

핵연료 및 피복관 실시간 변형계측기술 개발

Monitoring of Fuel and Cladding Elongation in a Nuclear Fuel Rod

홍진태^{1, #}, 양태호¹, 안성호¹, 정창용¹

Jintae Hong^{1, #}, Tae-Ho Yang¹, Sung-Ho Ahn¹, and Chang-Young Joung¹

¹ 한국원자력연구원 하나로이용연구본부 (Department of HANARO Utilization and Research, Korea Atomic Energy Research Institute)

Corresponding Author / E-mail: jthong@kaeri.re.kr, TEL: +82-42-868-4420, FAX: +82-42-868-8364

KEYWORDS: Nuclear fuel irradiation test (핵연료 조사시험), Measurement of fuel elongation (핵연료 변형 계측), Linear variable differential transformer (선형변이 차동변압기)

To evaluate the performance of nuclear fuel, it is necessary to measure the fission gas release, fuel temperature, fuel stack elongation, cladding elongation, fuel rod inner pressure, coolant temperature, and neutron flux during irradiation tests. Linear variable differential transformer (LVDT) is applied to the in-pile instruments for measuring the fuel rod inner pressure. In this study, design modification of LVDT was carried out to measure the fuel elongation and cladding elongation, without changing the structural soundness of the conventional nuclear fuel test rig used in HANARO. The magnetic core was directly connected to the fuel stack or cladding using a supporter, and it moved through the guide rail of LVDT sensor according to the deformation of fuel pellets or cladding. The performance verification and data calibration of the modified LVDT were verified by the deformation simulation system, where displacement was induced using a micrometer.

Manuscript received: December 6, 2016 / Revised: April 5, 2017 / Accepted: April 17, 2017

NOMENCLATURE

e = Voltage generated from LVDT

Δx = Displacement from the center of primary coil

1. 서론

새로운 핵연료를 개발하기 위해서는 핵연료 조사 리그를 제작하여 연구용원자로 내에서 중성자를 조사하면서 핵연료 및 피복관의 조사거동을 분석해야 한다. 핵연료 및 피복관을 조사시험하기 위해서는 중성자 조사량, 핵연료 소결체의 온도, 핵분열기체의 생성량, 냉각수 온도변화 등을 실시간으로 측정하여 분석해야 하며, 이를 위해 열전대, 자기출력형 중성자 검출기(Self-Powered Neutron Detector, SPND), 선형변이 차동변압기(Linear Variable Differential Transformer, LVDT) 등을 시험 핵연료봉 내에 계장하여 중성자 조사시험을 수행하게 된다.^{1,2}

특히 핵연료 및 피복관의 안전성을 검증하기 위해 조사시험 중 핵연료 소결체 및 피복관의 열팽창에 의한 변형을 계측하는 기술이 필수적으로 필요한데, 이를 위해 팽창온도계(Expansion Thermometer)를 이용한 변형계측방법, 초음파를 이용한 변형계측 방법, 광학 간섭계를 이용한 변형계측 방법, LVDT를 활용한 변형계측 방법 등 다양한 기술이 개발되어 왔다.³⁻⁵ 그러나 현재까지 국내의 핵연료 조사시험 연구에서는 핵연료 및 피복관 변형계측에 대한 핵심 기술이 보유되지 않은 상태에서 국내외의 핵연료 및 피복관 개발자의 다양한 조사시험 요구조건을 충족시켜 조사시험을 수행할 수 있는 기술개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

국내 유일의 연구용 원자로인 하나로에 적용하는 핵연료 조사 리그에는 열전대, LVDT, SPND의 계장 기술만 개발되어 조사시험에 적용되어 왔다. 본 연구에서는 기존 조사리그의 구조조건성을 해치지 않으면서 핵연료 및 피복관의 변형계측 기술을 구현하기 위해 LVDT를 활용한 변형계측기술을 개발하였으며,^{6,9} 모의 변형시험기를 개발하여 변형계측 성능을 검증하고 교정하는 기술을 개발하였다.

