

LVDT를 이용한 핵연료봉 내부 압력 측정을 위한 노외시험

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

손재민, 김봉구, 김도식, 주기남, 박승재, 강영환, 김용균, 염기언

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. 본 노외시험의 목적은 실제 조사시험에 사용될 LVDT의 특성을 파악하고, 적용방법을 연구하는 것이며, 이것은 하나로에서 핵연료 조사시험 시 측정될 핵연료봉의 내부압력을 정확하게 분석하기 위하여 필요하다. 따라서, LVDT를 이용한 압력측정 노외시험을 수행하기 위한 시스템을 구축하고, 상온에서 실제 핵연료 조사시험에 사용될 LVDT를 이용하여 노외시험을 수행하였다. 노외시험은 1 kg/cm²부터 30 kg/cm²까지의 범위에서 1 kg/cm²씩 압력을 증가하면서 6회의 실험을 수행하였다. 노외시험에 의해 추출된 LVDT의 sensitivity와 LVDT의 주어진 특성자료에 의하여 계산된 sensitivity를 비교하고, 특정온도에서의 적용 방법을 도출하였다. 노외시험의 결과는 핵연료 조사시험 시 측정될 핵연료봉 내부 압력 자료를 정확하게 분석하기 위하여 활용될 것이다. 또한, 핵연료 조사시험용 캡슐의 상세 설계에 적용하기 위하여 LVDT의 보다 세부적인 특성을 파악하기 위한 고온 노외시험이 필요하다.

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). The objectives of this test were to understand the LVDT's characteristics and to study its application techniques for fuel irradiation technology. It will be required to analyze the acquired internal pressure of fuel rod during fuel irradiation test in HANARO. Therefore, the out-of-pile test system for pressure measurement was developed, and the test with

the LVDT at room temperature were performed. This test were implemented in 1 kg/cm² increment from 1 kg/cm² to 30 kg/cm², and repeated 6 times at same condition. The LVDT's sensitivities were obtained by following two ways, the one by test and the other by calculation from characteristics data. These two sensitivities were compared and analyzed. The calculation method for internal pressure of nuclear fuel rod at specified temperature was also established. The results of the out-of-pile test will be used to predict accurately the internal pressure of fuel rod during irradiation test. And, the well qualified out-of-pile tests are needed to understand the LVDT's detail characteristics at high temperature for the detail design of the fuel irradiation capsule.

1. 서론

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⁾

이와 같이 다양한 핵연료 조사시험 계장기술 중에 핵연료봉 내부의 압력을 측정하기 위한 방법으로 LVDT(Linear Variable Differential Transformer, 선형변위차동트랜스)를 이용할 것이다. 이 기술을 개발하기 위하여 하나로에서의 실제 핵연료 조사시험 시 LVDT가 위치하게 되는 핵연료봉 상단에서 LVDT가 동작하는 특성을 정확하게 파악할 필요가 있으므로 상온에서의 노외시험을 수행하고, LVDT의 특성을 분석하였다.

LVDT는 오늘날 변위의 측정이나 제어용 센서로 널리 이용되고 있을 뿐만 아니라, 하중이나 압력과 같은 물리적 변화량을 선형변위로 변환하는 수단으로 이용되고 있다. LVDT의 응용원리는 그림 2와 같이 독립개체로 움직이는 두 개의 core 변위에 비례하는 전기출력을 발생시키는 전기-기계적인 변환기(electromechanical transducer)이며, core의 변위에 비례하여 전기적 출력이 생성되는 장치이다. 1차(primary) coil을 감은 원통형의 coil bobbin에 두개의 2차(secondary) coil을 대칭으로 감은 구조이며, coil 속으로 core를 삽입하면 1차와 2차 coil들을 연계하는 자력선의 유도가 생긴다. 1차 coil이 외부의 AC source에 의해 자화되면 core를 통하여 두 개의 2차 coil에 전압이 유도된다. 2차 coil을 서로 감긴 방향이 반대가 되도록 접속하면 출력전압은 두 2차 coil 전압의 차가 되며, core가 중앙(null 위치)에 위치할 때 두 전압은 상쇄되어 영(null)이 된다. Null 위치로부

터 전압이 증가하는 coil방향으로 core를 이동시키면 유도전압은 증가하고, 그 반대의 coil로 이동시키면 감소한다. 이러한 동작으로 core의 위치변화와 함께 직선적으로 변하는 편차전압의 출력이 생성된다.

