

단면 겹치기 접착 조인트에 존재하는 비대칭 결함 탐지를 위한 탄성과 유한요소 시뮬레이션

우진호* · 나원배*

*부경대학교 해양공학과

Finite Element Simulation of Elastic Waves for Detecting Anti-symmetric Damages in Adhesively-Bonded Single Lap Joint

Jinho Woo* and Won-Bae Na*

*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Finite element simulation 유한요소 시뮬레이션, Elastic waves 탄성파, Anti-symmetric damages 비대칭 결함, Adhesively-bonded single lap joint 단면 겹치기 접착 조인트

ABSTRACT: This study presents a finite element simulation of elastic waves for detecting anti-symmetric damages in an adhesively-bonded single lap joint. Plane strain elements were used for modeling adherents (aluminum) and adhesives (epoxy). Three types of damage were introduced: thickness reduction, elasticity deterioration, and voids in the adhesive layers, and two excitation and reception arrangements (ER1 and ER2) were used to investigate the detectability of the damage. The simulation showed that symmetrically located damage, such as a thickness reduction, can be detected by one excitation and one reception arrangement (ER1) and anti-symmetric damages, such as elasticity deterioration and voids, can be detected by modified two-point elastic wave excitation (ER2). Compared with the ER1 arrangement, the ER2 arrangement does not require a baseline signal for damage detection; hence, an efficient method of anti-symmetric damage detection in an adhesively-bonded single lap joint is proposed.

1. 서 론

접착 조인트는 우주항공, 자동차, 조선 그리고 토목 분야의 구조형식에 빈번히 사용되고 있다. 기계적인 이음과 비교한다면 접착 조인트는 응력집중 원인이 적고, 등분포 하중이 재하되며, 피로 대응 능력도 탁월하다(Goncalves et al., 2002). 따라서 접착 조인트의 이용이 점차적으로 확대되었고, 자연히 접착 조인트의 보다 완전한 구조설계와 무결함 제작이 요구되어 졌다. 접착 조인트의 구조설계분야에서는 새로운 형식의 접착 조인트의 개발, 기존 접착 조인트의 엄밀한 해석 등으로 연구가 진행되어 왔는데, 다수의 연구자들은 개발과 해석에 유한요소법을 사용해 왔다(Wooley and Carver, 1971; Carpenter and Barsoum, 1989; Richardson et al., 1993; Li and Lee-Sullivan, 2001; Andruet et al., 2001; Goncalves et al., 2002; Avila and Bueno, 2004). 기존 접착 조인트의 엄밀한 해석에 관한 예로서 Goncalves et al.(2002)은 단면 겹치기 접착 조인트(Adhesively-bonded single lap joint)의 응력해석을 위한 3차원 유한요소모델을 개발하고, 피접합물(Adherend)과 접착제(Adhesive) 경계의 응력을 계산하여 선형탄성과 탄소성 재료거동을 분석하였다.

새로운 형식의 접착 조인트 개발 예로서 Avila and Bueno (2004)는 파형 겹치기 접착 조인트(Wavy-lap bonded joint)의 응력해석을 유한요소법으로 수행하였다. Zeng and Sun(2001)에 따르면 파형 겹치기 조인트는 단면 겹치기 조인트에서 발생하는 편심하중을 피할 수 있으며, 겹치기 부분의 끝단에서 압축응력을 발생시킬 수 있다. 따라서 압축응력의 발생으로 겹치기 부분에 발생하는 수직인장응력에 의한 접착제의 벗겨 떨어짐(Peel)을 완화시켜 조인트가 보다 큰 하중을 지지하게 해준다(Tong and Steven, 1999).

아울러, 접착 조인트의 무결함 제작과 관련하여 다수의 연구자들이 접착층에 존재하는 결함검출에 관한 연구를 수행하였다(Rose et al., 1995; Deng et al., 2004; Pandurangan and Buckner, 2006; Puthillath et al., 2009). 이들 연구자들이 비파괴 검사에 사용한 물리적 인자는 유도초음파(Guided ultrasonic waves)와 진동(Vibration)이며 수신된 신호의 특징을 분석하여 결함을 검출하였다. 이들은 무결함 상태의 수신 신호를 기준으로 결함상태의 수신신호를 비교 분석하여 결함상태를 평가하는 일종의 기준기반(Baseline-based) 방법을 사용하였다. 이 방법은 기준 신호의 정보가 없는 경우에 사용할 수 없다는 단점이 있

다. 따라서 최근 결함검출에 무결함 상태의 기준 신호가 필요 없는(Baseline-free) 방법들이 제안되었다(Kim and Sohn, 2006; Kim et al., 2008). Kim과 Sohn(2006)은 유도초음파의 일종인 판파(Plate wave)의 모드(Modes) 중 기본모드의 모드변환을 이용하여 강구조에 존재하는 결함을 검출하는 방법을 제안하였는데, 제안된 방법으로 얇은 판의 양면에 부착된 압전소자를 통하여 균열손상에 의한 신호를 선택적으로 감지해 내었다. Kim et al. (2008)은 이점 탄성과 가진법(Two-point elastic wave excitation method)를 제안하였는데 이 방법은 위상이 다른 두 탄성파를 가진하여 무결함 상태에서는 수신신호가 없게 만듦으로써 결함 상태의 신호를 구별하게 하였다. 이들 방법은 강판 또는 콘크리트 슬래브와 같은 대칭성이 강한 구조물에 적용되었으며, 단면 겹치기 접착 조인트와 같은 대칭성이 다소 부족한 구조물에 적용되지는 않았다.