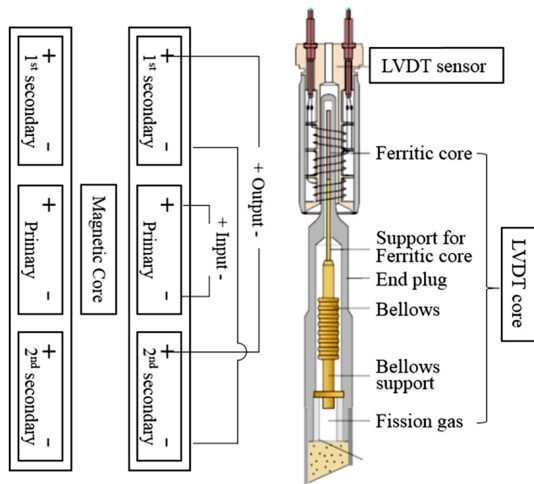


Fig. 1 LVDT, (a) Schematic of LVDT sensor, (b) LVDT for the measurement of fission gas pressure

2. 핵연료 및 피복관 변형계측용 LVDT 설계

LVDT는 힘과 변위와 같은 물리적 변화량을 직선운동으로 변환하여 발생하는 전기신호를 측정하는 센서로서 본래 중성자를 흡수한 핵연료의 핵분열 과정에서 발생하는 핵분열 가스에 의한 핵연료봉 내부의 압력 변화를 측정하기 위해 핵연료 조사리그에 적용되어 왔다(Fig. 1).

LVDT는 센서부와 코어 조립체로 구성된다. 센서부는 튜브에 환상구조로 감겨진 1차 코일과 2개의 2차 코일로 구성되고, 조사리그에 고정된다.

자성체로 구성되는 LVDT 코어는 계측하고자 하는 대상 물체에 연결되어 대상 물체의 변위에 따라 1차 및 2차 코일이 감겨진 튜브 내부의 공간을 마찰 없이 움직이면서 교류전류가 유도되며, 1차 코일에 흐르는 전류의 시간(t)에 따라 식(1)의 형태로 기전력(e)이 유도된다.

$$e = M \frac{di}{dt} \quad (1)$$

여기서, M 은 코일의 권선수와 자성체 코어에 따라 결정되는 상호 인덕턴스(Mutual Inductance)이고, i 는 1차 코일에 흐르는 전류의 세기이다.

Fig. 1(b)의 그림은 핵연료봉 내부의 기체압력을 계측하는 LVDT 구조를 나타내며, 핵분열 기체압력이 증가할수록 벨로우즈(Bellows)가 수축하면서 끝단에 연결된 자성 코어가 이동하여 기전력을 일으키도록 설계되어 있다.

2.1 핵연료 소결체 변형계측용 LVDT Core

Fig. 2는 한국원자력연구원에서 적용중인 핵연료 조사리그의 형상이다. 본 설계는 구조적 건전성이 검증된 설계로서 이를 해치지 않기 위해 외형의 변화없이 LVDT 코어의 구조만을 변경하여 핵연료 소결체의 변형을 계측할 수 있도록 Fig. 3과 같이 설계를