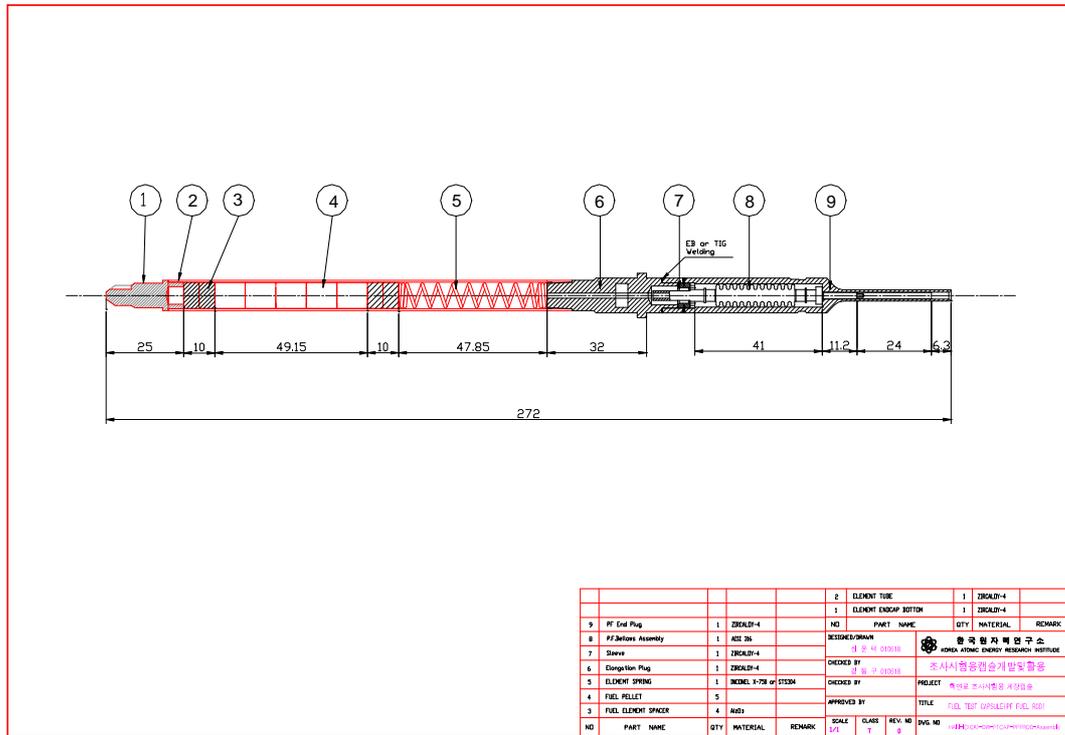


그림 1. 압력계 설치 핵연료봉

LVDT의 특징으로는. 첫째, coil과 core는 접촉과 마찰이 전혀 없어 마모가 있을 수 없으므로 실질적으로 무한한 수명을 갖는다. 둘째, 무한분해능이다. 즉, 아무리 미소한

