

계층 분석적 의사결정과 암반 공학 시스템에 의한 저심도 암반터널에서의 암반거동 유형 정량화 방법론

유영일¹⁾, 김만광²⁾, 송재준³⁾*

Methodology to Quantify Rock Behavior in Shallow Rock Tunnels by Analytic Hierarchy Process and Rock Engineering Systems

Yoo, Young-Il, Kim, Man-Kwang, Song, Jae-Joon

Abstract For the quantitative identification of rock behavior in shallow tunnels, we recommend using the rock behavior index (RBI) by the analytic hierarchy process (AHP) and the Rock Engineering Systems (RES). AHP and RES can aid engineers in effectively determining complex and un-structured rock behavior utilizing a structured pair-wise comparison matrix and an interaction matrix, respectively. Rock behavior types are categorized as rock fall, cave-in, and plastic deformation. Seven parameters influencing rock behavior for shallow depth rock tunnel are determined: uniaxial compressive strength, rock quality designation (RQD), joint surface condition, stress, ground water, earthquake, and tunnel span. They are classified into rock mass intrinsic, rock mass extrinsic, and design parameters. An advantage of this procedure is its ability to obtain each parameter's weight. We applied the proposed method to the basic design of Seoul Metro Line ○ and quantified the rock behavior into RBI on rock fall, cave-in, and plastic deformation. The study results demonstrate that AHP and RES can give engineers quantitative information on rock behavior.

Key words Rock behavior, Analytic hierarchy process (AHP), Rock Engineering Systems (RES), Fuzzy Delphi method (FDM), Cave-in, Rock fall, Plastic deformation, Rock behavior index (RBI)

초 록 저심도 터널 굴착시 예상되는 암반 거동을 정량적으로 파악하기 위해 계층 분석적 의사결정 방법과 암반 공학 시스템 방법을 적용하여 암반 거동 지수를 산정하였다. 복잡하고 조직화되지 않은 암반 거동을 효과적으로 결정하기 위해 쌍대 비교 매트릭스를 이용하는 계층 분석적 의사결정 방법과 상호 영향 매트릭스를 이용하는 암반 공학 시스템 방법을 적용하였고, 전문가 의견의 불확실성을 극복하고자 퍼지 델파이 방법을 적용하였다. 저심도 암반 터널 굴착 시 예상되는 암반 거동 유형으로 소성 변형, 낙반과 낙석을 제시하였다. 각각의 암반 거동 유형을 결정하기 위해 일축압축강도, 암질 지수와 절리 조건을 포함하는 암반 내생적 매개변수, 응력, 지하수와 지진 조건을 포함하는 암반 외생적 매개변수와 굴착 매개변수를 고려하였다. 이를 서울 지하철 ○호선 ○공구 설계에 적용하여 예상되는 암반 거동 유형을 정량적인 암반 거동 지수로 제시하였다.

핵심어 암반 거동, 계층분석적 의사결정, 퍼지 델파이 방법, 암반공학 시스템, 낙반, 낙석, 소성변형, 암반 거동 지수

1. 서론

암반 거동은 암반 자체 특성, 외부 요인과 설계 요인에 의해 복합적으로 거동한다고 볼 수 있으며, 다양한 요인을 고려한 암반 거동별 정량화 지수 산정이 필요하다. 현재까지 암반 거동과 그에 영향을 미치는 매개변수 산정에 대한 많은 연구가 진행되었다.

Martin et al. (2003)은 GSI 값, 암반강도 및 현상용

¹⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 박사과정

²⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정

³⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 조교수

* 교신저자 : songjj@snu.ac.kr

접수일 : 2008년 11월 21일

심사 완료일 : 2008년 12월 5일

게재 확정일 : 2008년 12월 5일

력을 근거로 2가지 파괴모드, 즉 응력지배적인 거동과 중력지배적인 거동을 제시하였다. Goricki et al. (2004)는 암반조건을 결정된 후 지하수 조건, 절리 조건, 지반 응력, 터널형상, 크기 및 위치를 고려하여 암반거동유형을 11가지로 분류하였다. Palmstrom & Stille (2007, 2008)는 응력조건과 터널 폭과 블록크기 비를 이용하여 응력지배적인 거동, 중력지배적인 거동, 그리고 물에 의해 영향을 받는 거동으로 크게 구분한 후 14가지로 다시 분류하였다. Singh et al. (2007)은 암반 자체 특성인 Q-값, 탄성계수, 일축압축강도와 예상 변형률 혹은 계측 변형률로부터 압착 거동(squeezing)을 정량화하였다. Cai et al. (2004)은 암반 분류와 터널 설계 및 안정성 분석에 적용에 필요한 매개변수를 암반 내생적 매개변수(rock mass intrinsic parameters), 암반 외생적 매개변수(rock mass extrinsic parameters), 굴착 매개변수(excavation parameters)로 나누었다. Poschl & Kleberger (2004)는 프로젝트 특성에 맞는 정량적인 암반 분류 및 암반 거동 평가를 위한 인자를 암반 물성과 주변 요인으로 크게 구분하였고, 암반물성과 외부요인의 상호작용이 무지보 상태의 암반거동을 지배한다고 하였다.

본 연구에서는 저심도 암반 터널에서 예상되는 암반 거동 유형을 규정하고 그에 영향을 미치는 매개변수에 경험이 많은 전문가 집단의 의사결정을 이용하여 가중치를 부여한 후 암반 거동을 정량화하는 방법론을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 저심도 암반 터널에 예상되는 암반 거동 유형을 세 가지로 나누었다: 낙반(rock fall), 낙석(cave-in); 그리고 소성 변형(plastic deformation). 암반 거동에 영향을 미치는 매개변수를 결정하기 위해 기존 암반분류에 고려되는 매개변수들 중 대표성을 지니면서 터널 굴착 시 가장 큰 영향을 미치고 설계 시 고려하기 용이한 매개변수를 선택하여 7개로 단순화시켰다: 암반 거동 유형에 영향을 미치는 인자로 암반 내생적 매개변수로 일축압축강도; 압질지수(RQD); 절리 조건; 외생적 매개변수로 응력조건; 지하수조건; 지진조건; 굴착 매개변수로 터널 폭. 암반 거동은 이 매개변수들에 의해 복합적으로 거동한다고 볼 수 있으며 이를 고려하여 암반 거동 유형을 결정하는 것이 중요하다. 정량적인 암반 거동 지수를 산정하기 위해서는 터널 굴착 시 암반 거동에 영향을 주는 매개변수들의 가중치(weights)를 결정하여야 한다. 매개 변수 가중치를 구하는 방법으로는 Hudson(1992)이 제안한 암반공학 시스템(Rock Engineering Systems, RES) 방법, Saaty (1980)가 제시한 계층 분석적 의사결정 방법(analytic hierarchy process, AHP), 그리고 Saaty (1996)가 제시한 매개변수 간의 상호 의존성과 피드백을 고려한 네트워크 분석적 방

