

[논문] - 비파괴검사학회지
*Journal of the Korean Society
 for Nondestructive Testing*
 Vol. 24, No. 2 (2004. 4)

위상배열 초음파를 이용한 터빈 블레이드 루트부내 결함평가 기법 연구

A Study on a Crack Evaluation Technique for Turbine Blade Root Using Phased Array Ultrasonics

조용상*[†], 정계조*, 박상기*, 김재훈**

Yong-Sang Cho*[†], Gye-Jo Jung*, Sang-Ki Park* and Jae-Hoon Kim**

초 록 초음파검사는 재료의 표면 또는 내부에 존재하는 불 연속부를 검출하기 위해, 초음파를 재료에 전달시켜 검사하는 비파괴검사법의 일종이다. 이러한 일반 초음파검사 방법 및 일반 결함평가 방법은 복잡한 형상에서 반사되는 신호로부터 결함을 구분하기가 어려워 결함의 평가 및 검사결과에 신뢰성이 떨어지고 있는 실정이다. 따라서 이러한 crack성 결함의 발생 가능성이 높으나 기존의 초음파검사 방법으로는 결함 판별에 어려움이 있는 설비에서의 검사방법 및 결함평가 방법의 제고가 필수 불가결한 실정이다. 본 연구에서는 위상배열 초음파를 사용하여 크랙 검출능력이 높고 길이 평가가 가장 정확한 방사각도를 규명하고, 주요발전설비중 하나인 터빈에 적용하였다. 기존의 초음파 검사 방식이 아닌 위상배열 초음파를 이용하여 결함의 크기를 평가할 수 있는 신 기법 및 이를 이용하여 터빈 블레이드 루트부 내에 존재하는 미세 결함에 대하여 크기평가 방법 및 결함탐지 방법에 대하여 고찰하였다.

주요용어: 초음파 검사, 위상배열 초음파, 크랙평가, 전자주사

Abstract Ultrasonic testing is a kind of nondestructive test to detect a crack or discontinuity in materials or on material surfaces by sending ultrasound to it. This conventional ultrasonic technique has some limitations in reliably detecting crack or accurately assessing materials in the case of complex-shaped power plant components such as a turbine blade root. An alternative method for such a difficult inspection is highly needed. In this study, application of a phased array ultrasonic testing (UT) system to a turbine blade, one of the critical power plant components, has been considered, and the particular incident angle has been determined so that the greatest crack detectability and the most accurate crack length evaluation may be achieved. The response of ultrasonic phased array was also analyzed to establish a special method to determine the crack length without moving the transducer. The result showed that the developed method for crack length assessment is a more accurate and effective method, compared with the conventional method.

Keywords: ultrasonic testing, ultrasonic phased array, electronic scan, crack evaluation

1. 서 론

발전설비 중 터빈과 같은 회전 기계류에서의 결함

과 재료의 손상은 발전소에서 예상치 않은 사고의 원인이 될 수 있다. 특히 터빈 블레이드를 고정하고 있는 루트부에서의 결함 발생과 전파는 설비의 건전

성을 결정하는 주 요인중의 하나가 될 수 있다.

터빈 블레이드는 운전기간 중 항상 고온 고압의 환경에서 작동되고, 특히 블레이드 루트부에 응력이 집중된다. 이러한 운전 조건과 응력집중에 의해 터빈 블레이드는 균열성 결함인 피로크랙, 응력부식크랙(stress corrosion crack)이 자주 발생되고 있다. 균열성 결함이 자주 발생하는 터빈 블레이드 루트부는 주기적 검사가 필요하나 형상이 복잡하고 접근이 어려워 일부분을 제외하고는 전체적인 검사 수행이 제한된다[1].

블레이드 루트부에서 발생하는 응력부식 크랙과 같은 크랙성 결함의 검사 및 평가를 위해서는 기존의 보편적인 A-scan 신호를 나타내는 일반 초음파 탐촉자로서는 검사 각도를 여러번 변경하여 검사하여야 하고, 탐촉자를 계속 이동하면서 결함을 찾고 찾아진 결함의 평가를 위해서는 탐촉자를 좌우로 움직이는 동안 결함 echo의 파형을 보면서 길이를 평가한다. 일반 탐촉자로는 터빈블레이드 루트부 주변의 복잡한 형상에서 반사되는 신호로부터 결함을 구분하기가 어려워 결함신호와 형상신호를 분별하기가 용이하지 않기 때문에 검사결과에 신뢰성이 떨어지는 실정이다.

