

온도변화가 암석의 기본물성과 압열인장특성에 미치는 영향 Effect of Temperature on Index Properties and Brazilian Tensile Strength of Rocks

이 찬 구(Rhee, Chan Gu)	한국원자력연구소
최 원 학(Choi, Weon Hack)	한국원자력연구소
장 천 중(Chang, Chun Joong)	한국원자력연구소
김 지 영(Kim, Ji Young)	한국원자력연구소
이 지 훈(Lee, Ji Hoon)	한국원자력연구소

요약/Abstracts

화강암과 안산암의 기본 물성치들은 공극률과 함수율의 관계에서는 매우 높은 상관성을 보였으나 진비중, 공극률 및 함수율과 P 파 속도와의 관계에서는 분산된 zone 형태의 낮은 상관성을 보였다.

압열인장강도는 온도상승시 화강암과 안산암 모두 큰 변화는 없었으나 100°C 부근에서 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 화강암의 경우에는 150°C 부근에서 강도가 증가한 후 200°C 이상의 온도에서는 약간 감소하는 경향을 보였으나, 안산암의 경우에는 200°C까지 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보였으며, 각 온도에서의 P파 속도의 변화는 이러한 인장강도의 변화와 유사한 양상을 나타내었다.

Among the index properties of granite and andesite, the relation between porosity and water content is highly correlated, but specific gravity, porosity and water content have low relation with P wave velocity and their relationship showed dispersed zone type.

With raising the temperature, Brazilian tensile strength was not changed remarkably, but decreased near 100°C. After the strength increased at 150°C, it decreased near 200°C in granite. In andesite, however, the strength was increased up to 200°C, and then decreased. The variations of P wave velocity at each temperature zone are similar to those of tensile strength.

시 인

지하심부에 방사성폐기물을 처분할 경우 암반의 자중에 의한 지압과 지열로 인한 온도상승의 영향을 고려하여야 한다. 특히, 고준위 방사성폐기물을 처분할 경우에는 폐기물 자체의 온도까지 고려하여야 하므로 처분동굴의 안정성을 해석할 때 반드시 온도상승으로 인한 열하중의 영향을 고려하여야 한다. 이러한 열하중의 영향을 고려하기 위해서는 우선 암석이나 암반의 공학적 특성에 영향을 미치는 물리적 특성치들의 온도상승에 따른 변화특성이 규명되어야 하며 특히 처분동굴의 안정성해석시 중요한 요소의 하나인 인장특성의 변화 양상이 밝혀져야 한다.

본 연구에서는 화강암과 안산암의 기본 물성치로 진비중, 공극률 및 함수율 등을 측정하였고 P파 속도를 측정하였으며 압열인장강도시험을 통해 이들 물성치간의 상호 관계를 살펴보았다. 또한 온도를 100°C, 150°C, 200°C 및 250°C로 상승시켰을 때 탄성파속도와 압열인장강도의 변화상태와 상호간의 상관성을 규명하고자 하였다.

시편제작 및 기본 물성치

본 연구에서는 전라남도 여천시 일대의 백악기 화강암 분포지역에서 채집한 30개의 NX 코아, 경상남도 울산군 일대의 백악기 안산암 분포지역에서 채집한 30개의 NQ코아를 시편으로 사용하였다. 화강암의 주 구성 광물은 정장석으로 전체의 약 50%를 차지하며 석영은 암석 전체의 약 20%를 점하며 유색광물들은 그 함량이 적어 암석전체가 우백

질의 특징을 보인다. 안산암의 주 구성광물은 사장석으로 약 30 - 50 %를 차지하며 석영은 평균 10%정도이나 유색광물과 불투명 광물들이 10%정도를 점하고 있어 암갈색을 띠었다.

이러한 암석학적 특성을 가진 지름이 각각 약 54mm와 48mm인 코아시료를 지름과 높이의 비가 1 : 0.5가 되도록 절단하여 시편을 제작하였다. 시료를 절단한 후 자동연마기와 Carborundum을 사용하여 상하의 절단면이 시편축에 직각이 되도록 연마하였으며 두 절단면이 최대한 평행이 되도록 연마하였다. 암석의 물리적 특성치를 결정하기 위하여 공극률, 진비중, 함수율 등을 측정하였으며 아울러 Sonic viewer를 사용한 초음파 pulse법에 의하여 탄성파속도를 측정하였다. 이와 같이 측정된 화강암과 안산암 시편의 물리적 특성치들은 Table 1에 요약되어 있다.

