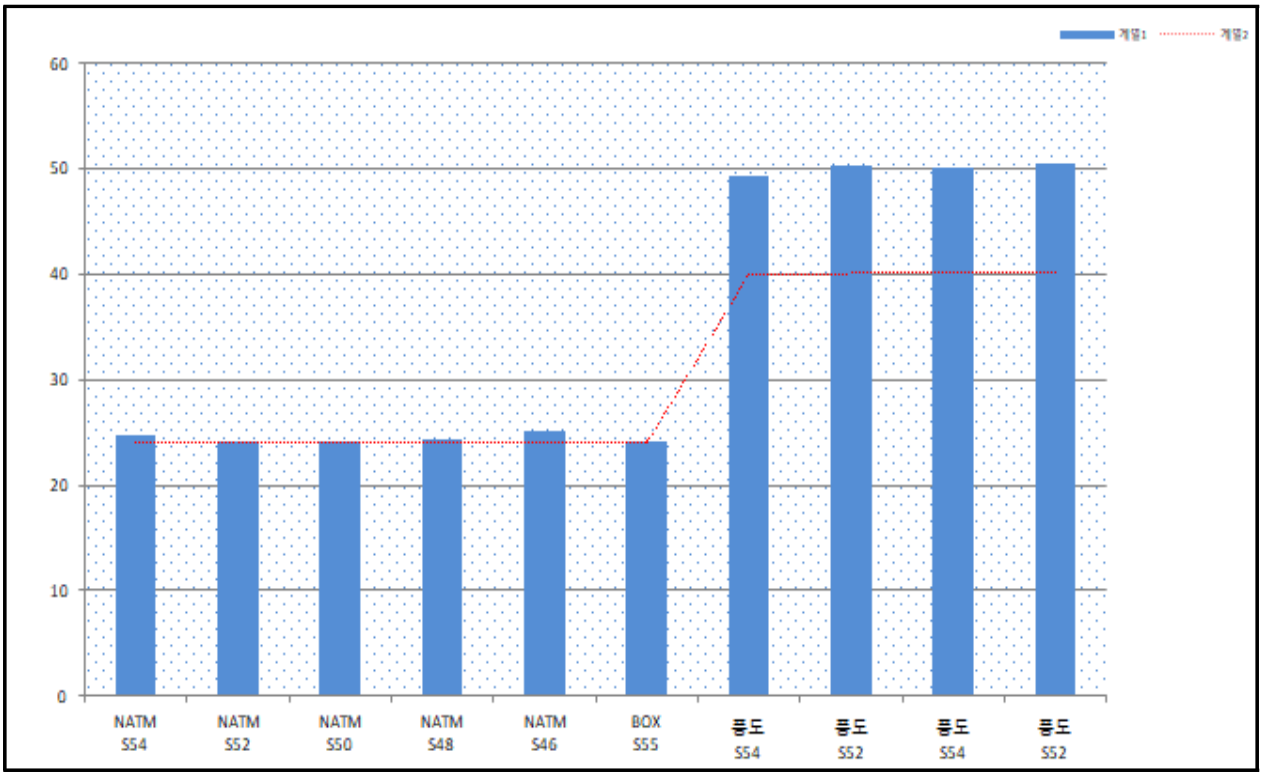
3.5.1 콘크리트 강도시험

신월여의지하도로의 콘크리트 비파괴강도시험은 반발경도법을 이용하여 허용 높이 초과 차량의 충돌 위치를 중점적으로 총 10개소(NATM 천단부 5개소, 풍도슬래브 4개소, BOX구간 슬래브 1개소)의 비파괴강도시험을 실시하였으며, 측정결과는 다음과 같다.

