

原電 稼動中検査 試験分析을 爲한 自動化 研究

*A Study of Automation for
Examination Analysis of
Inservice Inspection for
Nuclear Power Plant*



金 暹
(韓國検査開發(株) 技術部 部長代理)

I. 서 론

1. 연 구 목 적

현대산업이 비대해지고 고도화됨에 따라 필연적으로 자원문제에 직면하게 되었으며, 석유대체에너지로서 비화석에너지인 원자력에너지의 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 관련된 기술은 특수하고 복잡할 뿐만 아니라 핵심부인 원자로 및 주변 부품이 고온·고압을 받고 있으며, 방사능을 함유한 물질이 포함되어 있으므로 원자력발전소는 가동전이나 가동중에 항상 요구되는 검사업무를 철저히 수행해야만 한다.

따라서 원자력발전소의 각 부품들은 미리 계획된 일정과 검사방법에 따라 검사업무를 수행해야 하므로 본 연구에서는 각 부품에 요구되는 검사제반업무의 처리사항과 검사결과에 대한 판정의 자동화를 이룩하여 원자력 검사업무를 효율성을 높임으로서 원자력산업의 발전을 기하는데 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 가동중검사를 위하여 미국기계학회(ASME)에서 규정한 보일러와 압력용기에 관한 코드의 제 11권에 의하여 검사업무를 수행하고 있다.

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

본 연구는 경수형 원자로 형태의 발전소에 요구되는 검사의 제반업무규정인 미국기계학회코드 제11권에 의거한 경수냉각형 시스템의 가동중검사에 관한 요구사항만 다루었고, 검사방법으로는 원자력발전소 가동중검사의 적용검사방법중 가장 중요한 체적시험(Volumetric Examination)에 해당하는 초음파탐상법(Ultrasonic Examination)에 의한 검사결과 판정을 자동화 설계하였다.

II. 원자력발전소 가동중검사

1. 가동중검사의 개요

가동중검사에 대한 기술수준인 미국기계학회의 보일러와 압력용기에 관한 코드 제11권은 1970년 미국기계학회, 미국표준협회 및 미국원자력에너지위원회가 공동노력으로 마련한 것으로, 경수냉각형 원자로의 1차냉각재계통과 이와 관련된 부분에 대하여 사용기간중의 시험 및 검사를 규정한 것이다. 이 코드의 목적은 발전원자로의 사용기간중 생기는 결함을 시험 및 검사에 의하여 사전에 발견함으로써 발생할 수 있는 사고를 미연에 방지하여, 공중의 건강과 종사원의 안전을 보호하고 신뢰성 있는 발전소 운전을 기대하는데 있다고 할 수 있다.

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

1-1 범위와 책임

이 코드의 적용범위는 원자력 부품 1·2·3 등급의 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 준비등의 책임을 명시하고 있다.

1-2 검사대상

검사대상으로는 주로 경수형 원자로인 가압수형 원자로(PWR; Pressurizer Water Reactor)와 비등수형 원자로(BWR; Boiling Water Reactor)에 있어서 운전중 공용율이 높은 압력보유 부품들의 용접부분중 열응력으로 인한 영향이 큰 부분과 높은 중성자조사부분이 선정되고 있다. 따라서 이러한 피검사체는 원자로냉각재계통과 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 실패로는 원자로 머리부분과 플랜지(Plange)간의 너클용접부, 노즐내부의 만곡부분이 포함되며 그 밖에 원자로용기, 증기발생기와 가압기 등에서의 수직, 원주용접심, 원자로내부체의 지지부, 1차냉각계의 배관과 펌프밸브에서의 용접심, 내압부의 볼트 등은 중요한 검사대상이 되고 있다.

검사대상 부품들은 원자로냉각재계통의 부품별로 항목을 지정번호로 정하고 있으며, 검사범위와 검사정도 등에 의한 검사범주를 분류하고 있다.

1-3 시험방법

가동중검사중 시험방법의 분류는 크게 세가지로 구분된다.

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

상기 세가지 방법중 육안시험과 표면시험방법은 피검사체의 표면에서 이상을 발견하는 시험법

〈표 1〉 검사일정계획 A

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

〈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
	23	16	34
3 차	27	50	67
	30	100	100
	33	16	34
4 차	37	50	100
	40	100	

이고, 체적시험은 피검사체의 내부결함 여부를 찾아내는 시험법이다. 이들 시험방법의 적용여부는 여러가지의 적용인자가 있으나, 피검사체의 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 원격육안시험으로 대별된다.

