

암반공학 우리나라에서의 과제와 연구주제

정 소 곽*

한국지질자원연구원 지반안전연구부

Rock Mechanics-Major Projects and Research Topics in Korea

So-Keul Chung*

Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Major projects and research topics in the field of rock mechanics are analyzed to obtain the following results:

- Rock mechanics deals with the behavior of deformation, failure and displacement of the rock and rock mass on the basis of geological basics. Discontinuities in the rock mass are the most important parameters to control the behavior of rock mass around underground openings.

- The objective of site investigation and testing is to determine the strength properties of the rock mass and the in situ stress regime. Specimens for laboratory and in situ tests are to be selected in order that the results of the tests give the representative properties of the rock mass of the site in question.

- The result of a numerical model would be better evaluated not quantitatively but qualitatively. The displacement behavior of the rock mass has to be monitored properly for the NATM (New Austrian Tunneling Method) principles.

- The stability of rock slope is to be evaluated preferably by back analysis with strength parameters, such as cohesion and friction angle.

Key words : rock mechanics, mechanical behavior, discontinuities, underground openings, strength parameters, displacement, monitoring.

암반공학 관련 국책과제로부터 암반공학 분야의 주요 연구과제와 연구 내용을 분석해 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 암반공학은 암석 혹은 현지 암반의 변형, 파괴 그리고 변위에 대한 것을 주 연구 내용으로 하고 있으며, 지질학적인 기초를 요구하는 학문이다. 암반내에 존재하는 불연속면은 지하공간을 포함하는 암반의 거동을 결정하는 가장 중요한 변수이다.

- 현장조사와 시험의 기본적인 목적은 암반의 강도 정수의 결정과 현지 암반의 응력 상태를 규명하는데 있으며, 실험실 시험 혹은 현장 시험은 반드시 대상 암반의 역학적 거동을 대표할 수 있도록 수행되어야 한다.

- 수치해석의 결과는 그 결과가 비록 정량화되었더라도 정성적인 기준에 의해 평가되는 것이 타당하다. 암반의 변위 거동을 면밀하게 예측하여야 NATM의 기본 개념에 맞는 올바른 터널과 지하공간의 설계와 시공이 가능하며, 암반 사면의 안정성을 분석하는데 있어 역해석에 의해 산정된 강도 정수가 전제되어야 할 것으로 평가된다.

주요어 : 암반공학, 역학적 거동, 불연속면, 지하공간, 강도 정수, 변위, 계측

1. 서 론

암석역학이 하나의 학문 분야로 제안된 것은 1956년 (Talbot)이었으며, 1959년 12월 프랑스의 Malpasset댐

이 붕괴되면서 학문적인 가치를 인정받게 되었고 1964년 Mont Blanc 터널의 개통에 기여한 후 많은 발전을 거듭하였다(Berest *et al.*, 2000).

국토의 70% 이상이 산지이고 지질학적으로 화강암

*Corresponding author: skchung@kigam.re.kr

혹은 화강편마암이 주 구성 암석인 우리나라에서의 암반공학은 지금까지 수행되었던 대표적인 국책사업과 함께 발달하여 왔다. 1980년대까지는 지하자원개발을 위해 많은 양의 갱도를 굴착하였고 굴착된 갱도를 개발 기간 동안 유지하는데 암석의 역학적 특성과 응력의 해석 그리고 지보 설계가 필요하였다. 또한 광상의 부존 여건에 적합한 채광법 혹은 채탄법을 적용하기 위해서는 광체가 부존된 지층에 대한 암반공학적 특성을 규명하고 이에 적합한 경제적이고 안전한 채광법 혹은 채탄법의 설계가 필요하게 되었다. 1990년대 이후부터

는 석탄산업 및 일반광업으로부터의 수요가 극도로 미진하고 사회 간접자본 시설의 수요가 급증함에 따라 건설분야에서 암반공학의 역할이 더 많이 요구되었다.

특히 1970년 이래 지금까지 국내에서는 지하양수발전소, 지하유류비축시설, 고속철도 터널 및 지하철 터널과 같은 큰 규모의 암반공학 관련 사업이 수행되어 왔으며, 1980년대 말 수도권지역 개발이 활기를 띠면서 서울지역의 인구가 급격히 증가되었고 민간과 공공부분에서의 운송 수요에 대처하기 위해 도로와 지하철이 추가로 건설되었으며 지상 운송시설의 고속화 역시

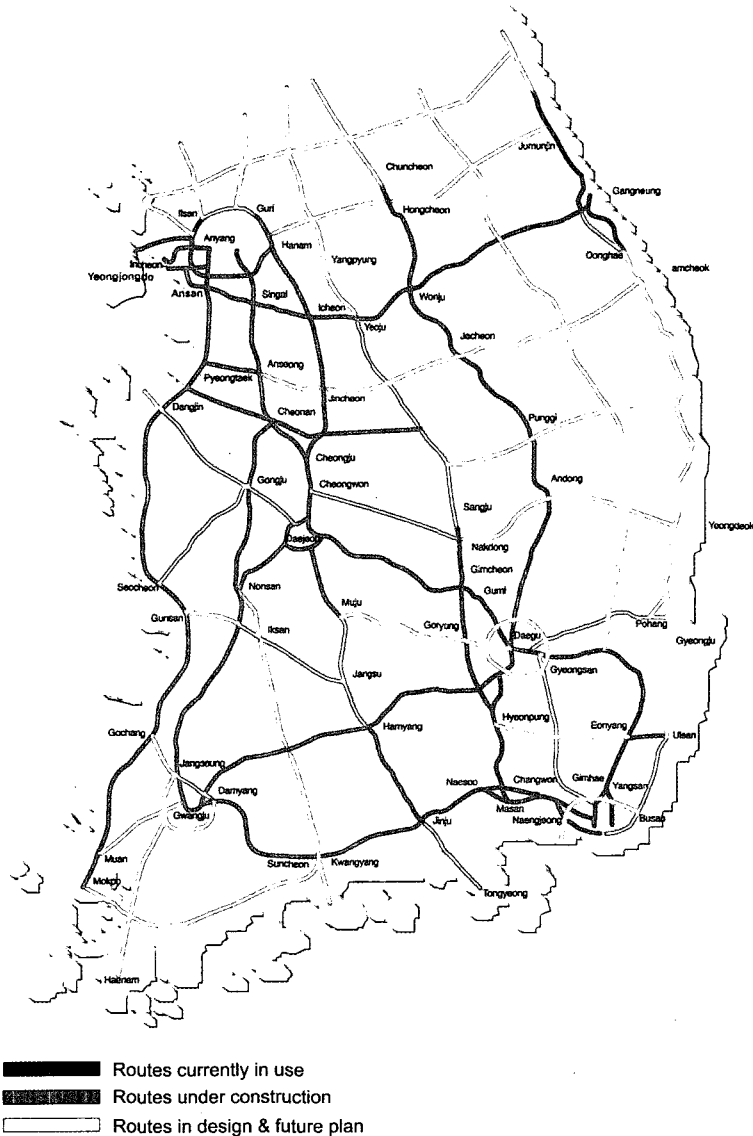


Fig. 1. Status and plan of Korean Highway network.

필요하게 되었다.

암반공학이 기여할 수 있는 대상 사업으로는 터널, 지하공간, 암반사면 그리고 구조물의 기초 등이 있는데, 국내 터널의 총 연장은 전력구나 통신구를 제외하고도 1,843 km에 달하고 있다. 국내에서 수행된 사회간접자본시설 관련 사업으로 건설된 터널의 총 연장을 사업별로 살펴보면 다음과 같다. 즉, 지하양수발전소: 14.8 km, 유류 등 에너지저장시설: 28.1 km, 고속철도 터널: 183.5 km, 철도터널: 240.9 km, 도로터널: 657.0 km, 지하철터널: 718.7 km 등이며 터널의 폭은 20 m 이상 되는 것도 있다(Fig. 2).

암반공학분야와 관련된 국내 학회로는 6개의 단체가 있는데 이들은 한국암반공학회(KSRM; 1981년 창립)를 비롯하여 대한토목학회(KSCE; 1951년 창립), 한국지구시스템공학회(KSGE; 1962년 창립), 한국지반공학회(KGS; 1984년 창립), 대한터널공학회(KTA; 1992년 창립) 및 대한지질공학회(KSEG; 1990년 창립) 등이다.

2. 암반공학적 과제

2.1. 사회적 수요

2.1.1. 도로터널

산악지역이 많은 국내 지형 여건 때문에 우리나라의 도로로는 대부분 터널과 교량으로 구성되어 있고 1990년 대부터 고속도로 추가 건설에 따라 터널의 건설이 급격하게 증가하였다. 도로의 총 연장을 국토의 면적으로 나눈 단위면적(1km²)당 도로 점유율은 0.89 km로서 선진국 수준에 크게 미치지 못하고 있어 이를 개선하기 위해 현재 건설 중인 도로 외에 더 많은 도로가 건설될 계획이다. 2020년 우리나라 고속국도의 총 연장은 지금의 두 배로 증가하게 되고 전국을 7개의 남북 축과 9개의 동서 축으로 연결시킬 계획이며, 국토의 50%를 2010년까지 4차선으로 확장할 계획이다(Fig. 1). 도로 건설에서의 암반공학기술은 설계, 시험 및 조사뿐만 아니라 시공 분야에서 급속한 발전을 거듭해 왔지만 아직도 안전문제, 환경문제 및 효율성 부분에서 많은 발전 여지를 안고 있다. 최근에 와서 터널내 화재 등의 사고를 예방하거나 사고가 발생하였을 때 피해를 최소화하기 위해서 도로 단면의 환기 시스템을 개발 적용하고 있다.

2.1.2. 지하철 터널

1974년 서울 지하철 1호선이 개통된 이래 지금까지 총 연장 437 km의 지하철 땅이 형성되어 있다. 현재 6

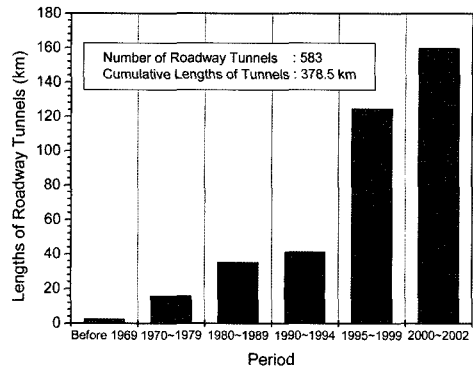


Fig. 2. Length of roadway tunnels.

대 도시에 지하철이 건설되어 있고 앞으로 94 km의 지하철망이 추가로 건설 중 혹은 계획되어 있다(Fig. 3). 지하철을 건설함으로써 터널을 굴진하는 기술들 즉, NATM, TBM(Tunnel Boring Machine)에 의한 기계굴착기술, 하저터널 굴진 등에 대한 많은 경험과 기술이 축적되었다.

특히 서울 지하철 건설 기간 중에 도입된 NATM 공법은 국내 사회간접 자본시설을 건설하는 과정에 많은 터널에 적용되어 왔다. 하지만 NATM이란 공법 자체는 알프스 산맥이 있는 산악지역의 터널링을 오랫동안 해 오던 오스트리아의 재래 전통기술을 체계화한 것에 불과하며(Kovari, 1993) NATM의 골자인 “암반내 동굴을 굴착할 때에 암반이 가지고 있는 고유의 지지능력을 이용하며, 굴진을 하면서 지보를 한다(Design as you go)”는 개념을 가진 기본 철학 역시 이미 19세기부터 현장에 적용되어 왔던 내용이다. NATM의 창시자로 알려져 있는 Rabcewicz(1964) 등이 NATM을 새로운 터널링 공법으로 소개하였을 때에는 본 공법의 개념이 암반공학적으로 몇 가지 잘 못된 이론적 배경을 가지고 있었다. 그 중 하나가 바로 암반내에 터널을 굴착한 후 터널 주변의 암반내에 새로운 응력 배치가 일어나는데 이 때 재배치된 응력의 크기가 암반이 가지는 고유의 강도 보다 클 때에는 파괴가 일어나는 것이 암반공학적 정론이다. 그리고 암반에 하중 혹은 응력이 작용하고 있고 다른 외력이 작용하고 있지 않을 때에는 응력이 지속적으로 감소하면서 변위가 발생한다. 하지만 이 무렵 NATM 개념은 암반내에 작용하는 응력이 터널 굴착 직후에 감소하다가 최소 응력점을 지나는 동안 변위가 발생하면서 다시 응력이 증가하게 된다는 모호한 이론을 가지고 있었다. 따라서 이들은 이 최소 응력점에 대응하는 지보력만으로

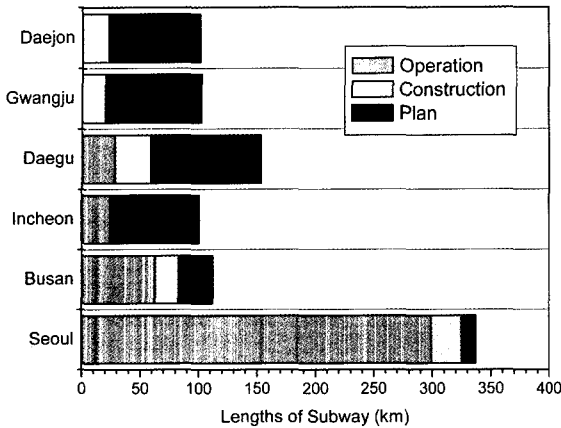


Fig. 3. Total Length of subway in Korea.

