

탄성표면파의 반사계수를 이용한 파괴응력의 해석

The analysis of fracture stress using reflection coefficient of surface acoustic wave

신진섭*, 김장권**, 권계석*

(J. S. Shin, J. K. Kim, K. S. Jun)

요 약

본 연구에서는 취약한 고체의 표면에 존재하는 crack에 탄성표면파를 입사 시켰을 때 발생하는 반사계수를 측정하여 파괴응력을 해석하는 방법을 연구 분석하였다.

Crack이 존재하는 취약한 고체에서의 파괴응력은 임계응력확대계수와 정규화된 최대응력확대계수의 함수로써 나타나며, 이 때 정규화된 최대응력확대계수는 탄성표면파의 반사계수를 측정하여 구할 수 있었다.

실험을 위하여 Pyrex glass원판 중앙에 깊이가 0.5mm~0.9mm인 crack을 새겨하였고, SAW wedge transducer를 피치 캐치(pitch catch) 모드로 구성하여 반사계수를 측정하고 파괴응력값을 산출하였으며 UTM(Universal Testing Machine)으로 측정한 값과 비교 분석하였다.

ABSTRACT

In this study, the analysis technique of fracture stress using the reflection coefficient of SAW reflected from a brittle solid with surface crack has been studied.

Fracture stress of brittle solid with surface crack has been obtained by the function of the critical stress intensity factor and the maximum normalized stress intensity factor of the crack in the body. And the maximum normalized stress intensity factor of a surface crack can be inferred from a measurement of reflection coefficient of SAW.

In experiment, the surface cracks ranging from 0.5mm to 0.9mm in crack depth has been made at the center of each Pyrex disc, and the SAW wedge transducer has been set up for the pitch catch mode. It has been compared the theoretical values of the fracture stress calculated from the reflection coefficient of SAW with the values of the fracture stress measured from UTM.

1. 서 론

*경희대학교 전석공학과
**대림공전 전자과

조음과는 고체내부를 잘 통과하는 성질을 가지고 있으며, 특히 탄성표면파는 표면을 따라 전파하며

대부분의 에너지는 한파장 깊이 범위내에 집중되므로 표면가까이에 존재하는 결함에 대하여 강하게 산란하는 성질이 있다⁽³⁹⁾. 이러한 탄성표면파는 1885년 Rayleigh 경에 의해서 그 특성이 연구된 이후에 전자산업분야와 비파괴분야에서 그 활용이 확대되고 있다⁽⁴⁾.

고체내에 존재하는 crack은 시간이 오래 경과함에 따라 막대한 누적을 가져오게 되며, 이러한 현상은 사고의 원인이 될 수도 있으므로, 파괴(fracture)는 공학에서 중요한 하나의 분야로 다루어지고 있으며 그에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다. Crack이 존재하는 고체의 파괴용력을 측정하는데는 파괴역학에서의 파괴점사방법에 의하여 구하여지지만, 이를 파괴치 않고도 초음파를 이용하므로써 파괴용력값을 구할 수 있는 비파괴 검사방법이 관심을 모으고 있다.

따라서, 본 연구에서는 취약한 고체의 표면에 존재하는 crack에 탄성표면파를 입사시켰을 때 발생하는 반사계수를 측정하여 파괴용력을 해석하는 방법을 연구분석하였다. 실험을 위하여 샘플로써 Pyrex glass를 선택하고, 이 원판의 표면에 crack을 한 파장보다 작은 범위로 제한하여 설계 제작하였다. 탄성표면파의 측정은 SAW(Surface Acoustic Wave) wedge transducer를 피치 캐치방식으로 구성하여 crack에 의한 탄성표면파의 반사계수를 측정하였으며, 정규화된 최대응력확대계수를 구하고 이것으로 재질에 따른 임계응력확대계수를 나누어 파괴용력값을 산출하였다. SAW wedge transducer는 interdigital transducer (IDT)에 비해 변환효율은 작으나 전극의 증착이 불필요하며, focused transducer에 비해 액체속에서 측정하는 번거로움 없이 매질위에서 측정이 가능하다는 장점이 있다.

