

암석의 수압파쇄특성에 미치는 주입률과 온도의 영향 Effects of Injection and Temperature Variations on the Breakdown Pressure of Rocks

이 찬 구(Rhee, Chan-Goo)
송 무 영(Song, Moo-Young)
최 원 학(Choi, Weon-Hack)
장 천 중(Chang, Chun-Joong)
이 종 옥(Lee, Jong-Uk)

한국원자력연구소
충 남 대 학 교
한국원자력연구소
한국원자력연구소
한국원자력연구소

요약/Abstract

주입률의 변화가 안산암의 수압파쇄특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 세 단계의 주입률 조건하에서 파쇄실험을 수행하였다. 40kN의 수직하중 하에서 주입률을 각각 1ml/min, 2ml/min 및 3ml/min로 제어하였을 때, 주입률의 변화에 관계없이 파쇄압은 163kg/cm² 내외로 일정한 값을 나타내었다.

화강암에서는 수압파쇄특성에 미치는 온도변화의 영향을 파악하기 위하여 다섯 단계의 온도조건 하에서 파쇄실험을 수행하였다. 40kN의 수직하중 하에서 1.7ml/min의 주입률로 파쇄시켰을 때 파쇄압은 상온에서는 평균 168kg/cm²를 보였으나 온도가 상승할수록 감소하여 200℃에서는 평균 124kg/cm²를 나타내어 약 25%정도 감소하는 경향을 보였다. 주입률을 일정하게 제어할 경우 균열의 초기생성압은 온도변화에 상관없이 파쇄압과 잘 일치하였으며 이러한 사실은 균열음 측정결과로도 확인할 수 있었다.

To elucidate the effects of flow rate on the hydraulic fracturing property of andesite, the hydraulic fracturing tests were conducted under three flow rates. As the tests are conducted with 1ml/min, 2ml/min and 3 ml/min under the constant axial load of 40 kN, the breakdown pressures of andesite seem to be constant as 163kg/cm².

The hydraulic fracturing tests were carried out under the temperatures of five stages to elucidate the effects of temperature variation on hydraulic fracturing property of granite. As the tests are carried out under the constant flow rate of 1.7ml/min, with the axial load of 40kN, the breakdown pressures of granite are 168kg/cm² at room temperature, and 124kg/cm² at 200℃. The breakdown pressure decreases about 25% than that of room temperature with increasing the temperature. Under the controlled flow rates, the initiation pressures of the microcracks of granite are well coincided with the breakdown pressures and these results are also confirmed by the levels of acoustic emission.

서 언

방사성폐기물 처분장의 부지특성평가지 중요한 고려사항들 중의 하나가 현지암반의 응력상태 평가분야이다. 지하심부에서 암반의 응력측정에 흔히 사용되는 방법 중 대표적인 방법이 수압파쇄 기법이나, 이 기법에는 아직도 실험적 연구를 통해 개선하여야 할 부분이 많이 남아있는 실정이다. 특히 균열의 초기생성압(initiation pressure:Pi)과 파쇄압(break-down pressure:Pb)의 혼용은 현장응력 해석시 상당한 오류를 야기할 수 있으므로 이 부분의 개선을 위한 실험적 연구가 필요한 실정이다(Zoback et al., 1977). 방사성폐기물의 심부처분시 이러한 점을 고려하여 응력해석을 하여야 하며 열하중으로 인한 강도특성의 변화와 미세균열의 생성으로 인한 지하수 유동로의 변화 가능성을 고려하여야 한다(Wang et al., 1989).

본 연구에서는 먼저 안산암 시편을 사용하여 수압파쇄시 주입률의 변화가 파쇄압에 미치는 영향을 확인한 후, 화강암시편에서의 주입률 제어방식의 실험을 통하여 기본물성과 파쇄압의 상관성 및 온도조건의 변화시 파쇄압의 변화상태를 규명하고자 하였다. 한편 전 시편에서 균열의 초기생성압과 파쇄압의 일치여부를 확인하였으며 이를 위하여 균열음(acoustic emission:A.E.)의 발생을 측정하여 균열의 발생시점과 파쇄시점을 명확히 구분, 일치여부를 분석하였다.

