

2000년 암반공학기술

신희순*1, 김영근*2, 전석원*3, 박연준*4, 김학준*5, 김창용*6

1. 서 언

한국은 전형적인 산악지형으로 대부분을 암반이 차지하고 있어 암석/암반을 대상으로 하는 암반공학분야에 대한 발전가능성이 매우 크다고 할 수 있으며, 대부분의 지하건설공사가 암반을 대상으로 한다는 점에서 많은 엔지니어들이 암반공학에 대한 관심이 증대되고 있다. 또한 암반공학도 건설공학의 한분야로서 중요한 역할을 차지하게 되었고, 건설기술자들도 암반에 대한 공학적 지식을 바탕으로 설계/시공시 이를 활용하고 적절히 대응해야 할 시점이라 할 수 있다.

초기 암반공학분야는 광산분야에서 암석의 역학적 성질, 암석 파괴특성, 채굴 안정성 평가 등에 대한 연구가 수행되었으며, 초기암반응력측정과 같은 현장실험이 실시되기도 하였다. 1980년대 이후 지하철, 고속도로, 고속철도, 철도 등의 건설이 활발하게 진행됨에 따라 암반조사/시험, 굴착/지보, 터널안정성해석에 관한 연구가 활발히 진행되었고, 지하공간, 지하비축시설, 폐기물처리시설과 같은 대형프로젝트가 진행되면서 암반 수리-열 상호작용, 불연속암반특성에 대한 연구활동이 전개되고 있으며, 터널공법, 발파공법에 대한 기술개발이 이루어지게 되었다.

1990년대 이후 암반공학분야에서의 연구활동은 관련학회를 중심으로 본격적으로 수행되기 시작하였고 학회지발간과 학술발표회를 통해서 연구결과

를 공유하고 정보를 교류하게 되었다. 최근에는 지반공학회내에 암반역학기술위원회가 만들어져 운영중에 있으며, 이외에도 토목공학, 지질공학과 같은 다양한 분야에서 활발한 연구활동이 이루어지고 있다. 또한 암반공학분야는 연구의 폭이 넓어지고 적용대상분야도 점점 다양해지고 있으며, 국가적 프로젝트가 진행됨에 따라 암반, 지반, 지질관련 연구자와 엔지니어들의 참여와 협동이 활발히 이루어져, 암반공학기술은 질적으로나 양적으로 커다란 발전을 이룩하고 있다.

본고에서는 암반공학기술변천사를 통하여 암반공학기술의 성장과 발전과정을 고찰하고, 1990년대를 중심으로 하여 암반공학분야에서의 연구활동과 기술개발현황을 분석하므로써 향후 해결해야할 주요기술과제를 살펴보고 분야별로 요구되는 암반공학기술을 전망하였다. 또한 암반공학기술의 국제적인 연구동향을 분석하므로써 암반공학기술의 발전방향을 고민하고 2000년 새천년을 맞이하여 보다 통합화되고 전문화된 암반공학기술의 발전을 모색하고자 하였다.

2. 한국암반공학의 기술변천사

2.1 암반공학기술의 성장(1957~1982)

암반공학이 학문적 기반을 이룬 것은 1960년대로 자원공학에서 암석역학이라는 분야로 시작되었다. 초창기는 주로 암석의 물리적 및 역학적 성질, 암반응력 해석, 암석의 변형·파괴, 굴착·발파, 암반보강, 지반침하 등에 대하여 연구가 수행되었다. 이중에서도 특히 암석의 물리적·역학적 특성 및

*1 정희원, 한국자원연구소 책임연구원

*2 정희원, (주)대우건설기술연구소 차장

*3 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

*4 정희원, 수원대학교 토목공학과 교수

*5 정희원, 대전대학교 지질공학과 교수

*6 정희원, 한국건설기술연구원 선임연구원

변형·파괴에 대한 연구가 주를 이루었으며, 관련 프로젝트도 주로 탄광이나 광산개발에 요구되는 주변 암석의 물리적 특성에 대한 것이 대부분이었다. 당시 현장시험은 시험비용이나 인력 등의 부족으로 엄두도 내지 못하였고, 주로 실험실에서 암석시편에 대한 실험적 연구가 진행되었다.

1970년대 중반이후 암석에 대한 다양한 실험이 수행되었는데, 압열인장실험, 직접전단실험, 삼축 압축실험등이 수행되었다. 사진 1은 서울대에서 이정인 등에 의해 수행되었던 국내최초의 삼축실험장치를 보여주고 있다.

1970년 후반부터는 암석물성에 대한 하중변화속도, 온도변화, 함수상태에 따른 역학적 특성에 대한 실험이 수행되었다. 또한 이회근 등은 암석의 변형·파괴특성을 고려한 탄소성 해석이 수행되면서 암반분야에 유한요소해석기법이 적용되기 시작하였으며, 지하발전소 주변의 응력해석에 적용되었다.

또한 현지암반에 대한 현장시험에 대한 연구가 시작되었는데, 이정인, 임한욱 등은 1980년 상동광산에서 국내최초로 공경변화법을 이용하여 암반내 현지암반응력을 측정하였으며, 1981년 삼랑진 양수발



사진 1. 국내최초의 삼축압축시험

전소 건설에 이를 적용하여 현지암반응력을 측정하였으며 대형건설프로젝트에 암반분야에 대한 조사/실험이 활용되기 시작하는 계기가 되었다. 사진 2는 심도 150m 되는 발전실(power house)에서 3방향 공경변형측정계(three directional borehole deformation gage)를 설치하는 장면이다.

그리고 광산갱도의 합리화사업의 일환으로 NATM공법의 도입이 검토되기 시작하며, 이경운, 신희순 등에 의해 갱내지보와 plate bearing test, In-situ 강도측정과 같은 현장시험에 대한 다양한 연구가 한국자원연구소를 중심으로 활발하게 진행되었으며, 또한 광산지역에서 채굴에 의해 침하문제가 발생하여 이에 대한 연구가 수행되기도 하였다.

2.2 암반공학기술의 발전(1983~1990)

1980년대 서울시 지하철건설에서 NATM 터널의 도입과 함께 암반분류, 터널해석, 도심지 발파에 대한 기술개발이 활발히 진행되었으며, 지하철, 도로공사, 지하굴착공사가 많아짐에 따라 암반공학분야에 대한 관심도 증가하게 되었고 기술분야도 지하비축기지문제, 현지암반응력측정, 불연속암반해석 등 다양해지게 되었다.

암석시험에서는 Servo-Control이 되는 압축기의 도입으로 암석의 최대하중이후의 변형거동, 반복하중, 인장변형특성에 대한 연구가 시작되었다. 또한 암반불연속면에 대한 실험장치의 개발로 절리



사진 2. 암반응력측정 현장시험

면 전단실험이 수행하여 암반불연속면에 대한 체계적인 연구가 지속적으로 수행될 수 있었다. 그리고 불연속암반내 공동의 변형거동, 층상암반내 공동의 변형거동과 같은 불연속 암반에 대한 연구가 수행되었으며, 특히 암반공학의 응용분야인 터널분야에 대한 프로젝트가 증가함에 따라 터널관련연구로서 터널굴착시 지반거동, 암반변위, 응력해석에 기술개발이 이루어지게 되었다.

또한 암반시험에서는 현지암반응력과 암반변형계수 측정기술이 도입되어 수압과쇄법에 대한 모형 및 현장실험이 이루어졌고, 공벽변형법에 의한 암반응력측정이 수행되기도 하였다. 사진 3은 한국자원연구소에 도입된 국내최초의 수압과쇄시험장치이다.

