

超音波 Fractography에 의한 破壞速度의 精密測定을 위한 最適周波數 選定에 관한 研究

이 범 성*, 한 응 교**, 송 창 섭**

A Study on the Optimal Frequency for Precise Measurement of Fracture Velocity by Ultrasonic Fractography

B. S. Lee*, E. K. Han**, C. S. Song**

ABSTRACT

A method to decide the optimal frequency for the fracture velocity measurement by ultrasonic fractography is presented. A theoretical formula to decide the optimal frequency for ultrasonic fractography testing is made and it is compared with experimental value. According to the formula the optimal frequency is shown to be depending on the attenuation coefficient and size(width) of the specimen. In the case of PMMA specimen with ligament 43mm the theoretical value for the optimal frequency is about 260 KHz and it is in good agreement with experimental value.

Key Words : Ultrasonic fractography(초음파 프랙토그래피), Fracture Velocity(파괴속도), Optimal frequency(최적 주파수)

1. 서 론

유리와 같이脆성이 큰 재료의 파단면을 주의하여 보면 半圓形의 곡선이 이따금씩 여러개 나타나 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 진행중에 있는 龜裂이 어떠한 부분으로부터 나온 音波(橫波)와 만났을 때 일어나는 흔적으로 Wallner 線이라고 한다. 超音波 Fractography는 破壞試驗시 강력한 超音波를 사용하여 파단면에 이와같은 Wallner 線을 人工的으로 발생시켜, 破面해석을 통하여 破壞速度 등 破壞研究에 필요한 情報를 얻는 方法이다.

이 方法은 유리와 같은 非晶質 彈性體의 破壞速度 測定을 위해 Kerkhof¹⁾에 의해 최초로 고안되었으며,

樹脂와 같은 粘彈性材料에 대해서는 Takahashi²⁾에 의하여 PMMA (Polymethyl Methacrylate)재에 강력한 超音波를 사용하여 그 可能性이 제기된 이후 PMMA와 EPOXY재 등 粘彈性材料의 破壞速度測定^{3) 4)}과 破壞 剛性^{5) 6)}등의 測定에 본격적으로 研究되기 시작하였다.

그러나 지금까지 이러한 超音波 Fractography에 의하여 파괴속도를 측정하고자 할 때 그에 적당한 주파수 선정에 대한 기준이 없어 임의로 주파수를 적용하여 시험하게 되는데 어느 適正周波數 보다 지나치게 높은 周波數를 사용할 경우 超音波의 減衰가 심해짐으로 해서, 초음파진동자로부터 멀리 떨어진 곳에서는 Wallner 線이 나타나지 않아 파괴속도의 측정을 할 수 없게 되며, 또한 이와 반대로 낮은 周波數를 사용할 경우 破

* 漢陽大學校 大學院 精密機械工學科(정희원)

** 漢陽大學校 精密機械工學科(정희원)

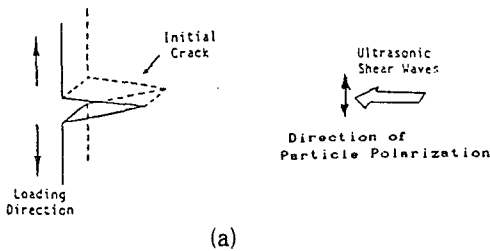
斷面 전체에 걸쳐 Wallner 線의 鮮明도가 떨어지게 되어 破壞速度測定의 誤差가 될 수 있다.

따라서 Wallner 線이 破斷面에 가장 鮮明하게 나타날 수 있게 되는 周波數의 選定이 필요하다. 本研究에서는 Wallner 線이 破斷面에 가장 鮮明하게 나타나게 되는 조건을 만족하는 周波數 選定에 관한 식을 제시하고 實驗을 통하여 이식의 妥當性을 증명하고자 한다.