시편제작 및 기본물성치 측정

이 연구에서는 주입률의 변화와 파쇄압의 관계를 규명하기 위하여 경상남도 울산시 양산읍 일대의 백악기 화산암 분포지역에서 채집한 15개의 NQ코어를 시편으로 사용하였다. 이 안산암은 암갈색으로 석리와 세립질 사장석 및 녹니석 등이 주성분을 이루고 있으며 장석류가 반정을 이루고 있다. 한편, 암석물성시험과 온도조건의 변화에 따른 실내 수압파쇄실험을 위하여서는 전라남도 여천시 일대의 백악기 화강암 분포지역에서 채집한 25개의 NX코어를 시편으로 사용하였다. 이 화강암은 미분상조직을 보이는 세립질로 정장석과 석영이 주성분을 이루고 있으며 유색광물들은 그 함량이 적어 암석 전체가 우백질의 특징을 보인다.

이와 같은 암석학적 특징을 가진 지름이 각각 약 48mm와 약 54mm인 코아시료를 지름과 길이의 비가 1:2보다 약간 크게 절단한 후, 자동연마기와 carborandum 등의 연마제를 사용하여 상하 절단면이 시편축에 직각이 되도록 하였으며 두 절단면의 수평도가 0.02mm 내외가 되도록 연마하였다. 이 시편들을 이용하여 기본물성시험을 수행하였으며, 수압파쇄실험을 위한 시편은 시편 중앙에 직경이 약 10mm되는 주입공을 천공한 후 길이가 직경의 2배가 되도록 위와 같은 방법으로 다시 연마하였다.

화강암의 물리적 특성치로는 국제암반역학회의 표준시험법(ISRM, 1979)에 따라 진비중, 공극률 및 함유수 등을 측정하였으며, 아울러 Sonic Viewer-170 (OYO model-5228)을 사용한 초음파 pulse법에 의하여 P파속도를 측정하였다. 이와 같이 측정된 화강암 시편의 물리적 특성치들은 Table 1에 요약되어 있다.

수압파쇄실험

실험장치

본 실험에 사용된 장치는 미국의 Structural Behavior Engineering Laboratory(SBEL)사에서 제작한 Hydraulic fracturing system-547로 최대 용량이 300,000Lbs이다. 이 실험장치는 여러가지 단위 장비들로 구성되어 있는 데 하중재하장치, 삼축압축용기, 압력증폭기, 주입펌프, servo controller 및 heating jacket 등이 주요 구성장비들(Fig.1A, 1B)로 이들의 성능은 Table 2와 같다.

실험방법

상온에서의 주입률변화 실험은 servo controller를 이용하여 일정하게 자동제어된 1ml/min, 2ml/min 및 3ml/min의 세 단계의 주입률 조건하에서 수행되었다. 온도변화 실험은 상온, 50°C, 100°C, 150°C 및 200°C의 다섯 단계의 온도조건 하에서 수행되었으며, 각 단계의 온도는 디지털식으로 온도를 제어할 수 있는 heating jacket을 사용하여 일정하게 유지되도록 하였다. 이 때 시편을 shrinkage tube로 피복하였으며 150°C 이상의 온도에서는 고온용 tube를 사용하였다.

수압파쇄시에는 먼저 약 3kN의 초기 수직하중을 가하여 실험용기와 시편을 고정한 후, 약 0.4kN 정

암석의 수압파쇄특성에 미치는 주입률과 온도의 영향

Table 1. Summary of the hydraulic fracturing and index property test results of granite

