논 문

非 破 壞 檢 査 學 會 誌
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing.
Vol.13, No. 3 (1993)

초음파의 가시화에 의한 진동자의 공진주파수 측정에 관한 연구

이 범 성*, 한 응 교**, 송 창 섭**
*한양대학교 대학원 정밀기계공학과
**한양대학교 정밀기계공학과

요 약 가시화 시험을 통하여 시험편에 부착된 초음파 진동자의 공진주파수의 측정을 시도하였다. 그 결과 시험편에 부착되어 있는 진동자의 공진주파수는 진동자 자체만의 공칭 공진주파수 보다 훨씬 낮게 나타났고, 그 정도는 주파수가 높은 진동자일수록 심하게 나타나는 것을 볼수 있었는데, 이론적인 해석에 의한 검증 결과 그 원인이 진동자 보호용 알루미늄 판재의 공진에 의한 것으로 판명되었다.

1. 서 론

초음파 fractography 시험[1]및 초음파가공[2]등 초음파의 에너지를 사용 하는 경우에 하나의 주파수만 이용하는 경우가 많으며, 또 공진을 이용하지 않으면 효율이 나빠지므로 가능한 한 강력한 초음파를 발생시키기 위해 공진형 초음파 진동자를 이용, 그 진동자의 공진주파수로 진동자를 발진시켜 사용하고 있다.

이와같은 공진형 초음파 진동자의 경우 그 진동자의 공진주파수를 알아내지 않으면 안되는데, 현재 진동자의 공진주파수를 측정하는 방법으로는 1)리사쥬 도형(lissajous figure)에 의한 방법, 2)플레이트 딥 미터(plate dip meter)를 이용하는 방법 3)공진 브리지회로를 이용하는 방법등이 이용되고 있다.[3]

그러나 이러한 방법은 초음파의 전파 상태를 확인할 수 없기 때문에 진동자의 상태라든가 진동자와 매질 경계층과의 접촉상태에 의해서 공진주파수의 측정오차에 미칠 수 있는 영향을 파악할 수 없는 단점이 있다.

특히 초음파 fractography 시험에 사용되는 초음파는 횡파를 사용하고 있으며 횡파는 전단 응력의 상태로 전파하므로 횡파 초음파 발생용 진동자에서 발생하는 횡파를 매질에 전달 시키기 위해서는 진동자를 매질에 접착시키지 않으면 안된다.

이 때문에 진동자의 공진주파수는 접착부의 상태 및 매질에 따라 달라질수 있는데, 이와같은것들을 확인하기 위하여 공진주파수의 측정시 초음파의 전파상태를 관찰 하면서 공진주파수를 측정 할 수 있는 방법이 필요하다.

이때 초음파의 전파상태를 관찰 할 수 있는 방법, 즉 초음파의 가시화법에 대해서도 다각적으로 연구되어 오고 있는데[4)-13)], 투명한 고체속의 초음파 진행상태의 가시화를 위한 방법으로 굴절무늬법(schlieren method)과 광탄성법(photoelastic method)등이 이용되고 있으며, 이중에서 종파, 횡파의 양성분을 관측 하는데에는 광탄성법이 유리하므로[17] 본연구에서는 초음파의 가시화를 위한 방법으로 광탄

(접수 : 1993. 7. 22)

성법을 사용하였다.

현재까지 이와 같은 광탄성법에 의한 가시화를 응용한 연구로는 매질속을 전파해 가는 초음파의 음장및 매질 경계부에서의 반사파의 관찰[14)-16)]과 음압및 음압분포등의 측정[17)-19)]이 있을 뿐이다.

따라서 본 연구에서는 초음파의 가시화법에 관한 응용으로, 초음파의 전파상태의 관찰을 통하여 진동자의 상태등을 확인하며 공진주파수를 측정할 수 있는 방법을 제시하고저 한다.

2. 이론 및 원리

2.1. 광탄성 이론[20)]

본 연구에 사용된 광탄성 실험장치는 Fig. 1과 같이 편광자 P 및 1/4파장판 Q_1, Q_2, 검광자 N로 구성되어 있는데, P와 N의 주축의 방향은 서로 직각으로 교차하도록 되어 있으며, Q_1, Q_2는 각각 P, N에 대하여 45°가 되도록 배치하였다.

보통 광탄성 실험에서는 편광자(polarizer) P와 검광자(analyzer) N만을 이용하는 방법도 있는데, P, N만을 이용하면 주응력의 방향을 나타내는 등경선과 주응력차의 값을 나타내는 등색선이 중첩되어 나타나기 때문에, 주응력차만을 고려하고저 할 경우 등경선이 함께 나타나면 등색선을 판정하는데 방해가 될수 있다.

따라서 P, N외에 1/4 파장판 Q_1, Q_2을 사용하여 원편광으로 하면 등경선을 제거하여 주응력차의 정보인 등색선 만을 나타내게 할 수 있으며 그 원리는 다음과 같다.