위상배열 탐촉자를 이용한 초음파 검사는 형상이 복잡하여 결함의 탐지 및 평가가 힘든 부분이나, 아울러 빔의 조정 폭이 다양하므로 접근이 어려운 곳에 적용할 수 있으며, 탐촉자의 이동을 최소화 하면서 검사의 신뢰도 및 신속성을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 기존의 초음파 검사 방식이 아닌 위상배열 초음파를 이용하여 초음파 신호취득 및 해석이 어려운 부위에서 발생하는 결함에 대하여 결함을 찾을 수 있는 방법 및 그 크기를 정량적으로 평가하는 방법에 대하여 고찰하였다.

2. 기본 이론

위상배열 초음파 검사는 한 탐촉자 내에 여러개의 Element 를 구성하여 탐촉자를 움직이지 않고도 원하는 각도와 깊이에 초음파 빔의 초점을 생성시켜 결함의 존재여부 및 결함의 크기평가 등이 시각적으로 가능하다. 이것은 탐촉자 내 각각의 압전소자에 초음파를 발생하는 시간지연을 부여함으로써 초음파 빔의 집속방향과 위치를 전자적으로 제어할 수 있는 것에 기인한다[2].

따라서 초음파 빔을 원하는 각도(steering angle)

로 조정하기 위하여 각 element들은 시간지연을 가져야 하며, 이 시간지연은

$$t_n = n \frac{d_n}{c} \sin \theta + t_0 \tag{1}$$

로 표시되고, 여기서

- t_n : element들 간의 시간 지연
- n : 중심 element에서부터 외부로의 element 번호, 0, ±1, ±2,....
- c : 실험체의 음속
- t_0 : 음의 시간지연을 피할 수 있을 만큼의 상수이다.

또한 초점은 빔의 천이 영역 Z_{TR} 을 벗어나는 영역에서 집속이 되도록 하여야 하며 천이 영역의 대략적인 거리는 아래 식 2와 같이 빔의 근거리 음장 영역과 일치한다.[3]

$$Z_{TR} = \frac{D_A^2}{4\lambda_0} \tag{2}$$

여기서

- λ : 초음파의 중심주파수에 해당하는 파장

초음파 빔이 일정한 거리 F에서 θ 의 방향으로 집속되도록 하기 위하여 각 Element들의 시간지연은 다음과 같이 계산한다.

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

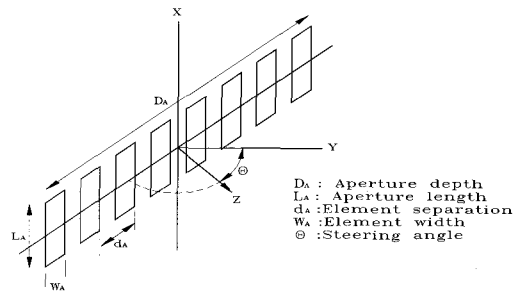


Fig. 1 The basic concept of ultrasonic phased array

3. 실험장치 및 실험방법

3.1. 실험장치

위상배열 초음파에 의한 결함의 크기 평가 실험에 사용된 장치는 캐나다 R/D Tech사에서 제작되

있으며, 구성은 초음파를 발생 시키는 송신부(pulser)와 수신부, 그리고 수신된 신호를 A/D 변환하여 나타내어주는 모니터로 구성되어 있으며 일반적인 초음파 탐상기와 달리 다중의 탐촉자를 제어하고 빔의 조정을 담당하는 전자적인 제어장치가 송신부/수신부와 함께 구성되어 있으며, 수집한 신호를 처리하여 화상으로 보여주는 신호처리기능이 소프트웨어적으로 구성되어 있다. Fig. 2는 실험장치 구성도 이다.

