

섀드 TBM 터널의 구조물 성능 평가 기준 개발

성주현¹ · 이유석² · 홍은수³ · 변요셉^{1*}

¹비회원, 한국시설안전공단

²정회원, 한국시설안전공단

³정회원, 한국과학기술원

Development of performance assessment criterion for structures of shield TBM tunnel

Joo-Hyun Seong¹, Yu-Seok Lee¹, Eun-Soo Hong², Yo-Seph Byun^{1*}

¹Korea Infrastructure Safety Corporation, 1443 Jungang-ro, Goyang-City 10223

²Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291 Daehak-ro, Daejeon 34141

ABSTRACT: In this study, the performance assessment criterion for reasonable maintenance of shield TBM tunnel was presented. The performance assessment items such as crack, leakage, breakage, spalling, exfoliation/detachment, efflorescence, quality condition, exposure of steel, carbonation, faulting step, bolts condition, drainage condition, ground condition, contact section condition and conduit condition were selected by analyzing domestic and foreign performance assessment criterions and investigating segment lining deterioration cases through the site investigation and in-depth inspection analysis result on the shield TBM tunnel. In addition, the reasonable weight using AHP (Analytic Hierarchy Process) were estimated.

Keywords: Shield TBM, Maintenance, Performance assessment criterion, AHP method

초 록: 본 연구에서는 국내에 활발히 적용되기 시작한 섀드 TBM 터널의 합리적인 유지관리를 위한 성능평가 기준을 제시하였다. 이를 위해 국내·외 성능평가 기준을 분석하였고, 국내 시공된 섀드 TBM 터널에 대한 현장조사 및 정밀안전진단 보고서 분석을 통한 변상사례를 조사하여 성능평가 항목을 균열, 누수, 파손, 박리, 층분리 및 박락, 백태, 품질상태, 철근노출, 탄산화, 단차, 볼트상태, 배수상태, 지반상태, 접촉부상태, 공동구 상태로 선정하였다. 또한 다중의사결정기법인 AHP 기법을 활용하여 선정된 성능평가에 대한 합리적인 가중치를 산정하였다.

주요어: 섀드TBM, 유지관리, 성능평가 기준, AHP 기법

1. 서 론

도심지 인구밀도가 증가함에 따라 지하공간의 이용은 필수적이 되고 있으며, 규모도 상·하수도, 전력, 통신구 등의 소규모 터널에서 근래에는 도로, 철도 및 지하철, 지하생활공간 등 대규모 터널이 증가하고

있다. 이러한 도심지 터널의 굴착방법으로 기계화 및 자동화 공법을 활용한 터널굴착 기술이 대두되고 있고, 그 중 섀드(Shield) TBM 터널은 다양한 지반조건에서 효과적으로 적용될 수 있어 해외선진국에서 활발하게 시공되고 있을 뿐 아니라 우리나라에도 여러 현장에 도입되고 있는 상황이다.

한편, 섀드 TBM 터널에서도 재래식 터널에서도 같이 여러 가지 내적 및 외적 요인에 의하여 다양한 형태의 변상이 발생한다. 변상이란 열화로 인한 재료의 내구성이 저하되는 상태와 손상 상태를 포함한다.

*Corresponding author: Yo-Seph Byun

E-mail: josep0103@kistec.or.kr

Received September 4, 2015; Revised September 16, 2015;

Accepted September 21, 2015

것으로서 쉴드 TBM 터널은 설계 및 시공, 지보구조, 변상원인 등이 재래식 터널과 상이하기 때문에 다른 기준으로 접근되어야 함에도 불구하고, 현재 쉴드 TBM 터널에 대한 점검 또는 진단의 체계적인 조사방법, 조사결과와 분류 및 평가기준 등이 미흡한 실정이다.

국내·외 평가 기준을 살펴보면 국내의 경우, 라이닝 성능평가와 터널주변 성능평가로 구분하여 실시하며, 성능평가 시 고려해야할 주요 평가항목은 라이닝 상태와 터널주변 상태로 구분한다. 여기서 라이닝 상태 평가 항목은 균열, 누수, 파손 및 손상, 재질열화(박리, 층분리 및 박락, 백태, 재료분리, 철근노출, 탄산화, 염화물) 등이고, 터널주변 상태 평가 항목은 배수상태, 지반상태, 갱문상태, 공동구 상태, 특수조건(도심지 토사터널, 전력구터널, 전차선을 설치한 터널, 추가점수 부여) 등이다(Korea Infrastructure Safety Corporation, 2004; Korea Infrastructure Safety Corporation, 2010; Korea Infrastructure Safety Corporation, 2012).

