

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.11.919>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 램파 혼합 기법을 이용한 알루미늄 합금의 부식 결함 검출에 대한 실험 연구<sup>§</sup>

최희웅\* · 이재선\* · 조운호\*<sup>†</sup>

\* 부산대학교 기계공학부

### Experimental Study on Corrosion Detection of Aluminum Alloy Using Lamb Wave Mixing Technique

Heeung Choi\*, Jaesun Lee\* and Younho Cho\*<sup>†</sup>

\* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received May 11, 2016 ; Revised August 21, 2016 ; Accepted August 24, 2016)

**Key Words:** Lamb Wave Mixing Technique(램파 혼합 기법), Nonlinear Parameter(비선형 인자), Wave Mixing Technique(초음파 혼합 기법), Corrosion(부식)

**초록:** 본 연구에서는 비선형 체적파 혼합 기법의 선행연구를 토대로 램파 기법에 적용하여 램파 혼합 기법에 대한 연구를 수행하였다. 램파 혼합 기법의 타당성을 증명하기 위해 결함이 없는 시편과 부식에 의해 발생된 표면 결함이 있는 시편에 대해 실험을 진행하였다. 실험 대조군으로는 램파의 지배적인 면 내변위와 면외변위를 가지는 모드 및 주파수로 선정하였다. 그 결과 램파 혼합 기법으로도 결함 검출이 가능하였고, 기존의 램파 기법의 경향성과 유사하게 나타났다. 그리고 이론과 동일한 지배적인 변위와 모드가 발생된 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 결함 검출 성능은 측정 방법 및 단순 모드 선정에 따라 결정되는 것이 아니라 변위 비율에 따라 결정된다.

**Abstract:** In this study, the Lamb wave mixing technique, which is based on advanced research on the nonlinear bulk wave mixing technique, is applied for corrosion detection. To demonstrate the validity of the Lamb wave mixing technique, an experiment was performed with normal and corroded specimens. Comparison group in an experimentation are selected to mode and frequency with dominant in-plane displacement and out-of-plane displacement of Lamb waves. The results showed that the Lamb wave mixing technique can monitor corrosion defects, and it has a trend similar to that of the conventional Lamb wave technique. It was confirmed that the dominant displacement and mode matching the theory were generated. Flaw detectability is determined depending on displacement ratio instead of using the measurement method and mode selection.

### 1. 서론

비선형 초음파 기술은 부식, 피로에 의한 소성 변형, 열화 등에 따른 미세 구조적 변질을 평가하는 방법으로 연구되어 왔다.<sup>(1~3)</sup> 비선형인자(nonlinear parameter)에 대한 비선형 방정식은 이

론적으로 재료에 의해 발생하는 고조파 성분만을 고려하고 있다.<sup>(4,5)</sup> 그러나 실제 실험에서는 재료에 의해 발생하는 고조파 성분 이외에 장비, 탐촉자, 접촉매질, 증폭기 등에 의해 발생하는 고조파 성분까지 포함되어 측정된다. 재료에 의해 발생하는 요인을 제외한 외부적인 요인들을 시스템 비선형성(system nonlinearity)이라 한다. 시스템 비선형성 중 장비에 의한 영향을 줄이기 위해 초음파 혼합 기법(wave mixing technique)이 있다. 이 기법에 대한 기존 연구로는 1-D과 2-D에 대한 비

§ 이 논문은 2016년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계 학술대회(2016. 4. 7.-8., 서귀포 KAL호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, mechcyh@pusan.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