II. 탄성표면파의 반사계수를 이용한 파괴용력 해석

1. 탄성표면파의 반사계수

표면에 존재하는 반타원형의 crack에 법선으로 입사되는 탄성표면파를 가정하도록 한다. crack에 대한 X축상의 길이를 2c라 하고, Y축상의 길이 즉,

crack의 깊이를 a라 하자.

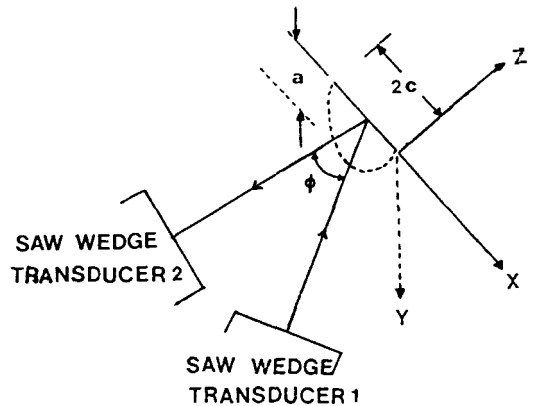


그림 1. 표면에 존재하는 반타원모양의 crack에 대한 탄성표면파의 반사계수를 얻기 위해 고려되어진 기하학적 구조

Fig. 1. A schematic of the geometry considered in the derivation of the reflection coefficient of surface acoustic wave for a half-elliptical shaped surface crack.

그림 1과 같이, SAW wedge transducer 1로 탄성표면파를 여기시키고 SAW wedge transducer 2로 crack으로 부터 반사된 신호를 수신한다고 할 때, 탄성표면파가 crack 깊이에 비해 긴 파장을 갖는다면 반사계수 S_{21} 은 다음과 같이 표현할 수 있다⁽³⁶⁾

$$S_{21} = \frac{j\omega}{4P} \int_{S_c} \Delta U_z \sigma_{zz} dS \quad (1)$$

여기에서 S_c 는 crack의 면적, ω 는 탄성표면파의 각 주파수, P는 transducer에 대한 입력전력, ΔU_z 는 crack이 X, Y 평면에 존재할 때 z방향으로의 변위, σ_{zz} 는 X-Y평면에 존재하는 평면 crack에 가해진 응력을 나타낸다.

한편, Auld는 손실을 고려하지 않을 경우, 표면에 서 측정된 탄성표면파의 응력에 대한 종성분의 크기 σ_{zz}^0 를 다음과 같이 정의하였다⁽³⁶⁾.

$$\sigma_{zz}^0 = \left[\frac{16P}{W} \left(\frac{V_s}{V_R} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{V_s}{V_L} \right)^2 \right]^2 / f_z \omega \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기에서 W 를 변환기의 폭, V_R 를 탄성표면파 속도, V_S 를 횡파 속도, V_L 를 종파 속도, ρ 를 재질 밀도(substrate density), f_z 를 재료 파라미터(material parameter)라 한다. crack 깊이가 탄성표면파의 한 파장 길이보다 작으면 작용수목 σ_{zz} 는 crack면 위에서 대략적으로 일정한 값을 가지므로 $\sigma_{zz} = \sigma_z$ 의 관계가 성립한다고 볼 수 있다.

실험상에서의 SAW wedge transducer로 탄성표면파를 여기시킬 경우 100%의 변환효율을 얻기란 불가능하며, 따라서 입력전력에서 음향전력으로 변환하는데 있어서 비효율적인 면을 고려해야 한다. 이러한 손실을 삽입손실이라 하며, 다음과 같이 정의할 수 있다¹⁹⁾⁹⁾¹⁰⁾.

$$\eta_T = \frac{P(\text{acoustic wave})}{P(\text{input to transducer})} \quad (3)$$

한편, Fraunhofer영역에서 측정되이질 때, SAW wedge transducer에서는 회절에 기인한 탄성표면파의 전력손실 η_D 가 발생하며 다음과 같이 정의되어진다¹⁹⁾³⁾¹⁰⁾.

$$\eta_D = \frac{W^2}{\lambda_x} \quad (4)$$

여기에서 λ 는 탄성표면파의 파장, x 는 측정거리를 나타낸다.

