

변형률 게이지 측정원리를 이용한 충격 하중 센서의 개발 및 암석의 동적 압열 인장 실험에 적용

민경조¹⁾, 오세욱¹⁾, Yudhidya Wicaksana²⁾, 전석원²⁾, 조상호^{1)*}

Development of the Strain Measurement-based Impact Force Sensor and Its Application to the Dynamic Brazilian Tension Test of the Rock

Gyeong-jo Min, Se-wook Oh, Yudhidya Wicaksana, Seok-won Jeon, Sang-ho Cho

Abstract In order to obtain the dynamic response behavior of the rock subjected to blasting loading, a shock-proof high sensitivity impact sensor which can measure high frequency dynamic force and strain events should be adopted. Because the impact sensors which uses quartz and piezoelectric element are costly, generally the strain measurement-based impact (SMI) sensors are applied to high speed loading devices. In this study, dynamic Brazilian tension tests of granitic rocks was conducted using the Nonex Rock Cracker (NRC) reaction driven-high speed loading device which adopts SMI sensors. The dynamic response of the granite specimens were monitored and the intermediate strain rate dependency of Brazilian tensile strengths was discussed.

Key words strain measurement-based impact sensors, dynamic brazilian tension test, Nonex Rock Cracker (NRC) reaction driven-high speed loading device

초 록 발파 하중에 대한 암석의 동적 응답 특성을 획득하기 위해서는, 내충격 고감도의 충격하중센서가 필요하다. 이러한 충격 하중 센서는 석영(quartz) 하중셀, 압전소자(piezoelectric element), 변형률 게이지를 적용하여 제작되고 있으나, 석영 및 압전소자의 경우 고가이기 때문에, 충격하중가압시험과 같이 압력 센서의 손상이 빈번한 경우에는 제약이 따르게 된다. 본 연구에서는 원통형 압축셀에 변형률 게이지 측정원리를 적용한 내충격 고감도 하중센서를 개발하였다. 개발된 하중 센서는 Nonex Rock Cracker (NRC) 구동 고속충격 하중 장치를 이용한 화강암 동적 압열 인장 실험에 적용하여 동적하중이력의 측정에 적용되었다. 그 결과, NRC 구동 고속충격하중장치는 암석 강도의 중간 변형률 속도 의존성 연구에 적용 가능한 것으로 파악되었다.

핵심어 변형률 측정원리 적용 내충격 고감도 하중센서, 동적 압열 인장 실험, Nonex Rock Cracker (NRC) 구동 고속충격 하중 장치

1. 서 론

발파에서 폭약의 폭굉 현상에 의해 주변에 전달된 충격 하중에 대한 정보는 발파 설계 나 새로운 발파

공법을 개발하는 데 중요하다. 그러나 발파 하중과 같이 짧은 시간동안 암석이나 암반구조물에 큰 하중이 발생할 때, 동적하중에 대한 암석이나 암반의 동적 응답 특성 정보를 획득하기 위해서는 고가의 계측 시스템과 내충격 하중 센서가 필요하다. 특히 압력 센서의 경우 한번 사용으로 수명이 다하고, 고가이기 때문에, 다소 많은 경비가 소모되는 실정이다 (안중량 외, 2011).

일반적으로 고주파수 및 충격적인 하중/변형률을

¹⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과
²⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부
* 교신저자 : chosh@jbnu.ac.kr
접수일 : 2017년 9월 7일
심사 완료일 : 2017년 9월 14일
게재 승인일 : 2017년 9월 19일

측정하는 내충격 하중센서에는 석영(quartz) 하중셀, 압전소자(piezoelectric element), 변형률게이지 센서가 이용되고 있으며, 석영 및 압전소자는 고속으로 증가하는 하중이력을 측정하는데 적절하지만, 출력 신호 값은 시간이 흐름에 따라 자연적으로 감소하는 현상을 보이므로, 비교적 긴 시간 동안 가압이 되는 준정적 하중시험 등에는 제한될 수 있다 (Matsuo 와 Nakamura, 1980; Osaka 외, 1991). 그중 변형률게이지식 충격하중센서는 동적반응특성이 우수하며, 제작 비용이 저렴하다. 반면에 센서 제작에 사용되는 재료의 특성 및 형상에 따라서 반응특성이 달라져 특별한 보정작업이 요구되며, 전기적 잡음이 쉽게 발생하는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 동적반응특성이 우수하며 하중신호의 감쇠가 발생하지 않은 변형률게이지식 센서를 이용한 충격하중센서를 제작하였으며, Nonex Rock Cracker (NRC) 반응구동 고속충격 하중 장치에 장착하여 화강암의 압열인장시료에 작용하는 하중시간이력을 측정하여, 준정적 압열인장강도와 변형률속도를 평가하였다.

