

초음파 탐상법을 이용한 접착이음에 대한 계면균열의 검출

정남용* · 이명대** · 박성일***

Detection of Interface Crack Using Ultrasonic Method in Adhesively Bonded Joints

Nam Yong Chung, Myung Dae Lee and Sung Il Park

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

Abstract

It is well recognized that the ultrasonic methods 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 interfacial crack length in the adhesively bonded joints of double-cantilever beam(DCB). The optimum condition of transmission coefficients in the adhesively bonded joints and it's experimental accuracy by the ultrasonic method 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 접착면에 대한 이중재료의 미시적 구조의 복잡성과 특이성으로 인하여 체계적인 비파괴검사의 연구가 미진하고, 그 검사방법 및 평가방법도 미확립

된 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⁽¹⁾. 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 측정의 원인이 된다. 이러한 초음파 탐상법을 접착이음에 대한 계면균열의 검출에 적용할 경우 얇은 접착층의 두께에 의한 영향, 재료물성치 차이에 의한 산란신호가 극히 미세하고, 초음파의 퍼

* 회원, 숭실대학교 기계공학과

** 회원, 숭실대학교 대학원(동서울대학 기계설계과)

*** 회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과

짐현상이 발생하여 균열길이의 정확한 측정이 곤란하여 측정오차가 크게 된다. 접착이음에 대한 이러한 측정오차를 감소시키기 위하여 수직 및 경사압사의 음압, 음압통과율, 초음파속도, 음향 임피던스와 탐촉자의 접촉각 등에 대한 최적조건이 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 아크릴과 접착체를 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 계면균열길이를 측정하고, 이에 대한 컴플라이언스(compliance)와 경계요소법(boundary element method; BEM)에 의한 수치해석 및 Ripling의 식에 의한 컴플라이언스의 계산결과로부터 균열길이 측정의 정밀도를 비교하였다⁽²⁾. 이들의 비교·검토를 통하여 초음파 탐상법에 의한 계면균열 검출의 정밀도를 향상시키기 위해 초음파 탐상의 최적조건을 설정하고, 체계적인 계면균열의 검출방법을 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.

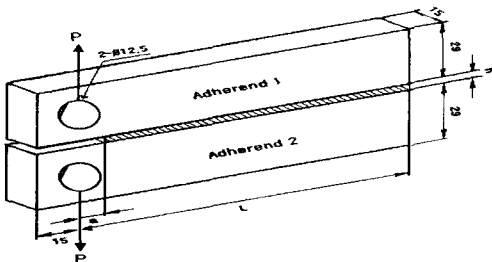


Fig. 1 Shape and dimension of adhesively bonded DCB specimen

예비균열의 길이 $a=10$ mm, $L=135$ mm로 하였고, 접착체는 균질재료 투명체인 아크릴과 불투명체인 알루미늄이고, 접착재는 구조접착제로 널리 사용되고 있는 세메다인 1500을 사용하였다. Table 1에서와 같이 불투명 접착체인 알루미늄을 세메다인 1500으로 접착(Al/Ced/Al)시킨 DCB 접착이음 시험편을 Type 1이라 한다. 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.

Table 1 Type of adhesively bonded DCB specimen

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

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

Table 2 Material properties of adherends and adhesive

Material properties Specimen materials	Density $\rho(10^3\text{kg/m}^3)$	Young's modulus $E(\text{GPa})$	Poisson's ratio ν
	Adherend Acryl	1.18	2.94
Aluminum	2.70	65.56	0.32
Adhesive Ced1500	1.07	2.06	0.40

Table 3 Ultrasonic properties of adherends and adhesive

Material properties Specimen materials	Impedance $Z(10^6\text{kg/m}^2\text{s})$	Velocity (m/s)	
		Longitudinal wave C_L	Shear wave C_s
Adherend Acryl	3.20	2,720	1,460
Aluminum	16.90	6,260	3,080
Adhesive Ced1500	2.20	2,034	831

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. 접착재는 주제와 경화제의 혼합형인 세메다인 1500을 사용하였고, 주제와 경화제를 1:1의 중량비로 혼합하였다. 예비균열의 형상 및 접착층

의 두께를 일정하게 하기 위하여 각각 0.2, 2 mm 두께의 테플론 필름을 삽입하였다. 또한, 접착압력을 일정하게 유지하기 위하여 지그를 사용하였고, 접착한 시험편은 지그에 고정된 상태로 전기로 내에서 60°C로 2시간 동안 경화시켰다.

