

발전기 회전자웨이 위상배열 초음파진단 기법

조용상\*, 문경희, 공태식\*\*  
한국전력공사

A Development of diagnostic technique for generator rotor wedge by phased array UT

Yong-sang Cho, Kyeong-hee Mun, Tae-shik Kong  
KEPCO

**Abstract** - 발전설비에 대한 비파괴 검사 기술은 발전소 운전 신뢰성 및 안전성 유지 확보 그리고 건전성을 보장하기 위한 필수적인 기술이다. 이 설비 중 터빈, 보일러 등 주요 발전설비에 대한 초음파 검사는 매우 신중하고 정확하게 검사할 필요성이 있으나, 일반적 초음파 검사 방법으로는 불가능한 부분이 많고 일부분에 대해서는 이를 외국 제작사 기술 용역에 의존하고 있는 실정이다. 특히 발전기 로타 웨지와 같이 재질상 감쇄가 심한 재료에 대해서는 검사 자체가 어렵고, 지금의 초음파 검사 방법으로는 결함의 크기나 형태를 파악하기도 어려워 이에 대한 개선책이 시급한 실정이다. 최근에 개발이 시작된 Phased Array UT분야는 발전설비중 접근자체가 어렵고, 형상이 복잡하여 결함의 탐지 및 평가가 힘든 부분에 적용하면 검사신뢰도 및 신속성을 향상시킬 수 있으며 접근성에 대한 제한 또한 감소시킬 수 있다. 따라서 본 논문은 발전기 부품에 발생하는 일반적인 결함에 대하여 Phased array UT 기술을 도입하여 신호의 특성을 분석하는 결과평가에 도움이 되고자 하였다

1. 서 론

발전기 부품에 대한 초음파 진단기술을 개발하기 위한 Phased Array UT System은 주요 발전설비에 대한 초음파 검사 데이터의 취득, 관리, 분석, 이미지화 등이 가능하며 초음파 탐촉자가 다중의 Element로 구성되어 각 Element에서 생성되는 초음파 빔의 발생 및 수신에 일정한 형태의 Time delay를 적용하고 수신된 신호를 합성함으로써 탐촉자를 움직이지 않고도 원하는 부위로 초음파 빔을 진행시킬 수 있다. 이 검사 시스템을 이용해서 발전기 설비에 대한 수동 및 자동 초음파 검사 적용 기술을 개발하고자 한다.

Phased Array UT System은 한 탐촉자에 다중의 Element를 구성하여 탐촉자를 움직이지 않고도 원하는 각도와 깊이에 초음파 빔의 초점을 생성시켜 결함의 존재여부 및 결함의 크기 평가등의 작업이 시작적으로 가능한 시스템으로서 의료 분야에서는 이미 태아의 상태를 확인하는 의료기기로 활용되고 있으나 비파괴 평가분야에서는 재료 및 구조의 복잡성 등으로 인하여 적용이 제한되어왔다. Phased array system은 probe 내의 Element들이 초음파를 발생하는 time delay를 가지게 함으로써 초음파 빔의 집속방향과 위치를 자유자재로 제어할 수 있다. 선형 Phased array는 파가 진행하는 방향에 수직인 선에서 최대 음향 강도를 생성한다. 초음파 빔을 원하는 각도(Steering angle)로 조정하기 위하여 각 Element들은 시간지연을 가져야 한다.

$$t_n = n \frac{d_n}{c} \sin \Theta + t_0 \dots \dots \dots (1)$$

여기서

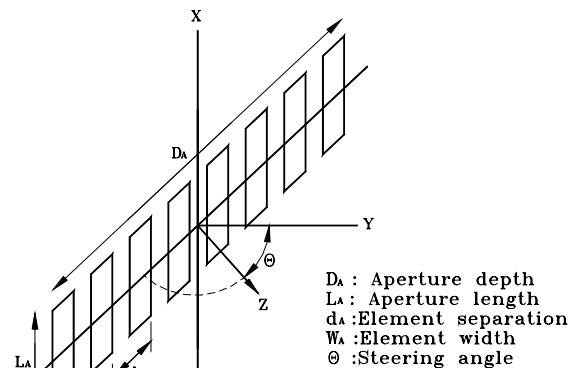
- $t_n$  : element들간의 시간 지연
- $n$  : 중심 element에서부터 외부로의 element번호, 0, ±1, ±2,...
- $c$  : 실험체의 음속
- $t_0$  : 음의 시간지연을 피할 수 있을 만큼의 상수

또한 초점은 빔의 천이 영역  $Z_{TR}$ 을 벗어나는 영역에서 집속이 되도록 하여야 하며 천이 영역의 대략적인 거리는 빔의 근거리 음장 영역과 일치한다.

$$Z_{TR} = \frac{D_A^2}{4\lambda_0} \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $\lambda_0$ : 초음파의 중심주파수에 해당하는 파장

