

原子力發電所 稼動中 検査의 試驗分析을 위한 自動化研究 (I)

金 煜

韓國検査開發株式會社

1985年9月15日 接受

A Study of Automation for Examination Analysis of
Inservice Inspection for Nuclear Power Plant (I)

W. Kim

ABSTRACT

The developing country, KOREA where does not possess the natural resources for traditional energy such as oil and gas, so. The nuclear energy is the most single reliable source available for closing the energy gap.

For these reason,

It is inavoidable to construct the nuclear power plant and to develop technology related nuclear energy. The rate of operation in large nuclear power facilities depends upon the performance of work system through design and construction, and also the applied technology.

Especially, it is the most important element that safety and reliability in operation of nuclear power plant.

In view of this aspects,

Nuclear power plant is performed severe examinations during preservice and inservice inspection.

This study provide an automation of analysis for volumetric examination which is required to nuclear power plant components.

It is composed as follows:

I. Introduction

II. Inservice Inspection of Nuclear Power Plant

- * General Requirement.

- * Principle and Methods of Ultrasonic Test.

- * Study of Flaw Evaluation and Design of Classifying Formula for Flaws.

III. Design of Automation for Flaw Evaluation.

IV. An Example

V. Conclusion

In this theory,

It is classifying the flaws, the formula of classifying flaws and the design of automation that is the main important point.

As metioned the above,

Owing to such as automatic design, more time could be allocated to practical test than that of evaluation of defects, Protecting against subjective bias tester by himself and miscalculation by dint of various process of computation.

For the more, adopting this method would be used to more retaining for many test data and comparative evaluating during successive inspection intervals.

Inspite of limitation for testing method and required application to test components, it provide useful application to flow evaluation for volumetric examination.

Owing to the characteristics of nuclear power plant that is highly skill intensive industry and has huze system, the more notice should be concentrated as follows.

Establishing rational operation plan, developing various technology, and making the newly designed system for undeveloped sector.

I. 서 론

1. 연구목적

현대 산업이 비대해지고 고도화됨에 따라 필연적으로 자원문제에 직면하게 되었으며 석유대체에 너지로서 비석화에너지인 원자력에너지 이용이 자원문제를 해결할 수 있는 대체수단으로 부각되었고 이를 위하여 원자력발전소 건설과 이에 필요한 기술개발이 시급한 실정에 있다.

대규모 원자력 설비가 어느 정도의 가동율을 보유하고 있는가 하는 것은 그 시설을 설계, 건설하고 운전가동하는 과정에서 제반업무가 우수하게 수행되고 고도의 기술이 채택되었는가에 따라 결정되는 것이다. 특히 원자력발전소의 안전성과 신뢰도는 발전소 가동에 있어 가장 중요한 요소가 된다. 또한 원자력발전소에 관련되는 기술은 특수하고 복잡할 뿐만 아니라 핵심부인 원자로 및 주변부품이 고온 고압을 받고 있으며 방사능을 함유한 물

질이 포함되어 있으므로 원자력발전소는 가동전이나 가동중에 항상 요구되는 검사업무를 철저히 수행해야만 한다.¹⁾

따라서 원자력발전소의 각 부품들은 미리 계획된 일정과 검사방법에 따라 검사업무를 수행해야 하므로 본 연구에서는 각 부품에 요구되는 검사제반 업무의 처리사항과 검사결과에 대한 판정의 자동화를 이룩하여 원자력 검사업무의 효율성을 높임으로서 원자력 산업의 발전을 기하는 데 그 목적이 있다.

2. 연구개발의 범위

일반적으로 현재 국내에서 가동되고 있거나 건설중에 있는 원자력발전소의 원자로 형태는 경수형원자로(Light Water Cooled Type Power Reactor)이며, 대부분의 국가가 이 원자로의 가동중 검사를 위하여 미국기계학회(ASME)²⁾ 에서 규정한 보일러와 압력용기에 관한 코드³⁾의 제 11

주 1) 원자력발전소 가동중검사기술기준(한국에너지 연구소 1981년)

주 2) ASME; The American Society of Mechanical Engineer.

주 3) Boiler and Pressure Vessel code

권⁴⁾에 의하여 검사업무를 수행하고 있다.

이 코드는 검사의 책임과 검사자의 자격으로부터 검사부위, 검사정도, 검사의 기록에 대한 평가가 규정되어 있다. 검사는 원자로 용기를 중심으로 1, 2, 3, 등급의 각종 압력용기와 배관류가 주 대상이고 펌프 밸브도 포함되지만 특히 압력부위, 용접부위에 중점을 두고 있다.

본 연구는 경수형 원자로 형태의 발전소에 요구되는 검사의 제반업무 규정인 미국기계학회 코드 제 11 권에 의거한 경수냉각형 시스템의 가동중 검사에 관한 요구사항만 다루었고 검사방법으로는 원자력발전소 가동중검사의 적용검사방법 중 가장 중요한 체적시험(Volumetric Examination)에 해당하는 초음파 탐상법(Ultrasonic Examination)에 의한 검사결과 판정을 자동화설계하였다.

II. 원자력발전소 가동중검사

1. 가동중검사의 개요

가동중검사에 대한 기술수준인 미국기계학회의 보일러와 압력용기에 관한 코드 제 11 권은 1970년 미국기계학회, 미국표준협회⁵⁾ 및 미국 원자력 에너지위원회⁶⁾가 공동노력으로 마련한 것으로 경수냉각형 원자로의 1차 냉각재 계통과 이와 관련되는 부분에 대하여 사용기간 중의 시험 및 검사를 규정한 것이다. 이 코드의 목적은 발전원자로의 사용 기간중 생기는 결함을 시험 및 검사에 의하여 사전에 발견함으로써 발생할 수 있는 사고를 미연에 방지하여 공중의 건강과 종사원의 안전을 보호하고 신뢰성 있는 발전소 운전을 기대하는 데 있다고 할 수 있다.

동 코드는 검사의 책임, 검사자의 자격으로부터 검사범위, 검사정도, 검사방법과 검사기록의 평가까지 규정하고 있다.

1-1 범위와 책임

이 코드의 적용범위는 원자력 부품 1, 2, 3등급의 모든 압력부위와 용기가 주 적용범위이며 이 부품을 지지하는 지지물도 대상이 되고 있다. 그리고 원자력발전소 소유자의 가동중검사의 책임사항을 규정하고 있다. 즉 소유자는 가동중검사의 절차와 실시방법을 작성하여야 하고 시험실시자의 자격인정, 검사기록의 관리, 보전, 검사후 얻어진 정보의 기록 그리고 검사입회에 따른 준비 등의 책임을 명시하고 있다.