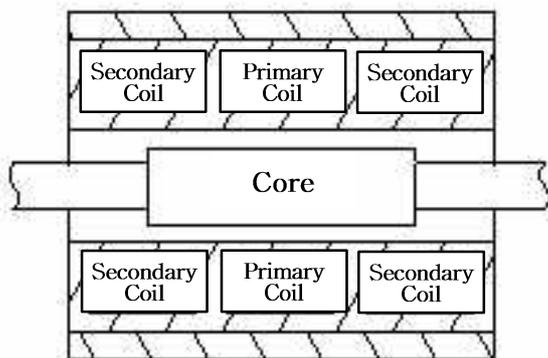


그림 2. LVDT 응용 원리

core의 움직임일지라도 이에 상응하는 출력이 생성되어 무한한 분해능이 제공되며, 이 분해능은 사용하는 전자장치의 성능에 따라 제한된다. 셋째, LVDT 구조의 대칭성으로 인하여 영점(null position)의 재현성에서 초 안정적인 특징을 갖는다. 넷째, 변화에 대한 반응 속도가 정확하고, 빠르다는 것이고, 다섯째는 환경 친화형으로서 부식성 액체 또는 유독성 기체가 발산되는 여러 가지 환경 속에서 사용할 수 있는 몇 안되는 변환기 중 하나이다. 이러한 특성을 가

지므로 다양한 방면의 산업현장과 군사·우주항공 분야에서 중요한 의미를 갖는 변환기(transducer)이다. 또한, LVDT는 자동차의 컴퓨터제어 현가 시스템(Auto Suspension System), 유압밸브 감시 및 제어시스템, 각종 압착제품 두께와 온실용 비닐막 두께, 포테이포 칩 반죽두께 제어 시스템, 그리고, load cell로 이용되며, 고열·먼지·진동 등의 가혹 환경에서 로봇 팔의 동작을 감지하는 sensor, 현금 자동인출기에서 지폐의 수를 헤아

리는 sensor 등 우리의 생활의 밀접한 곳에 많이 사용된다. ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

2. 시스템 구성 및 사양

노외시험을 위한 전체적인 시스템의 구성은 그림 3에 나타나 있는 것과 같이 LVDT, 압력 변환기(pressure transducer)인 BCA(Bellows Core Assembly), Electronics Unit, 가압 Adapter, Multimeter, Helium Gas Tank, 압력계, 그리고 가압 및 배기 밸브들로 이루어져있으며, 이것을 실제로 구성한 모습은 그림 4와 같다.

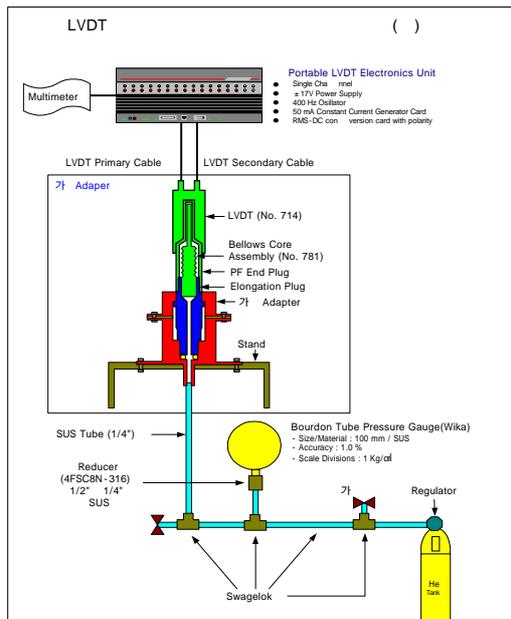


그림 3. LVDT를 이용한 압력 측정 노외시험 시스템 구성도



그림 4. LVDT를 이용한 압력측정 노외시험 장치

2.1. 선형 변위 차동 트랜스 (LVDT)

노외시험에서 사용된 LVDT와 BCA는 노르웨이의 HALDEN에서 구입한 제품이며, 외형은 그림 5와 같다. 이것은 실제 핵연료 계장캡슐에 장착되어 사용될 것이므로 노외시험 시 손상이 가지 않도록 하는 것이 중요한 관점 중에 하나였다. . LVDT는 240℃에서의 sensitivity가 6.29 mV/bar이며, Temperature Sensitivity (from 240 ℃)는 -0.82 % /℃이다.



