

# 국내 · 외 터널 상태평가 및 유지관리 기준 분석



변요섭

한국시설안전공단  
시설안전연구소 연구원  
(josep0103@kistec.or.kr)



성주현

한국시설안전공단  
시설안전연구소 선임연구원  
(bluehill@kistec.or.kr)

## 1. 서론

국내에서 “시설물의 안전에 관한 특별법”이 1995년에 제정된 이후, 현재까지 주요 터널들에 대한 수회에 걸친 점검 및 진단이 실시되고 있다. 터널구조물은 결합 및 변상의 원인을 규명하는 것이 쉽지 않고, 안전성을 평가하는 것이 어렵기 때문에 객관적인 면보다는 주관적으로 판단하는 경향이 많아 그 결과에 대한 문제점이 빈번히 제기되고 있으며 터널의 적절한 관리가 요구되고 있는 실정이다.

특히, 최근 국내에서는 대단면 지하철 터널에 쉴드 TBM 공법이 활발히 도입되고 있으며, 향후 해저터널 및 터널 장대화 추세에 따라 국내 활용도는 더욱 높아질 것으로 예측된다. 이에 따라 현재 국내 지반환경에 적절한 적용을 위한 계획, 설계 및 시공에 관한 연구는 많이 이루어지는 반면에 유지관리에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 국내 · 외 터널 상태평가 및 유지관리 기준에 대해 조사해 보았다. 국내의 경우에는 터널의 유지관리 시 사용하는 상태평가 세부지침 및 유지관리 매뉴얼(한국시설안전공단, 2004; 한국시설안전공단, 2010; 한국시설안전공단, 2012)에 대해 살펴보고, 국외는 일본, 미국, 오스트리아, 대만 등의 터널 상태평가 및 유지관리 기준에 대하여 조사하였다.

## 2. 국내 터널 상태평가 및 유지관리 기준

국내 터널의 유지관리는 점검계획을 통해 유지관리에 대한 구체적인 계획을 세운 후 정기점검과 정밀점검, 긴급점검, 정밀안전진단과 같이 시기와 상황에 맞는 현장 조사를 하게 된다(한국시설안전공단, 2004; 한국시설안전공단, 2010; 한국시설안전공단, 2012).

## 2.1 점검의 종류

점검의 종류는 앞 절의 점검계획에서 언급한 바와 같이 자료조사와 환경조사를 기본적으로 수행하되, 정기점검과 정밀점검, 긴급점검, 정밀안전진단으로 나뉘는 현장조사 시에는 다음과 같은 항목들을 중심으로 조사를 실시한다.

### 2.1.1 정기점검

정기점검은 경험과 기술을 갖춘 자에 의한 세심한 육안검사 수준의 점검으로써 간단한 점검기구(손전 등, 망치 등)에 의하여 터널에 발생한 결함과 기능적 상태를 판단하고 시설물이 현재의 사용요건을 계속 만족시키고 있는 확인하기 위하여 실시하는 관찰로 이루어지는 순찰과 유사한 성격의 점검을 가리킨다. 정기점검 시 점검자는 시설물의 전반적인 외관형태를 관찰하여 심각한 손상·결함의 가능성을 발견할 수 있도록 세심한 주의를 기울여야 하며, 이상이 발견되는 경우 즉시 보고하여야 한다. 육안조사 시에는 시설물의 상태를 주로 육안에 의해 판단하고 터널의 안정 상태

를 평가하는 것이며, 간단한 기구를 이용한 정기점검은 일반적으로 점검기구로 시설물에 타격을 가했을 때의 반발 정도나 소리, 반응형태 등으로 시설물의 안전 상태를 평가하는 것이다. 정기점검을 실시하는 경우의 구체적인 점검항목은 표 1과 같고, 각각에 대한 조사방법을 간략하게 나타내면 표 2와 같다.

일반적으로 정기점검의 육안조사는 가장 손쉽게 수행할 수 있는 조사방법으로써, 시설물의 결함을 찾아낼 수 있는 일차적인 조사에 해당한다. 그러나 다른 조사방법에 비해 정밀도가 낮으므로 정밀진단 단계에서의 실시되는 측정 장비에 의한 정밀한 측정과는 달리 균열, 백태, 변형 등을 포함한 단순항목에 대한 조사 위주로 진행된다. 즉, 터널의 입·출구부에서는 누수량, 수질, 수온 등을 조사하게 되고, 터널 본체에서는 바닥면 상태 및 주행성, 조명·환기 등의 부속시설의 상태 및 안전성을 조사하게 된다. 이 밖에도 사용성에 간접적인 영향을 미치는 청결상태, 퇴적물 적재상태 등의 조사와 터널 내 환기·조명상태 및 부속시설의 안전 상태와 기존 보수부위에 대해 세밀한 조사를 실시하여야 한다.

