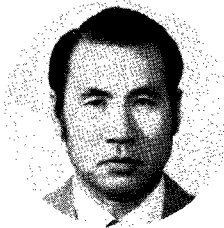


原子爐의 非破壞檢査技術 開發

*Development of Nondestructive Testing Technique for
Nuclear Reactor Safety*



朴 大 英

〈韓國에너지研·非破壞檢査研究室長〉

原子力發電所의 安全性確保를 위한 主要系統 및 部品에 對한 非破壞檢査技術에 있어서 최근의 技術開發은 새로운 探傷方法의 發明이나 感度增進보다는 主로 既存 技術을 遠隔調整化 및 自動화함으로써 檢査者의 放射線 被曝量을 감소시켜서 그의 身體安全를 增進시키며 또 檢査에서 얻어진 데이터의 處理를 電算化함으로써 檢査期間과 그 結果의 評價期間을 短縮하여 結果의 是로는 原子力發電所의 稼動率를 向上시키는데 기여하고 있다. ASME Code에서는 探傷方法을 自動으로 할 것인가, 手動으로 할 것인가는 問題되지 않는다.

우리나라 原子力發電所와 같은 PWR型에 對한 非破壞檢査를 檢査部位別로 大別하면

- 1) 原子力發電所의 心臟部를 이루고 있는 原子爐壓力容器檢査,
- 2) 人體의 肺와 비슷한 役割을 하고 있는 熱交換器인 蒸氣發生器의 轉熱管檢査,
- 3) 其他 殘餘部位檢査로 나눌 수 있으며, 本

稿에서도 최근의 非破壞檢査技術開發을 위와 같이 區分해서 소개하겠다.

1. 原子爐壓力容器的 檢査技術

原子爐의 稼動中檢査는 심한 放射能 때문에 手動檢査는 생각할 수 없으며 遠隔調整化된 超音波非破壞檢査法을 써서 原子爐의 壁, 底面 및 Nozzle部位 等の 熔接部位를 檢査한다.

檢査裝置는 Automatic Remote Controlled Mechanized Ultrasonic Testing System 이라고 부르며 간단히 Mechanized Ultrasonic Testing System 이라고도 부른다.

일찌기 여러 先進有名研究所에서 이에 對한 技術開發을 活潑히 해 왔으며 계속 改良型을 製作하고 있다. 最近의 改良方向의 軸점은 檢査의 Calibration에서 부터 데이터結果의 分析에 이르기 까지의 모든 檢査過程을 電算化하는 것과 檢査裝置의 調整을 Containment Building 밖에 設置하여 놓은 Trailer內에서 T. V.의 C. R. T.나 Computer Display를 보면서 遠隔調整하는 것이다.

오늘날 自由世界에서 活用되고 있는 것중 最近에 入手한 裝置들을 소개하면 表1과 같다. 表1을 자세히 보면 그 製品의 特徵을 대개 짐작하겠지만 여기서 特記할 만한 것만 몇가지 附言한다. 이 裝置들의 檢査方法에는 대개 接觸法(Contact Method)이 常用되고 있으나, We-

stinghouse 製의 Mechanized Ultrasonic Testing System은 水浸法(Immersion Method)을 쓰고 있으며 Intercontrole 製는 集束된 水浸法(Focused immersion method)을 채택하고 있다. 接觸法에서는 手動 超音波의 接觸法과 같이 탐촉자를 檢査部位에 직접 接觸시키며, 放射能 조사량때문에 原子爐 上部까지 채우는 물을 Couplant로써 使用한다.

Westinghouse가 채택하고 있는 水浸法이란 超音波 探觸子를 檢査面에 直接 접촉시키지 않

고 檢査面과 적당한 間隔을 두고 檢査를 한다. 檢査面에 直接 接觸시키지 않기 때문에 마찰이나 그 外의 接觸때문에 일어날 수 있는 故障 또는 接近性(Accessibility)問題가 훨씬 쉬워져서 作動制御가 쉽고 檢査速度를 빨리 할 수 있는 長點이 있는 反面, 音波의 境界面에서의 無關聯 指示 等때문에 일어나는 雜音增大, 感度低下 等の 短點이 있다. 特히 Calibration은 被試驗體와 同一條件을 갖춘 直接的인 實型의 Calibration Block을 쓰지 않고 一種의 間