Sample No.	Normal Load (kN)	Flow Rate (ml/min)	Breakdown Pressure (Pb) (Kg/cm ²)	A.E (precedes failure by sec)	Temperature	Index properties (room temperature)			
						Specific gravity	Porosity (%)	Water content (%)	P wave velocity (km/s)
YGP-31	40	1.7	184	1	Room Temp.	2.55	2.00	0.24	5.17
YGP-12	"	"	154	2	"	2.56	1.29	0.23	4.99
YGP-14	"	"	176	1	"	2.57	0.96	0.15	5.22
YGP-40	"	"	179	1	"	2.55	2.13	0.29	5.13
YGP-44	"	"	145	2	"	2.62	0.84	0.07	5.45
Average			168			2.57	1.44	0.20	5.19
YGP-41	"	"	154	1	50°C	2.54	2.26	0.18	5.08
YGP-21	"	"	145	1	"	2.58	0.85	0.13	5.03
YGP-54	"	"	187	1	"	2.57	1.17	0.13	5.29
YGP- 8	"	"	156	1	"	2.56	1.66	0.17	5.18
YGP-11	"	"	134	1	"	2.58	0.82	0.12	5.37
Average			155			2.57	1.35	0.15	5.19
YGP-58	"	"	139	1	100°C	—	—	—	—
YGP-56	"	"	168	1	"	2.57	1.26	0.09	5.30
YGP-29	"	"	142	1	"	2.53	3.27	0.29	5.16
YGP-59	"	"	163	1	"	—	—	—	—
YGP-22	"	"	155	2	"	2.55	2.41	0.22	5.26
Average			153			2.55	2.31	0.20	5.24
YGP-60	"	"	153	1	150°C	—	—	—	—
YGP-45	"	"	142	1	"	2.57	1.35	0.16	5.19
YGP-30	"	"	140	1	"	2.54	2.00	0.24	5.12
YGP-61	"	"	142	1	"	—	—	—	—
YGP-43	"	"	113	No proc.	"	2.59	0.81	0.09	5.43
Average			138			2.57	1.39	0.16	5.25
YGP-51	80	"	128	1	200°C	2.54	1.96	0.19	5.12
YGP-46	40	"	123	1	"	2.55	1.89	0.19	5.14
YGP-13	"	"	123	noisy	"	2.57	0.97	0.15	5.22
YGP- 5	"	"	117	1	"	2.55	2.36	0.21	5.17
YGP- 1	"	"	127	1	"	2.57	1.28	0.16	5.32
Average			124			2.56	1.69	0.18	5.20

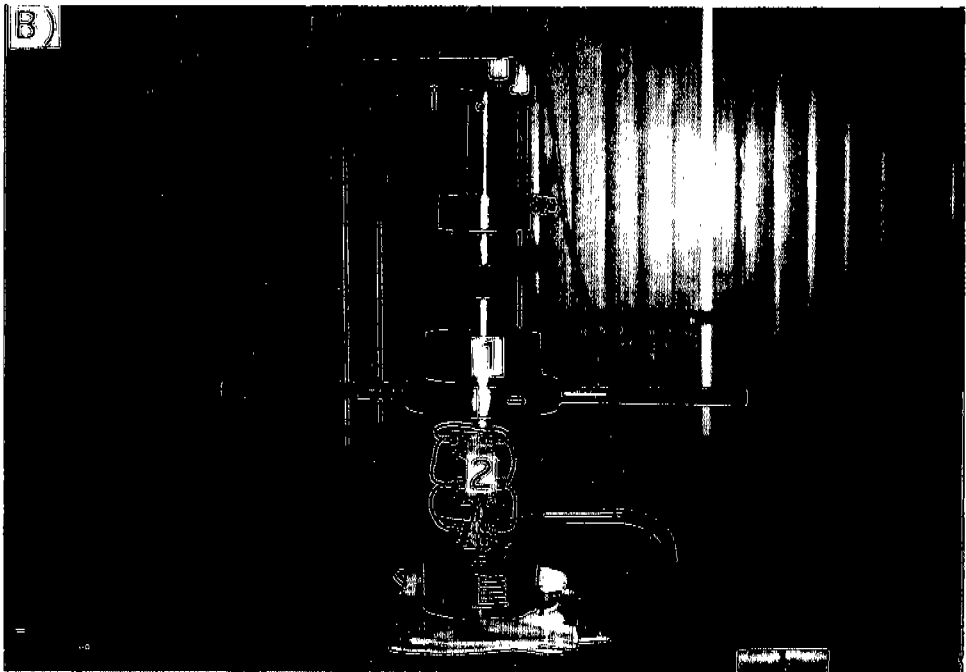
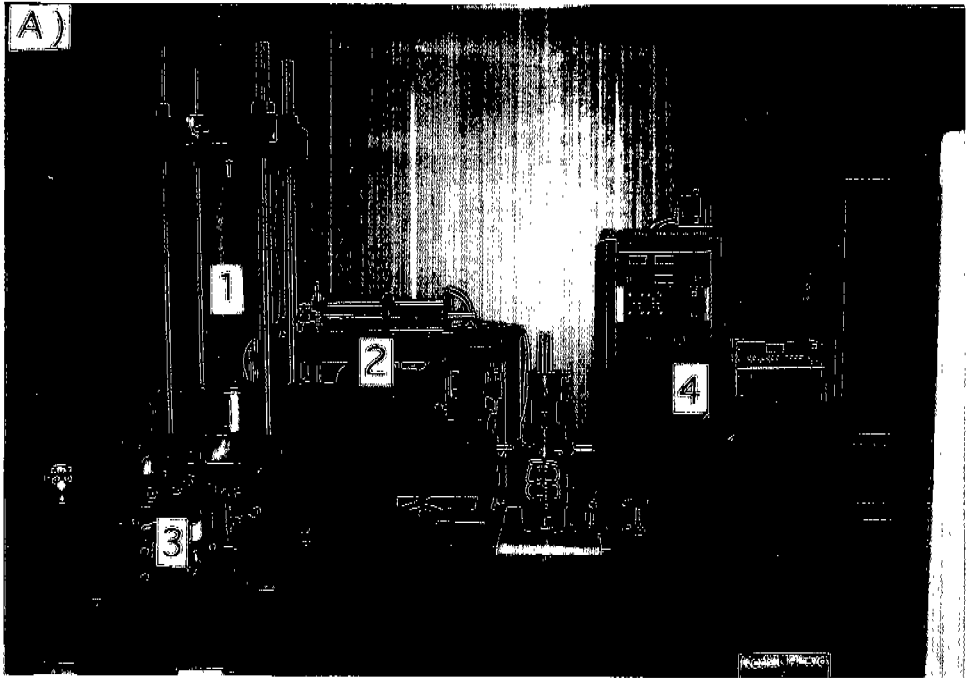