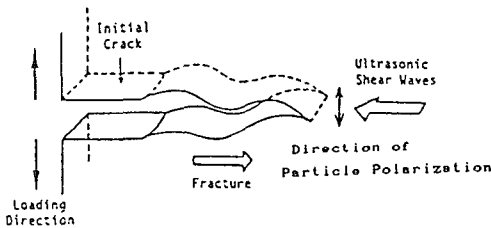
2. 理 論

2-1. 超音波 Fractography에 의한 破壞速度 測定의 原理

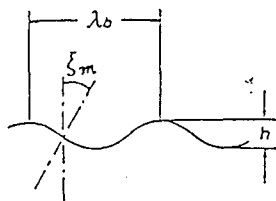
Fig. 1-(a)는 노치를 가진 引張實驗片에 작용하는 荷重의 방향과 超音波(橫波)의 進行方向을 보여주고 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 Schematic drawing of ultrasonic fractography

龜裂 先端의 主應力 方向은 입자의 분극방향의 하중 方向과 동일하고 이와 수직으로 전파하는 橫波에 의한 剪斷應力에 의하여 週期的으로 變한다.

따라서 龜裂이 이러한 應力場變化에 충실히 응답하면서 進行할 조건(超音波의 周波數, 振幅, 재료의 脆性 등)이 만족되면 破斷後의 破斷面에는 Fig. 1-(b)와 같은 週期的인 凹凸이 생기게 되는데, 이것을 Wallner 線이라고 한다.

Fig. 1-(c)는 이러한 破斷面의 Wallner 線을 模式的으로 나타낸 것이다. (Fig. 1)

그림에서 λ_b 는 Wallner 線의 波長을, h 는 깊이, ξ_m 는 最大傾斜角度를 나타낸다. Fig. 1-(a)에서와 같이 超音波의 進行方向이 荷重方向과 서로 垂直인 경우 入射 超音波의 周波數와 波長을 각각 f 및 λ_t , Wallner 線의 波長을 λ_b 라고 하면 破壞速度 V_f 는 다음식(1)로 된다⁷⁾.

$$V_f = \lambda_b f / (1 - \lambda_b / \lambda_t) \quad (1)$$

이 식에서 入射超音波의 周波數 f 와 波長 λ_t 를 알면, 破斷面의 Wallner 線의 波長 λ_b 를 測定하여 破壞速度를 구할 수 있게 된다.

Wallner 線의 波長 λ_b 는 破斷面寫眞으로부터 측정하든가, 表面거칠기 측정기에 의하여 측정할 수 있다.

2-2. Wallner 線의 最大傾斜角度

Fig. 1-(c)에서 Wallner 線의 形狀을 正弦波로 가정하면 Wallner 線의 最大傾斜角度 ξ_m 는 다음식(2)로부터 구할 수 있다⁵⁾.

$$\xi_m = \pi h / \lambda_b \quad (2)$$

식에서 h 와 ξ_m 는 龜裂先端의 應力狀態나 材質特性에 대한 정보를 파악하는 인자로 사용될 수 있는데, Wallner 線의 깊이 h 는 超音波의 1波長에 대한 龜裂의 應答特性을 나타내며, Wallner 線의 最大傾斜角度 ξ_m 는 橫波의 剪斷應力에 대한 응답특성을 나타낸다.

超音波에 의하여 時時각각 變化하는 龜裂先端의 應力 상태에 직접적으로 관련되는 것이 Wallner 線의 最大傾斜角度 ξ_m 이며, 이각이 크면 클수록 Wallner 선이 鮮明하게 보일 것이므로 Wallner 線の 鮮明度 判斷의 基準이 될 수 있다.

따라서 本研究에서는 超音波 Fractography에 의한 破壞速度의 精密測定에 필요한 Wallner 線에 대한 鮮明度の 基準으로 Wallner 線의 最大傾斜角度 ξ_m 를

사용하기로 한다.

