

합성암반체 접근법에 대한 고찰

박철환¹⁾, 박의섭^{1)*}, 신중호¹⁾

Review of the Synthetic Rock Mass Approach

Chulwhan Park, Eui-Seop Park, Joong-Ho Synn

Abstract This technical report is to introduce the research on SRM (Synthetic Rock Mass) which was presented in 2007 ISRM Congress at Lisbon by Prof. Fairhurst who speak with emphasis on its importance and potential in rock engineering. The Synthetic Rock Mass approach to jointed rock mass characterization (Pierce et al. 2007) is reviewed relative to existing empirical approaches and current understanding of jointed rock mass behaviour. The review illustrates how the key factors affecting the mechanical behaviour of jointed rock masses may be considered and demonstrates that the SRM approach constitutes a significant step forward in this field. This technique, based on two well-established methods, Bonded Particle Modelling in PFC-3D (Potyondy and Cundall, 2004) and Discrete Fracture Network simulation, employs a new sliding joint model that allows for large rock volumes containing thousands of pre-existing joints to be subjected to any non-trivial stress path. Output from SRM testing includes rock mass brittleness and strength, evolution of the full compliance matrix and primary fragmentation.

Key words Synthetic rock mass, Jointed rock mass, Stress path, Bonded particle model, PFC-3D

초 록 본 기술보고서는 Lisbon에서 개최된 2007 ISRM Congress에서 발표된 논문을 소개한 것이다. 이는 SRM(합성암반체)에 관한 연구결과이며, 이의 중요성과 향후 잠재력을 강조하고 있는 Fairhurst 교수가 직접 발표한 논문이다. 절리 암반의 특성을 규명하는 SRM 접근법은 현존하는 경험적 접근법이나 절리 암반의 거동에 대한 현재의 이해정도와 관련지어 재검토된다. 이 재검토 논문에서 절리 암반의 역학적 거동에 영향을 미치는 주요 요소들이 어떻게 고려되는가를 기술하며, 또 SRM 접근법이 상당히 발전되어 현장에 적용된 사례를 보여준다. PFC-3D에서 BP 모델링과 DFN 모사법 등의 두개의 잘 정립된 방법에 기초를 두고 있는 이 기법은 새로운 미끄러지는 절리모델을 사용한다. 이 모델은 모든 응력경로에 의하여 힘을 받고 있는 수천개의 기존 절리를 포함하는 대규모 암반체를 모사할 수 있게 하는 것이다. 암반의 강도 및 취성도, 완전 순응 행렬의 전개, 그리고 초기의 파쇄 등이 SRM 시험에서 얻어지는 결과이다.

핵심어 합성암반체, 절리암반, 응력경로, BP 모델, PFC-3D

1. 서 언

절리와 같은 불연속면이 발달된 암반의 역학적 거동은 암석 자체의 역학적 특성보다는 불연속면의 특성에 의해 더 많은 영향을 받기 때문에 이러한 불연속면들을 이해하고 해석하는 일은 매우 중요하다. 암반공학 분야에서 신선한 암석에 대한 강도 및 변형특성의 규명은 탄성학을 기초로 거의 확립되었으며, 절리의 특성도 절

리면 진단시험 등으로 많이 밝혀지고 있다. 그러나 절리의 수나 크기가 실험실에서 시험하기에 큰 규모일 때 이의 시험은 현지 암반에서 수행되지만 이의 특성은 쉽게 규명할 수 없으며 비용 또한 많이 소요된다.

지하구조물의 안정성 해석 및 평가의 대상이 되는 현지 암반은 신선한 암석에 절리가 포함되어 있는 경우가 대부분인데 이의 강도 및 변형, 파괴 등의 특성규명은 더욱 복잡하다. 이러한 절리 암반의 특성은 여러 가지 수치해석 기법이나 RMR, Q 및 GSI 등의 암반분류 시스템을 이용한 경험적 수식에 의하여 평가 또는 측정되고 있지만, 연구자들은 항상 이의 정량적 크기에 대하여 의문을 갖고 있는 것이 현재의 실정이다.

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부

* 교신저자 : espark@kigam.re.kr

접수일 : 2007년 7월 30일

심사 완료일 : 2007년 12월 4일

본 논문에서 언급되고 있는 SRM(Synthetic Rock Mass)은 재료로서의 신선한 암석과 이에 내재되어 있는 절리를 따로 규명하는 것이 아니라 이들을 하나로 통합한 연속체라는 의미로 사용된다. 이러한 의미를 바탕으로 SRM은 합성암반체로 번역될 수 있으며, 암반의 총합체 또는 일체화된 암반체라고 풀어 해석된다. 이 용어는 Itasca의 일련의 연구논문들에서 언급되고 있는데, 1999년 및 2001년의 Potyondy의 연구에서 Synthetic Material 이란 용어가 처음 사용되었으며, 2003년도 PFC-3D 설명집에 SRM으로 발전되면서 정립되었다. Itasca의 이러한 연구와는 별도로 저자(Park et al, 2004)는 이러한 접근법으로 연구를 수행한 바 있는데 Itasca의 연구에서도 이 연구논문을 SRM의 발전된 기법을 실현한 것으로 중요하게 언급하고 있다. 국내 암반공학 연구자들에게 SRM 접근법의 중요성을 소개하는 것을 목적으로 하는 본 기술보고서는 이러한 연구의 일환으로 수행된 사례를 Fairhurst 교수가 2007년 Lisbon에서 개최된 국제암반공학회 학술대회에서 직접 발표한 'The Synthetic Rock Mass approach - A step forward in the characterization of jointed rock masses' 제목의 논문을 번역하고 검토한 것이다.

2. 합성암반체 접근법 - 절리암반 특성화의 진일보

2.1 개 론

1962년 ISRM이 창립될 당시에 뮐러교수는 왜 이 학회가 필요한가라는 질문을 받고, 우리는 암반의 강도를 모르기 때문이라고 답하였다. 암반에 대한 실물크기의 직접실험이 어려운 것이 분명한 현실이어서 암반의 강도와 거동에 대한 이해는 아주 느리게 발전되고 있으며, 경험적 암반분류와 실제의 관측에 의지하고 있다.

