

原子炉 熔接部の 遠隔 自動 超音波檢査

安 熙 晟, 郭 慶 眞, 李 然 匹

韓國에너지研究所
(1981年 7月 8日 接受)

Remotely Operated Ultrasonic Inspection of Nuclear Reactor Weldments

HEE-SUNG AHN, KYUNG-JIN KWAK and YUN-PEEL LEE

Korea Advanced Energy Research Institute
(Received; July 8, 1981)

1963年 美國의 Southwest 研究所가 Elk River 發電所 原子爐의 노즐檢査에 처음으로 遠隔 自動裝置를 開發하여 使用한 이래 스웨덴의 Oskarsham 發電所에서 完全 自動化된 시스템을 適用시켜 檢査하였고 原子爐 內面의 遠隔 自動 超音波 檢査裝備는 1970~1971년에 美國 Point Beach 發電所 2號機의 稼動前檢査를 爲해 本格的으로 設計, 製作되었다. 이 같이 지난 10 餘年間 原子爐 熔接部의 檢査를 爲하여 使用될 遠隔 自動 超音波 檢査裝備의 開發을 위해서 많은 時間과 努力이 集中되었다.

1. 遠隔自動探傷法과 手動探傷法の 比較

自動探傷이 手動探傷에 비해 월등한 점은 다음과 같다.

- ① ASME B & PV, Section XI에서 要求하는 走査 形式을 滿足하면서 試驗데이터를 記錄化할 수 있다.
- ② 試驗結果의 解析 및 評價가 電算 Program에 의해 이루어진다. 따라서 試驗結果에 對한 信賴度가 增加하며 신속히 處理된다.
- ③ 영속적인 資料로써 保存하여 차후에도 檢査過程을 精確히 複製할 수 있으므로 次期 檢査의 結果와 比較할 수 있다.

- ④ 試驗結果를 매우 작은 부피로 보관한다.
- ⑤ 檢査委員의 訓練정도와 自質에서 오는 差가 대폭 줄어든다.
- ⑥ 檢査要員의 放射線 被曝量을 極小化할 수 있고 檢査期間을 단축시킨다.
- ⑦ 再現性이 좋다.
- ⑧ 出力 데이터는 破壞力學的 解析에 용이한 형태가 된다.

2. 遠隔 自動裝備로 試驗을 原子爐 內面에서 遂行할 때와 外面에서 遂行할 때의 長短点

다음 3項에 記術되는 裝備中 PaR ISI-2를 제외 한 全 裝備들은 原子爐 外面에서 試驗이 遂行된다.

- 1) 原子爐 內面에서 遂行할 때
 - ① 原子爐가 물로 채워지므로 특별한 초음파 탐촉자 접촉매질이 必要없다.
 - ② 탐촉자의 좋은 접촉을 위하여 表面의 페인트나 산화피막을 제거할 必要가 없다.
 - ③ 裝備조작이 Operating Deck에서 遂行되므로 檢査者에게 放射線 노출량을 줄일 수 있다.
 - ④ PWR의 경우 原子爐內 內部 구조물들이 일당 제거가 되면 原子爐의 全 熔接部位가 試驗 可能하다.

⑤ 原子爐 外面에서 發生하는 欠陷을 쉽게 檢출할 수 있다.

⑥ 裝備를 장착時 Position Reference를 Flange 表面이나 특정의 Stud를 택해 잡을 수 있다.

⑦ Thermal Shield 등으로 막혀있지 않은 Out let Nozzle 같은 경우 Nozzle-to-shell 용접부나 Inside Radius부위, Nozzle-to-pipe 용접부 등의 試驗이 쉽게 行해진다.

⑧ 原子爐 지지用 熔接 Pad에서 나오는 超音波 欠陷을 쉽게 檢출할 수 있다.

2) 原子爐 外面에서 遂行할 때

① 檢査作業이 核燃料 교체와 무관하게 行해질 수 있다.

② 原子爐 內面에서 發生하는 欠陷을 쉽게 檢출할 수 있다.

③ 原子爐 內부에 裝備 部品들을 떨어뜨릴 可能性이 없다.

④ 原子爐內 內部構造物들을 장탈없이 試驗할 수 있다.

⑤ 母材의 超音波 감쇠값을 쉽게 알 수 있다.

⑥ 裝備가 덜 복잡하며 염가이다.

⑦ 특별한 原子爐 內部表面 준비가 必要없다.

⑧ 裝備들이 작고 가벼워 CV의 Personnel hatch를 통해 운반할 수 있으며 Crane의 使用이 必要없다.

⑨ 裝備가 냉각수에 잠입이 안되므로 裝備오염이 없다.

3. 遠隔 自動 超音波 檢査裝備

지금까지 先進 外國에서 開發하여 現在 使用하고 있는 많은 裝備들中 대표적인 몇 裝備들만을 골라 說明하면 다음과 같다.