1-2 검사대상

검사대상으로는 주로 경수형 원자로인 가압수형 원자로(PWR; Pressurizer Water Reactor)와 증수원자로(BWR; Boiling Water Reactor)에 있어서 운전중 공용율이 높은 압력보유 부품들의 용접부분 중 열응력으로 인한 영향이 큰 부분과 높은 중성자조사부분이 선정되고 있다. 따라서 이러한 피검사체는 원자로 냉각재 계통과 이와 연결된 부분으로서 독립밸브(Isolation Valve), 체크밸브(Check Valve), 안전밸브(Safety Valve)와 릴리프 밸브(Relief Valve)까지 포함된다. 높은 열응력 발생의 가능성이 있는 부분의 실례로서는 원자로 머리부분과 플랜지(Plange)간의 너클용접부, 노즐내부의 만곡부분이 포함되며 그 밖에 원자로 용기, 증기 발생기와 가압기 등에서의 수직, 원주용접심, 원자로 내부체의 지지부, 1차 냉각계의 배관과 펌프밸브에서의 용접심, 내압부의 볼트등은 중요한 검사대상이 되고 있다.⁷⁾

검사대상 부품들은 원자로 냉각재 계통의 부품별로 항목을 지정 번호로 정하고 있으며 검사범위 검사정도등에 의한 검사범주를 분류하고 있다.

1-3 시험방법

가동중검사중 시험방법의 분류는 크게 세가지로 구

주 4) Rules for Inspection of Nuclear Power Plant Components.(ASME, 1983)

주 5) American National Standard Institute

주 6) U.SAEC; U.S. Atomic Energy Commission

주 7) 보문집(원자력 산업회의, 1975)

분되어 진다.

- a. 육안시험방법 (Visual Examination)
- b. 표면시험방법 (Surface Examination)
- c. 체적시험방법 (Volumetric Examination)

상기 세가지 방법중 육안 시험과 표면시험방법은 피검사체의 표면의 이상을 발견하는 시험법이고 체적시험은 피검사체의 내부결함 여부를 찾아내는 시험법이다. 이들 시험방법의 적용여부는 여러가지의 적용인자가 있으나 피검사체로의 접근성과 방사선 레벨에 의하여 결정된다.

육안시험은 눈에 의하여 피검사체의 표면불연속을 관찰하고 압력부품의 누설여부 그리고 구조적 기계적인 결함을 발견하는 것으로 직접 육안검사와 직접시험이 불가능한 곳은 거울 및 원격장치인 보아스코프(Bore Scope), 텔레스코프(Telescope)와 카메라 등을 이용한 원격 육안시험으로 대별된다.

표면시험에서 액체침투탐상시험(Liquid Penetrant Examination)과 자분탐상시험(Magnetic Particle Examination)이 적용된다.

액체침투탐상시험은 모세관현상을 이용한 방법이며 검출능 또한 적용방법에 따라 상당히 높다. 따라서 가동중 검사 동안에 발생이 예상되는 결함 검출에는 상당히 좋은 효과를 볼 수 있다.

그러나 검사방법으로서 침투제적용, 세척, 현상 그리고 관찰을 위해서는 접근성이 문제가 된다.

자분탐상 시험은 표면과 표면직하의 불연속을 검출하는 좋은 방법이나 자성체에 한해서 적용되므로 구리계통이나 오스테나이트계 재료로 되어있거나 클래딩(Cladding)으로 되어 있는 경우에는 적용할 수 없다.

체적시험으로서는 방사선투과시험(Radiographic Examination)과 초음파탐상시험(Ultrasonic Examination)이 있다.

방사선투과시험은 부품의 제작 및 가공 중에는 주요하게 이용되고 있으나 장비가 크고 방사선 수준이 높아 가동중 검사에는 별로 사용되지 않고 있

다.

초음파탐상시험법은 오늘날 가동중검사의 체적 시험으로 가장 중요하게 이용되고 있으며 초음파 탐상의 자동주사장치로 방사선 수준에 의한 접근성에 관계없이 적용되므로 가장 많이 채택되고 있으며 본 연구에서도 이 검사에 의한 결함 판정을 자동화 설계하였다.

1-4 검사일정

일반적으로 원자력발전소 수명을 40년으로 보고 검사일정계획 A(표 1)와 검사일정계획 B(표 2)의 두 가지 방법으로 대별하여 검사한다.

국내에서는 검사일정계획 B 방법에 의해 가동중 검사를 수행하고 있다.

<표 1> 검사일정계획 A

검사차수	검사기간 (년)	최소검사량 (%)	최대검사량 (%)
1 차	3	100	100
2 차	7	33	67
	10	100	100
	13	16	34
3 차	17	40	50
	20	66	75
	23	100	100
	27	8	16
4 차	30	25	34
	33	50	67
	37	75	100
	40	100	

2. 체적시험방법

대체로 가동중검사에 적용되는 검사의 종류를 대별하면 육안시험과 표면시험 그리고 체적시험으로 구분되어지며 체적시험으로 실시되는 시험방법으로는 검사 부재의 두께와 접근성 그리고 환경적인 요소등 여러 경우를 고려하여 선택되어 진다. 체적시험으로서는 방사선투과시험, 초음파탐상 시험 그리고 와전류시험등이 요구되고 있으나 가동중검

<표 2 > 검사일정계획 B

검사차수	검사기간 (년)	최소검사량 (%)	최대검사량 (%)
1 차	3	16	34
	7	50	67
	10	100	100
2 차	13	16	34
	17	50	67
	20	100	100
3 차	23	16	34
	27	50	67
	30	100	100
4 차	33	16	34
	37	50	100
	40	100	100

사에서 선택되는 시험방법으로는 초음파탐상시험이 주류를 이룬다. 초음파탐상시험법으로는 펄스 반사식 검사법이 주로 적용되며 자동 주사와 수동 초음파탐상이 사용되고 있다.

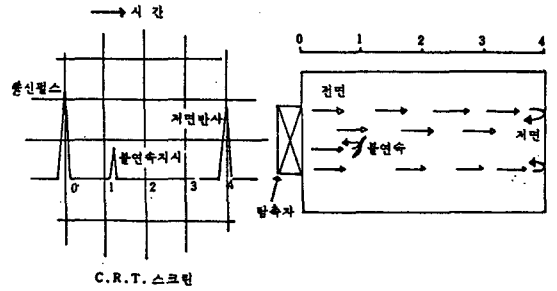
2-1 초음파탐상법의 원리와 종류

2-1-1 초음파탐상법의 원리

초음파탐상시험은 가청주파수보다 높은 0.4 ~ 25 MHz. 정도의 초음파를 사용하여 재료 내부의 결함을 찾아내는 것이다. 초음파탐상시험에 사용되는 높은 주파수의 진동을 발생하기 위하여 압전 물질 (Piezo Element)을 특정주파수에서 공진하도록 만든 초음파탐상용 탐촉자 (Transducer)를 사용한다.