2-3. 최적주파수

Fig. 2에서와 같이 σ_0 의 引張應力을 받는 龜裂先端에 橫波超音波에 의한 剪斷應力 σ_t 가 주기적으로 작용하면, σ_t/σ_0 에 비례하여 最大主應力의 방향이 변동된다. (Fig. 2)

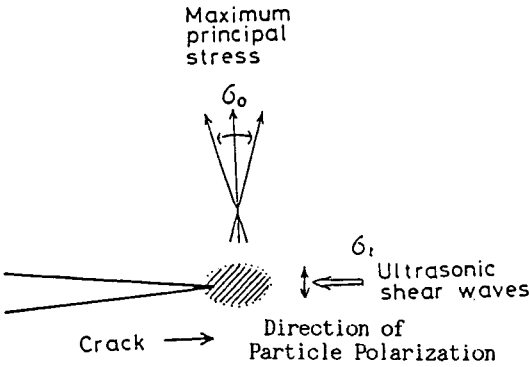


Fig. 2 Modulation of propagating crack front by ultrasonic shear waves

이러한 應力場속에 脆性龜裂이 존재하면 最大主應力의 방향에 수직방향으로 龜裂이 진전하기 때문에 最大主應力의 방향 변화와 더불어 龜裂進展의 방향도 變動해 간다.

Erdogan과 Sih⁸⁾에 의하여 應力變動의 초기단계에 있어서의 균열방향은 다음식과 같이된다.

$$\xi = 2K_{II} / K_I \quad (3)$$

여기서 ξ 는 진전되기전의 균열과 진전되어 굽어진 균열의 접선이 이루는 각도이며, K_I 과 K_{II} 는 각각 Mode I과 Mode II의 應力擴大係數이다.

여기서 K_{II} 의 最大値를 $K_{II\max}$ 라 하고 이것에 대응하는 ξ 의 最大値를 ξ_m 이라고 하면 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$\xi_m = 2K_{II\max} / K_I \quad (4)$$

Kuppers⁹⁾에 의하면 橫波의 音壓振幅 P_{tm} 과 波長 λ_t 인 橫波 荷重場에서의 應力擴大係數 $K_{II\max}$ 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$K_{II\max} = P_{tm} \lambda_t^{1/2} / \pi \quad (5)$$

식 (5)을 식 (4)에 대입하면 다음식과 같이 된다.

$$\xi_m = 2P_{tm} \lambda_t^{1/2} / \pi K_I \quad (6)$$

한편 超音波音壓은 音波의 放射(divergence)와 傳達媒質에서의 吸收(absorption) 또는 散亂(scattering)에 의하여 減衰하는데, 방사에 의한 음압 감쇠의 경우 면적이 S인 사각형 피스톤 음원으로부터 거리 d 만큼 떨어진 원거리 음장역에서의 음압은 다음 식으로 된다¹⁰⁾.

$$P = P_0 S / \lambda_t d \quad (7)$$

식에서 λ_t 는 초음파의 파장이며, 초기음압 P_0 가 실효치이면 P도 실효치가 된다.

또한 音의 吸收 또는 散亂에 의한 減衰로 인한 초음파 진동자로부터 거리 d인 곳에서의 音壓은 음원으로부터 방출되는 음압을 P_0 라고 할 때 다음식으로 주어진다¹¹⁾.

$$P = P_0 e^{-\alpha d} \quad (8)$$

Mason과 Mcskimin¹²⁾은 超音波가 媒質속을 傳播해 나갈 때 발생하는 超音波의 減衰를 吸收에 의한 減衰와 結晶粒境界에서의 散亂에 의한 감쇠로 분류하고, 吸收에 의한 減衰의 경우 감쇠계수는 周波數에 비례한다고 보고하였다.

따라서 超音波 Fractography는 주로 유리 또는 PMMA와 같은 比晶質재료에 적용되고, 比晶質 材料에서의 減衰는 주로 音波의 吸收에 의한 것이므로 減衰係數는 다음식과 같이 주파수에 대한 1차함수로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = af \quad (9)$$

식에서 a는 比例常數이고 f는 周波數이다. 따라서 音의 放射 및 吸收에 의한 減衰를 모두 고려한 진동자로부터 거리 d 만큼 떨어진 곳에서의 音壓은 식 (7), (8), (9)를 合成하여 다음식으로 표시된다.

$$P = P_0 S e^{-afd} / \lambda_t d \quad (10)$$

또한 音壓振幅 P_{tm} 과 音壓의 실효치 P는 서로 다음과 같은 관계가 있다¹³⁾.