Fig. 1 A) Hydraulic fracturing system-547. ① Load frame, ② HI-1000 pressure generating system, ③ AP-1000 triaxial pump, ④ 547 servo controller. B) Sample preparation stage. ① triaxial load cell, ② heating jacket.

Table 2. General specifications of Hydraulic Fracturing System-547.

1. Compression Machine	3) Heating Jacket:Max. temperature-550°F (288°C)
1) Automatic stress or strain control	
2) Loading frame:Model CT-250B	
-- Hydraulic actuator capacity:300,000lbs	5. 547 Servo Controller(Dynamic test system)
-- Actuator stroke:4 inches	1) Full conditioning of dual feedback signals:command signal & AC/DC transducer
-- NX-H-300 Load Cell & 3" stroke LVDT	2) Selectable parameter for limit shutdown
2. HI-1000 Pressure Generating System	3) Multifunction readout monitoring
1) Hydraulic intensifier:electro servo controlled 4:1 ratio	4) Dual full scale static command bias controls
2) Max. output pressure:10,000psi	
3) High pressure volume:20 cubic inches	6. Series 7 Displacement Signal Conditioning
4) Model 5 servo valve:5 GPM at 1000psi drop	1) Six channel LVDT system
	2) Individual gain & null settings for each channel
3. Model AP-1000 Triaxial Pump	
1) Max. input pressure:100psi	7. Servo Amplifier & Interface Module
2) Max. output pressure:10,700psi	-- 16 channels for data acquisition
4. Rockcell Model 10 Triaxial Cell	8. IBM Computer(486) & Servo software
-- Confining pressure to 10,000psi	
-- Axial loads to 300,000lbs	9. Acoustic Emission System
1) DJC Axial Deformation Jacket	1) Individual Integral Preamplifier:20 dB Gain
2) Circumferential Deformation Device:	2) Frequency responses:1-700kHz
-- Max. pressure:60,000psi	3) Gain solution:20-80 dB
-- Max. temperature:200°C	

도의 주입압을 가하여 주입유가 일정하게 작용할 수 있도록 하였다. 이러한 준비과정을 거친 후 phase 1 및 phase 2로 실험조건을 구분하여 실험을 수행하였다. Phase 1에서는 약 3kN의 초기하중이 5분 후에 40kN이 되도록 하였으며 이후 파괴가 일어날 때까지의 phase 2에서는 이 하중이 일정하게 유지되도록 하였다. Phase 2에서 주입을 시작하였는데 주입률 변화 실험에서는 세 단계의 주입률을 적용하였고 온도변화 실험에서는 화강암시편에서의 예비실험 결과와 압력인장시험 결과를 비교하여 1.7ml/min의 주입률을 적용하였다. Phase 1 및 phase 2에서의 실험조건을 요약하면 Table 3과 같다.

Table 3. Experimental conditions of the hydraulic fracturing test at phase 1 and phase 2.