표 1. 정기점검시의 점검항목 및 장비

점 검 부 위	점 검 항 목
입·출구부	•균열·누수·백태·박리·박락, 함몰 •철근부식 여부(표면노출)·부등침하, 이동
측벽부(좌·우)	•균열·누수·백태·박리·박락, 함몰 •철근부식 여부(표면노출)
천 정 부	•균열·누수·백태·박리·박락, 함몰 •철근부식 여부(표면노출)·조명상태
바 닷 부	•배수시설, 배수상태·궤도이상 •노면상태(침하, 용기 등)
옹 벽	•균열·누수·백태·박리·박락, 함몰 •부등침하
사 면	•사면의 구분(절토, 성토)·사면의 변형 유무 •사면보호공의 종류, 적정성

표 2. 조사항목별 조사방법

조사항목	조 사 방 법
균 열	육안으로 균열의 방향, 균열의 패턴을 관찰하고 늘어난 균열의 길이를 파악한다. 또한 내부 철근의 녹슬음에 의한 오염의 유무도 관찰한다.
들 뚝	육안으로 콘크리트의 들뜸 유무를 관찰한다. 또한 들 뜬 부분의 철근부식 유무를 관찰한다(망치사용).
박 락	육안으로 콘크리트가 박락되어 있는 부분의 유무를 관찰한다.
누 수	육안이나 문진 등으로 누수의 범위나 누수량을 확인한다.
백 태	콘크리트 면을 손으로 세게 눌러서 분상물의 부착으로 판단한다.
터널 사면	사면의 변형유무

### 2.1.2 초기점검

초기점검은 시설물 관리대장에 기록되며 최초로 실시하는 정밀점검을 말한다. 일반적으로 신설시설물의 경우는 준공 후 6월 이내에 시행토록 하는데 구조형태가 변화된 경우에도 초기점검이 필요하다. 초기점검은 특별법 시행령 제7조 별표 2의 정밀점검의 책임기술자로서의 자격을 각춘 자에 의하여 수행되어야 하며 필요한 경우에 한해서 내하력에 대한 해석적 계산을 실시한다.

초기점검의 목표는 첫째로 특별법에서 요구하는 시설물관리대장 및 평가자료 그리고 관리주체가 수집하는 관련 자료를 얻기 위함이며, 둘째로 구조물 상태의 판단 및 구조물의 문제점 또는 문제 가능성이 있는 구조부위를 확인하고 기록하는 것이다. 도면의 사전 상세검토를 통하여 붕괴의 위험성을 내포한 부위에 대하여 주의를 기울여야 하며 추후 특별한 주의를 필요로 하는 사항에 대하여는 점검기간 중에 평가하여야 한다. 또한 초기점검 시에는 추후에 실시되는 점검 및 진단 시 평가에 필요한 초기치와 기초자료를 제시할 수 있도록 하여야 하며, 육안조사 시 결함이 있는 경우에는 도면으로 기록하여야 한다.

### 2.1.3 정밀점검

정밀점검은 일정한 주기로 계획된 정기적 점검으로서 시설물의 현 상태를 정확히 판단하고 최초 또는 이전에 기록된 상태로부터의 변화를 확인하며 구조물이 현재의 사용요건을 계속 만족시키고 있는지 확인하기 위해 필요한 면밀한 육안검사와 간단한 측정 기구에 의한 측정으로 이루어진다.

터널의 경우 팽압이나 침하, 지질상태에 의한 터널 시설물의 결함 상태를 고려하여야 하며 콘크리트의 풍화나 철근부식 등 시간경과와 함께 발생할 수 있는 재료의 열화에 기인한 변상 여부를 관찰, 분석해야 한다. 면밀하고 지속적 감시가 필요한 시설물 부위는 사전현장조사, 구조해석 및 구조계산을 통하여 시설물의 안전성을 결정하는데 정밀점검 시의 구체적 점검항

표 3. 정밀점검시의 점검항목 및 장비

점검부위	점검항목
입·출구부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 균열(균열폭, 길이, 깊이, 균열의 진전여부)</li> <li>• 누수, 백화·박리, 박락, 함몰·철근 부식 여부</li> <li>• 부등침하·배수처리</li> <li>• 콘크리트 강도(표면타격법(슈미트해머))</li> </ul>
천정부 어깨부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 균열(균열폭, 길이, 깊이, 균열의 진전여부)</li> <li>• 누수, 백화·박리, 박락, 함몰·철근 부식 여부</li> <li>• 조명상태·농도·콘크리트 강도(표면타격법)</li> </ul>
측벽부 (좌·우)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 균열(균열폭, 길이, 깊이, 균열의 진전여부)</li> <li>• 누수, 백화·박리, 박락, 함몰·철근 부식 여부</li> <li>• 콘크리트 강도(표면타격법)</li> </ul>
바닥부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 궤도이상·배수시설·노면상태(침하, 균열 등)</li> <li>• 교통소통상태 및 안전사항·용수</li> </ul>
비탈면	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사면의 안정 상태, 변형 유무, 보호공</li> </ul>
기타	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 매연상태, 유지관리용 사다리, 부속시설물의 상태</li> </ul>

목은 표 3과 같다.

### 2.1.4 긴급점검

#### ① 손상점검

손상점검은 비계획적인 점검으로써 재해나 사고에 의해 비롯된 구조적 손상을 평가하는 것이다. 점검자는 점검대상 범위의 긴급한 사용제한이나 사용금지의 필요성이 있는지의 판단과 보수를 수행하는데 있어 필요한 작업량의 정도를 신속하게 결정할 수 있어야 하며 하중제한, 통행제한 등 사용제한 여부를 결정할 수 있도록 현장에서의 판단 능력이 요구된다. 손상점검은 정밀점검의 보완수단으로써 손상의 정도와 보수의 긴급성 그리고 보수작업의 규모를 파악할 수 있어야 하므로 시험장비에 의한 현장측정 및 사용제한 기간에 대한 해석이 필요하다.

