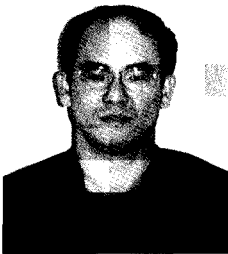


탄성계수 측정방법과 응용



박지홍

(KIMM 시험평가부)

- '83 연세대학교 금속공학과 (학사)
- '88 Case Western Reserve Univ. 재료공학 (석사)
- '94 Case Western Reserve Univ. 재료공학 (박사)
- '94 - '95 Case Western Reserve Univ. 연구원
- '96 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



이용태

(KIMM 시험평가부)

- '70 - '74 서울공대 (학사)
- '74 - '76 한국과학기술원 (석사)
- '76 - '80 국방과학연구소 (선연 및 연구원)
- '80 - '84 Case Western Reserve Univ. 재료공학 (박사)
- '84 - '85 Case Western Reserve Univ. 연구원
- '85 - '90 독일 항공우주연구소 (DLR) 연구원
- '90 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 머리말

모든 재료는 외부의 하중(load)을 받으면 변형을 하게 되는데 어떤 한계하중 이하에서는 그 하중이 제거되었을 때 원래의 상태로 복귀하게 되며, 이러한 원래 상태로의 복귀현상을 탄성거동(elastic behavior)이라 한다. 그러나 탄성한계(elastic limit) 이상의 하중에서는 재료가 원래의 상태로 복귀되지 못하고 영구변형이 발생하는 소성변형(plastic deformation)이 일어나게 된다. 일반적으로 탄성계수는 탄성영역에서 외부하중과 변형량과의 비례상수로 정의되는데, 이 값은 재료 내의 원자와 원자, 이온과 이온사이의 결합력과 관련된 재료 고유의 물리적 특성이다. 또한 탄성계수는 재료의 비틀림, 굽힘, 휨 등의 외력에 대한 저항과 변형량에 대한 척도로서 공업용 재료의 선택에 있어서 가장 기본적인 요인으로 사용된다^[1]. 공학적인 의미로서 탄성계수는 구조해석 분야에서 반드시 필요한 입력 데이터로 이용되어 왔고 재료 내에서 일어나는 여러 현상을 설명하기 위한 기본 물성값으로 이해되고 있다.

이와 같이 재료 설계나 구조물 역학해석 등에서 중요하게 고려되는 탄성계수의 측정방법으로는 정적인 방법(static method)과 동적인 방법(dynamic method)으로 크게 분류할 수 있다. 정적인 측정방법은 스트레인 게이지를 붙인 시편에 일정한 외력을 가한 후 이에 상응하는 변형량을 측정하여 탄성계수를 구하는 방법인 반면, 동적인 측정방법으로는 음파 또는 기계적 진동을 이용하여 재료의 공명주파수를 찾거나 시편에서 발생한

반향음을 이용하여 탄성계수를 측정하는 방법이라 정의된다. 동적 탄성계수 측정방법은 정적인 탄성계수 측정방법에 비해 정밀성과 재현성이 크며 저온 및 고온에서의 측정이 비교적 용이하다는 장점을 가지고 있다. 최근에는 정적인 방법으로는 측정하기 어려운 기지(substrate) 위에 얇게 코팅된 박막재료의 탄성계수를 동적인 방법으로 측정하는 기술도 개발되고 있다.

이 글에서는 탄성계수의 의미와 그 측정 방법, 그리고 재료의 처리에 따른 변화와, 탄성계수의 응용에 관하여 기술하고자 한다.

2. 탄성계수(elastic modulus)의 의미

2.1. 탄성계수의 기계적 의미

하중과 변형과의 비, 즉 단위 변형당 가해야 하는 하중을 기계적으로 그 재료의 탄성계수라 정의한다. 따라서 모든 재료에 있어서 탄성계수가 클수록 동일한 하중에 대한 변형량이 적다. 일반적으로 결정(crystalline) 재료인 경우 응력(stress)과 변형률(strain)의 관계는 탄성한계 이내에서는 대체적으로 직선적인(linear) 비례 관계를 유지하나 모든 재료가 반드시 직선적인 관계를 유지하는 것은 아니다. 예를 들어 비정질(monocrystalline)의 경우 비직선적인(nonlinear) 관계를 보여 준다. 일방향 하중(uniaxial loading) 일 경우 재료가 Hooke's law(변형률이 응력에 직선적인 비례 관계)를 따르는 재료에 있어서 변형률(strain : ϵ)에 대한 응력(stress : σ)의 비를 그 재료의 영률로 정의한다.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

탄성한계 내에서 재료가 비직선적(nonlinear) 변형-변형력의 관계에서는 tangent 또는 chord modulus가 재료변형의 척도로 쓰이게 된다(그림 1)^[2]

