

## 침수-하중 조건에서의 결정질 화강암의 열적, 역학적 물성 변화

허 진, 이재철, 서정범, 박승훈, 박정찬, 권상기\*

## Variation of Thermal and Mechanical Properties of Crystalline Granite under Saturated-Loading Condition

Jin Heo, Jae Chul Lee, Jung Bum Seo, Seung Hun Park, Jung Chan Park, Sangki Kwon\*

**Abstract** It is well known that rock properties can be affected by loading in underground condition. In the case of flooded underground mine or tunnels, rock properties variation due to loading might be different from the loading in dry condition. In order to verify the influence of saturated loading condition on rock properties, various laboratory tests had been carried out. Loading on the rock specimen was controlled to be ranged in between 20 ~ 80% of UCS. By comparing the variation of thermal, mechanical, and physical properties of rock specimens under the same load in saturated and dry condition, it was possible to find that the rock properties can be more significantly disturbed in the saturated loading condition than in dry loading condition.

**Key words** Saturated rock, Thermal conductivity, Rock strength, Saturation-loading Condition, Porosity

**초 록** 지하 하중 조건에서 암석물성이 변한다는 것은 잘 알려져 있다. 따라서 침수상태에 놓인 폐광산이나 폐공동에서의 하중에 따른 암석 물성변화와 일반적인 건조상태의 하중에 따른 물성 변화와의 관계에 대하여는 연구가 필요하다. 침수-하중 조건에서의 암석 물성 변화를 파악하기 위해 다양한 실험실 실험이 실시되었다. 암석에 가해지는 하중은 단축압축강도의 20~80%로 조절하였다. 침수 및 건조 조건에서 동일한 하중을 가할 경우 발생하는 암석의 열적, 역학적, 물리적 물성 변화를 비교함으로써 건조조건에 비해 침수조건에서의 물성변화가 더 크게 일어남을 알 수 있었다.

**핵심어** 포화암석, 열전도도, 암석강도, 침수-하중 조건, 공극률

## 1. 서 론

국가 경제 성장과 연계된 산업화의 진행에 따라 지하 공간의 개발 필요성은 지속적으로 증가하고 있다. 지하 공간의 경우, 지표로부터의 격리성, 향온, 향습, 방음, 차폐특성 등으로 인하여 국가기간사업과 같이 장기적인 목적으로 활용 될 수 있다. 국내에서는 자원개발 뿐 아니라 암반 내에 압축공기 저장 발전시스템(김형목 외, 2009), 극저온 지하 유류 및 액화가스저장소 활용(박의

섭 외, 2008), 지하 양수발전소(하진규, 1998), 방사능 폐기물 처분장 등 다양한 목적의 기간사업을 위해 지하 공간이 이용되고 있다. 개발 가능한 토지의 절대적 부족과 지가상승에 따른 토지 보상비 문제 등으로 인하여 국토자원을 보다 효율적으로 이용할 수 있는 방안을 마련하는 것에 대한 관심이 증대 되고 있다. 따라서 기존의 광산을 재개발하거나 용도 폐기된 지하공간을 다른 용도로 활용하는 것에 대한 수요가 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 과거 국내 산업에서 중요한 역할을 담당하다가 광산업의 침체와 매장량 고갈 등의 이유로 운영이 중단된 폐광산을 활용하기 위한 노력이 필요할 것이다. 국내 금속광산의 경우 한계 품위 미달로 인하여 97.5% 운영 중단 되었으나, 최근 지하공간의 재활용을 통한 지역사회의 문화산업단지 조성 및 국제 광물가격의 변화에 따라 심부 광맥의 재개발에 대한 관심이 증가하고 있다.

**Received:** Jun. 19, 2014

**Revised:** Jun. 27, 2014

**Accepted:** Jun. 27, 2014

**\*Corresponding Author:** Sangki Kwon

(Tel) +820328607554, (Fax) +820328727550

E-Mail) kwonsk@inha.ac.kr

INHA UNIVERCITY, 100, Inha-ro, Nam-gu, Incheon, Korea

지하공간은 수백 미터 심도까지 암반의 물성과 상태, 암종과 응력조건 등을 고려하여 다양한 활용이 가능하며, 고심도 암반에 위치하는 지하구조물의 경우 심도에 따른 하중 변화는 구조물 주변에 균열의 발생을 시켜 역학적 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있을 것이다. 특히 폐광산이나 폐공동과 같은 지하공간에서 배수가 적절하게 이루어지지 않을 경우 암반은 장기적으로 침수조건에 놓이게 된다. 이러한 배수 시스템의 부재로 인한 지하수의 유입은 암반물성 변화를 가져올 수밖에 없으며(백영준, 2011) 이와 더불어 암석 내 수분은 암석의 탄성계수와 강도를 감소시킴으로써 미세균열의 전파를 촉진시킬 수도 있다(Vásárhelyi 외, 1999). 하중증가에 따른 미세균열의 증가와 함께 포화조건에 따른 입자간의 결합력 감소에 의해 암석의 강도 저감 현상이 발생할 수 있다(김영찬, 2013). 따라서 장기적인 지하공간의 활용을 위해서는 침수-하중 조건에서의 암반의 물성변화에 관련된 연구가 필요하다. 국내에서는 장기적인 수압작용에 따른 강도의 안정성(윤용균 외, 2011) 및 갱내 지보설계를 위한 안정성 평가(정소길, 2005)에 대한 연구는 있어왔지만, 침수조건과 심도를 동시에 고려한 연구는 없었다.

