

## 스트레인 게이지를 이용한 암석의 저온 하 열팽창계수 측정

박찬, 신중호, 천대성, 한국지질자원연구원

### 1. 서론

비좁은 국토와 국내 농수산물 수급의 안정화를 위한 농수산물의 저온 저장시설이나 LNG, LPG와 같은 에너지 자원의 효율적인 수급을 위한 에너지 저장시설 등이 요구되며, 국토의 효율적인 이용과 안전성 등의 문제로 인하여 지하공간을 활용한 지하 저장시설의 증가가 바람직하다(Inada, 1989). 지하 암반 내에 저온 저장시설을 건설할 경우 암반의 단열성과 축열 능력에 의해 전력소비를 절감할 수 있다. 지상 저온 저장시설은 겨울철에 비하여 여름철에 약 2배의 전력이 소비되나 지하 저온시설의 경우 연중 일정한 전력이 소비되므로 에너지 절약과 최대부하의 절삭이 가능하다. 또한, 지하 암반의 축열능력에 의하여 일시적 정전으로 인한 저장물의 부패를 방지하는 효과도 기대할 수 있다. 특히 유정 또는 가스전에서 채집된 LNG는 보통 사용국의 지상 탱크나 지하저장 시설로 옮겨지며, 지하 저장의 경우 지상 저장에 비해 경제성, 안정성의 측면에서 훨씬 유리하므로 점점 그 수요가 증대되고 있다(Hong, 1995).

일부 국가에서는 생산이 완료된 가스층, 대수층(aquifer), 암염 동굴(salt dome) 등에 LNG를 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 열응력에 의하여 교란된 지하 암반의 역학적, 열적 특성을 파악해야만 한다. 이러한 LPG, LNG와 같은 저온물질의 지하저장소를 건설하기 위해서는 온도 하강에 따른 특수한 구조적 안정성 문제를 고려해야만 한다. 또한 열전도도, 비열, 열팽창계수 등의 열 물성은 암석의 역학적 특성과 함께 저온환경의 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 열전달 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 큰 부분을 차지할 것으로 판단되는 선열팽창계수도 국내에서는 저온에서 측정은 되지 않고 상온에서 100°C까지만 측정하고 있어서 본 연구에서는 한국지질자원연구원내에 건립 운영중인 LNG Pilot Plant 부지의 기반암인 화강암

에 대하여 저온 하에서 선열팽창계수를 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였다.

## 2. 시료의 특성

### 2.1 암석학적 특성

본 연구에서는 한국지질자원연구원내에 건립 운영중인 LNG Pilot Plant 부지의 기반암인 화강암을 시험 대상 시료로 사용하였으며 그림 1은 박편 현미경 사진으로서 시료의 암석학적 특성은 다음과 같다.

현미경 감정결과 석영, 장석, 사장석, 흑운모가 주성분이고, 녹니석, 백운모 등이 부성분을 이루는 흑운모화강암(Biotite granite)이다.

표 3.1은 직경 1 cm의 홀을 가진 알루미늄 원반형 홀더에 폴리에틸렌 필름을 부착한 후 분말시료를 코팅하고 X선을 투과하여 시료를 무게비로 분석하는 XRD(X-ray diffractometer) 정량분석의 방법을 이용하여 얻은 주요 광물성분에 대한 분석결과를 수록한 것이다. 현미경 관찰에 의한 Modal 분석은 약 30 %의 오차 범위를 갖지만 XRD 정량 분석은 약 1~2 %의 오차 범위 갖는 정확한 분석방법이다.