1) Head-to-Flange 熔接部 檢査裝備

本 裝備는 노즐 flange에 임시로 장착된 회전 track을 따라 作動이 되며 表面에 대해 탐촉자 module을 지지하며 조정 가능한 arm을 가진 구동차로 構成된다. 그림 1은 flange 위, Head 外面에 부착된 裝備의 모형도이며, 만일 보온재나 lifting lug, 試驗 表面조건 등으로 上記 方法에 따라 試驗이 곤란한 경우 그림 2와 같이 flange 밑, seal 表面으로부터 試

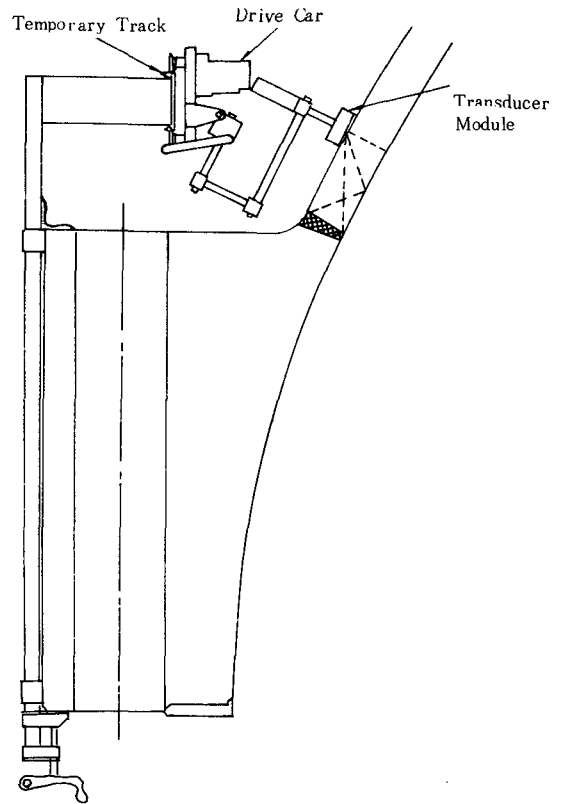


그림 1. Head-to-Flange 熔接部 檢査裝備 모형도

驗이 된다. 이 경우 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 범위의 굴절종파가 使用된다. 그러나 PSI/ISI를 위하여 closure head가 장탈되며 이 熔接部位에 對한 방사능은 무시할 정도로 작고 裝備를 使用할때의 번잡성 등으로 이 部品들은 大部分 手動試驗으로 遂行된다.

2) Flange-to-vessel 熔接部 檢査裝備

그림 3이 이 裝備의 모형도인데 基本的으로 그림 2와 다름바 없다. 그러나 굴절각이 다른 탐촉자를 使用하므로 탐촉자 module 亦是 다르다.

3) Stud 檢査裝備

本 裝備 開發의 基本的인 관심은 thread root에서 발달하는 $2\%T$ (T 는 thread 두께)의 notch 형태의 균열의 檢出이며 原子爐나 原子爐 냉각펌프의 heater hole을 가진 stud(길이 7~8', 지름 6~7', heater hole 지름 $\frac{3}{4} \sim 1\frac{1}{8}$ ')의 檢査이다. 檢査方法은 그림 4와 같이 탐촉자를 stud의 中央 heater hole에 삽입한

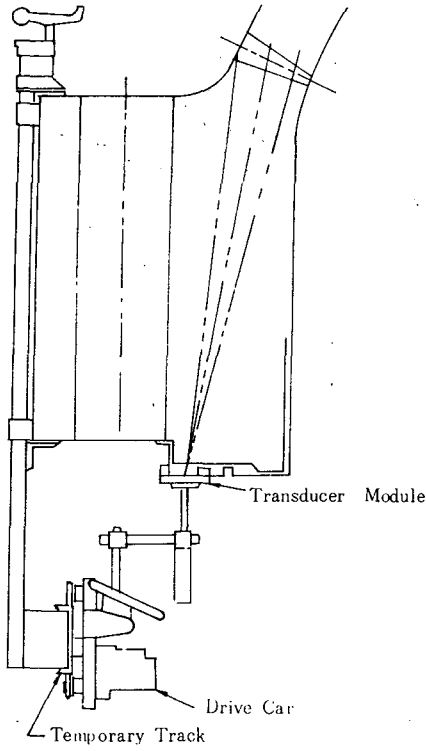


그림 2. Head-to-Flange 熔接部検査裝備
모형도(seal surface)

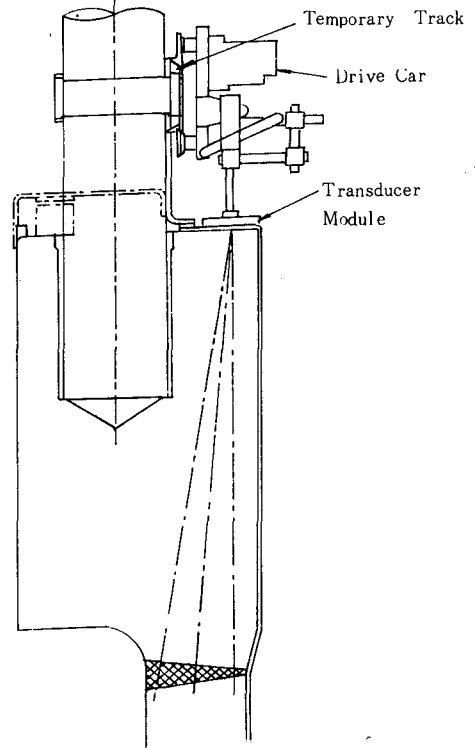


그림 3. Flange-to-Vessel 熔接部検査裝備
모형도(seal surface)

