터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제21권 제6호, 2011년 12월, pp. 407~426

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 21, No. 6, 2011, pp. 407-426
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

국제암반역학회의 50년의 발자취

박정욱[1], 박철환[1]*, 한공창[1]

Fifty Years of the ISRM and Associated Progress in Rock Mechanics

Jung-Wook Park, Chulwhan Park, Kong Chang Han

Abstract This technical report is to introduce the paper which was presented in the 2011 ISRM Congress at Beijing by Prof. Edwin T. Brown. In commemoration of the fiftieth year of the life of ISRM, the emergence of rock mechanics as a distinctive engineering and scientific discipline is described. And the state and achievements of the discipline at the time the ISRM was founded in 1962, the events leading up to the formation of the Society, the development and achievements of the Society in the 50 years since 1962, and the progress made in the discipline of rock mechanics and rock engineering since that time are also discussed.

Key words General

초 록 본 기술보고서는 베이징에서 개최된 2011 국제암반역학회 학술회의에서 Brown 교수가 직접 발표한 논문을 소개한 것이다. 이는 ISRM의 창립 50주년을 기념하여 강연된 내용으로 암석역학이 독창적인 공학기술이며 과학적인 학문분야로 출현하게 된 배경을 소개하였다. 또한 1962년 ISRM이 설립될 당시의 배경과 형성과정, 학회가 50년 동안에 이룩한 성과와 업적, 그리고 암석역학 및 암반공학의 발전상을 포괄적으로 살펴보았다.

핵심어 암석역학 및 암반공학 일반

1. 서 언

국제암반역학회(International Society for Rock Mechanics, ISRM)는 1962년에 창립되어 올해로 50주년을 맞는다. 이와 동시에 우리나라의 한국암반공학회도 30주년을 맞이했기에 지난 2011년 10월 중국 베이징에서 열린 제12회 ISRM Congress(Figure 1)는 전세계 암반공학 분야의 종사자들이 ISRM의 지난 역사를 되짚어 보고, 향후 학회와 암반공학의 발전을 기약하는 뜻 깊은 행사였다고 할 수 있다. 특히 이번 대회에서 박도현 회원의 박사논문이 Rocha Medal 수상자로 선정되어 기념 강연을 가졌다. 이는 우리나라로서는 처음으로 수상한 것으로 한국암반공학회의 위상을 드높이는 계기가 되었다(Figure 2).

이번 국제학술대회에서 6대 ISRM 학회장을 역임했

Fig. 1. Opening ceremony for 12th ISRM congress at Beijing

Fig. 2. Picture taken in memory of Rocha Medal award

[1] 한국지질자원연구원
* 교신저자 : cwpark@kigam.re.kr
접수일 : 2011년 11월 1일
심사 완료일 : 2011년 11월 22일
게재 확정일 : 2011년 12월 1일

던 호주의 Edwin T. Brown 교수는 주제강연을 통해 암석역학이라는 학문의 출현과 ISRM의 설립 배경, 그리고 지난 50년간 학회와 암반공학의 발전과정 및 업적에 대하여 발표하였다. 본 기술보고서는 Brown 교수의 강연 내용을 완역한 것으로, 특히 30주년을 맞은 한국암반공학회 회원들들에게 ISRM의 지난 50년의 발자취에 대해 소개하는 것은 매우 큰 의미가 있다고 판단된다. 이 논문에는 상당한 양의 참고문헌이 소개되어 있는데, 대부분이 암반공학 분야에서 검색강도가 매우 높은 논문들이기 때문에 가감하지 않고 언급하였다.(以上 譯者 註)

국제암반역학회는 1962년 5월 오스트리아 Salzburg에서 창립된 이래, 올해로 50주년을 맞이한다. 따라서 이번 제12회 ISRM Congress는 학회가 설립과정을 반추하고 지난 50년 동안의 성취와 발전을 되돌아 보면서 향후 50년의 일어날 발전을 기대해 보는 좋은 기회가 될 것이다.

본 보고서는 암석역학이 독창적인 공학기술이며 과학적인 학문분야로 출현하게 된 배경을 대단히 광범위하고 총괄적으로 반추해 보고자 한다. 뿐만 아니라 1962년 ISRM이 설립될 당시의 학문적 현황과 업적을 포괄적으로 살펴보면서, 지난 50년간 학회가 학문분야에서 이룩한 발전상을 소개하고자 한다. 비록 본인은 1966년 Losbon에서 개최된 첫 번째 학술대회 이전에는 너무 어려 학회업무에 관여하지 못했지만, 지난 50년 가운데 48년 동안에는 학회가 개척하는데 진지한 관심을 갖고 종사했다. 이번 발표에 이어서 현 회장이신 Hudson 교수께서는 학회와 학문의 향후 50년에 기대되는 바를 발표하실 것이다.

본 발표에서 사용되고 있는 암석역학이란 용어는 학회정관에 정의된 의미(*암석역학 분야는 암석과 암반의 물리적이고 역학적인 거동과 이러한 지식을 지질작용이나 공학분야에 진보된 이해를 하는데 활용하는 데에 관련되는 모든 연구를 포함한다*)로 사용될 것이다. 따라서, 암반공학이라는 용어와 다르게 사용되는 경우가 때때로 있지만, 이 용어는 일반적으로 암반공학을 포함한다.

2. 1962년의 국제정세

본론에 들어가기에 앞서, ISRM이 창립된 1962년 당시의 국제 정세를 간략히 살펴보는 것도 흥미로운 일일 것이다. 국제 사회는 냉전 갈등이 한창 심화되었을 때로, 구소련의 수상인 Nikita Kruschev와 미국의 대통령 John F. Kennedy가 훗날 '쿠바미사일위기'라 불리울 사태를 겪으며 날선 대립구도를 달리고 있었다. 영국, 프랑스, 인도 그리고 중국의 지도자는 각각 Harold Macmillan, Charles de Gaulle, Jawaharlal, Mao Zedong이었으며, 당시 서방국가들은 중국에 대해 거의 무지한 상태였다.

미국의 작가 John Steinbeck이 그해의 노벨문학상을 수상하였고, 오스트리아의 유명 바이올린리스트인 Fritz Kreisler가 1월 29일 사망하였다. 아마도 Kreisler의 오랜 팬이었던 ISRM 초대회장, Leopold Müller 교수에게는 그해에 일어난 가장 슬픈 사건 중 하나였을 것이다. Beatles의 첫 음반이 발매되었고 Rolling Stones가 데뷔하였다. 필자(Edwin T. Brown)가 가장 좋아하는 음악장르는 재즈인데 Herbie Hancock의 Watermelon Man이라는 곡이 재즈 차트가 아닌 대중음악 차트를 여러 주 동안 석권하였다. 월드컵과 월드베이스볼 시리즈에서 브라질과 뉴욕양키즈가 각각 우승컵을 거머쥐었다. 미국의 골프선수 Arnold Palmer는 British Open에서 2연패, US Masters에서 3번째 우승을 하였고, 호주의 테니스 선수 Rod Laver는 그랜드 슬램을 달성하기도 하였다.

과학 기술 분야에서는 레이저가 처음 발견되었고, 발광다이오드(light emitting diode)가 상용화되기 시작하였다. 세계 최초의 통신위성 Telstar 1호가 7월 10일 발사되었고, 펠트 펜이 출시되었다. 컴퓨터 기술의 발달 및 PC의 보급은 아직 걸음마 수준에 있었지만, PDP-1을 위한 컴퓨터 게임이 처음 개발되기도 하였다.

3. 암석역학의 출현

1960년대 초 암석역학(rock mechanics)은 완전히 체계를 갖추지는 못하였으나, 전문저널과 학회, 그리고 관련 단체들의 등장과 함께 독립적인 학문영역으로서 자리를 잡아가고 있었다(Brown, 1999, Brown, 2002, Hood & Brown, 1999).

19세기 중반, 많은 나라에서 대학교, 기업, 그리고 연구기관을 중심으로 현재 암석역학 또는 암반공학(rock engineering)으로 분류되는 주제에 대한 논문과 출판물이 발표되었다(Obert & Duvall 1967). 암석역학의 시초를 무엇으로 볼 것인가에 대해서 많은 논의가 있었는데, 러시아의 Turchaninov 등(1974)은 다음과 같이 결론지었다. "19세기 말 지하구조물과 지표면에서 발생하는 변형과 균열 패턴에 대한 연구가 진행되었다. 서부 유럽의 주요 석탄광산에서 지표면의 변형을 지속적으로 계측한 사례가 있고, 지표 침하의 위험에 대비하기 위한 광주설계 실무규칙이 제안되기도 하였다."

필자의 기억으로는 "rock mechanics"라는 용어가 처음 문헌에 등장한 것은 남아프리카공화국 Appleton(1944)의 논문이었다. 암석역학 및 암반공학 주제에 대한 최초의 전문저널은 1929년 Vienna에서 출간된 Geologie und Bauwesen으로, 당시 Josef Stini 교수가 편집장으로 있었다. 1958년에 ISRM의 창립자이면서 초대회장인 Leopold

Müller 교수(Figure 3)가 이를 이어받아, 1962년에 명칭을 Felsmechanik und Ingenieurgeologie(Rock Mechanics and Engineering Geology)로 바꾸었다. 이후 1969년과 1983년에 저널명이 각각 Rock Mechanics(Müller, 1969)와 Rock Mechanics and Rock Engineering로 변경되어 현재에 이르게 되었다. 이외의 주요 저널로는 1963년 영국의 Albert Robert에 의해 창간된 International Journal of Rock Mechanics and Mining and Mining Sciences가 있다(Roberts, 1963).

Fig. 3. The late Professor Leopold Müller, 1908-1988, founding President of the ISRM.

오스트리아에서는 1950년부터 암석역학에 대한 연례 학술회의가 개최되기 시작했다. 1951년에 벨기에 Liège에서 제1회 International Conference on Rock Pressure and Ground Support가 개최되었고, 1958년 독일 Leipzig에서 제3회 International Strata Control Congress가 열렸다. 그리고 여기에서 International Bureau of Rock Mechanics가 설립되기도 하였다. 미국에서는 1950년대 초반부터 암석역학에 대한 체계적인 연구가 이루어지기 시작하였고, 1956년 Colorado School of Mines에서 제1회 US symposia on rock mechanics가 개최되었다. 1962년에 ISRM의 8대 회장인 Charles Fairhurst 교수에 의해 미네소타대학에서 제5회 US symposia on rock mechanics가 열렸고(Fairhurst, 1963), 같은 해에 제1회 Canadian Symposium on Rock Mechanics도 개최되었다(Anon, 1963). 1960년대 초 각종 학술발표회와 저널을 통하여 다양한 주제의 연구논문이 발표되었고 암석역학에 대한 서적도 다수 출판되기 시작하였다. 이중 1957년 출간된 Talobre의 Lécanique des Roches가 주목할 만하며(Talobre, 1957), 같은 해 파리에서 이 주제에 대한 컨퍼런스가 개최된 바 있다.

위와 같은 사실들을 통해서 1962년 이전에 이미 몇몇 국가를 중심으로 암석역학이 독자적인 학문 분야로서 그 체계를 잘 정립해 가고 있는 단계였음을 짐작할 수 있다.

4. 1962년의 암석역학

그렇다면 1962년 당시, 암석역학 및 암반공학 분야에서 주요 관심사는 무엇이었고, 지식 및 성과 등은 어떤 수준이었을까? 간단히 답하자면, 우리가 지금 짐작하는 것 이상으로 진전된 수준에 있었다고 할 수 있다.

1962년 암석역학의 주요 연구분야는 매우 세분화되어 있었고, 많은 연구자 및 현장기술자를 중심으로 다양한 연구가 이루어지고 있었다. 예를 들면, Austrian School of rock mechanics는 여러 분야에서 활발한 활동을 벌이고 있었다. 이를 주도했던 Müller 교수(1979)에 의하면, 일찍이 1905년에 Albert Heim은 암석 재료와 암반의 차이점을 인지하고 있었다. 스테레오넷의 사용법이 Schmit(1925)에 의해 소개되었고, 암반 내 절리 시스템에 대한 연구도 1920년대에 시작되어(Stini, 1922), 지속적으로 수행되었다(Müller, 1933, Müller, 1950, Müller, 1979). 많은 사람들이 실내시험 및 현장시험에 대해 연구하였고(e.g. Blanks & McHenry, 1945, Golder & Akroyd, 1954, John, 1962, Rocha et al., 1955), 암반-지보재 상호작용(ground-support interaction)에 대한 개념이 도입되었다(Pacher, 1964, Rabcewicz, 1969). 그리고 암반 사면 및 기초에서 블록의 안정성을 해석하기 위한 한계평형법이 개발되기도 하였다(John, 1962, Terzaghi, 1962b).

세계 각지에서 암석의 역학적 물성에 대한 실험 연구도 활발히 진행되었다(Mayer, 1953, Obert et al., 1946). 사실, 암석 물성에 대한 연구는 18세기 중반 유럽에서 시작되었다(Coulomb, 1776, Heyman, 1972). 이후 von Kármán(1911)나 King(1912)과 같은 연구자들에 의해 암석에 대한 압축실험이 수행되었으며, 미국에서는 1930년대 중반 이후 Griggs(1936), Handin(1953) 등의 연구자들이 다양한 실험 연구를 진행하였다. 이 시기의 실험들은 아마도 암반공학적 관점에서보다는 순수하게 과학적, 지질학적, 지구물리학적 관점에서 이루어졌을 것으로 짐작된다. 일본과 호주에서는 각각 Kiyoo Mogi 교수와 Mervyn Paterson 박사를 주축으로 하여 광범위한 분야의 실험 연구가 수행되었다(Mogi, 1959, Mogi, 2007, Paterson, 1958, Paterson, 1978). John Jaeger 교수는 암석 절리와 표면의 마찰력에 대한 논문을 발표하는 등 주목할 만한 성과를 거두었으며(Jaeger, 1959, Jaeger, 1960), 세계 각지에서 현장 규모의 암반 불연속

면에 대한 전단시험도 수행되고 있었다(John, 1962, Rocha et al., 1955).