탐촉자에 고주파전압을 걸어주면 이는 기계적 진동으로 바뀌어 초음파를 발생하고, 반대로 초음파를 가하면 진동자가 진동하면서 그 진동에 비례하는 고주파전압을 발생하게 된다. 즉 탐촉자는 전기 진동과 기계진동을 상호변환시켜 줄 수가 있어 초음파를 발생하기도 하고 받아들이기도 한다.

이러한 탐촉자를 시험체 위에 올려놓고 여기에 전기적 진동을 가하면 초음파는 시험체 내부로 전



[그림 1] 초음파탐상의 원리

달된다. 이때에 결함에 의한 불연속면이 존재하면 초음파의 일부가 불연속면에서 반사되어 되돌아오게 되는데, 이는 시험편의 반대면(바닥)에서 반사되어 되돌아 온 신호보다 빨리 도착되어 시간차에 의해 구별되어 진다.

이 반사되어 되돌아 온 초음파신호를 다시 전기적 신호로 바꾸어 기록장치에 기록하고 이를 분석하여 결함의 크기, 위치와 깊이를 알아낼 수가 있다.

2-1-2 초음파탐상시험의 종류

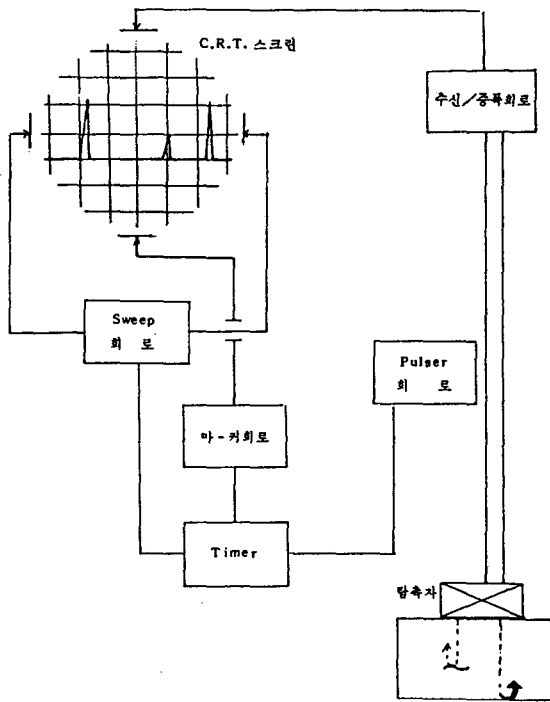
결함의 검출시 결함의 크기, 위치, 깊이 측정에는 다음과 같은 A·B·C-스캔 (Scan)의 세 가지 방법이 있다.

1) A-스캔

A-스캔은 초음파탐상 기기의 음극관상에 수평축은 초음파가 재질내에 전파하는 시간을, 수직축은 신호의 진폭을 나타내도록 하는 방법이다. 시험편내의 초음파의 속도에 의해 수평축 값은 거리 또는 깊이 계산에 사용될 수 있으며 반대로 시험편의 두께를 알고 있을 때 수평축 값은 초음파의 속도계산에 사용될 수도 있다. 초음파의 속도는 탄성계수와 밀접한 관계가 있으므로 A-스캔에 의하여 탄성계수 측정에도 이용될 수가 있다. 신호의 진폭은 투과 혹은 반사파의 강도를 나타내주는데 이는 결함의 크기, 시험편의 감쇄율, 초음파의 확산 등 여러 인자에 의해 결정되어진다.

2) B-스캔

B-스캔은 시험편의 종단면에서 본 결함의 크기



[그림 2] A-스캔 초음파 탐상장비의 Block Diagram

분포 사항을 알고자 할 때 사용된다.

초음파탐상기의 스위프신호(Sweep Signal)를 음극관의 수직축에 연결하고 탐촉자의 위치 신호를 수평축으로 연결한 후 결함에서 반사되어지는 신호의 진폭에 비례하게 주사선의 강도를 조절하게 된다. 저장음극관(Storage CRT)을 사용하고 탐촉자가 시편위를 지나가게 되면 시편 결함의 종단면을 볼 수가 있게 된다.

3) C-스캔

C-스캔은 시험편의 평면도로서 시험편 내의 불연속을 기록한다. 탐촉자로 시험편 평면을 가로,세로 축으로 움직이면서 이때의 불연속면이 나타나면 이를 이용하여 음극관 주사선의 밝기를 조절하여 결함의 위치를 표시한다. 이는 불연속면의 깊이나 방향 등에 대해서는 표시하지 못한다. 그러나 가로, 세로축 레코더(Recorder)를 사용하여

영구적으로 시험결과를 도시할 수가 있다.

2-2 탐상방법 및 측정방법

2-2-1 결함탐상방법

일반적으로 초음파탐상법에 의한 체적시험은 검사부품의 용접부위와 열영향부위(Heat Affect-ed Zone), 그리고 그 근처 모재부위를 검사하게 되어 있다. 또한 검사부품의 형상 및 결함의 기하학적 형태를 고려하여 한 검사부위에 대하여 수직탐상 및 사각탐상을 병행하도록 되어 있다. 또한 접근성을 고려하여 검사부품의 양면검사를 할 수도 있고 그렇지 못할 경우는 한쪽 면에서만 검사할 수 있다.

1) 수직탐촉자에 의한 시험

결함의 길이(l) 측정은 용접물인 경우는 용접길이 방향에 평행하게 탐상하며 결함의 폭(w) 측정은 용접길이 방향에 수직하게 탐상한다.

용접물 이외의 검사부품의 길이와 폭의 측정은 부품이 설치된 상태에서 기준점을 정하고 상하 혹은 좌우로 탐상한다.

2) 사각탐촉자에 의한 시험

검사하고자 하는 부위까지 초음파가 도달하도록 탐상하며 결함의 길이나 폭의 측정을 위한 탐상은 수직탐촉자를 이용한 탐상방법과 동일하게 실시한다.

2-2-2 결함측정방법

일반적으로 펄스반사식 초음파탐상시험에 의한 체적시험은 한 검사부위에 대하여 수직 및 사각탐촉자를 이용한 탐상방법으로 동시에 수행하며 초음파탐상기 스크린 상을 표준교정시편⁸⁾을 이용하여 결정되어진 기준수준을 초과하는 지시에 한하여 크기를 측정한다.

