2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료 소결체 길이변화 측정을 위한 LVDT 고온 노외시험

The high temperature out-of-pile test of LVDT for elongation measurement of fuel pellet

손재민, 김봉구, 조만순, 주기남, 박승재, 강영환, 김영진

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

하나로(HANARO, High-flux Advanced Nuclear Application Reactor)에서 핵연료 조사시험을 수행하기 위한 계장기술 개발의 일환으로 LVDT(Linear Variable Differential Transformer, 선형변위차동트랜스)를 이용한 조사시험 중 핵연료 소결체(fuel pellet)의 길이 변화를 측정하기 위한 기술을 개발 중이다. 핵연료 조사시험에 적합한 LVDT와 변형계(elongation detector)를 선정하였고, 이 선정된 LVDT는 온도변화에 민감한 반응을 나타내므로 핵연료 조사시험용 캡슐의 상세 설계에 적용하기 위한 세밀한 노외시험을 통하여 고온에서의 온도 변화에 따른 LVDT 변화특성을 분석할 필요가 있다. 따라서, LVDT의 고온 노외시험을 수행하기 위한 시스템을 구축하고, 상온에서 300℃까지의 온도 환경에서 5 mm까지 변형을 가하면서 노외실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 각 온도에서의 LVDT 특성은 물론이고, 온도의 변화에 따른 LVDT 특성변화 경향을 분석하였다. 본 고온 노외시험에 의해 다양한 온도환경에서 LVDT와 변형계를 적용하기 위한 방법을 도출하였으며 이는 핵연료 조사시험 시 측정될 핵연료 소결체의 길이 변화를 보다 정확하게 분석하기 위하여 활용될 것이다.

Abstract

As a part of the development of instrumentation technologies for the nuclear fuel irradiation test in HANARO(High-flux Advanced Nuclear Application Reactor), the elongation measurement technique of the fuel pellet is being developed using LVDT(Linear Variable Differential Transformer). The well qualified out-of-pile test were needed to understand the LVDT's detail characteristics at high temperature for the detail design of the fuel irradiation instrumented capsule, because LVDT is very sensitive to variation of temperature. Therefore, the high temperature out-of-pile test system for fuel pellet elongation was developed, and this test was performed under

the temperature condition between room temperature and 300℃ with increasing the elongation from 0 to 5 mm. The LVDT's high temperature characteristics and temperature sensitivity of LVDT were analyzed through this experiment. Based on the result of this test, the method for the application of LVDT and elongation detector at high temperature was introduced. It is known that the results will be used to predict accurately the elongation of fuel pellet during irradiation test.

1. 서 론

한국원자력연구소에서는 핵연료 조사시험용 계장캡슐을 개발하여 성능시험 중에 있으며, 이는 핵연료에 대한 성능 및 안전성을 확인하기 위하여 필수적으로 요구되고 있는 하나로의 주요 이용설비 중에 하나이다.[2][3][4]

연구로에서의 핵연료 조사시험을 위한 계장은 조사시험중 핵연료의 노내 거동 연구 및 설계자료의 확보를 위해 이용되고 있다. 이에 따라 1960년대부터 연구로를 보유한 각국에서는 핵연료 조사시험 중 핵연료 특성측정을 위해 다양한 계장기술을 개발하여 이용해오고 있다. 계장을 통하여 핵연료 조사시험 중 측정할 수 있는 특성으로는 핵연료 노내 성능과 관련이 있는 핵연료 중심 및 표면온도, 피복관 표면온도, 핵연료봉 내압, 핵연료 길이 변화, 그리고 피복관 직경 및 길이 변화, 피복관 산화층 두께변화 등이 있다. 이러한 특성들로부터 연소에 따른 핵연료의 노내 거동을 직접 확인할 수 있고, 여기서 수집된 자료들은 핵연료 설계와 관련된 연구에 많은 정보를 제공하게 된다. 조사시험용 핵연료 봉 계장기술 중 핵연료 중심온도 측정과 중성자 조사량 측정은 02F-11K 핵연료 조사시험용 계장캡슐에 설치되어 2003년 3월에 하나로에서 활용되었으며[5], 핵연료 봉 내부압력과 핵연료 소결체의 길이변화 측정은 2004년도에 활용될 예정이다.