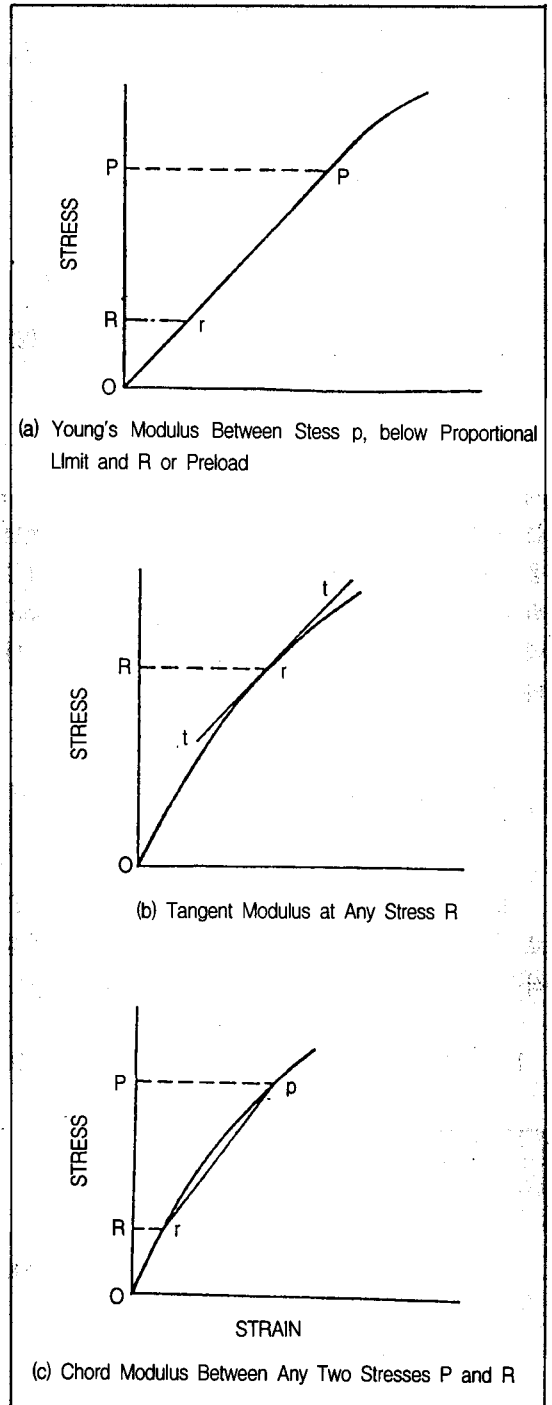


그림 1. (a) Young's modulus, (b) Tangent modulus, (c) Chord modulus의 측정방법

Tangent modulus 는 어떤 특정한 응력 혹은 변형률에서 $\sigma-\epsilon$ 커브의 기울기를 나타내고 chord modulus 는 재료의 탄성한도 이내에서의 $\sigma-\epsilon$ 커브의 어떤 지정된 두 지점 사이의 기울기로 나타낸다. 재료의 전단 계수(shear modulus : G) 는 Hooke의 법칙에서 전단 변형률(γ)에 대한 전단응력(τ)의 비로 정의한다.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

전단 탄성계수는 강성률(rigidity) 또는 비틀림 계수(torsional modulus) 라고도 한다. 여기서 G 는 비틀림 시험(torsion test)시에 가해지는 전단 응력으로 결정된다. 체적 변형과 관련되는 또다른 탄성계수의 일반적 정의는 체적 변형(dilatation)에 대한 정수압(hydrostatic pressure)의 비로 나타낸다.

$$K = \frac{\sigma_{Hyd}}{\Delta V/V} = \frac{1}{\beta} \quad (3)$$

체적 탄성률의 역을 압축률(compressibility), β 로 나타낸다. 따라서 이들 계수들간의 상호 관계식을 보면 표 1과 같이 나타내 진다^[3]

표 1. 등방성 물질 (isotropic solid)의 탄성계수 (elastic constants)

Constants	Sym bol	Equivalent functions
Young's modulus	E	$2G(1+\nu)$; $9K/(1+3K/G)$
Shear modulus	G	$E/2(1+\nu)$; $3K/(9K/E-1)$
Poisson's ratio	ν	$E/2G-1$; $3K-2G/2(3K-G)$; $(3K-E)/6K$
Lame's constant	λ	$E-2G/3$; $EG/(9G-3E)-2G/3$
Bulk modulus	K	$E/(3(1-2\nu))$; $1/\beta$; $EG/(9G-3E)$; $2G(1+\nu)/3(1-2\nu)$
Compressibility	β	$1/K$

2-2. 탄성계수의 물리적 의미

미세한 외부의 힘(external force) 이 어떤 재료

에 미칠 때 원자간의 움직임 ($\Delta r=r-r_0$, r_0 : equilibrium interatomic spacing) 은 외부의 힘에 비례적으로 거동하게 된다. potential energy 개념 (그림 2) 으로 보면 다음과 같은 식이 형성된다^[4].

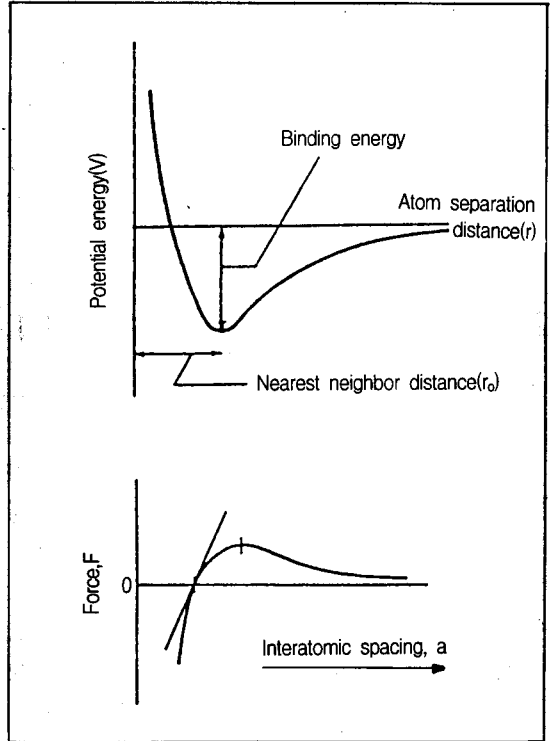


그림 2. 원자(atoms in a solid)내의 에너지우물 (potential energy well)

$$V(\Delta r) = V_{r_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2V}{dr^2} \right)_{r_0} \Delta r^2 + \text{high order terms} \quad (4)$$

여기서 Δr 이 매우 작으면 위의 식은 high order term이 무시되고 $r=r_0$ 에서 $dV/dr = 0$ 가 되어

$$V(\Delta r) = V_{r_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2V}{dr^2} \right)_{r_0} \Delta r^2 \quad (5)$$

과 같은 식이 된다. potential energy 는 원자간의 힘 (atomic force) 과의 관계에서 다음과 같은

식이 형성된다.

$$\text{Force} = -\frac{dV(\Delta r)}{d(\Delta r)} = -\left(\frac{d^2V}{dr^2}\right)_r \cdot \Delta r \quad (6)$$

여기서 힘(Force)은 변형량(Δr)과 비례적인 관계가 이루어지고 그 비례상수, 즉 $\left(\frac{d^2V}{dr^2}\right)_r$.