(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 cable과 secondary cable을 가지고 있으며, 각각의 특성은 표 2와 같다.

표 2. LVDT의 Coil 특성

Coil 구분	Loop	Insulation
Primary Coil	82.5 Ω	> 10 G
Secondary Coil	105.7 Ω	> 10 G

Primary와 secondary cable은 sheet안에 각각 2개씩의 conductor를 가지고있으며, 이것은 splicing작업을 통하여 conductor의 산화를 방지하면서 electronics unit에 연결하기 위한 연결선을 그림 6과 같이 접합한 후에 사용하였다. 이 cable conductor의 성분은 Ni(99.95%), C(0.034%), Fe(0.004%)으로 구성되어있다.



그림 6. LVDT Cable의 Splicing

2.2. 압력 변환기 (Pressure Transducer)

압력변환기는 BCA와 magnetic core, core holder, bellows support 그리고 end plug로 구성되어있다. 구조는 bellows가 bellows support와 core holder에 용접되어있고, bellows support는 다시 end plug에 고정되어있으며, magnetic core는 core holder에 연결된 형태를 가지고 있다. BCA는 Inconel로 제작되었으며, 외경이 13.0 mm이고, 길이가 65.0 mm이다. 이것은 최대압력 범위는 30 bar이다.

조사시험용 핵연료 캡슐의 조립 시 end plug의 끝부분을 핵연료봉의 끝단에 용접하여 사용하게 된다.

2.3. 전자 유니트 (Electronics Unit)

이 장치는 LVDT의 전압변화를 측정하기 위한 장치이며, 본 노외시험에서 사용된

LVDT를 포함한 5가지 형태의 LVDT에 적용하기 위하여 HRP(Halden Reactor Project)에서 제작된 것이고, 사양은 표 2와 같다. 이 장치의 출력은 data logger 또는 multimeter를 연결하여 사용 할 수 있도록 analog output을 제공한다.

표 2. Electronics Unit 사양

Model	Portable LVDT Electronics Unit
Channel 수	Single Channel
Power Supply	$\pm 17V$
Oscillator	400 Hz
Constant Current Generator Card	50 mA
Cooling	Natural Air Circulation
Operation Temperature	$< 55\text{ }^{\circ}\text{C}$

이 장치는 그림 7과 같으며, 표 3과 같이 LVDT의 cable과 출력측정 장치를 연결하였다. 이때 LVDT의 primary와 secondary cable을 구분하는 방법은 표 1에서 기술한 바와 같이 primary와 secondary cable의 저항값이 각각 82.5Ω 와 105.7Ω 이므로 splicing 작업 후 저항측정을 통하여 구분하였다.

표 3. Electronics Unit의 단자 연결

Unit Connection	Cable Connect To
PRIM.OUT	LVDT의 Primary Cable
SEC.INP	LVDT의 Secondary Cable
ANALOG OUT	Data Logger 또는 Multimeter

이 장치는 최대 $\pm 5\text{ V}$ 까지의 출력을 나타내도록 되어있으며, 두가지 gain을 조정하도록 되어있다. 따라서, 정밀한 결과를 얻기 위해서는 미리 출력값을 예측하여 표 4에서 주어진 대로 gain을 조정하는 것이 필요하다. 그리고 이 장치는 정상적으로 작동하기 위해서 1시간 이상의 worming-up 시간이 필요하다.

표 4. Electronics Unit의 Gain

Gain	Input Range (mVrms)
10	0 ~ 500
20	0 ~ 250



그림 7. Electronics Unit

그리고, 이 electronics unit와 LVDT의 신호흐름(signal flow)은 그림 8과 같다.