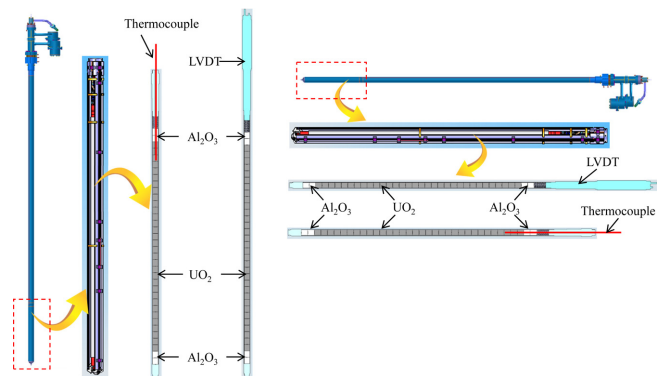


Fig. 2 Modeling of nuclear fuel test rig

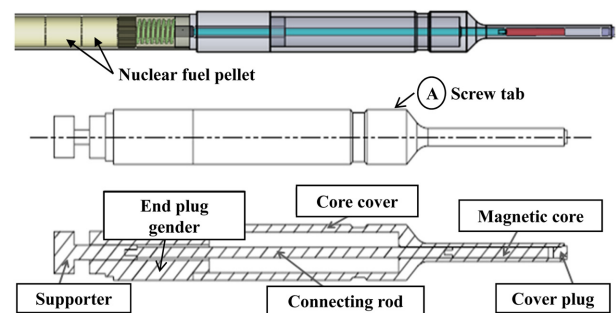


Fig. 3 Design of LVDT core for fuel pellet elongation

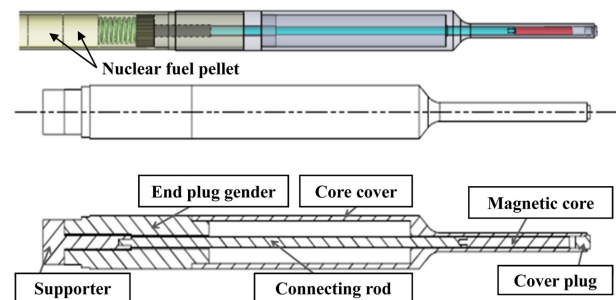


Fig. 4 Design of LVDT core for cladding elongation

구현하였다.

우선 벨로우즈를 제거하고 자성 코어를 연장하여 지지대 끝단이 핵연료 소결체에 직접 맞닿게 설계를 변경하였으며, 봉단마개가 자성 코어를 연결하는 연결봉(Connecting Rod)의 가이드레일(Guide Rail) 역할을 할 수 있도록 내부 형상을 변경하였다.

또한 지지대가 소결체를 지속적으로 접촉하여 핵연료 소결체의 변형을 즉시 감지할 수 있도록 봉단마개와 지지대 사이에 스프링을 추가하였다.

2.2 핵연료 피복관 변형계측용 LVDT Core

Fig. 4는 조사시험 중 피복관의 변형을 계측할 수 있도록 기존의 내압 계측용 핵연료봉 구조에서 LVDT 코어의 구조를 변경한 설계이다.

피복관의 길이변형 계측을 수행하기 위해서는 LVDT 코어 조립체가 피복관에 고정되어 피복관의 변형에 따라 LVDT 센서 내

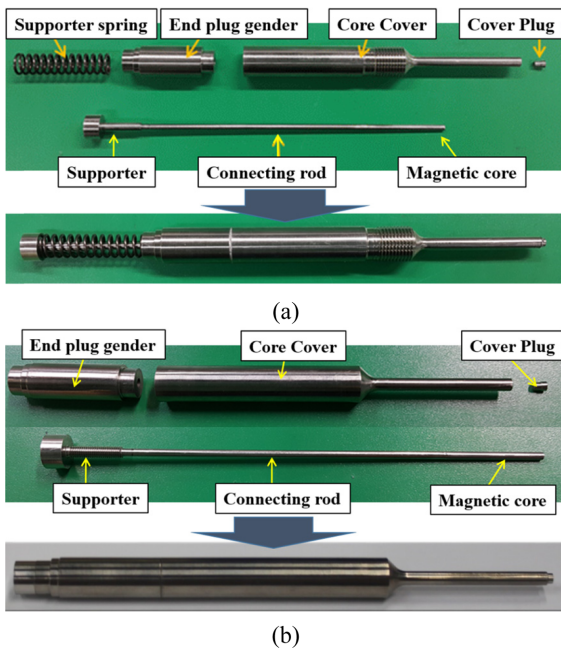


Fig. 5 Fabrication of LVDT core assembly for (a) Fuel elongation, (b) Cladding elongation