이와 같이 다양한 핵연료 조사시험 계장기술 중에 핵연료 소결체의 길이변화 측정 기술을 개발하기 위하여 LVDT와 변형계를 이용할 것이다. 이 기술을 개발하기 위하여 하나로에서의 실제 핵연료 조사시험 시 LVDT가 위치하게 되는 핵연료봉 상단에서 LVDT가 동작하는 특성을 정확하게 파악할 필요가 있으므로 노외시험을 수행하고, LVDT의 특성을 분석하였다. 이전에 수행된 핵연료봉 내부압력 측정을 위한 노외시험을 수행하면서 LVDT가 온도에 민감하다는 것을 알 수 있었으며[1], 고온 노외시험을 통하여 온도변화에 따른 LVDT의 특성을 파악할 필요성이 대두되었다. 따라서, 본 논문에서는 고온에서의 노외시험을 수행하여 온도에 따른 LVDT의 특성을 분석하였다.

2. LVDT와 변형계

고온 노외시험에서 사용된 LVDT와 변형계의 개념은 그림1과 같이 신호를 발생하는 LVDT와 길이 변화에 따라 움직이는 magnetic core, 핵연료봉에 용접하기 위한 end plug, 핵연료 소결체의 끝부분에 위치하게될 magnetic core support 등으로 구성되어 있다. 핵연료 조사시험을 위하여 선정된 것은 노르웨이의 HALDEN에서 구입한 LVDT 715와 Core 783이며, 이것의 외형은 그림 2와 같다. 이것은 실제 핵연료 계장캡슐에 장착되어 사용될 것이므로 노외시험 시 손상이 가지 않도록 하는 것이 노외시험 시스템 설계시 고려된 중요한 관점 중에 하나였다.

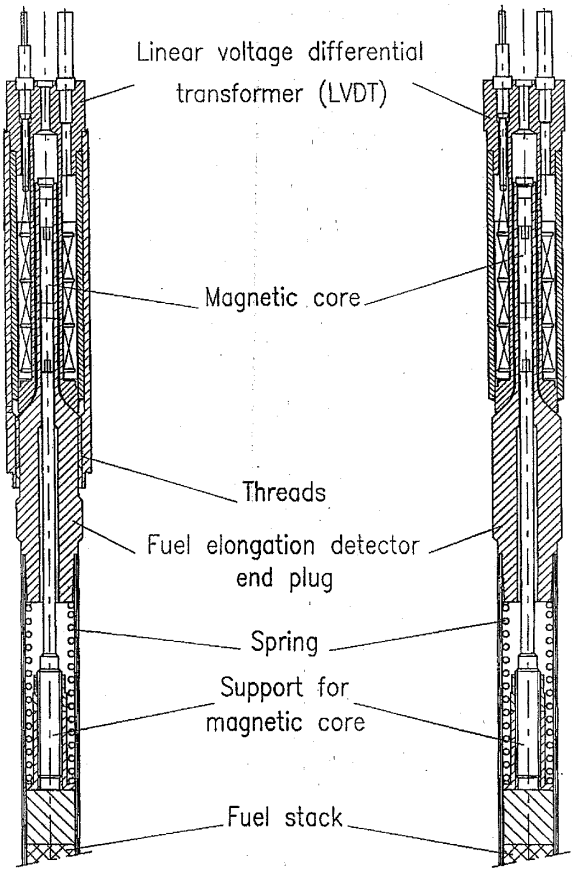

그림 1. LVDT와 변형계 개념도

(a) LVDT와 Core의 결합 전 상태

(b) LVDT와 Core의 결합 후 상태

그림 2. LVDT 715와 BCA 783

LVDT 715는 1차 coil과 2차 coil에 각각 연결된 도통저항 값이 83.68Ω인 primary cable과 도통저항 값이 104.97Ω인 secondary cable이 있으며, sheet안에 각각 2개씩의 conductor를 가지고있으며, 이것은 splicing 작업을 통하여 conductor의 산화를 방지하면

서 electronics unit에 연결하기 위한 연결선을 그림 3과 같이 접합한 후에 사용하여야 한다. 이 cable conductor의 성분은 Ni(99.95%), C(0.034%), Fe(0.004%)으로 구성되어있다. 변형계인 Core 781의 최대 측정 범위는 5 mm이며, 조사시험용 핵연료 캡슐의 조립 시 변형계의 아랫부분인 end plug가 핵연료봉의 끝단에 용접되며, magnetic core 끝부분이 핵연료 소결체 상단에 위치하도록 장착하여 사용된다.