광원으로부터 들어온 빛은 편광자 P 에 의하여 평면편광(plane polarized light)으로 변화 되는데, 편광자 P를 통과한 I의 위치에서의 편광벡터는 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$A = a \sin\omega t \quad \cdots\cdots (1)$$

식에서 a는 진폭, ω는 각속도, t는 시간이다.

이빛이 다시 1/4 파장판 Q_1에 들어오면 2개의 평면편광으로 나뉘어지고 이것을 통과한 II의 위치에서는 다음과 같은 위상차 $\pi/2$를 갖는 두개의 편광벡터로 표시되는 원편광(circularly polarized light)으로 된다.

$$A_3 = (a/\sqrt{2})\sin(\omega t + \pi/2) = (a/\sqrt{2})\cos\omega t$$
$$A_4 = (a/\sqrt{2})\sin\omega t \quad \cdots\cdots (2)$$

이 원편광이 응력을 받고있는 시험편에 들어오면 다시 주응력 σ_1, σ_2 의 두방향으로 나뉘어지며, 이 시험편을 통과한 III의 위치에서는 1/4 파장판과 주응력이 이루는 각도를 ϕ, 위상차를 δ라고하면 다음과 같은 편광벡터를 갖는 타원편광(elliptically polarized light)으로 된다.

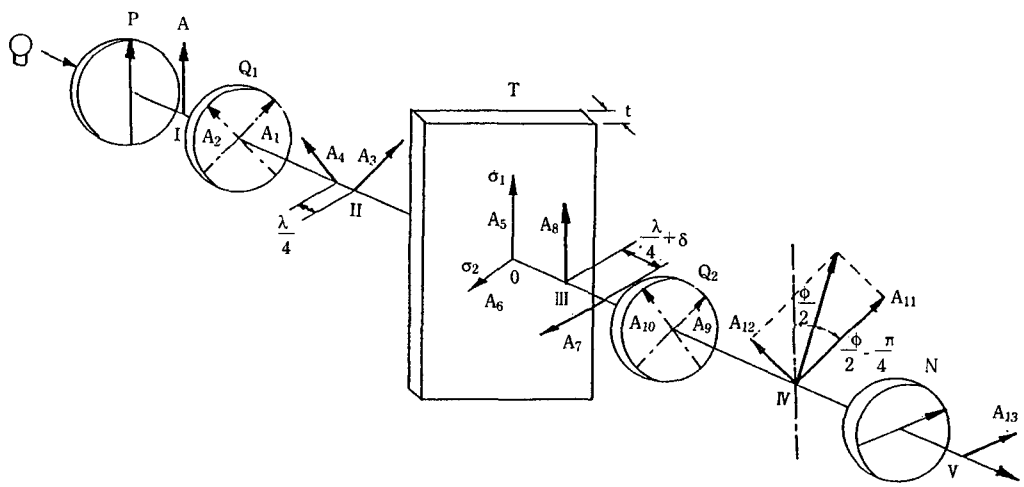


Fig 1. Photo elastic system

$$A_7=(a/\sqrt{2})\cos(\omega t-\phi+\delta)$$
$$A_8=(a/\sqrt{2})\sin(\omega t-\phi) \quad \cdots\cdots (3)$$

이 타원편광이 다시 1/4 파장판 Q_2 를 통과하면 $-\pi/2$의 위상차가 생기고 다음과 같은 두개의 편광벡터를 갖는 평면편광으로 변화된다.

$$A_{11}=a/\sqrt{2}\,[\cos(\omega t-\phi+\delta-\pi/2)\cos(\pi/4-\phi)+\sin(\omega t-\phi-\pi/2)\cos(\pi/4+\phi)]$$
$$A_{12}=-a/\sqrt{2}\,[\cos(\omega t-\phi+\delta)\cos(\pi/4+\phi)-\sin(\omega t-\phi)\cos(\pi/4-\phi)] \quad \cdots\cdots (4)$$

이 빛이 검광자 N을 통과하면 이두개의 편광벡터는 합성되어 다음과 같은 하나의 편광벡터로 된다.

$$A_{13}=1/\sqrt{2}(A_{11}-A_{12})$$
$$=a\ \sin\delta/2\ \cos(\omega t-2\phi+\pi/4+\delta/2) \quad \cdots\cdots (5)$$

이때 검광자를 통과한 빛의 강도는 진폭의 자승에 비례하므로 빛의 밝기 I는 다음 식으로 된다.

$$I=a^2\sin^2(\delta/2) \quad \cdots\cdots (6)$$

2.2. 광탄성법에 의한 초음파의 가시화 및 공진주파수 측정 원리

투명한 매질속을 전파해가는 초음파는 광학적으로 매질의 굴절율을 시간적, 공간적 변동으로 변화시킨다.