2.3 초음파 탐상 음압의 설정

2.3.1 수직탐상의 음압

초음파가 얇은 접착층을 수직으로 통과 또는 그곳에서 반사하는 문제는 각 매질의 음향 임피던스를 고려하여야 한다. 동일 재질로 접착된 경우 각 매질의 음향 임피던스는 $Z_1 = Z_2$ 이므로 음압반사율은 0이다. 동일 재료인 경우, 즉 강재의 가열 부분과 비가열부분, 또는 용접부의 모재와 용융 금속의 경계면 등에서 음향 임피던스의 차는 1% 이하이므로 음압반사율은 무시 가능하고, 음압통과율은 거의 100%로 된다. 이와 반대로 이종재료의 음향 임피던스의 차가 크면, 즉 $Z_1 \neq Z_2$ 이므로 음압반사율은 100% 전반사하게 되고 음압통과율은 거의 무시 할 수 있다. 그러나 두 재료의 음향 임피던스의 차가 작으면, 음압통과율에 따라 각 재료에서 되돌아오는 음의 차이를 알 수 있다. 따라서, DCB 접착이음의 접착층 두께 변화에 따른 음압통과율 식은 다음과 같이 표시된다⁽³⁾.

$$t = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 k_2 h + \frac{1}{4} \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 \sin^2 k_2 h}} \quad (1)$$

여기서, t 는 음압통과율, h 는 접착층의 두께, $k_2 = 2\pi/\lambda$, $\lambda = C/f$, λ 는 파장, C 는 재료의 속도, f 는 주파수, Z_i 는 각 재료의 음향 임피던스를 의미한다.

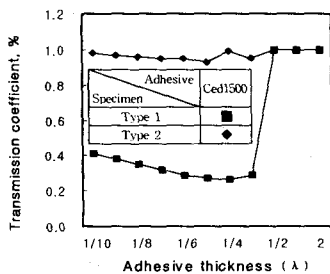


Fig. 2 Transmission coefficient of adhesively bonded DCB specimen

Fig. 2은 Type 1과 Type 2의 DCB 접착시험편에 대한 값을 식(1)에 대입하여 계산된 결과를 도시한 것이다. Type 1은 접착층 두께 $l > \lambda/3$ 에서 음압통과율이 급격히 증가함을 보이고 있다. 이는 접착체를 통과한 에코와 접착재를 통과한 에코가 서로 분리되는 것을 의미한다. 검증용 시험편인 Type 2는 접착층의 변화에 무관하게 거의 일정한 음압통과율을 나타내고 있다.

2.3.2 경사탐상의 음압

수직탐상의 경우에는 각 재료의 종파를 이용하여 음압을 계산하여 비교하였지만, 이는 종파의 진행방향과 균열이 수직되게 놓여 있다는 가정에서 계산되어진 음압이다. 그러나 이런 가정이 성립되지 않는다면 음압의 차이가 발생하게 된다. 따라서 이를 보완하기 위해서 초음파가 경사 입사하는 경우를 고려하면, 입사각의 변화에 따라 종파와 횡파가 발생하여 통과하며, 통과된 음파들은 또 다른 표면에 새로운 입사각으로 입사하게 된다. 이때의 입사각과 굴절각에 따라 결합에서 반사되어 돌아오는 음압의 변화로 결합검출의 정밀도에 차이가 발생한다. 접착체의 음의 속도와 입사각과 굴절각의 변화에 따른 음압통과율은 다음 식으로 표시된다⁽⁴⁾.

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

여기서,

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

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

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

또한, C_{1L} , C_{1S} 는 각각 Table 1에 대한 종파와 횡파의 속도를 나타내고, C_{2L} , C_{2S} 는 각각 접착체 2에 대한 종파와 횡파의 속도를 의미한다. 또한 ρ_1 , ρ_2 는 각 접착체의 밀도, α 는 입사각, θ 는 굴절각을 나타낸다.

Fig. 3은 Type 1과 Type 2의 DCB 접착 시험편에 대한 값을 식(2)에 대입하여 계산된 결과를 나타낸 것이다. DCB 접착이음의 각 Type에 대한 음압통과율은 20° ~ 30° 와 60° ~ 80°에서 크게 변화함을 알 수 있다.