2. 변형률 게이지 법을 적용한 충격 하중 센서의 제작

2.1 변형률 게이지 측정원리 및 충격 하중 센서 제작

변형률 게이지 측정법은 압력 센서, 로드셀(하중센서), 가속도 센서, 토크(Torque) 센서 등의 여러 물리량을 측정하기 위한 센서 개발에 적용되며, 이외에도 변형률이나 응력 해석용으로 많은 분야에서 활용되고 있다. 특히 하중을 측정하는 분야에 있어, 변형률 게이지법을 적용한 충격 하중 센서는 동적 반응 특성 및 민감도가 우수하기 때문에, 가장 보편적으로 사용되고 있다. 일반적으로 변형률 게이지 측정법은 Wheatstone bridge 회로를 이용하여 전원을 공급하며, 물리적인 변형을 전기적인 신호로 변환시키는 원리를 사용한다. 회로 내에 사용되는 변형률 게이지의 개수에 따라 쿼터 - 브리지 (1개), 하프 - 브리지 (2개), 풀 - 브리지 (4개) 회로로 구분되며, 많은 변형률 게이지를 사용할수록 변형에 대한 민감도가 증가되며 전기적 잡음을 최소화 할 수 있다. Fig. 1은 본 연구의 충격 하중셀 제작에 사용된 풀 - 브리지 회로를 보여

주고 있다.

충격하중셀은 Fig. 2와 같이 압축 하중에 대하여 비교적 선형적인 변형 거동을 나타내는 환형 실린더 형

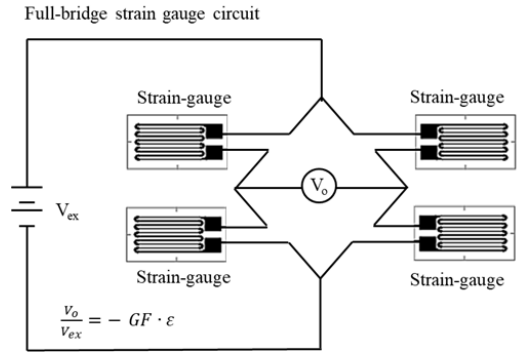


Fig. 1. Full-bridge strain-gauge circuit used for the impact force sensor.

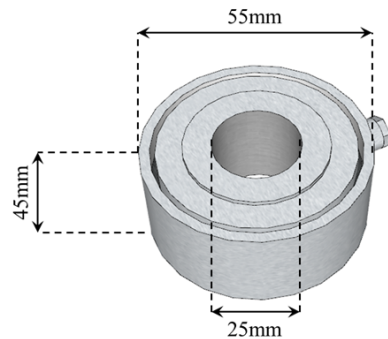


Fig. 2. Three-dimensional geometry of the impact force sensor.

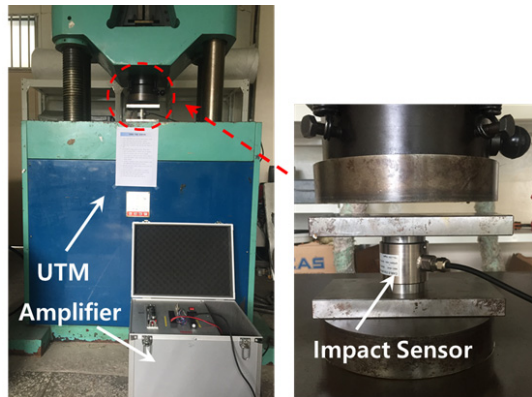


Fig. 3. A Photograph of UTM and Wheatstone-bridge circuit amplifier for impact sensor calibration.