암석역학 분야의 연구는 댐이나 터널 건설 시 지반조사와 설계과정에 응용되어 매우 중요한 역할을 담당하고 있었다(Jaeger, 1955, Jaeger, 1972). 일찍이 1951년에 Charles Jaeger 박사는 International Commission on Large Dams(ICOLD)에 "암석역학 분과위원회를 신설하기 위한"(Jaeger, 1972) 제안서를 제출하였고, Klaus John 박사는 1961년 로마에서 열린 제7회 ICOLD meeting에서 "암석역학의 중요성이 점차 증대되고 있다"라고 언급하기도 하였다(John, 1962). ISRM의 2대 회장인 Manuel Rocha 교수와 Lisbon의 National Civil Engineering Laboratory는 당시 국제 암석역학의 흐름을 선도하고 있었고(Rocha, 1964, Rocha et al., 1955), 1949년부터 Snowy Mountains Hydro-electric Scheme의 작업을 맡았던 Tom Lang의 팀은 암석역학 및 암반공학의 발전에 괄목할 만한 성과를 이루어 내었다(e.g. Alexander, 1960, Brown, 1999, Lang, 1961, Moye, 1959, Pinkerton et al., 1961).

지하공동 주변의 응력을 계산하기 위해서 Terzaghi & Richart(1952)는 탄성응력해석을 위한 수학해(closed-form solution)를 제시하였으며, 복잡한 단면형상에 대해서는 광-탄성(Photoelasiticity)이 적용되기도 하였다(e.g. Hoek, 1963, Pinkerton et al., 1961). 또한 남아프리카공화국에서는 electric analogue solution이 개발된 바 있다(Cook et al.,1966, Salamon et al., 1964). 당시에 디지털 컴퓨터와 유한요소법 등의 수치해석법이 개발되어 있었지만(Clough, 1960), 암반공학문제의 응력해석에 적극 활용할 수 있는 수준은 아니었다(e.g. Goodman, 1966, Zienkiewicz & Cheung 1964).

한편, 현지암반의 초기응력을 측정하고자 하는 연구도 활발히 이루어져 왔다(Judd, 1964, Terzaghi 1962a). ISRM 4대 회장이었던 프랑스의 Pierre Habib 교수는 1950년 응력보상법(flat-jack method)의 개발에 참여하였다. 응력보상법은 현지응력뿐만 아니라(Habib, 1950), 암반의 탄성정수를 측정하는 데에도 널리 적용되었다. 1958년에는 암반의 응력 측정 및 예측과 관련된 가장 중요한 논문 중 하나가 Nils Hast에 의해 발표되었는데(Hast 1958), 이는 이후 "ISRM Suggested Method"로 채택되기도 하였다. 1960년대 초까지 초기응력 측정법에 대한 다양한 연구가 진행되었으며, 자세한 내용은 Judd(1964)의 문헌을 참고하기 바란다. Obert & Duvall(1967)과 Hood & Brown(1999)의 문헌에 언급된 바와 같이, 1950년대를 거치면서 토목 및 광산공학 문제에 있어 암석역학 및 암반공학적 검토가 매우 중요한 요소로 떠올랐으며, 이는 현장 계측과 장비 개발의 광범위한 발전으로 이어졌다(e.g. Potts, 1957).

1953년 남아프리카공화국에서는 대심도 경암에서의 광산개발과 암반돌출(rock burst) 등 암반공학 문제와 관련한 주요 연구 프로그램이 수행되었고(Hill, 1954, Hill, 1966), 비슷한 시기 인도의 Kolar 금광 지대에서도 유사한 연구가 진행되고 있었다. 남아프리카공화국 프로그램에는 Müller 상의 수상자인 Neville Cook 박사와 Evert Hoek 박사를 포함한 뛰어난 연구자들이 참여하여 암석역학 및 암반공학의 실험적, 이론적 기초를 다지는 중요한 계기를 마련하였다. 주요 성과로서 수정 Griffith 이론을 이용한 암석 취성파괴에 대한 실험적, 이론적 연구 등이 있다(Cook, 1965, Cook et al., 1966, Hoek, 1964).

Hoek(2007)은 "1960년대 초반은 전세계적으로 암반공학 전반의 발전에 있어 매우 중요한 시기였다. 왜냐하면 연이어 발생한 비극적인 붕괴 사고들은 당시 우리가 토질뿐만 아니라 암반의 거동을 예측할 수 있는 능력이 한계에 도달하였음을 반증하고 있었기 때문이다" 라고 언급한 바 있다. 1959년 12월 프랑스에서 Malpasset 콘크리트 아치댐이 붕괴되면서 홍수로 인해 450명의 목숨을 앗아갔고(Londe, 1987), 1960년 1월에는 남아프리카공화국 Coalbrook의 한 탄광에서 붕괴 사고로 인해 432명의 인명피해가 발생하였다(Bryan et al., 1964). 그리고 1963년 10월에는 이탈리아 Longarone에서 발생한 산사태로 인한 지진파가 Vaiont Dam를 덮치면서 약 2500명의 사망자가 발생하였다(Müller 1964). 이같은 사건들로 말미암아 암반공학을 기반으로 한 새로운 정밀조사기법과 연구 프로그램에 대한 사회적 요구가 더욱 높아졌다(Bernaix 1969, Jaeger 1972, Londe 1987, Londe et al. 1969, Müller 1968, Müller-Salzberg 1987, Salamon & Munro 1967).

앞서 언급한 예시와 문헌들은 1960년대 초에, 암석역학 분야의 주요논의들이 세분화되어 기본적인 체계를 갖추고 있었음을 보여준다. 현재 사용되는 많은 기술들이 적어도 개발의 초기단계에 있었으며 암석역학에 대한 이해와 암반공학 분야의 응용 면에서 크게 진전되어 있는 상태였다. 그러나 아직 많은 문제들의 해답을 기다리고 있는 상태였으며, 그 중 가장 중요한 문제는 Müller의 "암반의 강도란 무엇인가?"라는 질문(Müller, 1967a)이라고 할 수 있다. 이 질문의 배경과 해답을 찾아가는 과정에 대해서는 Fairhurst(2010)의 논문에 잘 소개되어 있다.

5. ISRM의 설립

1951년 오스트리아 Salzburg에 위치한 Müller 교수의 자택

에서 16명의 연구자가 모여 Internationalen Arbeitsgemeinschaft für Geomechanik(International Working Group for Geomechanics)를 구성하였다. 이는 앞서 4장에서 간략히 소개된 Austrian School(Müller, 1967b)을 통해 암석역학 문제를 연구하기 위한 모임이었다. 이들은 Salzburger Kreis 또는 Salzburg Circle로 불리웠으며, 1958년 콜로라도 광업대학교에서 열린 제3회 US Rock Mechanics Symposium에서 Müller 교수가 Fairhurst 교수를 모임에 초빙하기 전까지는 대부분 오스트리아인으로 구성되어 있었다(Fairhurst, 2010). 1962년 5월 24일, Müller 교수는 Internationale Gesellschaft für Felsmechanik (International Society for Rock Mechanics, ISRM)라는 명칭을 공식적으로 등록하여 학회를 설립하였다. 그 다음날 Salzburg에서 열린 회의록에는 오스트리아, 독일, 폴란드, 영국, 미국, 유고슬라비아의 46명의 참가자 리스트가 기록되어 있다. ISRM은 Müller 교수의 역동적인 리더쉽과 여러 나라의 지원하에서 급속히 성장하여 실로 '국제적인' 학회로 거듭나게 되었다.

1966년 제1회 ISRM congress가 Lisbon에서 개최된 순간은 학회의 역사뿐만 아니라 필자의 인생에서도 매우 인상적인 순간이었다(Brown, 2007). 총 40개국에서 814명의 대표가 참석한 Congress의 개회식에서 Müller 교수는 다음과 같은 발언을 한 바 있다.

"많은 전문가들이, 암반의 가장 큰 특징이 불연속성(discontinuity)과 이방성(anisotropy)이며 불연속 암반의 특성은 암석 자체보다 블록시스템을 이루는 불연속면에 더 의존한다는 데에 동의할 것이다. 토질역학에서 토질 자체의 특성과 건설재료의 특성이 별개로 연구되어야 하듯이, 암반을 구성하는 모든 재료에 대한 이론은 독자적으로 연구될 필요가 있고 연속체 역학에서와는 다른 관점에서 접근되어야 한다(Müller, 1967a)."

암석역학은 점차 불연속체를 다루는 역학의 한 분야로 인식되기 시작하였다. 이는 암반공학 문제에 있어 탄소성 연속체역학을 적용할 수 없음을 의미하는 것이 아니다. 다만, Müller 교수의 질문("암반의 강도이란 무엇인가?")에 대한 해답은 암반을 불연속체로 고려하는 데에서부터 찾을 수 있음을 뜻한다.

1966년에는 Manuel Rocha가 2대 ISRM 회장으로 당선되었고, 포르투갈 Lisbon의 National Civil Engineering Laboratory(LNEC)에 학회 사무국이 설립되었다. Calouste Guggenheim 재단의 재정적 후원과 잘 정비된 사무국의 업무 지원을 통해서 포르투갈 Lisbon에서 제1회 Congress가 성황리에 치러졌다.

6. ISRM의 발전 및 업적

ISRM 창립 이래, 학회의 정관 및 규정은 시간의 흐름에 따라 일부 개정되었지만 학회의 설립 목적은 변함없이 다음과 같다.

- 암반공학 분야에 종사하는 과학기술자들 간의 국제협력을 도모하고 아이디어와 정보교류를 증진시킨다.
- 암반공학 분야의 교육, 학술연구 및 지식발전을 장려한다.
- 암반공학 분야에 종사하는 과학기술자의 실무능력을 고취함으로써, 토목공학, 광산공학, 석유공학 현장에서 보다 안전하고 경제적이며 친환경적인 설계가 이루어질 수 있도록 일조한다.

이러한 설립 목적에 부응하기 위한 주요 활동은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 4년마다 국제회의(International Congress)를 개최한다.
- National Group 간 주최하는 국제학술회의, 지역학술회의, 특별학술회의를 지원한다.
- 뉴스 저널을 발간하여 관련 과학기술에 대한 정보와 여러 커뮤니티의 최신 활동소식을 제공한다.
- 중요한 과학적, 기술적인 문제를 연구하기 위한 위원회(Commission)를 운영한다.
- 매년 우수한 박사논문을 선정하여 Rocha Medal을 수여하고, 4년마다 암석역학 및 암반공학 분야에 지대한 공헌을 한 과학기술자에게 Müller Award를 수상한다.
- 다른 과학기술 분야의 학회 또는 단체들과 협력을 도모한다.

필자의 개인적인 판단으로는, 설립 목적 중 처음 두 가지는 현재까지 여러 활동을 통해 성공적으로 실행되어 왔다. 그리고 세 번째 항목도 가시적이지는 않지만, 학회의 여러 활동과 성과에 잠재적으로 반영되어 왔다고 할 수 있다.

학회의 주요 활동 역시 효율적으로 수행되어 왔다. 사무국이 운영하는 ISRM 홈페이지에 의하면, 현재까지 학회의 지원을 받은 학술회의는 1968년 10월 Madrid에서 개최된 심포지엄을 시작으로 총 103회(국제학술회의 33회, 지역학술회의 68회, 특별학술회의 2회)에 달한다. 그리고 여러 위원회의 활동은 학회의 신뢰도를 향상시키는 데에 크게 이바지하였다. 가장 활발한 활동을 보인 위원회는 1966년 시작한 Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests로서 Don Deer 박사가 위원장으로 있었고, 1979년 스위스 Montreux에서 열린

제4회 Congress에서 Commission on Testing Methods로 개명되었다. 이 위원회의 활동은 “ISRM Suggested methods for laboratory and field testing”에 지속적으로 반영되고 있다(Ulusay & Hudson, 2007). 지난 45년 동안 가장 헌신적인 활동을 보여준 회원은 John Franklin 박사와 John Hudson 교수를 꼽을 수 있다. Franklin 박사는 1974~1987년에 위원회장(Commission President)을 거쳐 7대 학회장을 역임하였으며, 현재의 회장을 맡고 있는 Hudson 교수도 1987~2006년 위원회장을 역임한 바 있다. 암반공학 분야의 교육 및 학술진흥을 위한 활동으로는 ISRM slide collection, ISRM Lecture, Technical and Culture Field Trip 소개 등이 있으며, 최근에는 Commission on Rock Engineering Design Methodology의 성과물이 책자로 출판된 바 있다(Feng & Hudson, 2011). ISRM 홈페이지를 통해서 많은 ISRM Lecture를 다운받을 수 있으며, 2010년에는 전자도서관(ISRM Digital Library)이 개설되기도 하였다.

현재 한가지 아쉬운 사항이 있다면, 6개 지역군(Africa, Asia, Australasia, Europe, North America, South America) 전반에 걸쳐 개인회원수가 다소 부진하다는 점을 들 수 있다. Figure 4는 1966년 이후 학회의 개인회원수를 보여준다. 제1회 Congress 당시 383명으로 시작하여 1970년에 4,000명, 1989년에 6,470명으로 급격히 증가하였다. 2000년 무렵까지 감소세를 보이다가 다시 점차 증가하여 2010년 현재 6,312명의 개인회원이 등록되어 있는 상태이다. National Group은 1966년 12개국으로 시작하여 현재에는 48~49개국이 회원국으로 등록되어 있다.