가 탄성계수가 된다. 원자간의 결합력에 의존하는 탄성계수는 따라서 재료의 융점과 밀접한 관계를 갖는다. 대체적으로 높은 융점을 가지는 재료가 표 2에 열거한 것과 같이 높은 탄성계수를 가지고 있다^[5]. 융점은 에너지 우물(potential energy well)의 깊이(depth)에 의해 결정되고 탄성계수는 에너지 우물 바닥(bottom)의 곡률 반경(curvature)에 의해 결정된다. 그러므로 좁고 깊은 에너지 우물을 가지는 재료는 높은 탄성계수를 갖게 되고, 반면에 넓고 얕은 에너지 우물을 가지는 재료는 낮은 탄성계수를 가지게 된다.

표 2. 융점(melting temperature)과 영률(Young's modulus)과의 관계

Material	Modulus (GPa)	Melting Temp. (°C)
Titanium Carbide	310	3180
Tungsten	390	3370
Silicon Carbide	340	>2800
Periclase (MgO)	240	2800
Corundum (Al ₂ O ₃)	370	2050
Iron	210	1539
Copper	110	1283
Halite (NaCl)	34	801
Aluminium	69	660
Magnesium	41	650
Lead	15	327
Polystyrene	2.7	<300
Nylon	2.7	<300
Rubber	6.9	<300

3. 탄성계수의 측정 방법

3.1 정적인 측정법 (static methods)

3.1.1 인장(또는 압축)시험 (extensional measurement)

인장시험인 경우 단면적이 A_0 인 사각 단면을 가진 판상 혹은 봉상형태의 인장시편을 준비하여 두 개의 스트레인 게이지를 길이방향(x)과 직각방향(y)으로 붙인 후 외부 하중을 걸어 여기에 대응하는 변형량(strain), ϵ_x , ϵ_y 와 작용된 응력(stress : $\sigma_x = F/A_0$)을 구하여 영률(E), Poisson's ratio(ν) 및 전단계수(G)를 동시에 얻을 수 있다 (그림 3).

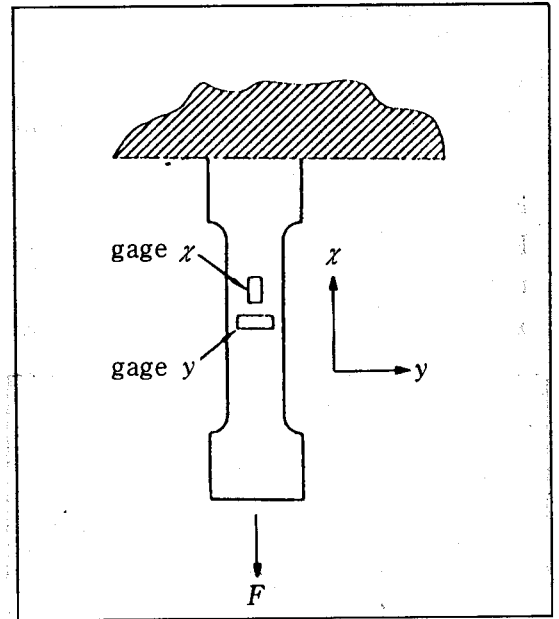


그림 3. 인장시험 (schematic illustration of tensile test)

압축시험으로도 인장시험과 마찬가지로 방법으로 이들 값을 측정할 수 있으나 시험도중 barreling 또는 buckling 등과 같은 시편의 변형이 최소로 되는 영역에서 주의해서 측정해야 하는 문제점이 있다.

3.1.2 굽힘 시험 (Flexural Measurement)

원통형, 봉상, 판상 등의 시편을 사용하여 탄성 계수 E 와 Poisson's ratio (ν) 를 측정할 수 있는데 보통은 판상 시편이 정확한 결과를 얻는데 적합하다. 막대 모양의 시편을 지지 대에 고정시키고 다른 한 쪽에 외부 하중을 걸고 시편에 두 개의 스트레인 게이지를 서로 직각 되게 (x, y) 붙인 후(그림 4), 이에 상응하는 변형량 ϵ_x 와 ϵ_y 를 스트레인 게이지로부터 읽는다. 이때 시편의 길이 방향(x)으로 작용된 응력 σ_x 는 식에 의하여 계산된다.

$$\sigma_x = \frac{M_y}{I} = \frac{P(L-x)}{1/12 bt^3} \cdot \frac{t}{2} ;$$

직사각형일 경우 (7)

- M : moment
- y : distance between strain gage and neutral line of the specimen
- P : load
- L : length
- t : thickness
- x : distance to strain gage

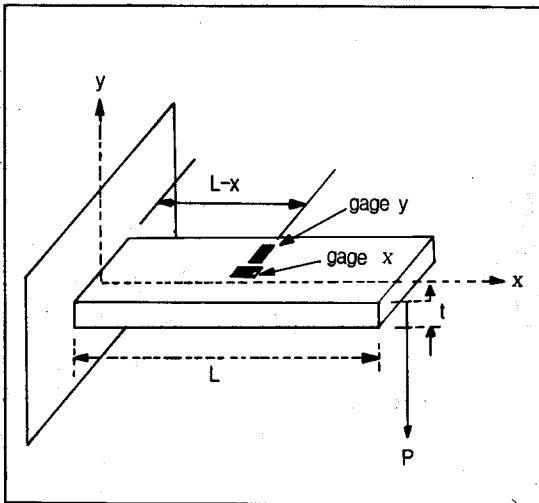


그림 4. 굽힘 시험(schematic illustration of bending test)

이때 M은 moment, P는 하중, L은 길이, t는 두께, b는 폭, x는 스트레인 게이지 까지의 거리, y는 시편의 중앙선에서 스트레인 게이지 까지의 거리이다. 영률(E)과 poisson's ratio(ν)를 구하기 위한 이후의 절차는 인장시험의 경우와 동일하다.

