

스트레인 게이지를 이용한 암석의 열팽창계수 측정

박 찬¹⁾, 천대성^{1)*}, 김형목¹⁾, 신중호²⁾, 박연준³⁾

Measurement of Thermal Expansion Coefficient of Rock using Strain Gauge

Chan Park, Dae-Sung Cheon, Joong-Ho Synn, Hyung-Mok Kim and Yeon-Jun Park

Abstract With increasing demand for LNG as energy resources and need for CO₂ sequestration as greenhouse gas, more storage facilities are required in Korea. Due to the recent acute safety concerns and land shortage, storage facilities tend to be located underground. In design and construction of underground storage for low and high temperature materials, besides their mechanical characteristics, the thermal characteristics of rock under temperature variation should be understood. In this study, laboratory experiments for the measurement of the thermal expansion coefficient of rock were performed using strain gauge in consideration of the particle size of mineral and experiment temperature range. Experiment results show that thermal expansion coefficient decreased as the temperature decreases. In addition, linear thermal expansion coefficient was developed for typical Korean rocks such as granite. The results of this study can be utilized for the evaluation of thermal propagation in rock mass and the thermo-mechanical stability of underground facilities.

Key words LNG, CO₂, Thermal characteristics, Strain gauge, Thermal expansion coefficient

초 록 에너지원으로서 LNG 수요뿐 아니라 온실가스인 이산화탄소의 처분에 대한 필요성이 점차 증가되고 있어, 이를 위한 많은 저장시설이 요구된다. 이러한 저장시설은 안전성과 국토의 효율적 이용 등으로 인하여 지하화하는 경향이 있다. 이와 같은 온도특성을 고려해야 하는 물질에 대한 지하저장시설의 건설에 있어서, 암석의 열물성은 열역학적 특성과 함께 저장시설의 설계 및 유지관리를 위한 중요한 요소이다. 본 연구에서는 암석입자의 크기와 실험온도범위를 고려하여 스트레인 게이지를 이용하여 암석의 열팽창계수를 실험적으로 측정하였다. 실험결과 열팽창계수는 온도가 내려감에 따라 감소하였으며, 국내 대표암석인 화강암에 대한 선열팽창계수의 온도관계식을 제안할 수 있었다. 본 연구에서 수행된 온도변화에 따른 시험결과는 지하저장시설의 열역학적 안정성 해석과 열전파 특성을 규명하기 위한 해석에 주요 자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심어 LNG, 이산화탄소, 열물성, 스트레인 게이지, 열팽창계수

1. 서 론

에너지원으로서 LNG 및 LPG의 수요가 점차 증가하고 있으며, 또한 온실가스인 이산화탄소에 대한 지층처분에 대한 필요성이 요구되고 있다. 이러한 저장시설은 국토의 효율적 이용과 장기적인 안정성 등으로 인하여 지하화되는 경향이 있다(Inada, 1984). 이와 같이 온도와 밀접한 관련이 있는 물질에 대한 지하저장시설의 건

설에 있어 저장시설의 대상이 되는 암석의 열역학적 특성 및 열적 특성은 저장시설의 설계 및 유지관리를 위한 중요한 요소이다.

특히 LNG의 경우 일부 국가에서는 생산이 완료된 가스층, 대수층(aquifer), 염암 돔(salt dome) 등에 저장하지만 우리나라와 같이 그러한 지질조건을 갖추지 못한 국가에서는 견고한 암반에 굴착한 암반공동에 저장시설을 확보하여야 한다. 가스저장은 상온고압 형태의 저장방식과 저온저장방식이 있으며, 상온고압의 방식은 액화시설이 필요하고 저온 저장시설의 경우 열용력에 의하여 교란된 지하 암반의 역학적, 열적 특성을 파악해야만 한다. LNG와 같은 저온물질의 지하저장소를 건설하기 위해서는 온도 하강에 따른 특수한 구조적 안정성 문제를 고려해야만 한다. 또한 열전도도, 비열, 열팽

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

²⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

³⁾ 수원대학교 토목공학과 교수

* 교신저자 : cds@kigam.re.kr

접수일 : 2007년 10월 15일

심사 완료일 : 2007년 11월 23일

창계수 등의 열 물성은 암석의 역학적 특성과 함께 저온 환경의 암반 거동평가에 있어서 매우 중요한 요소로서, 암반내의 초기 transient 상태 및 장기적 steady state의 열 전파 양상 및 지하공간의 열역학적 안정성을 평가하는 데 필수적이다.

