

## 초음파 탐상법을 이용한 접착이음에 대한 계면균열의 검출

정남용\* · 박성일\* · 이명대\*\*  
(2000년 5월 2일 접수, 2001년 1월 11일 심사완료)

### Detection of Interface Crack Using Ultrasonic Method in Adhesively Bonded Joints

Nam Yong Chung, Sung Il Park and Myung Dae Lee

**Key Words:** Adhesively Bonded Joint(접착이음), Interface Crack(계면균열), Ultrasonic Method(초음파 탐상법), Transmission Coefficient(통과율), Double-Cantilever Beam(이중 외팔보), Boundary Element Method(경계요소법), Compliance(컴플라이언스)

#### Abstract

It is well recognized that the ultrasonic method is one of the most common and reliable nondestructive testing(NDT) methods for the quantitative estimation of defects in welded structures. However, NDT techniques applying for adhesively bonded joints have not been clearly established yet. In this paper, the detection of interface crack by the ultrasonic method was applied for the measurement of interface crack length in the adhesively bonded joints of double-cantilever beam(DCB). The optimum condition of transmission coefficients and experimental accuracy by the ultrasonic method in the adhesively bonded joints have been investigated. The experimental values are in good agreement with the computed results by boundary element method(BEM) and Ripling's equation.

#### 1. 서론

비용접성 접착이음의 구조접착은 자동차, 항공기, 선박 및 우주선은 물론, 레저 및 스포츠 용품 등 각종 산업분야에서 그 활용범위가 날로 증가하고 있어 이들 제품의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위한 비파괴검사의 필요성이 대두되고 있다. 용접제품에 대한 비파괴검사의 적용은 눈부신 발전을 거듭하여 왔지만, 접착제품은 이중재

료의 접착계면에 대한 미시적 구조의 복잡성과 특이성으로 인하여 체계적인 비파괴검사의 연구가 미진하고, 그 검사방법 및 평가방법도 미확립된 상태이다. 특히, 접착이음은 접착계면단의 응력집중 때문에 조기에 초기균열이 발생하기 쉽고, 이를 기점으로 계면파괴를 일으키는 것이 일반적이므로 이러한 계면균열의 검출방법을 확립하는 것은 접착제품의 안전성 및 신뢰성을 확보하는데 중요한 역할을 한다.<sup>(1)</sup> 비파괴검사 방법중 초음파 탐상법은 용접제품에 가장 일반적으로 사용되고 있지만, 접착이음의 계면균열을 검출하려고 할 때, 접착체가 투명체의 경우는 이동식 현미경으로도 균열선단의 판별이 가능하지만, 접착체가 불투명체인 경우 균열선단의 판별이 현미경 관찰로는 매우 곤란하여 부정확한 균열길이 측정

\* 회원, 숭실대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과

E-mail : sipark-ndt@hanmail.net

TEL : (02)814-4758 FAX : (02)825-6263

\*\* 회원, 숭실대학교 대학원(동서울대학 기계설계과)

의 원인이 된다. 이러한 초음파 탐상법을 접착이음에 대한 계면균열의 검출에 적용할 경우 얇은 접착층의 두께에 의한 영향, 재료물성치 차이 등에 의한 산란신호가 극히 미세하고, 초음파의 퍼짐현상이 발생하여 균열길이의 정확한 측정이 곤란하여 측정오차가 크게 된다.<sup>(2,3)</sup> 접착이음에 대한 이러한 측정오차를 감소시키기 위하여 수직 및 경사입사시 음압, 음압통과율, 초음파 속도, 음향 임피던스와 탐촉자의 접촉각 등에 대한 최적조건의 설정이 요구되어진다.

따라서 본 연구에서는 접착체가 불투명체인 알루미늄(Al)을 세메다인(Ced) 1500으로 접착(Al/Ced/Al)시킨 DCB(double-cantilever beam) 접착이음 시험편을 제작하여 초음파 탐상법을 이용한 계면균열의 검출에 대한 초음파 탐상의 최적조건을 설정하였다. 또한, 접착이음에 대한 계면균열의 측정정밀도를 검증하기 위하여 육안으로도 균열진전의 관찰이 가능한 투명체인 아크릴을 접착체로 하여 세메다인 1500으로 접착(Acryl/Ced/Acryl)시킨 검증용 시험편을 제작하여 계면균열 길이를 이동식 현미경에 의한 측정과 초음파 탐상법에 의한 측정오차를 비교하였다. 이러한 검증을 거친 후, Al/Ced/Al의 DCB 시험편에 대하여 초음파 탐상법을 이용하여 계면균열 길이를 측정하고, 이에 대한 컴플라이언스(compliance)와 Rippling의 식<sup>(7)</sup>에 의한 컴플라이언스의 계산결과 및 경계요소(boundary element method; BEM)에 의한 수치해석<sup>(4)</sup> 으로부터 균열 길이 측정의 정밀도를 비교하였다. 이들의 비교·검토를 통하여 초음파 탐상에 의한 계면균열 검출의 정밀도를 향상시키기 위해 초음파 탐상의 최적조건을 설정하고, 체계적인 계면균열의 검출 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편의 형상 및 치수