본 연구는 Kim et al.(2008)이 제안한 이점 탄성과 가진법을 근간으로 단면 겹치기 접착 조인트의 접착부에 존재할 수 있는 결함들을 기준 신호 필요 없이 검출할 수 있는 방법을 제안하고, 이 방법의 적합성을 유한요소법에 의한 수치시뮬레이션으로 검증하고자 한다. 이를 위해 가진점(Excitation point)과 수신점(Receiving point)의 위치선정, 유한요소 모델링, 수신신호의 해석을 제시하고 접착제의 두께변화, 탄성계수 변화, 그리고 접착부 내부에 존재하는 공극(Void)을 검출하고자 한다.

2. 유한요소 해석

Fig. 1은 단면 겹치기 접착 조인트의 기하학적 형상 및 규격 인자를 나타내고 있다. 본 연구에서 피접합물의 길이 h 와 높이 s 는 각각 100mm와 10mm이며, 접합체의 길이 u 와 두께 t 는 각각 50mm와 1mm이다. 해석 프로그램은 범용 유한요소프로그램인 ANSYS LS-DYNA를 사용하였고 4절점 직사각형 모양의 평면변형요소(Plane strain element)로 모델링하여 외적동적 해석(Explicit dynamic analysis)을 수행하였다.

탄성과 전파를 유한요소해석으로 시뮬레이션하기 위해서는 요소크기(Element size) 및 시간증분(Time increment) 선정이 수치결과의 안정성 확보에 매우 중요한다. 본 연구에서는 Woo et al.(2007)이 제시한 세 가지 조건식을 만족하도록 요소크기와 시간증분을 각각 1mm 이하와 $1.19E-7$ sec으로 결정하였다. 피접합물은 알루미늄(Aluminum)으로 접착제는 에폭시(Epoxy)로 가정하였으며 이들 재료의 성질은 Table 1과 같다.

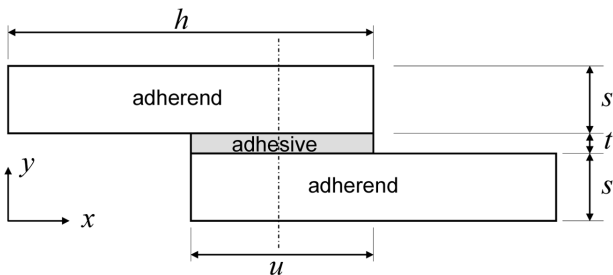


Fig. 1 Geometry of adhesively-bonded single lap joint

Table 1 Material properties of the aluminum and epoxy

	Aluminum	Epoxy
Density (kg/m ³)	2700	1170
Young's modulus (GPa)	70.785	3.999
Poisson ratio	0.337	0.390
Longitudinal velocity (m/sec)	6320	2611
Shear velocity (m/sec)	3130	1109

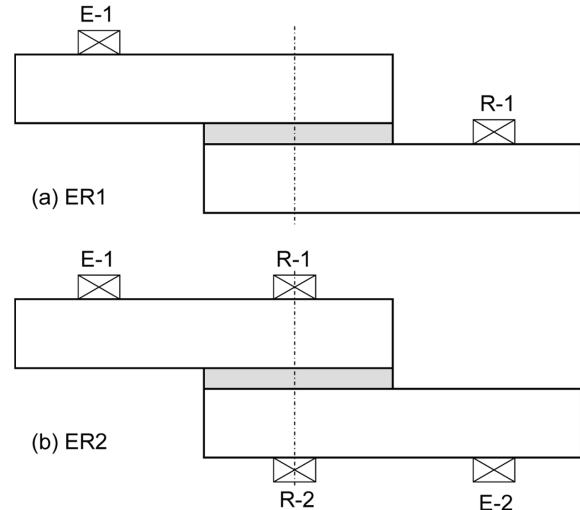


Fig. 2 Excitation-reception arrangements: (a) ER1 and (b) ER2

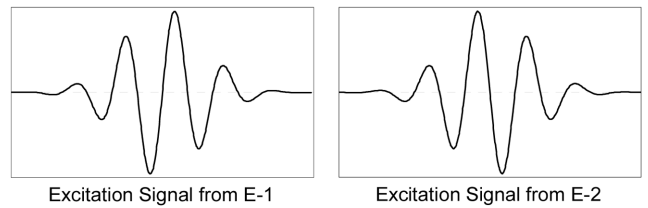


Fig. 3 Excitation signals from transmitter 1 (E-1) and transmitter 2 (E-2)

Fig. 2는 가진기와 수신기의 배열을 나타내는데 Fig. 2(a)의 ER1은 가진기(E-1)와 수신기(R-1)를 각각 하나씩 사용하는 배열이며, Fig. 2(b)의 ER2는 가진기(E-1, E-2)와 수신기(R-1, R-2)를 각각 두 개씩 사용하는 배열이다. ER2의 경우 E-1에서의 가진 신호와 E-2에서의 가진신호의 위상이 180° 다른데 이들 신호를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 가진 신호는 Tone-burst Gaussian 신호이며 지속시간은 1.5msec이고 파 주파수는 50kHz이다.