이들 저온상태의 암석의 열물성을 규명하기 위하여 여러 연구가 수행되었다. Mellor(1973), Lindblom(1977), Kuriyagawa et al.(1980)는 온도에 따른 선열팽창계수를 연구하였으며, 온도하강에 따라 열팽창계수도 감소하는 경향을 보인다고 보고하였다. 열전도도의 경우 열 전달 문제에서 전달특성으로 간주되며, 대부분의 암석의 열전도도에 관한 연구는 0°C 이상에서 이루어졌다. Kuriyagawa et al.(1980)은 건조 화강암에 대한 실험에서 -100°C의 열전도도는 20°C일 경우보다 10~20% 정도 더 크다고 보고하였으며, 건조 및 포화시료사이에는 큰 차이가 없다고 보고하였다.

이러한 열물성 중 암석의 냉열 거동에 중요한 역할을 하는 열팽창계수의 경우 국내에서는 아직까지 연구가 이루어지지 않았으며, 다만 상온에서 100°C까지 측정된 연구가 수행되고 있어 본 연구에서는 한국지질자원 연구원내에 위치한 LNG Pilot Plant의 기반암인 화강암에 대하여 저온 하에서 선열팽창계수를 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였다. 기존의 열팽창계수 측정은 직경 7 mm 코어의 수직방향의 팽창 변위를 팽창계(dilatometer)를 사용하여 표준물질과 비교 측정하는 상대적인 측정방법과 레이저 간섭식 열팽창계(Laser interferometric dilatometer)를 이용한 절대적 측정방법을 이용한다(Maglic et al., 1992). 그러나 이들 방법은 결정질 암석의 특성상 입자의 크기에 비하여 시료의 크기가 너무 작아 결정질 암석의 팽창계수를 측정하는데 다소 부적합한 것으로 판단되어 본 연구에서는 스트레인 게이지(strain gage)를 이용한 상대적 측정방법을 사용하여 20°C의 상온에서부터 -90°C까지 온도를 하강시키면서 측정된 열변형률로부터 열팽창계수를 산정하였다.

2. 시료의 특성

2.1 암석학적 특성

본 연구에서는 한국지질자원연구원내에 위치한 LNG Pilot Plant의 기반암인 화강암을 시험 대상 시료로 사용하였다.

그림 1은 박편 현미경 사진으로서 LNG Pilot Plant의 기반암은 석영, 장석, 사장석, 흑운모가 주성분이고, 녹니석, 백운모 등이 부성분을 이루는 흑운모화강암(Biotite

granite)이며, XRD(X-ray diffraction) 분석결과는 표 1과 같다. 현미경사진으로부터 관찰된 최대 입자의 크기는 3.5 mm이다.

2.2 물리, 역학적 특성

대상 시료의 물리·역학적 특성을 파악하기 위하여 각 시료의 직경과 길이, 건조무게, 포화무게를 측정하여 비중, 흡수율을 구하였으며, 공극률은 유효공극률(effective porosity)로서 공극과 시료의 부피비를 나타낸다. Model 5217A Sonic Viewer를 사용하여 P, S파의 전파속도를

표 1. 시료의 XRD 정량분석 결과(unit in wt. %)

광물명(Minerals)	조성비(Composition, %)
석영(Quartz)	23.0
장석(Feldspar(microcline, Albite))	67.2
백운모(Muscovite)	1.4
흑운모(Biotite)	6.9
녹니석(Chlorite)	1.4



그림 1. 시료의 현미경 사진(40X, cross nicol, 0.5 cm=100 μm, Qz; Quartz, Mu; Muscovite, Pl; Plagioclase, Bi; Biotite, Mi; Microcline, Bt=biotite)

측정하였으며, 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 포아송비 등을 MTS 815 시험기를 이용하여 산정하였다(표 2).

표 2는 각 물성에 대해 3~4회 측정값과 이들의 평균값을 나타내고 있다. 탄성계수는 스트레인 게이지를 이용하여 변형률을 측정하여 구한 응력-변형률 그래프에서 일축압축강도의 40~60% 응력 수준에서 구한 평균 탄성계수이며, 포아송비는 축방향 변형률과 횡방향 변형률 값의 비를 일축압축강도의 40~60% 응력 수준에서 구한 값이다.

3. 시험장치와 시험방법

3.1 시험장치

열팽창계수의 측정은 Interlaken 시험장비에 포함된 고온저온용 시험조(environmental chamber)를 사용하였다. 그림 2에서 시험 프레임의 오른쪽에 부착되어 있는 것이 온도제어장치의 모습이다. 시험조는 상·하부에 램이 연결될 수 있도록 원형의 연결구가 있다. 이 연결구로 램을 설치하고 램과 시험조 사이의 공간은 링 모양의 석면으로 밀폐할 수 있게 설계되어 있다.

온도제어는 Watflow 965 컨트롤러와 시험조 내부의 K-type 열전쌍(thermocouple)에 의해 자동제어되며, 필요에 따라 수동제어를 수행할 수 있다. 또한, 시험조 내부에는 균등한 온도분포를 위한 공기순환용 팬이 장착되어있다.

