



KR9900166

KAERI/TR-1098/98

하나로 핵연료에 대한 찻수측정 기술개발

Development of the method for the dimensional
measurement of the HANARO nuclear fuel

1998. 6

한 국 원 자 력 연 구 소

30 - 48



제출문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 '하나로 핵연료에 대한 칫수측정 기술개발'에 관한 기술보고서로 제출합니다.

1998. 6

과 제 명 :	조사재시험시설운영	
과제책임자 :	이기순	
참 여 자 :	주저자	박사후연수연구원 김태연
	공저자	책임연구원 이기순
		선임연구원 박대규
		선임연구원 주용선
		선임연구원 안상복

감수위원 : 김은가

요약문

I. 제목

하나로 핵연료에 대한 찢수측정 기술개발

II. 목적 및 중요성

핵연료봉은 원자로에서 중성자 조사 또는 고압의 조건에서 사용되므로 사용중에 찢수의 변화가 생기게 된다. 만약에 찢수의 변화가 크게 일어나면 안정성에 문제가 생기게 된다. 그러므로 연료봉의 원자로내 사용에 따른 연료봉의 직경변화와 길이변화 등 찢수변화에 관한 자료는 핵연료의 설계는 물론 건전성 평가에 대단히 중요한 자료가 된다.

III. 연구내용 및 범위

핫셀에서 하나로 핵연료봉의 형태를 가지면서 핵연료가 들어있지 않은 모의 연료봉에 대한 직경측정을 하였다. 그리고 하나로 핵연료다발 및 핵연료봉의 종방향 길이측정도 하였다.

IV. 연구결과 및 활용에 대한 건의

모의 핵연료를 이용하여 하나로 핵연료의 찢수측정 방법이 개발되었다. 이러한 예비시험 결과는 하나로 핵연료봉의 체적변화를 0.6 %의 통계적 불확도 내에서 측정할 수 있는 결과를 보여주었다.

SUMMARY

I. Project Title

Development of the method for the dimensional measurement of the HANARO nuclear fuel

II. Objectives and Importance of the Project

Dimension of the nuclear fuel is altered in nuclear reactor because of the neutron exposure with high pressure water. If the deformation is overlarge, the severe problem in safety of the nuclear fuel and the reactor come about. Therefore the accurate dimensional data of the nuclear fuel in diameter and length is very important for the design of the nuclear fuel and the estimation of the nuclear safety.

III. Scope and Contents of the Project

Measurement of diameter for the dummy HANARO fuel rod which has not filled with real fuel material was carried out in hotcell. And also the length of the HANARO fuel assembly and the rod are measured.

IV. Results and Proposal for Applications

Dimensional measuring method for the HANARO fuel was developed. The test result show our method is good enough to distinguish change in volume with statistical uncertainty of 0.6 %.

목차

제 1 장 서론	1
제 2 장 본론	2
제 1 절 측정방법	2
1. 하나로 모의 연료봉 직경 측정 장치	2
가. 측정장치	2
나. Calibration	6
다. 측정 과정	9
2. 하나로 핵연료 길이측정	13
가. 측정장치	13
나. 측정과정	13
(1) 핵연료다발 측정	13
(2) 핵연료봉 측정	14
제 2 절 측정 결과	16
1. 모의 핵연료에 대한 직경측정 결과	16
2. 하나로 핵연료 길이측정	38
가. 비조사 하나로 핵연료다발 길이측정 결과	38
나. 하나로 조사후 모의 핵연료다발의 길이측정 결과	39
다. 하나로 연료봉의 길이측정	40
제 3 장 결론	41
참고문헌	43

표 차례

표 1 DataPac 초기화 명령어들.	6
표 2 DataPAC의 각 채널에 대한 설정치.	7
표 3 표준 시험봉의 치수.	8
표 4 현미경으로 교정된 모의 연료봉의 직경측정 결과.	37
표 5 비조사 하나로 핵연료다발 길이측정 결과.	38
표 6 하나로 조사후 모의 핵연료다발의 길이측정 결과.	39
표 7 하나로 비조사 연료봉 길이 측정결과.	40

그림 차례

그림 1	칫수측정 장치.	2
그림 2-1	모델 10KU-KD의 앞면.	3
그림 2-2	모델 10KU-KD의 뒷면.	4
그림 3	IMEF M1 핫셀내 제원측정 장치.	5
그림 4	Calibration 후 C표준의 일부 구간을 재측정한 값.	9
그림 5	칫수측정 장치의 jaw plate에 설치된 측정 probe.	11
그림 6	하나로 핵연료봉.	15
그림 7	모의 연료봉(A)에 대한 직경측정 결과.	17
그림 8	모의 연료봉(A)에 대한 직경측정 결과.	18
그림 9	모의 연료봉(B)에 대한 직경측정 결과.	20
그림 10	모의 연료봉(B)에 대한 직경측정 결과.	21
그림 11	모의 연료봉(C)에 대한 직경측정 결과.	23
그림 12	모의 연료봉(C)에 대한 직경측정 결과.	24
그림 13	모의 연료봉(C)을 재측정한 결과.	26
그림 14	모의 연료봉(C)을 재측정한 결과.	27
그림 15	모의 연료봉(C)의 d축을 재측정한 결과(1).	29
그림 16	모의 연료봉(C)의 d축을 재측정한 결과(2).	30
그림 17	비조사 연료봉에 대한 직경측정 결과(1).	32
그림 18	비조사 연료봉에 대한 직경측정 결과(2).	33
그림 19	비조사 연료봉의 4개축 측정값들의 평균.	35
그림 20	현미경을 이용한 직경 측정.	36

제 1 장 서론

핵연료봉은 원자로에서 증성자 조사에 따른 핵분열 기체의 유출과 노내 고밀화에 의한 핵연료 수축 그리고 고압의 가혹한 조건에서 사용되므로 사용중에 치수의 변화가 생기는데, 만약에 치수의 변화가 크게 일어나면 핵연료의 안정성에 문제가 생기게 된다. 그러므로 연료봉의 원자로내 사용에 따른 연료봉의 직경 변화와 길이 변화 등 치수 변화에 관한 자료는 핵연료의 설계는 물론 건전성 평가에 대단히 중요한 자료가 된다.¹ 경수로 핵연료의 치수 측정은 LVDT에 의해 기존의 간단한 방법으로 정확하게 측정할 수 있다. 그러나 하나로 핵연료와 같이 연료봉에 fin이 부착되어 있는 경우에는 기존의 방법으로는 측정할 수 없다. 이에 따라 본 보고서에서는 하나로 핵연료봉의 조사에 따른 치수 측정 방법을 개발하고, 그 측정방법 및 결과에 대해 기술한다.

제 2 장 본론

제 1 절 측정방법

1. 하나로 모의 연료봉 직경 측정 장치

가. 측정장치

그림 1은 핫셀내에 있는 연료봉을 측정하기 위한 장치의 개략도이다. 그림 1에서 DataPAC은 여러개의 transducer로 들어 오는 analog 입력 신호전압들을 받아 집합적으로 처리하는 장치인데 본 측정장치에서는 2개의 transducer를 사용하고 있다. 사용한 기기는 Daytronic사의 Model 10KU-KD이다.² 그림 2는 사용한 모델의 앞면(그림 2-1)과 뒷면(그림 2-2)의 사진이다. 앞면의 경우 LCD 화면이 추가되게 된다. 그리고 뒷면의 경우 EEPROM의 쓰기방지 스위치의 위치를 알아두고 명령어를 기억시키기 위해 필요한 경우에 스위치를 켜고 사용하게 된다. 한편 위 측정 시스템의 일부는 와전류시험과 같이 사용하게 되는데 와전류시험 후 칫수측정 시험으로 시스템을 바꿀 때 신호선들의 연결에 주의가 필요하다. 채널 1, 2, 3으로 분배될 때 채널3에서 LVDT 1과 LVDT 2의 신호선과 컴퓨터의 ADC의 입력선과의 연결은 항상 동일하게 연결되어야 한다. 측정결과는 최종적으로 컴퓨터의 하드 디스크에 저장되며 이 후 분석에 사용되게 된다. 그림 3은 조사재시험시설의 M1 핫셀내에 설치된 벤치이송 장치와 직경측정 장치의 모습이다. 측정 핵연료는 핫셀 외부의 operation 지역에 있는 원격조정판 또는 컴퓨터에 의해서 상하로 구동하게 되어있다.

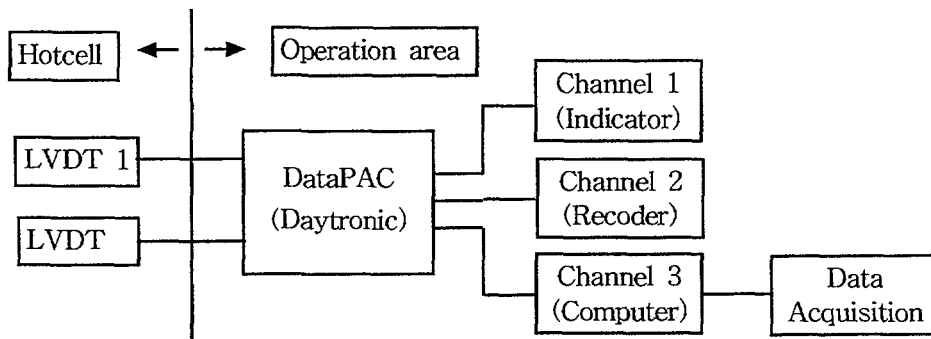


그림 1 칫수측정 장치.

(a) Model 10KU Front Elements

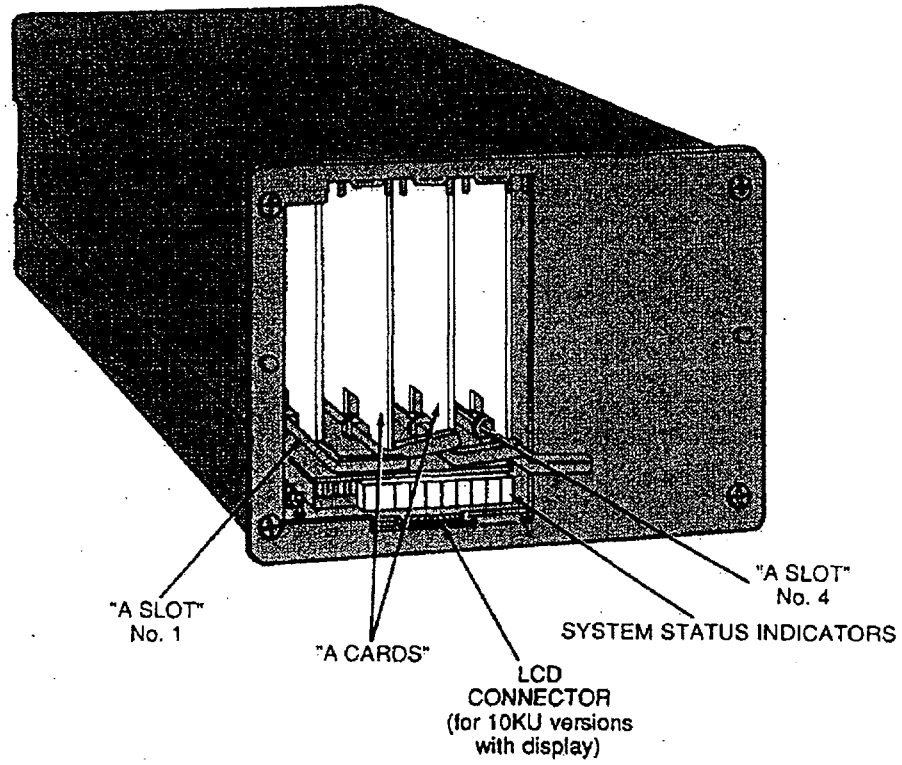


그림 2-1 모델 10KU-KD의 앞면.