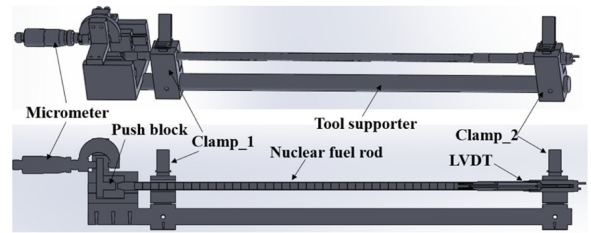
부를 이동해야 하므로, Fig. 4의 LVDT 코어 조립체와 피복관을 용접 접합한다. 핵연료봉 내압 계측용 LVDT 코어 조립체와 핵연료 소결체 변형계측용 LVDT 코어 조립체의 경우 코어 덮개(Core Cover) 내부의 자성 코어(Magnetic Core)만 이동해야 하므로 LVDT 센서와 코어 덮개(Core Cover)가 서로 고정되어 있어야 하기 때문에, Fig. 3에서 A 위치를 나사산으로 가공하였다. 그러나 피복관 길이변형 계측용 LVDT 코어 조립체는 코어 덮개 및 지지대가 피복관과 체결되어 있어 피복관의 변형에 따라 LVDT 센서 내부를 LVDT 코어 조립체 전체가 이동할 수 있도록 코어 덮개의 나사산 설계를 삭제하였다.

본 연구에서 LVDT 센서부는 자성 코어의 설계가 동일하여 핵연료봉 내압계측용 LVDT 센서를 공용으로 사용하기 때문에 별도의 개발은 진행하지 않는다.

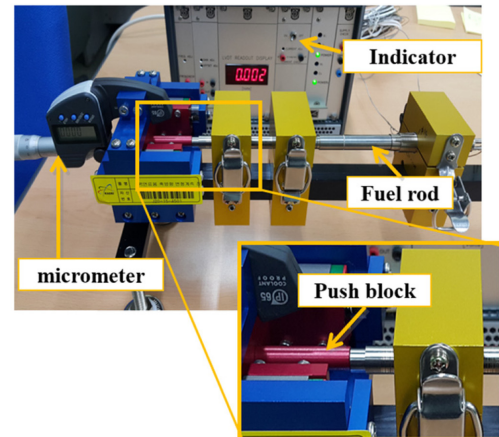
3. 변형계측용 LVDT 제작 및 신호취득

3.1 LVDT 시제품 제작

전장에서 설계된 핵연료 소결체 변형 계측용 LVDT 코어(Fig. 5(a))와 핵연료 피복관 변형계측용 LVDT 코어(Fig. 5(b)) 시제품을 각각 3개씩 제작하였다. 봉단마개 젠더(End Plug Gender)는 핵연료 피복관에 접합해야 하므로 피복관과 동일한 소재인 Zircaloy로 제작하였고, 이와 접합되는 코어 덮개, 커버 플러그(Cover Plug) 역시 Zircaloy로 제작하였다. 반면 자성 코어는 자성을 갖는 AISI403 소재를 사용해야 하므로 이와 연결되는 지지대와 연결봉은 자성코어와 같은 스테인레스 계열인 AISI316을 사용하여 제작하였다. 각 부품간 접합에는 IPG社の QCW 150-



(a)



(b)

Fig. 6 Deformation simulator (a) 3D modeling, (b) Measurement and data acquisition system

1500-AC 파이버레이저 용접기를 적용하였다.¹⁰

센서에 적용된 코일은 내방사선 특성을 갖는 Ni 합금으로 만들어져 있으며, 1차 코일 및 2차 코일 각각에 감긴 권선수는 450 회이다.

또한 변형계측을 위해 필요한 LVDT 센서는 내압계측용 LVDT 센서와 공용으로 사용하도록 설계하였기 때문에 별도로 제작하지 않으며, 센서 부품은 조사시설의 고온 고압의 냉각수에 노출되어 있으므로 Inconel을 이용하여 제작되어있다.

3.2 변형 모의시험장치 제작

국내에서 사용되는 시험 핵연료봉의 피복관 길이는 786 mm이고, 그 내부에는 62개의 핵연료 소결체가 투입되며, 조사시험 도중 핵연료 소결체와 피복관의 열팽창에 의한 변형량은 수백 μm 에서 최대 5 mm 이하로 알려져 있다.