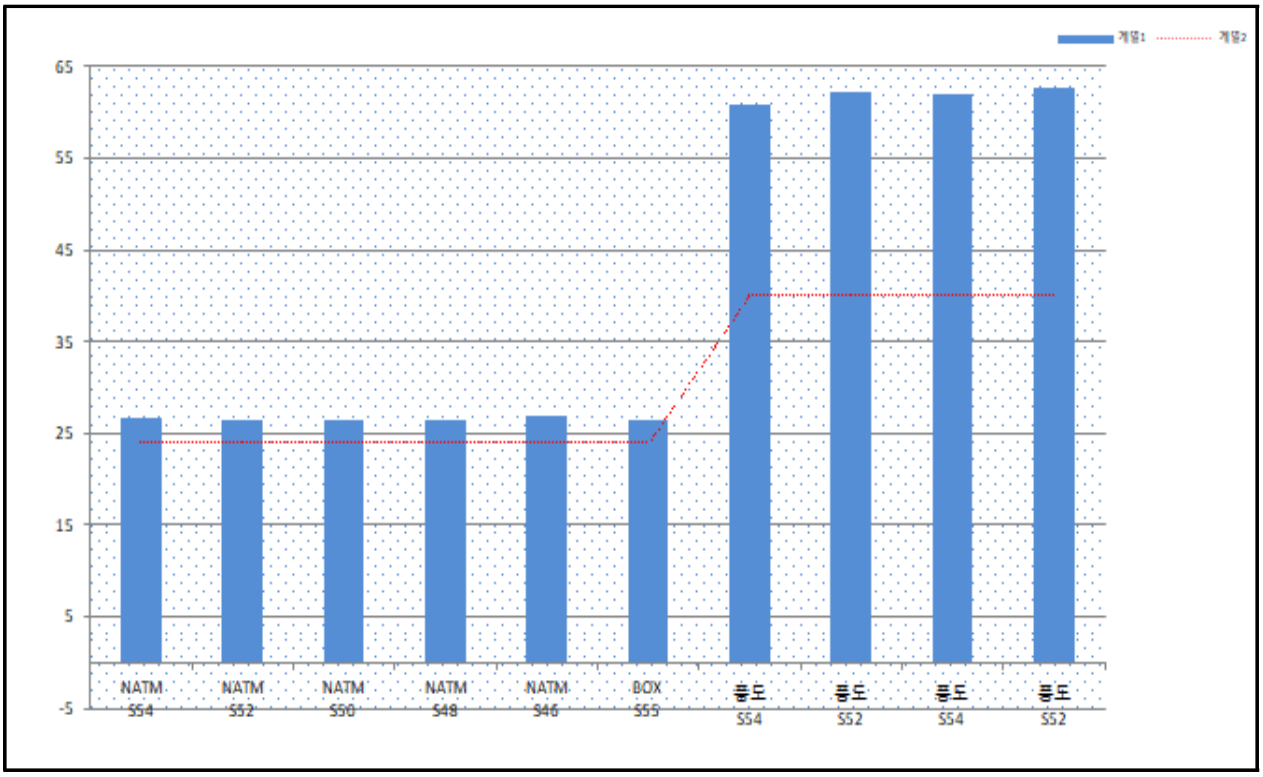
가. 비파괴강도 시험결과

【표 3.5.2】 비파괴강도 시험결과

시험위치		반발경도 (R_o)	재령 보정	반발경도법(MPa)				설계기준 강도(MPa)
				식①	식②	식③	식④	
NATM 천단부	S54	46.9	0.64	24.8	26.7	-	-	24
	S52	46.3		24.2	26.4	-	-	
	S50	46.1		24.1	26.3	-	-	
	S48	46.3		24.3	26.4	-	-	
	S46	47.4		25.1	26.9	-	-	
BOX 슬래브	S55	47.2		24.1	26.4	-	-	
풍도슬래브상면	S54	56.2		-	-	49.3	60.8	40
	S53	57.2		-	-	51.7	64.5	
풍도슬래브하면	S54	61.2		-	-	50.1	62.0	
	S53	61.6		-	-	51.1	63.6	