#### ② 특별점검

특별점검은 관리주체가 판단하여 행하는 정밀점검 수준의 점검이다. 이 점검은 기초침하 또는 세굴과 같은 결함이 의심되는 경우나 하중제한, 통행제한 중인

시설물의 지속적인 사용여부를 판단하기 위한 점검으로써 점검시기는 결함의 심각성을 고려하여 결정한다. 일반적으로 시설물이 신설되면 초기에 결함이 발생하기 쉬운데, 이러한 문제가 발생한 시설물은 문제 해결 후 안전한 상태를 유지하다가 시간의 경과와 함께 서서히 노후화가 진행된다. 이때 복합적인 원인으로 인해 판단하기 어려운 변상형태가 많이 발생할 수 있는데, 이러한 변상상태를 그대로 방치하게 되면 그 상태를 촉진하는 결과를 초래하게 되어 시설물의 변상이 급속하게 진행되고 궁극적으로는 시설물의 내구성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 이 때 실시하는 긴급 점검의 점검항목과 장비는 점검을 실시할 당시의 변상 종류가 점검항목이 되는 것으로서 점검장비 등은 정기 점검과 정밀점검에서 언급한 변상종류에 해당하는 장비를 동일하게 사용한다.

### 2.1.5 정밀안전진단

정밀안전진단을 위한 점검은 정밀점검과정을 통해서 쉽게 발견하지 못하는 결함부위를 발견하기 위하여 행해지는 정밀한 육안조사 및 측정장비에 의한 조사를 포함하는 근접 점검이다. 필요한 경우 차량통제나 단수 등을 실시하여야 하며 점검용 접근장비, 비계, 작업선과 같은 특수장비 및 특수기술자가 필요하다. 먼저, 육안조사의 결과는 전체 구조물의 표면에 대하여 도면에 기록하여야 하며, 구조물 전체에 대한 조사 결과 분석 및 상태평가가 포함되어야 한다. 결함의 유무 및 범위에 대한 확인이 필요한 때에는 부분적인 파괴시험과 비파괴 현장시험 및 기타 필요한 재료시험 등의 실내시험을 병행해야 하며, 콘크리트 재료의 열화정도, 배면지반의 상태 등 정량적인 판단을 주로 한다. 또한 정밀안전진단에서는 노후화 또는 손상 정도에 따라 구조물의 성능이나 잔존수명을 평가하기 위한 안전성 평가가 포함되어야 한다. 안전성 평가를 위하여 시설물의 안정과 내하력, 내진성 등을 결정하는데 필요한 조사나 시험을 실시할 수 있다. 정밀안전진단을 실시한 결과, 시설물의 재해예방 및 안전성의 확보

표 4. 정밀안전진단시의 점검항목

점검 부위	점검 항목
입·출구 부	• 균열조사 - 균열폭, 길이, 깊이, 균열의 진전 여부
	• 누수부위 탐사 - 누수량, 수질, 누수온도
	• 백태 - 열화증상 및 현장조사, 염화물 함유량 시험
	• 콘크리트 강도 - 표면타격법, 일축압축강도
본터널	• 터널주변 및 지반조사 - 사면 안정성 조사
	• 균열조사 - 균열폭, 길이, 깊이, 균열의 진행성 여부
	• 누수부위 탐사 - 누수량, 수질, 수온
	• 2차 라이닝 - 콘크리트 두께조사, Rock Bolt, Shotcrete, 열화조사, 염화물 함유량 시험 - 라이닝 응력 측정(필요 시)
	• 내부결함 탐사 - 공동, 박락, 박리 등 내부결함
	• 콘크리트 강도 - 철근배근 위치 탐사 및 철근 부식도 측정
	• 강지보공 규격 및 설치간격, 부식도 측정
	• 터널 단면 측정 - 건축한계, 내공변위 등
	• 열화증상 - 백태, 중성화 시험
	• 지반상태 - 풍화정도, 일축압축 강도, R.Q.D
• 궤도이상, 노면상태 및 주행성, 세굴 등	
• 부속시설의 상태 및 안전성 - 조명, 환기, 오염	
피난 연결통로	• 시공이음부, 신축이음재, 누수, 균열, 백태 등
기타	- 표지판 여부
	- 퇴적물 상태
	- 안전 및 유지관리 계획 여부, 청소상태
	- 시설물 이력카드 작성여부 및 보수이력 확인 - 진동 및 소음 상태

가 필요한 경우에는 적절한 보수·보강공법을 제시하여야 한다. 정밀안전진단시의 구체적인 정밀안전진단의 조사항목은 표 4에 나타낸 바와 같다.

### 2.2 상태평가 기준

터널의 상태평가는 라이닝 상태평가와 터널주변 상태평가로 구분하여 실시하며 상태평가 시 고려해야할

국내·외 터널 상태평가 및 유지관리 기준 분석

표 5. 터널 상태평가 항목

구분		평가항목
터널상태 평가	라이닝 상태	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 균열</li> <li>• 누수</li> <li>• 파손 및 손상</li> <li>• 재질열화(박리, 층분리 및 박락, 백태, 재료분리, 철근노출, 탄산화, 염화물)</li> </ul>
	터널주변 상태	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 배수상태</li> <li>• 지반상태</li> <li>• 갱문상태</li> <li>• 공동구상태</li> <li>• 특수조건 : 도심지 토사터널, 전력구터널, 전차선을 설치한 터널 (추가점수 부여)</li> </ul>

주요 평가항목은 표 5와 같다.

