

**技術報告**

**CANDU 발전소의 핵연료 압력관 검사**

정현규 박대영

한국에너지연구소

1986년 10월 24일 접수

**Pressure tube Inspection Technology for CANDU Reactors**

H. K. Jung, D. Y. Park

**1. 서 론**

원자력발전소가 우리나라에 도입된 이래 아직까지 큰 사고없이 운전되고 있어 산업 전반에 걸친 파급효과가 매우 컸다.

현재 우리가 보유하고 있는 핵발전소는 대부분 가압경수로(PWR)형으로서 원자로 압력용기(Reactor Pressure Vessel) 내에서 핵분열을 유도시키고 있지만 월성 CANDU형 가압 중수로(PHWR)에서는 원자로 압력용기 대신 핵연료관(Fuel Channel)에서 그 역할을 담당하고 있다. (그림 1 참조)

Fuel Channel 중에서 핵물질과 직접 접촉하고 있는 압력관(Pressure Tube)는 표 1에서 알 수 있듯이 방사능 유출에 관계되는 1차계통에서는 가장 높은 비가동인자임을 나타내 주고 있으므로 중수로 발전소의 어느 타 부품보다도 안정성이 요구되고 가동률 향상에도 막대한 영향을 미치기 때문에 CANDU형 발전소에서 가장 중요하다고 할 수 있다.(그림 2 참조)

압력관 검사는 월성 핵발전소의 가동전 검사시에만 해도 견식방법으로 수행되었으나 가동중 검사시에는 고 방사능 작업조건

**표 1. LIFETIME INCAPABILITY TO 1981, Dec. 31 4 Unit Years**

CAUSE OF INCAPABILITY TO		PICKERING GS 'A' INCAPABILITY (%)
ON-POWER FUELING	} 1차 계통	0.8
FUEL		0.1
HEAT TRANSPORT PUMPS		0.2
PRESSURE TUBES		4.9
BOILERS		0.5
TURBINE AND GENERATORS		5.8
INSTRUMENTATION AND CONTROL		0.7
HEAT EXCHANGERS		0.9
VALVES		0.4
OTHER		5.6
TOTAL INCAPABILITY		19.9

$$\text{INCAPABILITY FACTOR \%} = \frac{\text{ENERGY NOT PRODUCED DUE TO EQUIPMENT INCAPABILITY IN PERIOD}}{\text{PERFECT PRODUCTION IN PERIOD}} \times 100$$

( $\gamma$ -선)경우 $10^6\text{R/hr}$ 이상)이므로 이전 장비로는 접근성 및 방사선 피폭 문제등을 해결할 수 없어서 최근 캐나다 Ontario Hydro가 주축이 되어 CIGAR(Channel Inspection & Gauging Apparatus for Reactors)장비를 개발하였다.

이 장비는 컴퓨터를 이용하여 원격 자동 조정 및 자료 분석하여 검사의 재현성을 높이고 검사시간을 단축시킴으로써 압력관의 전장 체적검사, 내경 및 두께검사, 처짐(Sag)검사, 가터 스프링(Garter Spring) 위치측정을 수행하고 있다.

## 2. 압력관 검사 장비(CIGAR) 설계시 고려사항

CIGAR 장비를 개발하여 압력관 검사를 수행하고자 한 목적으로는 규제기관(AECB) 요구사항을 만족시키고, 압력관 수명예측에 필요한 가동 조건을 감시하며, 압력관 가동 중 수명 연장에 필요한 조치에 관한 정보 수집 및 미래 원자로에 대한 설계 관련 자료 수집등이다.

이외에도 압력관 검사시 발전소 가동에 관련된 사항을 요약하면

- 검사시 요구되는 Outage 기간 단축
- 검사자의 방사능 피폭 감소
- 열전달 계통의 온도 하강과 감압상태로써 Shutdown 원자로에 적용
- 핵연료를 압력관에서 제거하지만 중수는 채워진 상태로 검사가 수행되어 Feeder tube 을 isolation시킬 필요가 없다.
- Containment 밖에서 원격 조정 장치 로서 조작
- 검사 Head 가 압력관에 들어 있을때 원격 조정판에서 즉시 검사 정보 및 자료 수집

- 차후 검사시 비교하기 위해 기록 자료 제공
- 어느 형태의 중수로든지 현장 장비의 큰 변경없이 적용가능 등이다.