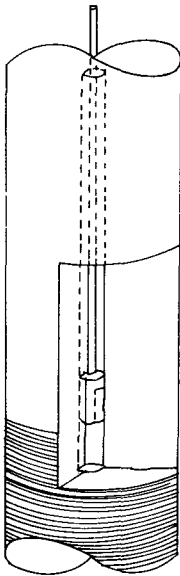


그림 4. Stud 検査法

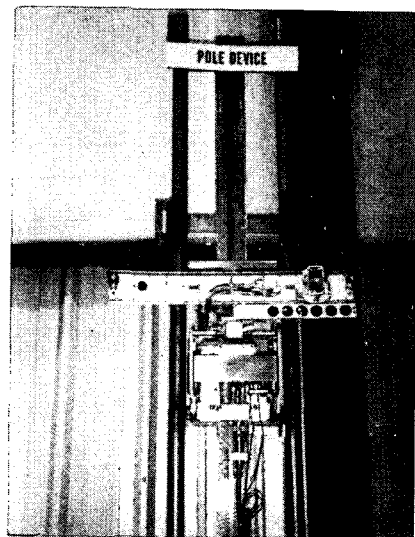


사진 1. Track-Guided(pole) 検査裝備

후 위, 아래 또는 360°로 돌려가면서 檢査를 하며 60° 횡파를 使用한다.

4) Track-Guided (pole) 檢査裝備

原子爐의 Circumferential, longitudinal 熔接部를 原子爐의 外面으로부터 檢査하는 裝備으로써 tracked pole을 原子爐에 부착한 後 이 track을 따라 탐촉자를 이동시켜 檢査한다. Circumferential 熔接部試驗의 경우 transverse arm이 약 1.5m 정도까지 뻗쳐져 시험이 가능하다.(사진 1 참조)

5) Magnetic Track Guide 檢査裝備

그림 5와 같은 目的의 유사한 裝備으로써 강전자석으로 track을 原子爐에 부착시켜 이 track과 arm을 使用하여 原子爐의 longitudinal 및 circumferential 熔接部를 檢査하는 裝備이다. 이는 試驗量이 작은 熔接部 檢査에 效果的이다(사진 2 참조).

6) Nozzle-to-shell 熔接部 檢査裝備

檢査는 배관에 track을 설치한 後 原子爐 外面에서 遂行케 되는데 track과 arm은 노즐크기에 따라 언제든지 變形이 가능하다(사진 3 참조).

本 裝備를 축소시킨 것으로 原子爐의 Safety injection 노즐部를 檢査키 위한 裝備가 있다. 모든 아이디어는 같다.

7) Nozzle inside radius 部位 檢査裝備

ASME Section XI의 1970edition판이 처음 등장하면서 Nozzle inside radius 部位에 對해 체적시험을 要求하였다. 檢査는 表面波를 使用하게 되는데 이를 위해 특별히 設計된 탐촉자와 shoe가 module에 장착된다(사진 4 참조).

8) PaR ISI-2 原子爐 內面 檢査裝備

本 裝備의 main body는 美國 Programmed and Remote System 會社가 設計, 製作한 것으로 原子爐 내경 8~18', 길이 36' 까지 조절토록 되어 있어 原子爐의 Inlet, Outlet노즐 용접부, flange 熔接部, lower head를 비롯한 原子爐 內部の 全 熔接部를 檢査