해석분야에서는 개별요소법(DEM)에 대한 연구가 시작되어 블록성 암반에서의 터널거동 및 사면안정성평가 그리고 이에 대한 모델실험을 수행하기도 하였다. 그러나 이러한 연구결과는 상용화에 이르지 못하고 학문적인 연구로 그치게 되어 UDEC과 같은 외국의 상용프로그램이 주로 사용되는 결과를 가져왔다. 또한 문현구 등은 불연속면을 고려한 터널해석과 하공동의 3차원 해석을 수행하기도 하였다.

발파진동문제에 대한 사례연구가 증가하기 시작하였으며, 블록이론(Block theory) 및 평사투영법을 이용한 암반사면안정 해석에 대한 현장적용연

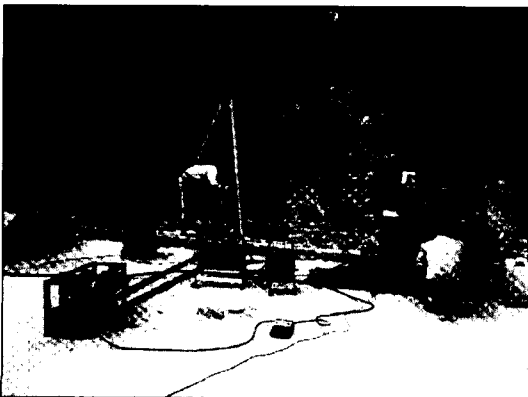


사진 3. 국내최초의 수압과쇄시험장치

구도 이루어 졌다. 김호영 등은 NATM공법이 적용된 심부암석경도의 지보설계에 계측결과를 활용하는 연구를 수행하기도 하였다.

특히 이 시기는 지하공간개발에 대한 사회적 관심이 증가된 시기로 우리나라의 지하공간의 이용 및 개발방안에 대한 연구를 시작하게 되었다. 또한 LPG 지하저장시설, 지하유류비축저장기지, 지하양수발전소에 대한 대형프로젝트가 발생하였고, 이에 따라 암반공학기술의 양적 질적 발전을 가져오는 계기가 되었다.

1980년대는 암반공학에 대한 연구개발이 활발히 수행되면서 시험, 해석, 지보, 발파, 터널, 사면, 지하저장시설과 같은 다양한 분야에 대한 현장적용이 이루어지게 되었다. 또한 지금까지 광산분야에 한정되었던 분야는 지하철, 도로, 대형지하공동과 같은 건설프로젝트에 확대되기 시작하였으며, 이를 통해서 본격적으로 암반분야가 건설공학으로 자리매김하는 시기라 할 수 있다.

3. 암반공학분야의 R&D현황(1990년대)

3.1 주요연구현황

암반공학분야의 주요연구현황을 분석하기 위해서는 먼저 연구분야를 구분할 필요가 있다. 본 고에서는 암반공학분야를 표 1과 같이 총 7개 분야로 구분하였다.

표 1. 암반공학분야의 분류

구분	분류
I	암반조사와 시험
II	암석 및 암반물성
III	수치모델링 및 해석
IV	터널과 지하굴착
V	암반사면과 노천굴착
VI	발파와 진동
VII	신기술 등 기타

본 분류는 국제암반역학회의 분류안을 기준으로 국내의 연구현황을 고려하여 작성되었으며 최근의 연구현황을 파악하기 위하여 1990년부터 1999년까지 지난 10년간의 발표된 연구논문을 기준으로 하였다.

가. 국내학회

국내에서의 암반공학관련 학회로는 한국지반공학회, 한국암반공학회, 한국자원공학회, 대한토목학회, 대한지질공학회가 있다. 이들 학회의 학회지 및 논문집에서 암반공학관련 논문을 조사하여 연구현황을 분석하였다.

지반공학회 논문집에 게재된 암반공학관련논문의 현황을 살펴보면, 그림 1에서 보는 바와 같이 1994년까지는 30편의 논문이 게재되다가 년 6회로 증간되는 1996년도 이후 약 70여편의 논문이 발표되고 있다. 이중 암반공학분야의 논문은 전체발표논문의 약 16%를 차지하고 있으며 해마다 꾸준히 증가하고 있다. 이는 지반공학분야의 영역이 암반분야로 보다 넓어져 암반공학분야의 연구자들의 참

여도가 증가하고 있기 때문으로 판단된다. 현재 학회내에는 암반역학기술위원회가 활동중에 있다. 분야별로는 암반물성 및 굴착분야, 그리고 해석 및 지반조사분야가 주를 이루고 있으며 상대적으로 발표 및 암반사면분야의 논문수가 적음을 알 수 있다.

암반공학회지인 터널과 지하공간에 실린 논문현황을 살펴보면, 연도별 발표논문수는 90년대초 연간 20여편이 발표되다가 학회지가 년 4회로 증간되는 1995년 이후 연간 약 30여편의 논문이 게재되고 있고 그 이후로 논문수는 거의 일정하였다. 분야별로 발표논문 경향은 암반물성 및 터널굴착분야가 주를 이루고 있다. 암반물성분야는 각 대학교의 암반공학연구실에서, 터널과 지하공간 굴착분야는 각 건설업체의 현장시공에 대한 사례연구가 중심으로 이루어짐을 알 수 있다. 그 다음으로 해석분야의 논문이 많으며, 최근 인공지능과 같은 신기술을 암반공학분야에 적용하려는 연구도 이루어지고 있다.

지질공학회지에 게재된 논문현황을 살펴보면 1994년까지는 꾸준히 증가하다가 그 이후로는 약 20편의 논문이 발표되고 있다. 이중 암반공학분야

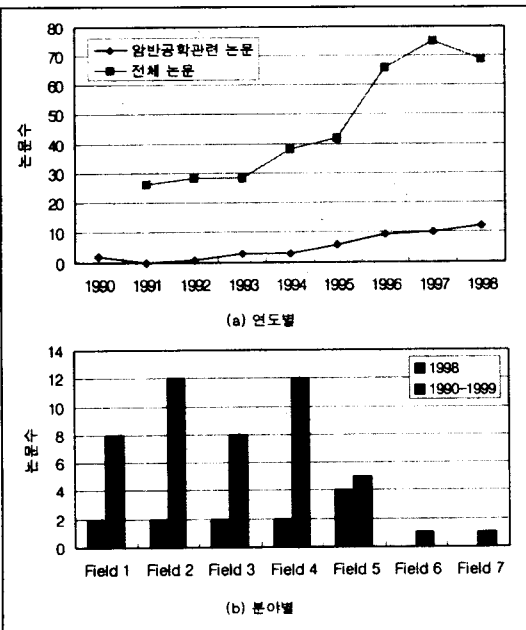


그림 1. 지반공학회에서의 암반공학관련논문 현황

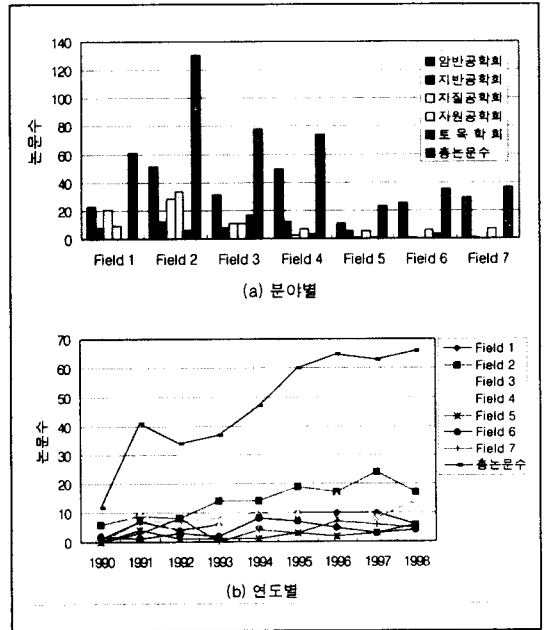


그림 2. 국내학회지에서의 암반공학관련논문 현황

의 논문 전체발표논문의 약 40%를 차지하고 있으며 해마다 9편 내외의 논문이 발표되고 있다. 이는 지질공학분야중에서 지반조사 및 암반물성분야는 연구영역이 같기 때문인 것으로 보인다. 분야별로는 지반조사 및 암반물성분야가 주를 이루고 있으며 지하수모델링에 대한 연구가 활발히 연구되고 있다.