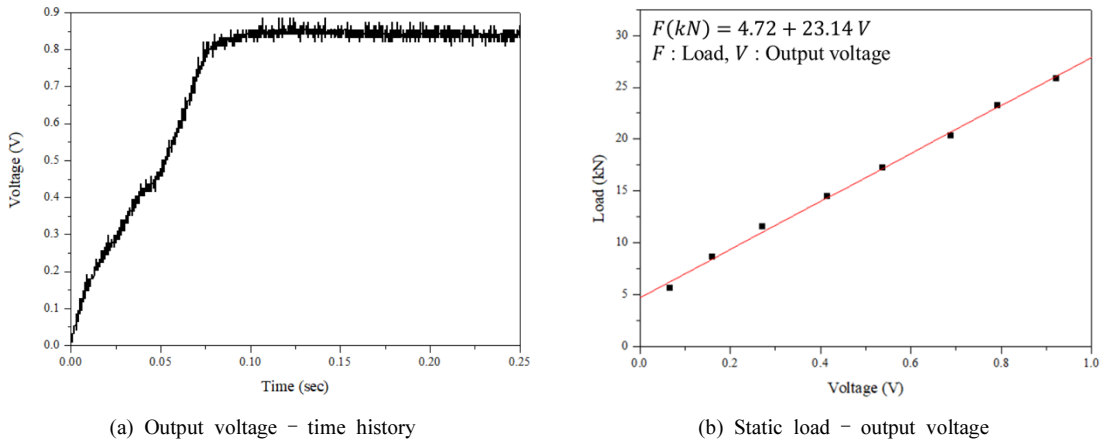


Fig. 4. Calibration results of impact force sensor.

상으로 제작하였다. 안쪽 실린더의 바깥쪽 표면에 4개의 변형률 게이지가 부착되어있다.

2.2 충격 하중 센서의 출력 신호 보정 실험

충격 하중 센서에 가해지는 하중 값과 동시에 충격 하중 센서에서 출력되는 전압 값의 관계를 도출하기 위한 보정 실험이 필요하다. 본 보정 실험에는 이러한 수식을 획득하기 위하여, 만능재료시험기 (UTM, Universal Testing Machine)을 활용 (Fig. 3) 하여, 가압된 하중에 대하여 충격 하중 센서의 출력 전압 값을 획득하였다. Fig. 4(a)는 UTM의 최대 설정 하중이 20kN 일 때, 기록된 충격 하중 센서의 출력 전압 - 시간 곡선을 보여주고 있으며, Fig. 4(b)는 가압된 하중의 증가에 따른 출력전압의 변화를 보여주고 있다. 살펴보면, 가압하중과 출력전압은 선형적인 관계를 보이고 있어, 선형 관계식을 이용하여 출력 전압 - 하중 보정식을 제안하였다.

3. 동적 압열 인장 실험

3.1 NRC 반응 구동 고속 하중 실험 장치

Nakamura 외 (2012)는 전기뇌관의 수증폭발압력을 이용한 고속하중재하시험기를 이용하여 콘크리트 및 암석에 대한 동적 압열인장실험을 수행한 바가 있다. 전기뇌관의 경우, 화공품으로 분류되어 법적인 규제를 받아 사용에 제약이 많다. 본 연구에서는 전기뇌관

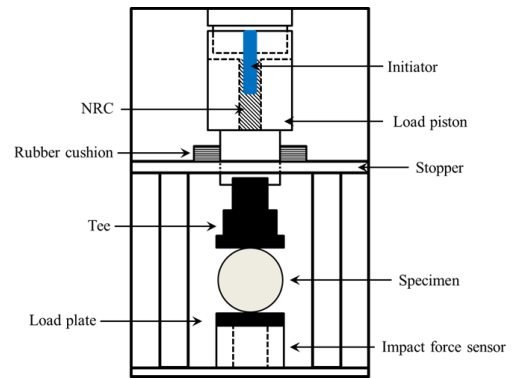


Fig. 5. A schematic diagram of NRC reaction driven-high speed loading device.

을 대신하여 NRC의 동적팽창거동을 이용한 중속하중재하시험기를 제안하였다. NRC는 비화약류 조성의 테르밋 반응 혼합물로서 이니시에이터 기폭을 통하여, 테르밋 반응이 발생하게 되면, 고온 반응열이 발생하여 NRC 내 금속 고체가 증기로 치환되며 대량의 가스가 발생하게 된다. NRC의 가스발생량은 300 l/kg 이상이며 연소속도는 300-900m/s로 알려져 있다 (김민성 외, 2015).

Fig. 5는 NRC 반응구동 중속하중실험장치의 개요도로써, 철재프레임, 반응셀(Charge pit), Load piston 등으로 구성되어 있으며, 하중값은 충격하중센서 (Impact force sensor)와 오실로스코프로 구성된 DAQ 시스템으로부터 얻은 출력전압을 Fig. 4(b)에서 제시

Table 1. Physical and Mechanical properties of Inada granite

암석 시료	탄성파 속도 (m/s)	밀도 (kg/m ³)	정적 인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
화강암	3950	2580	7.3	56.8

한 변환식을 이용하여 측정한다.