법(analytic network process, ANP)등이 있다. Benardos & Kaliampakos (2004)는 암반 공학 시스템 방법을 이용하여 TBM 굴착시 안정성에 영향을 미치는 매개변수의 가중치를 구한 후 손상 지수를 산정하여 위험도를 평가하고자 하였다. Chen & Liu (2007)은 계층 분석적 의사결정방법과 퍼지 델파이 방법(fuzzy Delphi method, FDM)을 적용하여 RMR 분류의 각 인자들의 가중치를 산정하여 기존 RMR 분류와 비교하였다. Ayalew et al. (2005)는 계층 분석적 의사결정방법으로 산사태에 영향을 미치는 인자들의 가중치로부터 산사태 민감도 맵을 작성하여 로지스틱 회귀분석과 비교하였다. Liu & Chen (2007)은 암반 사면 안정성 평가를 위한 암반 분류에 영향을 미치는 인자들의 가중치를 계층 분석적 의사결정방법과 퍼지 델파이 방법을 이용하여 구한 후 선형 판별 분석과 비교하였다. Neaupane & Piantanakulchai (2006)은 네트워크 분석적 방법으로 산사태에 영향을 미치는 매개변수들의 가중치를 산정하여 산사태 위험 구역을 맵핑하고자 하였다. 본 연구에서는 최근에 암반 공학 분야에서 매개 변수의 가중치로부터 최적의 의사결정을 내리기 위해 최근 적용되고 있는 계층 분석적 의사결정 방법과 암반 공학 시스템 방법을 적용하여, 암반 터널 굴착 시 예상되는 암반거동에 영향을 미치는 매개변수의 가중치를 구하여 암반 거동 지수(rock behavior index)로 암반 거동을 정량화하고자 하였다. 이를 서울 지하철 〇호선 〇공구 설계에 적용하여 예상되는 암반 거동 유형을 파악하고자 하였다.

2. 터널 굴착 시 예상되는 암반 거동 유형 및 매개변수 결정

2.1 기존 암반분류법 인자 고찰

Poschl & Kleberger (2004)는 프로젝트 특성에 맞는 정량적인 암반 분류 및 암반 거동 평가를 위해 암석학적 요인과 불연속면 특성을 고려한 암반 물성과 지하수, 현장 응력 분포 등의 주변 요인으로 크게 구분하고 각 항목에 대하여 상세히 기술하여 암반 종류(Rock mass type, RMT)와 그에 따른 암반 거동 및 리스크 요인을 제시하였으나 설계 단계에서 상세히 기록하기에는 현실적으로 어려움이 많다. Cai et al. (2004)은 암반 분류에 대하여 암반 내생적 매개변수, 암반 외생적 매개변수, 굴착 매개변수로 나누었고, 암반 내재적 매개변수는 무결암과 관련된 매개변수와 절리와 관련된 매개변수로 다시 나누었다(Table 1). 이는 많은 연구자들이 암반 거동인자로서 제시한 주요 인자를 포괄적으로 고려할 수 있다는 장점이 있다. 이 매개변수와 기존 경험적 암

반분류법에 제시된 인자들을 상호 비교하면 Table 2와 같다. RMR 분류법에서는 외생적 매개변수로 지하수만 고려하고 있고, 내생적 매개변수 중 절리 조건이 무결암 조건보다 큰 비중을 차지하고 있다. Q 분류법은 외생적 매개변수로 지하수 조건과 응력 조건을 고려하고 있고, 내생적 매개변수로 절리 조건만을 고려하고 있다. GSI 분류법은 외생적 매개변수는 고려하지 않고 내생

적 변수 중 절리 조건만을 고려하고 있다. RMi 분류법은 외생적 매개변수는 고려하지 않고 내생적 변수인 절리 조건과 무결암 조건을 고려하고 있다.

터널 굴착 시 영향을 주는 지반공학적 매개변수들의 복잡성과 불확실성(uncertainty)으로 인해 경험적 설계 방법이 지금까지 널리 사용되고 있다. 이 방법들의 단점은 각 매개변수들의 고정된 가중치만을 고려하여 해

Table 1. Group of Parameters affecting rock behaviors (M. Cai, 2004)

Group of parameters		Individual parameters
Rock mass inherent parameters	1. Intact rock parameters	Strength of intact rock
		Rock modulus
		Number of joint sets
	2. Joint parameters	Joint frequency
		Joint condition (roughness, infilling)
		Joint size/length, persistency
		Joint orientation
	3 Weak zones or faults	Width
		Orientation
		Gouge material (modulus and strength)
External parameters		In situ stress
		Ground water
Construction parameters (excavation parameters)		Excavation size
		Excavation shape
		Construction method
		Blasting damage

Table 2. Comparison among parameters of rock mass classifications and parameters suggested by Cai et. al (2004)

RMR	Cai et. al (2004)	Q-system	Cai et. al (2004)	GSI	Cai et. al (2004)	RMi (Palmström, 1995)	Cai et. al (2004)
RQD	Inherent / joint	RQD	Inherent / joint	Block volume	Inherent / joint	UCS	Inherent / intact
Joint spacing	Inherent / joint	Number of joint sets (Jn)	Inherent / joint	Joint condition	Inherent / joint	Joint roughness (jR)	Inherent / joint
Joint condition	Inherent / joint	Joint roughness (Jr)	Inherent / joint			Joint alteration (jA)	Inherent / joint
Ground water	External	Joint alteration (Ja)	Inherent / joint			Joint size factor (jL)	Inherent / joint
UCS	Inherent / intact	Ground water (Jw)	External			Block Volume (Vb)	Inherent / joint
Joint orientation	Inherent / joint	Stress reduction factor (SRF)	External				

당 지역의 특성을 반영하지 못하고 있다. 또한, 기존의 암반분류법은 세 가지 주요 매개변수 모두를 다 고려하지 못하고 있어, 암반 거동 유형을 결정하는 데 있어 한계가 있다. 더구나, 기존의 암반 분류법은 암반 거동을 예측하기에는 한계가 있다.

2.2 기존 암반 거동 유형 고찰

터널굴착 시 예상되는 암반거동에 관한 연구는 Martin et al. (1999, 2003)과 Kasier et al. (2000)에 의한 RMR, 일축압축강도와 응력조건에 따라 암반 거동을 결정한 연구와 Goricki et al. (2004)와 Palmstrom & Stille (2007)의 암반조건을 결정한 후 지하수조건, 절리 조건, 지반응력, 터널형상 및 위치를 고려한 암반거동을 결정한 연구로 대별할 수 있다 (Table 3).

Martin et al. (1999)은 RMR, 지반응력, 그리고 일축 압축강도간의 관계로부터 취성 파괴 영역 및 터널 불안정 영역을 제시하였다. Kaiser et al. (2000)은 Martin et al. (1999)이 제시한 도표에 굴착으로 인한 유도 응력에 따른 취성 파괴거동 및 터널 불안정 영역을 추가하여 제시하였다. Martin et al. (2003)은 리스크 평가를 위해 GSI를 최우선하는 결정인자로 하고 응력조건에 따라 (1)응력으로 유도되는 소성파괴, (2)중력에 의

해 지배되는 블록파괴, (3)응력으로 유도되는 취성 파괴로 구분하였다. 그에 따라 소성파괴가 예상되는 경우는 소성파괴 영역과 변형률을 제시하였고, 취성 파괴가 예상되는 경우는 취성 파괴심도 및 그에 따라 발생하는 파괴에너지를 제시하였다.

Goricki et al. (2004)는 설계단계에서 암반종류와 그에 따른 암반 거동 종류를 예측하여 굴착방법 및 지보 방법을 결정하도록 하였다. 암반종류를 결정하기 위한 인자로는 불연속면, 지질구조, 입자 크기, 공극, 변질/풍화정도 등을 포함한다. 즉, 광물학적인 매개변수와 공학적인 매개변수 및 불연속면 특징을 종합하여 암반종류를 결정한다. 암반 종류가 결정되면 굴착방향에 대한 불연속면의 상대적 방향, 지하수 조건, 응력상태, 그리고 터널의 크기, 형태 및 위치를 고려하여 암반 거동 형태를 11가지로 제시하였다. Palmstrom & Stille (2007)은 먼저 암반 조건을 분류한 후 응력, 지하수 조건 및 굴착특성에 따라 14가지 지반거동 유형을 제시하였고, 터널 폭에 대한 상대적인 블록 크기 비인 연속성 지수와 응력 및 지하수 조건에 따른 지반 거동 분류 도표도를 제안하였다.

