KURT 2단계 건설부지에 대한 암석역학모델 설정

장현식¹ · 고지혜¹ · 배대석² · 김건영² · 장보안^{1*}

¹강원대학교 지구물리학과, ²한국원자력연구원

Rock Mechanics Modeling of the Site for the 2nd Step Construction of the KAERI Underground Research Tunnel (KURT)

Hyun-Sic Jang¹, Chi-Hye Ko¹, Dae-Seok Bae², Geon-Young Kim², and Bo-An Jang^{1*}

¹Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

²Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, Korea

Received 30 May 2014; received in revised form 10 June 2014; accepted 17 June 2014

KURT 2단계 구간에 대한 암석역학 모델을 설정하기 위하여 대상지역의 암반을 지질특성과 절리발달정도에 따라 총 6개의 암반 단위체로 구분하였다. 연구지역 암반은 대부분 화강암 그룹인 G1, G2, G3 단위체로 이루어져 있으며, 관입암 그룹인 D1, D3 단위체가 소규모로 분포한다. 또한 단층파쇄대로 이루어진 불량한 암반인 F3 단위체가 KURT 2단계 구간의 입구를 가로지르는 형태로 분포한다. 암반의 상태를 파악하기 위하여 시추조사 자료를 바탕으로 RMR, Q-system, RMI 등 3종류의 암반분류법으로 암반을 분류하였고, 선행 연구들에서 제안된 다양한 경험식과 암반분류 결과를 이용하여 암반의 변형계수, 강도, 점착력, 마찰각 등의 지반정수를 계산하였다. 최종적으로 각 암반 단위체에 대한 대표 암반분류 값과 대표 지반정수 값들을 산정하여 연구지역의 암석역학 모델을 설정하였다. 이 연구에서 설정된 암석역학 모델은 KURT 2단계 구간에 대한 설계와 안정성 예측 연구에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 암반 단위체, 암반분류, 지반정수, 암석역학 모델

Rock masses at the site for the 2nd step construction of the KAERI Underground Research Tunnel (KURT) are divided into six units to establish a rock mechanics model that is dependent on the geological characteristics and degree of joint development. The site primarily consists of three granitic units (G1, G2, and G3), two dykes (D1 and D3), and a fault zone of poor rock mass quality (F3). The F3 unit crosses the tunnel at the beginning of the site of 2nd step construction. The rock masses of each unit are classified by RMR (Rock Mass Rating), Q-system, and RMI (Rock Mass Index), all based on borehole logging data. The deformation modulus, rock mass strength, cohesion, and friction angle for each unit are calculated using established empirical relationships. The representative rock mass classification and geotechnical parameters for the rock mass units are established, and a rock mechanics model for the site is proposed, which will be useful in the design and stability analysis of the 2nd step construction of KURT.

Key words : rock mass unit, rock mass classification, geotechnical parameters, rock mechanics modeling

*Corresponding author: bajang@kangwon.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

현재 우리나라는 사용 후 핵연료와 같은 고준위방사성폐기물을 처리하기 위하여 사용 후 핵연료 중간저장 시설과 최종처분장 건설을 계획하고 관련기술에 대하여 장기적 관점에서 연구하고 있다. 세계적으로 고준위방사성폐기물 처분시설은 생태계로부터 충분히 격리된 심부지하에 건설하는 것을 선호하고 있으며 이러한 심층처분시설은 수 천 년에서 수 만년 이상의 안정성을 요구받고 있다(NEA, 2004; Lee and Hwang, 2009; Bae et al., 2012). 심층처분시설을 건설하는데 있어서 가장 어려운 점은 부지를 선정하는 것이다. 이는 건설예정 부지의 이해당사자들에게 처분사업의 안전성을 입증하고 처분사업 전반에 대한 신뢰를 구축하는 것이 매우 어렵기 때문이다. 따라서 심층처분시설을 안전하게 설계하고 건설하기 위해서는 신뢰성 높은 다양한 조사와 연구가 필요하며, 이중에서도 처분시설이 건설된 심부지하에 대한 공학적 특성을 정확히 파악하는 것이 첫 번째 중요한 단계가 될 것이다.

심부지하는 대부분 암반으로 이루어져있으며 암반은 대부분 불연속면을 내포하고 있고 물리/역학적으로 이질적인 특성을 갖는 다양한 암석들이 존재할 가능성이 많다. 엔지니어들은 이러한 암반의 불균질성과 복잡성 때문에 암반의 공학적 특성을 정량적으로 파악하는데 많은 어려움을 겪었다. 이런 문제를 해결하고자 많은 연구자들은 암반의 복잡성을 합리적으로 단순화 시켜 암반의 공학적인 상태를 점수와 등급으로 분류하는 다양한 종류의 암반분류법들을 제안하였고, 이러한 암반분류법들은 터널과 같은 지하시설의 설계에 있어서 매우 유용한 도구로 사용되고 있다(Barton et al., 1974; Bieniawski, 1988; Hoek, 1994; Palmström, 1995). 깊은 심도에 건설되는 심층처분시설의 경우에는 스웨덴의 지하처분 연구시설인 Äspö나 핀란드의 고준위방폐장인 ONKALO의 사례에서 볼 수 있듯이 대상 지반의 공학적 상태를 파악하기 위해 단순한 암반분류만을 수행하지 않고 암반을 지질학적 유형과 불연속면의 분포양상에 따라 여러 암반 단위체(rock mass unit)로 구역화(zoning)한 후 시험 및 조사, 암반분류, 수치해석 등의 다양한 방법으로 각 단위체의 암반역학모델(rock mechanics model)을 수립하여 이를 설계에 반영하고 있다(Roshöff et al., 2002; Mönkkönen et al., 2012). 각 단위체별 암반역학모델 설정에서는 암반을 공학적인 유형으로 분류할 수 있는 다양한 방법으로 단위체를 대표

하는 암반분류값과 지반정수들을 결정한다.

이 연구에서는 한국원자력연구원 내에 위치한 지하연구시설인 KURT (Korea Underground Research Tunnel)의 2단계 시설 예정구간에 대한 암반역학모델을 설정하고자 하였다. 이를 위해 연구지역에서 수행된 지질조사, 시추조사, 실내시험 자료를 바탕으로 연구지역을 여러 암반 단위체로 구분하고 RMR (Rock Mass Rating), Q-system, RMI (Rock Mass Index) 등의 암반분류법으로 암반의 공학적 상태를 파악하여 각 암반 단위체별 대표 암반상태를 결정하였다. 또한 암반분류 결과와 선행연구들에서 제안된 다양한 경험식들을 이용하여 암반 단위체들의 대표 지반정수들을 결정하였으며 이를 종합하여 연구지역의 지질특성 및 역학적 특성이 반영된 암반역학 모델을 제안하고자 하였다.