국외의 경우, 일본에서는 균열, 누수, 박리, 박락 등의 개개의 변상별로 평가를 실시하지 않으며, 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 및 보수·보강의 시급성과 연계되어 설정되어 있는 것이 특징이다(JSCE, 2005). 미국 연방고속도로국(FHWA)에서는 TBM 터널에서의 세그먼트 역시 콘크리트 구조물의 한 종류로서 변상 종류는 변상된 모습에 따라 박리, 균열, 박락, Pop-Outs로 분류하며 세그먼트 사이로 물이 새어나오는 누수까지 총 5가지로 분류하고 있다(FHWA, 2009). FHWA에서는 변상된 정도에 따라 변상 수준을 3단계로 나누고 각각의 기준을 제시함으로써 변상 수준별로 대응책을 마련하도록 하고 있다(Table 1). 오스트리아에서는 비엔나 대학의 Georg (2004)가 세그먼트에서 적용 가능한 변상을 공동, 균

Table 1. The defects of concrete structures (FHWA, 2009)

Defects	Defects state	Level	Description
Scaling	The gradual and continuing loss of surface mortar and aggregate	minor	Loss of surface mortar up to 6 mm deep, with surface exposure of coarse aggregates
		moderate	Loss of surface mortar from 6 mm to 25 mm deep, with some added mortar loss between the coarse aggregates
		severe	Loss of coarse aggregate particles as well as surface mortar and the mortar surrounding the aggregates. Depth of loss exceeds 25 mm
Cracking	A crack is a linear fracture in the concrete caused by tensile forces exceeding the tensile strength of the concrete.	minor	Up to 0.80 mm
		moderate	Between 0.80 mm and 3.20 mm
		severe	Over 3.20 mm
Spalling	Spalling is a roughly circular or oval depression in the concrete	minor	Less than 12 mm deep or 75 mm to 150 mm in diameter.
		moderate	12 mm to 25 mm deep or approximately 150 mm in diameter.
		severe	More than 25 mm deep and greater than 150 mm in diameter and any spall in which reinforcing steel is exposed.
Pop-Outs	These are conical fragments that break out of the surface of the concrete leaving small holes.	minor	Leaving holes up to 10 mm in diameter, or equivalent.
		moderate	Leaving holes between 10 mm and 50 mm in diameter, or equivalent.
		severe	Leaving holes 50 mm to 75 mm in diameter, or equivalent. Pop-outs larger than 75 mm in diameter are spalls.
Leakage	This occurs on a region on the concrete surface where water is penetrating through the concrete	minor	The concrete surface is wet although there are no drips.
		moderate	Active flows at a volume less than 30 drips/minute.
		severe	Active flows at a volume greater than 30 drips/minute.

열, 박락, 파손, Pockets, Joints까지 총 6가지 종류로 정리하였다(Table 2).

세그먼트 변상 기준은 5등급으로 분류하였는데, 등급이 가장 높은 5등급은 누수가 발생하는 경우이며 가장 등급이 낮은 1등급은 세그먼트에서 흔히 볼 수 있는 미세 균열이 발생하는 경우로 분류하고 있다. 다만에서는 터널의 건전도 진단을 위해 즉시 위험한

경우와 즉시 위험하지 않은 경우로 분류한다. 즉시 위험한 경우는 다시 규정에 따라 운영이 가능한 경우와 운영이 불가능한 경우로 분류된다.

이처럼 현재 국내·외 터널 성능 평가 및 유지관리 기준을 살펴보면 국내의 경우에는 NATM 터널 및 셴드 TBM 터널에 대해 동일한 기준을 가지고 평가하고 있는 실정이며, 국외의 경우에는 NATM 터널의 콘크리트 라이닝과 셴드 TBM 터널의 세그먼트 라이닝의 재료를 동일한 콘크리트로 간주하기 때문에 셴드 TBM 터널 유지관리에 특화된 별도의 기준은 없는 실정이다. 그러나 NATM 터널과 셴드 TBM 터널을 동일한 기준으로 평가하기에는 설계 및 시공, 지보구조, 변상원인이 상이하기 때문에 셴드 TBM 터널의 내구성 및 장기적인 사용성능을 향상시킬 수 있는 적합한 성능평가 기준의 정립이 필수적이다.