ER1은 ER2에 비해 간단한 배열이지만 본 연구가 지향하고 있는 기준 신호 필요 없이 결함을 검출할 수 없는 배열이다. 반면에 ER2는 E-1에서 가진된 신호와 E-2에서 가진된 신호를 합치면 영의 상태가 되고 무결함 상태에서 R-1과 R-2에서 수신된 신호를 합치게 되면 영의 상태가 되는 배열이다. 여기에서 주목해야 할 것은 결함이 반드시 중앙선에 대해 비대칭이어야 R-1과 R-2의 합이 영이 된다는 점이다. 만일 결함이 접착부에 균질하게 분포하게 되거나 중앙선에 대해 대칭으로 존재하게 되면 R-1과 R-2의 합은 영이 되지 않는다. 이 경우에는 (1) ER1을 사

Table 2 Damage types in the adhesive

Type A	Variation in the thickness 0.8 mm, 0.6 mm, 0.4 mm
Type B	Variation in Young's modulus $E = 1.999 \text{ GPa}$
Type C	Variation in Young's modulus and density $E = 1.0E-6 \text{ GPa}$, Density = 1 kg/m^3

2001	....	2025	2026	....	2050
2051	....	2075	2076	....	2100
2101	....	2125	2126	....	2150

Fig. 4 Elements numbering of the adhesive area

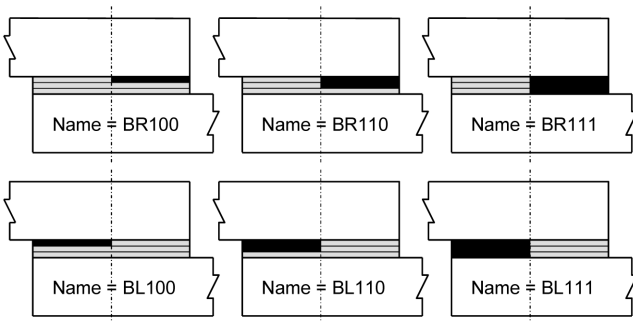


Fig. 5 B-type multiple damage cases of BR100, BR110, BR111, BL100, BL110, and BL111

용하거나, (2) ER2에서 R-1과 R-2의 신호를 합하지 않고 R-1 또는 R-2에서 수신된 신호를 분석해야 할 것이다. 상기에서 서술된 내용은 3장의 해석결과에서 자세히 설명될 것이다.

제안된 ER1과 ER2의 결합검출 여부를 판단하기 위해서 접착부의 결합 형식을 Table 2와 같이 결정하였다. A결합은 접착부의 두께 변화에 관한 것으로서 1mm의 두께를 0.8mm, 0.6mm, 0.4mm로 변화시킨 경우이다. B결합은 접착부의 열화에 의한 탄성계수의 변화를 나타낸 것이고, C결합은 접착부의 일부에 공극이 존재하는 경우이다. 이들 형식을 설명하기 위해서 접착부의 요소배열을 Fig. 4에 나타내었다. 접착부는 3층으로 구성되었으며 상층은 요소 2001번에서 2050번까지, 중간층은 2051번에서 2100번까지, 하층은 요소 2101번에서 2150번까지이다.

B결합은 중앙선을 중심으로 오른쪽과 왼쪽에 존재하는 비대칭 결합을 의미하며, Fig. 5와 Fig. 6에 이들 비대칭 결합을 나타내었다. 여기서 BR과 BL에서 B는 결합 형식을 R과 L은 오른쪽과 왼쪽을 의미하며, 세 자리 숫자(100, 110, 111, 등)에서 첫 번째 숫자는 상층을 두 번째 숫자는 중간층을 세 번째 숫자는 하층을 각각 의미하는데 숫자가 1이면 결합이 존재하고 0이면 결합이 존재하지 않음을 나타낸다. 예를 들면 BR100은 B결합이 오른쪽(R) 상층에 존재함을 의미한다.

C결합 또한 중앙선을 중심으로 오른쪽과 왼쪽에 존재하는 비

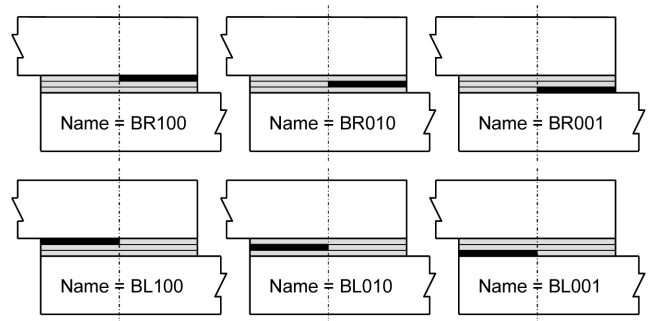


Fig. 6 B-type single damage cases of BR100, BR010, BR001, BL100, BL010, and BL001

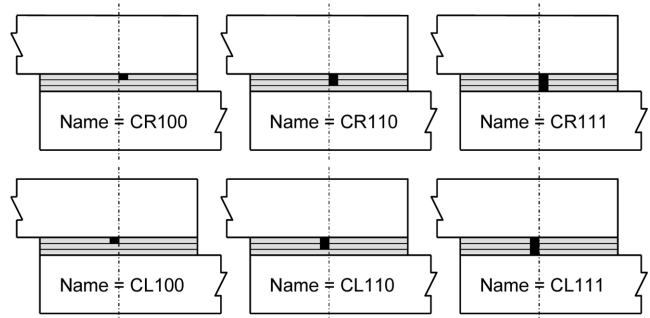


Fig. 7 C-type multiple damage cases of CR100, CR110, CR111, CL100, CL110, and CL111