온도제어장치를 ramp mode로 설정하면 목표 온도까지 자동 동조하는 PID 컨트롤을 통해 가열과 냉각을 받

표 2. 시험시료의 물리, 역학적 특성

Properties	Sample No.	D201	D202	D203	D204	Avg.
Bulk specific gravity		2.66	2.67	2.66	2.65	2.66
Absorption ratio(%)		0.34	0.30	0.29	0.34	0.32
Effective porosity(%)		0.90	0.80	0.77	0.90	0.84
P-wave velocity(m/sec)		3,790	3,740	3,910	3,530	3,740
S-wave velocity(m/sec)		2,040	2,020	2,100	1,890	2,010
Uniaxial compressive strength (MPa)		113	135	140	127	129
Brazilian tensile strength (MPa)		5.4	7.2	9.2	-	6.4
Young's modulus(GPa)		39.9	47.0	43.3	42.5	43.2
Poisson's ratio		0.25	0.24	0.21	0.19	0.22

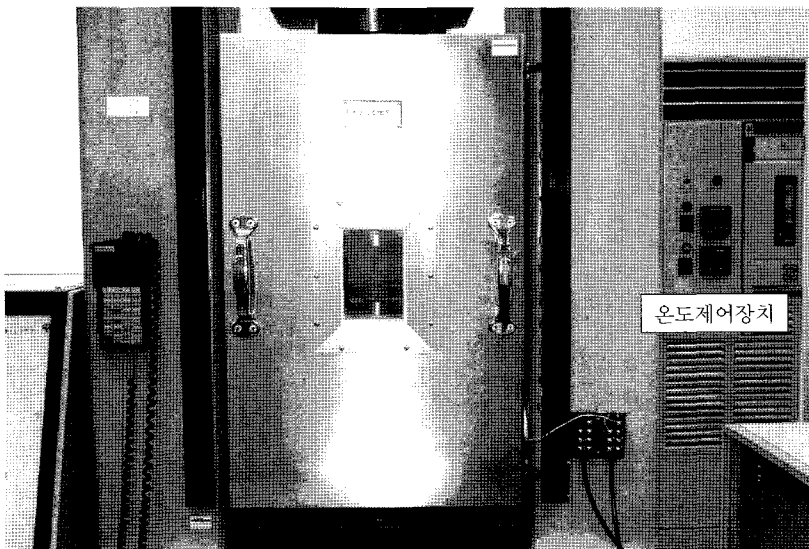


그림 2. 고온저온용 시험조와 온도제어장치의 모습

복하여 설정한 온도제어 속도에 따라 목표 온도에 도달하게 된다. 가열은 고온저온용 시험조 내부에 장치된 열선을 이용하여 가열하고, 냉각은 액화질소(liquid N₂)의 공급량을 조절하여 냉각시킨다.

시료에 부착된 스트레인 게이지에서 측정된 변형률은 일본 KYOWA사의 DPM-711B dynamic strain amplifier와 미국 Data translation사의 DT-2831 A/D board를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다.

3.2 시험방법

일반적인 재료의 열적 성질은 재료가 가진 기본적인 물성 중의 하나로서 재료의 기본특성, 형상, 상태 등의 여러 가지 요인에 의해 측정법을 달리해야 하는 특성을 가지고 있다. 이러한 물성을 정확히 파악하기 위해서는 재료의 적합한 측정법을 선택함으로써 보다 정확한 데이터를 얻을 수 있다.

기존의 열팽창계수 측정은 직경 7 mm 코어의 수직방향의 팽창 변위를 push-rod dilatometer를 사용하여 표준물질과 비교 측정하는 방법이 주로 이용되나(그림 3), 이는 결정질인 암석의 특성상 입자의 크기에 비하여 시료의 크기가 너무 작기 때문에, 결정질 암석의 열팽창계수의 측정에 부적합한 것으로 판단되어 본 연구에서는 스트레인 게이지(strain gage)를 이용한 방법을 사용하였다. 또한 본 연구에서는 스트레인 게이지와 리드선의 온도로 인한 시험의 오차를 확인하고 시험결과를 보정하기 위하여 표준물질(reference material)을 사용하였다. 시험에 사용된 표준물질은 미국 NIST (National

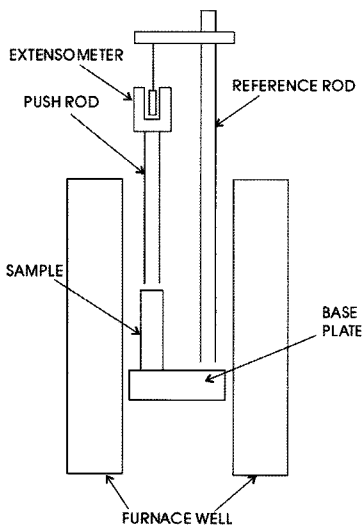


그림 3. Push-rod dilatometer를 이용한 열팽창계수 시험법 (Maglic et al., 1992)

Institute of Standards and Technology)의 SRM 736L1으로 직경 6.4 mm의 구리 봉과 SRM 731L1로 사각봉 형태의 Borosilicate Glass 두 종류이다.