$$P_{tm} = \sqrt{2} P \quad (11)$$

식 (10)을 식(11)에 代入하면 다음과 같이 된다.

$$P_{tm} = \sqrt{2} P_0 S e^{-afd} / \lambda_t d \quad (12)$$

또한 音速 C_t , 周波數 f, 波長 λ_t 사이에는 $\lambda_t = C_t/f$ 의 관계가 있으므로 이 관계를 代入하면 식 (12)는

다음식과 같이된다.

$$P_{tm} \approx \sqrt{2} P_o S f e^{-afd} / C_t d \quad (13)$$

따라서 식 (13)을 식 (6)에 代入하면 다음과 같은 Wallner 線의 傾斜角度 ξ_m 과 周波數 f 와의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\xi_m = \sqrt{8} P_o S f^{1/2} e^{-afd} / \pi K_I C_t^{1/2} \quad (14)$$

2.2절에서 언급한 바와 같이 Wallner 線이 가장 鮮明하게 나타나는 조건은 Wallner 線의 傾斜角度 ξ_m 이 가장 크게 될 때이며, 식 (14)에서 ξ_m 이 가장 크게 되는 조건을 만족하는 周波數 f 에 대한 조건은 $d\xi_m/df = 0$ 을 만족하는 f 의 값이므로, P_o , S , K_I , d , C_t 는 모두 상수로 간주하고 미분하면 다음과 같이 된다.

$$d\xi_m/df = \sqrt{8} P_o S e^{-afd} (1/2f^{-1/2} - a d f^{1/2}) / \pi K_I C_t^{1/2} d = 0 \quad (15)$$

따라서

$$f = 1 / 2ad \quad (16)$$

식 (16)에서 d 는 振動子로부터의 거리인데 식 (14)에서 예측할 수 있는 바와 같이 거리 d 가 커질수록 Wallner 선의 傾斜角度 ξ_m 의 값이 작아지고, 試驗片 내에서 d 의 값이 가장 最大가 되는 부위는 初期龜裂先斷部이며, 이 部位에서 Wallner 線의 傾斜角度가 가장 작아지게 될 것이다.

따라서 이부위에서의 Wallner 선의 경사각도가 가장 커지도록 하는 것이 破斷面 전체에 걸쳐 Wallner 線의 傾斜角度가 가장 커지게 되는 조건, 즉 破斷面 전체에 걸쳐 Wallner 線이 가장 鮮明하게 나타날 조건이 될 것이다.

따라서 振動子로부터 初期龜裂先斷部까지의 거리 (Ligament) 를 d_o 라고 하면 初期龜裂先斷部에서 Wallner 線의 傾斜角度가 가장 커지게 되는 조건을 만족하는 周波數는 위의 d 대신 d_o 를 代入하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$f_{opt} = 1 / 2ad_o \quad (17)$$

식에서 a 는 減衰係數에서의 比例常數로 試驗片의 材質에 의존하는 값이고, d_o 는 리거먼트(Ligament)로서 試驗片의 크기에 의존하는 항이다.

따라서 식 (17)은 시험편의 과단면 전체에 Wallner 선을 가장 선명하게 형성시키기 위해서는 試驗片의 材

質 및 試驗片의 크기에 따라 試驗周波數를 달리해야 한다는 것을 示唆하고 있다. 즉 감쇠계수의 비례상수가 큰 재료일 경우, 초음파 Fractography 시험에 요구되는 주파수(최적주파수)는 낮으며, 이와 반대로 비례상수가 작은 재료일수록 높은 주파수를 필요로 한다는 것을 의미한다. 또한 시험편의 크기, 즉 리거먼트가 큰 시험편을 시험하고자 할 경우에는 낮은 주파수를 사용하여야 하고, 리거먼트가 작은 시험편을 시험하고자 할 경우에는 그만큼 높은 주파수를 사용해도 좋다는 것을 의미하고 있다.

