

하중속도가 암석의 강도 및 변형특성에 미치는 영향에 관한 연구*

강 문 구* 김 재 동** 임 한 옥***

A STUDY ON THE STRENGTHS AND DEFORMATION BEHAVIOURS OF ROCKS UNDER VARIOUS LOADING RATES

Moon-Gu Kang, Jaedong Kim, Han-Uk Lim

ABSTRACT

Uniaxial compression tests are performed under various loading rates to study the influence of loading rate on the compressive strengths and deformation behaviours. The rock samples adopted in this experiments are Onyang granite, Hambaek sandstone, Hambaek shale and Donghae limestone. Total 120 specimens are prepared for this study.

As the loading rate increases from static to dynamic state which is about the level of 800~1,400 kgf/cm²/sec, the uniaxial compressive strengths are also increased within the range of 40%.

And Young's modulus and Poisson's ratio show similar trends but have a little lower rates of increase when compared with that of uniaxial compressive strength.

1. 서 론

암반내·구조물은 주로 정적인 응력상태 하에서의 안정성 유지를 일차적 목표로 하고 있으나 터널 굴착시 발파, 천공등의 인위적인 진동이 주어지는 경우나 지진과 같은 동적인 응력상태 하에서는 구조물

의 안정성에 상당한 차이를 나타내고 있다.

암반에 있어 구조물의 안정성에 영향을 끼칠 정도의 동적 응력변화 상태는 지하자원의 개발, 대규모 토목공사등에 있어 지하공동을 굴착하는 경우에 비교적 빈번히 발생 할 수 있는 것으로, 이러한 경우에 있어서 암석의 강도나 변형거동은 일반적으로 알려진 정적인 응력상태에 하에서와는 상당한 차이를

* 강원대학교 대학원 자원공학과 석사과정 졸업

** 강원대학교 공과대학 자원공학과 전임강사

*** 강원대학교 교과대학 자원공학과 부교수

나타내는 것으로 알려져 있다.

동적응력 상태가 강도에 미치는 영향등은 주로 지진파의 주파수에 근거한 피로시험등에 의해 세계적으로 일부 밝혀진 정도이며, 피로파괴 현상은 작용하는 응력의 증가속도, 주파수, 반복되는 응력의 수준등에 크게 영향을 받으므로 이러한 암석의 동적거동을 규명하기 위해서는 먼저 하중속도가 암석의 강도나 변형거동에 미치는 영향을 밝힐 필요가 있다.

또한 암석의 실험실 강도나 탄성계수, 포아송비등의 물질상수등을 측정하는데 있어 정하중 하에서의 시험조건을 확고히 설정하기 위해서는 이러한 물질상수에 동적인 영향을 미치지 않는 하중속도의 범위를 먼저 규명해야 할 필요가 있다.

동하중 하에서의 암석의 변형, 파괴 특성에 관한 연구 중 특히 피로현상에 관하여는 그 중요성이 인식되어 세계적으로 70년대 이후에 다수의 연구 결과가 보고되어 있으며^(1, 2) 국내에서는 이원규⁽³⁾, 김일중⁽⁴⁾에 의해 비교적 최근의 연구 결과로써 발표된 바 있다.

그러나 이러한 연구들은 주로 피로 파괴현상의 규명에 주안점을 두고 있으며 하중속도가 암석의 강도나 변형거동에 미치는 영향을 집중적으로 연구한 결과는 매우 희소한 형편이다.

지금까지 발표된 하중속도와 암석의 강도에 관한 주요 연구결과로는 Kobayashi^(5, 6)가 사암, 대리석, 안산암, 응회암, 화강암등 5종의 암석시료와 시멘트 몰타르를 이용하여 약 1.0×10^{-1} kgf/cm²/sec ~ $2.5 - 2.6 \times 10^7$ kgf/cm²/sec 범위의 다양한 하중속도 하에서 암석의 역학적인 거동을 연구하여, 하중속도가 증가함에 따라 암석의 압축강도는 증가하는 경향을 보인다는 결과를 발표한 바 있다.

본 연구에서는 삼척탄전지대의 사암과 혈암, 시멘트광산의 석회암, 석재용 화강암 시료를 대상으로 하여 동적하중 하에서 암석의 기본적인 물질정수들 및 역학적 변형특성에 나타나는 영향을 하중속도를 변수로 하여 밝혀보고자 한다.

본 연구로 부터 얻어진 결과는 전반적인 암석의 동적 거동에 관한 연구 및 동적 하중의 영향을 고려한 암반 구조물의 설계를 위해 필요한 자료를 실험적으로 구하기위한 시험조건 설정에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 암석시료, 실험장치 및 방법

2-1. 암석시료

본 실험에 사용한 암석시료는 대한석탄공사 함백 광업소의 사암과 혈암, 동해시 쌍용양회의 석회암, 충남 온양 일신석재의 화강암을 사용하였다.

사암은 세립질과 조립질의 두 종류이고 직경은 각각 36mm ϕ , 27mm ϕ 인 코어이며, 혈암은 27mm ϕ , 석회암은 36mm ϕ , 화강암은 33mm ϕ 의 코어이다.

시험편의 크기는 직경 대 길이의 비가 압축시험의 경우에는 1대 2, 인장시험의 경우에는 1대 0.8~0.9로 성형하였다. 제작된 시험편은 압축 시험용으로 약 90개, 인장시험용으로 약 30개 등 모두 120개이다.

암석의 각종 불성과 하중속도가 2.5~25kgf/cm²/sec인 정하중하의 일축압축시험에서 구한 압축강도, 탄성계수 및 포아송비를 Table 1에 나타내었다.

