

LVDT 디지털 측정법을 이용한 사용후핵연료봉의 정밀제원측정

Precise dimensional measurement using LVDT digital method

손영준, 김은가, 전용범, 엄성호, 권형문

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로에서 조사된 핵연료는 원자로내의 고온, 고압, 고방사능 조건의 여러 가지 원인에 의하여 변형이 발생할 수 가 있다. 이때 발생한 핵연료 제원의 변화는 핵연료 안전뿐만 아니라, 원자로 안전운전에도 영향을 미칠수 있다. 조사후시험을 통한 핵연료의 제원 측정 자료는 핵연료의 설계는 물론 건전성 평가에 대단히 중요한 자료가 된다. 본 연구에서는 핵연료 치수 측정방법을 개선하여 LVDT 센서가 핵연료봉의 제원을 0.001mm 까지 디지털로 표시된 LVDT 지시치를 읽도록 설계 제작하였다. 이 장치를 표준시험봉으로 교정한후 사용후핵연료봉의 직경 측정 방법을 이용하여 난형도를 정밀 측정 하였으며 이를 통해 핵연료봉의 조사후 변형도를 확인할 수 있었다.

Abstract

The irradiated fuel rods undergo a strain at high burnup, high pressure and high fluence. The dimensional change may affect not only the integrity of the fuel rods but also the safety of the reactor operation. The dimensional data such as diameter and length changes of the irradiated fuel rods are valuable information to design a fuel rod and evaluate the integrity of fuel rods.

In this study, the dimensional measurement method was improved and the LVDT equipment was designed and manufactured to make it possible to display the dimensional value of the nuclear fuel rod to 0.001mm minimum unit in the LVDT digital scale. After this equipment was calibrated by the standard fuel rods, the overality precisely was measured using the diameter measurement method of the

spent fuel rod. Through this method, the post-irradiation strain of the fuel rods was analyzed.

1. 서론

원자로에서 조사된 핵연료는 원자로내의 고온, 고압, 고방사능 조건의 여러 가지 원인에 의하여 변형이 발생할 수가 있다. 이때 발생한 핵연료 제원의 변화는 핵연료 안전뿐만 아니라, 원자로 안전운전에도 영향을 미칠수 있다. 조사후시험을 통한 핵연료의 제원 측정 자료는 핵연료의 설계는 물론 건전성 평가에 대단히 중요한 자료가 된다.^{1),2)}

조사후시험시설의 제원측정시험이 수행되는 핫셀에서 사용후핵연료봉의 치수측정시 LVDT를 사용하여 길이방향 및 직경방향으로 스캐닝 측정을 한다. 이때 LVDT는 디지털로 0.001mm까지 표시되나 수치가 급격히 변하여 육안으로는 핵연료의 길이를 측정 할 수가 없다. 따라서 현재까지는 기록계 종이에 그려서 이를 읽는 방법을 취해 왔었다. 그러나 이는 기록계 종이의 오차와 육안으로 읽을 때 생기는 측정오차가 존재하여 실제 측정에 많은 문제점이 발견되었으며 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 핵연료 치수측정 방법을 디지털화 하여 신뢰도, 정확도를 높이는 것이 필요하였다.

따라서 핵연료 치수측정 방법을 개선하여 LVDT sensor가 핵연료 길이를 scanning하여 0.001mm까지 디지털로 표시된 LVDT 지시치를 그대로 읽을 수 있도록 회로로 설계 제작하였다.³⁾ 이 회로의 블록디아그램 과 회로도를 통하여 실험방법 및 시험 측정 결과 처리를 전산처리하는 프로그램 MET_COM1.C를 C 언어로 작성하여 개발하였으며, 효율적인 운전을 위한 방법등을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 측정방법

그림 1은 핵연료봉 제원측정 장치를 나타낸 그림이다. 이 제원측정 장치는 핵연료봉의 직경과 힘을 측정하는 장치로써 1개의 선형차등변압기 센서가 핵연료봉 양쪽에 물리어 연속적으로 움직이는 두 센서 간격을 측정하도록 되어있다. 조사후시험시설의 핫셀내에 있는 핵연료봉을 길이방향 및 직경방향으로 스캐닝 측정하기 위한 장치의 개략도는 그림 2와 같다. 그림 2에 나타낸 것과 같이 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) conditioner에서 나오는 신호는 Digital Voltmeter를 통하여 숫자로 나타내며 2채널 레코더를 통하여 기록된다. 또 이와 아울러 12Bit인 A/D 변환기와 개인용 컴퓨터를 사용하여 시험과정을 자동으로 제어함과 동시에 데이터 획득을 자동으로 하였다. LVDT는 prove의 변위에 의한 전기 시그널의 변화를 말한다. 이 원리는 AC 전압을 걸면 secondary coil에 전압이 유기되고 core가 중앙에 있을 때 V1과 V2의 전압은 같고 위상이 반대이므로 0("null" 또는 "electric zero") 된다. null의 위치 core가 계속 움직이면 V 값이 변한다. 그리고 Signal Conditioner는 여러 개의 transducer로 들어오는 아날