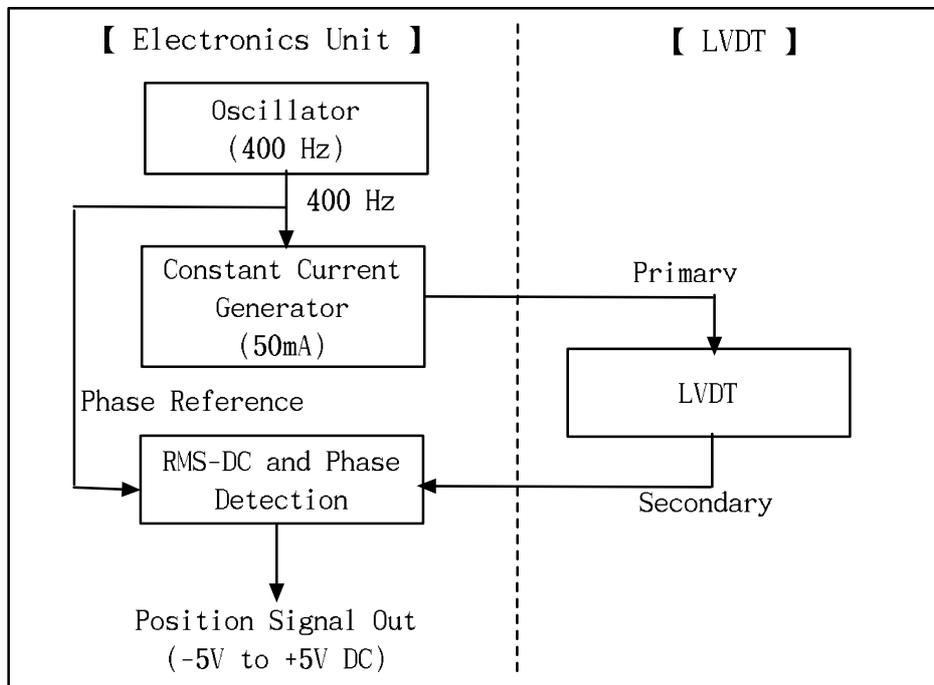


그림 8. Electronics Unit와 LVDT의 Signal Flow

2.4. 가압 어댑터 (Adapter)

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 사용하여 하므로 손상이 가지 않도록 하며, 상온에서 30 bar까지 가압 할 수 있도록 하는 것이었다. 이때 압력을 가하기 위하여 helium gas를 사용하였다.

이 장치는 그림 9의 개념도에서 보듯이 크게 BCA의 end plug에 압력이 새지 않도록 하는 밀봉부분과 cable을 걸기 위한 고리, 그리고 스탠드로 구성되어있으며, 설계도면은 그림 10과 같다. 이 장치는 SUS304로 제작되었으며, BCA의 end plug 아랫단에 Helium 압력이 새는 것을 막기 위하여 AN104 Viton O-ring을 사용하였으며, 이 O-ring의 규격

은 8.08mm(OD), 2.84mm(ID), 2.625mm(T) 이다.