암석은 복합 재료적 특성상 구성광물의 종류에 따라 다양한 특징을 갖는다. 암석 물성에 관한 연구결과에 따르면, 암석의 특성은 다양한 지질 시대를 거치면서 내외부적으로 영향을 받는다(Kranz, 1979, Reyes 외, 1991). 암석 내부를 구성하는 입자의 배열 및 방향성과 같은 구조적 특징, 암석 내부에 존재하는 미세 균열의 분포형태 등이 시료의 물리적 및 역학적 특성을 나타내는 중요한 인자로 보고된 바가 있다(Kranz, 1979, 박형동, 1995, 이상은 등, 1999, 원연호 등, 2004, 정형래와 김중우, 2006). 외부적 요인에 의한 암석의 물성변화 연구는 침투수의 용탈 작용에 의한 교질물질의 접착력 저하(조홍제 외, 2013), 하중 증가에 따른 공극 내 물의 썩기 작용으로 인한 균열확장(Romana 외, 2007), 그리고 재하속도 증가에 따른 강도의 증가(정우진, 2010) 등이 있다. 고준위 방사성폐기물 처분장의 경우, 방사성 붕괴열과 지하수의 유입에 의해 암반특성에 복합적인 변화가 발생할 것으로 예상된다(조원진 외, 2010). 본 연구에서는 다양한 실험실 실험을 통해 침수-하중 및 건조-하중 조건에서의 암석의 열적, 역학적, 물리적 물

성 변화를 비교 분석함으로써 향후 침수-하중 조건에 놓인 지하구조물의 안정성을 평가하는 기초 자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 시료제작

본 연구에서는 대전 원자력연구원 내에 건설된 지하 처분 연구시설인 KURT(Korean Underground Research Tunnel)에서 제공받은 화강암을 이용하여 실험을 실시하였다. 연구시료의 일축압축강도는 KURT에서 측정된 12개의 화강암 시료에 대한 일축압축강도(Table 1)의 평균인 71.39 MPa를 이용하여 추정하였다(권상기 외, 2004). 하중의 영향을 평가하기 위해 일축압축강도의 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%에 해당하는 하중을 가할 수 있도록 7개의 NX 시추코어를 10 cm 길이로 성형하였다.

### 2.2 건조-하중 및 침수-하중 조건

동일한 하중이 가해질 때 침수 및 비침수 환경에서의 암석 물성 변화를 파악하기 위해 시료의 절반은 물속에 놓이도록 하고 나머지 절반은 물밖에 놓인 상태에서 크립시험기를 사용하여 24시간 동안 주어진 하중이 가해질 수 있도록 하였다. 이후 해당 시료를 건조와 포화조건으로 비교하기 위해 암석절단기를 이용하여 침수-하중 조건에 놓인 부분과 건조-하중 조건에 놓인 부분을 나누었다. 절단 후 각 시료의 직경 대 길이 비는 1:2.2~2.5 사이에 있었다(Fig. 1). Fig. 1에서 건조-하중 시료는 A, 침수-하중 시료는 B로 표시되어 있다. 침수-하중 시료 중 A, B6에는 석영맥 존재하였고 나머지 시료들은 육안으로 볼 때 구성광물에 있어 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 물리적, 공학적 물성이 유사한 시료에 대하여 실험을 하기위해 석영맥이 존재하는 시료는 분석에서 제외하였다. 각각의 시료에 대해 밀도, 공극률, 열전도도, 인장강도를 측정, 비교하였다.

### 2.3 밀도 측정

본 실험에서는 암석 시료의 공극률 및 밀도 측정을 KSRM에서 제시하는 표준 밀도 및 부피 측정방법을 채택했다. 부피 환산을 위해 상온(25°C)기준에서 물의 밀

**Table 1.** Experiment results about uniaxial compressive strength of crystalline granite

| 공번                         | 1   | 2   | 3    | 4   | 5   | 6   | 7    | 8   | 9   | 10  | 11  | 12   |
|----------------------------|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|
| UCS (Kgf/cm <sup>2</sup> ) | 111 | 909 | 1271 | 518 | 827 | 867 | 1094 | 264 | 671 | 735 | 434 | 1034 |

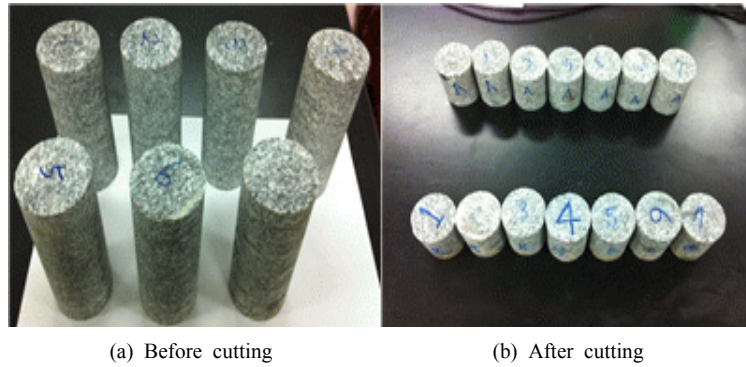


Fig. 1. Rock specimens for testing

도( $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$ )를 적용하였고, 암석시료를 24시간 이상 포화 시킨 이후, 매스실린더를 이용하여 포화시료의 부피를 측정하였다. 건조시료의 질량은 24시간 이상  $105^\circ\text{C}(\pm 3^\circ\text{C})$ 를 유지할 수 있는 조건으로 건조시킨 후 중량 저울을 이용하여 소수점 둘째 자리까지 측정하였다. 밀도는 식 (1), (2)를 이용하여 측정하였고, 최소 5 개 이상의 시험편에 대한 평균밀도( $2593.7 \text{ kg/m}^3$ )를 계산하였다.

$$M = M_s + M_w \quad (1)$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_{sat}} (\text{kg/m}^3) \quad (2)$$

여기서  $M$ 은 시험편의 전체 질량,  $M_s$ 는 건조시료의 질량,  $M_w$ 는 물의 질량,  $\rho_s$ 는 밀도,  $V_{sat}$ 는 포화상태의 전체 시료 부피를 의미한다.