학회 활동을 지역군별로 살펴보면 수적, 재정적 측면에서 모두 유럽이 중추적인 역할을 해왔음을 알 수 있다. Figure 5는 2010년 연차 보고서에서 발췌한 그림으로 2003~2010년 동안 각 지역군의 개인회원수를 보여준다. 유럽인의 비율이 현저히 높은 것을 확인할 수 있고, 최근에는 중국과 인도의 참여도가 높아지면서 아시아인의 비율도 증가하는 추세이다.

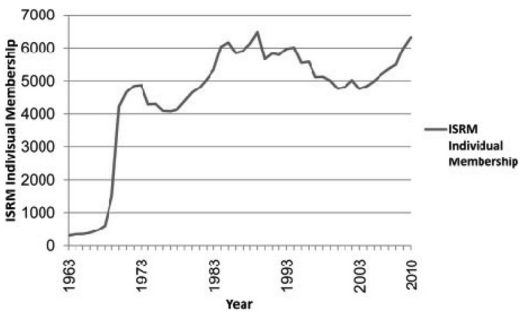

Fig. 4. Total ISRM individual membership, 1963-2010.

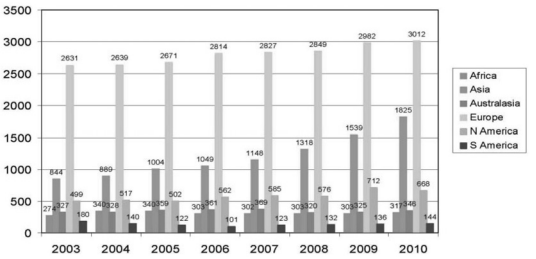

Fig. 5. Individual ISRM membership by Region, 2003-2010.

사실, 중국 내 암반공학의 성장 과정은 지난 25~30년 동안 ISRM과 전세계 암반공학이 발전해 온 과정을 보여준다고도 할 수 있다. 1979년 11명의 개인회원으로 시작한 중국은 2010년 현재 558명의 개인회원이 등록된 가장 큰 National Group으로 성장하였다. 필자의 기억에 의하면, 1983년 중국 대표 18명이 참석했던 제5회 Congress 무렵까지도 학회에서 중국의 활동은 거의 없었다. 그러나 중국은 지속적으로 성장하여 Lisbon에서 열린 2007 ISRM Congress에는 54명의 대표가 참석하였고, 이번(2011 ISRM Congress)에는 그보다 훨씬 많은 인원이 참가하였다.

1983~1987년에 Tan Tjong Kie 교수가 중국인 최초로 학회 부회장을 역임하였고, 1986년 중국에서는 처음으로 ISRM 국제학술발표가 Beijing에서 개최되었다. Chen 등(1986)은 이 학술발표회에서 1958년부터 시작된 Three Gorges Dam 프로젝트와 이와 관련된 지반조사 및 연구 프로그램에 대해서 발표하였다. 현재에는 Xia-Ting Feng 교수가 중국인 최초로 ISRM 회장에 선출되어 2015년까지의 임기를 앞두고 있다.

Table 1은 ISRM 역대 회장을 나타낸 것으로 대체로 유럽인, 특히 영어를 사용하는 경우가 많았다. 12명 중 7명이 유럽에서 배출되었고, 북아메리카 출신인 John Franklin과 Charles Fairhurs는 실제로 영국인이다. Table 2는 학회의 가장 큰 상인 Müller Award의 수상자 목록으로서, 1991년 독일 Aachen에서 Evert Hoek이 처음 수상하였다. Müller Award의 수상자 역시 전임 회장과 마찬가지로 유럽과 영어권의 비중이 높게 분포함을 확인할 수 있다.

1982년부터 2대 학회장인 Manuel Rocha의 업적을 기리기 위해 매년 가장 우수한 박사논문을 발표한 공학자에게 Rocha 메달을 수여하였다. 현재까지 17개국에서 30명의 젊은 공학자가 선정되었으며, 지역적인 편중은 비교적 크지 않은 편이다. 대부분의 수상자들은 학회와 관련 분야에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다.

위에서 살펴본 바와 같이 ISRM은 지난 50년간 설립

Table 1. ISRM Presidents from 1962 to date.

Year	President (Country)
1962-1966	Leopold Müller (Austria)
1966-1970	Manuel Rocha (Portugal)
1970-1974	Leonard Obert (USA)
1974-1979	Pierre Habib (France)
1979-1983	WalterWittke (Germany)
1983-1987	Edwin T. Brown (UK)
1987-1991	John A. Franklin (Canada)
1991-1995	Charles Fairhurst (USA)
1995-1999	Shunsuke Sakari (Japan)
1999-2003	Marc Panet (France)
2003-2007	Nielen van der Merwe (South Africa)
2007-2011	John A. Hudson (UK)
2011-2015	Xia-Ting Feng

목적과 취지에 따라 활발한 활동을 성공적이고 효율적으로 수행함으로써 전 세계의 암석역학 및 암반공학의 발전에 크게 이바지하여 왔다.

7. 암석역학의 발전

7.1 범위

ISRM 창립 이래, 지난 50년의 암반공학의 발전과 진보에 대하여 평가하는 것은 필자(Edwin. T. Brown)에게 있어 매우 어려운 일이다. 이 과정에서 필자의 제한된 지식과 경험, 그리고 주관적 관심사가 판단에 개입될 수 밖에 없기 때문이다. 또한 비슷한 이유로 몇몇 중요한 업적을 간과하거나 누락시킬 수도 있으므로, 이에 대해서는 먼저 양해를 구하는 바이다. 다음 절에 이어질 내용은 필자가 쉽게 구할 수 있거나 이미 잘 알고 있던 참고문헌과 지식을 바탕으로, 각 주제의 발전 및 업적을 설명한 것이므로 내용상 완벽하거나 명확하다고 말할 수는 없다.

Table 2. Müller Award recipients, 1991-2011.

Year	Award Recipient
1991	Evert Hoek (Canada)
1995	Neville G.W. Cook (USA)
1999	Herbert H. Einstein (USA)
2003	Charles Fairhurst (USA)
2007	Edwin T. Brown (Australia)
2011	Nicholas R. Barton (Norway

암반공학의 광범위한 주제를 보다 체계적으로 검토하기 위해서는 몇 가지 테마로 나누어 설명할 필요가 있다. 따라서 여기서는 많은 연구자들이 널리 사용하고 있는 단순화된 암반공학프로세스(simplified general rock engineering process)를 이용하여(e.g. Brady & Brown 2004, Hudson & Feng 2007, Read & Stacey 2009), 7.2~7.6절의 소주제로 분류하였다. 암반공학프로세스는 순차적인 진행 과정을 의미하는 것이 아니라 암반공학적 내용과 응용 분야에 의한 분류이다. 따라서 실무에서는 각 프로세스가 병행되거나 반복적으로 피드백이 이루어지기도 한다. Figure 6은 암반공학적 설계과정의 흐름도를 보여주는 것으로 전반적인 프로세스를 개략적으로 표현한 그림이다.

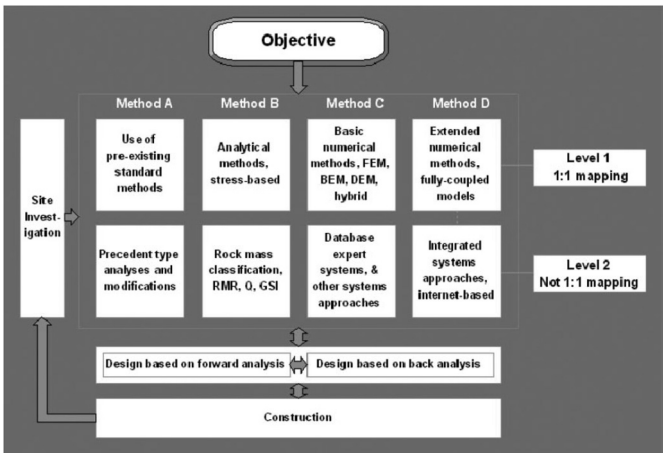

Fig. 6. Flowchart of rock mechanics modelling and rock engineering design approaches (Feng & Hudson, 2004).

7.2 부지조사 및 부지 특성화

암반공학 문제에 있어서 적절한 부지조사와 지질학적 부지특성화는 그 프로젝트의 성패를 결정하는 핵심적인 요소라고 할 수 있다. 4장에서 언급한 바와 같이, ISRM이 설립되기 이전에도 부지조사와 특성화에 대한 기본적인 개념 및 이론은 정립되어 있는 상태였다. 그러나 ISRM이 설립된 이후 관련 분야의 연구와 기술 개발이 가속화되었고, 그 내용을 살펴보면 다음과 같다.

- 드릴링, 시추공검층 기술: Core orientation method, 음향 텔레뷰어(acoustic televiewer, ATV) 등의 물리 검층 기술 등(Brown, 2007a, Takahashi et al., 2006)
- 지구물리탐사 기술: 탄성파 반사법, 탄성파 굴절법, 탄성파 토모그래피 등(Barton, 2006, Takahashi, 2004, Takahashi et al., 2006)
- 불연속면 조사 기법: 사진측량, 사진원격탐사, 레이저 스캐닝, 3차원 영상처리기법 등(Gaich et al., 2007, Grobler et al., 2003, Read & Stacey, 2009, Slob et al., 2007)
- 지하수 조사 및 분석 기법(Elsworth & Mase, 1993, Louis, 1974)
- 암반분류법의 개발(Barton, 2006, Barton et al., 1974, Bieniawski, 1976, Bieniawski, 1989, Hoek, 1994, Marinos et al., 2007)
- 불연속면 특성의 통계적 분석 기법(Billaux et al. 1989, Dershowitz & Einstein 1988, Priest 2004, Priest & Hudson 1981, Zhang et al. 2002)
- 개별균열연결망 모델(discrete fracture network, DFN) (Dershowitz, 1995, Rogers et al., 2010)
- 3차원 지반정보의 모델링 및 가시화를 위한 소프트웨어 개발(Beer, 2010)
- 현지응력 측정 기술(Amadei & Stephansson, 1997, Fairhurst, 2003, Hudson et al., 2003)

여러 가지 이유로, 지반조사 분야 중 현장시험 부분에서는 1960년대 초반 이후로 큰 발전을 이루지 못하였다. 그리고 몇몇 프로젝트에 참여한 필자의 경험에 의하면, 부지조사와 특성화를 위해 많은 장비와 기법들이 개발되었지만, 때로는 기본적인 코어 검층에 대한 기술과 숙련도 면에서조차 아쉬울 때가 있다.

7.3 암석 및 암반의 물성

지난 50년 동안 암석 및 암반 물성의 예측, 또는 측정과 관련된 주요 연구는 다음과 같이 간추릴 수 있다.

- 실내 실험을 통한 암석의 파괴 특성 연구 및 서보-제어 실험 장비 개발(Hudson et al., 1971, Martin, 1997, Wawersik & Fairhurst, 1970)
- Acoustic monitoring을 통한 암석의 파괴 특성 연구(Martin, 1997)
- 암석 및 암반에 대한 시험법 개발 및 보급: ISRM suggested method 등(Brown, 1981, Ulusay & Hudson, 2007)
- 실험장비 제어 및 데이터 처리, 분석에 대한 자동화 (Barla et al., 2007)
- 암석 및 암반의 강도 및 변형특성 추정을 위한 경험식의 개발(Hoek & Brown, 1980, Hoek & Diederichs, 2006, Suorineni et al., 2009)
- 암석파괴역학 이론, 관련 시험법 및 해석기법 개발 (Atkinson, 1987, Ulusay & Hudson, 2007, Zhou et al., 1986)
- 일정수직하중 및 일정수직강성 조건에서의 암석절리면에 대한 직접전단시험법 개발, 절리면 거칠기와 충전물이 전단거동에 미치는 영향에 대한 연구 (Barla et al., 2007, Barton & Bandis, 1990, Goodman, 1989, Grasselli & Egger, 2003, Indraratna et al., 2010)
- 개별요소법, 입자결합모델(bonded particle model)을 통한 암석 및 암반거동 수치모델링(Potyondy & Cundall, 2004) - 입자결합모델은 해석 대상을 암반유사재료(Synthetic Rock Mass model)로 모사함으로써 Müller의 '암반의 강도란 무엇인가?'라는 질문에 대한 해답의 열쇠를 제시하였다는 점에서 높이 평가할만하다(Fairhurst 2010, Mas Ivars et al. 2011, Pierce et al. 2009).
- 단일절리 및 암반내 절리연결망에서의 유체유동 연구(Barton & de Quadros, 1997, Long & Witherspoon, 1985, Louis, 1974, Witherspoon et al., 1980).

위와 같은 많은 연구와 노력에도 불구하고, 실제 산업현장에서는 많은 지질학자나 지질공학기술자들이 암반물성 추정과 관련된 프로그램이나 실험의 목적을 적절히 이해하지 못한 경우가 많다. Hoek-Brwon의 파괴기준식과 같은 경험적 접근법은 마치 블랙박스처럼 그 원리나 필요조건에 대한 충분한 고찰 과정 없이 사용되는 사례가 빈번하다(Brown, 2008, Kaiser & Kim, 2008).