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                 |

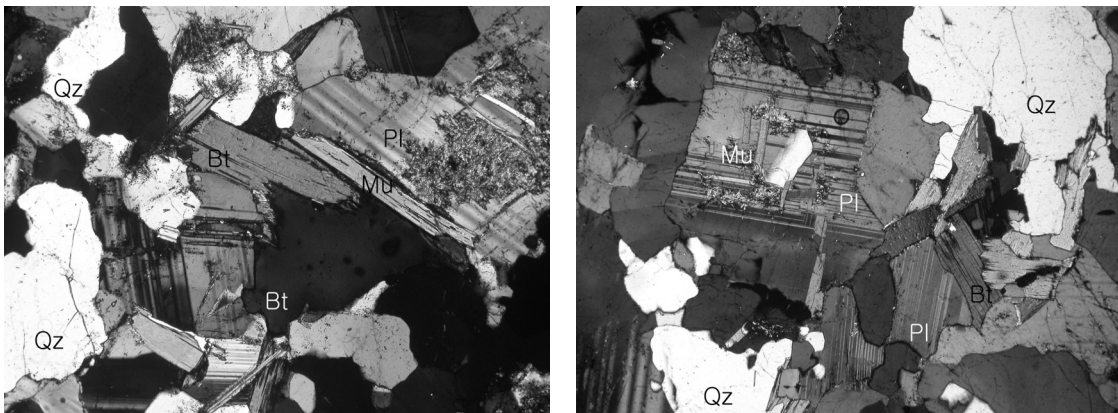


그림 1. 시료의 현미경 사진(40X, cross nicol, 0.5cm=100 $\mu$ m, Qz; Quartz, Mu; Muscovite, Pl; Plagioclase, Bi; Biotite, Mi; Microcline, Bt=biotite)

## 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 공극의 부피와 시료 부피의 비이다. Model 5217A Sonic Viewer를 사용하여 P, S파의 전파속도를 측정하였다. 또한, 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수, 포아송비 등을 MTS 815 시험기를 이용하여 구하였다.

이 결과는 표 2에 나타나 있다. 각 물성값은 3~4회 측정치의 평균값이며 탄성계수는 스트레인 게이지를 이용하여 변형률을 측정하여 구한 응력-변형률 선도에서 일축압축강도의 40~60 % 응력 수준에서 구한 평균탄성계수이며, 포아송비는 축방향 변형률과 횡방향 변형률 값의 비를 일축압축강도의 40~60 % 응력 수준에서 구한 값이다.

표 2. 시험시료의 물리, 역학적 특성

| Sample No.<br>Properties               | 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<br>(m/sec)             | 3,790 | 3,740 | 3,910 | 3,530 | 3,740 |
| S-wave velocity<br>(m/sec)             | 2,040 | 2,020 | 2,100 | 1,890 | 2,010 |
| Uniaxial compressive<br>strength (MPa) | 113   | 135   | 140   | 127   | 129   |
| Brazilian tensile<br>strength (MPa)    | 5.4   | 7.2   | 9.2   | -     | 6.4   |
| Young's modulus<br>(GPa)               | 39.9  | 47.0  | 43.3  | 42.5  | 43.2  |
| Poisson's ratio                        | 0.25  | 0.24  | 0.21  | 0.19  | 0.22  |

## 3. 시험장치

온도조절은 당 연구원의 INTERLAKEN 시험장비에 포함된 고온·저온용 시험조 (environmental chamber)를 사용하였다. 그림 2에서 시험 프레임의 오른쪽에 부착되어 있는 것이 온도 조절 장치함의 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.

온도조절은 Watflow 965 컨트롤러를 통해 프로그래밍하면 시험조 내부에 설치된 K-type thermocouple이 내부 온도를 feedback 신호로 처리하여 온도를 자동조절하며 수동으로도 조작이 가능하다. 또한, 시험조 내부에는 균등한 온도분포를 위한 공기 순환을 위하여 팬이 장착되어 있다.

온도조절장치를 ramp mode로 설정하면 목표 온도까지 자동 동조하는 PID 컨트롤을 통해 가열과 냉각을 반복하여 설정한 온도조절 속도에 맞춰서 원하고자하는 온도에 도달하게 된다. 또한, 현재 컨트롤러가 주는 입력온도와 실제 시험조 내부의 온도를 UTP-4 프로그램을 사용하면 온도의 연속적인 기록도 가능하다. 가열은 고온-저온용 시험조 내부에 장치된 열선을 이용하여 가열하고, 냉각은 액화질소(liquid N<sub>2</sub>)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.



그림 2. 고온-저온용 시험조의 모습

#### 4. 시험방법

일반적인 재료의 열적 성질은 재료가 가진 기본적인 물성중의 하나로서 재료의 기본특성, 형상, 상태 등의 여러 가지 요인에 의해 측정법을 달리해야하는 특성을 가지고 있다. 이러한 물성을 정확히 파악하기 위하여서는 재질의 적합한 측정법을 선택함으로써 보다 정확한 데이터를 얻을 수 있다. 암반의 거동을 파악하기 위하여 암석의 열물성 측정을 통하여 열적거동을 파악하고 해석하는데 매우 중요한 요소 중의 하나이다.

