

### 위상배열 초음파 탐상방식에 의한 차축 결합평가용 논리설계

김희영\*, 이홍호\*\*  
충남대학교\*, 충남대학교\*\*

#### Logic design of the Flaw Evaluation in the Rolling stock axle for Phased Array ultrasonic inspection method

Hi-Youong Kim\*, Hung-Ho Lee\*\*  
Chung-Nam University\*, Chung-Nam University\*\*

**Abstract** - 철도차량 차축의 초음파 탐상은 기존 펄스-에코방식을 사용하여 A-Scan으로 영상화하여 결합평가가 이루어 졌다. 하지만 이방법은 작업자의 판단에 의존하므로 신뢰성이 떨어졌다. 위상배열 초음파 탐상 검사는 단일 탐촉자에 여러개의 진동자를 배열하여 여러 각도에서 탐상이 가능하므로 차축처럼 종류 및 모양이 다양한 구조물의 탐상에 효과적이다. 또한 C-Scan방식으로 영상화 하므로써 작업자가 결함을 판단하는데 있어서 객관적인 평가방법이다. 이 논문에서는 위상배열 초음파 탐상 검사에 대하여 설명하고 차축결합평가를 위한 자동화된 설비의 논리설계를 분석하고 그 실험의 방법과 결과를 고찰하고자 한다.

의 다양한 방면에서 위상배열 초음파 탐상검사를 활용한 검사기술이 개발되고 있다.

기존의 초음파 탐상기 또한 노후화되어 정확성, 신뢰성 있는 검수를 하기에 부적합한 면이 있다. 그러므로 초음파 탐상기의 시설과 방식의 변화로 기존의 방식보다 신뢰성이 뛰어난 검수를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 형상이 다양하고 복잡한 철도차량 차축에 대한 검사기술을 확립하기 위해 위상배열 탐촉자를 사용하여 결함을 검출하고 그 결함을 검출하기 위한 탐상장치의 셋팅 및 자동화 기술에 대하여 고찰하고자 한다.

#### 1. 서 론

경제구조의 고도화가 가속되고 생활수준이 향상됨에 따라 이에 비례하여 사회간접시설 및 각종 용도의 기계구조물에 대한 수요 역시 증가하고 있으며, 이에 철도차량도 예외가 아니어서 고속열차의 제작 시에 주행장치의 중요품인 차축(Rolling Stock Axle)에 신뢰성 높은 유지보수에 대한 수요 역시 증가하고 있다. 일반적으로 윤축(wheelset)의 차축(Axle)과 같은 용도로 사용되는 기계구조물은 사용기간 동안에는 절대적 안전성 확보를 위하여 사용하중조건에서 무한수명을 가지도록 설계된다. 그러나 실제 철도 현장에서 운용중인 진동자의 차축이 균열사고가 발생한 적이 있음이 보고되고 있으며, 사용중인 차축을 초음파탐상검사 결과 불량축으로 판정되어 폐촉처리 되는 경우가 있어서, 이로 인하여 차축 교환기간 중 해당 차량의 운행 중지로 인한 영업 손실 뿐만 아니라, 자칫 이를 간과하면 차축 절손으로 인한 대형 인명사고를 야기시킬 가능성과 함께 위험성이 항상 잠재하고 있다. 따라서 차축의 건전성(integrity)과 신뢰성(reliability) 확보는 이들 분야의 경제성 향상과 인명보호를 위하여 매우 중요하다.

현재 국내에서 사용되는 초음파 탐상 검사 방법은 주로 단일 압전소자를 사용하는 펄스-에코 방식의 수동검사이다. 그러나 철도차량 윤축부는 형상이 다양하여 검사하는데 있어 여러 가지 탐촉자를 교대로 사용하여야 함은 물론 신호형상의 복잡성으로 인해 평가에 어려움을 겪고 있다.

위상배열 초음파 탐상검사(Phased array ultrasonic examination)는 여러개 작은 압전소자로 구성된 하나의 탐촉자를 이용하여 재질내로 전파되는 초음파 빔의 전자 조향(electronic steering), 깊이 초점(depth focusing), 섹터 탐상(sectorial scanning) 등의 기능을 가지고 있다. 초장기 위상배열 초음파 탐상검사는 주로 의료산업에서 환자 내부의 질병을 검사하는 데 주로 사용되어 왔다. 그러나 최근 위상배열 초음파 탐상검사의 특징을 활용하여 단일 압전소자를 사용하는 일반 초음파 탐상검사로 검사하기에 어려운 복잡한 형상의 검사, 다양한 검사 각도가 요구되는 검사, 넓은 체적의 검사영역에 대한 검사 등 산업계

#### 2. 위상배열 초음파 탐상

##### 2.1 초음파 탐상 검사

##### 2.1.1 초음파의 발생

초음파 탐상 검사는 초음파를 시험체내로 보내어 시험체내에 존재하는 불연속을 검출하는 방법으로서 시험체내의 불연속부로부터 반사되는 에너지량, 송신된 초음파가 시험체를 투과하여 불연속부로부터 반사되어 되돌아올때까지의 진행시간, 초음파가 시험체를 투과할때 감소되는 양의 차이를 적절한 표준자료(Standard data)와 비교하여 결함의 위치와 크기등을 측정하는 방법이다.