결함의 길이와 폭은 탐촉자가 검사부품의 표면을 이동한 거리이며 깊이(d)는 교정한 스크린상에 나타난 지시까지의 거리를 계산하면 된다.

1) 길이(l)

주 8) Boiler and Pressure Vessel Code Sec V; Nondestructive Exam. art. 4 (ASME 발행)

용접길이 방향이나 기준선에 평행하게 탐촉자를 이동하면서 결함으로부터 반사된 펄스가 탐상기 스크린상에 최대 높이로 나타나게 탐상하고 그점에서 좌우로 이동시키면서 스크린상의 지시가 최대 높이의 반(50%)으로 줄어드는 탐촉자 이동거리가 길이이다.(그림 3)

2) 폭(w)

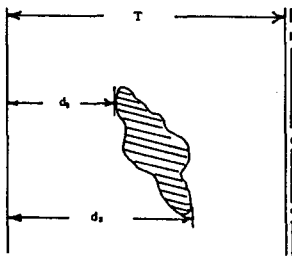
용접길이 방향이나 기준선에 수직하게 탐촉자를 이동하면서 결함으로부터 반사된 펄스가 초음파탐상기 스크린상에 최대 높이로 나타나게 조종하고 그점에서 상하로 이동시키면서 스크린상에 최대 높이로 나타나게 조종하고 그점에서 상하로 이동시키면서 스크린상의 지시가 최대 높이의 반으로 줄어드는 탐촉자 이동거리가 폭이다. (그림 3)

3) 깊이(d)

길이와 폭을 측정할 때 표준교정시편에 교정한 탐상기 스크린상의 나타난 지시를 실제 길이로 환산한 거리를 깊이로 한다. (그림 4)



[그림 3] 길이와 폭



[그림 4] 깊 이

(방법) d₁: 길이 방향으로 탐상하여 기준점에서 결함까지의 최소거리
 d₂: 길이 방향으로 탐상하여 기준점에서 결함까지의 최대거리
 w₁: 길이 방향에 수직으로 탐상하여 기준점에서 결함까지의 최소거리
 w₂: 길이 방향에 수직으로 탐상하여 기준점에서 결함까지의 최대거리
 d₃: 검사 표면에서 결함까지의 최소거리
 d₄: 검사 표면에서 결함까지의 최대거리

3. 결함평가에 대한 분석

3-1 결함형태에 대한 분석

결함형태 분류요소로서는 검사부품의 표면과 결함의 주요면이 이루는 각으로 분류되어지며 또한 결함간의 인접거리로써 분류되어질 수 있다.

우선 인접거리로서 단독결함과 다중결함인 경우로 나누어지며, 단독결함의 경우 결함의 주요면이 검사부품의 표면과 이루는 각으로 라미나(Laminar) 판(Planar) 비판(Nonplanar) 결함으로 세분되어지고 다중 결함인 경우는 다중라미나(Multiple Laminar) 다중판(Multiple Planar) 평행판(Parallel Planar) 이열동판(Nonaligned Coplanar) 결함의 네가지로 분류되어진다.

그러나 단독결함들 끼리 결합한 경우의 수로는 아홉가지의 형태로 분류될 수 있으나 결국은 크게 라미나형(Laminar Type)과 판형(Planar Type)으로 분류 평가할 수 있겠다.

<표 3> 다중결합의 경우의 수

	L	P	N
L	L-L	L-P	L-N
P	P-L	P-P	P-N
N	N-L	N-P	N-N

(범례) L : 라미나(Laminar)

P : 판(Planar)

N : 비판(Nonplanar)

이 표는 단독결함들간의 결합형태로서 생길 수 있는 경우의 수를 나타낸 것인데 여기서 중복을 빼면 L-L, L-P, L-N, P-P, P-N, N-N의 6가지로 축소되며 또한 비판형 결함은 두개의 판결함으로 분해평가되므로 L-N, P-N, N-N 결함의 다중결함은 결국 판결함으로 분류 평가된다.

또한 L-P, 결함의 결합도 두 결함이 결함 평가되므로 결국은 판결함으로 볼 수 있겠다. 그러므로 결함의 평가는 라미나형과 판형으로 구분하여 평가하면 된다.

3-2 결함형태에 따른 분류수치식 설계

3-2-1 라미나결합

어떤 결합으로부터 측정되어진 결합의 주요 면이 검사부품의 압력을 받는 표면과 평행하거나 10° 이내의 주요 단일면으로 되어 있는 판결합들은 라미나결합으로 간주한다. (그림 5)

$$\frac{\Delta d}{\Delta \ell} \leq \tan 10^\circ \cap \frac{\Delta d}{\Delta w} \leq \tan 10^\circ \dots\dots\dots (1) \text{식}$$

3-2-2 판결합

어떤 지시로부터 측정되어진 지시의 주요 면이 검사부품의 압력을 받는 표면과 평행하지 않은 단일면으로 되어 있으면 판결합으로 간주한다. (그림 6, 7)

$$\frac{\Delta d}{\Delta \ell} > \tan 10^\circ \cup \frac{\Delta d}{\Delta w} > \tan 10^\circ \dots\dots\dots (2) \text{식}$$

3-2-3 비판결합

어떤 지시로부터 측정되어진 지시의 주요 면이 단일면으로는 볼 수 없는 (두 개 이상의 면, 혹은 곡면), 한 연속된 결합은 주응력 방향에 수직하게 투영한 두 개의 판결합으로 분해 평가한다. (그림 8)

$$\frac{\Delta d}{\Delta \ell} > \tan 10^\circ \cap \frac{\Delta d}{\Delta w} > \tan 10^\circ \dots\dots\dots (3) \text{식}$$

3-2-4 다중라미나결합

라미나결합들이 아래와 같이 1인치 (inch) 이 내로 인접해 있을 때는 하나의 라미나결합으로 간주한다. (그림 5)

- a. $|w_1 - w_2'| \leq 1" \cup |w_1' - w_2| \leq 1"$
- b. $|\ell_1 - \ell_2'| \leq 1" \cup |\ell_1' - \ell_2| \leq 1"$
- c. $|d_1 - d_2'| \leq 1" \cup |d_1' - d_2| \leq 1"$

$$a \cap b \cap c \text{인 경우} \dots\dots\dots (4) \text{식}$$

3-2-5 다중판결합

인접한 지시들간의 거리가 인접지시들 중 결합 두께 (Δd)가 가장 큰 쪽보다 적거나 같은 경우의 불연속 지시들은 하나의 판결합으로 간주한다. (그림 9)