이에 본 연구에서는 재래식 터널과 차별화된 셴드 TBM 터널의 유지관리를 위한 성능평가 기준을 마련하고자 국내 시공된 셴드 TBM 터널에 대한 현장조사를 통해 변상사례를 조사하였고, 국내·외 관련 기준 분석 자료를 바탕으로 통계처리기법을 활용한 성능평가 항목 선정 및 가중치 산정을 통해 설계·시공특성을 고려한 합리적인 성능평가 기준을 제시하였다.

Table 2. An assortment of common damages on segments (Georg, 2004)

Defects	Description
Voids	The porosity of the surface is conditioned by number and size of voids (determining diameter of a single void) per rated surface area. By adherence to defined maximum values no repair is required. Measure: closure of voids by stopping with cement-bound mortar and final surface smoothing.
Cracks	Distinction between micro-cracks or damage-cracks. Dominant characteristic is the measured crack width. Micro-cracks (in general smaller 0,2 mm) within the groove need no repair since being filled by glue. Damage cracks within the groove may be penetrated with epoxy resin of low viscosity.
Spalling	Spallings within the edges of the groove are conditioned by depth and defined maximum length respective. Repair of spalling segment edges is necessary when > 5 mm depth and/or > 20 mm length. When the bottom of the groove is intact the edges can be postformed by stopping with cement-bound mortar and final forming. Spalling greater 3 cm needs repair with epoxy resin reconstructing the original geometry.
Breakage	breakages are to be distinguished as within the groove or within the contact area or within the erector cones and bolting gaps. Limitation of repair to size of depth (8, 7, 6, 5 mm) and corresponding length (50, 60, 70, 80 mm). Repair measure by stopping with cement bound mortar and final forming. Smaller breakage (<5 mm) and those which are outside areas with defined special requirements need no repair.
Pockets	Careful check of the segment is necessary. Pockets must get filled like breakage when they are out of the groove basis, locally limited and do not reach the reinforcement. Repair measure by cleaning the structure reaching the intact concrete zone and filled with cement bound mortar. Segments with more than one pocket are to be sorted out.
Joints	Staggered joints and lateral off-set of segments after finishing of ring application. No dismantling of segments is possible. Repair measure by widening and filling the joints.

2. 셴드 TBM 터널의 주요 변상

셴드 TBM 터널의 변상유형을 파악하기 위해 총 6개 현장조사 실시 및 정밀안전진단 보고서를 비교·분석하였으며, 이를 통해 셴드 TBM 터널에서 발생한 주요 변상 특성을 파악하였다.

2.1 현장 조사 결과

Table 3은 6개 현장의 개요를 보여주는데, 6개 현장에 대한 변상 유형 분석 결과, Fig. 1에서 보는 바와 같이 박리, 박락, 파손 및 손상, 철근노출, 들뜸, 볼트 결함, 단차 등의 기타변상에 비해 누수, 균열, 백태가 많이 발생한 것으로 나타났고, 주요 변상은 Fig. 2에서

Table 3. Summary of sites

No.	Sites	Summary of sites
1	Seoul Subway Line 7 (Chunui Station ~ Bucheon City Hall Station)	Length = 3,178 m Excavation width = 7.37 m
2	Bundang line (Wangsimni Station ~ Apgujeongrodeo Station)	Length = 846 m Excavation width = 8.06 m
3	Busan Subway Line 2 (Minrak Station ~ Centumcity Station)	Length = 840 m
4	Seoul Subway Line 9 (Dangsan Station ~ Yeouido Station)	Length = 3,614 m Excavation width = 7.80 m
5	Gwangju Subway Line 1 (Nangwangju Station ~ Geumnamrosaga Station)	Length = 1,425 m Excavation width = 7.50 m
6	Incheon International Airport Railroad (DMC station ~ Gimpo International Airport Station)	Length = 1,075 m Excavation width = 7.85 m