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

액체침투탐상시험은 모세관현상을 이용한 방법이며 검출능 또한 적용방법에 따라 상당히 높다. 따라서 가동중검사동안에 발생이 예상되는 결함검출에는 상당히 좋은 효과를 볼 수 있다. 그러나 검사방법으로서 침투제적용, 세척, 현상 그리고 관찰을 위해서는 접근성이 문제가 된다.

자분탐상시험은 표면과 표면직하의 불연속을 검출하는 좋은 방법이나 자성체에 한해서 적용되므로 구리계통이나 오스테나이트계 재료로 되어있거나 클래딩(Cladding)으로 되어있는 경우

에는 적용할 수 없다.

체적시험으로서는 방사선투과시험(Radiographic Examination)과 초음파탐상시험(Ultrasonic Examination)이 있다. 방사선투과시험은 부품의 제작 및 가공중에는 주요하게 이용되고 있으나, 장비가 크고 방사선 수준이 높아 가동중 검사에는 별로 사용되지 않고 있다. 초음파탐상 시험법은 오늘날 가동중검사의 체적시험으로 가장 중요하게 이용되고 있으며, 초음파탐상의 자동주사장치로 방사선 수준에 의한 접근성에 관계없이 적용되므로 가장 많이 채택되고 있으며, 본 연구에서도 이 검사에 의한 결함판정을 자동화 설계하였다.

1-4 검사일정

일반적으로 원자력발전소 수명을 40년으로 보고 검사일정계획 A(표1)와 검사일정계획 B(표2)의 두가지 방법으로 대별하여 검사한다. 국내에서는 검사일정계획 B 방법에 의해 가동중검사를 수행하고 있다.

2. 체적시험방법

대체로 가동중검사에 적용되는 검사의 종류를 대별하면 육안시험과 표면시험 그리고 체적시험으로 구분되어지며, 체적시험으로 실시되는 시험방법으로는 검사부재의 두께와 접근성 그리

고 환경적인 요소 등 여러 경우를 고려하여 선택되어진다. 체적시험으로는 방사선 투과시험, 초음파탐상시험 그리고 와전류시험 등이 요구되고 있으나, 가동중검사에서 선택되는 시험방법으로는 초음파탐상시험이 주류를 이룬다. 초음파탐상시험법으로는 펄스반사식 검사법이 주로 적용되며, 자동주사와 수동초음파탐상이 사용되고 있다.

2-1 초음파탐상법의 원리와 종류

2-1-1 초음파탐상법의 원리

초음파탐상시험은 가청주파수보다 높은 0.4~25MHz 정도의 초음파를 사용하여 재료내부의 결함을 찾아내는 것이다. 초음파탐상시험에 사용되는 높은 주파수의 진동을 발생하기 위하여 압전물질(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 전기진동과 기계진동을 상호변환시켜 줄 수가 있어 초음파를 발생하기도 하고 받아들이기도 한다.

이러한 탐촉자를 시험체 위에 올려놓고 여기에 전기적 진동을 가하면 초음파는 시험체 내부로 전달된다. 이때에 결함에 의한 불연속면이 존재하면 초음파의 일부가 불연속면에서 반사되어 되돌아오게 되는데, 이는 시험편의 반대면(바닥)에서 반사되어 되돌아온 신호보다 빠리 도착되어 시간차에 의해 구별되어 진다.

이 반사되어 되돌아온 초음파신호를 다시 전기적신호로 바꾸어 기록장치에 기록하고 이를 분석하여 결함의 크기, 위치와 깊이를 알아낼 수가 있다.

2-1-2 초음파탐상시험의 종류

결함의 검출시 결함의 크기, 위치, 깊이 측정

에는 다음과 같은 A·B·C-스캔(Scan)의 세 가지 방법이 있다.

1) 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 탄성계수측정에도 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, 분포사항을 알고자 할때 사용된다.

초음파탐상기의 스위프신호(Sweep Signal)를 음극관의 수직축에 연결하고 탐촉자의 위치신호를 수평축으로 연결한후 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 시험편내의 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 Affected 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 표준교정시편을 이용하여 결정되어진 기술수준을 초과하는 지시에 한하여 크기를 측정한다.