7.4 설계 분석

지난 50년간 암반공학 문제의 설계 분석 방법은 응력 및 변형해석을 위한 수치해석에 초점을 맞추어 개발되어 왔다. 여기서는 Feng & Hudson(2004)이 제시한 암반공학 모델링 과정(Figure 6)을 통해 이를 설명하도록

하겠다. 그림에서 Level 1은 직접적인 방법으로서 문제의 기하학적, 역학적 특성을 설계에 직접 반영한다. 여기에는 pre-existing standard method, 해석적 방법(analytic method), 수치적 방법(basic and extended numerical method) 등이 속한다. 한편, Level 2는 간접적인 방법으로서 대상 문제의 물성 또는 특성을 정확히 고려하지는 않는다. Level 2의 방법에는 precedent type analysis, 암반분류법을 이용하는 방법, 암반공학시스템(basic and integrated systems method) 등이 속한다.

상기한 방법 중에서 pre-existing standard method, 해석적 방법, precedent type analysis, 그리고 몇몇 암반분류법은 1960년 초에도 이미 사용되고 있었다. 1960년대 이후에 새로운 암반분류법이 발표되었고(Barton et al., 1974, Bieniawski, 1976, Bieniawski, 1989, Hoek, 1994, Marinos et al., 2007), 다양한 수치 모델링 기법이 개발, 적용되었다. 해석적 방법(e.g. Diederichs & Kaiser 1999, Sofianos et al., 1999)과 경험적 방법(e.g. Galvin et al., 1999, Hedley & Grant, 1972, Salamon & Munro, 1967)에도 혁신적인 발전이 있었다. 최근에는 인공지능, 전문가 시스템, 인터넷 또는 인공신경망에 기반한 통합 지능형 시스템을 통한 접근법이 개발되고 있다(e.g. Dershowitz & Einstein, 1984, Feng & An, 2004, Feng & Hudson, 2004, Feng & Hudson, 2010).

1960년대 중반부터 암반공학 설계에 수치해석법이 광범위하게 적용되어, 중요한 연구 테마로 부각되기 시작하였다. Jing(2003)은 774편의 문헌을 정리하여 암반공학 분야에서 활용되고 있는 수치해석법을 분류한 적 있는데, 여기서는 비교적 최근에 개발된 사례를 중심으로 기술하도록 하겠다.

1960년대에는 주로 연속체 모델이 보편적으로 사용되었으며, 암반 내 불연속면은 등가 연속체 매질로 고려되는 경우가 많았다(e.g. Goodman et al., 1968, Wittke, 1977). 한편, 5대 ISRM 회장을 역임한 Walter Wittke 교수는 불연속체를 해석할 수 있는 기법을 개발하여 암반공학 문제에 유한요소법의 활용 범위를 넓히는데 지대한 공헌을 하였다. 수치해석은 주로 응력과 변형 해석을 위해 적용되었으며, 암반 내 균열 성장 및 전파, 유체 유동해석, 열해석 등을 해석하는 데에도 널리 사용되었다. Jing(2003)은 암반공학문제에 적용되는 다양한 수치해석기법을 다음과 같이 분류한 바 있다.

- 유한요소법(finite element method, FEM): 무요소법(meshless method) 등(Beck et al., 2009, Beck et al., 2010, Goodman et al., 1968, Wittke, 1977, Wittke, 1990, Zienkiewicz, 1977)
- 유한차분법(finite difference methods, FDM): 유한체적법(Finite Volume Method, FVM) 등, ITASCA사의 FLAC이 대표적임(Detournay & Hart, 1999, Hart et al., 2008, Itasca, 2011, Sainsbury, D.P. et al., 2011).
- 경계요소법(boundary element method, BEM)(Beer & Watson, 1992, Brady, 1979, Brady, 1987, Crouch & Starfield, 1983)
- 개별요소법(discrete element method, DEM)(Cundall, 1971, Cundall, 1987, Itasca, 2011), 불연속변형해석법(discontinuous deformation analysis method, DDA)(Shi & Goodman, 1985), 블록이론(Goodman & Shi, 1985), 개별요소법에 기반한 입자결합모델(bonded particle model, BPM), 유사 정적모델(quasi-static model), 동적 격자망 모델(dynamic lattice network model)(Cundall, 2011, Cundall & Damjanac, 2009, Oñederra et al., 2009)
- 연동해석: FEM/BEM, DEM/BEM, DEM/FEM(Beer & Watson, 1992, Brady, 1987, Elsworth, 1986, Lorig & Brady, 1982)
- 개별균열연결망(DFN)과의 연동해석(e.g. Beck et al., 2009, Pine et al., 2006, Rogers et al., 2010)
- 수리-역학 커플링 해석(Beck et al., 2010), 열-수리-역학 커플링 해석(Detournay, 1995, Hudson et al., 2001, Stephansson et al., 1996)
- 역해석(back-analaysis)에서 사용되는 역산법(inverse solution method): 7.6절 참조

암반공학 문제에서 수치해석의 성공적인 적용 여부는 얼마나 적절한 지질공학적 모델과 구성모델, 그리고 경계조건을 선택하느냐에 달려있다. 또한 다른 재료와 달리 암석이나 암반은 입력변수를 결정하기 쉽지 않기 때문에 통계적, 확률론적 접근법이나 민감도 분석을 필요로 하는 경우도 종종 있다. Starfiled & Cundall(1988)이 지적한 바와 같이, 암반공학 문제는 입력자료를 선정하는 데에서부터 제약이 따르므로 대상체의 역학적 특성을 완전히 모사하는 것은 거의 불가능하다고 할 수 있다.

설계 분석 도구로서의 수치모델링 기법은 지속적으로 개발되어 왔고, 현재 매우 높은 수준에 도달하였다. 그러나 필자의 경험에 의하면, 실제 설계업무에서 수치해석과 관련된 컴퓨터 코드는 마치 블랙박스처럼 간주되는 경우가 종종 있다. 즉, 코드가 작동하는 메커니즘이나 입력자료의 선정, 해석의 원리, 획득한 결과의 공학적 의미 등에 대해 충분한 주의를 기울이지 않고, 소프트웨어의 기능을 사용하는 데만 능숙한 경우가 많다.

20년전 Starfield & Cundall(1988)의 가이드라인에서 제시된 바와 같이, 암반공학 과학기술자들은 수치해석의 목적이 생각 자체를 대신하는 것이 아니라 판단을 돕는 데에 있다는 것을 늘 상기하여야 할 것이다.

7.5 굴착 및 지보

7.5.1 굴착

지난 50년간 암반 내 굴착과 관련된 메커니즘의 이해, 기술 및 장비의 개발 등에 있어 현저한 발전이 이루어져 왔다. 굴착 방법은 크게 발파굴착(drilling & blasting)과 기계식굴착으로 나눌 수 있는데, 1950년대와 1960년대에는 충격식 착암(percussive drilling)과 발파에 의한 파쇄, 암석 절단의 메커니즘 등이 주요 연구 대상이었다. 이에 따라 암석동역학(rock dynamics)으로 분류된 세션이 암반공학 심포지엄과 컨퍼런스에 포함되기 시작하였다(e.g. Fairhurst 1963). 이 분야와 관련된 여러 주제들이 암반공학의 새로운 연구 주제로 떠올랐고, 많은 전문가 집단 및 학회가 생겨났다. 1850년대에서 1980년대까지 이루어진 암반굴착 관련 기술발전의 과정은 West(1988)의 책에 상세히 소개되어 있다.

발파굴착(drilling & blasting)과 관련해서는 주로 스웨덴을 중심으로 연구와 기술 개발이 이루어져 왔으며, 그 주제를 간략히 소개하면 다음과 같다.

- 전자 장비를 통한 통합 천공시스템, 천공패턴 설계와 천공자동화 및 천공 중 계측(measurement while drilling, MWD)을 위한 소프트웨어의 개발(Schunnesson, 2009)
- 대구경 발파공 천공법, 발파공법의 개발 및 개선, 전자기폭장치의 개발
- 발파작업 개선을 위한 계측, 모니터링 시스템(McKenzie, 1987)
- 환경영향평가를 위한 발파진동 계측(Dowding, 1985)
- 천공 및 발파 과정에 대한 실험적, 수치해석적 연구(Furtney et al., 2009, Minchinton & Dare-Bryan, 2005, Ouchterlony & Moser, 2006)

위와 같은 내용을 바탕으로 Hustrulid(2010)는 경암 광산에서의 발파설계에 대한 실무집을 발표하였고, Wlliams et al.(2009)는 대규모 노천 광산에서의 제어발파를 포함한 발파 실무 가이드라인을 발표한 바 있다.

기계식굴착과 관련해서는 연암층의 광산터널이나 토목터널의 굴착을 위한 다양한 장비들이 개발되어 왔으나, 경암 지반에 대해서는 아직 적용성이 높지 않은 편이다. TBM(tunnel boring machine)은 19세기 중반에 개발되기 시작하였지만, 1950년대에 이르러서야 경암 지반에서 성공적으로 적용할 수 있게 되었다. 현재까지 개발된 가장 큰 TBM의 직경은 15m이며, 경암을 포함한 다양한 지층 조건에서 적용이 가능하다(Zhao & Gong, 2006).

TBM 장비의 선택 및 성능 평가는 암반공학적 자료와 기법에 근거하여 실행되고 있으며(Barton, 2000, Gong & Zhao, 2009, Rojek et al., 2010, Zhao & Gong, 2006), 기계식굴착과 발파굴착에 관련된 기술 개발, 효율성 증진, 제어 및 자동화 등에 대한 각종 연구가 다각도로 진행되고 있다.

7.5.2 지보 및 보강

Windsor & Thompson(1993)은 지보(support)와 보강(reinforcement)이 통상 동일한 의미로 사용되었지만, 앞으로는 두 용어가 명확히 구분되어야 할 것이라고 하였다. 지보가 굴착면에 대해 반력을 적용하는 개념이라면, 보강은 록볼트나 케이블볼트 등을 사용해 암반의 전체적인 물성을 증진시키는 개념이다. 암반 내 지하공동의 굴착에 있어서 지보 및 보강과 관련된 가장 기본적인 개념은 암반-지보재 상호작용(ground-support interaction)으로서 Austrian School(Pacher, 1964, Rabcewicz, 1969)에서 처음 개발되었다. 이후, 10대 ISRM 회장이었던 Marc Panet에 의해서 변형-구속법(convergence-confinement method)로 확장되었고, 다양한 조건의 지반 및 지보재에 대한 지반응답 곡선을 위한 수학해(closed form solution)와 수치해(numerical solution)가 개발되었다. 수치해석 코드에 이러한 암반-지보재 상호 개념을 적용하는 등 많은 노력이 있어 왔으나(e.g. Itasca, 2011), 지보재 거동의 수치해석적 모델링은 아직 해결해야 할 많은 과제를 안고 있다(Jing, 2003).

지보재 및 보강재의 개발 분야에서도 지속적인 발전이 이어져 왔다. 예를 들면 취성 암반의 거동을 고려한 록볼트(Falmagne & Simser, 2004, Ortlepp 2007), 광산 현장용 케이블 볼트(Hutchinson & Diederichs, 1996, Windsor, 2004), 광섬유 보강 숏크리트 및 습식 숏크리트(Bernard, 2010) 등 새로운 지보, 보강재를 개발하려는 노력이 계속되었고, 록볼트, 케이블볼트, 그라운트 앵커의 부식(Windsor, 2004), 지보 및 보강재의 정적, 동적 실험(Player et al. 2008), 록볼트, 케이블볼트의 부식 과정 등에 대한 연구(Villaescusa et al. 2008)도 활발히 수행되었다. 또한 기존의 경험적 방법들을 대체 또는 개선하기 위한 다양한 지보 및 보강 설계법이 개발되고 있다(e.g. Barrett & McCreath, 1995, Barton et al., 1994, Hoek et al., 2008, Hutchinson & Diederichs, 1995, Pells, 2002).

7.6 계측 및 역해석

지하 구조물의 거동에 대한 계측은 ISRM 설립 이전에도 많은 광산터널과 토목터널의 굴착 현장에서 이루어지고 있었으며, 계측에 의한 설계(observational method)가 현장 실무에 있어 매우 중요한 부분으로 인식되고 있다. 일찍이 역학적, 광학적 방법에 의해서 계측이 이루어져 왔으나, 점차 전기, 전자광학, 전자학적인 기술들이 개발되어 적용되고 있다(e.g. Brady & Brown, 2004, Dunnicliff, 1988, Franklin & Denton, 1973, Kovari et al., 1979, Windsor, 1993). 노천 광산에서의 사면유동을 계측하기 위해서 GPS, 사진측량, 레어저 스캐닝(LiDAR), 레이터 및 인공위성 영상 기술과 시스템 등 첨단 기술이 사용되고 있다(Girard & McHugh, 2001, Hawley et al., 2009, Herrera et al., 2010, Sakurai et al., 2009).

컴퓨터와 디지털 기술이 발달함에 따라서 계측과 관련된 데이터 획득, 저장, 처리, 관리, 해석의 과정이 온라인 상에서 이루어지고 있다(Gilby & Socol, 2010, Kimmance, 1999). Figure 7은 데이터 운용과 계측 시스템을 개략적으로 보여주는 그림이다.

현대의 계측 프로세스는 잘 정비된 전문적 의사결정 과정과 리스크 관리 시스템의 구축을 가능하고 있다(e.g. Akutagawa, 2010, Dewynter et al., 2010, Hawley et al., 2009, Schubert, 2006). 사실, 계측의 목적과 원리는 개념적으로 현대와 과거가 크게 다르지 않지만, 프로세스 자체는 급진적으로 발전했다고 할 수 있다(e.g. Franklin, 1977, Kovari & Amstad, 1993).