터널 시설물 분류에 따른 터널별 상태평가의 결합점수와 결합지수 산출방법은 다음과 같다. 여기서 라이닝 결합지수(f)는 터널주변 항목점수를 제외한 라이닝만의 결합점수인 총점 36점으로 계산되며, 터널 결합지수(F)는 라이닝의 결합점수 및 터널주변 결합점수를 모두 합한 총점 43점으로 계산하여 상태평가 결과를 산정하면 된다. 평가항목은 5단계로 세분하였고, 평가항목별 상태평가기준은 터널 상태평가 결과와의 차이를 두기 위하여 소문자 a, b, c, d, e로 표기한다.

한편, TBM(Tunnel Boring Machine) 터널은 소규모 굴착장비나 발파방법에 의하지 않고 굴착에서 버려

표 6. NATM터널(철근콘크리트 라이닝)

평가기준		a	b	c	d	e	
		0 ≤ f < 0.15	0.15 ≤ f < 0.30	0.30 ≤ f < 0.55	0.55 ≤ f < 0.75	0.75 ≤ f	
라이닝	균열	0~2	3~5	6~8	9~11	12~13	
	누수	0	1	2	3	4~5	
	파손 및 손상	0	0	1	2	3	
	재질 열화	박리	0	0	1	1	1
		층분리 및 박락	0	0	1	2	3
		백태	0	0	1	1	1
		재료분리	0	0	1	1	1
		철근노출	0	1	2	3	4
탄산화		0	1	2	3	-	
염화물	0	1	1	2	-		
터널 주변	배수상태	오염됨 : 1					
		배수불량 또는 막힘 : 2					
	지반상태	풍화변질 및 단층파쇄대	영향범위 내 : 2~3				
			영향범위 외 : 1				
갱문상태	손상 : 0.5~1						
공동구상태	덮개파손 및 오염됨 : 0.5						
	이물질 퇴적 및 침수 : 1						
특수조건	도심지 토사터널, 전력구터널, 전차선을 설치한 터널에서 낙수 및 동결위험(추가점수) : 1~3						

$$\text{라이닝 결합지수}(f) = \frac{\sum \text{결합점수}}{36}, \quad \text{터널결합지수}(F) = \frac{\sum \text{결합점수}}{43}$$

처리까지 기계화 및 시스템화 되어있는 대규모 굴착기계를 말하며, 일반적으로 open TBM과 쉴드 TBM으로 구분한다. 본 상태평가기준은 콘크리트 세그먼트 라이닝이 설치되는 TBM 터널에 적용한다.

터널의 기능과 안전에 영향을 미치는 요소를 크게 외력의 변화, 라이닝 재료의 열화, 누수로 인한 기능상의 문제점으로 분류하여 각각에 대하여 나타날 수 있는 변상의 상태를 상호 연계하여 평가하고 있는 것이 특징이다. 또한 상태등급은 보수·보강의 필요성(A등급은 보수·보강이 필요함) 및 보수·보강의 시급성(AA, A1, A2)과 연계되어 설정되어 있는 것이 특징이다. 평가를 위한 검사는 전반검사와 개별검사로 구분하여 적용하고 있다(日本トンネル技術協會, 2000).

### 3. 국외 터널 상태평가 및 유지관리 기준

#### 3.1 일본

일본의 터널 유지관리 평가기준은 균열, 누수, 박리, 박락 등의 개개의 변상별로 평가를 실시하지 않으며,

전반검사는 터널조사의 가장 기본이 되는 조사로써 대상 터널의 전반적인 상태파악을 목적으로 실시한다. 전반검사는 주로 육안관찰에 의하여 이루어지며,

표 7. TBM 터널(콘크리트 세그먼트 라이닝)

평가기준		a	b	c	d	e	
		0≤f<0.15	0.15≤f<0.30	0.30≤f<0.55	0.55≤f<0.75	0.75≤f	
라 이 닝	균열	0~2	3~5	6~8	9~11	12~13	
	누수	0	1	2	3	4~5	
	파손 및 손상	0	0	1	2	3	
	재질 열화	박리	0	0	1	1	1
		충분리 및 박락	0	0	1	2	3
		백태	0	0	1	1	1
		재료분리	0	0	1	1	1
		철근노출	0	1	2	3	4
		탄산화	0	1	2	3	-
염화물		0	1	1	2	-	
터 널 주 변	배수상태	오염됨 : 1					
		배수불량 또는 막힘 : 2					
	지반상태	풍화변질 및 단층파쇄대	영향범위 내 : 2~3				
			영향범위 외 : 1				
	갱문상태	손상 : 0.5~1					
공동구상태	덮개파손 및 오염됨 : 0.5						
	이물질 퇴적 및 침수 : 1						
특수조건	도심지 토사터널, 전력구터널, 전차선을 설치한 터널에서 낙수 및 동결위험(추가점수) : 1~3						

$$\text{라이닝 결함지수}(I) = \frac{\sum \text{결함점수}}{36}, \quad \text{터널결함지수}(F) = \frac{\sum \text{결함점수}}{43}$$

## 국내·외 터널 상태평가 및 유지관리 기준 분석

환경조사와 관찰조사로 구성된다. 일본 철도터널의 경우 전반검사 시 상태평가기준은 표 8과 같다. 전반 검사 결과 A 등급으로 판정될 경우(변상의 진행을 감시할 필요가 있다고 판단된 경우) 변상의 정도나 진행성을 파악하여 그 후의 조치를 판단하기 위한 개별검사를 실시한다.

개별검사 시 영향인자별 평가요소 평가기준은 외력의 변화에 대한 판정, 라이닝 재료 열화에 대한 평가, 보수주기의 단축 및 누수에 대한 평가기준이 있다.