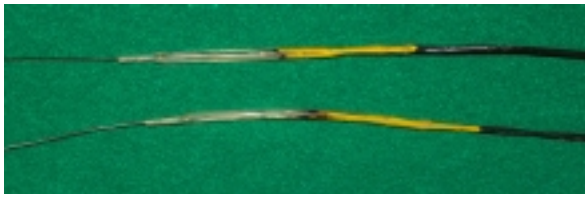

그림 3. LVDT Cable의 Splicing

3. 고온 노외시험 시스템 구성 및 사양

LVDT와 변형계를 이용하여 고온 노외시험을 위한 시스템 구성의 개념은 그림 4에 나타나 있는 것과 같이 LVDT와 변형계, electronics unit, argon gas 분위기 chamber와 furnace & 온도 controller, 변형 adapter와 micro meter system, 그리고 가압 및 배기 밸브들로 이루어져있으며 이것을 실제로 구성한 모습은 그림 5와 같다.

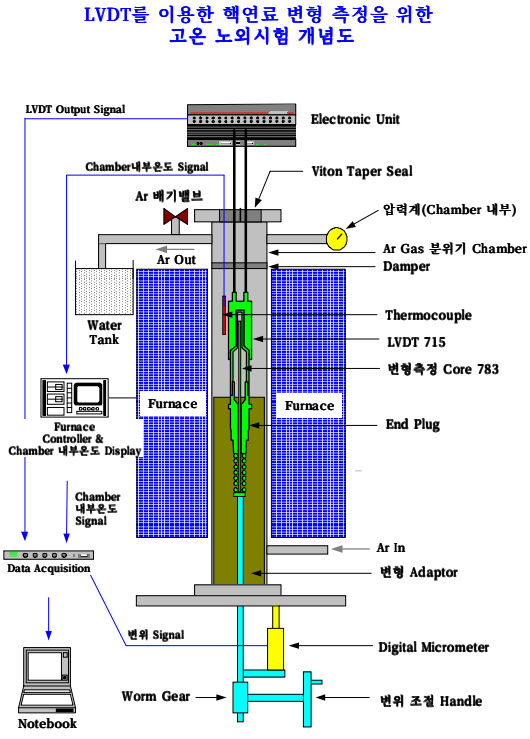

그림 4. 고온 노외시험 시스템 구성도

그림 5. 고온 노외시험 시스템

3.1. Electronics unit

이 장치는 LVDT의 전압변화를 측정하기 위한 장치이며, 본 고온 노외시험에서 사용된 LVDT를 포함한 5가지 형태의 LVDT에 적용하기 위하여 HRP(Halden Reactor Project)에서 제작된 것이고, 사양은 표 1과 같다. 이 장치의 출력은 data logger 또는

multimeter를 연결하여 사용 할 수 있도록 analog output을 제공한다. 이 장치는 그림 6과 같으며, -5 ~ 5 V까지의 출력을 나타내도록 되어있고, 이 장치는 정상적으로 작동하기 위해서 1시간 이상의 worming-up 시간이 필요하다.

그림 6. Electronics Unit와 Controller

표 1. Electronics Unit 사양

Model	Portable LVDT Electronics Unit
Channel 수	Single Channel
Power Supply	±17V
Oscillator	400 Hz
Constant Current Generator Card	50 mA
Cooling	Natural Air Circulation
Operation Temperature	< 55 ℃

3.2. Argon gas 분위기 chamber와 furnace & controller

Argon gas 분위기 chamber는 LVDT와 변형계의 산화를 방지하기 위한 목적으로 제작되었다. 이 chamber의 재질은 STS 304이며, 내경은 133 mm, 그리고 높이는 300 mm이다. 이 chamber 안쪽에 그림 7과 같이 LVDT 715와 Core 781이 위치하게되며, 고순도 argon(99.999)을 1~2 Kgf/cm^{2}정도로 아래에서 윗쪽으로 흐르게하여 chamber 내부에 산소가 유입되는 것을 방지하도록 하였으며, 배기관 끝부분을 수조에 담그어서 배기관 안쪽면을 따라 스며드는 산소의 역류현상을 최소화하였다. 또한 argon gas의 흐름을 조절하기 위하여 용량이 1~10 liter/mim인 ball flow meter를 입력밸브 부분에 설치하였다.