하지만, 기존의 암반 거동 유형을 결정하는 과정은 정성적이고 주관적이어서 정량적인 산정 방법이 필요하다.

Table 3. Comparison on main parameters on rock behaviors

Researchers	Main parameters	Rock behavior type
Martin et al. (1999)	RMR UCS Ground stress	10 types: stable, rock falls, cave-in, buckling, rupturing, spalling /slabbing, rockburst, plastic behavior, squeezing or swelling, swelling clay
Kaiser et al. (2000)	RMR UCS Ground stress Induced stress	Low mining-induced stress Intermediate mining-induced stress High mining-induced stress
Martin et al. (2003)	GSI UCS Ground stress	Stress-induced plastic yielding Gravity-induced controlled block movement Stress-induced brittle spalling
Goricki et al. (2001)	Rock type Ground water Joint orientation Ground stress Tunnel size, shape	11 types: stable, stable with the potential of discontinuity controlled block fall, shallow shear failure, deep-seated shear failure, rockburst, buckling, shear failure under low confining pressure, ravelling ground, flowing ground, swelling, Heterogeneous rock mass with frequently changing deformation characteristics
Palmstrom & Stille (2007)	Rock type Ground water Joint orientation Ground stress Tunnel size, shape	Gravity-induced (4 types): stable, block falls, cave-in, running ground Stress-induced (6 types): buckling, rupturing from stresses, slabbing, rockburst, plastic behavior, squeezing Groundwater influenced (4 types): raveling from slaking, swelling, flowing ground, water ingress

2.3 저심도 암반터널에서 예상되는 암반 거동 유형과 매개변수

암반 거동은 암반 자체 특성과 지반응력, 지하수, 굴착조건과 같은 외부요인의 상호작용에 의하여 결정된다. Table 1에 제시된 암반 거동 결정에 영향을 주는 인자를 모두 고려하는 것은 현실적으로 불가능하다. 즉, 설계 단계에서 터널 선형 문제, 지질 조사의 어려움과 공사비 문제 등으로 인하여 매개변수를 상수로 취급하여야 할 경우가 흔히 발생한다.

암반 내생적 변수 중 무결암의 일축압축강도와 탄성계수는 상호 독립적이라고 보기 힘들기 때문에 일축압축강도만 고려하였고, 절리 조건은 절리 방향성은 일반적으로 주절리군과 터널 선형과 불리한 방향은 회피할 수 있도록 터널 선형계획을 마련하기 때문에 절리면 상태와 절리 빈도와 관련한 RQD를 고려하였다. 절리군수와 절리 크기는 스캔 라인 조사 혹은 조사창 조사와 같은 노두 조사를 통해 정보를 얻어야 하지만, 터널 설계 시 이와 같은 정보를 얻기가 쉽지 않기 때문에 고려하지 않았다. 굴착 변수 중 굴착 방법, 터널 형상, 발파에 의한 영향은 사전에 결정되는 변수로 보는 것이 타당하므로 터널 크기만을 고려하였다. 지하 공동시공에서 터널크기와 형상이 중요한 변수이지만, 철도 및 도로터널에서는 교통량 등의 외부조건에 의해 터널형상이 결정되는 경우가 대부분이라고 할 수 있다. 반면에 암반 외생적 변수에는 지하수 조건과 응력 조건과 더불어 저심도 터널의 경우 지진과 같은 동하중 조건에 노출되기 쉽기 때문에 이를 추가하였다. 매개변수를 가능한 범위 내에서 단순화하게 되면 분류 체계의 일반성과 간결성을 확보할 수 있는 이점이 있다. 예를 들어, 지하 공동 굴착 시 주절리군 방향과 불리한 방향은 회피하도록 설계되는 경우가 많고 절리 방향성이 고려되면 분류 체계의 일반성과 간결성이 저하되는 문제점이 있다. 본 연구에서 암반 거동 유형을 결정하기 위한 매개변수는 일축압축강도, 암질 지수와 절리 조건을 포함하는 암반 내생적 매개변수, 응력, 지하수와 지진 조건을 포함하는 암반 외생적 매개변수, 그리고 터널 크기인 굴착 매개변수이다.

저심도 암반 터널에서 예상되는 암반 거동 유형을 Figure 1과 같이 규정하였다. 굴착 후 응력재분배로 인해 굴착 초기에 발생하는 비복원성 터널 변형인 소성변형(plastic deformation), 절리가 촘촘히 발달한 암반에서 터널 굴착시 소규모 암반블록들이 갑작스럽게 터널 내부로 이동하는 현상인 낙석(cave-in), 불연속면과 터널이 교차하여 발생한 블록이 낮은 절리면 전단강도로 인하여 터널 내로 자유 낙하하거나 미끄러지는 현상인

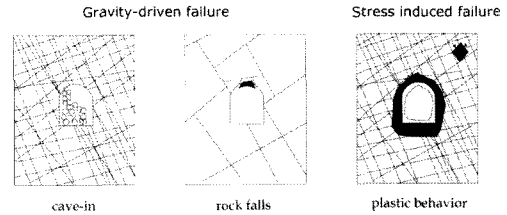


Fig. 1. Rock behavior types in shallow depth rock tunnel.

낙반(rock fall)으로 나누었다.

3. 암반 거동 지수(Rock behavior index) 산정

3.1 계층 분석적 의사결정(AHP)을 통한 암반 거동 유형별 가중치 결정

암반 거동 유형별 가중치를 산정하기 위해 계층 분석적 의사결정(Saaty, 1980)과 퍼지 델파이 방법(Kaufmann & Gupta, 1998)을 적용하였다. 계층 분석적 의사결정 방법은 자연스런 의사결정과정을 단순화시킴으로써 복잡한 문제에 대하여 효과적인 의사결정을 가능하게 해주며 복잡하고 조직화되어 있지 않은 문제상황을 그 구성요소를 세분화해 나가는 방법으로 이를 활용하면 암반 거동에 영향을 미치는 인자간의 우선순위와 그에 따른 가중치를 결정할 수 있다. 각 인자간의 우선 순위는 전문가로부터 얻은 설문에 대한 답변으로부터 구할 수 있다. 전문가 의견의 불확실성을 극복하기 위해 퍼지 델파이 방법을 이용하였다. 퍼지 델파이 방법을 적용하면 조사 시간과 비용을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 전문가의 의견을 분명히 나타내게 할 수 있다. 계층적 분석적 의사결정과 퍼지 델파이 방법을 활용한 암반 거동 유형별 가중치 결정 과정은 Figure 2와 같이 단계별로 설명하면 다음과 같다.