그림 4는 표준물질과 시험시료에 시험을 하기 위해서 스트레인 게이지를 부착한 모습이다. 이 표준물질의 상온에서 열팽창계수는 각각 16.7×10^{-6} 과 4.8×10^{-6} 정도이고 온도변화에 따른 상세한 열팽창계수는 표 3에 표시되어 있다.

시험시료는 시추공에서 채취한 NX 코어를 이용하였으며, 열팽창계수 측정에서 암석 입자의 크기에 따른 스트레인 게이지의 길이에 대한 영향을 파악하기 위하여 시료에 부착하는 게이지는 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm의 4종을 선택하여 시험하였다. 본 연구에 사용된 시료의 최대 입자크기는 3.5 mm이었다.

시험은 Interlaken 시험기에 장착된 고온저온용 시험조(environmental chamber) 내부에서 수행하였다. 먼저 시료를 시험조 내부의 중앙에 설치하고 시험조 측벽에 있는 센서 설치용 출입구로 스트레인 게이지와 표준시료를 설치한 후 온도를 설정하였다. 시험 동안 시료에 과도한 온도전달을 방지하기 위하여 시료 받침대를 목재로 사용하였다.

본 시험에서는 20°C를 기준으로 하여 0°C, -30°C, -60°C, -90°C에서 각각 수행하였다. 냉각속도는 열충격효과를 최소화하기 위해 0.5°C/min의 속도로 설정하여 온도를 조절하였다. 또한, 시료 내부의 온도 분포를 확인하기 위하여, 시험시료 이외에 여분의 시료에 대해 온도측정장치(thermometer)를 이용하여 표준시료 내부의 온도를 측정하였다(그림 5). 여분의 시료를 통하여 내부온도를 측정된 결과 시험조 내부의 온도가 설정 온도에 도달한 후 약 1시간 정도 경과 후 시료 내부까지 설정 온도에 도달하였다. 온도시험을 위한 온도조절은 다음 순서에 의하여 수행되었다.

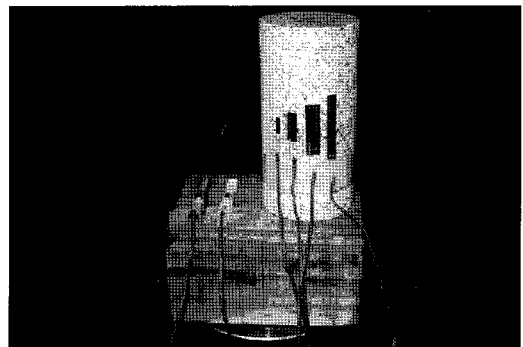


그림 4. 스트레인 게이지가 부착된 표준물질(SRM 736L1, 731L1)과 시험시료

표 3. 표준물질 SRM 736L1과 SRM 731L1의 열팽창계수

T	$\frac{L-L_{293}}{L_{293}}$	$\frac{1}{L_{293}} \frac{dL}{dT}$	T	$\frac{L-L_{293}}{L_{293}}$	$\frac{1}{L_{293}} \frac{dL}{dT}$	T	$\frac{L-L_{293}}{L_{293}}$	$\frac{1}{L_{293}} \frac{dL}{dT}$	T	$\frac{L-L_{293}}{L_{293}}$	$\frac{1}{L_{293}} \frac{dL}{dT}$
20 K	-3250×10^{-6}	$0.27 \times 10^{-6}/K$	340 K	793×10^{-6}	$17.07 \times 10^{-6}/K$	80 K	-819×10^{-6}	-	293 K	0×10^{-6}	$4.78 \times 10^{-6}/K$
30	-3245	0.98	360	1135	17.22	90	-797	-	300	34	4.82
40	-3229	2.29	380	1481	17.38	100	-771	$2.64 \times 10^{-6}/K$	320	131	4.91
50	-3198	3.87	400	1831	17.53	110	-744	2.86	340	230	4.99
60	-3151	5.48	420	2183	17.68	120	-714	3.07	360	330	5.06
70	-3089	6.98	440	2538	17.82	130	-683	3.25	380	432	5.11
80	-3012	8.30	460	2896	17.97	140	-649	3.43	400	535	5.15
90	-2923	9.46	480	3256	18.11	150	-614	3.58	420	638	5.19
100	-2823	10.46	500	3620	18.25	160	-578	3.72	440	742	5.21
110	-2714	11.32	520	3986	18.39	170	-540	3.85	460	847	5.23
120	-2597	12.05	540	4356	18.53	180	-501	3.97	480	952	5.25
130	-2474	12.67	560	4728	18.67	190	-460	4.08	500	1057	5.26
140	-2344	13.20	580	5102	18.81	200	-419	4.17	520	1162	5.26
150	-2210	13.64	600	5480	18.95	210	-377	4.26	540	1267	5.27
160	-2072	14.01	620	5860	19.09	220	-334	4.34	560	1372	5.27
180	-1785	14.63	640	6244	19.24	230	-290	4.41	580	1478	5.27
200	-1487	15.14	660	6630	19.38	240	-246	4.48	600	1583	5.27
220	-1180	15.57	680	7019	19.53	250	-201	4.54	620	1689	5.28
240	-865	15.94	700	7411	1.969	260	-155	4.60	640	1794	5.29
260	-543	16.24	720	7807	19.84	270	-109	4.66	660	1900	-
280	-215	16.50	740	8205	20.00	280	-62	4.71	680	2007	-
293	0	16.64	760	8607	20.16						
300	117	16.71	780	9012	20.33						
320	453	16.90	800	9420	20.51						