초음파 탐상법을 이용하여 접착이음에 대한 계면균열을 검출하기 위하여 Fig. 1과 같은 형상 및 치수로 DCB 접착이음 시험편을 제작하였다. 예비균열의 길이  $a=10$  mm,  $L=135$  mm로 하였

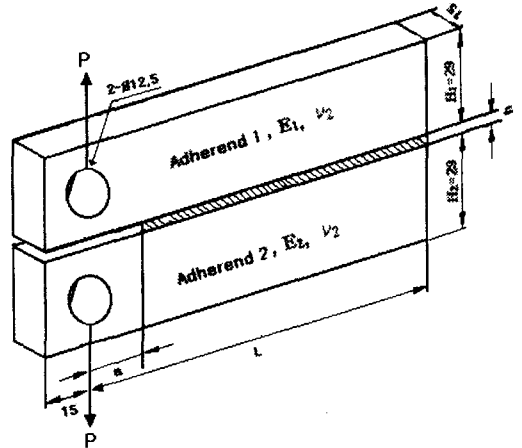


Fig. 1 Shape and dimension of adhesively bonded DCB specimen

Table 1 Type of adhesively bonded DCB specimen

Specimen	Adherend		Adhesive
	1	2	
Type 1	Aluminum	Aluminum	Cemidine
Type 2	Acryl	Acryl	1500

Table 2 Material properties of adherends and adhesive

Specimen materials	Material properties	Density $\rho$ ( $10^3$ kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus E(GPa)	Poisson's ratio $\nu$
	Adherend	Acryl	1.18	2.94
	Aluminum	2.70	65.56	0.32
Adhesive	Ced 1500	1.07	2.06	0.40

고, 접착체는 균질재료 투명체인 아크릴과 불투명체인 알루미늄이고, 접착체는 구조접착제로 널리 이용되고 있는 세메다인 1500을 사용하였다. Table 1에서와 같이 불투명 접착체인 알루미늄을 세메다인 1500으로 접착(Al/Ced/Al)시킨 DCB 접착이음 시험편을 Type 1이라 한다. 또한, 초음파 탐상법에 의한 Type 1의 접착이음에 대한 계면균열의 측정 정밀도를 검증하기 위하여 균열길이의 육안 관찰이 가능한 투명 접착체인 아크릴을 세메다인 1500으로 접착(Acryl/Ced/Acryl)시킨 시험편을 Type 2로 하였다. 실험에 사용된 접착체와

**Table 3** Ultrasonic properties of adherends and adhesive

Specimen materials		Material properties	Impedance Z ( $10^6 \text{kg/m}^2$ )	Velocity(m/s)	
				Longitudinal wave $C_L$	
				Shear wave $C_S$	
Adherend	Acryl	3.20	2,720		
			1,460		
	Aluminum		6,260		
			3,080		
Adhesive	Ced 1500	2.20	2,034		
			831		

접착재의 물성치는 ASME의 표준실험값과 초음파 성질은 ASNT의 공칭값을 사용하였고, 이들에 대한 값을 각각 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

## 2.2 시험편의 제작

접착체를 소정의 치수로 밀링가공하고, 접착면을 #220의 샌드 페이퍼로 연마한 후 아세톤으로 세척하고, 세메다인 1500의 접착제로 접착시켜 Fig. 1과 같은 DCB 접착이음 시험편을 제작하였다. 접착제는 주체와 경화제의 혼합형인 세메다인 1500을 사용하였고, 주체와 경화제를 1:1의 중량비로 혼합하였다. 예비균열의 형상 및 접착층의 두께를 일정하게 하기 위하여 각각 0.2 mm, 2 mm 두께의 테플론 필름을 삽입하였다. 접착압력을 일정하게 유지하기 위하여 지그를 사용하였고, 접착한 시험편은 지그에 고정된 상태로 전기로 내에서 60°C로 2시간 동안 경화시켰다.

## 2.3 실험방법

시험기는 인스트론식 만능재료시험기(Model 4206)을 사용하였다. 핀 하중, 변위제어로 하중속도는 0.5 mm/min로 하였다. 하중이 0인 상태에서 서서히 하중을 증가시켜 가면서 균열이 진전하면 하중을 제거하여 0인 상태로 되돌린 후 균열길이를 초음파 탐상으로 측정하였다. 이때 각 시험편에 대한 하중점의 변위는 클립 게이지를 시험편에 부착하여 X-Y 레코더로 하중-하중점 변위선도를 기록하여 측정하였고, 이 결과로부터 각 균열