7대 ISRM 회장을 역임한 John Franklin 박사는 계측의 기본적인 목적 중 하나가 설계 단계에서 가정된 개념모델과 암반 물성의 타당성을 점검하는 데에 있다고 하였다. 현재까지 이 과정에서 시행착오법(trial & error)과 탄성이론에 의한 정해석(forward analysis)를 이용한 curve fitting이 주로 이용되어 왔으나, 1970년대 말과 1980년대 초에 이르게 되면서 역해석(backward analysis)이 새로운 대안으로 주목받기 시작하였다. 역해석에는 기본적으로 두 가지 접근법이 있는데 하나는 역산법(inverse method)이며 다른 하나는 identification 또는 calibration method(Gioda, 1980)이다. 암반공학 문제에 역산법을 가장 먼저 사용한 학자는 Kirsten(1976)으로서 사면에서 계측된 변위와 FEM을 통해 계산된 변위를 이용하여 암반의 탄성정수를 구한 바 있다.

9대 ISRM 회장인 Shunsuke Sakurai 교수는 역해석 분야의 발전 과정과 밀접한 관련이 있는 인물로서(Sakurai & Takeuchi, 1983, Sakurai & Akutagawa, 1995, Sakurai et al., 2009), 역해석의 적용범위를 초기의 2차원 선형 탄성 문제에서 3차원 비선형-탄소성 문제로 확장하였다. 이후, 비선형 방정식을 해결하기 위한 다양한 연구들이 지속적으로 수행되었다(Feng et al., 2004, Gioda & Sakurai, 1987, Sakurai, 1993).

Sakurai 교수는 사실, 역해석보다는 암반굴착 시 계측의 중요성을 더욱 강조하였다. 그는 측정된 변위로부터 터널의 안정성을 평가하기 위한 한계(critical) 수직변형률 및 전단변형률 개념을 제안하였을 뿐만 아니라, 터널의 hazard warning level을 제시하기도 하였다(Sakurai, 1997, Sakurai, 1999). 이후 Hoek(2001)도 정규화된 터널 내공변위를 통해 유사한 연구를 진행한 바 있다.

7.7 암반공학의 응용

앞서 4장과 7장에서 각각 ISRM 설립 전후의 암반공

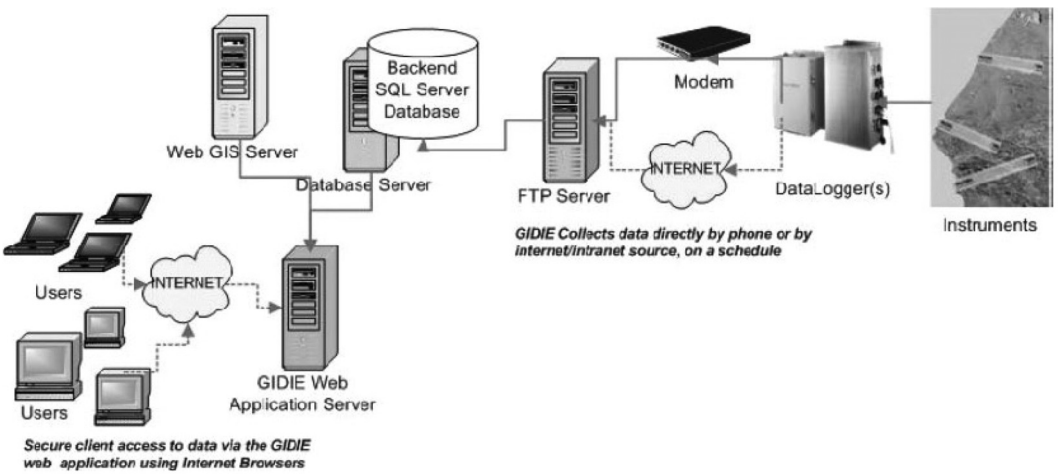

Fig. 7. Geotechnical instrumentation data interpretation and evaluation (GIDE) system components (Gilby & Socol 2010).

학 발전의 역사를 개략적으로 살펴보았다. 이를 돌이켜 보면 암반공학은 토목공학, 광산공학, 석유공학, 에너지 자원공학 등 지구자원공학 전 분야에 지대한 공헌을 해 왔음을 알 수 있다(Fairhurst, 2001).

토목공학 분야에서 암반을 대상으로 하는 프로젝트들의 비용, 규모 그리고 환경적 영향력은 점점 증가하고 있다(Feng & Hudson, 2004). 62 m 스팬의 노르웨이 Gjøvik 올림픽 하키 경기장(Barton et al. 1994), 세계 최대의 저토피 지하구조물인 호주 시드니의 오페라 하우스(Pells, 2002, Pells et al., 1991), 중국의 Three Gorges Dam 프로젝트(Feng & Hudson, 2004, Liu et al., 2003a, Liu et al., 2003b) 등이 그 좋은 예라 할 수 있다. 뿐만 아니라 Lötschberg과 Gotthard 터널 등과 같은 알프스의 장대터널은 단층 파쇄대, 취성, 압착성, 대심도 고지압 등의 문제를 갖는 복합적인 암반에서도 성공적으로 건설되었다(Hagedorn et al., 2007, Rojat et al., 2008).

광산공학 분야에서는 대규모 노천광산에서 생산성 및 효율성 증진을 위한 사면설계에 암반공학이 널리 활용되고 있다(Hoek & Bray, 1974, Read & Stacey, 2009). 갱내 채광의 경우, 남아프리카공화국의 대심도 고지압의 취성 암반에서 대규모 채광이 이루어지면서 암석역학이 널리 적용되었고, 이 과정에서 괄목할 만한 발전과 성과를 이루어 내었다(Cook et al., 1966, Ryder & Jager, 2002). 충전식 채광법(cut-and-fill stoping)에서 계단식 채광법(bench stoping)까지 다양한 방법이 개발되고 현장에 적용되었다(Brady & Brown, 2004, Villaescusa, 1996, Villaescusa, 2008). 지난 20년 간 있었던 가장 중요한 업적은 생산성과 경제성이 높은 중단붕락법(sub-level caving method)와 광획붕락법(block or panel caving method)이 활발히 적용되기 시작한 것으로, 대심도 경암에서 대량 생산이 가능하게 되었다는 점이다. 최근에는 그 채굴과정이 수치모델링을 통해 잘 모사되기도 하였다(Sainsbury et al., 2011). 한편 중국에서도 대규모 석탄 광산의 생산성을 제고하기 위한 다양한 채굴법이 개발, 소개되고 있다(Alehossein & Paulsen 2010, Vakili & Hebblewhite 2011).

1970년대 이후, 석유공학 분야에서도 암반공학의 필요성은 점차 증가하였다(Roegiers 1999). 더 깊고 복잡한 지층에서 가스 및 석유의 생산이 이루어짐에 따라 지질학적 모델 및 균열망 모델 등 암반공학적 요소가 중요한 설계변수가 되었다. 석유공학 분야에서는 개별균열 연결망(DFN) 모델, 단층촬영 등의 지질공학적 기술, 시추공의 안정성 문제, 현지 응력 측정, 회수율 증진을 위한 수압파쇄, 열-수리-역학 커플링 해석, 다공성매질의 역학, 스마트 드릴링, 비재래 유전개발, 저류층 공학 등 다양한 이론 및 기술이 활용되고 있다(Detournay, 1995, Fjaer et al., 2008, Roegiers, 1999, Schutjens, 2009).

앞서 언급한 분야 이외에도 지열에너지의 개발(Thorsteinsson et al. 2008), 석유 및 가스의 지중저장(You et al. 2006), 원자력 폐기물의(Fairhurst 2004, Hudson 2010, Hudson et al. 2001), 고체, 액체 폐기물의 지층매립(Dusseault 2010) 등의 다양한 에너지자원개발 관련 분야에서 암반공학의 역할이 증대되고 있다.

8. 결 언

1962년 국제암반역학회(ISRM)가 설립된 이래 ISRM과 암반공학의 역사를 뒤돌아보면서, 짧은 기간 동안 실로 엄청난 발전을 이루었음을 확인할 수 있었다. 암반공학의 활용 범위가 넓어지면서 새로운 개념과 이론들이 등장하였고, 컴퓨터와 정보통신 기술의 발달과 함께 데이터 처리, 분석을 위한 혁신적인 장비와 기술들이 개발되었다. 또한 ISRM은 설립 이래 여러 가지 활동을 성실하고 효율적으로 수행함으로써 학회의 설립 목표와 취지를 성공적이고 지켜 왔으며, 국제 암반공학의 발전에 이바지하여 왔다. 암반공학의 원리와 해석방법은 광산공학, 토목공학, 지질공학, 석유공학 등 다양한 전문분야에 활용되고 있으며, 그 역할도 날로 증가하는 추세이다. 지난 50년의 발자취를 돌아본 현 시점에서, 앞으로 다가올 미래에도 암반공학이 시대적 요구에 부응할 수 있는 도전적이고 창의적인 학문으로 거듭날 수 있기를 기대해 본다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 “고심도 지하연구실험실 구축 및 실증실험연구”과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Akutagawa, S. 2010. On site visualisation as a new paradigm for field measurement in rock engineering. In K. G. Sharma, T. Ramamurthy, V. K. Kanjlia & A. C. Gupta (eds), *Advances in Rock Engineering*, *Proc. ISRM Int. Symp. 2010 & 6th Asian Rock Mech. Symp*., New Delhi, 23–27 October, KN 34-KN 45. New Delhi: Central Board of Irrigation & Power.
2. Alehossein, H. & Paulsen, B. A. 2010. Stress analysis of longwall top caving. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47(1): 30-41.
3. Alexander, L. G. 1960. Field and laboratory tests in rock

mechanics.
4. *Proc. 3rd Australia-New Zealand Conf. Soil Mechanics & Foundation Engineering*, Sydney, 161-168. Sydney: Institution of Engineers, Australia.
5. Amadei, B. & Stephansson, O. 1997. *Rock Stress and its Measurement*, 512 p. Dordrecht: Kluwer.
6. Anon, 1963. *Proceedings, Rock Mechanics Symposium*, McGill University, Montreal, 7-8 September, 1962, p. 218. Ottawa: Mines Branch, Department of Mines & Technical Surveys.
7. Appleton, E. 1944. Scientific research: fundamentals of its application to rock mechanics. *South African Mining & Engineering Journal*, 55(1): 519-520.
8. Atkinson, B. K. (ed.) 1987. *Fracture Mechanics of Rock*, p. 534. London: Academic Press.
9. Barla, G., Barla, M., Camusso, M. & Martinotti, M. E. 2007. Setting up a new direct shear testing apparatus. In L. Ribeiro e Sousa, C. Olalla & N. F. Grossmann (eds), *Proc. 11th Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, 9-13 July, 1: 415-418. Leiden: Taylor & Francis.
10. Barrett, S. V. L. & McCreath, D. R. 1995. Shotcrete support design in blocky ground: towards a deterministic approach. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 10(1): 79-89.
11. Barton, N. 2000. *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*, p. 172. Rotterdam: Balkema.
12. Barton, N., 2006. *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*, p. 729. London: Taylor & Francis.
13. Barton, N. & Bandis, S. C. 1990. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In N. R. Barton & O. Stephansson (eds), *Rock Joints, Proc. Int. Symp. on Rock Joints*, Loen, 4-6 June, 603-610. Rotterdam: Balkema.
14. Barton, N., By, T. L., Chryssanthakis, P., Tunbridge, L., Kristiansen, J., Løset, F., Bhasin, R. K., Westerdahl, H. & Vick, G. 1994. Predicted and measured performance of the 62 m span Norwegian
15. Olympic Ice Hockey Cavern at Gjøvik. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 31(6): 617-641.
16. Barton, N. & de Quadros, E. F. 1997. Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses. In K. Kim (ed.), *Linking Science to Rock Engineering, Proc. 36th U.S. Rock Mech. Symp. & ISRM Int. Symp.,* New York, 29 June-2 July, 2: 907-916. NewYork: Columbia University.
17. Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4): 189-236.
18. Beck, D. A., Fillery, B. & Reusch, F. 2010. 3d hydro-mechanical simulation of faulted open pit slopes. *Proc. 44th U.S. Rock Mech.*
19. *Symp. & 5th U. S.-Canada Rock Mech. Symp*., Salt Lake City, 27-30 June, Paper ARMA-425, p. 6. (on CD-ROM).
20. Beck, D. A., Pfitzner, M. J., Arndt, S. M. & Fillery, B. 2009. Estimating rock mass properties and seismic response using higher order, discontinuous, Finite Element models. In M. Diederichs & G. Grasselli (eds), *Rock Engineering in Difficult Conditions, Proc. 3rd Canada-U.S. Rock Mech. Symp. & 20th Canadian Rock Mech. Symp.*, Toronto, 9-15 May, p. 12. (on CD-ROM).
21. Beer, G. (ed.) 2010. *Technology Innovation in Underground Construction*, p. 504. Leiden: CRC Press/Balkema.
22. Beer, G. & Watson, J. O. 1992. *Introduction to Finite and Boundary Element Methods for Engineers*, p. 509. Chichester: JohnWiley.
23. Bernaix, J. 1969. Newlaboratory methods of studying the mechanical properties of rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 6(1): 43-90.
24. Bernard, S. (ed.) 2010. *Shotcrete: Elements of a System, Proc. 3rd Int. Conf. on Engineering Developments in Shotcrete*, Queenstown, 15-17 March, p. 310. Leiden: CRC Press/Balkema.
25. Bieniawski, Z. T. 1976. Rock mass classifications in rock engineering. In Z. T. Bieniawski (ed.), *Proc. Symp. on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg, 1-5 November, 1: 97-106. Cape Town: Balkema.
26. Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*, p. 251. NewYork: JohnWiley.
27. Billaux, D., Chiles, J. P., Hestir, K. & Long, J. 1989. Three dimensional statistical modelling of a fractured rock mass - an example from the Fanay-Augères Mine. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 26(3-4): 281-299.
28. Blanks, R. F. & McHenry, D. 1945. Large triaxial testing machine built by Bureau of Reclamation. *Engineering News Record*, 135(6): 171-172.
29. Brady, B. H. G. 1979. A direct formulation of the boundary element method of stress analysis for complete plane strain. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 16(4): 235-244.
30. Brady, B. H. G. 1987. Boundary element and linked methods for underground excavation design. In E. T. Brown (ed.), *Analytical & Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*, 164-204. London: Allen & Unwin.
31. Brady, B. H. G. & Brown, E. T. 2004. *Rock Mechanics for Underground Mining*, 3rd edn, p. 628. Dordrecht: Kluwer.
32. Brown, E. T. (ed.) 1981. *Rock Characterization, Testing and Monitoring - ISRM Suggested Methods*, p. 211. Oxford: Pergamon Press.
33. Brown, E. T. 1999. Rock mechanics and the Snowy Mountains Scheme. In *The Spirit of the Snowy Fifty Years On, Proc. 1999 Invitation Symp., Australian Academy of Technological Sciences & Engineering*, Cooma, 23-24 November, 89-101. Melbourne: Australian Academy of Technological Sciences & Engineering.
34. Brown, E. T. 2002. Rock mechanics in Australia. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39(5): 529-538.
35. Brown, E. T. 2007a. *Block Caving Geomechanics*, 2nd