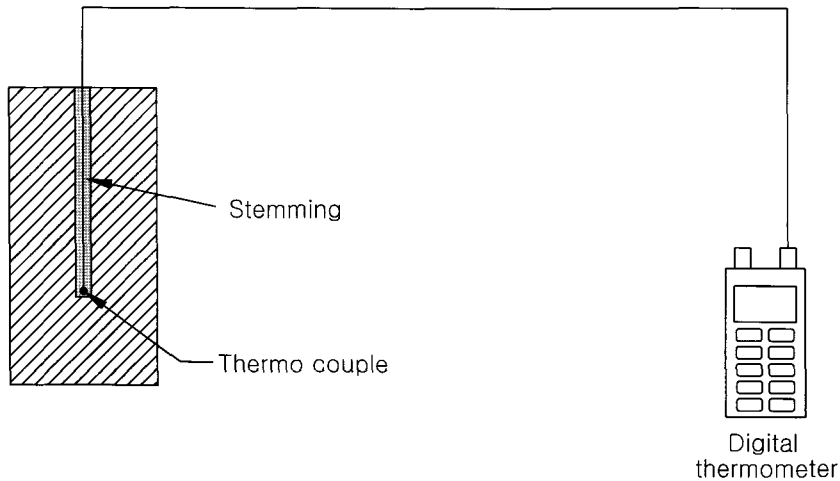


그림 5. 시료 내부의 온도를 측정하기 위한 표준시료의 모식도

우선 시험조 내부의 중앙에 스트레인 게이지가 부착된 시료와 표준물질을 올려놓고, 내부 순환이 잘되지 않을 것으로 예상되는 시험조 앞쪽에 표준시료를 설치한 다음 액체 질소 탱크를 시험조 뒷면에 있는 주입구

에 연결시키고, 밸브를 연다. 그리고 Watlow 965 컨트롤러를 통해 ramp mode로 설정하고, 설정 온도를 설정한다. 설정온도에 도달하면 표준시료의 내부온도가 설정온도에 도달할 때까지 온도를 유지하다가 다음 설정

온도로 Watlow 965 컨트롤러를 조정한다. 설정온도에 도달하면 시험조는 계속 설정온도를 유지하기 위하여 자동 동조(auto-tuning)하는 냉각과 가열을 반복하여 설정온도를 유지한다.

4. 시험결과

열팽창시험에서 얻어진 온도에 따른 열변형률 (thermal strain) 결과는 그림 6과 같이 나타났으며, 이를 정리하면 그림 7과 표 4와 같다. 그림과 표에서 볼 수 있듯이 게이지의 크기에 따라 약간의 차이는 있으나 사용된 게이지의 길이에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 일반적인 암석의 광물입자의 크기나 암석시험에서 사용되는 시료의 형상과 크기를 고려할 때 코어형 시료와 10 mm 이상의 게이지를 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

여기에서 구해진 결과는 게이지와 리드선이 온도변화에 따른 보정을 하지 않은 단계이므로 이를 온도보정을 해주어야 한다. 온도보정 방법에는 게이지와 리드선의

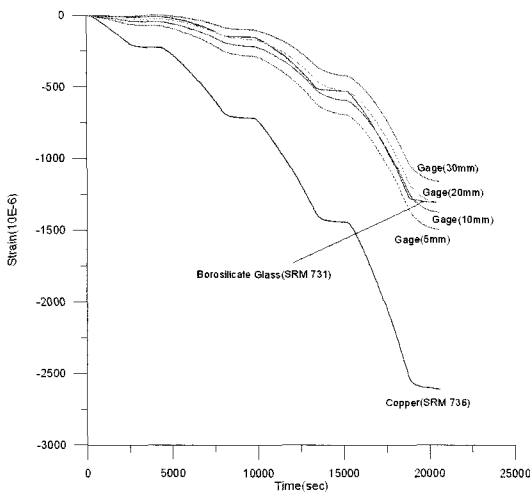


그림 6. 온도에 따른 열 변형률 측정 결과

열특성 표준식을 이용한 방법과 표준물질을 이용한 실험적 보정방법이 있다.

