

저온하에서의 화강암, 사암의 역학적 거동에 관한 연구

안경문¹⁾ · 박연준²⁾ · 이희근³⁾

A Study on Mechanical Behaviors of Granite and Sandstone at Low Temperature

Kyong-Moon Ahn¹⁾, Yeon-Jun Park²⁾ and Hi-Keun Lee³⁾

ABSTRACT To stabilize the energy price, the more storage facilities of energy are required and among the storage methods of LPG and LNG, the method of storage at low temperature under normal confining pressure is considered. It is needed to understand the mechanical and thermal characteristics of rock under temperature variation so that the behaviors of rock can be predicted. In this paper, the variation of the rock characteristics of the Hwangdeung granite and the Boryung sandstone is studied at low temperature. The mechanical characteristics of rock under low temperatures are that as temperature decreased, uniaxial compression strength and Young's modulus increased for Hwangdeung granite; strength and Young's modulus in wet condition were greater than those in dry condition. In the case of Boryung sandstone, as temperature decreases uniaxial compression strength and Young's modulus increase but decrease below -100°C in dry condition and below -160°C in wet condition. The mechanical characteristics of rock after cooling to previous temperature and thawing are that uniaxial compression strength and Young's modulus decrease as temperature decreases. Uniaxial compression strength and Young's modulus in wet condition decrease more than those in dry condition. Brazilian tension strength decreases as temperature decreases.

1. 서 론

에너지가격을 안정화하기 위해 보다 많은 에너지비축시설이 요구되고 있으며 보다 효율적인 국토이용과 재해에 대한 안정성 등의 이유때문에 지하공간의 이용이 더욱 더 증가할 것으로 기대된다. 적합한 지질 조건을 갖춘 몇몇 나라에서는 생산이 완료된 가스전, 대수층, 암염층 등에 가스저장을 하지만 그렇지 못한 나라에서는 경암의 암반공동에서 그 가능성을 찾아야 한다. 이는 저장시설의 부피를 줄이기 위해서는 가스의 밀도를 높이는 것이 필요하기 때문이다. 이것은 가스를 고압으로 유지하거나 저온으로 액화시킴으로서 이루어질 수 있다. 일반적으로 상온고압의 저장시설을 이용하지만 대부분의 가스수입은 저온의 상태로 수입되고 있다. 저온으로 저장할 시에는 고압방식으로 저장시에 필요한 액화시설 등이 필요없다는 장점이 있다. 이와 같이 저온으로 저장할 때는 암반이 열에 의해 변화를 받는데 이때 열응력에 의해 교란된 지하 암석의 역학적, 열적 특성을 이해하는 것이 필요하다. 이전의 Carlstad와

Hopkinton의 LNG저장시설 건설의 실패는 저온하에서의 암석의 역학적 거동에 대한 이해의 부족에 기인한다고 할 수 있다. 열과 역학적인 재하에 대한 암석의 거동을 정확하게 예측하기 위한 수치 모델에서는 암석 특성에 대한 입력 자료가 필요하다. 이들 특성들은 예상되는 제반 조건에 맞게 결정되어야 하는데 밀도, 압축강도, 인장강도, 탄성계수, 포아송비, 투수율, 열팽창 계수 등이 포함된다.

이에 따라 본 연구에서는 국내에 존재하는 황등화강암과 보령사암을 대상으로 하여 건조조건과 포화조건에 대해 저온냉각에 따른 단축압축강도, 탄성계수, 포아송비를 조사하여 저온에서의 암석의 역학적 특성을 조사하였다. 또한 암석을 저온냉각한 다음 해빙후 상온에서의 단축압축강도, 탄성계수, 포아송비, 인장강도, 탄성파속도 등을 조사하여 동결융해후의 암석의 역학적 특성에 대해 연구하였다.

- 1) 학생회원, 서울대학교 자원공학과, 공학석사
- 2) 정회원, 수원대학교 토목공학과 조교수
- 3) 정회원, 서울대학교 공과대학 자원공학과 교수

2. 시료, 시험장치 및 시험방법

2.1 시편 제작

본 연구에서 사용한 시료는 황등화강암, 보령사암으로 신선한 암괴로부터 암심을 채취하였으며 이때 이방성의 영향을 줄이기 위해 일정한 방향으로 채취작업을 실시하였다. 단축압축시험용 시편은 암괴시료에서 NX 암심을 채취하여 암석 절단기를 이용하여 직경 대 길이의 비가 1:1.8~2.0의 크기로 절단한 후, 일방향 표면 연삭기를 사용하여 양단면을 ± 0.001 mm의 정밀도로 연마하여 시료별로 100개씩 총 200개를 제작하였다. 압열인장시험용 시편은 NX암심을 직경 대 길이의 비가 1:0.6~0.7의 크기로 절단한 후, 카보랜덤 연마제를 사용, 수동 연마하여 시료별로 60개씩 총 120개를 제작하였다.

대상시료의 기본적인 물리적 특성은 Table 1에 나타나 있다.