Chamber의 바깥쪽에 최대출력이 500W인 band type heater를 설치하고, 내부에 K-type thermocouple을 설치하여 chamber 내부의 온도를 controller에 의해 제어하도록 하였다. 온도 controller의 sampling 주기는 250 ms, 측정정도는 0.1 %, 그리고 시간분해능은 0.1 % 혹은 10 ms의 작은 쪽인 사양을 갖는다.[9]

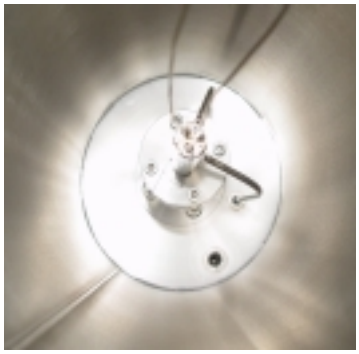

그림 7. LVDT 715와 Core 783이 chamber 안에 장착된 모습

3.3. 변형 adapter와 Micrometer

이 장치는 Core 783에 변형을 가하기 위한 것이며, Core 783의 end plug가 핵연료 봉 끝단에 용접되고, magnetic core support가 핵연료 소결체 끝단에 위치한 상태를 모사하기 위하여 설계·제작된 것이다. 이것은 Core 783이 장착될 때 magnetic core에 복원력을 주기 위한 길이 약 37 mm 스프링이 32.5 mm로 압축된 상태로 장착 되도록 하며, 5 mm까지 변형을 줄 수 있도록 하는 것이었다. 이 장치의 설계 시 고려된 사항은 앞에서 기술한 바와 같이 고가의 LVDT 715와 Core 783를 노외시험 후 실제 핵연료 조사시험용 캡슐에 사용하여야 하므로 손상이 가지 않도록 고려하였다. LVDT 175와 Core 783

assembly가 이 변형 adapter에 장착된 모습은 그림 8과 같다.

Core 783에 가해지는 변형량을 측정하기 위한 micrometer는 Mahr사의 Digital Dial Indicator 6731을 사용하였는데 측정범위가 12.5 ㎜이고, resolution이 0.001 ㎜, measuring force 0.7~0.95 N, 허용오차 5.0㎛이다.

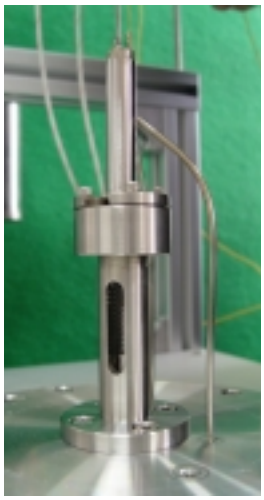

그림 8. LVDT 175와 Core 783이 변형 adapter에 장착된 모습

4. 고온 노외시험

4.1. 고온 노외시험

고온 노외시험은 실제 핵연료 조사시험 시 LVDT가 위치한 부분의 온도가 약 80℃ 정도로 예상되므로[6] 상온에서 80℃까지는 약 5℃간격으로 80℃에서 300℃까지는 약 10℃간격으로 수행하였다. 각 온도에서는 0 mm부터 5 mm까지 변형량을 증가하면서 LVDT output과 micrometer의 변형량을 측정하였다. LVDT output의 단위는 voltage였으며, micrometer의 단위는 ㎛였다. 이때, 각 신호의 흐름도는 다음 그림 9와 같다.