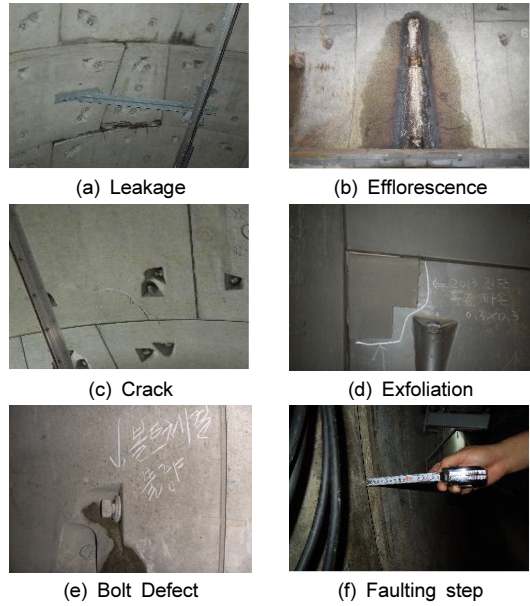


Fig. 3. Representative deteriorations at sites

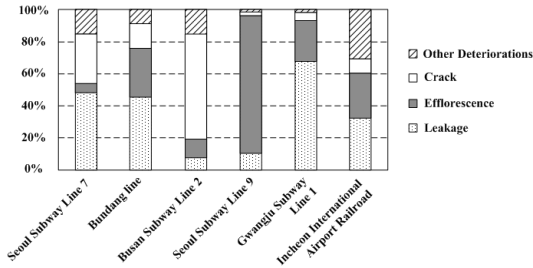


Fig. 1. Results of the Site Investigation

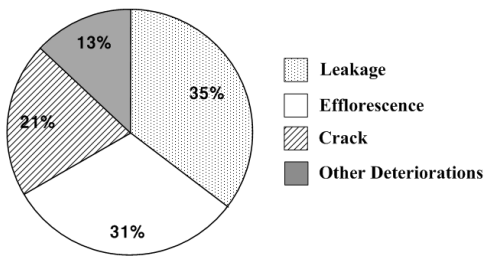


Fig. 2. Main Deterioration

보는 바와 같이 누수가 가장 많이 나타났으며 다음은 백태, 균열, 기타변상 순으로 나타났다.

Fig. 3은 총 6개 현장에서 발생한 대표적인 변상들을 보여준다.

2.2 정밀안전진단 보고서 분석 결과

셸드 TBM 터널에서 나타난 주요 변상은 누수, 백태, 균열이며 NATM 터널에서 나타나는 주요 변상을 비교하기 위해 기 수행된 47건의 NATM 터널 정밀안전진단 보고서를 토대로 각 터널별 변상항목을 조사하였다. 그 결과, Fig. 4에서 보는 바와 같이 균열, 누수, 박락, 백태 등의 순으로 변상이 발생한 것으로 나타났다.

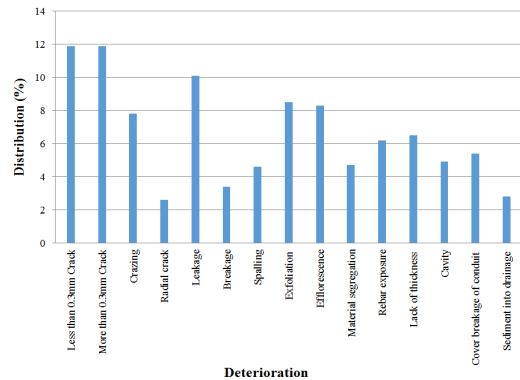


Fig. 4. Analysis Results using the In-depth Inspection Reports

2.3 종합 분석 결과

NATM 터널의 주요 변상 유형별 특성을 살펴보면 균열은 주로 터널 라이닝 단면 변상에 의해 나타나는 것으로서, 갭문 부근을 제외하면 보통 라이닝 내측에 발생한다. 누수는 배수공과 시공이음, 신축이음의 결합, 균열, 배면공동, 수막 등의 영향으로 인해 발생된다. 그러나 실드 TBM 터널의 변상 유형별 특성을 살펴보면 NATM 터널과 다른 원인에 의해 나타났는데, 균열은 대부분 세그먼트 모서리 부분 및 볼트 조임 구간에서 변상이 나타났다. 발생 원인은 굴착 방향으로 진행 시 잭추력에 의한 압축력으로 인하여 발생한 것으로 대부분 비구조적 균열인 것으로 판단된다. 누수는 배수공법 라이닝 시공불량 및 균열방치가 원인으로서 대부분이 뒷채움 주입공 및 세그먼트와 세그먼트 사이에서 가장 많이 발생하였고, 볼트부 및 세그먼트 균열부분에서는 적게 발생하였다. 백태는 누수 다음으로 많이 발생했는데, 백태는 누수가 발생한 곳에서 대부분 나타났으며, 세그먼트와 세그먼트 사이, 볼트부, 뒷채움 주입공에서 대부분 발생한 것으로 나타났다. 기타 변상으로는 박리, 박락, 파손 및 손상, 볼트 결합, 들뜸, 철근노출, 단차 등이 있었는데, 이는 시공시 및 공용중 라이닝의 변형이나 변위로 인해 발생한 것으로 판단된다.