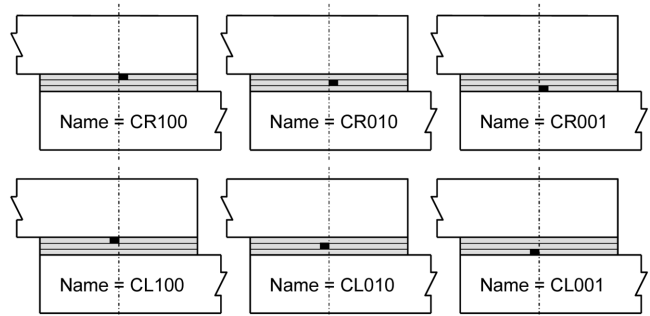


Fig. 8 C-type single damage cases of CR100, CR010, CR001, CL100, CL010, and CL001

대칭 결합을 의미하며, Fig. 7와 Fig. 8에 이들 비대칭 결합을 나타내었다. 여기서 CR과 CL에서 C는 결합 형식을 의미하며, 나머지 기호는 B결합의 경우와 동일하다. B결합의 경우 결합이 지정된 방향(오른쪽 또는 왼쪽)과 층(상층, 중간층, 하층)의 모든 요소에 존재하는데 반해 C결합의 경우는 결합이 지정된 방향과 층의 세 요소에 국한된다. 예를 들면 CR100은 요소 2026, 2027, 2028에, CR010은 요소 2076, 2077, 2078에, CR001은 요소 2126, 2127, 2128에 결합이 존재한다. 또한 CL100은 요소 2023, 2024, 2025에, CL010은 요소 2073, 2074, 2075에, CL001은 요소 2123, 2124, 2125에 결합이 존재한다. 즉, C결합은 한 층 50개의 요소 중에 3개의 요소로 공극을 시뮬레이션 한 것이다.

Table 2와 Figs. 5, 6, 7, 8에 설명된 결합을 요약하면 A결합은

세 가지 두께 변화를, B결함은 탄성계수 변화의 여섯 가지 경우를, C결함은 탄성계수 및 질량밀도 변화의 여섯 가지 경우를 나타낸다.

3. 해석 결과

우선 ER1 배열을 사용하여 획득한 수신 신호를 Figs. 9~17에 나타내었다. Fig. 2(a)와 Fig. 3에서 설명한 것처럼 E-1에서 신호를 가진하고 R-1에서 수신하였다. Fig. 9는 접착부의 두께 변화에 따른 수신 신호의 차이점을 나타낸다. Baseline은 원래의 두께 1.0mm를 모델에 사용하였을 때의 결과인데 두께가 얇아질

수록 진폭이 작아짐을 알 수 있다. Figs. 10과 11은 B결함 중 결함이 점차적으로 커질 때의 결과이다. 결함이 커질수록 진폭이 작아지고 신호가 오른쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다.

Figs. 12와 13은 B결함 중 동일한 크기의 결함이 위치가 다른 경우의 결과이다. 진폭의 변화로부터 수신 신호를 뚜렷하게 구별할 수 없는 것을 알 수 있다.

Figs. 14과 15는 C결함 중 결함이 점차적으로 커질 때의 결과이다. 뚜렷하게 결함의 정도를 구별할 수 없는 것을 알 수 있다. 주목할 것은 Fig. 14의 CR11과 Fig. 15의 CL11의 수신 신호가 영이라는 것이다. 이것은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 공극을 모델한 CR11과 CL11이 접착부를 관통함으로써 짧은 가진 신

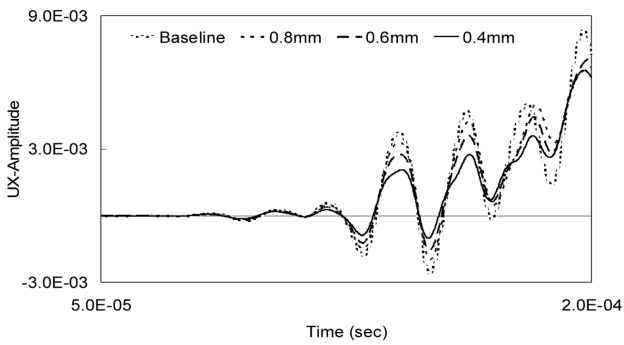


Fig. 9 Received displacement signals in the A-type damage cases of 0.8, 0.6, and 0.4 mm using ER1

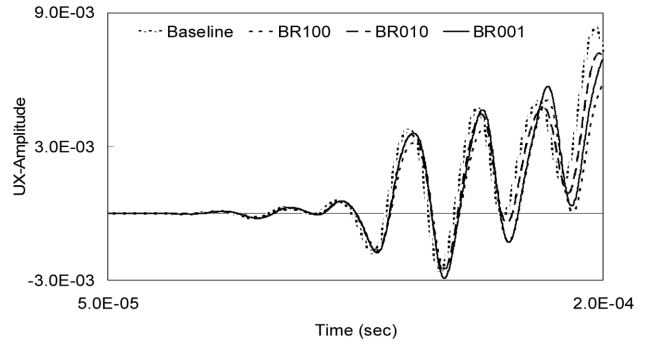


Fig. 12 Received displacement signals in the B-type single damage cases of BR100, BR010, and BR001 using ER1