암반구조의 크기와 하중의 존속기간이 다같이 클 때 암반의 강성이나 강도는 측정하기 매우 어렵다. 절리와 이와 유사한 평면적 불연속면들이 존재하면 일반적으로 신선한 암석에 비하여 강도가 저하된다. 또한 하중기간이 오랫동안 지속될수록 강도저하가 일어나는 경향이 있는데 이는 대규모의 평면적 불연속면 사이에 있는 신선한 암석은 브리지의 연화(Einstein and Meyer, 1999), 그리고 같은 맥락으로 임계이전 균열성장이나 응력에 의한 부식(Kemeny, 2003)으로 설명된다.

암반분류법은 토목이나 광산공학 분야에 활용하기 위하여 개발되었는데, 절리와 이들이 암석에 영향을 주는 연화현상에 주로 기초하여 해석이 필요한 암반을 등급화한 것이다. 즉, 암반의 등급을 집계하면 암반의 강도와 변형계수를 정량적으로 예측할 수 있다. 공학적 설

계에서 암반분류법과 관계식들이 널리 사용되고 있음에도 불구하고, 강도의 이방성이나 변형을 연화현상 등은 고려하지 못하고 있다. 이러한 분류법들의 또 다른 심각한 한계는 경험자료 이외에 대한 외삽법이 본래 갖고 있는 불확실성이다. 이에 대하여 Mas Ivars는 2007년 논문발표를 통하여 논쟁을 제기한 바 있다.

암석역학이나 암반공학 분야에서 연속체 역학이론도 역시 큰 장점을 갖고 적용되지만, 이 또한 한계를 갖고 있는데 1968년 Trollope는 다음과 같은 견해를 피력한 바 있다.

“지구역학 분야에서 입상 매질이나 블록형 절리 암반들은 이상적인 물리적 연속체라는 개념이 적용되기 어려운 명백한 예가 된다. 중략하고, 쇄설암반 모델이나 그것에 관한 더 나은 모델 개발에 대하여 고체의 완전한 응력-변형률 거동을 예측하는 문제의 해결은 사실 나의 관점에서 낙관적이다.”

암반 변형을 이해하는데 진척이 있으려면 불균일질이면서 개별적 미세구조의 암석이나 대규모 절리 또는 블록형 암반들은 불연속체 역학으로 해석이 가능하여야 한다. 이의 전형적인 예제는 암석이 비탄성적으로 변형하거나 광산에서 붕락채광과 같이 조절되면서 암반이 붕락으로 발전되는 경우이다.

비록 암반공학 문제에서 하중은 흔히 우세한 압축력을 의미하지만, 암석의 불균일질 구조는 지역적으로 작용하는 인장력이나 연속으로 발생하는 변형을 좌우하는 인장파쇄를 유발한다. 전단파쇄는 보통 확장된 미세인장균열의 최종단계이다. 큰 규모로 확대하여 보면, 절리면에 발생하는 불연속적으로 미끄러지는 과정과 절리들 사이의 신선한 브리지 지역을 관통하는 균열발달의 과정은 매우 복잡하며(Fairhurst et al, 2007) 연속체 문제로 표현하기 어렵다. 이러한 경우에, 파쇄와 붕락의 거동의 필수적 본질이 파악된다고 가정하면, 불연속체 및 입자역학 모델을 사용하는 것이 필수적이다. 몇몇 경우에서 불연속 모델에서 나타나는 이러한 거동이 연속체를 유용하게 표현하는 차세대 모델을 개발하는데 도움이 될 수 있다. 이러한 접근법이 본 연구에서 묘사되는 붕락해석에 사용된다.

입자역학에 근거하는 수치모델의 비교적 최근의 개발과 현저히 발달된 지금의 컴퓨터 진보로 인하여 여러 형태의 경우와 크기를 갖는 불연속면과 암석 브리지 사이의 상호작용을 상세하게 표현할 수 있게 되었다. 즉, 암반을 시뮬레이션하거나 물리적 시험에 대응하는 수치해석시험을 수행하는 것이 현재 가능해졌으며, 또한 암반의 강도와 거동에 크기 및 시간적 영향의 본질을 상당히 간파할 수 있게 되었다.

본 연구보고서에서는 최근 들어 현저하게 진보된 SRM (Pierce 등, 2007년) 접근법을 설명하며, 이를 붕락능력 연구에 적용한 결과를 소개한다. 이러한 예측이 붕락채광 주변에 설치한 삼차원 미소파괴음 장비를 사용하여 얻어진 응력 재분포와 붕락과정을 측정된 결과와 대비하여 검증되었는데, 현재까지의 결과는 매우 고무적이다. 비록 채광에 한하여 적용되었지만, 변형 및 파괴거동이 수백 미터에 달하여 대규모의 완전 붕괴로 이어졌음을 보여줄 수 있었기에 SRM 접근법은 암석역학에서 관심거리가 된다. 이의 목적이 암반체의 붕괴를 조장하거나 방지하든지 간에, 불연속적인 미끄러짐이나 전도, 분열 그리고 결국에는 붕괴에 이르는 영역에 대한 이해는 암반공학의 안전설계에 중요하다는 것은 명백한 사실이다.

암석의 BP모델(Bonded Particle Model, Potyondy and Cundall, 2002)해석에 근거하여, SRM 접근법은 최근들어 연속되지 않은 디스크 형태의 균열들로 구성된 삼차원 파쇄대 연결망을 생성하는 능력이 강화되어졌다. SRM 접근법은 10~100 m 크기의 암반체에 적용하도록 개발되었으므로 입도나 광물학적 혼합물, 금속 함량, 엇리, 공극률, 공극구조, 입자 내부 또는 입자간의 벽개 등과 같은 입자규모에 대한 영향이 직접적으로 미치지 못한다.

본 논문에서는 경험적 접근법과 비교되는 SRM 접근법이 장점을 설명하고 절리 암반체의 거동을 연구한 여러 문헌들을 언급한다. 또한 시간의존성 관점을 중심으로 향후 개발에 대한 가능성에 대하여 논의한다.