탐상검사에 사용되는 초음파를 발생시키는 방법에는 진동자를 이용하는 방식이 널리 사용되는데 진동자의 양면에 도금을 하여 전극으로 하고 양전극 사이에 전압을 가하면 전압의 크기와 진동에 따라 진동자가 진동하여 진동으로 바뀌어 초음파가 발생하게 된다. 진동자의 재질, 두께 및 진동자에 가하는 전압 또는 전류의 발생방법 등에 따라 발생하는 초음파의 성질이 다르게 나타난다.

##### 2.1.2 초음파 빔의 분산과 감쇠

원거리 음장에서 초음파의 진행거리가 증가함에 따라 초음파의 강도가 지수함수적으로 감소하는데, 그 이유는 초음파 진행에 따른 감쇠(Attenuation) 및 빔의 분산(Beam Spreading)때문이다. 초음파 빔의 분산은 진동자의 크기, 주파수에 따라 달라지는데 일반적으로 빔의 분산각은 빔중심의 최대강도로부터 0%(-∞ dB)로 낮아지는 부분을 빔의 가장자리로 하여 정한다. 원형진동자의 경우 빔의 분산각은 다음식에 의해서 구해진다.

$$\sin \psi = 1.22 \lambda$$

여기서,  $\psi$  : 빔의 분산각,  $\lambda$  : 파장

따라서 빔의 분산각을 적게 하기 위해서는 진동자의 직경이 큰 것을 사용하고 고주파수(짧은 파장)를 사용해야 한다.

초음파가 발생하여 재질을 통해 진행되면 필연적으로 에너지 손실

이 발생된다.

초음파빔의 감쇠는 크게 나누어 초음파의 진행에 따른 감쇠는 산란(Scattering), 흡수(Absorption) 및 경계면에서의 두 재질의 음향 임피던스 차이로 발생하고, 간섭에 의한 영향은 회절(Diffraction) 및 기타요인 등으로 인해 파의 줄무늬(Wave Fringe), 위상변이(Phase shift), 주파수 변이(Frequency Shift) 등이 나타난다.

또 빔의 분산으로 인해 평면파가 구형파 또는 원통형파로 형성되어 퍼져나가기도 한다.

이와 같은 빔의 감쇠를 총체적으로 보면 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$P = P_0 e^{-ad} \quad \text{----- (2-2)}$$

여기서,  $P_0$ 는  $d = 0$ 인 지점에서의 음압(초기음압)

$P$ 는 거리  $d$ 지점에서의 음압

$a$ 는 감쇠계수

$d$ 는 재질 내에서 초음파의 진행거리

이 때 감쇠계수  $a$ 는 재질의 종류와 초음파의 주파수에 따라 달라지는데 주파수가 높아지면 감쇠계수가 커지므로 거리에 따른 초음파의 감쇠율이 매우 높아진다.

### 2.1.3 초음파 탐상방식

#### ① 초음파의 진행원리에 의한 분류

초음파가 시험체내에서 진행할때 불연속부와 같은 경계면에서는 투과 및 굴절 또는 반사를 한다. 이때 불연속부에서 반사하는 초음파를 분석하여 검사하는 방법을 펄스 반사법, 투과한 초음파를 분석하여 검사하는 방법을 투과법, 펄스반사법과 유사하지만 공진현상을 이용한 공진법이 있다.

#### ② 탐촉자 접촉 방법에 의한 분류

탐촉자에서 발생시킨 초음파를 시험체에 전달하는 방식에 따라 분류하는 방법으로서, 탐촉자를 시험체에 직접 접촉시켜 초음파를 전달하는 방법을 직접 접촉법이라 하고, 시험체를 물과 같은 액체 접촉 매질 속에 넣고 초음파의 진동을 액체를 통해 시험체에 전달하는 방법을 수침법이라 한다.

#### ③ 파의 종류에 의한 분류

펄스 반사식 접촉법에 의한 파의 적용방식을 표현하면, 수직법, 사각법, 표면파법, 판파법 등으로 분류 할 수 있다.

#### ④ 표시 방법에 의한 분류

초음파 탐상검사서에서 반사파에 대한 정보를 CRT화면 또는 다른 기록장치에 나타내는 표시방법에 따라 A-Scan, B-Scan, C-Scan, M-Scan, 도플러 등으로 분류한다.