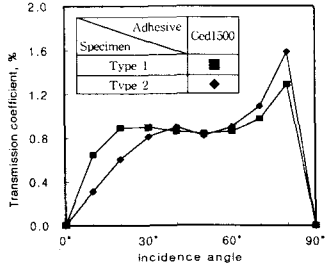


Fig. 3 Transmission coefficient of adhesively bonded DCB specimen

2.4 접착 시험편의 초음파 탐상에 의한 정밀도 검증

검증용 시험편인 Type 2를 테플론 필름을 삽입하여 형성시킨 인공균열의 경우 이동식 현미경으로 100배 확대하여 보면 Fig. 4(a)와 같은 균열 선단을 나타낸다. 또한, Type 2 시험편에 하중을 가하여 접착층에서의 계면균열 진전모습을 관찰하면 Fig. 4(b)와 같은 터널 모양(thumb nail)의 균열선단을 이룬다. 이때 초음파를 이용한 6dB drop법으로 균열길이를 측정하여 보면 균열선단과 균열측면에서 균열길이의 차(Δa) 만큼의 차이를 나타낸다. 또한 균열선단으로 갈수록 균열 폭의 감소로 인해 반사 음의 세기가 점점 약해져 측정오차가 커짐을 알 수가 있다. 6dB 드랍법은 균열 폭 변화에 의해 에코 높이가 저하될 뿐만 아니라, 빔폭에 의해서도 에코 높이의 저하가 발생하기 때문이다. 따라서 균열선단의 오차를 줄이기 위해 탐촉자의 진동자 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 인공균열 길이와 실제 하중에 의해 진전된 균열길이를 비교하여 보면, 5% 정도의 차이를 나타내었다.

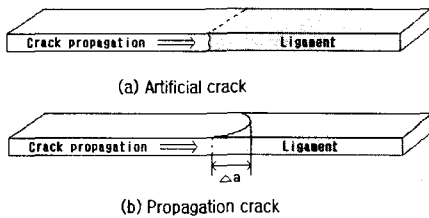
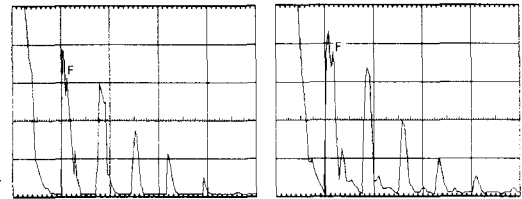


Fig. 4 Shapes of interfacial crack of adhesively bonded DCB specimen

Fig. 5는 Type 2에 대해 초음파 수직탐상으로 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)의 균열선단을 각각 측정하여 나타낸 것이다. 균열선단에 대해 초음파탐상 결과와 현미경 관찰 결과를 비교하여 보면 0.2 mm의 측정오차를 나타내었다.

피착체와 균열에서 반사되어 돌아오는 음의 세기는 피착체에서는 음의 감소가 등간격으로 나타나고 있지만, 균열에서는 피착체와의 음향 임피던스 차로 인해 음의 세기에 대한 차이가 발생하였다. 이때 피착체와 균열에서 반사되어 돌아오는 음의 세기와 거리의 차로 에코를 구별할 수 있었다.



(a) Fig. 4(a) (b) Fig. 4(b)
Fig. 5 Crack detection of Fig. 4 by straight beam test

2.5 실험방법

시험기는 인스트론식 만능재료시험기(Model 4206)를 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 측정하였다. 이때 각 시험편에 대한 하중점의 변위는 클립 게이지를 시험편에 부착하여 X-Y 레코더로 하중-하중점 변위선도를 기록하여 측정하였고, 이 결과로부터 각 균열길이에 대한 컴플라이언스를 구하였다. 초음파 탐상기는 USK-7D를 사용하였으며, 탐촉자는 진동자 직경 5 mm, 10 mm, 주파수 4 MHz, 5 MHz인 수직탐촉자를 사용하였고, 접착매질은 기계유를 사용하였다. 탐상감도는 접착층에서의 음의 감소를 보정하기 위해 BS(British Standard) 블록(block) A4 시험편을 사용하여 음의세기를 80%로 맞추어 +6dB로 하였다. 초음파 수직탐상인 경우에는 분해능을 향상시키기 위해서 접착제와 같은 초음파 속도를 나타내는 동종재료인 세메다인 1500으로 접착체의 위에 새로운 층을 만들어 탐상을 하였다. 경사탐상은 입사각을 변화시켜 실험을 하였