전절에서 제작된 시제품이 정밀하게 변형을 계측하는지 검증하고, 변위에 따른 전압의 세기를 측정하여 신호를 교정하기 위해 변형을 모의할 수 있는 장치가 필요하다. Fig. 6은 핵연료 및 피복관의 변형을 모의하기 위한 장치의 설계 및 실제 구현된 모습이다. 본 장치에서는 변형 계측용 핵연료봉을 클램프에 고정하고 반대쪽 끝단에 마이크로미터와 치구(Push Block)를 장착하여 핵연료 소결체 또는 피복관에 정밀한 변위를 인가하면서 LVDT의 출력전압 신호를 계측하도록 하였다.

또한 LVDT 센서에서 나오는 전압 신호는 매우 약하기 때문에 이를 증폭하여 측정 가능한 형태로 변경해주는 인디케이터를

연결하였다.

LVDT의 출력은 자성 코어의 기계적인 움직임에 대하여 선형적인 관계를 갖지만, 서로 다른 방향의 동일한 변위에 대해 동일한 크기의 출력전압을 발생시킨다. 두 변위의 구별은 180° 위상차를 구별함으로써 가능하다. 따라서 위상복조기(Phase Sensitive Demodulator)와 저역통과필터(Lowpass Filter) 등의 신호처리를 사용하여 위상차를 구별함으로써 변위에 대하여 하나의 출력전압을 얻을 수 있도록 한다.

3.3 변형 계측신호 교정 및 변위 추적

핵연료 길이변형 계측용 LVDT 코어 조립체의 성능을 검증하기 위해 Fig. 7과 같이 실제 핵연료와 동일한 크기로 알루미늄 소결체를 가공하고 피복관에 넣어 모의 시험 핵연료봉을 제작하였다. 피복관을 장치에 고정한 후 마이크로미터를 조절하여 소결체 끝단을 밀어넣으면 자성코어가 움직이면서 LVDT 센서에 유도전압을 발생시켜 계측장치에 출력전압이 나타난다. 계측장치의 분해능은 1 mV이다.

핵연료 길이변형 계측용 LVDT 코어 조립체의 코어 덮개에는 나사산이 가공되어 있으므로 LVDT 센서의 내측에 가공된 탭에 체결하여 고정시킨다. 제작된 핵연료 길이변형 계측용 모의 시험 핵연료봉을 변형계측장치에 장착하고, 마이크로미터를 조절하면서 알루미늄 소결체를 이동시켜 핵연료 소결체의 변형을 모사하면서 출력전압을 측정한다.

Fig. 8은 본 연구에서 제작된 3개의 모의 시험핵연료봉 중 Sample 1에 대해 소결체 변형에 따른 출력전압 변화를 10회 반복 측정하여 그래프로 나타낸 것이다.

각 측정값들로부터 최소자승법(Least Square Method)을 이용하여 선형 보간함수를 구하면 Table 1과 같으며, 표준편차는 최대 1.161 mV 이하로 보간되었다. 여기서 e 는 출력 전압, δx 는 변위, σ 는 표준편차이다. 본 실험에서 적용된 LVDT의 민감도는 $0.167 \text{ mV}/\mu\text{m}$ 이므로, 변위에 대한 최대 표준편차는 $6.97 \mu\text{m}$ 이다. 본 연구에서 목표로 하는 계측 정밀도는 $50 \mu\text{m}$ 이므로 본 반복능은 변위측정 성능기준에 부합하는 것으로 판단하였다.

일반적으로 LVDT는 시편간의 제작 편차(부품 가공 정밀도, 자성 코어의 크기, 자성 코어의 자력, 코일의 직경, 권선수 등)에 따라 측정 초기치가 다르고 변위에 대한 전압값이 다르게 측정된다. 그런데 실험 결과에서 보듯이 각각의 시편들이 자성코어의 크기 및 자력에 대한 제작편차가 있음에도 민감도를 나타내는 기울기에는 큰 변화가 없고, y절편인 초기치가 달라지는 것을 알 수 있다. 이는 자성코어의 크기 및 자력의 세기는 변위에 따른 출력전압의 변화율에 크게 영향을 거의 주지 않는다는 Van Nieuwenhove의 실험결과와 일치한다.¹¹