길이에 대한 컴플라이언스를 구하였다. 초음파 탐상기는 USK-7D를 사용하였으며, 탐촉자는 진동자 직경 5 mm, 10 mm, 주파수 4 MHz, 5 MHz인 수직탐촉자를 사용하였다. 탐상감도는 접착층에서의 음의 감소를 보정하기 위해 BS(British Standard) 블록(block) A4 시험편을 사용하여 감도를 80%로 맞추어 +6dB로 하였고, 접착매질은 글리세린을 사용하였다. 수직탐상인 경우에는 분해능을 향상시키기 위해서 음압통과율(transmission coefficient)이 크게 나타나는 동종재료인 세메다인 1500을 가공하여 접착체 위에 새로운 층을 만들어 탐상을 하였다. 경사탐상은 입사각을 변화시켜 실험을 하였고, 초음파 입사각의 변화는 아크릴 수지를 가공하여 썸기를 만들어 탐촉자와 아크릴 수지의 접착면의 각을 변화시켜 입사각을 조절하였고, 빔 거리를 0.5~1 스킵 거리로 하였다. 수직 및 경사 탐상에서 검출된 균열길이는 6dB 드랍법으로 측정하였다. 또한 접착층의 두께를 0.2 mm, 2 mm로 변화시켜 접착층의 변화에 따른 실험결과를 비교하였다.

## 2.4 초음파 탐상 음압의 설정

### 2.4.1 수직탐상의 음압

초음파가 얇은 접착층을 수직으로 통과 또는 그곳에서 반사하는 문제는 각 재료의 음향 임피던스에 따른 음압을 고려하여야 한다. 음향 임피던스( $Z$ )는 재료에 따라 달라지며 음파의 진행을 방해하는 것이라 할 수 있다. 이 값은 재료의 밀도와 속도의 곱으로서 두 재료의 음향 임피던스가 클수록 계면에서 더 많이 반사된다. 또한, 이때 발생하는 음압은 음파의 세기로서, 재료에 대한 음압계산은 접착층에서 발생하는 균열검출에 밀접한 관련이 있다. 초음파 탐상에 가장 적합한 접착층의 두께와 음의 세기를 구하고자 음압통과율을 구하였다. 음압 통과율은 두물질의 계면으로 입사된 파의 음압과 계면을 통과한 파의 음압 비율을 말한다. 또한 밀착하고 있는 경계면에서 접하는 2개의 재료의 음향 임피던스에 의해 결정되어진다.

동일 재료로 접착된 경우, 각 재료의 음향 임

피던스는  $Z_1 = Z_2$ 이므로 음압 반사율은 0이다. 이와 반대로 이종재료의 경우 음향 임피던스의 차가 크면, 즉  $Z_1 \neq Z_2$ 이므로 음압 반사율은 100% 전반사하게 되고 음압 통과율은 거의 무시할 수 있다. 그러나 두 재료의 음향 임피던스의 차가 작으면, 음압 통과율에 따라 각 재료에서 되돌아오는 음의 차이를 알 수 있다. 따라서, DCB 접착이음의 접착층 두께 변화에 따른 음압 통과율의 식은 다음과 같이 표시된다.<sup>(5)</sup>

$$t = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 kh + \frac{1}{4} \left( \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 \sin^2 kh}} \quad (1)$$

여기서,  $t$ 는 음압 통과율,  $h$ 는 접착층의 두께,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda = C/f$ ,  $\lambda$ 는 파장,  $C$ 는 재료의 속도,  $f$ 는 주파수,  $Z_i$ 는 각 재료의 음향 임피던스를 의미한다.

Fig. 2는 Table 1에서 Type 1과 Type 2의 DCB 접착이음 시험편에 대한 물성치 값을 식 (1)에 대입하여 계산된 결과를 도시한 것이다.

Type 1은 접착층 두께  $h > \lambda/3$ 에서 음압 통과율이 급격히 증가함을 보이고 있다. 이는 접착체를 통과한 에코와 접착체를 통과한 에코가 서로 분리되는 것을 의미하고 초음파 탐상에 적합한

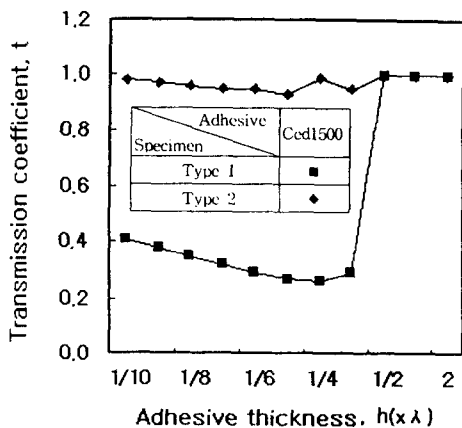


Fig. 2 Transmission coefficient of adhesively bonded DCB specimen

접착층의 두께를 나타내고 있다. 검증용 시험편인 Type 2는 접착층의 변화에 무관하게 거의 일정한 음압 통과율을 나타내고 있다.

### 2.4.2 경사탐상의 음압

수직탐상의 경우에는 각 재료의 종파를 이용하여 음압을 계산하여 비교하였지만, 이는 종파의 진행방향과 균열이 수직하게 놓여 있다는 가정에서 계산되어진 음압이다. 그러나 이런 가정이 성립되지 않는다면 음압의 차이가 발생하게 된다. 따라서 이를 보완하기 위해서 초음파가 경사 입사하는 경우를 고려하면, 초음파 입사각의 변화에 따라 재질내로 초음파가 통과함과 동시에 굴절과 파형변환이 발생하게 된다. 이때 파형변환에 의해 발생하는 횡파를 이용하게 된다. 입사각과 굴절각의 변화에 따라 결함에서 반사되어 돌아오는 음압의 변화로 균열검출의 정밀도에 차이가 발생한다.