연구지역의 지질

연구지역은 대전시 유성구 덕진동 일대로 대전분지의 서북부 경계에 위치하며 서쪽으로는 계룡산 줄기를 능선으로 공주시와 인접하고 있다. 이 지역은 분지 특성상 보덕봉, 금병산, 우솔봉, 갑하산, 도덕봉이 서북부 지역의 분수령을 이루고 있으며, 이 분수령을 기준으로 대전광역시 유성구와 충남 연기군 남면에 접하고 있다.

연구지역의 지질은 경기변성암복합체의 선캄브리아편마암류와 중생대 심성암 및 맥암류로 구성되어 있다(Fig. 1a). 선캄브리아기의 변성암류는 흑운모 편마암 및 편암으로 나누어지며, 이들은 주로 KURT 시설 부지의 북서부에 분포하고 있다. 중생대 심성암은 복운모화강암으로 구성되어 있으며, 편상화강암을 관입하여 연구지역에 광범위하게 분포하고 있다(Kim et al., 2012).

연구지역 내에는 3공의 시추조사가 이루어졌다(Fig. 1b). KP-1 시추공은 KURT 터널입구부에서 터널과 평행한 방향(N56W)으로 약 6°의 경사로 252 m 시추되어 KURT 1단계 구역을 지나 2단계 구간 약 0~5 m 상부를 통과하고 있다. KP-3과 KP-4는 30°의 경사로 KURT 1단계 터널의 끝부분에서 시작하여 2단계 구간의 하부에 V형태로 시추되었다. KP-3는 북북동 방향으로 86.5 m 시추되었으며, KP-4는 동남동 방향으로 101 m 시추되었다. 시추공으로부터 회수된 시추코어는 대부분 화강암이었으며 일부 구간에서 소규모의 염기성 관입암들이 확인되었다. 또한 KP-3과 KP-4 시추공의 초기 구간과 KP-1 177~181 m 구간에서는 단층대로 예상되는 파쇄대가 확인되었다.

Fig. 1. Geological map of the study area showing borehole locations.

Fig. 2. Rock types in the KP-1, KP-3 and KP-4 boreholes.

Fig. 3. Rock quality designations in the KP-1, KP-3 and KP-4 boreholes.

연구지역의 암반 단위체 설정

암반역학모델 설정의 첫 번째 단계는 대상 암반을 암석학적 특성과 구조적 특성이 같은 개별 암반 단위체 (rock unit)로 구분하는 것이다. 이 연구에서는 암반단위체 구분을 위해 각 시추공에서 회수된 코어시료들에 대한 암석학적 분류 결과와 절리밀도에 따른 암반의 질을 사용하였다. 분류된 단위체에는 암석의 종류를 나타내는 지질기호와 암반의 질을 나타내는 상태숫자를 조합하여 암반 단위체별로 기호를 부여하였다. Fig. 2는 KP-1, KP-3 및 KP-4 시추공에서 회수된 암석코어들의 암종 분포를 나타낸 모식도이다. 시추조사 지역의 암반은 대부분 화강암이며 일부 구간에서 중성 내지 염기성 관입암이 분포하고 있으며, KP-1 시추공에서 약 177~181 m 구간과 KP-3 시추공의 약 9~13 m 구간, KP-4 시

추공의 약 30~33 m 구간에서 단층 파쇄대가 분포하고 있다. 이 연구에서는 화강암 그룹은 ‘G’, 관입암 그룹은 ‘D’, 단층파쇄대 그룹은 ‘F’로 지질기호를 부여하였다.

절리밀도는 암반의 질, 즉 공학적 성질을 결정하는 가장 중요한 요소로서, 이 연구에서는 시추코어로부터 분석된 RQD (Rock Quality Designation) 값을 이용하여 절리밀도 상태를 구분하였다. Deere (1968)는 RQD와 암반의 공학적 질과의 상관성 연구에서 RQD 값이 75% 이상인 경우 우수한 암반으로, 50~75%의 경우는 양호한 암반으로, 50% 미만인 경우에는 불량한 암반으로 분류하였다. 이 연구에서는 시추공별로 Deere (1968)의 분류에 따라 암반을 구분하고, 우수한 암반은 ‘1’, 양호한 암반은 ‘2’, 불량한 암반은 ‘3’으로 상태숫자를 부여하였다(Fig. 3).

각 암반단위체에 대하여 지질특성 기호와 절리밀도

Fig. 4. Rock mass units in the KP-1, KP-3 and KP-4 boreholes.

상태숫자를 조합하여 단위체별 고유기호를 완성하였다. 3개의 시추공을 통해 파악된 연구지역의 암반은 총 6개 종류의 암반단위체로 분류할 수 있다. 먼저 가장 많이 분포하고 있는 화강암 암반은 절리밀도 상태에 따라 G1, G2, G3 단위체로 분류되고, 화강암체를 소규모로 관입하고 있는 관입암류는 D1, D3 단위체로, 단층파쇄대는 F3 단위체로 분류되었다(Fig. 4).

암반분류

암반분류법

암반분류(rock mass classification)는 복잡한 양상을 갖는 암반의 성질과 조건을 단순화하여 명확히 구분하고, 암반의 여러 성질을 등급에 따라 구분함으로써 계획 단계에서 조사, 설계, 시공에 이르는 전 과정을 효율적으로 진행시키기 위한 하나의 수단으로 이용된다. 일반적으로 암반분류법들은 암석의 강도, 불연속면의 특성(절리의 방향, 절리의 연속성, 절리의 빈도, 풍화·변질, 충전물 상태 등) 및 지하수 특성 등을 평가요소로 사용하고 있다. 지금까지 제안된 많은 암반분류법들은 대부분 특정 목적을 위하여 여러 가지 방법들이 고안되었으나, 이 연구에서는 암반분류법들 중에서 가장 많이 사용되고 있는 RMR, Q-system 방법과 비교적 최근에 개발된 RMI 분류법을 사용하였다. 또한 암반분류 결과를 바탕으로 각 암반단위체별 대표 암반분류 값을 산정하고 기타 지반정수(물성) 값을 추정하였다.