2-2. 실험장치

본 실험에 사용된 압축시험기는 미국 SBEL (Structural Behaviour Engineering Laboratories)사의 암석 압축시험용 서보시스템(Electro-Hydraulic Closed Loop Servo Dynamic Test System)으로 가압용 프레임, 조정부(Control Panel), 유압 펌프의 3부분으로 크게 나누어져 있다. 최대 가압 용량은 100톤이며 제하 형태나 입출력 명령, 측정 자료의 처리 등은 16비트 개인용 컴퓨터로 이루어진다.

컴퓨터는 조정부와 연결되어 COMMAND SIGNAL과 COUNTER의 입출력을 통제하고 하중과 변위의 측정 결과를 기록, 처리하며 여러가지 형태의 제하 파형과 가압시간, 주파수등을 조절할 수 있는 프로그램에 의해 명령과 데이터를 입출력시킬 수 있다.

Fig. 1은 이상의 실험 및 측정 장치들을 연결한 개조도이다.

Table 1. The physical properties of five rock samples

| Rock type | Apparent Density (gr/cm ³) | True Density (gr/cm ³) | Porosity (%) | Shore hardness | Wave velocity(m/sec) | | Sc | St | E | ν |
|-----------------------------|--|------------------------------------|--------------|----------------|----------------------|------|------|-----|------|-------|
| | | | | | P | S | | | | |
| Onyang granite | 2.60 | 2.66 | 2.26 | 65 | 3430 | 2080 | 1630 | 70 | 3.97 | 0.26 |
| Donghae Lime-stone | 2.74 | 2.80 | 2.14 | 30 | 4590 | 2530 | 890 | 80 | 5.27 | 0.26 |
| Hambaek sand-stone (fine) | 2.72 | 2.76 | 1.45 | 58 | 4170 | 2490 | 1270 | 200 | 4.52 | 0.24 |
| Hambaek sand-stone (coarse) | 2.64 | 2.72 | 2.94 | 71 | 4140 | 2630 | 1640 | 190 | 6.17 | 0.20 |
| Hambaek shale | 2.73 | 2.76 | 1.08 | 46 | 4400 | 2550 | 650 | 90 | 4.50 | 0.28 |

Sc : Uniaxial compressive strength (kgf/cm²)

St : Tensile strength (kgf/cm²)

E : Young's modulus(x10⁵kgf/cm²)

ν : Poisson's ratio

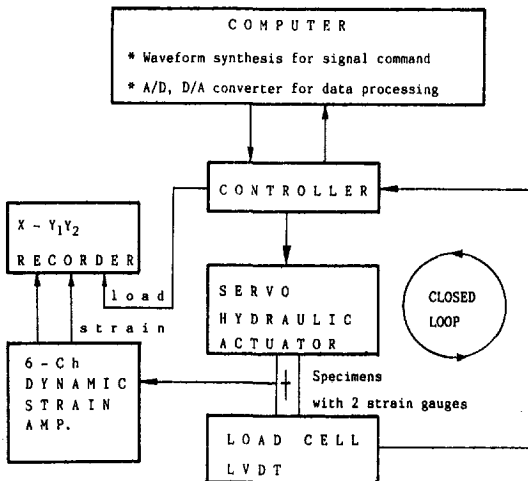


Fig. 1 Block diagram showing the overall test set up

2-3. 실험방법

본 실험은 하중속도의 변화가 암석의 압축강도 및 변형특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 하중속도를 정하중시험 상태로 부터 최대 800~1400 kgf/cm²/sec까지 증가시켜 가며 일축압축시험을 행하였다.

하중속도의 결정은 ISRM(International Society for Rock Mechanics)의 기준(직경 54mm의 시험편에 대해 파괴시 까지의 총 가압 시간이 약 5~10분)에 따라 대체로 추산된 정하중 속도인 2.5~10 kgf/cm²/sec로 부터 몇 단계로 구분하여 최대 약 800~1400 kgf/cm²/sec 수준으로 하였다.

최대 하중속도는 본 연구에 사용된 압축 시험기의 조건이 최대용량 100톤이며, 최대용량 까지의 최단 가압 시간이 10초이므로 단위 시간당 가압 가능한 응력의 크기는 시험편의 단면적에 따라 차이는 있으나 단면적인 약 5.6cm²인 시험편의 경우 정하중 속도의 약 100배 이상 달하는 수준까지 시험 가능하

였다.

가압형태는 하중을 일정한 속도로 증가시키는 선형 증가함수(Ramp Mode)의 형태를 사용하였고, 컴퓨터로 부터 주어진 가압명령에 따라 수압기(Load cell)에서 측정된 실제 가압 상태를 컴퓨터로 모니터하였다.

측정에 있어, 하중 및 축방향 변위량은 각각 120톤 용량의 수압기와 LVDT(Linear Variable Differential Transducer)에 의해 측정된 신호를 컴퓨터에 디지털방식으로 기록하였으며, 이와는 별도로 시험편 표면에 변형률 측정용 게이지를 시험편 축방향에 대해 중횡방향으로 부착하여 시험편의 변형률을 측정하였으며 측정된 아나로그 신호는 변형률 증폭기를 거친 후 하중과 함께 $X-Y_1Y_2$ 기록계에 자동기록 되도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 동하중 상태의 하중속도가 암석의 강도 및 변형특성에 미치는 영향을 밝히기 위하여, 시료로 사용된 총 5개 암종별로 하중속도를 변화 증가시켜가며 일축압축시험을 실시하였으며 그 결과를 압축강도, 탄성계수, 포와송비 및 응력과 축방향 변형률 관계로 나누어 고찰하였다.