물리적 특성치의 상관성

일반적으로 암석의 기본 물성치들 사이의 상관관계는 직선관계, 곡선관계 및 zone의 형태 등으로 분류될 수 있다. 그러나, 이론적으로 양호한 상관관계가 기대되는 몇몇 탄성계수 상호간이나 탄성계수와 특정 물성치 사이의 관계를 제외한 대부분의 경우는 zone의 형태를 나타낸다 (Judd and Herbert, 1961). 이러한 현상은 국내산 암석을 시편으로 사용한 연구 (김영화, 장보안, 1992; 송무영, 황인선, 1993; 김재동, 장보안, 1993) 결과에서도 나타나며, 암상이 비교적 단순하고 물성적으로 등방균질한 것으로 간주되는 화강암의 경우라 하더라도 기본 물성치들은 상당

Table 1. Measured index properties in granite and andesite. Sample number of YGT-No. is granite and that of WAT-No. is andesite. The unit of porosity and water content is percent(%), and P wave velocity has km/sec unit. Tensile strength is expressed as t(kg/cm²).

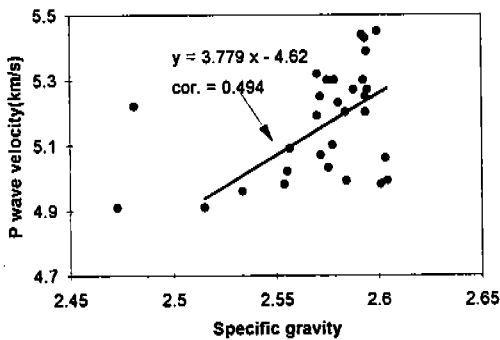
Sample Number	Specific gravity	Porosity	Water Content	P wave velocity	t(kg/cm ²)	Sample Number	Specific gravity	Porosity	Water Content	P wave velocity	t(kg/cm ²)
YGT-1	2.60	0.97	0.14	4.99	136.02	WAT-1	2.63	1.97	0.60	5.36	118.21
YGT-2	2.58	1.33	0.24	4.99	171.89	WAT-2	2.67	3.55	0.77	5.54	143.53
YGT-3	2.60	0.94	0.16	4.98	145.93	WAT-3	2.57	5.80	1.36	5.17	163.77
YGT-4	2.59	0.98	0.20	5.25	182.37	WAT-4	2.57	5.99	1.37	4.95	139.14
YGT-5	2.58	1.45	0.25	5.10	158.63	WAT-5	2.67	2.19	0.50	5.71	181.08
YGT-6	2.59	0.98	0.19	5.30	215.30	WAT-6	2.63	2.54	0.68	5.56	158.91
YGT-7	2.58	1.30	0.21	5.20	203.06	WAT-7	2.66	2.20	0.73	5.59	184.15
YGT-8	2.59	0.93	0.17	5.27	206.16	WAT-8	2.62	2.89	0.90	5.32	168.67
YGT-9	2.59	1.08	0.15	5.20	240.31	WAT-9	2.67	2.19	0.60	5.33	214.07
YGT-10	2.55	2.13	0.37	4.98	201.31	WAT-10	2.67	1.97	0.53	5.74	182.67
YGT-11	2.59	0.84	0.16	5.39	191.49	WAT-11	2.61	3.33	0.89	5.39	182.50
YGT-12	2.57	1.66	0.28	5.07	218.26	WAT-12	2.68	3.99	0.88	5.41	226.86
YGT-13	2.58	1.45	0.28	5.23	182.19	WAT-13	2.72	2.05	0.52	5.86	235.96
YGT-14	2.59	0.97	0.17	5.43	189.04	WAT-14	2.68	3.44	0.90	5.67	177.72
YGT-15	2.48	1.63	0.30	5.22	234.90	WAT-15	2.63	4.60	1.04	5.34	153.63
YGT-16	2.56	1.76	0.31	5.09	203.33	WAT-16	2.68	1.83	0.62	5.82	144.27
YGT-17	2.56	2.18	0.38	5.02	212.11	WAT-17	2.72	0.68	0.21	5.75	172.16
YGT-18	2.59	1.24	0.26	5.44	212.25	WAT-18	2.61	5.75	1.06	4.97	185.33
YGT-19	2.60	0.82	0.16	5.45	200.30	WAT-19	2.63	4.26	0.97	5.32	139.22
YGT-20	2.58	1.25	0.03	5.30	245.45	WAT-20	2.61	3.38	0.93	5.51	108.51
YGT-21	2.59	1.26	0.25	5.27		WAT-21	2.65	1.01	0.35	5.42	
YGT-22	2.58	2.44	0.72	5.03	172.86	WAT-22	2.65	0.75	0.26	5.57	180.28
YGT-23	2.57	2.12	0.60	5.32	183.95	WAT-23	2.65	0.85	0.30	5.37	
YGT-24	2.58	2.44	0.72	5.30	186.90	WAT-24	2.65	0.99	0.35	5.42	
YGT-25	2.57	2.42	0.55	5.25	201.55	WAT-25	2.65	0.89	0.31	5.45	259.72
YGT-26	2.53	4.47	0.74	4.96		WAT-26	2.65	0.73	0.26	5.51	225.85
YGT-27	2.57	2.21	0.61	5.19	194.22	WAT-27	2.69	3.50	1.20	5.61	209.12
YGT-28	2.47	7.33	1.44	4.61		WAT-28	2.65	0.79	0.27	5.50	257.20
YGT-29	2.60	1.55	0.39	5.06		WAT-29	2.67	2.83	0.93	5.62	181.42
YGT-30	2.52	5.37	1.07	4.91		WAT-30	2.69	3.60	1.00	5.66	