(b) Model 10KU Rear Elements

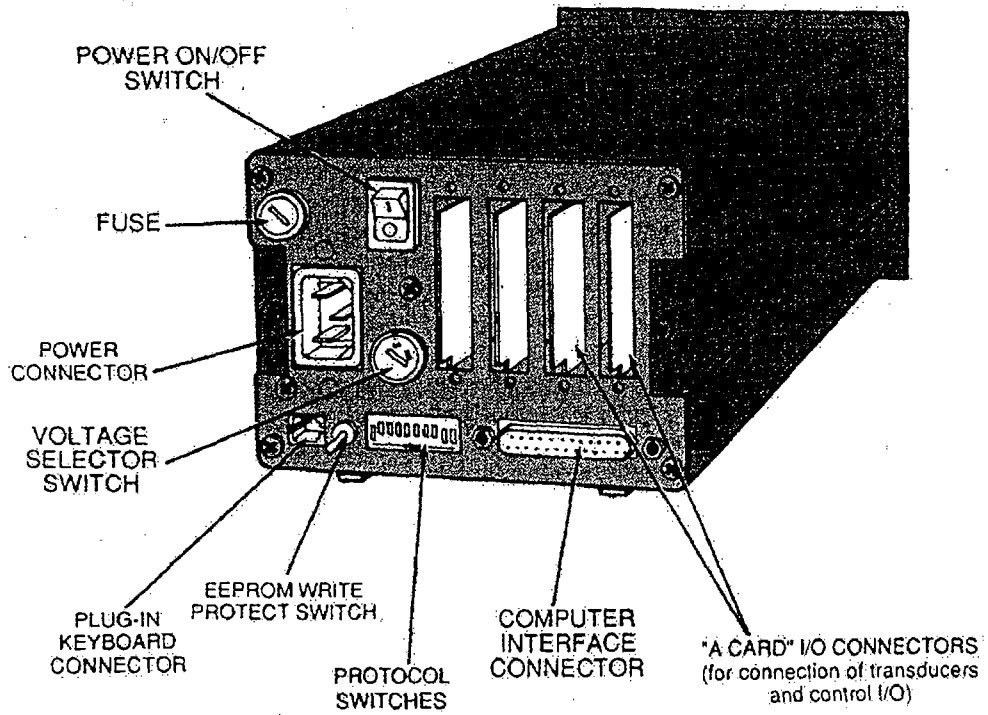


그림 2-2 모델 10KU-KD의 뒷면.

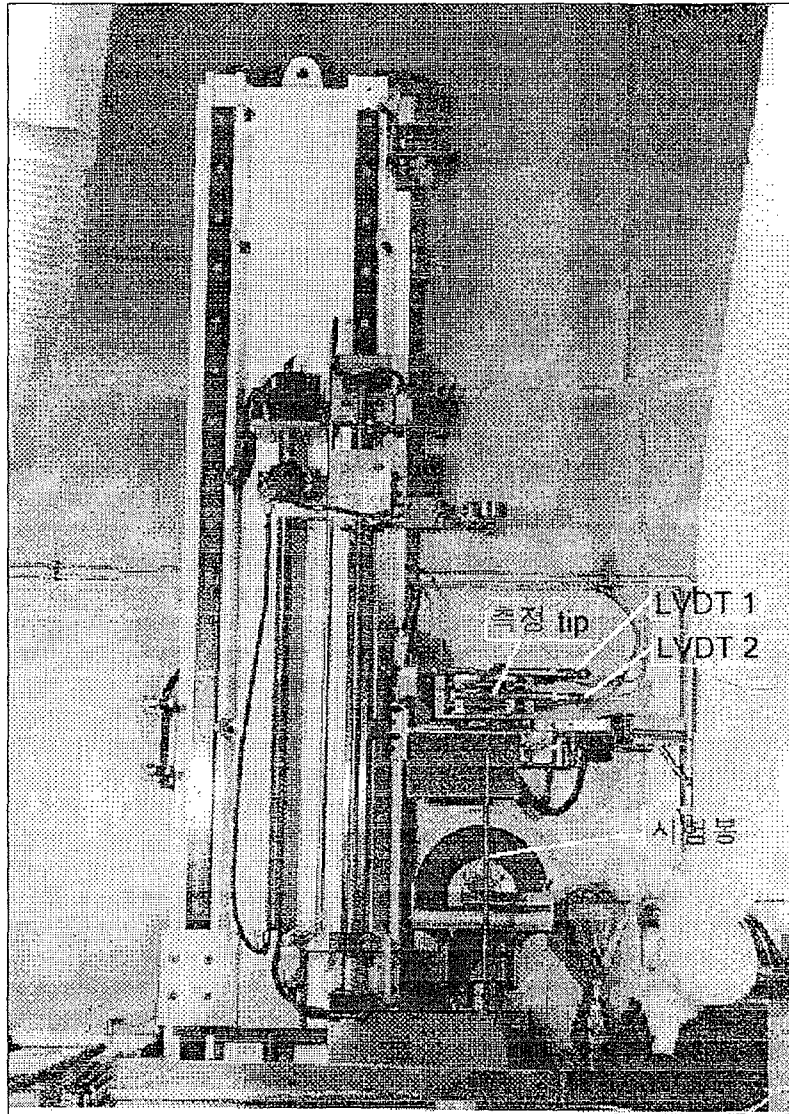


그림 3 IMEF M1 핫셀내 제원측정 장치.

나. Calibration

DataPAC의 calibration 방법중 상대적으로 간단한 two-point calibration 방법을 사용하였다. 우선 calibration을 하기 전에 DataPAC과 현재 구성장치간의 신호처리를 위해서는 10KU-KD의 설정을 표 1과 같이 하여야 한다.

표 1 DataPac 초기화 명령어들.

DataPAC 명령어	의 미
TYP1=30	1번 채널의 카드 타입은 LVDT용 10A30-2 이다.
TYP2=30	2번 채널의 카드 타입은 LVDT용 10A30-2 이다.
LCT1=1011	1번 채널의 카드 위치는 A 카드(1)의 1번 슬롯(01)의 1번(1) 채널에 있다.
LCT2=1012	2번 채널의 카드 위치는 A 카드(1)의 1번 슬롯(01)의 2번(2) 채널에 있다.
LCT3=23	3번 채널의 카드 위치는 2번 슬롯의 3번 채널에 있다.
LCT4=24	4번 채널의 카드 위치는 2번 슬롯의 4번 채널에 있다.
LCT5=25	5번 채널의 카드 위치는 2번 슬롯의 5번 채널에 있다.
LCT6=26	6번 채널의 카드 위치는 2번 슬롯의 6번 채널에 있다.
LCT7=27	7번 채널의 카드 위치는 2번 슬롯의 7번 채널에 있다.
LCT8=28	8번 채널의 카드 위치는 2번 슬롯의 8번 채널에 있다.
TER=8	채널 8개를 사용한다.
LEG1=mm	채널 1의 단위를 mm로 한다.
LEG2=mm	채널 2의 단위를 mm로 한다.
CHAN 1	채널 1의 데이터를 DataPAC의 CRT 화면에 보여준다.
CHAN 2	채널 2의 데이터를 DataPAC의 CRT 화면에 보여준다.

표 1의 명령어들은 이미 DataPAC의 EEPROM에 write 되어 있으므로 다시 설정할 필요는 없다. 따라서 calibration 과정은 다음에 기술되는 명령어들만을 EEPROM에 다시 써주면 된다. EEPROM에 명령어를 쓰기

위해서는 rear panel의 EEPROM 스위치에 전원을 반드시 넣어주어야 한다.

DataPAC 이외에 측정의 편리성을 위하여 DataPAC의 각 채널 데이터를 편리한 공학단위로 표시하여 주는 3개의 표시기가 설치되어있다. 2개의 모델 9515A에는 직경과 bowing의 치수를 표시하는데 각각 대상체의 절대치수가 표시되고, 모델 9530A에는 직경의 변화량이 표시되게 되어 있다. 이들 치수의 분해능은 calibration 과정에 의해서 결정이 된다. 물론 이들 표시기에 나타나는 치수는 표 2와 같이 설정하였다. 그렇지만 그 내용은 DataPAC을 통해서 조정할 수 있다.

표 2 DataPAC의 각 채널에 대한 설정치.

DataPAC 명령어	의 미
ANO5=1.667(CHN1)	채널 1의 아날로그 전압 데이터를 calibration 후 공학단위(mm)에 맞추기 위해 1.667배 하여 locate 5으로 보냄. 9530A에 display 됨. 한편 이 값은 현재 컴퓨터의 ADC 카드의 입력값으로 쓰이고 있음. 즉 9530A에 display 되는 값이 컴퓨터에 기록되는 값과 동일하다.
ANO3=10(CHN1)	채널 1의 아날로그 전압 데이터를 공학단위(mm) 0.1 mm 변화에 1 Volt 변화도록 하여 locate 3으로 보냄.
ANO7=0.1667(CHN2)	Bowing을 나타내는 절대적 수치로 indicator(9515A)에 표시 됨.
ANO4=1(CHN2)	Bowing을 나타내는 상대적 수치로 recorder에 입력됨. 1 mm 변화에 1 Volt 변하게 설정된 것임.

Two-point calibration은 표준 시험봉에서 측정하고자 하는 하한선에 transducer를 맞추고 "ZRO1"을 입력한다. 그러면 이 지점이 영점으로 설정이 된다. 그 다음 표준 시험봉을 상한선으로 옮긴 다음 상한선과 하한선 사이의 길이를 원하는 분해능으로 설정하면 된다. 실제의 예를 들면, 표준 시험봉의 7.40 mm에서 하한선으로 정하고 이 위치에서 "ZRO1"을 입력한다. 그리고 10.60 mm를 상한선으로 정하고 이 위치에서

“FRC1 = 320” 으로 설정한다. 그러면 10.60 mm와 7.40 mm가 320등분 되어 0.01 mm의 분해능으로 치수가 측정이 된다.

따라서 직경을 측정하는 대상체의 절대 치수는 직경의 변화량 (ANO5)과 0점으로 잡은 표준 시험봉의 치수가 합하여져서 표시기 (9515A)에 나타난다. 즉,

$$ANO6 = 1.667(CHN1) + 1.667(740 \times 0.01) + 1.667(CHN1) + 1233$$

으로 설정하고 이를 표시기(9515A)로 보내면 측정하는 시험봉의 절대직경 치수가 화면에 표시되게 된다. 한편 컴퓨터 상에 저장되는 데이터는 현재 다음과 같은 방식으로 프로그램되어 있다.

$$DIAMETER = REFERENCE + (REFERENCE - LOWER) \times ANO3$$

지금의 표준 시험봉은 다음과 같이 3가지로 분리되어 0.2 mm 범위의 직경을 측정하도록 되어 있다.

표 3 표준 시험봉의 치수.

종류	치수(mm)			불확도(mm)
A 표준	7.40	7.50	7.60	0.005
B 표준	10.60	10.70	10.80	0.005
C 표준	15.30	15.40	15.50	0.005

따라서 REFERENCE라는 것은 각각의 표준에서 중심의 치수가 되고 LOWER는 그 아래의 작은 치수가 된다. 따라서 결과값은 기준값에 대한 + 또는 - 의 변화량을 더해 줌으로써 절대치수가 기록되게 된다. 그림 4는 calibration 과정을 끝낸 후 표준 시험봉을 재측정한 결과이다.

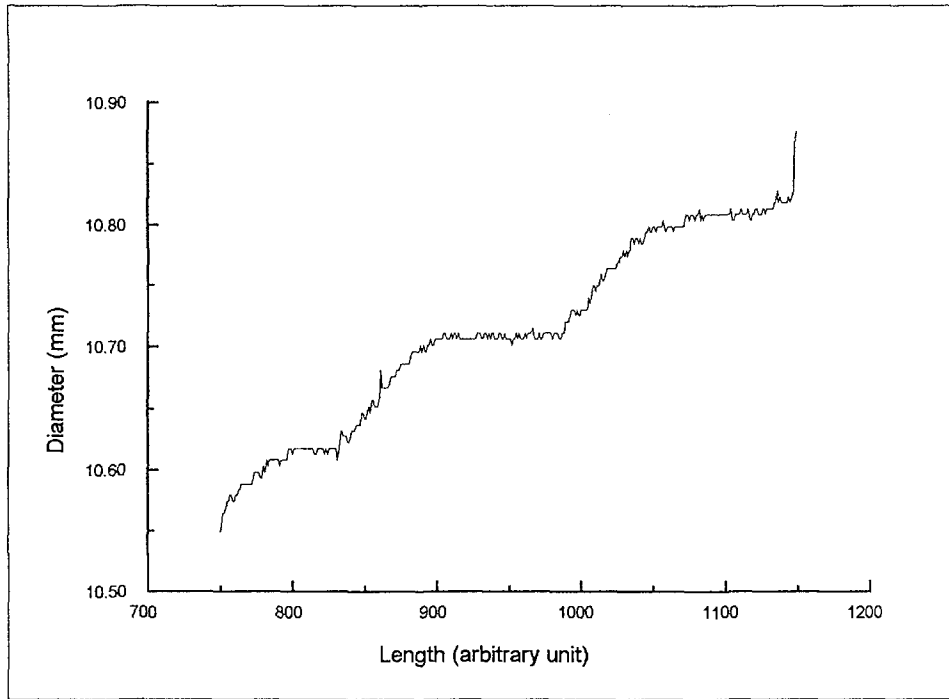


그림 4 Calibration 후 C표준의 일부 구간을 재측정한 값.

