

전자적 스캔에 의한 미소결함길이 평가기법

A Small Crack Length Evaluation Technique by Electronic Scanning

조용상*[†], 김재훈**

Yong-Sang Cho*[†] and Jae-Hoon Kim**

초 록 초음파에 의한 결함평가 방법은 결과가 검사자의 경험과 지식에 의존되고 검사자에 따라 평가결과가 달라진다. 위상배열 초음파는 탐촉자 소자에 초음파를 발생하는 시간지연을 부여함으로써 초음파 빔의 집속 방향과 위치를 전자적으로 제어할 수 있는 특징이 있으며 탐촉자를 움직이지 않고 결함의 평가가 가능하다. 본 연구에서는 위상배열 초음파의 전자적 스캔 특성을 이용하여 미소결함에 대한 크기평가의 기법에 대한 고찰을 하였다. 일반적으로 탐촉자를 움직여서 결함길이를 평가하는 기존의 방법은 결함의 길이가 아주 미소할 경우는 탐촉자의 이동거리 역시 미소하여 크기를 평가하기가 곤란하다. 따라서 전자적 스캔의 특성을 이용하여 미소결함에 대해서도 결함길이를 정확하게 평가할 수 있는 방법 및 기법에 대하여 고찰하여 그 유효성을 입증하였다.

주요어: 위상배열초음파, 횡파, 결함길이 평가, 전자적 스캔, 미소결함

Abstract The results of crack evaluation by conventional UT(Ultrasonic Test) is highly depend on the inspector's experience or knowledge of ultrasound. Phased array UT system and its application methods for small crack length evaluation will be a good alternative method which overcome present UT weakness. This study was aimed at checking the accuracy of crack length evaluation method by electronic scanning and discuss about characteristics of electronic scanning for crack length evaluation. Especially ultrasonic phased array with electronic scan technique was used in carrying out both sizing and detect ability of crack as its length changes. The response of ultrasonic phased array was analyzed to obtain the special method of determining crack length without moving the transducer and detect-ability of crack minimal length and depth from the material. A method of crack length determining by electronic scanning for the small crack is very real method which has it's accuracy and verify the effectiveness of method compared to a conventional crack length determination.

Keywords: Phased Array UT, Shear Wave, Crack Length Evaluation, Electronic Scan, Small Crack

1. 서 론

초음파 시험은 결함에 민감하고 인체에 무해하며 결함의 분류와 크기 산정을 위해 필요한 다양한 정보를 제공하기 때문에 널리 사용되는 시험방법 중의 하나이다[1]. 일반적인 초음파 결함평가 방법은

평가결과가 검사자의 경험과 지식에 의존되고 검사자에 따라 평가결과가 달라질 수 있다. 특히 검사 대상체의 형상이 복잡한 경우는 형상에서 반사되는 신호와 결함신호를 구분하기가 어려워 평가결과에 대한 신뢰성이 떨어지고 있는 실정이다[2].

위상배열 초음파에 의한 검사는 탐촉자 소자에

초음파를 발생하는 시간지연을 부여함으로써 초음파 빔의 집속방향과 위치를 전자적으로 제어할 수 있는 특징이 있다. 즉, 위상배열 초음파는 미리 정해 놓은 위상편차를 전기적으로 조정하고, 각각의 탐촉자가 시간 지연을 두고 펄스를 발생하도록 할 수 있는 것이다[3]. 즉, 빔을 보내는 방향과 형태를 잘 조절함으로써 비파괴검사의 동적집속(dynamic focusing)과 실시간 탐상(real-time scanning), 검사 결과의 영상화 등이 가능하다. 이것은 결함의 평가 결과를 2, 3차원적으로 표시할 수 있다는 것이며, 이에 따른 결함의 존재여부 및 결함의 크기평가 등을 할 수 있다는 것이다[4,5]. 또한 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[6]. 본 연구에서는 기존의 여러 가지 초음파 결함에 대한 평가방식[7-10]이 아닌 위상배열 초음파의 전자적 스캔 특성을 이용한 미소결함 길이평가 방법에 대한 연구로서 결함 평가방법 및 기법의 특성에 대하여 고찰하였다.