접착체에 대한 음의 속도와 입사각과 굴절각의 변화에 따른 음압 통과율은 다음 식과 같이 된다.<sup>(6)</sup>

$$t = - \frac{C_{2S} \cdot C_{1L}}{C^2_{1S}} \cdot \frac{\cos \theta}{\cos \alpha} \cdot \frac{2(b^2 - 1)}{B} \quad (2)$$

여기서,

$$a = \sqrt{(C/C_{2L})^2 - 1}, \quad a' = \sqrt{(C/C_{1L})^2 - 1}$$

$$b = \sqrt{(C/C_{2S})^2 - 1}, \quad b' = \sqrt{(C/C_{1S})^2 - 1}$$

$$B = \left[ \frac{(b^2 - 1)}{2a} + 2b \right] + \frac{\rho_2}{\rho_1} \left( \frac{C_{2S}}{C_{1S}} \right)^4 \left[ \frac{(b^2 - 1)^2}{2a} + 2b' \right]$$

$$C = C_{2L} / \sin \alpha$$

또한,  $C_{1L}$ ,  $C_{1S}$ 는 각각 Table 1의 접착체 1에 대한 종파와 횡파의 속도를 나타내고,  $C_{2L}$ ,

$C_{2S}$ 는 각각 접착체 2에 대한 종파와 횡파의 속도를 의미한다.  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ 는 각각 접착체의 밀도,  $\alpha$ 는 입사각,  $\theta$ 는 굴절각을 나타낸다.

Fig. 3은 Type 1과 Type 2의 DCB 접착이음

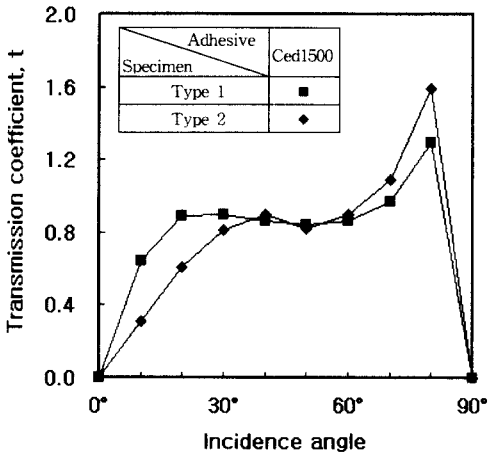


Fig. 3 Transmission coefficient of adhesively bonded DCB specimen

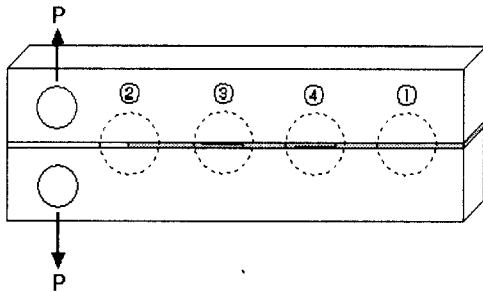
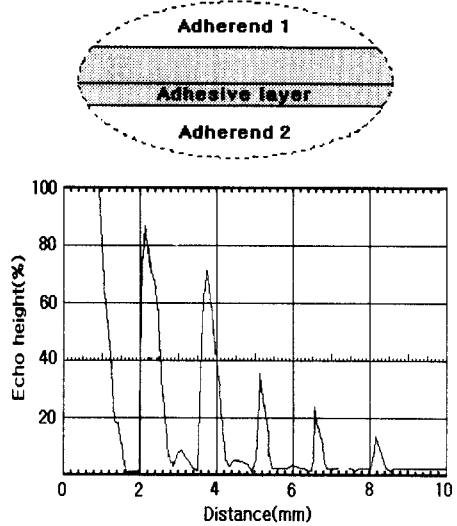


Fig. 4 Schematic diagram of ultrasonic test

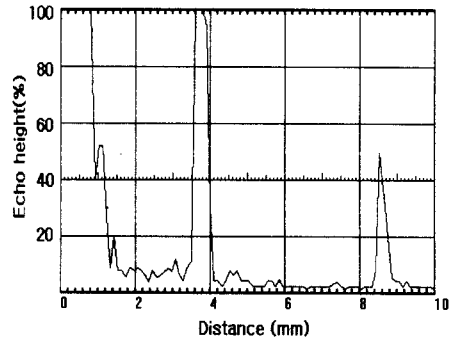
시험편에 대한 재료 및 초음파 물성치 값을 식 (2)에 대입하여 각각의 계산한 결과를 나타낸 것이다. 입사각의 변화에 따른 음압 통과율을 보면, Type 1에서는 20° ~ 40° 와 60° ~ 80° 부근에서, Type 2에서는 30° ~ 50° 와 60° ~ 80° 부근에서 각각 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 경사탐상의 경우 이 구간에서 DCB 접착이음에 대해 초음파 탐상을 하는 것이 효과적이다.