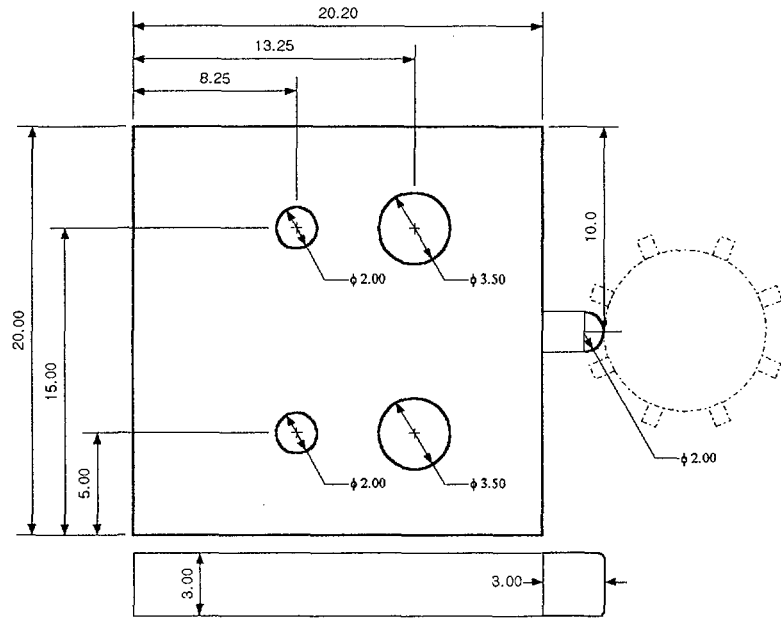
다. 측정 과정

측정한 핵연료봉은 실제 핵연료가 채워지지 않은 채 원자로에서 조사된 dummy 핵연료 집합체를 해체하여 사용하였다. M2 핫셀에서 해체된 연료봉을 M1 핫셀로 옮겨와 측정을 시작하였다. 해체된 핵연료봉 36개중 3개봉에 대해서 직경측정이 실시되었다. 각각 핵연료봉의 집합체에서의 상대적인 위치는 해체시 별다른 기록이 남아 있지 않아 상실된 것으로 본다. 따라서 연료봉을 A, B, 그리고 C 등 3개로 임의적인 구분을 하였다.

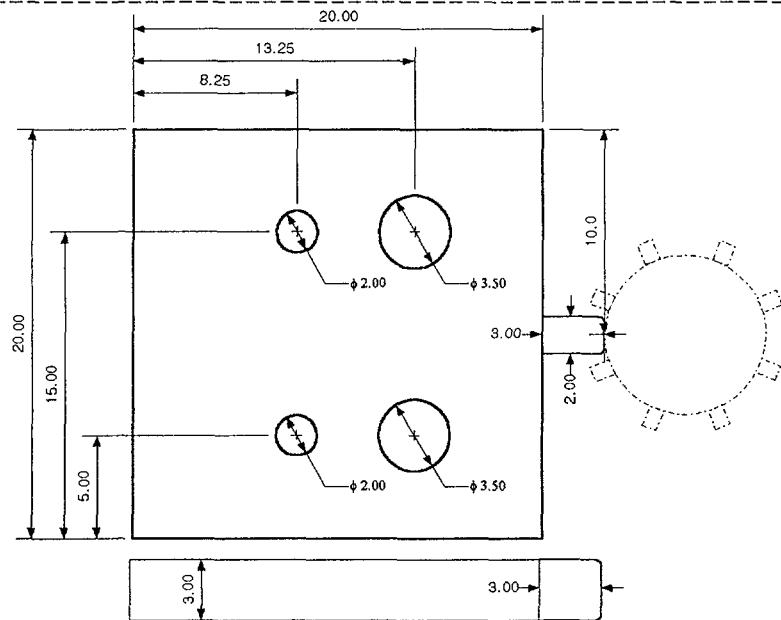
이전에 갖추어진 직경 측정장치는 본래 PWR 연료봉을 측정하기 위한 것이었다. 따라서 8개의 fin이 달린 하나로 연료봉의 직경을 측정을 위해서는 그림 5의 도면 I과 II 같은 probe를 새롭게 준비하였다. 하나로

핵연료는 8개의 핀으로 인하여 4개의 대칭축이 생긴다. 따라서 직경측정은 4개의 대칭축에 대하여 각 1회씩 수행되었다. 한편 벤치이송 장치는 감마스캐닝, 와전류시험, 그리고 칫수측정 및 외관검사등 여러종류의 비파괴실험을 위한 다목적장치이다. 따라서 측정대상에따라 이송장치의 특별한 위치에 리미트 스위치가 설치되어 있다. 이때문에 하나로 핵연료봉 전체 길이 중에서 리미트 스위치로 인해 접근할 수 없는 상하 끝단의 일부를 제외하고 620 mm 길이에 대해서 직경을 측정하였다.

도면 1



도면 II



- | | |
|---|---------------------|
| 1. 두께 : 3.00 mm | 2. 재질 : 게이지 강 |
| 3. 수량 : 각 도면 2개씩 | 4. 점선부분은 가상적인 물체 임. |
| 5. 20.00 mm x 15.00 mm x 10.00 mm block 1개 추가 | |

그림 5 칫수측정 장치의 jaw plate에 설치된 측정 probe.

전체 측정과정은 다음과 같다.

- (1) 측정하고자 하는 표준 시험봉 또는 핵연료봉을 벤치에 장착한다.
- (2) 벤치 및 구동제어기의 전원공급기에 전원을 넣는다.
- (3) 벤치 및 구동제어기 조절판의 전원을 넣는다. 그리고 직경 측정 probe가 달린 jaw plate를 시험봉 중심에 위치시킨다.
- (4) 컴퓨터에 전원을 넣는다.
- (5) DataPAC의 전원을 넣는다.
- (6) DataPAC의 칫수표시기(모델 9515A 2개, 9530A 1개)에 전원을 넣는다.
- (7) Calibration이나 기타 EEPROM에 쓰여진 명령어를 수정할 경우에 별도로 만들어진 EEPROM의 스위치를 키고 수정시킨다.
Calibration이 이루어진 후 반복적인 측정의 경우에는 스위치를 끄고 측정한다.
- (8) 측정하고자 하는 시험봉의 하한이나 상한서에 jaw plate를 위치시킨 후 jaw를 닫는다. 그리고 PC에서 측정 프로그램인 HOTCELL을 실행시킨다. 이후 초기화면이 뜨면 벤치의 이동거리, 속도, 방향등을 설정하고, reference와 lower 변수에 대한 입력값을 주고 데이터 저장 파일의 이름과 저장속도 등을 설정한 다음 측정을 수행한다.
- (9) 하나로 연료봉은 8개의 fin을 가지고 있기 때문에 jaw plate에 달린 측정 probe가 정확하게 fin 사이에 들어갔는지 칫수표시기에 나와 있는 값을 설계시 기준값과 비교하여야만 한다. 그리고 측정중에도 측정 probe가 fin에 걸릴 수 있으므로 측정중에도 주의를 기울여야만 한다.
- (10) 측정이 끝나면 측정된 저장 파일들은 압축파일로 복사본을 만들어 따로 보관한다.
- (11) 모든 측정장치의 전원을 공급시의 역순으로 차단한다.

2. 하나로 핵연료 길이측정

가. 측정장치

측정장치는 IMEF의 M1 핫셀에 있는 PLC에 의한 벤치구동제어판 상에 스테핑모터의 구동을 나타내는 칫수를 이용하여 측정하였다. 그리고 측정점의 위치는 핫셀 외부에서 망원경을 이용하였으며, 이때 측정값의 유효숫자는 mm 단위로 xxxx.xx 형식을 가지며 0.01 mm까지 측정된다. 한편 이와 같은 측정장치를 이용할 경우 중요한 개별적 불확도 요소로는 다음의 사항들을 고려할 수 있다.

- PLC눈금 불확도 < 0.05 mm,
- 망원경과 연료봉 end point 그리고 수평받침대의 수평도 < 0.5 mm,
- 개인의 눈금 읽기 < 0.4 mm.

나. 측정과정

(1) 핵연료다발 측정

- (가) 측정은 32봉의 외각의 정점에 위치한 6개의 연료봉에 대해서 이루어 졌다.
- (나) 최초 측정봉의 위치는 upper endplate와 grapple head lock에 연결되어 있는 “스”자 모양의 가스관의 왼쪽에 묶인 연료봉부터 시계 방향으로 돌아 가면서 각연료봉에 대하여 7회씩 반복측정.
- (다) 1회 측정때마다 연료봉의 top end와 bottom end에서 0점을 다시 설정.
- (라) 0점 설정은 외부의 망원경에서 본 각 end point가 연료봉 뒤에 수평으로 놓여져 일직선을 이루고 있는 감마스캐닝의 부속장치인 collimator 받침대와 일치했을 때 0점으로 reset함.

(2) 핵연료봉 측정

(가) 측정방법은 하나로 32봉 연료다발 측정시와 동일.

(나) 측정부분은 그림 의 1번 사이의 길이.

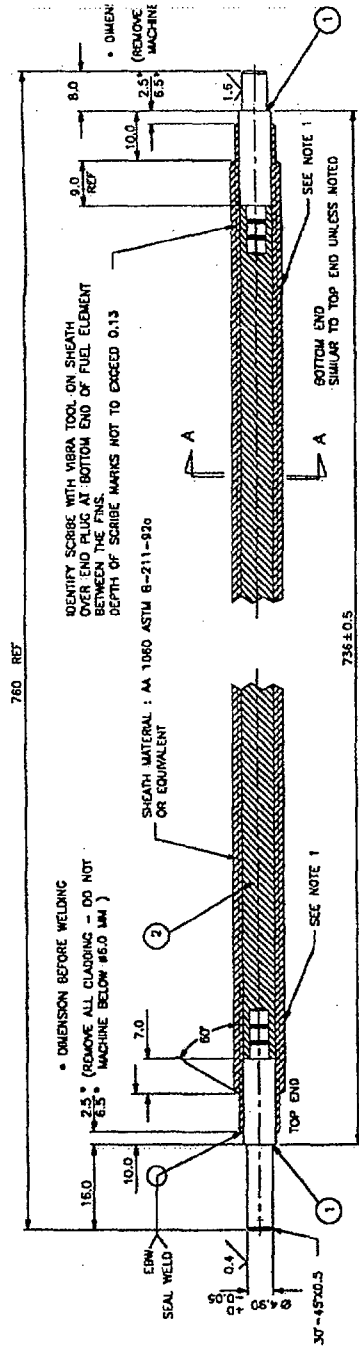


그림 6 하나로 핵연료봉.

제 2 절 측정 결과

1. 모의 핵연료에 대한 직경측정 결과

측정은 각각의 연료봉에 대하여 4회씩 측정하였다. 측정할 때 마다 probe의 위치를 45도씩 회전하여 동일한 축을 반복측정하는 일이 없도록 하였다. 측정된 결과는 측정 프로그램에서 binary 파일로 저장이 되게 된다. 따라서 측정 후 데이터 저장파일을 다시 ASCII 파일로 바꾸어 측정 결과를 분석하였다. 다음은 측정 결과이다.