이와같이 초음파에 의하여 매질의 굴절율이 변화되는 이유는 매질에 어떠한 형태의 응력이 작용하게 되기 때문이며, 이 음장에 주응력축에 대하여 45°의 각을 이루는 평면편광이 들어오면 주응력축 방향으로 진동하는 두개의 평면편광으로 나뉘어지고, 이 음장을 통과하면 다음 식과 같이 주응력차에 비례하는 위상차 δ를 갖는 타원편광으로 된다.[21]

$$\delta=Ct(\sigma_1-\sigma_2) \quad \cdots\cdots (7)$$

식에서 C는 광탄성계수(stress-optical coefficient)이고, t는 광로의 길이(optical path length)즉 매질의 두께에 해당된다.

따라서 초음파에 의하여 발생되는 매질의 응력변동은 광탄성법에 의하여 관찰할수 있으며 그 원리는 다음과 같다.

2.2.1. 종파의 가시화

Fig. 2(a)와 같은 파형의 종파가 진동자로부터 매질에 전파되면 Fig. 2(b)에서와 같은 매질속의 미소요소 A에서는 압축응력과 인장응력이 주기적으로 작용하게 된다.

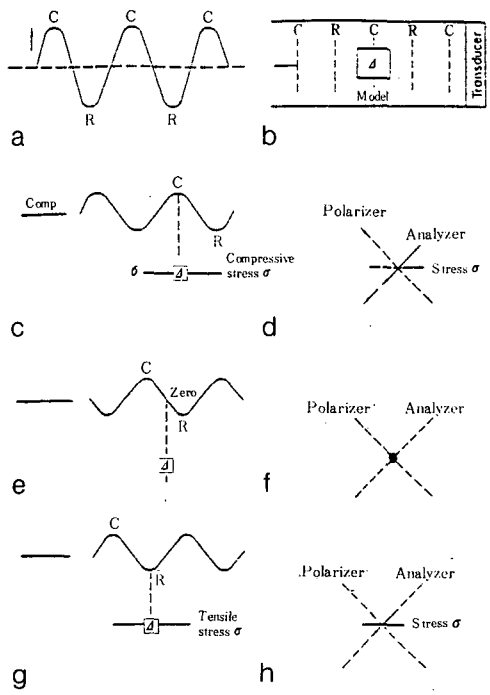


Fig. 2. Principle of visualization of the longitudinal wave
(a) Waveform
(b) Ultrasonic wave transmitted from transducer
(c) Action of a compressive stress on element A
(d) Light passed by analyzer for (c)
(e) Action of zero stress on element A
(f) Light not passed by analyzer for (e)
(g) Action of a tensile stress on element A
(h) Light passed by analyzer for (g)

Fig. 2(c)에서와 같이 압축응력이 작용 할 경우에는 빛은 검광자(analyzer)를 통과하게 되어 상이 밝아지며, Fig. 2(e)와 같이 응력이 0의 상태로되면 빛이 검광자를 통과하지 못하게 되어 어둡게 된다. 또한 Fig. 2(g)와 같이 인장응력이 작용하게 되면 Fig. 2(h)와 같이 빛이 검광자를 통과하게 되고 다시 밝게 나타난다.

따라서 1 cycle 마다 2개의 밝은 구역이 나타나게 되는데, 이와같은 종파의 경우 응력파는 인장, 압축의 형태로 전파 하므로 주응력 σ_2는 0가되고, 주응력 σ_1만이 작용하게 되어 위상차 δ에 관한 식(7)은 다음과 같이 주응력 σ에 대한 1차식으로 된다.[22]

$$\delta = Ct\sigma \quad \cdots\cdots (8)$$

이식을 빛의 밝기에 관한식 (6)에 대입 하면 다음식과 같이 된다.

$$I = a^2\sin^2(Ct\sigma/2) \quad \cdots\cdots (9)$$

식(9)에서 보는 바와 같이 빛의 밝기 I는 초음파에 의하여 발생되는 주응력, 즉 음압진폭에 일시적으로 관련됨을 알수있다.

2.2.2. 횡파의 가시화

Fig. 3(a), (b)와 같이 정현파의 횡파가 매질속에 전파되면, 매질속의 미소요소 A에는 양의 전단응력이 작용하게 되고, 주응력이 미소요소의 대각선방향으로 작용하게 되어, 빛은 검광자를 통과하게 되므로 가시화상은 밝아진다.

또한 Fig. 3(c), (d)와 같이 전단응력이 0이 되면 주응력도 0이 되므로 빛은 검광자를 통과하지 못하게 되어 어두워지게 되며, Fig. 3(e), (f)와 같이 음의 전단응력이 작용하게 되면 역시 대각선방향으로 주응력이 작용하게 되고 빛이 검광자를 통과 하게 되어 다시 밝아지게 된다.