2.5 접착 시험편의 초음파 탐상에 의한 측정 정밀도 검증

검증용 시험편인 Type 2를 테플론 필름을 삽입하여 형성시킨 인공균열에 하중을 가하여 접착층에서 발생하는 계면균열에 대해 Fig. 4에 나타내었다. 각각의 균열 형태에 따라 초음파를 이용한 6dB 드랍법으로 수직 및 경사 탐상에 대한



(a) Straight-beam test



(b) Angle-beam test

Fig. 5 Crack detection at position ① of Fig. 4 by ultrasonic test

음압 통과율 계산결과를 토대로 에코 변화의 차이를 비교하였다.

Fig. 5는 Fig. 4의 ①과 같이 균열이 없는 접착 계면을 확대하여 나타낸 것이다. 초음파 수직탐상(a)의 경우 접착체 1을 통과하여 접착층에서 반사되는 에코와 접착층을 통과하여 접착체 2의 저면에서 반사되어 돌아오는 에코가 빔거리에 따라 등간격으로 나타나고, 접착체 1과 2에서 반사되는 에코와 접착층 내부에서 반사되어 돌아오는 에코가 서로 중복됨을 알 수가 있다. 초음파 경사탐상(b)의 경우에는 입사점을 기준으로 0.5 스

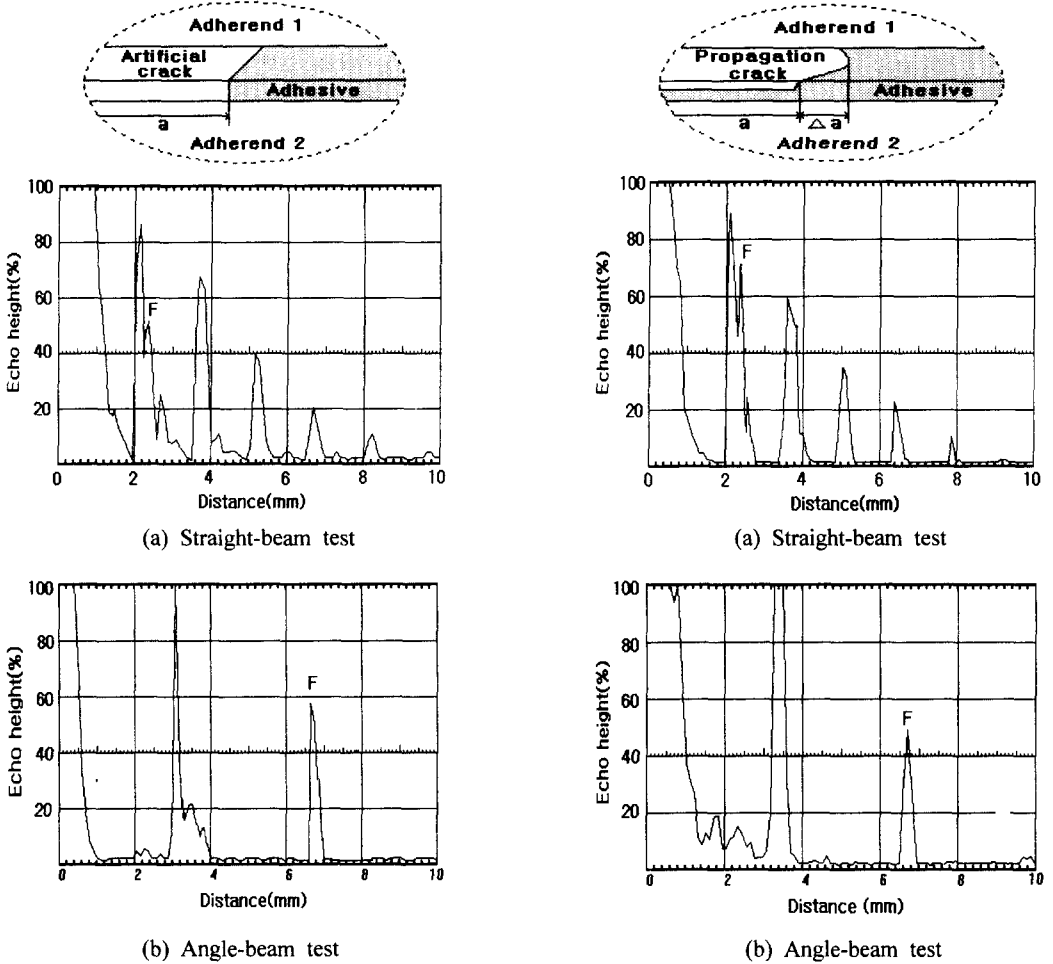


Fig. 6 Crack detection at position ② of Fig. 4 by ultrasonic test

Fig. 7 Crack detection at position ③ of Fig. 4 by ultrasonic test

킵 거리에서는 접착층을 통과하지 못하고 반사되어 1 스킵 거리인 접착체 1의 표면에서 반사되어 돌아오는 에코가 나타남을 볼 수가 있다.