- (1) 문제의 목적을 설정: 암반 거동 유형별 가중치 결정
- (2) 목적에 영향을 주는 기준 설정: 암반 내생적 매개변수, 암반 외생적 매개변수와 굴착변수를 상위 기준으로 설정하고 하위 기준으로 암반 내생적 매개변수에는 RQD, 일축압축강도, 절리면 조건, 암반 외생적 매개변수에는 응력, 지하수와 지진으로 구분, 굴착변수로 터널 크기.
- (3) 계층적 구조 설정: Figure 3와 같이 목적, 상위기준 및 하위기준에 따라 계층적 구조를 설정
- (4) 각 단계에서 쌍대 매트릭스 구성 및 판단부여: 의사결정에서 요소의 우선순위를 설정하기 위한 첫번째 단계는 쌍대비교를 행하는 단계이다. 즉, 주어진 기준

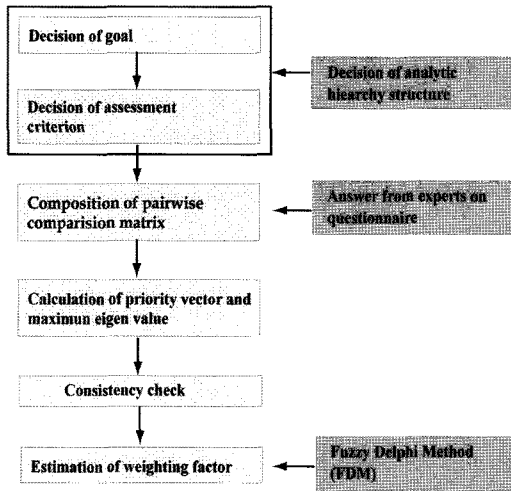


Fig. 2. Flow chart of AHP.

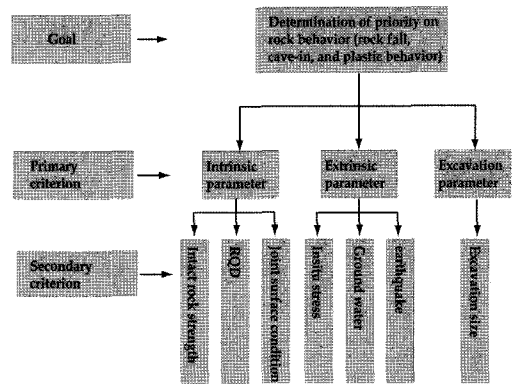


Fig. 3. Analytic hierarchy structure to decide the weighting factor of parameters on rock behavior.

에 대하여 요소를 쌍으로 비교하는 것이다. $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$ 는 j -열 성분에 대한 i -행 성분의 상대적인 중요도를 나타낸다. 예를 들어, $a_{ij}=9$ 인 경우는 j -열 성분에 비해서 i -행 성분이 상대적인 중요도가 상당히 크다는 것(extreme importance)을 의미한다. 상대적인 중요도

는 1에서 9까지의 중요도 강도(intensity of importance)로 표현할 수 있다 (Table 4). a_{ij} 의 역수는 i -행 성분에 대한 j -열 성분의 상대적인 중요도를 나타낸다. n 개의 성분이 비교된다면 다음과 같은 매트릭스를 구성한다. AHP의 핵심은 i -성분과 j -성분의 가중치 w_i 와 w_j 를 결정하는 것이 아니라, 상대적인 가중치,

Table 4. The fundamental scale of AHP (Saaty, 1980)

Intensity of importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective
2	Weak	-
3	Moderate importance	Experience and judgment slightly favor one activity over another
4	Moderate plus	-
5	Strong importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another
6	Strong plus	-
7	Very strong or demonstrated importance	An activity is favored very strongly over another; its dominance demonstrated in practice
8	Very, very strong	-
9	Extreme importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
Reciprocals of above	If activity i has one of the above nonzero numbers assigned to it when compared with activity j , then j has the reciprocal value when compared with i	
Rationals	Ratios arising from the scale	
		If consistency were to be forced by obtaining n numerical values to span the matrix

$\frac{w_i}{w_j}$ 를 평가하는 것이다.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

모든 상대비교가 이루어지면 선호도 가중치 벡터(priority weight vector), w 가 유일 해로 계산될 수 있다.

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (2)$$

여기서, λ_{\max} 는 매트릭스 A 의 가장 큰 eigenvalue이며, 선호도 가중치 벡터는 정규화된다.

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (3)$$

최대 eigenvalue (λ_{\max})를 구한 후, 일관성 지수(consistency index, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$), 일관성 비율(consistency ratio, $CR = CI/RI$)을 구한다.

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} \times w_j}{w_i} \quad (4)$$

여기서, n 은 매트릭스 크기, a_{ij} 는 쌍대 매트릭스의 요소, w_i 와 w_j 는 eigen vector의 i 번째, j 번째 요소, RI 는 랜덤 지수(random indices)이다(Table 5).

일관성 비율 (CR)이 0.1이하일 경우, 정규화된 가중치가 의미를 가질 수 있다. 실질적으로는 0.1을 초과하는 것이 빈번하다.

(5) 퍼지 델파이 방법을 이용하여 각 상대비교 매트릭스 내 인자들의 상대적 퍼지 가중치를 다음과 같은 절차에 의하여 계산한다.

5-1) 삼각 퍼지수(triangular fuzzy numbers), \tilde{a}_{ij} 를 계산한다. 삼각 퍼지수는 주어진 대상에 대한 전문가의 비관적, 중립적, 낙관적인 의견을 의미한다 (Fig. 4).

$$\tilde{a}_{ij} = (\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}) = (p_{ij} + \alpha(m_{ij} - p_{ij}), m_{ij}, o_{ij} - \alpha(o_{ij} - m_{ij})) \quad (5)$$

$$p_{ij} = \text{Min}(\delta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$m_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \delta_{ijk} \right)^{1/n}, k = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$o_{ij} = \text{Max}(\delta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (8)$$

여기서, $p_{ij} \leq m_{ij} \leq o_{ij}$, $p_{ij}, m_{ij}, o_{ij} \in [1/9, 1] \cup [1, 9]$. p_{ij} 는 하한값을, o_{ij} 는 상한값을 나타낸다.

δ_{ijk} 는 “ k ”라는 전문가가 i 와 j 대개변수간의 상대적인 중요도 강도를 나타낸다. n 은 설문 대상 전문가들의 수이다.

의사결정 과정에 관한 불확실성을 반영하기 위해 α -cut개념을 적용한 퍼지 델파이 방법을 적용하였다. α 는 “0”과 “1” 사이의 값을 가진다. $\alpha=0$, $\alpha=0.5$ 와 $\alpha=1$ 은 각각 비관적인, 중립적인, 낙관적인 의사결정을 나타낸다.

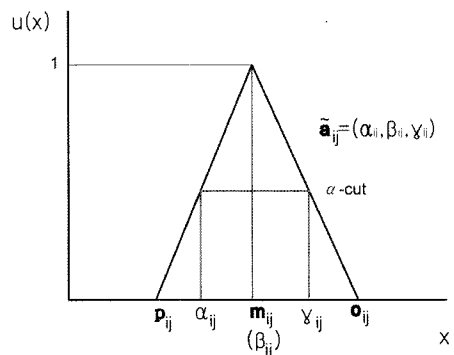


Fig. 4. The membership function of the fuzzy Delphi method (FDM).

Table 5. The consistency indices of randomly generated reciprocal matrices

RI value	Order of the matrix						
	1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32

5-2) 양의 퍼지 역 매트릭스(fuzzy positive reciprocal matrix), \tilde{A} 를 구한다.

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}] \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} \approx 1, \forall i, j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

5-3) 각 매개변수의 상대적인 퍼지 가중치(relative fuzzy weights)를 계산한다.