#### 2.4 공극률 측정

본 실험에서 공극률의 경우 암석시료에서 서로 연결된 공극의 부피인 유효 공극(Effective porosity)을 측정하였다. 식 (3)과 (4)를 통해 공극의 부피와 시료의 겉보기 부피를 구한 후, 식 (5)를 이용해 0.01%까지 유효 공극률을 산출하였다. 겉보기 부피는 시료를 포화시켜 매스실린더에 넣었을 때 증가한 물의 부피이며 이는 암석시료의 고체성분, 내부를 차지하는 물, 미세 공극에 갇힌 공기부피로 생각하였다.

$$V_v = V_w + V_a = V_{sat} - V_s = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad (3)$$

$$V = V_s + V_v \quad (4)$$

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100(\%) \quad (5)$$

여기서  $V_v$ 는 공극의 부피,  $V_w$ 는 공극속의 물의 부피,  $V_a$ 는 공기의 부피,  $V_{sat}$ 는 포화된 암석시료의 부피,  $V_s$ 는 암석시료의 부피,  $M_{sat}$ 는 표면건조 포화질량,  $M_s$ 는 암석시료의 질량,  $V$ 는 시험편의 겉보기 부피,  $n$ 은 유효 공극률을 나타낸다.

#### 2.5 열전도도 측정

본 실험에서 열전도도 측정을 위해 ISOMET 2114를 사용하였다. ISOMET 2114는 물질을 통과하는 열의 확산에 따라 발생하는 펄스로 인한 열적 반응의 시간변화를 분석한다. Fig. 2와 같은 실험 장치는 접촉식 프로브를 이용하여 직접적으로 열전도도(thermal conductivity)와 체적열용량(volumetric heat capacity)을 측정할 수 있고, 전기적 에너지에 의해 발생하는 접촉면에서의 열의 흐름을 기기에 입력된 보정상수에 의해 평균치로 나타낸다. 열전도도 실험에서 사용된 프로브의 측정 범위는  $2.0 \sim 6.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 이며  $-15 \sim +50^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서



Fig. 2. Thermal conductivity device (ISOMET 2114)

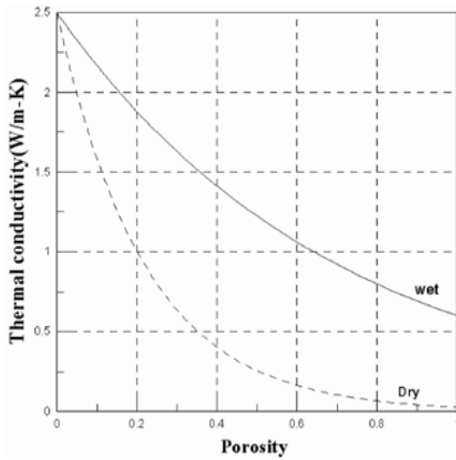


Fig. 3. Porosity effect on thermal conductivity derived by a geometric model(Woodside and Messmer, 1961)

측정이 가능하고 5% (0.001 W/m·K)의 오차한계를 갖는다. 열전도도 계수( $\lambda$ )값 중에서 5%의 허용오차를 초과하는 값들은 실험적으로 사용되기 보다는 공학적으로 적용하기에 적합하다고 판단하였다. 건조 시료의 열전도도는 상온(25°C)에서 측정하였고 포화시료의 경우 시료표면의 온도교란을 방지하기 위해 표면의 수분을 제거한 후에 측정을 실시하였다. 암석의 열전도도 측정에 있어서 하중과 침수조건이 미치는 물성변화를 확인하고자 하였다. 열전도도에 미치는 온도의 영향을 최소화하기 위해 25~26°C 사이의 일정한 온도에서 측정이 이루어질 수 있도록 하였으며, 이를 위해 직접 제작한 단열박스 내부에 접촉식 프로브와 시료를 넣고 측정하였다.

암석의 열전도도에 영향을 주는 주요 인자는 포화조건, 온도, 공극률, 구성광물, 입도분포, 밀도 등 여러 가지 요인들이 있으며 본 실험에서 예상되는 하중 증가에 따른 열전도도 변화는 균열 발생에 따른 공극률 증가와 관계될 것으로 예상된다. 공극률과 열전도도 간의 상관관계를 나타내는 Fig. 3은 포화조건과 건조조건에서 측정된 열전도도에 큰 차이가 나타남을 보여준다.