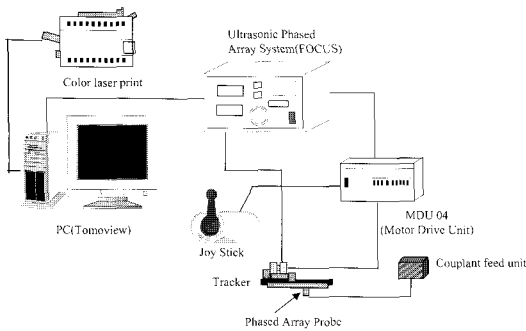


Fig. 2 Test equipment

실험에 사용한 탐촉자의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of phased array probe

No. of elements	32 Elements
Dimensions	12 X 8 X 13 mm
Type	Linear
Center frequency	10 MHz
Wedge angle	0°, (LW) 31°(SW), 53.46°(StW)
Wedge material	Plexi glass
Sound speeds	3200 m/s, 5900 m/s, 2840 m/s Shear wave, longitudinal wave, Surface wave

3.2. 결함평가 시편 및 평가방법

3.2.1. 결함평가용 대비시편

위상배열 초음파에 의한 결함의 크기 평가용 기준 시편은 결함평가 결과를 판정할 수 있도록 정확한 길이의 인공결함을 삽입하여 제작되었다. 결함평가용 기준 시편은 A, B, C 3개로서 A 대비시편

은 결합길이 1-10 mm, B 대비시편은 10-100 mm, C 대비시편은 100-250 mm 길이의 인공결함이 표면에 가공되어져 있다. 결함은 방전 가공으로 삽입하였으며 정량적 평가를 위해 결함의 크기를 각 대비시편 별로 A 대비시편은 1, 2, 3, 4, 5 mm... B 대비시편은 10, 20, 30, 40 mm... C 대비시편은 100, 150, 200 mm... 방식으로 각각 순차적으로 배열하였다. 시편의 재질은 일반강이며 음속은 5900 m/sec 이다. Table 2에 일반적인 Cr강인 결함 평가용 시편의 화학조성을 나타내었다

Table 2 Chemical composition of reference block for crack evaluation

C	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Si
0.27	0.43	1.9	1.27	0.45	0.12	0.27

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에는 결함평가용 특수시편의 설계도를 나타내었다.

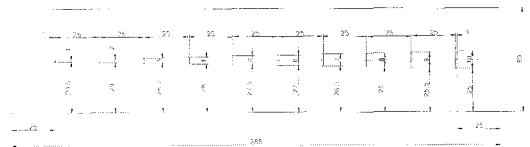


Fig. 3 Schematic diagram of reference block A

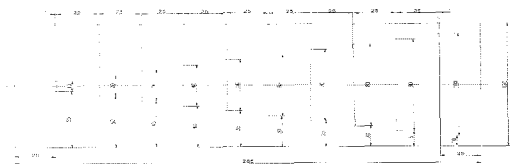


Fig. 4 Schematic diagram of reference block B

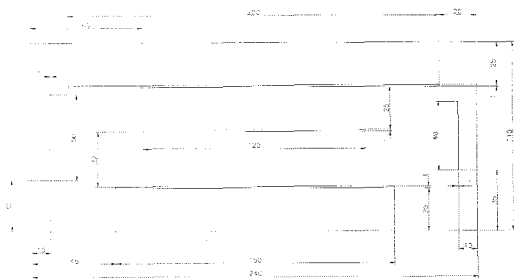


Fig. 5 Schematic diagram of reference block C

3.2.2. 결함평가 방법

결함의 특성은 결함의 위치, 방향 및 크기에 따라 결정되므로 시험체의 재질 및 두께에 따라 적절한 탐촉자를 선택하여 결함을 검출한 후에 여러 가지의 초음파 평가방법을 이용하여 정확한 결함의 특성을 평가하는데 지금까지 알려진 결함의 평가방법과 위상배열 초음파의 특성에 의한 새로운 결함 평가 방법과의 비교 평가를 위해서 결함평가용 시편을 활용, 결함의 평가를 Fig. 6에 보인바와 같이 일반적인 결함 검사를 통한 크기 평가의 방법으로 시험을 하고 그 결과를 고찰하였다. 다만 판과는 표면파와 같이 취급하여 실험대상 모드에서 생략하였다.

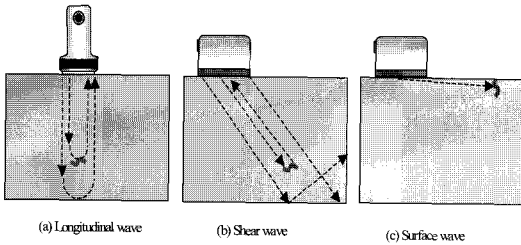


Fig. 6 Inspection method for crack

3.2.3. 결함 길이 평가법

불연속부의 길이 측정방법에는 크게 나누어 db drop법과 감도기준법이 있으나 이번 실험에서는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 불연속부가 검출되었을 때 탐촉자를 좌우로 이동시켜 결함 반사파의 높이가 결함 에코 최대 높이의 좌우측에서 50% 크기로 줄어들 때 까지의 탐촉자의 이동거리를 결함의 길이로 하는 6 db drop법을 이용 평가하였다.