- 1) a. $\ell_1' - \ell_2 \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽})$
- b. $w_2' - w_1 \geq 0 \cap w_2 - w_1' \geq 0$
- c. $d_2' - d_1 \geq 0 \cap d_2 - d_1' \geq 0$

$$a \cap b \cap c$$

- 2) a. $w_1' - w_2 \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽})$
- b. $\ell_2' - \ell_1 \geq 0 \cap \ell_2 - \ell_1' \geq 0$
- c. $d_2' - d_1 \geq 0 \cap d_2 - d_1' \geq 0$

$$a \cap b \cap c$$

- 3) a. $d_1' - d_2 \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽})$
- b. $\ell_2' - \ell_1 \geq 0 \cap \ell_2 - \ell_1' \geq 0$
- c. $w_2' - w_1 \geq 0 \cap w_2 - w_1' \geq 0$

$$a \cap b \cap c$$

$$1) \cup 2) \cup 3) \text{인 경우} \dots\dots\dots (5) \text{식}$$

3-2-6 평행판결합

어떤 불연속한 지시들로부터 측정되어진 주요면들이 검사부품의 표면과는 평행하지 않고 지시들의 주요면 끼리는 평행한 불연속지시는 만약 이들간의 인접된 거리가 0.5인치보다 적거나 같은 경우는 단일판결합으로 간주한다. (그림 10)

- a. $\frac{\Delta d}{\Delta \ell} = \frac{\Delta d'}{\Delta \ell'} \cap \frac{\Delta d}{\Delta w} = \frac{\Delta d'}{\Delta w'}$
- b. $|\ell_1' - \ell_2| \leq 0.5" \cup |\ell_1 - \ell_2'| \leq 0.5"$
- c. $|w_1' - w_2| \leq 0.5" \cup |w_1 - w_2'| \leq 0.5"$
- d. $|d_1' - d_2| \leq 0.5" \cup |d_1 - d_2'| \leq 0.5"$

$$a \cap b \cap c \cap d \text{인 경우} \dots\dots\dots (6) \text{식}$$

3-2-7 이열동판결합

불연속한 지시들이 동판형결합이고 검사부품의 단면상으로 볼 때 일렬로 되어 있지 않고, 그리고 그 불연속 지시들간의 인접거리가 지시들 중 결합 두께 (Δd)가 가장 큰 쪽보다 적거나 같은 경우는 하나의 판결합으로 간주한다. (그림 11)

- a. $0 < \ell_1' - \ell_2 \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽}) \cup 0 < \ell_1 - \ell_2' \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽})$
- b. $0 < w_1' - w_2 \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽}) \cup 0 < w_1 - w_2' \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽})$
- c. $0 < d_1' - d_2 \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽}) \cup 0 < d_1 - d_2' \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽})$

$$a \cap b \cap c \text{인 경우} \dots\dots\dots (7) \text{식}$$

3-3 결합위치의 결정방법

결합의 위치 결정은 크게 두 가지로 볼 수 있다.

표면과 내부로 대별되며 각 경우의 판정비교기준치가 가변적이므로 결함평가의 중요인자로 볼 수 있다.

3-3-1 표면결함

결함이 표면에 노출되었거나 표면 직하에 있을 경우를 말하는데 수직표현을 하면 다음과 같다.

S < 0.4 x Δd / 2 (8) 식

여기서 S는 검사부품의 표면과 결함과의 최단 거리이며 (8)식을 만족하면 표면결함(그림 12)이다.

즉 T - d2 = x 라면

d1 ≥ x 이면 S = x 이고

d1 ≥ x 이면 S = d1 이다. (9) 식

그리고 Δd는 깊이의 차이(결함두께)이며

Δd = d2 - d1 이다. (10) 식

3-3-2 내부결함

결함이 검사부품 내부에 위치한 경우인데 수식 표현은 다음과 같다.

S ≥ 0.4 x Δd / 2 (11) 식

(11)식을 만족하면 내부결함(그림 13)이다.

3-4 결함크기의 측정방법

결함크기 측정은 크게 라미나형결함과 판형결함으로 대별하여 측정한다.

3-4-1 라미나형

압력을 받는 검사부품의 표면에 평행한 결함의 주요면의 면적을 크기로 측정하면 된다.

즉 길이(Δℓ)와 폭(Δw)의 곱으로 측정하며 결함면적의 측정치는 다음식과 같이 면적에 0.75 배 해 준다.

AA = Δℓ x Δw x 0.75 (12) 식

라미나형의 결함평가는 검사부재 두께(T)에 대한 결함면적을 기준치와 비교 평가하면 된다.

3-4-2 판 형

가동전 혹은 가동중 검사하는 동안에 검출된 모든 체적결함의 크기 결정은 결함이 완전히 포함되는 정사각형 혹은 직사각형의 크기로서 측정된다.

1) 길이(L)

길이는 검사부품의 내압을 받는 표면과 평행한 정사각형 혹은 직사각형의 한변으로 측정된다.

Δℓ = ℓ2 - ℓ1 (13) 식

Δw = w2 - w1 (14) 식

여기서 길이(L)는

Δℓ ≥ Δw 이면 L = Δℓ 이고

Δℓ < Δw 이면 L = Δw 이다. (15) 식

2) 결함두께(a 혹은 2a)

결함두께는 검사부품의 내압을 받는 표면에 수직 한 정사각형 혹은 직사각형의 한 변으로 측정되고 표면결함인 경우는 a이고 내부결함인 경우는 2a로 정한다.

표면결함의 경우

a = Δd + S (16) 식

내부결함의 경우

2a = Δd 에서

a = Δd / 2 (17) 식

3) 결함의 가로 세로의 비(길이 L과 결함두께 a의 비)는 a/L로 정하고 이 가로 세로의 비는 0.5를 초과할 수 없다.

a/L ≤ 0.5 이면 L = L 이고

a/L > 0.5 이면 L = 2a 이다. (18) 식

4) 판형결함의 비교평가는 결함의 형태, 위치, 그리고 크기의 종합적인 평가이다. 즉 검사부품의 압력을 받는 표면과 결함의 주요면과의 각과 위치 그리고 결함자체의 가로 세로의 비(a/L)에 대한 결함두께의 퍼센트(a/T x 100)의 측정치와 기준치와 비교 평가한다.

a. 표면판인 경우

a/L = (Δd + S) / L (19) 식

a/T (%) = (Δd + S) / T x 100 (20) 식

b. 내부판인 경우

a/L = Δd / 2L (21) 식

$$a/T (\%) = \frac{\Delta d}{2T} \times 100 \dots\dots\dots (22) \text{ 식}$$

3-4-3 비관형

3-4-2에서와 마찬가지로 길이 (Δl) 폭 (Δw) 결함두께 (Δd) 그리고 결함위치 (S)를 구하고 $L = \Delta l$ 인 경우와 $L = \Delta w$ 인 경우로 분류하여 각 경우의 a/L 값과 a/T 값을 구하여 비교평가한다.