또한 초음파 진동자 또는 초음파 발생기 성능등의 이유로 해서 시험하고자 하는 주파수를 변화 시킬 수 없는 경우, 감쇠계수의 비례상수가 큰 재료는 리거먼트를 작게하여야 하나, 감쇠계수의 비례상수가 작은 재료의 경우에는 그만큼 리거먼트를 크게 해도 좋다는 것을 의미한다.

3. 실험

3-1. 試驗片

本 研究에서 사용한 시험편의 材料는, 熱可塑性高分子 材料인 PMMA (Polymethyl-methacrylate) (三菱 레이온 : 아크리리트 S, 평균분자량 $M_w = 2.3 \times 10^6$)이며, 이 材料의 材料定數는 Table 1과 같다.

Table 1 Material property of PMMA

종탄성계수 (GPa)	횡탄성계수 (GPa)	프와송비	밀도 (kg/m ³)	종파속도 (m/s)	횡파속도 (m/s)
5.97	2.23	0.28	1170	2540	1380

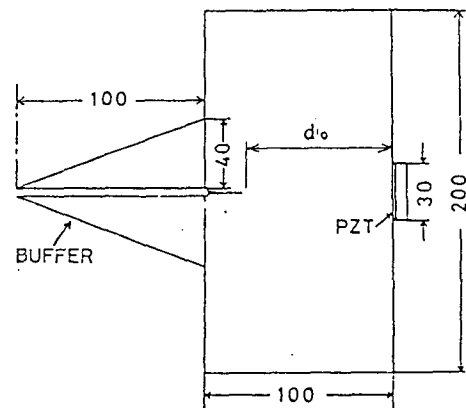


Fig. 3 Single-edge-cracked type specimen

시험편의 형상은 Fig. 3에서와 같이 200 * 100 * 5mm인 직사각형 관재의 편축증상에 임팩터에 의하여 7mm 정도의 예리한 初期龜裂(Precrack)을 넣은 SEC 시험편(single-edge-cracked type specimen)으로 하고, 反射波의 영향을 제거 시키기 위하여 2매의 삼각형 버퍼(Buffer)를 접착시켰다. 또한 진동자 단면의 세로 방향으로 진동하는 횡파용 PZT 超音波 振動子(단면적 10*30mm, 富士 세라믹스社 製)는 初期龜裂과 반대편에 에폭시계 強力接着劑로 接着하였다. (Fig. 3)

3-2. 實驗方法

3-1절에서와 같이 제작된 시험편을 引張試驗機(島津製作所製 Instron type UTM)에 裝着하고 시험편에 부착된 振動子에 각각 實驗周波數에 해당하는 周波數(150, 200, 250, 350 kHz)의 超音波(횡파)를 연속적으로 發生 시키면서, 100 mm/min의 速度로 引張試驗을 하였다.

이때 超音波의 音壓을 一定하게 할 목적으로 超音波 振動子의 入力電壓은 모두 500V로 하였다.

이와같이 引張試驗한후 시험편의 破斷面을 관찰하여 보면 주기적인 凹凸(Wallner 線)이 형성되어 있는데, 이것을 工具顯微鏡(Olympus사)과 表面거칠기 測定機(Rank Taylor Hobson사 FTS-S5)를 사용하여 그 破斷面의 破面解析을 하였다.

이때 破斷面に 형성된 Wallner 線은 거칠기 成分보다 波長이 긴 波狀度(waviness) 成分으로 볼 수 있으므로, 表面거칠기 측정기에 의한 破面解析시, Cut-off 치 0.8로 低域필터를 설정하여 거칠기성분을 제거하고 波狀度 成分만을 취하였으며, 종배율 2000배, 횡배율 10배로 하여 파상도의 높이 h는 10⁻²μm까지, 파장 λ_b는 10μm까지 측정 하였다.

4. 實驗結果 및 考察

Fig. 4는 周波數 200 kHz일 때의 超音波 傳播距離 d에 대한 Wallner 線의 傾斜角度 ξ_m의 변화를 나타낸 것으로, 식 (14)에서 구한 이론치와 실험치를 비교하여 나타낸 것이다.