자원공학회지에 게재된 논문현황을 살펴보면 1993년까지는 50편의 논문이 게재되다가 1997년도 이후 약 70여편의 논문이 발표되고 있다. 이중 암반공학분야의 논문은 전체발표논문의 약 15%를 차지하고 있으며 약간 감소하고 있음을 볼 수 있다. 분야별로는 암반물성이 전체의 40% 이상을 차지하고 있는데 이는 주로 암석 및 암반의 물성연구를 기본으로 하는 자원공학의 성격을 나타내는 것이라 할 수 있다.

토목학회 논문집에 게재된 논문현황을 살펴보면 암반공학분야는 크게 구분되지 않고 지반 및 터널공학분야의 논문집에 속해 있다. 암반공학분야의 논문은 1995년도 이전에는 매우 적었으며, 1995년 이후 발표논문이 점차 증가함을 볼 수 있다. 이는 토목공학에서 터널 및 지하구조물에 대한 구조공학적인 관점에서 연구하는 경향이 생겼기 때문으로 보인다. 분야별로는 해석분야가 50% 이상을 차지하고 있음을 볼 수 있다.

지금까지의 국내의 암반공학관련학회의 학회지 및 논문집에 게재된 암반공학관련 논문현황을 살펴보면, 1990년부터 1999년 현재까지 400편 이상의 논문이 발표되었다. 분야별로는 그림 2에서 보는 바와 같이 암반물성분야가 30%로 가장 많고 그 다음이 해석과 굴착분야가 약 18%, 지반조사분야가 약 15%, 그리고 발파 및 사면분야가 8% 이하로 나타났다. 연도별로는 1990년대 들어와 논문수가 많았으며, 그 이후로 해마다 암반공학관련 논문수는 증가하여 1998년에는 66편의 논문이 게재되었다.

암반공학과 관련하여 국내학회지에 발표된 논문

의 연도별, 분야별 경향을 고찰한 결과 암반분야에 대한 연구는 증가하고 있으며, 이는 관련 프로젝트가 증가되고 학문간의 교류가 활발해지면서 암반분야에 대한 관심이 꾸준히 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

나. 국제학회

암반공학관련 국제학회로는 국제암반역학회(IS-RM)주관의 국제암반역학회의가 대표적이며, 미국을 중심으로 한 US ROCK 심포지엄과 유럽을 중심으로 한 EUROCK 심포지엄 등이 있다. 또한 해마다 특정한 주제를 가지고 지역심포지엄이 열리고 있으며, 아시아를 중심으로 한 아시아암반역학심포지엄(ARMS)이 서울에서 개최된 바 있다. 또한 터널과 관련하여 국제터널협회(ITA)주관의 국제터널총회가 해마다 개최되고 있다.

암반공학관련 논문집으로 ISRМ의 논문집과, ITA의 학회지인 Tunnel and Underground Space Technology가 대표적이라 할 수 있으며, 이외에도 Rock Mechanics and Rock Engineering, 국제지질공학회 논문집인 Engineering Geology 등이 있다.

본고에서는 국제암반역학회의의 발표 논문집과 두 개의 논문집을 기준으로 하여 한국에서의 국제학회의 연구활동을 기술하였다. 기타 여러 국제학회와 논문집에 대해서는 충분한 조사가 이루어지지 못해 이를 생략하였다.

1990년도 이후 발표되거나 게재되었던 논문현황을 살펴보면, 국제 암반역학회의에는 1991년 7차에 3편, 1995년 8차에 10편, 1999년 9차에는 10편의 논문을 발표하였다. 또한 국제암반역학회 논문집에는 1991년 이후 해마다 1~2편의 논문이 발표되어 1998년까지 총 9편의 논문이 게재되었으며 Tunnel and Underground Space Technology에는 2편의 논문이 실렸다.

국제학회에 발표된 논문의 분야별 특성을 살펴보면 국제암반역학회지에는 물성분야가 5편, 해석분

아가 3편으로 암반물성과 해석분야가 주를 이루고 있으며, 국제암반역학회에는 해석분야에 8편, 물성분야에 5편의 논문이 발표되었다. 또한 국제터널학회지인 Tunnel and Underground Space Technology에는 굴착분야 논문이 2편 실려 위의 경우와 비교됨을 알 수 있다. 국제학회지에 대한 논문발표가 상대적으로 적은 편으로 앞으로 보다 많은 참여가 기대된다 할 수 있다.

해마다 다양한 암반관련 심포지엄이 개최되고 있으며, 국내연구자들의 참여도 활발해지고 있다. 국내에서의 암반관련 프로젝트는 다른나라에 비교하여 결코 적지 않으며, 일부 프로젝트에서는 국제적인 협력이 수행되고 있다.

따라서 향후 국제학회에서의 국내연구자나 기술자들의 위상을 높일 필요가 있으며, 이를 위해서는 적극적인 참여와 논문발표가 이루어져야 한다. 21C에는 암반공학기술자들이 국제적인 기술자가 되어 세계기술을 선도하는 역할을 기대해 본다.

3.2 기술개발활동

암반공학분야에 대한 기술개발활동주체로는 정책연구소와 기업연구소 그리고 대학교로 구분할 수 있으며, 이들을 중심으로 암반공학관련 분야에 대한 연구와 기술개발에 대한 노력이 활발히 진행되고 있다. 본고에서는 한국자원연구소와 한국건설기술연구원, 기업에서는 현대, 대우, 삼성, SK 건설기술연구소에서의 최근 기술개발활동을 간략하게 정리하였다.

가. 국책연구기관

암반공학분야에 대한 연구개발활동을 수행하고 있는 국책연구기관은 한국자원연구소와 한국건설기술연구원 등이 있다. 한국자원연구소는 지질과 광산관련 연구개발을 기반으로 하여 암반공학그룹에서, 한국건설기술연구원은 건설기술개발을 기반으로 하며 지하구조물그룹에서 터널/지하구조물관련 연구를 수행하고 있다.

한국자원연구소 암반공학그룹은 터널링, 굴착, 지보관련 문제를 주로 연구하고 있으며, 주요 시설로는 국내최대 규모의 MTS와 Interlaken 암석시험장치가 구비되어 있고 수압파쇄장비를 이용한 현저암반응력측정기술이 개발되어 이에 대한 많은 자료 및 해석기술을 확보하고 있다. 또한 지질분야 및 탐사분야와의 상호협조를 바탕으로 지반/지질조사에 대한 기술개발을 활발히 수행하고 있다.

그리고 압축공기에너지저장시설, 지하하수처리 시설, 식품저장과 같은 지하공간관련 연구를 중점적으로 수행하고 있으며, 지하냉동고를 이용한 식품저장을 위한 지하 pilot plant를 운영하고 있다 (사진 4). 그리고 암반의 발파성, 발파에 의한 damage zone의 평가, 발파진동에 의한 환경영향, 조절발파방법 등에 관한 연구가 진행되고 있다.