지보를 설계하는 것이 바로 NATM 공법이라고 소개하였다. 최근에 와서는 이러한 부분은 학자들(Hoek and Brown, 1980)에 의해 수정되었다.

NATM 공법의 또 다른 핵심인 “굴진을 하면서 지보를 한다”고 함은 관측(observation) 혹은 계측(monitoring)에 의해 터널 주위 암반 거동을 파악함으로써(주로 변위의 계측에 의해 규명) 규명된 암반의 거동 즉, 터널의 안정성을 확보하는 범위내의 변위만 허용하도록 지보를 하는 개념이다. 따라서 지보를 하는데 계측자료가 반드시 반영되어야 한다.

보편적으로 주계측단면과 보조계측단면에 공통적으로 측정되는 것이 내공변위인데 그 계측 정밀도를 1/100 mm로 권장(Bieniawski, 1984)하고 있는 이유가 있다. 터널의 직경을 일반적으로 10 m로 가정하면 우리가 계측하는 정밀도인 1/100 mm는 변형률로 환산할 때 단위 변형률(Strain; 10^{-6})에 해당되기 때문이다. 따라서 단위 변형률의 크기를 오차 범위로 설정하지는 의미가 담겨 있다.

NATM이 국내에 소개되어 지속적으로 적용되고 있지만, 계측 자료가 실제로 지보설계에 활용되지 못하는 실정이다. 그 이유는 암반의 변위가 터널의 안정성에 문제를 야기할 만큼 중요하지 않는 것이 대부분의 경우로 풀이되며 최근의 터널 설계 개념은 암반등급 평가(Rock mass classification) 방법인 RMR 혹은 Q 시스템과 접목한 이른바 RMR-NATM 혹은 Q-NATM 을 적용하기 때문인 것으로 보인다. 즉, 터널을 시공하기 전에 지질 조사 및 암반 조사를 통하여 터널의 암반등급을 평가하고 이에 적합한 지보를 설계하고 있다. 이와 같은 방법은 엄밀한 의미에서 NATM과는 거리가 있는 것으로서 일반적인 천공 및 발파(Drill and blast)에 의한 터널링

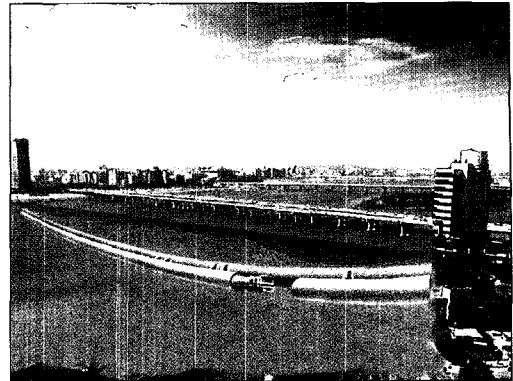


Fig. 4. Line No. 5 path crossing the Han River.

공법과 암반등급 평가에 의한 지보법이라 판단된다. 우리나라에서는 일부 파쇄대 혹은 저강도 암반을 제외한 대부분 산악터널에 적용되는 터널링 공법에 대하여 굳이 NATM이란 용어를 쓰지 않는 것이 좋을 것으로 판단된다.

한편 하천이나 수로의 하부에 터널을 굴진하기 위해서는 실드 TBM 혹은 가물막이에 의한 개착식 공법이 이용되는데, 하천으로부터 심도가 깊은 터널을 건설할 때에는 Open TBM이 적용된다. 서울 지하철 5호선 건설 중 한강 상류방향의 1,000 m 구간에 가물막이에 의한 개착식 공법이 적용되었으며(Fig. 4), 하류에는 실드 TBM이 적용되었다. 하류방향의 터널을 굴진하는 과정에 터널내에 출수량이 많아 조밀한 그라우팅을 하였다. 기계굴착방식인 TBM 공법은 1990년에 처음으로 국내에 도입되었으며 최근에 와서 실드 TBM이 지하철 터널공사에 많이 이용되고 있다. 2001년 부산지하철 2호선 건설공사에서는 폭 200 m의 수명강 하부를 횡단하기 위하여 직경 7.3 m의 실드 TBM이 적용되었는데 이 지역의 지질조건이 복잡한 복합지층으로 구성되어 있어 시공과정에 많은 어려움을 겪었다. 현재 국내 6대 도시에서는 총 13개 노선의 지하철이 운행 중에 있으며 5개의 노선이 건설 중에 있고 앞으로 각 도시 별로 추가 노선을 계획하고 있다.

2.2. 고속철도 터널

우리나라 최초의 철도터널은 1905년 경부선 철도를 건설하는 과정에 탄생했다. 그 당시 철도 터널은 다단계 굴착방법을 이용하였는데, 대부분의 경우 유럽식의 벽돌 라이닝을 사용하였다. 그 후 많은 터널이 건설되어 지금까지 굴진된 터널의 총 연장은 240.9 km에 달

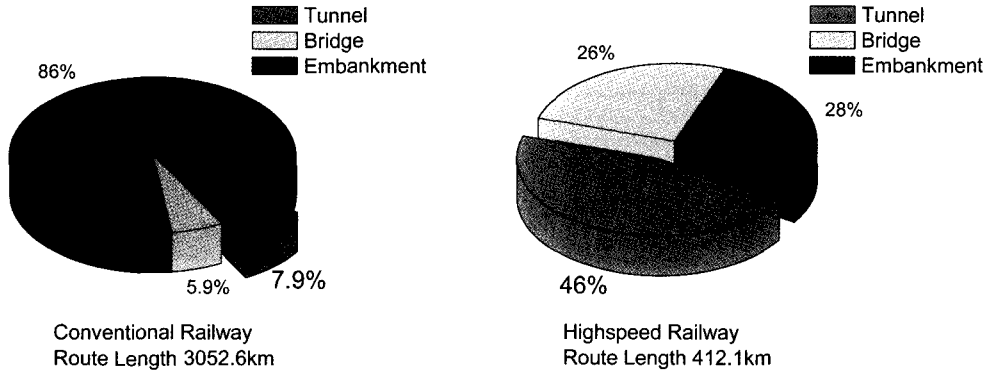


Fig. 5. Status and plan of national railway network.

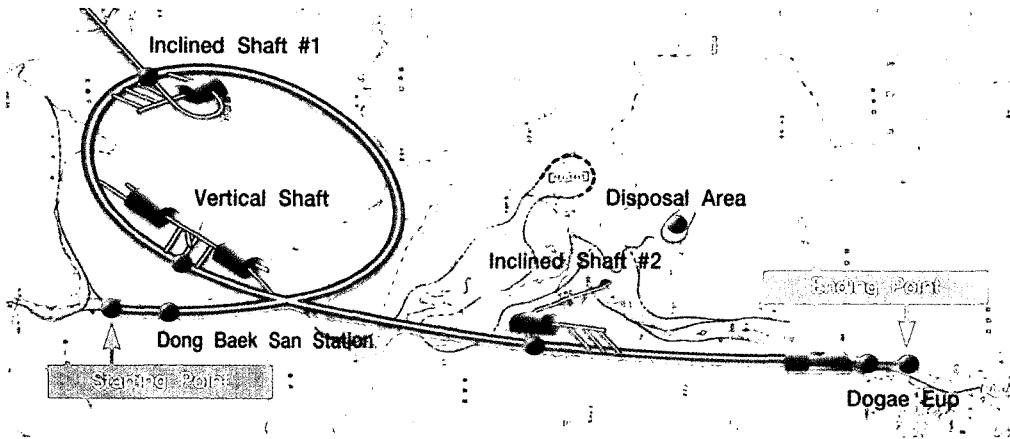


Fig. 6. Alignment of Solan tunnel in Yeongdong Line(18.5 km).

하며 이는 전체 철도 연장의 7.9%에 해당된다(Fig. 5). 지금까지 471개의 터널이 건설되었고 이 중 가장 길이가 긴 솔안 터널은 16.2 km로서 2005년 현재 영동선 철도 이설공사에 포함되어 있으며 이 터널은 통리와 도계 사이의 380 m의 급격한 해발 고도 차를 극복하기 위해 루프형 선형을 가지고 있다(Fig. 6). 이와 같은 일반 철도터널과는 달리 2005년 현재 운행 중에 있는 서울-대구 구간과 건설중인 대구-부산 간 경부선 고속철도(KTX) 노선상에는 총 연장 191 km에 달하는 터널이 완공 또는 건설 중에 있으며 이는 경부선 총 연장의 46%에 해당된다. 터널의 수는 총 84개로서 이중에 길이가 5 km 이상인 터널이 9개나 된다. 제1세대 고속철도의 설계속도는 300 km/h이나 단면의 크기가 107 m²인 복선궤도 터널일 경우에는 설계속도가 350 km/h로 커진다. 고속철도 터널의 형상과 단면을 결정하는 주요 요소는 열차, 속도, 공기역학, 궤도의 폭, 최소곡률반경, 궤도의 기울기, 유지 및 안전 기준 등이다. 복선 궤도 고

속철도 터널의 단면은 말발굽 형이며 터널 바닥에는 지반 조건에 따라 평평한 형태 혹은 타원형의 인버트로 구성되어 있다. 우리나라의 일반 철도터널과 고속철도 터널에서 사용하고 있는 단면, 굴착방법, 일차지보, 최종지보, 배수 및 방수 등을 적용하는 기술은 다른 외국의 경우와 거의 유사하지만 국내의 여건에 적합하도록 우리 고유의 방법으로 정착되었다. 고속철도를 건설하면서 얻은 경험은 앞으로 장기간 동안 터널을 효율적으로 유지 관리할 수 있는데 기여할 것이다. 축적된 경험과 새로운 기술의 개발로 고속철도 터널 건설 관련기술은 계속 발전될 것으로 전망된다.

향후 20년 동안 여러 노선의 새로운 고속 철도가 건설되고 복선 전철화될 전망이다. 전국 철도망의 총 연장은 5,000 km에 달하게 되며 새로운 철도 건설에는 암반공학 기술을 필요로 하는 사업이 활발히 진행될 것으로 예상된다.

Table 1. Underground crude oil and LPG storage facilities in operation

name	Contained material	Section (W \times H)(m)	Total Length(m)	Storage Capacity(kl)	Rock Type	Construction Period
U-2	crude oil	18 \times 30	8,814	4,293,000	Granodiorite	'81-'85
L-1	LPG	18 \times 22.5	879	300,000	Andesite	'86-'89
K-1	Gasoline Kerosene	15 \times 20.5	1,262	231,000	Granite	'75-'82
○○	LPG	15 \times 19.5 16 \times 21.0	968	290,000	Andesite Tuff	'81-'83
△△	LPG	19 \times 21.0	1,482	500,000	Sandstone	'85-'88
K-1*	Gasoline	18 \times 22.5	440	159,000	Granite	'90-'94
U-1	crude oil	18 \times 30	8,685	4,452,000	Andesite Tuff	'90-'98
U-2*	crude oil	18 \times 30	3,794	1,908,000	Granodiorite	'90-'97
L-1*	LPG	18 \times 22.5	830	315,000	Gneiss	'90-'96
Y-2	LPG	16 \times 26	800	928,000	Gneiss	'97-'00
**	LPG	16.4 \times 20.5	1,180	367,000	Granite	'97-'01

2.3. 암반동굴 및 지하시설

우리나라에는 여러 가지 형태의 지하공간과 터널이 암반내에 건설되어 왔는데, 예를 들면 지하 원유저장 시설, 지하 LPG 저장시설, 지하 식품저장시설, 지하 양수발전소, 지하 전력구, 지하 저수 터널, 도수터널 등이 그것이다.

2.3.1. 유류 및 가스 저장 동굴

1970년대에 석유파동이 일어난 이 후 정부는 석유의 안정적 공급을 위해 60일분의 석유류를 저장할 수 있는 지하 유류 저장시설을 건설하였다. 지하 유류 및 가스 저장시설을 대규모로 건설함으로써 우리나라의 암반공학 기술을 한 단계 발전시키는 계기가 되었다.