2. 본 론

2.1. 기본 이론

위상배열 초음파는 전자적 주사의 특징에 의해 동적집속(dynamic focusing)과 실시간 탐상(real-time scanning)을 가능하게 된다[1]. 이러한 특성에 의해 전자적 조향각을 가진 초음파 빔은 재료내부로 진행할 때 특정 영역의 각도를 가지게 된다. 초음파 빔은 재료내부에서 결함을 만날 때까지는 정상적으로 진행하다가 결함을 만나게 되면 음향 임피던스의 차이로 결함을 만난 대부분의 초음파는 탐촉자로 되돌아오게 된다. 위상배열 초음파에서는 결함을 향한 빔이 검사자의 의도에 의해 주어진 각도(focal law)만큼 주사각도를 가지고 내부로 진행하게 되는데 이때의 초음파 빔이 갖는 각을 조향각이라고 하면 위상배열 초음파에서는 결함을 향해 진행하는 빔이 일정한 영역의 조향각을 가지고 진행하기 때문에 결함을 만나게 되면 특정 조향각 내의 초음파 빔이 탐촉자로 되돌아오게 된다. 이때 결함의 크기에 따라 되돌아오는 빔도 일정영역의

각도를 가지고 오게 되고 이 각도를 측정하여 결함의 크기를 평가할 수 있다[5].

위상배열 초음파의 특성을 이용한 결함평가를 위해서는, 먼저 지향특성이 우수한 위상배열 탐촉자의 설계가 중요하며, 위상배열 초음파 탐촉자의 빔 지향특성(beam directivity)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$H(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right) \sin\left[\frac{\pi d N}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_s)\right]}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta N \sin\left[\frac{\pi d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_s)\right]} \right| \quad (1)$$

여기서, a : 압전소자의 폭

d : 압전소자간의 간격

N : 압전소자의 수

θ_s : 조향각도

λ : 검사대상체 재료내의 파장

이다. 즉 지향성은 위상배열 초음파에서의 압전소자의 폭, 간격, 수, 조향각도 등의 변수에 의하여 빔이 얼마나 정확하게 원하는 각도로 지향하는가를 나타내는 척도로 사용할 수 있다. 또한, 형상이 복잡한 재료에 적용하기 위한 위상배열 탐촉자는 소자의 개수 및 폭, 주사각도, 소자간의 간격 등을 고려하여 선정되어야 한다. 위상배열 초음파 탐촉자의 설계조건은 주파수, 압전소자의 수, 압전소자 사이의 간격, 압전소자의 크기 등이다. 각 압전소자의 간격은 넓을수록 빔의 지향성은 향상되지만 메인 로브(main lobe) 주위의 사이드 로브(side lobe) 영향이 강하게 나타나 정확한 탐상이 어려워진다. 이 간격들은 지향성이 좋고 사이드 로브의 영향이 적은 적당한 값으로 설정하여야 한다. 이러한 소자간의 간격은 또한 검사 대상체의 음속을 고려하여 선정되어야 하며, Ronald 등에 의해 선형배열 탐촉자인 경우 $1.0 \sim 1.5 \lambda$, 평면배열인 경우 $0.5 \sim 0.7 \lambda$ 의 값으로 선정되어야 효과적인 것으로 알려져 있다[4]. 조향각(steering angle) 및 활성소자의 개수에 따른 메인로브(main lobe)의 빔 sharpness(q)는 식 (2)와 같이 나타내어진다[4].

$$q = \sin^{-1}\left(\sin \theta_s + \frac{\lambda}{dN}\right) - \sin^{-1}\left(\sin \theta_s - \frac{\lambda}{dN}\right) \quad (2)$$

Fig. 1은 조향각에 따른 메인 로브의 빔 폭 변화를 나타낸다. 본 연구에서는 활성소자수 32개와 16개, 소자간 간격 0.3 mm이고, 10 MHz의 주파수

를 갖는 탐촉자에 대하여 조향각이 변할 때의 빔 샤프니스를 구한 결과를 플롯한 것이다. 조향각이 증가함에 따라 초음파 빔의 지향특성이 감소됨으로 위상배열 초음파특성을 이용한 결함 평가의 오차가 증가함을 예측할 수 있다. 즉, 위상배열 초음파 탐촉자 설계시 제작 가능한 높은 주파수, 다수의 활