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n}, \tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n)^{-1} \quad (10)$$

여기서, $\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 \equiv (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$. \otimes 기호는 퍼지 수(fuzzy numbers)의 곱셈을 나타내고, \oplus 기호는 퍼지 수의 덧셈을 나타낸다. $\tilde{W}_i = (w_1, w_2, \dots, w_n), i = 1, 2, \dots, n$. w_i 는 i 번째 매개변수의 퍼지 가중치이다. 디퍼지(defuzzification)는 기하학적 평균으로 구한다.

$$w_r = \left(\prod_{i=1}^n w_{ij} \right)^{1/n} \quad (11)$$

여기서, w_{ir} 는 구하고자 하는 디퍼지화된 가중치이다 ($r=1$: 낙반, $r=2$: 낙석, $r=3$:소성 변형).

각 매개변수에 대한 가중치를 결정하기 위해 각계 전문가 25명을 대상으로 한 설문조사를 실시하였다. 계층

분석적 의사결정 방법과 퍼지 델파이 방법에 의한 암반 내재적 매개변수, 외생적 매개변수와 굴착 변수들에 대한 가중치 산정 결과는 Table 6과 같다. 낙반과 낙석 거동에서는 암반 내재적 변수와 굴착변수가 암반 외생적 변수보다 가중치가 크게 나타났고, 소성 변형 거동에서는 암반 외생적 변수가 다른 두 변수보다 가중치가 크게 나타났다. 7가지 매개변수에 대한 가중치 산정 결과는 Table 7과 같다. 낙반과 Cave-in 거동에서는 절리면 조건, RQD, 터널 크기, 지하수 조건의 가중치가 크게 나타났고, 소성 변형 거동에서는 응력 조건, 지하수 조건, 터널 크기의 가중치가 크게 나타났다. 또한, 7가지 매개변수에서는 암반 외생적 변수 중 지진 매개변수의 가중치가 가장 낮게 나타났다.

3.2 암반 공학 시스템(RES)에 의한 암반 거동 유형별 가중치 결정

터널내의 암반 거동은 여러 변수들에 의해 복잡하게 작용하는 상호 영향성을 고려한 시스템적 접근 방법이 필요하다. Hudson (1992)은 상호 영향 매트릭스(interaction matrix)를 이용하여 암반 공학적 문제를 해결할 수 있도록 시스템적 접근 방법에 기초한 암반 역학 시스템 방법을 제안하였다. 이러한 상호영향 매트릭스 방법의 개념은 1970년대에서부터 시작되었으며(Loepold et al., 1971), 기존의 환경 및 자연요소와 인간의 활동 사이의 원인-효과 관계를 평가하는데 사용되었다. 이후 암반의

Table 6. Weighing of the primary parameters according to rock behaviors

Primary Parameters	Rock fall			Cave-in			Plastic deformation		
	$\alpha=0.0$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1.0$	$\alpha=0.0$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1.0$	$\alpha=0.0$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1.0$
Rock mass intrinsic parameter	0.44	0.44	0.58	0.45	0.44	0.60	0.30	0.26	0.29
Rock mass extrinsic parameter	0.25	0.21	0.16	0.24	0.21	0.16	0.44	0.47	0.50
Excavation parameter	0.31	0.35	0.26	0.31	0.35	0.24	0.26	0.28	0.21

Table 7. Weighing of the secondary parameters according to rock behaviors

Secondary Parameters	Rock fall			Cave-in			Plastic deformation		
	$\alpha=0.0$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1.0$	$\alpha=0.0$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1.0$	$\alpha=0.0$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1.0$
UCS	0.08	0.05	0.06	0.08	0.05	0.06	0.05	0.03	0.03
RQD	0.16	0.16	0.23	0.16	0.16	0.23	0.11	0.09	0.11
Joint condition	0.20	0.23	0.29	0.20	0.23	0.30	0.14	0.14	0.15
Stress condition	0.08	0.06	0.05	0.08	0.06	0.05	0.15	0.13	0.17
Ground water condition	0.11	0.10	0.08	0.10	0.10	0.09	0.19	0.23	0.27
Earthquake	0.06	0.05	0.02	0.06	0.05	0.02	0.10	0.11	0.07
tunnel span	0.31	0.35	0.26	0.31	0.35	0.24	0.26	0.28	0.21

안정화 문제에 변경 및 적용되었다(Hudson, 1992; Hudson & Harrison, 1992; Mazzoccola & Hudson, 1996). Mazzoccola & Hudson (1996)은 각각의 요소들이 서로 얼마나 영향을 주고 받는지의 영향도 정도(“원인(cause)”와 “효과(effect)”)를 나타내었고, 이러한 요소들은 정 사각 매트릭스 주 대각 방향을 따라 나열되며 주 대각 방향을 제외한 부분에서 상호 영향성을 나타낼 수 있다.

“원인”와 “효과”는 매개변수간의 상호 영향의 중요성을 정량화하기 위해 코딩이 필요하며, Hudson (1992)은 ESQ (Expert Semi-Quantitative)로써 Table 8과 같은 코딩과 상호 관계 정도를 제안했다.

Figure 5에서 표현된 P_i 를 통해서 행과 열을 따라가면 각각의 값은 I_{ij} 가 되고, 행의 값들과 열의 값들을 합하게 되면 각각 “원인(cause, C)”과 “효과(effect, E)”가 되며 다음과 같이 정의된다.

$$C_i = \sum_{j=1}^n I_{ij} \tag{12}$$

$$E_i = \sum_{i=1}^n I_{ij} \tag{13}$$

여기서, C_i 는 임의의 매개변수가 다른 매개변수에 영향을 주는 총합을 나타내며, E_i 는 임의의 매개변수가 시스템에 의해서 영향을 받는 총합을 나타낸다.

각 매개변수에 대한 우선 순위를 결정하기 위해 계층 분석적 의사결정 방법과 마찬가지로 각계 전문가 25명을 대상으로 한 설문조사를 실시하였다. 암반 거동 결정을 위한 주요 매개변수에 대한 가중치를 결정하기 위한 상호영향 관계 결과는 Table 9와 같다. 각 매트릭스 내 값은 임의의 두 매개변수의 상호영향에 대한 전문가들 의견의 평균값이다.

“원인”와 “효과”를 도시해보면, 각각의 요소들이 어떤 역할을 하는지 쉽게 이해할 수 있다(Fig. 6). 임의의 매개변수에 대한 C+E 값은 해당 매개변수가 시스템에서 차지하는 비중을 확인할 수 있는 지표가 될 수 있다(Mazzoccola & Hudson, 1996). 절리면 상태는 이번 연

구에서 시스템에 가장 큰 상호영향을 미치며 지진 매개변수는 가장 적은 상호 영향성을 보여준다.

암반거동에 영향을 미치는 매개변수에 대한 가중치는 다음 식과 같이 암반 거동에 영향을 미치는 매개변수간의 상호 영향을 고려한 가중치와 암반 거동에 영향을 미치는 가중치의 기하평균으로 정의하였다.

$$W_{ir} = \left(\frac{(C_i + E_i)}{(\sum_i C_i + \sum_i E_i)} \times \frac{E_{ir}}{\sum E_{ir}} \right)^{1/2} \tag{14}$$

여기서, C_i 는 i 번째 매개변수의 원인율, E_i 는 i 번째 매개변수의 효과를 나타내며, E_{ir} 는 i 번째 매개변수가 각 암반거동에 영향을 미치는 정도를 나타내며, i 는 주요 매개변수의 개수를 나타낸다.