		Phase 1	Phase 2
Duration time(min)		5.00	20.00
Servo 1	Feedback channel	2	2
	Initial value	3.00 kN	40.00 kN
	Amplitude	37.00 kN	0.00 kN
	Waveform	Ramp	Ramp
	Frequency(Hz)	0.0033	0.00083
	Phase shift(deg)	0.00	0.00
	Delay(sec)	0.00	0.00
Servo 2	Feedback channel	4	6
	Initial value	0.40 MPa	0.00 ml
	Amplitude	0.00 MPa	34.00 ml
	Waveform	Ramp	Ramp
	Frequency(Hz)	0.0033	0.00083
	Phase shift(deg)	0.00	0.00
	Delay(sec)	0.00	0.00

결과분석 및 토의

Zoback 등(1977)은 실험을 통하여 가압률을 높일수록 균열의 초기생성압과 파쇄압이 증가하며, 가압률이 클수록 이 두 값의 차이가 더욱 커진다는 사실을 밝혔으며 이러한 사실은 그 후 다른 연구자들(Haimson & Zhongliang, 1991; Cheung & Haimson, 1989)에 의해서도 확인되었다. 따라서 Zoback 등은 현지암반의 응력상태를 해석할 때 생성압 대신 파쇄압을 사용하면 큰 오류를 야기할 수

있으므로 가압률 대신 일정하게 제어된 주입률을 사용할 것을 제안하였다. 제어된 주입률을 사용할 경우 주입률을 변화시켜도 생성압과 파쇄압이 거의 변하지 않으며 두 값이 서로 잘 일치하기 때문이었다. 그러나 이러한 사실은 불과 10개의 사암 시편에서 얻은 실험결과이므로 차후 다양한 암종에서의 보다 충분한 실험을 통한 완전한 규명이 필요하다고 하였다.

본 연구에서는 이러한 필요성에 따라 세 단계의 주입률 조건을 설정한 후, 각 단계의 주입률에서 5개씩의 안산암 시편을 사용하여 파쇄실험을 수행하였다. 그러나, 1ml/min 및 2ml/min의 주입률을 적용하여 수행한 실험에서는 준비과정에서 시편이 훼손되어 일부 시편에서는 실험결과를 얻지 못하였다. 주입률변화 실험을 통해 구한 각 주입률에서의 파쇄압과 균열음의 발생시점 등은 여타 실험조건과 함께 Table 4에 요약되어 있다.

Table 4. Summary of the hydraulic fracturing test results of andesite

Sample No.	Normal Load (kN)	Flow Rate (ml/min)	Breakdown Pressure (Pb) (kg/cm ²)	A.E (precedes failure by sec)	Remarks
WAP- 9	40	1	175	1	Room Temp.
WAP-13	"	"	173	1	"
WAP-14	"	"	182	1	"
WAP-24	"	"	124	1	"
Average			164		
WAP- 6	"	2	175	1	"
WAP- 8	"	"	141	1	"
WAP-12	"	"	152	1	"
WAP-22	"	"	170	1	"
Average			160		
WAP- 3	"	3	198	1	"
WAP- 7	"	"	209	1	"
WAP-10	"	"	146	1	"
WAP-18	"	"	134	1	"
WAP-19	"	"	137	2	"
Average			165		

파쇄압은 주입률이 1ml/min인 경우에는 평균 164kg/cm², 2ml/min에서는 평균 160kg/cm², 3ml/

min에서는 평균 165kg/cm²로 Fig. 2에서 보듯이 주입률의 변화에 상관없이 거의 일정한 값을 보였으며 균열음의 발생시점이 파쇄시점과 잘 일치하였다. 이와 같은 실험결과는 주입률을 일정하게 제어할 경우 주입률의 크기에 상관없이 압종에 따른 고유의 파쇄압을 구할 수 있음을 의미하는 것이다.

