2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료봉 내부 압력 측정을 위한 LVDT의 고온 노외시험

The high temperature out-of-pile test of LVDT for internal pressure measurement of nuclear fuel rod

손재민, 김봉구, 김도식, 윤기병, 신윤택, 박승재, 강영환

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 핵연료봉의 내부압력을 측정하기 위한 기술을 개발 중이다. 상온에서의 노외시험 결과를 통하여 LVDT가 온도에 매우 민감한 반응을 나타내는 것을 알 수 있었다.[(2)(3)] 이에 따라 핵연료 조사시험용 캡슐의 상세 설계에 적용하기 위한 세밀한 노외시험을 통하여 고온에서의 온도 변화에 따른 LVDT 변화특성을 분석하여야할 필요성이 대두되었다. 따라서, LVDT의 고온 노외시험을 수행하기 위한 시스템을 구축하고, 상온에서 300℃까지의 온도 환경에서 0 bar부터 30 bar까지 압력을 증가하면서 노외실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 각 온도에서의 LVDT 특성은 물론이고, 온도의 변화에 따른 LVDT 특성변화 경향을 분석하였다. 본 고온 노외시험에 의해 다양한 온도환경에서 LVDT를 적용하기 위한 방법을 도출하였으며 이는 핵연료 조사시험 시 측정될 핵연료봉 내부 압력 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 internal pressure measurement technique of the nuclear fuel rod is being developed using LVDT(Linear Variable Differential Transformer). As the results of out-of-pile test at room temperature, it was concluded that the well qualified out-of-pile tests were needed to understand the LVDT's detail characteristics at high temperature for the detail design of the fuel irradiation capsule, because LVDT is very sensitive to variation of temperature.[(2)(3)] Therefore, the high temperature out-of-pile test system for pressure measurement was developed, and this test was performed under the

temperature condition between room temperature and 300℃ increasing the pressure from 0 bar to 30 bar. 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 at high temperature was introduced. It is known that the results will be used to predict accurately the internal pressure of fuel rod during irradiation test.

1. 서 론

한국원자력연구소에서는 핵연료 조사시험용 계장캡슐을 개발 중에 있으며, 이는 핵연료에 대한 성능 및 안전성을 확인하기 위하여 필수적으로 요구되고 있는 하나로의 주요 이용설비 중에 하나이다.

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. 현재 개발중인 핵연료 계장캡슐에서는 조사중 핵연료 온도, 핵분열기체 방출에 의한 핵연료봉 내압 및 핵연료 변형 등을 측정하기 위한 계장기술을 개발하고 있으며, 이를 위한 핵연료봉(길이 200 mm)을 그림 1과 같이 설계하였다. 현재 개발중인 조사시험용 핵연료봉 계장기술은 핵연료 조사시험용 계장캡슐에 설치되어 2003년 초부터 하나로에서 활용될 예정이다.[1]

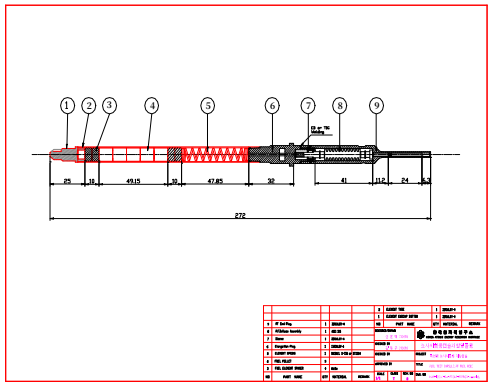


그림 1. 압력계 설치 핵연료봉

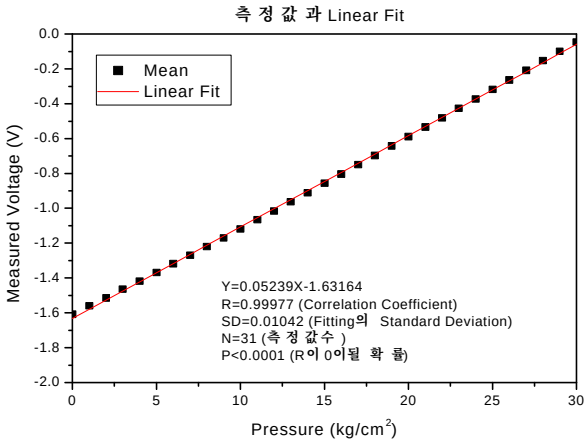


그림 2. 노외시험값과 Linear Fitting 결과

이와 같이 다양한 핵연료 조사시험 계장기술 중에 핵연료봉 내부의 압력을 측정하기 위한 방법으로 LVDT를 이용할 것이다. 이 기술을 개발하기 위하여 하나로에서의 실제 핵