히 분산된 zone형태의 상관성을 보인다(김영화,홍순호, 1990).

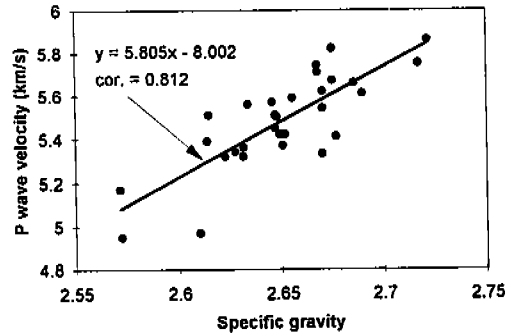
Fig.1은 암석의 기본 물성치 중 대표적인 특성치인 진비중과 공극률의 P파 속도와의 관계를 나타낸 것으로 전반적으로 분산된 zone형태의 상관성을 보인다. P파 속도는 두 암종 모두에서 대체적으로 비중의 증가에 따라 증가하며 공극률의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 화강암의 평균 진비중이 2.57이고 평균 P 파 속도가 5.17 km/sec이었으며, 안산암의 경우 진비중의 평균이 2.65이고 P파 속도의 평균이 5.47

km/sec 이었으므로 암종에 관계없는 현상임을 알 수 있다.

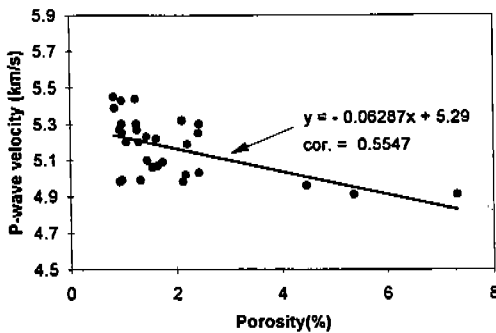
진비중에 대한 P파 속도의 상관성은 화강암의 경우 (Fig.1 A) 상관도가 0.49로 안산암 (Fig.1 B)의 상관도 0.81보다 상당히 낮게 나타났으며, 공극률에 대한 P파 속도의 상관성은 화강암의 경우(Fig.1 C) 0.55의 상관도를 보여 안산암의 경우(Fig.1. D)와 비슷하게 나타났다. 이와 같은 시험결과를 중생대 화강암 시편을 대상으로 한 연구결과(김영화,장보안,1992)와 비교해 볼 때 P파 속도는 진비중에 대해 비슷한 상관도를 보이나 공극률에