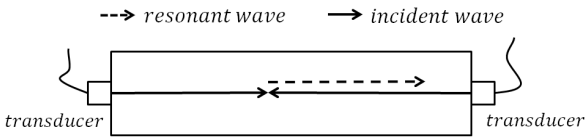


Fig. 1 Description of collinear bulk wave mixing technique

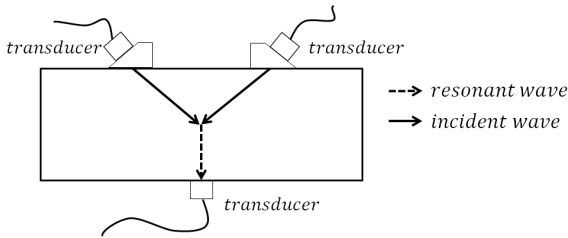


Fig. 2 Description of noncollinear bulk wave mixing technique

선형 체적파 혼합 기법(Nonlinear bulk wave mixing technique)이 있다. 초음파 혼합 기법은 1963년 Jones 등<sup>(6)</sup>의 논문에서 처음 거론 되었다. 이후 1-D 비선형 체적파 혼합 기법에 대한 연구가 이루어 졌다. 많은 논문들 중 하나인 Liu 등<sup>(7)</sup>의 논문은 Fig. 1과 같이 공선파 혼합(collinear wave mixing)으로 종파와 횡파를 일직선상에서 상호작용하여 발생된 혼합파를 활용하여 비선형 인자(nonlinear parameter)를 측정하였다. 2-D 비선형 체적파 혼합 기법의 경우, Croxford 등<sup>(8)</sup>의 논문은 Fig. 2와 같이 비공선파 혼합(noncollinear wave mixing)으로 이를 활용하여 소성 변형과 피로손상에 대한 결함에서 비선형 인자를 측정하는 실험을 수행하였다.

비선형 체적파 혼합 기법에 대한 이론부터 실험적인 검증까지 많은 연구가 이루어져 왔고 이를 이용한 비선형성 평가도 가능하다.<sup>(6-10)</sup> 그러나 체적파의 한계점을 그대로 가지고 있다. 그러므로 초음파 혼합 기법의 장점을 가지면서 비선형 체적파 혼합 기법의 탐상 영역 한계성을 극복해야 한다. 따라서 광범위한 영역을 진단하기 위해 램파 혼합 기법이 요구된다.

본 연구에서는 램파 혼합 기법에 대한 연구를 수행하였다. 비선형 체적파 혼합 기법의 선형연구를 토대로 램파(Lamb wave) 기법에 적용하였다. 적용된 램파 혼합(Lamb wave mixing) 기법으로 미세 결함의 검출 가능 여부를 판단하고, 기존의 램파 기법과 차이점에 대해 연구하였다. 이를 위해 결함이 없는 Al5052 평판과 국부적으로

부식된 Al5052 평판에서 실험을 수행하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 비선형 인자

비선형 초음파 평가하기 위해 임의의 주파수를 가지는 초음파가 입사되어 재료를 투과하게 된다. 이 과정에서 입사된 초음파는 재료의 비선형적 탄성특성에 의해 왜곡되고 2차고조파 성분이 발생된다. 기본 주파수 성분과 2차고조파 성분이 동시에 수신된다. 이러한 2차 고조파 성분은 재료의 미세구조 변화와 연관성을 지닌다. 이 연관성을 알기 위해 비선형 인자의 값을 구하는데 이 값은 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{A_2}{A_1^2} \frac{8}{k^2 x} \tag{1}$$

식 (1)은 체적파에 대한 비선형 인자 식이다. 여기서  $\beta$ 는 비선형 인자이고,  $A_1$ 은 기본 주파수 성분의 크기이며,  $A_2$ 는 2차 고조파 성분의 크기이다.  $x$ 는 전파거리,  $k$ 는 파수(wave number)이다. 실험에서 전파거리와 파수가 일정할 경우, 기본 주파수 성분 제곱과 2차 고조파 성분의 비율에 비례한다. 그러므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta \propto \beta' = \frac{A_2}{A_1^2} \tag{2}$$

따라서 식 (2)의 상대적인 비선형 인자  $\beta'$ 을 이용하여 재료의 미세구조 변화를 알 수 있다. 램파의 경우, 식 (1)과 유사하나 주파수에 대한 식이 추가로 곱해져 있다. 실험에서는 주파수 및 다른 변수들이 동일하므로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

### 2.2 램파 혼합 기법

램파는 면내변위(in-plane displacement)와 면외변위(out-of-plane displacement)의 조합으로 이루어져 있다.<sup>(11)</sup> 마찬가지로 램파 혼합도 동일한 조합으로 이루어져야 한다. 그리고 면내변위를  $u_1$ , 면외변위를  $u_3$ 라고 할 때, 램파는 주파수 및 모드에 따라  $u_1$ 과  $u_3$ 의 비율이 결정된다. 따라서 이러한 특성을 활용하기 위해 파형구조선도(wave structure)를 고려한다. 그리고 혼합파의 발생 조건과 비선형인자에 대한 비례식을 구하기 위해 비선형 체적파 혼합 기법에 대한 식을 활용하였다.