이와 같이 매질에 횡파가 전파 할 때에도 종파의 경우에서와 같이 암흑의 부분을 중심으로 밝은 부분이 2개 나타나게 됨을 알 수 있으며, 전단응력과 주응력 사이에는 일반적으로 $\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau$의 관계가 성립하므로[23] 이 관계를 빛의 밝기에 관한식(6)에 대입 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$I = a^2\sin^2 ct\tau \quad \cdots\cdots (10)$$

식에서 보는 바와 같이 가시화상의 밝기 I는 전단응력 τ의 크기에 의존하는데 이때 전단응력은 음압진폭에 비례하므로 결국 상의 밝기는 초음파의 진폭에 의존하게 됨을 알수 있다.

그런데 랑지방(P. Langevin)[24]은 압전진동자에 공진주파수를 작용시킬 때 초음파의 진폭이 가장 커진다고 하였으므로, 가시화상이 가장 선명하게 나타날때의 주파수가 그진동자의 공진주파수가 됨을 추정할 수 있다.

따라서 진동자에 부가되는 주파수를 변화 시키면서 가시화상의 밝기의 정도를 관찰하므로써, 진동자의 공진주파수를 측정할 수 있음을 알 수 있다.

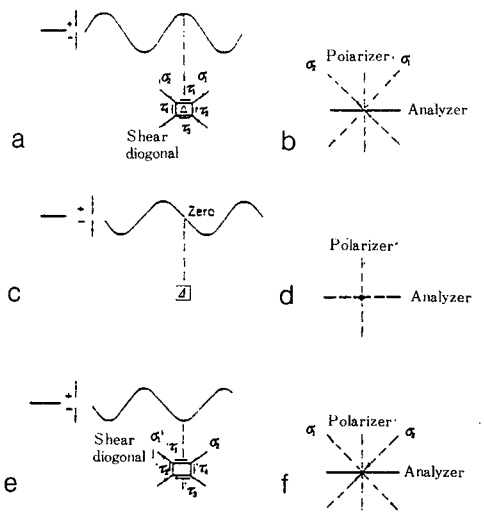


Fig. 3. Principle of visualization of the shear wave
(a) Action of a positive shear stress on element A
(b) Light passed by analyzer for (a)
(c) Action of zero shear stress on element A
(d) Light not passed by analyzer for(c)
(e) Action of a negative shear stress on element A
(f) Light passed by analyzer for(e)

3. 실 험

3.1. 시험편

본 연구에서 사용된 시험편의 재료는 열경화성 고분자 재료인 epoxy(araldite B, 理研 光彈性)이며, 이 재료의 기계적성질및 광, 음향학적 성질은 Table 1과 같다.

시험편의 형상은 Fig.4에서와 같이 200×100×5인 판재의 편측중앙에 충격에 의하여 6mm정도의 예리한 초기균열(precrack)을 넣은 초음파 fractography 시험용 SEC 시험편 (single-edge-cracked type specimen)[25]으로하고, 초음파가 시험편의 경계에서 반사됨으로써 미칠 수 있는 반사파의 영향을 제거시키기 위하여 2매의 직각삼각형 버퍼(buffer)를 접착 시켰다. 또한 PZT 초음파 진동자(단면치수 10×30mm)는 초기균열과 반대편에 에폭시계 강력 접착제로 접착하였다.

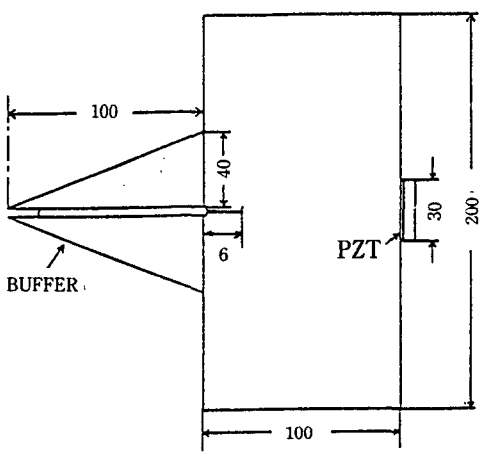


Fig. 4. Specimen for ultrasonic visualization test

3.2. 초음파 진동자

본 연구에 이용된 초음파 진동자는 단면치수 30×10mm 인 직사각형 모양의 지르콘티탄산염(PZT)계 공진형 진동자(當士세라믹스사제)로, 무부하시의 공진주파수는 각각 200kHz(진동자의 두께 t=4.2), 400kHz(t=2.1), 800kHz(t=1.05)이다.

횡파는 전단응력의 형태로 전파하기 때문에 초음파 진동자로부터 피시험체에 초음파를 전파시키기 위해서는 강력접착제를 사용하여 진동자를 피시험체에 접착시키지 않으면 안되는데, 이 때 진동자를 피시험체에 직접 접착하게 되면 진동자를 피시험체로 부터 분리할 때 진동자의 파손을 가져올 수 있으며, 특히 초음파 fractography 시험의 경우에는 시험편이 파단되는 순간에 야기될 수 있는 진동자의 파손을 방지하기 위하여, 두께 약 1mm 정도의 알루미늄판을 진동자에 접착하여 사용하고 있다.