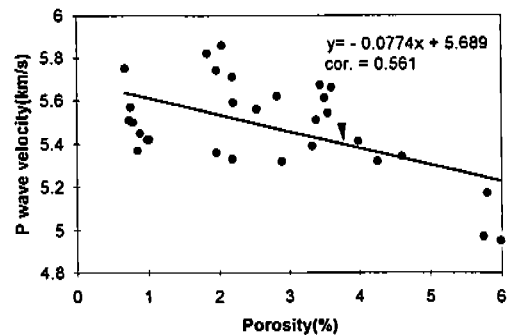
A)



B)



C)



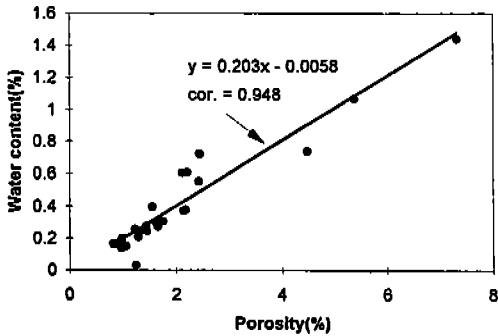
D)

Fig. 1 The relations between index properties at room temperature. A) and B) show specific gravity - P wave velocity relations in granite and andesite respectively. C) and D) show porosity - P wave velocity relations in granite and andesite respectively. The equation is a linear regression from two data, and cor. means correlation coefficients.

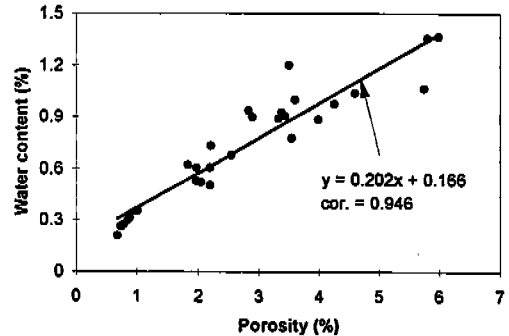
대해서는 낮은 상관성을 보였다. 그러나, 퇴적암을 대상으로 한 연구결과(송무영, 황인선, 1993)중 셰일의 경우에 비해서는 진비중과 공극률에 대한 P파 속도의 상관성은 모두 높은 편이었다.

Fig. 2는 공극률과 함수율의 상호관계와 함수율에 대한 P파 속도의 관계를 나타낸 것으로 공극률과 함수율의 관계(Fig.2 A, B)

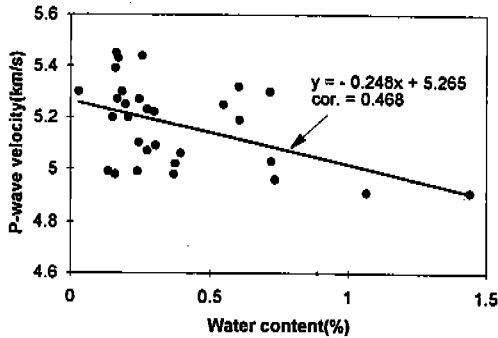
는 화강암의 경우와 안산암의 경우 상관도가 모두 0.95로 매우 높은 상관성을 보이고 있다. 그러나, 함수율에 대한 P파 속도의 관계(Fig.2 C, D)는 분산된 zone형태의 상관도를 보였으며 공극률에 대한 경우보다 약간 더 분산된 결과를 보였다. 이러한 시험결과의 상관성은 전술한 연구자들의 시험결과와 비교할 때 모두 약간 높은 편이었다.