2.2 시험장치

(1) Interlaken 시험 시스템

본 시험에서 사용한 시험기는 미국 Interlaken사에서 제작한 고온 및 저온용 암석역학용 시험 시스템이다. 시험시스템의 구성부분은 시험 프레임, DDC 컨트롤러, UTP 프로그램, 펌프, 삼축셀, 봉압 및 간극수압용 증폭기(Intensifier)와 액세서리 부품(익스텐소미터, 고온 및 저온용 시험조, 그립, 고정장치 등)으로 이루어져 있다. 시험 프레임은 450톤의 압축용량과 225톤의

Table 1. Physical and mechanical properties of tested samples

Properties	Samples	Hwangdeung granite	Boryung sandstone
Bulk specific gravity		2.65	2.66
Apparent porosity (%)		0.70	0.30
P-wave velocity (m/sec)		3130	4900
S-wave velocity (m/sec)		1950	2450
Uniaxial compressive strength (kg/cm ²)		1870	2170
Brazilian tensile strength (kg/cm ²)		91	169
Young's modulus (10 ⁵ kg/cm ²)		5.67	7.41
Poisson's ratio		0.19	0.15

인장 용량을 가지고 있다. 시험 프레임 오른쪽 면에 두 개의 온도조절장치가 부착되어 있다. DDC 4000 컨트롤러는 모든 신호의 생성과 제어 및 측정을 하는 디지털 신호처리기로서, 컨트롤러와 사용자와의 상호작용은 486 컴퓨터에 장착된 인터페이스 소프트웨어 UTP-4 프로그램으로 연결되어 일련의 시험을 수행하였다. 시험프레임에 설치, 제거가 가능한 고온·저온용 시험조(Environmental Chamber)는 -200°C에서 400°C까지 온도변화를 줄 수 있다. Fig. 1은 저온시험을 위한 구성부분과 함께 전체적인 시스템의 도해도이며 Fig. 2는 전체적인 시스템의 모습을 보여주고 있다.

(2) 측정 기기

가압시 하중을 측정하기 위하여 500 KN용량의 단축 압축용 수압기가 시험 프레임 위판에 설치되었다. 변위 측정과 제어는 구동장치에 달린 교류형 LVDT를 통해 구동하였다. 구동장치와 LVDT는 100 mm의 이동거

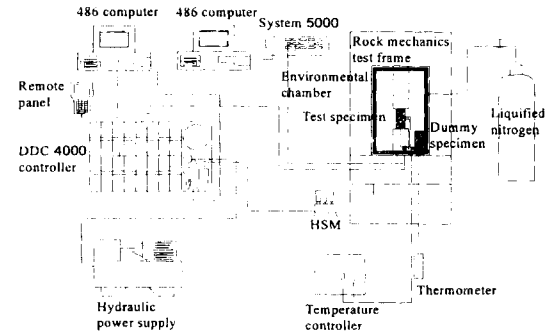


Fig. 1. Schematic diagram of testing system.

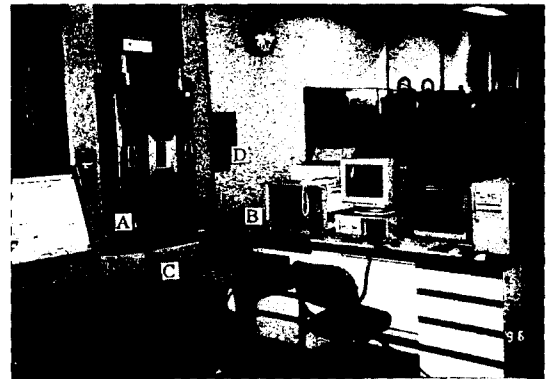


Fig. 2. A general view of Interlaken Rock Mechanics Testing System (A: Environmental chamber, B: DDC4000 controller, C: System5000, D: Temperature controller).

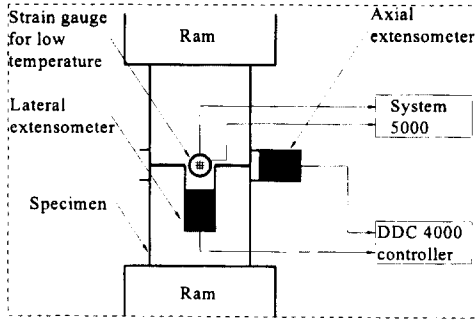


Fig. 3. A schematic diagram of data acquisition method.

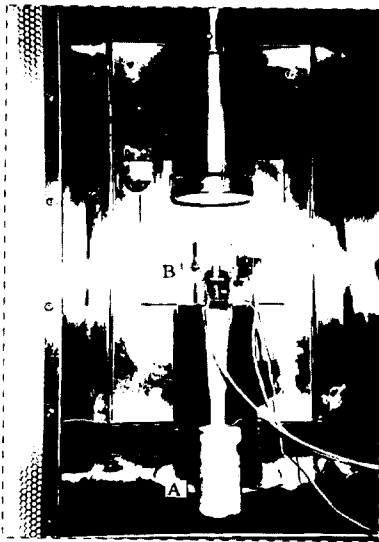


Fig. 4. A view of the environmental chamber before refrigerating (A: Test specimen, B: Reference specimen).