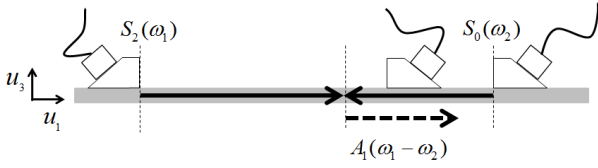


Fig. 3 Schematic of wave propagation

체적파 혼합의 식을 전개시키면 다음과 같다.(7)

$$U_1 = A \sin(k_1 x - \omega_1 t), V_1 = B \sin(k_2 x + \omega_2 t) \quad (3)$$

$$V_2 = C \sin((k_1 + k_2)x - (\omega_1 - \omega_2)t) \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{2} \beta_s AB \frac{\omega_2(c_2 \omega_1 + c_1 \omega_2)}{(c_1 + c_2)(c_2 \omega_1 + 2c_1 \omega_2 - c_1 \omega_1)} \quad (5)$$

$$(c_1 + c_2) = 0, (c_2 \omega_1 + 2c_1 \omega_2 - c_1 \omega_1) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{c_1 - c_2}{2c_1} \quad (7)$$

여기서,  $k$ 는 파수,  $\omega$ 는 각주파수(angular frequency),  $c$ 는 속도(velocity)이다. 그리고  $c_1 = c_l$ ,  $c_2 = c_s$ ,  $\omega_1 = \omega_l$ ,  $\omega_2 = \omega_s$ 를 나타내고, 종파가 횡파보다 빠르므로  $c_1 - c_2 > 0$ 이다.  $\beta_s$ 는 횡파 성분이 강한 비선형인자이고,  $A$ 와  $B$ ,  $C$ 는 임의의 진폭 값이다. 식 (3)의  $U_1$ 과  $V_1$ 는 Fig. 1과 같이 각각 좌측과 우측에서 발생하는 초음파에 대한 식이다. 식 (4)의  $V_2$ 는  $U_1$ 과  $V_1$ 에 의해 발생하는 혼합파에 대한 식이다. 그리고 식 (5)는 혼합파의 진폭 값에 대해 정리한 식이다. 식 (6)은 혼합된 신호의 진폭이 최대가 되기 위한 조건이다. 혼합파 진폭  $C$ 의 분모를 0에 가깝게 만들어 진폭 값이 무한대가 되어 신호 발생에 유리하도록 하였다. 식 (7)에 알루미늄의 종파( $c_1 = 6.36 \text{ mm}/\mu\text{s}$ )와 횡파( $c_2 = 3.01 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ) 속도를 각각을 대입하면,  $\omega_2/\omega_1 = 0.263$ 이다. 그러므로 다음과 같은 조건을 얻었다.

$$U_1(\omega_1) + V_1(0.263\omega_1) \Rightarrow V_2(0.737\omega_1) \quad (8)$$

체적파에 대한 조건식 (8)을 램파에 적용하여, 대칭모드에서 지배적인 면외변위와 면내변위를 혼합하여 파를 형성하려고 한다. 따라서 다음과 같은 조건을 얻을 수 있다.

$$S_2(\omega_1) + S_0(0.263\omega_1) \Rightarrow A_1(0.737\omega_1) \quad (9)$$

식 (9)의 주파수 비율 조건을 만족하는 동시에 파형구조선도를 고려하여  $S_2$ 와  $S_0$  모드의 주파수를 선정해야 한다. 파형구조선도의 방정식은 다음과 같다.(11)

Symmetric mode

$$|u_1| = k \cos(px_3) + \frac{2kq \sin(ph)}{(k^2 - q^2) \sin(qh)} \cos(qx_3) \quad (10)$$

$$|u_3| = -p \sin(px_3) + \frac{2k^2 p \sin(ph)}{(k^2 - q^2) \sin(qh)} \sin(qx_3) \quad (11)$$

Anti-symmetric mode

$$|u_1| = k \sin(px_3) + \frac{2kq \cos(ph)}{(k^2 - q^2) \cos(qh)} \sin(qx_3) \quad (12)$$

$$|u_3| = p \cos(px_3) - \frac{2k^2 p \cos(ph)}{(k^2 - q^2) \cos(qh)} \cos(qx_3) \quad (13)$$