4.1 게이지의 열특성 표준식을 이용한 보정 방법

스트레인 게이지를 이용하여 측정한 열변형률에는, 측정 시료 자체의 열변형률뿐만 아니라 부착된 게이지 및 리드선의 열변형률도 함께 포함되어 있다. 따라서 순수한 시료의 열변형률을 구하기 위해서는 이들 게이지 및 리드선의 열변형률을 보정해 주어야 한다. 본 실험에 사용한 게이지는 일본 Kyowa사의 KFG 스트레인 게이지로서, -196~150°C의 범위에 대해 측정이 가능하며, 게이지 자체의 온도(T)에 따른 표준 열출력량은 다음 식으로 제시되어 있다.

$$\epsilon_g = -33 + 2.9 \times T - 0.062 \times T^2 + 0.00029 \times T^3 - 0.00000046 \times T^4 \quad (\times 10^{-6}) \quad (1)$$

또한, 연결 리드선에 의한 열보정식은 다음 식 (2)와 같다. 여기서, γ 는 리드선의 총저항, α 는 리드선의 저항 온도계수(구리선의 경우 0.003 /°C), K_s 는 게이지율, R 은 리드선을 포함한 게이지의 저항, ΔT 는 온도변화량이다.

$$\epsilon_t = \frac{\gamma \cdot \alpha}{K_s \cdot R} \cdot \Delta T \quad (2)$$

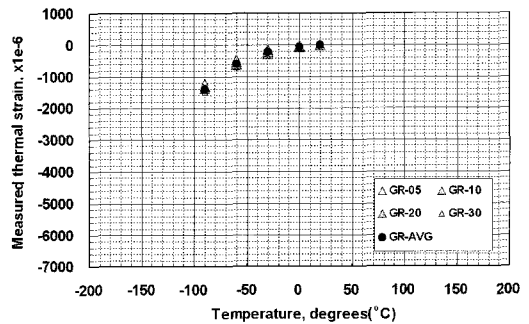


그림 7. 열팽창시험에서의 측정된 열변형률

표 4. 게이지 길이에 따른 열변형률

Temperature (°C)	SRM		Thermal strain (Gage length, mm)			
	Copper (736L1) ($\times 10^{-6}$)	Borosilicate Glass (731L1) ($\times 10^{-6}$)	5 ($\times 10^{-6}$)	10 ($\times 10^{-6}$)	20 ($\times 10^{-6}$)	30 ($\times 10^{-6}$)
0	-224	-10	-73	-44	-24	0
-30	-718	-151	-288	-220	-166	-98
-60	-1,445	-532	-698	-596	-527	-420
-90	-2,607	-1,309	-1,499	-1,377	-1,309	-1,162

위 두 식에 의한 열출력 및 그 합 즉, 총 보정치는 그림 8과 같다.

4.2 표준물질을 이용한 실험적 보정

보정치를 구하는 또 다른 방법은 표준물질을 이용하는 것이다. 즉, 온도에 따른 순수 열변형률을 알고 있는 국제적으로 공인된 표준물질을 이용한 열시험을 통하여 온도에 따른 열변형률을 측정하여, 측정치와 표준 열변형률의 차이로써 시험장치에 의한 보정치를 구할 수가 있다.

본 시험에서 사용된 표준물질은 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 SRM 736L1과 731L1이다. 그림 9와 표 3은 이 표준물질의 온도에 따른 열팽창계수 변화곡선과 열팽창계수를 나타낸다.

그리고 그림 10은 온도에 따른 열변형률을 나타낸 것이다. 비교를 위하여, 이 표준물질을 이용한 열시험을 통하여 측정된 열변형률을 함께 수록하였다. 그림 9에서 각 온도에 따른 표준치와 실제 측정치의 차이가 곧 보정치가 된다. 본 실험의 온도범위(-90~+20°C)에 대해 자세히 나타낸 것이 그림 11이며, 사용된 두 종류의

표준물질 중에서 화강암의 열변형률과 유사한 변형률 분포를 갖는 SM731L1을 보정에 사용하였다.

4.3 열팽창계수 산정

본 실험결과해석에서는 KFG 게이지의 이론적 특성 곡선을 적용할 경우 측정장치 및 적용온도범위 등의 실제 시험조건으로 인하여 발생하는 오차를 배제하기 위하여 표준물질을 이용한 보정 방법을 적용하였다. 표준 물질을 이용한 열보정치를 적용하여 화강암의 순수 열변형률을 계산한 결과는 그림 12와 같다.