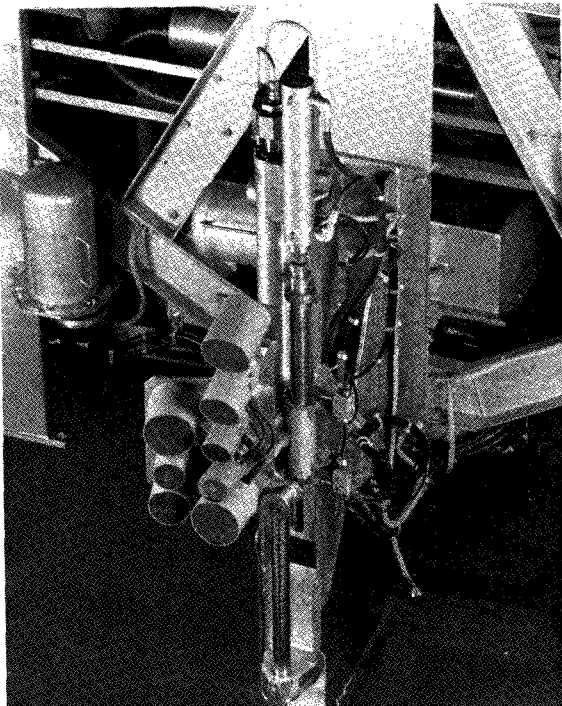
〈表 1〉 遠隔自動超音波檢査裝置의 特性比較

	Rockwell (U. S. A)	SwRI (U. S. A)	Westinghouse (U. S. A)	Intercontrole (France)	KWU (W. Germany)	TRC (Sweden)
Initial Bid price 및 Financing(\$ million) 1983. 7價格	2.2(Trailer不包含)	2.2(Trailer不包含)	3.2	3.2	2.8	2.7(Trailer不包含)
經驗(製作數, 販賣臺數, 檢査回數)	PWR Inspection 경험은 不足(2개뿐) (6, 4, 14)	比較的 풍부한 (13, 6, 40)	자체 檢査팀에서만 使用, 他社 販賣 實績없음(3, 0, 26)	主로 佛蘭西內 檢査가 주된 實績 (6, 2, 50)	主로 西獨內와 東子 라과檢査가 주된 實績(4, 0, 30)	PWR Inspection 經驗不足 (6, 2, 50)
檢査方法	Immersion法과 Contact法	Contact法	Immersion法	Focused Immersion 法	Contact法	Contact法이 主이고, Nozzle 一部를 Immersion法
主裝置의 材質 (重量)	大部分이 AL 強度를 要하는 部分: S. S. (Stainless Steel) (1.7 Ton)	大部分이 AL 強度를 要하는 部分: S. S. (1.6 Ton)	大部分이 S. S.이고, Al 部品이 약간 있다. (5 Ton)	大部分이 S. S.이고, Plastic 部品이 약간 있다. (12 Ton)	大部分이 S. S.이고, Al 部品이 약간 있다. (6.5 Ton)	大部分 S. S. (2.7 Ton)
Delivery time	18個月	12個月	18個月	18個月	18個月	16個月
Data Aquisition System Computer (Channel 數)	DEC RT-11 (12 Channel)	Data General Nova/Eclipse (9 Channel)	Westinghouse P-2500 (≥ 16 Channel)	Stadu -Produx (≥ 16 Channel)	Data General Nova 3/Eclipse (≥ 18 Channel)	Motorola M6800 (9 Channel)
技術支援施設 및 背景	PaR System은 GCA社에서, UT System은 SwRI, Data Aquisition은 Rockwell	PaR은 GCA社에서, 나머지는 自體開發	自體開發	Data Aquisition은 Intertechnique社에 서, 나머지는 自體 開發	Mechanical Part는 MAN에서 開發하고 고, 나머지는 自體 開發	UT System은 Sw- RI에서 開發하고, 나머지는 自體開發
특기사항 및 綜合評價	BWR에는 經驗이 풍부하나, PWR는 經驗不足	經驗이 풍부하고 過 去 3年間 KAERI 와 共同作業	Immersion法은 感 도와 表面效果때문 에 신빙성이 적으며 專門家들 間에 論雜 이 많은 技術	Focused Immersion 法은 佛蘭西 特有의 原理에서 發展된 것 이며 美國 Code에 는 무관련. 機械가 너무 무겁다. Tran- sducer가 총60個	Technical/Research back-up이 제일 잘 되었다. 機械가 무거 운 것과 高價인 것이 흠이다.	PWR에는 經驗이 不足 Technical/Re- search back-up이 零細

接的인 Cylinder型 Calibration Block과 Computer 조작으로 校正하기 때문에 그 信賴性이 떨어진다고 하여 아직도 많은 論難이 되고 있다.