3-1. 압축강도와 하중속도

하중속도의 변화가 암석의 압축강도 및 변형거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 일축압축시험에서 하중속도를 증가, 변화시켜가며 시험하였다.

Fig. 2는 하중속도와 압축강도와의 관계를 암종에 따라 구분하여 도시한 것이다. 전 암종에 걸쳐 하중속도가 증가함에 따라 강도 역시 증가하는 공통적인 경향을 보이고 있다. 단위속도 증가(1 kgf/cm²/sec)에 대한 화강암의 강도 상승율은 (a)에 보인 바와 같이 0.59 kgf/cm²이며 분산정도는 타 암종에 비해 적게 나타났다. 사암의 강도 상승률은 세립질(b)과 조립질(c)에 있어서 각각 0.43, 0.71 kgf/cm²로 나타났으며, 측정치의 분산에 있어서 조립질이 큰 것은 입자의 불균질성에 기인한 것으로 볼 수 있다. (d)는 석회암으로서 하중속도가 증가함에 따라 일축압축강도가 증가되는 현상을 볼 수

있으며 강도 상승율은 0.57 kgf/cm²이다. 분산정도는 화강암과 비슷한 수준이나 암석내에 내재된 결함으로 압축강도가 낮게 나타난것으로 사료된다. (e)는 혈암으로서 강도 상승율이 다른 암종에 비해 가장 낮은 0.27 kgf/cm²이고 미소 crack이 발달되어 측정치의 분산이 크게 나타났다.

보통 암석의 강도는 신선한 정도에 따라 강도 측정치의 분산이 크게 영향을 받으며 동일 시료에 있어서도 심한 경우, 약 100% 이상의 차이가 나는 것으로 알려져 있으며 본 연구에 사용된 석회암과 조립질사암 시료가 이러한 경우에 해당된다고 생각된다.

Fig. 3은 정하중 상태의 하중속도 수준을 살펴보기 위해 하중속도가 비교적 낮은 수준에서의 암종별 강도 분포를 나타낸 것으로서 통계적으로 처리한 결과 하중속도가 약 20~25 kgf/cm²/sec 정도 수준까지는 전암종에 걸쳐 증가경향이 나타나지 않았다.

측정치의 표준편차는 조립질사암(ssc)과 석회암(1s)이 각각 320, 150 kgf/cm²로 비교적 크게 나타났고 화강암(gr), 세립질사암(ssf), 혈암(sh)의 경우에는 약 60~100 kgf/cm²로 거의 비슷한 수준을 나타내었다. 이 결과는 앞에서 기술한 바와 같이 동하중상태를 포함한 전체적인 강도 측정치의 분산 경향과 일치한다.

ISRM표준 시험법에서 제시된 정하중 하의 일축압축시험에 대한 개략적인 기준을 보면 NX코어 시험편에 대해 파괴시까지 약 5~10분이 소요되는 것으로 제시되어 있어 이를 강도 1,000~2,000 kgf/cm²인 암석을 예로부터 추산해 볼때 최대 약 10~15 kgf/cm²/sec 까지를 정하중 시험상태의 하중속도 조건으로 생각할 수 있으며 ISRM 기준과 본 실험 결과를 비교하여 보면 본 실험결과의 정하중 조건 범위가 넓어 ISRM 기준이 보다 안정적인 정하중상태를 제시하고 있는 것으로 볼 수 있다.

일반적인 실험실내 정하중 강도 시험에서 볼때 하중속도 20 kgf/cm²/sec는 매우 빠른 속도에 속하므로 정하중 강도 시험에서 나타날수 있는 다소간의 하중속도 변화는 강도 측정치에는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 암종별로 하중속도의 증가에 따른 일축압축강도의 변화 경향을 최소자승법을 이용 선형방