리를 갖는다. 변형률을 측정하기 위하여 익스텐소미터와 저온용 스트레인 게이지를 사용하였는데 이중 익스텐소미터는 평균 축방향 변형률 익스텐소미터와 원주방향 변형률 익스텐소미터를 사용하였다. 저온용 스트레인 게이지는 +80°C~-196°C까지 사용가능하다. 이는 각각 DDC 4000 controller와 System 5000을 통해 PC에 아스키파일로 저장된다. 측정에 사용된 익스텐소미터와 스트레인 게이지의 개략도가 Fig. 3에 나타나 있다. 또한 Fig. 4는 저온상태에서의 단축압축시험을 하기 위해 준비된 저온냉각전의 저온조 내부모습이다.

2.3 시험방법

(1) 시료편의 건조와 포화

Fig. 5의 시험절차에서 보듯이 준비된 시료를 완전건

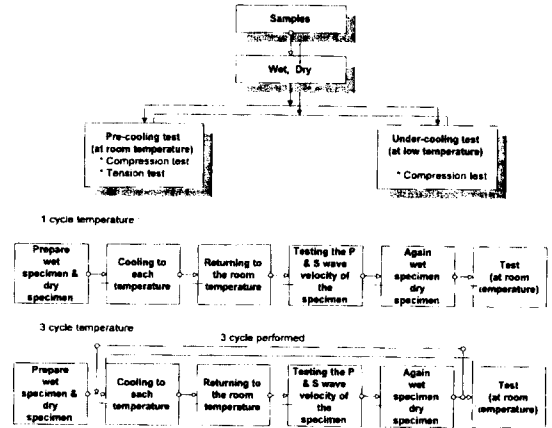


Fig. 5. Flow chart of the tests.

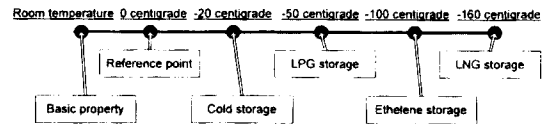


Fig. 6. Temperature of the tests.

조 및 완전포화의 두부분으로 나누어 준비하였다. 완전 건조형 시료는 24시간 정도 약 100°C정도의 건조오븐 속에서 시료를 보존한 후 데시케이트 속에 48시간 정도 보존하여 시료를 완전건조시켰다. 그리고 완전포화용 시료는 시편을 침수시킨 후 진공오븐상태에서 24시간 유지한후 48시간 정도 물속에 침수시켜 완전포화시켰다. 이렇게 완전건조와 완전포화된 시료는 수분의 유출 입을 막기 위해 비닐랩으로 포장하여 실험시까지 보관되었다. 각각의 온도용으로 3개씩 준비하였다.

(2) 시험시행 온도

시험을 시행한 온도는 상온, 0°C, -20°C, -50°C, -100°C, -160°C이다. Fig. 6에 시험의 저온냉각온도가 나와 있다. 각각의 온도는 각각 물질을 저장하는 시설의 건설시 저장시설의 중심온도로 -20°C는 냉동저장시설, -50°C는 LPG저장시설, -100°C는 에틸렌 저장시설, -160°C는 LNG 저장시설의 중심온도이다.

(3) 저온냉각하에서의 단축압축시험

저온냉각하에서 황등화강암과 보령사암의 단축압축강도와 영률, 포아송비를 측정하기 위해 시험온도는 상온(+25°C), 0°C, -20°C, -50°C, -100°C, -160°C에서 저온단축압축시험을 실시하였다.

온도조절기에는 냉각속도를 정량적으로 프로그래밍하는 기능이 없고 최종 온도만 조절할 수 있으나, 적정

온도하강속도로 시편의 온도를 하강시킨 후 목표온도에서 적절한 유지시간을 주었다. 즉, 시편내 온도구배를 완화하고 없애기 위해 표준시료의 내부온도가 목표온도에 도달한 후에 60분동안 유지하였다. 그리고 시험은 30분 사이에서 실시하였다. 또한 저온 단축압축시험시 축압의 변위속도는 0.002 mm/sec로 하여 하중충격의 영향을 최소화하였다. 단축압축강도는 파단하중을 시편의 단면적으로 나누어 구하였으며, 영률은 단축압축강도의 50%수준에서 구한 접선탄성계수로 구하였다. 그리고 포아송비는 단축압축강도의 50%수준에서 횡방축과 축방향의 변형률 값의 비이다.

(4) 저온냉각해빙후 상온에서의 단축압축시험, 압열인장시험, 탄성과 속도 측정

단축압축시험용 시료에 대해서 저온으로 냉각시킨 다음 해빙후 상온에서 단축압축시험을 행하였다. 압열

인장시험과 탄성과속도측정용 시료에 대해서는 1회 및 3회 주기적으로 온도를 저온으로 냉각시킨 다음 해빙후 상온에서 압열인장시험과 탄성과속도를 측정하였다. 이때 온도를 주기적으로 냉각-해빙시키는 과정에서 상온시에는 항상 건조상태및 포화상태를 유지하였다. 단축압축강도와 영률, 포아송비를 구하는 방법은 위의 저온냉각하에서의 방법과 동일하다. 압열인장시험은 디스크형의 시편을 시험기에 설치하고 원주방향으로 축하중을 가하여 파괴하중을 측정후 인장강도를 구하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 저온냉각하에서의 단축압축시험