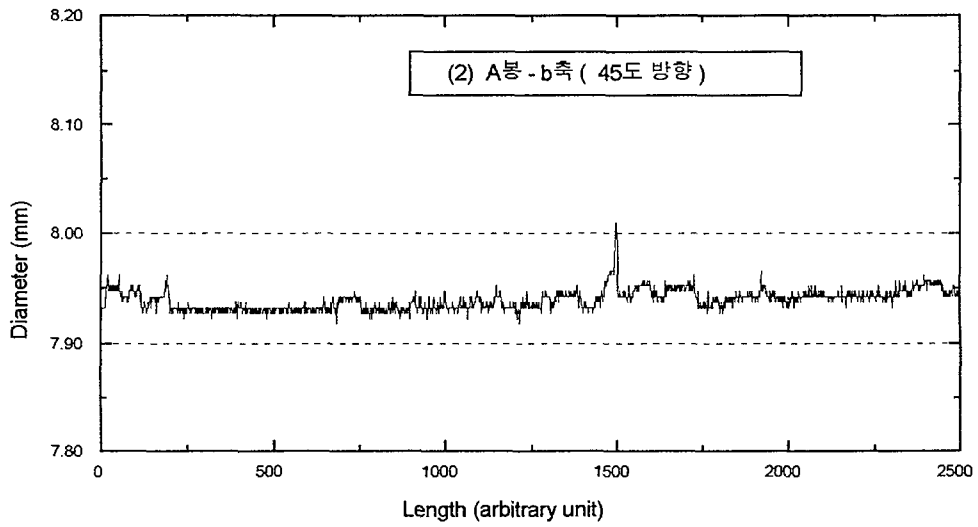
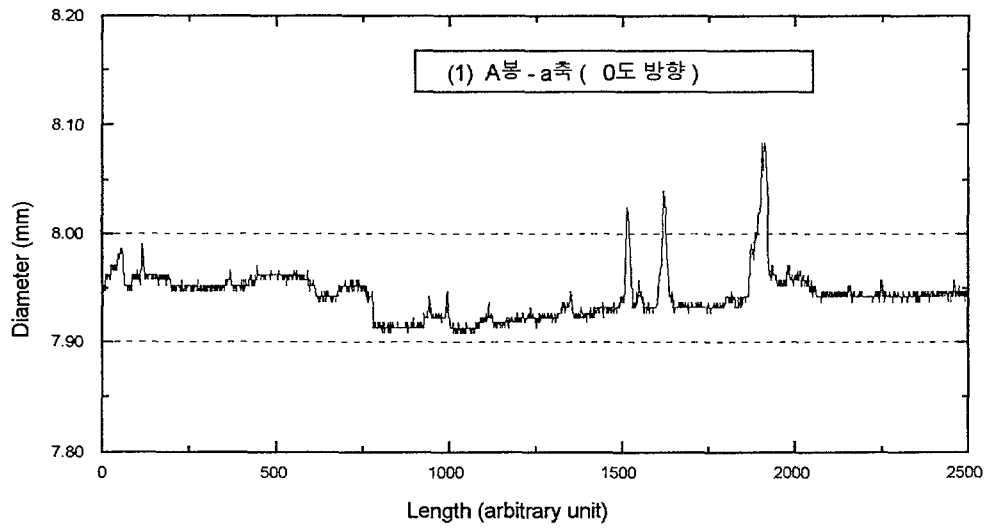


그림 7 모의 연료봉(A)에 대한 직경측정 결과.

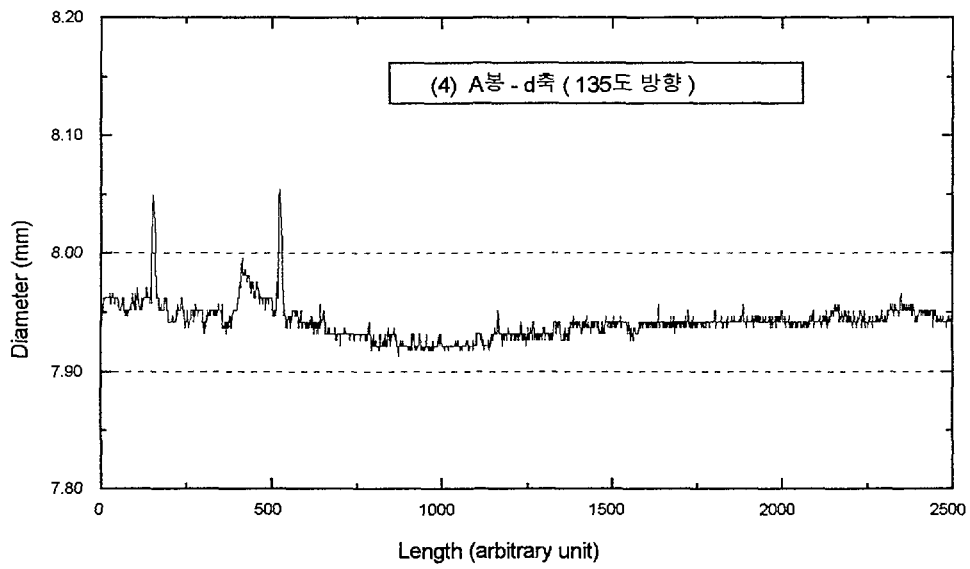
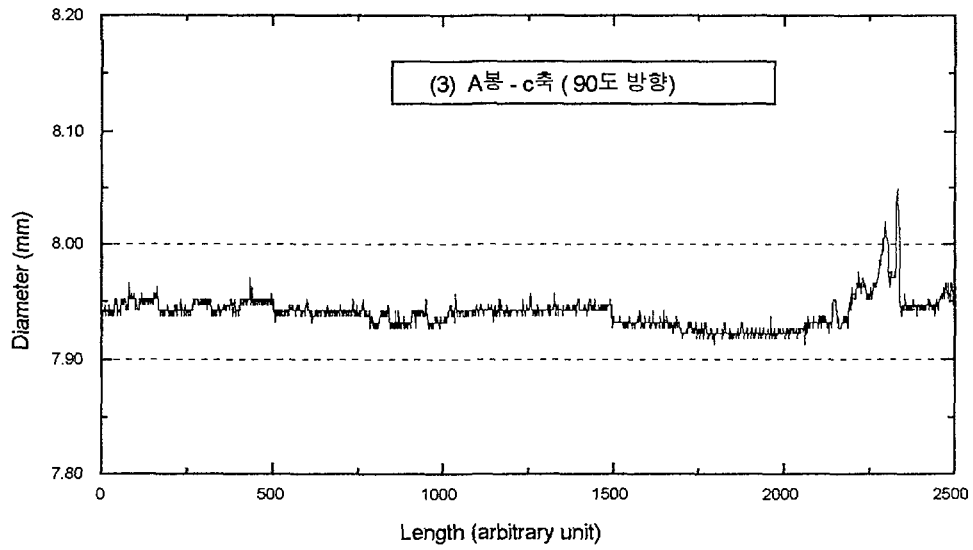


그림 8 모의 연료봉(A)에 대한 직경측정 결과.

그림 7과 8의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 각 축에 대하여 620 mm를 2500회 구간으로 나누어 측정.
- (2) 각 축에 대한 측정값은 다음 표와 같다.

측정대상	평균직경(mm)	표준편차(mm)
A봉 - a축	7.943	0.021
A봉 - b축	7.939	0.009
A봉 - c축	7.942	0.015
A봉 - d축	7.940	0.014

- (3) 최대 표준편차가 0.021 mm로 양호한 측정값을 보여준다.

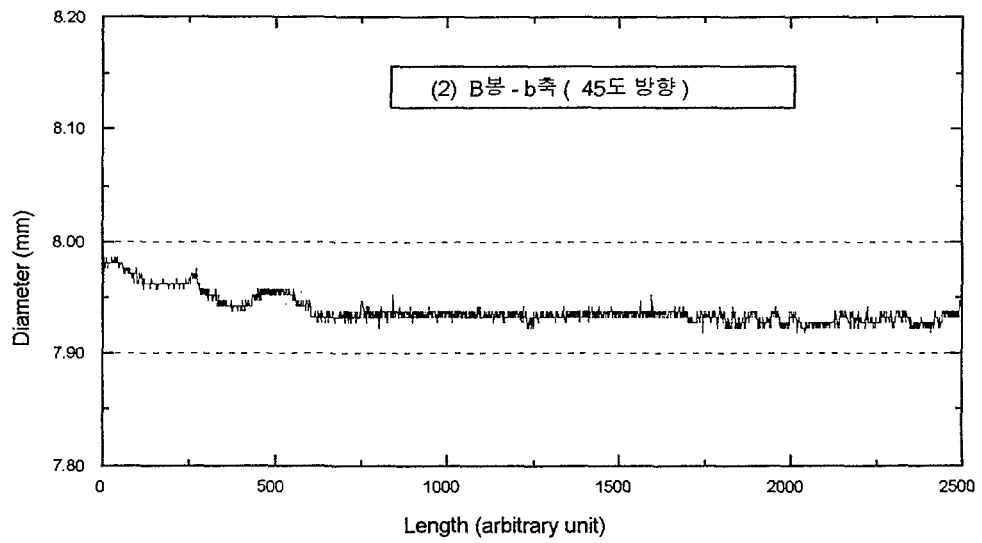
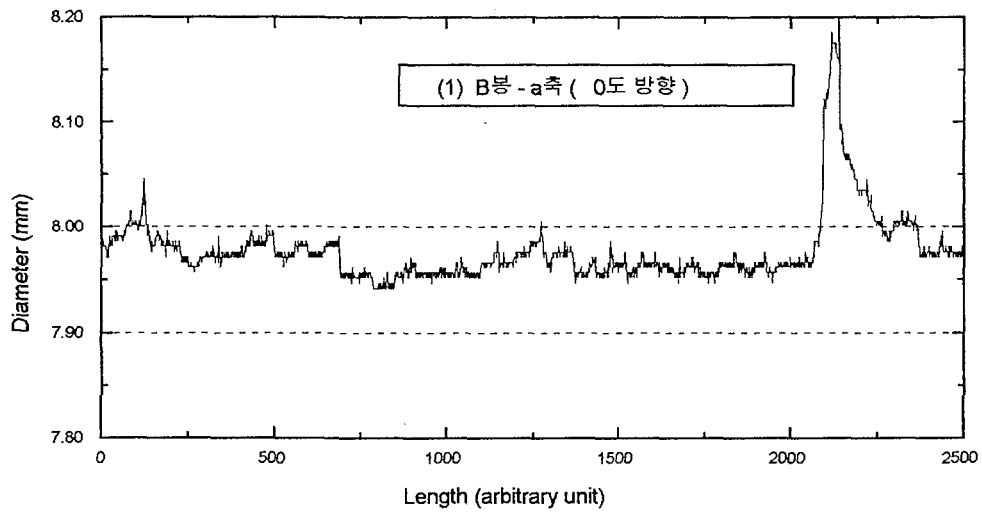


그림 9 모의 연료봉(B)에 대한 직경측정 결과.