반면 자성 코어가 LVDT 센서의 1차 코일 중심에 위치할 때 1차 및 2차 코일에 모두 영향을 미치면서 신호를 왜곡시키기 때문에 출력 전압값이 불연속적으로 변한다. 즉, 조사시험 도중 핵연료봉 내의 자성코어가 1차 코일 중심을 지나지 않도록 설계되어야 한다. 조사시험 중 핵연료봉 내 핵연료 소결체들의 총 변형량은

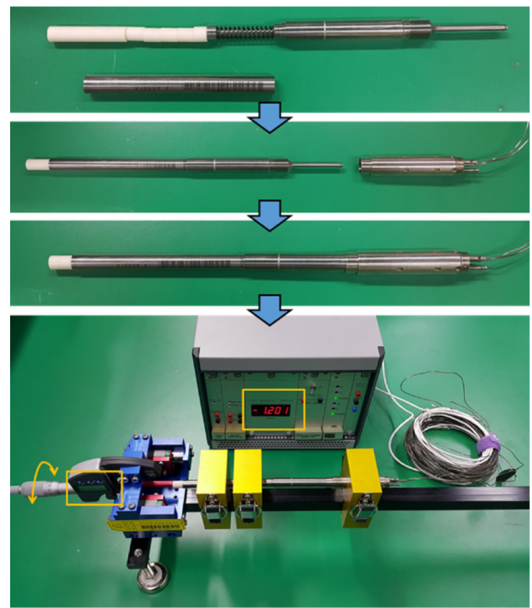


Fig. 7 Simulation of fuel elongation and signal measurement

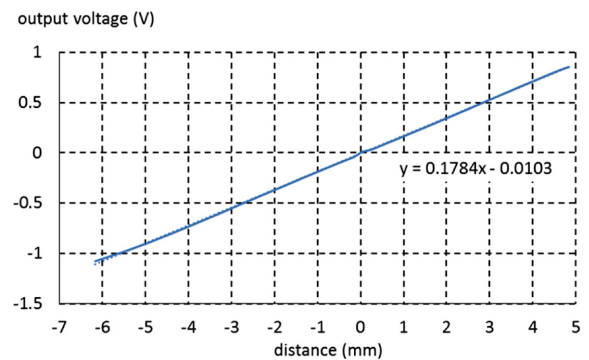


Fig. 8 Output voltage according to the deviation of magnetic core (Elongation of fuel stack)

Table 1 Linear interpolation of fuel elongation data

Sample	$e = a \times \delta x + b \text{ (V)}$		
	a	b	$\sigma \text{ (mV)}$
1	0.1784	-0.0103	0.705
2	0.1774	-0.0167	1.161
3	0.1775	-0.0147	1.097

최대 5 mm를 넘지 않는 것으로 알려져 있으므로, 실제 시험 핵연료봉 제작시에는 자성 코어의 변위가 1차 코일의 중심부로부터 한쪽 방향으로만 일어나도록 자성 코어의 초기 위치를 설정해야 한다.

Fig. 9는 핵연료 피복관의 길이변형 계측용 LVDT 코어 조립체의 성능을 검증하기 위해 시제품을 제작하고 모의 시험을 실시한 그림이다.

핵연료 피복관의 변형량을 LVDT 센서에 직접적으로 전달하기 위하여 코어 덮개와 지지대를 레이저용접 공정으로 접합하고 이를 다시 피복관 끝단과 레이저용접 공정으로 접합하여 피복관의