Fig. 6은 Fig. 4에서 ②와 같이 테플론 필름의 삽입에 의한 인공계면 균열선단에 대해 수직 및 경사 탐상으로 측정된 초음파 에코를 나타낸 것이다. 수직탐상(a)인 경우, 접착체 1을 통과한 에코가 접착층의 인공균열 선단을 통과하여 1회 반사되었을 때, 각 재질의 음향 임피던스의 차이로 에코가 분리되어 나타남을 볼 수가 있다. 경사탐상(b)의 경우에는 접착체 1과 인공균열 선단 및 접착체의 음의 속도와 음향 임피던스의 차이로 입사점을 기준으로 0.5 스킵 거리에서 접착층을

통과하여 인공균열 선단에서 반사되어 에코가 나타나는 것을 알 수 있다. 여기서 F는 결함에코를 나타낸다.

Fig. 7은 Fig. 4의 ③과 같이 균열이 접착재와 접착체 1 사이의 계면을 따라 균열이 진전할 때의 균열선단 모양을 확대하여 나타낸 것이다. 하중을 가했을 때 균열진전 모양을 관찰하여 보면, 터널 모양(thumb nail)의 균열선단을 이룬다. 수직탐상(a)의 경우, 균열선단과 균열측면에서 균열 길이를 측정하면 균열진전 길이의 차  $\Delta a$  만큼의 차이가 나타나고, 시험편의 폭 중앙에 대한 균열선단을 측정하였을 때의 결함에코를 보이고 있다. 경사탐상(b)의 경우에는 터널 모양의 균열

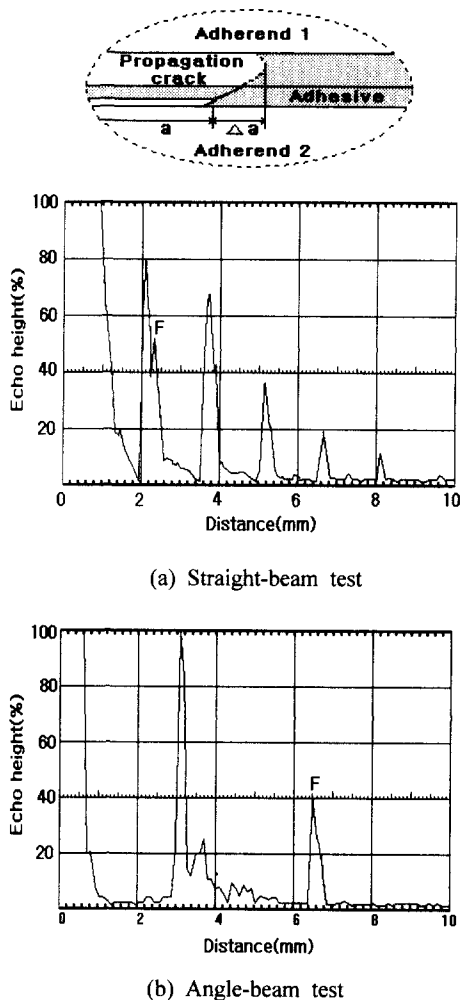


Fig. 8 Crack detection at position ④ of Fig. 4 by ultrasonic test

선단 중앙에서 균열측면으로 탐촉자를 이동하여 보면, 미세한 거리차를 확인 할 수 있다. 시험편의 폭 중앙에 대한 균열선단에서 반사되어 돌아온 에코를 나타내고 있다.

Fig. 8은 Fig. 4의 ④와 같이 접착재와 접착체 2 사이로 진전된 계면균열의 모양을 확대하여 나타낸 것이다. 수직탐상(a)인 경우, 균열선단으로 갈수록 균열 폭의 감소와 균열 상부에 접착층이 존재하기 때문에 에코의 세기가 점점 약해져 균열선단과 균열측면에 대한 균열진전의 차  $\Delta a$  만큼의 차이가 발생하고 있다. 경사탐상(b)의 경우에는 에코의 진행 방향과 균열진전 방향이 직각이

아니기 때문에 에코의 세기가 약해짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 7과 에코의 차이를 비교하여 보면, 음의 진행방향에서 균열선단의 반사 면적이 작기 때문에 에코의 차이가 발생한다. 균열선단의 측정오차를 줄이기 위해 탐촉자에 대한 진동자의 직경 5 mm, 10 mm와 주파수 4 MHz, 5 MHz로 변화시켜 비교하여 보면 균열선단의 폭보다 탐촉자의 진동자 직경이 작고, 주파수가 높을수록 빔의 퍼짐이 적고 감도와 분해능이 커졌다. 또한 실제 하중의 증가에 의해 진전된 계면균열의 경우 시험편의 측면 균열길이와 시험편 폭의 중앙부에 대한 균열길이의 차( $\Delta a$ )를 비교하여 보면, 5% 정도의 차이를 나타내었다. 인공균열 선단에 대해 초음파 탐상과 이동식 현미경 관찰에 의한 측정 결과를 비교하여 보면 3%의 측정오차를 나타내었다.