연료 조사시험 시 LVDT가 위치하게 되는 핵연료봉 상단에서 LVDT가 동작하는 특성을 정확하게 파악할 필요가 있으므로 노외시험을 수행하고, LVDT의 특성을 분석하였다. 본 실험 이전에 수행된 상온에서의 노외시험은 가압 adapter를 제작하여, 압력을 0 kg/㎠부터 30 kg/㎠까지 1 kg/㎠씩 증가시키면서 LVDT의 특성을 측정하였다. 상온 노외시험의 결과는 그림 2와 같이 실험값과 linear fitting값이 거의 일치하는 것을 알 수 있었다. 그러나. 이 상온 노외시험을 수행하면서 LVDT가 온도에 민감하다는 것을 알 수 있었으며, 고온 노외시험을 통하여 온도변화에 따른 특성을 파악할 필요성이 대두되었다.[(2)(3)] 따라서, 본 논문에서는 고온에서의 노외시험을 수행하여 온도에 따른 LVDT의 특성을 분석하였다.

2. 고온 노외시험 시스템 구성 및 사양

고온 노외시험을 위한 시스템 구성의 개념은 그림 3에 나타나 있는 것과 같이 LVDT와 압력 변환기(pressure transducer)인 BCA(Bellows Core Assembly), electronics unit, argon gas 분위기 chamber와 furnace & 온도 controller, 가압 adapter와 압력계, data acquisition system, 그리고 가압 및 배기 밸브들로 이루어져있으며 이것을 실제로 구성한 모습은 그림 4와 같다.

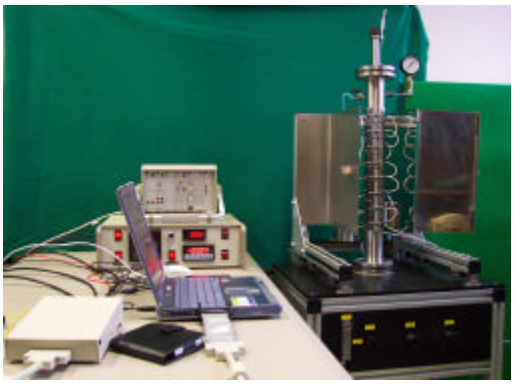


그림 4. 고온 노외시험 장치

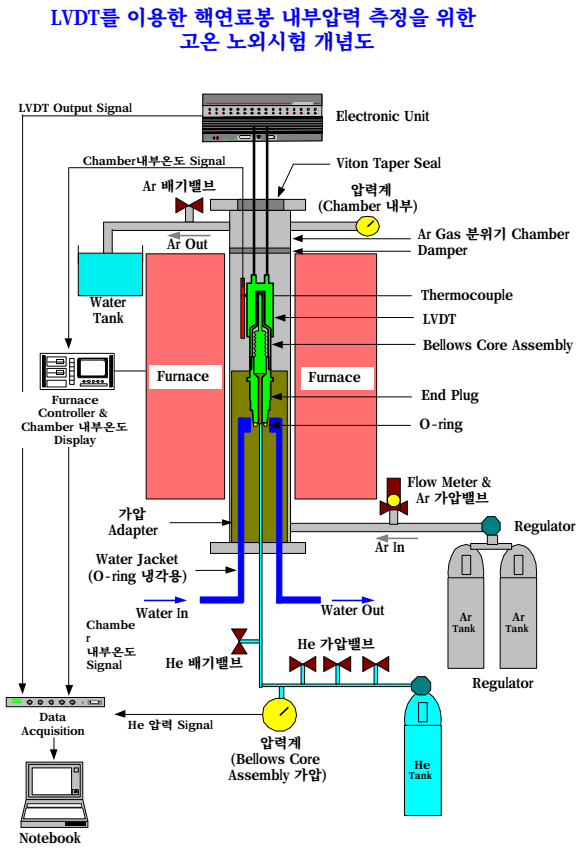
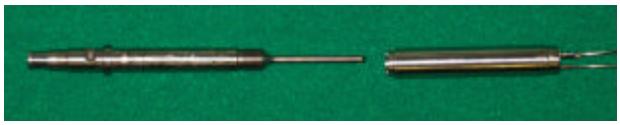