RMR 분류법은 Bieniawski (1973)에 의해 제안된 후 1974, 1976, 1979 및 1989년에 수정·보완된 가장 널리 알려진 암반분류방법으로서 식 (1)과 같이 무결암의 압축강도, RQD, 불연속면의 간격, 길이, 틈새, 거칠기, 충전물, 풍화도와 지하수의 용출상태, 불연속면의 방향성 등 총 10개의 평가요소 점수들의 합으로 RMR 점수를 계산한다. RMR 점수는 0~100까지의 범위를 가지며 점수에 따라 매우 우수(very good) 등급부터 매우 불량(very poor) 등급까지 5개의 암반 등급으로 분류된다.

$$RMR = RMR_{USC} + RMR_{RQD} + RMR_{spacing} + RMR_{length} + RMR_{aperture} + RMR_{roughness} + RMR_{infilling} + RMR_{weathering} + RMR_{water} + RMR_{orientation} \quad (1)$$

Q-system은 터널지보 체계 결정을 위한 지표로서 Barton et al. (1974)에 의해 제안되었다. Q-System은 RQD, 절리군의 수(Joint set number, J_n), 가장 상태가 나쁜 절리의 거칠기(Joint roughness number, J_r), 절리면을 따라 충전된 물질 또는 변질 정도(Joint alteration number, J_a), 지하수 유입 상태(Joint water reduction factor, J_w) 및 응력 조건(Stress reduction factor, SRF) 등 총 6가지의 평가 요소들의 조합으로 암반의 상태를 정량적으로 평가한다. Q-system의 평가 요소들은 3개의 지수 그룹 즉 블록의 크기, 블록간의 전단강도, 암체단위에 작용하는 유효 응력으로 구분되며, 식 (2)와 같이 그룹간의 곱으로 Q 값을 계산한다. Q 값은 각 평가 인자의 최솟값이나 최댓값을 조합하였을 때 0.001~1000까지의 범위를 가지며, 지수규모(log scale) 범위에 따라 9개 등급으로 분류된다.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2)$$

RMI 분류법은 Palmström (1995)에 의해 제안되었으며, 식 (3)과 같이 실내시험으로부터 산정된 암석의 일축압축강도(σ_c)와 암반의 절리상태(JP)를 평가한 값의 곱으로 계산되며, 여기서, JP는 식 (4), (5), (6)으로 부터 계산할 수 있다.

$$RMI = \sigma_c \times JP \quad (3)$$

$$JP = 0.2jC^{0.5}Vb^D \quad (4)$$

$$jC = jL(jR/jA) \quad (5)$$

$$D = 0.37jC^{0.2} \quad (6)$$

여기서, Vb 는 블록의 부피(m^3), jC 는 절리상태 요소, jL 는 절리 길이와 연장성 요소, jR 는 절리면 거칠기 요소, jA 는 절리면 변질도 요소이다. RMI 값은 암반의 강

Table 1. Uncertainties in the evaluation parameters for the rock mass classifications.

<i>RMR</i>	<i>UCS</i>	<i>RQD</i>	<i>Spacing</i>	<i>Length</i>	<i>Aperture</i>	<i>Roughness</i>	<i>Infilling</i>	<i>Weathering</i>	<i>Water</i>	<i>Orientation</i>	
Certain	○	○									
Probable			○		○	○	○	○		○	
Guesswork				○					○		
Q-system	<i>RQD</i>		<i>J_n</i>		<i>J_r</i>		<i>J_a</i>		<i>J_w</i>		<i>SRF</i>
Certain	○										
Probable			○		○		○				
Guesswork									○		○
RMi	<i>σ_{ci}</i> (<i>UCS</i>)		<i>J_p</i>								
<i>Vb</i>			<i>jL</i>		<i>jR</i>		<i>jA</i>				
Certain	○										
Probable			○				○		○		
Guesswork					○						

도를 의미하며 단위는 MPa이고 계산된 값의 지수규모 범위에 따라 7개 등급으로 분류된다.

암반분류를 위한 평가항목 및 자료 수집

RMR, Q-system, RMi 등의 암반분류를 수행하기 위하여 KP-1, KP-3 및 KP-4 시추공의 시추조사 자료를 바탕으로 평가항목을 정하여 항목별 입력 자료를 수집하였다. 암반분류를 위한 평가항목으로는 RQD, 암석의 강도(UCS), 불연속면의 간격, 불연속면의 특성(길이, 틈새, 거칠기, 충전물, 풍화도, 변질도) 등이 있다. 이러한 평가 항목 중에서 RQD와 강도는 시추조사와 역학시험 결과를 바탕으로 정량적으로 자료를 수집하여 암반분류에 적용하였다. 또한 불연속면의 틈새, 거칠기, 충전물, 풍화도 및 변질도는 RMR과 Q-system분류 기준에 부합하도록 각 평가항목별 분류기준을 설정하여 자료를 수집하였다. 그러나 불연속면의 길이, 지하수 상태, SRF등과 같이 시추조사만으로 정량적 자료를 획득하기 어려운 항목의 경우 평가 배점의 중간 점수를 적용하였으며, 시추조사에서 확인된 단층대(파쇄대)의 경우 중간 점수가 아닌 하위점수를 적용하여 단층대의 암반분류 결과가 낮게 평가 될 수 있도록 유도하였다.

대부분의 암반분류법들은 각 평가항목별 할당 점수들의 조합으로 점수를 산정하게 되는데 산정표 자체에 내재된 판정기준의 불확실성과 조사자의 경험적 지식과 주관적 판단 차이에 때문에 암반분류결과에는 많은 불확실성이 포함되게 된다. 이 연구에서는 사용된 암반분류법들의 평가항목별 불확실성을 평가자의 주관에 따라 Table 1에 표시하였다. RQD, 강도 등은 충분한 측정과

분석으로 비교적 정량적인 값을 사용할 수 있었으며, 불연속면 특성 항목들도 대부분 시추조사 및 BHTV 분석 결과를 바탕으로 정성적 평가를 수행할 수 있었다. 그러나 불연속면의 길이, 지하수 상태, 응력에 대한 항목은 조사의 부족으로 전적으로 추정에 의존할 수밖에 없었다.

암반분류 결과

Fig. 5는 KP-1, KP-3 및 KP-4 시추공에 대한 RMR 분류 결과를 보여준다. KP-1 시추공에서는 2단계 터널의 초기 구간에 해당되는 180.5~192.2m 구간에서 38점 이하의 RMR 값을 갖는 불량한(poor) 상태의 암반이 존재하고 있으며, 이외 대부분의 구간은 51점 이상의 비교적 양호(fair)하거나 우수한(good) 암반 상태를 가지고 있다(Fig. 5a). KP-3 시추공에서는 2단계 터널의 초기 구간에 해당되는 4.4~6.9m, 12.0~13.3m 구간에서 47점 이하의 RMR 값을 갖는 불량한 암반이 존재하고 있으며, 이외의 대부분 구간은 57점 이상의 비교적 우수한 암반인 것으로 분석되었다(Fig. 5b). KP-4 시추공에 대한 RMR 분류 결과는 30.6~33.3m 구간에서 38점 이하의 불량한 암반이 존재함을 보여주고 있으며, 이외의 대부분 구간에서는 53점 이상의 양호하거나 우수한 암반이 분포하고 있음을 지시한다(Fig. 5c). RMR 분류에서 불량한 암반으로 분류된 구간은 암반 단위체 분류상 F3에 해당하는 단층 파쇄대 구간과 일치한다.