이와 같이 실드 TBM 터널의 변상은 대부분 세그먼트와 관련된 문제로서 설계 및 시공, 지보구조, 변상원인이 서로 상이한 NATM 터널과 동일한 기준으로 유지관리하기에는 합리적이지 않은 것으로 판단된다.

3. 실드 TBM 터널의 성능평가를 위한 항목 선정 및 가중치 산정

3.1 평가항목 선정

일반적으로 NATM 터널과 실드 TBM 터널은 굴착 방법에 차이가 있으나 콘크리트 구조물이라는 공통점

이 있다. 따라서 실드 TBM 터널의 유지관리 항목을 선정하기 위해서는 NATM 터널의 유지관리 항목 중 콘크리트 구조물 특성에 따른 항목들을 모두 포함하면서 실드 TBM 터널의 세그먼트 라이닝 특성을 반영한 유지관리 항목들을 추가하는 것이 바람직할 것으로 판단되어 실드 TBM 터널 특성을 고려한 성능평가 기준 제시를 위한 항목을 선정하였다.

이를 위해 첫째로 NATM 항목에서 재료분리와 염화물 변상 항목을 품질상태 항목으로 통합하였고, 기존의 갭문 상태 항목은 현재 운용중인 실드 TBM 터널의 경우 독립터널이 아니라 일부 구간에 적용되는 현황을 고려하여 접속부 상태 항목으로 변경하였다. 또한 도심지 토사터널, 전력구터널, 전차선을 설치한 터널에서 낙수 및 동결위험이 있는 특수조건 같은 경우, 국내 실드 TBM 터널의 현황을 고려시, 터널 종류에 대한 구분은 불필요할 것으로 사료되어 제외시켰다.

둘째로 세그먼트 라이닝이 공장 제작방식인 실드 TBM 터널 특성을 고려한 항목 선정을 위해 발생할 수 있는 변상들을 살펴본 결과, 제작된 세그먼트들을 연결하기 위하여 사용되는 볼트가 손상되거나 체결하지 않는 경우가 발생할 수 있으며, 세그먼트가 조립시 단차가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 세그먼트 조립 시 지수재를 설치하게 되는데 단차 및 작업자의 숙련도 부족 등과 같은 이유로 인해 지수재가 손상되어 누수가 발생할 수도 있는 것으로 나타났다. 따라서 단차, 볼트 결합, 볼트 미체결, 지수재 손상의 4가지 항목을 유지관리 항목으로 추가 선정하였으나, 볼트미체결도 볼트상태에 대한 평가로 판단되어 볼트결합과 함께 볼트상태로 통합하였고, 지수재 손상은 확인이 어렵고 누수와 중복 가능성이 있어 항목에서 제외시켜 최종적으로는 Table 4에서 보는 바와 같이 단차와 볼트상태를 추가 항목으로 선정하였다.

3.2 가중치 산정을 위한 AHP 분석

실드 TBM 터널 유지관리 항목별 가중치를 산정하

Table 4. The proposed Evaluation Items of Shield TBM

	NATM	Proposed Shield TBM
Items	Crack	Crack
	Leakage	Leakage
	Breakage	Breakage
	Spalling	Spalling
	Exfoliation and Detachment	Exfoliation and Detachment
	Efflorescence	Efflorescence
	Exposure of Steel	Exposure of Steel
	Carbonation	Carbonation
	<u>Material Segregation</u>	<u>Quality Condition</u>
	<u>Chloride</u>	-
	-	<u>Faulting step</u>
	-	<u>Bolt condition</u>
	Drainage Condition	Drainage Condition
	Ground condition	Ground condition
	<u>Portal condition</u>	<u>Contact Section Condition</u>
Conduit condition	Conduit condition	
Special conditions	-	

기 위해 다중의사결정기법인 AHP (Analytic Hierarchy Preocess: 계층화 분석) 기법을 활용하였다. AHP 기법은 Thomas Saaty가 개발한 기법으로 적용방법이 용이하고 계층적 평가구조에 따라 척도산정, 가중치 산정 절차가 이론적으로 높기 평가되고 있으므로, 각 분야의 집단 의사결정 지원시스템으로 광범위하게 활용되고 있다(Satty, 1996). AHP 기법은 전문가들의 집단 의사결정을 체계화할 수 있는 방법으로 의사결정 문제를 계층화한 후 상위 계층에 있는 평가 요소의 관점에서 하위 계층에 있는 요소들의 상대적 중요도를 쌍대 비교에 의해 측정한다. 이러한 방식을 통해 AHP 기법은 궁극적으로 최하위 계층에 있는 대안들의 가중치 또는 우선순위를 구할 수 있도록 한다. 따라서 AHP는 정량적인 요소뿐만 아니라 정성적인 요소도 동시에 평가할 수 있으며, 평가자로 하여금 쌍대비교를 통해서 한번에 둘씩 비교하게 함으로 평가를 수월하게 해준다. 또한 평가자의 의견에 관한 일관성을

검증할 수 있는 방법이 있어서 평가결과의 신뢰성을 높일 수 있다(Jung and Park, 2002).