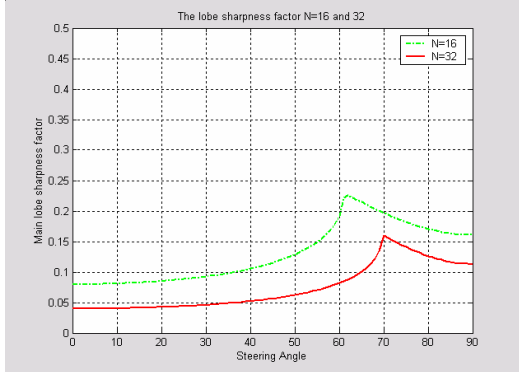


Fig. 1 Main lobe sharpness factors of the number of active element changes

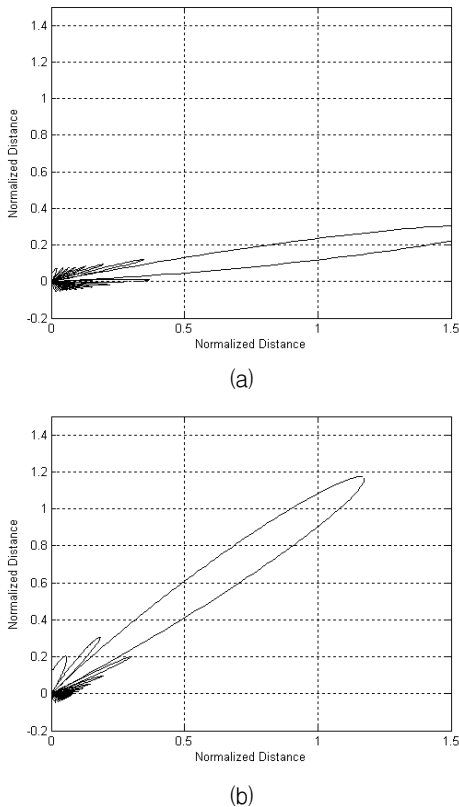


Fig. 2 Ultrasonic beam directivity in steel, N=32, d=0.3 mm, (a) steering angle 10°, (b) steering angle 45°

성소자를 선택함으로써 초음파 빔의 지향 특성을 향상시킬 수 있다. 이렇게 설계, 제작된 탐촉자는 작은 조향각을 사용할 경우 결함을 정확히 평가할 수 있다[5]. 따라서 본 실험에서는 가급적 높은 주파수인 공칭 주파수 10 MHz, 소자간 간격 0.3 mm, 활성소자 개수 32인 위상배열 초음파 탐촉자를 사용하여 빔의 지향특성을 좋게 하고, 빔의 sharpness 를 높은 상태에서 결함평가에 적용하였다.

Fig. 2는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 본 연구에서 사용하고자 하는 위상배열 초음파 탐촉자의 제원에 의한 일반 강(steel)에서의 초음파 빔 지향 특성을 나타낸 것이다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 결과에 의하여 본 실험에서 이용한 위상배열 초음파 탐촉자의 빔 지향특성은 삼각법에 의해 결함을 평가하는 비교적 작은 각도 내에서는 만족할 만한 결과를 얻을 것으로 예측되었다[5].

2.2. 실험장치 및 실험방법

2.2.1. 실험장치

위상배열 초음파에 의한 결함의 크기 평가 실험에 사용된 장치의 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. 실험에 사용한 탐촉자의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of a phased array probe

Number of element	32 Elements
Size	6 x 8 x 13 mm
Type	Linear
Frequency	10 MHz
Wedge angle	0°(LN), 31°(SH), 53.46°(SF)
Wedge material	Plexi glass
Velocity	Shear wave(3200 m/s), Longitudinal wave(5900 m/s), Surface wave(2840 m/s)

2.2.2. 대비시험편

위상배열 초음파에 의한 결함의 크기 평가용 기준 시험편은 결함평가 결과를 판정할 수 있도록 정확한 길이의 인공결함을 삽입하여 제작하였다. 미소 결함평가용 기준 시험편은 1-10 mm 길이의 인공 결함이 표면에 가공되어져 있다. 결함은 방전 가공으로 삽입하였으며 정량적 평가를 위해 결함의 크기를 1, 2, 3, 4, 5, ... 10 mm로 순차적으로 배열하였다(Fig. 3). 시험편의 재질은 탄소강이며 음속은 5900 m/sec이다.

Fig. 3에는 결함평가용 시험편(reference block)의 설계도를 나타내었다.