〈그림 2.1〉 표시방법에 따른 탐상방식의 분류  
(a) A-Scan, (b) B-Scan, (c) C-Scan

## 2.2 위상배열 초음파 탐상방식

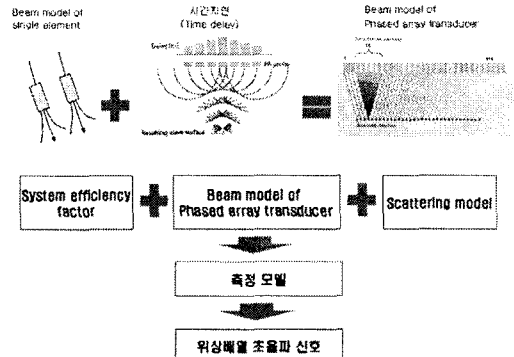
### 2.2.1 위상배열 초음파 탐상

위상배열(Phased Array)초음파는 한 Probe에 다중의 엘리먼트

(Element)를 구성하여 Probe를 움직이지 않고도 원하는 방향으로 초음파 빔을 보내어 결합의 존재 여부 및 결합의 크기 평가 등이 가능한 시스템으로 의학분야에서는 이미 태아의 상태 확인, 골다공증 진단 등 다양하게 활용되고 있으나 NDE분야에서는 적용이 제한되어 왔다.

위상배열 초음파 검사는 Probe 내의 엘리먼트들이 초음파를 발생하는 Time delay를 가지게 함으로써 초음파 빔의 집속방향과 위치를 자유자재로 제어할 수 있다. 선형 위상배열(phased array)은 파가 진행하는 방향에 수직인 선에서 최대 음향 강도를 생성한다. 초음파 빔을 원하는 각도(Steering angle)로 조정하기 위하여 각 엘리먼트는 시간지연을 가져야 한다. 또한 중심 엘리먼트에 긴 시간지연을 주고 외부로 향할수록 시간지연을 낮춰주면 파의 진행방향 중심선상에 빔의 집속이 이루어진다. 불연속 또는 결함으로부터 되돌아온 에코는 각 엘리먼트에 수신되어 파가 전파될 때의 시간지연을 계산하여 각각의 엘리먼트들로부터의 신호를 합산하면 결합신호를 나타내게 된다.

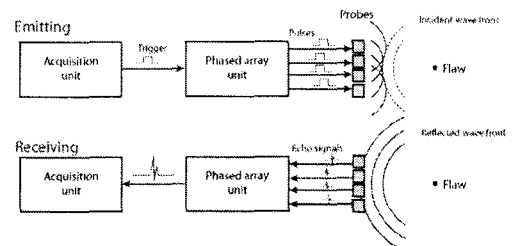
시스템 효율요소와 위상배열변환기의 빔모델, 분산모델의 합으로 측정모델을 나타낼수 있으며 이로써 위상배열 초음파 신호를 발생하는 시스템이다.



〈그림 2.2〉 위상배열 초음파탐상 검사 시스템

### 2.2.2 위상배열 초음파 탐상 시간지연(Time Delay)

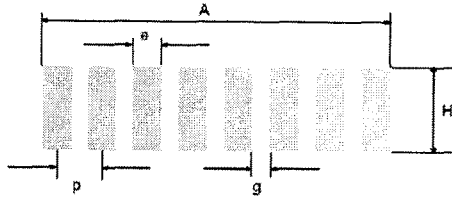
하나의 진동자가 폭이 길이보다 아주 적은 여러 개의 진동자로 분리되어 있다고 가정하면 각각의 작은 진동자는 하나의 선으로 간주 할 수 있으며 이것을 원통형 파(cylindrical waves)의 선원(line source)으로 고려할 수 있다. 이 작은 각각의 파는 위상과 진폭에서 시간지연(time-delay)을 가질 수도 있으며, 동기화(synchronized)될 수 있다. 이러한 시간지연과 동기화를 이용하면 초음파 빔을 집속(focused)하고 조향(steering)할수 있는 능력을 가지게 된다. 그림 2.3은 위상배열 탐촉자의 각각의 압전소자에 주어진 시간지연에 따라 초음파의 송신과 수신이 어떻게 이루어지는 가를 나타낸다.



〈그림 2.3〉 위상배열 탐촉자 압전소자의 시간지연에 따른 송수신

### 2.2.3 위상배열 초음파 탐촉자

위상배열 초음파 탐촉자의 성능에 영향을 미치는 인자들은 각 탐촉자의 형상에 따라 각 각 다르다. 여기에서는 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 선형 위상배열 초음파 탐촉자에 대한 변수들을 고려해 보기로 하자. 그림 2.4는 선형 위상배열 초음파 탐촉자의 일반적인 치수에 대하여 나타내고 있다.



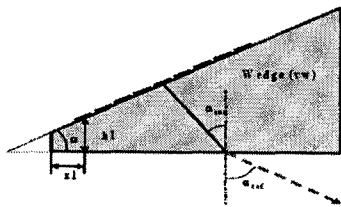
〈그림 2.4〉 Definition of transducer elements

위상배열 초음파 탐촉자를 설계하기 위한 변수들은 아래와 같다.

- 주파수 (f), 파장 ( $\lambda$ )
- 어레이 내의 압전소자 수 (n)
- 조향방향의 전체 구경(aperture) (A)
- 높이 (H)
- 각 소자의 폭 (e)
- 피치 (p)
- 간격, 일반적으로  $e < \lambda/2$

그리고 검사시 필요한 췌지에 대하여서도 아래와 같은 변수들을 고려하여야 한다.

- 췌지에서의 속도 (vw)
- 췌지 각도 ( $\omega$ )
- 첫 번째 소자의 높이 (h1)
- 첫 번째 소자의 오프셋 (x1)



〈그림 2.5〉 Transducer wedge parameters

그림 2.5은 췌지의 변수들에 대한 설명을 나타낸다.