원유를 비축하는 지하동굴 방식은 프랑스의 Geostock사로부터 기술을 이전 받았으며, 그 기본 개념은 석유가 물보다 가벼워서 비축 동굴내에 석유를 저장하고 동굴 주위에 수압을 유지하게 되면 동굴로부터 석유가 유출되지 않는 것이다. 지하 유류 비축 동굴을 건설하기 위해서는 적합한 암반 조건을 조사하는 기술, 대규모 동굴(폭 20 m, 높이 30 m, 길이 1 km 이상)의 굴착 및 유지 기술이 필요하며, 장기 저장환경에 따른 암반의 물성과 암반내 지하수 유동에 대한 기초 기술이 적용된다.

1977년부터 1982년까지 서울 남동쪽에 우리나라에서 처음으로 석유 제품유 지하 저장 동굴이 건설된 이래 지금까지 10 여 곳의 석유 및 가스 지하 저장 동굴이 건설되었다. 맨 처음 건설된 동굴의 규모는 150 만 배럴이며 이와 인접한 곳에 같은 규모의 동굴이 1994년에 건설되었다. 1981년부터 1997년까지 남해안에 3기의 지하 원유 저장시설이 건설되었고 현재 추가

저장시설을 건설 중에 있다.

지하 유류 저장 시설은 정부의 전력비축 사업의 일환으로 수행되는 한편, 민간 기업에서도 울산지역에서 타당성 연구를 수행한 바 있다. 1984년 여수에 부탄과 프로판 등 LPG 지하저장 동굴이 운영되기 시작하여 5 기의 LPG 저장 동굴이 울산, 평택 및 인천에 건설되었다(Fig. 7). LPG 저장 동굴은 민간 기업에서 운영하고 있으며 상업화에 성공하였다(Table 1).

2.3.2. 지하 식품저장 동굴

우리나라 도시 지역의 토지 이용 수요가 점점 증가함에 따라 지하 동굴을 이용한 식품저장시설 건설이 1995년 처음으로 시도되었다. 암반내 -30°C의 저온 저장을 위해서는 암반과 지하수를 함유하고 있는 암반의 냉열 저동 규명이 필요하다. 암반이 장기간 동안 저온 상태에 놓이게 되면 암반내 냉열 전파가 일어나고 냉열로 인한 암반의 수축현상이 일어남으로써 저장 동굴의 안정성에 영향을 미치게 된다. 대전 연구단지내에 있는 한국지질자원연구원에 국내 처음으로 지하 냉장 및 냉동식품 저장용 파일럿 시험장이 건설(김호영 외, 1997)되었고 이를 바탕으로 하여 1996년 상업용 지하 냉동식품 저장 동굴이 곤지암에 건설되어 현재 수입 냉동육을 저장하고 있다(Fig. 8).

2.3.3. 지하 양수 발전소

지하 양수 발전소를 건설하기 위해서는 대규모의 동굴을 건설하여야 하며 몇 개의 동굴을 인접하여 배치하려면 3차원적인 응력해석이 이루어져야 한다. 이 때 동굴이 위치하는 암반내에 작용하는 초기응력의 규명이 필요하다.

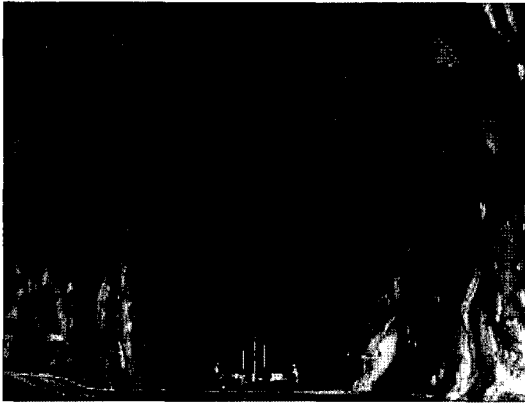


Fig. 7. Final piping works after excavation of Pyeongtaek LPG Storage.

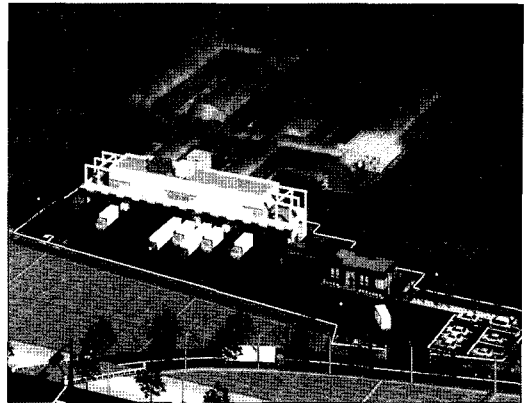


Fig. 8. Gonjiam Food Storage Cavern.

국내에서는 4기의 지하양수발전소가 현재 운영 중에 있고 앞으로 2기가 추가로 건설될 예정이다. 첫 번째 지하양수발전소는 발전용량 400 MW급으로 1980년 청평에 건설되었으며 7년여의 공사기간이 소요되었다. 이어서 두 기의 600 MW급 지하양수발전소가 무주와 삼랑진에 각각 건설되었다. 산청 지하양수발전소의 발전용량은 700 MW로서 최근에 완공되었으며 양양과 청송의 지하양수발전소는 현재 공사 중에 있다. 그리고 입지선정이 어려운 점을 고려할 때 앞으로 지하원자력 발전소의 건설에 대한 연구가 필요 할 것으로 본다.

2.3.4. 지하전력구

최근에 지하전력구의 수요가 증가함에 따라 지난 2년 동안 20개의 지하 전력구 터널이 건설되었으며 현재 서울지역에는 10개의 지하 전력구 터널이 추가로 건설되고 있고, 실드 TBM, open TBM 혹은 Drill & Blast 방법 등이 굴진 방법으로 적용되고 있다. 앞으로 수요증가에 따라 시공상의 민원 문제 등을 해결하고 안전성과 경제성을 제고하기 위하여 Microtunneling 기술을 도입하는 것이 바람직할 것으로 평가된다.

2.4. 미래과제

지금까지 국내에서 지하공간 관련 사업이 수행되면서 암반공학과 터널링 분야의 많은 경험과 기술이 축적되어 왔지만 가까운 장래에 지하 유류 저장시설과 지하양수 발전소와 같은 사업들이 완료될 것으로 전망된다. 따라서 암반공학과 관련기술을 더욱 발전시키는 새로운 사업의 창출이 시급히 요구된다.

암반공학 분야의 학자 및 기술자들은 새로운 사업을 창출하기 위해 지금까지 노력해 오고 있으며 최근에

암반의 냉열 거동 연구 성과에 따라 액화천연가스(LNG) 지하저장 관련 기술을 개발하였으며(정소걸, 2006), 그 기술을 바탕으로 액화수소가스의 지하저장 기술의 개발이 가능할 것이다. 지구 온난화를 대비한 심지층내 이산화탄소 격리에 대한 연구 역시 시급하며, 지하 방사성폐기물 처분장 관련 과제를 앞으로 추진할 주요 과제로 예상하고 있다. 지하 암반내에 장기적으로 저장시설을 유지하기 위해서는 암반의 장기 거동에 대한 크립(Creep) 연구도 지속적으로 수행되어야 할 연구 주제이다. 또한 최근 국내 뿐만 아니라 국제적으로도 각국에 소속된 본토와 섬을 연결하고 서로 인접하는 국가간의 교통망을 형성하기 위해 해저에 교통신널을 시공 또는 구상하고 있어 이에 대한 연구 역시 활발할 것으로 보인다.

지하 암반내 LNG 저장을 위한 암반동굴(Lined Rock Cavern, LRC) 파일럿 시험

LNG가 -162°C 인 극저온 물질이기 때문에 LNG를 지하 암반내 저장하는 기술은 아직까지 세계 어느 나라에서도 상용화되지 못하고 있다. SK건설은 프랑스의 Geostock 및 Technigaz와 공동으로 멤브레인 구조를 가지는 저장탱크를 이용하여 경암내에 새로운 개념의 LNG 저장기술을 개발하여 한국지질자원연구원과 함께 기술을 검증해 오고 있으며 2004년과 2005년에 걸쳐 파일럿 시험 과정(Fig. 9)을 거쳐 Prototype의 개발 단계에 와 있다(정소걸 외, 2005). 지하 암반 동굴내에 LNG를 저장하면 극저온 상태의 LNG로 인하여 동굴 둘레에 동굴과 유사한 모양을 가지는 빙벽(Ice ring)이 형성되는데, 이 빙벽은 저장탱크의 내조시스템(Containment system)과 함께 자연 방호벽 역할을 하

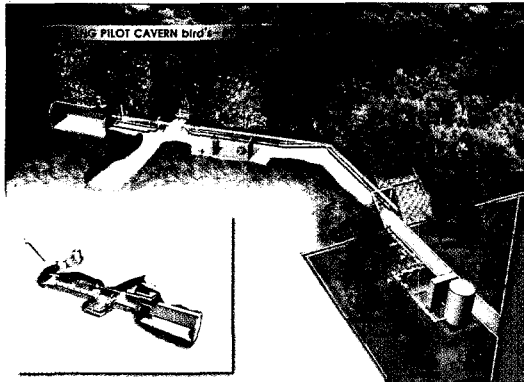


Fig. 9. General arrangement of Daejeon LNG pilot cavern.

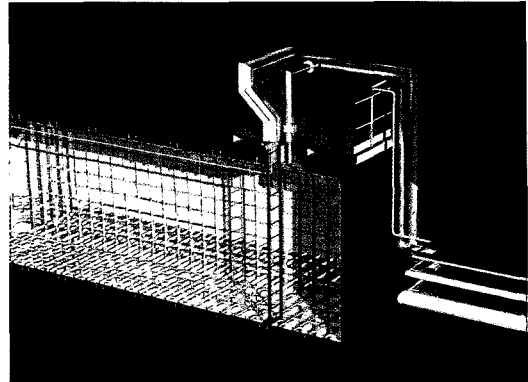


Fig. 10. Containment system of Daejeon LNG pilot cavern.

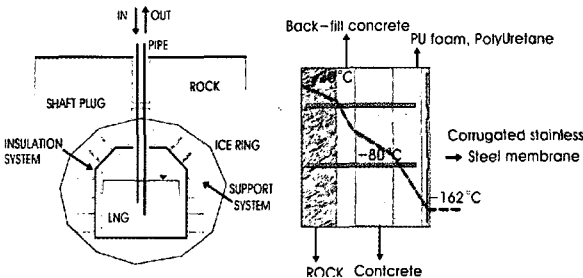


Fig. 11. Concept of LNG storage cavern and containment system.

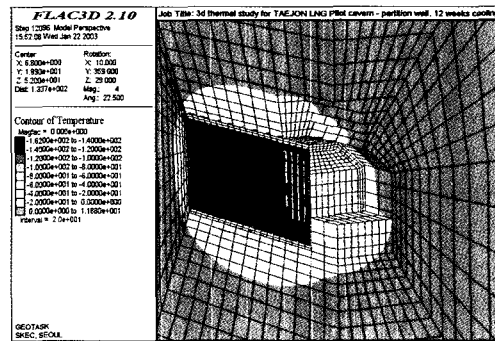


Fig. 12. Thermo-mechanical analysis of pilot cavern.

게 된다. 빙벽을 형성시키기 위해 동굴이 건설될 장소에 동굴을 굴착하기 전부터 암반을 배수한 후 LNG를 주입하여 건조한 상태의 암반이 결빙될 때까지 배수상태를 유지하며 결빙된 후에는 배수를 중단하여 지하수위를 회복시킴으로써 0°C 등온선을 따라 빙벽이 형성되도록 한다. 이와 같은 개념을 실제로 검증하기 위하여 한국지질자원연구원내에 LNG 저장 파일럿 시험장을 건설하고 시험을 실시하였다. 파일럿 시험장으로 이용된 지하 동굴은 1995년부터 1997년까지 지하 냉동 및 냉장 식품 저장 연구 동굴로 활용된 바 있다. 파일럿 플랜트의 저장 동굴 규모는 부피 110 m³로 육면체 모양을 가지며 그림과 같이 암반을 록볼트 등으로 보강한 다음 내조시스템과 암반 사이에 철근 콘크리트 라이닝이 설치되어 있다. 내조 시스템의 내부에는 주름이 있는 멤브레인과 그 외부를 폴리우레탄폼(Polyurethane foam, PU Foam)이 덮고 있다(Fig. 10). 1년여에 걸친 토목공사를 거쳐 배관과 계측장비 설치를 완료한 다음 2003년 시험 준비를 끝마쳤다. 지

난 2004년 1월 초부터 7월까지 시험 중에 주입된 액체는 LNG 보다 더 저온 상태며 안전한 액화질소(LN2)를 사용하였다. 시험 중에는 지중변위계, 지중경사계, 온도계, 지하수위계, 균열계 및 스트레인게이지 등 여러 가지 계측장비를 설치하여 극저온 상태의 암반 거동과 빙벽의 형성과정을 검증하였다(Fig. 11). 파일럿 시험 중 취득된 자료는 설계 단계에 이용된 전산 모델링 결과를 검증할 수 있었을 뿐만 아니라(Fig. 12, Fig. 13) 장차 실 규모 상업용 지하 LNG 저장동굴 건설 사업을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 본다.