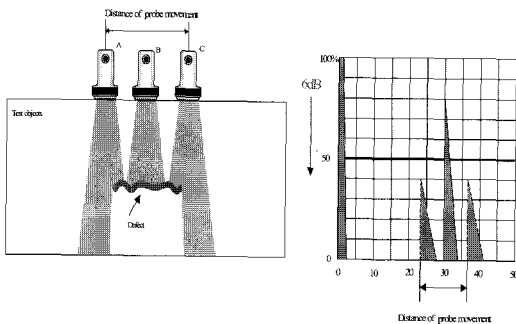


Fig. 7 6 db drop method

위상배열 초음파를 이용하여 결함을 평가하기 위해서 결함의 길이를 알고 있는 시편을 이용해 위상배열 초음파 특유의 결함 신호 표시 방식인 sector scan을 이용, 결함이 위상배열 검사 신호상에서 차지하는 각도의 영역을 고찰하고 이로부터 크기를 간략히 평가할 수 있는 기법에 대하여 실험을 통해 고찰하였다. 방전가공으로 결함을 길이별로 삽입한 결함 평가용 시편에 의하여 실제 결함길이와 신 기법에 의한 평가결과와 비교를 통하여 개연성을 부여하고자 하였다.

Fig. 8은 결함에 대한 신호가 차지하는 각도를 계산하는 위상배열 결함평가 삼각법에 의한 결함 평가법을 보여주고 있다. 이 방법에 의한 결함의 크기는 결함까지의 빔 진행거리 X Sin(결함각)이다

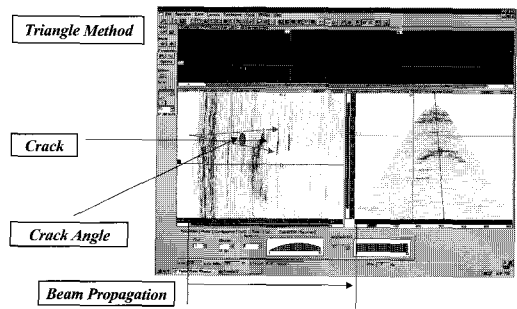


Fig. 8 Triangle method of ultrasonic phased array

즉 결함의 길이는 빔 진행거리 s, 결함이 차지하는 각도를 θ 라 하면,

$$L = 2S * \text{Sin}\theta \tag{4}$$

이다[8].

4. 결과 및 고찰

4.1. 전자적 주사에 의한 결함 평가법(표면파)

위상배열 초음파의 매우 중요한 특징은 검사 대상체에 수많은 각도로 초음파를 거의 동시에 주사할 수 있다는 것이다. 이런 방법은 빔의 주사를 일련의 법칙에 따라 행하고 탐촉자 내의 엘리먼트들에게 순차적으로 전압을 여기 시킴으로서 가능해진다. 이 방법으로 원하는 각도로 초음파 빔을 결함 평가용 시편에 주사하였다. 표면파는 특수웨지를 사용하여 검사대상체의 표면에 초음파 빔이 진행하

도록 설계하였으며 시편의 인공 결함길이 1 mm에서 10 mm까지 실험을 수행하였다. 위상배열 초음파에 의한 표면파가 웨지에 의해 유도되어 표면을 따라 진행하다 표면결함을 만나게 되면 다시 위상배열 탐촉자로 돌아오게 된다. 웨지에 의해 굴절된 표면파는 검사자의 의도나 프로그램에 의해 어떤 특정각도의 전자 주사각도를 갖고 있기 때문에 결함의 크기에 따라, 또 초음파 빔이 진행한 거리에 따라서 서로 틀린 각도의 빔이 돌아오게 된다. 이때 초음파 빔이 진행한 거리를 알게 되면 위상배열 초음파 신호 상에서 쉽게 볼 수 있는 빔의 반사 시작점과 끝점의 각도를 읽음으로서 결함의 크기를 평가할 수 있는 것이다. 이런 방법으로 하면 아주 쉽게 표면결함을 평가할 수 있다[6]. 이것이 기본적인 위상배열 초음파 결함평가 삼각법의 방법이다. Fig. 9에 Fig. 3에 상세히 나타낸 인공결함에 대한 위상배열 초음파의 결함평가 신호중 결함길이 2 mm에 대한 평가신호를 나타내었다.