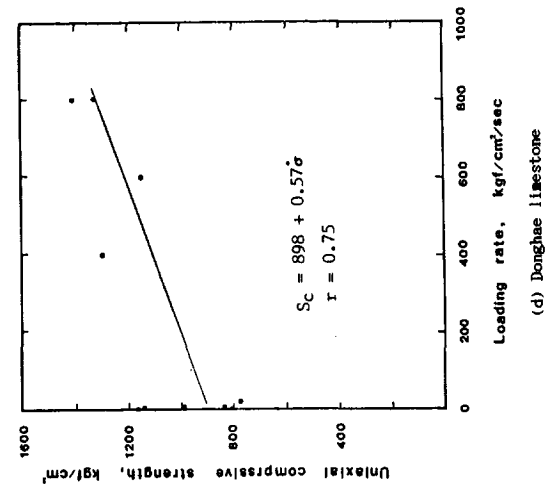
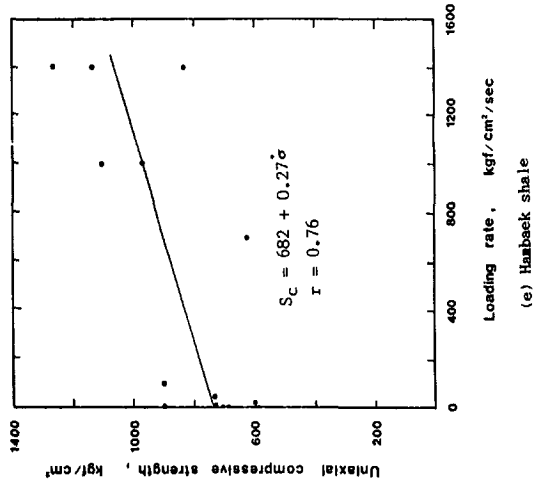
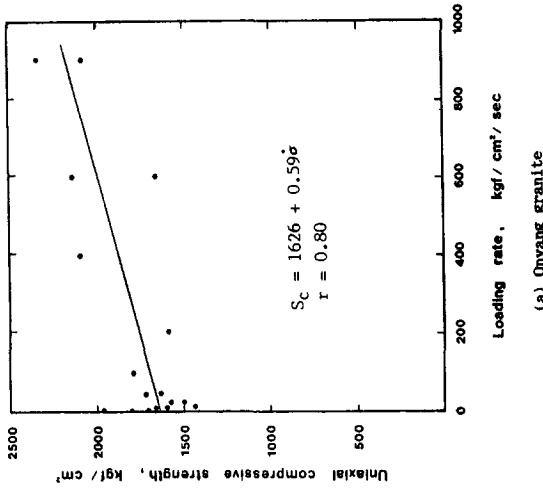
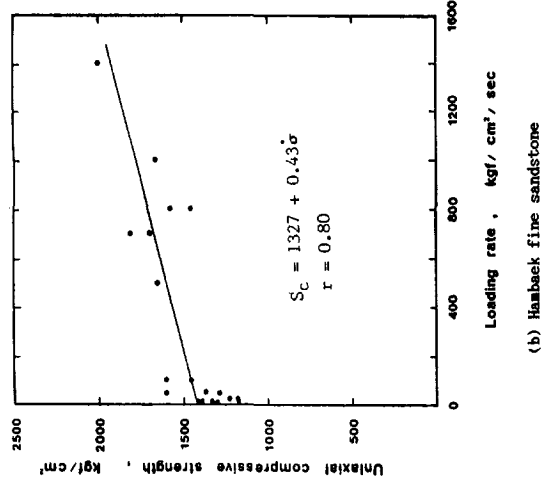
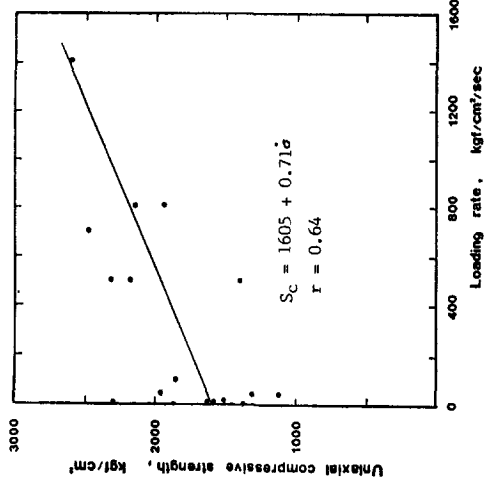


Fig. 2 Relationship between loading rate and uniaxial compressive strength

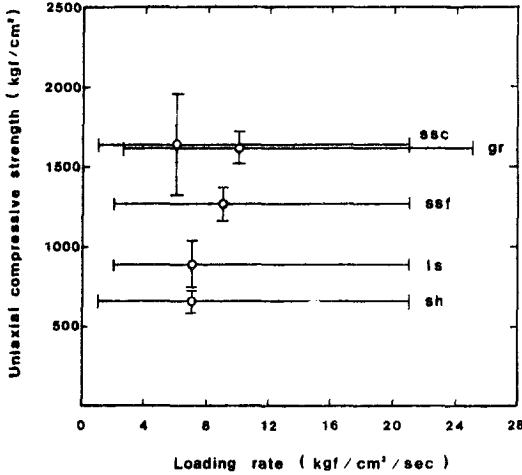


Fig. 3 Uniaxial compressive strengths of five rocks under static loading condition

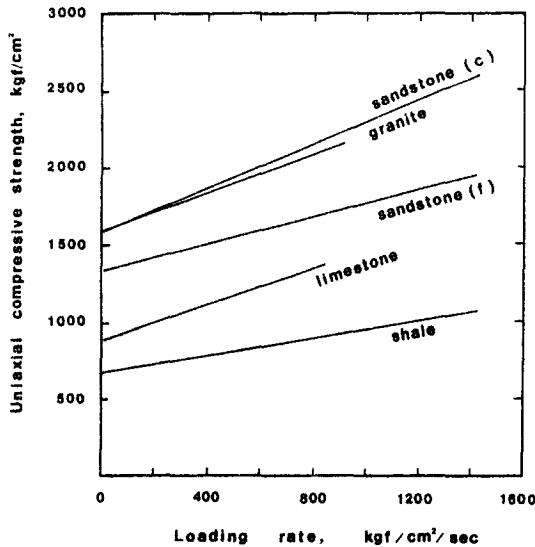


Fig. 4 Comparison of the increasing trends of uniaxial compressive strength according to the loading rates for five rocks

식으로 비교 도시한 것이다. 강도의 수준은 조립질 사암, 화강암, 세립질사암, 석회암, 혈암의 순으로 나타났다.

전반적으로 하중속도에 따른 강도의 증가량은 하중속도가 10 kgf/cm²/sec인 정하중상태와 1,000 kgf/cm²/sec인 동하중상태를 비교해 볼 때, 화강암

이 약 35%, 세립질사암이 32%, 조립질사암이 44%, 석회암이 63%, 그리고 혈암이 40% 정도로 나타나 강도에 대한 하중속도의 영향이 뚜렷하였다.

그러나 측정치의 분산정도가 암종별로 상당한 차이를 보이고 있으며, 또한 전체적으로 시험편의 수가 충분치 않아 각 암종별 증가율의 정량적인 비교는 무리가 있다고 판단된다.