일본 철도터널과 도로터널의 외력에 대한 상태평가 기준은 각각 표 9, 표 10과 같다.

터널의 라이닝 콘크리트는 터널의 사용연수가 증가

**표 8. 일본 철도터널(NATM)의 전반검사 시 평가기준**

상태등급		평가의 내용
외력의 변화에 의한 변상에 대한 판정	A	변동·이동·침하 등에 의해 소정 한계에 지장이 있거나 지장을 줄 우려가 있는 것
		변동·이동·침하 등에 의해 붕괴우려가 있는 것
	C	라이닝이 박리·박락될 우려가 있으며, 이런 상황이 발생한 경우 직접적으로 열차운행이나 승객의 안전을 위협한다고 판정되는 것
라이닝의 노후화, 궤도보수 주기의 단축 등에 대한 판정	A	변상은 있지만 진행될 가능성은 없는 것으로 확인된 것과 그 변상이 사용상의 목적을 저해하지 않는 것
		라이닝 재질열화에 의해 라이닝의 박락이 종종 발생하고 열차운행, 승객의 안전을 위협하는 것
	B	한계에 지장을 주는 고드름, 측방이 발생했을 경우
	C	열차운행이나 궤도보수 작업자에게 중대한 영향을 줄 수 있는 누수나 고드름이 있는 경우 및 측방이 발생한 경우
	B	열차운행 및 승객의 안전에는 문제가 없지만 궤도보수 주기단축 등 사용상의 기능을 저하시키는 것
	C	누수가 있지만 열차운행 및 승객의 안전을 위협하지 않고, 사용상 기능에 영향을 주지 않는 것

**표 9. 일본 철도터널(NATM)의 외력변화에 대한 상태평가 기준**

상태등급	평가의 내용
3A	변상이 크고 통행자 및 통행차량에 대한 위험이 있어 즉시 대책이 필요함
2A	변상이 있고 진행성이며 조만간 통행자 및 통행차량에 대한 위험이 예상되어 조속한 대책이 필요함
A	변상이 있고 장래 통행자 및 통행차량에 위험이 예상되어 중점적인 감시와 계획적인 대책이 필요함
B	경미한 변상으로 현재 통행자 및 통행차량에 대한 영향이 없으나 감시는 필요함

**표 10. 일본 도로터널(NATM)의 외력변화에 대한 상태평가 기준**

상태 등급	변상 및 붕괴현상		
	라이닝 콘크리트의 변형, 이동, 침하	라이닝 콘크리트의 균열	라이닝 콘크리트의 들뜸, 탈락
3A	변형, 이동, 침하등으로 구조물의 기능이 현저 저하되었을 때	균열이 크고 밀집되어 있음, 또한 전단 균열이 크게 생겼을 때 진행이 크게 확인됨	아치, 상부에 균열이 밀집·요철이 생기고, 탈락이 생겨 콘크리트 덩어리가 낙하됨
2A	변형, 이동, 침하 등으로 곧 구조물의 기능저하가 예상될때	균열이 크고 밀집되어 있음, 또한 전단균열이 생기고 진행이 확인됨	측벽부의 균열이 밀집, 요철이 생기고, 탈락이 생겨 콘크리트 덩어리가 낙하됨
A	변형, 이동, 침하 등이 있고 진행이 완만함	균열이 있고 진행이 확인됨	-
B	변형, 이동, 침하 등이 있으나 진행이 정지되어 있으며 변상이 재발하지 않음	균열이 있으나 진행이 확인되지 않음	-



함에 따라 물리·화학적 작용에 의하여 노후화 및 열화되어 라이닝의 내력이 저하될 뿐 아니라 균열 등에 의하여 쉽게 붕락될 가능성이 높아진다(JSCE, 2005). 따라서 터널의 안전한 운영을 위해서는 이러한 붕락 가능성을 사전에 파악하여 대책을 세워야 한다. 일본에서는 이러한 재료의 열화에 의한 변상상태를 별도의 상태등급으로 평가하고 있으며 그 평가기준은 철도 터널의 경우 표 11, 도로터널의 경우는 표 12와 같으며

두 기준은 서로 유사하다.

터널 내부로의 누수로 인한 측방, 고드름, 토사유출 등 터널 내 안전운영상의 문제점에 대하여 철도터널의 경우 궤도보수주기의 단축에 대한 상태평가로, 도로터널의 경우 누수에 대한 상태평가로 구분하여 별도의 항목으로 평가를 실시하고 있으며, 그 기준은 각각 표 13, 표 14와 같다.

표 11. 일본 철도터널(NATM)의 재료 열화에 대한 상태평가기준

평가 등급	평가기준
AA	• 아치부근의 라이닝이 낙하할 우려가 있는 것
A1	• 라이닝 재료가 열화하여 아주 작은 외력에도 붕락 또는 박락이 예상되어 이로 인해 중대한 영향이 예상되는 것 • 라이닝의 박락, 재료열화가 단독 또는 복합적으로 발생하여 단면의 강도가 현저하게 저하된 것
A2	• 라이닝의 박락, 재료열화가 단독 또는 복합적으로 발생하여 단면의 강도의 상당부분이 저하된 것 • 라이닝 재료열화가 진행되고 있고, 그 원인이 명확하여 방치해 두면 노후화가 급속히 진행될 우려가 있는 것
B	• 라이닝의 박락, 재료열화가 확인되지만 급속히 진행될 우려는 없는 것