0°C, -20°C, -50°C, -100°C, -160°C의 온도까지 암석

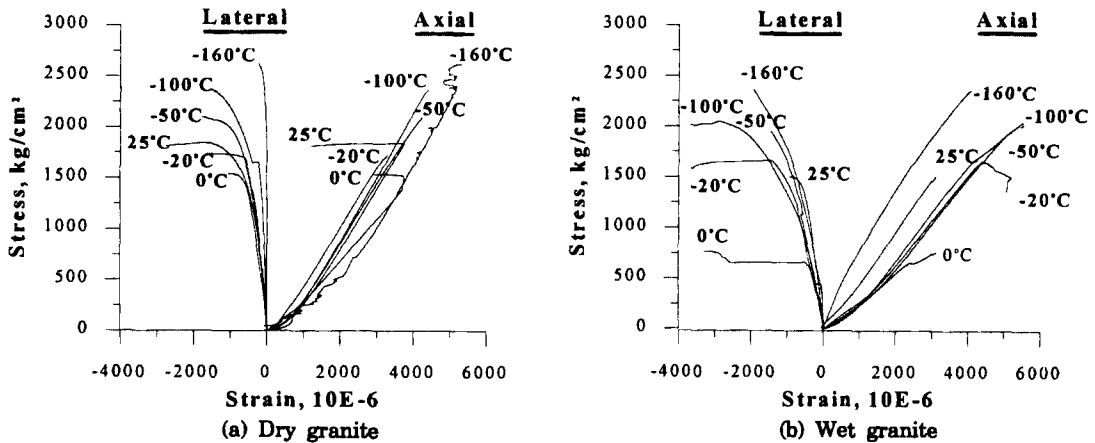


Fig. 7. Stress strain curves of uniaxial compression test under cooling temperature change.

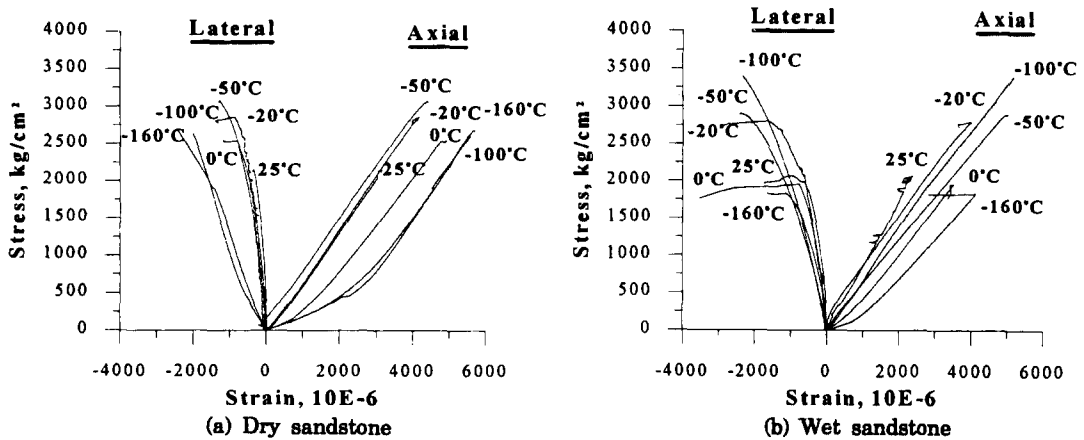


Fig. 8. Stress strain curves of uniaxial compression test under cooling temperature change.

을 냉각시킨 후 단축압축하에서 측정된 시료의 응력-변형률 선도를 각 압종과 함수상태에 따라 온도별로 Fig. 7과 Fig. 8에 도시하였다.

황등화강암의 경우 0°C일 때 소폭의 강도 저하가 발생했을 뿐 온도가 더 하강할수록 강도가 증가하였다. 건조시료일 경우 상온에 비해 -160°C에서 36%의 강도 증가, 포화시료의 경우 상온에 비해 -160°C에서 74%의 강도증가를 나타냈다. 상온에서 포화시료의 강도가 건조시료의 강도보다 낮지만 온도가 떨어짐에 따라 강도 증가비는 건조시료의 경우보다 훨씬 컸다. 이는 암석내부의 공극이나 미소균열내에 존재하는 간극수나 유동수가 응고되면서 미소균열의 틈을 채워주기 때문으로 사료된다. 온도가 내려감에 따라 축방향의 변형률과 횡방향의 변형률의 변화폭이 감소함을 보여 주는데 이는 강도의 증가에서와 마찬가지로 공극수의 역할과 냉각

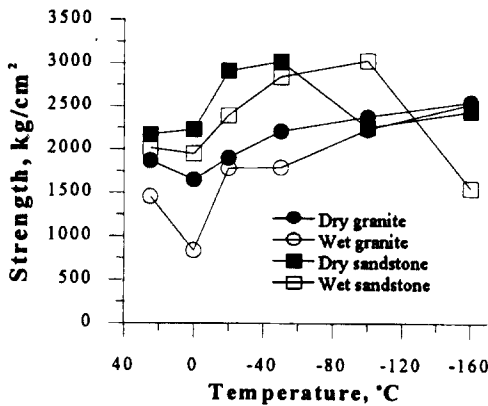


Fig. 9. Comparison of compressive strength under cooling temperature change.