3-2. 탄성계수와 하중속도

Fig. 5는 일축압축시험에서 얻어진 응력-축방향 변형을 곡선에서 응력수준 50%로 부터 접선탄성계수를 구하여 하중속도와와의 관계를 암종별로 도시한 것이다.

(a)는 화강암의 경우로써 단위속도 증가(kgf/cm²/sec)에 대한 탄성계수 상승율은 132 kgf/cm²로 가장 크고 분산정도는 세립질사암을 제외한 타암종에 비해 적게 나타나고 있다. (b)와 (c)의 사암의 경우에 있어서 세립질과 조립질의 탄성계수 상승율은 각각 112, 126 kgf/cm²이며 분산정도는 조립질이 세립질보다 크다. (d)와 (e)는 석회암과 혈암의 탄성계수 상승율을 나타낸 것으로 각각 83, 45 kgf/cm²로 화강암이 사암에 비해서 낮게 나타난 것

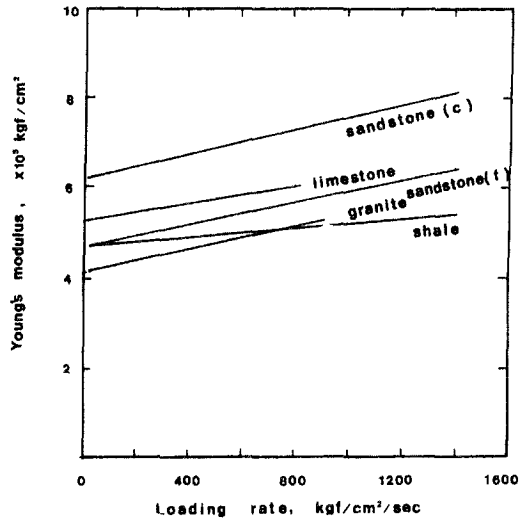


Fig. 6 Comparison of the increasing trends of tangential Young's modulus according to the loading rates for five rocks

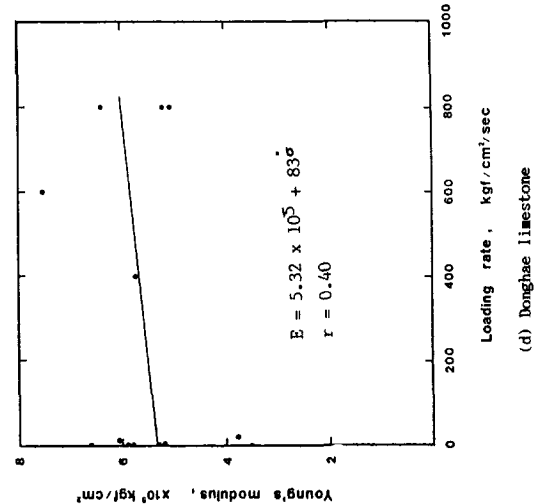
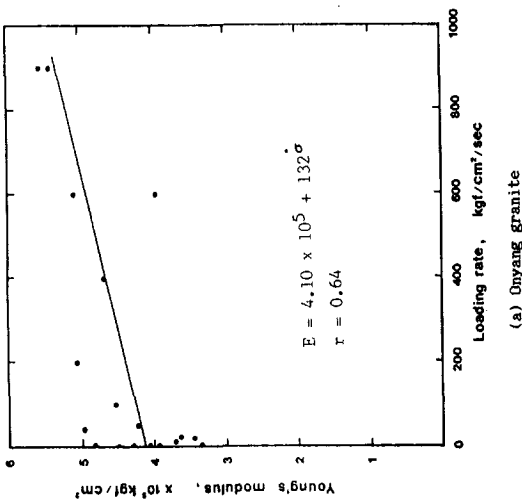
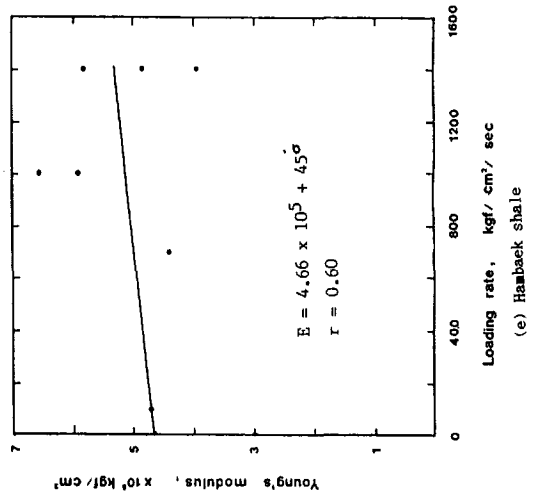
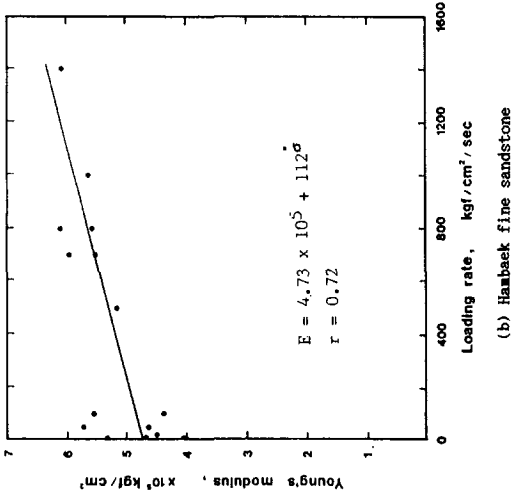
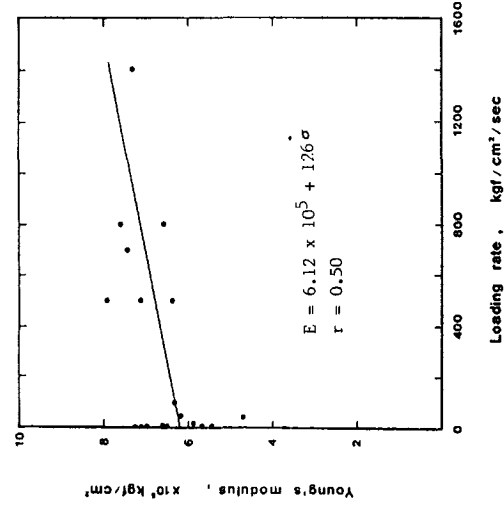
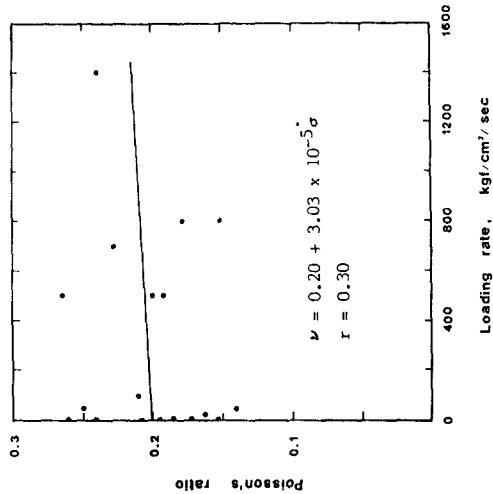
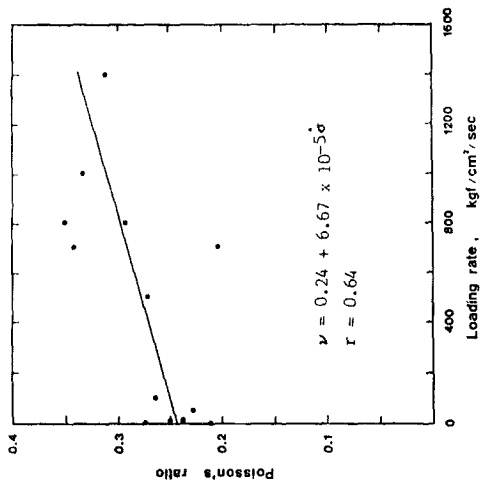