### 2.6 반발계수 측정

슈미트 해머 실험은 대상의 경도를 측정하는 비파괴 실험으로 시료의 파괴 없이 화강암 시료의 반발경도(Rebound hardness)와 일축압축강도 사이의 관계식을 통해 연구시료의 일축압축강도 추정을 목적으로 수행되었다. 실내 실험을 위한 L-Type형 슈미트 해머를 이용하여 A, B시료 표면에 대해 90° 방향으로 암석시료의 반발계수를 측정하였으며 슈미트 해머 타격에 의한

시료의 미세균열 발생을 줄이기 위하여 측정은 시료 당 2회(건조조건, 포화조건)만 실시하였다. 즉, 각 시료에 대해 건조 상태에서 1회, 포화 상태에서 1회 타격하여 이수근(1995)이 제시한 건조 시료의 상관관계식 (6)과 포화 시료의 상관관계식 (7)을 적용하여 일축압축강도를 추정하였다.

$$\text{Log } \sigma_d = 2.32481 + 0.01641 R_d \quad (6)$$

$$\text{Log } \sigma_s = 1.80601 + 0.02324 R_s \quad (7)$$

여기서,  $\sigma_d$ 는 건조상태의 일축압축강도,  $R_d$ 는 건조상태의 슈미트해머 반발계수,  $\sigma_s$ 는 포화상태의 일축압축강도,  $R_s$ 는 포화상태의 슈미트해머 반발계수를 나타낸다.

### 2.7 간접인장강도 측정

미소균열의 전파는 압축시험의 경우 시료 파괴 이전부터 시작되어 점차 거시적인 균열로 발전되지만 인장시험의 경우 균열 전파와 파괴가 거의 동시에 일어난다. 이처럼 암석시료는 인장력에 매우 취약한 특성을 보이기 때문에(Brace, 1960) 간접인장강도 실험을 통해 파괴면상에 균열 발생이 미치는 영향을 강도저감의 차이로 확인할 수 있으리라 사료된다. 또한 동일 시료에 대한 간접인장강도의 파괴면은 일축압축강도의 파괴면보다 넓기 때문에 간접인장강도의 측정은 일축압축강도의 측정과 달리 균열 분포에 의한 강도변화에 더 많은 영향을 받을 수 있다. 따라서 각 시험편에 대해 간접인장강도 시험을 실시하였다. 편마 구조를 가진 시편의 경우, 편마 구조의 결과 수직되는 방향으로 가압하도록 함으로써 이방성에 의한 영향이 배제될 수 있도록 하였다. UTM(Universal Testing Machine)기를 이용하여 하중을 가할 때 하중재하속도에 의한 영향을 최소화하기 위해서 국제암반공학회(ISRM)의 규정에 따라 시료에 1.0N/mm<sup>2</sup>s의 일정한 재하속도로 하중을 가했다.

### 3. 연구 결과 및 논의

#### 3.1 공극률

초기 성형된 시료들 사이의 공극률 차이( $\phi_{An} - \phi_{Bn} \approx 0, n: 1 \sim 7$ )가 적다고 가정했을 때, 하중이 증가함에 따라 Fig. 4에서의 건조조건인 A시료 군과 침수조건인 B시료 군의 공극률 변화양상을 비교하였다. 하중이 증가함에 따라 미세 균열의 발생으로 공극률은 증가하는 경향을 나타내며 증가량은 포화조건에서 약 1.2배 높게 나타났다. 포화상태의 28, 35 MPa의 하중에서 공극률

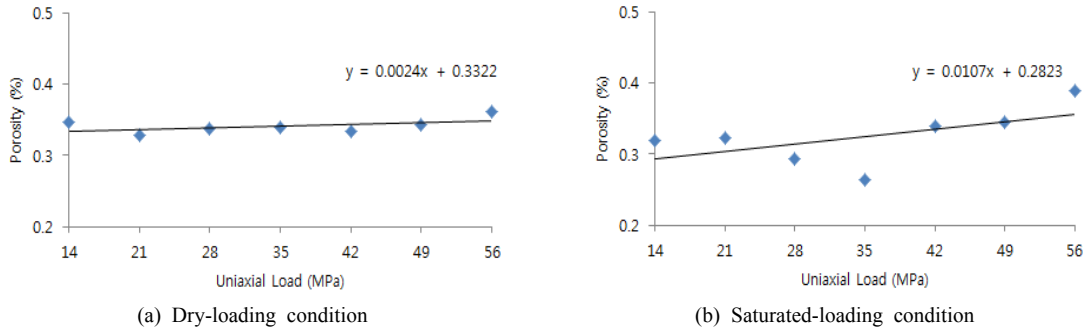


Fig. 4. Porosity variation with the increase of load

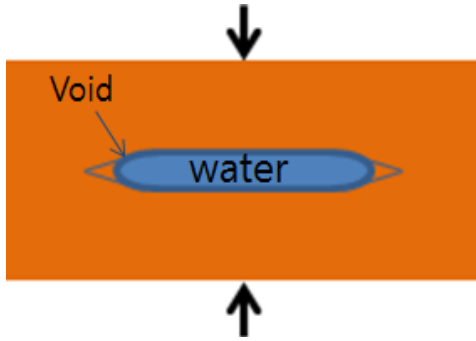


Fig. 5. Schematic diagram of wedge action of pore water

우 공극 내 존재하는 물이 하중증가에 따라 균열 천부를 기점으로 썩기작용(Fig. 5)을 하여 공극 구조의 파괴를 가져오는 것으로 생각해 볼 수 있다.

3.2 암석강도 추정

일축압축강도는 슈미트해머 반발계수에 대한 상관관계식(식 6과 7)을 통해 Fig. 6과 같이 하중 증가에 따라 추정된 일축압축강도 변화를 나타내었다. 침수-하중 조건의 시료군 B는 하중 증가에 따라 일축압축강도는 점차 감소하는 경향을 보였다(Fig. 6(b)). 이에 반해 건조-하중 조건의 시료들은 상대적으로 하중증가에 따른 강도의 변화가 미미하였다(Fig. 6(a)). 건조-하중과 침수-하중 조건 모두에서 포화조건에서 추정된 일축압축강도는 건조조건에 얻어진 일축압축강도에 비해 낮게 나타났다. 포화조건에서는 암석을 구성하는 광물입자를 고정시켜주는 교질물질의 용해 및 용탈작용을 일으켜, 이로 인한 입자와의 결속력 약화로 강도 감소 현상(조흥제 외, 2012)이 일어나기 때문으로 사료된다.