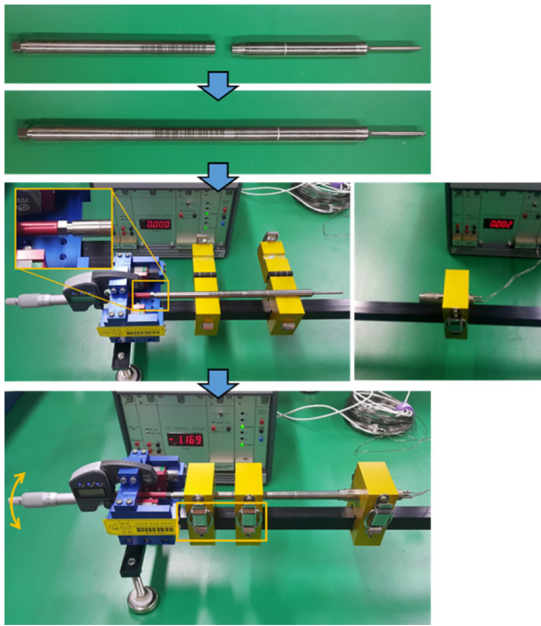


Fig. 9 Simulation of cladding elongation and signal measurement

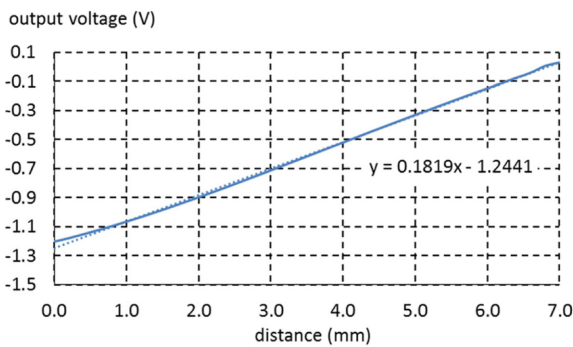


Fig. 10 Output voltage according to the deviation of magnetic core (Elongation of cladding)

변형량에 따라 LVDT 코어 전체가 함께 움직이도록 하였다. 핵연료 피복관 변형계측용 LVDT 코어 조립체의 코어 뒷개에는 나사산이 없으므로 LVDT 센서의 내측에 가공된 가이드 홀을 따라 LVDT 코어 조립체가 자유롭게 이동할 수 있다.

제작된 핵연료 피복관 길이변형 계측용 모의 시험핵연료봉을 변형계측장치에 장착할 때 LVDT 센서는 이동하지 않도록 고정한다. 장치의 마이크로미터를 조절하면 핵연료봉이 밀리면서 피복관의 변형이 모사되어 출력전압을 측정한다.

Fig. 10은 본 연구에서 제작된 3개의 모의 시험핵연료봉에 대해 피복관 변형에 따른 출력전압 변화를 모의 실험한 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

실험은 자성 코어를 LVDT 센서의 2차 코일 바깥쪽부터 1차 코일 중심으로 이동시키면서 진행되었으며, Fig. 10에서 보는바와 같이 선형성을 유지함을 확인할 수 있다. 특히 여기서는 코어 뒷개의 외곽 형상이 LVDT 센서의 프레임에 걸리도록 설계되어 있어 자성 코어가 1차 코일의 중심을 지나지 못함으로써 출력전압의 불연속점은 나타나지 않았다.

Table 2 Linear interpolation of cladding elongation data

Sample	$e = a \times \delta x + b \text{ (V)}$		
	a	b	$\sigma \text{ (mV)}$
1	0.1819	-1.2441	1.014
2	0.1683	-1.1924	1.034
3	0.1862	-1.2623	0.972

피복관 모의 변형계측 시험의 교정 데이터로부터 최소자승법을 이용하여 선형 보간함수를 구하면 Table 2와 같으며, 소결체의 변형계측 실험결과와 비슷하게 표준편차는 1.034 mV 이하로 보간되어 6.15 μm 이하의 정밀도를 나타내었다. 특히 Sample 2의 측정결과 다른 시편들과 마찬가지로 선형성을 유지하기는 하나 기울기가 약 0.02 정도 차이가 있다. 이는 시편별 제작편차에 의해 Sample 2에서는 코어뒷개의 외곽형상과 LVDT 센서 프레임 간 이격이 있어 코어의 위치가 센서 코일의 중심축 위치에서 벗어나 있기 때문으로 판단된다. 즉, LVDT 출력전압-변위 그래프의 기울기를 일정하게 유지하기 위해서는 코어의 위치가 센서 코일의 중심축에 일정하게 유지될 수 있도록 하는 것도 매우 중요하다.