기존의 열팽창계수 측정은 직경 7mm 코아의 수직방향의 팽창 변위를 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)를 사용하여 표준물질과 비교 측정하여 구하는 방법이다. 이는 결정질인 암석의 특성상 입자의 크기에 비하여 시료의 크기가 너무 적어 측정에 다소 문제점이 있는 것으로 판단되어 본 연구에서는 스트레인게이지(strain gage)를 이용한 방법을 사용하였으며, 스트레인게이지와 리드선의 온도에 의한 영향으로 인한 시험의 오차를 확인하고 시험결과의 보정을 위하여 표준물질(reference material)을 사용하였다. 여기에 사용된 표준물질은 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 SRM 736L1으로 직경 6.4 mm의 재질은 구리로 된 봉 형태와 SRM 731L1로 사각봉 형태의

Borosilicate Glass 두 종류이다.

그림 3은 표준물질과 시료에 시험을 하기 위해서 스트레인 게이지를 부착한 모습이다. 이 표준물질의 상온에서 열팽창계수는 각각  $16.7 \times 10^{-6}$  과  $4.8 \times 10^{-6}$  정도이고 온도변화에 따른 상세한 열팽창계수는 표 3에 표시되어 있다.

시험시료는 시추공에서 채취한 NX 코아 형태를 준비하였다. 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.

시험은 Interlaken 시험기에 장착된 고온-저온용 시험조(environmental chamber) 내부에서 수행하였다. 먼저 시료를 시험조 내부의 중앙에 설치하고 시험조 측벽에 있는 센서 설치용 출입구로 스트레인 게이지와 표준시료를 설치한 후 온도 설정을 하였다. 이때 시료에 과도한 온도전달을 방지하기 위하여 시료 받침대를 목재로 사용하였다.

온도는 Watlow 965 컨트롤러를 통해서 조절이 가능하며, 고온은 시험조 내부에 있는 열선을 이용하지만, 저온은 외부에서 공급되는 액체 질소의 양을 조절하여 지정한 온도속도에 맞춰서 설정 온도에 도달하게 된다.

본 시험에서는 20 °C를 기준으로 하여 저온으로는 0 °C, -30 °C, -60 °C, -90 °C에서 각각 수행하였다. 온도조절속도는 Watlow 965 컨트롤러에서 0.5 °C/min의 속도로 설정하여 온도를 조절하였다. 또한, 시료 내부의 온도 분포를 확인하기 위하여 별도의 thermometer를 이용하여 표준시료 내부의 온도를 측정하였다. 별도의 시료를 통하여 확인한 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.

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 주입구에 연결시키고, 밸브를 연다. 그리고 Watlow 965 컨트롤러를 조정하여 mode를 ramp mode로 설정하고, 도달 온도를 설정한다. 설정온도에 도달하면 표준시료의 내부온도가 설정온도에 도달할 때까지 온도를 유지하다가 다음 설정온도로 Watlow 965 컨트롤러를 조정한다.