3.2 화강암의 동적 압열 인장 실험

본 연구에서는 동적 압열 인장 실험을 수행하기 위하여, 직경 50mm, 두께 25mm 의 Inada 화강암 시편을 사용하였다. Table 1은 Inada 화강암의 기초물성을 나타낸다. 압열 인장 실험편은 직경이 50mm 이고, 입사 파형의 증가시간(가압 후 최대 하중에 도달하는데 소요되는 시간)이 50 μ s 이상 일 때, 암석 시편이 파괴되기 전에 응력 평형 상태에 가까이 도달한다고 보고한 바가 있다. 화강암의 시료 내 응력 평형 상태가 이루어진다는 가정 하에 정적 압열인장 실험에서 사용하는 인장강도식 (식 1)을 사용할 수 있다 (Cho 외 2007).

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dt} \quad (1)$$

여기서 σ_t 는 실험 시편의 동적 인장 강도, P 는 가압하중, d 는 실험 시편 직경, t 는 시편 두께이다.

시험시료의 변형률 속도는 식 (2) 를 통하여 획득할 수 있다.

$$\dot{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{\tau}, \quad \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}_t}{E} \quad (2)$$

여기서 $\dot{\sigma}_t$ 는 실험 시편의 하중 속도, τ 는 폭발 하중 도달 시점부터 피크 값까지의 경과시간, $\dot{\varepsilon}$ 는 실험 시편의 변형률 속도, E 는 실험 시편의 영률이다.

3.2 실험 결과

Fig. 6는 NRC 구동 중속하중재하실험기를 이용한 Inada 화강암의 압열 인장 시험결과로서 하중-시간이력곡선과 시료사진을 보여주고 있다. 가압이 시작된 이후 17kN까지 도달하는데 약 1.7ms가 소요되었다.

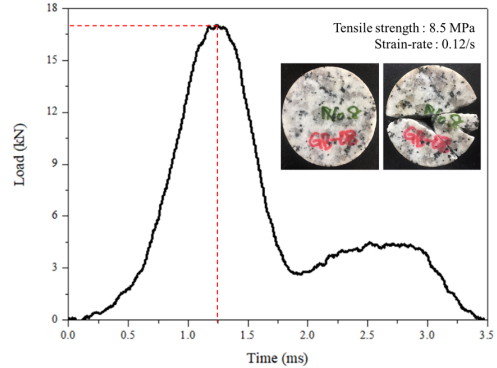


Fig. 6. Result of dynamic Brazilian tensile test of Inada granite using the NRC reaction driven-high speed loading device

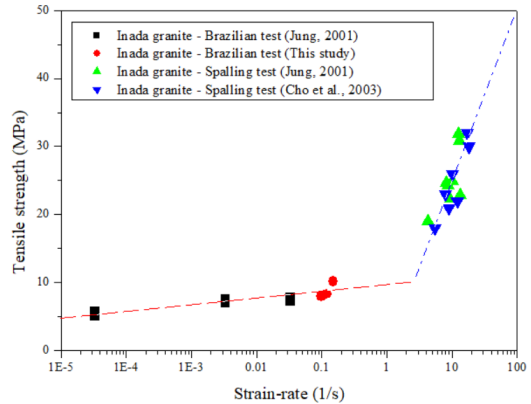


Fig. 7. Relationship between strain-rate and tensile strength of Inada granite

하중값을 압열 인장강도로 변환하면 8.5 MPa이며, 변형률 속도는 약 0.12s⁻¹가 된다. 그래프 내 사진은 시험 전후의 사진으로, 하중점을 따라 균열이 발생한 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 본 연구에서 획득한 Inada 화강암의 압열 인장 시험결과를 기존 실험결과(Jung, 2001; Cho et al., 2003)와 비교하였다. 중속하중재하 시험기로 수행된 Inada 화강암의 데이터는 정적압열 인장강도와 변형률속도의 추세식에 일치하고 있다.