한편, 두 개의 SAW wedge transducer를 위치 캐치방식으로 구성할 경우, 입사된 빔과 반사된 빔 사이에 각도 ϕ 가 발생하며, 따라서 다음과 같은 각도에 따른 손실을 고려해야 한다⁹⁾.

$$\eta_\phi = \frac{1}{4} [(1-\nu) + (1+\nu) \cos \phi]^2 - \frac{(1+\nu^2)}{2(2-\nu)} \sin^2 \phi \quad (5)$$

여기에서 ν 는 포아송 비(Poisson's ratio)를 나타낸다.

결국, 실험상에서 반사계수의 측정은 다음과 같은 손실이 발생하게 된다.

$$\eta = \eta_T \eta_D \eta_\phi \quad (6)$$

2. 파괴응력(Fracture Stress)

고체가 응력을 받아 2개 이상의 부분으로 분리되는 것을 파괴라 하며, 응력확대계수는 균열선단의 극부탄성영역의 강도를 표시하는 파라미터이다.

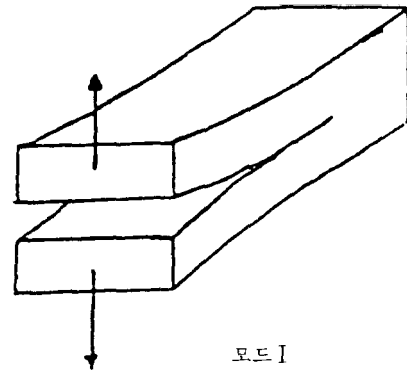


그림 2. 파괴의 opening 모드
Fig. 2. Opening mode of fracture

그림 2는 균열에 하중이 작용하는 방식중에서 opening 모드(모드 I)를 나타내고 있다. 모드 I에 대한 정규화된 최대응력확대계수 $k_{I\max}$ 를 탄성표면파를 이용하여 구하고 임계응력확대계수 K_{Ic} 를 알므로써 crack이 존재하는 취약한 고체에서의 파괴응력 σ_f 를 산출할 수 있다.

파괴응력 σ_f 는 다음 식으로 주어진다.

$$\sigma_f = \frac{K_{Ic}}{k_{I\max}} \quad (7)$$

탄성표면파를 이용한 정규화된 최대응력확대계수의 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$k_{I\max} = \gamma \left[\frac{3E V_R^2 W S_a}{(1-\nu^2)\pi^3 \omega^2 V_S^2 \eta \rho f_z (1-(V_S/V_T)^2)^2} \right]^{1/6} \quad (8)$$

여기에서, γ 은 표면에 crack이 존재하는 경우에 적용할 때, $a/c \geq 0.8$ 일 경우 $\gamma = 1.22$ 의 값을 가지

며, E는 영률(Young's modulus)을 나타낸다.

한편, Wiederhorn은 microscope slide인 6개의 Pyrex glass 시편에 대한 실험결과로서 다음과 같은 Pyrex glass에 대한 임계응력확대계수 K_{Ic} 를 얻었다¹⁰⁾.