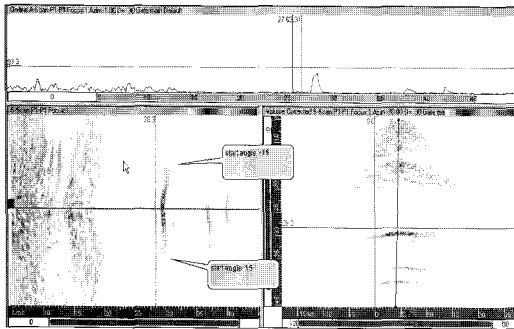


Fig. 9 Crack evaluation by electronic scan (SW, 2 mm)

4.2. 전자적 주사에 의한 결함 평가법 (횡파)

위상배열 초음파에 의해 유도된 횡파가 재료 내를 어떤 특정 각도로 입사할 때에도 일정영역의 주사각도를 가지고 입사하기 때문에 결함을 만나게 되면 결함과 만난 어떤 특정각도의 초음파만이 되돌아오며 이것으로 결함과 만나는 각도와 빔 진행거리를 통해 결함의 평가를 수행할 수 있다[6]. Fig. 10에 횡파를 이용한 결함의 평가 신호를 나타내었다.

4.3. 전자적 주사에 의한 결함평가법(종파)

위상배열 초음파에 의한 결함의 평가를 특별한 웨지를 사용하지 않을 경우는 종파에 의한 결함평

가가 가능하다. 결함평가용 대비시편 A의 인공결함에 대해서 종파를 이용 평가하였다. Fig. 11에 종파에 의한 위상배열 초음파 결함평가 신호의 대표적 예를 나타내었다.

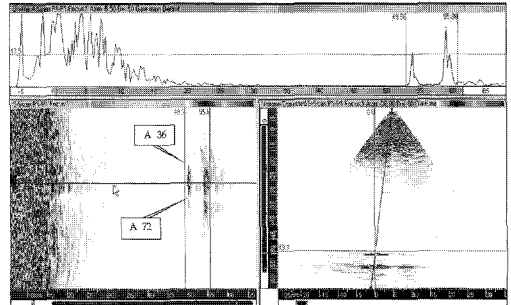


Fig. 10 Crack evaluation by electronic scan (SHW, 2 mm)

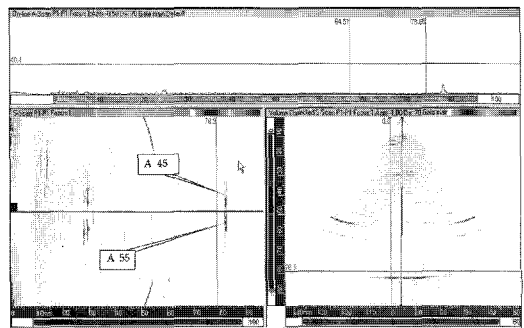


Fig. 11 Crack evaluation by electronic scan (LW, 2 mm)

위상배열 초음파 결함평가 삼각법에 의한 결함의 크기평가를 표면파, 횡파, 종파의 각각의 경우에 대하여 결함대비시편 A, B, C의 각각의 결함 크기에 대하여 수행한 결과를 아래 Table 3에 정리하여 나타내었다.

A, B, C 3개의 결함평가용 대비시편의 각각의 결함크기에 대한 표면파, 종파, 횡파를 이용한 위상배열 초음파 삼각법과 6 dB drop 법에 의한 결함평가의 비교 분석 결과 매우 좋은 정도로 일치함을 알 수 있었다.