3-5 결함비교평가 방법

3-5-1 비교기준치가 있을 경우

각 형태 결함에서 구한 크기측정치를 해당 부품의 합부기준치와 비교 평가한다.

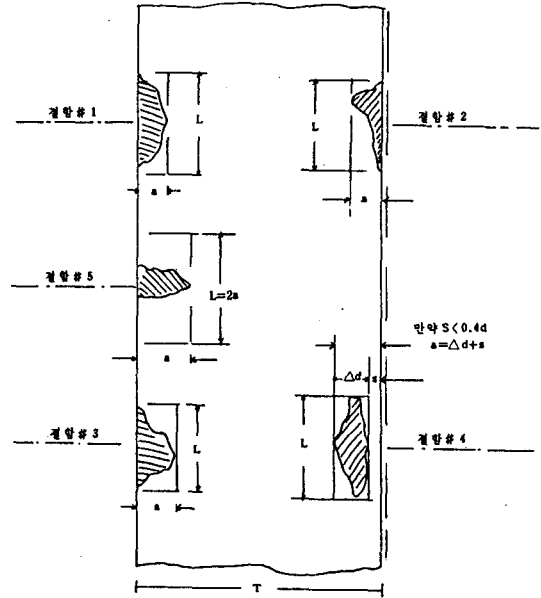
측 정 치		기 준 치	
$a/L, (T)$	$a/T \%, (AA)$	$a/L, (T)$	$a/T \%, (AA)$
I	P	I	Q

이라면

$P \leq Q$ 이면 합격 (Accept)

$P > Q$ 이면 불합격 (Reject)

3-5-2 비교기준치가 없을 경우



[그림 6] 표면판 (Subsurface Planar) 결함

측 정 치		기 준 치	
$a/L, (T)$	$a/T \%, (AA)$	$a/L, (T)$	$a/T \%, (AA)$
I	P	H	N
		J	S

측정치 I 값이 기준비교치에 없을 경우는 기준치에서 I 값 보다 큰값과 작은 값을 찾아 다음 식에 의해 구하여 비교 평가한다.

Q (해당기준치 $a/T \%$ 나 AA)

$$= \frac{I-H}{J-H} \times (S-N) + N \dots\dots\dots (23) \text{ 식}$$

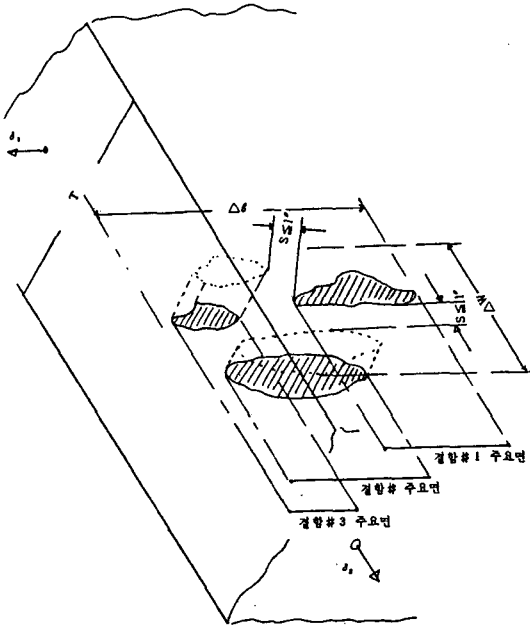
$P \leq Q$ 이면 합격 (Accept)

$P > Q$ 이면 불합격 (Reject)

3-5-3 비교기준치에 Y 값이 있을 경우

라미나결함과 표면판결함일 경우는 3-5-1 항과 3-5-2 항에 의해서 비교 평가하면 되고 내부판형 결함의 경우는 Y 값에 따라 세가지로 분류 비교 평가 한다.

$$Y = S/a \dots\dots\dots (24) \text{ 식}$$



[그림 5] 라미나 (Laminar) 결함

1) $Y < 0.4$ 일 경우

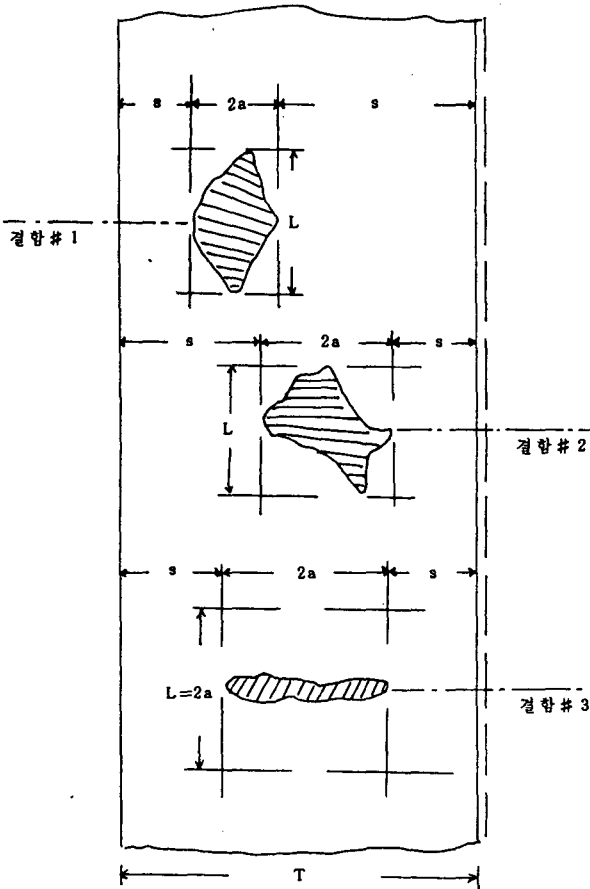
이 경우는 표면판기준치와 비교 평가한다.

2) $0.4 \geq Y < 1$ 인 경우

3-5-1 항 혹은 3-5-2 항에 따라 구한 기준치의 a/T (%) 값에 Y 값을 곱한 것을 측정치와 비교 평가한다.

3) $Y \geq 1$ 인 경우

3-5-1 항 혹은 3-5-2 항에 따라 구한 기준치의 a/T (%) 값에 1을 곱해서 측정치와 비교 평가한다.