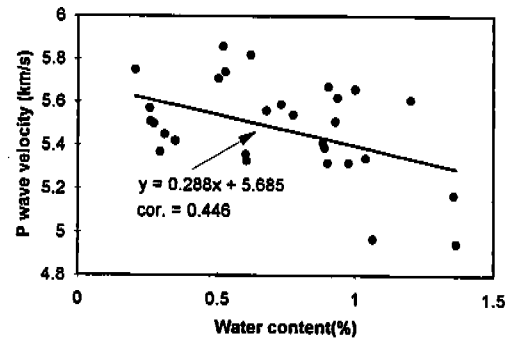
A)



B)



C)



D)

Fig. 2 The relations between index properties at room temperature. A) and B) show porosity - water content relations in granite and andesite respectively. C) and D) show water content - P wave velocity relations in granite and andesite respectively.

온도조건과 압력인장강도

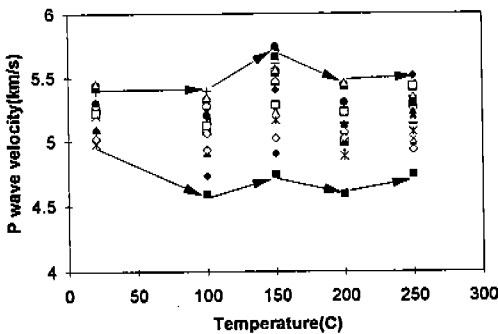
온도조건의 변화가 압력인장특성에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 먼저 기본 물성의

변화를 살펴 보아야 한다. 암석의 물리적 특성치에 미치는 온도의 영향에 관한 연구는 여러 연구자들(Elliot, Brown, 1988; 島田莊平 譯, 昭和 58; Griggs, Tunner, 1960)에 의해

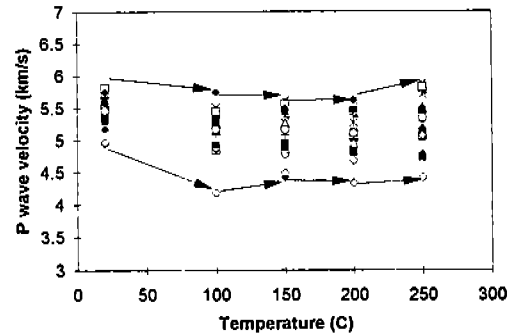
수행되었다. 일반적으로 온도가 상승하면 암석의 강도특성이 변하게 되는데 (1) 온도가 상승하면 최대강도점까지 파괴강도가 증가한 후 감소하는 경우와 (2) 파괴강도가 온도의 상승에 따라 일정온도까지 급격히 감소한 후 서서히 감소하는 경우의 두 그룹으로 대별할 수 있다. 첫 번째 그룹에 속하는 암석들은 보통 온도상승의 초기단계 (100 °C ~ 160°C) 에서 강도지표가 감소하는 경향이 있으므로 주의할 필요가 있는 것으로 알려져 있다(島田莊平 譯, 昭和 58). 따라서 온도의 변화가 암석의 물리적 특성치에 미치는 영향을 분석할 필요가 있으며, 특히 방사성폐기물을 지하 심부에 처분할 경우에는 열하중이 암석의 인장강도에 미치는 영향 등이 반드시 고려되

어야 한다(Stephens, Voight, 1982, Solberg, Lockner, 1980).

Fig.3은 온도를 일정하게 유지할 수 있는 건조기에서 각 온도까지 충분히 가열한 후 온도별로 각각 5개씩의 시편에서 측정된 P 파 속도변화를 나타낸 것으로 화강암과 안산암의 경우 모두 변화의 폭은 크지 않았으며 전체적인 변화 양상은 대체적으로 유사한 형태를 보였다. 화강암의 경우 (Fig.3A)는 100 °C부근에서 약간 감소한 후 150°C부근에서 증가현상을 보였다가 200°C에서는 다시 약간 감소하는 경향을 보였다. 안산암의 경우(Fig. 3B)도 비슷한 형태를 보였으나 250°C부근에서 화강암에 비해 다소 증가하는 경향을 보이고 있다.



A)



B)

Fig. 3 The variation of P wave velocity to the temperature shows dispersed zone type. A) is granite and B) is andesite. The same symbol is measured from one specimen with respect temperature.