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

1) 길 이(l)

용접길이 방향이나 기준선에 평행하게 탐촉자를 이동하면서 결함에서 부터 반사된 펄스가 탐상기 스크린상에 최대 높이로 나타나게 탐상하고, 그 점에서 좌우로 이동시키면서 스크린상

의 지시가 최대 높이의 반(50%)으로 줄어드는 탐촉자 이동거리가 길이이다.

2) 폭(w)

용접길이 방향이나 기준선에 수직하게 탐촉자를 이동하면서 결함에서 부터 반사된 펄스가 초음파탐상기 스크린상에 최대 높이로 나타나게 조종하고, 그점에서 상하로 이동시키면서 스크린상의 지시가 최대 높이의 반으로 줄어드는 탐촉자 이동거리가 폭이다.

3) 깊 이(d)

길이와 폭을 측정할때 표준교정시편에 교정한 탐상기 스크린상의 나타난 지시를 실제 길이로 환산한 거리를 깊이로 한다.

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, 다중결함인 경우는 다중라미나(Multiple Laminar), 다중판(Multiple Planar), 평행판(Parallel Planar), 이열동판(Non-aligned 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 평가 할 수 있겠다(표3).

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-

〈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

(별례) L : 라미나(Laminar)

P : 판(Planar) N : 비판(Nonplanar)

N결합의 다중결합은 결국은 판결합으로 분류·평가된다.

또한 L-P 결합의 결합도 두 결합이 결합 평가되므로, 결국은 판결합으로 볼 수 있겠다. 그러므로 결합의 평가는 라미나형과 판형으로 구분하여 평가하면 된다.

3-2 결합형태에 따른 분류수치식 설계

3-2-1 라미나결합

어떤 결합에서 부터 측정되어진 결합의 주요면이 검사부품의 압력을 받는 표면과 평행하거나, 10° 이내의 주요 단일면으로 되어있는 판결합들은 라미나결합으로 간주한다.

$$\frac{\Delta d}{\Delta l} > \tan 10^\circ \cap \frac{\Delta d}{\Delta w} \leq \tan 10^\circ \dots\dots (1)$$

3-2-2 판결합

어떤 지시에서 부터 측정되어진 지시의 주요면이 검사부품의 압력을 받는 표면과 평행하지 않은 단일면으로 되어 있으면 판결합으로 간주한다.

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

3-2-3 비판결합

어떤 지시에서 부터 측정되어진 지시의 주요면이 단일면으로는 볼 수 없는(두개 이상의 면 혹은 곡면), 한 연속된 결합은 주응력 방향에 수직하게 투영한 두개의 판결합으로 분해 평가한다.

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

3-2-4 다중라미나결합

라미나결합들이 다음과 같이 1인치(inch)이내로 인접해 있을 때는 하나의 라미나결합으로 간주한다.

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. $|d_1 - d_2'| \leq 1" \cup |d_1'' - d_2| \leq 1"$

$a \cap b \cap c$ 인 경우 (4)

3-2-5 다중판결합

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

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) ∪ 2) ∪ 3)인 경우 (5)

3-2-6 평행판결합

어떤 불연속한 지시들로 부터 측정되어진 주요면들이 검사부품의 표면과는 평행하지 않고 지시들의 주요면끼리는 평행한 불연속지시는 만약 이들간의 인접된 거리가 0.5인치보다 적거나 같은 경우는 단일판결합으로 간주한다.

a. $\frac{\Delta d}{\Delta l} = \frac{\Delta d'}{\Delta l'} \cap \frac{\Delta d}{\Delta w} = \frac{\Delta d'}{\Delta w'}$

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. $|d_1' - d_2| \leq 0.5" \cup |d_1 - d_2'| \leq 0.5"$

$a \cap b \cap c \cap d$ 인 경우 (6)

3-2-7 이열동판결함

불연속한 지시들이 동판형결함이고 검사부품의 단면상으로 볼때 일렬로 되어있지 않고 그리고 그 불연속 지시들간의 인접거리가 지시들중 결합두께(Δd)가 가장 큰 쪽보다 적거나 같은 경우는 하나의 판결함으로 간주한다.