Active aperture(A)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A = n e + g (n - 1) \quad \text{-----} \quad (2-3)$$

### 3. 위상배열 초음파 탐상방식을 이용한 차축의 결함평가

#### 3.1 차축의 특성

##### 3.1.1 차축의 구조

차축은 탄소강을 로울러에 길이 압연하여 원통으로 한 다음 함마로서 단조 후 기계로 소정의 치수로 형상하여 만들어진다.

① 저널 : 우렛지와 축수금을 거쳐서 증량을 받으며 회전하므로 완전한 원통형으로 정밀 다듬질되어 있다.

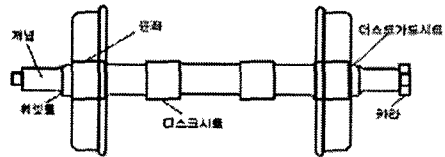
② 카라 : 휘렛드와 상대하여 축수금의 횡동을 억제시켜 차체의 윤축에 대한 좌,우 관계를 유지시킨다. 카라와 축수금과의 유간은 6-16mm이다.

③ 더스트가드시트 : 더스트가드가 끼여지는 곳으로 축상 내부에 빗물, 먼지등의 침입 방지하고 기름 유출 방지

④ 휘렛트 : 저널과 더스트시트간의 구배를 이룬 부분으로 축수금의 좌우 이동 억제

⑤ 윤좌(휠시트, 보스좌) : 보스를 끼워 고정하는 부분으로 차축중 가장 큰 힘을 받는다.

⑥ 휠시트 카라 : 차륜간의 거리 조정 및 보스 이완시 차륜이 내방으로 들어가지 못하도록 한다.



〈그림 3.1〉 윤축의 구조

#### 3.1.2 차축의 결함 발생

차축의 고장은 차축 절손 및 보스(차륜의 압입부)이완으로 대부분 이어진다. 차축절손은 벤딩모멘트가 가장 큰 곳, 평축의 경우는 윤좌의 외측, 로울러 베어링 축은 윤좌의 내측에서 주로 발생하게 된다.

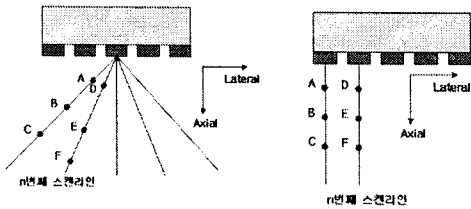
차축절손의 원인은 재질결함, 차축발열에 의한 저널부 절손, 차축과 차륜의 삽입이 불량할 경우에 발생한다.

또한 보스이완의 경우는 압입부의 다듬질 불량, 압입력 부족, 동일차축의 직경차, 과적동력에 의하여 보스에 작용, 차축과 차륜의 취부각도 상이, 보스와 윤좌와의 직경 부적합 등의 원인에 의해 발생한다.

조향과 집속을 전자적으로 매우 빠르게 수행하면 차축 결함에 대한 영상을 획득할 수 있게 된다. 결함을 영상화 하여 보여주는 개념은 다음과 같다. 그림(1)에서는 한 프레임의 영상을 얻기 위해서 여러 개의 스캔라인이 모여져서 구성되며, 예를들어 하나의 스캔라인을 구성하기 위한 집속점이 A, B, C 세 개의 점으로 구성된다면, 초음파 발진과 수신시 A, B, C에 대한 시간지연(focal law)을 적용한 후 수신 시에 획득된 A-Scan 신호의 세기를 흰색과 검은색 등의 색깔로 등급화하여 화면에 나타낸다. 추가적으로 결함 영상의 향상을 위해 가장자리 검출효과(edge enhanced effect)등의 이미지 처리과정(image processing)등을 거쳐 모니터 화면에 나타내게 된다. 이러한 결함 영상은 탐상시 사용하는 탐촉자의 종류 등에 따라 그림(1)에서 보이대로 섹터스캔(sectoral scan)과 선형스캔(linear scan)으로 나눌 수 있다.

첫째, 그림(a)의 섹터스캔(sectoral scan)의 경우에는 탐촉자의 위치를 고정하고 미소발진자를 전체 또는 부분적으로 발견시켜, 탐촉자의 가로방향의 크기를 넘어서는 영역으로도 조향 및 집속을 수행하여, 탐촉자의 크기보다 넓은 영역에 대한 부위의 결함 영상화가 가능한 기법이고, 둘째, 그림(b)의 선형스캔(linear scan)의 경우에는 미소 발진자를 몇 개씩 그룹으로 묶어서 나누고, 각 그룹별로 깊이 방향에 대한 초음파의 발견과 수신 집속을 순차적으로 수행함으로써, 탐촉자의 가로 길이에 해당하는 영역만을 영상화할 수 있어, 깊은 부위의 탐상 영역에서도 섹터스캔에 비하여 결함 분해등의 저하가 덜하고, 그룹화를 잘 수행할 경우 탐촉면 바로 아래의 결함에 대한 영상도 우수해질 수 있는

장점을 지닌 기법이다.