KP-1, KP-3, KP-4 시추공에 대한 Q-system 분류 결과는 Fig. 6에 제시되었다. KP-1 시추공의 Q 값은 4.69~88.00의 범위를 보이며, F3 단위체에 해당되는 180.5~192.2m 구간에서 가장 작은 값을 가지나, 이

Fig. 5. RMR values in the (a) KP-1, (b) KP-3, and (c) KP-4 boreholes.

구간을 제외한 대부분의 구간은 11점 이상의 비교적 우수한 암반으로 분류되었다(Fig. 6a). Fig. 6b에 나타난 KP-3 시추공의 Q 값은 0.27~81.84의 범위를 보이며, 4.4~6.9 m, 12.0~13.3 m, 79.1~84.0 m 구간의 Q 값이 불량 등급 이하의 낮은 값을 보여 F3 단위체 외에도 불량한 상태의 암반들이 존재하고 있음을 보여준다. 그러나 KP-3 시추공 역시 대부분의 구간에서 8점 이상의 양호하거나 우수한 암반으로 분류되었다. KP-4 시추공의 Q 값은 0.12~62.70의 범위를 보이며, 0.0~37.0 m, 40.1~52.6 m, 74.0~78.7 m, 89.8~94.4 m 구간 등 여러 구간에서 불량등급 이하의 낮은 Q 값을 나타낸다(Fig. 6c). 특히 F3 단위체에 해당하는 30.6~33.3 m 구간은 연구지역내에서 계산된 Q 값 중에서 가장 낮은 0.12로 암반상태가 극히 불량(extremely poor)하다. KP-4 시추공 내에서 10 이상의 Q 값을 갖는 우수한 암반은 52.6~74.0 m, 78.7~89.8 m, 94.4~101 m 구간으로 KP-1과 KP-3 시추공에 비해 우수한 암반상태가 상

Fig. 6. Q-values in the (a) KP-1, (b) KP-3 and (c) KP-4 boreholes.

대적으로 적은 것으로 나타났다.

Fig. 7은 KP-1, KP-3 및 KP-4 시추공에 대한 RMi 분류 결과를 나타낸 그래프이다. KP-1 시추공의 RMi 값은 4.0~62.8 MPa의 범위를 보이나, 177~192.2 m, 198.3~212.5 m 구간에서 9 MPa 이하의 강도를 보이며, 특히 F3 단위체에 해당하는 180.5~192.2 m 구간의 RMi 값이 4.0 MPa로 가장 낮다. 그러나 대부분의 구간은 12 MPa 이상의 매우 강한(very strong) 암반이 분포하고 있다(Fig. 7a). KP-3 시추공의 RMi 값은 0.48~39.07 MPa의 범위를 보이나, F3 단위체에 해당하는 12.0~13.3 m 구간은 KP-3 구간중 가장 낮은 0.48 MPa로 보통(Medium) 정도의 강도를 암반으로 분석되었다. 0~6.9 m, 8.9~12.0 m, 13.3~24.0 m, 79.1~84. m 구간에서는 1~10 MPa 범위를 갖는 강한(strong) 암반이 분포하며, 이외의 구간은 13 MPa 이상의 매우 강한(very strong) 암반으로 분류된다. 그러나 강한 암반으로 분류된 구간 중에서 4.4~6.9 m, 8.9~12.0 m, 79.1~

Fig. 7. RMI values in the (a) KP-1, (b) KP-3 and (c) KP-4 values.

84.0 m 구간들의 RMI 값이 3 MPa 이하로서 같은 등급의 다른 구간들에 비해 상대적으로 낮은 강도를 갖는 것으로 나타났다(Fig. 7b). Fig. 7c에 나타난 KP-4 시추공의 RMI 값은 1.06 ~ 38.4 MPa의 범위를 보이고 있으나, 가장 낮은 RMI 값을 갖는 구간은 F3 단위체에 해당하는 30.6 ~ 33.3 m 구간으로 RMI 값은 1.06 MPa로 강한(strong) 암반과 보통(medium) 암반의 경계에 해당하는 값을 갖는다. 이외에도 0 ~ 30.6 m, 40.1 ~ 52.6 m, 74.0 ~ 78.7 m 구간도 3 MPa 이하의 상대적으로 낮은 강도를 가지는 반면에, 55.0 ~ 74.0 m, 82.6 ~ 89.8 m, 94.4 ~ 101.0 m 구간은 10 MPa 이상의 매우 강한(very strong) 암반으로 분류된다.

RMR, Q-system 및 RMI 분류 결과는 각각의 분류마다 서로 다른 등급 체계를 가지고 있기 때문에 등급 구분이 모두 일치하지는 않으나 시추공별 암반분류 결과들의 전반적인 경향성은 유사하였다. 특히 단층파쇄대로 이루어진 F3 단위체 구간에서는 모든 암반분류법에

서 공통적으로 가장 낮은 암반등급이 산출되어, 연구에 사용된 암반분류법들이 암반을 공학적으로 분석하는데 유효함을 나타낸다.

암반분류 결과를 이용한 지반정수의 결정

터널 설계에서 지반조건에 따라 설계 및 시공방법이 달라지며 경제성과 안정성까지 좌우되므로 정확한 지반정수의 산정은 매우 중요하다. 설계와 안정해석에 필요한 지반정수들 중에서 주로 이용되는 지반정수들에는 암반의 변형계수(E_m), 강도(σ_{cm}), 점착력(c_m)과 마찰각(ϕ_m) 등이 있다. 이 지반정수들은 현장 암반시험이나 실내 암석시험 등에 의하여 직·간접적으로 측정되거나 기존의 경험치 및 경험식들을 이용하여 평가되어 실제 설계에 필요한 수치해석모델의 적용되고 있다. 지반정수를 결정하는 방법들 중에서 가장 신뢰도가 높은 방법은 현장에서 직접 측정하는 방법이지만, 이 방법은 주로 시추공을 이용하고 있어 절리 등 불연속면 특성을 포함하는 광역 지반을 대표하는데 문제가 있으며, 시험비용이나 측정방법별 오차 등의 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제들로 인하여 지반정수를 결정하는 방법들이 다양하게 연구되어 왔으며, 현장암반의 상태를 고려할 수 있는 암반분류 값을 이용한 경험식들이 많이 제안되어 왔다.