로그 입력 신호전압들을 받아 집합적으로 처리하는 장치인데 본 측정장치에서는 2개의 transducer 중 1개의 힘량측정용과 1개의 외경측정용을 사용하고 있다. 그리고 핵연료봉의 상하이동용 직류모터(DC motor) 및 회전용 스텝모터(step motor)가 장착된 스캐닝 벤치 구동장치는 핫셀 외부에는 operation 지역(Working Area)에 설치된 벤치 구동용 원격조정판과 이의 인터페이스용으로 A/D 변환기, I/O port, Recorder, 그리고 제어 및 데이터계산을 위한 컴퓨터로 구성 되어있다. 핵연료봉의 구동은 assembler 언어로 하여 상하이동 속도를 높였으며, 0.1mm 마다 직경을 읽도록 프로그램 하였다. 이 데이터들을 개인용컴퓨터가 계산하여 그 결과를 저장 디스크에 저장하고, 또한 이들을 도표화 및 그래프화 하여 제원측정의 분석을 용이하고 빠르게 하였다. 설계 제작된 이 시스템은 직경측정시 5미크론의 정밀도로써, 전 핵연료봉 길이에 대하여 나타내었다. 또한 사용후핵연료봉 제원측정장치의 기기교정, 정밀도 측정 및 디지털 지시기의 환산표를 작성하기 위하여 표준게이지 2개를 제작하여 핫셀 내부 및 외부에 1개씩 설치하였다. 이 표준게이지의 재질은 게이지용 강(SKS-3)이었으며 정밀도는 외경공차 $\pm 0.002\text{mm}$, 진원도 ± 0.002 이었다. 또한 표면조도는 1.5S로 함과 아울러 열처리하여 표면을 경화시켰다. 제작된 표준봉을 검증하기 위하여 Dial Gauge가 Range 0-25mm(정밀도:0.001mm)를 사용하여 Block Gauge(Mitutoyo사, Serial No.137703)을 측정한 정밀도 검증 실험하였으며, 각 위치별 8.500, 9.000, 9.500, 10.000 및 10.500mm를 각각 5번에 걸쳐 0도, 120도, 240도 그리고 사용위치로 돌려 측정하였다. 기술한 제작시방에 따라 제작된 핵연료봉 직경 측정용 표준 게이지에 대한 검·교정 검사는 국가공인교정검사기관인 한국표준연구소에서 수행하였으며, 제작한 표준게이지에 의하여 측정시스템을 교정하고 LVDT 전압과 핵연료봉 직경의 관계식

$$(mm) = 10.700 + (\quad - 1.31) \times \frac{0.05}{0.16} \text{ ----- (1)}$$

을 사용하여 핵연료봉의 직경을 측정하였다. 자료수집(data acquisition) 및 처리는 모터 구동 자동제어 시스템을 사용하여 0.1mm 마다 모터가 이동하고 직경을 읽도록 프로그램을 개발하였다. 먼저 속도를 높이기 위하여 기계어 프로그램으로 길이방향 0도, 90도 스캐닝 모터구동 및 컴퓨터에 의해 data가 수집되고, 회전방향 180도 스캐닝 시험은 BASIC 프로그램으로 작성되었다. 이 기계어 프로그램은 BASIC 프로그램으로 작성하였다. 이들 프로그램에서 데이터들을 디스켓에 저장되고 데이터 수집 흐름도(data aquisition flow chart)는 그림 3에 나타내었다. 이를 사용하여, 이들을 10mm 마다 평균 및 표준편차 그리고 난형도를 구하여 도표화 할수 있으며, 이 도표화한 데이터 등을 직경(0도, 90도), 난형도(0도-90도)에 대해 그림 4에 그래프로 나타낼 수 있도록 하였다.