표 12. 일본 도로터널(NATM)의 열화에 대한 평가기준

평가 등급	라이닝 콘크리트의 단면강도 저하	라이닝 콘크리트의 들뜸, 탈락	열화 두께(유효두께/설계두께)
3A	재료열화 등에 따라 단면강도가 현저히 저하되어 구조물의 기능이 현저히 손상될 때	아치 상부의 재료열화로 들뜸이 생기고, 콘크리트 덩어리가 낙하된 것이 확인될 때	-
2A	재료열화 등으로 단면강도가 상당히 저하되어 구조물의 능이 손상될 때	측벽부의 재질열화가 생겨 콘크리트 덩어리가 낙하되거나 낙하될 우려가 있을 때	1/2 미만
A	재질열화 등에 따라 단면강도가 심하게 저하되고 구조물의 기능의 손상가능성이 있을 때	-	1/2 ~ 2/3
B	재료열화 등이 약간 보이나 단면강도에는 영향이 없을 때	들뜸, 탈락 등이 확인되지 않을 때	2/3 이상

표 13. 일본 철도터널(NATM)의 궤도 보수주기의 단축에 대한 평가기준

평가등급	평가 기준
AA	• 누수에 의해 고드름이 생기거나, 측벽부가 동결되어 열차운전에 지장을 주는 경우 • 전철화 구간에 있어서 아치부에서 누수가 직접 전선이나 애자로 흐르는 경우
A1	• 궤도 비틀림이 커지고, 보수주기가 짧아서 정상 운전이 곤란한 경우
B	• 누수로 노반상태가 불향하게 된 경우



표 14. 일본 도로터널(NATM)의 누수에 대한 평가기준

평가 등급	위 치		
	아 치 부	측 벽 부	노 면
3A	• 누수가 분출하고 통행 안전성 위협	-	• 토사유출로 인한 포장의 함몰과 침하의 우려가 있음
2A	• 누수가 흐르고 통행 안전성 위협 • 고드름에 의해 통행 안전성 위협	• 누수가 분출로 인한 통행 안전성 위협 • 측벽 결빙으로 인한 통행 안전성 위협	• 배수불량으로, 포장면에 체수가 발생할 때
A	• 누수가 방울져 떨어지고 통행 안전성 위협	• 누수가 흐르고 통행 안전성 위협	• 배수불량으로, 포장면에 체수가 생길 우려가 있을 때
B	• 누수 흔적 있으나 통행 안전성 위협 없음	• 누수 흔적 있으나 통행 안전성 위협 없음 • 측벽 결빙이 있으나 통행안전과 무관	• 누수, 체수의 흔적이 있으나 통행 안전성에 거의 영향이 없을 때

### 3.2 미국

일반적으로 TBM 터널에서의 세그먼트 역시 콘크리트 구조물의 한 종류이므로 미국의 연방고속도로

국(FHWA)에서 관리하고 있는 콘크리트 구조물의 손상 분류 기준을 알아보았다. 아래의 표 15와 같이 콘크리트 구조물과 관계된 손상 종류는 손상된 모습에 따라 박리(Scaling), 균열(Cracking), 박락(Spalling),

표 15. 미국의 콘크리트 구조물 손상 분류(FHWA, 2003)

종류	손상 설명	수준	수준별 손상 설명
박리 (Scaling)	점진적이고 계속적인 표면 모르타르와 골재의 손실	minor	얇은 골재의 표면 노출 6mm 깊이까지의 표면 모르타르 손실
		moderate	일부 얇은 골재 사이에 모르타르 손실 6mm~25mm사이의 손실 깊이
		severe	얇은 골재 입자까지 손실 25mm를 초과하는 손실 깊이
균열 (Cracking)	콘크리트의 인장강도를 초과하는 인장력작용하여 선형파괴	minor	0.08mm 까지
		moderate	0.80mm와 3.20mm 까지
		severe	3.20mm 초과
박락 (Spalling)	원형이나 타원형 모양으로 움푹 패인 것	minor	깊이가 12mm 이하이거나 직경이 75mm~150mm인 경우
		moderate	깊이가 12mm~25mm이거나 직경이 대략 150mm인 경우
		severe	깊이가 25mm 이상이거나 직경이 150mm 이상인 경우 보강된 철근이 노출 된 경우
Pop-Outs	콘크리트 표면이 원뿔 모양으로 떨어져서 남은 작은 구멍들	minor	직경이 10mm 이내의 구멍이 난 경우
		moderate	직경이 10mm~50mm의 구멍이 난 경우
		severe	직경이 50mm~75mm의 구멍이 난 경우, 75mm 이상의 Pop-outs은 spalling
누수 (Leakage)	수분이 콘크리트 표면에서 흘러나오는 것	minor	물방울은 없지만 표면이 젖은 경우
		moderate	1분당 30물방울 이하의 부피에서 흐름 존재
		severe	1분당 30물방울 이상의 부피에서 흐름 존재

Pop-Outs로 분류되며 세그먼트 사이로 물이 새어나 오는 누수까지 총 5가지로 분류하고 있다. FHWA에서는 손상된 정도에 따라 손상 수준을 3단계로 나누고 각각의 기준을 제시함으로써 손상 수준별로 대응책을 마련하도록 하고 있다.

미국에서는 터널 상태등급 코드를 연약지반 터널과 암반 터널로 분류하여 아래의 표 16, 표 17과 같이 제시하고 있다.