또 프랑스 Intercontrol製의 Mechanized Ultrasonic Testing System의 特徵은 普通탐촉자와 같이 Straight Parallel Beam을 쓰지 않고 集束된 Beam을 쓰기때문에 그에 따른 長短點이 수반된다. 探傷部位의 範圍가 線型이 아니고 點이 되기때문에 各 集束深度가 여러가지로 다른 (보통 3가지) 接觸子를 쓰기 때문에 탐촉자數도 그만큼 많아지며 原子爐內面의 Austenitic Stainless Steel Cladding에서 音波의 굴절 및 산란때문에 일어나는 音壓의 減衰現狀을 줄이기 위해 作動周波數를 낮추는 以外에 探觸子의 直徑을 크게 (20cm 以上인 것도 있다) 하여 集束 Beam을 만들기 때문에 大型探觸子를 支持 및 支援하기 爲한 裝置때문에 裝備의 大型化를 초래시키고 있다(그림 1 참조).

〈그림 1〉 Shell Weld Examination Tool (Intercontrol)

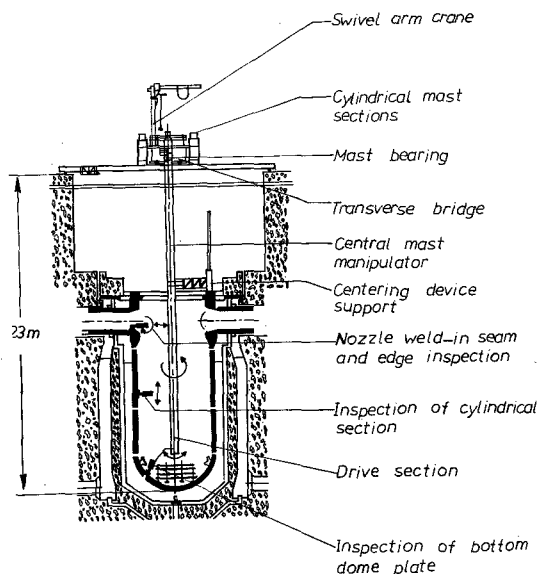


다른 4社의 探傷方法은 原則的으로 接觸法을 사용하고 있으며 SwRI製와 Rockwell International製의 機械的 部品の 主體는 다같이 Programmed and Remote System, Inc.에서 製作한 Tripod가 달린 PaR System을 사용하고 있다. 그 超音波 探傷裝置도 이 두 장비는 매우 흡사하나 Computer System을 위시한 기록 및 해석장치는 서로 다르다(表 1 참조) KWU製(그림 2 참조)나 TRC製의 機械的 主體는 PaR System과 같이 Tripod를 使用치 않고 Vertical Mast가 円型 또는 線型 Rail上을 이동하게끔 裝置되어 있는 것이 美國製와 다르다. 물론 모든 製品은 Computer에 의해서 C-scan이 可能하다. 그림 3과 그림 4는 SwRI製와 Westinghouse製의 主要 部分을 나타낸다.

2. 蒸氣發生器의 轉熱管檢査技術

증기발생기의 전열관 검사는 Eddy Current Testing (ECT) 法이 常用되고 있는데 현재 A-SME Code Section XI에서 要求하고 있는 것

〈그림 2〉 Ultrasonic Inspection of RPV (Kraftwerk Union)