그림 3. LVDT를 이용한 압력 측정 고온 노외시험 시스템 구성도

2.1. LVDT와 BCA

고온 노외시험에서 사용된 LVDT와 BCA은 상온 노외시험에서 사용되었던 것과 동일한 것으로 노르웨이의 HALDEN에서 구입한 제품이며, 외형은 그림 5와 같다. 이것은 이용자 조건에 적합하도록 선정된 것이므로 실제 핵연료 계장캡슐에 장착되어 사용될 것이다. 따라서, 노외시험 시 손상이 가지 않도록 하는 것이 중요한 관점 중에 하나였다.



(a) LVDT와 BCA 결합 전 상태

(b) LVDT와 BCA 결합 후 상태

그림 5. LVDT 714와 BCA 781

LVDT는 1차 coil과 2차 coil에 각각 연결된 primary cable(82.5 Ω)과 secondary(105.7 Ω) cable이 있으며, sheet안에 각각 2개씩의 conductor를 가지고있으며, 이것은 splicing 작업을 통하여 conductor의 산화를 방지하면서 electronics unit에 연결하기 위한 연결선을 그림6과 같이 접합한 후에 사용하여야 한다. 이 cable conductor의 성분은 Ni(99.95%), C(0.034%), Fe(0.004%)으로 구성되어있다. BCA의 최대압력 범위는 30 bar이며, 조사시험용 핵연료 캡슐의 조립 시 BCA의 아랫부분인 end plug가 핵연료봉의 끝단에 용접되어 사용된다.

그림 6. LVDT Cable의 Splicing

2.2. 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 7과 같으며, -5 ~ 5 V까지의 출력을 나타내도록 되어있고, 이 장치는 정상적으로 작동하기 위해서 1시간 이상의 worming-up 시간이 필요하다.

그림 7. 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 ℃

2.3. Argon gas 분위기 chamber와 furnace & controller

Argon gas 분위기 chamber는 LVDT와 BCA의 산화를 방지하기 위한 목적으로 그림 8과 같이 제작되었다. 이 chamber의 재질은 STS 304이며, 내경은 62mm, 그리고 길이는 300mm이다. 이 chamber 안쪽에 LVDT와 BCA가 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 작은쪽인 사양을 갖는다.[6]

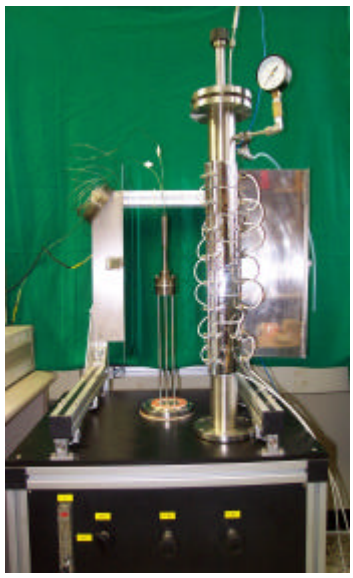


그림 8. 가압 adapter, Chamber와 furnace

2.4. 가압 adapter와 압력계

이 장치는 BCA에 압력을 가하기 위한 것이며, BCA가 핵연료 봉 끝단에 용접된 상태를 모사하기 위하여 설계·제작된 것이다. 이 장치의 설계 시 고려된 사항은 앞에서 기술한 바와 같이 고가의 LVDT와 BCA를 노외시험 후 실제 핵연료 조사시험용 캡슐에 사용하여야 하므로 손상이 가지 않도록 하며, 0 ~ 30 bar까지 가압 할 수 있도록 하는 것이었다. 이때 압력을 가하기 위하여 helium gas를 사용하였다.