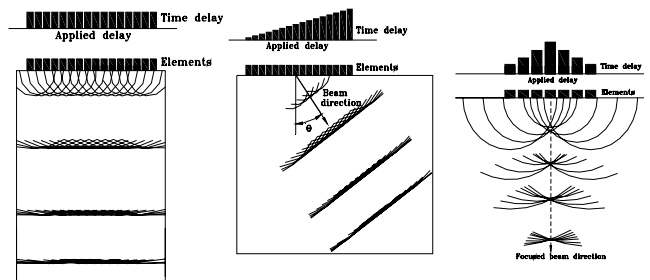
초음파 빔이 일정한 거리 F에서  $\Theta$ 의 방향으로 집속되도록 하기 위하여 각 element들의 시간지연은 다음과 같이 계산하여야 한다.



<그림 1> Design of multiple element linear array

$$t_n = \frac{F}{c} \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{nd}{F} \right)^2 - 2 \frac{nd}{F} \sin \Theta \right]^{1/2} \right\} + t_0 \dots \dots \dots (3)$$

phased array probe를 사용하거나 설계시에는 여러 가지 인자를 고려하여야 한다. 이러한 인자에는 element들의 수, probe가 시험체에 접촉할 것인지 수침법으로 사용될 것인지, 전기적인 여기(excitation)를 burst로 할 것인지 아니면 pulse로 할 것인지, 그리고 파의 전달과 신호의 제어에 관한 방법등의 모든 인자에 대하여 고려하여야 한다. Element들 사이의 delay가 적용되지 않았을 경우에는 각 element들의 빔이 같은 조건으로 진행하므로 파의 강도(Intensity)가 진행방향에 수직인 선상에 균일하게 존재한다. 그림 2-5는 조정각(steering angle)  $\Theta$ 로 초음파 빔의 진행방향을 이동하고자 할 때, 시간지연(time delay)을 이동하고자 하는 방향으로 선형적으로 증가 시킴으로써 빔의 집속 방향을 이동시키는 것을 도식적으로 나타낸 것이다. 또한 중심 element에 긴 시간지연을 주고 외부로 향할수록 시간지연을 낮추어주면 파의 진행방향 중심선상에 빔의 집속이 이루어진다. 불연속 또는 결함으로부터 되돌아온 echo는 각 element에 수신되어 파가 전파될 때의 시간지연을 계산하여 각각의 element들로부터의 신호를 합산하면 결함신호를 나타내게 된다.

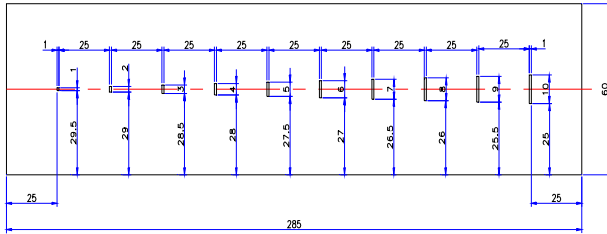


<그림 2>. phased array 빔 진행 모드

2. 본 론

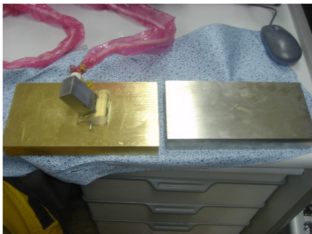
### 2.1 고감쇄 재료에 대한 검사기법개발 및 결함 검출능 실험

리테이닝 링과 같은 고감쇄 재료에 대한 위상배열 초음파 진단을 위해서 내부 형상에 대한 결함검출능 제고를 위한 시편 제작 및 실험을 수행하였다. 회전자 웨지와 같이 초음파 감쇄가 심한 재질을 사용하여 시편을 제작하여 위상배열 초음파에 의한 결함신호 검출 실험을 수행 하였다. 그림 2-15 에는 대비시험편에 삽입된 인공결함의 상세 제원을 나타내었다.



<그림 3> 로타 웨지 대비시험편 인공결함 설계도

미소 결함평가용 기준 시편은 그림 3에 보인 바와 같이 1-10mm, 길이의 인공결함이 표면에 가공되어져 있다. 결함은 방전 가공으로 삽입하였으며 정량적 평가를 위해 결함의 크기를 1, 2, 3, 4, 5mm 순서로 배열하였다



<그림 4> 신호취득 대비시험편

<그림 5> 신호취득 실험

### 2.2 위상배열 초음파 진단용 웨지 및 홀더 등 검사장치 설계/제작

발전기 설비에 대한 초음파 검사 신뢰성 제고 및 위상배열 초음파 특징을 활용한 검사 결과의 2차원 영상화를 위해서는 각 발전기 부품의 초음파 신호를 취득하기 위한 각종 웨지 및 탐촉자 홀더를 제작하고 필요한 입사각도 및 전자적 스캔의 각도를 효율적으로 지정하여야 한다. 또한 탐촉자 홀더를 이용하여 검사를 원하는 대상 설비에 원하는 각도로 초음파 빔을 입사 시킬 수 있기 때문에 현재의 문제점을 극복하여 검사 시간, 노동력의 단축과 검사 신뢰도의 객관성을 이루는데 크게 기여할 수 있다.