3.1.3 비틀림 시험 (torsional measurement)

원통 형태의 시편에 회전(rotation)을 발생시키는데 필요한 토크를 측정함으로써 전단계수(shear modulus : G)를 측정하는 방법이다.

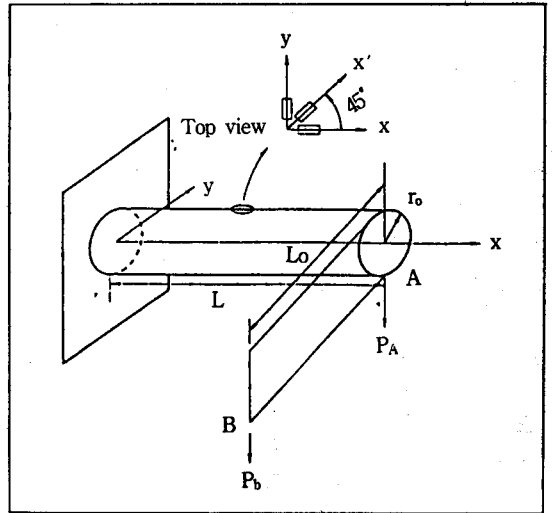


그림 5. 비틀림 시험(schematic showing twisting test)

3개의 스트레인 게이지를 60° 나 45° 각도로 시편에 붙인 후 그림 5와 같이 시편의 한 쪽 끝인 A 지점에 비틀림 모멘트(T)를 가하여 강성계수(G)를 측정하는 방법이다. 모멘트에 의하여 봉상 시편의 표면에 작용되는 전단응력 τ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = \frac{T r_o}{J} \quad (8)$$

- T : twisting moment
- J : moment of inertia
- ($J = \pi r_o^4 / 2$: for cylindrical)

여기서 T 는 비틀림 모멘트, γ_0 는 시편의 반경, J 는 관성모멘트로서 반경 γ_0 의 봉상시편의 경우 $J = \pi r_0^4 / 2$ 로 주어진다. 강성계수 G 를 구하기 위해서는 τ 이외에 전단변형률(γ)이 필요한데 각각의 스트레인 게이지로부터 측정된 변형률은 수직변형률(ϵ)이기 때문에 측정된 수직변형률을 좌표변환식을 이용하여 전단변형률로 계산하여 강성계수(G) 값을 구한다.

3.2 동적인 측정법 (dynamic methods)

정적인 측정 법에 비하여 동적인 측정법의 장점으로는 시편 준비, 시편의 형태 및 크기에 있어서 상대적으로 준비하기 쉬우며 정밀성과 재현성이 뛰어나다. 동적인 측정방법에서는 음파(sound wave) 또는 기계적 충격(impulse)을 가하여 재료의 공명 주파수(resonance frequency)를 찾아냄으로써 탄성계수를 측정하는 공진법(resonance technique)과 임펄스법(impulse excitation techni-

que), 초음파를 재료시편에 통과시켜 그 재료 시편에서 발생하는 반향음을 이용하여 탄성계수를 측정하는 초음파 에코 중첩법(pulse echo overlap) 등이 있다.

3.2.1 Resonance Technique (free-free suspended beam technique)

이 방법은 여러 가지 주파수(frequency)를 측정하고자 하는 재료에 적용하여 공명 진동수를 측정하는 방법이다^[6] 구동탐촉자(drive transducer)를 통하여 전기적인 신호를 기계적인 진동으로 발생시키고 수신탐촉자(detector transducer)가 이 기계적인 진동을 수신하여 또 다시 전기적인 신호로 변환시켜 oscilloscope 으로 보내 공명 주파수를 찾아낸다. 찾은 공명 주파수, 재료시편의 크기, 무게 등이 탄성계수와 전단계수를 계산하는데 사용된다. 이 장치의 대강의 개략도는 다음과 같다 (그림 6).