- a. $0 < l_1' - l_2 \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽}) \cup 0 < l_1 - l_2' \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽})$
- 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. $0 < d_1' - d_2 \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽}) \cup 0 < d_1 - d_2' \leq (\Delta d \text{와 } \Delta d' \text{ 중 큰쪽})$
 $a \cap b \cap c$ 인 경우.....(7)

3-3 결함위치의 결정방법

결함의 위치결정은 크게 두가지로 볼 수 있다. 표면과 내부로 대별되며, 각 경우의 판정비교 기준치가 가변적이므로 결함평가의 중요인자로 볼 수 있다.

3-3-1 표면결함

결함이 표면에 노출되었거나 표면직하에 있을 경우를 말하는데, 수식표현을 하면 다음과 같다.

$$S < 0.4 \times \frac{\Delta d}{2} \dots\dots\dots(8)$$

여기서 S는 검사부품의 표면과 결함과의 최단거리이며, (8)식을 만족하면 표면결함이다.

즉, $T - d_2 = x$ 라면

$$d_1 \geq x \text{ 이면 } S = x \text{ 이고}$$

$$d_1 < x \text{ 이면 } S = d_1 \text{ 이다} \dots\dots\dots(9)$$

그리고 Δd는 깊이의 차이(결합두께)이며

$$\Delta d = d_2 - d_1 \text{ 이다} \dots\dots\dots(10)$$

3-3-2 내부결함

결함이 검사부품 내부에 위치한 경우인데, 수식표현은 다음과 같다.

$$S \geq 0.4 \times \frac{\Delta d}{2} \dots\dots\dots(11)$$

(11)식을 만족하면 내부결함이다.

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 0.75배해 준다.

$$AA = \Delta l \times \Delta w \times 0.75 \dots\dots\dots(12)$$

라미나형의 결함평가는 검사부재두께(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.

$$\Delta l = l_2 - l_1 \dots\dots\dots(13)$$

$$\Delta w = w_2 - w_1 \dots\dots\dots(14)$$

여기서 길이(L)는

$$\Delta l \geq \Delta w \text{ 이면 } L = \Delta l \text{ 이고}$$

$$\Delta l < \Delta w \text{ 이면 } L = \Delta w \text{ 이다} \dots\dots\dots(15)$$

2) 결합두께(a 혹은 2a)

결합두께는 검사부품의 내압을 받는 표면에 수직한 정사각형 혹은 직사각형의 한변으로 측정되고, 표면결함인 경우는 a이고 내부결함인 경우는 2a로 정한다.

표면결함의 경우

$$a = \Delta d + S \dots\dots\dots(16)$$

내부결함의 경우

$$2a = \Delta d \text{ 에서}$$

$$a = \frac{\Delta d}{2} \dots\dots\dots(17)$$

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

$$a/L \leq 0.5 \text{ 이면 } L = L \text{ 이고} \dots\dots\dots(18) \text{ 식}$$

$$a/L > 0.5 \text{ 이면 } L = 2a \text{ 이다.}$$

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

a. 표면판인 경우

$$a/L = \frac{\Delta d + S}{L} \dots\dots\dots(19)$$

$$a/T(\%) = \frac{\Delta d + S}{T} \times 100 \dots\dots\dots(20)$$

b. 내부판인 경우

$$a/L = \frac{\Delta d}{2L} \dots\dots\dots(21)$$

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

3-4-3 비판형

3-4-2에서와 마찬가지로 길이(Δℓ), 폭(Δw), 결함두께(Δd) 그리고 결함위치(S)를 구하고, L = Δℓ 인 경우와 L = Δw 인 경우로 분류하여 각 경우의 a/L 값과 a/T 값을 구하여 비교·평가한다.

3-5 결함비교평가방법

3-5-1 비교기준치가 있을 경우

각 형태 결함에서 구한 크기 측정치를 해당 부품의 합부기준치와 비교 평가한다.