암반 공학 시스템 방법에 의한 암반 거동에 영향을 미치는 매개변수들의 가중치 산정결과는 Table 10과 같다. 낙반과 Cave-in 거동에서는 절리면 조건, RQD, 터

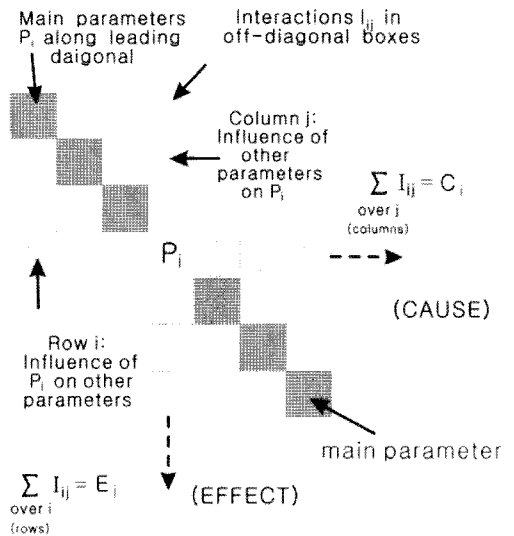


Fig. 5. Summation of coding values in the row and column through each parameter to establish the cause and effect co-ordinates (modified from Hudson, 1992).

Table 8. ESQ-coding of the parameters' interaction intensity used in the model (Hudson, 1992)

Coding	Description
0	No interaction
1	Weak interaction
2	Medium interaction
3	Strong interaction
4	Critical interaction

Table 9. Interaction matrix coding for the study area

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	Rock behavior		
C ₁	UCS (P ₁)	1.4	11	1.5	0.5	0.4	2.0	0.9	1.2	2.6
C ₂	1.7	RQD (P ₂)	2.2	1.3	2.0	0.6	2.3	2.8	3.1	2.2
C ₃	1.5	1.8	JC (P ₃)	1.3	2.4	0.8	2.5	3.3	3.3	2.1
C ₄	1.7	1.8	1.8	Stress (P ₄)	0.8	1.3	2.5	1.7	1.8	3.3
C ₅	1.7	1.3	2.4	1.4	Ground water(P ₅)	0.6	2.3	2.3	2.7	1.7
C ₆	0.4	0.7	0.9	1.6	0.8	Earth Quake(P ₆)	1.3	1.9	1.8	1.1
C ₇	0.9	0.9	1.0	2.3	1.9	0.5	Tunnel Span(P ₇)	2.8	2.5	2.5
								Rock fall	Cave-in	Plastic Deformation

Table 10. Weighting of parameters according to rock behaviors

Secondary parameter	Rock fall	Cave-in	Plastic deformation
UCS	0.08	0.09	0.13
RQD	0.16	0.17	0.14
Joint condition	0.20	0.20	0.16
Stress condition	0.14	0.14	0.19
Ground water condition	0.15	0.16	0.13
Earthquake	0.07	0.07	0.06
tunnel span	0.18	0.17	0.17

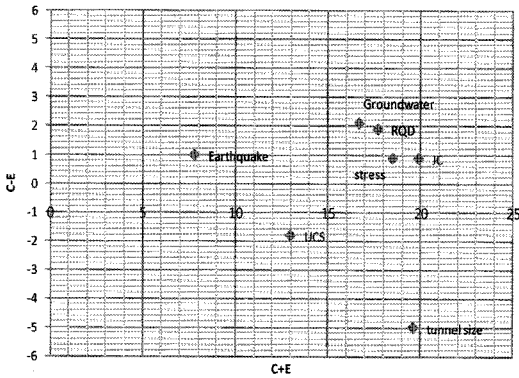


Fig. 6. Cause versus effect diagram on 7 parameters.

널 크기, 지하수 조건의 가중치가 크게 나타났고, 소성 변형 거동에서는 응력 조건, 절리면 조건, 터널 크기의 가중치가 크게 나타났다.

3.3 암반 거동 지수(Rock behavior index) 산정

암반 거동 별 매개변수에 대한 가중치(w_{ir} , $r=1$: 낙반, $r=2$: 낙석, $r=3$: 소성변형)와 Table 12에 제시된 각 매개변수에 해당하는 배점(P_i) 들의 선형조합으로 이루어지며(Table 11) n 개의 인자들의 총합으로 계산할 수 있다. 이러한 일련의 과정을 거쳐서 터널 굴착 시 예상되는 암반 거동 지수 (RBI)를 산정하게 되는데 식 (15)와 같다.

$$RBI_r = 100(1 - \sum_{i=1}^n W_r \frac{P_i}{P_{max}}) \tag{15}$$

여기서, P_{max} 는 정규화 요소로서 변수가 취할 수 있는 최대값이다. 여기에서는 $P_{max}=4$ 이다. 이와 같은 방식으로 산정한 암반 거동지수는 0~100의 백분율로 표현이

Table 11. Suggested rating of parameters affecting rock behavior in shallow tunnels

Factors	Classes	1	2	3	4	5
UCS(MPa)	P ₁	< 25	25-50	50-100	100-250	>250
RQD (%)	P ₂	< 20	20-40	40-60	60-80	>80
Joint condition	P ₃	< 3	3-8	8-12	12-15	>15
Overburden height/Tunnel Span	P ₄	< 1.0	1.0-1.5	1.5-2.5	2.5-3.5	> 3.5
Ground water level - tunnel crown level (m)	P ₅	> 15	10-15	5-10	0-5	<0
Earthquake intensity	P ₆	> 0.25 g	0.20-0.25 g	0.15-0.20 g	0.1-0.15 g	< 0.10 g
Joint spacing/Tunnel span	P ₇	< 1/200	1/200-1/100	1/100-1/50	1/50-1/5	>1/5

Table 12. Rock behavior index (RBI) categories

Linguistic values: Rock Behavior Index (RBI)	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
Linguistic terms	Very Low Probable	Low Probable	Moderately Probable	High Probable	Very High Probable

된다 (Table 12). 이를 5개 범주로 분류하면 0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 그리고 80~100의 범주로 나눌 수 있는데 0~20구간의 경우 해당 암반 저동 가능성이 매우 크므로 그에 따른 사전 대책 수립을 요한다고 할 수 있다. 저심도 터널에서의 응력 매개변수의 점수는 토피고와 터널 폭의 비, 지하수 매개변수의 점수는 지하수위와 터널 천단고 차, 터널 폭 매개변수의 점수는 절리 간격과 터널 폭의 비로 정의하였다. 절리면 매개변수의 점수는 절리면 거칠기, 절리면 풍화정도와 절리면 충전물질 점수의 합으로 정의하였다(Sonmez & Ulusay, 1999).

4. 사례 연구

본 대상 지역은 서울시 강남구에 위치하는 서울 지하

철 ○호선 ○구간으로 총 연장 1.77 km 중 터널구간은 1.41 km로 NATM 공법으로 설계되었다. 본 구간의 지반조사 결과, 편마암이 널리 분포하고 있고 단층이 4개가 있는 것으로 나타났다(Fig. 7). 터널 단면은 복선 터널 단면 (PD section)이 주를 이루고 있고 (Fig. 8), 터널 정거장과 연결되는 구간은 확폭 단면 (PW section)과 2-Arch 단면(2-Arch section)으로 이루어져 있다. 터널 토피고는 16~38 m이고 터널 통과구간은 대부분이 암반으로 되어 있다.