이 감소하는 것은 입자 사이의 공극구조 파괴에 따른 유효공극률 저하로 생각되며 이는 추후 공극 구조 변화에 대한 추가 연구를 통해 확인할 필요가 있다. 이후 35 MPa 이상의 하중 증가 단계에서는 공극 내 물이 공극의 천부를 기점으로 균열을 확대시키는 썩기작용(남정만 등, 2008, 정우진 2010)으로 인한 균열증가로 해석될 수 있다. 즉, 포화조건에서는 균열 경계부의 표면에너지가 감소하여 일정 기준 이상으로 하중이 가해질 경

3.3 열전도도

건조(A) 및 침수조건(B)에서 동일한 하중을 받은 시

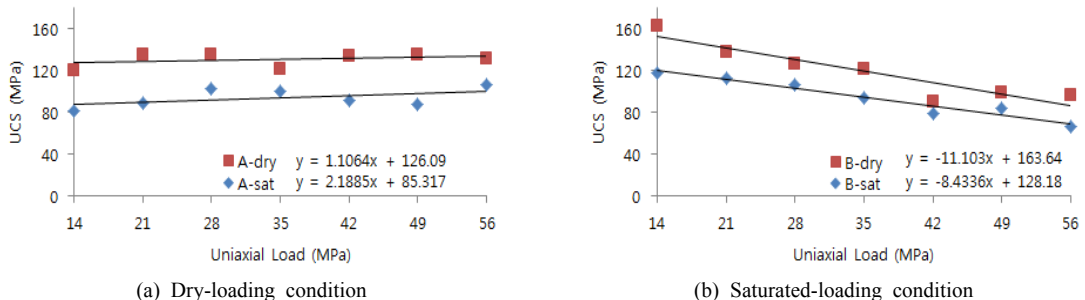


Fig. 6. Variation of UCS estimated from Shumidt hammer test with increase of uniaxial load

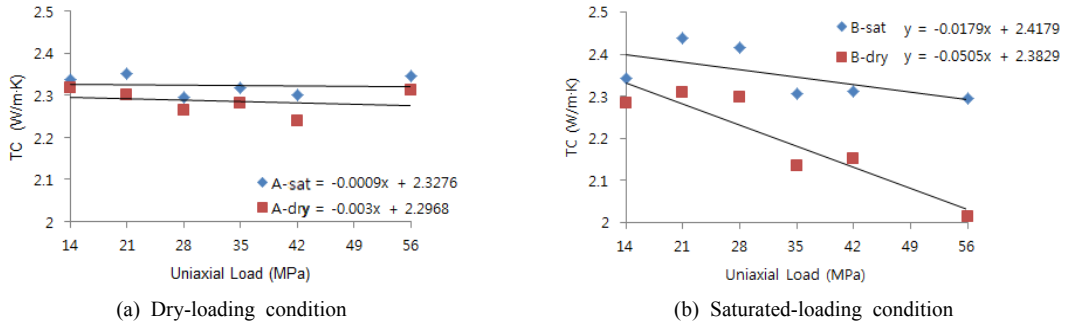


Fig. 7. Variation of thermal conductivity with increase of uniaxial load

료에 대해 건조 및 포화시의 열전도도 측정 결과는 Fig. 7과 같다. 두 하중조건에서 공극률의 영향을 확인하기 위해 하중에 따른 개별 시료의 포화조건과 건조조건의 열전도도차간의 관계는 Fig. 8에 나타내었다. 암석의 공극은 암석보다 현저히 낮은 열전도도를 갖는 물(0.6 W/m·K)이나 공기(0.024 W/m·K)로 대체되기 때문에 공극률이 클수록 암석의 열전도도는 감소하게 되며 함수비가 증가하면 열전도도는 증가하는 경향을 보이게 된다. 또한 균열이 발생하지 않는 상태에서의 하중 증가는 기존의 균열을 밀착하게 함으로써 열전도도의 증가를 가져올 수 있다(이정훈 외, 2011). Fig. 7은 이러한 경향을 잘 보여주고 있다. Fig. 7(a)에서와 같이 시료군 A의 열전도도 측정 결과는 하중 증가에 따른 열전도도 변화가 미미함을 보여준다. 이는 하중에 따라 균열이 발생할 수 있겠지만 하중에 의해 기존 공극이 닫히면서 입자간의 접촉면이 증가가 발생하였기 때문으로 판단된다. 두 하중 조건 A, B에서 포화 열전도도가 건조 열전도도에 비해 상대적으로 높게 나타나는 것은 공극을 채우는 물의 열전도도가 공기 열전도도 보다 높기 때문이며, 하중의 증가에 따라 전반적으로 열전도도가 낮아지는 것은 균열의 발생에 의한 공극률의 증가로 설명할 수 있다. 건조-하중 조건에 놓인 시료에 비해 침수-하중 조건

에 놓인 시료에서 하중 증가에 따른 열전도도 감소 정도가 크다는 것은 침수 조건에서 하중 증가의 영향이 상대적으로 크다는 것을 의미한다. 또한 Fig. 8에서 보듯이 하중 증가에 따라 포화 열전도도와 건조 열전도도의 차이가 커진다는 것은 하중에 의한 균열의 발생이 침수 조건에서 보다 원활하게 일어났다는 것을 의미한다.