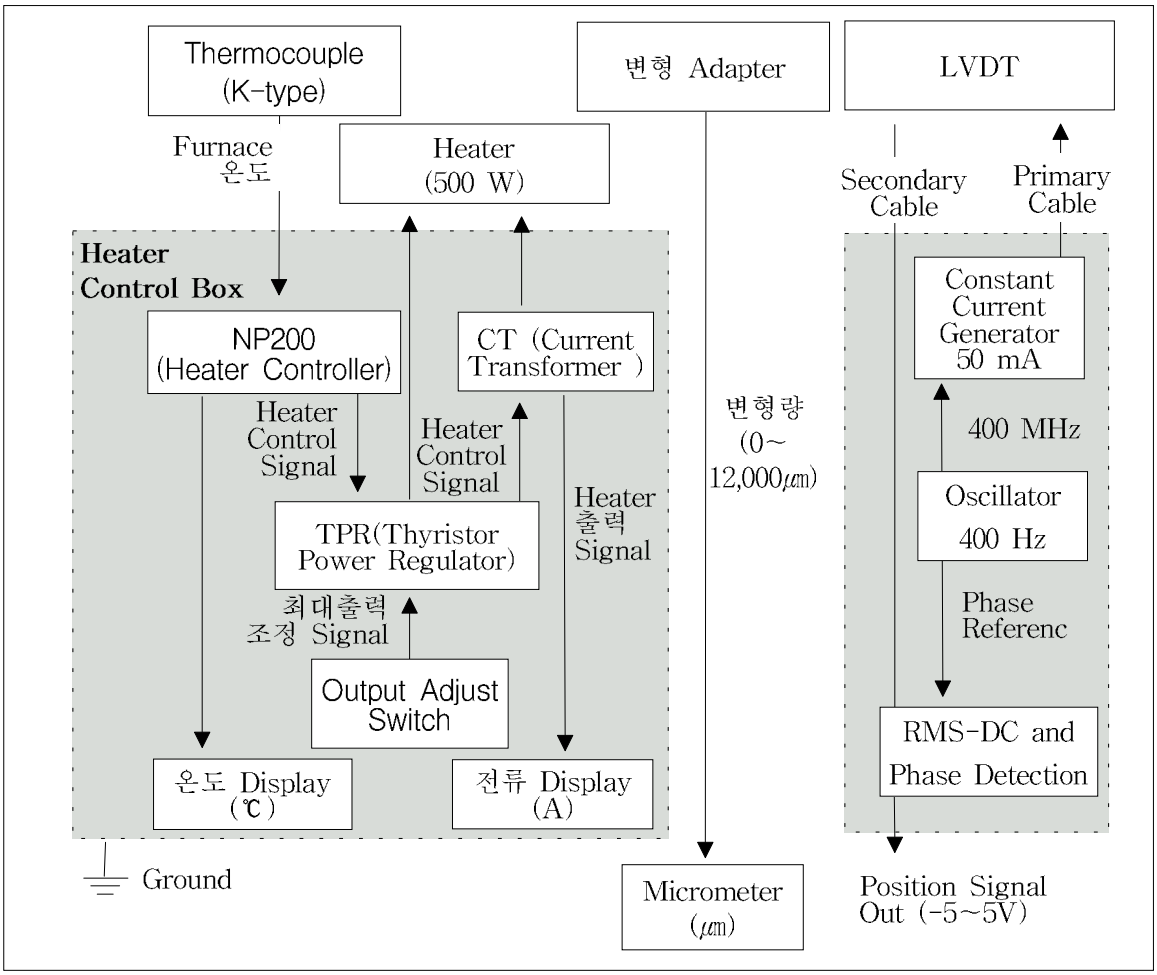

그림 9. 신호 흐름도

각 온도에서 수집된 자료는 linear fitting을 통하여 특성을 분석하였다. 그림 10은 240℃에서의 측정값과 linear fitting 결과를 예로 보여주고 있다.