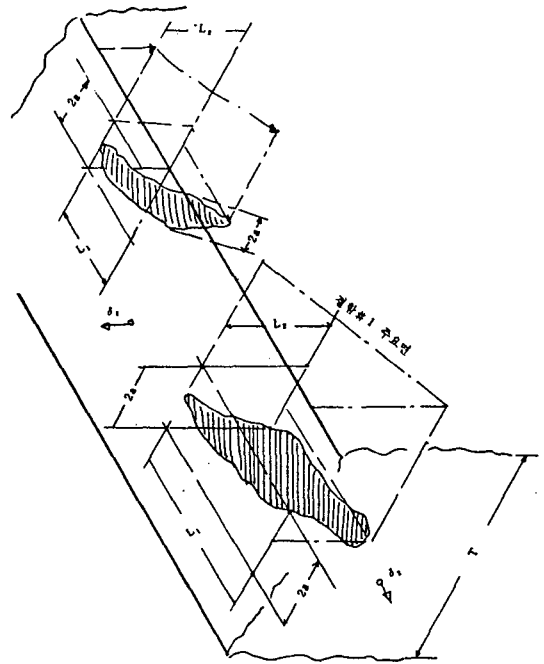


[그림 7] 내부판 (Subsurface Planar) 결함

4. 현실태와 개선방안

4-1 초음파탐상의 자동화 및 검사실태

원자력발전소 가동중점사의 체적시험으로 이용되고 있는 초음파 탐상시험은 부품의 종류 및 결함



[그림 8] 비판 (Nom Planar) 결함

의 형상에 따라 검사부품의 미세한 결함까지 검출할 수 있으므로 원자력발전소의 많은 부품의 검사 방법으로 채택되고 있다.

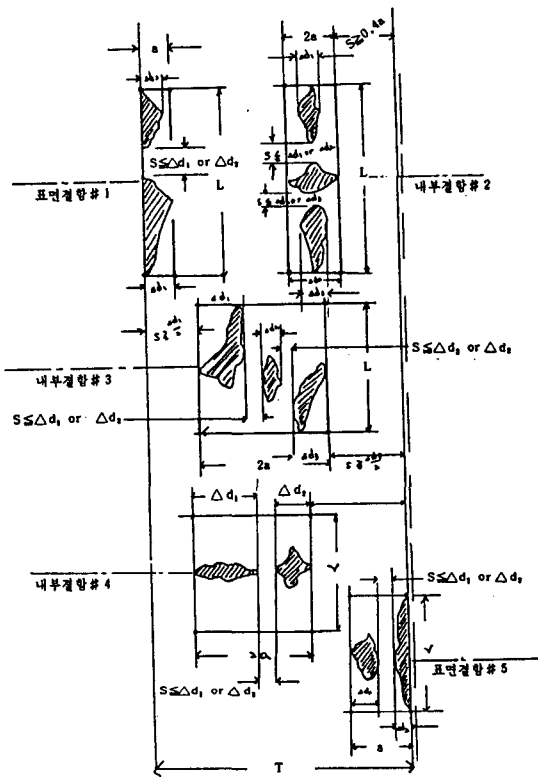
이를 위하여 세계 각국 연구소 및 초음파탐상기 제작처에서도 이에 대한 자동화처리 연구를 끊임없이 해오고 있으며 이미 상당 수준의 자동화가 달성되어 검사실무에 적용되고 있다.

국내에서도 원자력발전소 체적검사를 위하여 각 학교 및 연구기관에서 이에 대한 연구를 끊임없이 노력하고 있으나 아직 초음파탐상의 자동화 처리 국산화 과정에서 많은 부분이 미개발된 상태이다.

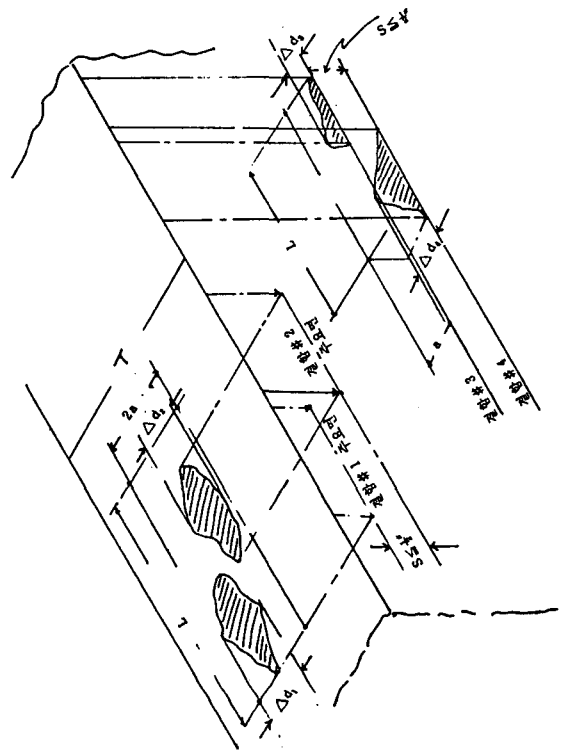
초음파탐상의 자동화는

- a. 주사장치의 자동화
- b. 데이터 수집의 자동화
- c. 데이터 처리의 자동화

d. 결함판정의 자동화로 볼 수 있으며 현 국산화 과정에서 주사장치의 자동화 및 데이터 수집의 자동화는 모두 달성되었으나 데이터 처리 및 결



[그림 9] 다중판 (Multiple Planar) 결함



[그림 10] 평행판 (Parallel Planar) 결함

합판정의 자동화는 아직 미개발된 상태로 계속 연구하고 있는 실정에 있다.

그리고 현 검사실태로서 많은 검사부품에서 검출되어진 기준수준을 초과하는 여러 지시에 대하여 매우 복잡한 여러 단계를 수작업을 통하여 결함을 분석평가하므로 검사시간의 상당부분을 차지하며 또한 평가자의 지식만으로 평가하므로 그릇된 주관이 평가에 게재되어 정확한 결함평가에 지장을 줄 수 있으며 검사차수별 결함상태를 분석하고 검사 다음 단계인 보수 및 교체등의 결정을 위하여 구문서를 찾아 비교 분석해야하는 불편한 점이 있다.

4-2 적용검사 업무의 개선방안과 이점

일반적으로 원자력발전소 수명 40년동안 수차에 걸쳐 검사를 반복 실시하는 가동중검사는 검사 결과의 정확성 및 합리성이 요구되며 또한 검사후

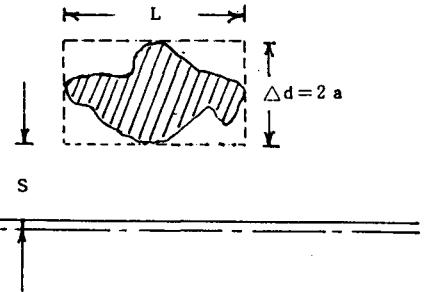
에도 발생할 수 있는 결함의 성장 및 생성을 예시해야 하며 파괴에 대한 예측을 통하여 검사부품의 사전보수 및 교체를 해야한다.