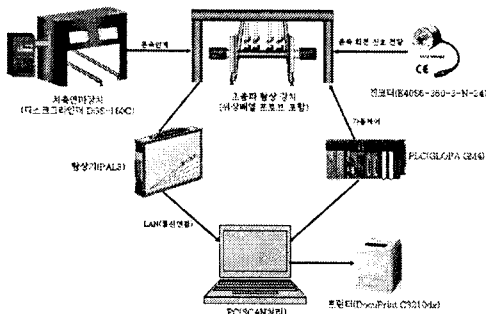


(a) Sectoral scanning (b) Linear scanning  
 <그림 3.2> Sectoral scanning 과 linear scanning 원리

**3.2 결함평가용 검사장치의 구성**

초음파 신호 취득을 위한 탐상용 장비는 일본 Krautkramer 사의 PAL3를 사용하였다. PAL3는 송수신 32채널 Portable 초음파 Phased Array 장비로 128 소자까지의 위상배열 탐촉자를 사용할 수 있으며 총 8 채널(channel)의 펄스-에코 입력신호를 처리할 수 있다. 수집된 신호의 처리를 위한 컴퓨터 프로그램은 PA View를 사용하였으며 특징은 다음과 같다.

- 섹터(sector), 선형(linear), 깊이(depth)에 대한 focal law를 손쉽게 계산
- 자동 체적 설정(volumetric settings)
- A-scan, B-scan, C-scan, D-scan에 대한 실시간 표시
- 위상배열 섹터 주사(sector scan)의 실시간 표시
- A-scan, C-scan 또는 첩두 자료(peak data)로부터 각도 교정(anglecorrected), 상부(top), 측면(side), 전면 보기(front view)의 실시간 표시
- 자료 취득과 동시에 평가가능
- 자동검사를 위한 스캐너의 조절

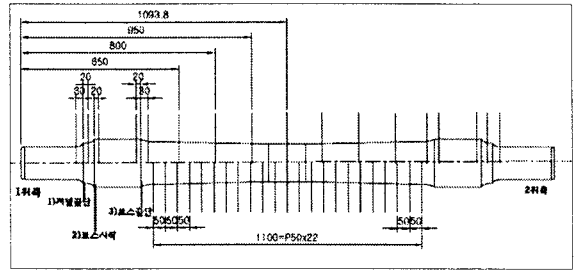


<그림 3.3> 위상배열 초음파 탐상 검사장치 구성도

**3.2.1 시험편**

차축에 가공된 화차 RCT-D축 인공결함은 시험편 그림에서 알 수 있듯이 Probe에서 빔이 분사되는 접촉면에서 수직으로 360°, 90°, 180°, 270° 방향으로, 10x3mm 23개, 5x2mm 15개, 5x4mm 15개를 다양하게 만들었다. 객차의 경우 대표적인 KT23-스, NT-130대, 아세아120축으로 시험편을 제작하였으며, 3x1mm의 크기로 제작되었다.

결함의 크기나 위치를 다양하게 제작한 이유는 초음파 탐상 시 정확한 감도의 세팅을 하기 위한 것이며 인공으로 가공된 결함의 크기, 위치를 파악함으로써 신뢰성을 높이고자 하는 것이다. 이처럼 인공결함을 다양하게 가공한 이유는 화차의 축이 구배가져 있으며, 각 Probe의 밀착도와 빔각도의 다양성에 맞는 결함의 추출로 각 Probe의 감도를 일정하게 조정하기 위함이다.



<그림 3.4> 화차 RCT-D축 시험편

<표 3.1> 화차 RCT-D축 결함의 속성

결함 치수 (L x D, mm)	갯 수	위치	Probe 와의 각도
10 x 3	23	1위축 끝에서부터 595mm지점부터 50mm간격으로 23개 배치	360
5 x 2	15	① 1위축 끝단으로부터 650mm 지점 ② 1위축 끝단으로부터 800mm 지점 ③ 1위축 끝단으로부터 950mm 지점 ④ 1위축 끝단으로부터 1093.8mm 지점	270
5 x 2	15	⑤ 1) 1위축 저널 끝단으로부터 좌측방향으로 30mm 지점 ⑥ 1) 1위축 저널 끝단으로부터 우측방향으로 20mm 지점	180
5 x 4	15	⑦ 2) 1위축 보스 시작부로부터 우측방향으로 20mm 지점 ⑧ 3) 1위축 보스 끝단으로부터 좌측방향으로 20mm 지점 ⑨ 3) 1위축 보스 끝단으로부터 우측방향으로 30mm 지점	90