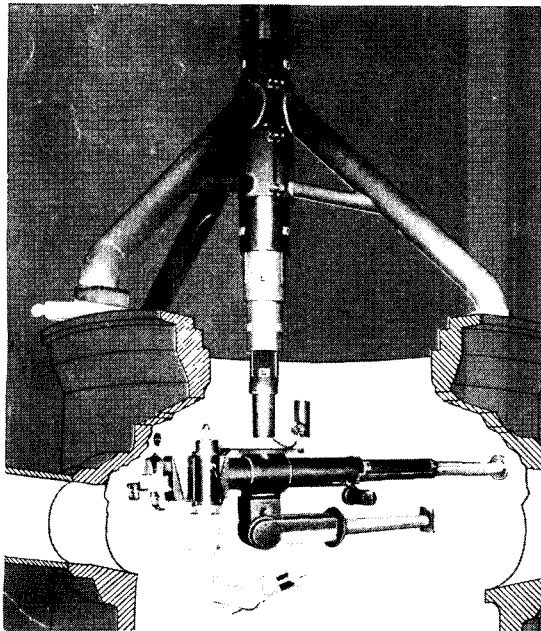


그림 5. PaR ISI-2 原子爐 內面 檢査裝備

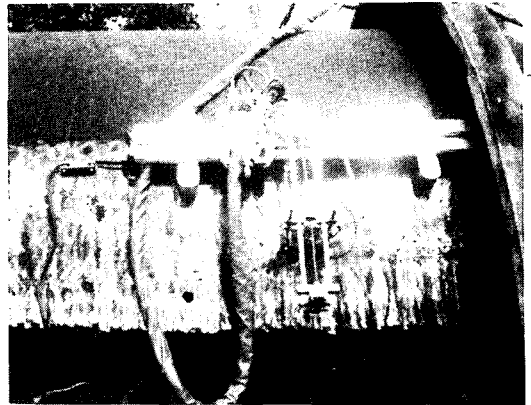


사진 2. Magnetic track guide 檢査裝備

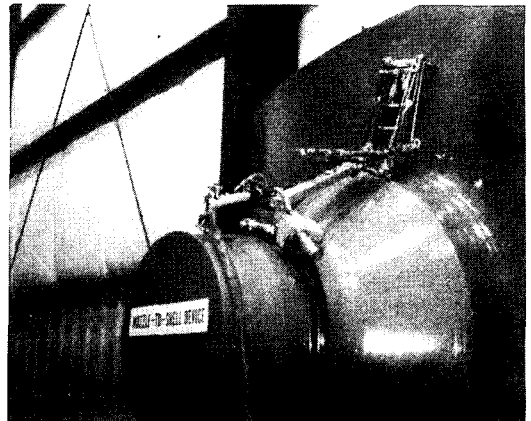


사진 3. Nozzle-to-shell 熔接部 檢査裝備

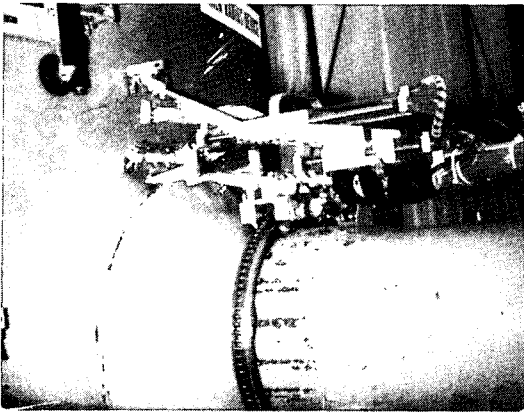


사진 4. Nozzle inside radius部位 検査裝備

하도록 되어 있으며 検査時 3개의 다리가 flange seal 表面에 장착되어 guide pin에 依하여 고정된다. boom assembly에 부착되는 여러 악세서리들은 southwest 研究所가 製作하여 使用되고 있는데 용도에 따라 vessel longitudinal, circumferential weld seam, bottom head weld, nozzle-to-shell weld, nozzle-to-safeend weld, flange-to-shell weld, nozzle inside radius 部位 等の 検査를 爲한 여러 악세서리가 boom 및 pivot에 부착되어 使用된다. PaR 裝備의 main body는 다음의 主要 assembly로 構成된다.

- Tripod ● Telescoping tube hoist
- Inspection boom ● control console
- Bottom hemisphere inspection boom
- Model 3000 manipulator

또한 boom에는 TV 카메라가 부착될 수 있어 原子爐 内部 육안 検査를 同時에 遂行할 수 있다. PaR 裝備의 수직 運動은 5개의 튜브로 조립되어 있는 hoist가 있어 이 hoist는 電氣의 혹은 유압으로 作動이 되며 hoist assembly에 장착된 digital encoder로써 수직 運動이 측정된다. boom은 hoist tube의 맨 마지막단에 부착되어 boom 연장 및 회전 亦是 電氣的 혹은 유압으로 作動되며 조정 panel의 digital read out에 依하여 boom의 위치들을 알 수 있다. 또 하나의 boom이 상기 boom 바로 밑에 장착되는데 이는 原子爐의 lower head에 있는 meridional 熔接部 検査에 利用된다. 선택으로 model 3000 manipulator가 bottom hemisphere boom 밑에 부착이 될 수 있는데 이는 原子爐의 수리나 検査의 보조수단 혹은 検査中 原子爐

바닥에 떨어진 物體들을 집어 올리는데 使用된다. (그림 5 참조)

PaR 裝備의 主要한 特性은 다음과 같다.

- 다양한 速度조절 및 手動조작이 가능하다.
- 一定의 고정된 走査率을 가진다.
- 스무드한 다양한 速度조절을 爲하여 전 모터는 직류 또는 hydraulic을 使用한다.
- 水中 assembly들은 borated water에 견딜 수 있는 材質로 製作된다.
- 裝備의 장착 및 모든 作動은 水面위에서 遂行된다.

4. Data Acquisition System 및 데이터의 電算處理

本質적으로 遠隔 自動 超音波試驗은 手動 試驗의 연장이다. 따라서 모든 데이터의 기록이나 分析方法이 手動試驗과 다를바 없다. 그러나 手動試驗時 나오는 각종 데이터에 對하여 検査者가 기록을 할 것인가, 안할 것인가 하는 선택능력은 비단 裝備에 gate 와 일정높이의 진폭을 設定한다 해도 遠隔 自動 超音波試驗은 갖고 있지 않다. 따라서 많은 量의 데이터가 기록이 되는데 이 데이터는 video나 magnetic tape, strip chart recorder 등으로 기록이 되며 기록 및 分析으로 컴퓨터를 使用할 경우 computer magnetic tape, computer printout도 함께 포함되겠다.

1) Data Acquisition System

그림 6은 本 시스템을 알기 쉽게 圖解한 것인데 이 시스템의 基本目的은 各種 데이터들이 분석과 보고를 爲하여 꼭 必要되는 정보만을 제공할 수 있도록 여러 기록장비에 試驗 데이터를 기록하고 기록된 데이터들을 정리함에 그 目的이 있다.

Data Acquisition System은 다음 裝備들로 構成된다.