본 연구에서는 AHP 기법을 적용한 쉴드 TBM 터널 평가 항목의 계층구조를 Fig. 5와 같이 구성하였다. 이 구조는 평가기준이라는 최상의 계층 아래 2개의 하부 계층으로 구성되어 있는데, 이는 각 계층에 속해 있는 항목들에 대해서 1대 1 쌍대비교를 통해 각 계층 별로 항목들의 상대적 가중치를 얻게 된다.

AHP 계층도를 바탕으로 쌍대비교를 위한 설문지를 작성하여, 설계·시공 분야 10명, 연구 분야 10명, 진단 분야 11명, 유지관리 분야 21명을 포함한 총 52명의 터널 전문가로부터 설문조사를 실시하였다. 설문 분석을 위해 AHP 전용 소프트웨어인 Expert Choice 프로그램을 사용하였다. 설문조사를 통해 얻어진 평가자의 개개인의 항목별 가중치는 Satty (1980)의 이론을 적용하였다. Satty (1980)는 일관성을 평가하기 위한 일관성 지수(Consistency Index, CI)를 제안하고 0.1 이하일 경우 합리적인 일관성을 갖는 것으로 제안하였다. 이에 본 연구에서는 Feedback 과정을 거친 후에도 일관성이 부족한 5명의 설문 결과를 제외한 일관성 지수가 0.1 이하인 47명의 설문 결과만을 사용하여 가중치를 설정하였다.

AHP 분석 결과, Table 5와 Fig. 6에서와 같이 일반

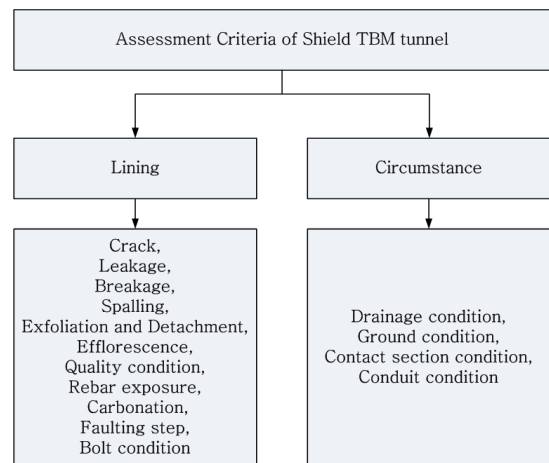


Fig. 5. Hierarchy Model of AHP

적으로 터널 유지관리 시 중요하게 관리해야 하는 균열, 누수, 철근노출 등이 중요 항목으로 나타났고, 터널에서 흔히 볼 수 있으나 안정성에 큰 영향을 주지 않는 박리나 백태 등은 가중치가 낮은 항목으로 나타났다. 특히, 누수가 균열보다 높은 가중치를 갖는 것으로 나타났는데, 이는 셸드 TBM 터널에서 누수의 발생 빈도가 다른 변상에 비해 상대적으로 매우 높기 때문에 AHP 설문과정에서 중요한 항목으로 인식된 것으로 판단된다.

또한, 일반적으로 균열 및 누수 발생 위치에 따라 위험성이 다르기 때문에 균열과 누수 항목은 세부기준에 대한 설문도 추가적으로 실시하였다. 균열의 경우는 세그먼트 중앙부와 세그먼트 모서리 및 볼트 연결부로 구분하였고, 누수의 경우는 관통부 누수(세그먼트 연결부, 볼트 연결부, 뒤채움 주입공)와 손상부 누수(균열부 누수)로 구분하여 발생하는 위치별 상대적인 중요도 조사를 실시하였다. 그 결과, Table 6에서와 같이 균열의 경우에는 세그먼트 중앙부와 세그먼