edn, p. 696.
36. Brisbane: JKMRC.
37. Brown, E. T. 2007b. Rock mechanics - the basic mining science: challenges in underground mass mining. In L. Ribeiro e Sousa, C. Olalla & N. F. Grossmann (eds), *Proc. 11th Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, 9-13 July, 3: 1335-1347. Leiden: Taylor & Francis.
38. Brown, E. T. 2008. Estimating the mechanical properties of rock masses. InY. Potvin, J. Carter, A. Dyskin & R. Jeffrey (eds), *Proc. 1st Southern Hemisphere Int. Rock Mech. Symp.*, Perth, 16-19 September, 1: 3-22. Perth: Australian Centre for Geomechanics.
39. Brown, P. D. & Robertshaw, J. 1953. The in-situ measurement of Young's Modulus for rock by a dynamic method. *Géotechnique*, 3(7): 283-286.
40. Bryan, A., Bryan, J. G. & Fouché, J. 1964. Some problems of strata control and support in pillar workings. *The Mining Engineer*, 123(41): 238-266. Carranza-Torres, C. & Fairhurst, C. 1999. The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 36(6): 777-809.
41. Chen, Y., Liu, Y., Zhang, M. & Chen, R. 1986. A preliminary study of in-situ stress field in the Three-Gorge Dam area. *Proc. Int. Symp. on Engineering in Complex Rock Formations*, Beijing, 3-7 November, 149-162. Beijing: Science Press.
42. Chitombo, G. P. 2010. Cave mining - 16 years after Laubscher's 1994 paper "cave mining - state of the art". In Y. Potvin (ed.), *Caving 2010, Proc. 2nd Int. Symp. on Block & Sublevel Caving*, Perth, 20-22 April, 45-61. Perth: Australian Centre for Geomechanics.
43. Clough, R. W. 1960. The finite element method in plane stress analysis. *Proc. 2nd ASCE Conf. on Electronic Computation*, Pittsburgh, September, 345-378.
44. Cook, N. G. W. 1965. The failure of rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2(4): 389-403.
45. Cook, N. G. W., Hoek, E., Pretorius, J. P. G., Ortlepp, W. D. & Salamon, M. D. G. 1966. Rock mechanics applied to the study of rockbursts. *Journal, South African Institute of Mining & Metallurgy*, 66(10): 436-528.
46. Coulomb, C. A. 1776. Essai sur une application des régles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatives à l'architecture. *Mémoires de Mathématique et de Physique, l'Académie Royale des Sciences*, 7: 343-382.
47. Crouch, S. L. & Starfield, A. M. 1983. *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*, p. 322. London: Allen & Unwin.
48. Cundall, P. A. 1971. A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. In *Rock Fracture, Proc. Int. Symp. Rock Mech*., Nancy, 4-6 October, 1: Paper II-8.
49. Cundall, P. A. 1987. Distinct element models of rock and soil structure. In E. T. Brown (ed.), *Analytical & Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*, 129-163. London: Allen & Unwin.
50. Cundall, P. A. 2011. Lattice method for modelling brittle, jointed rock. In D. P. Sainsbury, R. D. Hart, C. L. Detournay & M. J. Nelson (eds), *Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics - 2011, Proc. 2nd Int. FLAC/DEM Symp.*, Melbourne, 14-16 February, 11-19. Minneapolis: Itasca International Inc.
51. Cundall, P. A. & Damjanac, B. 2009. A comprehensive 3D model for rock slopes based on micromechanics. In *Slope Stability 2009, Proc. 3rd Int. Symp. on Rock Slope Stability*, Santiago, 9-11 November, p. 10 (on CD-ROM).
52. Daemen, J. J. K. 1977. Problems in tunnel support mechanics. *Underground Space*, 1(3): 163-172.
53. Dershowitz, W. 1995. Interpretation and synthesis of discrete fracture orientation, size, shape, spatial structure and hydrologic data by forward modelling. In L. R. Myer, N. G. W. Cook, R. E. Goodman & C-F. Tsang (eds), *Proc. Conf. on Fractured&Jointed Rock Masses*, Lake Tahoe, 3-5 June 1992, 579-586. Rotterdam: Balkema.
54. Dershowitz, W. S. & Einstein, H. H. 1984. Applications of artificial intelligence to problems of rock mechanics. In C. H. Dowding & M. M. Singh (eds), *Rock Mechanics in Productivity & Protection, Proc. 25th U.S. Symp. Rock Mech*., Evanston, 25-27 June, 483 - 494. NewYork: A.I.M.E.
55. Dershowitz, W. S. & Einstein, H. H. 1988. Characterizing rock joint geometry with joint system models. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 21(1): 21-51.
56. Desseault, M. B. 2010. Deep injection disposal: environmental and petroleum geomechanics. In K. G. Sharma, T. Ramamurthy, V. K. Kanjlia & A. C. Gupta (eds), *Advances in Rock Engineering*, *Proc. ISRM Int. Symp. 2010 & 6th Asian Rock Mech. Symp*., New Delhi, 23-27 October, KN 21-KN 33. New Delhi: Central Board of Irrigation & Power.
57. Detournay, C. & Hart, R. (eds) 1999. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, *Proc. Int. FLAC Symp*., Minneapolis, 1-3 September, p. 528. Rotterdam: Balkema.
58. Detournay, E. 1995. Coupled thermo-hydro-mechanical processes in rock mechanics, with applications to the petroleum industry. In T. Fujii (ed.), *Proc. 8th Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Tokyo, 25-29 September, 3: 1061-1068. Rotterdam: Balkema.
59. Dewynter, V., Magne, S., Rougeault, S., Ferdinand, P., Vallon, F., Avallone, L., Vacher, E., de Broissia, M., Canepa, C. & Poulain, A. 2009. Optical fiber sensing cable for underground settlement.
60. monitoring during tunnelling. In G. Beer (ed.), *Technology Innovation in Underground Construction*, 163-188. Leiden: CRC Press/Balkema.
61. Diederichs, M. S. & Kaiser, P. K. 1999. Stability of large excavations in laminated hard rock masses: the voussoir analogue revisited. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 36(1): 97-117.
62. Dowding, C. H. 1985. *BlastVibration Monitoring and Control*, p. 297. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
63. Dunnicliff, J. 1988. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, p. 577. NewYork: JohnWiley.

64. Elsworth, D. 1986. A hybrid boundary element-finite element analysis procedure for fluid flow simulation in fractured rock masses. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 10(6): 569-584.
65. Elsworth, D. & Mase, C. R. 1993. Groundwater in rock engineering. In J. A. Hudson, E. T. Brown, C. Fairhurst & E. Hoek (eds), *Comprehensive Rock Engineering*, 1: 201-226. Oxford: Pergamon Press.
66. Evison, F. F. 1953.The seismic determination of Young's modulus and Poisson's ratio for rocks in situ. *Géotechnique*, 6(3): 118-123.
67. Fairhurst, C. (ed.) 1963. *Proceedings, Fifth Symposium on Rock Mechanics*, University of Minnesota, Minneapolis, May 1962, p. 726. Oxford: Pergamon Press.
68. Fairhurst, C. 2003. Stress estimation in rock: a brief history and review. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40(7-8): 957-973.
69. Fairhurst, C. 2004. Nuclear waste disposal and rock mechanics: contributions of the Underground Research Laboratory (URL), Pinawa, Manitoba, Canada. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41(8): 1221-1227.
70. Fairhurst, C. 2010. First Vienna-Leopold-Müller Lecture: What is the strength of a rock mass? Progress in answering Müller's (implicit) question. *Proc. 5th Colloquium, Rock Mechanics - Theory & Practice,* Vienna, 26-27 November 2009, *Mitteilungenfür Ingenieurgeologie und Geomechanik,* Band 9: 87-110.
71. Fairhurst, C. 2011. Grand challenges in Earth Resources Engineering - and some implications for rock mechanics and rock engineering. In D. P. Sainsbury, R. D. Hart, C. L. Detournay & M. J. Nelson (eds), *Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics - 2011, Proc. 2nd Int. FLAC/DEM Symp.*, Melbourne, 14-16 February, 3-10. Minneapolis: Itasca International Inc.
72. Falmagne, V. & Simser, B. P. 2004. Performance of rockburst support systems in Canadian mines. In E. Villaescusa & Y. Potvin (eds), *Ground Support in Mining & Underground Construction, Proc. 5th Int. Symp. on Ground Support*, Perth, 28-30 September, 313-318. Leiden: Balkema.
73. Feng, X-T. & An, H. 2004. Hybrid intelligent method optimization of a soft rock replacement scheme for a large cavern excavated in alternate hard and soft rock strata. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41(4): 655-667.
74. Feng, X-T. & Hudson, J. A. 2004. The ways ahead for rock engineering design methodologies. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41(2): 255-273.
75. Feng, X-T. & Hudson, J. A. 2010. Specifying the information required for rock mechanics modelling and rock engineering design. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47(2): 179-194.
76. Feng, X-T. & Hudson, J. A. 2011. *Rock Engineering Design*, p. 464. Leiden: CRC Pres/Balkema.
77. Feng, X-T., Zhao, H. & Li, S. 2004. Anewdisplacement back analysis to identify mechanical geo-material parameters using integrated intelligent methodology. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 28(11): 1141-1165.
78. Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, P., Raaen, A. M. & Risnes, R. 2008. *Petroleum Related Rock Mechanics*, 2nd edn, p. 514. Amsterdam: Elsevier.
79. Franklin, J. A. 1977. Monitoring of structures in rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 14(4): 163-192.
80. Franklin, J. A. & Denton, P. E. 1973. The monitoring of rock slopes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 6(3-4): 259-286.
81. Furtney, J. K., Cundall, P. A. & Chitombo, G. P. 2009. Developments in numerical modeling of blast induced fragmentation: updates from the HSBM project. In J. A. Sanchidrián (ed.), *Rock Fragmentation by Blasting - FragBlast 9, Proc. 9th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, Granada, 13-17 September, 335-342. Leiden: CRC Press/Balkema.
82. Gaich, A., Potsch, M. & Schubert, W. 2007. Rock mass characterization for tunneling and mining using 3D images. In L. Ribeiroe Sousa, C. Olalla & N. F. Grossmann (eds), *Proc. 11th Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, 9-13 July, 2: 1019-1024. Leiden: Taylor & Francis.
83. Galvin, J. M., Hebblewhite, B. K. & Salamon, M. D. G. 1999. University of New South Wales pillar strength determinations for Australian and South African mining conditions. In C. Mark,
84. K. A. Heasley, A. T. Iannocchione & R. J. Tuchman (eds), *Proc. 2nd Int. Workshop on Coal Pillar Mechanics & Design*, Vail, 6 June, NIOSH IC 9448, 63-71. Pittsburgh: U.S. Department of Health & Human Services.
85. Gilby, J. & Socol, M. 2010. Geotechnical instrumentation data management. In K. G. Sharma, T. Ramamurthy, V. K. Kanjlia & A. C. Gupta (eds), *Advances in Rock Engineering, Proc. ISRM Int. Symp. 2010 & 6th Asian Rock Mech. Symp.*, New Delhi, 23-27 October, Paper 124, p. 7. (on CD-ROM). New Delhi: Central Board of Irrigation & Power.
86. Gioda, G. 1980. Indirect identification of the average elastic characteristics of rock masses. In P. J. N. Pells (ed.), *Structural Foundations on Rock, Proc. Int. Symp.*, Sydney, 7-9 May, 65-73. Rotterdam: Balkema.
87. Gioda, G. & Sakurai, S. 1987. Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics. *International*
88. *Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 11(6): 555-583. Girard, J. M. & McHugh, E. L. 2001. Emerging technologies and the future of geotechnical instrumentation. In D. Elsworth, J. P. Tinucci & K. A. Heasley (eds), *Rock Mechanics in the National Interest, Proc. 38th U.S. Symp. Rock Mech.*, Washington D. C., 5-7 July, 1: 445-450. Lisse: Balkema.
89. Golder, H. Q. & Akroyd, T. N. W. 1954. An apparatus