3. 암반공학 분야 연구개발

3.1. 국가연구개발사업

현재 암반공학 관련 연구 사업을 지원하고 있는 국가기관으로는 과학기술부(MOST), 건설교통부(MOCT), 산업자원부(MOCIE), 정보통신부(MIC), 교육인적자원부

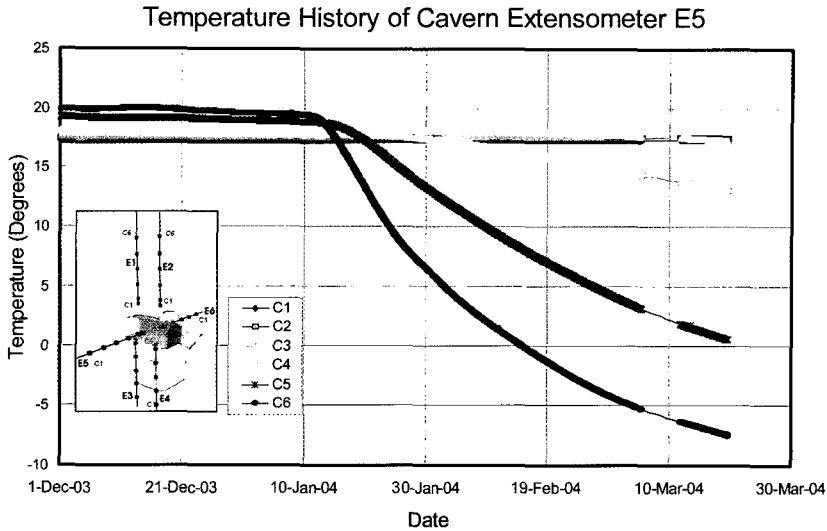


Fig. 13. Temperature history measured from extensometer E5.

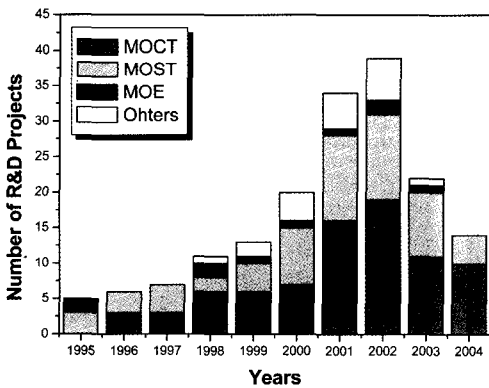


Table 2. Classified fields in rock mechanics based on ISRM standard

Classification	Rock Mechanics fields
Field 1	Site investigation and testing
Field 2	Properties of rock and rock mass
Field 3	Numerical modeling and analysis
Field 4	Tunnels and underground excavation
Field 5	Rock slope and surface excavation
Field 6	Blasting and vibration
Field 7	New technology and etc.

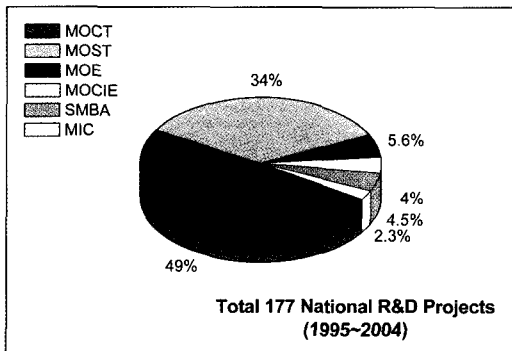


Fig. 14. General trend of national R&D projects on rock mechanics.

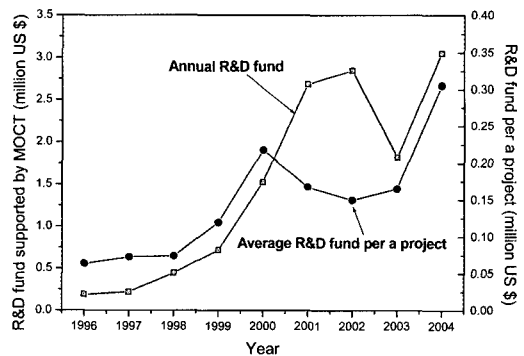


Fig. 15. Annual trends in research fund supported by MOCT.

(MOE&HRD), 중소기업청(SMBA) 등이 있다.

암반공학 관련 국가 연구개발 사업은 해마다 증가 추세에 있으며 2000년 이후에는 20여 개의 사업이 수

행되었다(Fig. 14). 지난 10년 동안 연구 사업비 중 49%는 건설교통부에 의해 지원되어 왔으며 대부분 터널과 암반사면에서의 암반공학 응용과 관련된 연구비이다. 국토의 여건상 전국토의 70% 이상이 산악이르

로 사회간접자본시설 확충에 필요한 국토의 활용을 위해서는 암반공학과 관련된 문제의 해결이 필요하다.

한편 건설교통부 연구개발비를 분석해 보면 1999년 이후 급격한 증가 추세를 보이고 있는데 2004년의 경우 3백만 달러를 기록하였다(Fig. 15). 또한 한 연구 과제 당 연구비도 계속 증가 추세에 있으며 30만 달러를 상회하는 규모이다. 최근에 수행된 연구 사업을 국제암반공학회(ISRM)의 기준에 따라 분석해 보면 암반공학 분야의 연구 사업은 크게 7개 분야로 나뉠 수 있다(Table 2).

지난 10여 년간 수행된 177개의 국가 연구개발사업

은 암반 터널과 지하공간 관련 연구가 전체 연구비의 37%를 차지하고 있는데 그 이유는 이 연구비의 대부분이 건설교통부에서 암반 터널에 관련된 연구개발비로부터 지원된 것이다. 현장조사와 전산모델링이 두 번째와 세 번째로 많이 지원된 연구개발 분야이다. 과학기술부가 지원한 연구비는 암반공학 관련 전체 연구비의 34%를 차지하고 있는데 대부분 기초 및 학술 연구 과제이며 여러 세부 분야에 고른 분포를 보이고 있다(Fig. 16).

3.2. 암반공학 연구 내용과 분야

암반공학에서 다루는 기본적인 내용은 다음과 같이 요약될 수 있다. 즉, 암반공학은 암반과 관련된 공학적인 문제를 다루는데 근본 학문은 암석역학(Rock mechanics) 또는 암반역학이나, 보다 현장 중심적인 응용 학문으로 분류할 때에는 암반공학(Rock engineering)으로 부르기도 한다. 암반공학에서는 암석(Rock, 또는 Intact rock)과 암반(Rock mass)을 구분하고 있다. 학문 분야로 볼 때 암석역학에서 다루는 주요 내용으로는 첫째, 재료로서의 암반에 대한 변형, 파괴 및 변위 등이며, 여기서 암석은 하나의 유체와 같은 연속체로 보는 경우와 절리 등이 내포되어 있는 불연속체인 경우 그리고 이들 고체와 유체의 집합체인 경우가 있다. 둘째, 지질학 분야의 암석학, 광물학 및 층서학 등은 암석역학에 있어 역학적 성질을 결정하는 이방성과 등방성 혹은 연속성의 파악과 시편의 치수효과(Scale effect)와 관련되며, 구조지질학은 불연속체 암반의 역학적 특성을 결정하기 위한 기초가 된다. 암반을 이루는 구성 요소는 크게 암석과 불연속면으로 볼 수 있으며 이중 암반의 역학적인 특성을 결정하는 것은 불연속면일 경우가 지배적이기 때문에 암반공학에서의 구조지질학의 중요성은 대단히 크다고 볼 수 있다.

암반공학의 분야별 주요 연구 주제와 그 발전 과정을 보면 다음과 같다.

3.2.1. 암반조사 및 시험

현지 암반 조사는 지하 구조물을 건설하기 전 기본 설계과정부터 필요한 분야로서 이 과정에 노두의 지질조사를 통한 지질구조, 층서 등을 규명하고 특히 암반내 불연속면의 분포와 특성을 파악하게 된다. 암반 조사와 시험을 하는 가장 중요한 목적 중에 하나는 구조물이 위치할 입지의 암반 강도 정수를 결정하는 것이다.

지하에 구조물을 건설할 때에는 지표조사는 물론 물

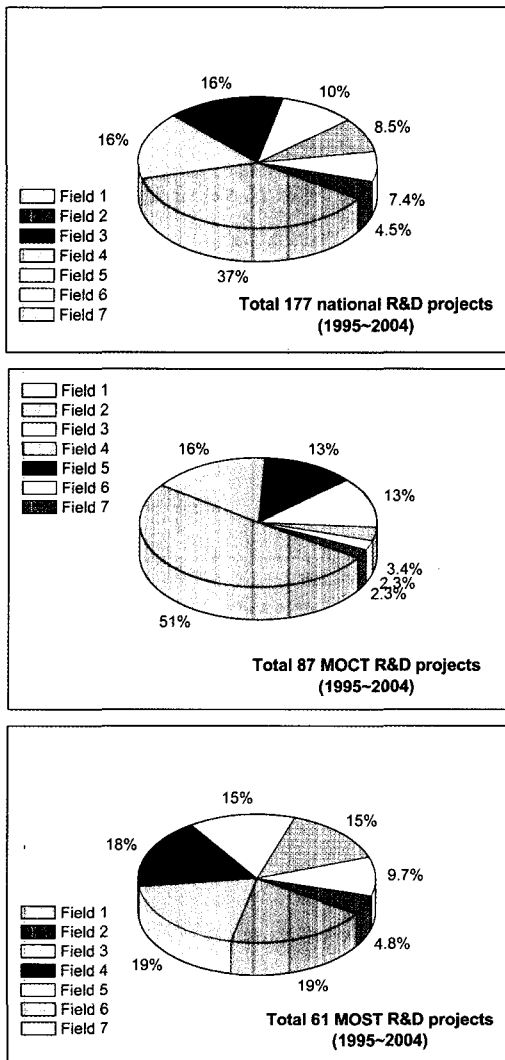


Fig. 16. Research trend of rock mechanics based R&D projects during last decade.

리탐사 방법과 시추조사를 통하여 구조물이 건설될 심도에서의 암반 특성을 예측하여 구조물의 안정성을 검토한다. 조사 결과는 주로 암반의 강도 정수 결정에 중요한 요소가 되는 암반의 등급 판정에 이용되며, 이렇게 결정된 등급 즉, RMR(Bieniawski, 1989) 혹은 Q(Barton and Grimstad, 1994) 값에 따라 암반의 강도를 결정하는 방법을 최근에 많이 활용하고 있다. 이들 암반 등급의 판정은 암반내에 존재하는 불연속면의 분포와 특성에 많은 영향을 받으며 실제로 신선한 암반 부분 보다 불연속면의 특성에 따라 암반의 강도정수가 결정되는 것이라 해도 과언이 아니다. 이 과정에 지표 조사에서 구한 여러 가지 물성이 지하 심부의 물성으로도 적정한 가를 판단해야 한다. 방사성 폐기물 처분 시설 등과 같이 1,000m 정도의 고심도의 구조물을 대상으로 할 때에는 암반내 존재하는 불연속 면의 특성에 따라 암반의 등급을 결정하는 방법의 한계가 나타나는 경우가 있는 점(Martin, 2005)에 유의해야 한다. 다시 말해서 심도가 크지 않는 위치에 건설되는 터널 혹은 지하공간의 안정성을 평가하기 위해 산정한 암반의 강도정수는 RMR 혹은 Q값으로부터 결정되지만 지하 심부에서는 이와 큰 차이를 보일 수 있고 암반내 분포하는 불연속면 보다 암반내 응력의 분포가 암반의 강도 정수 결정에 더 큰 영향을 미칠 수 있다는 것이다. 암반내 작용하는 응력의 크기와 방향을 결정하는 방법으로는 과거에 공경변형을 측정법(USBM deformation meter, Panek, 1965), 공저변형을 측정법(Doorstopper method) 그리고 공벽변형을 측정법(Leeman method, 1969) 등을 이용한 응력해방법 또는 응력개방법(Overcoring method) 등이 이용되어 왔는데 이들 방법은 암반내 발생하는 변형률의 크기를 측정하여 암반의 변형계수를 곱함으로써 응력을 산출하는 간접적인 방법이다. 1990년대 초 수압파쇄 방법(Hydraulic fracturing method)에 의한 초기 응력 측정법이 도입되면서 지표에서 시추공에 의해 초기응력을 직접 측정하고 있다. 수압파쇄에 의한 방법 역시 연직방향의 응력(Vertical stress)을 하나의 주응력으로 가정하는 단점이 있어 이를 보완하기 위한 방법으로 공간 3개의 서로 다른 방향의 시추공을 이용한 방법 등이 연구되고 있다.