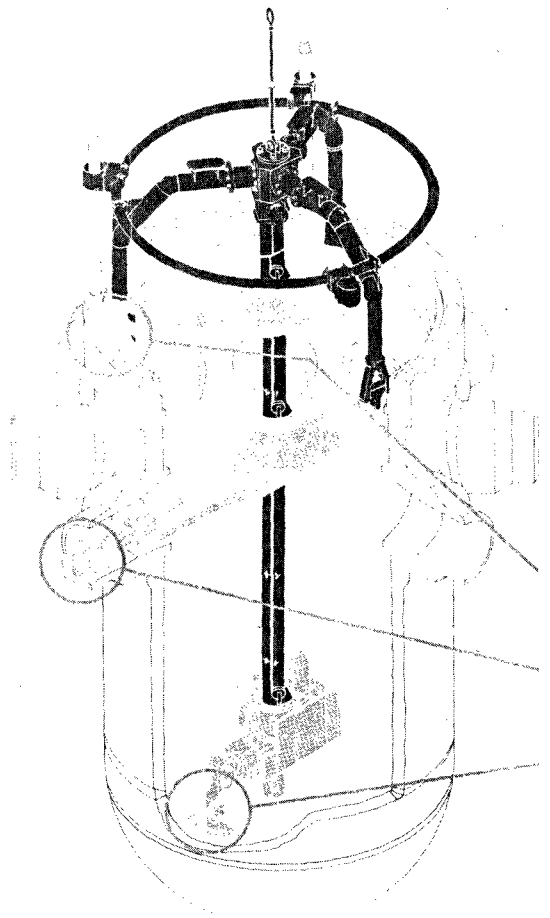
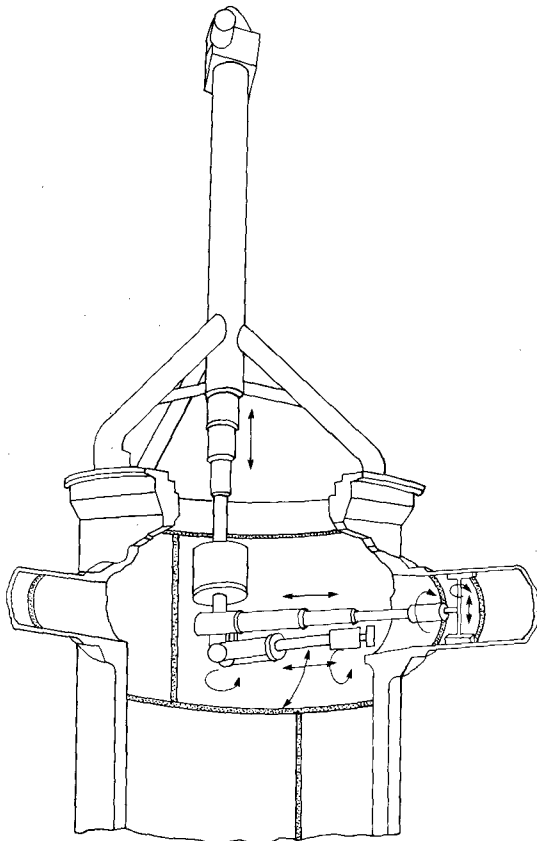
이나 NRC Regulatory Guide 1.83에서 規定하고 있는 바로는 Circumferential differential Single Frequency를 使用해서 하는 Normal Test ECT法 以外는 規定하고 있지않다. 이 Normal Test란 主로 Defect의 管 두께에 對한 相對깊이와 CRT信號의 位相角과의 相關關係를 利用해서 Defect의 相對깊이를 알아내는 것이다.

比較的 稼動 初期의 轉熱管이나 單一種類결함(複合信號가 아닌)은 이 Single Frequency ECT方法으로 Defect를 探傷하는 데 별 어려움이 없으나 轉熱管의 使用年輪이 더할수록 信號가 複雜해지고 또 2個 種類以上の 信號가 混合하여 나타날 때에는 이 Circumferential

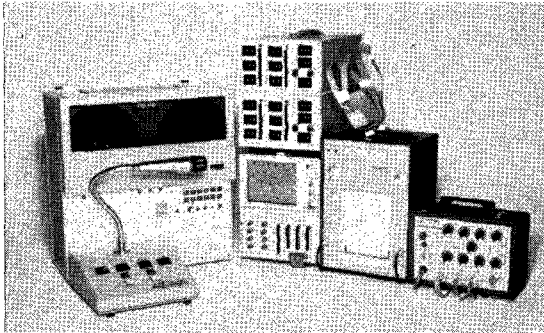
differential Single Frequency를 쓴 Normal Test ECT 만으로는 充分하지 않아서 여러가지 探傷 方法이나 計器가 考案되고 있다. 물론 부식성이나 不均열성 결함이 가장 해로운 것이지만 이 以外에도 機械的 壓力이나 충격으로 생긴 Denting 信號, 管의 熱處理未備로 생기는 Permeability Variable信號, Tube Sheet上的 2次側 Sludge퇴적信號, Support Plate Ligament Cracking信號 또는 低 row number 管의 U-Bend 信號 等 여러가지 指示와 또 이것들이 Tube Support Plate나 Tube Sheet 信號와 上記 여러 信號와 混合해서 나타날 경우 Circumferential differential Coil을 쓴 Si-