- 3대의 超音波裝備(Sonic MKII 나 MKIII)와 전자 gate(DEC Module, Flaw/Amplitude Module, Time(Analog Module)
- 3대의 遠隔 CRT display
- Model 80600 data display super panel(analog를 digital로 바꿈)
- 6 channel brush 260 strip chart recorder
- Ampex 7 channel analog tape recorder

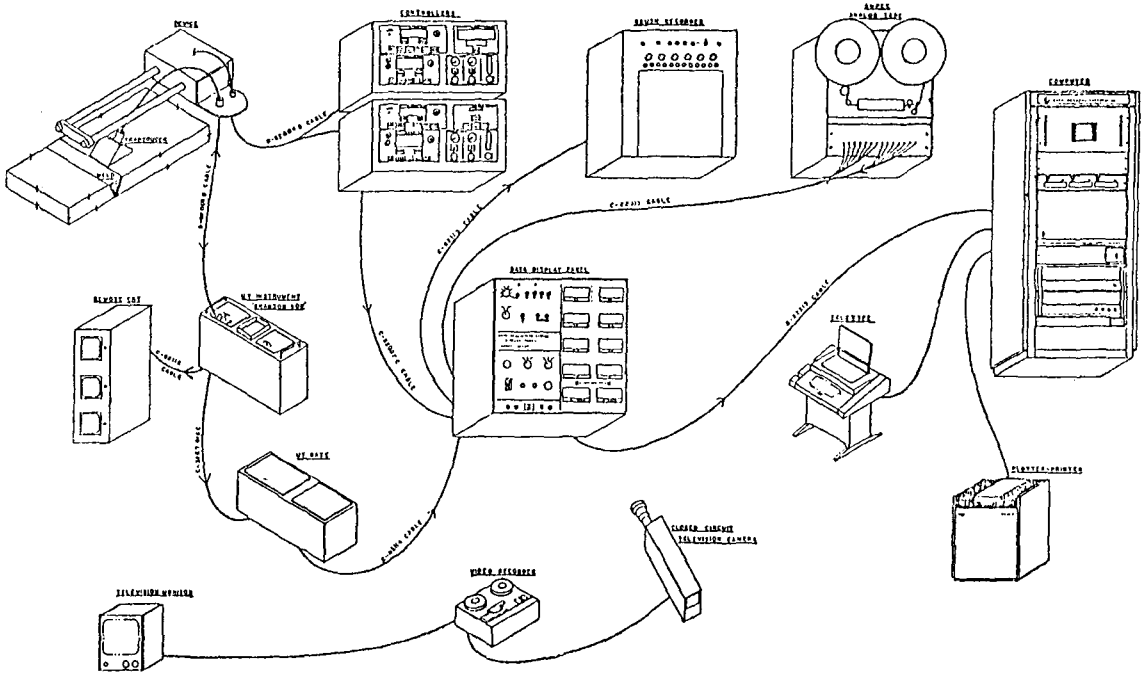


Fig 6. Data acquisition system배열

- Video tape recording system(video recorder, video TV monitor, closed circuit TV camera)
- Gate block
- Mini-computer system

3대의 초음파장비가 동시에 펄스-에코 모드로써 작동되고 PaR 장비를 비롯한 각종 원격 자동장비의 module에 3개의 탐촉자를 달아 시험이 동시에遂行된다. 그러면 원격 자동 초음파시험에서 얻은 데이터들이 Data Acquisition System을 통하여處理되는 과정을 간단히說明하면 다음과 같다.

시험절차서에 따라 적절하게 calibration된 각 초음파장비의 탐촉자에서 온信號들은 각 장비의 원격 CRT 스크린상에 나타나며 calibration時 미리定한 gate와 진폭(이는 Dec module, Flaw/Amplitude module, Time/Analog module을 가지고定함)에 따라 이들 전자 gate에서 나온 진폭과 time analog 정보들이 Data super panel의 A₁, A₂, A₃ 및 T₁, T₂, T₃에 각각 voltage로써 숫자로表示된다. 또한 탐촉자의 X와 Y의 위치(X와 Y는手動探傷時 L과 W에 해당)가亦是 숫자로써 원격장비를 조정하는 controller의 숫자 panel과 같이 super panel의 X, Y에 각각 나타난다. super panel의上記 digital display

와 遠隔 CRT display들은 video TV 카메라에 의하여 연속적으로 video tape recorder에 기록된다. 또한 모든 analog信號들은 super panel에서 6-channel strip chart recorder에 전달되는데 이는試驗 데이터의 일종의 hard copy로써 3개의 amplitude channel과 3개의 metal path channel로構成되며 이외에 탐촉자 module 위치, 즉 X와 Y가 event marker 신호로써 기록된다. super panel의 모든 analog信號들은 Ampex analog tape에도 기록이되며 analog tape 데이터의 재현亦是 super panel을 통해 이루어진다. 따라서 strip chart record와 computer printout 등은 analog tape record로부터再生시킬 수가 있다. super panel의 A₁, A₂, A₃, T₁, T₂, T₃, X, Y에 나타나는 모든 데이터들은 multiplex되어 카세트 테이프에 저장될 수 있는 컴퓨터에 보내진다.