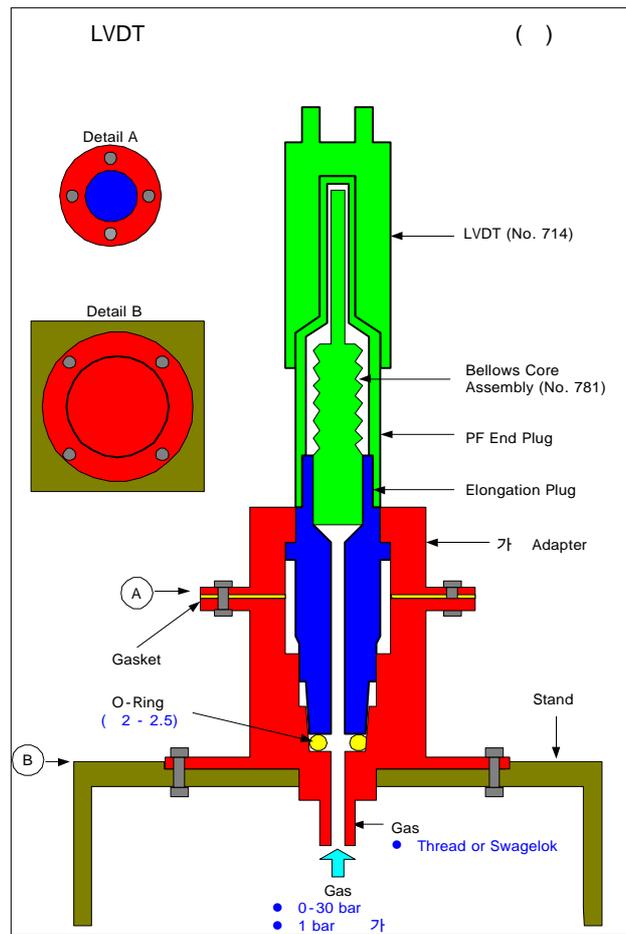
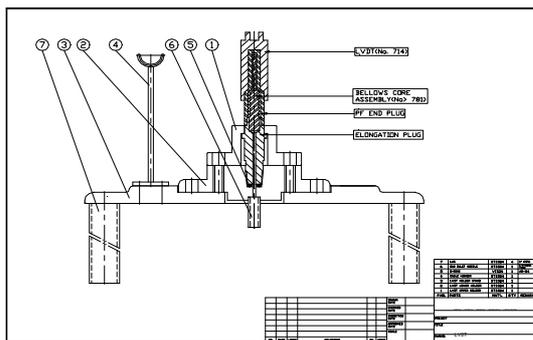
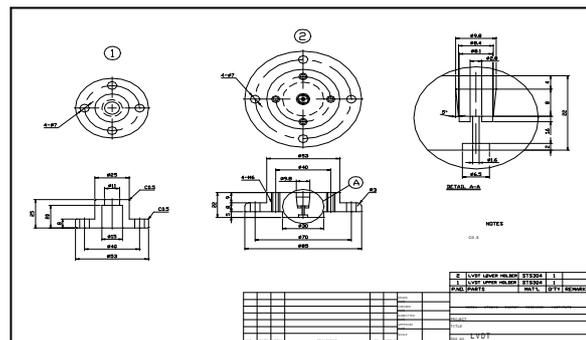


그림 9. 가압 Adapter 개념도



(a) 가압 Adapter 전체 도면



(b) 가압 Adapter 밀봉부분 도면

그림 10. 가압 Adapter 도면

3. 노외시험 및 결과 분석

본 실험은 노외시험 장치를 이용하여 상온에서 수행하였으며, 압력은 0 kg/cm²부터 30 kg/cm²까지 1 kg/cm²씩 증가시키면서 측정하였다. LVDT는 온도에 민감하므로 동일한 온

도조건인 19 °C에서 2차에 걸쳐 3회씩 시험을 수행하였다. 노외시험 결과는 실험의 평균값을 사용하였다. 또한 실제 조사시험 시에는 bar 단위로 사용할 것이므로 이것을 linear fitting한 후 bar로 환산하였다.(1 kg/cm² = 0.980665 bar)

노외시험을 통한 목표 중 가장 중요한 것은 LVDT의 제작사에서 주어진 특성자료에 의해서 LVDT를 특정온도에 적용하기 위한 단위압력 당 출력변화량(mV/bar)의 계산값과 노외시험을 통하여 얻은 단위압력 당 출력변화량의 실험값이 일치하는지를 확인하는 것이었다. 이때 특정온도라 함은 노외시험 온도인 19 °C를 의미한다. 이렇게 비교한 결과에서 계산값과 실험값이 동일하면 실제 조사시험 시에도 측정된 온도와 함께 계산에 의해 핵연료봉 내부의 압력을 분석할 수 있다는 것을 증명하게 되는 것이다. 노외시험의 결과는 그림 11과 표 5와 같다. 그림 11에서 보듯이 검은 노외시험을 통한 실험값이고, 직선은 linear fitting한 결과이다.