암반의 변형계수

암반의 변형계수는 터널 설계 시 변형에 대한 예측에 가장 중요한 지반정수중 하나다. 암반의 변형계수와 암반 등급은 현저한 상관성이 나타나는데, 암반을 이루는 암석의 풍화가 심할수록, 공극률이 클수록, 강도가 작을수록 변형계수는 작아지며, 암반 내에 불연속면이 많이 발달해 있는 경우에도 변형계수가 작아지는 것으로 알려져 있다. 따라서 많은 연구자들은 암반분류 결과와 변형계수간의 상관성 연구를 통해 매우 다양한 형태의 변형계수 경험식을 제안해 왔다. Table 2는 선행 연구들에서 제안된 암반 변형계수 경험식 중에서 이 연구에서 사용된 RMR, Q-system, RMI 값을 이용하는 관계식들만을 나타낸 것이다.

Fig. 8은 연구지역에서 가장 많은 부분을 차지하고 있는 G1 단위체에 속하는 암반들을 대상으로 Table 2에 수록된 총 15개의 경험식들로부터 계산된 변형계수 값들을 보여준다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 유사한 암반분류 값을 가지더라도 경험식에 따라 서로 다른 변형계수 값이 계산되는 것을 알 수 있다. 경험식들 중에서

Table 2. Empirical equations for predicting the rock mass deformation modulus (E_m).

Proponents	Empirical equations
Biniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$ ($RMR > 50$)
Nicholson and Bieniawski (1990)	$E_m = E_i / [100 (0.0028RMR^2 + 0.9e^{RMR/22.82})]$
Mehrotra (1992)	$E_m = 10^{(RMR-20)/38}$
Grimstad and Barton (1993)	$E_m = 25 \log Q$
Mitri et al. (1994)	$E_m = E_i [0.5 (1 - \cos(\pi RMR / 100))]$
Palmström (1996)	$E_m = 5.6RMR^{0.375}$
Read et al. (1999)	$E_m = 0.1 (RMR / 10)^3$
Palmström and Singh (2001)	$E_m = 7RMR^{0.4}$
Barton (2002)	$E_m = 10Q_c^{1/3}$
Chun et al. (2006)	$E_m = 0.3228e^{(0.0485RMR)}$
Kim and Kim (2006)	$E_m = 300e^{0.07RMR} \times 10^{-3}$
Sonmez et al. (2006)	$E_m = E_i \times 10^{\frac{(RMR-100)(100-RMR)}{4000e^{(-RMR/100)}}$
Barton (2008)	$E_m = 10(Q_c / 100)^{1/3}$
Kang et al. (2013)	$E_m = 10^{0.0185RMR - 0.322}$ $E_m = 10^{0.32 \log Q + 0.585}$

Fig. 8. Values of deformation modulus calculated using empirical equations for rock mass unit G1.

Nicholson and Bieniawski (1990)의 경험식은 다른 경험식들에 비해 비현실적으로 큰 값이 계산되었으며, Kim and Kim (2006)의 경험식의 경우에는 계산 값의 분산 범위가 상당히 큰 것으로 나타났다. 또한 Palmstrom (1996), Chun et al. (2006), Kang et al. (2013)의 경험식들은 계산 값의 분산은 크지 않으나 다른 식들에 비해 다소 작은 값이 계산되었다. 이 연구에

서는 비현실적으로 큰 값이 계산된 Nicholson and Bieniawski (1990)의 경험식과 분산도가 매우 큰 Kim and Kim (2006)의 경험식을 제외한 나머지 13개 경험식에서 계산된 변형계수 값들 이용하여 각 암반 단위체 별 변형계수 값을 Table 3과 같이 통계적으로 분석하였다. Table 3은 D1 단위체의 변형계수 값이 가장 큰 것을 보여주며, 단층파쇄대 구간인 F3 단위체가 가장 낮

Table 3. Deformation moduli of the rock mass units (in GPa).

Rock mass unit	G1	G2	G3	D1	D3	F3
Mean value	24.7	20.3	14.4	30.2	20.6	7.0
Standard deviation	14.0	13.9	10.8	14.3	13.2	6.3
Coefficient of variation	57%	69%	75%	47%	64%	89%
Range of values	4.2~72.6	4.4~71.2	0.3~44.3	7.3~61.7	4.0~49.2	1.9~23.8

Table 4. Empirical equations for predicting rock mass strength (σ_m).

Proponents	Empirical equations
Hoek and Brown (1980)	$\sigma_m = q_c e^{(RMR - 100) / 18}$
Yudhbir et al. (1983)	$\sigma_m = e^{7.65(RMR - 100) / 100}$
Ramamurthy (1986)	$\sigma_m = q_c e^{(RMR - 100) / 18.75}$
Singh and Singh (1993)	$\sigma_m = 5\gamma Q_c^{1/3}$
Kalamaris and Bieniawski (1995)	$\sigma_m = q_c e^{(RMR - 100) / 24}$
Sheorey (1997)	$\sigma_m = q_c e^{(RMR - 100) / 20}$
Singh et al. (1997)	$\sigma_m = 0.38\gamma Q_c^{1/3}$
Aydan and Dalgic (1998)	$\sigma_m = q_c RMR / [RMR + \beta(100 - RMR)]$
Trueman (1988)	$\sigma_m = 0.5e^{(0.06RMR)}$
Barton (2002)	$\sigma_m = \gamma(Q \times q_c / 100)^{1/3}$

Fig. 9. Values of rock mass strength estimated using empirical equations for rock mass unit G1.

은 변형계수 값을 나타낸다. 그러나 모든 암반 단위체에 서 변동계수(coefficient of variation, CV)가 47 % 이상 으로 경험식으로 계산된 변형계수들은 비교적 큰 분산 도를 나타낸다.

암반의 강도

암반의 강도(σ_m)는 Rmi 값을 사용하거나 변형계수와

마찬가지로 암반분류 결과를 이용한 다양한 경험식을 바 탕으로 추정될 수 있다. 이 연구에서는 Rmi 분류 결과 와 Table 4에 나타난 11개의 경험식을 이용하여 연구지 역 암반의 강도를 추정하였다. Fig. 9는 G1 단위체 구 간 내의 암반들을 대상으로 계산된 암반강도들을 제안 식별로 나타낸 그래프로, 암반강도 역시 변형계수와 마 찬가지로 대부분의 경험식에서 다소 분산된 양상을 보

Table 5. Strengths of the rock mass units (in MPa).