한국건설기술연구원 지하구조물그룹은 터널 및 지하공간에 관련된 건설기술들을 연구해 왔다.

주요 연구분야는 첫째, 정보화 터널 설계/시공 기술 개발, 둘째, 신재료·신굴착 공법 개발, 셋째, 지하구조물 유지관리 시스템 개발, 넷째, 신개념 지반조사 기법 개발, 다섯째, 터널 설계 기준 및 시방서 작성 등에 관련된 연구 업무를 수행 중에 있다. 현재 특히 가장 역점을 두고 추진하고 있는 연구는 첨단 터널 정보화 설계/시공기술에 대한 것으로서 먼저, 터널정보 가시화를 위한 기반기술 확보 및 Prototype system을 구축하고, 첨단기법을 이용한 통합터널 정보화설계/시공관리 전문가시스템



사진 4. 지하 Pilot plant

개발을 통하여 국내 터널정보화 설계/시공 기술을 첨단화 기법에 접목하여 국제 건설시장에서 기술적 우위를 확보하는데 주력하고 있다.

또한 인공신경회로망(Neural Network)을 이용하여 인접구조물의 손상을 평가하는 전문가시스템을 개발한 바 있으며, 직천공식 강관 다단 그라우팅 보강공법 및 격자지보재의 현장 적용성 연구 등 다양한 지보·보강공법연구, 3차원 역학적 가시화 및 애니메이션기법 개발, 터널시공 중 정보화 막장 관찰 시스템을 개발, GIS를 이용한 터널의 위치/분포/터널정보를 제시할 수 있는 TIS(Tunnel Information System)를 개발하였다. 또한 Fuzzy 추론을 이용한 터널 보강공법 선정용 전문가 시스템을 개발하여 터널시공 중 보강공법에 대한 체계적인 기준을 마련하고 인터넷을 통한 전문가시스템을 현장에 보급하고 터널정보시스템을 축적해 나갈

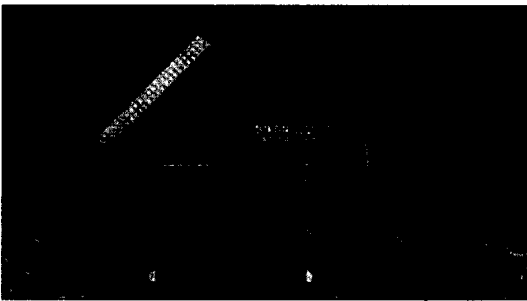


사진 5. 지하공간실험동

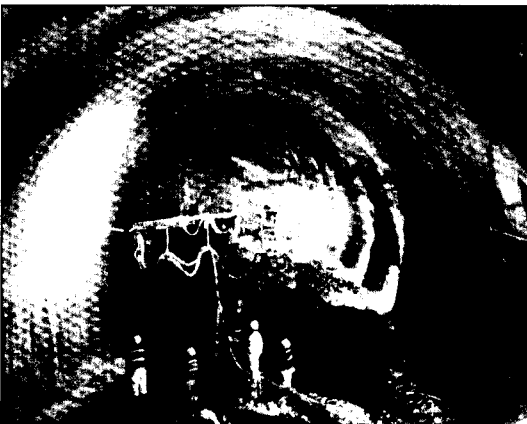


사진 6. 국내 최대 장대터널

예정이다.

통합적인 지하구조물의 설계/시공 및 유지관리를 위한 기반요소기술들을 연구중에 있으며, 특히 실무에 직접적으로 활용할 수 있는 기술들을 개발하고, 지하구조물 설계/시공 기술의 정보화를 위한 요소기술들과 현장에서의 애로사항 등을 충실히 연계시킬 수 있는 토대를 마련하고자 하였다.

나. 기업연구소

1990년대 초부터 주요건설사를 중심으로 실험동을 구비한 연구소를 건립하게 되었으며, 지하공간 개발과 관련하여 지하공간실험동을 건립하려는 움직임이 활발하였다. 또한 암반분야에 대한 투자도 활발하여 각종 조사장비 및 실험장비를 구비하므로써 관련현장에 대한 설계/시공지원 뿐만아니라 용역업무도 수행하고 있다. 본 검토에서는 국내건설사중 현대, 대우, 삼성, SK건설연구소에 대하여 간단히 살펴보았다.

현대건설에서는 연구소 주변의 산을 굴착하여 지하공간실험동을 건설하여 물리탐사를 이용한 지반조사, 암반절리에서의 그라우팅 효과와 같은 다양한 연구를 수행하고 있으며, 노르웨이 지반연구소와 요빅경기장과 같은 대형 지하공동에 대한 공동 연구를 수행한 바 있다. 사진 5는 연구소내 건설된 지하공간실험동의 모습이다.

대우건설에서는 국내최대규모의 원심모형실험장치(Centrifuge)가 설치된 지반공학실험동을 건립하였으며, Centrifuge를 이용한 모델실험과 유압램을 이용한 터널라이닝 파괴실험을 수행한 바 있으며, 터널의 변상원인 추정과 건전도 평가기법에 대한 연구를 수행하고 있다. 사진 6은 대우에서 시공한 경부고속철도구간에 건설중인 국내최대 장대산악터널인 상촌터널의 모습이다.

삼성건설에서는 암반 및 콘크리트의 파쇄 및 절삭기술, Fuzzy 추론을 이용한 터널보강공법 선정용 전문가시스템 개발, 터널보조공법 평가를 위한 모형실험 및 시공안전 관리, 불연속 암반에서의 지

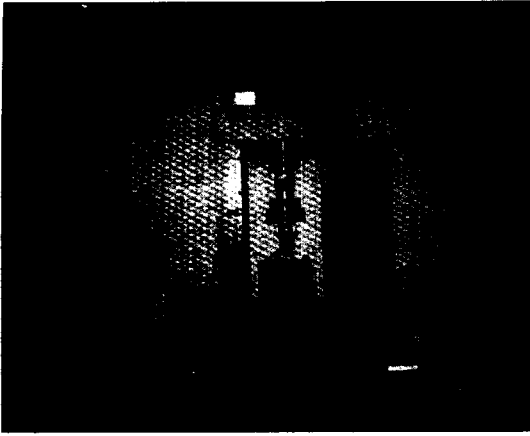


사진 7. MTS와 절리전단시험장치

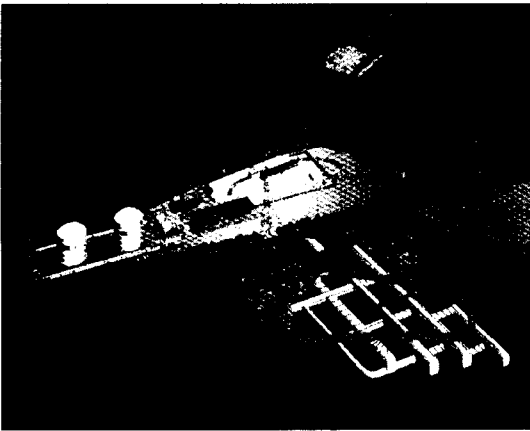


사진 8. 지하유류비축기지

하공간 설계·시공기술에 대한 연구를 수행하였다. 최근에는 MTS 암석시험장치를 이용하여 암석절리에 대한 전단시험을 수행한 바 있다. 사진 7은 절리면의 수리특성을 규명하기 위한 절리전단시험장치를 보여주고 있다.