실험온도구간에 대한 최적 회귀로부터 온도-열변형률 관계식을 아래와 같이 도출하였다.

$$(Thermal\ strain) = 0.0204T^2 + 6.595T - 142.51 \quad (1e-6/^{\circ}C) \quad (3)$$

이렇게 얻어진 온도-열변형률 관계식으로부터 온도변화에 대한 선열팽창계수(linear thermal expansion coefficient, LETC)를 식 (4)와 같이 도출하였으며, 이 결과를 표 5에 10°C간격으로 제시하였다. 표 5에서 보는

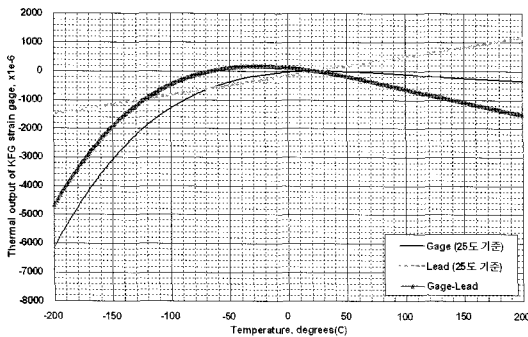


그림 8. KFG 게이지와 리드선의 열출력 및 그 보정값

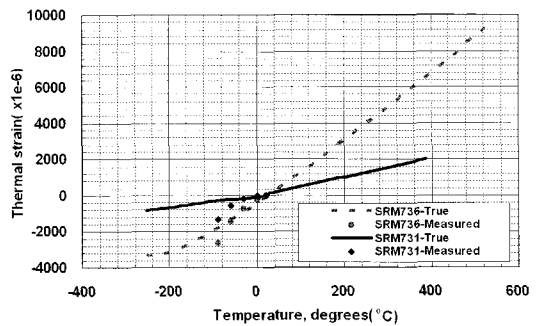


그림 10. 온도변화에 따른 표준물질의 열변형

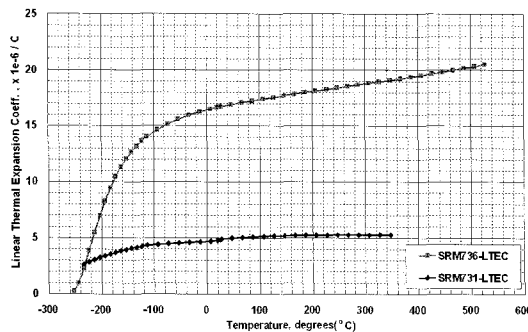


그림 9. 온도에 따른 표준물질 SRM 736L1과 731L1의 선열 팽창계수

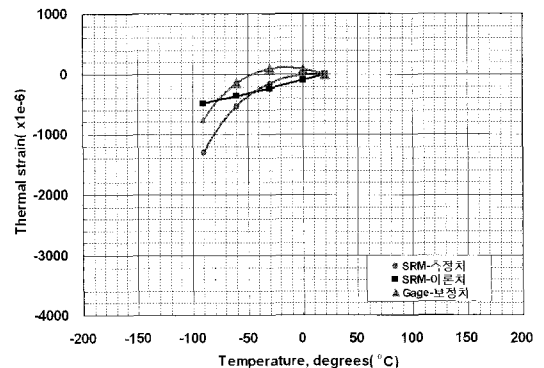


그림 11. 표준물질을 이용한 열팽창시험결과의 보정

바와 같이 열팽창계수는 온도가 내려감에 따라 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다.

$$(LETC) = 0.0408T + 6.595(\times 1e-6/^{\circ}C) \quad (4)$$

표 6은 한국표준과학연구원에서 직경 7mm 코어에 대하여 20℃에서 100℃까지 표준물질을 이용하여 선열팽창계수를 측정한 값이다. 본 연구에서 -90℃~20℃의 온도범위에서 스트레인 게이지를 이용하여 관찰되었던 온도의 하강에 따른 열팽창계수의 감소하는 경향과 20℃~100℃ 사이에서 측정한 한국표준과학연구원의 시험결과의 경향이 서로 잘 부합되는 것을 알 수 있었다.