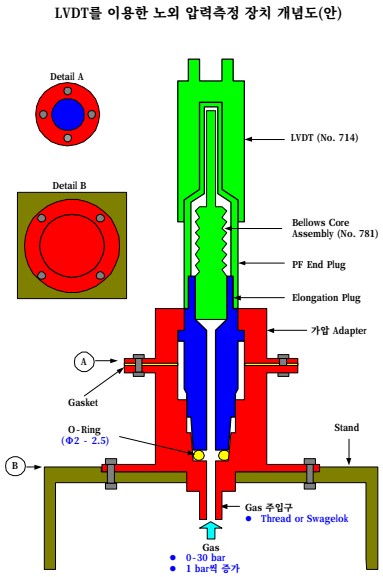


그림 9. 가압 Adapter 개념도

그림 10. 가압 adapter와 LVDT

이 장치는 그림 9의 개념도에서 보듯이 크게 BCA의 end plug에 압력이 새지 않도록하는 밀봉부분이 주요 부분이며, SUS304로 제작되었으며, BCA의 end plug 아랫단에 helium 압력이 새는 것을 막기 위하여 AN104 Viton O-ring을 사용하였으며, 이 O-ring의 규격은 8.08mm(OD), 2.84mm(ID), 2.625mm(T) 이다. 이 가압 adapter는 가열로 안에 위치하고 있으며, 300℃까지 온도가 올라가므로 Viton O-ring이 열에 의해 파열되는 것을 방지하기 위하여 water jacket을 설치하였다.

Digital 압력 sensor는 Druck사의 PMP4070을 사용하였는데 측정범위가 60 bar이고, 출력은 0~5 V, accuracy는 0.04%이다. 압력 indicator 역시 accuracy가 0.02%인 Druck사

의 DPI280을 사용하였다.[7]

2.5. Data acquisition system

이것은 고온 노외시험 시 가압 adaptor에 가압되는 helium 압력과 LVDT의 output을 자동으로 수집하기 위하여 구성된 장치이다. 이것은 National Instruments사에서 제작된 PCMCIA type의 DAQCard-AI-16XE-50(200 kS/sec, 16 bit)와 SCB-68 input module을 사용하였고, software는 VI logger을 사용하였다. 고온 노외시험의 data를 수집하기 위한 전체적인 신호흐름도는 다음 그림 11과 같다.