## 3. CIGAR 장비 및 검사기능

CIGAR 장비 구성은 크게 몇가지로 구분되는데, 신호 탐지 기능을 지닌 검사 Head, Fueling Machine Bridge 에 장착되어 검사 Head 를 직진 또는 회전운동 시켜주는 구동장치, 구동장치와 검사 Head 를 연결시켜 주는 connector rod 와 이것의 Sealed Penetration 을 가능케 해주는 특수 Closure Plug 구동장치에 전원을 공급해 주기도 하고 원격 조정 장치와의 연결 역할을 하는 근거리 조정장치 및 자료 수집 처리와 화상 처리기능을 지닌 원격조정장치로 그림 3,4에 나타나 있다.

이 장비로서 수행되는 검사 내용은 현재까지 4가지 기능을 가지고 있는데 다른 기능을 추가할 수도 있다. 즉, 초음파 결함 탐지기능, 초음파 게이징 기능, 처짐 측정 기능, 가터 스프링 위치 측정기능 등이다.

### 1) 초음파 결함 탐지 기능

이 계통은 일정 속도의 나선 운동 탐상시 압력관의 결함을 탐지하고 만약 지시부가 발견되면 정밀 탐상을 실시한다. 이때, 기록 및 보고용 설정 기준은 Grass-level-plus 라는 특이한 개념으로 접근하고 있어 CSA N285.4 코드에서 서술된 기준 시험관이 필요없다.

압력관 체적 검사는  $45^\circ$ 회과 초음파 탐촉자가 축방향으로 2개, 원주 방향으로 2개씩 서로 마주보고 있고, 중앙에는 수직탐촉자( $0^\circ$ )가 위치하고 있다. 탐촉자 제원은

직경 9.6 mm, 주파수 10 MHz, 물에서의 집속거리 33 mm, damping 기능이 좋은 것이며 초음파 장비에 의해 연속적으로 주사된다. (그림 5 참조)

검사후에는 장비 조작자가 주 컴퓨터를 사용하여 기록된 아나로그 정보를 처리하여 신호크기대 위치로 화상처리된 Isometric 화면을 제공한다. (그림 6 참조)

2) 초음파 게이징 가능

이 계통은 나선 운동 탐상시 결합 탐지와 동시에 압력관 벽두께 및 직경을 측정한다.

이것은 3개의 초음파 탐촉자에 두께 측정 게이징(CL-204)을 연결하여 사용한다.

2개의 탐촉자는 압력관 직경 선상위에 일정길이 간격으로 반대 방향으로 향하고 있고 나머지 한개는 음속교정을 위해 목표물로 향하고 있다. 그래서 검사 Head가 1 회전시마다 12번씩 고정 목표물까지의 물거리, 압력관 벽까지의 물거리 및 압력관 벽 두께를 측정한다. 수집된 자료는 원격 조정 장치에 전송되어 마이크로 프로세서와 연결 회로가 내경을 계산하고 구동장치 조절 계통에서 얻어진 위치정보와 관련을 맺어 준다. 그림 7에서는 평균 직경과 축 방향 위치와의 최대값, 최소값 및 평균값을 나타내 준다.

3) 처짐(Sag) 측정기능

이 계통은 Inclinator (일종의 Accelerometer) 을 사용하여 축 방향 위치에 따라 압력관의 기울기를 측정하도록 설계되었다. 기울기 및 위치 자료는 일단 기록해 두었다가 검사후 수학적 처리가 되어 Sag Profile을 컴퓨터를 통해 나타내 준다.(그림 8 참조)

4) 가터 스프링 위치측정 기능

수평으로 누운 압력관은 Calandria 관내부 정 중앙에 9 mm의 Annulus Gap 을 가지

고 있으며 가터 스프링 스페이서(Garter Spring Spacer)에 의해 지탱되고 있다.