【그림 3.5.2】반발경도시험 압축강도 식①, 식③ 추정결과



【그림 3.5.3】반발경도시험 압축강도 식②, 식④ 추정결과

- 비파괴강도시험 검토결과, 반발경도법에 의한 콘크리트 강도는 BOX슬래브 및 NATM 라이닝 24.1~26.9MPa, 풍도슬래브 49.3~64.5MPa로 설계기준강도(라이닝: 24MPa, 풍도슬래브: 40MPa)를 상회하는 값으로 분석되었다.
- 따라서, 금회 시험을 실시한 콘크리트 강도는 공용년수 경과에 따른 강도 저하 및 허용 높이 초과 차량 충돌 사고에 의한 강도의 영향은 없는 것으로 판단된다.

【표 3.5.3】 비파괴강도시험 결과분석

구 분	시험방법	추정강도(A)	설계기준강도(B)	A/B×100(%)
BOX슬래브, NATM라이닝	반발경도법	24.1~26.9	24.0	100.3~112.2
풍도슬래브	반발경도법	49.3~62.6	40.0	123.3~156.5

3.5.2 철근탐사 시험

철근탐사기(RC-Radar)를 이용한 철근탐사시험은 탄산화 깊이측정 시험을 위한 피복두께 측정을 위해 탄선화시험과 동일한 부위에서 2개소(NATM라이닝 차량 충돌 구간 1개소, NATM라이닝 상태양호 구간 1개소)의 철근탐사 시험을 실시하였으며, 측정결과는 다음과 같다.

가. 철근탐사 시험결과

【표 3.5.5】 철근탐사 시험결과

시험위치		철근종류	측정치(㎜)		설계치(㎜)		비고
			배근간격	피복두께	배근간격	피복두께	
NATM 라이닝 RAMP-D	S54 (차량충돌구간)	주철근	@140	60	@120	60	
		배력철근	@190	63	@200	60	
	S52 (상태양호구간)	주철근	@125	61	@120	60	
		배력철근	@215	63	@200	60	

본 과업대상에 대하여 철근탐사 수행결과, 측정된 철근배근 간격 및 피복두께는 설계치와 비교시 준공도면과 대체로 일치한 것으로 확인되었다.

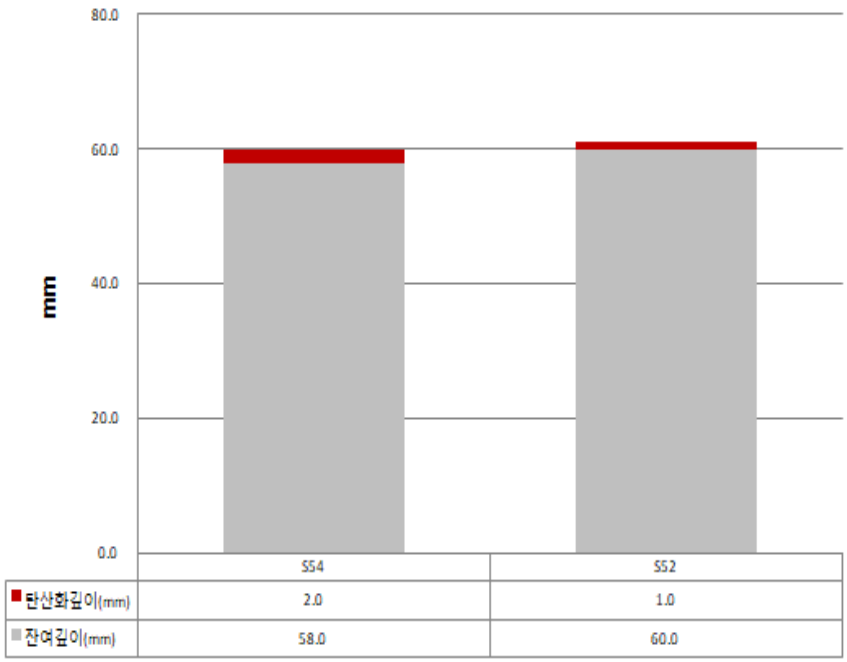
3.5.3 탄산화 깊이 측정

탄산화 깊이 측정은 총 2개소(NATM라이닝 차량 충돌 구간 1개소, NATM라이닝 상태양호 구간 1개소)의 탄산화 잔여깊이를 측정하였으며, 실측 최소 피복두께를 적용하기 위해 철근탐사시험과 결과를 피복두께로 하여 결과를 평가하였고, 그 결과는 다음과 같다.