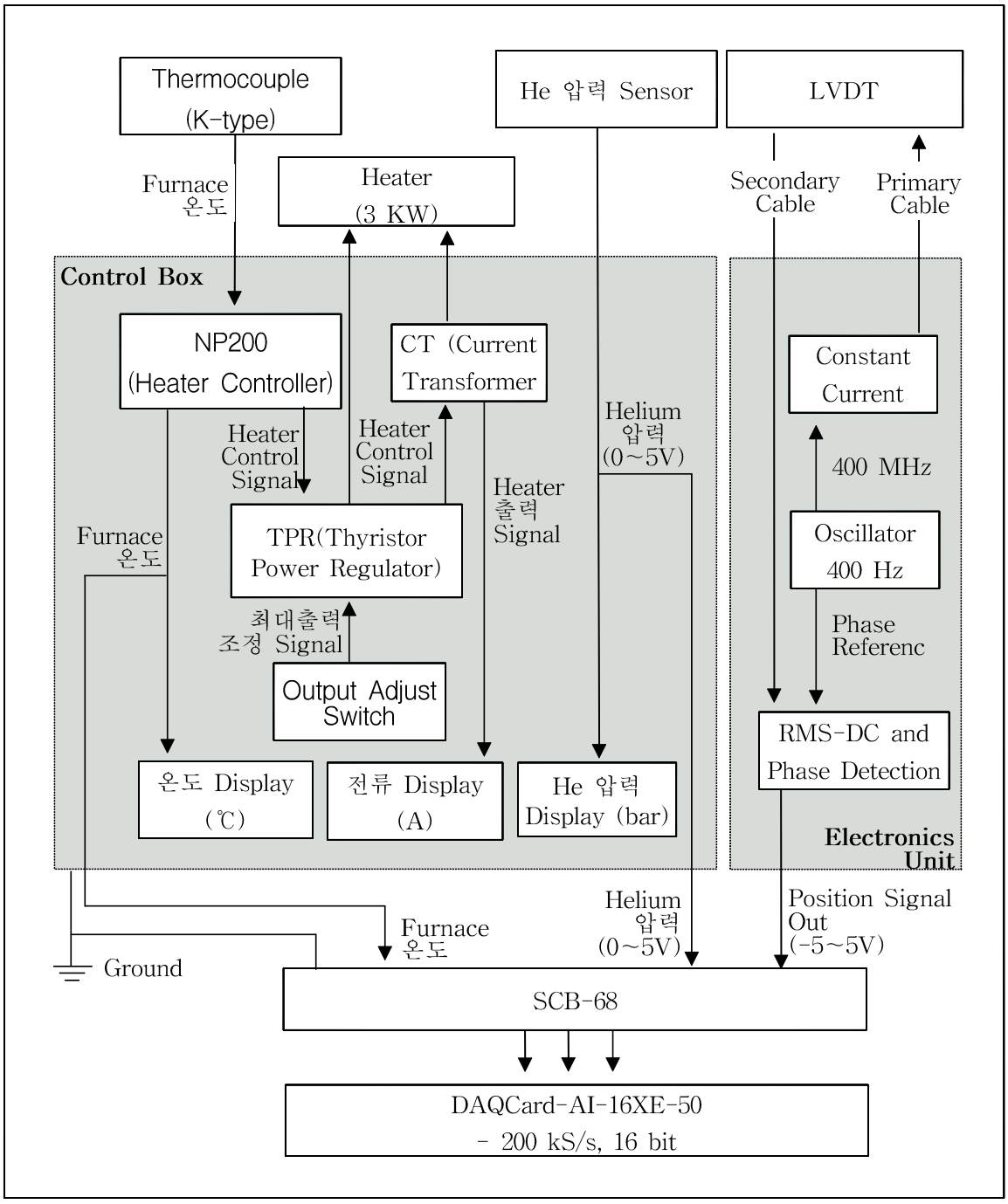


그림 11. 신호 흐름도

3. 고온 노외시험

3.1. LVDT&BCA의 산화정도 시험

LVDT와 BCA의 외부재질은 Zr로 되어있고, 이것은 실제 조사시험시 사용될 것이므로 이것의 산화 정도를 시험할 필요가 있었다. 따라서, copper와 Zr 시편을 고온 노외시험 조건과 동일한 300℃의 argon gas 분위기에서 약 60시간 정도 가열한 후 유관검사와 무게변화를 측정하였다. 또한 300℃가열 시 water jacket에 물을 순환시키면서 O-ring의 건전성 시험도 함께 수행하였다. 그림 12는 이와 같은 산화정도 시험을 위하여 copper와 Zr 시편을 가압 adapter에 장착한 모습니다.

Copper와 Zr 시편을 아세톤과 초음파세척기로 세척한 후의 무게와 산화시험 후 무게의 변화는 표 2와 같이 미미한 정도가 증가하였으며, 유관검사 결과는 그림 13과 같이 약간의 산화막이 형성되었을 뿐이었다. 그림 13에서 아래에 위치한 것이 산화시험을 거친 것이고, 위의 것은 산화시험을 거치지 않은 것이다. O-ring도 30 bar의 압력을 유지하는데 문제가 없는 것으로 확인되었다.

그림 12. 가압adater에 장착된 시편

표 2. 산화 정도 시험 전후의 시편 무게

구 분	세척 후 & 산화 전 무게 (㎎)	산화 test후 무게 (㎎)	무게변화율 (%)
Zr	1.72502	1.72520	0.0104346
Copper	97.03500	97.04060	0.005668

그림 13. 산화시험을 위한 Copper 모형과 Zr 시편

3.2. 고온 노외시험

고온 노외시험은 실제 핵연료 조사시험 시 LVDT가 위치한 부분의 온도가 약 80℃ 정도로 예상되므로 상온에서 80℃까지는 약 5℃간격으로 80℃에서 300℃까지는 약 10℃ 간격으로 32회를 수행하였다. 각 온도에서는 0 bar부터 30 bar까지 helium 압력을 증가하면서 helium 압력과 LVDT output을 data acquisition system에 의하여 수집하였다. 이때, helium 압력과 LVDT output의 단위는 voltage였다.

각 온도에서 수집된 자료는 linear fitting을 통하여 특성을 분석하였다. 그림 14는 240℃에서의 측정값과 linear fitting 결과를 예로 보여주고 있다.