※ 차축의 중심 1093.8mm 결함을 중심으로 대칭하여 2위축 방향으로 인공결함 생성

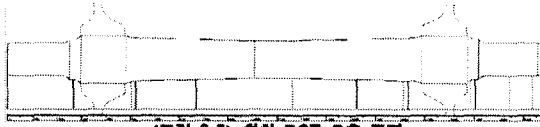
**3.3 결함 평가 검사를 위한 최적화 세팅**

**3.3.1 차축별 프로브(Probe) 위치 및 감도 설정**

● 화차 RCT-D축

프로브	Probe (mm)				Range Start (mm)				Range End (mm)				Gate Upper (mm)	Gate Lower (mm)	Cycle Count (mm)	Scale Gain (dB)	Base Gain (dB)	Probe 감도 (dB)		
	P1	P2	P3	P4	F1	F2	F3	F4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
가변	-66	-92	-92	-66	80	80	80	80	430	510	510	430	100	100	0		33	33	33	22
화차	-65	-65	-65	-65	80	80	80	80	530	530	530	530	100	100	0		33	33	33	17

※ Position의 위치는 엔코더 방향을 기준으로 저어널 끝단부터 프로브1,2(Probel,2)의 위치를 측정하여 차축의 중앙을 중심으로 대칭으로 표현하였다.



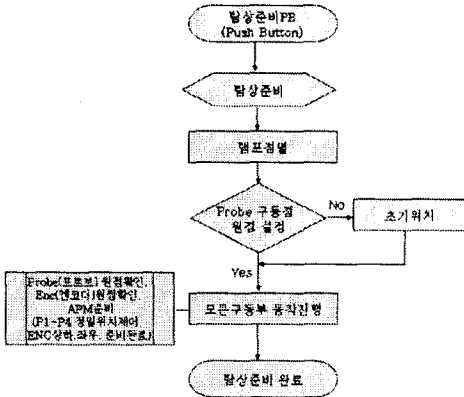
〈그림 3.5〉 화차 RCT-D측 도면

### 3.4 PLC Logic 설계

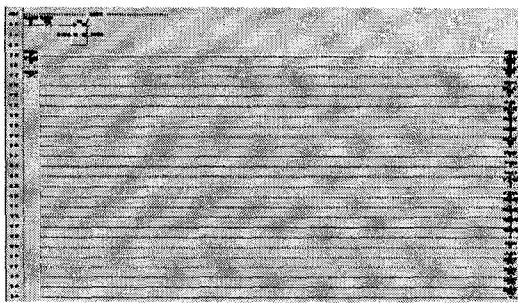
#### 1) 탐상준비

탐상준비 푸쉬버튼을 눌렀다 때면 탐상준비 초기화가 진행된다. 우선 모든 램프가 점멸되고 Probe 구동점이 원점으로 설정된다. 그리고 모든 구동부가 동작진행상태로 제어되는데, Probe(프로브)의 원점확인, Enc(엔코더)의 원점확인, APM(Probe1~Probe4)의 정밀 위치제어, Enc 상하, 좌우, 준비완료)의 원점확인이 진행된다.

세부적 동작진행을 살펴보면, 선택자등으로 준비상태에 있게되며, 수동탐측자, 수동 Enc(엔코더)가 선택 가능한 위치에 있게된다. 또한 차측 정회전, 역회전, 고속회전, 회전탐상, 차측반출, 차측통과, 매질유, Probe(프로브)하강, 자동회전시작 등의 탐상시작을 위한 준비완료가 진행된다.



(a) 탐상준비를 위한 순서도

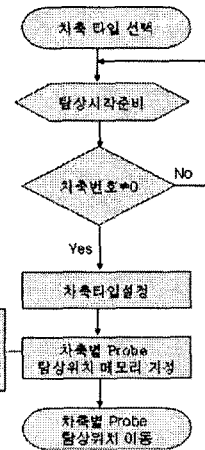


(b) 탐상준비를 위한 레더로직

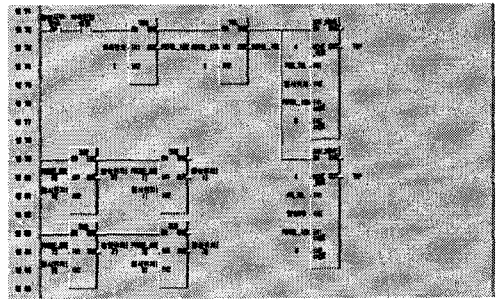
〈그림 3.6〉 탐상준비 논리설계

#### 2) 차측타입 버튼 선택시 탐상 위치 설정

차측번호≠0, 차측타입설정이 실행된다. 탐상시작 준비 후 차측타입설정이 실행되면 차측타입번호를 PBTBL\_IDX값으로 출력시킨다. PB\_TBL변수의 PBTBL\_IDX값부터 4개만큼 복사하여 탐상할 Probe인 탐상PB의 0번째 값부터 붙여넣기를 시작한다. 차측별 탐상위치로 메모리를 이동시켜 Probe를 탐상위치에 보낸다.



(a) 차측타입 버튼 선택시 탐상위치 설정 순서도



(b) 차측타입 버튼 선택시 탐상위치 설정 레더로직  
〈그림 3.7〉 차측타입 버튼 선택시 탐상위치 설정 논리설계

#### 3) 탐상시작

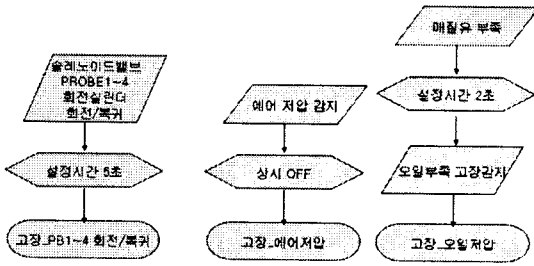
시작 PB(푸쉬버튼)을 누르면 탐상PB[0]~PB[3]까지 탐상할 Probe를 설정하고, 차측타입설정후 Probe를 탐상 위치를 판단하여 탐상시작 준비를 완료한다.