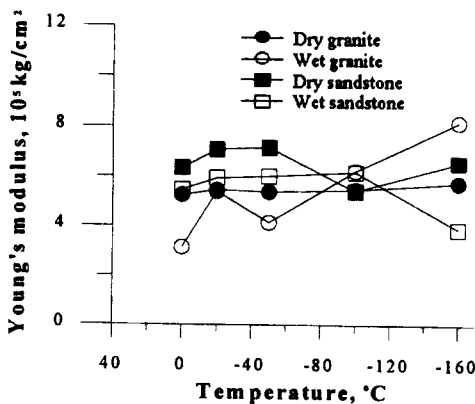


Fig. 10. Comparison of Young's modulus under cooling temperature change.

에 의한 암석의 수축등으로 설명된다.

보령사암의 경우 온도가 내려감에 따라 강도가 증가하였으나 건조시료의 경우는 -100°C에서부터 그리고 포화시료의 경우는 -160°C에서부터 강도의 저하가 나타났다. 황등화강암과 마찬가지로 0°C에서 약간의 감소가 나타났고, 그 이후 온도가 내려감에 따라 강도가 증가하여 건조시료에서는 -50°C에서 39% 강도증가하였으나 이후 강도가 감소하였다. 포화상태의 경우는 -100°C에서 51% 증가하였으나 -160°C에서 감소하였다. 이는 사암의 경우 냉각에 의한 광물입자의 수축으로 균열이 확장하여 취약한 면을 내포하게 되어 강도저하한 것으로 사료된다. 축방향의 변형률과 횡방향의 변형률의 추이양상은 황등화강암과 마찬가지로 강도의 변화와 비슷하게 거동하였다. 보령사암도 마찬가지로 포화시료보다는 건조시료에서 변형률이 작았다.

그리고 Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11에는 저온하에서의 온도에 따른 강도의 변화, 영률, 포아송비의 변화를 평균값으로 보여주고 있다. 단축압축강도의 경우 온도에 따른 강도의 변화의 변수로서 함수율과 공극의 영향이 있음을 알 수 있다. 황등화강암과 보령사암의 경우 둘다 건조상태 일때 보다는 포화상태 일때 강도 증가비가 더 큼을 볼 수 있다. 건조시료의 경우는 온도가 내려감에 따라 공극율과 강도변화비는 반비례의 관계, 그리고 포화시료는 비례의 관계를 보여줌을 알 수 있다.

3.2 저온냉각-해빙후 상온에서의 단축압축시험

Fig. 12와 Fig. 13은 각각의 온도에서 저온냉각 후 그 온도에서 90분정도 유지시킨 다음 상온에서 완전히

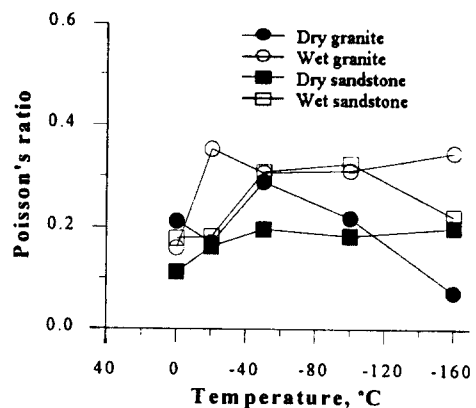


Fig. 11. Comparison of Poisson's ratio under cooling temperature change.

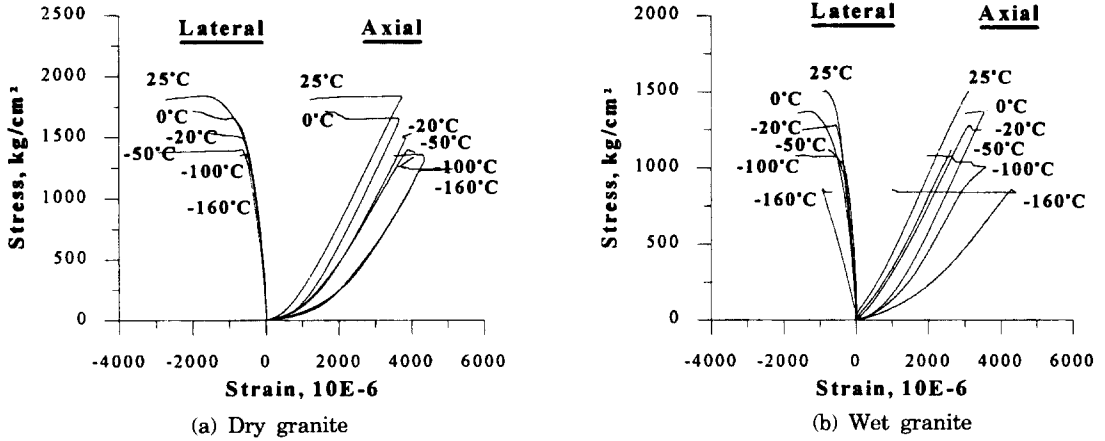


Fig. 12. Stress strain curves of uniaxial compression test under normal temperature after cooling temperature change.