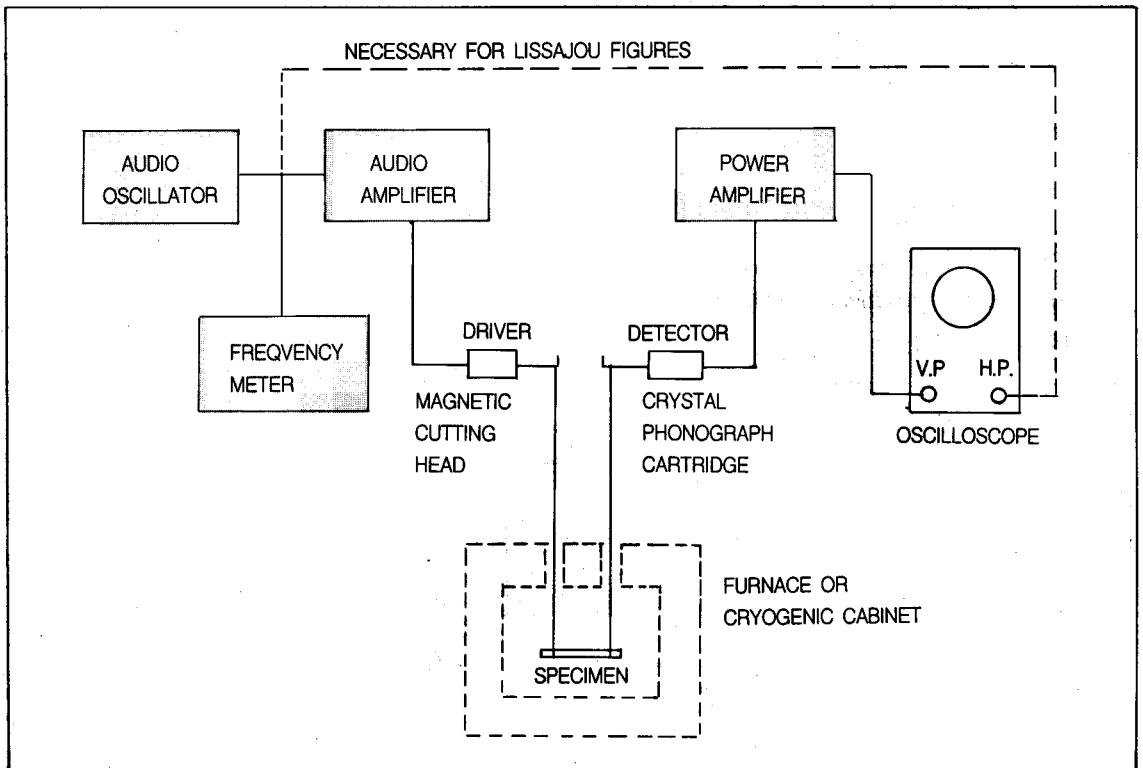


그림 6. 실험장치(block diagram of apparatus)

이 구성도에서 보듯이 oscillator에서 싸인파 (sinusoidal voltage)를 발생시키고 audio amplifier에서 충분히 증폭시켜 구동탐촉자 (speaker)에서 전기적 신호를 기계적인 진동음으로 바꾸어 주며 이 기계적인 진동음은 시편을 따라 전달하여 수신탐촉자 (pick-up)로 전달된다. 여기서 받은 기계적인 진동음은 다시 전기적 신호로 변환된 후 증폭기(power amplifier)에서 충분히 증폭된 후 oscilloscope에 나타내게 된다. 주어진 재료의 공명 진동수(resonance frequencies)는 시편 크기, 밀도, 탄성계수와 함수 관계를 가지며 다음과 같은 관계식이 성립된다^[6].

$$E = 96.517 (L^3/bt^3) T \omega f^2 \times 10^{-8} \tag{9}$$

: For the fundamental in flexure of a rectangular bar

$$E = 1.6408 (L^3/D^4) T \omega f^2 \times 10^{-8} \tag{10}$$

: For the fundamental in flexure of a rod of circular cross section

$$G = (10.197 B \omega f^2 \times 10^{-7}) / (1+T) \tag{11}$$

: For the fundamental torsion of a rectangular bar

$$G = (2L \omega f^2 \times 10^{-3}) \pi r^2 \tag{12}$$

: For the fundamental torsion of a cylindrical rod

여기서 L은 길이(cm), b는 폭(cm), t는 두께(cm), w는 무게(g), f는 주파수(Hz), T는 보정계수이고, B는 다음 식과 같다.

$$B = \frac{4L}{bt} \left[\frac{b/t + t/b}{4(t/b) - 2.52(t/b)^2 + 0.21(t/b)^6} \right] \tag{13}$$

3.2.2 Impulse excitation technique

이 측정방법은 망치와 같은 impulse tool로 재료 시편에 충격을 주어 재료의 공명 진동수를 찾아내는 방법이다. 이 장치의 대강의 개략도는 다음과 같다. (그림 7)^[7].

impulse로 재료 시편에 적당한 충격을 가하여 기계적인 진동을 발생시키고 탐촉자(transducer)를 통하여 기계음을 전기적 신호로 바꾸어 주며 signal amplifier, frequency analyzer, read-out device 등으로 구성되는 전기 시스템(electrical system)에서 수신된 전기적 신호를 증폭시키고 여러 파장이 섞여 있는 음파 속에서 시편의 공명 주파수(resonance frequency)만을 분리해 내는

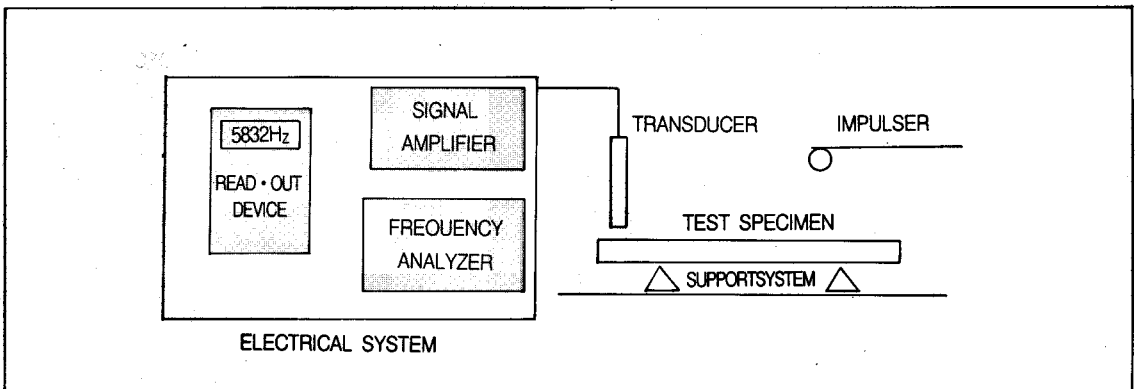


그림 7. 임펄스시험(block diagram of impulse test)

작업을 하게 된다. 여기서 구한 공명 진동수 (resonance frequency), 시편의 형상, 무게 등으로 다음 관계식을 이용하여 영률(E), 전단계수(G), Poisson's ratio를 얻는다^[7].