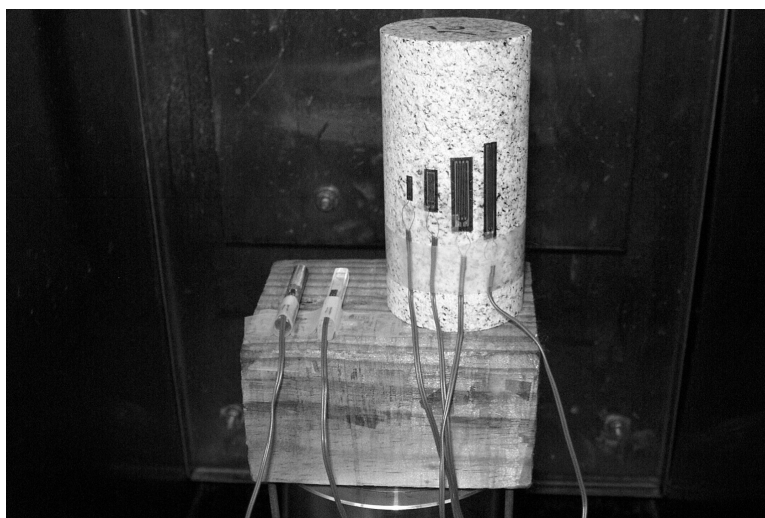


그림 3. 스트레인 게이지가 부착된 표준물질(SRM 736L1, 731L1)과 시험시료

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

이렇게 측정된 시험결과는 게이지와 리드선이 온도변화에 따른 보정을 하지 않은 단계이므로 온도보정을 해주어야 한다. 온도보정 방법에는 게이지와 리드선의 열특성 표준식을 이용한 방법과 표준물질을 이용한 실험적 보정방법이 있다.

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

#### 4.1 게이지의 열특성 표준식을 이용한 보정 방법

스트레인게이지를 이용하여 측정한 열변형량에는, 측정 시료 자체의 열변형량뿐만 아니라 부착된 게이지 및 리드선의 열변형량도 함께 포함되어 있다. 따라서 순수한 시료의 열변형량을 구하기 위해서는 이들 게이지 및 리드선의 열변형량을 보정해 주어야 한다. 본 실험에 사용한 게이지는 일본 Kyowa사의 KFG 스트레인게이지로서, 게이지 자체의 온도(T)에 따른 표준 열출력량은 다음 식으로 제시되어 있다.

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

또한, 연결 리드선에 의한 열보정식은 다음 식과 같다. 여기서,  $\gamma$ 는 리드선의 총저항,  $\alpha$ 는 리드선의 저항온도계수(구리선의 경우 0.003 /°C),  $K_s$ 는 게이지율,  $R$ 은 리드선을 포함한 게이지의 저항,  $\Delta T$ 는 온도변화량이다.

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

위 두 식에 의한 열출력 및 그 합 즉, 총 보정치는 그림 4와 같다.

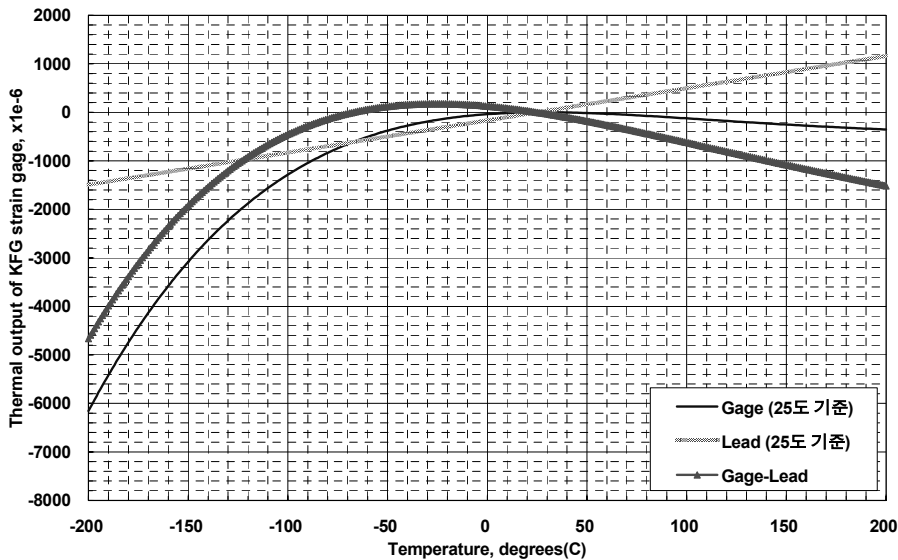


그림 4. KFG 게이지와 리드선의 열출력 및 그 보정값

#### 4.2 표준물질을 이용한 실험적 보정

스트레인 게이지와 리드선에 의한 열변형량 보정치를 구하는 방법은 표준물질을 이용하는 것이다. 즉, 온도에 따른 순수 열변형량을 알고 있는 국제적으로 공인된 표준물질을 이용한 열시험을 통하여 온도에 따른 열변형량을 측정하여, 측정치와 표준 열변형량의 차이로써 실험장치에 의한 보정치를 구할 수가 있다.