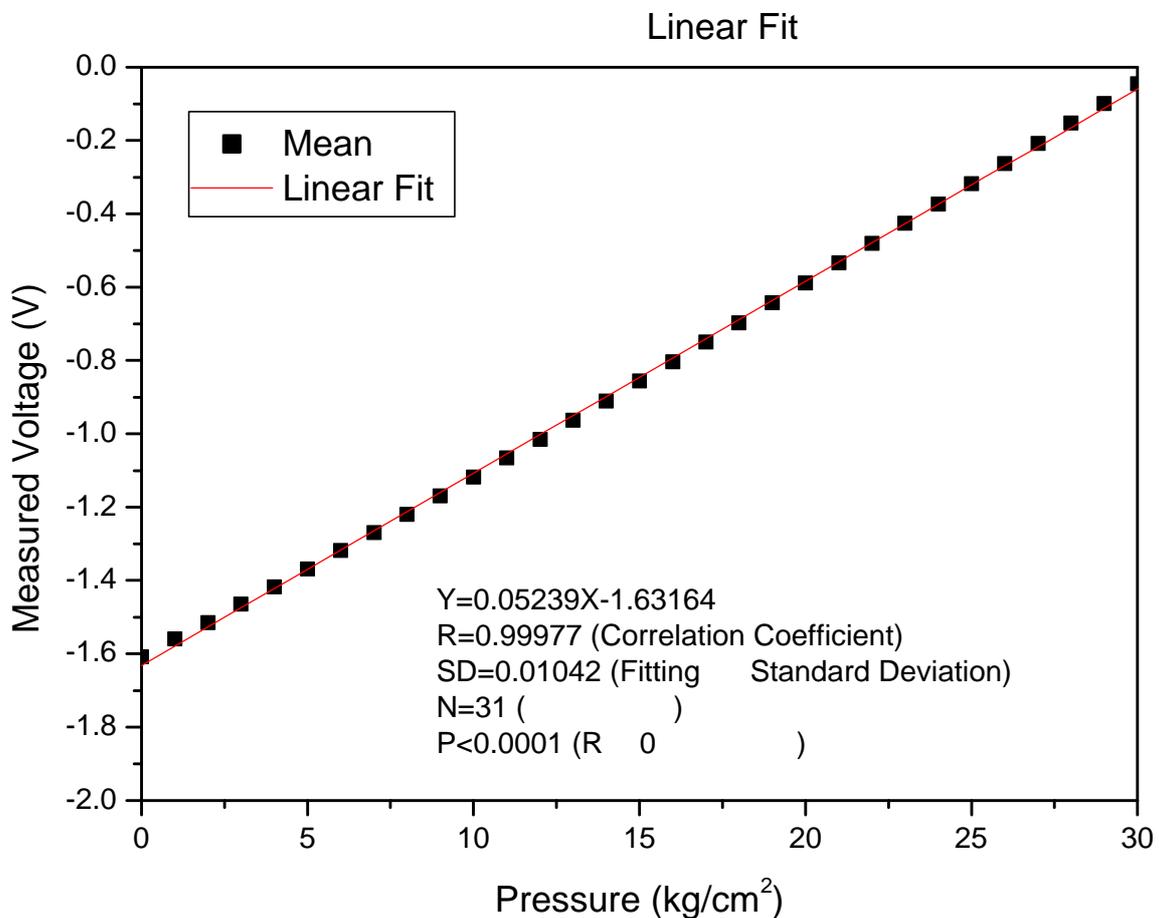


그림 11. 노외시험값과 Linear Fitting 결과

표 5. Linear Fitting 결과

선형식	$Y = 0.05239 X - 1.63164$
상관계수(R)	0.99977
표준편차(SD)	0.01042
측정값 수 (N)	31
상관계수가 0이될 확률(P)	<0.0001