2.2.3. 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 위상배열 초음파의 특성에 의한 새로운 결함 평가 방법의 유효성을 검증하기 위해

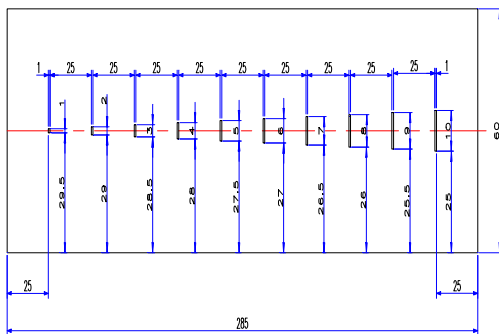


Fig. 3 Schematic diagram of the reference block

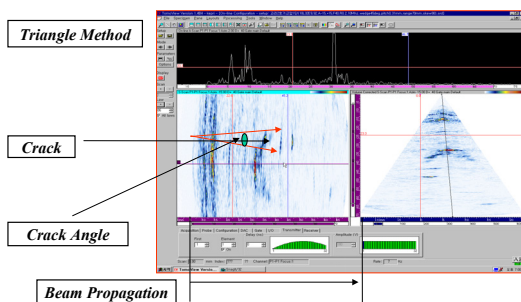


Fig. 4 Schematic diagram of crack evaluation by triangle method

서 결함평가용 시험편을 활용, 결함의 평가를 Fig. 4에 보인바와 같은 위상배열 초음파 검사 결함평가 방법으로 그 결과를 고찰하였다.

불연속부의 길이 측정방법에는 크게 나누어 db drop법과 감도기준법 등이 있으나 본 실험에서는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 불연속부로부터 되돌아오는 결함의 각도를 측정하여 평가하는 위상배열 초음파 결함 평가법을 이용하였다. 위상배열 초음파를 이용하여 결함을 평가하기 위해서 결함의 길이를 알고 있는 시험편을 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 기법으로 미소한 결함의 평가특성에 대하여 실험을 통해 고찰하였다. 방전가공으로 결함을 길이별로 삽입한 결함 평가용 시험편에 의하여 실제 결함길이와 신 기법에 의한 평가결과와 비교를 통하여 개연성을 부여하였다.

Fig. 4는 결함에 대한 신호가 차지하는 각도를 계산하는 위상배열 결함평가 삼각법에 의한 결함 평가법을 보여주고 있다. 이 방법에 의한 결함의 크기는 결함까지의 빔 진행거리 $s \times \tan(\text{결함각})$ 이다.

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

$$L = 2S * \tan\theta \tag{3}$$

이다.

3. 결과 및 고찰

위상배열 초음파의 특성을 이용하여 재료내 존재하는 결함에 대해서 기존 결함평가 방법과 다른 새로운 평가방법인 위상배열 초음파 삼각법의 미소각도 변화에 따른 결함평가의 정확성 영향을 고찰해 보기 위하여 결함평가용 대비시험편에 있는 미소 인공결함을 활용, 같은 크기의 미소결함에 대해 전자주사 각도를 변화하여 가면서 식 (3)에 의한 계산 결과와 실제 결함의 길이를 비교하였다.

Table 3은 활성 소자수가 8개인 경우의 결함의 길이 1-5 mm에 대해서 전자 주사각 1-5°로 변화시키면서 삼각법에 의한 결함의 크기 평가 결과를 나타낸 것이다. Table 4는 Table 3에서의 실험 조건과 같으나 활성 소자수가 32개인 경우의 실험결과를 나타낸 것이다.