이 계통은 와전류 시험장비에 의해 나선 운동 탐상이 끝난뒤 후진하면서 절반, 나머지 절반은 처짐 탐상 이후 전진하면서 검사한다. 이때 와전류 신호의 X, Y 성분은 축 방향과 원주방향 위치 정보와 함께 아나로그 테이프 기록계에 수록된다. 검사후 컴퓨터에 의해 자료가 분석되어 가터 스프링 위치가 결정된다. (그림 9 참조)

4. 결 론

CIGAR 검사 장비는 현재 성공적으로 작동되고 있고, 압력관의 건전성 및 가동상태에 관한 중요 정보를 제공해 준다. 또한 이 장비 개발에 관련된 기술 축적으로 차후 원격 자동화해야 할 다른 복잡한 문제도 해결 가능케 한다.

월성 핵발전소는 앞으로 압력관 검사를 수행해야 하기 때문에 여기에 관심있는 분들에게 도움이 되었으면 한다.

참 고 문 헌

1. Improved Pressure Tube Inspection in CANDU Reactors.  
J. A. Baron Dr et. al. Nuclear Engineering International, DEC. 1981, pp. 45-48
2. Pressure Tube Ultrasonic Inspection Philosophy "Grass-level-plus."  
M. D. C. Moles and A. L. L. Allen, Ontario Hydro Report No. M85-34-K, 1985
3. Ontario Hydro Inspection Procedure No. N-03640. 1. 10