식 (14)의 P₀, K₁의 값은 小城¹⁴⁾의 연구결과로부터 얻은 값을 대입하였으며, 문헌(15)에 의하면 주파수가 1 MHz일때 PMMA의 감쇠계수 α=0.45Np/Cm이므로 감쇠계수에서의 비례상수 a는 다음과 같이 구하였다.

$$a = \alpha / f = 0.45 \text{ Np/MHz} \cdot \text{Cm}$$

그림에서 보는 바와 같이 理論値와 實驗値 모두 거리 d에 따라 傾斜角 ξ_m이 減少되어가는 것을 볼 수 있는데, 超音波 振動子와 거리가 가까운 곳에서는 理論値와 實驗値 사이에 많은 차이가 있으나 그거리가 멀어질수록 實驗値는 理論値에 近접하는 것을 볼 수 있다. (Fig. 4)

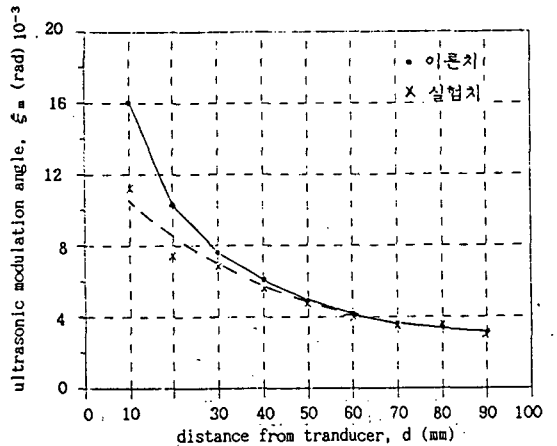


Fig. 4 Relation of ultrasonic modulation angle and distance from transducer at 200 kHz

이와같이 超音波 振動子와의 거리가 가까운 곳에서 理論値와 實驗値 사이에 큰 차이를 보이는 것은 식 (14)을 유도하는데 사용된 音의 放射에 의한 音壓의 減衰에 관한식(7)이 遠距離 音場域(근, 원거리 음장 경계값 N=15mm)에 해당되는 식이었기 때문이며, 따라서 이식도 遠距離 音場域에서 잘 맞는 식임을 알 수 있다.

Fig. 5는 폭 50mm의 시험편에서 龜裂길이 7mm를 제외한 길이(Ligament) 43mm의 시험편에 대한 周波數와 Wallner 線의 傾斜角度와의 관계를 나타낸 것으로 식 (14)에 의한 이론치와 실험치를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Wallner 線의 傾斜角度 ξ_m이 최대가 되는 周波數(最適 周波數)는 이론식에 의한 그래프에서 약 260 kHz로 나타나 있는데, 이것은 식 (17)에 의하여 구한 최적 주파수에 해당되며, 150, 250, 350 kHz의 3종류의 주파수를 적용하여 試驗한 결과 이중 260 kHz와 가장 가까운 250 kHz에서 Wallner 선의 경사각도가 가장 크게 나타나 이론치와 잘 일치되고 있음을 알 수 있다. (Fig. 5)

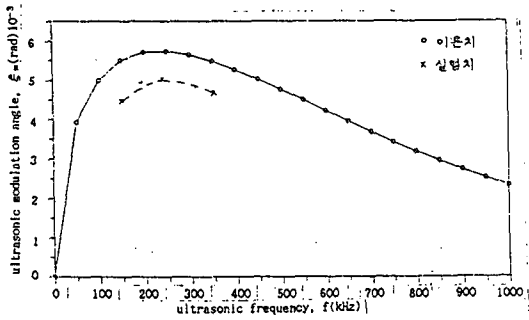


Fig. 5 Relation of ultrasonic frequency and ultrasonic modulation angle

Fig. 6은 PMMA 시험편에 각각 150 KHz, 250 KHz, 350 KHz의 周波數를 작용시키면서 인장시험하여 얻은 破斷面中 초기균열 부근에서의 사진과 표면거칠기 측정기로 측정한 波狀度の 일부이다. 사진에서 밝은 부분은 Wallner 선의 산부를 나타내고, 어두운 부분은 골부를 나타낸다.