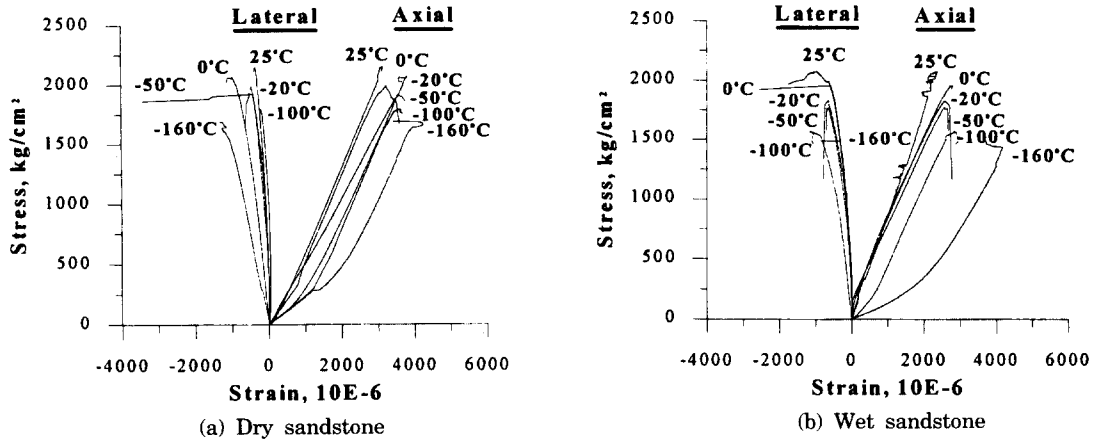


Fig. 13. Stress strain curves of uniaxial compression test under normal temperature after cooling temperature change.

해빙한 후 상온에서 실시한 단축압축시험의 결과로서 각각의 응력-변형률선도이다. 4가지의 경우 모두 온도의 변화폭이 크면 클수록 단축압축강도, 탄성계수가 감소하는 경향을 보였다. 이는 냉각으로 인한 광물입자의 축소와 얼음의 부피증가로 인해 확장된 미소균열이 상온으로 변하여도 원상태로 회복하지 못하였기 때문이다.

황동화강암의 경우 온도의 변화폭이 커짐에 따라 강도저하와 변형률이 증가하였다. 건조시료보다 포화시료에서 더욱더 강도저하와 변형률의 폭이 증가하였다. 강도는 건조시료의 경우 상온에 비해 -160°C에서 26%정도 감소하였고 포화시료의 경우 37%정도 감소하였다.

보령사암의 경우도 온도가 내려감에 따라 건조시료

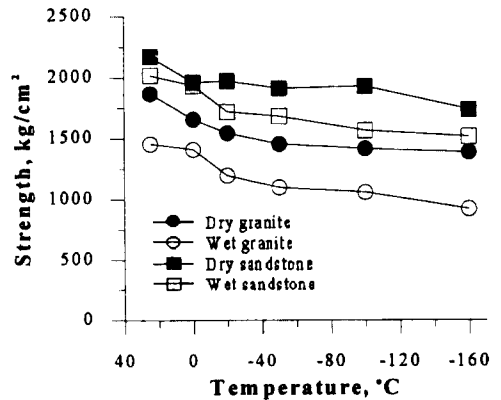


Fig. 14. Compression of compressive strength under normal temperature after cooling temperature change.

보다는 포화시료에서 강도감소가 더 많이 발생하였다. 건조시료의 경우 상온에 대비하여 -160°C에서 20%정도 압축강도가 감소하였고 포화시료의 경우 24%정도의 감소가 발생하였다.

Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16는 각각 저온냉각-해빙후 상온에서의 단축압축강도, 영률, 포와송비의 변화이다.

3.3 저온냉각-해빙후 상온에서의 압열인장시험

0°C, -20°C, -50°C, -100°C, -160°C까지 각각 저온냉각시킨 다음 해빙후 상온에서 압열인장시험을 실시하였다. 이때 1회와 3회 저온냉각-해빙한 두 가지 경우에 대해 시험을 하였다. Fig. 17에 황등화강암과 보령사암에 대한 압열인장시험의 결과가 그래프로 표시되었다. 이는 각각의 암석에 대해 건조상태와 포화상태의

두 경우를 1회와 3회 각각 저온냉각-해빙후에 시행한 시험결과이다.

황등화강암과 보령사암 둘다 저온반복 횟수에 의한 강도의 차이는 거의 없었다. 그러나 황등화강암의 경우는 건조시료보다 포화시료의 강도저하정도가 좀더 많이 일어났으며 보령사암의 경우는 건조시료의 경우가 포화시료보다 약간 강도저하정도가 더 높았다. 이는 보령사암의 공극률이 낮아 황등화강암의 경우보다 덜 얼음의 영향을 받은 것으로 사료된다.

3.4 저온 냉각-해빙후 상온에서의 탄성과 속도의 변화

시편을 1회와 3회씩 저온냉각-해빙한 후 상온에서 암석의 탄성과속도를 측정하였다. Fig. 18과 Fig. 19에

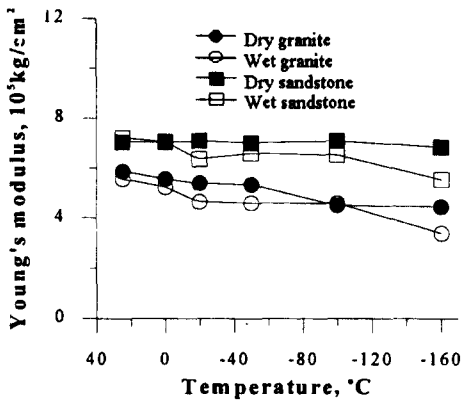


Fig. 15. Comparison of Young's modulus under normal temperature after cooling temperature change.