### 3. 경계요소법에 의한 접착 계면균열 길이의 예측

#### 3.1 경계요소 해석모델 및 해석방법

Fig. 9는 Fig. 1의 DCB 접착이음 시험편에 대한 경계요소(BEM) 해석모델을 도시한 것이다. 해석모델은 Fig. 1에 대한 실제 시험편의 치수를 1/2로 축소한 것으로 균열 길이를 변화시켜 가면서 하중점에 대한 변위를 구하고, 이 해석결과로부터 컴플라이언스를 계산하였다. 본 경계요소 해석은 Kelvin의 기본해를 사용한 2차원 탄성해석이고, 모델의 요소 분할은, 접착체는 각각 2개 영역, 접착층은 1개 영역으로 하여 모델 전체의 절점수는 326개로 분할하였다.

균열의 길이를  $a$  (mm), 작용하중을  $P$  (N), 하중점의 변위를  $\delta$  (mm)라 하면, 각 균열길이에 대한 컴플라이언스는 다음 식과 같이 된다.

$$C = \frac{\delta}{P} \text{ (mm/N)} \quad (3)$$

Fig. 10은 경계요소 해석결과를 식 (3)에 대입하여 균열길이에 대한 컴플라이언스를 나타낸 것이다. 균열길이가 길어질수록 하중점의 변위가 증가하여 컴플라이언스도 비선형적으로 증가함을

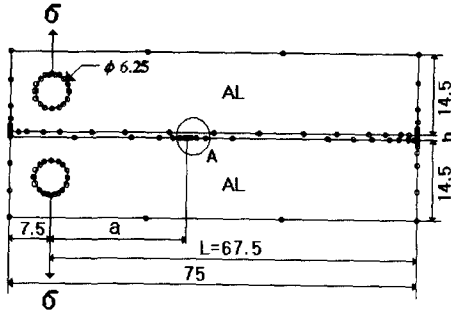


Fig. 9 Typical mesh pattern of BEM model

알 수 있다. 초음파 탐상 실험에서도 하중점에 대한 변위의 실험적인 정밀한 측정이 가능하므로 경계요소 해석의 컴플라이언스에 상응하는 초음파 탐상에 의한 계면균열의 예측이 가능하다.

3.2 경계요소 해석결과와 Ripling 식의 비교

경계요소 해석에 의한 컴플라이언스의 계산결과와 정밀도를 검증하기 위하여 Ripling의 식과 비교하였다. Ripling의 식은 접착층이 없는 균질재의 DCB 접착이음 시험편에 대한 컴플라이언스의 근사식이지만, DCB 접착이음에 대한 컴플라이언스의 계산에도 널리 사용되고 있는 식으로 다음과 같이 표시된다.<sup>(7)</sup>

$$C = \frac{1}{3E_1I_1} [(a + a_0)^3 + H_1^2 a] + \frac{1}{3E_2I_2} [(a + a_0)^3 + H_2^2 a] \quad (4)$$

여기서,  $E_i$ 는 접착체의 세로탄성계수,  $I_i$ 는 단면 2차 모멘트,  $H_i$ 는 접착체의 높이,  $H_i^2 a$ 는 전단에 의한 수정량,  $a$ 는 균열길이이다.  $a_0$ 은 시험편의 회전 보전량으로 Ripling은  $a_0 = 0.6 H_i$ 로 하였다. Ripling에 의한 식 (4)로부터 계산한 컴플라이언스와 경계요소 해석에 의한 컴플라이언스를 Fig. 10에 나타내었다. 경계요소 해석결과가 Ripling의 식보다 약간 큰 값으로 나타났지만, Ripling의 식은 균질재에 대한 식인 것을 감안한다면 경계요소 해석결과는 실제의 접착 상황을 더욱 잘 반영하는 것으로 고려된다

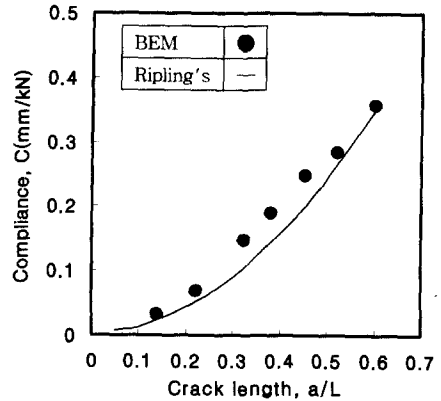


Fig. 10 Relation between BEM analysis and Ripling's equation

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 11은 실험에서 직접 측정한 하중-하중점 변위선도를 사용하여 식 (4)에서 구한 컴플라이언스를 초음파 탐상 실험을 실시하여 측정한 계면균열 길이에 대하여 도시한 것이다.

접착층의 두께  $h=0.2$  mm, 2 mm에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 이때 수직탐상 실험은 Fig. 2의 계산결과를 토대로 접착층 두께가  $\lambda/3 < h < 2\lambda$ 의 범위에서 실시하고, 경사탐상은 Fig. 3을 근거로 하여 입사각을  $20^\circ \sim 50^\circ$  와  $60^\circ \sim 80^\circ$ 의 범위에서 계면균열 길이를 측정하는 것이다. 또한 Fig. 11에서 수직 및 경사탐상에 의한 측정오차는 매우 작고 접착층 두께  $h=0.2$  mm, 2 mm에 대한 컴플라이언스의 차이도 무시할 수 있을 정도로 작았다.