사진 및 파상도에서 보는 바와 같이 周波數가 높을수록 Wallner 線 사이의 波長은 작아지나 Wallner 線의 傾斜角度는 커지고 있는 것을 볼 수 있으며, 또한 하나의 波斷面에 대해서도 超音波 振動子와 가까운 질수록(그림의 右側방향), Wallner 線의 傾斜角度는 커지고, 그에 따라 破斷面上的의 Wallner 線이 鮮明하게 나타남을 볼 수 있다. (Fig. 6)

Fig. 7은 PMMA제에 각각 150, 250, 350 KHz의 주파수에 대하여 시험하여 얻은 超音波 振動子와의 거리에 따라 변화하는 Wallner 線의 傾斜角度를 그래프로 도시한 것이다.

그래프에서 보는 바와 같이 周波數가 높을수록 初期(振動子 接着部 近方) Wallner 線의 傾斜角度는 커지나, 진동자로부터의 거리에 따라 경사각도의 감소율이 커지며, 周波數가 낮으면 낮을수록 초기 Wallner 선의 경사각도는 작아지고, 그에 따라 진동자로부터의 거리에 따른 경사각도의 감소율도 작아져감을 알 수 있다.

따라서 最適周波數(260 kHz)보다 지나치게 높은 周波數를 사용할 경우 減衰가 심해져 진동자로부터 거리가 먼곳에서는 Wallner 線이 나타나지 않을수도 있으며, 지나치게 낮은 周波數를 사용할 경우 전체적으로 Wallner 선의 鮮明度가 떨어지게 됨으로서 破壞速度 測定의 誤差가 됨을 추정할 수 있다. (Fig. 7)

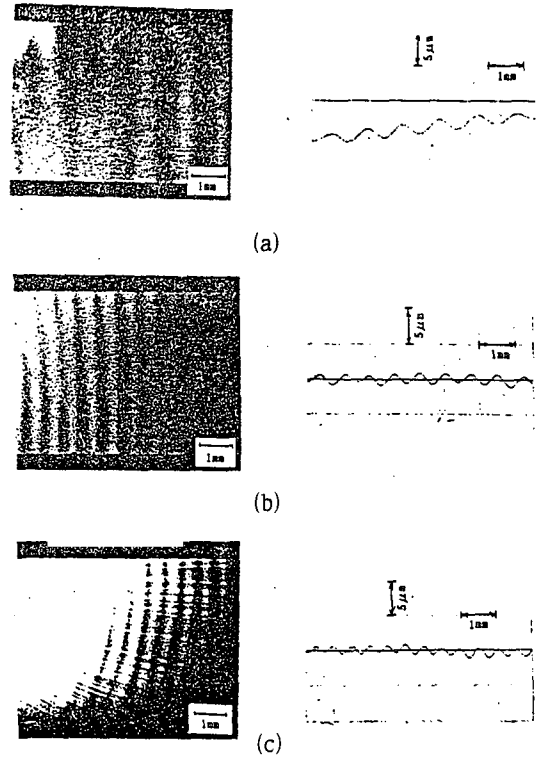


Fig. 6 Photo and waviness of rupture face of specimen at 150 kHz(a), 250 kHz(b), 350 kHz(c)

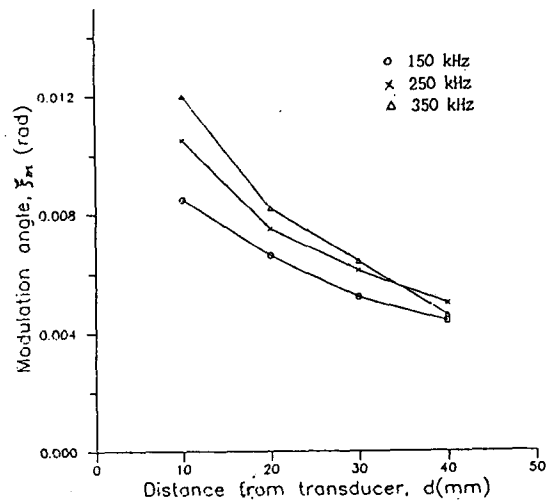


Fig. 7 Relation of ultrasonic modulation angle and distance from transducer at 150 kHz, 250 kHz, 350 kHz

5. 결 론

超音波 Fractography에 의한破壊速度測定時, 破壊速度의精密測定을 위한最適周波數選定에 관한研究結果 다음과 같은結論을 얻었다.