SK건설에서는 지하비축시설에 대한 기술개발활동을 활발히 수행하고 있으며, 한국자원연구소와 공동으로 지하식품저장시설에 대한 연구를 수행한 바 있다. 또한 발파에 대한 연구를 현장과 연계하여 수행하여 SUPEX-CUT이라는 발파공법으로 신기술을 얻기도 하였다. 최근에는 유류 및 LPG 지하비축기지 데이터분석시스템 실용화 연구, 터널

자동계측시스템 실용화 연구, 습식 숏크리트공법 실용화 연구를 수행하고 있다. 사진 10은 지하유류 비축기지의 조감도를 보여주고 있다.

4. 암반공학분야의 기술과제와 전망

4.1 주요기술과제

지금까지 암반공학분야에 대한 기술변천사와 최근 연구현황과 기술개발활동을 살펴보았다. 1980년대초 연구활동을 전개하기 시작하였으며, 각 학교나 연구소의 각종실험장비가 열악함에도 불구하고 좋은 논문들이 발표되었고 많은 엔지니어들이 배출되어 이제는 각 분야에서 활발한 활동을 수행하고 있다. 현재는 각종실험장비가 갖춰진 대형실험동이 구축되었고, 연구분야도 조사분야부터 컴퓨터를 활용한 신기술까지 다양해지고 있다.

현재 국내에서는 암반공학분야 관련 대규모 건설사업이 진행되고 있다. 서울과 부산을 연결하는 경부고속철도와 광주, 대전, 대구 등에서의 지하철, 춘천과 대구를 가로지르는 중앙고속도로, 노후화된 철도의 복선화 또는 이설하는 철도사업 등이 활발히 진행되고 있으며, LNG, LPG, 원유 등을 저장하려는 대규모 지하비축저장시설이 건설 또는 계획 중에 있다. 또한 핵발전소에서 나오는 폐기물을 처리하기 위한 지하핵폐기물저장시설의 건설도 계획 중에 있다. 이와 같이 터널과 지하공간은 장대화, 대형화로 특징지워지며, 열악한 지질조건을 회피하는 것이 아니라 이를 기술적으로 극복하는 과정으로 설계/시공된다고 할 수 있다. 본고에서는 앞으로 해결해야할 주요기술과제와 주요분야별로 연구과제와 개발기술의 전망에 대하여 살펴보았다.

암반공학 분야는 이러한 건설동향에 따라 연구분야도 초기의 조사 및 시험분야에서 해석 및 굴착분야로의 연구가 활발하며, 특히 터널과 관련된 연구가 활성화되고 있다. 그리고 핵폐기물 저장시설과 관련된 암반의 열, 수리, 역학적인 커플링 해석관

표 2. 암반공학분야의 주요기술과제

기술과제	주요기술내용
정밀 암반조사시험 및 평가기술	단층파쇄대, 연약대와 같은 문제가 되는 지질조건을 찾고, 설계에 필요한 정수를 구할 수 있는 효율적인 지반조사기술
복합지질에서 굴착 및 보강기술	단층파쇄대, 연약층과 같은 복합지질불량구간에서의 터널굴착방법 및 안정성 확보를 위한 굴착 및 보조공법기술
암반불연속면 해석 및 평가기술	암반의 불연속면을 효과적으로 모델링하고 이를 고려한 해석방법이 암반구조물 설계시 적용될 수 있는 설계기술
암반 커풀링해석과 응용기술	암반의 수리학적, 열역학적, 역학적 특성등을 고려할 수 있는 커풀링 해석기법과 실제 설계에 반영될 수 있는 기술연구
대심도/대규모 지하공간구축기술	상당한 정도의 지압이 작용하는 대심도에서의 지하굴착, 대규모 지하공간굴착에 대한 보강 및 안정성 평가에 대한 기술연구
저소음·미진동 발파기술	도심지 굴착공사시 민원을 최소화하고 발파에 의한 지반의 영향을 최소화 하기 위한 미진동, 저소음 발파공법에 대한 연구
컴퓨터 신기술의 응용기술	인공지능, 퍼지이론, 3차원 그래픽, 정보시스템 등과 같은 컴퓨터 신기술을 암반공학분야에 접목시켜 활용하는 기법연구

런 연구도 수행되고 있다. 지금까지의 연구와 기술 개발결과를 바탕으로 앞으로의 보다 연구되어야 할 기술개발과제는 표 2에 정리하여 보았다. 표에서 보는 바와 같이 암반조사 및 시험분야에서 컴퓨터 신기술 응용분야까지 전문분야에 걸쳐 요구되는 주요 기술이 언급되어 있지만 아마도 이외에도 더 많은 기술들을 연구개발함으로써 암반공학기술분야가 미래기술에 있어서 결코 선진국에 뒤떨어지지 않았으면 하는 바램이다.

4.2 암반공학기술의 전망

가. 조사시험분야

건설공사에 있어서 암반구조물의 효율적이고 안전한 설계·시공을 위해서는 암석·암반의 공학적 특성 및 대상지역의 지압상태 등을 명확히 파악하는 것이 중요하다. 또한 최근에 첨단조사 및 시험기술이 각종 프로젝트에 적극적으로 도입되어 설계업무에 활용하기 시작하고 있다.

암석 및 암반의 공학적 특성에는 물리적 성질과 역학적 성질이 포함된다. 이러한 특성들의 평가시험은 실내암석시험과 현장암반시험으로 구분되며, 실내암석시험에서는 초기부지조사단계에서 시추를 통하여 회수되는 시추코어 및 현장에서 채취한 암괴시료를 이용하여 무결한 암석자체에 대한 물리적, 역학적 특성을 조사하며 이는 설계시공을 위한 중요한 기초자료로 이용된다. 그러나 실제 암반은 암석자체 뿐만아니라 절리 단층, 균열 등의 불연속면 및 지하수 등을 포함하고 있기 때문에 암반의 변형성이나 강도 특성은 암석의 특성과는 매우 다르다고 할 수 있다.

실내실험에서는 비교적 용이하게 여러 가지 기본 특성들을 평가할 수 있지만 현장요소들의 영향을 파악하지 못하는 반면, 현장시험은 보다 현실적인 현지암반의 특성을 평가하지만 시간과 비용이 많이 소요되므로 통상 필요에 따라 상호보완적으로 이루어진다. 즉 현장시험이 이루어지지 못하거나 현장시험으로 얻을 수 없는 특성에 대해서는 실내실험에 의해 암석의 특성을 측정하고 RQD, RMR, Q 시스템 등의 현장암반평가기법을 도입하여 현지암반의 특성을 추정하고 있다. 하지만 정확한 암반의 특성을 규명하기 위해서는 현장암반시험을 하는 것이 바람직 하다고 할 수 있다.

암석 및 암반은 다른 재료에 비해 불균질성을 많이 내포하고 있어서 시험조건에 따라 측정결과와 분산도가 비교적 크게 나타날 수 있기 때문에 신뢰성 높은 자료를 얻기 위해서는 전체 암석 및 암반에 대해 선택한 시료의 대표성, 현장장비의 정밀성, 시험자의 숙련도, 시험기준 및 절차 등의 시험전반에 걸친 품질이 충족되어야 하는 것이 무엇보다도 중요하다.

최근에는 지반조사에 대한 역할이 커짐에 따라 실내실험의 경우 절리면에 대한 전단실험, 편리, 층리 등을 고려한 이방성 실험, 이암 등에 대한 팽창성 시험 등이 수행되고 있으며, 현장실험에서는 수압파쇄법을 이용한 현지암반의 응력측정기술과 암

반의 변형특성을 측정하기 위한 공내재하시험이 수행되고 있다. 최근에는 시추공영상촬영기술을 도입하여 시추공내 암반절리의 상태 및 방향, 분포특성에 대해 정량적으로 평가하고 있다.