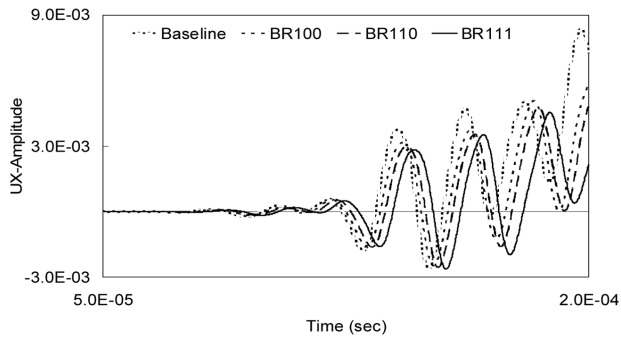


Fig. 10 Received displacement signals in the B-type multiple damage cases of BR100, BR110, and BR111 using ER1

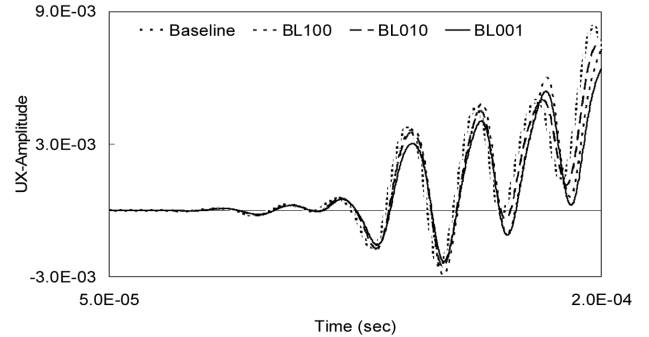


Fig. 13 Received displacement signals in the B-type single damage cases of BL100, BL010, and BL001 using ER1

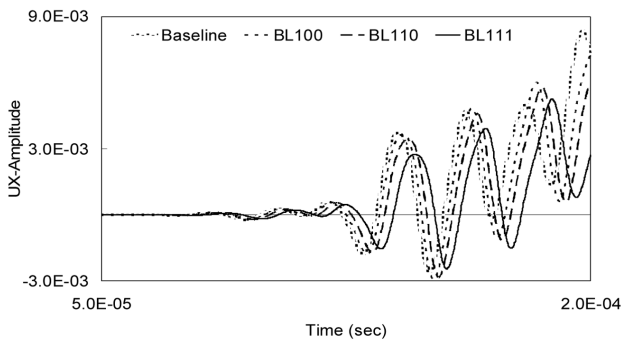


Fig. 11 Received displacement signals in the B-type multiple damage cases of BL100, BL110, and BL111 using ER1

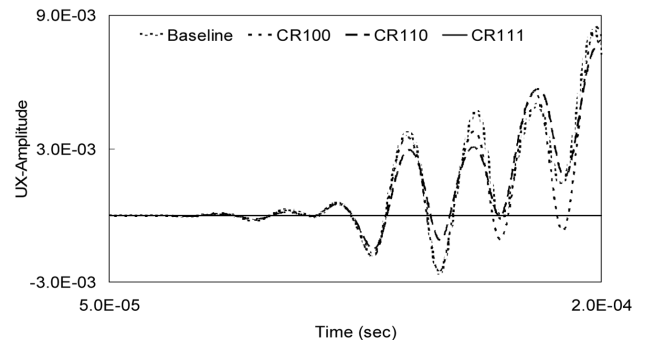


Fig. 14 Received displacement signals in the C-type multiple damage cases of CR100, CR110, and CR111 using ER1

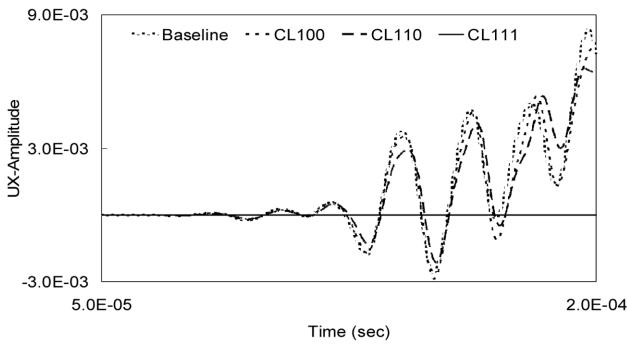


Fig. 15 Received displacement signals in the C-type multiple damage cases of CL100, CL110, and CL111 using ER1

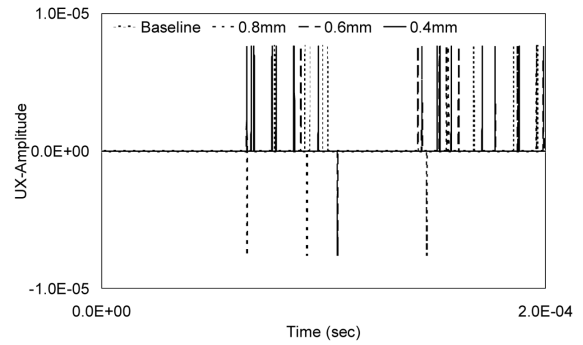


Fig. 18 Received displacement signals in the A-type single damage cases of 0.8, 0.6, and 0.4mm using ER2

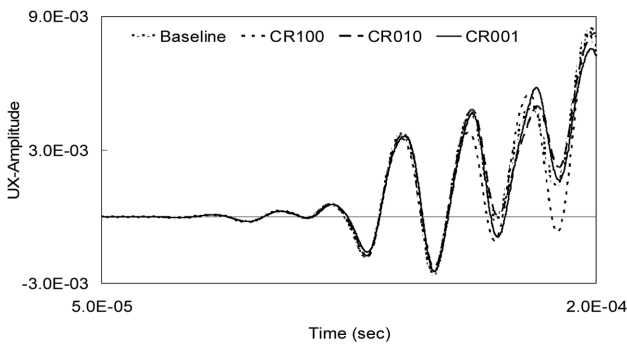


Fig. 16 Received displacement signals in the C-type single damage cases of CR100, CR010, and CR001 using ER1