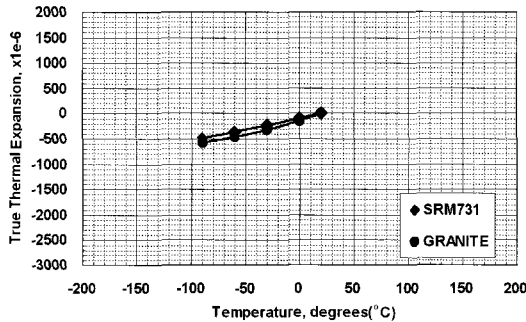


그림 12. 표준물질에 의해 보정된 암석의 열팽창계수

표 5. 온도에 따른 선열팽창계수 측정 결과

Temperature (°C)	Linear Thermal Expansion coefficient (×10 ⁻⁶ /°C)	Temperature (°C)	Linear Thermal Expansion coefficient (×10 ⁻⁶ /°C)
20	7.411	-40	4.963
10	7.003	-50	4.555
0	6.595	-60	4.147
-10	6.187	-70	3.739
-20	5.779	-80	3.331
-30	5.371	-90	2.923

표 6. 온도에 따른 선열팽창계수 측정 결과(표준과학연구원, 1996)

Temperature range (°C)	Linear Thermal Expansion coefficient (×10 ⁻⁶ /°C)	Standard deviation
20~50	10.72	0.65
50~80	11.40	0.26
80~100	13.45	0.26

그러나 상온에서 열팽창계수의 절대값은 다소 상이한데, 이는 시험에 사용된 시료크기에 따라 시료에 포함된 결정입자의 개수가 다르기 때문인 것으로 판단되며, 향후 스트레인 게이지를 이용하여 고온상태의 열팽창계수도 측정하여 추가적인 비교·검증 연구가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

저온상태에서의 암석의 열역학적 특성 및 열물성을 알아보기 위해 -90℃에서 20℃사이의 온도범위에서 화강암에 대하여 스트레인 게이지를 이용하여 열팽창계수 측정시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열팽창계수는 온도가 내려감에 따라 감소하였으며, 게이지의 길이에 대한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 시험의 용이성과 최대 광물 입자 크기를 고려할 때 코어형식의 시료와 10 mm 이상의 게이지를 사용하는 것을 제안한다.
- 2) 본 연구에서 -90℃~20℃의 온도범위에서 스트레인 게이지를 이용하여 관찰되었던 온도의 하강에 따른 열팽창계수의 감소하는 경향과 20℃~100℃ 사이에서 측정한 한국표준과학연구원의 시험결과의 경향이 서로 잘 부합되는 것을 알 수 있었다.
- 3) 상온에서 열팽창계수의 결과가 다소 상이한데, 이는 시험에 사용된 시료크기에 따라 시료에 포함된 결정입자의 개수가 다르기 때문인 것으로 판단되며, 향후 스트레인 게이지를 이용하여 고온상태의 열팽창계수도 측정하여 추가적인 비교·검증 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 스트레인 게이지를 이용한 열팽창계수 측정시험을 통해 저온상태의 암석에 대한 열팽창계수 측정에 대한 적용성을 확인하고, 이로부터 국내의 대표적인 암종인 화강암에 대해 온도에 따른 선열팽창계수 관계식을 제안할 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘환경위해 가스 지중저장환경의 역학적 거동 평가 및 유동확산 모니터링 기법개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한국표준과학연구원, 1996, 암석의 열물성 측정시험 연구, 45p.

2. Inada, Y., 1984, Some studies of low temperature rock strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., 21(3), 145-153.
3. Kuriyagawa, M., Matsunaga, I., Kinoshita, N. & Hibi, K. 1980. Rock behavior of underground cavern with the storage of cryogenic liquefied gas, Proc. Intern. Symp. on subsurface space, Stockholm, 665p.
4. Lindblom, U. 1977. Experimental and analytical research related to LNG storage in rock caverns. Proc. 1st Intern. Symp. on storage in excavated rock caverns, Stockholm., 257-263.
5. Maglic, K.D., Cezairliyan, A., Peletsky, V.E., 1992, Compendium of thermophysical property measurement Methods, Vol. 2, Plenum press.
6. Mellor, M. 1973. Phase composition of pore water in cold rocks. U.S. Army Corp. of Engineers. CRREL Research Report 292. Hanover, New Hampshire.

박 찬



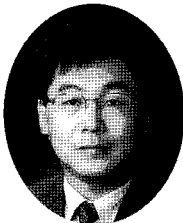
1988년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2000년 수원대학교 공과대학 토목공학과 공학석사
 2006년 충남대학교 공과대학 토목공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3245
 E-mail: chan@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

천대성



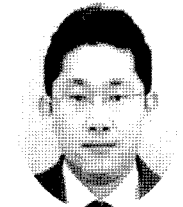
1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사
 Tel: 042-868-3248
 E-mail: cds@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

신중호



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
 1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3242
 E-mail: jhsynn@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

김형목



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2002년 동경대학교 대학원 토목공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3265
 E-mail: kimh@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

박연준



1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토목공학과 공학박사
 Tel: 031-220-2580
 E-mail: yjpark@suwon.ac.kr
 현재 수원대학교 토목공학과 교수