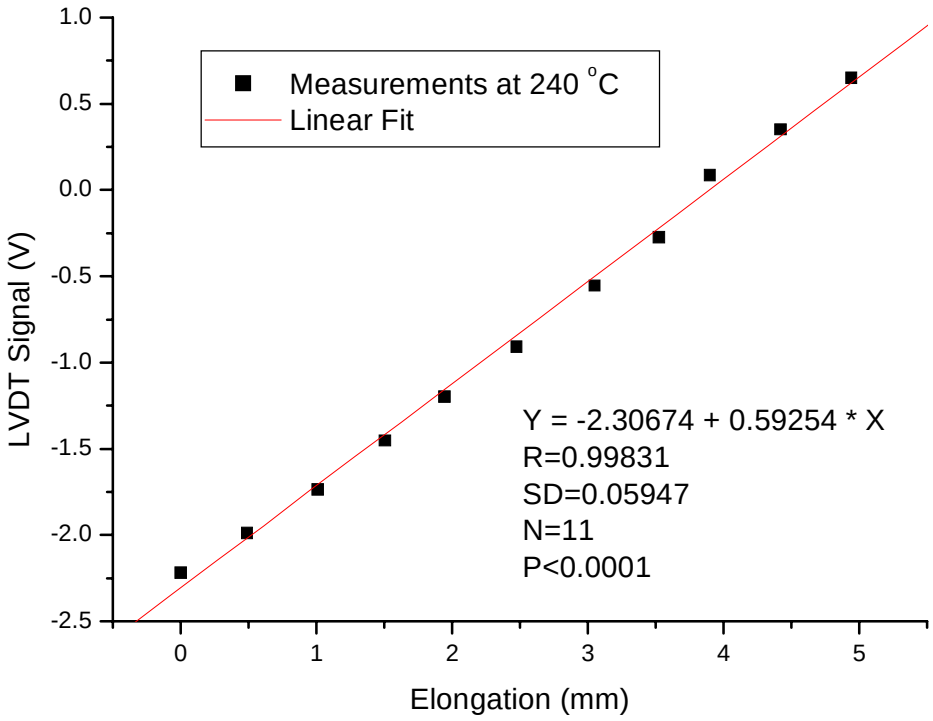

그림 10. 240℃에서 LVDT 175와 Core 783의 실험값과 linear fitting 결과

각 온도에서의 압력변화에 대한 측정값을 linear fitting하기 위한 선형식을 구하는 방법은 linear least square fitting이 사용되었다. 이때 사용된 선형회기모델(linear regression model)은 식(1)과 같다.[7][8]

$$Y = A + BX \qquad (1)$$

식(1)에서의 변수 A는 Y축의 절편값이며, B는 기울기을 의미한다. 이들은 least square방법에 의해 예측되게 된다.

상관계수(R)가 1이면 노외시험을 통한 실험값과 linear fitting 결과가 완전히 일치하는 것을 의미한다. 또한, 상관계수가 0이 될 확률은 0.0001이므로 실험에서 얻은 결과는 선형도가 우수한 것으로 분석된다. 여기서 상관계수는 실험값과 linear fitting값 사이의 상관관계를 수치적으로 판단하게 해준다. 상관계수는 통상적으로 $-1 \leq R \leq 1$이 된다. 상관관계의 강도는 상관계수의 절대값 $|R|$ 또는 R^2으로 평가한다. 두 가지 경우 모두 1에 가까울수록 상관이 강하다는 것을 의미한다. 여기서 상관계수를 산출하는 방법은 식(2)와 같다.[5]

$$R = \frac{S(xy)}{\sqrt{S(xx)S(yy)}} \qquad (2)$$

이때,
$$S(xx)=\sum_{i=0}^{n}(x_i-\bar{x})^2=\sum_{i=0}^{n}x_i^2-\left(\sum_{i=0}^{n}x_i\right)^2/n$$
$$S(yy)=\sum_{i=0}^{n}(y_i-\bar{y})^2=\sum_{i=0}^{n}y_i^2-\left(\sum_{i=0}^{n}y_i\right)^2/n$$
$$S(xy)=\sum_{i=0}^{n}(x_i-\bar{x})^2(y_i-\bar{y})^2=\sum_{i=0}^{n}x_i y_i-\left(\sum_{i=0}^{n}x_i\right)\left(\sum_{i=0}^{n}y_i\right)/n$$

표준편차(standard deviation)는 다음 식(3)에 의해 산출되며, 이때, (x_i, y_i)는 각 데이터의 포인트를 의미한다.

$$SD=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i-(Ax_i+B))^2}{N-2}} \qquad (3)$$

4.3. 노외시험 결과 분석

각 온도에서의 측정값을 토대로 linear fitting한 결과 살펴보면, 실험 온도가 증가할수록 각 온도에서의 linear fitting결과에서 식(1)의 기울기, 즉 sensitivity(V/mm)가 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 LVDT는 주위의 온도가 올라갈수록 동일한 변형에 대하여 sensitivity가 커진다는 것을 알 수 있다. 그리고, 상온에서 300℃까지의 범위에서 LVDT의 sensitivity는 그림 11에 나타나있다.