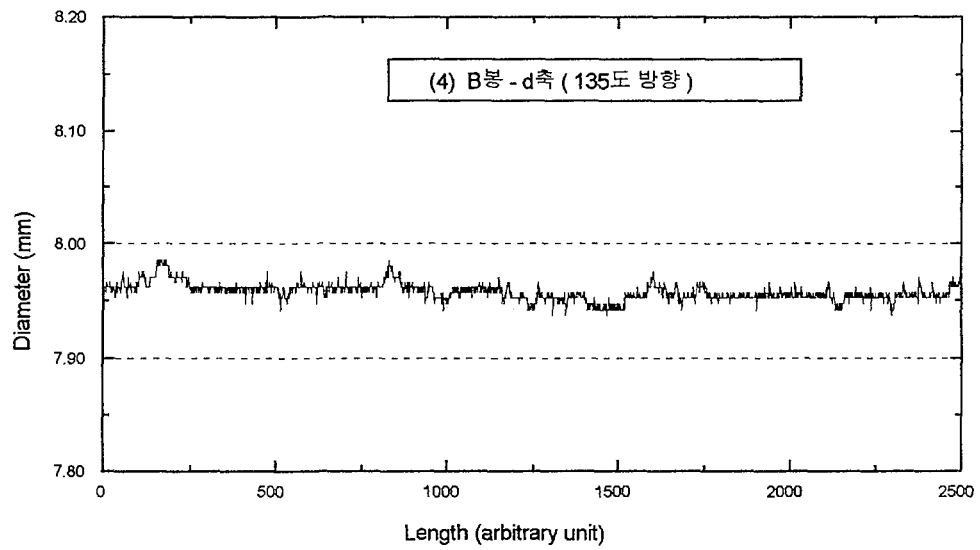
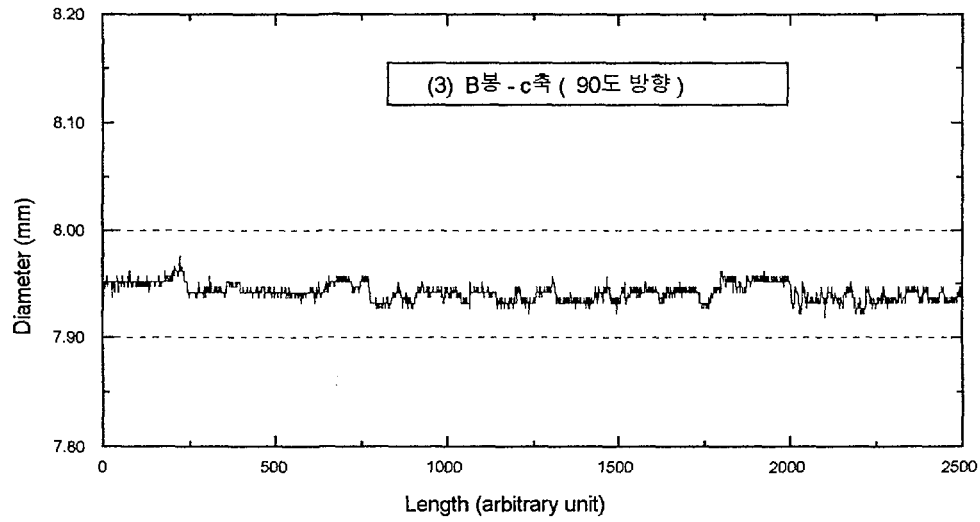


그림 10 모의 연료봉(B)에 대한 직경측정 결과.

그림 9과 10의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 각 축에 대하여 620 mm를 2500회 구간으로 나누어 측정.
- (2) 각 축에 대한 측정값은 다음 표와 같다.

측정대상	평균직경(mm)	표준편차(mm)
B봉 - a축	7.977	0.032
B봉 - b축	7.938	0.013
B봉 - c축	7.942	0.008
B봉 - d축	7.957	0.008

- (3) B봉 - a축의 측정값을 제외하고 양호한 측정값을 보여준다.

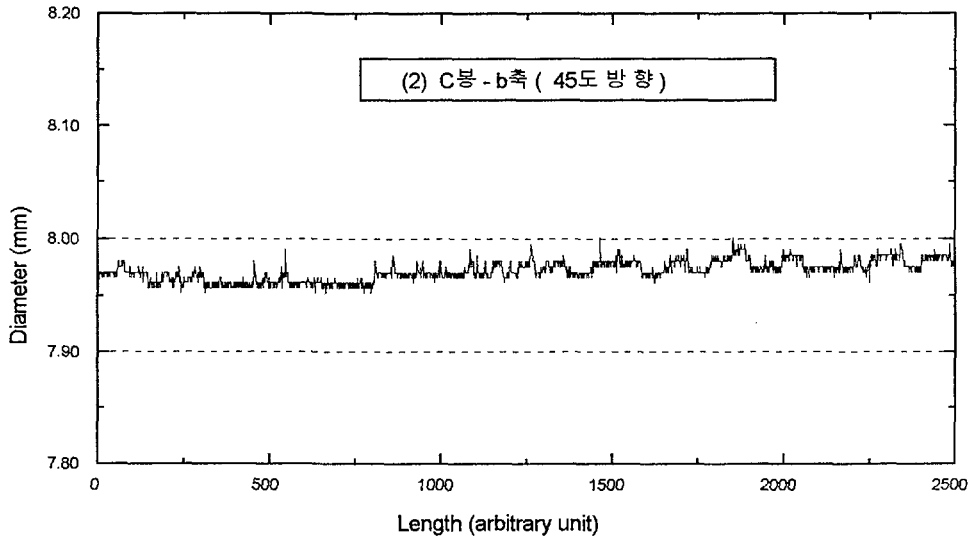
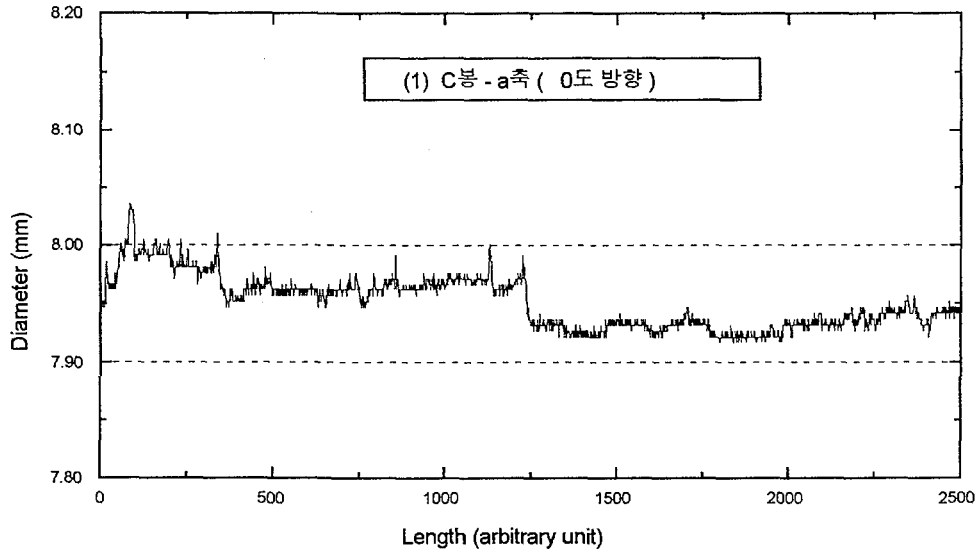


그림 11 모의 연료봉(C)에 대한 직경측정 결과.

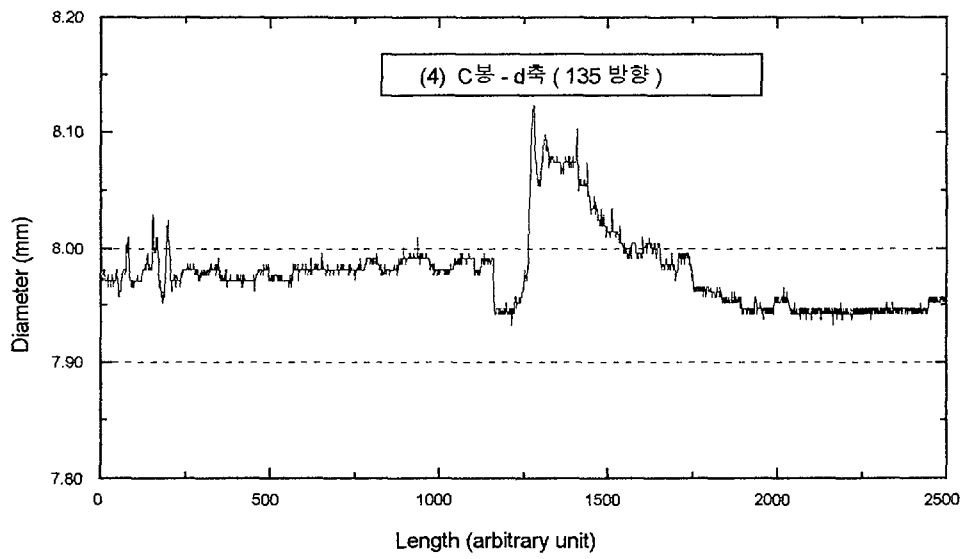
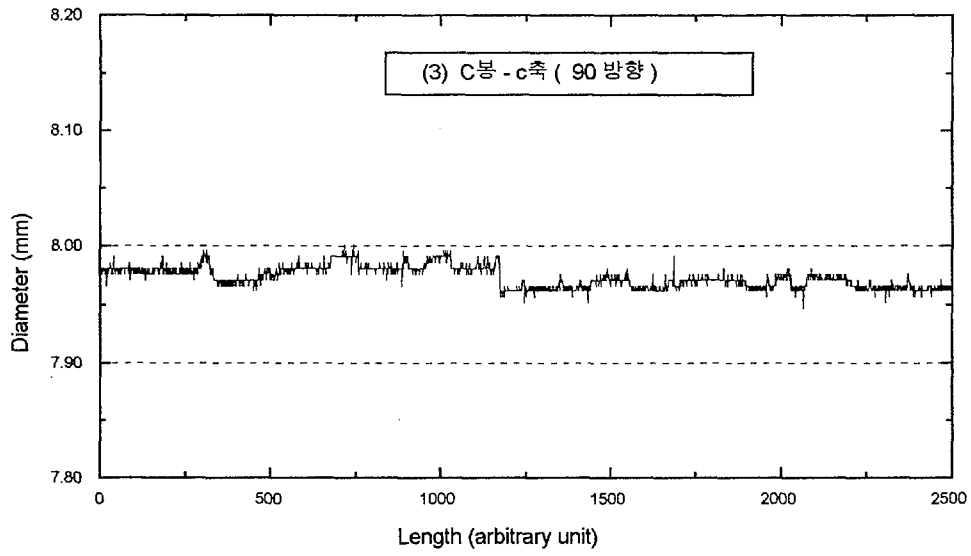


그림 12 모의 연료봉(C)에 대한 직경측정 결과.

그림 11과 12의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 각 축에 대하여 620 mm를 2500회 구간으로 나누어 측정.
- (2) 각 축에 대한 측정값은 다음 표와 같다.

측정대상	평균직경(mm)	표준편차(mm)
C봉 - a축	7.951	0.022
C봉 - b축	7.972	0.009
C봉 - c축	7.973	0.009
C봉 - d축	7.978	0.065

- (3) C봉 - d축을 제외하고 양호한 측정을 보여준다. d축의 경우 측정 기준점 으로부터 300 mm 떨어진 부분에 과대평가된 부분이 존재하는 데 이에 대한 추가검사가 필요하다고 본다.

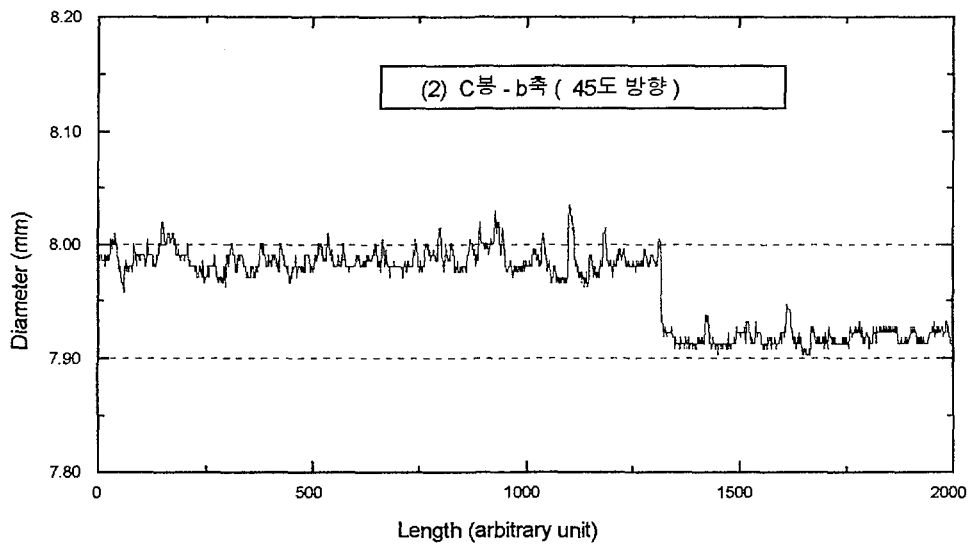
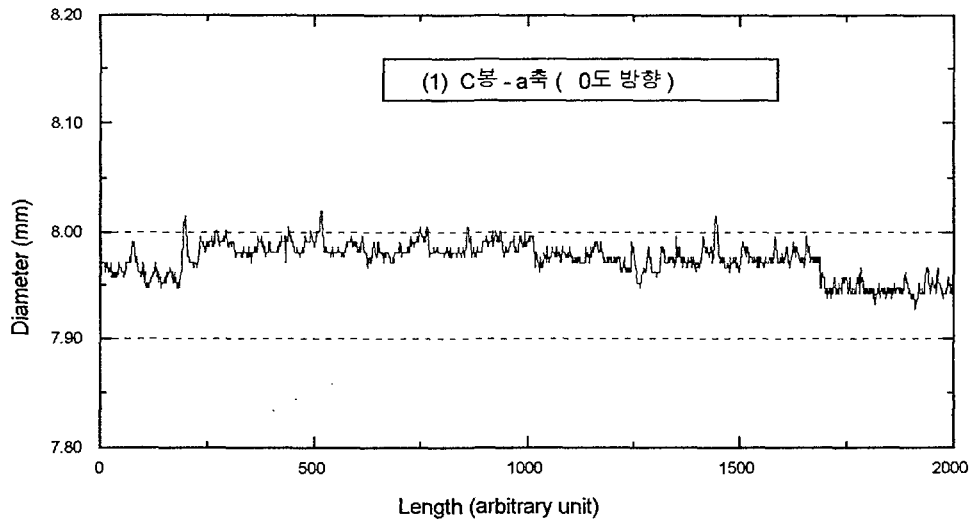


그림 13 모의 연료봉(C)을 재측정한 결과.