2.2. 합성암반체 접근법

SRM 기법은 암반특성을 예측하는 경험적 방법을 보완하는 ‘사실상의 실험실(virtual laboratory)’로서 필수적으로 사용된다. 이 기법은 2004년에 발표된 Park의 연구에서 수천개의 불연속적인 균열을 포함하는 직경 10~100 m의 구면 암반에 확장되었다. 여기서 이 기법으로 새로운 미끄러짐 균열모델을 개발하였으며, 이러한 SRM 시료에 해당 지역의 특정 응력을 가하였다. 암반체의 강도와 취성도는 지역별로 구성된 대규모의 표준 연속체 모델에 직접 입력자료가 되는 실험자료로부터 예측된다. 이러한 모델기법은 굴착이나 지면에 인접한 대규모 지질구조와 같은 다른 형태들을 구체화할 수 있게 한다.

SRM 시료는 삼차원이며 암석을 디스크 형태의 결합, 즉 균열들로 구성된 하나의 불연속적 연결망이 함유된 하나의 결합된 구형체, 즉 신선 암석들의 일체화된 조립물로 묘사한 것이다. 2003년 Itasca에서 개발된 PFC-3D에서 구성된 이 시료는 실험과정에서 변형률의 적용이나 회전을 용이하게 하기 위하여 구형체로 되어 있다.

원주나 육면체보다는 구형을 사용하면 주어진 해상도를 얻을 수 있는 입자의 수가 현저히 감소한다는 부수적인 장점도 발생한다. 실험에 요구되는 SRM 시료의 크기는 암반을 대표할 수 있는 만큼 커져야 하며, 또한 해석시간을 고려할 수 있는 작은 크기이어야 한다.

한개의 SRM 시료는 다음과 같은 주요 단계를 거쳐 만들어지고 시험된다.

- 1) 실험실 시험결과에 대응하는 신선 암석의 특성을 조정한다. 이때 규모는 현지암반 블록의 통상적 크기가 되어야 하며, Potyondy & Cundall이 2004년에 언급한 과정을 거쳐 parallel-bonded 물질로 된 구형 신선 암석 시료를 생성한다.
- 2) 암반을 대표하는 개별적 절리망을 생성하여 앞의 시료에 합체시킨다.
- 3) 시험에서 요구되는 응력조건을 시료에 제공하여 파괴가 이루어지도록 하는데 이 과정은 Pierce 등의 2007년의 논문에 기술되어 있다.

그림 1은 시료에 가해진 두개의 응력경로를 도시한 것이다. 이 시료는 12.4 cm ~20.6 cm 직경을 균일하게 분포시킨 255,000개의 구형 입자로 구성되어 있으며, 20,000개의 절리를 포함하여 전체 크기는 직경 12 m이다. 시료의 손상 개시는 최대 강도에 달하기 직전에 발생하는데, 입자들 사이의 결합력이 붕괴의 징후로 나타난다. 결합력의 붕괴를 crack이라 표현할 수 있는데 약 1000개가 발생할 때 암반체 시료는 팽창 또는 왜곡되기 시작한다. 그림 1에서 밝혀진 것은 1999년 Diederichs에 의하여 논의된 바 있는 경험적인 손상조건적 최저

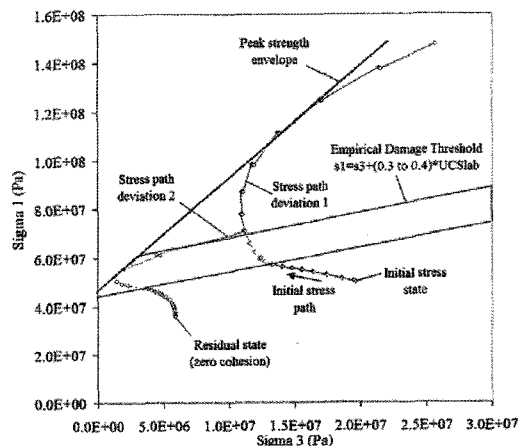


Fig. 1. Stress paths, fitted peak-strength envelope and damage threshold in SRM samples

한계점과 매우 잘 일치하는 결과이다. 다음은 앞에서 언급한 시험에서의 강도 및 다른 역학적 특성을 평가하는데 SRM 접근법이 갖는 장점들의 개요를 열거한 것이다.

1) joint fabric; 현지 암반의 절리구조가 강성과 강도, 팽창특성을 고려하며 명백하게 삼차원으로 설명된다. 이런 방법으로 기존의 절리작용에 의하여 발생된 이방성 특성이 충분히 반영되며 강도 및 취성도, 분쇄에 대한 이방성 영향이 고려된다. Barton이나 Stephansson, Brown 등의 연구에 의한 경험적 방법은 절리망과 이의 역학적 특성을 규명할 수 있도록 잘 정립되어 있지만, 이러한 요소들의 복합적 영향은 고려하지 못하고 있다. 이는 아마도 얻어진 자료가 절리특성에 대한 연구 대상이 되는 전체 부피나 크기의 효과에 대한 고려가 부족하기 때문에 큰 불확실성이 내재하는 사실에 기인할 것이다(Pinto de Cunha, 1990 & Fardin, 2003). SRM 시료내의 절리구조를 설명하기 위하여 DFN(Discrete Fracture Network)이 만들어지고, 절리의 빈도나 길이, 강도를 유효한 크기로 조정한다. DFN을 생성하는 잘 정립된 유용한 도구들이 많이 있는데 예를 들면 Frac-Works XP(fracman.com)나 3FLO(ICSAS, 2006) 등이다. 절리망 또는 강도에 대한 불확실성에 의한 영향은 일련의 SRM 시료들의 민감도 연구를 수행하면 정량화 될 수 있는데, 그림 2는 여러 가지의 절리구조와 강도를 갖는 SRM 시료들의 일축압축강도가 어떻게 달라지는가를 보여주는 그림이다.

2) elastic/inelastic compliance matrix; 탄성과 비탄성을 다같이 충족시키는 완벽한 순응함수 행렬식은 응력경로의 어떠한 단계에서도 용이하게 유도될 수 있다. 경험적 접근법은 일반적으로 등방성 또는 한 방향의 탄성상수만을 예측하며, 응력이나 손상, 절리의 개폐에 의한 영향에서 발생하는 비선형적 거동을 설명하지 못한다.