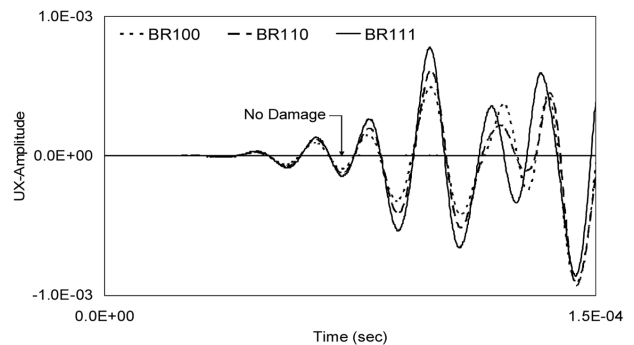


Fig. 19 Received displacement signals in the B-type multiple damage cases of BR100, BR110, and BR111 using ER2

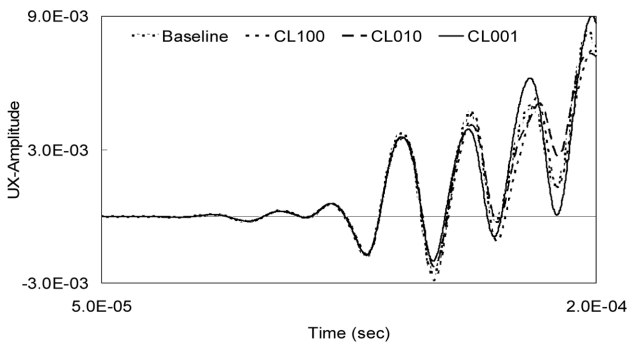


Fig. 17 Received displacement signals in the C-type single damage cases of CL100, CL010, and CL001 using ER1

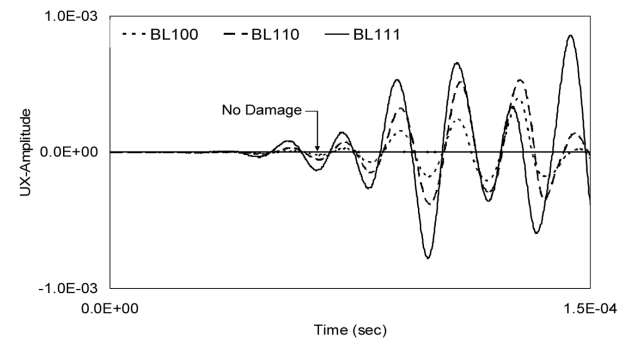


Fig. 20 Received displacement signals in the B-type multiple damage cases of BL100, BL110, and BL111 using ER2

호가 수신기에 도달하지 못함을 의미한다.

Figs. 16과 17은 C결함 중 동일한 크기의 결함이 위치가 다른 경우의 결과이다. 진폭의 변화로부터 결함의 위치를 뚜렷하게 구별할 수 없는 것을 알 수 있다.

다음으로 ER2 배열을 사용하여 획득한 수신 신호를 Figs. 18~26에 각각 나타내었다. Fig. 2(b)와 Fig. 3에서 설명한 것처럼 E-1과 E-2에서 위상이 다른 신호를 가진하고 R-1과 R-2에서 수신한 후 이들 수신신호를 합하여 그림으로 나타내었다. 예견한 바와 같이 접착부의 두께 변화에 따른 수신 신호를 나타낸 Fig. 18에서 신호가 영에 근접함을 알 수 있다. 즉 ER2배열로는 두

께변화를 감지할 수 없다. Figs. 19와 20은 B결함 중 결함이 점차적으로 커질 때의 결과이다. 결함이 커질수록 진폭이 커지는 것을 알 수 있다. 여기에서 주목해야 할 것은 ER2배열의 특성상 결함이 없는 경우에는 수신 신호가 영이다. 따라서 결함 발생 상태를 정확히 구별할 수 있다.

Figs. 21과 22는 B결함 중 동일한 크기의 결함이 위치가 다른 경우이다. BR의 경우(Fig. 21)에는 상층에 결함이 존재하는 경우(BR100)가 중간층(BR010)과 하층(BR001)에 결함이 존재하는 경우보다 큰 진폭을 나타낸다. 반면에 BL의 경우(Fig. 22)에는 하층에 결함이 존재하는 경우(BL001)가 중간층(BL010)과 하층

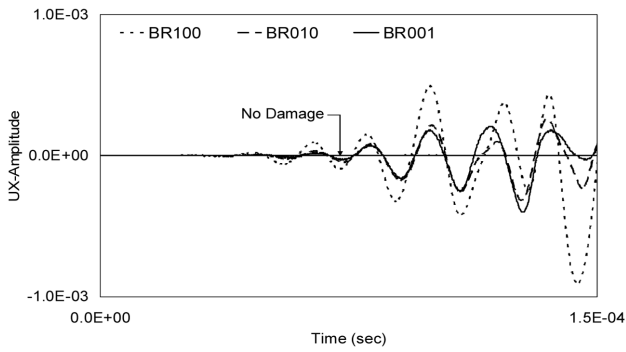


Fig. 21 Received displacement signals in the B-type single damage cases of BR100, BR010, and BR001 using ER2