전반적으로 측정된 열전도도는 하중의 증가에 선형적으로 변화하는 경향을 보이지만 일부 시료의 경우 튀는 값을 보이고 있는데 이는 시료의 불균질성에 기인한 것으로 판단된다. 퇴적암이나 화산암 같이 큰 공극을 갖는 암석의 경우 공극의 크기가 열전도도 값에 영향을 주는 주요한 요인으로 작용할 수 있지만, 심성암 및 변성암의 경우 공극이 상대적으로 작기 때문에 열전도도에 있어 공극의 영향보다는 구성광물에 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 특히 열전도도가 7.7 W/m·K로 매우 높은 석영의 함량에 따라 열전도도는 영향을 많이 받게 된다(이영민, 2007). 이로 인해 49 MPa 하중에서의 높은 열전도도 측정 결과는 육안으로 관찰되는 석영 맥의 존재 때문으로 판단되어 분석에서 제외하였다.

### 3.4 인장강도

Fig. 9은 하중 증가에 따른 인장강도의 변화를 보여준

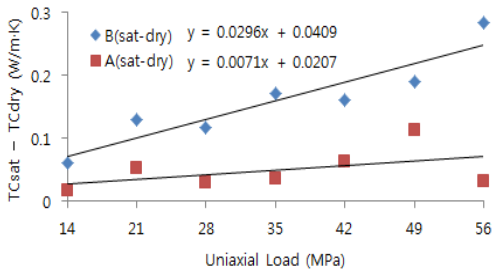


Fig. 8. Variation of difference in thermal conductivity between saturated and dry condition with increase of uniaxial load

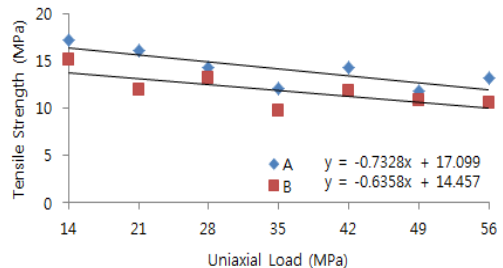


Fig. 9. Variation of tensile strength with increase of uniaxial load

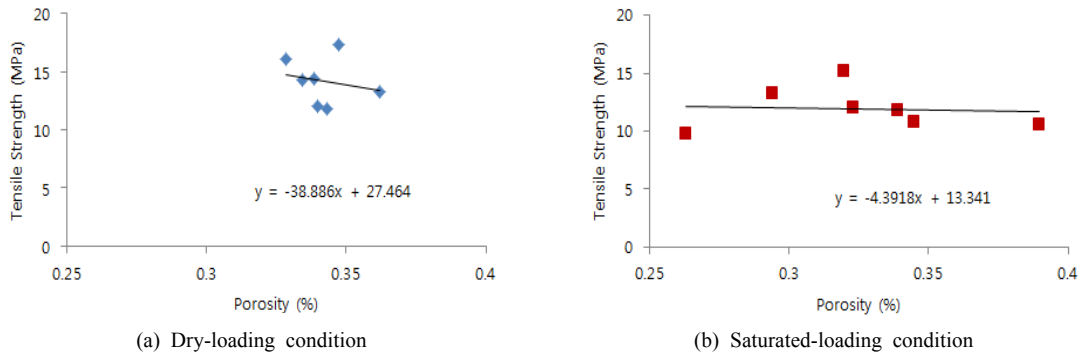


Fig. 10. Correlation between porosity and tensile strength

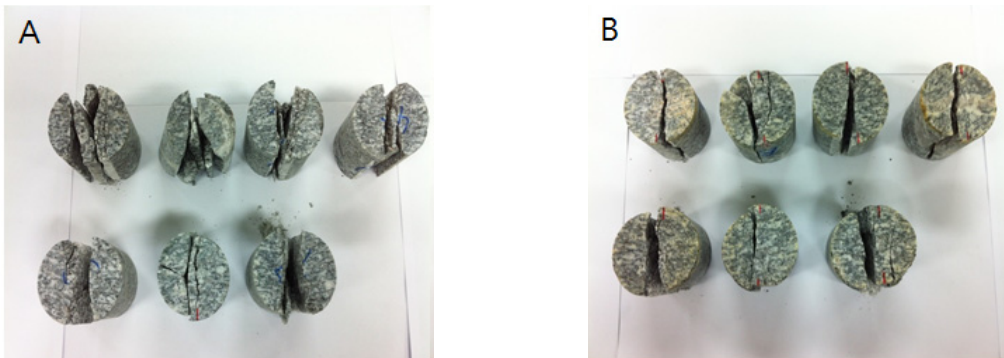


Fig. 11. Tensile fracture surface

다. A와 B시료군 모두에서 하중증가에 따라 인장강도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 인장강도는 시료에 가해진 하중이 증가할수록 감소하였으며 포화조건에서 하중을 가한 시료군 B에서 낮게 측정되었다. B 시료군의 인장강도가 A시료군 보다 낮게 측정된 것은 포화조건에서 하중이 가해질 경우 암석시료에 더 많은 손상이 가해졌기 때문으로 사료된다. 하지만 인장강도와 공극률간의 관계는 Fig. 10에서와 같이 낮은 상관성을 나타냈다. 이는 공극률과 인장강도에는 큰 상관성을 보이지 않는 것으로 기존의 연구결과(김영찬, 2013)로 설명된다. 특히 공극률이 낮은 화강암의 경우, 공극률의 미세한 변화가 인장강도에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단할 수 있다. 이러한 결과를 나타내는 원인을 미세 균열 분포와 파괴면 사이의 일치 여부를 통해서도 생각해볼 수 있다. 균열 방향과 파괴면의 방향이 일치한다면 암석강도를 저하시키는 요인으로 작용하게 될 가능성이 있지만 하중 증가에 따라 인장강도 파괴면과 평행하게 미세균열이 발생하지 않는다면, 인장강도 측정 결과에는 영향이 크지 않을 것으로 예상할 수 있다. Fig. 11은 두 하중 조건에서 파괴된 인장강도 파괴면을 비교하