〈그림 4〉 Westinghouse Tool Number 2

〈그림 3〉 PaR Model ISI-2 In Service Inspection System For RPV(SwRI)



〈그림 5〉 MIZ-12 Multi-Frequency Inspection System



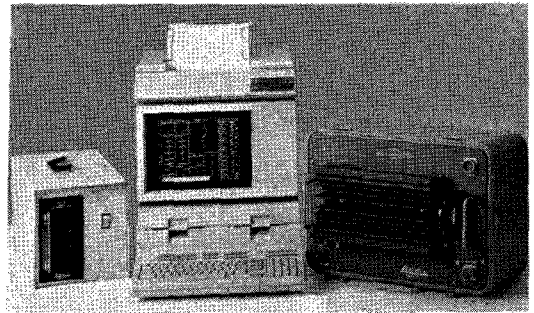
ngle Frequency ECT方法으로는 이 指示들을 分析하는데 있어서 어려움이 많다. 以上の 어려움 點을 解決하려고 주파수를 달리 한다든지, 특수한 Probe를 쓴다든지 오늘날 여러가지 研究가 進行되고 있는데 여기에 그중 몇 가지만 소개해 보겠다.

첫째로 Multifrequency Eddy Current Testing法이 開發되고 있는데 이는 여러가지 주파수를 동시에 내 보내어서 各種 결함(부식 Defect, Dent, Support Plate, Permeability Variable etc)에서 Feed-Back 해서 나온 指示信號가 位相이나 振幅에 있어서 서로 다르기 때문에 이를 適當히 組合處理하면 複合信號中 一部를 消去可能하다. 예를들면 2個의 周波數를 보내서 受信된 信號를 適當히 處理하면 한개의 變數(指示信號)를 除去 可能하고 3個의 周波數를 쓰면 2個의 變數(指示信號)를 除去 可能하다.

그 原理나 方法이 꼭 聯立方程式를 푸는 原理나 方法과 同一하다. 현재에 入手할 수 있는 것으로는 프랑스 Intercontrole製의 IC 3 FA와 Zetec製의 MIZ-12(그림 5 참조)를 들 수 있다. 또 最近에는 Zetec製의 MIZ-18(그림 6)과 DDA-4란 것이 今年에 소개되어 있는데, 그 특징은 다음과 같다.

지금까지의 ECT裝備(Multifrequency 포함)는 모두 Analog信號 處理를 했는 데 이는 Pr-

〈그림 6〉 MIZ-18 Digital Eddy Current Inspection System



obe에서 Data Processing 및 Record 장치까지는 보통 數십미터에서 300미터까지 되는 것이 常例인데 그사이 遠隔信號 전달과정에서 各種 雜音 影響을 받아서 信號가 歪曲되고 分解能이 떨어진다. 그러나 MIZ-18은 Digital System을 채택했다. Probe에서 생긴 Analog信號를 16Bit Analog-to-digital converter를 써서 digital信號로 바꾸어 가지고 Data Processing장치에 넣기 때문에 外的 影響없이 雜音 影響을 極小로 할 수 있고 Record도 Mass Storage Digital Tape Unit(Kennedy 6455)를 쓰기 때문에 Record 보존도 Analog信號 Record보다 容易하다. Data Analysis도 Digital로 되어 있어서 Computer Software로 多樣하고 편리하게 信號處理를 할 수 있는 長點이 있다.

둘째로, Dent 크기 測定에 對하여 종내의 Circumferential Differential Coil만의 信號만으로는 Dent의 크기를 알아내기가 힘들었다. 即, 이 Circumferential Coil을 가지고서는 1 mil X 360度 均等 Dent나 4mil X 90度 孤部分 Dent信號를 區別이 곤란 했으나^(註1) 이것을 解決하려고 시도한 것이 그림 7과 같은 B&W에서 考案한 Strain을 利用한 Profilometry이다. 即, 円周方向의 45度마다 位置한 8個의 機械的 Strain에 依한 變形에 比例하는 信號를 모아 Computer에 넣어서 다시 再生Plot

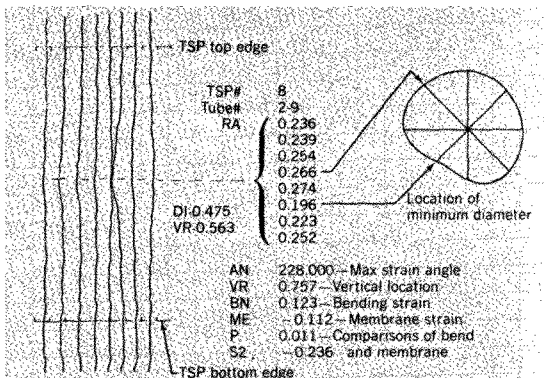
하는 것이다.