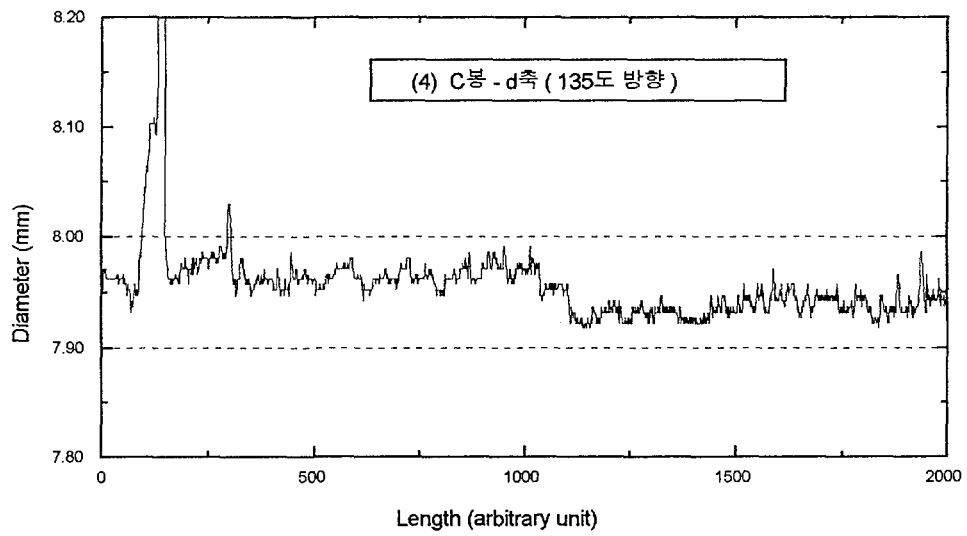
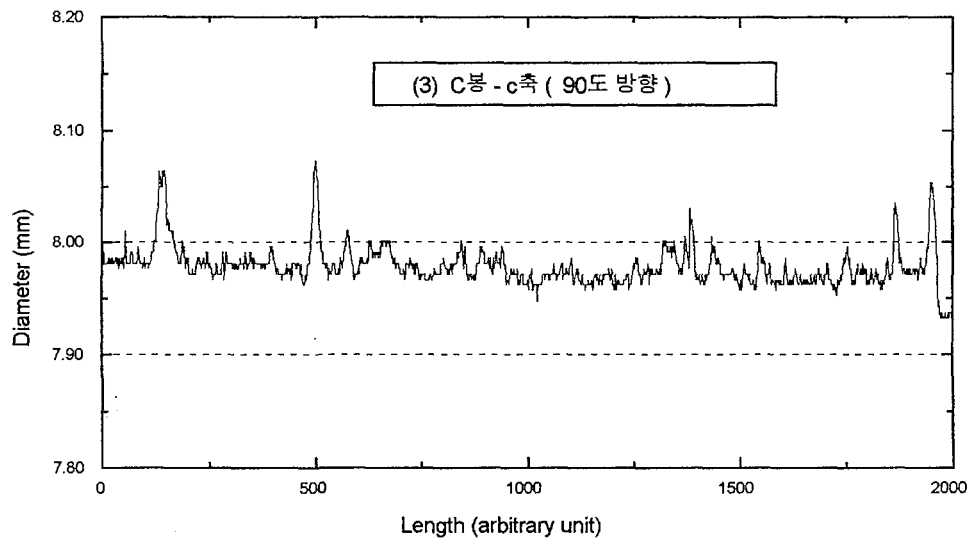


그림 14 모의 연료봉(C)을 재측정한 결과.

그림 13와 14의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 각 축에 대하여 475 mm를 2000회 구간으로 나누어 측정.
- (2) 각 축에 대한 측정값은 다음 표와 같다.

측정대상	평균직경(mm)	표준편차(mm)
C봉 - a'축	7.974	0.016
C봉 - b'축	7.963	0.034
C봉 - c'축	7.978	0.018
C봉 - d'축	7.959	0.057

- (3) C봉을 재측정한 값으로써 전체 평균값은 앞서 그림 11와 12의 측정 결과값의 0.02 mm 범위에 포함되는 재측정값을 보여준다.

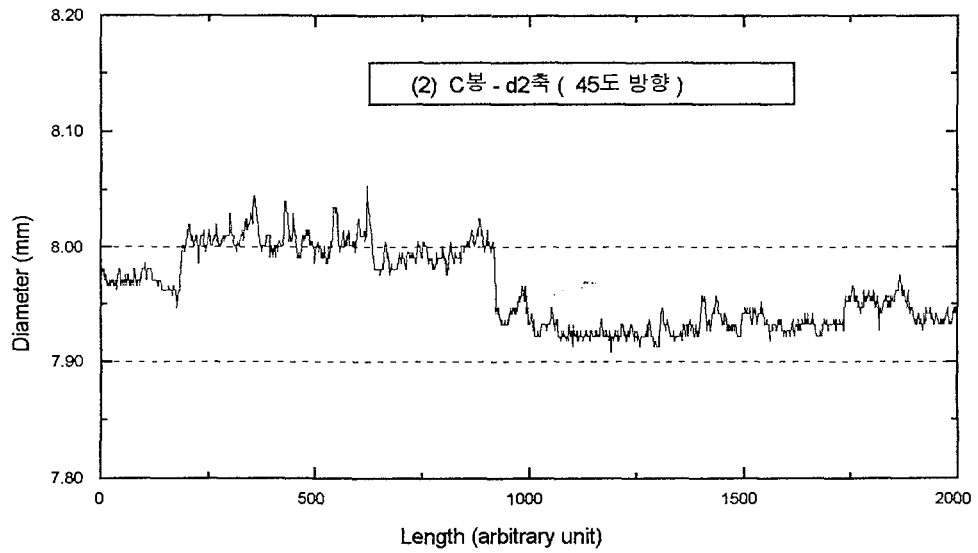
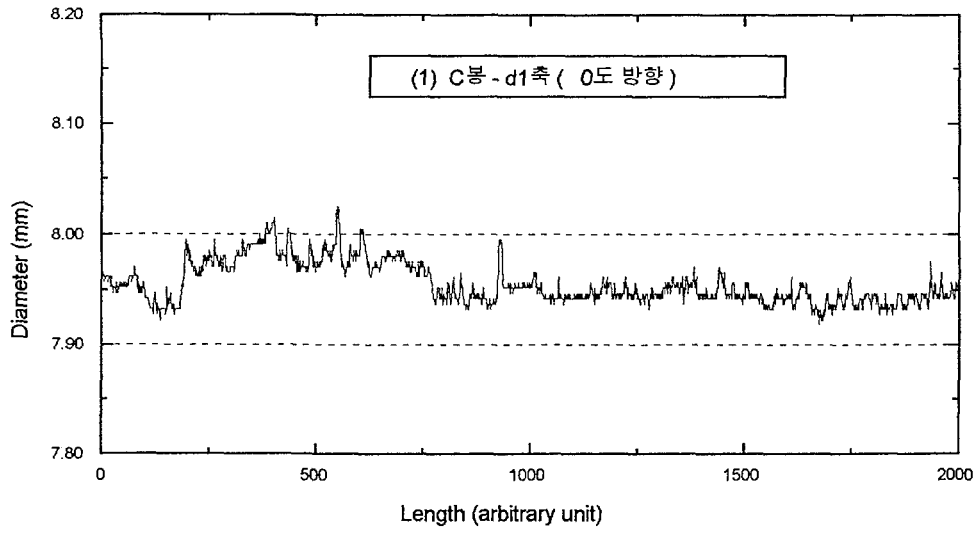


그림 15 모의 연료봉(C)의 d축을 재측정한 결과(1).

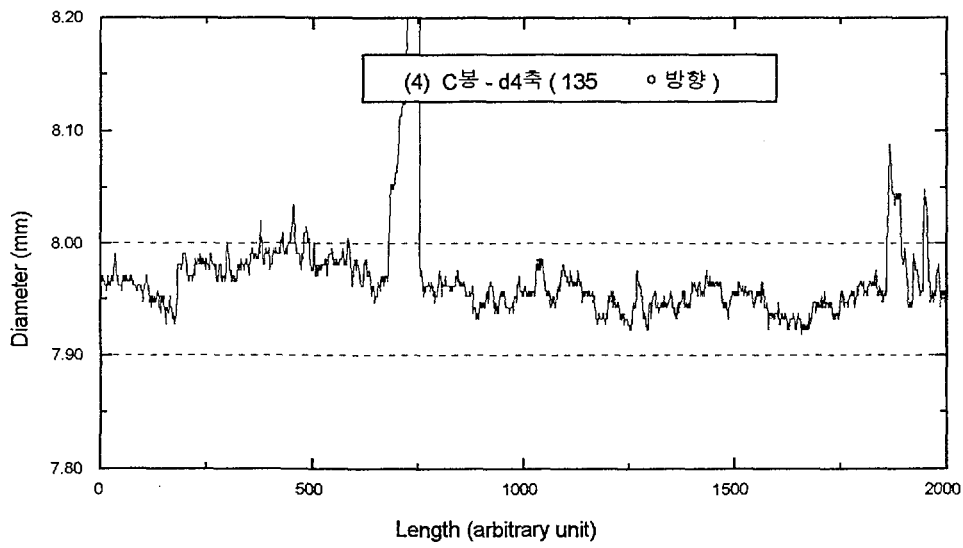
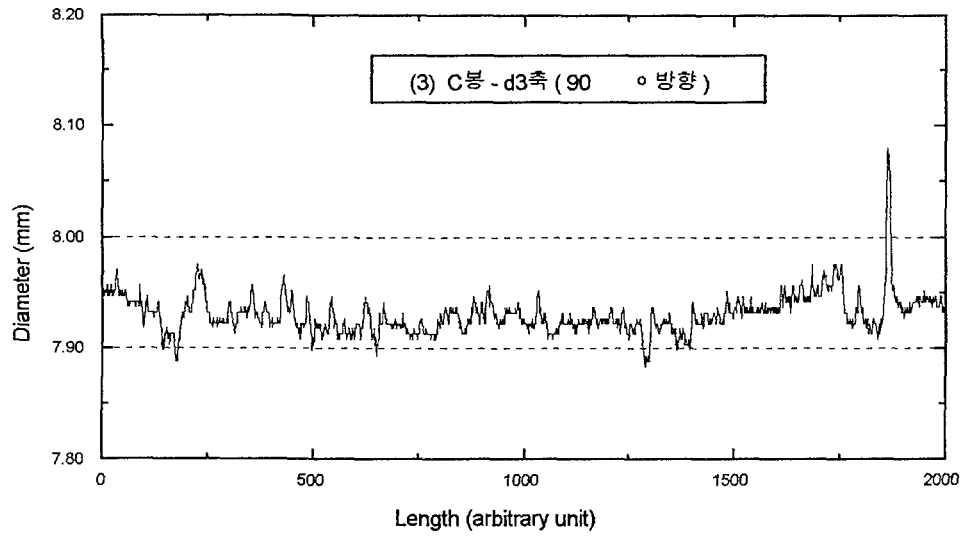


그림 16 모의 연료봉(C)의 d축을 재측정한 결과(2).