여 보여준다. 시료군 B는 전반적으로 단일한 파괴면을 보였고, 시료군 A의 경우 파괴면과 평행하게 다수의 균열이 발생하는 특징을 보여주었다. 이는 하중 증가에 따른 미세균열의 발생이 침수-하중조건일 경우와 건조-하중 조건에서 다르게 나타날 수 있다는 것을 간접적으로 보여주는 것으로 추후 균열 발생 메커니즘 측면에서의 추가 연구를 통해 이를 검증해 볼 필요가 있을 것으로 여겨진다. 또한 추가 실험을 통해 시료의 개수를 늘려 경향성에 대한 신뢰도를 확보할 필요가 있다고 사료되며, 가해진 하중변화에 대한 인장강도 및 공극률 사이의 관계가 통계적으로 유의한 결과를 나타내는지에 대한 분석이 필요할 것이다.

#### 4. 결론

지하 암반은 지하수의 영향으로 포화조건인 경우가 많기 때문에, 광산 및 지하공간의 활용을 위해서는 포화상태에서의 암반 강도를 반드시 고려해야한다. 본 연구에서는 수리적, 기계적 작용이 암석시료에 복합적으로 작용했을 때 나타나는 암석 시료의 열적, 역학적, 물

리적 물성 변화를 다양한 실험실 실험을 통해 측정하였다. 건조조건에서 하중을 가한 A시료와 침수조건에서 하중을 가한 B시료로 나누어 공극률, 열전도도, 반발계수, 인장강도 등을 측정 및 비교하고 이들의 경향성을 평가하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1. 하중이 증가함에 따라 미세 균열의 발생으로 공극률은 증가하는 경향을 나타내며 증가량은 포화조건에서 약 1.2배 높게 나타났다.
2. 열전도도는 포화시료에서 높게 나타났으며 하중 증가에 따른 열전도도의 감소 경향은 포화조건에서 두드러지게 나타났다.
3. 슈미트해머로 추정된 일축압축강도와 시료에 가해진 하중과의 관계는 포화조건에서 하중을 가한 시료군 B에서 하중 증가에 따라 감소하며 더 뚜렷한 경향성을 나타내었다.
4. 인장강도는 시료에 가해진 하중이 증가할수록 감소하였으며 포화조건에서 하중을 가한 시료군 B에서 평균적으로 2.5 MPa 정도 낮게 측정되었다.
5. 인장강도 파괴면의 미세균열의 정도는 건조조건에서 하중을 가한 시료군 A에서 파괴면 주위로 평행하게 더 많이 발달한 특징을 보였으며, 상대적으로 포화조건에서 하중을 가한 시료군 B에서 단일한 파괴면을 보였다.

폐광산 및 폐지하공간의 재활용을 위해서는 본 연구에서 대상으로 한 화강암 이외에 다양한 암석시료에 대한 열적, 역학적 물성 변화 실험이 추가적으로 필요할 것이다. 본 연구에서 수행하지 못한 탄성파속도 측정, 단축 및 삼축압축강도 시험도 추가적으로 실시할 수 있으면 침수-하중 조건에서의 암반 거동을 이해하는데 보다 도움이 될 것이다. 더불어 암석의 미세균열 발생 메커니즘 및 시간에 따른 균열 발생 변화에 대한 추가 연구도 필요할 것으로 사료된다. 이러한 연구를 통해 지하 공간의 활용을 위한 안정성 평가시 암반 물성과 하중조건 사이의 상관성을 파악함으로써 향후 폐광산 및 폐공동의 재활용뿐만 아니라 침수와 건조조건이 반복적으로 발생하는 차수막, 댐, 사면, 항만구조물 등의 설계, 안정성 평가에도 활용할 수 있을 것이라 기대한다.

## 사 사

본 연구는 2013년도 한국과학창의재단의 지원을 받아 수행한 전공심화 연구과제(과제번호: 129-89)와 인

하대(과제번호: 46430-01)의 지원으로 수행되었습니다.