美國 Zetec 社는 Strain 裝置 대신 아주 작은 8 個 Surface ECT Coil을 장치한 Probe 를 썼으며 美國의 Sigma Research Inc.는 그림 8 과 같은 Optical Probe 를 썼다.^(註2)

셋째로, Canada의 ECT란 會社에서는 上記 Circumferential differential Probe 의 弱點을 보완하기 위해서 Three dimensional (3D) Probe 를 考案했는 데 그 原理는 이 Probe 가 Tube 의 各 點에 있어서 Probe 의 円周方向뿐만 아니라 여러 方向으로 渦流를 흐르게 한다는 點이다. 그리하여 이는 Crack 의 方向에 관계없이 同一 感度로써 결함을 찾아내며 Support Plate, Roll Expanded Zone 또는 Tube Sheet 에 對한 信號는 Circumferential Probe 로 검사때보다 훨씬 작아서 그들 近方에서의 결함을 찾아내는 데 훨씬 敏感하고 편리하다는 것이다.^(註3)

蒸氣發生器 各 部品에 對한 탐상방법에는 그 外에도 Tube Support Plate 검사에 對한 W. Lord 氏의 Magnetic Flux Leakage 法(MT 法이 아님)^(註4) V. L. Newhouse 氏의 Pulse-Echo Ultra Sound System,^(註5) Combustion Engineering Inc.의 Radiographic Technique,^(註6) 美 ANCO Engineering Inc.의 Vibration Probe Analysis^(註7) 等の 연구를 들 수 있으나 아직

〈그림 7〉 Profilometry probe



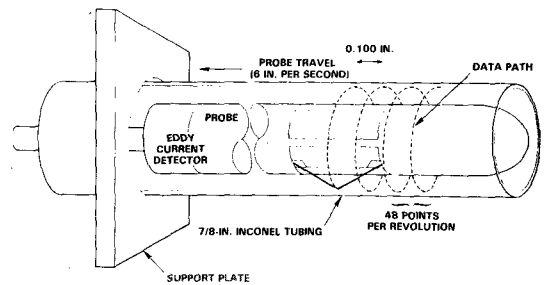
實驗단계에 불과하다.

蒸氣發生器에 對한 탐상방법 외에도 탐상장치를 蒸氣發生器 内部에 設置하여 願하는 各 Tube 속에 Probe 를 插入하는데 있어서 어떻게 遠隔自動化 하는가는 非破壞탐상법과는 다른 分野에 속한다. 이에 對하여도 여러 會社製品들이 開發되어 있지만 가장 많이 쓰이고 있는 세가지만 여기서 소개한다. 가장 오래되고 값이 싼것으로 美國 Zetec 社의 “SM-4”란 장치가 있으며 그 設置상태는 그림 9 의 右端에 보이는 것이다. 또 프랑스 Intercontrole 製의 소위 “Finger Walke”와 多國籍會社인 Brown Boveri 製의 ECT “Manipulator”(韓電所有)가 있다.

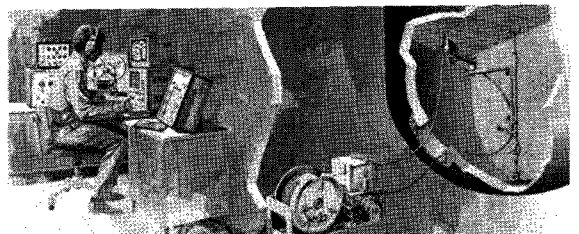
3. 其他의 部位檢査

原子爐壓力容器나 蒸氣發生器 以外の 部位檢査는 主로 手動檢査를 利用하고 있으나 近來에는 이 分野에도 많은 기술개발이 進行되고 있다. 먼저 Pipe 와 Nossle 의 검사기술들을 몇 가지 살펴보겠다.