그리고 재료의 미세구조 변화를 알기 위해 램파 혼합의 상대적인 비선형 인자를 구해야 한다. 앞서 언급한 것과 같이 실험에서는 주파수 및 다른 변수들이 동일하므로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 따라서 램파 혼합의 상대적인 비선형 인자는 식 (5)를 정리하여 다음과 같은 식을 도출할 수 있다.

$$\beta' \propto \frac{C}{AB} \quad (14)$$

여기서,  $\beta''$ 는 상대적인 비선형 혼합 인자(nonlinear mixing parameter)고,  $A$ 는  $S_0(0.263\omega_1)$ ,  $B$ 는  $S_2(\omega_1)$ , 그리고  $C$ 는  $A_1(0.737\omega_1)$  각각의 진폭 값이다.

### 3. 실험 구성

#### 3.1 주파수 선정

파형구조선도와 식 (9)의 주파수 비율을 만족하는 주파수 및 모드를 선정하였다. 서로 다른 대칭모드들로 혼합할 경우, 주파수×시편두께( $f \times d$ )의 값이  $S_0$  모드에서는 2이상  $S_2$  모드에서는 6.5 이상이어야만 주파수 비율과 지배적인 변위 조건이 성립함을 알 수 있다. 이에 만족하는 임의의 값을 선정한 결과, Fig. 4와 같이 파형구조선도를 구하였다.  $S_0(2.07\text{MHz})$ 는  $|u_3/u_1|=10.34$ 로  $u_3$ 가  $u_1$ 보다 크므로 지배적인 면외변위를 가지며,  $S_2(7.88\text{MHz})$ 는  $|u_3/u_1|=0.31$ 로  $u_1$ 이  $u_3$ 보다 크므로 지배적인 면내변위를 가진다.

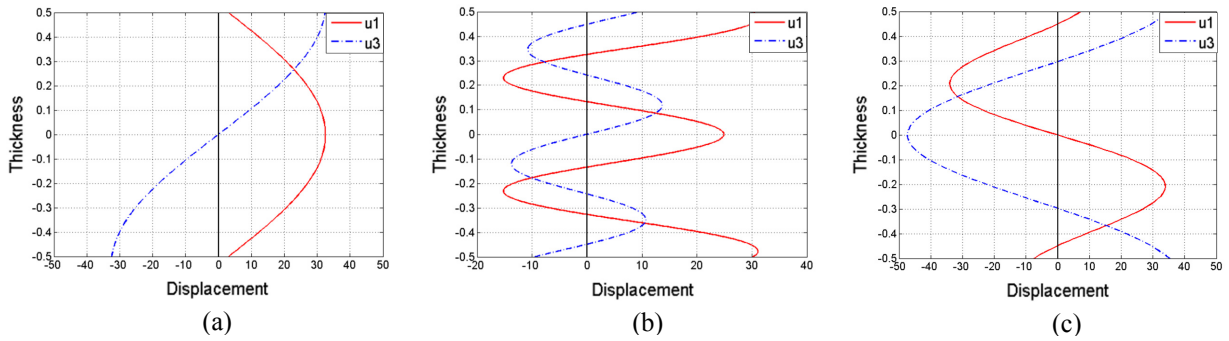


Fig. 4 Wave structure of modes satisfying frequency ratio and displacement condition : (a)  $S_0$  mode(2.07MHz), (b)  $S_2$  mode(7.88MHz), (c)  $A_1$  mode(5.81MHz)

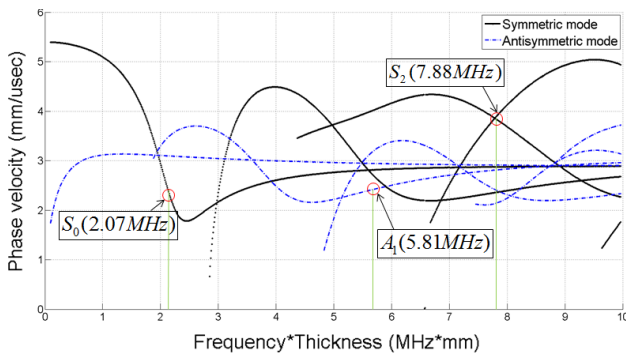


Fig. 5 Group velocity dispersion curves of Lamb wave in Al5052 ( $t=1\text{mm}$ )