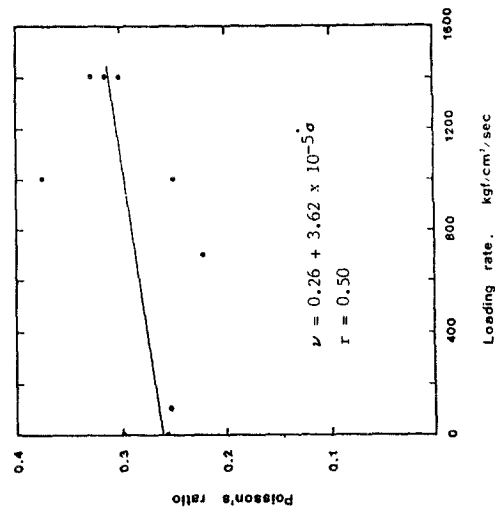
Fig. 5 Relationship between loading rate and tangential Young's modulus



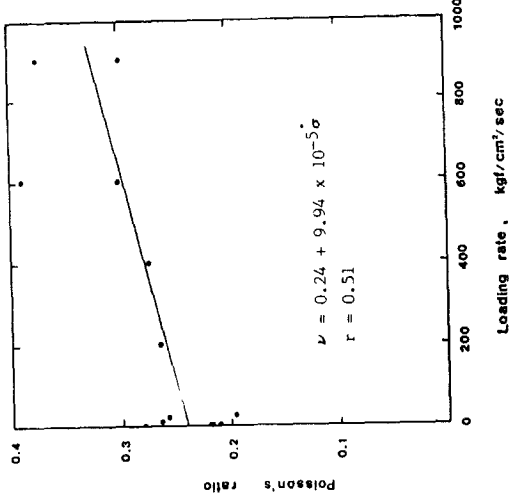
(c) Hambaek coarse sandstone



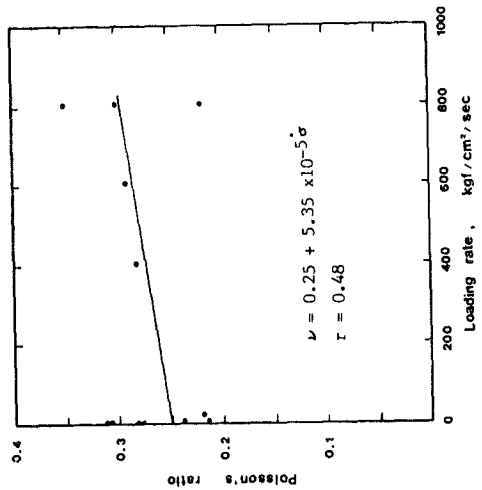
(b) Hambaek fine sandstone



(e) Hambaek shale



(a) Onyang granite



(d) Donghae limestone

Fig. 7 Relationship between loading rate and Poisson's ratio

은 강도의 상승율에서 설명한 암석내에 내재된 결함과 미소crack이 발달되어있기 때문이라고 사료된다

Fig. 6은 앞 그림들에서 나타난 변화 경향을 최소자승법으로 처리하여 종합한 것이며, 전체적으로 하중속도가 커짐에 따라 접선탄성계수는 증가하는 것으로 나타났으며, 강도 부분에서 고찰한 것과 같은 10 kgf/cm²/sec인 정하중상태와 1,000 kgf/cm²/sec인 동하중상태의 하중속도 수준에서 비교해 보면, 탄성계수의 증가율은 화강암이 약 31%, 세립질사암이 23%, 조립질사암이 20%, 석회암이 15%, 그리고 혈암이 10% 정도였다.