2. 결과 및 고찰

사용후 핵연료봉 C15-B11를 장전하기 전에 직경이 10.600mm에서 10.800mm까지

0.050mm의 등간격으로 변화는 표준봉을 사용하여 측정시스템을 교정하였다. 즉 직경을 측정할 때 LVDT에 나타나는 전압을 측정하여 전압에 대한 직경의 관계식 (1)을 구하였다. 이 식을 사용하여 표준봉의 직경을 스캐닝 방법에 의하여 다시 측정하여 관계식을 재 확인한 결과 10.600 ± 0.001 , 10.65 ± 0.003 , 10.700 ± 0.001 , 10.750 ± 0.002 그리고 10.789 ± 0.001 mm의 값을 나타내었다. 여기서 10.600mm에서 10.750mm까지는 위의 관계식이 잘 적용되고 있음을 알 수 있고 그 이상의 직경에서는 교정된 다른 관계식이 요구되나 본 시험에 사용된 핵연료봉에 대한 대략적인 직경의 분포를 이 식을 사용하여 확인한 결과 10.600mm에서 10.750mm 이내에 있으므로 위의 관계식을 본 시험에 사용할 수 있었다. 핵연료봉에 대한 시험은 핵연료봉 하단에서 20mm위치가 측정 센서에 오도록 한 다음에 핵연료봉을 등속도로 내리고 동시에 약 1mm 이동후의 직경을 읽었다. 그후 10mm 마다 수집된 직경의 평균값과 그 표준편차를 구하여 측정값을 도표화하였다. 장치의 특성상 핵연료봉 상단에 약 50mm 위치까지 시험이 가능하였다.

핵연료봉 C15-B11에 대한 제원측정의 결과는 표 1에 나타내었다. 그리고 그림 5는 원주방향 0도에 대한 직경(D1), 원주방향 90도에 대한 직경(D2)과 이것에 대한 난형도를 나타낸 것이다. 또한 그림 5는 연료봉의 180도 회전방향 난형도를 나타낸 것이고 3,429.6mm에서 인공결함을 나타낸 것이다. 시험결과 얻은 직경을 조사전 핵연료봉 직경 10.72mm와 비교해 볼 때 핵연료봉의 하단 부분과 상부 스프링이 있는 부분을 제외하고는 전체적으로 감소하였으며 D1, D2 모두 약 10.66 ± 0.02 mm 이내의 값을 나타내었다. 한편 하단에서 약 3660mm에서 직경이 증가하여 10.72mm의 값을 나타내었다. 난형도의 경우 전반적으로 ± 0.07 mm 이내의 변화를 가지고 있으나 부분적으로 이 보다 큰 변화를 나타내고 있다. 즉 상단에서 155mm, 895mm, 1,115mm부분에서는 각각 0.074mm, 0.073mm, 0.078mm와 하단에서 3,335mm, 3,345mm부분에서는 각각 0.079mm, 0.077mm의 비교적 큰 폭의 변화를 보였고, 3,429.6mm에서 인공결함 부위를 나타낸 것이다. 핵연료봉 C15-B11의 조사후 길이는 3,881mm이고 조사전 길이 3,857mm보다 24mm 늘었다.

3. 결론

사용후 핵연료의 직경측정 및 길이측정 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 핵연료 직경측정 및 길이측정 지시기의 설계 제작으로 직경 및 길이 측정뿐 아니라 LVDT를 사용하는 다른 측정시스템에도 적용이 가능하여 측정의 정확도 및 신뢰성을 높일 수 있다.

둘째, Calibration을 위한 핵연료봉 제원측정용 표준게이지는 PWR 핵연료봉의 직경 및 길이변화를 측정하기 위해 제작된 것으로 표준 직경을 얻어 각각의 표준치를 핵연료봉 직경측정장치인 LVDT를 사용하여 구한 값과 비교함으로써 이들 사이의 관계식을 구하였다.

셋째, 길이방향 및 회전방향으로 연속적으로 Scanning 할 수 있는 구동 자동제어 프로그램화 하여 Key Board로서 제어 할 수 있도록 하였다. 또 한편으로는 각 스텝모터에 부착되어 있는 엔코더(encoder)를 읽고 수정작업을 함으로써, 정확한 위치이동 및 감지가 가능하도록 하였다.