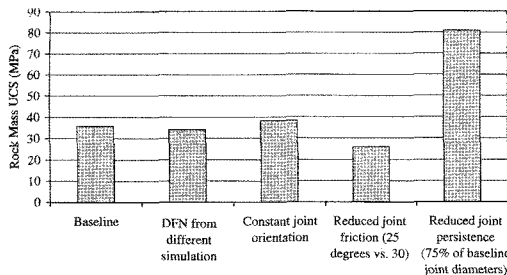


Fig. 2. Comparison of USC values from sensitivity study on SRM samples(Mas Ivars, 2007)

3) non-trivial stress path; 완전한 텐서양으로 표현되는 경시할 수 없는 응력경로를 적용하면 응력장의 회전이나 중간 주응력을 포함한 구속응력의 영향을 설명할 수 있게 된다. 구속압은 팽창하는 미소균열의 성장을 억압하면서 취성파괴강도에 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 고려인자이다. Hudson 등(1972년)과 다른 여러 연구(Rummel and Fairhurst, 1970, Ribacci, 2000)의 실험에서 신선 암석이나 절리 암석의 소성적 또는 취성적인 파괴가 구속응력에 상당히 의존되어 있는 경향이 밝혀진 바 있다. 이러한 경향이던 일축압축시험에서 취성적이던 물질이 구속응력이 증가하면서 상당히 소성적으로 파괴되는 현상을 의미한다. 이에 부가하여 중간 주응력이 파괴강도나 파괴형태에 미치는 영향을 무시하는 통상의 가정은 진삼축시험 연구들에서 밝혀졌듯이 더 이상 유효성이 지속될 수 없는 것이 될 것이다.

4) slip on joints; 응력경로의 어떠한 단계에서 미끄러지는 절리의 극좌표를 스트레오네트에 도시해 보면 SRM 시료내의 절리구조에 관계가 있는 응력의 크기와 방향이 다르기 때문에 나타나는 영향을 알 수 있게 된다(그림 3).

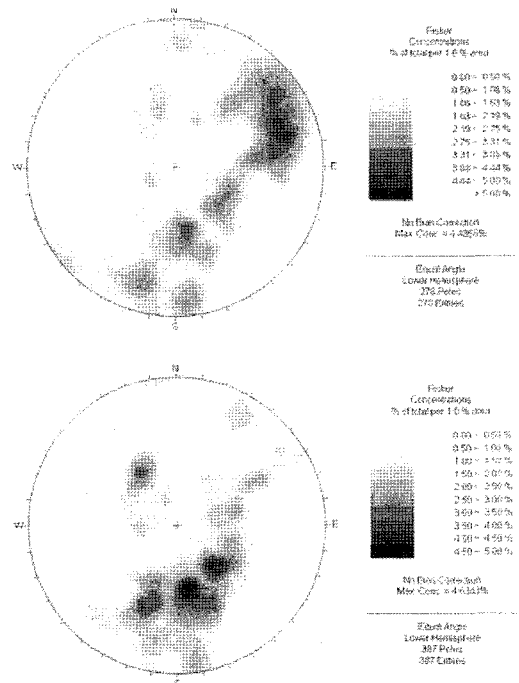


Fig. 3. Stereonet plots of poles to joints slipping at the onset of damage in two SRM samples subjected to different stress paths

5) *brittleness*; 최대강도에서 잔류강도로 약화된 점착력과 관련된 소성적인 전단변형률을 추적하면 SRM 시료의 취성도는 얻어진다. 지구학적 물체에 누적된 소성적 전단변형률은 비가역적 전단변형률에 비하여 보통계량되는 것이며, 더 일반적인 상식으로 말하면 손상의 한 계측값대로 여겨질 수 있는 것이다. 그림 4에서 점착력과 소성적 전단변형률의 관계를 설명하고 있는데, 여기에서 사용된 5개의 서로 다른 SRM 시료는 이 관계를 얻을 목적으로 만들어진 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 취성도에는 상당한 변화가 관측되었으며, 이는 시료들 간에 신선 암석의 강도와 응력경로를 달리한 조건으로 직접적으로 얻어지는 결과이다. Hajiabdomajid와 Kaiser가 2003년에 발표하였듯이 취성도는 물체의 특성 및 기하학적 형태와 크기와 지속적으로 의존되는 것으로 알려져 있다. SRM 방법론은 취성도에 영향을 주는 이러한 모든 것들을 획득할 수 있는 능력을 갖고 있다. 이런 방법으로 암반의 취성도를 예측할 수 있는 능력은 상당히 진일보된 것으로 판단된다. 왜냐하면 10~100 m 규모의 절리암반에의 거동을 모사할 수 있는 확립된 방법론이 아직 없기 때문이다.

6) *fragmentation*; SRM 물체 내에 접촉되어 있는 블록들 - 즉 구성된 입자들이 이웃으로 결합된 접촉(*bonded contacts*)을 통하여 모두 접하고 있는 시료 내의 신선 암석의 독립된 블록들을 시험함으로써 신선 암석이 초기에 어떻게 붕괴되는가를 그림 5처럼 볼 수 있다. 또한 이러한 붕괴를 유도하는 파쇄들을 가시화할 수 있다. 파쇄과정에서 동반되어 서서히 발전된 파편의 크기 분포 역시 그림 6과 같이 연속되는 각각의 블록 부피를 입자의 등가직경으로 환산하는 방법으로 예측된다.

7) *nature of fracturing*; 절리암반의 균열과정에 영향을 미치는 수많은 효과들은 암반의 강도를 예측하는 모든 실제적 방법에 적용되는 보편적인 법칙의 전개를 차단한다(Lockner, 1995). 일반적인 암반을 모델링하는 것 보다는 SRM 시료들이 특정 암반을 측정가능한 형태로 재생산할 수 있으며, 또한 지역의 특성에 맞는 응력조건으로 시험할 수 있도록 한다. 신선 암석을 나타내는 결합된 입자들의 조합에서 발생하는 파괴순서를 분석해 보면 SRM 시험은 기존 절리의 확장이나 독립된 새로운 균열의 진척을 이해하는데 사용될 수 있다. BP 모델의 본질은 실제 암석내의 미소균열을 성장시키는 원인으로 작용하는 것으로 알려진 여러 형태의 결합이나 지역적 응력집중을 일으키는 자연 암반의 불균일성이라는 본성을 모사하는 것이다(Kemeny & Cook,

1991). 또한 절리면에서 미끄러지는 것은 기존 절리의 첨단부에 인장응력을 유발하며, 많은 실험연구(Dyskin, 1994a, b, 1999; Germanovich, 1994, Bobet, 1997, 1998a, Sagong and Bobet, 2002; Germanovich and Dyskin, 2002, Wong 2001)에서 보고된 wing-crack을 유도할 수 있는 것이다.