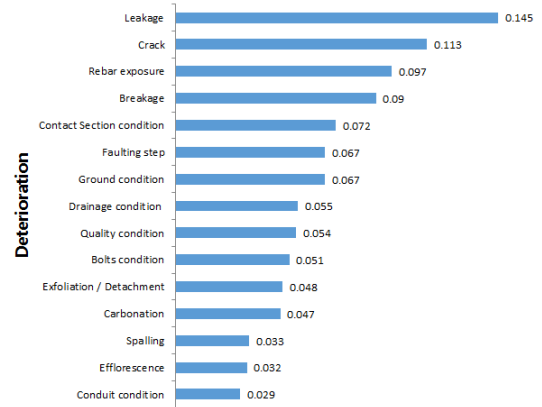


Fig. 6. The Weights by the Priorities

트 모서리 및 볼트 연결부의 상대적 중요도는 약간의 차이를 보였으나 누수의 경우에는 관통부나 손상부에 따른 차이가 거의 없는 것으로 조사되었다.

4. 셸드 TBM 터널의 성능평가 기준 제안

NATM 터널 기준은 균열, 누수, 파손 및 손상, 재료 열화에 대해 라이닝 평가를 실시한 후에 산정된 라이닝 결함점수를 총 점수 36점으로 나누어 라이닝 결함 지수(F)를 산정한다. 그리고 배수상태, 지반상태, 갭문 상태, 공동구상태에 대한 터널주변 평가와 특수조건에 대한 평가를 실시한 후에 산정된 결함점수를 라이

Table 5. Results of Weights Analysis using AHP

Evaluation Items	Weights
Crack	0.113
Leakage	0.145
Breakage	0.090
Spalling	0.033
Exfoliation and Detachment	0.048
Efflorescence	0.032
Exposure of Steel	0.097
Carbonation	0.047
Quality Condition	0.054
Drainage Condition	0.055
Ground Condition	0.067
Contact Section Condition	0.072
Conduit condition	0.029
Faulting step	0.067
Bolts Condition	0.051
Total	1.000

Table 6. The Relative Importance for Initiation Section

Evaluation Items	Initiation Section	Relative Importance
Crack	Mid-span of segment	0.390
	Edge of segment and Bolted Connectors	0.610
	Total	0.39
Seepage	Leakage of penetrating location	0.479
	Leakage of damaged location	0.521
	Total	0.869

널 결합점수와 더하고 이를 총 점수 43점으로 나누어 터널 결합지수(F)를 산정한다(Korea Infrastructure Safety Corporation, 2010). 따라서 쉴드 TBM 터널의 결합점수 총점은 NATM 터널 기준과 일관성을 유지하기 위해 43점으로 결정하여 성능평가기준을 제안하였다.

일반적으로 터널에서 가장 중요한 변상 요인은 균열 항목으로서 NATM 터널 기준에서도 높은 가중치를 갖는 항목이다. 그러나 쉴드 TBM 터널에 대한 AHP 분석 결과에서는 앞서 설명한 것과 같이 누수가 균열보다 더 높은 가중치를 가지는 것으로 나타났다. 이는 쉴드 TBM 터널에서 누수의 발생빈도가 다른 변상에 비하여 상대적으로 매우 높아 AHP 설문과정에서 더 중요한 항목으로 인식된 것으로 판단된다. 이에 연구진과 전문가 자문그룹은 변상 항목의 발생 빈도와 중요도에 대한 재검토를 실시하였다. 쉴드 TBM 터널에서 누수의 발생빈도 및 중요도를 고려시 NATM 터널보다 가중치를 상향조정하는 것이 필요하

나 균열보다는 낮게 산정하는 것이 합리적인 것으로 판단하여, 누수의 평가점수에는 6점을 부여하고 균열은 누수의 2배인 12점을 부여하는 것으로 조정하여 합리적인 기준을 제시하고자 하였다. 또한 공장에서 제작하는 쉴드 TBM 터널의 세그먼트 라이닝의 경우, 철근노출이 철근 부식을 일으켜 구조물의 내구성을 악화시키는 주요 원인이므로 파손에 대한 위험성보다 철근노출에 의한 위험성이 중요하므로 파손 항목은 3점에서 2점으로, 철근노출 항목은 3점에서 4점으로 조정하였다. 그 외의 항목들은 가중치대로 부여하였다. Table 7은 제안된 쉴드 TBM 터널에서의 항목별 평가점수와 NATM 터널에서의 각 항목별 평가점수를 보여준다.