4. Wet Channel Inspection Systems for  
CANDU Nuclear Reactors  
(CIAGR and CIGARette).

M. D. C. Modles, M. P. Dolbey and

K. S. Mahil. AECL-8707, pp. 178-193

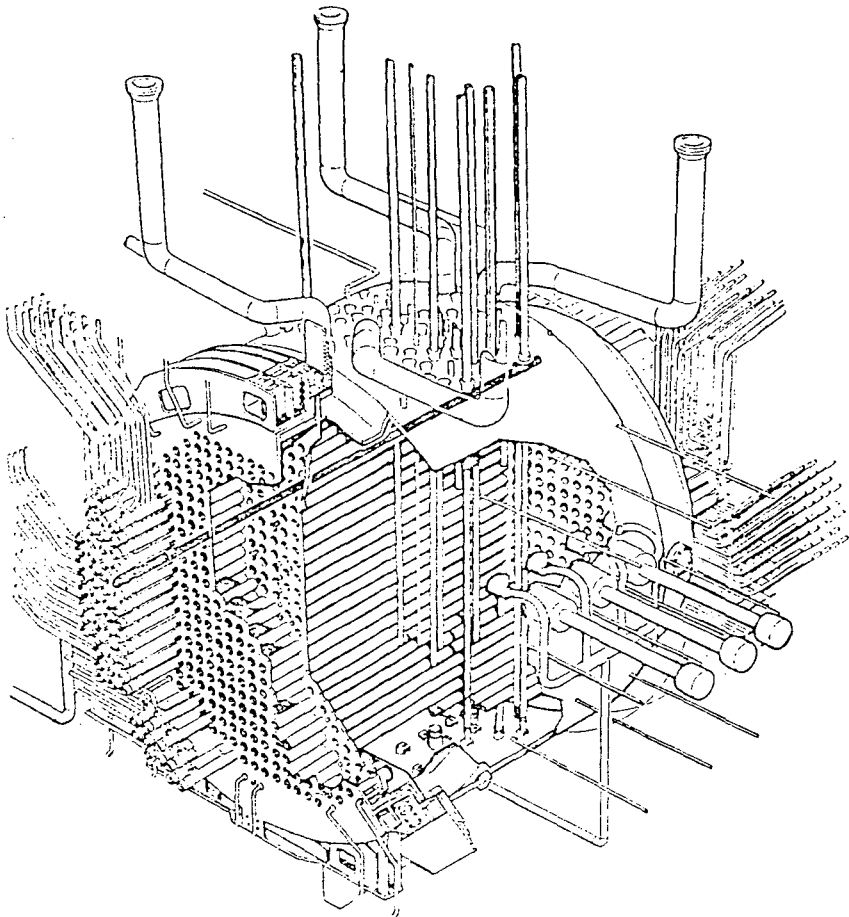


그림 1. CANDU 600 MW REACTOR

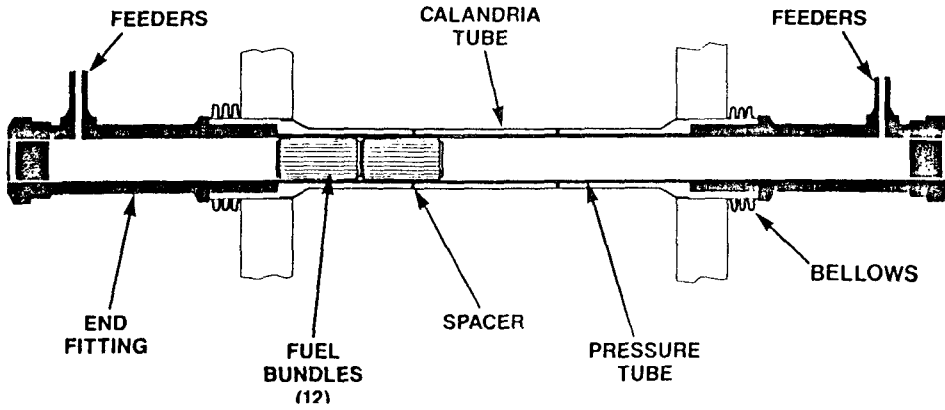


그림 2. SIMPLIFIED DIAGRAM OF FUEL CHANNEL

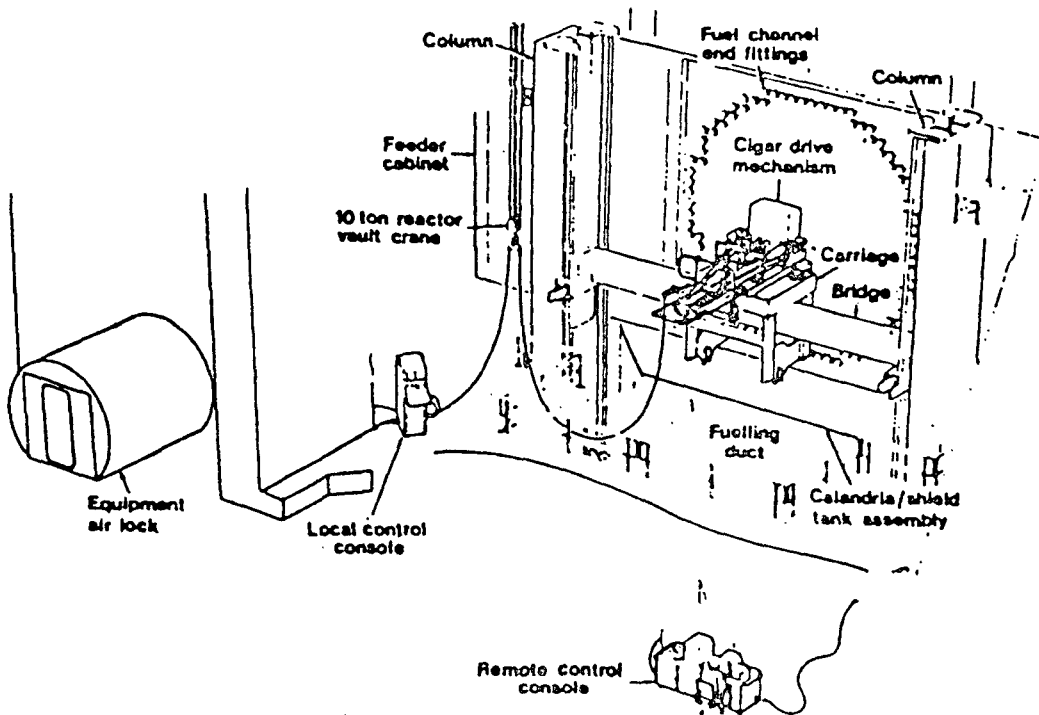


그림 3. CIGAR SYSTEM AT THE BRUCE REACTOR.