Rock mass unit	G1	G2	G3	D1	D3	F3
Mean value	25.5	22.7	13.4	37.7	26.0	6.3
Standard deviation	15.4	17.4	9.2	18.9	17.3	8.2
Coefficient of variation	60%	77%	69%	50%	67%	129%
Range of values	2.6~88.6	1.0~85.1	0.7~46.5	7.1~87.4	3.3~66.2	0.2~39.7

Table 6. Empirical equations for predicting rock mass cohesion (c_m) and the friction angle (ϕ_m).

Proponents	Empirical equations
Trueman (1988)	$c_m = 0.25e^{(0.05RMR)}$ $\phi_m = 0.5RMR + 5$
Bieniawski (1989)	$c_m = -0.051 + 0.008 RMR - (3.46 \times 10^{-5}) RMR^2$ $\phi_m = -0.086 + 0.7891 RMR - 0.0031 RMR^2$
Kim (1993)	$c_m = 2e^{(0.08RMR)}$ $\phi_m = 0.25 RMR + 27.5$
Aydan and Kawamoto (2000)	$\phi_m = 20 + 0.05 RMR$
Barton (2008)	$\phi_m = \frac{1}{1.124} \tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a} \times J_w \right)$

이고 있다. 그러나 Singh et al. (1997)과 Barton (2002)은 다른 경험식들에 비해 낮은 값과 적은 분산도를 보이고 있으며, 특히 Singh et al. (1997) 경험식은 가장 신선하고 강한 암반에서도 5 MPa 이하의 매우 낮은 값이 계산되었다. Table 5는 암반의 강도를 전반적으로 저평가하는 Singh et al. (1997)의 경험식을 제외한 10개의 경험식과 RMI를 이용하여 각 암반 단위체별 암반강도 값을 통계적으로 분석한 결과이다. 각 암반 단위체들의 암반강도의 분포양상은 변형계수의 양상과 유사하게 D1 단위체의 강도가 가장 크고 F3 단위체의 강도가 가장 낮다. 그러나 암반강도 역시 모든 암반 단위체에서 변동계수가 50 % 이상으로 분석되어 비교적 큰 분산도를 갖는다.

암반의 점착력 및 마찰각

탄성해석에서 점착력(c_m) 및 마찰각(ϕ_m)은 지반의 변형에는 영향을 미치지 않지만 암반 파괴에 대한 안전율을 평가할 때 이용되며, 또한 비선형해석이나 탄소성 해석에서 항복기준의 인자이므로 해석 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 암반의 점착력과 마찰각 역시 변형계수와 암반강도와 마찬가지로 암반분류 결과를 이용한 다양한 경험식들이 Table 6과 같이 제안되었다. G1 단위체 구간 내의 암반들을 대상으로 제안식별로 계산된 점착력과 마찰각들은 Fig. 10에 나타나 있다. 먼저 점착력의 계산에서 Truman (1988)과 Kim (1993)의 경험식은 다

른 지반정수들과 마찬가지로 다소 분산된 양상을 보이고 있으며, Bieniawski (1989)의 경험식은 분산은 거의 없지만 다른 식들에 비해 매우 작은 값을 나타낸다(Fig. 10a). 마찰각의 경우에는 Trueman (1988), Bieniawski (1989) 및 Kim (1993)의 경험식은 비교적 유사한 계산 결과들을 보여주고 있지만 Aydan and Kawamoto (2000)의 경험식은 다른 식들에 비해 매우 낮은 마찰각을 보여준다(Fig. 10b). 따라서 이 연구에서는 Bieniawski (1989)와 Aydan and Kawamoto (2000)의 경험식을 제외하고 나머지 경험식들에서 계산된 결과들을 통계적으로 분석하여 각 암반 단위체별 점착력과 마찰각을 Table 7에 표시하였다. 각 암반 단위체들의 점착력은 변형계수 및 암반강도와 마찬가지로 D1과 G1 단위체에서 가장 큰 값을, 단층파쇄대 구간인 F3 단위체에서 가장 작은 값을 보였으며, 변동계수 또한 37 % 이상으로 비교적 분산도가 큰 것으로 나타났다. 마찰각의 경우에는 가장 적은 값을 갖는 F3 단위체를 제외한 모든 단위체에서 비교적 유사한 값을 갖는 것으로 분석되어 다른 지반정수들과 다소 다른 특성을 보였다. 또한 변동계수 역시 20 % 이하로 계산되어 마찰각이 다른 지반정수들에 비해 분산도가 상대적으로 낮다는 것을 확인할 수 있었다.

KURT 2단계 지역의 암반역학 모델 설정

연구지역인 KURT 2단계 구간의 암반역학 모델을 설

Fig. 10. Values of (a) cohesion and (b) friction angle determined using empirical equations for rock mass unit G1.

Table 7. Cohesion and friction angles of the rock mass units.

Rock mass unit		G1	G2	G3	D1	D3	F3
Cohesion (MPa)	Mean value	7.9	6.6	3.9	9.8	4.9	1.1
	Standard deviation	4.6	5.4	2.5	3.6	2.5	0.8
	Coefficient of variation	59%	82%	65%	37%	51%	65%
	Range of values	1.4~19.5	1.5~18.5	0.8~9.2	3.4~14.2	1.3~7.7	0.4~2.0
Friction angle (°)	Mean value	41.7	39.8	37.1	43.3	38.9	29.5
	Standard deviation	4.2	5.0	5.2	3.2	4.6	6.0
	Coefficient of variation	10%	13%	14%	7%	12%	20%
	Range of values	31.5~49.1	32.2~48.9	28.3~45.5	37.1~47.7	31.0~44.6	24.2~38.0

정하기 위하여 KP-1, KP-3 및 KP-4 시추공에서 구역화된 암반 단위체 모델을 확장하여 Fig. 11과 같이 연구지역 전체에 대한 암반 단위체 모델을 수립하였다. KURT 2단계 구간은 KP-1 시추공과 KP-3, KP-4 사이에 위치하므로 Fig. 11의 암반 단위체 모델은 KURT 2단계 구간과 같은 심동에 대한 추정 모델이다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 연구지역의 대부분은 G1 단위체에 속하며 단층과쇄대 구간인 F3 단위체는 2단계 터널 시점부를 NS 방향으로 가로지르는 형태로 존재할 것으로 추정된다. 또한 2단계 터널의 끝부분에는 관입암체 그룹인 D1과 D3 단위체가 5~10 m 두께로 G1 단위체를 NE-SW 방향으로 관입한 형태로 분포할 것으로 판단된다. 이외에도 F3 단위체 주변을 중심으로 G3 단위체들이 분포할 것으로 예상되며, 폭 1m 이하의 소규모 D1 단위체도 일부 분포할 것으로 예상된다.