계층분석적 의사결정 방법과 암반공학 시스템 방법으로 암반 거동을 정량화하였다. 예상되는 암반거동 유형은 낙반, 낙석과 소성 변형으로 규정하였고, 암반 거동에 영향을 미치는 7가지 매개변수는 일축압축강도, RQD, 절리 조건, 응력조건, 지하수 조건, 지진 및 터널 폭이라

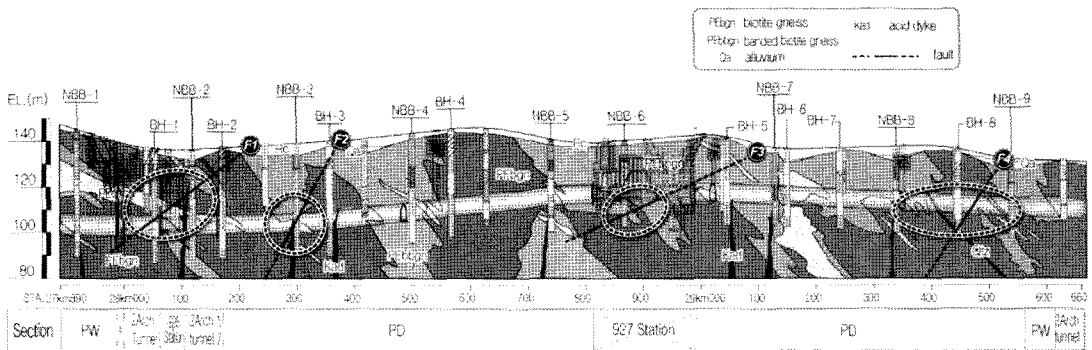


Fig. 7. Geology and tunnel longitudinal section (PD: double lane track section, PW: enlarged section).

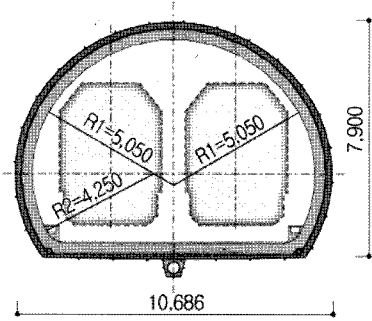


Fig. 8. Double-lane track section (PD section)

고 간주하였다. Table 13은 복선터널 단면에 대하여 구간별로 7가지 매개변수에 대한 점수와 암반 거동별 암반 거동 지수를 나타낸다. 암반 거동 지수 산정 결과, 모든 구간에서 낙반과 낙석 거동 가능성이 소성변형 가능성보다 높게 나타났다.

Figure 9는 계층 분석적 의사결정 방법과 암반 공학 시스템에 의해 구한 지보 패턴 별 암반 거동 지수를 나타낸다. 퍼지 델파이 방법을 적용한 계층 분석적 의사결정 방법의 경우, 낙관적인 견지인 경우(α -cut=1.0)에서 암반 거동별 암반 거동 지수의 차이가 크게 나타남을 볼 수 있다. 암반 공학 시스템 방법으로 구한 지보 패턴별 암반 거동 지수는 계층 분석적 의사결정 방법보

다 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 모든 지보 패턴에서 낙반과 낙석 거동 지수가 소성 변형 거동지수보다 크게 나타났고, 소성 변형 거동 지수는 두 방법 모두 비슷한 경향을 보였다.

5. 계층 분석적 의사결정 방법과 암반공학 시스템 방법 비교

Figure 10은 계층 분석적 의사결정 방법과 암반 공학 시스템 방법으로 구한 암반 거동 유형에 따른 각각의 가중치를 나타낸다. 계층 분석적 의사결정 방법과 퍼지 델파이 방법에서 α -cut=1.0을 적용한 경우와 암반공학 시스템방법과 비교하였다. 왜냐하면, 암반 공학 시스템 방법의 경우 전문가들 의견의 평균만을 고려하였기 때문이다. 낙반과 낙석을 지배하는 매개변수는 두 방법 모두 절리면 조건, 터널 폭, RQD였다. 소성 변형을 지배하는 매개변수는 계층분석적 의사결정 방법에서는 지하수, 응력과 터널 폭이었고, 암반 공학 시스템 방법에서는 응력조건과 지진조건을 제외한 다섯 가지 매개변수 모두 비슷하게 나타났다.

계층 분석적 의사결정 방법은 계층적 구조로 인해 암반 공학 시스템에 비해 매개변수간의 차이가 크게 나타났다. 반면에 낙반과 낙석 암반 거동에 대한 매개변수 간 차이는 거의 없었다. 암반 거동에 영향을 미치는 매

Table 13. Suggested rating of parameters and rock behavior index (RBIs) according to support pattern of PD section

support pattern	Site pos.	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	AHP method			RES method		
									RBI ₁	RBI ₂	RBI ₃	RBI ₁	RBI ₂	RBI ₃
PD-4	28,170	2	0	2	3	2	2	1	66.25	65.75	56.75	60.50	60.25	56.25
PD-5A	28,200	3	2	2	3	3	2	1	53.25	53.00	45.00	46.50	46.25	43.00
PD-4	28,300	2	0	1	3	4	2	0	76.00	74.75	53.75	64.00	62.25	59.00
PD-5B	28,350	1	1	1	3	4	2	1	64.25	63.25	46.25	55.75	54.50	54.50
PD-5A	28,430	2	0	1	3	3	2	1	70.00	69.00	54.00	61.75	62.00	57.25
PD-4	28,500	2	2	2	3	4	2	1	52.25	51.75	39.75	44.00	42.50	43.75
PD-5A	28,550	1	1	2	2	3	2	1	62.00	61.50	53.00	56.50	56.00	59.25
PD-5A	29,000	2	0	1	2	3	2	1	71.50	70.50	58.00	65.75	65.00	63.00
PD-5A	29,200	3	2	2	2	3	2	2	46.50	46.25	43.25	44.50	43.75	44.25
PD-3B	29,540	2	1	2	2	2	2	1	63.00	62.75	58.25	59.00	58.75	58.50

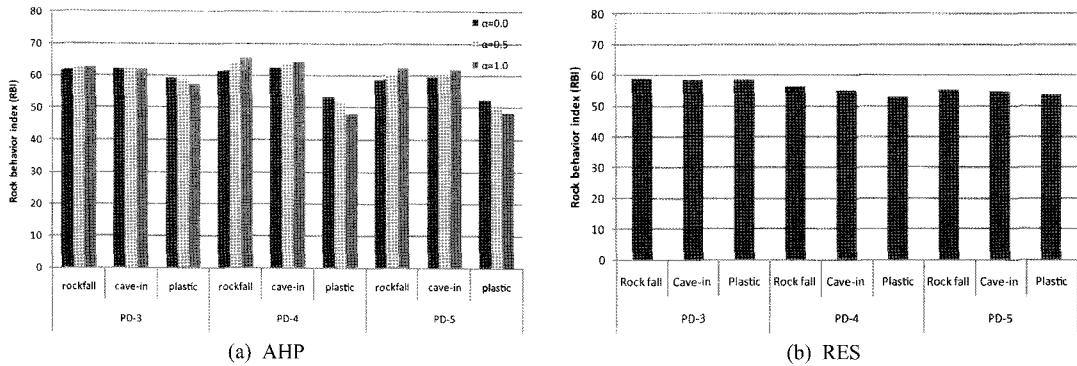


Fig. 9. Comparison between RBIs by AHP and that by RES on rock behavior.