다른 여러 연구에서도 같은 효과들을 얻었는데, 규칙적이거나 혹은 불규칙으로 분산된 균열요소의 격자 배열내에 적절한 요소들을 활용한 연구(Lockner and Madden, 1991a, b; Sellers and Napier, 1997; Napier and Malan, 1997; Chiaia, 1997)가 있으며, 연속되는 변위와 불연속면 경계요소를 연계하는 연구(Scvia, 1992, 1995; Napier and Hildyard, 1992; Bobet and Einstein, 1998b; Shen, 2004)들이 있다. 잘 알려진 SPH(smoothed particle hydrodynamics) 방법과 같은 수치해석법들은 구획을 분할하는 데에서 오는 문제에 좌우되지 않는 메쉬가 필요없는 방법들이다(Monaghan, 2000; Gray, 2001; Jing, 2003). 암반내에 절리망을 적용하는 BP 해석법은 연속체 모델을 정교하게 설정하지 않아도 복잡한 균열형태 및 물체의 거동결과를 얻을 수 있다는 장점을 지니고 있다.

SRM 시료 내부에서 관찰된 균열형태는 높은 정밀도의 미세파괴음 측정으로 얻어진 균열의 기하학 특성과 파괴특성, 균열확장 등의 관찰과 서로 연관된다. 붕락능력 연구의 일부로서 여러 가지 암반의 SRM 시료에서 얻어진 균열형태를 고안한 방법과 현장에 설치한 미소파괴음으로 유도된 균열형태를 비교하였더니 서로 잘 일치하였다(Reyers-Montes, 2007). SRM 방법을 적용하여 얻어진 결과는 광산규모의 붕락능력 연구모델에 성공적으로 잘 적용되었다(Pierce, 2006).

2.3 향후 발전에 대한 잠재력

지금까지 SRM 접근법에 시간의존성이나 온도, 공극압은 고려되지 않고 있다. 이러한 요소들의 중요성과 이들이 의한 효과가 적용되어 앞으로 SRM법이 더 발전할 수 있는 잠재력을 여기에서 검토하고자 한다.

1) *time dependence*; 암석역학을 담당하고 있는 연구자들은 오래 전부터 절리 암반에서 신선 암반과 절리의 두 가지 요소가 다같이 시간의존적인 특성을 갖고 있는 것을 인지하였다. 취성파괴의 과정이 하중이 가해지는 시간에 따라 달라지는 것은 잘 정립되어 있다(Potyondy, 2006). 취성적 크립에서 시간의존성에 대한 신뢰할 수 있는 개념은 균열성장을 화학적으로 돕는 응력부식과

인장균열이 서서히 증가하는 속도에 의하여 조절되는 크립속도로 여겨지는 것이다. PFC-3D를 이용하여 2006년 Potyondy에 의하여 개발된 PSC (Parallel-bonded Stress Corrosion) 모델은 SRM 방법론을 기반으로 신선 암석의 파괴의 본질을 묘사할 수 있는 수단을 제안한 것이다. 시간의존적인 절리의 미끄러짐 특성을 결합하는 것이 추가적인 발전에 필수적인 요소이다. 균열의 해소 및 접합, 고밀도화와 같은 추가적인 효과들도 이 방법론에 포함시켜 연구하는 것도 가치가 있다.

2) temperature; 고온에 의하여 신선 암석의 강도 및 파쇄강도가 줄어드는 것은 잘 알려져 있으므로(Wong, 1982), PFC-3D에 이미 적용가능한 열적 요소를 사용하여 특수한 경우에 유용하게 활용될 수 있다.

3) pore pressure; 파쇄의 본질은 공극압의 변화에 의하여 바뀔 수 있는 것이다. 즉, 공극에 있는 유체의 압력이 증가하면 유효응력을 감소시키며 또한 아주 작은 최소 주응력에 의해서도 인장파괴가 일어날 수 있다. 이 압력이 더 크게 증가하면 수압파쇄와 같은 결과를 초래할 수 있게 된다(Einstein and Dershowitz, 1990). 공극압의 변화는 절리의 강도에도 영향을 미친다(Lockner, 1995; Secor, 1965, 1968, Byerlee, 1990, 1992). SRM 방법론은 PFC-3D에 추가된 공극압 논리를 이미 적용하고 있다. 절리 내에 유체압력을 적용하는 문제는 앞으로의 개발대상이 될 것이다.

2.4 결론

SRM 접근법은 절리압반의 거동을 더 깊이 이해하고 예측할 수 있는 잠재력 있는 방법으로 제안되었다. 암석의 BP 모델에 근거를 둔 이 방법론은 서로 결합된 수천개의 구형입자와 연속되지 않은 절리의 연결망이 내재되어 있는 암반시료의 하나의 삼차원 합성시료라는 구조를 사용한다.