따라서 본 시험에서도 두께 1mm 정도의 알루미늄 판재를 에폭시계 강력접착제로 진동자에 접착하여 시험하였다.

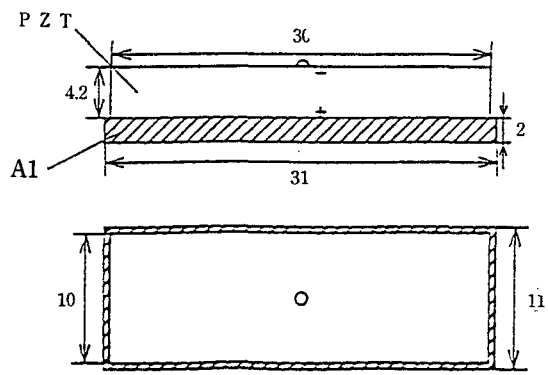


Fig. 5. Ultrasonic transducer

본 실험에 사용된 진동자의 허용전압은 800V인데, 전압인가 시간의 경과로부터 발생할 수 있는 진동자의 劣化와 파괴를 방지하기 위하여 실제 사용전압은 500V 정도로 하였다.

Table 2는 진동자의 재료정수를, Table 3은 초음파 진동자와 알류미늄판 및 시험재(epoxy)의 음향임피던스를 나타낸다.

Table 1. Mechanical and photo-acoustic property of epoxy

재 료	종탄성계수 (GPa) *	횡탄성계수 (GPa) *	프와송 비 *	밀 도 (kg/m³)	종파속도 (m/s)	횡파속도 (m/s)	굴절율	응력광정수 (m²/N)
Epoxy	3.87	1.40	0.39	1220	2490	1070	1.58	9.7×10^{-11}

표에서 *표시는 동적치를 나타냄

Table 2. Material property of PZT

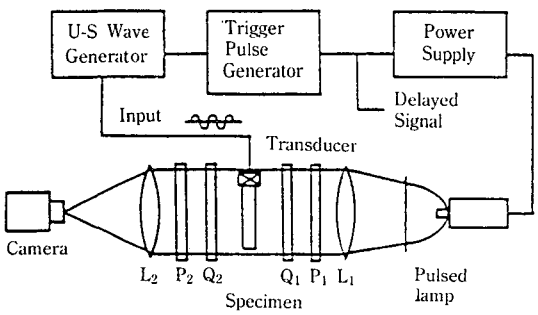
탄 성 정 수 (GPa)	프 와 송 비	주 파 수 정 수 (mm kH)	큐 리 점 (° C)	밀 도 (kg/㎥)
21	0.35	840	320	$7.4*10^3$

Table 3. Acoustic impedance of epoxy, Al and PZT (단위 : kg m^{-2} s^{-1})

Epoxy	Al	PZT
1.31×10^6	8.32×10^6	1.25×10^7

3.3. 가시화 시험장치및 실험방법

Fig. 6및 Photo 1 은 초음파의 가시화를 위해 사용된 광탄성 실험장치의 광학계와 초음파 발생장치에 대한 구성도 및 사진이다.



Q_1, Q_2 : 1/4 λ Plate L_1, L_2 : Lens P_1 : Polarizer P_2 : Analyzer

Fig. 6. Schematic diagram of ultrasonic visualization system

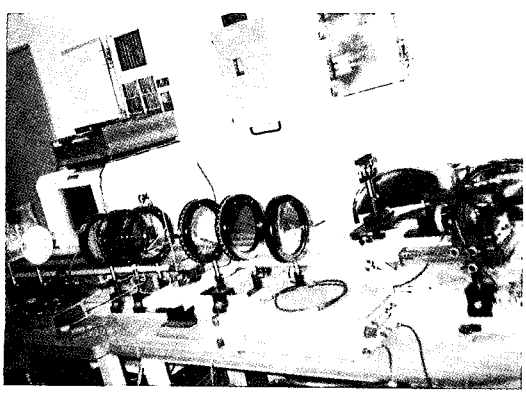


Photo 1. Photo elastic type ultrasonic visualization system

초음파 발생기에서 설정한 어느 주파수를 갖는 전기신호는 광학계의 중앙에 위치한 시험편에 접착되어 있는 진동자에 전달 되어 초음파가 발생되고, 이 초음파는 시료속을 전파해간다.

이와 같은 초음파 발생장치와 광학계가 동기되어 작동 하도록 되어 있는 trigger pulse generator에서 발생한 펄스신호는 전력공급장치의 스위치 회로를 개폐하여 광원(lamp)이 펄스상의 빛을 발생한다.

광원에서 방사하는 빛은 시야렌즈 L_1, 편광자 P_1, 1/4 파장판 Q_1을 통과하여 시료에 조사되고, 시료를 통과한 빛은 다시 1/4 파장판 Q_2, 편광자 P_2, 시야렌즈 L_2를 통하여 나타난 상을 카메라로 촬영하도록 되어있다.