4. 결론

본 연구에서는 LVDT를 활용하여 핵연료의 노내조사시험에서 핵연료 소결체의 길이변형과 피복관의 길이변형을 계측할 수 있는 계측기를 개발하였으며, 계측기의 검증을 위해 신호 취득 및 교정시험을 수행하였다. 핵연료 길이변형 계측기의 자성 코어는 한쪽 끝단이 핵연료 소결체에 접촉하고 있어, 핵연료봉 내 소결체들의 전체적인 팽창과 수축에 따른 위치변형에 따라 움직인다. 또한 피복관 길이변형 계측기의 자성 코어는 핵연료 피복관에 접촉하고 있어, 피복관의 팽창과 수축에 따른 길이변형에 따라 움직인다. 자성 코어는 핵연료봉의 한 쪽 끝에 위치하고 있기 때문에 핵연료봉 봉단마개를 돌려싸고 있는 LVDT 센서에 대한 상대위치가 바뀌면 신호가 발생하며, 이 신호를 길이변화로 환산 가능하다. 본 연구에서는 핵연료 길이변형 계측기와 피복관 길이변형 계측기를 각각 설계/제작하여 계측 성능시험을 수행하였으며, 계측된 데이터에 대해 최소자승법을 이용하여 선형보간 함수를 구성하여 변위를 실시간으로 분석할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 개발한 핵연료 및 피복관 길이변형 계측기술은 캡슐 또는 루프설비를 이용하여 노내에서 핵연료의 성능을 검증하는데 활용될 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 달탐사 개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016 M1A3A9005565).

REFERENCES

1. Hong, J. T., Kim, K. H., Joung, H. Y., Ahn, S. H., and Joung, C. Y., "An Experimental Study on Drilling Conditions for the Instrumentation of Nuclear Fuel," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 1, pp. 113-119, 2013.
2. Doh, J., Kwon, Y. D., and Lee, J., "Approximate Multi-Objective Optimization of Gap Size of PWR Annular Nuclear Fuels," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 9, pp. 815-824, 2015.
3. Van Nieuwenhove, R., "Development and Testing of Instruments for Generation-IV Material Research at the Halden Reactor Project," In-Pile Testing and Instrumentation for Development of Generation-IV Fuels and Materials, p. 11, 2013.
4. Rempe, J., Knudson, D., Daw, J., Unruha, T., Chase, B., et al., "New Sensors for Irradiation Testing at Materials and Test Reactors," In-Pile Testing and Instrumentation for Development of Generation-IV Fuels and Materials, p. 34, 2013.
5. Shaimerdenov, A., Tanimoto, M., Beisebaev, A., Kimura, N., Gizatulin, S., et al., "Irradiation Test for Liner Variable Differential Transformers in the WWR-K Core, INP-KNNC, Kazakhstan and JAEA, JAPAN," In-Pile Testing and Instrumentation for Development of Generation-IV Fuels and Materials, p. 45, 2003.
6. Heo, S. H., Yang, T. H., Hong, J. T., Joung, C. Y., Ahn, S. H., et al., "Manufacture of LVDT Core for Nuclear Fuel Test," Proc. of the Korean Nuclear Society Fall Meeting, Paper No. 47085197, 2015.
7. Heo, S. H., Hong, J. T., Ahn, S. H., Joung, C. Y., Yang, T. H., et al., "Compatible Design of Instrumentation Fuel Pin for Measuring Cladding Tube Length Deformation," HANARO Symposium, 2016.
8. Hong, J. T., Ahn, S. H., Joung, C. Y., Yang, T. H., Heo, S. H., et al., "Measurement of Clad Elongation in a Nuclear Fuel Test Rig," Proc. of the ISGMA Conference, 2016.
9. Ahn, S. H., Hong, J. T., Joung, C. Y., Yang, T. H., Heo, S. H., et al., "Online Measurement of Fuel Stack Elongation," World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, Vol. 10, No. 6, pp. 1058-1061, 2016.
10. Hong, J., Joung, C.-Y., Kim, K.-H., Heo, S.-H., and Kim, H.-G., "Study on Fiber Laser Welding Conditions for the Fabrication of a Nuclear Fuel Rod," Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 15, No. 4, pp. 777-781, 2014.
11. Van Nieuwenhove, R., Solstad, S., and Eriksen, K.-W., "Potential for Increasing the Sensitivity of LVDT's," OECD Halden Reactor Project, Document ID: F-Note 2054, 2003.