SRM 방법은 주어진 암반 영역의 변형과 손상, 파쇄 등의 관측을 가능하게 한다. 이러한 현상은 발전하는 과정에 연관되는 경시할 수 없는 응력경로와 신선 암석의 강성 및 강도, 절리와 같은 모든 주요 요소의 함수로 나타난다. 절리에는 방향이나 연속성, 간격, 강성, 강도, 전단 팽창 등의 특성을 포함하는 것이다. 경험적인 연속체 수치모델 접근법에서 현재까지는 표현하지 못하는 결정적 관점들의 대부분을 평가할 수 있는 모델을 구성하여 구체적인 연구가 수행되었다. 완전한 순응 행렬식과 파쇄의 본질, 분쇄는 SRM 시료가 응력경로에 따라 힘을 받아 파괴에 이르는 모든 단계에서 평가가 가능해진다. 부가적으로, 암반의 강도와 취성도에 관한

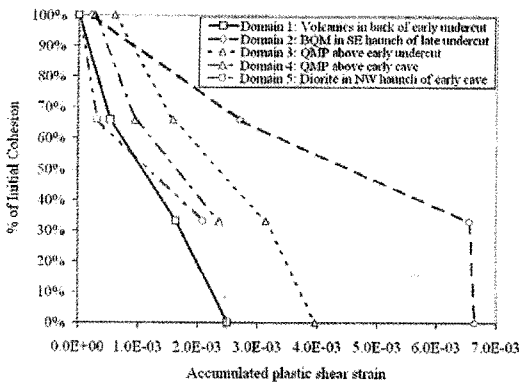


Fig. 4. Estimates of brittleness obtained from testing of five different SRM samples, Domain 1-5. (Steep lines indicate high brittleness - i.e. less plastic strain required to lose cohesion)

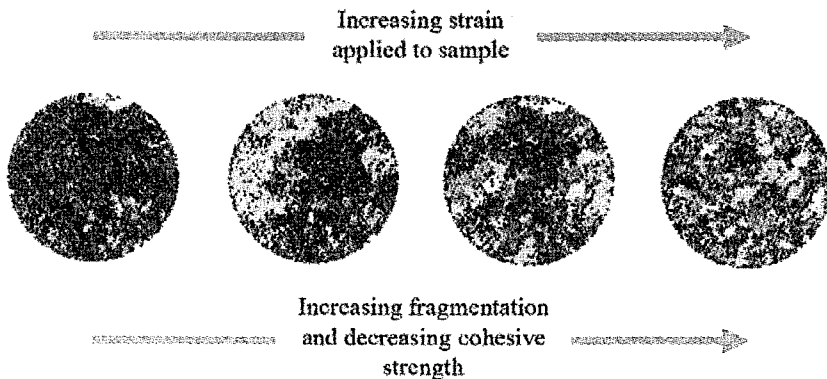


Fig. 5. Evolution of fracturing in SRM sample on a vertical cross-section through the centre. Solid colours denote contiguous blocks of bonded material, i.e. isolated intact rock blocks

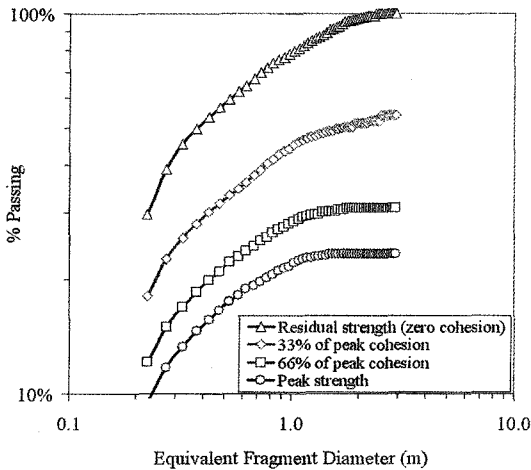


Fig. 6. Evolution of isolated block size distribution within the SRM sample as it passes from peak to residual strength

결과들은 주변의 굴착작업이나 대규모 단층, 지형에 의한 영향을 고려할 수 있는 대규모의 연속체 모델해석의 입력자료로 활용될 수 있다. 종합적으로 보면 SRM 접근법은 변형 및 파괴과정에 대한 이해를 엄청나게 증진시켰으며, 암반의 변형과 강도를 평가할 수 있는 합리적인 골격의 개발에 대한 기초를 제공한다.

3. 검토

Fairhurst 교수는 본 논문 발표에서 지금까지 지하구조물의 안정성 해석 및 평가에 사용되고 있는 암반분류에 의한 경험적 관계를 이용한 수식의 한계를 매우 간단하게 지적하고 있다. 그러나 경험적 관계를 이용한 방법론은 다음과 같은 문제점들을 내포하고 있다고 판단된다(박의섭, 2004, 개별요소법을 이용한 절리암반의 물성 및 파괴후 거동 평가).

- 경험적 관계의 유효성: 경험적 관계들은 기본 역학으로부터 유도된 것이 아니기 때문에, 그것들이 최초로 개발된 상황과 유사한 환경에서만 유효하다. 특히 건설 환경이 상대적으로 독특한 것이라면, 경험적 접근은 사전에 확인할 수 없는 요소를 많이 포함하고 있다.

- 응력 의존적인 변수: 현지 암반의 역학적 물성은 일반적으로 응력 의존적인 관계로 어떠한 경험적인 관계도 암반 응력값을 직접 이용하지는 않는다. 다만, Q 시스템은 SRF 요소를 통하여 응력 의존성을 고려하지만, RMR 시스템은 암반 응력이 포함되어 있지 않다. 따라서 변형계수와 같이 결정되어야 할 입력 변수들이 응력 수준이 변하는 수치해석에 사용될 때는 의문의 여지가 있다.

- 입력 자료의 불확실성과 공간적 변화: 암반내 Q 또

는 RMR 분포를 예측함에 있어서 여러 가지 불확실성이 존재하는데, 이것은 알려진 입력 자료를 가지고 물성을 평가하는 방법에 내포된 불확실성과 입력 자료의 3차원적 분포에서의 불확실성으로부터 생겨난 것이다. 이는 다른 영역내의 Q와 RMR 예측에서의 공간적 변화성은 주어진 자료의 통계학적 분포로부터 평가되고, 예측의 신뢰도는 사용된 자료의 양을 근거로 판단되기 때문이다.

이러한 단점들에 의하여 경험적인 관계를 이용하는 방법은 대상지역내의 현지 암반조건을 정확히 반영하지 못하는 매우 중요한 결점을 갖고 있다. 다시 언급하자면 현지 암반의 역학적 물성을 추정하기 즉, 암반의 역학적 거동에 가장 중요한 요소인 암종별 신선암의 거동특성, 불연속면의 역학적 특성 및 기하학적 특성(불연속면의 방향 및 빈도 등)에 대한 직접적인 반영이 어렵다는 것이다. 그럼에도 불구하고 경험적 수식이 오랫동안 지하구조물의 설계분야에 폭넓고 사용되고, 현지 암반의 역학적 물성을 평가하는 중요한 수단이었던 것은 이를 대체할 방법이 개발되지 않았기 때문이다.