<u>측 정 치</u>		<u>기 준 치</u>	
a/L, (T) a/T%, (AA)	a/L, (T) a/T%, (AA)	a/L, (T) a/T%, (AA)	a/L, (T) a/T%, (AA)
I	P	I	Q

이라면

P ≤ Q 이면 합 격(Accept)

P > Q 이면 불합격(Reject)

3-5-2 비교기준치가 없을 경우

<u>측 정 치</u>		<u>기 준 치</u>	
a/L, (T) a/T%, (AA)	a/L, (T) a/T%, (AA)	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 큰 값과 작은 값을 찾아, 다음식에 의해 구하여 비교 평가한다.

$$Q(\text{해당기준치 } a/T\% \text{ 나 } AA) = \frac{I-H}{J-H}$$

$$\times (S-N) + N \dots\dots\dots(23)$$

P ≤ Q 이면 합 격(Accept)

P > Q 이면 불합격(Reject)

3-5-3 비교기준치에 Y 값이 있을 경우

라미나결함과 표면판결함일 경우는 3-5-1항과 3-5-2항에 의해서 비교평가하면 되고, 내부판결함의 경우는 Y 값에 따라 세가지로 분류 비교평가 한다.

$$Y = S/a \dots\dots\dots(24)$$

1) Y < 0.4 일 경우

이 경우는 표면판기준치와 비교·평가한다.

2) 0.4 ≤ Y < 1 인 경우

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

3) Y ≥ 1 인 경우

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

4. 현실태와 개선방안

4-1 초음파탐상의 자동화 및 검사실태

원자력발전소 가동중검사의 체적시험으로 이용되고 있는 초음파탐상시험은 검사부품의 미세한 결함까지 검출할 수 있으므로 원자력발전소의 많은 부품의 검사방법으로 채택되고 있다.

이를 위하여 세계각국 연구소 및 초음파탐상기 제작처에서도 이에 대한 자동화처리 연구를

끊임없이 해오고 있으며, 이미 상당 수준의 자동화가 달성되어 검사실무에 적용되고 있다.

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 달성화되었으나, 데이터 처리 및 결함판정의 자동화는 현재 개발중인 상태이다

그리고 현 검사실태로서 많은 검사부품에서 검출되어진 기준수준을 초과하는 여러지시에 대하여 매우 복잡한 여러단계를 수작업을 통하여 결함을 분석평가하므로 검사시간의 상당부분을

차지하며, 또한 평가자의 지식만으로 평가하므로 그릇된 주관의 평가에 게재되어 정확한 결함평가에 지장을 줄 수 있으며, 검사 차수별 결함상태를 분석하고 검사 다음 단계인 보수 및 교체등의 결정을 위하여 구문서를 찾아 비교·분석해야하는 불편한 점이 있다.

4-2 적용검사업무의 개선방안과 이점

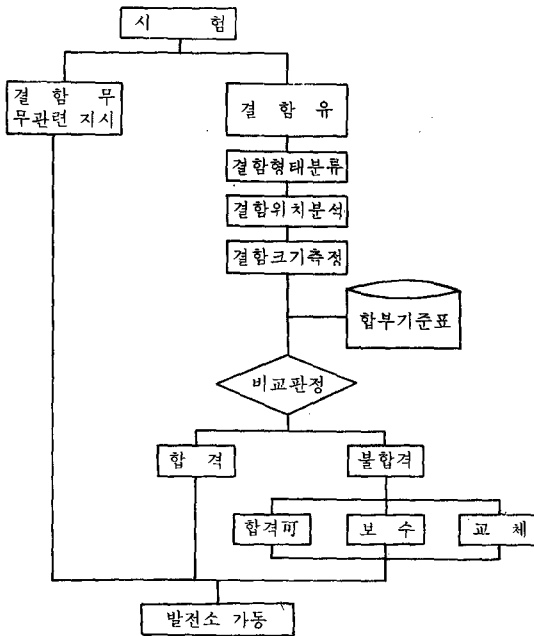
일반적으로 원자력발전소 수명 40년동안 수차에 걸쳐 검사를 반복 실시하는 가동중검사는 검사결과와 정확성 및 합리성이 요구되며, 또한 검사후에도 발생할 수 있는 결함의 성장 및 생성을 예시해야하며 파괴에 대한 예측을 통하여 검사부품의 사전보수 및 교체를 해야한다.

그러므로 개선방안으로 다음과 같이

- a. 검사부품에 대한 일반요구사항 및 검사요구 자료를 축적 보관
- b. 검사 측정치에서 부터 결함의 분류 자동화 처리
- c. 결함의 평가 자동화처리
- d. 검사 차수별 비교·평가자료로 검사결과 평가서로 활용.