2) Computer system

Data Acquisition System에 사용되는 소형 컴퓨터는試驗 데이터의 재빠른 처리에利用되며 이는 직접은-라인으로 데이터를 수집하거나 analog tape record를利用하여 나중에 컴퓨터 printout을 얻을 수도 있다.

① Computer system hardware

시험 데이터의 기록 및 분석을 위하여 사용되는 컴퓨터 시스템은 다음들로 구성된다.

- Data General Nova 840 central processing unit (CPU), 16 bit word memory, hardware multiply/divide (M/D) floating point (FP) hardware
- Data General Nova cassette drive(3-decks), 100,000 bytes
- Diablo moving head disk(dual drive, 5 million bytes)
- Gould 5,000 electrostatic printer/plotter (1,600 lines/minute, 132 characters/line print 3.5 inches/second plot, 100 points/inch resolution)
- ASR 33 teletype

Real time disk operating system(RDOS)과 적절

한 프로그램에 따라 조정되는 Nova 840 cpu는 일반 프로그램 및 데이터의 기억으로 32k를 사용한다.

Multiply/divide와 floating point hardware는 빠른 산술프로그램에 쓰이고 3-deck 카세트는 시험 데이터의 저장 및 재생에 이용되며 electrostatic printer/plotter는 고속의 printing과 plotting에 이용된다. Teletype은 operator의 console이나 system hardware의 진단을 위한 input으로 쓰인다.

② Computer system software: PULSE(program for ultrasonic signal evaluation)

PULSE는 Data General Nova Computer로 RDOS를 사용하여 만들어진 프로그램인데 이는 real-time multi-tasking operation을 가지고 Data General FORTRAN5로 쓰여진 프로그램이다. 이 시스템은 시험 데이터의 수집 및 분석에 사용되는 것으로 다음 6가지의 프로그램 module로 구성된다.

표 1. RLIS의 printer output

X RANGE 000 - 100.000
Y RANGE 000 - 1000.000

INSTRUMENT#1 AMPLITUDES 30. - 200.
METAL PATHS .5 - 4.5

INSTRUMENT#2 AMPLITUDES 30. - 200.
METAL PATHS 1.0 - 6.5

INSTRUMENT#3 AMPLITUDES 1 - 1.
METAL PATHS 0 - .0

XCNT	YCNT	X	Y	A1	T1	A2	T2	A3	T3	INSTR
0.	0.	.000	.00	111.	2 2	65	7 6	95.	1.9	1 0 0
216.	349.	9.37	3.49	8.	10.1	34	3.6	92.	1.7	0 2 0
218.	349.	9.45	3.49	9.	10.1	43	3.6	109.	1.7	0 2 0
220.	349.	9.54	3.49	5	10.0	44.	3.6	109.	1.7	0 2 0
222.	349.	9.63	3.49	5	10.1	53.	3.6	102	1.7	0 2 0
224.	349.	9.71	3.49	2.	10.1	85	3.6	107	1.7	0 2 0
226.	349.	9.80	3.49	0.	10.0	72.	3.5	108.	1.7	0 2 0
228.	349.	9.89	3.49	3.	10.1	89	3.6	109.	1.7	0 2 0

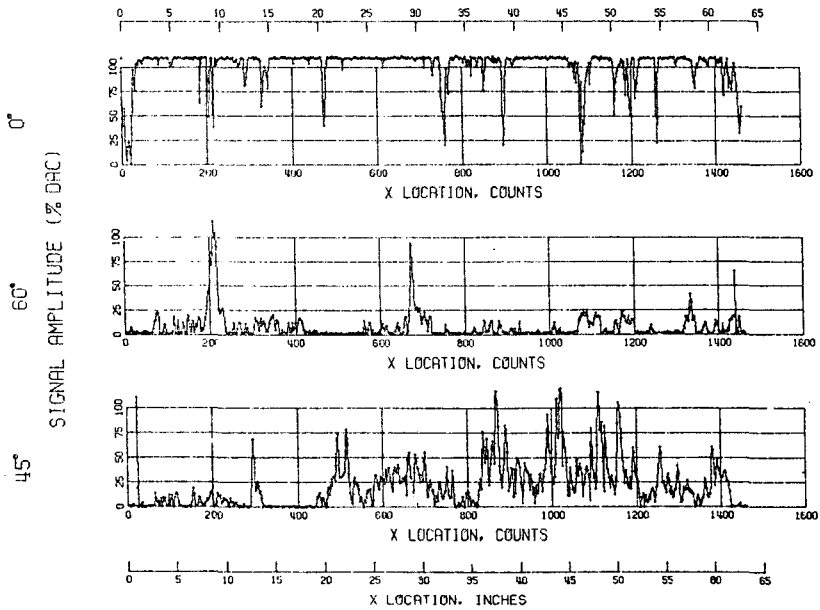
1370.	349	59.41	3.49	38.	4 2	1.	10.5	107.	1.7	1 0 0
1372.	349.	59.50	3.49	39.	4 2	1	10.5	103.	1.7	1 0 0
1374.	349.	59.59	3.49	33.	4 2	2.	10.6	106.	1.7	1 0 0
1380.	349.	59.85	3.49	31.	4 2	1.	10.5	105.	1.7	1 0 0
1382.	349.	59.93	3.49	35.	4 4	4.	10.7	101	1.7	1 0 0
1384.	349	60.02	3.49	35.	4 3	4	10.6	109	1.7	1 0 0
1386.	349	60.11	3.49	37.	4 3	7.	10.6	110.	1.7	1 0 0
1388.	349.	60.13	3.49	35.	4 3	9.	10.6	110.	1.7	1 0 0