Fig.4 는 각 온도에서 미국의 Structural Behavior Engineering Laboratory사에서 제작한 용량이 30만 LBS 인 Hydraulic fracturing system 547을 사용하여 변형을 제어 방식으로 측정된 압력인장강도의 변화를 나타낸 것으로 두 암종의 변화양상은 대체로 유사한 형태를 보였다. 화강암의 경우

(Fig.4A) 상온에서는 평균 184kg/cm²를 나타내나 100 °C부근에서는 평균 156kg/cm²으로 감소한 후, 150°C부근에서는 약 209kg/cm²로 증가하였다. 200°C부근과 250°C부근에서는 각각 평균 199kg/cm² 및 210kg/cm²로 큰 변화를 나타내지 않았다. 전체적인 인장강도의 변화 폭은 상온에서의 강도를 기준으로

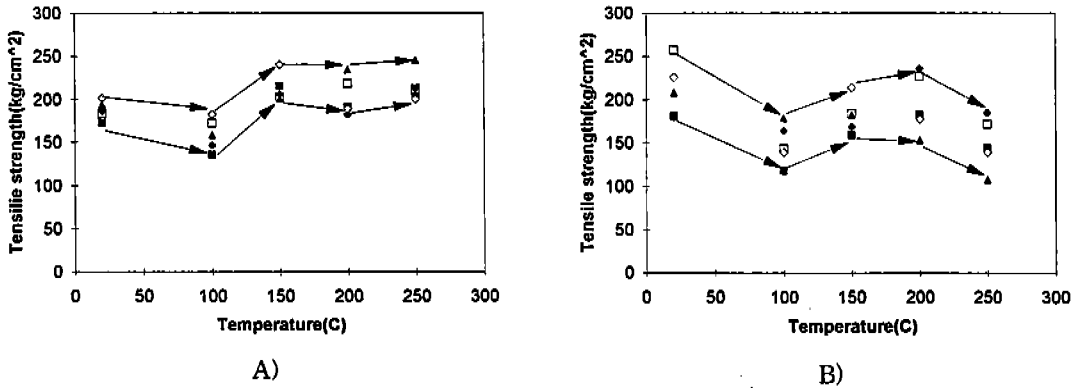


Fig. 4 The variation of Brazilian tensile strength to the temperature shows dispersed zone type. A) is granite and B) is andesite. Five specimen were tested at each temperature.

할 때 약 15%이내의 증감을 나타내는 바, 이는 강도시험 시 일반적으로 나타나는 변화의 폭과 큰 차이를 나타내는 것은 아니다. 그러나, 안산암의 경우도 화강암의 경우와 유사한 변화 양상을 보이는 것으로 볼 때 100°C 부근에서 인장강도가 약간 감소하며 150°C - 200°C 부근에서 다소 증가하는 경향은 분명함을 확인할 수 있었다.

한편, 이러한 압력인장강도의 변화양상은 두 암종 모두에서 각각 Fig. 3의 P와 속도의 변화 양상과 상당히 유사한 형태를 보인다. 이러한 변화의 유사성이 직접적인 상관성을 의미하는지는 아직 불분명하나, 이런 현상은 온도가 상승하면 파괴전에 먼저 미세 균열들이 발생(Wang, Bonner, 1989)하게 되는데 이러한 미세균열들의 영향이 P와 속도에 반영되기 때문인 것으로 판단된다.

토의 및 결론

암석의 어떤 물리적 특성치가 강도 특성의 변화에 결정적인 영향을 미치느냐 하는 것을

밝히는 것은 매우 어려운 일이며, 동일한 종류의 암석에서도 가장 결정적인 요인을 찾아낸다는 것은 대부분의 경우 불가능한 일(島田莊平譯, 昭和 58)로 알려져 있다. 그러나, 여러 연구자들에 의해 아직 충분하지는 못하지만 여러가지 물리적 특성치 중 P와 속도의 유용성이 밝혀지고 있다.

본 연구에서도 온도 상승시의 P와 속도의 변화양상이 압력인장강도의 변화양상과 매우 유사하여 온도변화에 따른 지표로서의 P와 속도의 활용가능성을 확인하였다. 이러한 가능성은 화강암에서의 열하중에 의한 미세균열의 연구(Wang, Bonner, 1989)에 의해서도 뒷받침된다. Wang과 Bonner는 Westerly 화강암과 Illinois 화강암의 경우 동일 하중조건에서 미세균열의 발생률이 100°C에서 증가하였다가 200°C에서 감소한 후 250°C 부근에서 다시 증가함을 밝혔으며 이런 현상은 석영과 장석의 경계부분에서 현저함을 밝혔다.