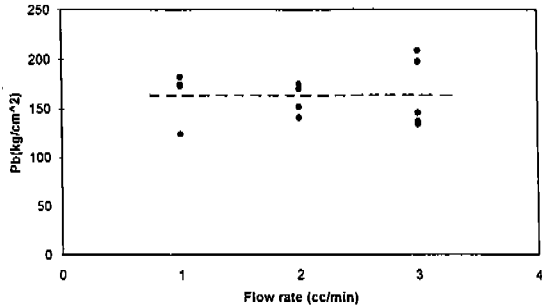
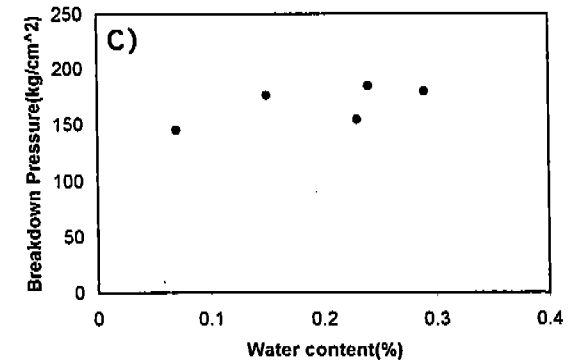
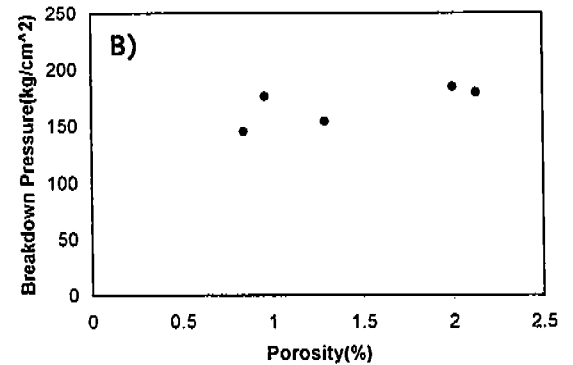
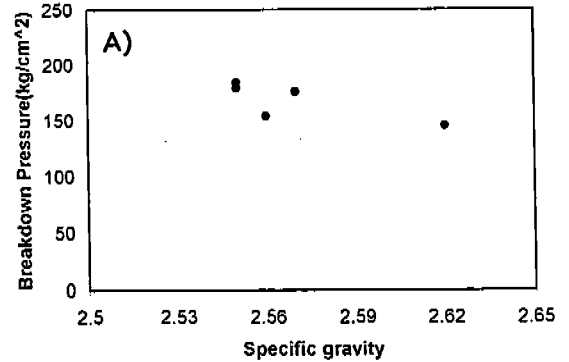


Fig. 2 The breakdown pressures are shown at varying flow rate, 1ml/min, 2ml/min and 3ml/min.

한편, 온도조건의 변화가 파쇄압에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상온, 50℃, 100℃, 150℃ 및 200℃ 다섯 단계의 온도조건을 설정한 후 화강암 시편을 사용하여 각 온도에서 5개씩의 파쇄실험을 수행하였다. 실험을 통해 구한 각 온도에서의 파쇄압과 균열을 발생상태 및 기본물성치 등은 수직하중과 주입률 등의 실험조건과 함께 Table 1에 요약되어 있다.

파쇄압은 대체로 온도가 상승할수록 감소하는 경향을 보이는 바, 상온에서는 평균 168kg/cm²이었으며 50℃와 100℃ 부근에서는 약 10% 정도 감소하였으며 150℃에서는 평균 138kg/cm²이었고 200℃에서는 평균 124kg/cm²로 약 25% 정도 감소하였다. 각 온도에서의 파쇄압의 감소율은 거의 일정한 편이었으나 100℃ 부근에서의 구간 변화율은 약간 작게 나타났다. 이러한 현상은 진비중과 공극률, 함수율 및 P 파 속도 등 암석의 기본물성치들과 파쇄압과는 거의 무관한 관계(Fig. 3)를 보이는 점으로 볼 때, 기본물성치보다는 광물들 사이의 경계면을 이루는 기질부의 열안정성이 전반적으로 불안정해져 강도특성이 저하되는 현상(島田莊平 譯, 昭和 58) 때문인 것으로 판단된다. 이는 파쇄면의 조도가 대체로 rough 및 undulated한 상태이며, 현미경하에서 주로 주구

성광물 중 장석류와 기질부가 파쇄되어 입자내균열(intragranular crack)과 입자경계균열(grain boundary crack)에 의한 복합적인 파괴형태로 관찰되는 사실로도 뒷받침된다.



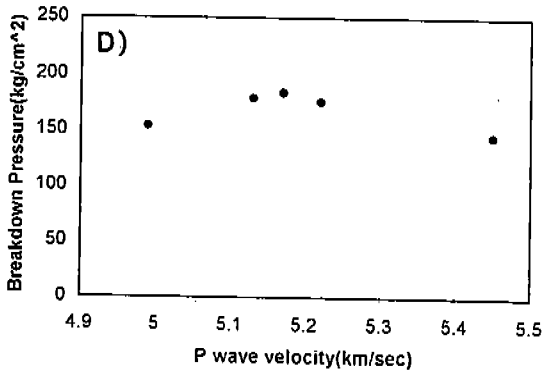


Fig. 3 The relationships of breakdown pressures to A) specific gravity B) porosity C) water content and D) P wave velocity at room temperature for granite specimen.