$$K_{Ic} = 0.758 \pm 0.010 (MPa \sqrt{m}) \quad (9)$$

III. 실험 및 결과고찰

1. 탄성표면파의 반사계수 측정

실험에 사용된 시편은 지름 12cm, 두께 4.3mm~4.8mm의 Pyrex glass 원판을 사용하였다. Pyrex glass의 탄성표면파 속도는 3012m/s, 종파속도는 5640m/s, 횡파속도는 3280m/s이다. crack은 10개의 시편표면 중앙에 0.5mm, 0.6mm, 0.7mm, 0.8mm, 0.9mm의 길이로 각각 2회에 걸쳐 제작하고, a/c의 값은 0.8로 하였다. 탄성표면파를 여기시키기 위하여 Lucite로 wedge를 제작하였으며, Pyrex glass의 표면중앙에 형성되어 있는 crack에 탄성표면파를 입사시켰을 때 발생하는 탄성표면파의 반사계수를 측정하기 위하여 ULTRASONIC PROCESSOR로 부터 -180V의 입력전압을 SAW wedge transducer 1에 연결하고 피치 캐치방식에 의하여 SAW wedge transducer 2로 반사신호를 받아 오실로스코프 상에서 반사전압을 구하였다. 이러한 SAW wedge transducer를 이용한 측정은 Fraunhofer 영역에서 일정한 거리로 실시되었으며, 반사전압값을 입사전압값으로 나누어 반사계수를 얻을 수 있었다.

그림 3은 본 실험에 사용되던 시스템의 블록 다이어그램이다.

Crack 길이가 0.8mm일 때 입력신호에 대한 증폭된 반사신호의 파형을 사진 1와 2에 나타내었다.

그림 4는 0.5mm~0.9mm의 crack 길이를 갖는 시편을 각각의 길이에 대하여 2개씩 제작하여 crack에 대한 탄성표면파의 반사계수를 측정된 결과로서, crack 길이가 증가함에 따라 반사계수는 증가함을 알 수 있다. 각각의 crack 길이에 대하여 ●와 ▲면역 시편, ▲는 수면제 시편을 나타낸다.

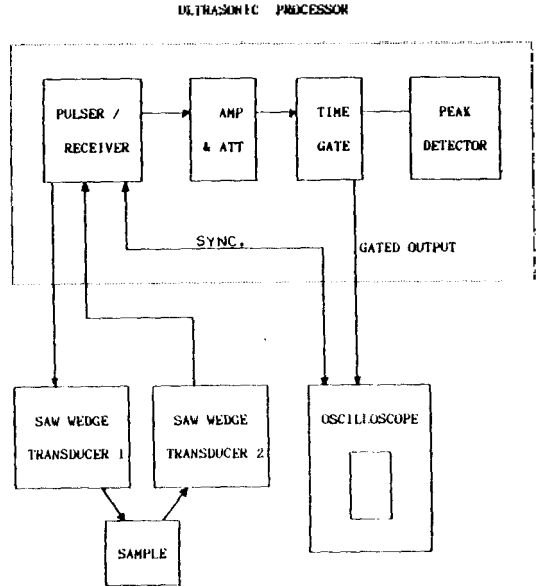


그림 3. 실험 장치의 블록다이어그램
Fig. 3. Block diagram of experimental system.

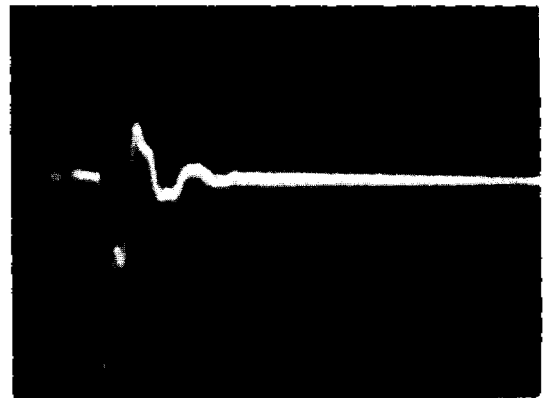


사진 1. 입력신호(50V/div, 100ns/div)
Photo 1. Incident signal

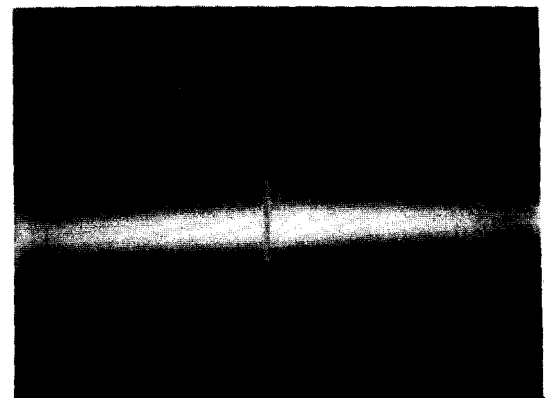


사진 2. 반사신호(20mV/div, 5ns/div)
crack 길이: 0.8mm, a/c: 0.8
Photo 2. Reflected signal.