Fig. 11. Rock mechanics modeling of the site for the 2nd step construction of KURT.

각 암반 단위체별 암반분류값과 지반정수값을 Table 8에 표시하였다. 각 단위체별 대포값들은 각 단위체별

Table 8. Properties of the rock mass units.

Rock mass unit	G1	G2	G3	D1	D3	F3
RMR	70.4 (9.1)	65.4 (11.0)	56.7 (10.6)	74.7 (6.7)	62.9 (9.5)	39.6 (2.0)
Q-system	28.6 (21.3)	18.4 (16.3)	4.4 (5.1)	52.5 (23.1)	27.6 (27.6)	3.1 (5.0)
RMi (MPa)	19.1 (13.2)	10.7 (6.8)	4.0 (2.5)	33.3 (11.6)	25.7 (25.8)	4.0 (5.6)
E_m (GPa)	24.7 (14.0)	20.3 (13.9)	14.4 (10.8)	30.2 (14.3)	20.6 (13.2)	7.0 (6.3)
σ_m (MPa)	25.5 (15.4)	22.7 (17.4)	13.4 (9.2)	37.7 (18.9)	26.0 (17.3)	6.3 (8.2)
c_m (MPa)	7.9 (4.6)	6.6 (5.4)	3.9 (2.5)	9.8 (3.6)	4.9 (2.5)	1.1 (0.8)
ϕ_m (°)	41.7 (4.2)	39.8 (5.0)	37.1 (5.2)	43.3 (3.2)	38.9 (4.6)	29.5 (6.0)

Values marked with an asterisk (*) are mean values and the numbers in parenthesis are standard deviations.

암반에서 계산된 암반분류값과 지반정수값들의 평균이며, 괄호 안의 값은 표준편차이다. RMR값이 RMi값이나 Q-system의 값보다는 편차가 적었으며, 마찰각을 제외한 변형계수, 암반강도, 점착력은 분산이 비교적 큰 것으로 확인되었다. KURT 2단계 지역의 대부분을 차지하고 있는 G1과 D1 단위체는 RMR 분류기준상 평균 70점과 74.7점의 우수한(2등급, Good) 암반으로 분류되고 있어서, KURT 2단계 지역의 암반은 공학적으로 비교적 안정적인 상태에 있다. 그러나 2단계 터널의 시점부를 가로지르는 F3 단위체는 RMR 값이 평균 39.6점인 불량한(4등급, poor) 암반인 것으로 분석되어 이 구간에 대한 철저한 대비가 필요할 것으로 판단된다.

결 론

KURT 2단계 지역 내에서 수행된 시추조사 자료를 바탕으로 암반분류법과 선행연구들에서 제안된 다양한 경험식을 이용하여 KURT 2단계 지역의 암반역학 모델을 설정하였다. 시추조사로부터 수집된 지질특성과 절리밀도상태를 이용하여 연구지역을 암반 단위체로 구역화하였고, 연구지역은 화강암 그룹인 G1, G2, G3 단위체와, 관입암 그룹인 D1, D3 단위체, 단층파쇄대 구간인 F3 단위체 등 총 6개의 암반 단위체로 구분되었다. 시추공별 암반 단위체 분포양상을 확장하여 연구지역 전체에 대한 암반 단위체 분포양상을 추정하였다. KURT 2단계 터널구간은 대부분 G1 단위체에 해당되며, 터널 시점부에는 F3 단위체가 NS 방향으로 터널을 가로지르는 형태로 분포하고 터널 종점부에는 관입암체인 D1, D3 단위체가 분포하고 있다. 이외에도 F3 단위체 주변을 중심으로 G2, G3 단위체들이 분포하며, 소규모 관입상으로 D1 단위체가 일부 분포한다.

RMR, Q-system, RMi 분류법을 이용하여 연구지역내

암반의 공학적 상태를 파악하였다. 연구지역 암반은 단층파쇄대가 통과하는 구간과 터널 종점부에 분포하는 관입암체 일부 구간의 암반이 불량(poor)한 상태이고 이외의 대부분 구간에서 우수(good) 또는 양호한(fair) 상태이다. 각 암반 단위체별 암반분류값은 G1, D1 단위체에서 RMR 기준으로 평균 70점과 74.7점으로 우수한(2등급, Good) 상태의 암반이고, G2, D3 단위체 역시 평균 65.4점과 62.9점으로 비교적 우수한(2등급, Good) 암반이다. G3 단위체는 평균 56.7점의 양호한(3등급, Fair) 암반이며, 단층파쇄대 구간인 F3 단위체는 평균 39.6점의 불량한(4등급, poor) 암반으로 분류되어, 암반 단위체 분류와 암반분류 결과와의 유사성을 확인할 수 있었다.

각 암반 단위체별 지반정수를 결정하기 위해 암반분류 결과와 선행 연구들에서 제안된 다양한 경험식들을 사용하였다. 일부 경험식들은 비현실적인 값들이 도출되거나 다른 경험식에서 도출된 값들과 큰 차이를 보이기도 하였다. 이렇게 문제가 있는 일부 경험식들을 제외하고 각 암반 단위체별로 다양한 경험식들로 부터 계산된 결과들을 통계적으로 분석하여 단위체별 대표 지반정수값들을 설정하였다. 이렇게 설정된 암반역학 모델은 KURT 2단계 구간에 대한 설계와 안정성 예측 연구에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 미래창조과학부 원자력연구개발사업의 지원으로 수행하였습니다.