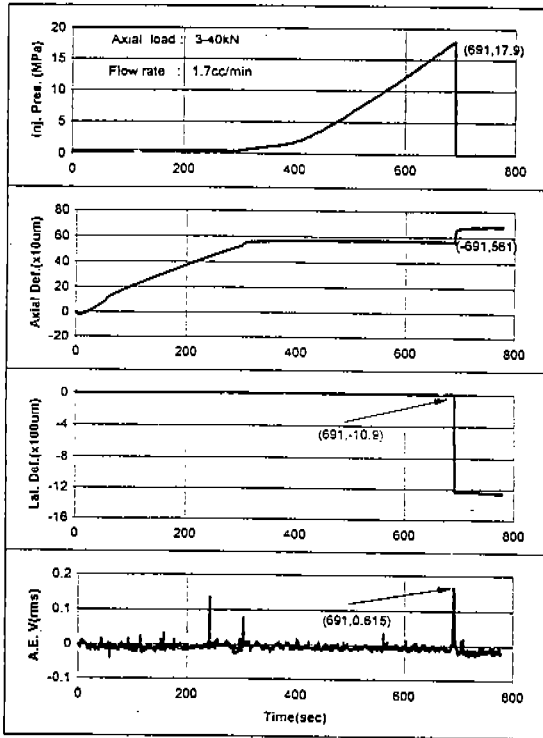


Fig. 4 Measurements made during the flow rate controlled experiment with sample YGP-40 at room temperature (20°C). Shown from the top as a function of time are the injection pressure, axial deformation, lateral deformation and acoustic activities.

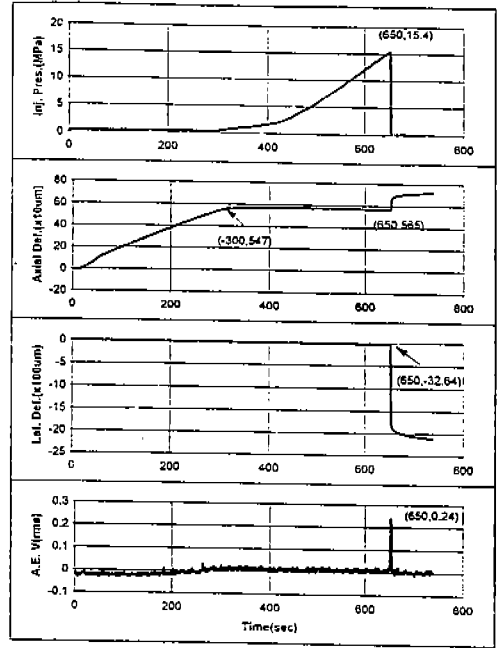


Fig. 5 Measurements made during the flow rate controlled experiment with sample YGP-41 at 50°C. Shown from the top as a function of time are the injection pressure, axial deformation, lateral deformation and acoustic activities.

또한, 본 연구에서는 실험과정에서 균열의 초기생성압과 파괴압의 일치여부를 확인하기 위하여 파괴시점을 보다 분명히 포착할 수 있도록 미세균열을 측정장비를 사용하여 A.E.의 발생상태를 기록하였다. 이와 같은 보조 측정장비를 사용한 것은 시편에 하중이 가해짐에 따라 축적된 변형에너지가 파괴시점까지 급격히 발산(Koerner et al., 1981; Hardy, 1972)되므로 파괴시점을 보다 분명히 밝히는 데 도움이 되기 때문이다.

Table 1에서 보듯이 균열음의 발생시점과 파괴시점이 아주 잘 일치하고 있으며 Fig. 4와 Fig. 5에 도시된 바와 같이 균열음의 발생시점이 변형-시간곡선에서도 파괴시점과 잘 일치하고 있다. Fig. 4의 경우 250초 부근과 300초 부근에서 균열음이 기록되었으나 이는 주입이 시작되기 전에 시편조립시 사용한 접착제가 파괴될 때 기록된 것으로 시편의 파괴와는 무관한 기록이었으며, 주입이 시작된 300초 이후 구간에서는 균열의 생성시점에서만 기록되었다.