3.2.2. 암석 및 암반 물성

암석의 압축강도는 인장강도 보다 더 큰(압축강도/인장강도=10-20) 특징을 가지고 있어 일반적으로 일축압축강도(Uniaxial Compressive Strength, UCS)를 암석

의 대표적인 역학적 특성으로 보는 것이다. 지금까지 현장 암반으로부터 채취된 암석 시편을 이용하여 암반의 물성을 규명하여왔고 이들 물성치를 기초로 암반을 단성체 혹은 탄소성체 또는 점탄소성체로 단순화하여 지하 구조물의 안정성을 해석하여 왔다. 1960년대까지 즉, 컴퓨터가 개발되기 전까지는 이와 같이 단순화된 모델을 기초로 한 분석적 해석에는 실험실에서 구한 암석의 강도 정수가 거의 전부였다고 할 수 있다. 현지 암반을 대상으로 한 실규모의 물성시험은 시편의 크기에 따라 강도 정수가 저하되는 치수효과(Scale effect)를 극복하고 현장의 암반 물성에 보다 접근된 그리고 구조물을 이루는 암반의 물성에 대한 대표성(representability)을 가질 수 있어야 한다.

3.2.3. 수치해석

컴퓨터가 개발되기 이전에는 분석적인 해석 방법과 물리적 모델을 주로 활용하여 암반 구조물의 안정성을 해석하여 왔다. 실험실 내에서 유사모델을 이용한 차원해석 또한 많이 수행되었었다. 1970년대 후반부터 컴퓨터가 도입되고 난 이후에는 컴퓨터에서 수치모델을 이용하여 응력해석을 하고 있다. 초기에는 유한차분법(Finite Difference Method, FDM), 유한요소법(Finite Element Method, FEM)등을 활용하여 대상 암반 전체를 미소요소로 분할하여 경계조건, 강도 및 물성 자료를 입력하면 암반 구조물의 예상 거동이 결과로 출력되었다. 그 후 암반내 채굴 공동 문제와 같이 경계조건으로부터 주변 암반의 거동을 계산하는 경계요소법(Boundary Element Method, BEM)이 개발되어 터널과 지하공간의 설계에 활용되었고 특히 자원 개발을 위한 채굴공동의 안정성 평가에 많이 활용되었다(Chung, 2004). 이상의 세 가지 방법은 암반을 하나의 연속체로 가정하여 개발된 모델들이다. 한편 질리가 많이 발달한 암반을 대상으로 하여 개발된 개별요소법(Distinct Element Method, DEM)은 질리의 물성을 고려한 불연속체 모델이라는 특징을 가지고 있다. 최근에는 불연속체 모델링인 DDA(Discontinuous Deformation Analysis) 외에, 인공신경망 이론을 이용한 수치해석방법 그리고 확률론을 응용한 수치해석 방법도 활용되고 있다 (암반공학 수치해석, 2005). 아울러 FEM-BEM과 같이 두 가지의 수치해석 방법의 장점을 접목한 하이브리드(Hybrid) 형 수치해석 방법도 자주 이용되고 있다. 방사성 폐기물처분 혹은 지하천연가스저장 시설과 관련하여 암반 구조물을 다룰 때에는 암반의 역학적 거동뿐만 아니라 열적 거동 그리고 수

리적 거동을 동시에 고려하는 THM(Thermo-hydro-mechanical model) 커플링(Coupling) 해석이 필요하며, 장기적으로 암반이 화학적 변화에 노출되어 있는 환경을 고려하면 화학적 거동 역시 고려되어야 할 것으로 본다. 수치해석에서 암반구조물의 안정성을 평가하는 기준으로 암반의 파괴기준(Failure criterion)을 이용하는데 과거에는 최대 전단강도 개념의 Mohr-Coulomb 공간이론이 지배적이었으나 최근에 와서 경험적인 파괴기준(Hoek and Brown, 1980)을 많이 채택하고 있다. 수치해석을 할 때 유의해야 할 점은 수치해석을 통해 정량적인 결과가 도출되기는 하지만 이에 대한 검증이 반드시 전제되어야 한다는 것이다. 다시 말해서 수치해석의 결과는 정성적으로 보는 것이 바람직하다.

3.2.4. 터널과 지하공간

터널과 지하공간 관련 분야에서는 이미 재래식 자원 개발용 갱도와 채굴장 건설에 적용되었던 기술을 제1세대로 볼 수 있으며, 이 때에는 천공 및 발파에 의한 굴진과 목재 혹은 철재 지보를 이용하여 안정성을 유지하였다. 1980년대 들어 서울 지하철 건설과 함께 록볼트와 슛크리트를 이용한 새로운 지보법이 도입되어 자원 개발용 갱도 지보에도 활용됨으로써 강성지보에만 의존하던 시대로부터 한 단계 발전을 하였다. 서울 지하철 건설 기간 중에 도입되었던 NATM 공법은 원래 오스트리아의 재래 전통기술을 체계화한 것으로서 “암반이 가지고 있는 고유의 지지능력을 이용하며, 굴진을 하면서 지보를 한다(Design as you go)”는 개념을 가지고 있다. NATM 공법의 기본 개념중의 하나인 “굴진을 하면서 지보를 한다”고 함은 관측(Observation) 혹은 계측(Monitoring)에 의해 터널 주위 암반 거동을 파악함으로써(주로 변위의 계측에 의해 규명) 규명된 암반의 거동 즉, 변위가 터널의 안정성을 확보하는 허용 범위 내에 있도록 지보를 하는 개념이다. 따라서 지보를 하는데 계측자료가 반드시 반영되어야 한다.

변위중에 보편적으로 주계측단면과 보조계측단면에서 공통적으로 계측되는 것이 내공변위인데 그 계측 정밀도를 1/100 mm로 권장(Bieniawski, 1984)하고 있는 이유가 있다. 터널의 직경을 일반적으로 10 m로 가정하면 우리가 계측하는 정밀도인 1/100 mm는 변형률로 환산할 때 단위 변형률(Strain; 10^{-6})에 해당되기 때문이다. 따라서 단위 변형률의 크기를 오차 범위로 설정하자는 의미가 담겨 있다.

최근의 터널 설계 개념은 암반등급 평가(Rock mass classification) 방법인 RMR 혹은 Q 시스템과 접목한

이른바 RMR-NATM 혹은 Q-NATM 을 채택하고 있다. 즉, 터널을 시공하기 전에 지질 조사 및 암반 조사를 통하여 터널의 암반등급을 평가하고 이에 적합한 지보를 설계하고 있다.

Q시스템을 근거로 하는 노르웨이식 터널링공법(Norwegian Method of Tunneling, NMT)이 소개되면서 최종 콘크리트 라이닝이 없는 소위 싱글셸(Single shell) 공법이 연구개발되고 있다. NMT 역시 노르웨이의 자원개발 현장에서 오랫동안 적용되어 오던 고유 공법으로서 NGI(Norwegian Geotechnical Institute)에서 Barton 등(1992)에 의해 체계화된 것이다.

부피가 백만 입방 미터($1,000,000 \text{ m}^3$) 이상의 대규모 지하공간을 건설하기 위해서는 여러 가지 구상이 발표되어 왔는데 그 중에 실현 가능한 기술로는 지하공간 가장 자리 곡면을 따라 TBM 등에 의해 1차로 조밀하게 굴진을 한 다음 그 터널 전단면을 보강재료로 채워 보강을 한 다음 곡면내부를 굴착하여 지하공간을 형성하는 개념이다. 이 때 곡면을 따라 굴착된 곡선 터널이 일반 터널에서의 지보(Steel rib) 역할을 하게 되는 것이다.

3.2.5. 암반사면과 굴착

암반 사면의 안정성 해석은 암반 사면의 파괴 유형에 따라 수행된다. 암반 사면의 파괴 유형을 보면 주 절리군이 한 개이며 절리면의 경사방향과 사면의 경사방향이 $\pm 20^\circ$ 이내의 범위에서 유사한 경우 평면 파괴, 절리면이 두 개이며 두 절리면이 교차하여 만드는 교선의 방향 즉, 침강선(Plunge) 방향이 사면의 경사방향으로 향하고 있을 때 썩기형 파괴 그리고 절리면의 분포가 분산하고 있을 경우에는 원호 파괴로 가정하여 사면의 안정성을 해석한다. 그리고 암반 사면의 경사방향이 절리면의 경사방향과 반대 방향일 때 전도 파괴를 예상할 수 있다. 이와 같은 사면의 안정성을 해석하기 위해서 이용되는 암반의 강도 정수인 점착력(Cohesion)과 마찰각(Friction angle)은 절리면을 자연 상태로 채취해서 실험실에서 절리면에 대한 전단시험(Shear test)을 수행하여 산정하는 것이 일반적이다. 강도정수는 최대 강도 정수와 잔류 강도 정수로 구분되는데, 장기적인 안정성을 고려할 경우에는 잔류 강도 정수를 사용하는 것이 타당하다. 현지 암반의 조건이 시편 형성에 적합하지 않을 경우에는 문헌을 활용하여 강도정수를 유추하는 경우가 있지만 최근에는 현장 암반 조사로부터 공간GSI(Geological Strength Index) 등에 의해 점착력과 마찰각을 구할 수 있어(Hoek, 1999;

Carranza-Torres and Fairhurst, 1999) 보다 현장 암반의 거동에 접근된 결과를 얻을 수 있다. 사면의 안정성을 파악하는 지표로는 안전계수(Safety factor) 즉, 전단강도와 전단응력의 비를 이용하며, 건조한 사면일 때 1.5 이상 습윤 사면일 때 1.2 이상이 일반적으로 안전한 사면으로 평가한다. 그러나 사면의 안전계수가 크다고 해서 더 안전한 것은 아닌 경우가 허다하며, 사면의 파괴가 일어난 부분으로부터 역해석적인 방법으로 안정성을 예측하는 것이 바람직하다.

3.2.6. 발파 및 진동

암반내 구조물을 건설하거나 재료를 채취하고자 할 때 발파에 의한 방법이 가장 경제적이며 보편적이다. 발파에 의해 방출되는 에너지는 소음과 진동으로 나뉘는데 이들은 발파로 인한 환경문제를 유발하는 원인이 된다. 소음은 인체나 동물에 미치는 영향외에 구조물에 대한 영향을 평가할 수 있는 음압 레벨이 연구 대상이 된다. 지반의 진동이 인접하는 구조물의 안정성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 주로 지반 진동의 속도를 이용하는데 속도를 측정하여 구조물에 미치는 영향 범위를 산정할 때 최대진동속도(Peak Particle Velocity, PPV)를 이용한다. PPV는 폭원으로부터의 거리, 지발당 최대 장약량과 입지 상수의 곱으로 표현되며 거리를 장약량으로 환산한 형태인 환산거리(Scaled distance, SD)를 사용하는데, 이 때 장약량의 제곱근으로 환산한 형태의 것을 제곱근 환산거리라고 하며, 세 제곱근으로 환산한 형태의 것을 세제곱근 환산 거리라고 한다. 제곱근 혹은 세제곱근의 선택은 자료처리 결과 적합도가 높은 쪽을 선택하는 것이 보편적이다.

3.3. 국책연구소의 연구동향

국내 국책연구기관 중 암반공학 분야의 연구를 수행하고 있는 기관으로는 한국지질자원연구원, 한국원자력연구소, 한국건설기술연구원 등이 있다.

3.3.1. 한국지질자원연구원

한국지질자원연구원은 암반공학과 발파공학 분야의 연구를 수행한 가장 오래된 기관 중의 하나이며 박사급 연구원의 수가 15명으로서 암반 구조물의 설계, 시공 및 유지 관리와 관련된 연구를 수행하고 있다.