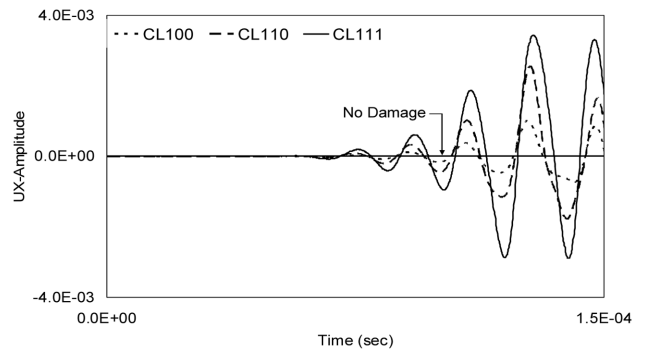


Fig. 24 Received displacement signals in the C-type multiple damage cases of CL100, CL110, and CL111 using ER2

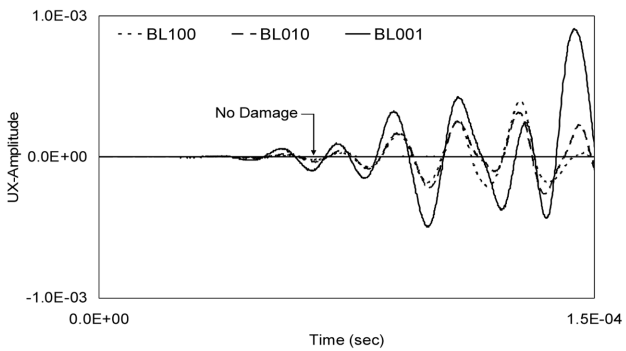


Fig. 22 Received displacement signals in the B-type single damage cases of BL100, BL010, and BL001 using ER2

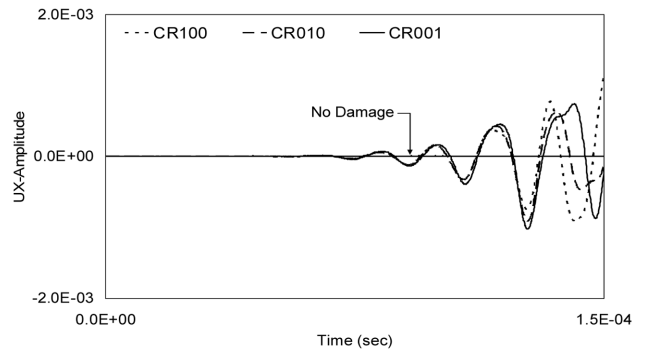


Fig. 25 Received displacement signals in the C-type single damage cases of CR100, CR010 and CR001 using ER2

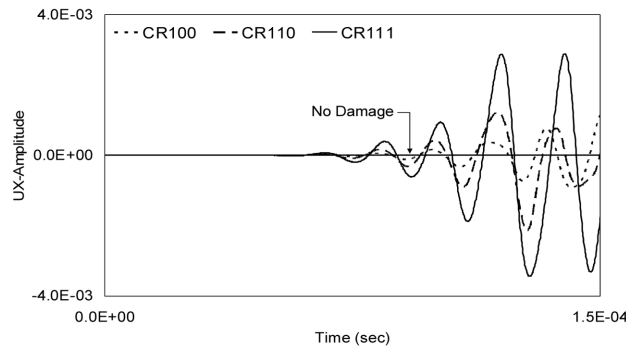


Fig. 23 Received displacement signals in the C-type multiple damage cases of CR100, CR110 and CR111 using ER2

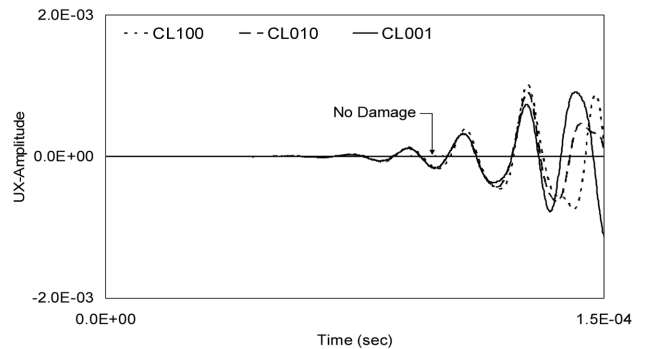


Fig. 26 Received displacement signals in the C-type single damage cases of CL100, CL010, and CL001 using ER2

(BL001)에 결함이 존재하는 경우보다 큰 진폭을 나타낸다. 여기에서 주목해야 할 것은 BR100과 BL010은 종축(시간축)을 중심으로 서로 대칭이며, BR010과 BL010 그리고 BR001과 BL100 또한 시간축을 중심으로 서로 대칭임을 알 수 있다. 이 결과는 ER2배열 특성과 결함위치에 기인한다.

Figs. 23와 24는 C결함 중 결함이 점차적으로 커질 때의 결과이다. 결함이 커질수록 진폭이 커지는 것을 알 수 있다.