Fig. 4는 상온에서 수행된 실험결과이며 Fig. 5는 50°C에서 수행된 실험결과와 한 예를 보여준 것으로 중,황변형이나 A.E. 발생상태 등으로 볼 때 온도조건의 변화에 관계없이 초기 균열 생성시점과 파쇄시점이 전 시편에서 모두 잘 일치하였다. 이러한 현상은 안산암 시편을 사용하여 수행된 주입률변화 실험 결과에서도 확인할 수 있었다(Table 4). 따라서 이러한 실험결과는 일정한 주입률을 사용할 경우 주입률의 크기와 온도조건의 변화에 상관없이 균열의 생성압과 파쇄압이 거의 일치함을 보여주는 것으로, Zoback 등(1977)이 지적한 오류를 피하기 위해서는 주입률 제어방법을 사용하여야 함을 의미하는 것이다.

결 언

주입률 조건의 변화가 안산암의 수압파쇄특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 1ml/min, 2ml/min 및 3ml/min의 세단계의 주입률로 파쇄실험을 수행하였다. 또한, 온도조건의 변화가 화강암의 수압파쇄특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 상온, 50°C, 100°C, 150°C 및 200°C로 다섯 단계의 온도조건을 설정하여 1.7ml/min의 일정한 주입률로 파쇄실험을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 주입률을 일정하게 제어할 경우 주입률의 크기에 관계없이 안산암의 파쇄압은 평균 163kg/cm²로 일정하였으며 균열음의 발생시점이 파괴시점과 잘 일치하였다.
- (2) 화강암의 파쇄압은 대체로 온도가 상승할수록 감소하는 경향을 보였으며 상온에서는 평균 168 kg/cm²이었으나 50°C와 100°C에서는 약 10% 정도 감소하였고 200°C에서는 평균 124kg/cm²로 약 25% 정도 감소하였다. 이러한 감소현상은 광물들 사이의 경계부를 이루는 기질부와 주구성광물 중 장석류의 열안정성이 보다 빨리 불안정해져 강도특성이 저하되는 현상 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 온도조건의 변화에 관계없이 각 온도에서 균열음의 발생시점이 파괴시점과 잘 일치하였으며 변형-시간곡선에서도 파괴 직전의 변형을 증가시점과 잘 일치하였다.

이러한 두 방식의 실험결과는 일정한 주입률을 사용할 경우 균열의 초기생성압과 파쇄압이 주입률과 온도조건의 변화와 무관하게 거의 일치함을 보여주

는 것으로 현지암반의 정확한 응력상태 해석을 위해서는 주입률 제어방법을 사용하여야 함을 의미하는 것이다.

참 고 문 헌

Cheung, L.S. and Haimson, B.C., 1988, Hydraulic fracturing stress measurement in intact and prefractured rock—A laboratory study, Proc. 2nd Int. Workshops on Hydraulic Fracturing Stress Measurements, Vol.2, pp.542—582.

Haimson, B.C. and Zhongliang, Z., 1991, Effect of borehole size and pressurization rate on hydraulic fracturing breakdown pressure, Proc. of 32nd US Symposium on Rocks, pp. 191—199.

Hardy, H.R., 1972, Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research, ASTM STP 505, pp.41—83.

ISRM, 1979, Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake durability index properties, Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., Vol.16, pp.141—156.

Koerner, R.M., McCabe, W.M. and Lord, A.E., 1981, Overview of acoustic emission monitoring of rock structures, Rock Mech & Rock Eng., Vol.14., pp.27—35.

Wang, H.F., Bonner, B.P., Carlson, S.R., and Kowallis, B.J., 1989, Thermal stress cracking in granite, Jour. of Geophy. Res., Vol.94, pp.1745—1758.

Zoback, M.D., Rummel, F., Jung, R., and Raleigh, C.B., 1977, Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock, Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., Vol.14, pp.49—58.

島田莊平 譯, 昭和 58, 高温下の岩石物性, 内田老鶴 圖, pp.1—42.

이찬구, 송무영, 최원학, 장천중, 이종욱

이찬구, 최원학, 장천중, 이종욱
한국원자력연구소
305-600
대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105호
TEL:(042) 868-2061
FAX:(042) 861-4824
Korea Atomic Energy Research Institute
P.O. Box 105, Yuseong, Taejon
305-600

송무영
충남대학교 자연과학대학 지질학과
대전광역시 유성구 궁동 220
305-764
TEL:(042) 861-6423
FAX : (042) 822-9690