1990년대 초까지는 주로 석탄광산 및 금속광산을 대상으로 자원개발에 따른 갱도의 굴착과 유지, 채광 및 채탄 작업장의 안전 유지와 관련된 기술과 채광법 설계, 채광 작업장의 심부화에 따른 응력 증가에 대응하

는 기술을 개발하여 왔다(정소걸과 신중호, 2004). 광산 갱도의 건설을 위해 최초로 NATM 개념의 지보 방법을 도입하여 현장에 적용하였으며(한국동력자원연구소, 1986), 석탄층의 부존 여건이 열악한 가운데도 지압 측정과 작업장 주변 암반내 응력을 제어하는 기술을 연구(김인기 외, 1991)하여 단벽식 채탄법, 중단봉락식 채탄법, 장벽식 채탄법의 적용을 이끌어 내게 되었다. 또한 심부 암반내 응력 측정을 통하여 주요 광산 지역에 대한 응력 분포를 파악할 수 있었다. 1990년대 중반부터는 국내 최초로 수압파쇄 방법에 의해 지표 시추공으로부터 현지 암반내 응력 측정을 할 수 있었으며, 현지암반의 거동을 원격 모니터링하기 위한 시스템을 개발하였고 지반침하 혹은 암반 사면의 안전 진단을 장기간 할 수 있는 모니터링 방법으로 시간영역 반사법(Time domain reflectometry, TDR)을 국내 처음 도입하여 그간 해석이 불가능하였던 현지 암반의 전단 변위를 측정할 수 있게 되었다(정소걸, 1995). 2000년대에는 현지암반 모니터링 시스템에서 그 동안 시도되지 못하였던 터널 내공변위를 자동 계측하는 시스템을 개발하여 암반의 변위 거동을 Web환경에서 모니터링함으로써 터널과 지하공간에 대한 안정성을 실



Fig. 17. Test of materials and protection scheme.

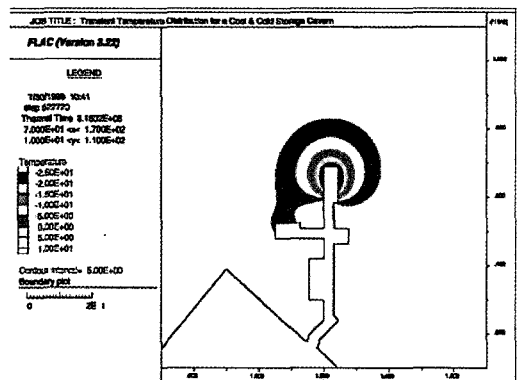


Fig. 18. Thermo-mechanical behaviors around the pilot plant.

시간으로 해석할 수 있게 되었다. 터널과 지하공간 그리고 암반사면에 주 연구 대상 분야이며 지상 및 지하의 암반구조물에 관한 모든 내용을 다루고 있다. 구조물의 발파해체기술을 포함하는 발파기술 분야에서 가장 선진기술을 연구하고 있고 지하공간의 굴착에는 제어발파 기술을 응용하고 있다(Fig. 17). 한국지질자원연구원의 암반공학 분야 주 연구 내용은 다음과 같다. 즉, 현지암반 조사 및 현지응력 측정에 관한 연구, 암반구조물의 설계 및 해석, 암반구조물의 안전감시 시스템 개발 연구, 발파 및 발파해체 기술의 적용, 암반내 고온 및 저온 저장기술 개발 연구(Fig. 18), 암반사면 안정성 해석, 암반물성시험 표준화, 워트켓 응용 기술 및 채석기술, 암반내 극저온 저장을 위한 파일릿 시험 연구 등이 그것이다. 암반내 극저온 저장을 위해서 액화천연가스를 대상으로 하여 2002년부터 파일릿 플랜트 운영 중 암반거동 모니터링, 저온하의 암반의 열물성 규명, 열-역학적 거동 전산모델링 및 열유동의 장기적 안정성 예측 등을 연구하고 있다.

제어발파기법을 이용한 발파해체 기술 개발은 철근 및 재료의 특성에 따른 폭약 소모량을 결정하고 부직포 등을 이용한 비산의 제어 기술과 철근 콘크리트 기둥을 이용한 실규모 발파 해체 시험 연구를 하고 있다.

한편 TBM 성능의 설계 및 평가를 위해 취성도 시험, Sievers' 천공시험, 마모도 시험, 석영함량 등에 대한 암석물성 규명과 절리밀도 규명, 천공률 지수, 커터 수명 지수, 기계 변수 등의 분석, 순굴진율의 예측 및

커터 소모량 계량을 통한 TBM 성능 평가를 수행하고 있다.

최근에 철도 사면 안정성 해석을 위한 데이터 베이스 프로그램을 개발함으로써 사면 안정성 해석과 사면 보강에 대한 기술을 보유하게 되었다(Fig. 19).

수압파쇄법(Hydraulic fracturing method)에 의한 응력측정은 기존 균열에 대한 수압파쇄 시험을 하여 절리 암반에 대한 응력 측정을 가능하게 하였다.

3.3.2. 한국건설기술연구원

한국건설기술연구원에서 수행 중인 암반공학 관련 연구는 주로 터널과 사면을 대상으로 하고 있으며 최근의 연구 분야를 요약하면 다음과 같다.

첫째, TBM 커터헤드의 자체 기술확보와 국내 지반 조건에 적합한 TBM 커터헤드 설계 모델을 개발하기 위하여 급속터널 기계화시공을 위한 최적 굴착설계모델 개발 연구를 하고 있다. 본 연구에서는 TBM의 커터헤드 설계와 굴진 속도 예측을 위한 LCM(Linear Cutting Machine) 구축 및 실험 방법을 확보하고 LCM 시험에 근거한 커터헤드 설계와 굴진 속도 예측 방법을 확립하는 것을 주 내용으로 하고 있다.

둘째, 국내 지반과 시공조건을 고려한 한국형 싱글셀 터널공법은 양호한 지반조건에서 싱글셀 터널공법을 적용하는 것을 목표로 하고 있다. 본 연구는 노르웨이의 NMT(Norwegian Method of Tunneling)에 착안 우리 고유의 터널기술을 개발하는 것을 전제로 지반정수, 지보패턴 설계, 터널의 배수 설계 등을 연구 내용으로 설정하고 있다.

셋째, 터널의 급속시공과 급속 안정화를 도모하기 위한 지보재 고성능화가 필요하고 국산 신재료를 활용한 지보재의 고품질화를 추구하기 위하여 국산 미분말 혼화재와 폴리카르본산계 고성능 감수제에 의한 숏크리트의 고강도 및 고내구성화를 연구하며, 시공성, 인발 성능 및 장기 내구성이 확보된 신재료 기반 모르타르 록볼트 충전재에 대한 연구를 하고 있다.

넷째, 첨단 터널 정보화 설계 및 시공 기술을 확립하고 터널 정보화 설계 및 시공 전문가 시스템 개발에 의한 시공과 조사, 설계, 시공 중 획득된 정보의 효율적 활용을 통한 시공 중 의사결정 지원의 필요에 따라 이를 위한 지반조사 및 설계기술개발, 터널 설계 및 시공 정보 D/B 구축에 대한 연구를 하고 있다(Fig. 20). 또한 인공지능과 GIS 기술을 터널 안정성 해석에 적용하며 온라인 기반의 터널 정보화 시스템(IT IS)을 개발하고 있다.

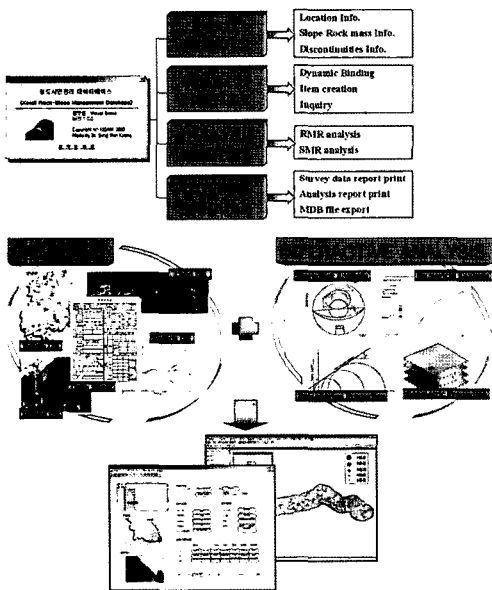


Fig. 19. Outline of DB program for rail way slopes.

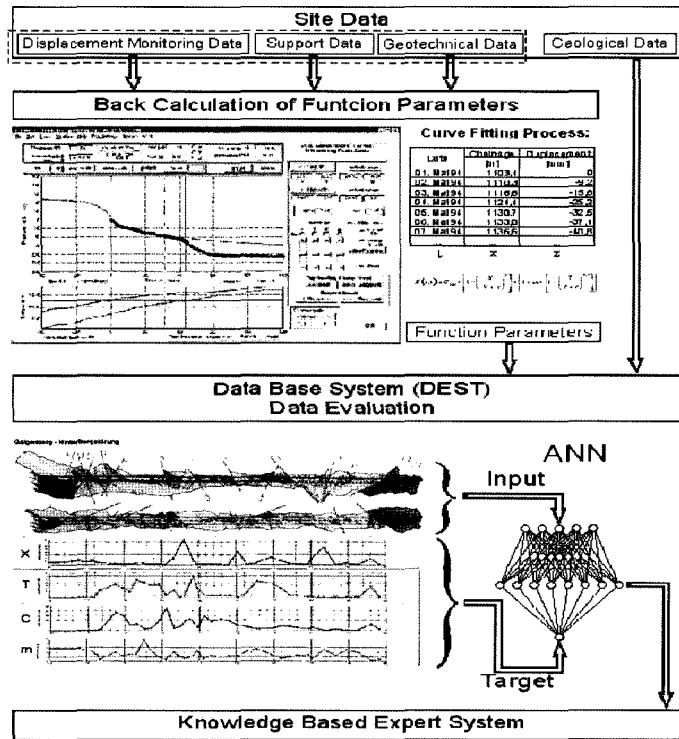


Fig. 20. Expert system for prediction of rock displacement in tunnel.

다섯째, 터널 시공 중에 계측과 Mapping 정보체계를 구축하고 막장 관찰의 객관화를 위한 합리적인 체계 구축과 온라인 터널 시공 계측 정보 분석 방안을 마련하기 위한 첨단 모니터링 분석 기술개발, Face Mapping 기술 개발, 터널 시공 중 막장 붕괴 혹은 불량 분석 시스템 개발, 연약대 혹은 파쇄대 거동 해석 기술 개발, 지능형 터널 내공변위 예측 시스템 개발, 막장 전방 연약대와 파쇄대 예측시스템 개발을 통한 통합 SMART 터널 Observation Expert System 인 IntuMES의 개발 연구를 수행하고 있다.

여섯째, 도로 절토 사면 유지 관리시스템 개발과 운용을 위해 도로 절토사면 안정성 해석, 절토사면 안전 유지, 데이터베이스 구축, 위험 절토사면의 상시 계측 시스템 구축 및 운용과 절토 사면에 대한 유지관리시스템의 운영을 위한 연구를 수행하고 있다.

3.3.3. 한국원자력연구소

한국원자력연구소는 고준위방사성 폐기물의, 심지층 처분기술 개발을 수행하고 있다.

현재 국내에서는 20기(CANDU 4기, PWR 16기)의 상용원자력이 가동 중에 있으며 6기가 추가될 예정으

로 있다. 원자력 발전용량은 17GWe로서 국내 전기에너지의 40%가 원자력 발전을 통해 생산되고 있다. 원자력 발전을 통해 발생하는 사용후핵연료는 2005년 6,600톤이며 원자로의 수명기간 동안 발생하게 될 총 사용후핵연료는 CANDU 16,000톤, PWR 20,000톤으로 추정된다. PWR 사용후핵연료는 발전소내 저장 수조에 임시 저장되고 있으며 CANDU 사용후핵연료는 건식 저장되고 있다. 임시저장을 통해 방사성붕괴열이 낮아진 사용후핵연료는 지하 암반 수백미터에 처분하는 것이 가장 합리적인 방안으로 전 세계적으로 고려되고 있다. 사용후핵연료와 같은 고준위폐기물 처분 연구를 위한 중장기 원자력연구 계획은 1992년 수립되었으며 수정보완을 거친 중장기 10년 계획은 제 247차 원자력에너지위원회(AEC)에 의해 1997년 승인되었다. 이 계획에 따르면 고준위폐기물 처분연구 프로그램은 한국형 처분개념을 개발하고 이의 안전성 평가를 수행하는 것이 목표로 되어 있다. 연구 프로그램은 3단계로 나뉘어져서 수행되었다.

- 1단계: 1997-2000년 까지의 1단계 연구에서는 처분개념의 개발을 위한 기법의 개발과 제한된 처분개념의 성능평가를 위한 기법의 개발을 위한 단계.

- 2단계: 개발된 기법을 사용한 기준처분개념을 도출하는 단계로 2001-2003년까지 수행. 방사선적 안전성 평가를 위한 MASCOT-K 가 개발되었다.
- 3단계: 2004-2006년 까지의 최종 단계에서는 고준위폐기물 처분을 위한 한국형 처분개념을 최종 제안하고 이에 대한 종합성능평가(Total System Performance Assessment)를 수행.