암반조사시험은 한 분야로 떨어져 그 결과를 활용하는 경우 많은 한계를 갖는다. 즉 조사단계에서의 각종 물리탐사결과, 지표지질조사의 결과를 참고로 하여 적정한 시험위치를 선정하고 시험항목을 결정하는 것이 중요하다. 또한 조사결과를 해석하는데 있어 지질 및 탐사결과 등을 고려하여 종합적으로 판단하여 측정결과나 해석결과의 타당성을 검증하는 과정을 거쳐 보다 공학적인 조사시험이 될 수 있도록 해야 한다.

최근 조사목적 상실한 다량의 현장시험은 조사를 위한 조사로서 문제가 될 수 있다고 생각된다. 또한 많은 비용과 노력을 통하여 구한 조사결과가 그냥 자료로만 남고 이의 활용에 대한 공학적 판단과 치밀한 고민이 부족한 경향이 있으며, 성과위주의 조사시험은 그 한계를 가질 수밖에 없음을 다시 한번 인식해야 한다.

나. 수치해석분야

현재 지반공학분야에서 널리 이용되는 수치해석법으로는 유한요소법, 유한차분법, 경계요소법 및 개별요소법을 들 수 있다. 이 방법들은 모두 1960년대 전후에 개발된 방법으로 컴퓨터의 발달과 함께 종래의 이론적인 해석기법의 한계를 극복하는데 기여한 바 크다. 암반공학분야에서도 유한요소법이 주로 사용되었으나 FLAC과 같이 유한차분법과 유한요소법의 중간 형태를 가지는 프로그램도 개발되어 사용되고 있다. 경계요소법은 transient heat flow, 선형 점탄성 문제 또는 동역학적 탄성 문제 등 주로 시간 의존성을 갖는 경계치 문제의 해를 구하는데 활용되나 선형 탄성적인 매질에 대한 해석으로 그 적용분야가 국한되며 지반의 불균질성의 고려 및 소성해석이 어렵다는 단점 때문에 활용분야가 매우 적은 편이다.

Goodman 등에 의하여 불연속면이 절리암반의 거동을 지배한다는 사실이 밝혀진 후에, 암반역학 분야에서의 수치해석의 초점은 불연속면의 변형 및 파괴거동을 고려하는데 집중되었다. 이에 따라 불연속면을 따른 미끄러짐과 파괴를 고려한 탄소성 등가연속체 모델이 많은 연구자들에 의해 연구개발된 바 있다. 이들은 근본적으로 비등방 소성 모델로, 해석대상 물질이 절리와 같은 불연속면 방향으로 수많은 미끄러짐 면을 가진 것으로 가정하는 것이다. 이와는 달리 Cundall은 암반을 불연속면으로 분할된 블록들의 집합체로 보고 개별 블록의 이동 및 회전을 해석하는 개별요소법을 개발하여 현재 UDEC 및 3DEC으로 발전시켰다.

이러한 수치해석 기법들은 1960년대에 실험실에서 행해지던 다소 복잡한 형상에 대한 모델실험과 병행하여 사용되다가 1970년대 후반부터는 아예 실험실 모델실험의 상당부분을 대체하게 되었다. 이처럼 수치해석이 유행하게 되자 학자들 간에는 수치해석 결과에 대한 신뢰성에 대한 의문이 제기되었으며, 이러한 논란은 오늘날까지 계속되어 오고 있으나 새로운 구성방정식의 도입, 새로운 컴퓨터 언어의 개발, 입출력의 용이성 도입, 결과의 도시화 기능추가 등 수치해석 기법은 발전에 발전을 거듭하여 오늘날에 이르고 있다.

현재 암반공학 분야에서 수치해석이 차지하는 비중은 결코 무시할 수 없으며 지반조사기술의 발달과 함께 입력정수의 신뢰도가 증가하면 이 비중은 더욱더 높아질 것으로 전망된다.

컴퓨터에 의한 계산이 모두 그렇듯이 입력상수가 정확해야 해석결과도 정확한 법이지만 수치해석은 여러 가지 면에서 실험실 시험과 유사하여 한 두 가지 파라미터를 변화시켜가며 해석을 반복수행함으로써 입력정수를 역으로 산정할 수도 있다. 계속결과와 병행하여 역해석이란 분야도 탄생하여 측정이 곤란한 지반정수를 역으로 산출이 가능하게 되었으며, 한계평형 이론에 의존하던 사면의 안전율 계산도 유한요소법이나 유한차분법에 의하여 신속

하고 정확하게 계산이 가능해졌다.

그러나 수치해석법은 아직도 해당 전공분야에 대한 상당 수준의 지식을 가진 사람에 의해서만 가능하며, 전문지식이 결여된 사람에 의해 수행될 경우에는 의외의 결과를 줄 수도 있는 위험성을 안고 있다. 따라서 현재의 수치해석법이 계산 위주라면 미래의 수치해석 프로그램은 사용자의 편의성 위주로 변신하여야 할 것이다. 이를 위해서는 프로그램 자체가 사용자와 interactive 형태로 사용자가 무엇을 어떻게 해석하고자 하는지 정확히 의도를 파악하고 필요에 따라 사용자에게 필요한 전문지식을 교육시켜가며 정확한 해석을 할 수 있도록 유도해주는 기능이 필요할 것이다. 또한 해석결과의 타당성 판별 및 해석결과의 의미를 알기 쉽게 설명해주는 기능도 필요하다.

현재의 전처리 프로그램은 주로 요소망의 생성과 해당 요소에 대한 지반 물성치의 배정이 주된 작업이나, 지반공학 분야에서의 큰 문제점 중의 하나가 적정 지반 물성치의 결정임을 감안 하면 여러 가지 시험 자료와 지질 특성 등으로부터 적정 지반 물성치를 합리적이고 과학적으로 추정해 주는 기능이 첨가되어야 할 것이다. 이를 위해서는 신경망 시스템이나 전문가 시스템에서 사용되는 기법들이 이용되어야 할 것이며 지반의 특성, 암중 지질 조건 등에 따른 방대한 data base가 구축되어 사용되어야 할 것으로 생각된다.

Barton이 제 9차 국제 암반역학회총회에서 보고한 바와 같이 암반공학은 지질학, 지구물리학, 수리학, 토질역학, 암석역학, 통계학, 확률론, 환경공학 등 다양한 분야를 포함하며 서로 연결되어 있다. 이와 함께 수치해석도 단순히 지반 자체의 변형 및 파괴거동 분석에서 한 걸음 더 나아가 열, 수리 및 화학적인 현상과의 상호작용을 해석하는 데까지 발전하여 이미 활용되고 있으며 최근의 환경문제와 더불어 이러한 상호작용 해석에 대한 해석은 더욱 늘어날 전망이다.

이렇게 복잡한 해석의 경우 전기한 4가지 방법을

적절히 혼용하면 더욱 효율적이고 해석 결과의 정확도도 향상 될 수 있으므로, 미래의 수치해석법은 단일 프로그램 내에서 필요에 따라 두 가지 이상의 해석 기법이 동시에 적용될 수 있도록 구성되어야 할 것이다.

수치해석기법의 발전은 지반조사 기술, 측정기기 및 컴퓨터의 발전과 지반공학의 발전이 병행되어야 가능하며, 전반적인 기술발전의 경향을 살펴보면 향후 암반공학 분야에서 차지하는 비중은 더욱 높아 질 것으로 전망된다.