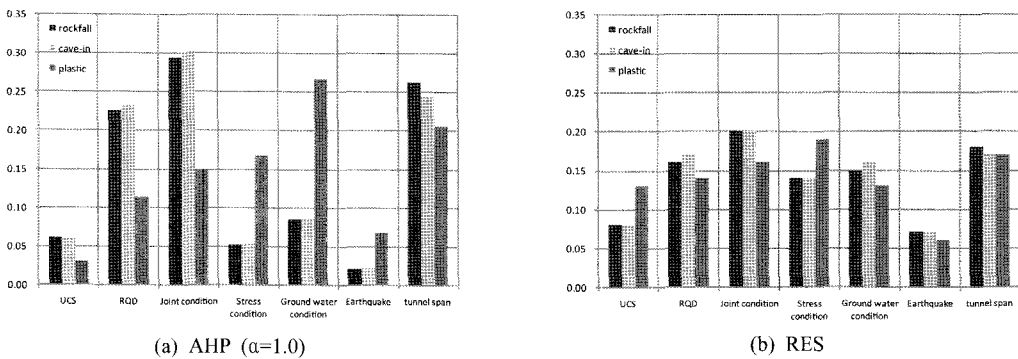


Fig. 10. Comparison between weights of rock behaviors by AHP and by RES.

개변수와 암반 거동이라는 인과 관계를 분석하는 방법으로 적용한 계층 분석적 의사결정 방법은 암반 거동이라는 복잡하고 불확실한 문제에 대하여 3가지 상위 구성 요소(암반 내생적 매개변수, 암반 외생적 매개변수, 굴착변수)로 분류한 후, 각 요소에 해당하는 매개변수들이 각 구성요소에서 차지하는 중요도를 고려하여 가중치를 구하는 방법이다. 반면에 암반 공학 시스템은 각 암반 거동에 대한 단지 매개변수들간의 상호 영향을 고려하여 매개변수 가중치를 결정하는 방법이다. 따라서, 계층 분석적 의사결정 방법에서 사용한 3가지 상위 구성 요소로 구분한 후 각 요소에 해당하는 매개변수로 이루어진 하위 요소로 계층 구조를 만든 후, 각 매개변수간의 상호 영향을 고려한 암반 공학 시스템 방법을 결합한 방법이 암반 거동 유형에 영향을 미치는 매개변수 가중치 문제를 해결하는데 보다 적합한 방법으로 판단되며 이에 대한 연구가 필요하다.

6. 결론

암반 거동 유형에 영향을 미치는 인자를 결정하기 위

해 기존의 암반분류법인 RMR, Q-system, GSI 그리고 Rmi에서 고려하는 인자들을 내생적 매개변수, 외생적 매개변수와 굴착 매개변수로 분류하여 고찰한 결과, 기존의 분류법을 세 가지 매개변수 모두를 다 고려하지 못하고 있다. 암반 내생적 매개변수로 일축압축강도, RQD와 절리 조건, 외생적 매개변수로 응력조건, 지하수조건과 지진조건, 굴착 매개변수로 터널 폭을 고려하여 저심도 암반 터널 굴착시 예상되는 암반 거동 유형을 예측하였다. 저심도 암반 터널 굴착시 예상되는 암반 거동 유형으로는 소성 변형, 낙반과 낙석을 제시하였다. 일곱 가지 암반 거동에 영향을 미치는 인자와 세 가지 암반 거동 유형간의 상호 관계를 구하기 위해 전문가의 견해를 기반으로 한 계층 분석적 의사결정과 암반 공학 시스템에 의해 매개변수 가중치를 산정하였다. 낙반과 낙석을 지배하는 매개변수는 두 방법 모두 터널 크기, 절리면 조건 및 RQD로 나타났다. 반면에 소성 변형을 지배하는 매개변수는 계층분석적 의사결정 방법에서는 지하수, 응력과 터널 폭이었고, 암반 공학 시스템 방법에서는 응력, 터널 폭, 절리면 조건으로 나타났다. 매개변수 가중치와 점수로부터 암반 거동 유형별

암반 거동 지수를 제시하였다. 이를 서울 지하철 〇호선 〇공구 설계에 적용하여 예상되는 암반 거동 지수를 산정한 결과, 낙반과 낙석 거동이 소성변형 거동보다 높게 나타났다.

사 사

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 첨단도시개발사업(04핵심C01)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- Martin C. D., Kaiser P. K., Christiansson R., 2003, Stress, instability and design of underground excavations, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, 1027-1047.
- Goricki A., Schubert W., Riedmueller G., 2004, New developments for the design and construction of tunnels in complex rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* Volume 41, Supplement 1, 720-725
- Palmstrom A. & Stille H., 2007, Ground behavior and rock engineering tools for underground excavations, *Tunnelling and Underground Space Technology* 22, 363-376.
- Stille H. & Palmstrom A., 2008, Ground behavior and rock mass composition in underground excavations, *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, 46-64.
- Singh M., Singh B., Choudhari J., 2007, Critical strain and squeezing of rock mass in tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology* 22, 343-350.
- Cai M., Kaiser P. K., Uno H., Tasaka Y., and Minami M., 2004, Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41, 3-19.
- Poschl I., and Kleberger J., 2004, Geotechnical risk in rock mass characterization-a concept, *Geotechnical risks in rock tunnels*, 145-154.
- Hudson, J. A. (1992), "Rock Engineering Systems", *Rock Engineering Consultants and Imperial College*, University of London, Ellis Horwood, New York.
- Saaty T., 1980, *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill International Book Company, New York.
- Saaty T., 1996, *Decision making with dependence and feedback: the analytic network process*, RWS Publications, Pittsburgh.
- Benardos A. G. and Kaliampakos D. C., 2004, A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunneling -illustrated by Athens Metro, Greece, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41, 987-999.
- Chen C. S. and Liu Y. C., 2007, A methodology for evaluation and classification of rock mass quality on tunnel engineering, *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, 377-387.
- Ayalew L., Yamagishi H., Marui H., and Kanno T., 2005, Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications, *Engineering Geology* 81, 432-445.
- Liu Y. C. and Chen C. S., 2007, A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment, *Engineering Geology* 89, 128-143.
- Neaupane K. M. and Piantanakulchai, 2006, Analytic network process model for landslide hazard zonation, *Geology* 85, 281-294.
- Martin, C. D., Kaiser, P. K., McCreath, D. R., 1999, Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels, *Canadian Geotechnical Journal* 36(1), 136-151.
- Kaiser P. K., Diederichs M. S., Martin C. D., Sharp J., and Steiner W., 2000, *Underground works in hard rock tunneling and mining*, An international conference on geotechnical and geological engineering.
- Kaufmann A. and Gupta M.M, 1998, *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*. North-Holland, Amsterdam.
- Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B. B. and Balsley, J. R. (1971), "A Procedure for Evaluating Environmental Impact", US Geological (USGS) Circular 645 USGS, Government Printing Office, Washington, DC.
- Hudson, J. A. and Harrison, J. P. (1992), "A New Approach to Studying Complete Rock Engineering Problems", *Quarterly J. of Engineering Geology*, Vol. 25, 93-105.
- Mazzoccola, D. F. and Hudson, J. A. (1996), "A Comprehensive Method of Rock Mass Characterization for Indicating Natural Slope Instability", *Quarterly J. of Engineering Geology*, Vol. 29, 37-56.
- Sonmez H., Ulusay R., 1999, Modifications to the geological strength index(GSI) and their applicability to stability of slopes, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 36, 743-760.

유 영 일



1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학석사

Tel: 02-880-9304
E-mail: hidemi04@snu.ac.kr
현재 서울대학교 에너지시스템공학부 박사과정

김 만 광



2006년 강원대학교 자연과학대학 지질학과, 이학사

Tel: 02-880-9304
E-mail: raonmk@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템 공학부 석사 과정

송 재 준



1993년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학 석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템 공학부 공학박사

Tel: 02-880-9043
E-mail: songjj@snu.ac.kr
현재 서울대학교 에너지시스템공학부 교수