넷째, 모터 구동 자동제어 시스템을 사용하여 0.1mm 마다 모터가 이동하고 직경을 읽도록 프로그램화 하여 컴퓨터에 의해서 자료를 획득하고 분석할 수 있는 프로그램을 제작하여 사용후 핵연료봉에 대한 길이측정과 직경측정 및 난형도 측정 기술 개발하였다.

다섯째, 개발한 제원측정 시험기술에 의하여 사용후 핵연료봉의 직경 및 난형도를 측정하고 분석한 데이터들을 100mm, 10mm마다 평균 및 표준편차 그리고 난형도를 구하여 도표화한 데이터들을 그래프로 나타낼 수 있도록 하였다.

결론적으로 사용후 핵연료봉에 대한 직경 길이 및 난형도 측정 방법이 개발되었으며, 이 첫수측정 자료의 결과를 가지고 해석함으로써 핵연료의 안전성 평가 및 노내거동 연구에 활용될 것이다.

참고문헌

1. B. Lacroix, et al, Proc.IAEA Technical Lommittee Meeting for Water Reactor Fuel, France(1994)p173
2. 김은가의 “원전연료 손상원인 규명 연구”, KAERI/CR-78/99, 한국원자력연구소(1999)
3. “조사후시험시설운영”, KAERI/MR-129/87, 한국원자력연구소(1987).