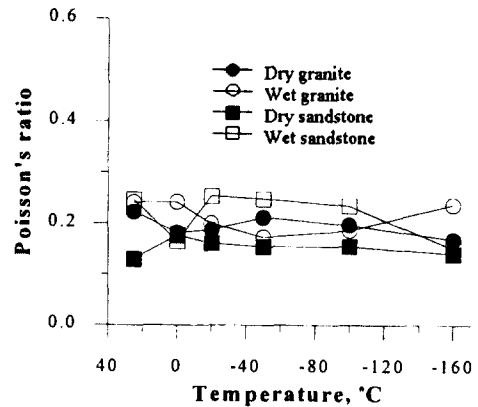


Fig. 16. Comparison of Poisson's ratio under normal temperature after cooling temperature change.

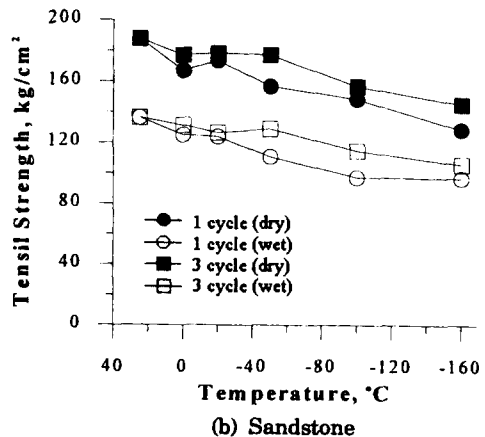
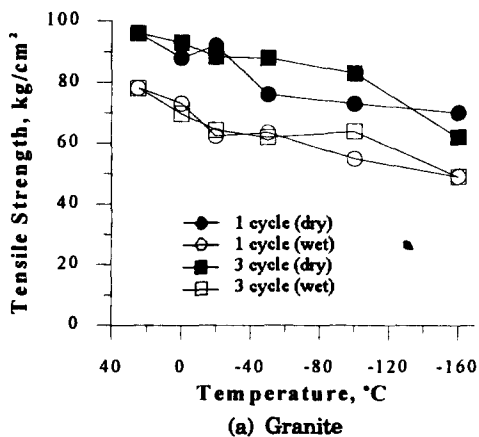


Fig. 17. Comparison of tensile strength under normal temperature after cooling temperature change.

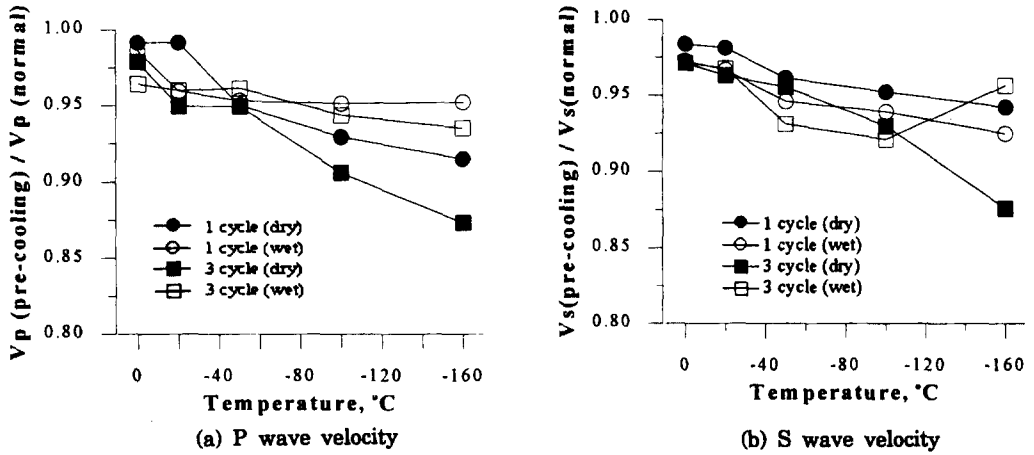


Fig. 18. Comparison of elastic wave velocity under normal temperature after cooling temperature change for Granite.

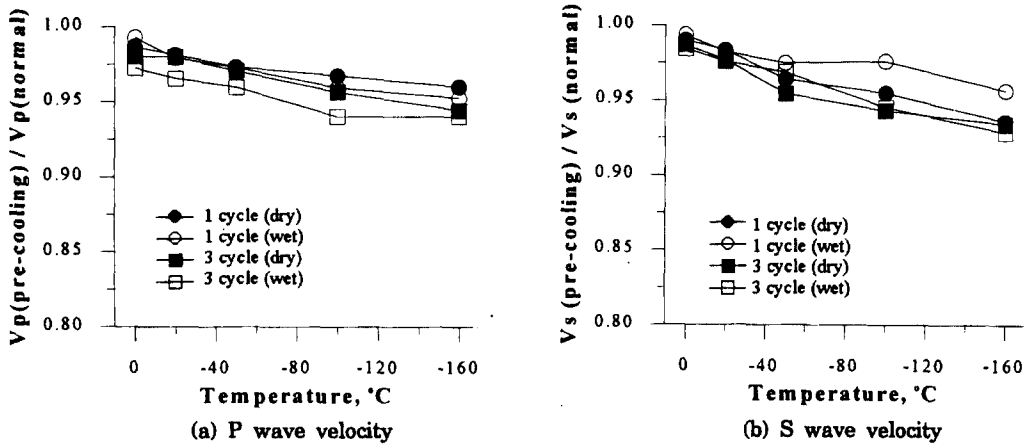


Fig. 19. Comparison of elastic wave velocity under normal temperature after cooling temperature change for Sandstone.