References

Aydan, O. and Dalgic, S., 1998, Prediction of deformation behaviour of 3-lanes Bolo tunnels through squeezing rocks of North Anatolian fault zone (NAFZ), In: The

- Int. Reg. Symp. on Sed. Rock Eng., Taipei, Taiwan, 228-233.
- Aydan, O. and Kawamoto, T., 2000, The assessment of mechanical properties of rock masses through RMR rock classification system, In: ISRM International Symposium, International Society for Rock Mechanics, Melbourne, Australia, UW0926. (on CD)
- Bae, D. S., Koh, Y. K., Park, J. W., Park, J. B., and Song, J. S., 2012, Study on basic requirements of geoscientific area for the deep geological repository of spent nuclear fuel in Korea, J. Korean Radioact. Waste Soc., 10, 63-75. (in Korean with English abstract)
- Barton, N., Lien, R., and Lunde, J., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mech., 6, 189-236.
- Barton, N., 2002, TBM tunnelling in jointed and faulted rock, Balkema, Rotterdam, 169pp.
- Barton, N., 2008, Training course on rock engineering, Organized by ISRM-TT & CSMRS, Course Coordinator Rajbal Singh, New Delhi, India, 502pp.
- Bieniawski, Z. T., 1973, Engineering classification of jointed rock masses, Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng., 5, 335-344.
- Bieniawski, Z. T., 1988, The Rock mass rating(RMR) system (Geomechanics Classification) in engineering practice, in Rock classification systems for engineering purposes, ASTM STP 984 (Kirkaldie L. ed), Amer. Soc. for Testing Mat., Philadelphia, USA, 17-34.
- Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley & Sons, New York, 251pp.
- Chun, B. S., Lee, Y. J., and Jung, S. H., 2006, The evaluation for estimation method of deformation modulus of rock mass using RMR system, Korean Geoenviron. Soc., 7, 25-32. (in Korean with English abstract)
- Deere, D. U., 1968, Geological considerations, In: Stagg, R.G., Zienkiewicz, D.C. (eds) Rock Mech. in Engin. Practice, New York, Wiley, 1-20.
- Grimstad, E. and Barton, N., 1993, Updating the Q-system for NMT, In : Proc. Int. Symp. Sprayed Concrete, Fagernes, 21.
- Hoek, E., 1994, Strength of rock and rock masses, ISRM News Journal, 2.2, 4-16.
- Hoek, E. and Brown, E. T., 1980, Underground excavations in rock, London: Inst. of Min. and Metal., 527pp.
- Kang, S. S., Kim, H. Y., and Jang, B. A., 2013, Correlation of in situ modulus of deformation with degree of weathering, RMR and Q-system, Environ. Earth Sci., 69, 2671-2678.
- Kalamaris, G. S. and Bieniawski, Z. T., 1995, A rock mass strength concept for coal incorporating the effect of time. In: Proc. of the eighth int. cong. on rock mech., Chiba, Japan, Rotterdam, Balkema, 295-302.
- Kim, G. W., 1993, Revaluation of 'Geomechanics classifications of rock masses', In : KGS Spring '93 National Conference / Geotech. Engin. and Tunn. Technol. Seoul, 33-40. (in Korean with English abstract)
- Kim, G. W. and Kim, S. J., 2006, Correlation between engineering properties of rocks in Korea, The J. of Eng. Geol., 16, 59-68. (in Korean with English abstract)
- Kim, K. S., Park, K. W., Kim, G. Y., and Choi, H. J., 2012, Potential repository domain for A-KRS at KURT facility site, J. of the Korean Radioactive Waste Society, 10, 151-159. (in Korean with English abstract)
- Lee, S. H. and Hwang, Y. S., 2009, Technical standards on the safety assessment of a HLW repository in other countries, J. Korean Radioact. Waste Soc., 7, 183-190. (in Korean with English abstract)
- Mehrotra, V. K., 1992, Estimation of engineering parameters of rock mass, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Roorkee, India, 267pp.
- Mitri, H. S., Edrissi, R., and Henning, J., 1994, Finite element modeling of cable-bolted slopes in hard rock underground mines, In : SME Annual Meeting 14-17 February. New Mexico SME, Albuquerque, 94-116.
- Mönnkönen, H., Hakala, M., Paananen, M., and Laine, E., 2012, ONKALO rock mechanics model (RMM) - Version 2.0, POSIVA Working Report 2012-07, 94pp.
- NEA, 2004, The handling of time scales in assessing post-closure safety, Nuclear Energy Agency, Doc. No. OAR-2005-0083-0046. 47pp.
- Nicholson, G. A. and Bieniawski, Z. T., 1990, A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 8, 81-202.
- Palmström, A., 1995, RMI - a rock mass characterization system for rock engineering purposes, Ph.D., Thesis, Univ. of Oslo, 400pp.
- Palmström, A., 1996, Characterization of rock masses by the RMI for use in practical rock engineering, Tunn. and Undergr. Space Technol., 11, 175-186(part 1), 11, 287-303(part 2).
- Palmström, A. and Singh, R., 2001, The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates, Tunn. Undergr. Space Technol., 16, 115-131.
- Ramamurthy, T., 1986, Stability of rock mass. 8th annual lecture, Indian Geotech. J., 1-74.
- Read, S. A. L., Richards, L. R., and Perrin, N. D., 1999, Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks, In : Proc. 9th Int. Soc. Rock Mech. Congress. Paris., 2, 655-660.
- Roshöff, K., Lanaro, F., and Jing, L., 2002, Strategy for a rock mechanics site descriptive model - development and testing of the empirical approach, SKB Report R-02-01, ISSN 1402-3091. 119pp.
- Sheorey, P. R., 1997, Empirical rock failure criterion, Rotterdam, Balkema. 176pp.
- Singh, B., Viladkar, M. N., Samadhiya, N. K., and Mehrotra, V. K., 1997, Rock mass strength parameters mobilized in tunnels, Tunn. Undergr. Space Technol., 12, 47-54.
- Singh, V. K. and Singh, D. P., 1993, Correlation between point load index and compressive strength for quartzite rocks. Geotech. Geol. Eng., 11, 269-272.
- Sonmez, H., Gokceoglu, H. A., Nefeslioglu, A., and Kayabasi, A., 2006, Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 43, 224-235.
- Trueman, R., 1988, An evaluation of strata support tech-

niques in dual life gateroads, Ph.D. Thesis, University College, Cardiff, UK, 362pp.
Yudhbir L. W. and Prinzl F., 1983, An empirical failure criterion for rock masses, In : Proc. of the 5th Int. Soc. of Rock Mech. Cong., Melbourne, 1B, 1-8.

장현식

강원대학교 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 강원대학길 1
Tel : 070) 7843-3329
Fax : 033) 244-9276
Email : whitenull@kangwon.ac.kr

고지혜

강원대학교 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 강원대학길 1
Tel : 033) 244-9275
Fax : 033) 244-9276
Email : kochir@hanmail.net

배대석

한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부
305-353 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
Tel : 042) 868-2030
Fax : 042) 868-0355
Email : ndsbae@kaeri.re.kr

김건영

한국원자력연구원 방사성폐기물처분연구부
305-353 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
Tel : 042) 868-8197
Fax : 042) 868-0355
E-mail : kimgy@kaeri.re.kr

장보안

강원대학교 지구물리학과
200-701 강원도 춘천시 강원대학길 1
Tel : 033) 250-8583
Fax : 033) 244-9276
E-mail : bajang@kangwon.ac.kr