본 장치에 사용된 광원은 발광지속시간이 180 nsec인 강력한 광펄스 발생장치(管原製作所 ; 나노라이트)를 이용하였으며, 진동자에 인가하는 주파수를 진동자의 공칭 공진주파수에 해당하는 주파수로부터 점차적으로 내려가며, 카메라를 통하여 초음파 음장의 상태를 관찰하다가 진동자로부터 전파되는 초음파의 음장이 가장 선명하게 나타나는 주파수및 그 주파수로 부터 10 kHz 전후의 주파수에 대한 가시화상을 사진 촬영하였다.

4. 시험결과 및 고찰

Photo 2,3,4 는 각각 공진주파수 200kHz, 400kHz, 800kHz의 진동자에서 발생한 초음파가 epoxy 시험편내를 전파하고 있는 것을 보여 주는 초음파 가시화상으로, 각각 진동자의 공칭 공진주파수로 부터 주파수를 낮추어 가며 가시화상을 관찰하고 초음파 음장이 가장 선명하게 나타나는 주파수및 그 주파수를 기점으로 10kHz 전후의 주파수에 대하여 초음파 가시화상을 사진촬영 한 것이다.

Photo 2 의 공칭 공진주파수 200kHz 인 진동자의 경우, 160kHz 에서 가시화상이 가장 선명해지는 것을 볼 수 있으며, Photo 3 의 공칭 공진주파수 400

kHz 인 진동자의 경우에는 270kHz에서, 공칭 공진주파수 800kHz 진동자의 경우에는 410kHz 에서 가시화상이 가장 선명하게 나타나는 것을 볼수 있다.

2.2. 절에서 언급한 바와 같이 가시화상이 가장 선명하게 나타날 때를 진동자의 실공진주파수로 본다고 하면 위의 결과로부터 공칭 공진주파수 200kHz 인 진동자의 경우, 실 공진주파수는 160kHz가 되고, 공칭 공진주파수 400kHz인 진동자의 경우 실 공진주파수는 270kHz가 되며, 공칭 공진주파수 800kHz 의 진동자의 경우 실 공진주파수는 410kHz로 되어 진동자 자체의 공칭 공진주파수와 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

이와같이 진동자의 실공진주파수가 공칭 공진주파수와 큰 차이를 보이는 이유 중의 하나는 진동자의 보호를 위하여 진동자에 부착 시킨 두께 1.0mm 의 알루미늄 판재의 공진에 의한 것으로 생각되며, 따라서 이와같은 알루미늄판재가 진동자와 같이 공진하는 것으로 가정하고 다음과 같은 진동자의 공진주파수에 대한 이론식[26]의 진동자 두께 t에 알루미늄 판재를 진동자의 두께에 합산하여 계산하여 보았다.

진동자의 공진주파수 $f=N/t$ ····· (11)

식에서 N : 주파수 정수

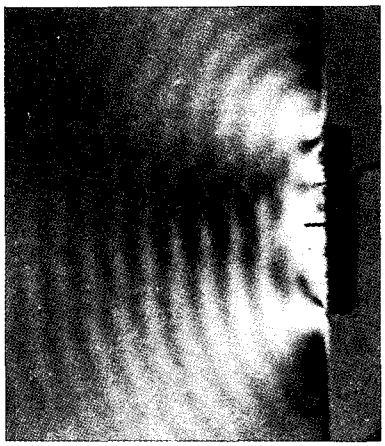
(본 실험에 사용된 진동자의 경우 N=840 kHz · mm)

t : 진동자의 두께

즉, 공칭 공진주파수 200kHz의 진동자의 경우 진동자 자체의 두께는 4.20mm, 400kHz 진동자의 경우 2.10mm, 800kHz 진동자의 경우 1.05mm 가 되는데, 이 진동자에 붙여진 두께 1mm 의 알루미늄판재가 같이 공진한다고 보고 이 진동자의 두께에 각각 1 mm 씩 더하여 계산하면 공진주파수 200kHz 진동자의 경우 162kHz, 400kHz 진동자의 경우 271kHz 로 되고, 800kHz 의 경우 410kHz 로 되어 이 결과는 실험결과와 잘 일치되고 있다.

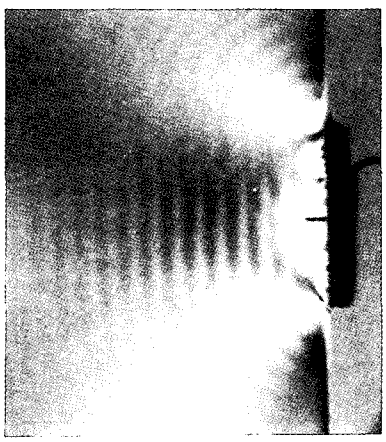
Fig. 7은 이와같이 진동자 자체의 공진주파수와 알루미늄판재의 두께를 합산하여 계산한 진동자의 공진주파수의 공칭 공진주파수에 대한 변화및 실험치를 비교하여 나타낸 것이다.