1. 超音波 Fractography에 의한破壊速度의精密測定을 위한最適周波數選定에 관한식 $f_{opt} = 1/2ad_0$ 을 제시하였으며, 식으로부터最適周波數는實驗材의 음향학적 성질(감쇠계수의 비례상수 a) 과 시편의 크기(Ligament d_0)에 의존함을 알 수 있다.
2. 실험결과 이식은 근거리음장역에서는 실험치와 많은 차이가 보이나 遠距離音場領域으로 갈수록 실험치에 접근함을 알 수 있었다.
3. Ligament 43mm인 PMMA 시험편의 경우 이론식에 의한最適周波數는 약 260 kHz이였으며, 이 결과는實驗値와 잘 일치되고 있다.
4. 周波數가 높을수록 진동자 부근에서의 Wallner 線의 경사각도는 커지나 그에 비례하여 진동자로부터의 거리에 따른 경사각도의 감소율은 커지며, 周波數가 낮을수록 진동자 부근에서의 Wallner 線의 경사각도는 작아지며 그에 비례하여 진동자로부터의 거리에 따른 경사각도의 감소율도 작아진다.

참고문헌

1. F. Kerkhof : Analyse des sproden zugbruches von Glasern mittels ultraschall. naturwissenschaften. 40 P.478, 1953
2. K. Takahashi, K. Matsushige and Y. Sakurada : Application of ultrasonic Fractography to Visco-elastic Materials. Proc. 2ne Symp. on Ultrasonic Electronics, Tokyo, 1981, Jpn. J. Appl. Phys. 21 Suppl. 21-3, P.123, 1982.
3. K. Takahashi, K. Matsushige and Y. Sakurada : Cyclic modulation of moving cracks in glassy polymers by ultrasonic shear waves. J. Mater. Sci. 19, P.527, 1984
4. K. Takahashi, T. Ogihara : Fast fracture of Poly(Methyl Methacrylate) under pressure, J. of the Society of Materials Science. Vol. 40, No. 449, PP.185~191, Feb. 1991
5. K. Takahashi, and S. Hyodo : Experimental determination of the rigidity Modulus of PMMA near a running crack tip. J. Macromol. Sci-Phys. B19, P.695, 1981
6. H. Kojoh, K. Arakawa, K. Takahashi : Dynamic Crack Response to Mode II Ultrasonic Shear Wave Loading, 日本機械學會論文集(A編) 55권 512호, PP.965~969, 1989~4
7. 高橋清, 松重和美, 櫻田泰弘, 馬田俊雄 : ポリマーの不安定破壊 發生値後の破壊速度の精密測定, 九州大學應用力學研究所 所報, 第57號, P.285, 1982
8. F. Erdogan and G.C.Sih : On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, J. Basic Eng.-Trans. ASME, 85D, P.519, 1963
9. H. Kuppers, Wiss. Bericht, 4/66, Ernst-Mach Inst., 1966
10. 超音波 採傷試驗 Ⅲ, 日本非破壞檢査協會, 1989, P.12
11. J. Krautkramer, H. Krautkramer : Ultrasonic Testing of Materials, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1977, P.108
12. Mason, W.P., McSkimin, J.H. : Attenuation and Scattering of high frequency sound waves in metals and glasses, J.A.S.A. 19, PP.464~473, 1947
13. 日本學術振興會 : 超音波 採傷法, 日刊工業新聞社, 1974, P.17
14. 小城宏樹, 超音波 フラクトグラフィーによる高分子材料の動的破壊に関する研究 九州大學 博士學位論文, 1989. 12, P.73
15. 超音波 技術便覽(新定版), 日刊工業新聞社, 1987, P.1789