TOTAL DATA POINTS - INSTR#1. 67

TOTAL DATA POINTS - INSTR#2. 22

TOTAL DATA POINTS - INSTR#3. 0

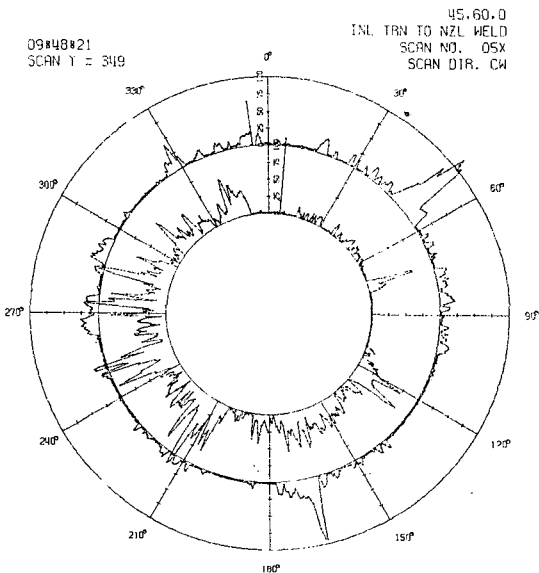
SEARCH UNIT LOCATION VS. SIGNAL AMPLITUDE



09#48#21
SCAN Y = 349

45.60.0
INL TRN TO NZL WELD
SCAN NO. 05X
SCAN DIR. CW

Fig 7. Strip chart plot



SEARCH UNIT LOCATION VS. SIGNAL AMPLITUDE
RING #1 = DATA FOR 45° REFRACTED ANGLE
RING #2 = DATA FOR 60° REFRACTED ANGLE

Fig 8. Polar plot

- Parameter entry
- General acquisition, testing, and examination system(GATES)
- Reporting analysis and test evaluation system (RATES)
- Acquisition system checkout
- Data log
- Tape identification

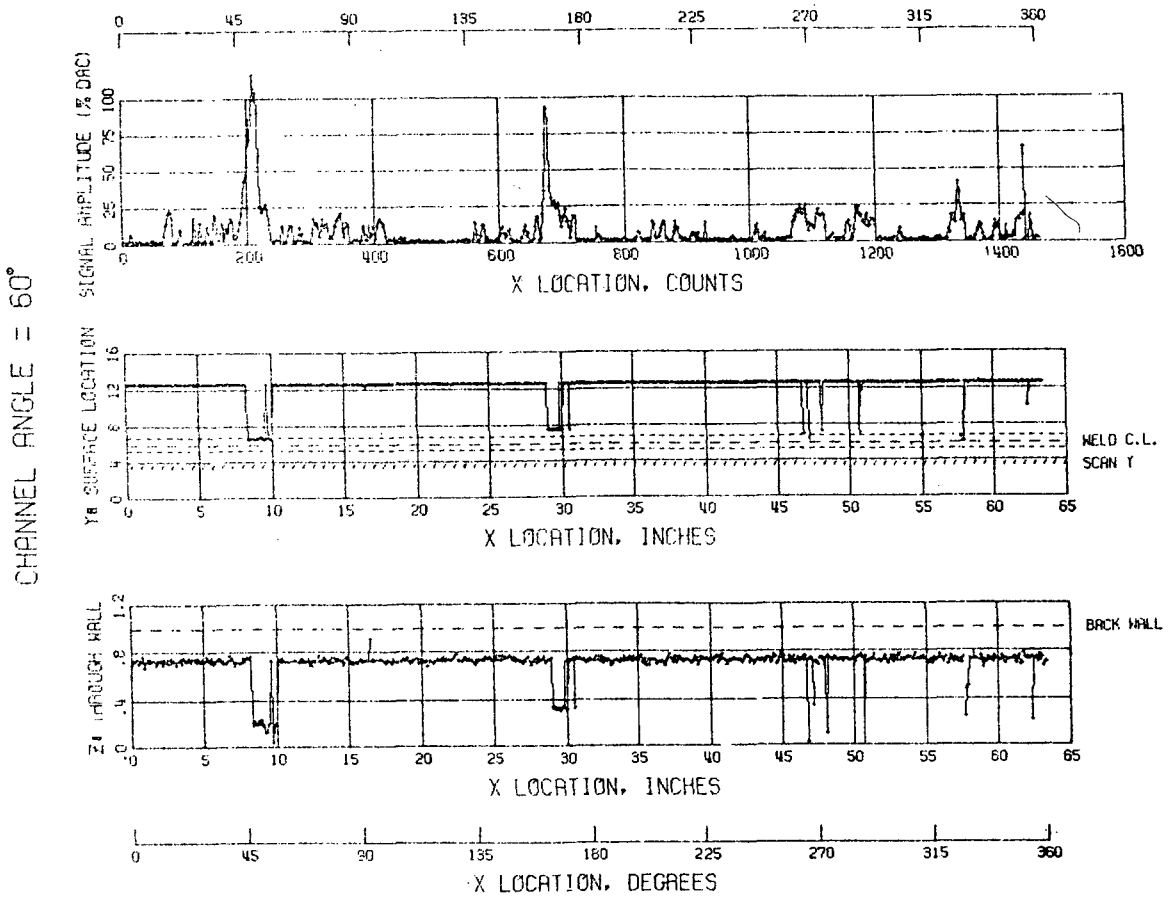
이중 몇가지 重要한 module만 説明하면 다음과 같다.