Figs. 25와 26은 C결함 중 동일한 크기의 결함이 위치가 다른 경우의 결과이다. 신호의 처음 몇 봉우리에서는 결함을 구별하기 어려우나 세 번째 봉우리부터 CR의 경우(Fig. 25)에는 하층

에 결함이 존재하는 경우(CR001)가 중간층(CR010)과 상층(CR100)에 결함이 존재하는 경우보다 큰 진폭을 나타낸다. 반면에 CL의 경우(Fig. 26)에는 상층에 결함이 존재하는 경우(CL100)가 중간층(CL010)과 하층(CL001)에 결함이 존재하는 경우보다 큰 진폭을 나타낸다. 또한 C결함의 경우에도 B결함과 동일하게 종축(시간축)에 관한 대칭 현상을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 단면 겹치기 접착 조인트의 접착부에 존재 할

수 있는 결함들을 기준 신호 없이 검출할 수 있는 방법을 제안하고 이 방법의 적합성을 유한요소법에 의한 수치시뮬레이션으로 검증하였다. 이 때 결함검출을 위해 기준 신호가 필요한 송수신배열(ER1)과 기준 신호가 필요 없는 송수신배열(ER2)을 이용하였다. 이로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 접착부의 두께변화에 대해 ER1 배열은 명확하게 두께변화를 예측할 수 있다. 다만, 두께변화 예측에 무결함 상태의 기준 신호가 반드시 필요하다.

(2) 비대칭적으로 존재하는 접착부의 탄성계수 변화(B결함)와 탄성계수 및 밀도 변화(C결함) 검출에 ER1 배열은 전반적으로 명확한 해법을 제시하지 못한다. 즉, 수신신호의 진폭변화에 일관성을 찾을 수 없다.

(3) ER2 배열의 특성상 접합부에 대칭적으로 존재하는 접합부 두께 변화는 ER2로 감지할 수 없다.

(4) 비대칭적으로 존재하는 접착부의 탄성계수 변화(B결함)와 탄성계수 및 밀도 변화(C결함) 검출에 ER2 배열은 결함의 정도와 위치를 예측할 수 있다. 기준 신호가 필요 없으므로 신호가 일단 수신되면 결함이 존재한다는 것을 알 수 있고, 신호의 진폭 차이를 통해 결함의 크기 및 위치를 파악할 수 있다.

(5) ER1은 두께변화와 같은 접합부의 전반적인 변화를 감지할 수 있고 ER2는 비대칭적으로 존재하는 결함(B결함, C결함)을 검출할 수 있다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2008-331-D00589).

참 고 문 헌

- Andruet, R.H., Dillard, D.A. and Holzer, S.M. (2001). "Two- and Three-dimensional Geometrical Nonlinear Finite Elements for Analysis of Adhesive Joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol 21, pp 17-34.
- Avila, A.F. and Bueno, P.D.O. (2004). "Stress Analysis on a Wavy-lap Bonded Joint for Composites", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol 24, pp 407-414.
- Carpenter, W.C. and Barsoum, R. (1989). "Two Finite Elements for Modeling the Adhesive in Bonded Configuration", *Journal of Adhesives*, Vol 30, pp 25-46.
- Deng, M., Wang, P. and Lv, X. (2004). "Nondestructive Evaluation of Adhesive Joints in Layered Structures using Nonlinear Measurement of Second Harmonics of Ultrasonic Lamb Waves", 2004 IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference, pp 2291-2294.
- Goncalves, J.P.M., de Moura, M.F.S.F. and de Castro, P.M.S.T. (2002). "A Three-Dimensional Finite Element Models for Stress Analysis of Adhesive Joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol 22, pp 357-365.
- Kim, J.K., Woo, J. and Na, W.B. (2008). "Finite Element Simulation of Two-Point Elastic Wave Excitation Method for Damage Detection in Concrete Structures", *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol 44, No 10, pp 719-726.
- Kim, S.B. and Sohn, H. (2006). "Baseline-free Crack Detection in Steel Structures using Lamb Waves and PZT Polarity", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol 10, No 6, pp 79-91.
- Li, G. and Lee-Sullivan, P. (2001). "Finite Element and Experimental Studies on Single-Lap Bonded Joints in Tension", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol 21, pp 211-220.
- Pandurangan, P. and Buckner, G.D. (2006). "Vibration Analysis for Damage Detection in Metal-to-Metal Adhesive Joints", *Experimental Mechanics*, Vol 46, pp 601-607.
- Puthillath, P.K., Kannajosyula, H., Lissenden, C.J. and Rose, J.L. (2009). "Ultrasonic Guided Wave Inspection of Adhesive Joints: A Parametric Study for a Step-Lap Joint", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Proceedings of the 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol 1096, pp 1127-1133.
- Richardson, G., Crocombe, A.D. and Smith, P.A. (1993). "A Comparison of Two and Three-Dimensional Finite Element Analysis of Adhesive Joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol 13, pp 193-200.
- Rose, J.L., Rajana, K.M. and Hansch, M.K.T. (1995). "Ultrasonic Guided Waves for NDE of Adhesively Bonded Structures", *Journal of Adhesion*, Vol 50, pp 71-82.
- Tong, L. and Steven, G.P. (1999). *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*, Kluwer Academic Publishers.
- Wooley, G.R. and Carver, D.R. (1971). "Stress Concentration Factors for Bonded Lap Joint", *Journal of Aircraft*, Vol 8, pp 817-820.
- Woo, J., Na, W.B., Kim, J.T. and Cho, H.M. (2007). "Finite Element Simulation of Elastic Wave Propagation in a Concrete Plate - Modeling and Damage Detection", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol 21, No 6, pp 26-33.
- Zeng, Q. and Sun, C.T. (2001). "Novel Design of Bonded Lap Joint", *AIAA Journal*, Vol 39, pp 1991-1996.

2009년 9월 2일 원고 접수

2009년 12월 2일 심사 완료

2009년 12월 21일 게재 확정