4.4. 전자적 주사에 의한 블레이드 루트부 결함 평가

이상과 같이 위상배열 초음파에 의한 결함평가 기법을 이용하여 형상이 복잡하여 기존의 방식으로

Table 3 Comparison of phased array triangle method and 6DB drop method

Crack length (mm) (specimen)	Conventional method (6 dB drop)	Phased array (triangle method)			Distance to crack (mm)
		Longitudinal wave	Shear wave	surface wave	
1	N/A	1.8	1.4	N/A	10
2	N/A	2.6	2.3	1.6	10
5	6.4	5.4	5.2	4.6	20
10	11	12.2	10.6	9.4	20
20	22	22	20.2	18.6	50
50	47	48	51.4	48.4	100
100	102	92	101.8	98.2	200

는 결함의 평가가 힘든 발전용 터빈 블레이드 루트부에 대한 위상배열 초음파 검사를 수행하고 삼각법에 의해 결함의 평가를 수행하였다. Fig. 12에 발전설비 중 대표적으로 초음파 검사하기에 어렵고 결함의 평가가 힘들거나 결함발생 빈도가 높은 핀핑거 형태의 블레이드 루트부 검사모양을 도시하였으며 핀홀 주위에 대하여 각 양쪽 방향으로 2 mm의 인공결함을 삽입하고 위상배열 초음파 삼각법에 의한 결함의 평가를 수행하였다. 이때의 결함검사 신호는 Fig. 13과 같으며 식 (4)에 의한 결함 길이 평가는 2.4 mm 였다.



Fig. 12 Pin finger type root

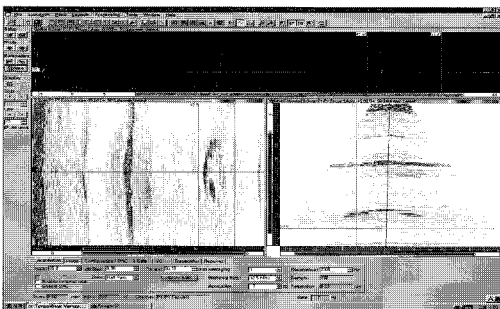


Fig. 13 Crack evaluation by electronic scan for blade root

Fig. 14는 표준화력용 블레이드 루트부인 straddle mount type의 root부에 대하여 각 후크부위에 길이 2 mm의 인공결함을 가공하고 위상배열 초음파 결함평가 삼각법에 의한 결함평가를 수행한 내용을 표시하였다. 역시 식 (4)에 의한 결함의 평가결과 2.4 mm - 2.8 mm로 나타났다

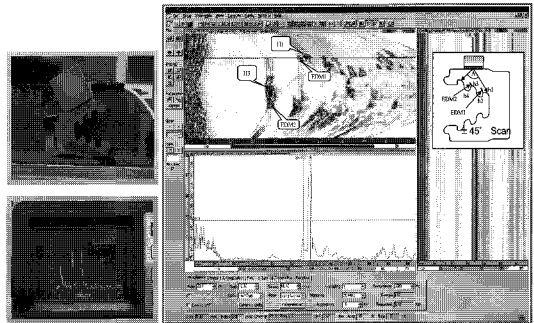


Fig. 14 Crack evaluation by electronic scan for blade root

5. 결론

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

1. 위상배열 초음파 검사의 결함평가는 접근성이 제한 될 때 결함을 평가할 수 있는 효과적 방법이다
2. 위상배열 삼각법은 초음파 빔의 전자주사와 빔의 진행거리와 관계에서 탐촉자를 움직이지 않고 계산하는 한 방법이며 결함길이 평가에서 유효하다.

3. 위상배열 초음파 scan 각에 의한 결함의 평가는 2 mm이내의 아주 작은 결함의 경우를 제외하고는 횡파, 종파, 표면파, 각각에 대하여 결함길이 10% 이내의 정확한 평가 결과를 보였다.
4. 결함평가용 전자 주사의 각도는 30도 이내일 때 가장 선명한 신호를 보였다.
5. 위상배열 결함평가 삼각법은 복잡한 형상에서의 결함의 길이를 정량적으로 평가하기에 매우 간편하고 효율적인 방법이다.

참고문헌

- [1] M. H. Jung and D. Y. 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, pp. 129-134, (1990)
- [3] V. Ramm 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)
- [5] A. Lamarre and N. Dube, "Feasibility Study of ultrasonic Inspection Using Phased Array of Turbine Blade Root," EPRI Workshop, July 29 - Aug. 01, pp. 1-9, (1997)
- [6] Y. S. Cho and J. H. Kim, "A study on the characteristics of surface wave induced by phased array UT," The 11th Asia-Pacific Conference on Nondestructive Testing, Jeju Island, (2003)