고, 초음파 입사각의 변화는 아크릴 수지로 썬기를 만들어 탐촉자와 아크릴 수지의 접촉면의 각을 변화시켜 입사각을 조절하였고, 빔 거리를 0.5 스킵으로 하였다. 초음파 수직, 경사탐상에서 검출된 균열길이는 6dB 드랍법으로 측정하였다. 측정된 내용은 ULTRADOC 프로그램을 이용하여 탐상 데이터를 전송 받았다. 또한 접착층의 두께를 0.2 mm, 2 mm로 변화시켜 접착층의 변화에 따른 실험결과를 비교하였다.

3. 경계요소법에 의한 접착 계면균열 길이의 예측

3.1 BEM 해석모델 및 해석방법

Fig. 6은 Fig. 1의 접착 시험편에 대한 해석모델을 도시한 것이다. 해석모델은 Fig. 1에 대한 실제 시험편의 치수를 1/2로 축소한 것으로 $L=67.5$ mm, 접착층의 두께 $h=1$ mm로 하고 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.

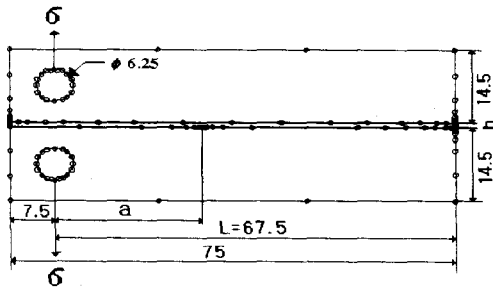


Fig. 6 Typical mesh pattern of BEM model

균열의 길이를 a mm, 작용하중을 $P(N)$, 그리고 하중점의 변위를 δ mm라 하면, 각 균열길이에 대한 컴플라이언스는 다음 식과 같이 된다.

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

Fig. 7은 BEM 해석결과를 식(3)에 대입하여 균열길이에 대한 컴플라이언스를 나타낸 것이다. 균열의 길이가 길어질수록 하중점의 변위가 증가하여 컴플라이언스도 비선형적으로 증가함을 알 수 있다.

초음파 탐상 실험에서도 하중점에 대한 변위의 실험적인 정밀한 측정이 가능하므로 BEM해석의 컴플라이언스에 상당하는 초음파 탐상 실험에 의한 접착 계면균열의 예측이 가능하다.

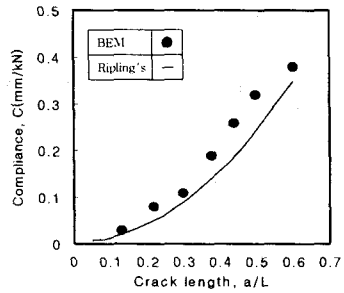


Fig. 7 Relation between BEM analysis and Ripling's equation

3.2 BEM 해석결과와 Ripling 식의 비교

BEM 해석에 의한 컴플라이언스의 계산결과와 정밀도를 검증하기 위하여 Ripling의 식과 비교하였다. Ripling의 식은 접착층이 없는 균질재의 DCB 시험편에 대한 컴플라이언스의 근사식이지만, DCB 접착이음에 대한 컴플라이언스의 계산에도 널리 사용되고 있는 식으로 다음과 같이 표시된다⁽⁵⁾.

$$C = \frac{2}{3EI_1} [(a+a_0)^3 + H_1^2 a] \quad (4)$$

$$+ \frac{2}{3EI_2} [(a+a_0)^3 + H_2^2 a]$$

여기서, E 는 접착체의 세로탄성계수, I 는 단면 2차 모멘트, H 는 접착체의 높이, $H_1^2 a$ 와 $H_2^2 a$ 는 전단에 의한 수정량이고, a 는 균열길이이다. a_0 은 시험편의 회전 보전량으로 Ripling은 $a_0 = 0.6 H_1$ 또는 $a_0 = 0.6 H_2$ 로 하였다.

Ripling에 의한 식(4)로부터 계산한 컴플라이언스를 Fig. 7에 BEM 해석에 의한 컴플라이언스와 함께 나타내었다.