$$E = 0.9465 (mf^2/b) (L^3/t^3) T \quad (14)$$

: For the fundamental flexure frequency of a rectangular bar

$$E = 1.6067 (L^3/\rho^4) (m f^2) T \quad (15)$$

: For the fundamental flexure frequency of a rod of circular section

$$G = \frac{4Lmf^2}{bt} [B/(1+K)] \quad (16)$$

: For the fundamental flexure frequency of a rectangular bar

$$G = 16mf^2 (L/\pi D^2) \quad (17)$$

: For the fundamental torsional frequency of a cylindrical rod

여기서 m은 시편의 무게, f는 기본공명진동수, b는 폭, L은 길이, t는 두께, T는 보정계수, D는 직경이고 B는 다음과 같이 정의된다.

$$B = \frac{b/t+t/b}{4(t/b) - 2.52(t/b)^2 + 0.21(t/b)^6} \quad (18)$$

3.2.3 Ultrasonic pulse echo overlap

재료의 탄성 계수는 물체 내에서 초음파가 전파되는 속도 v_l, v_t 로부터 계산된다. 여기서 v_l 은 종파속도(longitudinal wave velocity)이며, v_t 는 횡파속도(transverse wave velocity)이다. 초음파의 속도는 초음파 탐촉자 (ultrasonic transducer)에서 발생된 초음파가 시편을 왕복한 시간 (t_l, t_t)을 oscilloscope에서 측정한 후에 왕복거리를 왕복시간으로 나눈 값이다. (그림 8)^[8]. 탄성계수 등을 구하는 관계식은 아래와 같다.

$$v_l = \frac{2L}{t_l} \quad v_t = \frac{2L}{t_t}$$

$$G = v_t^2 \rho \quad \nu = \frac{1-2(v_t/v_l)^2}{2-2(v_t/v_l)^2}$$

$$E = v_l^2 \rho \quad B = \frac{E}{9-6(1+\mu)}$$

$$\theta = \frac{h}{k} \cdot \left(\frac{9N}{4\pi V}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{1}{V_l^3} + \frac{2}{V_t^3}\right)^{-1/3} \quad (19)$$

$$C_v = 9NK \cdot \left(\frac{T}{\theta D}\right)^3 \cdot \int_0^{x_D} \frac{x^4 e^x}{e^x - 1} dx \quad (20)$$

$$C_p = C_v \cdot (1 + 10^{-4} T) + \gamma T \quad (21)$$

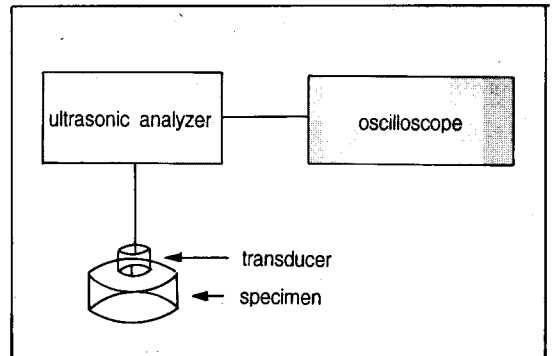


그림 8. 초음파 실험장치
(schematic diagram of ultrasonic wave velocity measuring system)

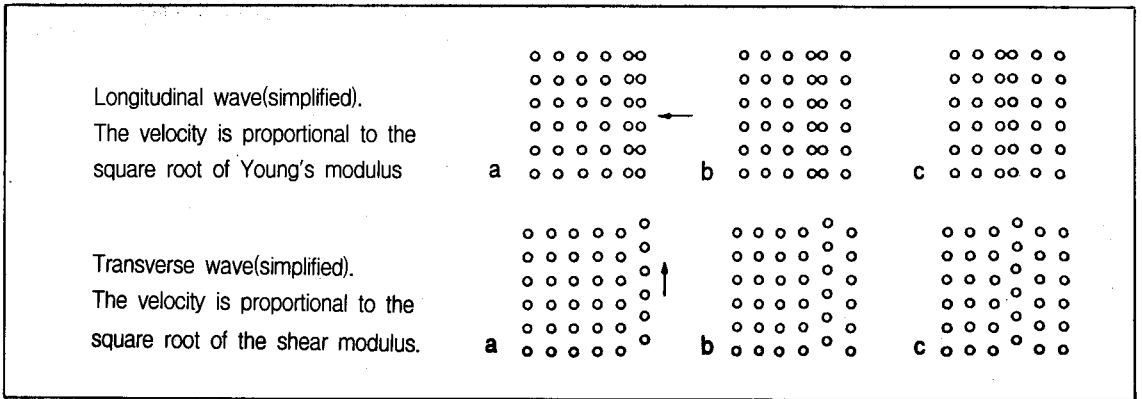


그림 9. 원자간힘의 스프링 모델(spring model of interatomic force)

여기서 h 는 Plank 상수, k 는 Boltzmann 상수, N 은 Avogadro 수, V 는 몰랄부피, θ_D 는 Debye 온도, T 는 절대온도, C_v 및 C_p 는 비열, γ 는 전기적 비열계수로 정의된다. 위 식에 의하여 초음파 속도가 구해지면 재료의 많은 물리적 상수가 계산되어 질 수 있다. 이러한 수식을 이용하여 재료의 상변태를 유추할 수도 있다.^[13]

spring model을 근거로 원자간의 힘(interatomic force)에 의해 음파(sound wave : elastic wave)가 재료를 따라 전달되는 과정을 그림으로 나타내었다 (그림 9)^[3]

그림 9에서 pulse 가 도달함에 따라 초기 원자면(initial plane of atoms)이 다음면(next plane of atoms)에 대해 압축이 되고 힘의 균형을 위해 둘째면(second plane)이 움직이고, 따라서 pulse의 움직이는 방향으로 계속해서 세 번째, 네 번째 면의 변위(displacement)가 생기고 초기 원자면은 제자리로 돌아온다. f/sec (f : frequency)의 음파에 의한 pulse가 생기면 두 번째 변위(displacement)는 $1/f$ sec가 되고 이러한 pulse series 즉 wave가 재료에 따라 이동하게 된다. 이 변위(displacement)는 탄성계수(elastic modulus)와의 관계를 갖고 time lag 은 원자 질량(atomic mass)과 연관된다. 그 결과로 속도 v 로 움직이는 wave는 영률, 종파속도(v_l) 및 밀도(ρ)와의 관계에서 다음과 같은 식을 갖는다.