### 3.3 오스트리아

오스트리아의 비엔나 대학의 Georg(2003)는 세

그먼트에서 적용 가능한 손상을 표 18과 같이 공동(Voids), 균열(Cracks), 박락(Spalling), 파손(Breakage), Pockets, Joints까지 총 6가지 종류로 정리하였다. 누수를 세그먼트 관리에 가장 큰 위협이라 판단하여 세그먼트 손상 분류에 포함시키지 않고 손상 기준에서 언급하였다.

Georg는 세그먼트 손상 기준을 표 19와 같이 5등급으로 분류하였다. 가장 등급이 높은 5등급은 누수가 발생하는 경우이며 가장 등급이 낮은 1등급은 세그먼트에서 흔히 볼 수 있는 미세 균열이 발생하는 경우로 분류하고 있다.

표 16. 미국의 연약지반 터널 상태 코드(FHWA, 2003)

등급	연약 지반 터널
9	새롭게 완공된 터널
8	아주 좋은 상태 - 결함이 발견되지 않음.
7	좋은 상태 - 수리 필요 없음. 철, 콘크리트, 주철(cast iron)과 석조(masonry) 라이너들은 단순 결함이 발견됨. 강판(steel plate), 형강(steel shape)과 라이너들은 단면 손실 없이 부분적으로 표면이 부식됨. 콘크리트 라이너와 안전 도보 판넬은 하나 정도의 작은 균열 발생함. 석조는 3m 보다 큰 간격에 작은 균열이 있고 백태가 나타남. 연결부 볼트는 변색되고 라이너 사이의 개스킷을 통해 적은 누수가 발생함.
6	"5"와 "7" 사이
5	보통 상태 - 라이너는 설계대로 제 기능을 하지만 부분 수리가 필요함. 철, 콘크리트, 주철(cast iron)과 석조(masonry) 라이너들의 단순 결함이 많이 발견됨. 강판(steel plate), 형강(steel shape)과 라이너들은 단면 손실 없이 부분적으로 표면이 부식됨. 콘크리트 라이너와 안전 도보 판넬은 둘 보다 많은 작은 균열 발생함. 석조는 1.5~3.0m 간격에 균열이 있고 백태가 나타남. 부분적인 누수가 발생함. 연결부 볼트는 교체 또는 재조임이 요구됨. 라이너 사이로 일반적인 누수가 발생함.
4	"3"과 "5" 사이
3	나쁜 상태 - 전체적인 수리가 필요함. 콘크리트, 철, 주철 라이너 요소들은 넓은 범위에서 원 설계대로 능력을 충분히 발휘하지 못하는 것과 같이 심각한 손상이 나타남. 석조는 과도한 백태, 누수와 착색(staining)을 동반한 일반적인 균열을 가짐. 박리, 모르타르 손실위치가 널리 퍼져있음. 심각한 누수가 인접한 라이너 세그먼트 또는 석조를 통해 발생함. 연결부 볼트는 단면의 15% 손실과 함께 악화됨.
2	아주 나쁜 상태 - 즉시 전체적인 수리가 필요함. 라이너 요소들은 즉시 수리 없이는 설계하중을 더 이상 지지할 수 없는 것과 같은 광범위하고 심각한 처짐. 석조는 광범위하고 심각한 균열, 박리를 가짐. 심각한 누수가 터널 세그먼트 안에 여러 곳에서 나타남. 연결부 볼트는 단면의 50% 손실과 함께 악화됨.
1	심각한 상태 - 즉시 구조물을 폐쇄하고 수리 여부를 결정할 연구가 수행되어야 함.
0	심각한 상태 - 구조물을 폐쇄해야 함.

국내 · 외 터널 상태평가 및 유지관리 기준 분석

표 17. 미국의 암반 터널 상태등급 코드(FHWA, 2003)

등급	암반 지반 터널
9	새롭게 완공된 터널
8	아주 좋은 상태 - 결함이 발견되지 않음
7	좋은 상태 - 수리 필요 없음. 콘크리트/숏크리트 라이너는 부분적이 백태와 함께 3m 보다 큰 간격에서 부분적인 원형 균열을 가짐.
6	"5"와 "7" 사이
5	보통 상태 - 요소는 설계대로 제 기능을 하지만 부분 수리가 필요함. 콘크리트/숏크리트 라이닝은 1.5m~3.0m 간격에서 원형 균열과 백태가 나타남. 부분적인 누수가 발생함. 연결부 볼트는 교체 또는 재조임이 요구됨. 라이너 사이로 일반적이 누수가 발생함.
4	"3"과 "5" 사이
3	나쁜 상태 - 전체적인 수리가 필요함. 요소는 설계된 대로 제 기능을 못함. 콘크리트/숏크리트 라이닝은 광범위한 백태, 누수, 착색(staining)과 함께 넓게 길고 원형 균열이 생김.
2	아주 나쁜 상태 - 즉시 전체적인 수리가 필요함. 콘크리트/숏크리트 라이닝은 광범위하고 심각한 균열, 박리, 박락, 누수가 생김.
1	심각한 상태 - 라이닝은 매우 많은 균열과 처짐이 심각하게 발생. 설계 하중을 유지하기 위한 전체적인 능력을 잃음.
0	심각한 상태 - 구조물을 폐쇄해야 함

표 18. 세그먼트 손상 분류(Georg, 2003)