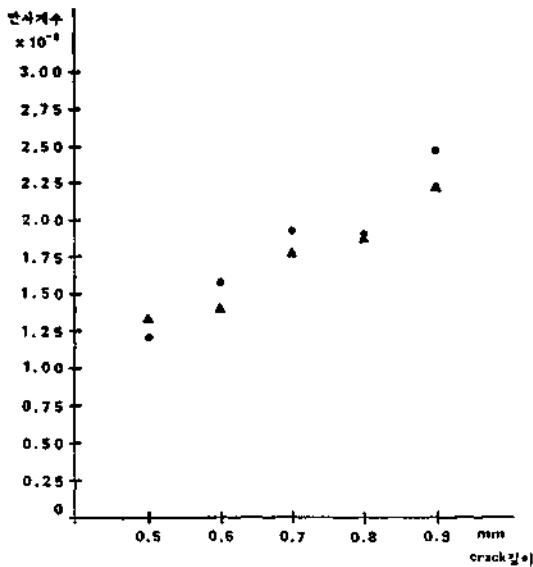


그림 4. crack길이에 따른 반사계수의 그래프
Fig. 4. Graph of the reflection coefficient vs. the normalized crack depth.

2. 파괴응력측정

파괴응력 측정을 위하여 crack이 존재하는 Pyrex glass 원판을 1시간가량 진공관에 두었다가 UTM에 옮겨서 fracture toughness 측정실험을 행한다. UTM에서 100kg의 load cell을 선택하여 각각의 Pyrex glass 시편에 대하여 파괴시킨 후, 100분의 1로 기록되는 chart에 그려진 눈금을 읽어서 응력을 계산한다. 파괴의 과정은 세 개의 볼로 제작된 받침대위에 피스톤모양의 가는 봉이 내려와 Pyrex glass 시편을 파괴하며, 이 때 피스톤 모양의 봉끝은 수평을 이루어야 한다.

표 1은 파괴응력값을 탄성표면파의 반사계수를 측정하여 구한 이론치와 UTM에 의해 구한 파괴 측정치를 비교하여 나타내었다. 이론치에서는 임계응력확대계수의 값이 $K_{Ic} = 0.758(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ 일 때의 파괴응력값을 구하였으며, UTM에 의해 측정된 파괴응력값과 비교한 결과, 두번째, 세번째, 아홉번째, 열번째 샘플에서 발생한 비교적 큰 오차는 샘플의 제작과정과 UTM의 파괴측정 과정에서 발생한 것으로 사려되며, 나머지는 10% 내외에서 일치하였고, 또한 crack 길이가 커짐에 따라 오차도 다소 커짐을 알 수 있었다.

표 1. 파괴응력값의 비교

Table 1. Comparison of values of fracture stress

번호	crack 길이 (mm)	샘플 두께 (mm)	파괴 응력(MPa)		오 차 (%)
			반사계수에 의한 이론치	UTM에 의한 파괴 측정치	
1	0.5	4.5	29.43	29.11	1.10
2	0.5	4.6	28.85	23.02	25.33
3	0.6	4.4	28.12	20.84	34.93
4	0.6	4.4	28.66	29.81	3.86
5	0.7	4.8	27.20	24.96	8.97
6	0.7	4.3	27.54	26.90	2.38
7	0.8	4.8	27.27	25.05	8.86
8	0.8	4.8	27.36	24.52	11.58
9	0.9	4.3	26.11	21.47	21.61
10	0.9	4.5	26.55	21.02	26.31

IV. 결 론

본 논문에서는 취약한 고체의 표면에 존재하는 crack에 탄성표면파를 입사시켰을 때 발생하는 반사계수를 측정하여 파괴응력을 해석하는 방법을 연구하였다.