Photo 2. Visualization image of ultrasonic wave changed by a frequency in a transducer of nominal frequency 200kHz



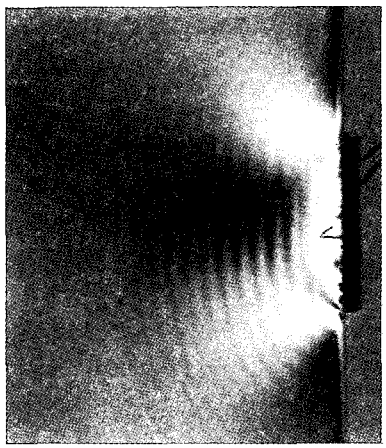
(a) 260kHz

(b) 270kHz

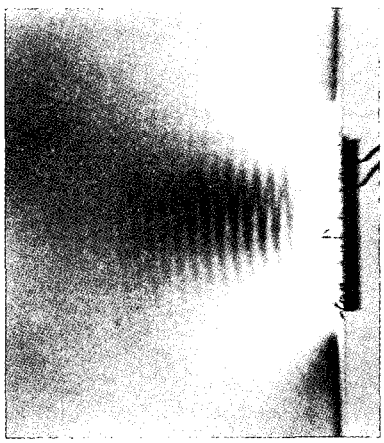


(c) 280kHz

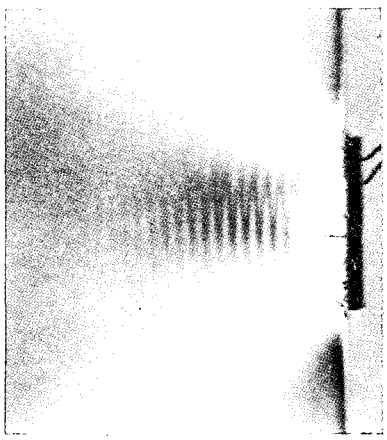
Photo 3. Visualization image of ultrasonic wave changed by a frequency in a transducer of nominal frequency 400kHz



(a) 400kHz



(b) 410kHz



(c) 420kHz

Photo 4. Visualization image of ultrasonic wave changed by a frequency in a transducer of nominal frequency 800kHz

그림에서 실험치는 알루미늄판재의 두께를 합산하여 계산한 진동자의 공진주파수와 일치하며 진동자 자체만의 공진주파수와는 많은 차이가 있음을 알 수있다.

따라서 실험에서 나타난 공진주파수의 변동은 진동자 보호용 알루미늄판재의 영향인 것이 확실시되며, 이와같이 가시화 시험에 의해서 공진주파수를 측정할 수 있음을 알 수 있다.

또한 알루미늄판재의 두께를 합산하여 계산한 진동자의 공진주파수는 공칭 공진주파수가 높아질수록 진동자 자체만의 공진주파수와 더욱 큰 차이를 보이는 것으로 보아 같은 두께의 알루미늄판재를 접착시킬지라도 주파수가 높은 진동자일수록 공진주파수의 변화에 미치는 영향이 커짐을 알 수 있다.

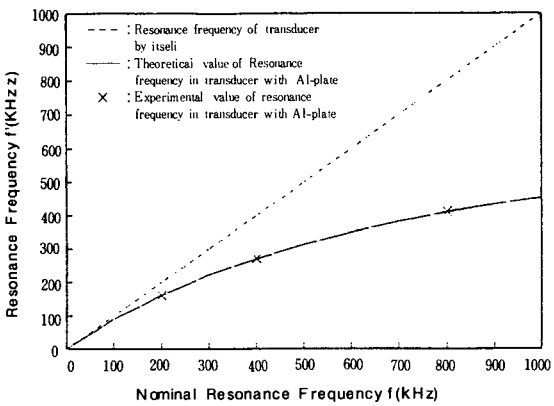


Fig. 7. Theoretical and experimental value of resonance frequency in transducer with Al-plate or by itself

5. 결 론

초음파의 가시화에 의한 진동자의 공진주파수 측정에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초음파의 가시화법에 의하여 진동자의 공진주파수를 측정할 수 있었다.
2. 가시화법에 의한 공진주파수의 측정 결과 공칭 공진주파수 200kHz 진동자의 경우 160kHz 대로, 공칭 공진주파수 400kHz 인 진동자의 경우 270 kHz 대로, 그리고 800kHz 진동자의 경우 410kHz 대로 공진주파수가 크게 변하였으며, 이는 진동자 보호용 알루미늄 판재의 공진에 기인한다.
3. 같은 두께의 보호용 알루미늄 판재를 진동자에 부착 시킬지라도 공칭 공진주파수가 높은 진동자일수록 공진 주파수의 변화에 미치는 영향은 커진다.