Fig. 5는 미소결함에 대한 전자 조향각 변화에 따른 결함의 평가결과를 고찰하기위해 결함의 길이가 1 - 5 mm인 비교적 작은 결함에 대하여 결함에서 반사되어 오는 조향각이 1 - 5° 가 되도록 입사 전자주사 각도를 선정된 상태에서 식 (3)에 의해 결함의 길이를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 결함의 크기를 측정할 때에는 결함이 차지하는 각도를 측정하기 위해 검사 화면상에서 결함의 시작점의 각도와 결함이 끝나는 점의 각도를 읽은 후 그 차이를 식 (3)에서의 각도로 입력하여 계산한다. Table 4에서의 각 실험치와 Fig. 5에서의 경향을 살펴보면, 결함의 크기가 커질수록 결함에 대한 평가의 오차가 커짐을 볼 수 있으나 그 크기는 탐촉자 수가 작은 경우보다 더 작았다. 즉 탐촉자 수가 많고 조향각이 작으면 결함평가의 오차율도 작았다. 조향각의 변화에 대해서도 조향각이 커질수록 결함평가의 정도는 낮아졌으나 그 오차율은 결함이 큰 경우보다 감소하였다. 이것은 미소결함의 경우 일정 빔 진행거리에서 결함에 의해 반사되는 위상 배열 초음파 각도가 작아짐에 따른 결함각의 손실이 적어진 결과이다. 따라서 위상배열 특성에 의한 결함평가는 작은 결함에 더욱 정확한 평가결과를 나타내며 빔 조향각이 20° 이상을 차지하는 큰 결함에 대한 평가를 위해서는 결함의 위치가 탐촉자로부터 멀리 떨어진 경우는 압전소자의 간격이 넓을수록 집중효과가 증대되므로 활성 압전소자수를

조정하던가, 빔 진행거리를 멀게 하여 빔 조향각을 미소하게 하여야 한다.

따라서 결함의 정량적 평가의 정확성을 기하기 위한 전자 주사각은 최대 20° 이내로 선정하는 것이 필요하다. 그러나 미소결함 평가결과 고찰에서 살펴본 바와 같이 결함각이 작으면 결함평가의 정도가 올라가므로 정확한 평가를 위해서는 전자 주사각 10° 이내로 하는 것이 결함의 평가 정확도를 고려한 결함평가시의 최소 조향각도이다.

Fig. 6은 결함길이 1 - 5 mm의 미소결함에 대하여 활성소자수의 변화 및 반사각의 변화에 의한 결함의 평가결과 오차율을 방법별로 표시한 것이다. Fig. 6에서 비교적 작은 결함에 대하여 제일 작은 전자 주사각도로 활성 소자의 수 32개인 경우가 오차율이 제일 낮다(S1E32, 주사각도 1도, element 32개). 미소결함의 경우에는 활성소자수가 많으면 결함의 크기가 점점 커지기 시작하더라도 5 mm 정도까지는 결함평가 오차율이 일정하게 유지되었으며 정량적 결함평가의 정도를 높일 수 있는 인자

Table 3 Comparison of crack length by electronic scan angle with 8 elements

Crack length(mm) Scan angle(°)	1	2	3	4	5
1	1.03	2.05	3.07	4.09	5.11
2	1.04	2.07	3.09	4.12	5.13
3	1.06	2.09	3.14	4.14	5.18
4	1.09	2.11	3.17	4.17	5.22
5	1.09	2.12	3.19	4.19	5.28

Table 4 Comparison of crack length by electronic scan angle with 32 elements

Crack length(mm) Scan angle(°)	1	2	3	4	5
1	1.02	2.04	3.06	4.07	5.08
2	1.03	2.06	3.08	4.09	5.09
3	1.05	2.07	3.11	4.13	5.11
4	1.05	2.08	3.12	4.16	5.13
5	1.05	2.09	3.15	4.18	5.16

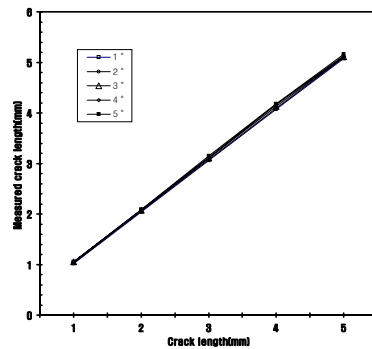


Fig. 5 Crack length evaluation by electronic scan angle changes with 32 active elements

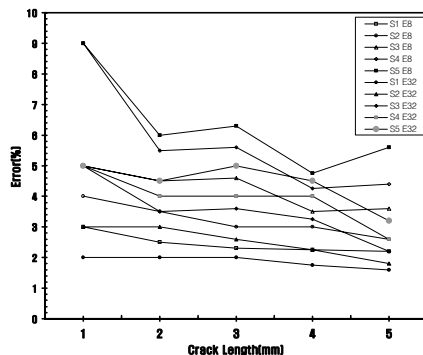


Fig. 6 The error percentage of crack length evaluation by scan angle and element changes

가 될 수 있음을 알 수 있다.