이 결과에서 압중에 따라 증가치의 차이가 매우 큰 것을 알 수 있으며, 이는 암석의 불균질성이나 내재 균열이 강도 보다 탄성계수에 더 큰 영향을 미치고 있는것으로 생각할 수 있다. 전체적인 시험편 수가 적어 정량적인 판단은 어려우나 대체로 정하중속도와 동하중속도의 결과를 비교할 때 탄성계수는 약 10~30%의 증가를 보인다고 판단할 수 있다.

3-3. 포아송비와 하중속도

Fig. 7은 압중별로 하중속도와 포아송비의 관계를 도시한 것으로 전체적으로 볼때 포아송비는 정하중상태의 0.20~0.26에서 부터 하중속도가 증가함에 따라 0.25~0.35까지 증가하는 결과를 보이고 있다.

화강암(a)의 경우 단위속도 증가(kgf/cm²/sec)에 대한 포아송비 상승율은 타압중에 비해 가장 큰 9.94×10^{-5} kgf/cm²이며, 측정치의 분산은 압축강도와 탄성계수에 비해 크게 나타났다. (b)와 (d)의 세립질사암과 석회암은 비슷한 수준인 6.67×10^{-5} kfg/cm² 과 5.35×10^{-5} kgf/cm²의 상승율을 보이고 있으며 석회암의 분산정도가 큰것은 암석내에 내재된 결함에 원인이 있다고 본다. (c)의 조립질사암은 포아송비의 상승율이 가장 낮은 3.03×10^{-5} kgf/cm²이며 (e)의 혈암의 경우도 비슷한 상승율인 3.62×10^{-5} kgf/cm²으로 나타났다.

포아송비는 횡방향 변형률의 변화에 크게 영향을 받는 물질상수로서 비교적 측정치의 분산이 크게 나타나는 것으로 보통 알려져 있으며, 본 실험측정의 결과에서도 그러한 경향이 많이 나타난 것으로 볼 수 있다.

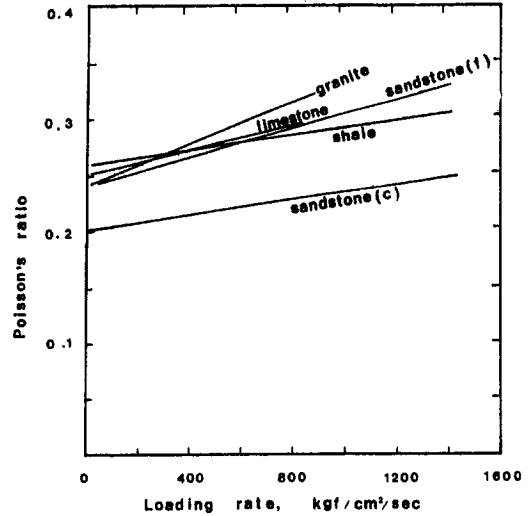
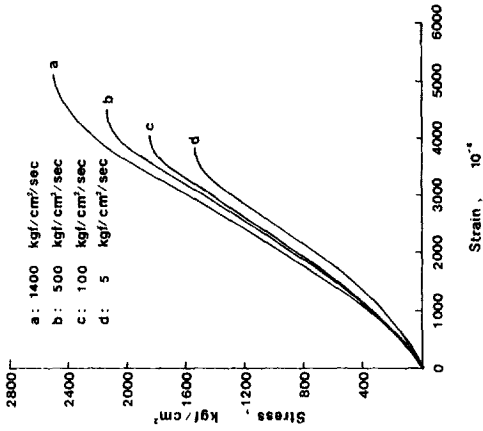


Fig. 8 Comparison of the increasing trends of Poisson's ratio according to the loading rates for five rocks

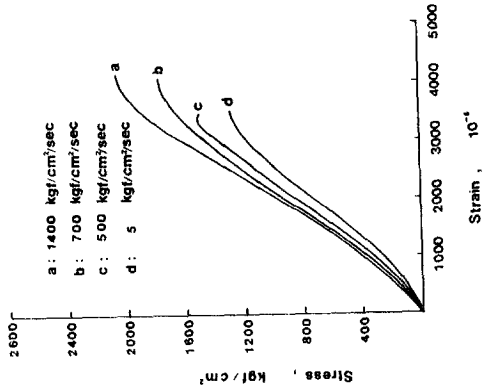
Fig. 8은 각 압중별 결과를 종합한 것으로 하중속도가 증가함에 따른 포아송비의 전체적인 증가 경향을 확인할 수 있으며 조립질사암의 경우를 제외한 나머지 압중에서 볼 때, 10 kgf/cm²/sec인 정하중상태와 1,000 kgf/cm²/sec인 동하중 상태의 포아송비는 화강암이 41%, 세립질 사암이 28%, 조립질사암이 15%, 석회암이 21%, 혈암이 14% 증가한 것으로 나타났다.