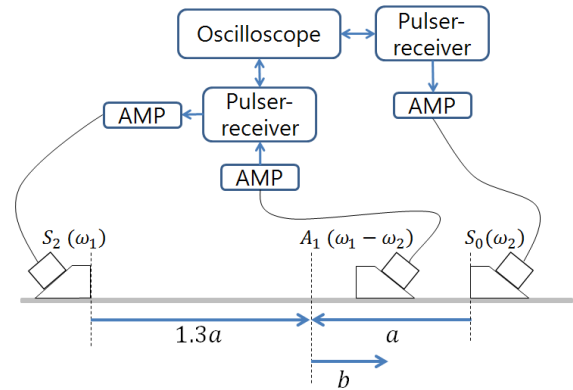


Fig. 6 Schematic of experimental setup

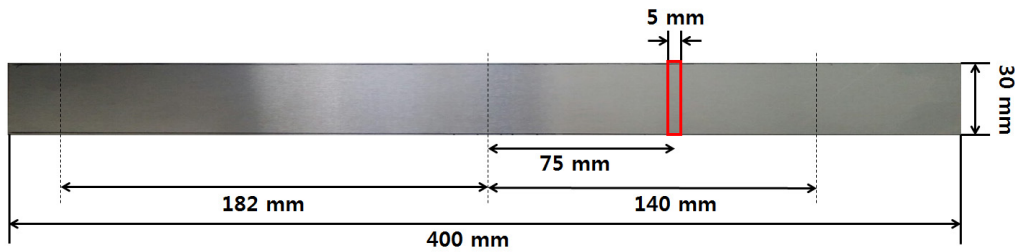


Fig. 7 Location of corrosion defect in Al5052( $t=1\text{mm}$ )

### 3.2 실험 방법 및 장비 구성

혼합파를 형성하기 위해 Fig. 5의 군속도(Group velocity)를 고려하여  $S_0$ (2.07MHz)와  $S_2$ (7.88MHz)가 같은 시간에 도달할 수 있도록 Fig. 6과 같이 거리 비율을 설정하였다. 실험 조건 및 장비 구성은 Fig. 6과 같고,  $a$ 는 140mm이고  $b$ 는 탐촉자 위치를 기준으로 55mm부터 5mm 간격으로 95mm까지의 범위를 가진다.

혼합되어 발생된  $A_1$ (5.81MHz)의 도달 시간과 웨지(wedge)의 지연 시간을 고려하여 거의 정확한 시간을 추정하였고, 혼합된 신호를 확인할 수

있었다. 따라서 누적효과(accumulated effect)를 활용하기 위해 5mm 간격으로 혼합된 신호를 수신하였다. 이에 비선형 인자의 경향성을 통해 결함 탐상 가능 여부를 판단하고자 실험을 수행하였다.<sup>(12~14)</sup>

### 3.3 시편

시편은 Al5052로 Fig. 7과 같이  $400 \times 30 \times 1\text{mm}$  크기의 알루미늄 합금 평판을 사용하여 실험을 수행하였다. Al5052의 특성은 내식성 및 해수에 대한 내성이 강한 금속으로 부식의 진행속도가

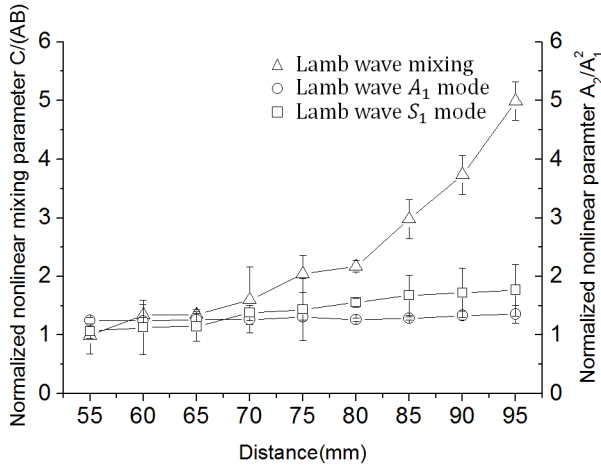


Fig. 8 Comparisons of nonlinear parameters between Lamb wave mixing and Lamb wave in Al5052 plate( $t=1\text{mm}$ )