즉, 위상배열 초음파를 이용한 본 연구에서의 결함 평가방법은 미소결함의 길이평가에 아주 효율적이며 조향각을 아주 작게 하면 결함의 평가의 정확도가 향상된다는 사실을 보여주는 것이다. 또한, 전자주사 각도별, 활성소자수별, 삼각법의 특성을 평가결과의 오차율로 비교하여 본 바와 같이 결함 평가를 할 때 초음파 빔의 집속 및 해상도 제고를 위해 가급적 조향각은 감소시키고 활성소자수를 증가시킨 상태에서 검사하면 결함평가의 정도를 높일 수 있을 것으로 나타났다.

따라서 위상배열 초음파의 집속능력을 활용하여 아주 미세한 결함에 대해서 충분한 정도의 해상도를 제고한다면 결함의 길이 평가에 대한 이 방법은 결함평가의 정밀도에 있어서 그 정도를 더할 수 있을 것이다.

4. 결 론

일반적인 초음파 검사에 의한 결함의 평가에 의해서도 결함의 길이를 평가할 수는 있으나 결함의 크기가 미소한 경우는 정확한 결함의 평가가 어렵다. 비교평가를 위해 기존의 결함평가법에 의한 본 시편에서의 결함을 평가하였으나 결함의 길이가 5 mm 이내의 경우는 결함의 길이 평가 자체가 정량성을 가질 수 없고 최소 오차 50-100%에 달하여서 비교용 Table로는 활용하지 못하였다. 위상배열 초음파의 전자적 스캔 특성을 이용한 결함 평가법은 어떤 특정 크기 이내의 결함 혹은 특정 조향각 이내에서는 기존의 결함평가 방식보다 더 정확하게 정량적으로 평가할 수 있다. 실험을 통해 기존의 결함 평가법과 비교하여 아래의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 연구에서의 결함평가법은 초음파 빔의 전자주사와 빔의 진행거리와 관계에서 탐촉자를 움직이지 않고 계산하는 한 방법이며 미소결함길이 평가에서 유효함을 입증하였다.
- 2) 위상배열 초음파를 이용한 결함 평가는 미소결함의 정량적 평가에 아주 효율적이며 조향각이 감소할수록 활성소자수가 증가할수록 결함의 평가결과 정확도가 향상 되었다.
- 3) 위상배열 전자적 주사각에 의한 결함의 평가는 미소결함에 대해서는 결함길이 10% 이내의 정확한 평가 결과를 보였다.
- 4) 위상배열 초음파를 이용한 결함 평가법은 미소

결함에 대한 정량적 결함 평가에 정확도가 증가하고, 본 실험의 조건에서 빔 조향각 10° 이내에서는 오차율 5 % 이내, 빔 조향각 5° 이내에서는 오차율 2 % 이내로 나타났다.

참고문헌

- [1] H. J. Shin and S. J. Song, "Nondestructive inspection of steel structure using phased array ultrasonic technique," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 20, No. 6, pp. 538-544, (2000)
- [2] 박익근, "초음파를 이용한 재료의 비파괴평가", 기계저널, Vol. 38, No. 9, pp. 44-48, (2000)
- [3] 송성진, "결함의 정량적 비파괴평가기술", 기계저널, Vol. 36, No. 9, pp. 49-53, (2001)
- [4] 최상우, 이준현, "Phased array 트랜스 듀서에 있어서 구성 압전소자수의 변화에 따른 초음파 빔 전파특성 해석(제1보)", 한국비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, pp. 70-79, (1998)
- [5] Y. S. Cho, 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)
- [6] 조용상, 길두송, "초음파 및 phased array를 이용한 터빈 블레이드 루트부 건전성 평가에 관한 연구", 한국비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, pp. 95-100, (2003)
- [7] M. Onozawa and Y. Ishii, "Experimental measurement of flaw height by ultrasonic testing-effective beam spread angle method," Journal of JSNDI, Vol. 26, No. 5, pp. 324-329, (1977)
- [8] 홍재근, 김우성, "기계적 피로결함 시험편 제조 및 결함크기평가", 한국비파괴검사학회지, Vol. 23, No. 1, pp. 38-44, (2003)
- [9] 박문호, 강석철, "ASME 및 CSA 코드에 의한 초음파 결함크기측정", 한국비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 4, pp. 313-320, (1998)
- [10] M. H. Park, "Ultrasonic flaw sizing technique," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 19, No. 6, pp. 448-453, (1999)