Fig. 12는 경계요소법에 의한 수치해석 결과, Ripling의 식 및 초음파 탐상에 의한 컴플라이언스가 동일할 때 균열길이의 측정 차이를 나타낸 것이다. 이때 각 방법에 의한 균열길이의 측정 차이를 비교하여 보면, 초음파 탐상과 BEM 해석결과는 매우 잘 일치하였고, Ripling의 식과도 5% 이내의 측정 정밀도를 나타내었다.

실험에서 구한 값이 미소한 값으로 편차를 보이는 것은 얇은 접착층 두께의 영향, 재료 물성치, 균열길이의 측정오차, 음의 중복 현상 등으로 인한 음의 세기에 영향을 주기 때문이다.



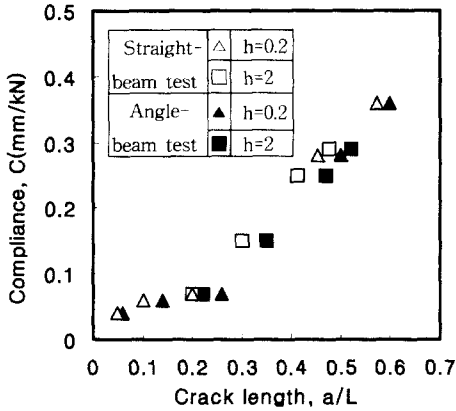


Fig. 11 Relation between compliance and crack length by ultrasonic test

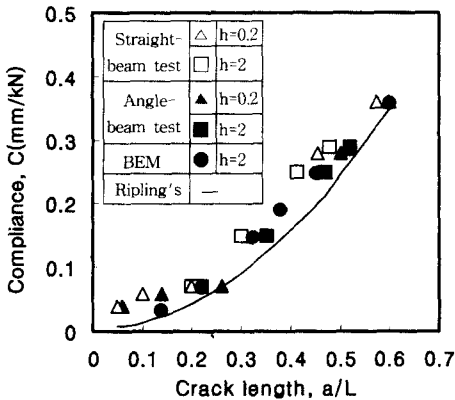


Fig. 12 Comparison of measuring accuracies by BEM analysis, Ripling's equation and ultrasonic tests

5. 결론

DCB 접착이음 시험편을 제작하여 초음파 탐상법에 의한 계면균열의 검출 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초음파 탐상법을 이용한 계면균열 길이의 측정은 경계요소 해석결과와 더욱 잘 일치하였고, Ripling의 식과도 5% 이내의 정밀도를 나타내었다.

(2) 초음파 수직탐상인 경우 접착재와 동일한 초음파 속도를 나타내는 동종재료인 세메다인 1500으로 접착체 위에 새로운 층을 만들어 탐상

한 결과  $\lambda/3 < h < 2\lambda$  범위에서 음압의 증가로 인해 결함 검출능과 분해능이 더욱 향상되었다.

(3) Type 1의 경우 접착체와 접착재의 초음파 속도 차가 1.5~2배 이상 일 때에는 음의 중복 현상으로 Type 2 보다 분해능이 감소하기 때문에 측정정밀도가 저하되었다.

(4) 초음파 탐상 중에서 경사탐상인 경우 입사각이 20°~50°와 60°~80°가 최적의 탐상 조건임을 알 수가 있었다.

후 기

본 연구는 1999년도 숭실대학교 교내 학술 연구비의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) 정희돈, 신현재, 1998, "유도 초음파를 이용한 박판에서의 결함 검출에 관한 연구," 비파괴 검사 학회지, 제18권, 제6호, pp. 445~453.
- (2) R. A. Kline, C. P. Hsiao, and M. A. Fidaali, 1986, "Nondestructive Evaluation of Adhesively bonded Joint," *Trans. ASME*, July, pp. 214~217.
- (3) 송성진, 최지용, 1998, "복합재 구조물의 비파괴평가를 위한 탄성과 전파 특성연구- 실험적 접근," 대한기계학회논문집(A), 제22권, 제6호, pp. 978~989.
- (4) 정남용, 이명대, 강삼근, 2000, "DCB접착이음의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가," 대한기계학회논문집(A), 제24권, 제6호, pp. 1547~1556.
- (5) 木村勝美, 1998, "探傷面の粗さが超音波垂直探傷感度にぼす影響," 日本非破壊検査學會誌, 第47, 卷5號, pp. 315~321.
- (6) 高橋文信, 1990, "タービンダブ テール部検査における二探觸子法の超音波受信強度解析," 日本機械学会春季講演概要集, 第41卷, 4號, pp. 207~214.
- (7) E. J. Ripling's, S. Mostovoy, and R. L. Patrick, 1964, "Measuring Fracture Toughness of Adhesive Joints," *Materials Research Standard*, Vol. 4, pp. 129~134.