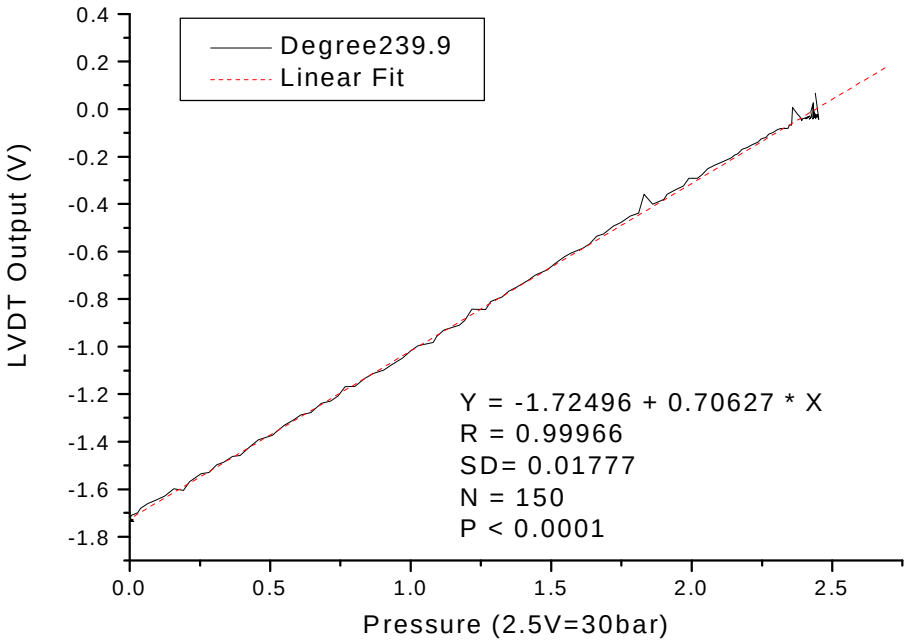


그림 14. 240℃에서의 고온 노외시험 측정값과 linear fitting

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.[4][5]

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

식(1)에서의 변수 A는 Y축의 절편값이며, B는 기울기을 의미한다. 이들은 least square방법에 의해 예측되게 된다. [6]

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 $-1 \le R \le 1$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.

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

3.3. 노외시험 결과 분석

각 온도에서의 측정값을 토대로 linear fitting한 결과 중에서 30℃, 100℃, 200℃, 그리고 300℃의 linear fitting 결과를 살펴보면, 그림 16과 같이 기울기가 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 LVDT는 주위의 온도가 올라갈수록 단위압력당 output, 즉 sensitivity(V/bar)가 커진다는 것을 알 수 있다. 그리고, 상온에서 300℃까지의 범위에서 LVDT의 sensitivity는 그림 17에 나타나있다. 이것을 분석해보면 LVDT는 1℃가 증가할 때마다 sensitivity가 272.054mV/bar정도 증가하는 것을 알 수 있다.