다. 지질공학분야

지질공학은 지질학과 공학의 두 가지 학문분야가 합쳐져서 만들어졌으며 지질학의 원리를 구조물의 설계나 건설과 같은 공학적인 문제를 해결하는데 적용시키는 학문이다. 그러므로 지질공학자는 지질학과 공학의 지식을 동시에 필요로 한다. 외국의 경우 지질공학은 오래된 학문분야 중의 하나로 인식되고 있고, 지질학 이외에 광산과 토목공학에 그 학문의 근간을 두고 있으며, 지질공학자는 석유공학, 토목공학, 자원공학, 지하수, 폐기물 처리, 지하자원 탐사, 혹은 지구물질에 대한 이해가 필요한 분야에서 광범위하게 활동하고 있다.

국내의 경우에는 지질학 관련 전공자들이 공학관련 분야에서 활동하면서 지질학적 지식을 토목분야에 적용시키게 되었다. 그러나 지질공학이 국내에서 활성화되어 토목공학관련 분야에 기여를 하기 위해서는 아직도 많은 문제점을 안고 있다. 먼저 지질학자로부터의 자료를 엔지니어들이 사용할 때 자료의 정량화가 미흡하다는 지적이 많고 또한 지질용어나 지질학적 내용에 대한 엔지니어들의 이해 부족이 큰 문제점으로 제기되고 있다. 특히 지질학자의 경우 토목분야와 수학, 역학 등에 대한 이해 부족으로 엔지니어가 원하는 정보를 효율적으로 제공하지 못하고 있다는 문제점이 있다. 이러한 문제가 해결되기 위해서는 토목공학에서 지질학에 대한 기초과목을 개설하고, 지질학에서도 기초적인

공학분야를 제공해야 한다. 이러한 과정은 관련분야 전공교수를 초빙하거나 두 분야의 상호협력에 의해 이루어질 수 있다. 지난해 응용지질 workshop에서 이루어졌던 국내지질공학의 토착화방향에 대한 토론에서 산업계가 학계에 제기한 가장 큰 문제점은 기존 교과목들이 너무 순수분야에 치우쳐 있다는 것이었다.

토목공사에서 지반의 중요성에 대해서는 어느 누구도 반론의 여지가 없는 것이므로 앞으로는 경제적이고 안정성이 확보된 공사를 위해서 지질공학과 토목공학분야에 종사하는 실무자들의 상호 협조가 절실하다고 할 수 있고 이를 위해서는 여전히 많은 노력이 필요한 실정이다.

앞으로 국내 일괄입찰방식에서 볼 수 있듯이 댐, 터널, 도로 등과 같은 구조물 건설을 위한 지반 및 지질조사의 역할이 더욱 강화될 것이다. 또한 지질공학분야의 연구과제를 살펴보면, 한반도 주변 국가들의 막대한 지진 피해로 인하여 지진에 대한 경각심이 증대되었으므로 각 지역별로 지진발생 위험도 평가에 대한 연구, 국내 절개사면에 대한 GIS를 이용한 데이터 베이스 시스템의 구축이나 지역별 산사태 위험 재해도의 구축에 대한 연구, 각 업체나 기관 별로 시행되고 있는 지반조사 결과에 대하여 GIS를 이용한 데이터 베이스 시스템의 구축으로 인터넷을 통한 정보 공유 가능성에 대한 연구, 국내에 산재한 폐공의 처리 및 활용방안 연구, 시추조사에 의하여 얻어지는 막대한 양의 암석시료에 대한 활용방안, 수자원의 관리를 위하여 지하수 장기 관측망 조사 및 수질검사 결과 등에 의한 지하수 정보 관리시스템 구축, 지하수 오염 분포도 작성, 오염물질의 확산 방지나 처리, 오염된 장소의 복구 등에 대한 연구, 국내지질에 맞는 암반분류방법에 대한 연구, 터널 계측자료와 암반상태의 상관성 연구에 대한 연구가 수행될 수 있을 것으로 생각된다.

4.3 해외연구동향과 전망

여기서는 국제학술대회 발표자료 등을 통하여

정리된 암반공학 분야에서의 지난 수십년간의 연구 경향과 향후 연구방향 및 전망에 대하여 서술하고자 한다.

지난 세기에 걸쳐 진행된 암반공학에서의 연구는 암반의 취약성, 강도 및 그 외의 다양한 주제와 관련되어 있다. 특히 팽창성 암반과 암반의 constitutive modelling에서 응력변환, 암반의 팽창성, 이방성 및 경계조건, 암반의 평가와 경험적인 암반구조물 설계, 연속체 모델링과 불연속체 모델링 등의 연구분야에서 상당한 진보를 이루었다. 21세기의 암반공학도는 지질학, 지구물리학, 수리학, 토질역학, 암석역학, 통계학, 확률론, 환경공학 등 다양한 분야를 종합하는 역량을 가지고 있어야 함은 물론 경제학, 보험, 계약, 장비설계, 장비운용, 시공 및 계획 등에 대해서도 이해할 수 있어야 할 것으로 보고 있으며 (Nelson, 1996), 이는 다른 학문분야와의 복합적인 조화의 필요성을 의미한다고 할 수 있다. 향후 연구 전망에 대하여는 (1) 절리 및 불연속면에 대한 응력변환, (2) 입력자료 및 constitutive model, (3) 암반의 물성을 예측하기 위한 암반평가 방법, (4) 절리암반과 단층대에서의 TBM 터널링, (5) 절리암반의 그라우팅, (6) 불연속체 모델링 및 이방성 등의 세부 내용으로 나누어 살펴본다.

대상 암반내에 작용하는 주응력 성분으로부터 가상의 평면에 법선방향으로 작용하는 응력성분을 구할 때 일반적으로 Mohr의 이론(Mohr의 응력원)을 적용하며, 이는 대상암반의 주응력성분으로부터 가상의 평면에 작용하는 법선응력과 전단응력성분으로 변환될 수 있다. 암반과 토질에서는 절리와 단층면이 존재하고 대부분의 경우 팽창하는 특성을 가지고 있다. 아주 높은 응력하에서의 전단시험을 제외하고는 다져진 실트, 모래, 자갈, Rock fill 및 과압밀 점토 등도 팽창을 하는 경향이 있다. 팽창이 되면 전단응력과 전단 변형률의 축이 일치하지 않게 되므로 토질역학 및 암반공학에서 Mohr 이론을 더 이상 적용할 수 없는 조건에 놓이게 된다. 따라서 팽창성 암반에 응력변환을 적용하려면 Mohr의

응력이론을 변형하여 Non-coaxial 응력변환 계수가 포함되어야 한다. 역학적인 관점에서의 절리면 거칠기를 팽창에 의해 보정해야 할 뿐만 아니라 수리학적 거칠기로도 보정해야 한다. 따라서 팽창은 단지 거칠기와 법선응력의 증가만을 의미하지 않음을 의미한다.

수치모델링과 관련하여 2차원 혹은 3차원의 연속 혹은 불연속체 모델링 방법이 이용되고 있고, 부분적으로 절리면을 나타내는 방법으로서 통계적인 방법과 확률적인 방법이 적용되고 있다. 지금까지 20세기의 40여년동안 암반공학이 발전되어 오면서 제기되었던 문제들을 다음 21세기에서 발전시키는 방법에 대해서도 생각하여야 할 것으로 본다. 가장 중요한 문제는 암반의 적절한 강도와 변형계수 그리고 이들 변수들을 활용하는 가장 적절한 모델링일 것으로 판단된다. Hoek-Brown의 경험적 변수, Q시스템 혹은 RMR 값을 기초로 하여 결정한 C값 및 ϕ 값, 암반내 절리분포와 응력의 이방성 등을 적용할 경우 신중한 고려가 필요하다. 파쇄암반이나 절리암반의 전단거동을 부분적으로 잘 설명해 줄 수 있는 것은 경험적으로 유도된 식으로서 이를 위한 입력자료로서, JRC, JCS, ϕ_r , ϕ_b 등이 필요하다.