탄성표면파의 반사계수는 한 파장 이내에서 crack의 길이가 증가함에 따라 그 값도 증가하며, 이러한 반사계수를 이용한 정규화된 최대응력확대계수를 가지고 재질에 따른 임계응력확대계수를 나누어 파괴응력값을 구하였다.

SAW wedge transducer를 피치 캐치방식으로 구성하여 Pyrex glass의 표면에 존재하는 crack에 탄성표면파를 입사시켜 반사계수를 측정하여 이것으로 파괴응력값을 산출하였으며, UTM에 의해 측정된 파괴응력값과 비교하였다. 실험결과, crack길이가 증가함에 따라 탄성표면파의 반사계수도 증가함을 확인할 수 있었으며, 이러한 반사계수를 이용하여 구한 파괴응력값은 UTM에 의해 측정된 파괴응력값과 비교하였을 때, 두번째, 세번째, 아홉번째, 열번째 샘플에서 발생한 비교적 큰 오차를 제외하고는 10% 내외에서 일치함을 알 수 있었다.

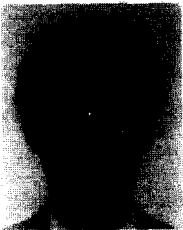
앞으로 한 파장 이상의 crack이 존재하는 경우와 다양한 재료에서의 연구가 계속되어 비파괴검사의 응용범위를 더욱 확대해 나아가야 하겠다.

參 考 文 獻

1. G.S. Kino, "Acoustic Wave : Device Imaging and Analog Signal Processing", Prentice-Hall.
2. B.R. Lawn, T.R. Wilshaw, "Fracture of Brittle Solids", Cambridge Univ. Press.
3. M.T. Resch, "Non-Destructive Evaluation of Small Surface Crack using Surface Acoustic Waves", Ph.D Stanford University., November 1982.
4. M.T. Resch, B.T. Khuri-Yakub, G.S. Kino, and J.C. Shyne, "The Acoustic Measurement Stress intensity factors", Appl. Phys. Lett. Vol. 34, No. 3, pp. 182~184, February 1, 1979.
5. S.M. Wiederhorn, "Fracture Surface energy of Glass" J.Amer. Cer. Soc., Vol. 52, No. 2, pp.99~105, 1969.
6. B.A. Auld, "General Electromechanical Reciprocity

- Relations Applied to the Calculation of Elastic Wave Scattering Coefficients", Wave Motion, Vol. 1, No. 1, pp.3~10. 1979.
7. G.S. Kino, "The Application of Reciprocity Theory to scattering of Acoustic Wave by Flaws", J. Appl. Phys, Vol. 49, No. 6, pp. 3190~3199, June 1978.
8. J. Tien, B.Khuri-Yakub, and G.S. Kino, "Acoustic Surface Wave Probing of Ceramics", ARPA / AFML. Rev. of Progress in Quantitative NDE, La Jolla, CA, 1979.
9. 김장권, "고효율 광대역 초음파 변환기의 실현에 관한 연구", 경희대학교 대학원 박사학위논문 1989 6월.
10. B.T. Khuri-Yakub, G.S. Kino, A.G. Evans, "Acoustic Surface Wave Measurements of Surface Cracks in Ceramics", J. Amer. Cer. Soc., Vol. 63, No.1-2, pp. 65~71, February 1980.

▲신진섭(정회원) : 1965년 12월 21일생



1989년 2월 : 호서대학교 정보통신공학과 졸업 (공학사)
 1991년 2월 : 경희대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사)
 1991년 3월~현재 : 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정

▲김장권(정회원) 1949년 12월 16일생



1977년 2월 : 광운대학교 졸업 (공학사)
 1980년 10월 : 연세대학교 대학원 졸업 (공학석사)
 1989년 8월 : 경희대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학박사)
 1990년 3월~현재 : 대림전문대학 전자과 전임강사

▲전계석(정회원) : 9권 2호 참조.