BEM 해석 결과가 Ripling의 식보다 약간 큰 감으로 나타났지만, Ripling의 식은 균질재에 대한 식인 것을 감안한다면 BEM 해석 결과는 실제의 접착 상황을 더욱 잘 반영하는 것으로 고려된다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 실험에서 직접 측정된 하중-하중점 변위선도를 사용하여 식(4)에서 구한 컴플라이언스를 초음파 탐상 실험을 실시하여 측정된 계면균열에 대하여 도시한 것이다. 접착층의 두께 $h=0.2$ mm, 2 mm에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. 이때 수직탐상 실험은 Fig. 2의 계산결과를 토대로 접착층 두께가 $\lambda/3 < K < 2\lambda$ 의 범위에서 실시하고, 경사탐상은 Fig. 3을 근거로 하여 입사각을 $20^\circ \sim 30^\circ$ 와 $60^\circ \sim 80^\circ$ 의 범위에서 계면균열 길이를 측정하는 것이다. 또한 Fig. 8에서 수직 및 경사탐상에 의한 측정오차는 매우 작고 접착층 두께 $h=0.2$ mm, 2 mm에 대한 컴플라이언스의 차이도 무시할 수 있을 정도로 매우 작았다.

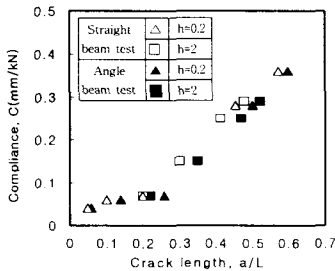


Fig. 8 Relation between compliance and crack length by ultrasonic test

Fig. 9는 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 해석 결과는 매우 잘 일치하였고, Ripling의 식과도 5% 이내의 측정 정밀도를 나타내었다.

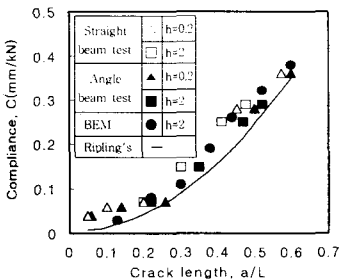


Fig. 9 Comparison of accuracies by BEM analysis, Ripling's eq. and ultrasonic test

실험에서 구한 값이 미소한 값으로 편차를 보이는 것은 얇은 접착층 두께의 영향, 재료 물성치와 균열길이의 측정오차, 음의 중복 현상등으

로 인한 음의 세기에 영향을 주기 때문이다.

5. 결론

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

- (1) 초음파 탐상법을 이용한 계면균열 길이의 측정은 BEM 해석결과와 더욱 잘 일치하였고, Ripling의 식과도 5% 이내의 정밀도를 나타내었다.
- (2) 초음파 수직탐상인 경우 접착재와 동일한 초음파 속도를 나타내는 동종재료인 세베다인 1500으로 접착체 위에 새로운 층을 만들어 탐상한 결과 $\lambda/3 < K < 2\lambda$ 범위에서 결합검출능과 분해능이 더욱 향상되었다.
- (3) DCB 접착이음 시험편에 대한 접착재와 접착재의 초음파 속도의 차가 1.5~2배 이상일 때에는 음향 임피던스의 차로 인해 분해능이 감소하여 결합검출의 정밀도가 저하되었다.
- (4) 초음파의 경사탐상인 경우 입사각이 $20^\circ \sim 30^\circ$ 와 $60^\circ \sim 80^\circ$ 가 최적의 탐상조건임을 알 수가 있었다.

참고문헌

- (1) 野中壽夫, 1992, “超音波による接着・はく離の非破壊評価”. 日本機械学会論文集, 第58卷 546號, pp. 431~438.
- (2) 정남용, 이명대, 강삼근, 1999, “DCB접착이음의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가”, 대한기계학회, 춘계학술대회 논문집(A), pp 566~572.
- (3) 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”, 非破壊検査學會, 第47卷5號, pp. 315~321.
- (4) 高橋文信, 1990, “タ-セ”ソタ”ア”テ”ル部検査における二探觸子法の超音波受信強度解析”, 平成3年度春季講演概要集, 第41卷 4號, pp. 207~214.
- (5) Ripling's, 1964, “Measuring fracture toughness of adhesive joints”, Materials and research and standard, Vol. 4, pp. 129~134.