본 실험에서 사용된 표준물질은 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 SRM 736L1과 731L1이다. 그림 5는 이 표준물질의 온도에 따른 열팽창계수 변화곡선이다.

그리고 그림 6은 온도에 따른 열변형량을 나타낸 것이다. 비교를 위하여, 이 표준물질을 이용한 열시험을 통하여 측정된 열변형량을 함께 수록하였다. 그림 7에서 각 온도에 따른

표준치와 실제 측정치의 차이가 곧 보정치가 된다. 본 실험의 온도범위(-90~+20 °C)에 대해 자세히 나타낸 것이 그림 7이다.

본 실험결과해석에서는 KFG 게이지의 이론적 특성곡선을 적용할 경우 측정장치 및 적용 온도범위 등의 실제 실험조건으로 인하여 오차가 발생할 수 있어 이를 배제하기 위하여 표준물질을 이용한 보정 방법을 적용하였다.

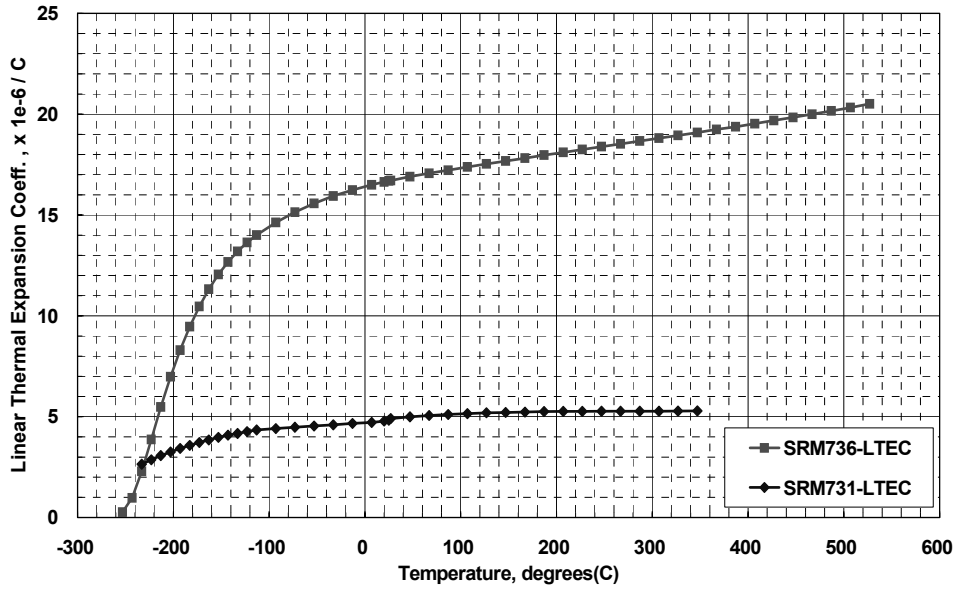


그림 5. 온도에 따른 표준물질 SRM 736L1과 731L1의 열팽창계수

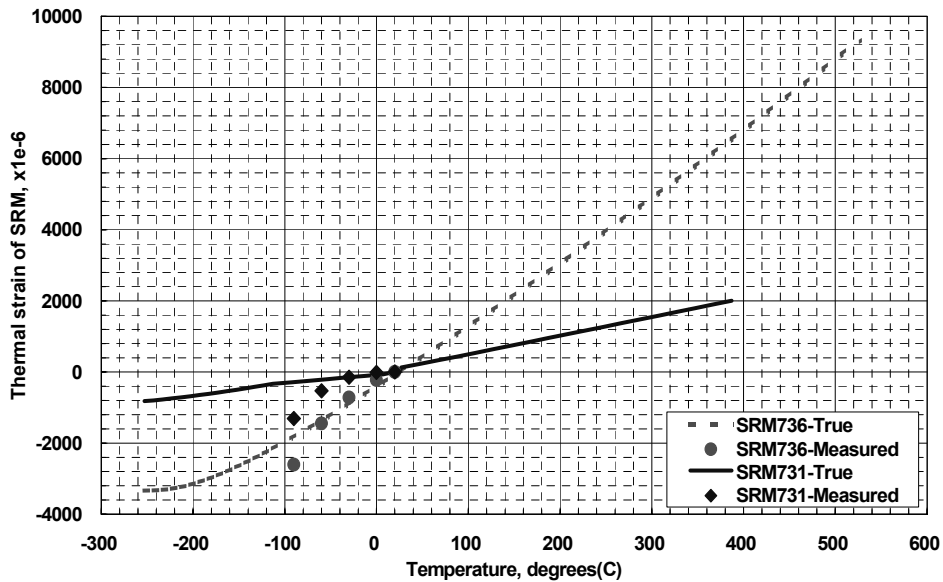


그림 6. 온도변화에 따른 표준물질의 열변형



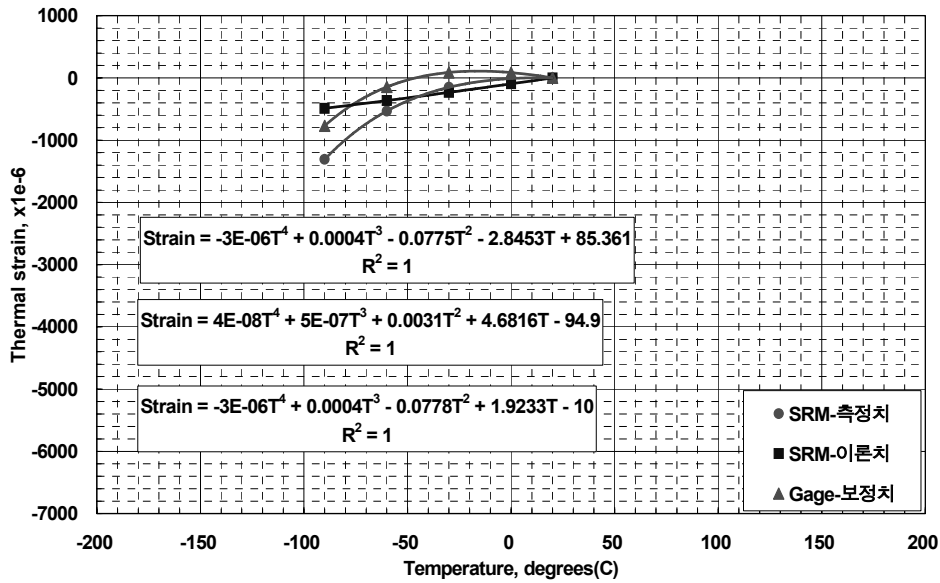


그림 7. 표준물질을 이용한 열팽창시험결과의 보정

## 5. 시험결과

열팽창계수는 SRM 736L1(borosilicate glass)과 731L1(copper) 표준물질을 이용하여 측정하였으며, 열팽창시험에서 얻어진 온도에 따른 열변형량 결과는 그림 8과 같이 나타났으며, 이를 정리하면 표 4와 같다.

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

온도보정 방법에는 게이지와 리드선의 열특성 표준식을 이용한 방법과 표준물질을 이용한 실험적 보정방법이 있다. 본 실험의 해석에 있어서는 시험상의 오차나 기타 오류를 배제하기 위하여 표준물질을 이용한 보정방법을 사용하였으며, 그 결과는 표 5에 나타나 있다.

표 6은 1996년에 한국표준과학연구원에서 직경 7mm 코아에 대하여 20℃에서 100℃까지 표준물질 이용하여 측정한 값이다.

표 4. 열팽창시험에 의한 열변형량

| Temperature (°C) | SRM    |                    | Strain gage(length, mm) |        |        |        |
|------------------|--------|--------------------|-------------------------|--------|--------|--------|
|                  | Copper | Borosilicate Glass | 5                       | 10     | 20     | 30     |
| 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 |