〈그림 8〉 Optical Probe



〈그림 9〉 “SM-4” (Zetec)

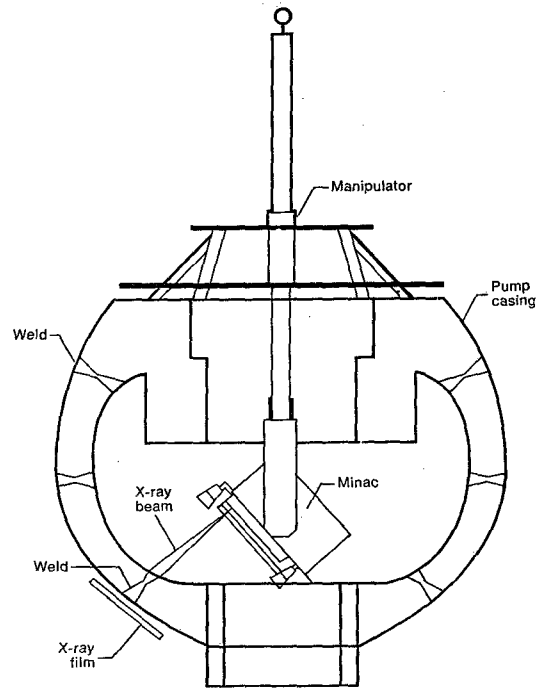


“MINAC”이라고 하는 운반이 가능한 加速器가 있는데 이는 Miniature Linear Accelerator의 略字이다. 在來式 Radiography法으로는 Co^{60} ($E=1.33MeV$)을 쓰는데 이것은 通常露出時間內에 두꺼운 部位를 투과하기에는 그強度가 充分하지 못할뿐만 아니라 放射性物質은 취급하기도 어려운점이 많다. 따라서 12inch쯤 되는 鉄鋼製 構造物의 内部 部位의 檢査는 자연히 高energy 加速器가 要求된다.

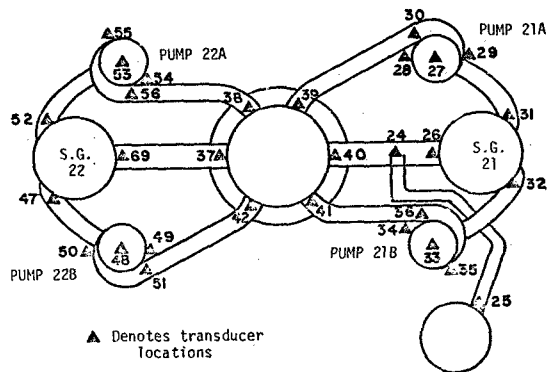
美國 Schonberg Radiation Corporation 과 EPRI에 의해서 3.5MeV 6 MeV 및 MINAC을 製作했는데 이것을 使用함으로써 10~12inch 두께 鋼의 檢査시간을 대단히 短縮가능했고 또 高放射線 背景에서도 作動할 수 있다. 6 MeV 장비는 3.5MeV장비보다 半價層이 約 20%改善되었다. 이장비로써 Ginna Power Plant와 Indian Point # 2 等 4個 發電所에서 一次 冷却 Pump의 두꺼운 熔接檢査에서 滿足할만한 結果를 얻었고^(註8) Pump 및 Valve의 性能試驗에까지 利用可能하다. 그림10은 Ginna Plant에 있는 主原子爐 冷却 pump를 MINAC을 써서 檢査하는 斷面圖이다.

다음에는 새로운 Ultrasonic Testing (UT) 技術 세가지를 소개한다. “ALN 400 APIS”(Automatic Pipe Inspection System)란 장비를 Adaptronics, Inc.에서 開發했는데^(註9) 이 장비는 Stainless Steel Pipes 熔接 附近의 HAZ (Heat Affected Zone)에서 円周 IGSCC (Intergranular Stress Corrosion Cracks)를 탐상해서 位置와 크기를 알아내는데 Computer를 쓴 ALN (Adaptive Learning Network) 方法을 써서 他形의 變則信號와 區別했다. 이 檢査는 Scanner를 Pipe에 올려놓는것, 校正하는것, 0도와 45度 探觸子를 서로 交換하는데만 手動이고 나머지는 전부 自動으로 수행한다. 이 ALN法은 渦流탐상시 결함신호 分析에도 使用될 수 있다. 近來에 BWR에서 IG-

〈그림10〉 Cross-section of the main reactor coolant pump at RG & E's Ginna plant



〈그림11〉 Reactor Coolant Pumps(4), Pressurizer Surge Line and Piping Transducer Locations



SCC가 대단히 問題되고 있어서 IGSCC에 對해서는 이외에도 많은 研究가 進行中이다.^(註10)