1970년대 이후 활용되고 있는 두 가지의 암반분류법(Bieniawski, 1973 and Barton et al. 1974)도 잘못 활용되는 경향이 있다. 그러나, 암반분류법은 여러 가지 다양한 조건에서 비교적 유용하게 활용되어 왔다고 볼 수 있다. RMR에는 응력에 관한 요소가 없으나, Q system에서 반영되고 있는 응력 관련 변수인 SRF값과 같이 σ_c/σ_1 값에 의해 간접적으로 반영되고 있다.

RMR에는 절리면의 방향 혹은 이방성과 절리면 물성의 평균치를 고려하며, 유리한 방향과 불리한 방향에 대한 보정을 한다. Q system에서는 터널이나 동굴의 안정성에 가장 불리한 영향을 주는 절리면의 거칠기 변수 및 풍화정도에 대한 변수를 적용한다. 향후 탄성과 속도와 Q 값의 변화를 심도, 지

보압, 투수성 등과 연관시키는 연구가 더욱 필요하며, 약식 암질평가 방법과 터널지보에서 Q값과 RMR의 관계에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

TBM 터널링에서는 (1) TBM 능률에 대한 올바른 예측과 (2) 단층지역의 굴진의 두 가지 문제가 가장 중요하다. 이 두 가지의 문제가 터널의 내부 및 외부의 안전과 환경에 가장 큰 영향을 미친다. Barla 등(1999)은 서로 다른 세 가지의 모델링 방법을 적용하여 단층대에서의 TBM 굴진능률에 대해 분석하였는데 그 결과 터널의 굴진기간이 6개월로부터 9개월까지 지연되는 것은 피압수의 출수, 입도가 작은 암편들이 터널로 흘러나오는 이른바 "Church roof" 및 "Natural shaft" 형태가 생기기 때문이라 설명하고 있다. 암반과 커터 사이의 상호 관계를 고려하지 않고 단지 지금까지의 Q값만으로는 절삭속도(PR)와 굴진속도(AR)를 정량화하기가 어렵다.

출수 터널에서 지반의 지수방법으로 폴리우레탄을 이용한 그라우팅이 이용된다. 폴리우레탄은 물과 반응을 일으켜 이산화탄소를 발생시킴으로써 출수가 심한 지역의 출수량을 조절할 수 있다. 암반내 응력조건, 지질구조, 탄성과 속도, 투수계수 및 이들의 빈도 및 이방성 사이에는 어떤 공통된 상관성이 있기 때문에 암반내 응력측정, 투수시험, 반사법 탄성과 탐사 등이 수행되어야 한다. 터널굴진, 특히 TBM 굴진에서 출수량이 많을 때, 시험시추와 폴리우레탄 및 마이크로 시멘트의 사전 주입으로 터널의 안정성 향상과 변위 및 출수량 조절에 큰 효과를 볼 수 있었다. 이와 같은 세 가지의 요소를 제어할 수 있을 경우 지속적인 TBM의 능률 향상을 가져올 수 있다.

입력자료와 Constitutive model에서 연속체 모델링을 수행할 때, 절리의 이방성에 대한 경향을 곧잘 간과함으로써 발생하는 문제가 제기되었었다. 이러한 관점에서 등방 연속체 모델과 모든 방향으로 같은 값의 입력자료를 사용해서는 안 될 것으로 판단된다. 층리가 발달한 지층을 대상으로 연속체

모델을 적용할 때에는 입력자료가 Transverse isotropic parameter 혹은 Orthotropic 분포를 가지도록 하는 것이 현실에 더 가깝다. FLAC이나 FLAC3D에서 Ubiquitous joint formulation을 적용하는 것은 연속체 모델링의 현실성을 나타내게 해 준다.

5. 결 언

본 고에서는 국내에서의 암반공학분야의 기술사를 돌이켜 봄으로써 암반공학기술의 성장과 발전과정을 고찰하였다. 또한 최근 암반공학분야의 연구활동과 기술개발현황을 분석하고 고찰하므로써 21C를 맞이하여 해결해야할 주요 기술과제와 향후 암반공학기술을 전망하였다.

암반공학은 1960년대 학문적 기반을 바탕으로 1970년대에는 주로 암석에 대한 역학적 특성에 대한 실험과 파괴특성에 대한 연구를 중심으로 하다가 점차로 현지암반에 대한 현장시험을 실시하여 암반에 대한 조사/시험기술을 확보하게 되었다. 또한 1980년대 지하철, 도로, 철도 등의 사회간접시설의 확장과 지하공간개발에 대한 사회적 관심이 증가함에 따라 지하굴착, 지보, 터널시공, 발파, 암반사면, 대형지하구조물에서의 암반공학의 활용이 증가하게 되었고, 암반역학 및 암반공학이 건설공학으로서 차지하는 역할이 커지게 되었다. 또한 1990년대에는 암반공학에 대한 연구활동 및 기술개발노력이 급격히 증가하면서 암반분야 관련학회가 구성되었고 지하공학회내에 암반역학기술위원회가 만들어져 토목기술자, 암반기술자, 지질기술자간의 상호교류 및 기술적 공감대를 형성하였고, 고속철도, 고속도로, 철도, 대규모 지하공간개발과 같은 국가적으로 중요한 프로젝트를 성공적으로 수행하고 있다.

암반공학분야의 최근 연구현황을 보면, 국내학회의 경우 지난 10년간 400편 이상의 암반공학과

련 논문이 발표되었으며, 발표논문수는 해마다 꾸준히 증가하였다. 분야별로는 암반물성분야가 30%로 가장 많았고, 그 다음으로 해석 및 굴착분야로 나타났다. 국제학회지의 경우, 학술회의 논문집에는 해석분야가, 학회지에는 암반물성분야가 주로 발표되었으며, 앞으로 보다 적극적인 참여와 활동이 요구되고 있다. 암반공학분야의 최근 기술개발활동을 보면, 한국자원연구소에서는 현지암반응력측정과 지하식물저장과 같은 암반관련기술, 한국건설기술연구원에서는 지반굴착과 터널기술 그리고 신기술응용에 대한 기술개발이 수행되고 있다. 기업연구소의 경우 최신장비를 갖춘 실험동 구축으로 암반분야에 대한 연구와 터널과 지하구조물에 대한 기술개발에 노력하고 있으며, 연구성과의 현장적용을 통한 실용화연구가 활발히 이루어지고 있다.

이와같이 암반공학분야에 대한 연구와 기술개발이 활발하게 이루어지고 있으며, 보다 발전적인 결과를 얻기 위해서는 암반, 토질, 지질, 구조기술자들의 상호협조와 이해를 통해 통합화된 연구시스템을 구축하도록 많은 노력이 필요하다고 할 수 있다. 또한 앞으로 해결해야할 암반공학분야에서의 기술과제는 산적해 있으며 각자의 전공과 관심분야를 살려 보다 적극적으로 기술개발에 임해야 할 것이다. 이를 위해서는 학문적 영역을 과감히 탈피하고 암반공학의 발전을 위해서 각 분야의 전문가들이 협력하고, 국가별 협력도 아끼지 않아야 할 것이다.

2000년은 20세기를 마감하고 21세기를 시작하는 해이다. 지난 세월 많은 발전을 거듭한 암반공학기술도 이제는 새천년을 맞이하여 제 3의 공간으로서의 안전하고 경제적인 지하공간의 건설을 위해 보다 실용적인 기술개발에 힘을 다해야 할 것이다.