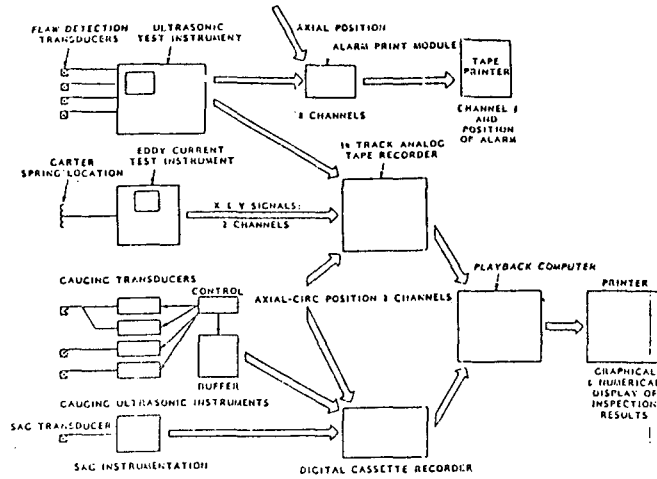


그림 4. CIGAR INSPECTION & DATA ACQUISITION SYSTEMS.

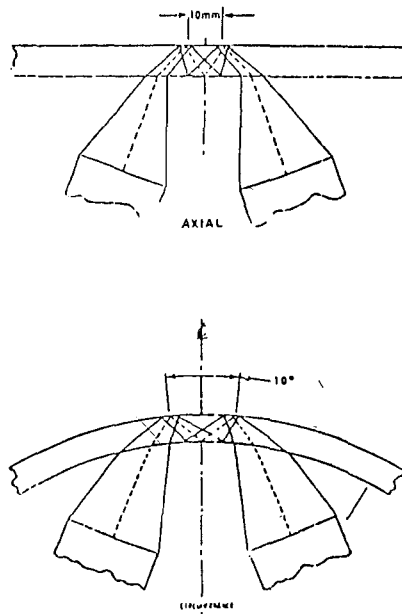


그림 5. ULTRASONIC BEAM PATHS IN PRESSURE TUBES

CIGAR FLAW DETECTION GENERAL HELICAL PLAYBACK PROGRAM 28-SEP-85 13:54:5  
 SWEEPS/CRT TRACE = 1 AXIAL POSITION: INITIAL = 5329.0mm/CURRENT = 5460.0m  
 CURRENT TRACE NUMBER: 50