for triaxialcompression tests at high pressures. *Géotechnique*, 4(4): 131-136.
90. Gong, Q. M. & Zhao, J. 2009. Development of rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46(1): 8-18.
91. Goodman, R. E. 1966. On the distribution of stresses around circular tunnels in non-homogeneous rocks. *Proc. 1st Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, 25 September - 1 October, 2: 249-255. Lisbon: LNEC.
92. Goodman, R. E. 1989. *Introduction to Rock Mechanics*, 2nd edn, p. 562. NewYork: JohnWiley.
93. Goodman, R. E. & Shi, G-H. 1985. *Block Theory and its Application to Rock Engineering*, p. 338. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
94. Goodman, R. E., Taylor, R. L. & Brekke, T. L. 1968. A model for the mechanics of jointed rock. *Journal, Soil Mechanics&Foundations Division*, *A.S.C.E.*, 94 (SM3): 637-659.
95. Grasselli, G. & Egger, P. 2003. Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40(1): 25-40.
96. Griggs, D. T. 1936. Deformation of rocks under high confining pressures. *Journal of Geology*, 44: 541-577.
97. Grobler, H. P., Poropat, G. & Guest, A. R. 2003. Photogrammetry for structural mapping in mining. *Technology Roadmap for Rock Mechanics, Proc. 10th Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Johannesburg, 8-12 September, 1: 431-436. Johannesburg: Southern African Institute of Mining & Metallurgy.
98. Habib, P. 1950. Détermination du module d'élasticité des roches enplace. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, No. 145, September: 27-35.
99. Habib, P. & Marchand, R. 1952. Mesures des pressions de terrains par l'essai de vérin plat. *Suppléments aux Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Série Sols et Foundations*, No. 58, October: 967-971.
100. Hagedorn, H., Rehbock-Sander, M. & Stadelmann, R. 2007. Gotthard Base tunnel: rock burst phenomenon during construction of a multifunctional section in a fault zone area. In L. Ribeiroe Sousa, C. Olalla & N. F. Grossmann (eds), *Proc. 11th Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, 9-13 July, 2: 917-920. Leiden: Taylor & Francis.
101. Handin, J. 1953. An application of high pressure geophysics: experimental rock mechanics. *Transactions, American Society of Mechanical Engineers*, 75: 315-324.
102. Hart, R. D., Detournay, C. L. & Cundall, P. A. (eds), 2008. *Continuum and Distinct Element Modeling in Geo-Engineering, Proc. 1st FLAC/DEM Symp.*, Minneapolis, 25-27 August, p. 698. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc.
103. Hast, N. 1958. The measurement of rock pressure in mines. *Sveriges Geologiska Undersokning*, Series C, 52(3).
104. Hawley, M., Marisett, S., Beale, G. & Stacey, P. 2009. Performance assessment and monitoring. In J. Read & P. Stacey (eds), *Guidelines for Open Pit Slope Design*, 327-379. Melbourne: CSIRO Publishing.
105. Hedley, D. G. F. & Grant, F. 1972. Stope and pillar design at the Elliot Lake uranium mines. *Canadian Institute of Mining & Metallurgy Bulletin*, 65(723): 37-44.
106. Herrera, G., Tomás, R., Vicente, F., Lopez-Sanchez, J. M., Mallorquí, J. J. & Mulas, J. 2010. Mapping ground movements in open pit mining areas using differential SAR interferometry. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47(7): 1114-1125.
107. Heyman, J. 1972. *Coulomb's Memoir on Statics*, p. 212. Cambridge: Cambridge University Press.
108. Hill, F. G. 1954. An investigation of the problem of rockbursts; an operational research project. Part I. The approach to the problem and analyses of the rockbursts that have occurred on the ERPM during the years 1948-1953. *Journal, Chemical, Metallurgical & Mining Society of South Africa*, 55(October): 63-83.
109. Hill, F. G. 1966. Preface to "Rock Mechanics applied to the study of rockbursts". *Journal, South African Institute of Mining & Metallurgy*, 66(10): 435.
110. Hoek, E. 1963. Experimental study of rock-stress problems in deep level mining. *Experimental Mechanics*, 3: 177-194.
111. Hoek, E. 1964. Fracture of anisotropic rock. *Journal, South African Institute of Mining & Metallurgy*, 64(10): 501-518.
112. Hoek, E. 1994. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2(2): 4-16.
113. Hoek, E. 2001. Big tunnels in bad rock. The 36th Karl Terzaghi Lecture. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, A.S.C.E.*, 127(9): 726-740.
114. Hoek, E. 2007. The development of rock engineering. In *Practical Rock Engineering*. Available at http://Rocscience.com/hoek/pdf/1_The_development_of_rock_engineering.pdf.
115. Hoek, E. & Bray, J. W. 1974. *Rock Slope Engineering*, p. 309. London: Institution of Mining & Metallurgy.
116. Hoek, E. & Brown, E. T. 1980. *Underground Excavations in Rock*, p. 527. London: Institution of Mining & Metallurgy.
117. Hoek, E., Carranza-Torres, C., Diederichs, M. S. & Corkum, B. 2008. Integration of geotechnical and structural design in tunnelling. *Proc., University of Minnesota 56th Annual Geotechnical Engineering Conf.*, Minneapolis, 29 February, 1-53.
118. Hoek, E. & Diederichs, M. S. 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics&Mining Sciences*, 43(2): 203-215.
119. Hood, M. & Brown, E. T. 1999. Mining rock mechanics, yesterday, today and tomorrow. In G. Vouille and P. Berest (eds), *Proc. 9th Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Paris, 25-28 August, 3: 1551-1576. Lisse: Balkema.
120. Hudson, J. A. 2010. Underground radioactive waste

disposal: the rock mechanics contributions. In K. G. Sharma, T. Ramamurthy, V. K. Kanjlia & A. C. Gupta (eds), *Advances in Rock Engineering*, *Proc. ISRM Int. Symp. 2010 & 6th Asian Rock Mech. Symp*., New Delhi, 23-27 October, KN 3-KN 20. New Delhi: Central Board of Irrigation & Power.

121. Hudson, J. A. 2011. The next 50 years of the ISRM and anticipated future progress in rock mechanics. In Q. Qian & Y. X. Zhou (eds), *Harmonising Rock Engineering and the Environment, Proc. 12th Congr., Int. Soc. Rock Mech*., Beijing, 16-21 October, 1: (this volume). Leiden: CRC Press/Balkema.
122. Hudson, J. A., Brown, E. T. & Fairhurst, C. 1971. Optimizing the control of rock failure in servo-controlled laboratory tests. *Rock Mechanics*, 3(4): 217-224.
123. Hudson, J. A., Brown, E. T., Fairhurst, C. & Hoek, E. (eds) 1993. *Comprehensive Rock Engineering*, 5 Vols. Oxford: Pergamon Press.
124. Hudson, J. A., Cornet, F. H. & Christiansson, R. 2003. ISRM Suggested methods for rock stress estimation - Part 1: Strategy for rock stress estimation. *International Journal of Rock Mechanics& Mining Sciences*, 40(7-8): 991-998.
125. Hudson, J. A. & Feng, X-T. 2007. Updated flow charts for rock mechanics modelling and rock engineering design. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44(2): 174-195.
126. Hudson, J. A., Stephansson, O., Andersson, J., Tsang, C-F. & Jing, L. 2001. Coupled T-H-M issues relating to radioactive waste repository design and performance. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 38(1): 143-161.
127. Hustrulid, W. 2010. Some comments regarding development drifting practices with special emphasis on caving applications. InY. Potvin(ed.), *Caving 2010, Proc 2nd Int. Symp. on Block & Sublevel Caving*, Perth, 20-22 April, 3-43. Perth: Australian Centre for Geomechanics.
128. Hutchinson, D. J. & Diederichs, M. S. 1996. *Cablebolting in Underground Mines*, p. 406. Richmond, B. C.: Bitech Publishers. Indraratna, B., Oliveira, D. A. F. & Brown, E. T. 2010. A sheardisplacement criterion for soil-infilled rock discontinuities. *Géotechnique*, 60(8): 623-633.
129. Itasca, 2011. *FLAC Ver 6.0, FLAC3D Ver 4.0, FLAC/Slope Ver 6.0, UDEC Ver 5.0 & 3DEC Ver 4.1* Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc. (See www.itascacg.com/home.php.)
130. Jaeger, C. 1955. Present trends in the design of pressure tunnels and shafts for underground hydro-electric power stations. *Proc., Institution of Civil Engineers*, 4(2): 116-174.
131. Jaeger, C. 1972. *Rock Mechanics and Engineering*, p. 417. Cambridge: Cambridge University Press.
132. Jaeger, J. C. 1959.The frictional properties of joints in rock. *Geofisica Pura e Applicata*, 43(Part 2): 148-158.
133. Jaeger, J. C. 1960. Shear fracture of anisotropic rocks. *Geological Magazine*, 97: 65-72.
134. Jaeger, J. C. 1971. Friction of rocks and stability of rock slopes. *Géotechnique*, 21(2): 97-134.
135. Jing, L. 2003. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40(3): 283-353.
136. John, K. W. 1962. An approach to rock mechanics. *Journal, Soil Mechanics & Foundations Division*, *A.S.C.E*., 88(SM4): 1-30.
137. Judd, W. R. (ed.) 1964. *State of Stress in the Earth's Crust*, *Proc. Int. Conf*., Santa Monica, 13-14 June 1963, p. 732. NewYork: American Elsevier.
138. Kaiser, P. K. & Kim, B-H. 2008. Rock mechanics challenges in underground construction and mining. In Y. Potvin, J. Carter, A. Dyskin & R. Jeffrey (eds), *Proc. 1st Southern Hemisphere Int. Rock Mech. Symp.*, Perth, 16-19 September, 1: 23-38. Perth: Australian Centre for Geomechanics.
139. Kármán, T. von, 1911. Festigkeitsversuche unter allseitigem Druck. *Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure*, 55: 1749-1757.
140. Kimmance, J. P. 1999. Geographical information system application to construction and geotechnical data management on large projects. In C. F. Leung, S. A. Tan & K. K. Phoon (eds), *Proc. 5th*
141. *Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics*, Singapore, 1-3 December, 151-156. Rotterdam: Balkema.
142. King, L. V. 1912. On the limiting strength of rocks under conditions of stress existing in the earth's interior. *Journal of Geology*, 20: 119-138.
143. Kirsten, H. A. D. 1976. Determination of rock mass elastic moduli by back analysis of deformation measurements. In Z. T. Bieniawski (ed.), *Proc. Symp. Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg, 1-5 November, 1: 165-172. Cape Town: Balkema. Kovari, K. & Amstad, C. 1993. Decision making in tunnelling based on field measurements. In J. A. Hudson, E. T. Brown, C. Fairhurst & E. Hoek (eds), *Comprehensive Rock Engineering*, 4: 571-606. Oxford: Pergamon Press.
144. Kovari, K., Amstad, C. & Köppel, J. 1979. New developments in the instrumentation of underground openings. In A. C. Maevis & W. A. Hustrulid (eds), *Proc. 1979 Rapid Excavation & Tunneling Conf*., Atlanta, 18-21 June, 1: 817-837. NewYork: A.I.M.E. Lang, T. A. 1961. Theory and practice of rockbolting. *Transactions, Society of Mining Engineers of A.I.M.E.*, 220: 333-348. Liu, J., Feng, X-T., Ding, X-L., Zhang, J. & Yue, D-M. 2003a. Stability assessment of the Three Gorges Dam foundation, China, using physical and numerical modeling - Part I: physical model tests. *International Journal of Rock Mechanics&Mining Sciences*, 40(5): 609-631.
145. Liu, J., Feng, X-T. & Ding, X-L. 2003b. Stability assessment of the Three Gorges Dam foundation, China, using physical and numerical modeling - Part II: numerical modeling. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40(5): 633-652.
146. Londe, P. 1987. The Malpasset Dam failure. *Engineering*