이상과 같은 자동화처리를 함으로서 검사시간의 많은 부분을 차차하는 결함평가를 위한 수작업시간을 실검사시간에 많이 활용할 수 있으며, 평가자의 그릇된 주관과 복잡한 계산과정으로 인한 오류를 방지할 수 있고 또한 아무리 많은 검사부품의 검사보고자료 및 검사결과자료가 생성되어도 축적·보관할 수 있으며, 검사 차수별 결함의 비교평가를 위하여 검사실적자료로써 활용할 수 있을 뿐만아니라, 결함의 성장 및 파괴예측자료로 이용할 수도 있다(그림 1).

〈그림 1〉 결함판정의 자동화시스템



〈표 4〉
과일 검사요구

IDN ₀	PJT	ECNM	PE	EC	MD	EV	EE	AC	RL	EL	AS
부품번호	공사명	검사부품명	검사부위	검사범주	검사방법	검사량	적정코드	기록코드	기록수준	평가수준	합부기준
I8	A7	A10	A15	A3	A6	A20	A20	A10	A10	A10	A10

〈표 5〉 검사보고파일

IDNo	FN _o	LENGTH			WIDTH			DEPTH			TTT	EL	EA	EXAMINER		EDATE
		l_1	l_M	l_2	W_1	W_M	W_2	d_1	d_M	d_2				NAME	LEVEL	
부품 번호	결함 번호										검사부 재두께	검사 위치	검사 각도	검사자		검사 일자
I8	I3	F5.2	F5.2	F5.2	F5.2	F5.2	F5.2	F5.2	F5.2	F5.2		A2	F3.1	A10	I3	I6

Ⅲ. 결함판정의 자동화 설계

1. 입출력파일 설계와 생성

1-1 검사요구파일(EXRQ-F)

가동중검사에서 검사요구되는 부품들은 이미 적용표준에 의거하여 각 부품별로 구분되어 있으며, 검사부위 또한 지정되어 있고, 기타 검사에 필요한 모든 요구사항이 선정되어 있으므로 검사요구파일은 적용표준에 충실하게 요구되는 모든 사항을 효과적으로 배치 작성하여 파일을 구성한다(표4).

1-2 검사보고파일(EXRP-F)

가동중검사의 각 부품별 검사요구 사항에 의거하여 검사를 수행한후 판정을 위한 최소 자료를 구성 설계하며, 검사중에 첨가된 추가사항들을 기재 생성한다(표5).

1-3 검사결과파일(EXRT-F)

검사요구파일과 검사보고파일에 의해 입력된 자료를 결함평가단계, 즉 결함상태, 결함위치 그리고 결함크기측정 및 판정단계를 거치면서 작성되는 자료를 검사결과파일로 작성, 파일을 생성하면 된다.

가동중검사는 발전소 수명 40년동안 수차에 걸쳐 검사가 반복수행되므로 이미 검사된 검사결과파일은 차후 시행될 검사의 결함평가분석 자료로서 보존되어야 하며, 수시 참고자료로 이용할 수 있도록 파일구성되어야 한다(표6).

2. 처리순서도

가동중검사에 관한 결함평가의 자동화처리순서는 다음과 같다. 프로세스 # 1에서는 표준지침에 의하여 작성된 검사요구파일 및 검사수행 후 작성되는 검사보고파일을 생성하고 입력처

〈표 6〉 검사결과파일

IDNo	부품번호	I8
FN _o	결함번호	I3
SIZE	Δl	F6.2
	ΔW	F6.2
	Δd	F6.2
FT	결함형태	A3
S	결함깊이	A3
TTT	검사부재두께	F6.2
FL	결함위치	A2
EXAM RESULT	AA	F6.2
	a/L	F6.2
	a/T	F6.2
STD	AA	F6.2
	a/L	F6.2
	a/T	F6.2
RESULT	합부판정	A6
EA	검사각도	I4.1
NAME	검사자	A10
LEVEL		I3
E-DATE	검사일자	I6

리한다.