5. 결론

쉴드 TBM 터널의 유지관리를 위한 성능평가 기준을 마련하고자 국내 시공된 쉴드 TBM 터널에 대한 현장조사를 통해 변상사례 및 국내·외 관련 기준 분석 자료를 바탕으로 통계처리기법을 활용한 성능평가 항목 선정 및 가중치 산정을 통해 합리적인 성능평가 기준을 제시한 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 쉴드 TBM 터널의 변상 유형을 파악하기 위해 총 6개 현장조사 실시 및 정밀안전진단 보고서를 비교·분석한 결과, 주요 손상은 누수가 가장 많이 나타났으며, 다음은 백태, 균열, 기타손상(박리, 박락, 파손 및 손상, 철근노출, 들뜸, 볼트결함, 단차) 순으로 나타났다.
2. 쉴드 TBM 터널의 성능평가 항목 선정시, 세그먼트 라이닝이 공장 제작방식인 특성을 고려하여 평가 항목을 선정하였고, 최종적으로 균열, 누수, 파손, 박리, 층분리 및 박락, 백태, 품질상태, 철근노출, 탄산화, 단차, 볼트상태, 배수상태, 지반상태, 접촉 부상태, 공동구상태로 선정하였다.
3. 다중의사결정기법인 AHP 기법을 활용하여 쉴드

Table 7. A Comparison of evaluation Items score of NATM and Proposed Shield TBM

Evaluation Items	NATM	AHP Shield TBM	Proposed Shield TBM
Crack	13	5	12
Leakage	5	6	6
Breakage	3	4	2
Spalling	1	1	1
Exfoliation and Detachment	3	2	2
Efflorescence	1	1	1
Exposure of Steel	4	4	4
Carbonation	3	2	2
Quality Condition	3	2	2
Drainage Condition	2	2	2
Ground condition	3	3	2
Contact Section Condition	1	3	2
Conduit condition	1	1	1
Faulting step	-	3	2
Bolts Condition	-	2	2
Total score	43	43	43

TBM 터널 성능평가 항목별 가중치를 산정한 결과, 일반적으로 터널 유지관리 시 중요하게 관리해야 하는 균열, 누수, 철근노출 등이 중요 항목으로 나타났고, 터널에서 흔히 볼 수 있으나 안정성에 큰 영향을 주지 않는 박리나 백태 등은 가중치가 낮은 항목으로 나타났다. 특히, 누수가 균열보다 높은 가중치를 갖는 것으로 나타났는데, 이는 쉴드 TBM 터널에서 누수의 발생빈도가 다른 변상에 비해 상대적으로 매우 높기 때문에 AHP 설문과정에서 중요한 항목으로 인식된 것으로 판단된다.

4. AHP 기법 결과를 토대로 변상 항목의 발생 빈도와 중요도에 대한 재검토를 실시하여 선정된 쉴드 TBM 터널 성능평가 항목에서 누수의 평가점수에는 6점을 부여하고, 터널에서 가장 중요한 변상 요인인 균열은 누수의 2배인 12점을 부여하는 것으로 조정하여 최종 쉴드 TBM 터널의 성능평가 기준을 제안하였다.
5. 최종적으로 쉴드 TBM 터널의 성능평가 기준을 균열 12점, 누수 6점, 파손 2점, 박리 1점, 층분리 및 박락 2점, 백태 1점, 품질상태 2점, 철근노출 4점, 탄산화 2점, 단차 2점, 볼트상태 2점, 배수상태 2점, 지반상태 2점, 접속부상태 2점, 공동구상태 1점으로 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 한국시설안전공단 “특수굴착터널(쉴드터널) 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. Georg, J.H., Davorin, K. (2004), Selection of segmental lining system and repairclassification. In: Proceedings of the CSSE Symposium DAMOCS. Dubrovnik, pp. 179-186.
2. Federal Highway Administration (2009), Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements, pp. 4-1-4.6
3. JSCE (2005), Interim report on construction loads on segment, JSCE, Japan. (in Japanese)
4. Jung, B.D, Park, Y.J. (2002), “A study of determining priorities of ITS services using analytic hierarchy process”, Journal of Korea Planning Association, Korea Planning Association, Vol. 37, No. 6, pp. 138-139.
5. Korea Infrastructure Safety Corporation (2004), Tunnel Management & Maintenance Manual.
6. Korea Infrastructure Safety Corporation (2010), Guidelines for Safety Inspection and indepth-inspection safety. (Tunnel)
7. Korea Infrastructure Safety Corporation (2012), Safety Inspection & In-depth Safety Inspection Guidelines. (Tunnel)
8. Saaty, T.L. (1980), The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York.
9. Saaty, T.L. (1996), Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process, RWS Publications.