표 5의 결과를 산출한 방법은 다음과 같다. Linear fitting에서 선형식을 구하기 위한 방법은 linear least square fitting이 사용되었다. 이때 사용된 선형회기모델(linear regression model)은 식(1)과 같다.

$$Y=AX+B \quad (1)$$

식(1)에서의 변수 A는 기울기이며, B는 Y축의 절편값을 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 $-1 \leq R \leq 1$ 이 된다. 상관관계의 강도는 상관계수의 절대값 $|R|$ 또는 R^2 으로 평가한다. 두 가지 경우 모두 1에 가까울수록 상관이 강하다는 것을 의미한다. 여기서 상관계수를 산출하는 방법은 식(2)와 같다. ⁽⁵⁾

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

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

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

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

본 노외시험의 결과를 분석하여 볼 때 linearity가 정확하게 산출되었으므로, 이 결과를 이용하여 조사시험용 계장캡슐의 핵연료봉 내부압력을 분석할 수 있을 것으로 판단된다..

4. 결론

금번의 노외시험은 핵연료 조사시험용 계장캡슐의 계장 기술 개발의 일환으로 조사시험 수행 시 핵연료봉 내부의 압력을 측정하기 위한 기술을 개발하기 위하여 수행되었다. 본 실험은 압력측정을 위하여 핵연료봉 상단에 용접될 LVDT의 특성을 파악하고, 조사시

험 시 추출될 자료를 보다 정확하게 분석하기 위하여 반드시 필요한 실험이었다.

핵연료봉 내부압력 변화를 측정하기 위하여 실제 이용자의 요구조건에 적합한 LVDT(Linear Variable Differential Transformer, 선형변위차동트랜스)를 선정하여 노외 시험을 수행하고, 이 결과를 토대로 LVDT를 적용하는 방법과 조사시험 시 계측된 데이터를 분석·평가하기 위한 방법을 연구하였다. 이 연구를 수행하기 위하여 핵연료 계장캡슐의 조사시험 시 핵연료봉 내부에서 발생하는 압력을 모사하기 위한 가압 장치를 설계·제작하고, 상온에서 이 장치를 이용하여 1 kg/cm²부터 30 kg/cm²까지의 범위에서 LVDT의 특성을 파악하고 분석하였다. 본 연구를 통하여 핵연료 계장캡슐에 사용하고자하는 LVDT의 특성자료를 얻었고, 핵연료봉 내부압력의 변화를 정확하게 해석할 수 있는 기술을 확보하였다.

향후 LVDT의 실제 설치 위치인 핵연료봉 상단 온도에서의 특성자료를 정밀하게 산출하고, 3-Pin 핵연료 노내 조사시험 설비(FTL, Fuel Test Loop)의 운전환경에 적용하기 위한 기술확보를 위하여 고온환경에서의 노외시험을 수행할 계획이다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 김봉구의 외 6인, 2001.11.3, “조사시험용 계장 핵연료 봉 개발”, 2001 한국재료학회 추계 학술발표회 논문집
- [2] 이래덕의 외 4인, 1989.6, “정밀측정용 LVDT의 국산화 개발(1차년도)”, KSRI-89-50-IR, 한국표준연구
- [3] 이래덕의 외 2인, 1991.7, “정밀측정용 LVDT의 국산화 개발(III)”, KSRI-81-110-IR, 한국표준연구소
- [4] 구대서의 외 6인, 1999.6. “LVDT에 의한 조사 핵연료봉 체원측정 시험기술개발”, KAERI/TR-1348/99, 한국원자력연구소,
- [5] 노진형, 법문사, “Excel에 의한 조사방법 및 통계분석”, pp 246-247,
- [6] Microsoft, “Origin User’s Manual Version 6”, pp 582-583