이번 연구에서도 시험에 사용된 화강암과 안산암의 주성분 광물인 석영과 장석의 경계부에서 이런 현상이 발생하여, P와 속도와

인장강도의 변화에 영향을 미쳐 온도상승에 따라 증감의 변화를 나타낸 것으로 판단된다. 그러나, 이러한 시험결과는 각 온도에서 5개씩의 제한된 시편을 사용하여 얻은 결과이므로, 차후 충분한 시험과 미세균열의 발생현상에 대한 현미경적 분석 등의 연구를 수행하여 온도변화에 따른 파괴특성 변화의 원인을 보다 분명히 규명할 필요가 있다. 따라서, 아직 만족스러운 결과는 아니지만 본 연구의 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 화강암과 안산암의 압력인장강도는 온도가 상승함에 따라 100℃부근에서 약간 감소하는 경향을 보였다. 화강암의 경우 150℃부근에서 증가한 후 200℃이상에서는 다시 감소하는 경향을 보이며 안산암의 경우는 200℃까지 다소 증가한 후 250℃에서는 다시 약간 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 대체로 인장강도의 변화 폭은 상온에서의 강도를 기준으로 할 때 약 15%정도의 증감을 나타내어 전체적인 변화의 폭은 작은 편으로 나타났다.

2) 온도의 상승에 따른 P파 속도의 변화 양상은 압력인장강도의 변화양상과 상당히 유사한 형태를 보여, 온도변화시의 압력인장 특성에 대한 지표로서의 활용가능성을 확인할 수 있었다.

3) 암석의 물리적 특성치는 그 암석의 공학적 특성을 나타내는 유효한 기준이 될 수 있으나, 구성 매질의 성분과 조직상의 차이나 측정조건의 미세한 차이 등에 상관성에 있어서 많은 차이를 나타내므로 보다 정밀한 측정방법에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- 김영화, 장보안, 1992, 화강암의 풍화현상에 수반되는 물성변화의 특성, 지질공학, 제2권 제1호, pp. 36-46.
- 김영화, 홍순호, 1990, 풍화현상에 수반되는 화강암의 물성변화에 관한 연구, 광산지질, 제23권, pp. 221-232.
- 김재동, 장보안 외, 1993, 국내산 석재의 물리적, 화학적, 역학적 특성 및 내구성 연구, 한국과학기술재단, pp. 1-35.
- 島田莊平 譯, 昭和 58, 高温下の岩石物性, 内田老鶴圃, pp.1-42.
- 송무영, 황인선, 1993, 한반도 중부권 지각물질의 구조와 물성연구(2) : 퇴적암류 코아시료의 탄성파속도와 점재하 강도의 비교, 지질공학, 제3권 제1호, pp.21-37.
- Elliot, G.M. and Brown, E.T., 1988, Laboratory measurement of the thermohydro-mechanical properties of rock, Quart. Jour. of Eng. Geo., Vol.21, pp.299-314.
- Griggs, D.T., Turner, F.J., et al., 1960, Deformation of rocks at 500 to 800℃, G.S.A., Meomori 79, pp.39-104.
- Judd, W. and Herber, C., 1961 Correlation of rock properties by statistical method. Int. Symp. Mining Res., Missouri Sch. Mines, Rollar, Mo.
- Solberg, P., Lockner, D., et al., 1980, Hydraulic fracturing in granite under geothermal conditions, Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.17, pp.25-33.
- Stephens, G. and Voight, B., 1982, Hydraulic fracturing theory for conditions of thermal stress, Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.19, No.4, pp. 279-284.

이찬구, 최원학, 장천중, 김지영, 이지훈 :
한국원자력연구소 부설 원자력환경관리
센터 사업기술부 지질공학실
305 -353
대전광역시 유성우체국 사서함 105호
TEL : (042) 868 - 2061
FAX : (042) 861 - 4824