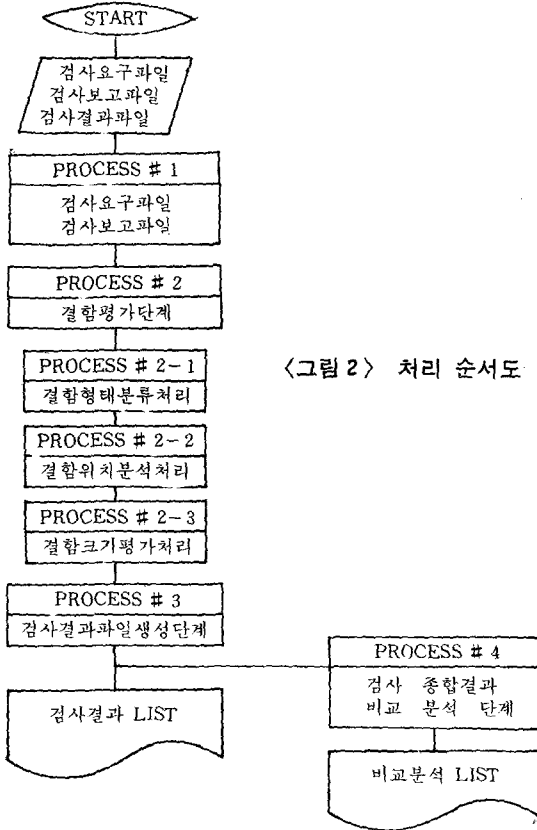
프로세스 # 2에서는 입력되어진 각 자료들을 해당 관련식대로 처리하여 결함을 평가하는 단계이다. 이 단계는 크게 세가지로 세분되는데,

제 1 단계는 결함의 형태분류처리

제 2 단계는 결함의 위치분석처리

제 3 단계는 결함의 크기측정 및 합부평가처리단계이다.

프로세스 # 3에서는 한 검사부품에 대한 검사결과와 종합평가 및 기수행된 검사결과 자료와의 비교분석처리로서 결함의 생성과 성장 그리고 방향성여부등의 시간적차이에서 발생할 수 있는 결함비교분석·처리단계이다(그림2).



〈그림 2〉 처리 순서도

3. 자동화처리세부내용

3-1 검사측정수치 입력처리(PROCESS #1)

검사요구파일과 검사보고파일을 생성하고 입력시킨다.

3-2 결합평가처리(PROCESS #2)

3-2-1 결합형태분류처리(PROCESS#2-1)

입력되어진 검사보고파일의 DATA로 먼저 부품번호를 KEY로 하여 각 검출된 결합들을 결합번호대로 계속 TABLE에 SAVE시킨다.

부품번호로서 결합전수를 알 수 있고, 이것이 완료되면 SAVE된 각 결합의 DATA로서 길이(Δl), 폭(Δw) 그리고 결합두께(Δd) 값을 계산하고 (1)식, (2)식 그리고 (3)식에 따라 각 결합의 형태를 분류한다. 그리고 각 결합들 간의 관계를 오름차순분류(ASCENDING SORT)로 상호 CHECK하여 단독결합인가 다중결합인가를 판단한다.

각 단독결합들 간의 관계를 상호 CHECK 하는 방법으로는 결합일련번호 순으로 상호 CHECK 하며, 이미 단독결합의 형태는 분류되었으므로 라미나-라미나(L-L)인 경우는 (4)식을 만족하면 다중라미나이고 라미나-판(L-P), 판-비판(P-N) 그리고 라미나-비판(L-N)인 경우는 (5)식을 만족하면 다중판형결합이고 (7)식을 만족하면 이열동판결합으로 처리한다.

그리고 판-판(P-P)형 결합과 비판-비판(N-N)형 결합은 (6)식을 만족하면 평행판형결합이고 (5)식, (7)식을 차례로 대입해보고 만족하는 경우의 해당 다중결합으로 처리하고 아니면 단독결합으로 처리한다.

또한 다중결합들이 연속해서 있을 경우는 상기 다중결합분류식을 적용해서 만족하는 동일한 다중결합은 같은 다중결합으로 분류하고 다른 다중결합일 경우는 다중판형결합으로 처리한다.

단독결합인 경우는 (13)식, (14)식 그리고 (10)식에 의해서 구해진 길이(Δl), 폭(Δw) 그리고 두께(Δd) 값을 그대로 적용하고, 다중결합인 경우는 결합된 각 결합의 길이, 폭 그리고 두께 값을 새로이 상호 CHECK하여 각 경우의 가장 작은 값이 l_1, w_1, d_1 이 되고 각 경우의 가장 큰 값이 l_2, w_2, d_2 값이 되어 (13)식, (14)식 그리고 (10)식에 의해서 길이(Δl), 폭(Δw) 그리고 결합두께(Δd) 값을 구한다.