증장기 10년 연구 성과는 정부에 제출될 것이며 이는 고준위처분을 위한 국가 정책의 수립에 기여할 것이다. 지금까지 도출된 한국형 처분개념에 따르면 PWR 과 CANDU 사용후핵연료를 담은 내부식성 처분용기는 지하 수백미터 암반에 만들어진 처분 터널 바닥의 처분 공에 처치된다. 처분용기를 빠져나오는 방사성 핵종은 완충재, 뒷채움재, 암반으로 구성되는 다중 방벽에 의해 차단, 지연된다. 완충재로는 압축벤토나이트가 고려되고 있으며 처분터널은 벤토나이트와 패쇄암으로 구성되는 뒷채움재를 이용하여 매우게 된다(Fig. 21, Fig. 22).

고준위방사성폐기물 처분을 위한 증장기 연구를 통해 수행된 주요 연구내용은 다음과 같다.

첫째, 처분시스템개발로서, 기준처분개념의 개발(폐기물종류, 폐기물 부피, 처분용기 형상, near field 설계 등), 처분개념에 대한 비용 분석, Near field 의 열-역학적 거동에 대한 연구, 공학적 방벽의 THM 거동 해석 등이 그것이다.

둘째, 안전성 평가 분야는 상세 성능평가 기법의 개발, FEP 개발 및 평가, 도출된 한국형 처분개념에 대한 종합 안전성 평가, QA 시스템의 확립 등이다.

셋째, 지질환경 연구 분야는 500m 심부에 확보된 시추공으로부터 암반의 열적, 역학적, 수리적 물성의 측정, 지화학 환경 연구, 공간함수질리대 연구 등을 수행한다.

넷째, 처분시스템 실증 연구는 핵종 흡착 연구 및 데이터베이스 개발, 지하 매질을 통한 핵종 이동 시험, 콜로이드를 통한 이동 연구, 공학적 방벽 시스템 시험, 소규모 지하처분연구시설의 확보, 처분 개념에서 사용된 가정에 대한 실증 등을 수행한다.

한국원자력연구소는 처분 시스템의 안정성과 건전도를 실험적으로 검증하기 위하여 연구소 부지 내에 2005년 연구용 지하실험터널(Underground Research Tunnel, URT)을 건설하였다.

3.4. 민간부문 연구동향

민간기관에 의해 수행되고 있는 연구 대상 분야는

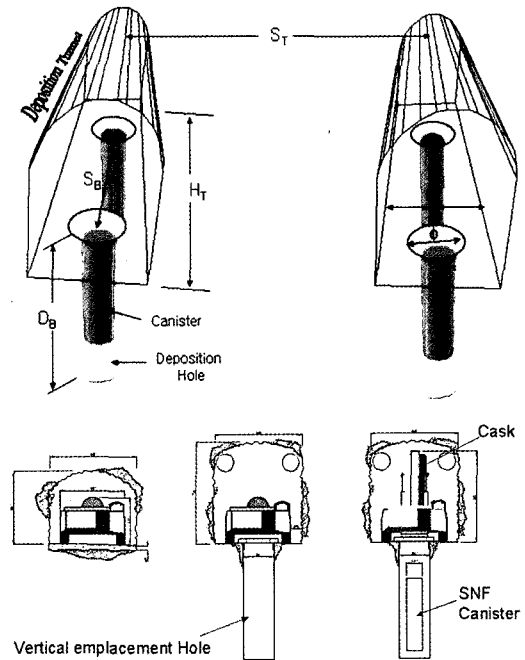


Fig. 21. Schematic diagram of a deposition hole.

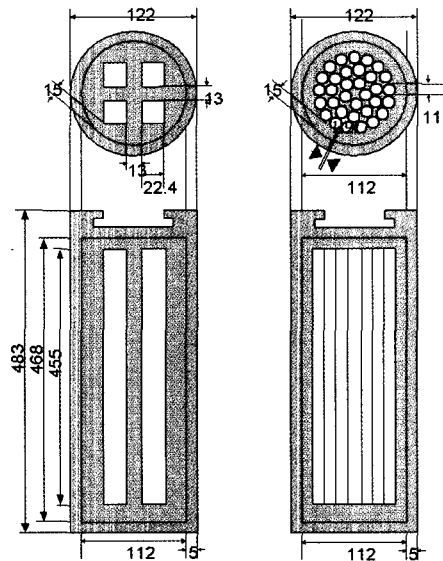


Fig. 22. Concept of disposal container.

자원산업 보다는 주로 사회간접자본시설 관련 사업이며, 주요 연구 대상 분야는 국책연구기관의 경우와 마찬가지로 터널과 지하공간이다.

과거에 민간기관에서 수행되어 왔던 연구는 단지 건설현장에서 일어나는 기술적인 문제를 해결하는 데 국

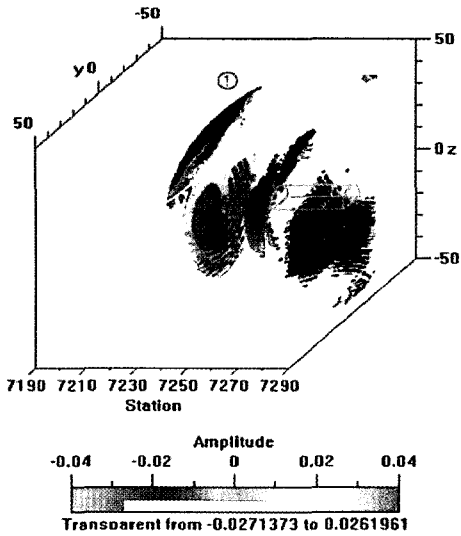


Fig. 23. Investigation of rock mass characteristics ahead of tunnel by HSP.

한되었으나, 최근에 와서 많은 기업들이 새로운 기술과 기업 고유의 자체기술 개발에 박차를 가하고 있다. 특히 GPR(Ground Penetrating Radar)이라든가 TSP (Tunnel Seismic Prediction) 등 현장 암반조사용 연구 (Fig. 23)와 발파 효율을 증대시키기 위한 센터컷 패턴의 개발을 비롯하여 고강도 슛크리트의 개발 등이 활발히 수행되고 있다.

4. 암반공학 연구 발표

4.1. 암반공학 관련 학회 및 학술지

우리나라에는 암반공학 관련하여 여섯 개 학회가 있으며 지반, 토목, 자원공학, 지질에 관련된 연구 개발이 수행되고 있다.

한국암반공학회지인 터널과 지하공간은 1991년 창간되어 격월간으로 발간되고 있으며, 한국지반공학회의 지반공학은 1985년 창간되어 매월 발간되고 있다. 대

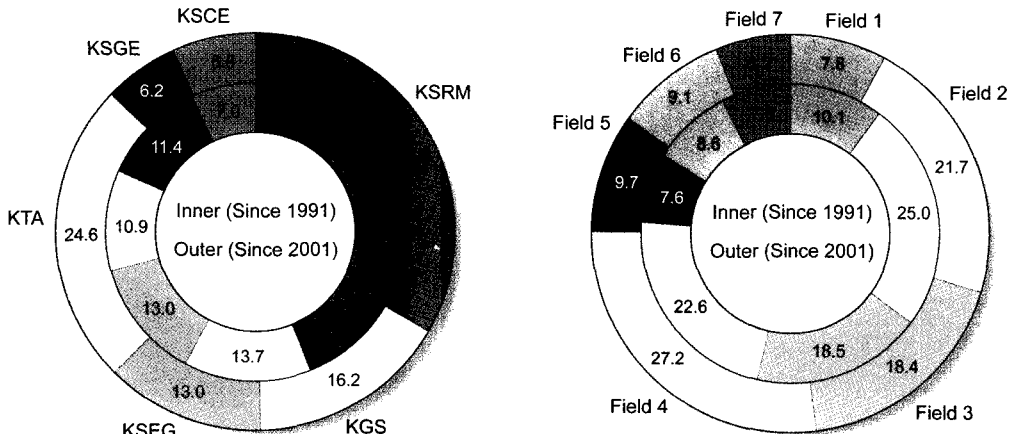
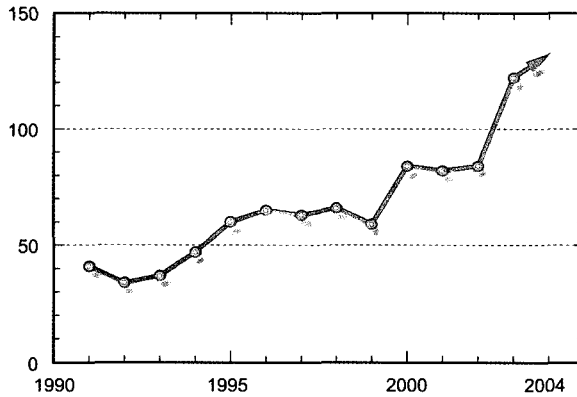


Fig. 24. Published papers in Korea since 1991.

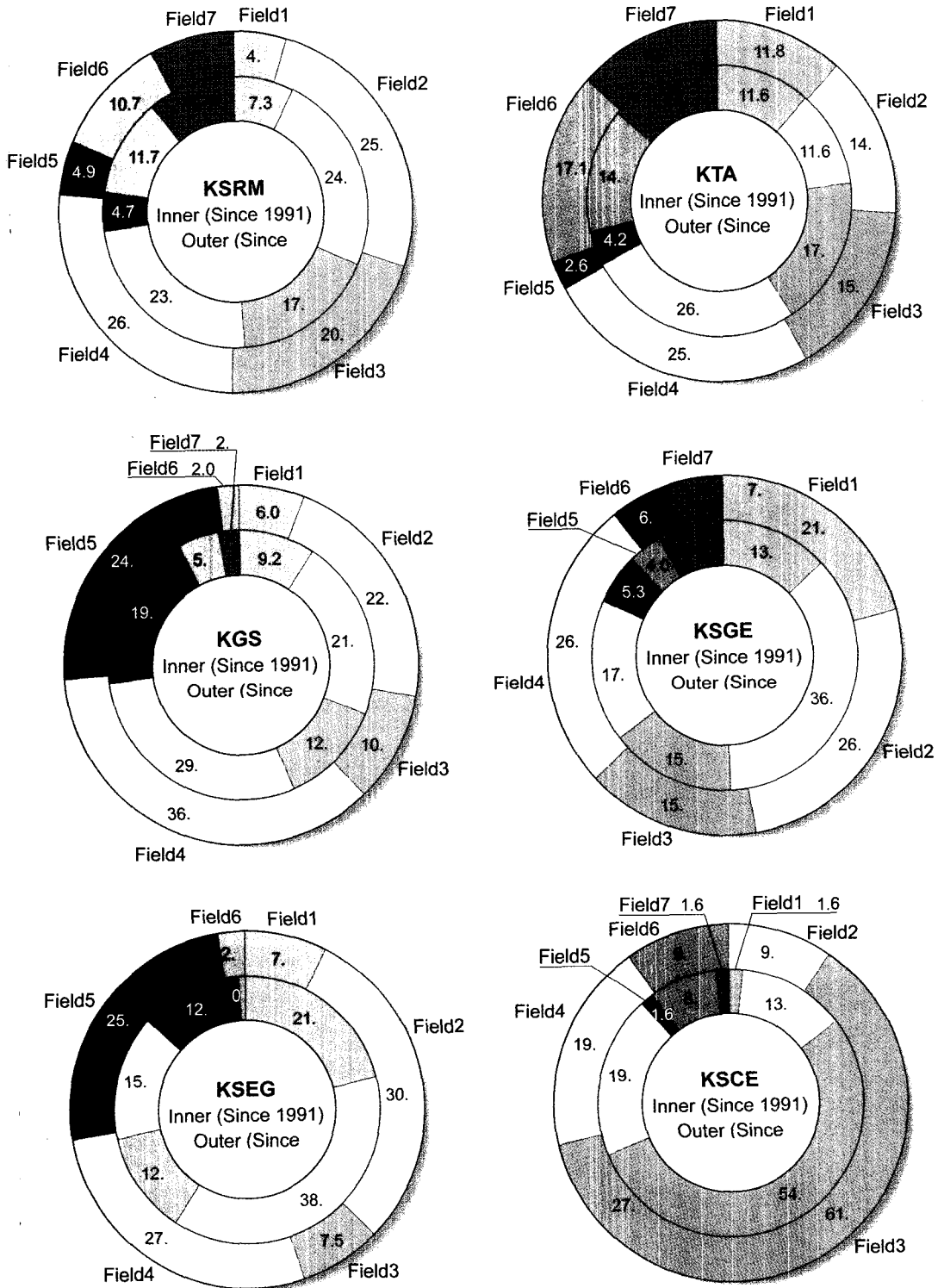


Fig. 25. Activities analyzed from published papers.