3-4. 응력과 축방향 변형률

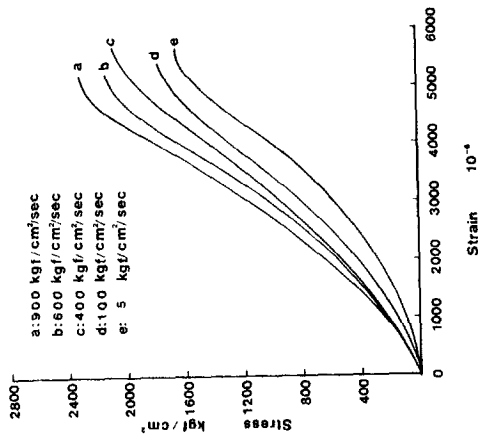
Fig. 9는 압중별 응력 - 축방향 변형률 곡선들 중 하중속도별로 결과가 뚜렷이 나타난 것들을 발췌하여 도시한 것이다. 전 압중에 걸쳐 하중속도가 증가함에 따라 강도와 탄성계수의 증가 경향을 뚜렷이 알 수 있으나, 파괴시까지 발생한 총 축방향 변형률의 양은 일정한 경향을 파악하기 어려웠다. 이는 파괴에 접근될 때 나타나는 비선형의 변형 거동이 하중속도가 커질수록 불안정해지는 것에 기인한 것으로 사료된다.



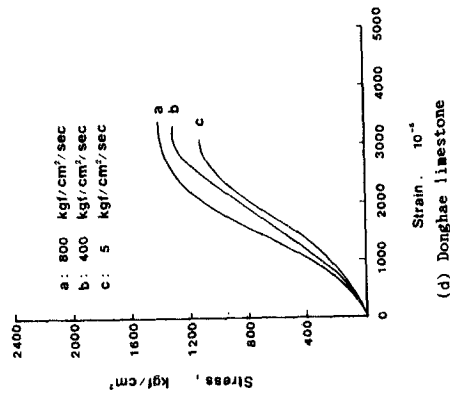
(c) Hambaek coarse sandstone



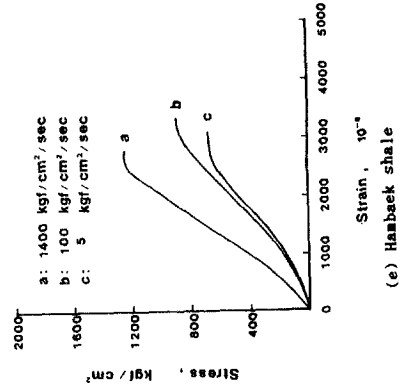
(b) Hambaek fine sandstone



(a) Onyang granite



(d) Donghae limestone



(e) Hambaek shale

Fig. 9 The stress and axial strain curves under various loading rates

4. 결 론

참 고 문 헌

화강암, 세립질 사암, 조립질 사암, 석회암, 혈암의 5종의 암석을 시료로 하여 하중속도를 증가시켜 가며 압축강도와 탄성계수, 포아송비의 변화 경향을 실험 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하중속도의 단위증가(1 kgf/cm²/sec)에 따른 압중별 강도 상승율(kgf/cm²)은 약 0.5(화강암 0.59, 세립질사암 0.43, 석회암 0.57)수준이며, 10 kgf/cm²/sec인 정하중상태와 약 1,000 kgf/cm²/sec인 동하중상태를 비교해보면, 압중별로 약간의 차이를 보이고 있으나, 약 40%의 증가를 보여 하중속도의 증가에 따른 영향이 뚜렷하였다.
- 2) 하중속도의 단위증가(1 kgf/cm²/sec)에 따른 압중별 탄성계수 상승율(kgf/cm²)은 화강암, 조립질 및 세립질사암의 경우 110~130정도의 유사한 수준을 보였으나, 석회암(85)과 혈암(45)의 경우 낮게 나타나 내재 균열 등의 결합이 탄성계수의 변화에 크게 영향을 미치며 10 kgf/cm²/sec인 정하중상태와 약 1,000 kgf/cm²/sec인 동하중상태의 탄성계수의 증가량은 전자의 경우 약 25%내외, 후자의 경우 약 15%내외로 나타나고 있으며 증가 경향을 확인할 수 있었다.
- 3) 하중속도가 증가함에 따른 포아송비의 상승율은 $3.03 \times 10^{-5} \sim 9.0 \times 10^{-5}$ kgf/cm²의 범위이며, 10 kgf/cm²/sec인 정하중상태와 약 1,000 kgf/cm²/sec인 동하중상태의 정량적 증가량은 15~40% 정도로 나타났고 증가경향은 확인할 수 있으나 측정치의 분산정도가 커 보다 많은 실험에 의한 고찰이 필요한 것으로 사료된다.

1. Haimson, B. C. and Kim, C. M., 1970, "Mechanical Behaviour of Rock under Cyclic Fatigue" Proc. of 13th Sympo. on Rock Mech., Urbana Illinois, pp.1-84.
2. Heroesewojo, Nishimatsu and Suzuki., 1971, "The Effects of Repeated Compressive or Tensile Load on the Mechanical Properties of Rock(1st Report)" : J. of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, V.87, No.1001, pp.515-520.
3. 이원규, 이정인, 이경운, 김민규, 김순창, 1987, "반복하중에 의한 화강암의 역학적 거동에 관하여" : 대한광산학회지, Vol.24, No.1, pp. 1-7.
4. 김일중, 김영석, 1990, "일정한 응력진폭에 의한 반복하중 하에서 사암의 피로 파괴거동에 관한 연구" : 대한자원공학회지, Vol.27, No.1, pp.9-19.
5. Ryoji Kobayashi., 1969, "Mechanical Properties of Rocks under High Rates of Loading(1st Report)" : J. of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, Vol. 85, No.979, pp.911-916.
6. Ryoji Kobayashi., 1970, "Mechanical Properties of Rocks under High Rates of Loading(2nd Report)" : J. of the Mining and Metallurgical Institute of Japan, Vol. 86, No.989, pp.525-529