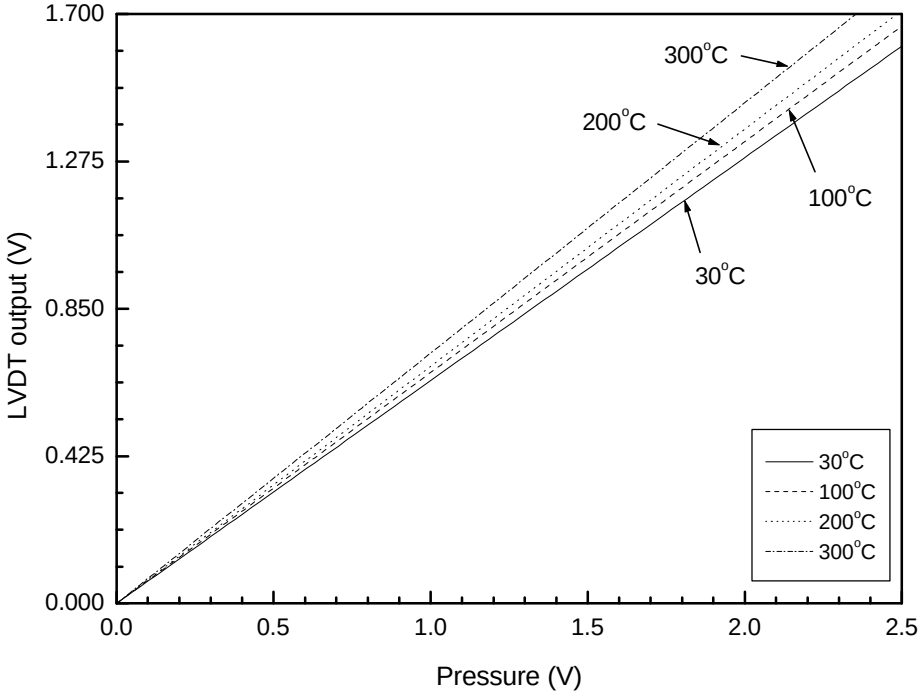


그림 16. 각 온도에서의 linear fitting

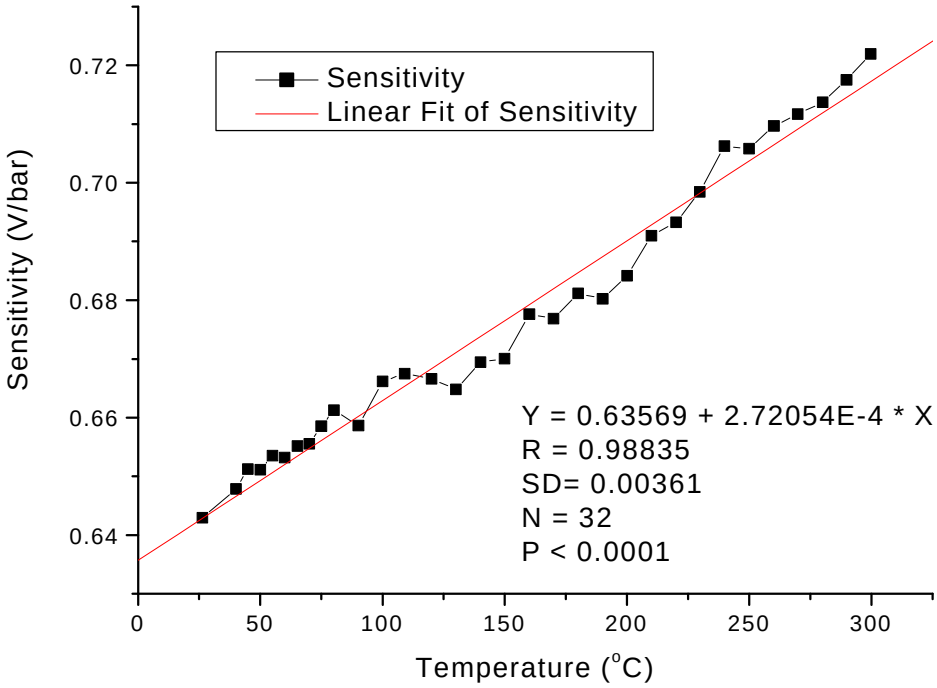


그림 17. 온도변화에 따른 sensitivity의 변화 추이

5. 결론

LVDT의 고온 노외시험은 핵연료 조사시험용 계장캡슐의 계장 기술 개발의 일환으로 조사시험 수행 시 핵연료봉의 내부 압력변화 측정 기술을 개발하기 위하여 수행되었다. 본 실험은 압력의 변화를 측정하기 위하여 핵연료봉 상단에 용접될 LVDT의 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 온도변화에 따른 특성도 파악하였다. 본 고온 노외시험의 연구를 통하여 핵연료 조사시험 시 변화하는 온도환경에서 핵연료봉 내부의 압력변화를 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] 김봉구외 6인, 2001.11.3, “조사시험용 계장 핵연료 봉 개발”, 2001 한국재료학회 추계 학술발표회 논문집
[2] 손재민외 11인, 2001.11.30, “LVDT를 이용한 핵연료봉 내부 압력측정을 위한 노외시험”, KAERI/TR-1972/2001, 한국원자력연구소
[3] 손재민외 7인, 2002.5.24, “The out-of-pile test for internal pressure measurement of nuclear fuel rod using LVDT”, 한국원자력학회 2002년도 춘계학술발표회 논문집
[4] 노진형, 법문사, "Excel에 의한 조사방법 및 통계분석", pp 246-247,
[5] Microsoft, "Origin User's Manual Version 6", pp 582-583
[6] NP200 Program Controller User's Manual, Hanyoung Electronic Co., LTD.
[7] DPI 282(280) Manual