각각의 암석과 탄성파의 종류에 따라 온도변화폭에 따른 P파와 S파의 속도변화를 그래프로 표시하였다. 황등화강암의 P파속도는 건조상태인 경우, 3회 저온처리했을 때가 포화상태일 때와 1회 저온처리때보다 많은 감소가 일어났다. S파도 역시 P파와 비슷한 경향을 보였다.

보령사암의 P파속도 변화는 건조상태와 포화상태일 때의 차이가 황등화강암처럼 명백하지는 않았지만 건조시에 더 많은 변화가 있었다. 또한 저온 처리의 횟수에 따른 감소정도는 거의 차이가 없지만 3회 처리시 더 많은 감소가 있었다. 보령사암의 S파속도 변화는 건조한 경우와 3회 저온처리의 경우가 포화한 경우와 1회 저온처리의 보다 더 많은 변화가 있었다.

4. 결 론

저온하에서의 암석의 역학적 특성을 규명하기 위하여, 본 연구에서는 -160°C까지 황등화강암과 보령사암에 대하여 건조상태와 포화상태의 각각의 경우에 저온냉각하에서 단축압축시험을 하였으며, 또한 저온냉각-해빙 후 상온하에서 단축압축시험, 압열인장시험, 탄성파속도측정을 실시하였다.

1. 저온냉각하에서의 단축압축시험에서 황등화강암은 온도의 감소에 따라 0°C의 경우를 제외하고는 -160°C까지 단축압축강도와 영률이 증가하였다. 건조한 경우보다는 포화된 경우 더욱더 강도의 증가폭이 더 컸으며 포이송비의 경우는 일정한 경향성을 찾을수가 없

었다. 그리고 보령사암의 경우 온도가 내려감에 따라 강도와 영률이 증가하다가 건조시료는 -100°C 에서 감소하였으며 포화시료의 경우는 -160°C 에서 감소하였다.

2. 저온냉각-해빙후 상온에서의 단축압축시험 결과 황등화강암과 보령사암의 단축강도와 영률은 감소하였다. 그리고 포아송비도 일정한 경향은 아니지만 대체로 감소하는 경향을 보였다. 그 감소폭은 포화시료가 건조시료보다 훨씬 더 많이 감소하였으며 포화상태에서는 화강암이 보령사암보다 감소폭이 컸으며 건조상태에서는 사암이 황등화강암보다 감소폭이 컸다.

3. 저온냉각-해빙후 상온에서의 압열인장시험에서 온도변화의 폭이 클수록 인장강도도 감소하였다. 포화시료의 경우가 건조시료보다 인장강도의 감소가 훨씬 더 일어났으며 공극율이 큰 황등화강암이 더 많이 감소하였다. 그리고 온도변화횟수는 인장강도에 많은 영향을 끼치지 않았다. 이는 공극율이 작아 변화횟수에 많은 영향을 받지 않은 것으로 사료된다.

4. 저온냉각-해빙후 상온에서의 탄성파속도 측정에서는 온도가 내려감에 따라 탄성파속도도 감소하였다. 공극율이 상대적으로 큰 황등화강암이 보령사암보다 더 많이 감소하였으며 1회 온도변화시보다는 3회 온도변화시에 더 많은 감소가 있었으며 건조시료의 경우가 포화시료보다 더 많은 감소가 있었다. 그리고 S파보다

는 P파의 경우 더 많은 감소가 있었다.

참 고 문 헌

1. 정재훈, 김영근, 이형원, 이희근, 1992, 고온 및 저온하에서의 암석의 변형, 파괴특성, 터널과 지하공간, 한국암반역학회, Vol. 2, pp.224-236.
2. 통산산업부, 1995, 에너지 절약형 지하 냉장 및 냉동저장 설계기술개발에 관한 중간보고서.
3. Inada, Y., 1989, Low temperature storage of gases in underground openings, Storage of Gases in Rock Caverns, Balkema, pp. 259-266.
4. Inada, Y., and K. Yokota, 1984, Technical Note: Some Studies of Low Temperature Rock Strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.21, No. 3, pp. 145-153.
5. Kenji Aoki, Keisuke Hibiya and Takehisa Yoshida, 1989, Storage of refrigerated liquified gases in rock caverns-Characteristics of rock under very low temperature, Storage of Gases in Rock Caverns, Balkema, pp. 221-227.
6. Kuriyagawa, M., I. Matsunaga, N. Kinoshita and K. Hibi, 1980, Rock Behavior of Underground Cavern with the Storage of Cryogenic liquified Gas, Subsurface Space-Proceedings of the International Symposium (Rockstore '80).
7. Malcolm M., 1973, Mechanical properties of rocks at low temperatures, Int. Conf. on Permafrost 2nd, Yakutsk, Siberia.