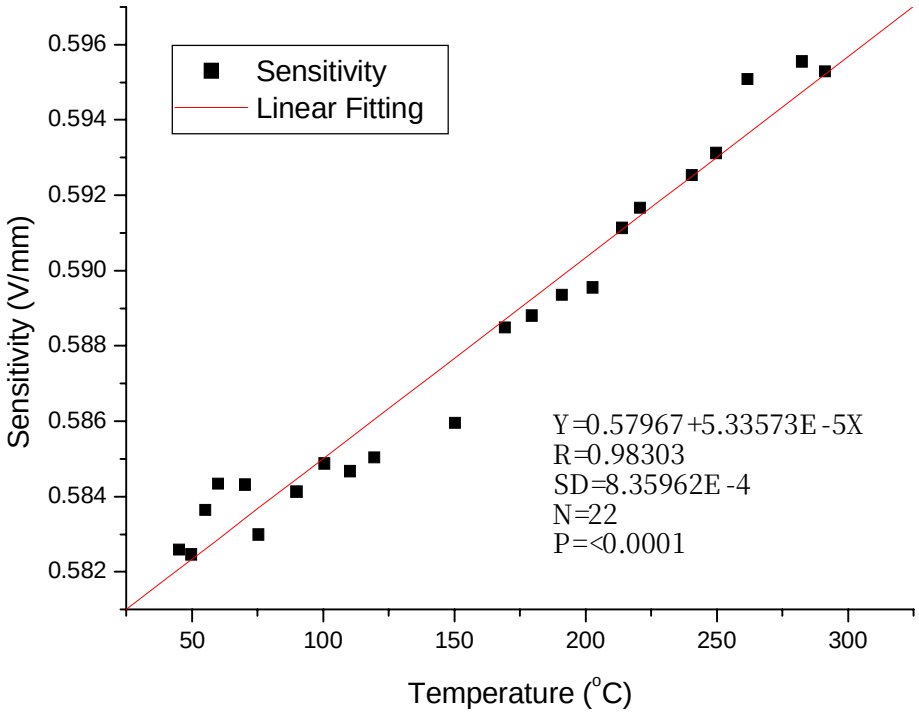

그림 11. LVDT 715 & Core 783의 온도변화에 따른 sensitivity

5. 결론

변형 측정을 위한 LVDT의 고온 노외시험은 핵연료 조사시험용 계장캡슐의 계장 기술 개발의 일환으로 조사시험 수행 시 핵연료 소결체의 길이 변화 측정 기술을 개발하기 위하여 수행되었다. 본 실험은 길이의 변화를 측정하기 위하여 핵연료봉 상단에 용접될 LVDT의 온도환경에 따른 특성을 정확하게 파악하여 조사시험 시 추출될 자료를 보다 정확하게 분석하기 위하여 반드시 필요한 실험이었다.

실제 이용자의 요구조건에 적합한 LVDT를 선정하고, 그것을 이용하여 고온 노외시험을 수행하였으며 그 결과로 상온에서 300℃까지의 다양한 온도에서의 LVDT특성과 온도 변화에 따른 특성도 파악하였다. 본 고온 노외시험의 연구를 통하여 핵연료 조사시험 시 변화하는 온도환경에서 핵연료 소결체의 길이 변화를 정확하게 측정하고, 분석하기 위한 기술을 확보하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기 사업 중 조사시험용 캡슐개발 및 활용 연구과제의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

[1] 손재민외 6인, 2002.9.11, “The high temperature out-of-pile test of LVDT for internal pressure measurement of nuclear fuel rod”, 한국원자력학회 2002 추계학술발표회 논문집

[2] 강영환외 6인, 2002.4.30, “Fuel Irradiation Capsule Development Status for Advanced Fuel Development in the HANARO”, 한국재료학회 2002년도 춘계학술발표회 논문집

[3] 김도식외 6인, 2002.4.30, “Preliminary Analysis of Temperature and Thermal Stress on the Open Basket Type Instrumented Capsule for Fuel Irradiation Test in HANARO”, 한국원자력학회 2002년도 춘계학술발표회 논문집

[4] 김봉구외 6인, 2002.9.12, “Development of an instrumented capsule for irradiating nuclear fuel in HANARO”, 한국원자력학회 2002년도 추계학술발표회 논문집

[5] 김봉구외 12인, 2003.3.11, “핵연료 조사시험용 계장 캡슐 (02F-06K/02F-11K) 설계/제작”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-02408/2003

[6] 손재민외 4인, 2003.2, “핵연료 조사시험용 개방형 계장캡슐에 대한 열적거동 해석”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2404/2003

[7] 노진형, 법문사, "Excel에 의한 조사방법 및 통계분석", pp 246-247,

[8] Microsoft, "Origin User's Manual Version 6", pp 582-583

[9] NP200 Program Controller User's Manual, Hanyoung Electronic Co., LTD.