4. 인장강도의 변형률 속도 의존성에 대한 고찰

최근 암석의 인장 강도는 변형률 속도 의존성을 고려한 많은 파괴 기준식이 제안되어 있으며 Autodyn

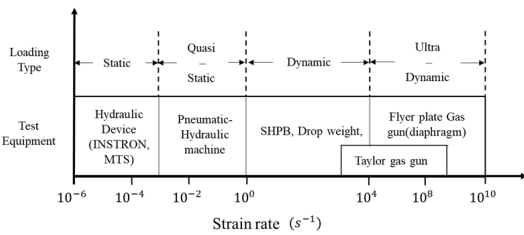


Fig. 8. Schematic diagram of strain-rate regimes and the apparatus for testing

및 LS-Dyna와 같은 상용 소프트웨어에 적용되고 있다. 변형률 속도에 따른 인장강도는 고속 유압 제어 장치를 적용한 동적하중 가압장치 또는 SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) 등을 이용하여 획득되어오고 있다 (Cho 외, 2007; 조상호 외, 2009). Fig. 8은 변형률속도에 따른 하중상태와 적용장비를 보여주고 있다. Fig. 6에서 제시한 0.12 s⁻¹를 고려하면 본 연구에서 적용한 NRC 구동 중속하중재하시험기는 준정적 하중조건이지만 동적하중조건에 가까운 성능을 구현하고 있는 것으로 판단된다. 또한 NRC 구동 중속 하중재하시험기에 전기뇌관 등을 이용한 10⁻²~1 s⁻¹ 범위의 변형률 속도 구현이 가능할 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 변형률 게이지 측정원리를 적용한 충격 하중 센서를 제작 및 활용하여, Inada 화강암에 대한 압열 인장 실험을 수행하였다. 압열 인장 실험은 NRC 반응 구동 고속 하중 시험 장치를 활용하여 수행하였다. 최대 하중은 약 17kN, 가압시간은 약 1.7ms, 압열 인장강도는 약 8.5 MPa이며, 변형률 속도는 약 0.12s⁻¹으로 평가되었다. 중속하중재하시험기에 의한 Inada 화강암의 압열인장강도는 정적압열인장강도와 변형률속도의 추세식에 일치하는 경향을 보였다.

감사의 글

본 연구에 사용한 NRC 반응 구동 고속 하중 실험

장치는 일본 구마모토과학기술대학의 나카무라교수님으로부터 기부받은 전기뇌관 구동 고속재하시험기를 일부 개조하여 제작되었다. 나카무라교수님께 진심으로 감사한 마음을 전합니다. 또한 변형률게이지식 충격하중센서의 설계와 제작에 도움을 주신 코지 인터내셔널의 안성우사장님께 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

1. 안중량, 김승곤, 성낙훈, 송영수, 조상호, 2011, 변형률 게이지 측정원리를 이용한 충격하중 측정 센서의 동적 응답 특성에 관한 연구, 화약·발파 (대한화약발파공학회지), Vol. 29, No. 1, pp. 41~47.
2. Matsuo, H. and Y. Nakamura, 1980, Experiments on cylindrically converging blast waves in atmospheric air. American Institute of Physics, pp. 47-52.
3. Osaka, H., M. Fujita, K. Hanasaki and Y. Fujinaka, 1991, The effect of pressure wave control in the underwater explosive forming. Journal of The Industrial Explosives Society, 52-1, pp. 41-50.
4. 김민성, 강형민, 정상선, 정운영, 박훈, 조상호, 2015, 연속적 폭굉속도 측정 시스템을 이용한 테르밋 반응 혼합물의 연소전파속도 측정에 관한 연구, 화약·발파 (대한화약발파공학회지), Vol. 33, No. 3, pp. 21-28.
5. Cho S.H., Nakamura Y., Ogata Y., Mohanty B., Kitayama H. and Kaneko K., 2007, Fracture processes of rocks in dynamic tensile-splitting test, the 1st Canada and U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, pp. 639-645.
6. Cho S.H., Mohanty B., Rajeev R., Xia K., and Kaneko K., 2007, Fragmentation mechanism of rock in Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test, 21st Canadian Congress of Applied Mechanics, Ryerson University, Toronto, Canada, pp. 607-608.
7. 조상호, 조슬기, 김승곤, 박 찬, 金子勝比古, 2009, 단계적 충격하중에 의한 암석의 동적손상메커니즘에 관한 실험적 연구, 터널과 지하공간 (한국암반공학회지), Vol. 19, No. 6, pp. 545-557.
8. Cho, S. H., Ogata Y., Kaneko K., 2003, Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 40, pp. 763-777.
9. Jung, W. J., 2001, Studies on effects of fracture strength characteristics and rock pressure on crack generation of rock during blasting, Ph. D Thesis, Yokohama National University, Japan.

**민 경 조**

전북대학교 자원·에너지공학과
박사과정

Tel: 063-270-4636
E-mail: felsmechanik@gmail.com

**오 세 옥**

전북대학교 자원·에너지공학과
박사과정

Tel: 063-270-4636
E-mail: oseo5353@naver.com

**Yudhidya Wicaksana**

서울대학교 에너지시스템공학부
박사과정

Tel: 02-880-7232
E-mail: ywicaksana@snu.ac.kr

**전 석 원**

서울대학교 에너지시스템공학부 교수

Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@snu.ac.kr

**조 상 호**

전북대학교 자원·에너지공학과 교수

Tel: 063-270-4636
E-mail: chosh@jbnu.ac.kr