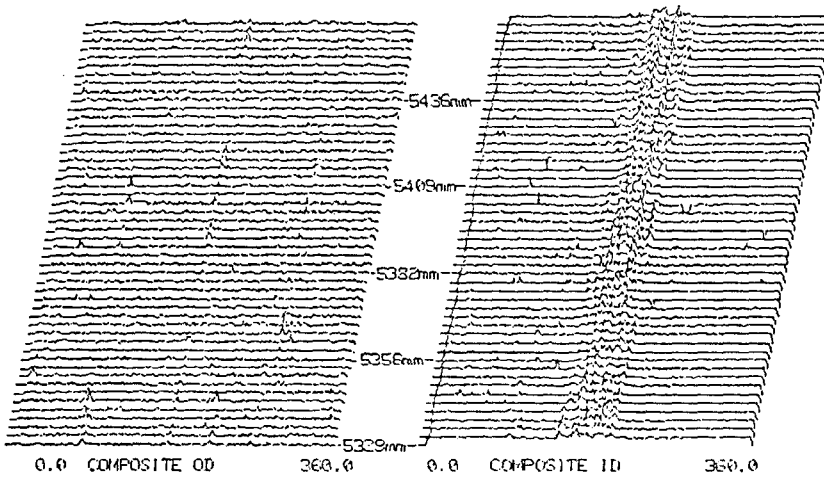


그림 6. ISOMETRIC PLOT FROM FLAW DETECTION PLAYBACK

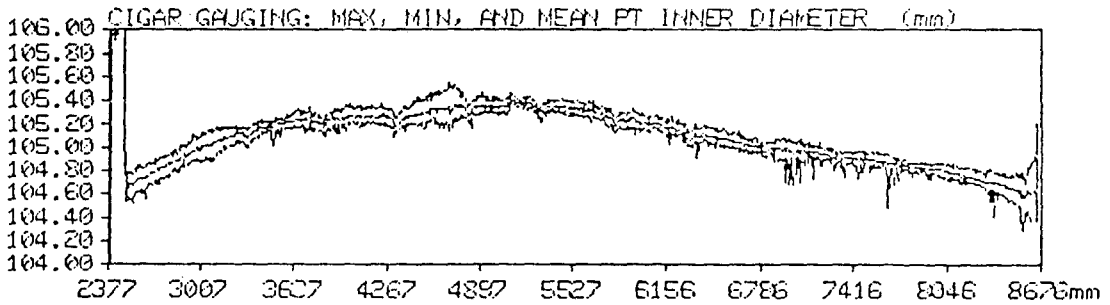


그림 7. GRAPHIC OUTPUT FROM GAUGING - DIAMETER

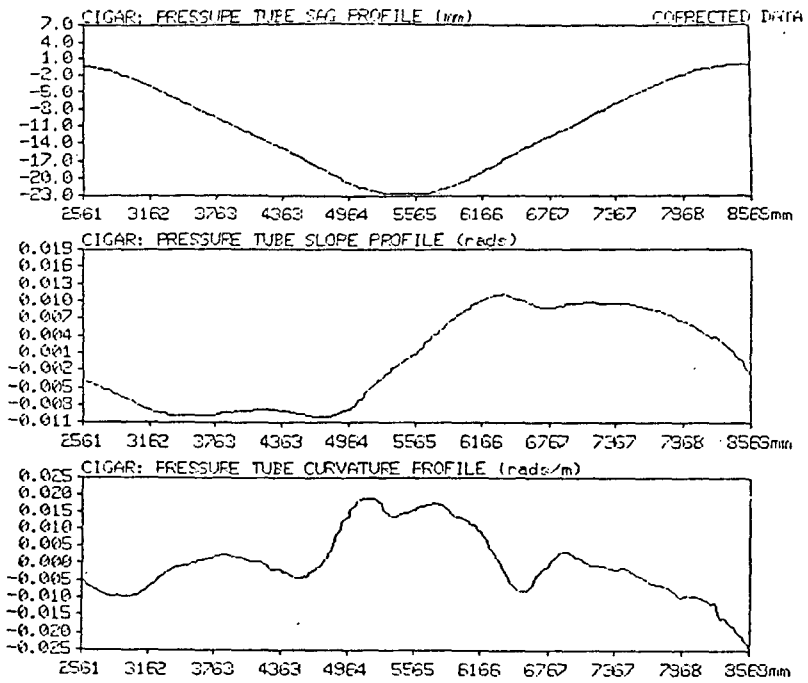


그림 8. GRAPHICAL OUTPUT FROM SAG MEASUREMENT

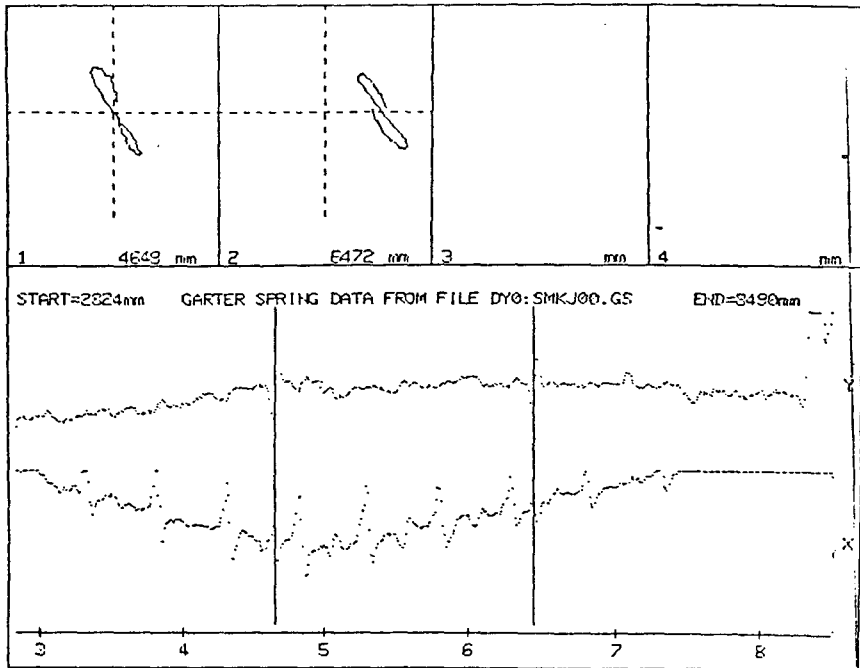


그림 9. DETAILED GARTER SPRING LOCATION PLAYBACK