종류	손상 설명
공동 (voids)	세그먼트의 공극(porosity)은 정해진 표면적당 공동의 크기와 개수에 의해 결정된다. 보수 대책은 시멘트 계열 모르타르(cement-bound mortar)로 공극을 채우고 표면 다듬어서 공동을 막는다.
균열 (cracks)	미세 균열(micro-cracks)과 파손 균열(damage-crack)을 구별한다. 결정적인 특징은 측정된 균열 폭이다. 그루브(groove) 안에 존재하는 (일반적으로 0.2mm 보다 작은) 미세 균열은 접착제에 의하여 채운 후 더 이상의 보수는 필요 없다. 파괴 균열은 낮은 정도의 에폭시 레진(epoxy resin)으로 채운다.
박락 (spalling)	그루브(groove)의 가장자리에서의 박락은 정의된 최대 길이와 깊이에 따라 각각 결정된다. 박락의 깊이가 5mm 보다 크고 길이가 20mm 보다 큰 경우 세그먼트의 보수는 필요하다. 그루브(groove)의 바닥이 온전할 때 시멘트 계열 모르타르로 채움으로써 가장 자리를 2차 성형 할 수 있다. 3cm 보다 큰 박락은 에폭시 레진으로 기존의 모양으로 보수해야한다.
파손 (breakage)	파손은 그루브(groove) 또는 접촉면 또는 erector cone, bolting gap에서 발견할 수 있다. 보수 대책은 시멘트 계열 모르타르로 채우고 성형하는 것이다. 작은 파손(5mm보다 작음)이나 정의된 특별 요구사항을 가지는 외부 영역은 더 이상의 보수는 필요 없다.
pockets	pockets은 groove basis에서 떨어져서 보강에 도달하지 못하거나 부분적으로 한계를 가지게 되면 파손과 같이 채워야만 한다.
Joints	링 조립을 마친 후 횡방향으로 어긋난 세그먼트와 어긋난 조인트, 세그먼트의 해체는 불가능하고 조인트를 채우거나 넓히는 수리 방법이 가능하다.

표 19. 세그먼트 손상(Georg, 2003)

등급	손상 특징
1	온도와 수축으로 인한 미세 균열
2	철근 노출 없는 표면 손상
3	철근 노출과 함께 표면 손상
4	Open, through-going cracks off mechanical impact
5	연결부에서 누수 발생

표 20. 도로터널의 건전도 진단(Hunag et al., 1999)

터널 분류		손상 수준	손상내용	교통 정책
즉시 위험하지 않은 경우	A	손상 없음	외관 검사로는 손상을 찾을 수 없는 경우	정상 운영
		손상 약간	외관 검사로 작은 손상은 발견되나 교통에 영향을 주지 않는 경우 (균열 폭 < 3mm, 균열 길이 < 5m)	
위험한 경우	B	손상 중간	박락, 철근부 노출, 누수, 세그먼트 조인트 변이 발생, 부분 교통 지장 (균열 폭 > 3mm, 균열 길이 > 5m)	규정에 따라 운영
	C	손상 심각	입구부의 사면 파괴, 주요 터널 구조물의 붕괴, 도로 웅기, 침수, 장대터널에서의 환기 및 라이닝 시스템 손상 전체 교통 지장	운영 불가

### 3.4 대만

대만에서는 터널의 건전도 진단을 위해 즉시 위험한 경우와 즉시 위험하지 않은 경우로 분류한다. 즉시 위험한 경우는 다시 규정에 따라 운영이 가능한 경우(B)와 운영이 불가한 경우(C)로 분류되며 그 상세한 내용은 표 20과 같다.

## 4. 결론 및 제언

본 연구에서는 국내·외 터널 상태평가 및 유지관리 기준에 대해 살펴보았다. 국내의 경우에는 터널의 유지관리시 사용하는 상태평가 세부지침 및 유지관리 매뉴얼에 대해 살펴보았고, 국외는 일본, 미국, 오스트리아, 대만 등의 터널 상태평가 및 유지관리 기준에 대하여 조사하였다. 국내 터널 상태 평가 및 유지관리 기준을 분석한 결과 NATM 터널 및 쉴드 TBM 터널에 대해 동일한 기준을 가지고 평가하고 있는 실정이며, 국외 터널 상태 평가 및 유지관리 기준을 분석한 결과, NATM 터널의 콘크리트 라이닝과 쉴드 TBM 터널의 세그먼트 라이닝의 재료를 동일한 콘크리트로 간주하기 때문에 쉴드 TBM 터널 유지관리에 특화된 별도의 기준은 없는 것으로 조사되었다. 그러나 NATM 터널과 쉴드 TBM 터널을 동일한 기준으로 평가하기에는

NATM 터널과 쉴드 TBM 터널이 설계 및 시공, 지보 구조, 변상원인이 상이하기 때문에 쉴드 TBM 터널에 적합한 상태평가가 마련되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. 한국시설안전공단(2004), "터널 유지관리 매뉴얼"
2. 한국시설안전공단(2010), "안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (터널편)"
3. 한국시설안전공단(2012), "안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 해설서(터널편)"
4. Federal Highway Administration(2003), "Effects Of Geosynthetic Reinforcement Spacing On The Behavior Of Mechanically Stabilized Earth Walls"
5. JSCE, 2005, "Interim report on construction loads on segment", JSCE, Japan. (in Japanese)
6. 日本トンネル技術協會(2000), "TBM 핸드북". 社団法人日本トンネル技術協會
7. Huang T.H., Ho T.Y., Chang C.T., Yao X.L., Chang Q.D., Lee H.C., 1999, Quick investigation and assessment on tunnel structure after earthquake, and the relevant reinforced methods. Report for Public Construction Commission, Taipei, Taiwan, Iida H., Hiroto T.,