Geology, 24(1-4): 295-329.
147. Londe, P., Vigier, G. & Vormeringer, R. 1969. Stability of rock slopes, a three-dimensional study. *Journal, Soil Mechanics&Foundations Division, A.S.C.E.*, 95(SM1): 235-262.
148. Long, J. & Witherspoon, P. 1985. The relationship of the degree of interconnection to permeability in fracture networks. *Journal of Geophysical Research*, 90(B4): 3087-3098.
149. Lorig, L. J. & Brady, B. H. G. 1982. A hybrid discrete elementboundary element method of stress analysis. In R. E. Goodman & F. E. Heuze (eds), *Issues in Rock Mechanics, Proc. 23rd U.S.*
150. *Symp. Rock Mech*, Berkeley, 25-27 August, 628-636. NewYork: A.I.M.E. Louis, C. 1974. Rock hydraulics. In Müller, L. (ed.), *Rock Mechanics*, (Course held at CISM, Udine, Italy), 300-387. Vienna: Springer-Verlag.
151. McKenzie, C. K. 1987. Blasting in hard rock: techniques for diagnosis and modeling for damage and fragmentation. In G. Herget & S. Vongpaisal (eds), *Proc. 6th Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Montreal, 30 August - 3 September, 3: 1425-1431. Rotterdam: Balkema.
152. Marinos, P. G., Marinos, V. & Hoek, E. 2007. The Geological Strength Index (GSI): a characterization tool for assessing engineering properties of rock masses. In C. Mark, R. Pakalnis & R. J. Tuchman (eds), *Proc. Int. Workshop on Rock Mass Classification for Underground Mining*, Vancouver, 31 May, NIOSH IC 9498, 87-94. Pittsburgh: U.S. Department of Health & Human Services.
153. Martin, C. D. 1997. Seventeenth Canadian Geotechnical Colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(5): 698-725.
154. Mas Ivars, D., Pierce, M. E., Darcel, C., Reyes-Montes, J., Potyondy, D., Young, R. P. & Cundall, P. A. 2011. The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48(2): 219-244.
155. Mayer, A. 1953. Les propértiés mécaniques des roches. *Géotechnique*, 3(8): 329-338.
156. Mayer, A. 1963. Recent work in rock mechanics. *Géotechnique*, 13(2): 99-118.
157. Mayer, A., Habib, P. & Marchand, R. 1951. Mesure en place des pressions de terrains. *Proc. Conf. Int. sur les Pressions deTerrains et le Soutènement dans les Chantiers d'Exploration*, Liège, 24-28 April, 217-221.
158. Minchinton, A. & Dare-Bryan, P. 2005. The application of computer modelling for blasting and flow in sublevel caving operations. *Proc. 9th AusIMM Underground Operators' Conf.*, Perth, 7-9
159. March, 65-73. Melbourne: Australasian Institute of Mining & Metallurgy.
160. Mogi, K. 1959. Experimental study of deformation and fracture of marble (1). On the fluctuation of compressive strength of marble and relation to the rate of stress application. *Bulletin, Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 37: 155-170.
161. Mogi, K. 2007. *Experimental Rock Mechanics*, p. 361. London: Taylor & Francis.
162. Moye, D. G. 1959. Rock mechanics in the investigation and construction of T.1 underground power station, Snowy Mountains, Australia. *Geological Society of America Engineering Geology Case Histories*, No. 3: 13-44.
163. Müller, L. 1933. Untersuchungen über statistische Kluftmessungen. *Geologie und Bauwesen*, 5(4): 185-255.
164. Müller, L. 1950. Der Kluftkörper. *Geologie und Bauwesen*, 18(1): 52-60.
165. Müller, L. 1964. The rock slide in the Vajont Valley. *Rock Mechanics & Engineering Geology*, 2: 148-212.
166. Müller, L. 1966. Der progressive bruch in geklufteten median. *Proc. 1st Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, 25 September-1 October, 1: 679-686. Lisbon: LNEC.
167. Müller, L. 1967a. Address to the Opening Session. *Proc. 1st Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, 25 September-1 October, 1966, 3: 80-83. Lisbon: LNEC.
168. Müller, L. 1967b. Address to the Closing Session. *Proc. 1st Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, 25 September-1 October, 1966, 3: 90-92. Lisbon: LNEC.
169. Müller, L. 1968. New considerations of the Vajont slide. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 6(1): 1-91.
170. Müller, L. 1969. New editorial system. *Rock Mechanics*, 1(1): 1-4.
171. Müller, L. 1979. Josef Stini: contributions to engineering geology and slope movement investigations. In B. Voight (ed.), *Rockslides and Avalanches*, 2: 95-109. Amsterdam: Elsevier.
172. Müller-Salzburg, L. 1987. The Vajont catastrophe - a personal view. *Engineering Geology*, 24(1-4): 423-444. Obert, L. & Duvall, W.I. 1967. *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*, p. 650. NewYork: JohnWiley.
173. Obert, L., Windes, S. L. & Duvall, W. I. 1946. Standardized tests for determining the physical properties of mine rock. *U.S. Bureau of Mines Report of Investigation* 3891.
174. Oñederra, I., Chitombo, G. P., Cundall, P. A. & Furtney, J. K. 2009. Towards a complete validation of the lattice scheme in the Hybrid Stress Blasting Model (HSBM). In J. A. Sanchidrián (ed.), *Rock Fragmentation by Blasting - FragBlast 9, Proc. 9th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, Granada, 13-17 September, 343-351. Leiden: CRC Press/Balkema.
175. Ortlepp, W. D. 2007. Dynamic capacity in cable anchors and rockbolts. In *Cave Mining, 1st Int. Symp. on Block & Sub-level Caving*, Cape Town, 8-10 October, 405-419. Johannesburg: Southern African Institute of Mining & Metallurgy.
176. Ouchterlony, F. & Moser, P. 2006. Likenesses and differences in the fragmentation of full-scale and model-scale blasts. *Fragblast-8, Proc. 8th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, Santiago, 7-11 May, 207-220. Santiago: Editec.
177. Pacher, F. 1964. Deformationsmessungen im Versuchstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und

zur Bemessung des Ausbaues. *Rock Mechanics & Engineering Geology*, Suppl IV, 149-161.
178. Panet, M. 1993. Understanding deformations in tunnels. In J. A. Hudson, E. T. Brown, C. Fairhurst & E. Hoek (eds), *Comprehensive Rock Engineering*, 1: 663-690. Oxford: Pergamon Press.
179. Panet, M. 1995. *Calcul desTunnels par la Methode de Convergence-Confinement*. Paris: Press de l'Ecole Nationale des Ponts et Chausses.
180. Paterson, M. S. 1958. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble. *Bulletin, Geological Society of America*, 69: 465-476.
181. Paterson, M. S. 1978. *Experimental Rock Deformation - The Brittle Field*, p. 254. Berlin: Springer-Verlag.
182. Pells, P. J. N. 2002. Developments in the design of tunnels and caverns in the Triassic rocks of the Sydney region. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39(5): 569-587.
183. Pells, P. J. N., Poulos, H. G. & Best, R. J. 1991. Rock reinforcement and design for a shallow large span cavern. In W. Wittke (ed.), *Proc. 7th Congr., Int. Soc. Rock Mech*, Aachen, 16-20 September, 2: 1193-1198. Rotterdam: Balkema.
184. Pichler, J., Lammer, E. & Bertignoll, H. 2010. Innovative roadheader technology for safe and economic tunnelling. In G. Beer (ed.), *Technology Innovation in Underground Construction*, 315-333. Leiden: CRC Press/Balkema.
185. Pierce, M., Gaida, M. & DeGagne, D. 2009. Estimation of rock block strength. In M. Diederichs & G. Grasselli (eds), *Rock Engineering in Difficult Conditions, Proc. 3rd Canada-U.S. Rock Mech. Symp*, Toronto, 9-15 May, Paper 4360 (on CD-ROM).
186. Pine, R. J., Coggan, J. S., Flynn, Z. N. & Elmo, D. 2006. The development of a new numerical modelling approach for naturally fractured rock masses. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 39(5): 395-419.
187. Pinkerton, I. L., Andrews, K. E., Bray, A. N. G. & Frost, A. C. H. 1961. The design, construction and commissioning of Tumut 1 Power Station. *Journal, Institution of Engineers, Australia*, 33(7-8): 235-252.
188. Player, J., Thompson, A. & Villaescusa, E. 2008. Dynamic testing of reinforcement systems. In T. R. Stacey & D. F. Malan (eds), *Proc. 6th Int. Symp. on Ground Support in Mining & Civil Engineering Construction*, Cape Town, 30 March - 3 April, 597-622. Johannesburg: SouthernAfrican Institute of Mining & Metallurgy.
189. Potts, E. L. J. 1957. Underground instrumentation. *Quarterly, Colorado School of Mines*, 52(3): 135-182.
190. Potvin, Y., Stacey, D. & Hadjigeorgiou (eds) 2004. *Surface Support in Mining*, p. 416. Perth: Australian Centre for Geomechanics.
191. Potyondy, D. O. & Cundall, P. A. 2004. A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41(8): 1329-1364.
192. Priest, S. D. 2004. Determination of discontinuity size distributions from scanline data. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 37(5): 347-368.
193. Priest, S. D. & Hudson, J. A. 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 18(3): 183-197.
194. Rabcewicz, L. 1969. Stability of tunnels under rock load. *Water Power*, 21(6-8): 225-229, 266-273, 297-304.
195. Read, J. & Stacey, P. (eds) 2009. *Guidelines for Open Pit Slope Design*, p. 496. Melbourne: CSIRO Publishing.
196. Roberts, A. 1963. Editorial. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1(1): 3-4.
197. Rocha, M. 1964. Mechanical behaviour of rock foundations in concrete dams. *Transactions, 8th Int. Congr. Large Dams*, Edinburgh, 1: 785-832.
198. Rocha, M., Serafim, J. L., Silveira, A. & Neto, J. R. 1955. Deformability of foundation rocks. *Proc. 5th Congr. Large Dams*, Paris, R75, 3: 531-559. Paris: Editions Science et Industrie.
199. Roegiers, J-C. 1999. The importance of rock mechanics to the petroleum industry. In G. Vouille & P. Berest (eds), *Proc. 9th Congr., Int. Soc. Rock Mech*., Paris, 25-28 August, 3: 1525-1549. Lisse: Balkema.
200. Rogers, S., Elmo, D., Webb, G. & Catalan, A. 2010. Adiscrete fracture network based approach to defining in situ, primary and secondary fragmentation distributions for the Cadia East panel cave project. In Y. Potvin (ed.), *Caving 2010, Proc. 2nd Int. Symp. Block & Sublevel Caving*, Perth, 20-22 April, 425-439. Perth: Australian Centre for Geomechanics.
201. Rojat, F., Labiouse, V., Kaiser, P. K. & Descoeudres, F. 2008. Brittle rock failure in the Steg lateral adit of the Lötschberg base tunnel. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 42(2): 341-359.
202. Rojek, J., Oñate, E., Labra, C., Kargl, H. & Akerman, J. 2010. Optimizing rock cutting through computer simulation. In G. Beer (ed.), *Technology Innovation in Underground Construction*, 299-314. Leiden: CRC Press/Balkema.
203. Ryder, J. A. & Jager, A. J. (eds) 2002. *Rock Mechanics for Tabular Hard Rock Mines*, p. 489. Johannesburg: SIMRAC.
204. Sainsbury, B. L., Sainsbury, D. P. & Pierce, M. E. 2011. A historical review of the development of numerical cave propagation simulations. In D. P. Sainsbury, R. D. Hart, C. L. Detournay & M. J. Nelson (eds), *Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics - 2011, Proc. 2nd Int. FLAC/DEM Symp*., Melbourne, 14-16 February, 23-36. Minneapolis: Itasca International Inc.
205. Sainsbury, D. P., Hart, R. D., Detournay, C. L. & Nelson, M. J. (eds) 2011. *Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics - 2011, Proc. 2nd Int. FLAC/DEM Symp.,* Melbourne, 14-16 February, p. 852. Minneapolis: Itasca International Inc.
206. Sakurai, S. 1993. Back analysis in rock engineering. In J. A. Hudson, E. T. Brown, C. Fairhurst & E. Hoek (eds), *Comprehensive Rock Engineering*, 4: 543-569. Oxford:

Pergamon Press.
207. Sakurai, S. 1997. Lessons learned from field measurements in tunnelling. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 12(4): 453-460.
208. Sakurai, S. 1999. Interpretation of field measurements in tunnelling practice. In G. Vouille & P. Berest (eds), *Proc. 9th Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Paris, 25-28 August, 3: 1517-1523. Lisse: Balkema.
209. Sakurai, S. & Akutagawa, S. 1995. Some aspects of back analysis in geotechnical engineering. In L. Ribeiro e Sousa & N. F. Grossmann (eds), *Eurock '93 - Safety & Environmental Issues in Rock Mechanics, Proc, Int, Symp*., Lisbon, 21-24 June 1993, 1133-1140. Rotterdam: Balkema.
210. Sakurai, S., Farazmand, A. & Adachi, K. 2009. Assessment of the stability of slopes from surface displacements measured by GPS in an open pit mine. In G. Deák & Z. G. Agioutantis (eds), *Sustainable Exploitation of Natural Resources, Proc. 3rd Int. Seminar ECOMINING - Europe in 21st Century*, Milos Island, Greece, 4-5 September, 239-248.
211. Sakurai, S. & Takeuchi, K. 1983. Back analysis of measured displacement of tunnels. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 16(3): 173-180.
212. Salamon, M. D. G. & Munro, A. H. 1967. Astudy of the strength of coal pillars. *Journal, South African Institute of Mining & Metallurgy*, 68(2): 55-67.
213. Salamon, M. D. G., Ryder, J. A. & Ortlepp, W. D. 1964. An analogue solution for determining the elastic response of strata surrounding tabular mine excavations. *Journal, South African Institute of Mining & Metallurgy*, 65(2): 115-137.
214. Schmidt, W. 1925. Gefügestatistik. *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 38: 392-423.
215. Schubert, W. 2006. The role of on-site engineering in underground projects. In C. F. Leung & Y. X. Zhou (eds), *Rock Mechanics in Underground Construction, Proc., ISRM Int. Symp. 2006, 4th Asian Rock Mech. Symp*., Singapore, 8-10 November, 71-82.
216. Singapore: World Scientific Publishing Co.
217. Schunnesson, H. 2009. Modern tools and equipment for tunnelling and drifting. In P. Dight (ed.), *Proc. 1st Int. Seminar on Safe & Rapid Development Mining*, Perth, 6-7 May, 139-148. Perth: Australian Centre for Geomechanics.
218. Schutjens, P. 2009. Book review: Petroleum Related Rock Mechanics, 2nd edn, 2008. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46(8): 1398-1399.
219. Shi, G-H. & Goodman, R. E. 1985. Two dimensional discontinuous deformation analysis. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 9(6): 541-556.

박 정 욱

2003년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학석사
2011년 서울대학교 대학원 에너지시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3904
E-mail: jwpark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 Post-Doc.

한 공 창

1976년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 Ecole des mines de Paris 지질공학과 공학석사
1993년 Ecole des mines de Paris 지질공학과 공학박사

Tel: 042-868-3241
E-mail: hankc@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

박 철 환

1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3244
E-mail: cwpark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원