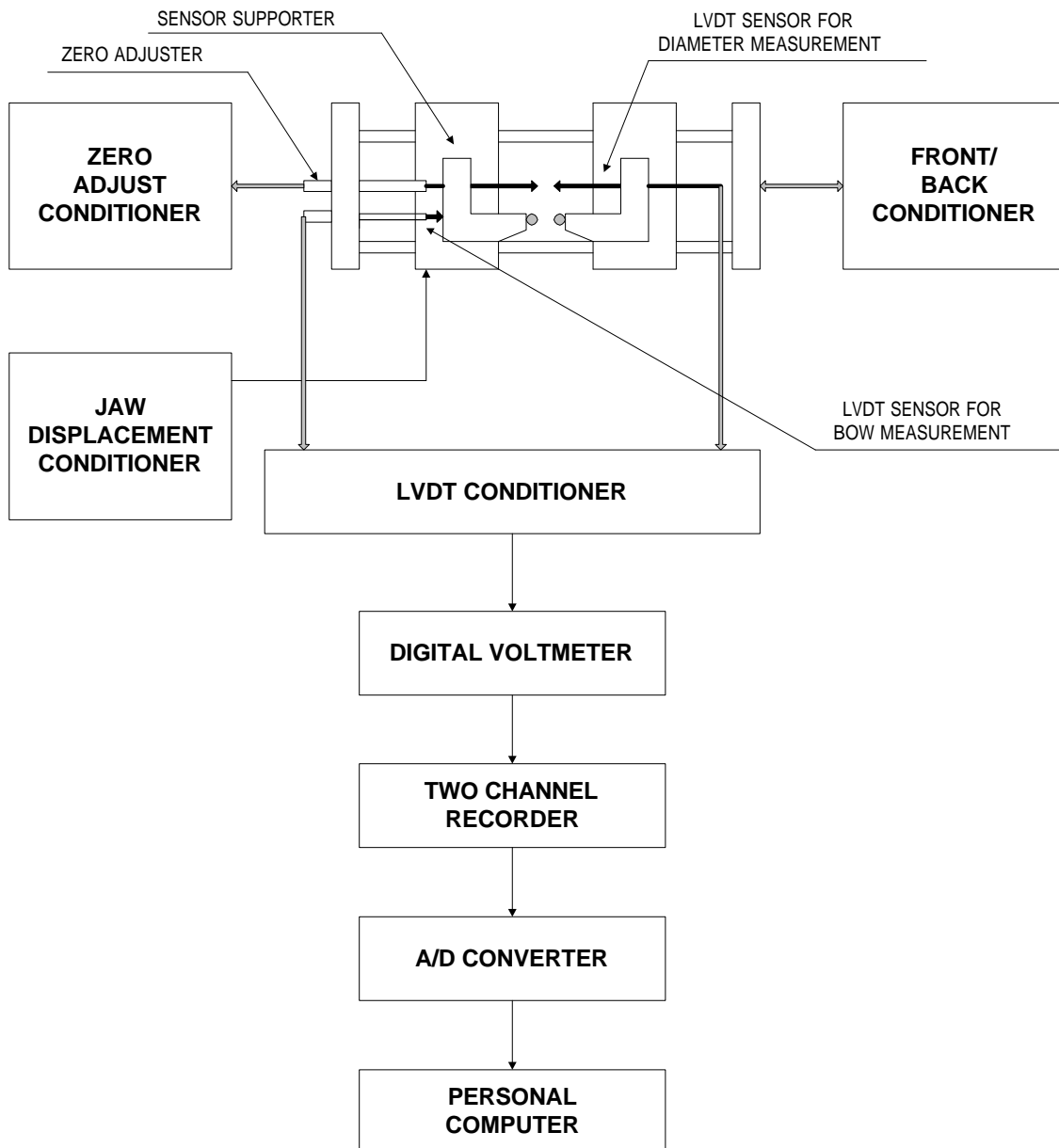


Fig. 1. The Device of Diameter Measurement

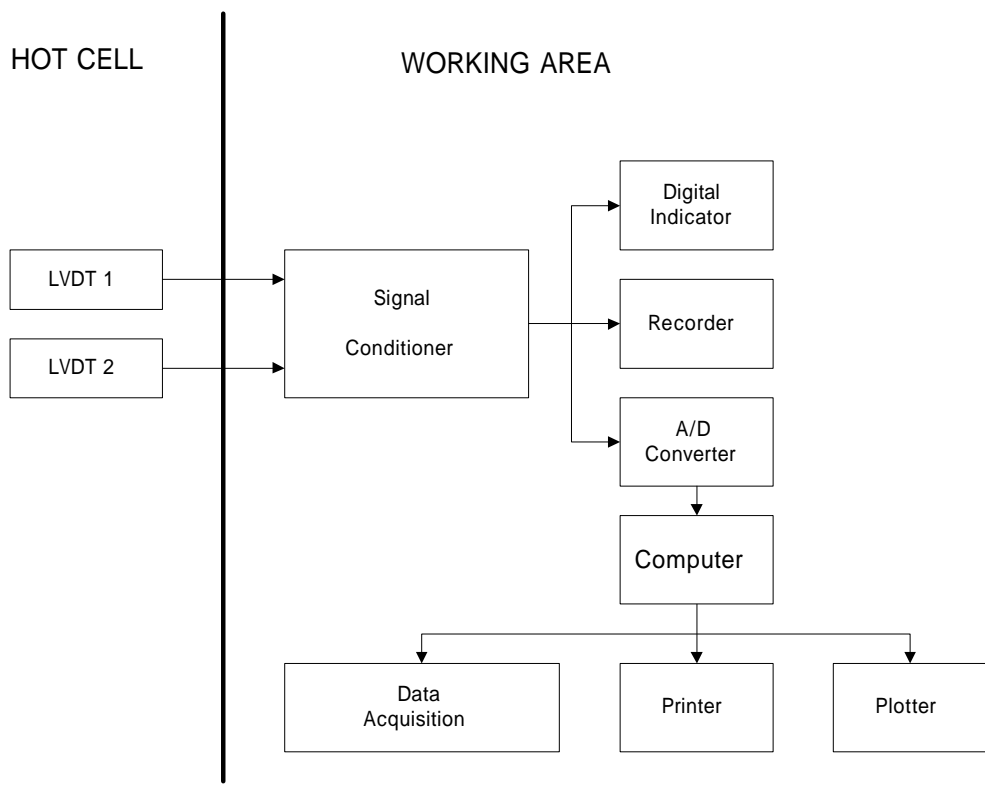


Fig. 2. Schematic Diagram Metrology Examination at Hot Cell

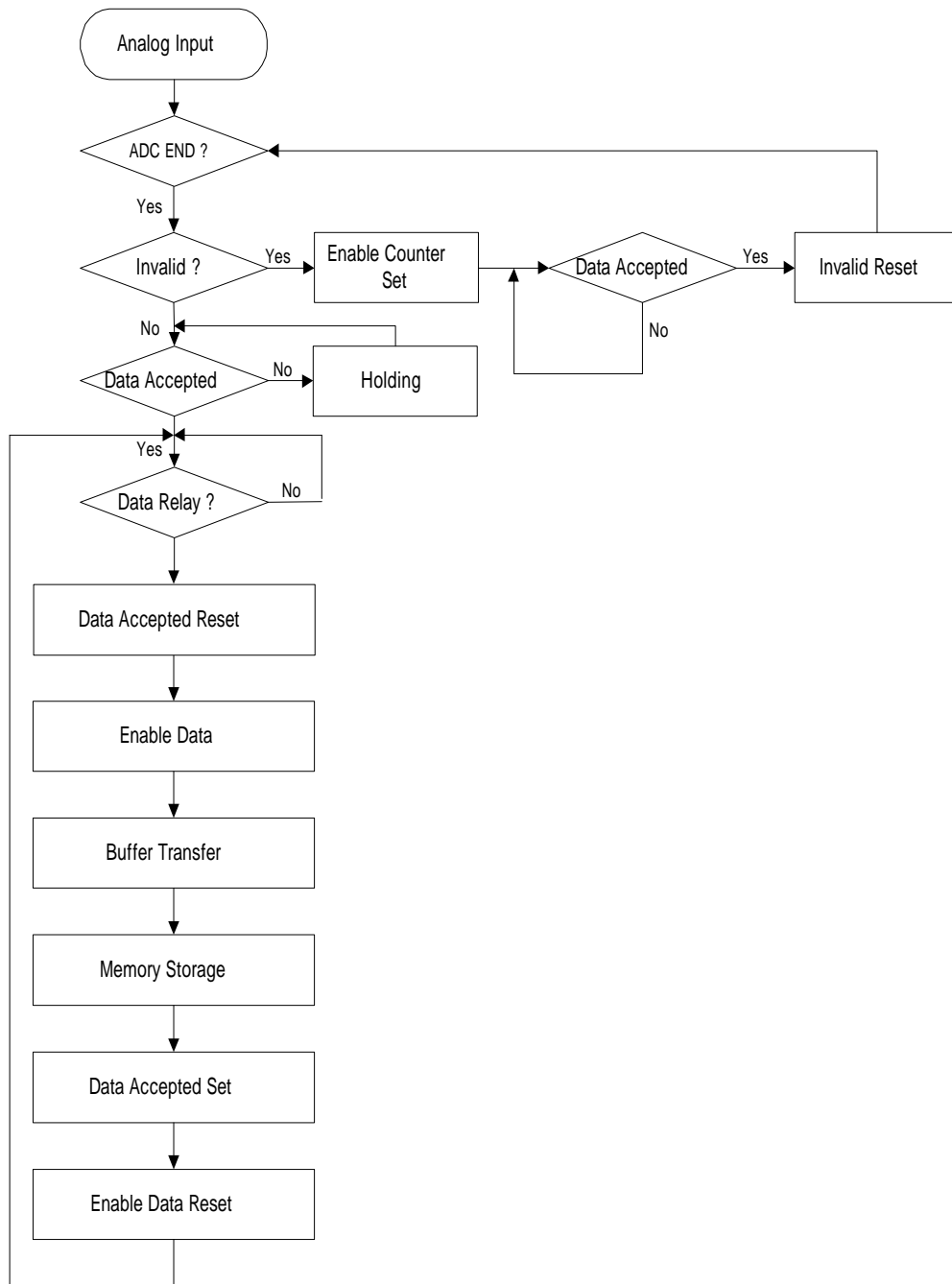


Fig. 3. Data Aquisition Flow Chart

Table. 1. The Result of Metrology for Fuel Rod C15-B11

C15-B11(Ref:10.72mm)									
Group	Position(mm)			Diameter(mm)			OVAL	dB	% (dD/D)
	Start	Stop	Center	D1 (0°)	D2 (90°)	D ()			
Mean	20	3830	-	10.658	10.651	10.655	0.019	-0.07	-0.81
Min-D	2680	2690	2685	10.621	10.629	10.625	0.010	-1.10	-0.89
Max-0	3330	3340	3335	10.713	10.834	10.674	0.079	-0.05	-0.43
Mean	860	2660	-	10.647	10.639	10.643	0.017	-0.08	-0.72
Ref	3780	3830	3805	10.725	10.728	10.727	0.008	0.01	0.07