시작 PB(푸쉬버튼)을 1회 더 누르게 되면 Enc(엔코더)가 차측의 저널 끝단 중심부에 밀착 하게 되며 각 Probe(탐상PB[0]~PB[3])가 차측종류별로 이동하게 된다.

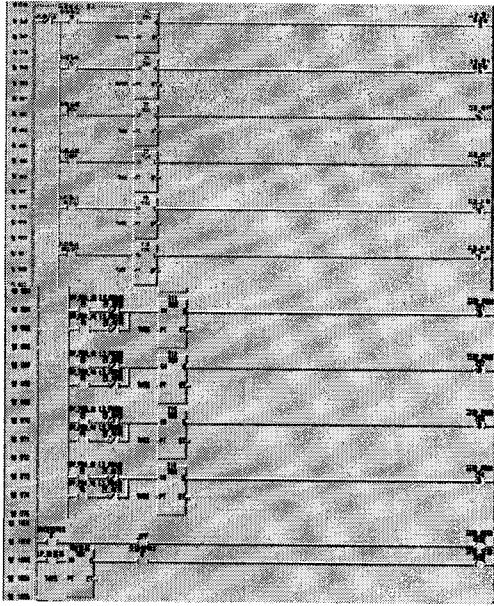
이로써 탐상시작이 완료되고 Probe가 차측에 밀착하게 된다. 차측에 밀착 된 후 매질유가 공급되고 차측이 정회전하기 시작한다. 차측은 720°간 자동회전을 하게 되며, 일정 시간이 흐른 후 360°가 되었을 경우 Probe가 상승하여 회전을 시행한다.

회전 후 다시 Probe가 하강하여 탐상을 시작하며 720°까지 탐상을 진행 한 후 Probe는 초기단계로 복귀하고 탐상을 마치게 된다.





(a) 고장 발생시 순서도



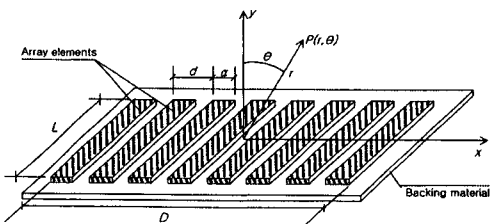
(b) 고장 발생시 레더로직  
**<그림 3.10> 고장 발생시 논리설계**

**4. 실험방법 및 고찰**

**4.1 C-Scan에 의한 결함판단**

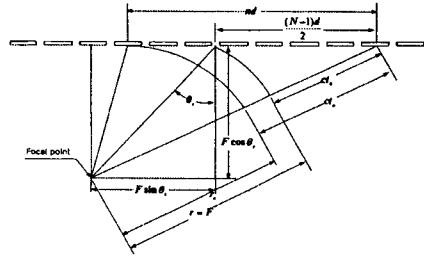
1) 시간지연 계산

위상배열 초음파 탐상 시스템은 기존의 단일 탐촉자 초음파 탐상 시스템과 달리 기계적 스캐닝 장비를 사용하지 않고도 초음파 빔의 집속과 조향을 조절하여 초음파 영상을 획득할 수 있다. 이런 집속과 조향 조절을 위해서는 위상배열 초음파 탐촉자의 각 요소에 적용하는 시간지연은 계산하는 것이 필요하다. 그럼에서 보인바와 같이 위상배열 탐촉자는 여러 개의 미소 요소로 구성되어 있다.



**<그림 4.1> Geometry of a typical linear phased array transducer; d: Inter-element spacing, a: Element width, L: Elevation, D: Lateral dimension(aperture size)**

위상배열 탐촉자의 기본적인 설계변수는 주파수(f), 미소요소 넓이(a), 미소요소간격(d), 미소요소 개수(N), 위상배열 탐촉자 전체 넓이(D), 그리고 요소길이(L)로 구성되어 있으며, 미소요소의 두께는 주파수에 의해 결정된다. 그림은 등방성 균질매질 내에서 위상배열초음파 빔의 집속과 조향에 관련된 기하학적 관계를 나타내고 있다.



**<그림 4.2> Geometry used for deriving the focusing formula of a linear phased array transducer**

등방성 균질의 탄성 재료 내에서 위상배열 초음파의 조향에 대한 각 요소의 시간지연은 식(4-1)에 의해 계산된다.

$$\Delta\tau = \frac{d \sin\theta_s}{c} \quad \text{----- (4-1)}$$

여기서  $\Delta\tau$ 는 인접한 요소들 사이의 시간지연이고, d는 요소사이의 거리,  $\theta_s$ 는 조향각, 그리고 c는 매질에서 파의 속력이다.