$$v_l = \sqrt{E/\rho} \tag{22}$$

v_l : 종파속도 (longitudinal wave velocity)
 ρ : 밀도 (density)

마찬가지로 그림 9에서 보듯이 횡파속도(v_t)와 전단계수(G), 밀도(ρ)는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$v_t = \sqrt{G/\rho} \tag{23}$$

v_t : 횡파속도 (transverse wave velocity)

4. 탄성계수의 변화

4.1 열적 성질에 의한 탄성계수의 변화

대부분의 금속재료에서는 온도가 올라가게 되면 열에너지가 원자간의 힘(interatomic force)을 극복하도록 도와주기 때문에 탄성계수가 감소한다. 그러나 고무나 elastomer 경우는 열에너지가 유기화학적으로 결합된 원자간 배열상의 kinked 구조 형성을 도와주기 때문에 오히려 탄성계수가 증가한다^[3]. 이와 같은 결과가 그림 10에 나타나 있다.

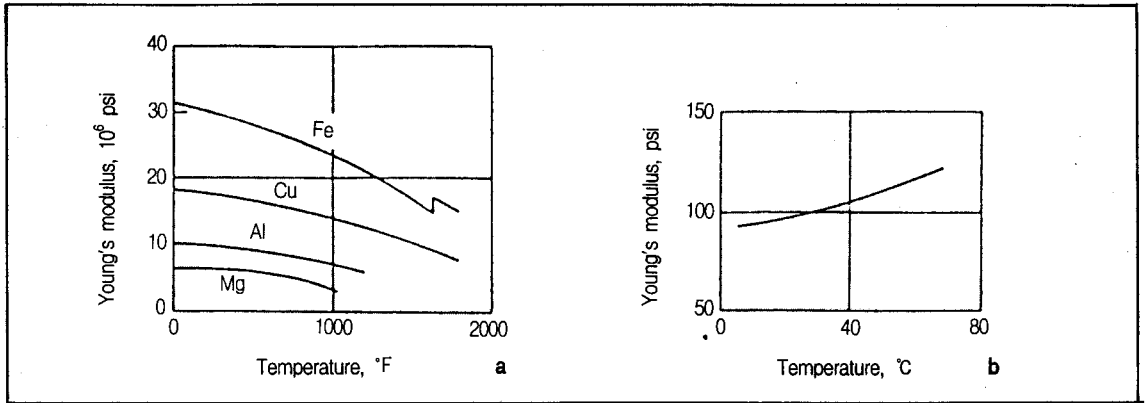


그림 10. 영률(Young's modulus) 과 온도(temperature)와의 관계
(a) 금속(metal) (b) 고무(isoprene rubber)

4.2 이방성(anisotropy)에 의한 탄성계수의 변화

이방성 결정 재료(anisotropic crystal)에서는 결정 방향에 따라 원자간의 거리가 틀리며 각기 다른 탄성계수를 가지게 된다.(그림 11, 표 3)^[3]

이러한 재료의 이방성 특징은 재료 응용에 있어서 중요한 역할을 한다. 예를 들어 재료의 가공에 있어서 결정 방향을 이용하여 집합조직 강화(texture stiffening or hardening)등을 얻을 수 있다.

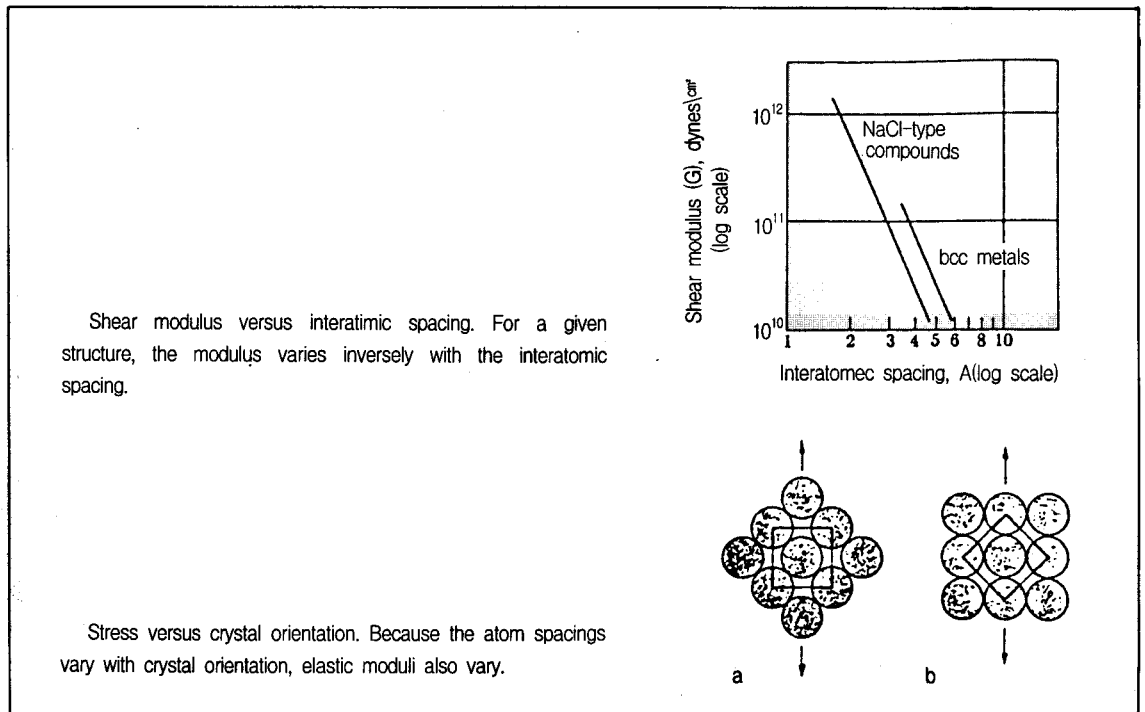


그림 11. 탄성계수, 응력과 재료의 결정방향, 원자간 거리와의 상관관계
(modulus, stress versus crystal orientation, interatomic spacing)