가. 탄산화 깊이 측정결과

【표 3.5.6】 탄산화깊이 측정결과 및 평가

시험위치		실측 피복두께 (㎜)	탄산화 깊이 (㎜)	탄산화 잔여깊이 (㎜)	평가 결과 (등급)	잔존 수명예측 (년)	탄산화 속도계수 (A)	비 고
NATM 라이닝 RAMP-D	S54 (차량충돌구간)	60.0	2.0	58.0	a	2,697	1.155	
	S52 (상태양호구간)	61.0	1.0	60.0	a	11,160	0.577	



【그림 3.5.4】 신월여의지하도로 탄산화깊이 측정결과

콘크리트 부재에 대한 탄산화 깊이 측정결과, 실측 피복두께와 비교시 탄산화 잔여깊이가 30.0㎜ 이상으로 측정되어 『시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(2026. 01)』의 탄산화 상태평가 기준에 의거 "a"로 평가되었으며, 철근까지의 탄산화 도달기간은 풍도슬래브 차량 충돌 구간 및 상태양호 구간 모두 100년 이상으로 측정되어 탄산화로 인한 내구성 저하 가능성이 없는 양호한 상태로 분석되었다.

3.5.4 내구성조사 결과 요약

【표 3.5.8】 내구성조사 결과 요약

<table>
<tr><th>시험명</th><th>시 험 위 치</th><th colspan="5">시 험 결 과</th><th>비 고</th></tr>
<tr><td rowspan="5">비파괴 강도 (MPa)</td><td>시험종류</td><td colspan="2">추정강도(A)</td><td colspan="2">설계기준강도(B)</td><td>A/B×100(%)</td><td rowspan="5"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">반발경도법</td><td colspan="2">24.1~26.9</td><td colspan="2">24.0</td><td>100.3~112.2</td></tr>
<tr><td colspan="2">49.3~62.6</td><td colspan="2">40.0</td><td>123.3~156.5</td></tr>
<tr><td>검토의견</td><td colspan="5">■ 설계기준강도 대비 100%이상으로 공용년수 경과에 따른 콘크리트강도 저하는 없는 것으로 판단됨</td></tr>
<tr><td rowspan="6">철근탐사 (㎜)</td><td rowspan="2">부재</td><td rowspan="2">철근종류</td><td colspan="2">측정치</td><td colspan="2">설계치</td><td rowspan="6"></td></tr>
<tr><td>배근간격</td><td>피복두께</td><td>배근간격</td><td>피복두께</td></tr>
<tr><td rowspan="2">라이닝</td><td>주철근</td><td>125~140</td><td>60~61</td><td>120</td><td>60</td></tr>
<tr><td>배력철근</td><td>190~215</td><td>63</td><td>200</td><td>60</td></tr>
<tr><td>검토의견</td><td colspan="5">■ 피복두께가 대체로 일치한 것으로 확인됨</td></tr>
<tr><td rowspan="3">탄산화 잔여깊이 (㎜)</td><td>부재</td><td colspan="2">잔여깊이</td><td colspan="2">평가</td><td>잔존수명</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td>탄산화 잔여깊이</td><td colspan="2">58.0～60.0</td><td colspan="2">a</td><td>100년이상</td></tr>
<tr><td>검토의견</td><td colspan="5">■ 탄산화 잔여깊이가 30㎜이상인 "a"로 평가되며, 탄산화로 인한 내구성 저하 가능성은 없는 것으로 검토됨</td></tr>
</table>