한지질공학회의 지질공학은 1991년 창간되어 계간으로 발간되고 있고 한국터널공학회지인 터널기술은 1997년 창간되어 계간으로 발간되고 있다. 또한 한국지구시스템공학회지는 1962년 창간되어 격월간으로 발간되고 있고 역사가 가장 오래된 대한토목학회지는 1953년 창간되어 격월간으로 발간되고 있다.

4.2. 논문

1980년대까지의 암반공학 관련 연구는 자원개발과 관련한 내용을 주로 다루었으나, 1990년대 이후에는 터널과 지하공간 사업의 수요가 증가하면서 이에 대한 관심이 높아지고 연구도 활발하게 진행되었다. 한국암반공학회지인 '터널과 지하공간'은 창간 초기에는 년 2회 발행을 하였으나, 1995년부터는 년 4회로 발간 횟수가 증가되었고 2003년부터 년 6회를 발행하고 있다. 지질공학회지와 터널공학회지는 1년에 4회 발간하고 있으며 게재된 논문의 수가 매년 증가하고 있다.

1991년부터 2003년까지 총 870여 편의 논문이 게재되었으며, 2003년에 게재된 논문의 수는 1991년의 것에 비해 3배 증가하였다. 논문의 수가 이렇게 증가한 것은 암반공학 관련 분야의 연구 개발 영역이 지속적으로 확장되고 있기 때문일 것으로 평가된다(Fig. 24).

지난 10년 동안 한국암반공학회는 암반공학 분야 연구 개발의 중추적인 역할을 해 왔는데 암반공학 관련 연구 논문 중 '터널과 지하공간'에 발표된 논문의 수가 전체의 45%에 달하는 것이 이를 입증하고 있다. 최근에 와서 한국암반공학회의 '터널과 지하공간'과 한국터널공학회의 '터널기술'에 암반공학 연구 논문이 주로 발표되고 있다. 특히 지난 3년간 이들 두 개의 학술지에 발표된 논문은 전체 논문의 58%에 해당된다.

암반공학 관련 연구 논문을 ISRM 기준에 따라 분류하면 크게 7개의 세부 분야로 나눌 수 있다(Table 2). 우리나라의 연구 활동은 이들 7개 분야에서 고른 분포를 보이고 있으며, 특히 많은 연구가 수행된 분야는 암석 및 암반 물성, 수치해석, 터널과 지하공간 분야 등이다. 최근에 방사성 폐기물의 지하처분에 관한 연구, 도로 터널 내 환기, 그리고 터널의 방재 연구가 점점 증가하는 추세이다. 그 외에 인공지능망을 이용한 수치해석이 새로운 기술로 평가되고 있다.

전체적으로 볼 때, 한국암반공학회(KSRM)와 한국터널공학회(KTA)에서는 모든 분야에서 고른 연구 결과가 발표되고, 대한지질공학회(KSEG)에서는 암반물성과 암반사면이 주요 관심 분야이며, 한국지구시스템공학회(KSGE)에서는 지반조사가 그리고 한국지반공학회(KSG)

에서는 수치해석이 주요 연구 대상 분야로 분석된다(Fig. 25).

5. 결 론

암반공학은 암반과 관련된 공학적인 문제를 다루며 근본 학문은 암석역학 또는 암반역학으로서 암반에 대한 변형, 파괴 및 변위 등을 연구한다. 지질학적 배경 또한 중요하며, 특히 구조지질학은 불연속체 암반의 역학적 특성을 결정하기 위한 기초가 된다고 볼 수 있다. 암반공학의 분야별 주요 연구 주제와 그 발전 과정을 살펴 본 결과는 다음과 같다.

첫째, 암반조사 및 시험은 구조물이 위치할 입지의 암반 강도 정수를 결정하는 것을 주 목적으로 하며, 조사 결과는 주로 암반의 강도 정수 결정에 중요한 요소가 되는 암반의 등급 판정에 이용된다. 결정된 등급에 따라 암반의 강도를 산정하는 방법을 최근에 많이 활용하고 있는데, 이들 암반 등급의 판정은 암반내에 존재하는 불연속면의 분포와 특성에 많은 영향을 받으며 실제로 신선한 암반 부분 보다 불연속면의 특성에 따라 암반의 강도정수가 결정되는 것이라 해도 과언이 아니다. 이 과정에 지표 조사에서 구한 여러 가지 물성이 지하 심부의 물성으로도 적절한 가를 판단해야 한다. 방사성 폐기물 처분 등과 같이 고심도의 구조물을 대상으로 할 때에는 암반내 분포하는 불연속면 보다 암반내 응력의 분포가 암반의 강도 정수 결정에 더 큰 영향을 미치는 경우도 있다. 암반내 작용하는 응력의 크기와 방향을 결정하는 방법으로는 과거에 공경변형률 측정법, 공저변형률 측정법 그리고 공벽변형률 측정법 등을 이용한 응력해방법이 이용되어 왔는데, 1990년대 초 수압파쇄 방법에 의한 초기 응력 측정법이 도입되면서 지표에서 시추공에 의해 초기응력을 직접 측정하고 있어 지속적인 연구 개발이 요구되고 있다.

둘째, 암반으로부터 채취된 암석 시편을 이용하여 암석과 암반의 물성을 규명하여왔고 1960년대까지는 실험실에서 구한 암석의 강도 정수를 분석적 해석에 사용하였다. 현지 암반을 대상으로 한 실험규모의 물성시험은 구조물을 이루는 암반의 물성에 대한 대표성을 가질 수 있어야 할 것으로 보아 이에 대한 심화 연구가 필요하다.

셋째, 수치해석에서 암반구조물의 안정성을 평가하는 기준으로 암반의 파괴기준을 적용하는데 과거에는 최대 전단강도 개념의 Mohr-Coulomb 공간이론이 지배적이었으나 최근에 와서 경험적인 파괴기준을 많이

채택하고 있다. 수치해석을 통해 정량적인 결과가 도출되기는 하지만 이에 대한 검증이 반드시 전제되어야 그 결과에 따른 안정성을 평가할 수 있다. 다시 말해서 수치해석의 결과는 정성적으로 보는 것이 바람직하다.

넷째, 1980년대 초 서울 지하철 건설 기간 중에 도입되었던 NATM 공법은 원래 오스트리아의 재래 전통 기술을 체계화한 것으로서 “암반이 가지고 있는 고유의 지지능력을 이용하며, 굴진을 하면서 지보를 한다”는 개념을 가지고 있다. NATM 공법의 기본 개념중의 하나인 계층의 중요성을 인식하고 계층결과를 이용한 안정성 평가와 관련된 심화 연구가 필요하다.

다섯째, 사면의 안정성을 해석하기 위해서 이용되는 지반의 강도 정수에는 점착력과 마찰각이 있는데 절리면을 자연 상태 그대로 채취해서 실험실에서 절리면에 대한 전단시험을 수행하여 강도 정수를 산정하는 것이 일반적인데, 현지 암반의 조건이 시편 형성에 적합하지 않을 경우에는 현장 암반 조사로부터 공간GSI 등과 같은 정량적 접근 방법에 대한 연구가 요망된다. 사면의 안정성을 파악하는 지표로는 안정성 해석을 통한 안전계수를 이용하지만, 역해석 방법에 의한 사면의 안전계수의 검증이 연구 대상이 될 수 있다.

여섯째, 암반 구조물을 해체할 때, 발파가 가장 능률적인 방법이나, 이로 인한 지반 진동 등의 환경영향 평가와 정밀 발파에 대한 연구는 앞으로 지속적으로 발전되어야 할 내용이다. 발파가 구조물에 미치는 영향을 규명하기 위해 최대진동속도를 산정할 때 환산거리의 결정 또한 심화 연구 대상이다.

사 사

본 원고는 한국지질자원연구원의 기본사업(과학기술부) “지하구조물의 통합 안전 감시 시스템 개발연구(2006)”의 지원에 의해 수행되었으며, 또한 2004년 한국암반공학회와 국제암반공학회(ISRM) 각 회원국에 우리나라의 암반공학 활동을 홍보하기 위하여 출판된 “Rock Mechanics in Korea 2004”을 토대로 집필되었다. 자료 정리와 원고 작성에 도움을 주신 장수호 박사(건설기술연), 권상기 박사(원자력연), 이연규 교수(군산대), 정해식 박사(서울대), 이희석 박사(SK 건설), 박의섭 박사(지질자원연), 전석원 교수 및 송재준 교수(서울대)의 노고에 감사드립니다.

참고문헌

- 김인기, 정소결 외 (1991) 심부 석탄자원 개발을 위한 암반거동 및 지압조정 연구(III). 한국동력자원연구소 보고서, KR-91(T)-19, 141p.
- 김호영, 신중호 외 (1997) 에너지 절약형 지하 냉장 및 냉동 저장 설계기술개발에 관한 최종보고서. 통상산업부, 282p.
- 암반공학회 (2005) 암반공학 수치해석. 한국암반공학회, 건설정보사 출판, 555p.
- 정소결 (1995) 시간영역 반사법에 의한 암반 변위의 계층 기술 분석. 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 5권, p. 70-76.
- 정소결 (2005) 터널의 내공변위 자동화 계층기술 분석. 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 15권, p. 1-8.
- 정소결 (2006) LNG 지하동굴 저장시스템의 기술적·경제적 타당성. 가스연맹지, p. 37-46.
- 정소결, 박의섭 외 (2005) LNG 지하저장 기반기술개발 및 Pilot Plant 운영결과 분석연구(최종보고서). SK건설(주), 123p.
- 정소결, 신중호 (2004) 심부 급경사 연약층의 채굴 진행에 따른 주변 암반 거동의 탄소성 해석 및 현장계측. 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 4권, p. 295-303.
- 한국동력자원연구소 (1986) 심부 대단면 시설경도에 대한 신지보법 설계 및 감리. 삼척탄광개발주식회사, 177p.
- Barton, N. and Grimstad, E. (1994) The Q-system following twenty years of application in NMT support selection. 43rd Geomechanics Colloquy, Salzburg, Austria, p. 428-436.
- Barton, N., Grimstad, E. *et al.* (1992) Norwegian method of tunneling. World Tunnelling, Vol. 5, pp231-236, pp324-328, Also published in NGI publ. No. 194.
- Berest, P., Habib, P., Sarda, J.P., Vouille, G. (2000) Manuel de mecanique des roches, Tom 1: Fondements. Comite Francais de Mecanique des Roches, Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 265p.
- Bieniawski, Z.T. (1984) Rock mechanics design in mining and tunneling. Balkema/Rotterdam/Boston, 272p.
- Bieniawski, Z.T. (1989) Engineering rock mass classifications, A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, 251p.
- Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C. (1999) General formulation of the elasto-plastic response of openings in rock using the Hoek-Brown failure criterion. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., v. 36, p. 777-809.
- Chung, S.K. (2004) Application of some numerical methods to the stability analysis of large underground mine openings in Korea. Special Lecture, Proc. ISRM Int. Symp. 3rd ARMS. Kyoto, Japan. Nov. 2004. p. 77-84.
- Chung, S.K. (2005) Mechanical behavior of rock masses around liquefied natural gas storage cavern. Int. Symp. on Advanced in min. tech. and man. Kharagpur, India, Dec. 2005. p. 25-40.
- Hoek, E. (1999) Rock Engineering. Course notes by Evert Hoek printed from <http://www.rocsience.com>, 313p.
- Hoek, E. and Brown, E.T. (1980) Underground excavation in rock mass. The institution of mining and metallurgy, London, 527p.
- Kovari, K. (1993) Erroneous Concepts behind NATM.

- Lecture given at the Rabcewicz-Geomechanical Colloquium in Salzburg, 20p.
- KSRM (2004) Rock Mechanics in KOREA 2004: the Korean Society for Rock Mechanics. 43p.
- Leeman, E.R. (1969) The 'doorstopper' and triaxial rock stress measuring instruments developed by the CSIR. J. South Afr. Inst. Min. Met., v. 69, p. 305-339.
- Martin, C.D. (2005) Progressive failure of brittle rock masses-Experience from URL, Quantifying in-situ stress, and Geomechanics research needs for deep geological repositories. Underground Research Laboratory(URL) Program in Canada, Lecture II, III and IV delivered at KIGAM, 229p.
- Panek, L.A. (1965) Calculation of the average ground stress components from measurements of the diametral deformation of a drill hole. USBM, RI6732.
- Rabcewicz, L. (1964) The New Austrian Tunnelling Method. Water Power, Nov. 1964, p. 453-457.
- Talbore, J. (1956) La mecanique des roches, Dunod, Paris, (1ere edition 1956).

2005년 12월 27일 원고접수, 2006년 5월 25일 게재승인.