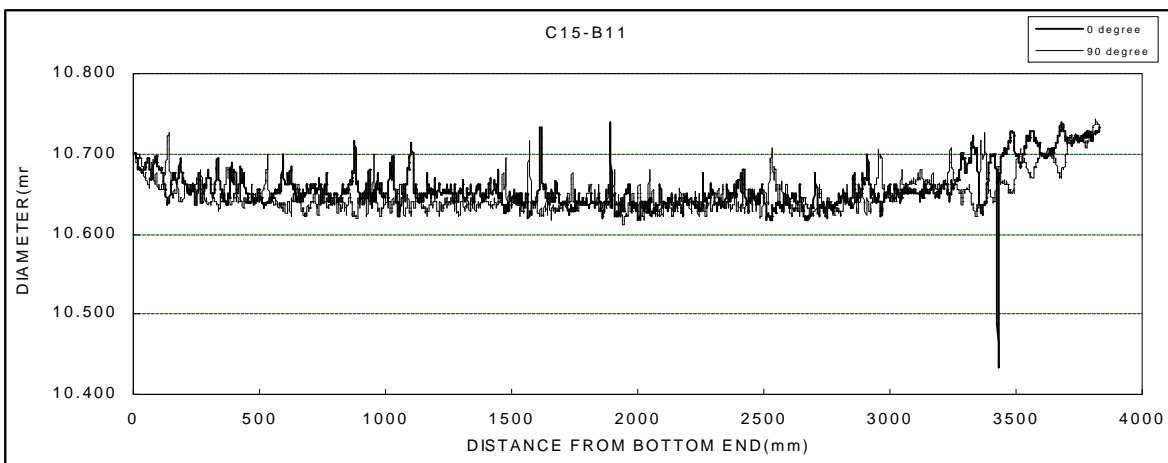
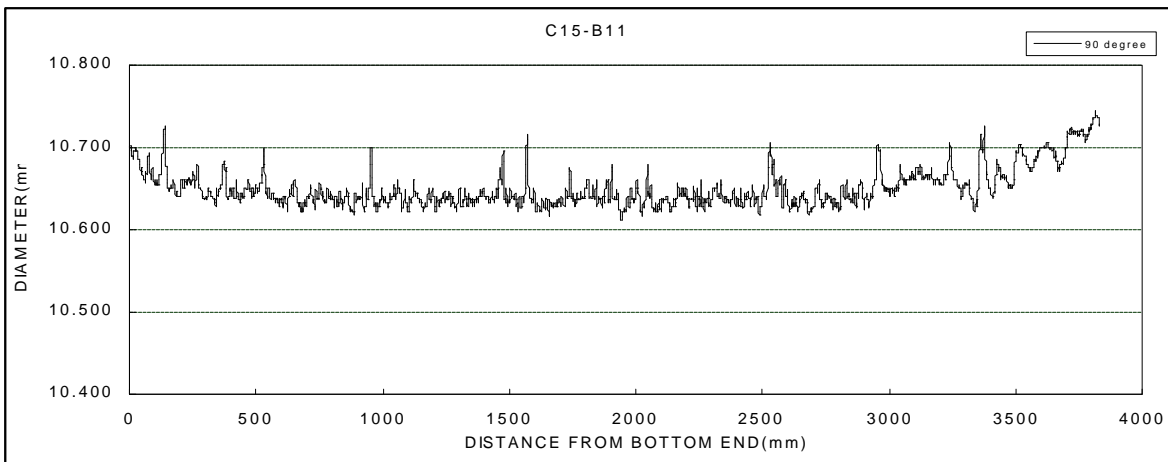
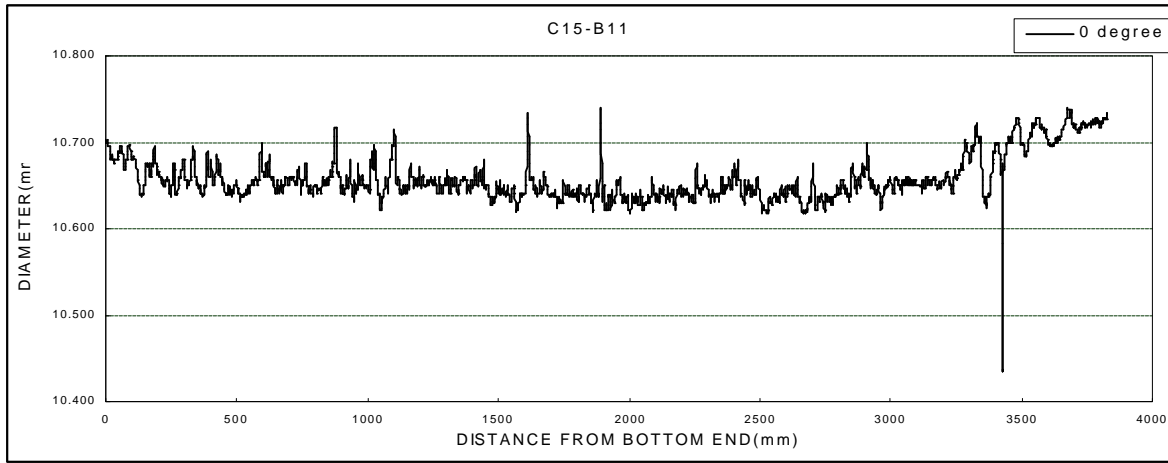