현지 암반물성을 이론적-수치해석적 기법을 통하여 계산하는 방법은 이러한 경험적 방법의 단점을 극복할 수 있다고 판단된다. Fairhurst 교수가 연구하고 있는 SRM 접근법은 이러한 문제점에서 출발하며 PFC-3D를 활용하고 있다. PFC는 압축재료의 변형 및 파괴거동이 변화하는 미세구조의 함수로 표현되는 수치해석 프로그램으로서 암반의 역학적 물성을 신선암 및 불연속면의 역학적 거동과 불연속면의 기하학적 형상으로부터 계산하는 것이다. 이는 특정한 구성방정식 및 파괴기준을 적용하는 기존의 연속체(FLAC) 및 불연속체(UDEC) 해석 프로그램과 큰 차이점이다. 따라서 SRM 접근법은 Fairhurst 교수가 강조하였듯이 현지 암반의 여러 가지 특성을 구현할 수 있는 방법이다. 이 기법은 절리의 미세구조를 고려할 수 있으며 주변에 작용하는 모든 응력을 적용할 수 있는 큰 장점을 지니고 있다. 또한 암반의 시간의존성 거동특성을 고려할 수 있으며 온도나 공극압에 의한 변화를 예측할 수 있는 잠재력을 지닌 방법이 될 것이다. 이러한 무한한 가능성을 지니고 있는 SRM 기법은 향후 지하구조물의 안정성 해석 및 평가에 널리 활용될 것으로 판단된다.

사 사

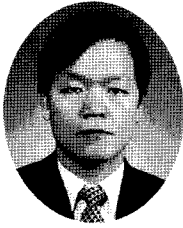
본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “고심도 지하연구실험실 구축 및 실증실험연구” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Barton N., 1976, "The Shear Strength of Rock and Rock joints." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;13:255-279.
2. Barton N. and Stephansson O., 1990, "Proceedings of the International Symposium on Rock Joints", 4-6 June, Loen, Norway, AA Balkema, Rotterdam.
3. Barton N., 1993, "Physical and Discrete Element Models of Excavation and Failure in Jointed Rock." In : *Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering*, Pasamehmetoglu et al, (eds.), Balkema, Rotterdam.
4. Bobet A., 1997, "Fracture coalescence in rock materials : experimental observations and numerical predictions", Sc.D. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
5. Bobet A. and Einstein H.H., 1998a, "Fracture Coalescence in Rock-type Materials under Uniaxial and Biaxial Compression", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;35: 863 -888.
6. Bobet A. and Einstein H.H., 1998b, "Numerical modelling of fracture coalescence in a model rock material", *Int. J. Fract.*;92:221-252.
7. Brown E.T., 2003, "Block Caving Geomechanics (The International Caving Study I, 1997-2000)", University of Queensland, JKMRM Monograph Series in Mining and Mineral Processing, Vol. 3. Indooroopilly, Australia.
8. Byerlee J.D., 1990, "Friction, overpressure and fault normal compression", *Geophys. Res. Lett.*;17:2109-2112.
9. Byerlee J.D., 1992, "The change in orientation of subsidiary shears near faults containing pore fluid under high pressure", *Tectonophysics*;211:295-303.
10. Colmenares L.B. and Zoback M.D., 2002, "A Statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;39(6):695-729.
11. Diederichs M.S., 1999, "Instability of Hard Rockmasses : The Role of Tensile Damage and Relaxation." Ph.D. Thesis, University of Waterloo.
12. Dyskin A.V., Germanovich L.N., Jewell R.J., Joer H., Krasinski J.S., Lee K.K., Roegiers J-C, Sahouryeh E. and Ustinov K.B., 1994a, "Study of 3-d mechanisms of crack growth and interaction in uniaxial compression", *ISRM News Journal*, 2(1), 17-24.
13. Dyskin A.V., Jewell R.J., Joer H., Sahouryeh E. and Ustinov K.B., 1994b, "Experiments on 3-d crack growth in uniaxial compression", *Int. J. Fract.*, 65, R77-R83.
14. Einstein H.H. and Dershowitz W.S., 1990, "Tensile and Shear Fracturing in Predominantly Compressive Stress Fields - A Review." *Engng. Geol.*;29, 149-172.
15. Einstein H.H. and Meyer T., 1999, "Puzzles in Rock." Müller Lecture, Proc. Int'l. Congress of the ISRM, Vol. 3, Paris.
16. Fairhurst C., Damjanac B. and Brandshaeg T., 2007, "Rock Mass Strength and Numerical Experiments." 35th Geomechanics Colloquium, Tech. Univ. Freiberg, Institutsheft Geotechnik 2006-5.
17. Fardin N., 2003, "The effect of scale on the morphology, mechanics and transmissivity of single rock fractures", Ph.D. Thesis, KTH, Stockholm, Sweden.
18. Germanovich L.N., Salganik R.L., Dyskin A.V. and Lee KK 1994, "Mechanisms of brittle fracture of rock with multiple preexisting cracks in compression", *Pure and Applied Geophysics (PAGEOPH)*;143(13):117-49.
19. Germanovich, L.N. and Dyskin AV 2000, "Fracture Mechanisms and Instability of Openings in Compression.", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;37:263-284.
20. Gray J.P., Monaghan J.J. and Swift R.P., 2001, "SPH Elastic Dynamics", *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng.*;190:6641-6662.
21. Hajiabdolmajid V. and Kaiser P.K., 2003, "Brittleness of Rock and Stability Assessment in Hard Rock Tunneling.", *Tunn. & Underground Space Tech.*;18:35-48.
22. Hudson J.A., Brown E.T. and Fairhurst C., 1972, "Shape of the Complete Stress-Strain Curve for Rock." In : Cording E.J. (ed.) *Stability of Rock Slopes (Proceedings of the 13th U.S. Symposium on Rock Mechanics, University of Illinois at Urbana, 1971)*, pp. 773-795. New York:ASCE.
23. Itasca Consultants SAS, 2006, "3FLO, Version 2.2" Lyon, France: ICSAS.
24. Itasca Consulting Group Inc, 2003, "PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions)" Version 3.0, Minneapolis: ICG.
25. Jing L., 2003, "A Review of Techniques, Advances and Outstanding Issues in Numerical Modelling for Rock Mechanics and Rock Engineering", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;40:283-353.
26. Kemeny J.M. and Cook N.G.W., 1991, "Micromechanics of deformation in rocks", In: Shah S. P. (ed) *Toughening mechanisms in quasi-brittle materials*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 155-188.
27. Kemeny J.M., 2003, "Time-Dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities: a fracture mechanics approach", *Rock Mech. Rock Engng.*;36:27-38.
28. Lockner D.A. and Madden T.R., 1991a, "A multiple crack model of brittle fracture - 1. non-time-dependent simulations." *J. Geophys. Res.*;96:19623-19642.
29. Lockner D.A. and Madden T.R., 1991b, "A multiple crack model of brittle fracture - 2. time-dependent simulations", *J. Geophys. Res.*;96:19643-19654.
30. Lockner, 1995, "Rock Failure", In: *Rock Physics and Phase Relations, "A Handbook of Physical Constants"*, AGU.
31. Mas Ivars D., 2007, "Bonded-Particle Model for the Deformation, Yield and Failure of Jointed Rock Masses", Ph. D. Thesis, KTH, Stockholm, Sweden, In prep.
32. Monaghan J.J., 2000, "SPH without a Tensile Instability", *J. Computat. Phys.*;159:290-311.
33. Napier J.A.L. and Malan D.F., 1997, "A Viscoplastic Discontinuum Model of Time-Dependent Fracture and