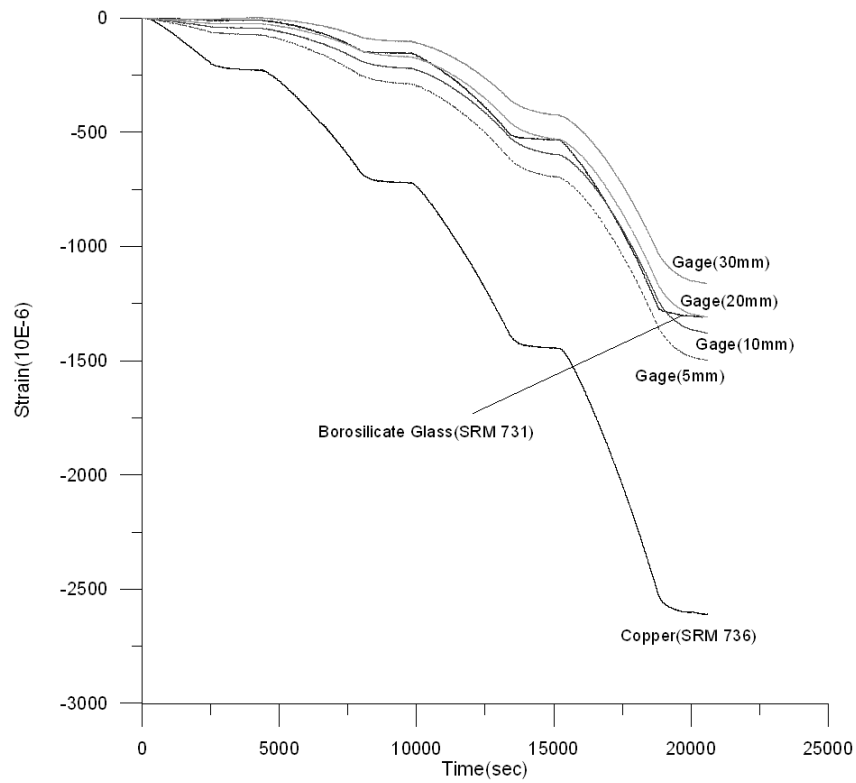


그림 8. 온도에 따른 열 변형률 측정 결과

표 5. 온도에 열팽창계수 측정 결과

| Temperature (°C) | Expansivity ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) | Temperature (°C) | Expansivity ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) |
|------------------|---|------------------|---|
| 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 5. 온도에 열팽창계수 측정 결과(표준과학연구원, 1996)

| Temperature range (°C) | Expansivity ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) | Standard deviation |
|------------------------|---|--------------------|
| 20 ~ 50                | 10.72   | 0.65               |
| 50 ~ 80                | 11.40   | 0.26               |
| 80 ~ 100               | 13.45   | 0.26               |

## 6. 결 론

저온상태에서의 암석의 열역학적 특성 및 열물성을 알아보기 위해  $-90^{\circ}\text{C}$ 에서  $20^{\circ}\text{C}$ 사이의 온도범위에서  $10^{\circ}\text{C}$  간격으로 화강암에 대하여 스트레인 게이지를 이용하여 열팽창 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 열팽창계수는 온도가 내려감에 따라 감소하였으며, 시편의 형태와 게이지의 길이에 대한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 시험의 용이성과 최대 광물입자 크기를 고려할 때 코어형식의 시료와 10mm 이상의 게이지를 사용하는 것을 제안한다.

2)  $-90^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 에서 측정된 본 연구결과의 온도의 증가에 따라 열팽창계수의 증가하는 경향과  $20^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$  사이에서 측정된 한국표준과학연구원의 시험 결과의 증가 경향이 서로 잘 맞음을 알 수 있었다.

3) 상온에서 두 결과가 다소 상이한데 이는 결정입자의 크기가 큰 화강암 시료의 경우 7 mm 정도의 작은 코아는 시료에 따라 포함하는 결정입자의 수와 관련된 것으로 판단된다.

4) 스트레인 게이지를 이용한 열팽창시험을 통해 국내의 대표적인 화강암에 대해 온도에 따른 열팽창계수 관계를 제안할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Inada, Y., 1984, Some studies of low temperature rock strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 21(3), 145-153.
2. 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.
3. Lindblom, U. 1977. Experimental and analytical research related to LNG storage in rock caverns. *Proc. 1stIntern. Symp. on storage in excavated rock caverns*, Stockholm., 257-263.
4. Mellor, M. 1973. Phase composition of pore water in cold rocks. U.S. Army Corp. of Engineers. CRREL Research Report 292. Hanover, New Hampshire.
5. Hong, S. H., 1995, Present status and prospect of LNG storage tank, *J. of KWS*, 12(3), pp.1 ~ 7