그러므로 개선방안으로 다음과 같이

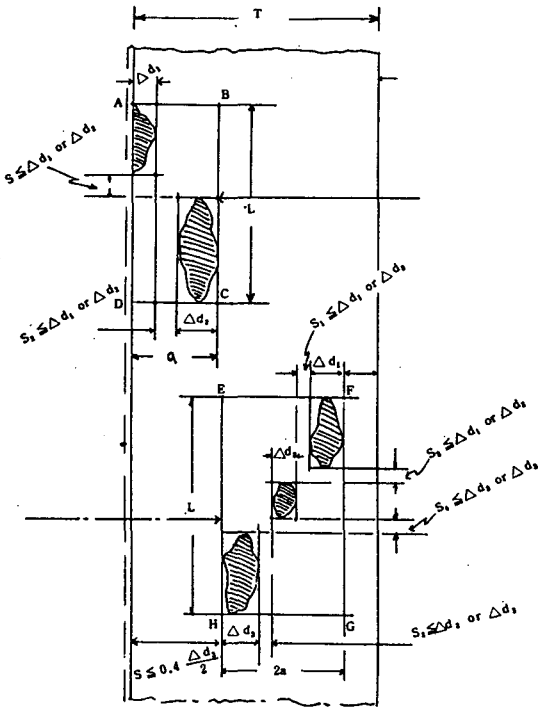
- a. 검사부품에 대한 일반요구사항 및 검사요구 자료를 축적 보관
- b. 검사 측정치로부터 결함의 분류 자동화처리
- c. 결함의 평가 자동화처리
- d. 검사 차수별 비교 평가 자료로 검사결과 평가서로 활용

이상과 같은 자동화처리를 하므로써 검사시간의 많은 부분을 차지하는 결함평가를 위한 수작업시간을 실험시간으로 많이 활용할 수 있으며 평가자의 그릇된 주관과 복잡한 계산과정으로 인한 오류를 방지할 수 있으며 또한 아무리 많은 검사부품의

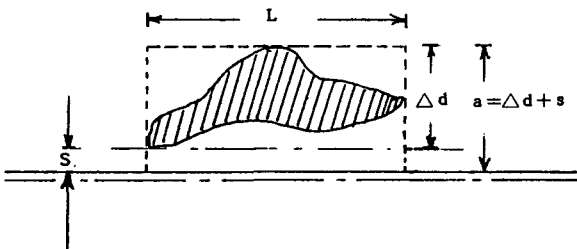
검사보고자료 및 검사결과자료가 생성되어도 축적 보관할 수 있으며 검사 차수별 결함의 비교평가를 위하여 검사 실적자료로써 활용할 수 있으며 결함의 성장 및 파괴예측자료로 이용할 수 있다.



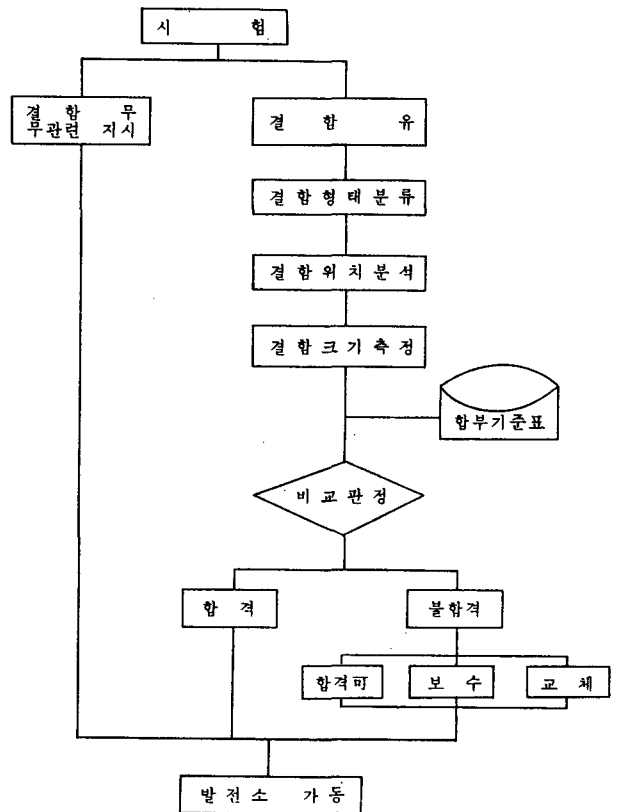
[그림 13] 내부 (Subsurface) 결함



[그림 11] 이열동판 (Nonaligned Coplanar) 결함



[그림 12] 표면 (Surface) 결함



[그림 14] 결함판정의 자동화시스템

참고문헌

1. DANIEL D. MCCRACKEN; A Simplified Guide to Structured Cobol Programming (1976. John Willey & Sons, Inc).
2. H.E. Gundtoft & T. Nielsen; Accurate Three-Dimensional Characterization of Ultrasonic Sound Fields (by computer controlled rotational Slanning).
3. ASME ; Boiler and Pressure Vessel Code Sec V and Sec XI
Sec V ; Nondestructive Examination
Sec XI ; Rule for Inservice inspection of Components
4. AWS; Guide for the nondestructive inspection of Welds, (American Welding Society).
5. JOSEF TRAUTKRÄMER, et; Ultrasonic Testing materials
6. ELLIS HOROWITS & SARTAT SAHNI; Fundametals of DATA STRUCTURE.
7. 한국원자력에너지연구소 : 원자력발전소 가동중 검사 기술기준 (1981년 판)
: 제 1 차 가동중검사 (고리 원자력발전소 1호기. 1980년).
8. 한국표준연구소 : 초음파탐상시험의 자동화 (1984)
: 정보처리 표준화에 관한 연구
9. 한국 원자력 산업회의 ;보문집 (1975)
10. 홍영식, 엄기현 저 ; 자료구조 (정익사)
11. 배일성, 구연호, 성기수 ; Cobol 연습 (대은출판사)



편집자 註 : 회원명단중 오기, 누락, 정정이 필요하거나 근무처 및 현주소가 변경된 회원께서는 다음 양식에 의거 한국 비파괴검사학회 사무실 (전화 583-7564)로 연락주시기 바랍니다.

아울러 당학회에서는 대체구좌를 개선하여 회비 납부에 편의를 도모토록 하였으니 많은 이용을 바라겠습니다.

성명 (영문)	근무처 (전화번호)	현주소

우편대체 구좌번호 : 012591-31-2004695

보내주실 곳 : 서울특별시 강남구 서초동 산62-3

한국비파괴검사학회 직원 임상석
직원 박영희