또 “P-Scan” (Project Scan)이라 하는 方法이 있는데 이것은 C-Scan方式의 하나의 變形인데 이것은 斜角 探觸子로써 發送한 超

音波가 용접부를 通過하면서 缺陷에서 反射할 때 탐촉자에 受信되기보다 탐촉자와 연결된 發光 diode板에 결합위치를 나타내게 發光하는 Scan法이다.^(註11)

또 “SUTARS” (Search Unit Tracking And Recording System)^(註12)이라 하는 것은 美國 Southwest 研究所가 開發한것으로써 對比試驗 및 走査는 手動으로 하나 走査에 對한 記錄 즉 探觸子の 위치와 反射音의 진폭이 自動 記錄된다. 또한 이 裝備는 探觸子走査하여 지나간 모든 位置를 表示하므로 檢査者는 走査가 끝난 뒤 이를 보면 檢査하여야 할 全部位를 走査하였는지 확인할 수 있다. 이 表示가 UT 장비의 信號 表示에 중첩되어 기록되므로 檢査 結果에 對한 客觀的인 신뢰도가 증가한다.

탐촉자의 위치측정은 위치 측정용 Linear Receiving Array Sensor를 熔接部 주위 探傷部位 以外の 場所에 설치하여 電氣的으로 發生된 音響波가 탐촉자에서 發射되면 이 Sensor가 信號를 感知하며 이 波가 탐촉자를 떠나 Sensor에 도달하는 時間이 가장 가까운 2개의 Sensor에서 正確히 측정되어 이에따라 탐촉자의 位置를 精確히 알아낼수 있다.

이 近來에 關心의 對象이 되고 있는것中 Acoustical holography가 일찍 부터 연구되고 있는데 이법의 長點은 보통 UT法이 材料 두께의 영향을 받는데 比해서 이 Acoustical holography로써는 결함의 모양이나 크기측정 結果에 있어서 試驗材料 두께의 영향을 받지 않는다는 것이다.^(註13)

끝으로 未來의 非破壞法이라고 일컫는 Acoustic Emission(AE)에 對하여 간단히 言及 하겠다. 現在 發電所에서 常用되고 있는 非破壞檢査法은 이미 存在한 결함을 찾아내는 말하자면 靜的인 方法이라고 할 수 있으나 運轉中에 결함發生進展, Leak Detection 또는 Loose Parts 등을 그때 그때 監視 및 포착하

는 On-line monitoring法으로써는 動的인 非破壞檢査法인 Acoustic Emission法이 있다.

그림11은 美國 Calrert Cliffs Unit 2의 稼動前檢査時(1976년)에 Dunegar/Endevco社가 遂行했던 一次測 水壓試驗때의 AE 탐촉자의 配置圖이다. 각 탐촉자는 Computer에 入力되어 進行性 결함의 位置, 위험도 등을 바로 判定할 수 있어서 아주 편리하여 우리나라에서도 第7號機에는 設置예정이다.

- 註1 : 1981年度 韓國에너지研究所 研究報告書, 非破壞檢査 技術開發Ⅱ, -渦電流試驗法- KABRI/PR-349/81. 61-65面.
- 註2 : Nondestructive Evaluation Program: Progress in 1982, EPRI NP-2728-SR, 28-1面
- 註3 : 3D Eddy Current Inspection of Heat Exchanger Tubing, Eddy Current Technology
- 註4, 6 및 7 : 註2와 同一文獻, EPRI NP-2728-SR, 27-1面, 26-1面 및 25-1面.
- 註5 : Nondestructive Evaluation Program: Progress in 1981, EPRI NP-2088-SR, 26-1面
- 註8 : 註2와 同一文獻, EPRI NP-2728-SR, 4-1面.
- 註9 : ALN4000 Ultrasonic Automatic Pipe Inspection System, Volum I - Volune IV, Adaptronics Inc.
- 註10 : 註2와 同一文獻, EPRI NP-2728-SR, 9-1-12-1面.
- 註11 : Nondestructive Testing “The Projection Scan, a New Method for Recording and Visualizing Data from Ultrasonic Weld Inspection,” Dec 1973, 307面.
- 註12 : ASNT National Fall Conference, Denver, 1978 “Automated Data Processing for ASME Section XI Requiements Using The SUTARS System” by M·Rensmeyer & H. Grothues.
- 註13 : Development of In-Service Inspection Equipment for Nuclear Power Plants, April 1977 Takasago Technical Institute, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.