표 3. 금속재료의 탄성계수(영률)의 이방성
(anisotropy of Young's modulus in various metallic materials)

Metal	Maximum [MPa] [111]	Minimum [MPa] [100]	Random [MPa] [Polycrystalline]
Pb	2.7×10^4	6.9×10^3	1.4×10^4
Al	7.5×10^4	6.2×10^4	6.9×10^4
Au	1.1×10^5	4.1×10^4	8.3×10^4
Cu	1.9×10^5	6.9×10^4	1.1×10^5
Fe(BCC)	2.8×10^5	1.3×10^5	2.1×10^5
W	3.9×10^5	3.9×10^5	3.9×10^5

4.3 합금화(solid solution, effect of alloying)
에 의한 탄성계수의 변화

고용체인 경우 탄성계수는 대체로 원자 분률(atom fraction)과 직선적인 관계를 가진다. 재료의 구성원자가 되어 있는 경우에는 결합력이 강한 두 원자 쌍을 떼어 내는데 더 많은 힘이 필요하다. 이러한 이유로 금속간 화합물의 경우 강한

규칙 고용체(ordered solid solution)를 구성하여 높은 탄성계수를 보여주게 된다.(그림 12)^[9]

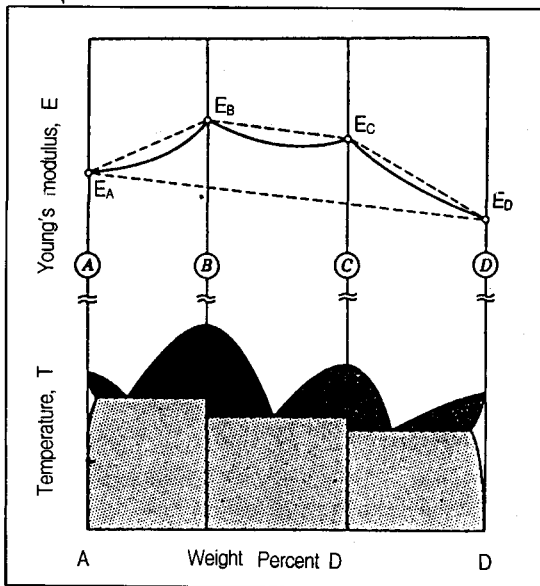


그림 12. 탄성계수(modulus)와 합금성분(comp-
osition of alloys)과의 관계

4.4 격자 결함에 의한 탄성계수의 변화

탄성계수는 재료 내부를 진행하는 음파(sound wave) 속도의 제곱에 비례하기 때문에 재료 내부에 음파의 진행을 방해하는 격자 결함이 존재할 경우 재료의 탄성계수는 낮아지게 된다[10-12]. 이러한 음파 진행에 장애물로 영향을 주는 결함으로는 입계(grain boundary), 입계 크기(grain size), 미세 균열(microcrack), 공공(vacancy), 전위(dislocation), 기공(pore) 등이 있다. 이러한 성질을 이용하여 측정된 탄성계수로부터 격자 결함을 유추하는 것은 가능하다.

5. 맺음말

재료의 탄성치(stiffness)는 재료가 어떤 하중을 받았을 때 그 형태를 유지하려는 능력이다. 이 탄성치는 재료 고유의 물리적 특성을 가지므로 공업용 재료 사용에 있어서 탄성치는 매우 중요한 재료선택의 기본 척도가 되고 있다. 재료의 탄성치는 열적(thermal), 기계적(mechanical), 물리적

(physical) 성질과 밀접한 관계를 가지고 있으며 입계, 미세균열, 공공, 전위, 기공 등과 함수관계를 이루어 재료의 물리적 현상을 규명하는 중요한 물성값이다. 그러므로 공학적인 의미로서 재료의 물리적, 기계적 구조 해석을 위하여 탄성치의 정확하고 분석적인 입력 데이터의 확보가 요구된다.

이 글에서는 탄성계수를 측정하는 여러 가지 방법에 대하여 고찰 하였고, 재료의 특성에 따른 탄성계수의 변화에 대하여 알아보았다.

참 고 문 헌

1. F. A. A. Crane and J. A. Charles, "Selection And Use of Engineering Materials", Butterworth LTD, Chap. 8, 87,(1984)
2. ASTM Designation : E 111-82 "Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus", 409,(1982)
3. P. E. Amstrong, Technique of Metal Research, 5, Chap. 9 123,(1971)
4. A. H. Cottrell, "The Mechanical Properties of Matter, John Wiley & Sons, Inc., NY., 84,(1964)
5. L. H. Van Black, "Materials Science for Engineers", Addison-Wesley Publishing Company, Inc, Chap. 10, (1971)
6. ASTM Designation : C848-78 "Standard Test Method for Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio For Ceramic Whitewares by Resonance", 268, (1978)
7. ASTM Designation C1259-94 "Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio For Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration", 1, (1994)
8. 김시영, 석사논문, 부산대학교, (1993)
9. H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials", John Wiley & Son, Inc., 3, Chap 2,(1965)
10. B. Budiansky and R. J. O'Connell, Int. J. Solids Structures, 12, 81, 1976
11. A. Hoening, Int. J. Solids Structures, 15, 137, 1979
12. R. L. Salganik, Izv, AN SSSR. Mekhanika Tverdogo Tela, 8[4], 149, 1973
13. Y. T. Lee, M. Peters, G. Welsch, Met. Trans. A, Vol. 22A(3), 1991, 709-714