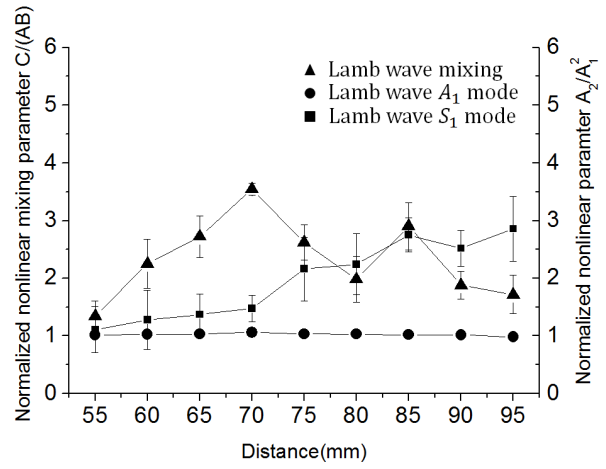


Fig. 9 Comparisons of nonlinear parameters between Lamb wave mixing and Lamb wave in corroded Al5052 plate( $t=1\text{mm}$ )

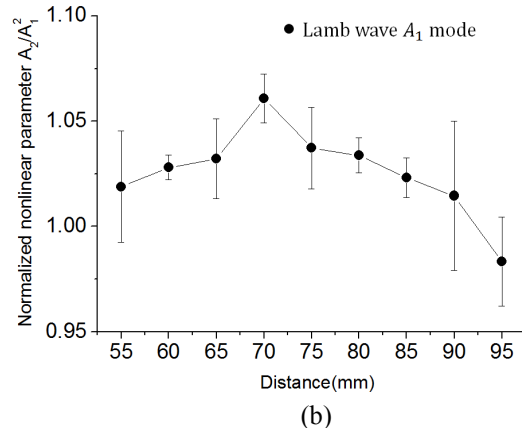
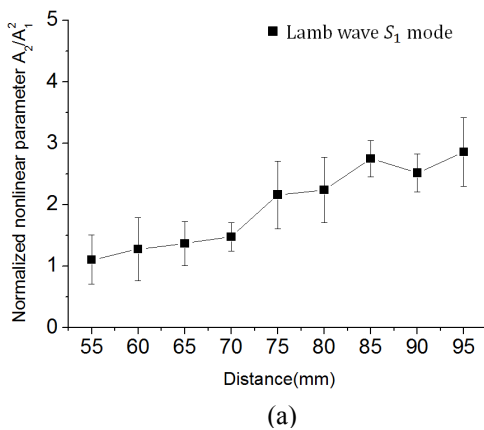


Fig. 10 Relationship between nonlinear parameter and distance in corroded Al5052 plate( $t=1\text{mm}$ ) : (a)  $S_1$  mode (3.5MHz), (b)  $A_1$  mode(4.45MHz)

느리다. 부식 진행속도가 느린 점을 이용하여, 3.5% 농도의 NaCl을 상온에서 10시간 노출시켜 표면 결함을 생성하였다. 표면 부식 결함 위치는  $b=75\text{mm}$  지점으로 크기는  $30 \times 5\text{mm}$ 이다.

#### 4. 실험 결과

비선형 초음파 기법 또는 모드에 따른 차이에 대해 중점적으로 연구를 수행하였다. 우선 램파 혼합 기법은  $S_1$ 모드와  $A_1$ 모드를 수신하였지만  $A_1$  모드만을 확인할 수 있었다. 이에 지배적인 면외 변위를 가지는  $A_1$ 모드가 맞는지에 대해 검증할 필요가 있다. 따라서 실험 대조군으로 램파 기법의 지배적인 면내변위를 가지는  $S_1(3.5\text{MHz})$ 모드와 지배적인 면외변위를 가지는  $A_1(4.45\text{MHz})$ 모드를 선정하였다. 그리고 식 (2)를 사용하여 거리에