3-2-2 결합위치의 분석처리(PROCESS #2-2)

1) 라미나형 ; L, ML인 경우

이 과정은 필요없으므로 다음 처리로 넘어간다.

2) 판형 ; P, N, MP, PP, NCP인 경우

각 경우의 구해진 DATA로서 결합최소길이(S) 값을 (9)식에 의해 구하고, (8)식과 (11)식으로 표면결합인가 내부결합인가를 구분한다.

3-2-3 결합크기 측정처리(PROCESS #2-3)

1) 라미나형 ; L, ML인 경우

(12)식에 의거하여 넓이 0.75배 해준 값을 구

한다.

2) 판형 ; P, MP, PP, NCP인 경우

표면결함인 경우는 (19)식과 (20)식에 의해, 내부 결함인 경우는 (21)식과 (22)식에 의해 a/L 값과 $a/T(\%)$ 값을 구한다.

3) 각 결함의 크기를 측정후 기준치를 SAVE하고 있는 군과, Loop를 돌러가면서 기준치와 측정치가 같으면 해당기준치가 존재하는 것이므로 이 기준치를 찾아 비교평가하며, 그렇지 않을 경우는 (23)식에 의거 기준치를 생성하여 측정치와 비교평가한다.

3-3 검사결과파일 생성 및 출력처리

전 처리과정에서 진행되어진 결과치를 검사 결과파일 LAYOUT의 동일한 Field에 각각 Move하여 Write시켜 OUTPUT파일을 생성한다.

3-4 비교분석처리

비교평가단계이며 검사다음단계를 결정하기 위한 단계로 연차별 검사실정 및 결과자료를 검사관이 비교평가하기 좋게 배열 출력처리한다.

IV. 결 론

본 연구는 원자력발전소 가동중검사의 체적 검사중 초음파탐상을 이용한 결함판정의 자동화 처리를 설계하였다. 초음파탐상법의 자동화는 주사장치의 자동화, 결함판정의 자동화로 대별된다. 이중 미개발 부분인 결함판정의 자동화를 설계하여 적용사례와 같은 정확하고도 신속한 결함평가를 할 수 있었다.

자동화처리 설계 전에는 결함판정의 수작업으로 많은 시간이 필요했고 결함평가의 부정확성과 평가자의 주관적인 오류를 막을 수 없었으나, 자동화처리로서 시간적인 손실을 줄이고 결함평가를 체계적으로 수식화된 순서로서 분류평가하므로 정확하고 체계적인 평가로 확립할 수 있었다. 또한 검사 차수별 반복 검사에 따른 자료를 축적보관하면서 다음 단계에 필요한 의사결정을 종합적인 비교·평가자료를 통하여 합리

적으로 결정지을 수 있을 것으로 판단되었다.

한 검사부품에 대한 평가를 위하여 그 부품 자체의 특징인 재질, 모양, 두께, 용도 등이 고려되어야 하며, 더욱이 중요한 것은 환경적인 요소를 감안 평가하여야 한다. 즉, 주위압력, 온도, 진동, 부식 등의 영향까지 고려하여야 한다. 이런 다각적인 관점에서 본 연구는 검사시스템 전반에 걸친 자동화 범주까지는 미치지 못하였으나, 경수냉각형 발전소 가동중검사 요구사항에 의거한 본 자동화설계는 체적결함평가에 매우 유익하게 적용될 수 있을 것이다.

원자력발전소는 고도의 기술집약적 산업이며 방대한 시스템에 따른 다양한 기술과 합리적인 운영방안이 수립되어야 하며, 안전성과 신뢰도 면에서 검사업무를 철저히 수행해야 하므로 계속적인 미개발업무에 대한 시스템 개발을 위하여 연구되어야 할 것이다.

《참 고 문 헌》

1. DANIEL D. MCCracken ; A Simplified Guide to Structured Cobol Programming(1976. John Wiley & 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 nuclear Power Plant Components
4. AWS ; Guide for the nondestructive inspection of Welds, (American Welding Society)
5. JOSEF KRAUTKRAMER, et ; Ultrasonic Testing of materials
6. ELLIS HOROWITS & SARTAT SAHNI ; Fundamentals of DATA STRUCTURE
7. 한국원자력에너지연구소 : 원자력발전소 가동중검사 기술기준(1981년 판) ; 제1차 가동중검사(고리원자력발전소1호기, 1980년).