- Seismicity Effects in Brittle Rock”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;34:1075-1089.
34. Napier J.A.L. and Hildyard M.W., 1992, “Simulation of Fracture Growth around Openings in Highly Stressed, Brittle Rock”, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*;92:159-168.
 35. Park E-S, Martin C.D. and Christiansson R., 2004, “Simulation of the Mechanical Behavior of Discontinuous Rock Masses Using a Bonded-Particle Model.” In: Yale et al, (eds) *Gulf Rocks 2004: Rock Mechanics Across Borders and Disciplines (Proceedings of the 6th North American Rock Mechanics Symposium, Houston)* Paper No. 04-480.
 36. Paterson M.S. and Wong T-f., 2005, “Experimental rock deformation-the brittle field.” 2nd Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.347.
 37. Pierce M., Mas Ivars D., Darcel C., Cundall P.A., Young R.P., Reyes-Montes J. and Pettitt W., 2006, “Six Monthly Technical Report, Caving Mechanics, Sub-Project No. 4.2: Research and Methodology Improvement, & Sub-Project 4.3, Case Study Application.” ICG, Report to Mass Mining Technology Project, 2004-2007, September.
 38. Pierce M., Mas Ivars D., Cundall P.A. and Potyondy D.O., 2007, “A synthetic rock mass model for jointed rock”, NARMS, Vancouver, In press.
 39. Pinto de Cunha A. (Ed.), 1990, “Scale effects in rock masses”, A. A. Balkema, Rotterdam, p. 339.
 40. Potyondy D.O. and Cundall P.A., 2004, “A Bonded-Particle model for Rock”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;41:1329-1364.
 41. Potyondy D.O., 2006, “Simulating stress corrosion with a bonded-particle model for rock”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;doi:10.1016/j.ijrmmms.2006.10.002.
 42. Reyes-Montes J., Pettitt W. and Young R.P., 2007, “Validation of a Synthetic Rock Mass Model Using Excavation Induced Micro-seismicity”, NARMS, Vancouver, In press.
 43. Ribacci R., 2000, “Mechanical tests on pervasively jointed rock material: Insight into rock mass behaviour.” *Rock Mech. Rock Engng.*;22(4):243-266.
 44. Rummel F. and Fairhurst C., 1970, “Determination of the Post Failure Behavior of Brittle Rock Using a Servo-Controlled Testing Machine.” *Rock Mech.*;2(4):189-204.
 45. Sagong M. and Bobet A., 2002, “Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;39:229-241.
 46. Scavia C., 1992, “A Numerical Technique for the Analysis of Cracks Subjected to Normal Compressive Stresses”, *Int. J. Numer. Methods Engng.*;33:929-942.
 47. Scavia C., 1995, “A Method for the Study of Crack Propagation in Rock Structures”, *Géotechnique*;45:447-463.
 48. Secor D.T., 1965, “Role of fluid pressure in jointing”, *Am. J. Sci.*;263:633-646.
 49. Secor D.T., 1968, “Mechanics of natural extension fracturing at depth in the Earth’s crust”, *Can. Geol. Surv. Pap.*;68-52:3-48.
 50. Sellers E. and Napier J.A.L., 1997, “A Comparative Investigation of Micro-Flaw Models for the Simulation of Brittle Fracture in Rock”, *Computat. Mech.*;20:164-169.
 51. Shen B., Stephansson O., Rinne M., Lee H.S., Jing L. and Roshoff K., 2004, “A Fracture Propagation Code and Its Applications to Nuclear Waste Disposal”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;41, Special Issue, Proceedings of the ISRM SINOROCK 2004 Symposium. CD, Paper 2B 02.
 52. Stephansson O. (Ed.), 1985, “Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints”, 15-20 September, Björkliden, Sweden, Centek Publishers.
 53. Trollope DH 1968, “The Mechanics of Discontinua or Clastic Mechanics in Rock Problems.” In: Stagg KG and Zienkewicz OC (eds.), *Rock Mechanics in Engineering Practice*, Wiley (London), pp 275-320.
 54. Wong T-f, 1982, “Effects of temperature and pressure on failure and post-failure behavior of Westerley granite”, *Mechanics of Materials*;1:3-17.
 55. Wong R.H.C., Chau K.T., Lin P. and Tang C.A., 2001, “Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-Part I: experimental approach”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*;38:909-24.

박철환



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 지반안전연구
부 책임연구원

박의섭



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 042-868-3098
E-mail: espark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구
부 선임연구원

신중호



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학박사
Tel: 042-868-3242
E-mail: jhsynn@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
책임연구원