따른 각각의 비선형 인자 값을 구하였다. 그 결과 Fig. 8에서 보는 것과 같이 비선형인자가 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. Fig. 8은 무결함 시편에서 램파 혼합 기법과 기존의 램파 기법에 대해 비교한 실험 결과이다. 램파 혼합 기법은 식 (14)를 적용하여 비선형 혼합 인자를 구하였다. 그 결과 기존의 램파 기법과 동일하게 거리에 따라 비선형 인자가 선형적으로 증가하는 경향성을 보였다. 이 결과를 통해 램파 혼합 기법에서도 누적효과가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 세로축을 동일한 크기로 설정한 Fig. 8에서 보는 것과 같이 램파 혼합 기법이 램파 기법보다 상대적으로 기울기가 큰 것을 볼 수 있다. 기존의 램파 기법의 경우, 상대적으로 거리에 따른 비선형 인자의 변화폭을 관찰하기 어려울 정도로 작다. 그러나 램파 혼합 기법은 변화

폭이 크기 때문에 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 이를 통해 램과 혼합 기법이 램과 기법보다 상대적으로 비선형 인자의 변화폭을 통한 비선형 진단에 있어서는 더 우수한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 바탕으로  $A_1(5.81\text{MHz})$ 는 재료 내부에서 발생하므로 시스템 비선형성의 영향을 줄임으로써 보다 신뢰성 있는 검출이 가능하다고 판단된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 3.5% NaCl을 사용하여 표면 부식 결함 시편에서 실험한 결과이다.  $S_1$ 모드는 재료 내부에 위치한 결함에 민감하고,  $A_1$ 모드는 재료의 표면 결함에 민감하다. 따라서  $A_1$ 모드로 결함의 유무와 위치 파악할 수 있지만  $S_1$ 모드는 어려울 것으로 예측된다. 그 결과, Fig. 10과 같이 램과 기법의  $S_1$ 모드는 비선형 인자가 거리에 따라 선형적으로 증가하는 경향만을 보여 결함 검출이 어려운 것으로 확인되었다. 반면에, 램과 기법의  $A_1$ 모드는 부식 결함에 영향을 받아 75mm부터 감소하는 경향을 보여 검출이 가능했다. 그리고 램과 혼합 기법의 경우, Fig. 10-(b)의 램과  $A_1$ 모드의 경향성과 유사한 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 결함 검출이 가능하다는 것을 알 수 있었고,  $S_0$ 모드와  $S_2$ 모드를 가진시켜 생성된 혼합파가 정확히  $A_1$ 모드로 나온 것을 알 수 있었다. 그리고 결함 검출 성능은 비선형 초음파 기법의 차이가 아닌, 면외변위 또는 면내변위의 성분 비율에 따라 결정된다. 예를 들어,  $A_1(4.45\text{MHz})$ 로 면외변위가 면내변위보다 크다면 표면에서 민감도가 뛰어나다. 따라서 표면의 결함에서는 면외변위 성분이 강한  $A_1(4.45\text{MHz})$ 가  $S_1(3.5\text{MHz})$ 보다 상대적으로 높은 민감도를 가진다.

## 5. 결론

본 연구에서는 램과 혼합 기법 이론의 실험적 검증과 결함 탐상 가능 여부, 그리고 기존의 램과 기법과의 차이점에 관해 연구를 수행하였다.

주파수 비율과 파형구조선도 조건을 만족하는 주파수 및 모드를 결정할 때 한정적으로 선정되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 오직 이 두 조건을 충족시킬 때 혼합파를 얻을 수 있었다. 램과 혼합 기법으로도 결함 검출이 가능하였고, 기존의 램과 유사한 경향성을 나타내고 있다. 이를 기반으로 혼합파의 생성과 결함 탐상이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 8과

같이 세로축을 동일하게 할 경우 램과 혼합 기법은 변화폭이 크기 때문에 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 이를 통해 램과 혼합 기법이 램과 기법보다 상대적으로 비선형 인자의 변화폭을 통한 비선형 진단에 있어서는 더 우수한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 기존의 비선형 진단 기법과는 다르게 시편 내부에서 생성되어 장비에 의해 발생하는 시스템 비선형성을 줄일 수 있기 때문이다. 그리고 램과의  $S_1$ 모드는 결함 검출이 안 되었던 반면에,  $A_1$ 모드로는 검출이 가능하였다. 이를 근거로 모드 및 주파수에 의해 결함 검출 성능이 결정된다고 생각할 수 있다. 그러나 정확히 말하자면 각 모드 및 주파수에 따라 면내변위와 면외변위의 비율이 다르기 때문에 변위에 의해 결정된다고 할 수 있다. 따라서 결함 검출 성능은 측정 방법 및 단순 모드 선정에 따라 결정되는 것이 아니라 변위 비율에 따라 민감도가 결정된다.