위상배열 초음파의 또 다른 중요한 성질 중의 하나는 아래식(4-2)에 나타난 천이 범위 이내에서만 빔 집속이 가능하다는 것이다.

$$Z_{TR} = \frac{D^2}{4\lambda} \quad \text{----- (4-2)}$$

여기서, D는 배열의 전체 치수이고,  $\lambda$ 는 파장이다. 실제로 위식에 나타난 천이범위에 의해 배열탐촉자의 원거리음장과 근거리음장이 나뉘어 진다. 배열탐촉자로부터 목표점의 거리가  $Z_{TR}$ 보다 작으면 근거리 음장인데, 이곳에서는 시스템의 검출능을 높이기 위한 집속이 가능하다. 단일 매질에서 집속과 조향을 위한 시간지연은 아래식 (4-3)에 의해 계산한다.

$$t_n = \frac{F}{c} (1 - [1 + (\frac{nd}{F})^2 - 2\frac{nd}{F} \sin\theta_s]^{1/2}) + t_0 \quad \text{----- (4-3)}$$

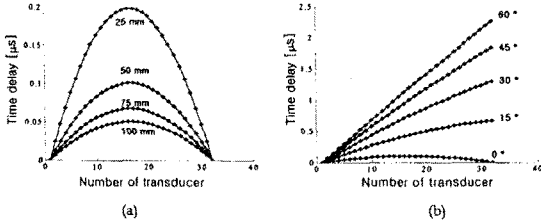
여기서,  $t_n$ 은 n번째 요소에 대한 지연시간이고, F는 집속거리, 그리고  $t_0$ 는 지연시간의 값이 모두 양의 수가 되도록 위한 보정값이다. 위식의 집속식은 2개의 제한사항을 가지고 있다. 첫째로 이 식은 요소들의 수가 홀수일 때만 유효하다. 그러나 대부분의 위상 배열 탐촉자는 짝수개의 요소들을 가지고 있다.

32개의 배열탐촉자에 대하여 조향각과 집속점의 변화에 따른 지연시간을 계산하였다. 그림(a)는 조향각을 0°로 하고 집속거리를 25mm, 50mm, 75mm, 100mm로 하였을 때의 각 요소의 지연시간을 나타내고 있다. 집속거리가 짧을수록 요소간의 지연시간

이 길게 되고, 집속거리가 길수록 지연시간은 상대적으로 작게 된다. 따라서 조향각을 0°로 하였을 경우 그림(a)에 나타난 바와 같이 집속거리가 가장 짧은 경우의 가운데 요소의 지연시간이 가장 길게 나오고, 대칭적으로 양 옆으로 갈수록 지연시간이 짧아진다. 그림(b)는 집속거리를 50mm로 고정하고, 조향각을 15°, 30°, 45° 그리고 60°로 하였을 때의 각 요소의 지연시간을 나타내고 있다.

**[참고 문헌]**

[1] 조용상, "위상배열 초음파의 삼각법에 의한 비파괴적 결함평가 기법 연구", 박사논문, 2004  
 [2] 김용식, "위상배열초음파 탐상검사를 이용한 Turbine Disk Rim의 결함 평가", 석사논문, 2007  
 [3] 김종수, "철도차량 차축의 초음파탐상에 대한 고찰", 석사논문, 2005



**<그림 4.3> Time delays according (a) the variation in focusing and (b) the variation in steering angle in a medium**

2) 조향각의 변화에 따른 탐상감도의 영향

조향각의 변화에 따른 탐상감도의 영향을 알아보기 위한 본 고찰에서는 아래의 표와 같은 결과가 나옴을 알 수 있었다.

**<표 4.1> 위상배열 초음파의 전자조향각 변화에 대한 신호진폭영향**

Focal Depth(mm)	35	40	45	50	55	60	65
Scan angle(°)							
-30	33	35	38	38	38	38	38
-20	60	60	61	62	59	58	57
-10	78	79	80	81	80	79	78
0	22	23	24	25	26	23	25
10	76	77	78	79	78	77	76
20	47	47	45	48	50	50	50
30	36	37	38	40	37	37	36

음압의 변화 경향은 조향각이 커짐에 따라 확연히 떨어짐을 알 수 있다. 이것은 빔 진행거리가 길면 빔 조향각의 크기가 집속 깊이에 의한 영향보다 훨씬 크다는 사실을 나타낸다. 그러므로 미소결함의 정확한 평가를 위해서는 빔 조향각을 더 감소시키던지 빔 진행거리를 증가시켜서 평가해야 된다는 사실을 예측할 수 있다.

**5. 결 론**

위상배열 초음파에 의한 결함평가 기법은 실험을 통해 기존의 결함 평가법과 비교하여 아래의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 위상배열 초음파 검사의 결함평가는 접근성이 제한될 때 결함을 평가할 수 있는 효과적인 방법이다.
2. 결함평가용 전자 주사의 각도는 45° 이내일 때 가장 선명한 신호를 보였다.
3. 정확한 결함의 위치는 파악하는데 아주 효과적이지만 정량적인 결함의 크기를 판단하는데는 아직 미비하므로 정확한 수식적 대안이 필요하다.