Fig. 4. The Result of Diameter Measurement for Fuel Rod C15-B11

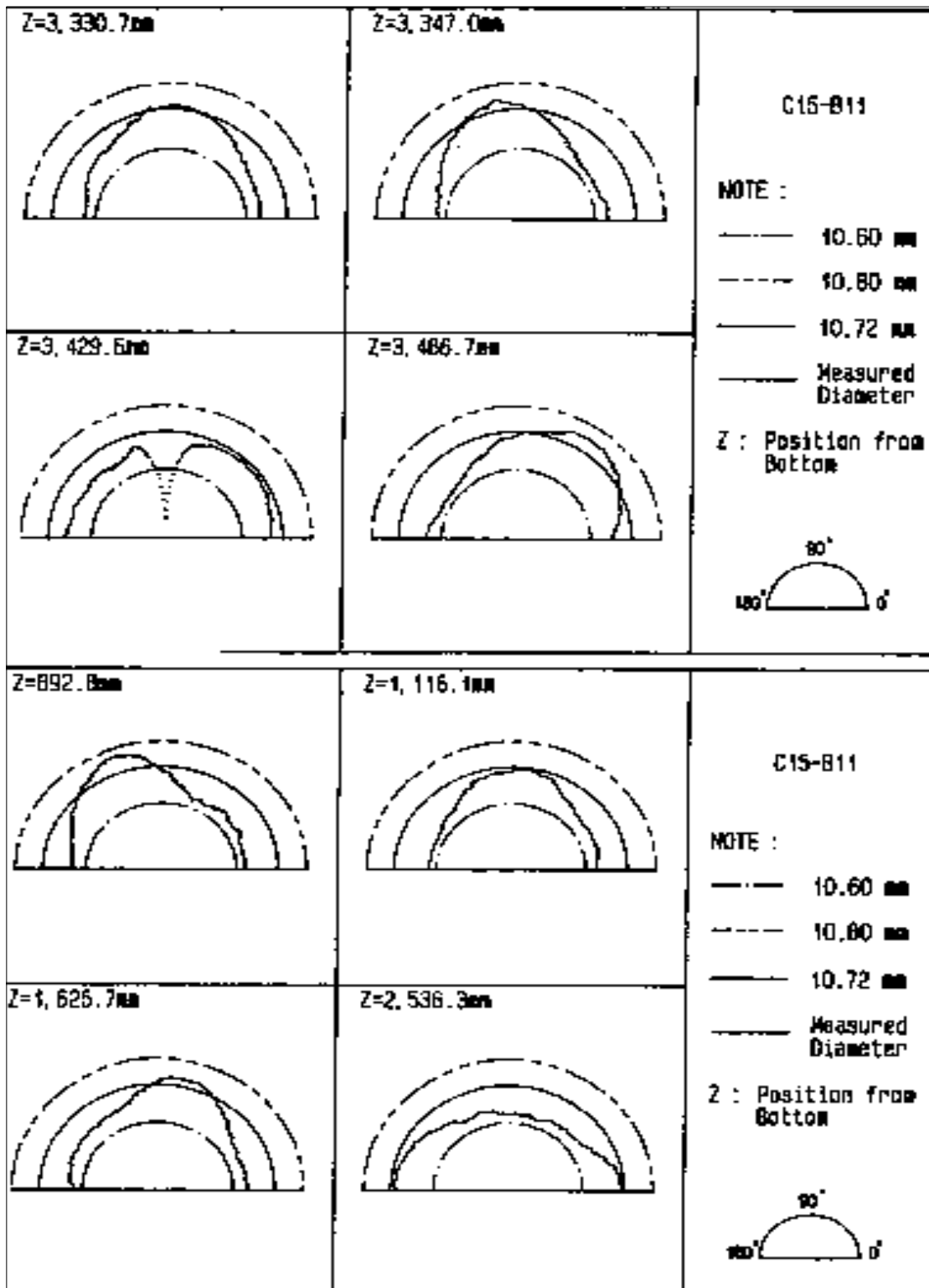


Fig. 5. Metrology(Oval.) of C15-B11