㉔ General acquisition, testing and examination system(GATES)

本 시스템은 試驗 데이터의 온-라인 處理에 대한 全般的인 調整을 하는 것으로 다음 事項들을 포함한다.

- Calibration 간격의 감시
- 특별한 Scan parameter의 삽입
- Scan 데이터의 수집

THREE-VIEW PLOT



09:48:21
SCAN Y = 349

45, 60, 0
INL TRN TO NZL WELD
SCAN NO. 05X
SCAN DIR. CW

Fig 9. Three-view plot

- Operator 경고 데이터
- Scan 데이터의 분석
- Scan comment의 삽입
- 전 試驗 데이터의 기록

따라서 検査者の 선택에 따라 데이터의 숫적인 list 나 3가지 plot(strip chart, polar three-view)이 가능하다. (表 1, 그림 7, 8, 9 참조)

表 1은 reduced data listing(RLIST)인데 要求에 따라 検査者は 특별부위에 對한 X, Y 진폭, metal

path 등을 볼 수 있으며 그림 7은 strip chart plot 으로 3가지 진폭 channel이 한 sheet에 plot이 되어 각 지시부의 진폭에 對한 그때의 X, Y 위치를 한 눈에 볼 수 있다. 그림 8은 polar plot으로 strip chart plot과 내용상 같으나 한 sheet에 두 channel을 수록한다. 그림 9는 3-view plot으로 단지 하나의 channel만이 利用되는데 맨 윗것은 一般 strip chart plot이며 中間 및 아래것이 各各 C-scan 및 B-scan 을 나타낸다.

Table 2. Scan log summary

SCAN LOG SUMMARY

SITE: SWRI PAR BLDG.
WELD: INL TRN TO NZL WELD

SCAN NO	SCAN DIR	VIDEO REEL CT	ANALOG REEL CT	CHART ROLL	CASS NO	FILE NO	DATE	TIME
1X	CW	1 0	1 6	1	2	1	3 7 75	9 18 2
2X	CCW	1 101	1 64	1	2	3	3 7 75	9 31 17
3X	CW	1 184	1 120	1	2	5	3 7 75	9 36 54
4X	CCW	1 254	1 175	1	2	7	3 7 75	9 43 1
5X	CW	1 321	1 230	1	3	1	3 7 75	9 48 21
6X	CCW	1 381	1 282	1	3	3	3 7 75	9 55 23
7X	CW	1 439	1 333	1	3	5	3 7 75	10 4 20
8X	CCW	1 493	1 384	1	3	7	3 7 75	10 10 5
9X	CW	1 545	1 433	1	4	1	3 7 75	10 15 30
10X	CCW	1 597	1 482	1	4	3	3 7 75	10 22 36
11X	CW	1 644	1 530	1	4	5	3 7 75	10 29 41
12X	CCW	1 688	1 576	1	4	7	3 7 75	10 35 16
13X	CW	1 731	1 621	1	5	1	3 7 75	10 42 59
14X	CCW	1 773	1 666	1	5	3	3 7 75	10 51 53

SCAN NO

COMMENTS

1X	FIRST 185 COUNTS OF DATA LOST; NOTED UNSTEADY FLICKER PERIODICALLY ON X-COUNT VALUE
2X	NO COMMENTS
3X	NO COMMENTS
4X	NO COMMENTS
5X	NO COMMENTS
6X	NO COMMENTS
7X	THIS, AS WELL AS THE LAST SEVERAL SCANS, HAVE SHOWN TWO SETS OF PEAKING FOR 60 DGRS: 220->240 COUNTS, AND 690->700 COUNTS
8X	NO COMMENTS
9X	NO COMMENTS
10X	NO COMMENTS
11X	THREE CLUSTERS OF PEAKS OVER 50% DAC NOTED FOR 60 DGRS: 340->390, 860->1000, AND 1300->1430 COUNTS.
12X	NO COMMENTS
13X	NOTE THAT ALL APPLICABLE ALERT-LIMIT VALUES FOR 60 DGRS, HAVE METAL-PATH VALUES THAT APPROACH THE MAX. GATE OF 6.5"
14X	END OF ANALOG TAPE FOR SCAN 14 IS 709; END OF VIDEO TAPE FOR SCAN 14 IS 814

㉞ Data log

이는 카세트 테이프로부터 表 2와 같은 scan log 요약 을 만드는 것으로 다음 事項들이 기록된다.

- scan 數
- video tape 위치
- analog tape record 위치
- scan type
- strip chart roll

數 ● cassette tape 數 ● scan 方向 ● ca- ssette file 數 ● scan 날자 및 時間 ● 檢査 者의 論評

따라서 本 요약으로부터 한 檢査 品目에 對한 적절 한 기록을 쉽게 찾을 수 있다.