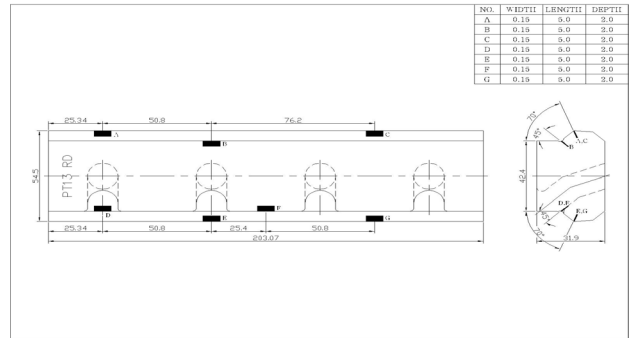
<그림 6> 결함초음파 검사용 각종 웨지

### 2.3 인공결함 설계제작 및 신호취득

앞서 기술한 대비시험편에 대하여 응력이 발생하는 패턴 및 실지 응력에 의한 결함의 발생빈도 등을 감안하여 결함이 발생할 가능성이 높은 응력집중부 및 응력에 의한 발생결함의 형태를 예상하고 대비시험편에 모사할 결함을 설계하였다.

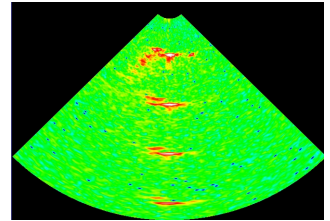
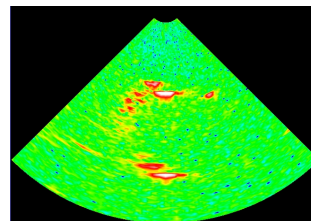
일반적으로 회전자 웨지에 발생하는 응력은 로타의 회전에 의한 원심력이며 이 원심력에 의한 인장 혹은 압축 응력으로 인해 웨지의 굴곡부 및 끝단부에 응력이 집중되며 이로 인해 결함은 피로 크랙이 발생하게 된다.

따라서 이러한 상황을 가장 잘 구현하기 위해 미소 크랙형 결함을 모사하였고 실제로 미세한 크기로 인공결함을 방전가공 처리하였다. 또한 회전자 웨지와 같이 초음파 감쇄가 심한 재질을 사용하여 시편을 제작하여 위상배열 초음파에 의한 결함신호 검출 실험을 수행할 예정이며 아래 그림 7에 각 대비시험편의 인공결함 설계도를 나타내었다.



<그림 7> 회전자 웨지 대비시험편 인공결함 설계도

발전기 설비중 회전자웨지에 대한 위상배열 초음파 기술의 활용을 위해 검사용 웨지제작 및 제작된 웨지의 현장에서 적용성을 사전에 점검하였다. 추후에 제작할 자동 검사 장치 및 검사용 탐촉자 홀더의 제작 방향을 정하기 위한 사전 현장검사를 신인천 복합화력의 계획예방정비 기간에 수행하여 신호를 취득하고 추후 제작할 홀더 및 자동 검사장치의 방향을 설정하였다.



<그림 8> 대비시험편 B 신호

<그림 9>대비시험편 A 신호

### 3. 결 론

연구 수행중 개발된 회전자 웨지에 대한 위상배열 초음파 검사기술에 대하여 사전 현장적용을 거쳐 발전소 현장에 대한 적용검사를 수행하였다. 회전기 웨지에 대한 각종 검사용 웨지를 설계 제작하여 웨지 대비시험편에 대한 위상배열 초음파 신호를 취득 및 분석하였다. 또한 이를 토대로 검사방법의 확립을 기하고 현장적용 성과를 제고하였다. 또한 회전자 웨지의 비파괴 검사 신뢰성 확보를 위한 신호 해석 절차서를 확보할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

[1] MH. Jung, DY. Park, "Development of technique for crack detection in TBN blade root" KEPRI Report KRG- 90G-J04, 1992,8  
 [2] C. A. Cain, and E. S. Ebbini. : "Synthesis of Optical Field Patterns with ultrasound Phased Array Applicators." Annual International Conference of the IEEE and Biology Society, Vol. 12. No 1, 1990.  
 [3] V. Ramm, O.T and S.W. Smith. "Beam Steering with Linear Arrays." Transaction on Biomedical Engineering. Vol. No. 8. New York, NY : Institute of Electrical and Engineers , 1983.  
 [4] B. D. Steinberg, Principles of Aperture and Array System Design. New York: Wiley, 1976.