두 조건을 만족하는 주파수 및 모드 선정이 한정적이지만, 다른 모드 및 주파수로 선정하여 가진시키면 재료의 내부 및 표면의 결함을 탐상하기에는 충분하다고 판단된다. 또한 기존의 램과 기법과는 달리 각 모드 및 주파수에 따라 속도가 다른 점을 활용하여 혼합되는 위치를 조절할 수 있다. 따라서 접근이 어려운 구역을 탐상할 때, 혼합되는 위치를 조절하여 탐상 하고자하는 위치로부터 혼합된 신호를 일정한 간격으로 수신할 수 있다. 그리고 수신한 자료를 토대로 분석하여 미세 결함의 유무와 위치를 파악할 수 있다는 가능성을 가지고 있다. 위 연구는 초기단계의 연구로 무수한 결함 중 하나이고 앞으로 보다 다양한 경우의 실험이 필요하다.

## 후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구사업임. (NRF-2015M2A2A9067474)

## 참고문헌 (References)

- (1) Bermes, C., Kim, J. Y., Qu, J. and Jacobs, L. J., 2008, "Nonlinear Lamb Waves for the Detection of Material Nonlinearity," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, No. 3, pp. 638~646.

- (2) Jhang, K. Y., 2009, "Nonlinear Ultrasonic Techniques for Nondestructive Assessment of Micro Damage in Material: a Review," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 123~135.
- (3) Yost, W. T. and Cantrell, J. H., 1990, "Materials Characterization Using Acoustic Nonlinearity Parameters and Harmonic Generation: Engineering Materials," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 9, pp. 1669~1676.
- (4) Li, W., Lee, J. and Cho, Y., 2010, "Study of Ultrasonic Nonlinearity in Heat-treated Material," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 6, pp. 751~756.
- (5) Kim, G. J., Jang, G. Y. and Hisashi, Y., 2001, "The Evaluation of Partially Degraded Material using Nonlinear Propagation Characteristics of Ultrasonic Wave," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 25, No. 2, pp. 214~219.
- (6) Lee, J. G. and Kobett, D. R., 1963, "Interaction of Elastic Waves in an Isotropic Solid," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 35, No. 1, pp. 5~10.
- (7) Liu, M., Tang, G., Jacobs, L. J. and Qu, J., 2011, "Measuring Acoustic Nonlinearity by Collinear Mixing Waves," *AIP Conference Publishing*, Vol. 1335, No. 1, pp. 322~329.
- (8) Croxford, A. J., Wilcox, P. D., Drinkwater, B. W., Nagy, P. B., 2009, "The Use of Non-collinear Mixing for Nonlinear Ultrasonic Detection of Plasticity and Fatigue," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 126, No. 5, pp. EL117~EL122.
- (9) Liu, M., Tang, G., Jacobs, L. J., Qu, J., Thompson, D. O. and Chimenti, D. E., 2012, "A Nonlinear Wave Mixing Method for Detecting Alkali-Silica Reactivity of Aggregates," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1430, No. 1, pp. 1524~1531.
- (10) Jingpin, J., Junjun, S., Guanghai, L., Bin, W. and Cunfu, H., 2015, "Evaluation of the Intergranular Corrosion in Austenitic Stainless Steel Using Collinear Wave Mixing Method," *NDT & E International*, Vol. 69, pp. 1~8.
- (11) Rose, J. L., 2004, *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 101~119.
- (12) Bermes, C., Kim, J. Y., Qu, J. and Jacobs, L. J., 2007, "Experimental Characterization of Material Non-linearity Using Lamb Waves," *Applied Physics Letters*, Vol. 90, No. 2, pp. 021901~021901~3.
- (13) Matsuda, N. and Biwa, S., 2011, "Phase and Group Velocity Matching for Cumulative Harmonic Generation in Lamb Waves," *Journal of Applied Physics*, Vol. 109, No. 9, pp. 094903~094903~11.
- (14) Deng, M., Wang, P. and Lv, X., 2005, "Experimental Observation of Cumulative Second-harmonic Generation of Lamb-wave Propagation in an Elastic Plate," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 38, No. 2, p. 344.