그림 15와 16의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 각 축에 대하여 475 mm를 2000회 구간으로 나누어 측정.
- (2) 4회 측정에 대한 각각의 측정값은 다음 표와 같다.

측정대상	평균직경(mm)	표준편차(mm)
C봉 - d1축	7.956	0.018
C봉 - d2축	7.963	0.034
C봉 - d3축	7.931	0.018
C봉 - d4축	7.973	0.077

- (3) C봉 - d축을 4회에 걸쳐 재측정하였다. 앞서 그림 12의 d축 (135도 방향)과 그림 14의 d'축(135도 방향)의 측정 결과값과 비교할 때 0.02 mm 범위에 포함되는 재측정값을 보여준다.

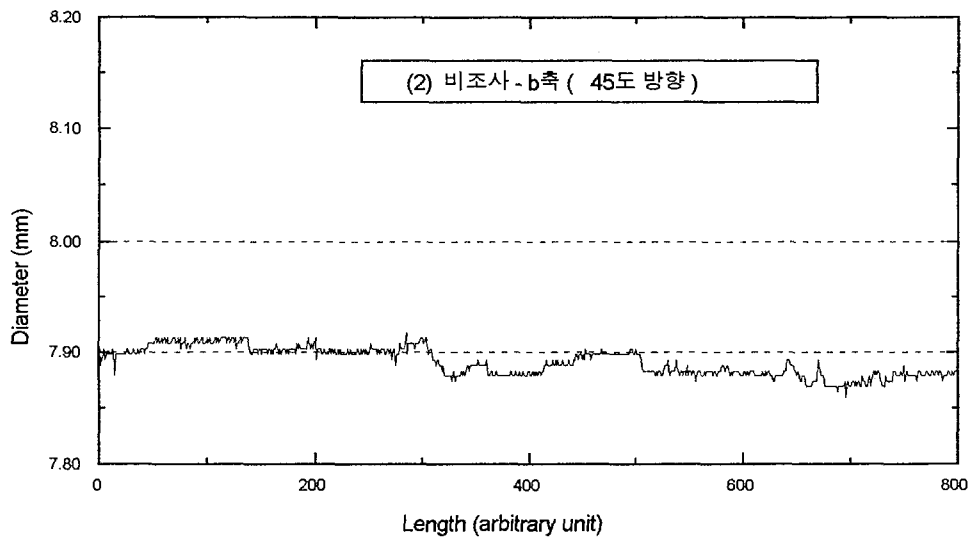
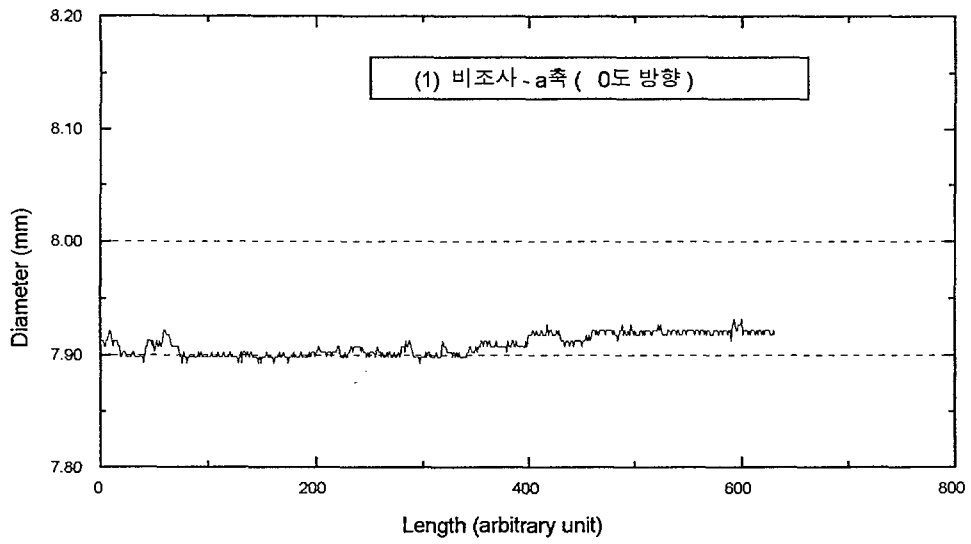


그림 17 비조사 연료봉에 대한 직경측정 결과(1).

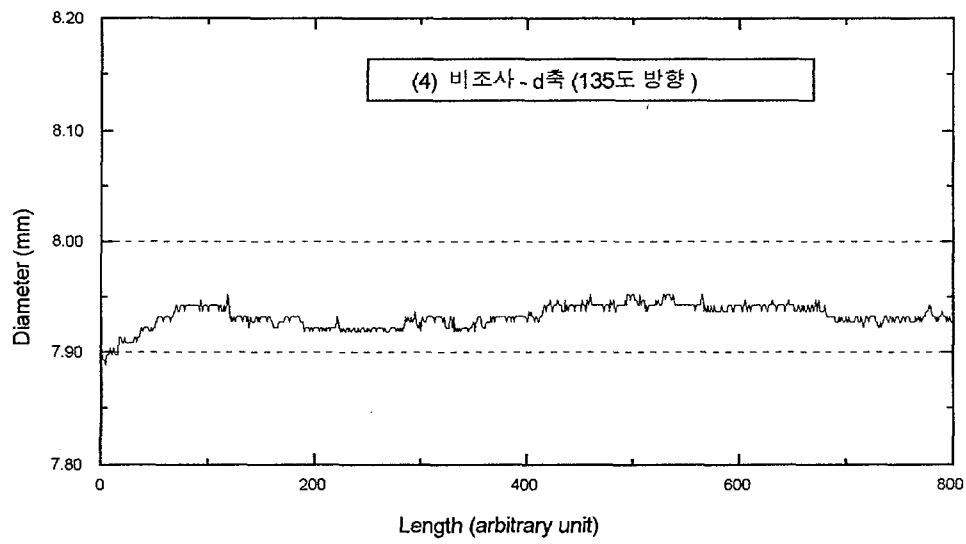
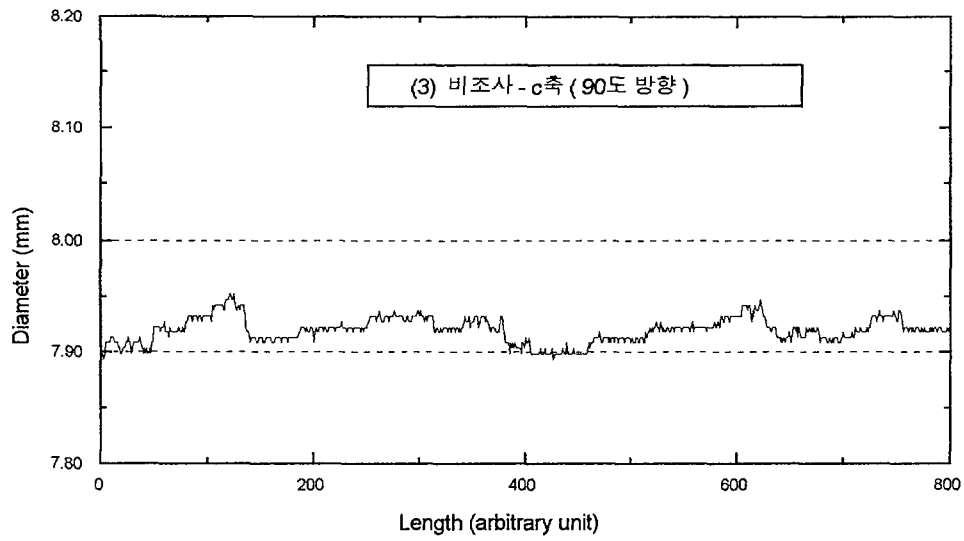


그림 18 비조사 연료봉에 대한 직경측정 결과(2).

그림 17과 18의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 비조사 연료봉 a축의 경우 150 mm 구간을 측정, 나머지는 200 mm 구간을 측정.
- (2) 각 축에 대한 측정값은 다음 표와 같다.

측정대상	평균직경(mm)	표준편차(mm)
비조사 - a축	7.909	0.009
비조사 - b축	7.891	0.012
비조사 - c축	7.919	0.011
비조사 - d축	7.932	0.010

- (3) 조사된 모의 연료봉의 표준편차보다 더 적은 최대 0.012 mm 표준편차 범위내에서 직경의 평균값도 고른 분포를 나타내고 있다.

비조사봉 4회 측정 평균

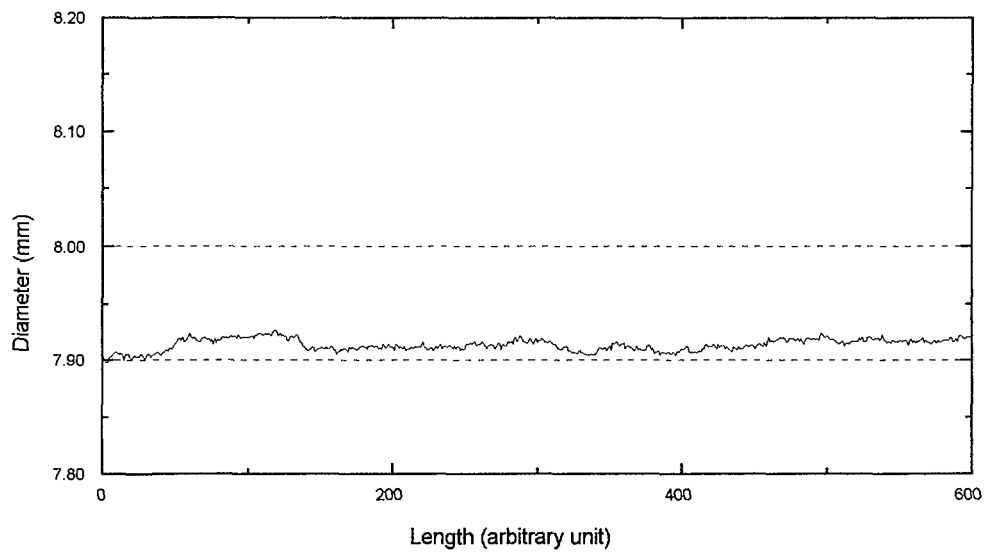


그림 19 비조사 연료봉의 4개측 측정값들의 평균.

하나로비조사연료

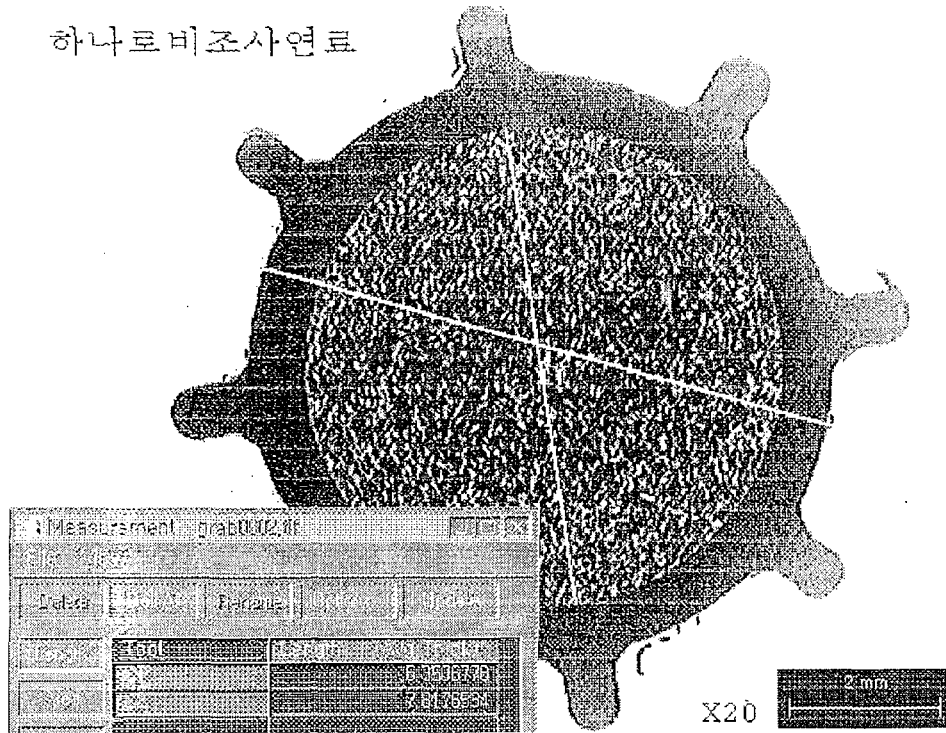


그림 20 현미경을 이용한 직경 측정.