## Reference

1. Kim, H. M., Ryu, D. W., Chung, S. K., and Song, W. K., 2009, Flexible and Lined Segment Tunnel for Underground Compressed Air Energy Storage (CAES), *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 19,2, 77-85.
2. Bak, E. S., Chung, S. K., Lee, D. H., and Kim, H. Y., 2008, Prospect of Underground LNG storage techniques, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 87-89.
3. Ha, J. G., 1998, Energy Resource development by utilizing Underground Space, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 46,3, 21-29.
4. Yoon, Y. K., Baek, Y. J., and Jo, Y. D., 2011, Effect of Degradation of Rock Mass Properties Caused by Water Pressure on the Stability of Mine Gallery. *Journal of Korean Society For Rock Mechanics*, 21,2, 138-144.
5. Vásárhelyi, B. and Ledniczky, K., 1999, Influence of water saturation and weathering on mechanical properties of Sivac marble. 9th Int. Cong. On Rock Mech. Paris. 2, 691-693.
6. Kim, Y. C., 2013, Mechanical Properties of Basaltin Jeju Island with respect to Porosity, Department of Construction and Environmental Engineering Graduate School of Industry Jeju National University, 1-41.
7. Yoon, Y. K., Baek, Y. J., and Jo, Y. D., 2011, Effect of Degradation of Rock Mass Properties Caused by Water Pressure on the Stability of Mine Gallery, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 21,2, 138-144.
8. Chung, S. K., Sun, E. C., Jun, Y. S., and Jung, Y. B., 2005, Design of A Sustain and Estimation to Stability of Sightseeing Cave, 88-99.
9. Kranz, R. L., 1979, Crack-crack and crack-pole interactions in stressed granite, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech.* 16, 37-47.
10. Reyes, O. and Einstein, H. H., 1991, Failure mechanism of fractured rock - a fracture coalescence model, *Proc. 7th ISRM Congress, Aachen, Germany*, 333-340.
11. Park, H. D., 1995, A Study of the Laboratory Scale Measurement Technique of P-Wave Velocity for the Assessment of the Anisotropy of Engineering Property of Rock, *Journal of Engineering Geology*, 5,3, 237-247.
12. Lee, S. E., Cho, S. H., Yang, H. S., and Park, H. M., 1999, Estimation of Micro-discontinuity Distribution Using Scanline Survey in Granites, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 9, 364-372.
13. Won, Y. H., Kang, C. W., Kim, J. I and Park, H. S., 2004, Characteristics of Physical Properties of Rocks and Their Mutual Relations, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 14,4, 261-268.
14. Jung, H. R. and Kim, J. W., 2006, Deformation Behaviors around Tunnel in Anisotropic Rocks Considering Joint Orientation and Rock Pressure Condition Using Scaled Model Tests, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*,



- 16.4, 313-325.
15. Cho, H. J, Moon, J. K., and Jeong, I. S, 2013, A Study on Decreasing Behavior of Strength & Elastic Parameters due to Water Infiltration in Rock Cores (I), Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 29.1, 149-159.
  16. Romana, M., and Vásárhelyi, B., 2007, A discussion on the decrease of unconfined compressive strength between saturated and dry rock samples. Polytechnic University of Valencia, Valencia.
  17. Jung, W. J, 2010, Effects of Strain Rate and Water Saturation on the Tensile Strength of Rocks, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 20.2, 119-124.
  18. Cho, W. J. and Kwon, S., 2010, Estimation of the thermal properties for partially saturated granite. Engineering Geology, 115.1, 132-138.
  19. Kwon, S., Park, J. W., and Cho, W. J., 2004, Geotechnical Characteristics of the Site for an Underground Research Tunnel in KAERI, Korean Atomic Energy Research Institute, Taejon(Korea, Republic of), 1-78.
  20. Woodside, W. T. and Messmer, J. H., 2004, Thermal conductivity of porous media-I Unconsolidated sands, Journal of applied physics, 32.9, 1688-1699.
  21. Lee, G. S and Lee, S., 1995, A Suggested Method to Predict Uniaxial Compressive Strength of Korean Granites by Schmidt Hammer Value, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 15.1, 199-210.
  22. Brace, W. F., 1960, An extension of the Griffith theory of fracture to rocks. Journal of Geophysical Research, 65.10, 3477-3480.
  23. Vásárhelyi, B., and Ván, P., 2006, Influence of water content on the strength of rock. Engineering Geology, 84.1, 70-74.
  24. Nam, J. M., Yun, J. M., Song, Y. S., and Kim, J. H., 2008, Analysis of Influence Factors to Compressive and Tensile Strength of Basalt in Cheju Island, Journal of Engineering Geology, 18.2, 205-215.
  25. Cho, H. J., Jeong, I. S., and Moon, J. K., 2012, A Study on Decreasing Behavior of Strength & Elastic Parameters due to Water Infiltration in Rock Cores (II), Journal of the Korean geotechnical society, 28.11, 87-99.
  26. Lee, Y. M., 2007, Thermal conductivity of rocks for geothermal energy utilization, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 305-350.
  27. Lee, J. H., Choo, J. H., Yun, T. S., Lee, J. G., and Kim, Y. S., 2011, Loading Effects on Thermal Conductivity of Soils: Particle-Scale Study, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 27.9, 77-86.



**허진**  
2014년 인하대학교 에너지자원공학과  
재학중

Tel: 032-872-7551  
E-mail: gjwls89@naver.com



**이재철**  
2014년 인하대학교 에너지자원공학과  
재학중

Tel: 032-872-7551  
E-mail: flyaway0455@naver.com



**서정범**  
2014년 인하대학교 에너지자원공학과  
재학중

Tel: 032-872-7551  
E-mail: sjb9053@hanmail.net



**박승훈**  
2012년 조선대학교 에너지자원공학과  
공학사

Tel: 032-872-7551  
E-mail: wartrip@naver.com  
현재 인하대학교 에너지자원공학과 석  
사 재학중



**박정찬**  
2012년 인하대학교 토목공학과 공학사

Tel: 032-872-7551  
E-mail: qwer9316@naver.com  
현재 인하대학교 에너지자원공학과 석  
사 재학중



**권상기**  
1987년 서울대학교 자원공학과 공학사  
1989년 서울대학교 자원공학과 공학석사  
1996년 University of Missouri-Rolla  
Mining Eng. 공학박사

Tel: 032-860-7554  
E-mail: kwonsk@inha.ac.kr  
현재 인하대학교 에너지자원공학과 부  
교수