* 앞으로 광전 센서등을 사용하여 가시화상 명암의 변화를 정량적이고도 정확히 검출할 수 있는 방법이 연구 되면 보다 높은 精度로 공진 주파수를 측정 할수 있을 것으로 기대된다.

* 本 研究및 實驗을 도와 주신 九州大學校 応用力学 研究所의 高橋 清 教授와 樓田泰弘, 馬田俊雄 先生님께 感謝를 드립니다.

참 고 문 헌

1) 日本材料科學會, 超音波と材料, 裳華房 1992, pp 89－109
2) 鳥川正憲, 超音波工學, 工學調査會, 1977, pp 77－136
3) 電子技術研究會, 超音波應用, 枝文社, 1989, pp 220－222
4) J.H. Gunton and D.M.Marsh "The Visualization of Ultrasound in Solids" Radio and Electronic Engineer, Vol. 40, No.6(1970) pp. 316－320
5) P.D. Handstead et al, "Ultrasonic Visualization", British J. of NDT, Nov.(1972) pp.162-169
6) P.D. Handstead et al, "Direct Ultrasonic Visualization : A New Inspection Method" British J. of NDT, Mar.(1974) pp.34－44
7) R.C. Wyatt et al. "Imaging Ultrasonic Probe Beams in Solids" British J. of NDT, Sept. (1975) pp. 133－139
8) V.M. Baborovsky "Visualization of Ultrasound in Solids", Phys. Technol. Vol.10, (1979) pp. 171－177
9) K.G. Hall "Observing Ultrasonic Wave Propagation by Stroboscopic Visualization Methods" Ultrasonics. July(1982) pp. 159－167
10) 藤懸 洋一外2人 "かラスパイプ. 角ブロック内の超音波の 勤的觀察と TV畫像處理" 日本非破壞檢査協會誌 32卷 9號, (1983) pp.744－745
11) 根岸 勝雄, "短い 超音波パルスによろ光回折と光學映像" 日本電子信學會 技術研究報告 93號,

(1984) pp.9－16
12) 伊達 和博外 2人 "光彈性を用いた固體彈性波の觀察" 日本非破壞檢査協會誌 33卷 7號, (1984) pp.513－519
13) 伊達 和博外 2人 "固體内超音波の可視化解析システムの開發" 日本非破壞檢査協會誌 36卷 9號, (1987) pp.672－673
14) 新川 和夫外 2人, "固體中の超音波の可視化の試み" 九州大學應用力學研究所所報 56號, (1983) pp.109－113
15) 伊達 和博外 2人 "光彈性法による缺陷かろの反射波の可視化" 日本非破壞檢査學會誌 35卷 2號, (1986) pp.150－151
16) 根岸勝雄, 高木堅志郎：超音波技術, 東京大學出版會, (1987), pp. 99－100
17) 伊達 和博, 島田 平八"光彈性法により可視化されわた超音波パルスの音壓測定法" 日本非破壞檢査協會誌 35卷 2號, (1986) pp.148－149
18) H. Kojoh et al. "Measurement of Ultrasonic Shear Wave Amplitude Using Raman Nath Parameter" Japanese J. of Applied Physics, Vol. 26 (1987) pp.247－249
19) H. Kojoh and K. Takahashi, "Acousto－Optical Measurement of Shear Wave Amplitudes Using Light Beams of Different Sizes" Japanese J. of Appl. Phys. Vol. 28(1989) pp. 200－202
20) 管野昭外, 應力ひずみ解析, 朝倉書店, 1988. pp. 77－87
21) G. Hall "Ultrasonic Wave Visualization as a Teaching Aid in Nondestructive testing", Ultrasonics, March (1977) pp.57－69
22) 伊達 和博, 島田 平八, "固體内超音波の光彈性可視化法による定量評價" 日本非破壞檢査協會誌, 36卷 9號, (1987) pp.605－612
23) 任尚鈿, 材料力學, 文運堂, 1993, pp. 75
24) 川端 昭, やさしい 超音波工學, 工業調査會, 1991, pp. 33－36
25) 小城宏樹, "超音波 フラクトクラフィーによる高分子材料の動的破壞に關する研究", 九州大學博士學位論文(1989), pp. 29－31
26) 島川正憲, 超音波工學, 工業調査會, 1977, pp. 59－62

The Measurement of the Resonance Frequency of Transducer by Ultrasonic Visualization

B. S. Lee*, E. K. Han** and C. S. Song**
Hanyang University

Abstract A method to measure the resonance frequency of the ultrasonic transducer which is adhered to the specimen by the ultrasonic visualization is tried. The result shows that the resonance frequency of the transducer adhered to the specimen is lower than the nominal resonance frequency of the transducer in itself and the greater the degree of deviation. It is verified that its cause is the resonan of Al-plate for protecting the transducer by the theoretical analysis.

(*Received July 22, 1993*)