위의 그림 20은 비조사 핵연료봉을 절단한 단면을 현미경 촬영한 것이다. 그림에서 짧게 표시된 직경(L1)은 피복관 내부의 직경이고 길게 표시된 직경(L2)는 피복관 외부의 직경으로써 LVDT로 측정되는 직경이다. 현미경의 길이측정을 위해서 준비된 교정용 마이크로 미터기의 불확도는 0.005 mm 이내이다. 현미경 측정값과 비조사 연료봉의 측정값으로부터 교정된 모의 연료봉의 직경측정값이 표 4에 있다. 교정인자에 대한 표준편차가 LVDT측정값의 표준편차와 비교하여 상대적으로 작으므로 교정값에 대한 표준편차는 LVDT의 표준편차값과 동일한 것으로 보고 따로 계산하지 않았다.

표 4 현미경으로 교정된 모의 연료봉의 직경측정 결과.

측정대상	평균직경 (mm) (LVDT)	교정된 값(mm)
A봉 - a축	7.943	7.848
A봉 - b축	7.939	7.844
A봉 - c축	7.942	7.847
A봉 - d축	7.940	7.845
B봉 - a축	7.977	7.882
B봉 - b축	7.938	7.843
B봉 - c축	7.942	7.847
B봉 - d축	7.957	7.861
C봉 - a축	7.951	7.855
C봉 - b축	7.972	7.877
C봉 - c축	7.973	7.878
C봉 - d축	7.978	7.883
C봉 - a'축	7.974	7.879
C봉 - b'축	7.963	7.868
C봉 - c'축	7.978	7.883
C봉 - d'축	7.959	7.864
C봉 - d1축	7.956	7.861
C봉 - d2축	7.963	7.868
C봉 - d3축	7.931	7.836
C봉 - d4축	7.973	7.878

2. 하나로 핵연료 길이측정

길이측정은 3가지 시료에 대해서 수행되었다. 즉, 비조사 하나로 핵연료다발, 조사된 하나로 모의 핵연료다발, 그리고 비조사 하나로 핵연료봉에 대해서 수행되었으며 각각의 결과는 다음과 같다.

가. 비조사 하나로 핵연료다발 길이측정 결과

횟수 위 치	0도	60도	120도	180도	240도	300도
1	735.91	736.35	735.75	736.23	736.36	736.32
2	736.11	736.20	736.42	736.54	736.75	736.37
3	736.22	736.17	736.60	736.50	736.45	736.95
4	735.85	735.93	736.81	736.51	736.55	736.33
5	735.61	736.16	736.80	736.60	736.98	736.27
6	736.33	736.86	736.54	736.61	736.51	736.53
7	735.78	736.10	736.26	736.90	736.60	736.50
평균	735.97	736.25	736.45	736.56	736.60	736.47
표준편차	0.26	0.30	0.37	0.20	0.21	0.23
표준오차	0.10	0.11	0.14	0.07	0.08	0.09

표 5 비조사 하나로 핵연료다발 길이측정 결과.

나. 하나로 조사후 모의 핵연료다발의 길이측정 결과

횟수 \ 위치	0도	60도	120도	180도	240도	300도
1	736.46	736.12	736.52	736.60	736.27	736.63
2	736.15	736.49	736.54	736.40	736.43	736.49
3	735.65	735.92	736.37	736.40	736.33	735.96
4	736.20	736.17	736.33	736.25	736.57	736.60
5	735.74	736.24	736.25	736.14	736.36	736.04
6	736.08	736.22	736.45	736.17	736.65	736.44
7	735.99	736.11	736.17	736.30	736.30	736.31
평균	735.89	736.18	736.38	736.32	736.42	736.35
표준편차	0.28	0.17	0.14	0.16	0.14	0.26
표준오차	0.11	0.06	0.05	0.06	0.05	0.10

표 6 하나로 조사후 모의 핵연료다발의 길이측정 결과.

위에서 0도와 60도 위치에 있는 연료봉들은 과거 연료다발 취급시 손상된 연료봉이다.

다. 하나로 연료봉의 길이측정

횟수 \ 구분	1군	2군
1	735.84	735.62
2	735.49	735.84
3	735.56	735.68
4	735.79	735.74
5	735.97	735.82
6	735.83	735.86
7	735.31	735.80
8	735.62	735.96
9	735.73	735.90
10	735.36	735.77
평균	735.65	735.80
표준편차	0.22	0.10
표준오차	0.07	0.03

표 7 하나로 비조사 연료봉 길이 측정결과.

위 측정결과에서 1군은 연료봉 하단의 K224 글자가 정면으로 보일 때 측정한 것이고, 2군은 이 위치에서 +180도 회전후 측정한 값이다.

제 3 장 결론

하나로 모의 핵연료의 직경측정 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, Calibration을 위한 표준 시험봉은 PWR 연료봉을 측정하기 위한 측정 probe을 위해서 마련된 것으로 지금의 하나로 연료봉을 위한 측정 probe을 calibration 하는데는 불편하다. 따라서 하나로 연료봉을 위해서는 지금의 원통형이 아닌 사각면을 갖는 표준 시험봉을 사용하는 것이 편리할 것이다.

둘째, 연속적으로 길이측에 따라 측정한 각연료봉의 직경을 보면 여러곳에서 갑자기 직경값이 0.10 mm 이상 변하는 곳이 있다. 이것은 실제의 연료봉 직경값의 변화보다는 측정 측정 probe이 하나로 연료봉의 fin에 걸려서 생기는 것 같다. 이것은 현재의 측정시스템으로는 피할 수 없는 것이다. 따라서 이러한 곳에서는 측정후 육안 검사나 기타의 방법으로 추가적인 검사가 수행되어야 할 것이다. 그리고 연료봉과 접하는 측정 probe 의 접촉면의 모양도 개선되어야만 한다.

셋째, LVDT를 사용한 비조사 핵연료봉의 측정 결과와 비조사 핵연료봉을 절단하여 현미경 촬영을 통한 직경측정값을 비교해 보았다. 본 측정장치로 비조사 핵연료봉을 4개 축에 대한 직경측정의 평균값은 7.913 mm이고, 현미경 촬영을 통한 절단면의 1회 직경 측정값은 7.818 mm이다. 앞서 언급한대로 본 측정장치의 표준 시험봉의 부적절함과 측정 probe과 fin 사이의 불안정성을 고려하면 본 측정장치의 값이 현미경을 이용한 측정값으로 교정되어야만 한다. 이렇게 교정된 값이 측정결과 10에 실려 있다.

넷째, 측정값에서 알 수 있듯이 현재의 측정장치가 전체 핵연료봉에 대한 평균값을 측정하는 용도로는 0.05 mm의 통계적 불확도내에서 적절하다고 본다. 하지만 핵연료봉에서 입의의 위치에 대한 직경값을 구하기 위한 용도로 본 측정장치를 사용하기에는 측정 probe 장치의 개선없이 부적절하다고 생각된다.

한편, 하나로 핵연료에 길이측정의 결과로부터는 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 길이측정 과정에서 PLC 눈금의 불확도, 망원경과 연료 다발 및 연료봉 사이의 수평도, 그리고 망원경을 통한 개인의 눈금 읽기

등의 불확도를 고려하면 총불확도는 ± 0.65 mm로 추정된다. 또한 비조사 핵연료다발의 측정결과 (최저=735.97, 최고=736.60 mm)와 비교할 때 조사된 모의 핵연료다발의 경우 조사전후의 길이변화는 총불확도내에서 없는 것으로 판단 된다.

결론적으로 하나로 핵연료에 대한 직경측정 방법이 개발되었으며, 이를 이용한 하나로 핵연료봉에 대한 직경측정과 길이측정의 결과 핵연료봉의 단면적을 원으로 가정할 경우 핵연료봉의 체적($Q = \pi r^2 L$)은 0.6%의 상대적인 불확도($\Delta Q/Q$)내에서 측정된다고 볼 수 있다.

참고문헌

1. 이기순, “조사공학”, 문경출판사 (1997).
2. “System 10 Guidebook”, Daytronic Co. Part No. 92000 (1986).

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR -1098/98			
제목 / 부제	하나로 핵연료에 대한 찻수측정 기술개발		
연구책임자 및 부서명 (AR,TR일 경우 주저자)	김태연, 조사재시험시설		
연구자 및 부서명	이기순, 박대규, 주용선, 안상복		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	43 p.	도표	있음(O), 없음()
발행년	1998	크기	26 Cm.
참고사항			
비밀여부	공개(O), 대외비(), 급비밀	보고서종류	기술보고서
연구위탁기관		계약번호	
초록 (15-20줄내외)	<p>핵연료봉은 원자로에서 중성자 조사 또는 고압의 가혹한 조건에서 사용되므로 사용중에 찻수의 변화가 생기게 된다. 만약에 찻수의 변화가 크게 일어나면 안정성에 문제가 생기게 된다. 그러므로 연료봉의 원자로내 사용에 따른 연료봉의 직경변화와 길이변화 등 찻수변화에 관한 자료는 핵연료의 설계는 물론 건전성 평가에 대단히 중요한 자료가 된다. 핫셀에서 하나로 핵연료봉의 형태를 가지면서 핵연료가 들어있지 않은 모의 연료봉에 대한 직경측정을 하였다. 그리고 하나로 핵연료다발 및 핵연료봉의 종방향 길이측정도 하였다. 모의 핵연료를 이용하여 하나로 핵연료의 찻수측정 방법이 개발되었다. 이러한 예비시험 결과는 하나로 핵연료봉의 체적변화를 0.6%의 통계적 불확도 내에서 측정할 수 있는 결과를 보여주었다.</p>		
주제명키워드 (10단어내외)	하나로, 핵연료, 찻수측정, 핫셀, 연료다발, 연료봉, 모델 10KU-KD		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No. INIS Subject Code	
KAERI/TR-1098/98					
Title / Subtitle		Development of the method for the dimensional measurement of the HANARO nuclear fuel			
Project Manager and Department (or Main Author)		Tae Yeon Kim, Irradiation Material Examination Facility(IMEF)			
Researcher and Department		K. S. Lee, D. G. Park, Y. S. Choo, S. B. Ahn (IMEF)			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	1998
Page	43 p.	Ill. & Tab.	Yes(O), No ()	Size	26 Cm
Note					
Classified	Open(O), Restricted()		Report Type		
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)					
<p>Dimension of the nuclear fuel is altered in nuclear reactor because of the neutron exposure with high pressure water. If the deformation is overlarge, the severe problem in safety of the nuclear fuel and the reactor come about. Therefore the accurate dimensional data of the nuclear fuel in diameter and length is very important for the design of the nuclear fuel and the estimation of the nuclear safety. Measurement of diameter for the dummy HANARO fuel rod which has not filled with real fuel material was carried out in hotcell. And also the length of the HANARO fuel assembly and the rod are measured. Dimensional measuring method for the HANARO fuel was delveloped. The test result show our method is good enough to distinguish change in volume with statistical uncertainty of 0.6 %.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		HANARO, Nuclear Fuel, Dimensional measurement, Hotcell, Fuel Assembly, Fuel Rod, LVDT, Model 10KU-KD,			