

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2019.43.4.261>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

IET(Impulse Excitation Technique)법을 이용한 구조재료의 동탄성계수와 감쇠비 평가원리 및 응용사례 §

윤선아* · 이중권* · 이창순* · 임태환* · 한철운** · 조인식***†

* 선문대학교 신소재공학과, ** AD소프트, *** (주)엠브로시아

Evaluation Principles and Applications of Dynamic Elastic Modulus and Damping Ratio of Structural Materials using the IET Method

Sun A Yoon*, Jung Kwon Lee*, Chang Soon Lee*, Tae Hwan Lim*, Chul Woon Han** and In Sik Cho***†

*Dept. of Advanced Materials Engineering, Sun Moon Univ.

** AD Soft., Int., *** Mbrosia Co., Ltd.

(Received July 30, 2018 ; Revised January 10, 2019 ; Accepted, January 31, 2019)

Key Words: Impulse Excitation Technique(충격가진법), Dynamic Young's Modulus(동탄성계수), Damping Ratio(감쇠비), Internal Friction(내부마찰), Structural Material(구조재료), Poisson's ratio(푸아송비)

초록: 본 논문에서는 S10C, Al6061, Cu-Zn(65-35) 재료에 대하여 음향 공진 주파수를 이용한 탄성 내부마찰(Internal friction) 개념과 기계적 방법인 탄력계수(modulus of resilience)와의 상관관계를 연구하고자 하였으며, 이에 IET(Impulse Excitation Technique)법을 이용한 동탄성계수 및 푸아송비를 기본적으로 측정된 후 측정된 변형주파수(Flexural Frequency)에 대한 FWHM(Full Width Half Maximum) 값을 각각 분석한 결과 3.96Hz로 Al6061재료가 가장 높은 주파수 변화량($\Delta f: f_2-f_1$)을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 이에 인장시험에서 알 수 있는 변형률 에너지밀도(strain energy density)와 탄력계수(modulus of resilience)는 Al6061 재료가 6.7 J/mm^3 , 0.84 J/mm^3 로 가장 낮게 확인되었다. 이와 같이 3가지 다른 각각의 구조재료에 대하여 동적인 음향공진 주파수를 통한 동탄성계수, 푸아송비 및 내부마찰에 대한 비교평가와 기계적 방법인 탄력계수(modulus of resilience)와의 연관성에 대하여 상관관계를 연구하고자 하였다.

Abstract: In this study, the relationship between internal friction when using an acoustic resonance frequency and the mechanical modulus of resilience of S10C, Al6061, and Cu-Zn(65-35) materials was studied. The dynamic modulus and Poisson's ratio were measured using the impulse excitation technique. In addition, full width half maximum analysis of the measured flexural frequencies showed that the Al6061 had the highest frequency variation($\Delta f: f_2-f_1$) of 3.96Hz. Moreover, tensile tests showed that Al6061 had the lowest strain energy density of 6.7 J/mm^3 and modulus of resilience of 0.84 J/mm^3 . The dynamic elastic modulus, Poisson's ratio, and internal friction through dynamic acoustic resonance frequency were evaluated, and their relation to the mechanical modulus of resilience for three structural materials was determined.

1. 서 론

재료의 탄성치(stiffness)는 재료가 어떤 하중을 받았을 때 그 형태를 유지하려는 능력을 의미하며, 이는 열적(thermal), 기계적(mechanical), 물리적

(physical) 성질과 밀접한 관계를 가지고 있다.

특히 물리적 성질인 탄성계수는 구조 및 강도 해석 분야에서 재료 탄성치의 정확한 값을 확보하는 것은 기본적인 내용이다. 이와 같이 재료 설계나 구조 및 강도해석 등에서 중요하게 고려되는 탄성계수의 측정방법으로는 정적인 방법(static method)과 동적인 방법(dynamic method)으로 구분할 수 있으며, 정적인 측정방법은 인장시험이나 굽힘 시험시 변형 게이지를 통해 일정한 외력을 가

§ 이 논문은 대한기계학회 재료 및 파괴 부문 2018년도 춘계학술대회(2018.4.11-13., 서귀포 KAL호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, mbrosia1018@naver.com, mbrosia.co.kr

© 2019 The Korean Society of Mechanical Engineers

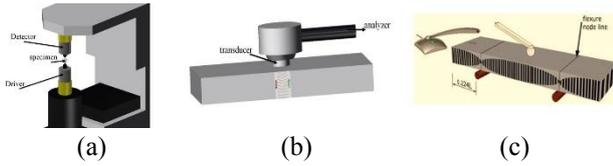


Fig. 1 Dynamic Elastic & Shear Modulus Test Methods (a) Resonance Technique, (b) Ultrasonic Echo Pulse and (c) Impulse Excitation Technique

한 후 이에 상응하는 변형량을 측정하여 탄성 및 전단계수를 구하는 방법인 반면, 동적인 측정방법으로는 충격가진 또는 기계적 가변 진동을 통해 재료의 공명주파수를 찾거나 시편에서 발생한 초음파 반향음을 이용하여 탄성계수를 측정하는 방법이라 정의한다.⁽¹⁻⁴⁾ 이러한 대표적인 동탄성계수 및 푸아송비 측정방법은 Fig. 1(a)의 가변주파수를 이용하여 공진 주파수를 찾아내는 공진법(Resonance Technique)과 Fig. 1(b)의 초음파를 재료시편에 통과시켜 그 재료시편에서 발생하는 반향음을 이용하여 동탄성계수 및 푸아송비를 측정하는 초음파 에코 중첩법(Ultrasonic Pulse Echo Overlap), 그리고 Fig. 1(c)의 임의의 충격을 주어 고유주파수를 찾아내는 임펄스법(Impulse Excitation Technique)이 있다.^(4,5)

따라서 본 논문에서는 동적인 방법 중 임펄스법(Impulse Excitation Technique)에 대한 동탄성계수 및 푸아송비 측정의 기본적인 이론과 저탄소강, 알루미늄합금, 구리합금 구조재료에 대하여 측정된 결과를 가지고 감쇠비(damping ratio) 즉, 재료의 탄성 내부마찰(Internal friction) 개념과 탄력계수(modulus of resilience)와의 상관관계를 설명하고자 하였으며, 추가적으로 현재 개발 응용되고 있는 다양한 적용 사례에 대하여 소개하고자 한다.

2. 시험재료

본 논문에서는 기계적 특성과 미세조직이 상이한 일반적인 구조재료인 S10C, Al6061, Cu-Zn(65-35) 3가지를 선정하였으며, ASTM E8 인장시험편 규격에 맞추어 측정한 각각의 기본적인 최대인장강도와 연신율, 그리고 미세경도값에 대한 결과는 Table 1과 같다.

이 중 S10C 재료가 가장 높은 인장강도와 미세경도값을 가지고 있었으며, 연신율은 Cu-Zn 재료가 가장 높은 것으로 보여주고 있다.

Fig. 2는 각 재료에 대한 광학현미경 미세조직 사진으로, 미세조직을 관찰하기 위한 식각(etching) 액으로 S10C는 증류수와 Hydrochloric acid를 각각 50ml로 하였고, Al6061은 증류수100ml와 Sodium

Table 1 Mechanical properties

Material	UTS [MPa]	EL. [%]	Hv [500g]
S10C	270	29	114.17
Al6061	75	12	112.97
Cu-Zn	240	31	36.40

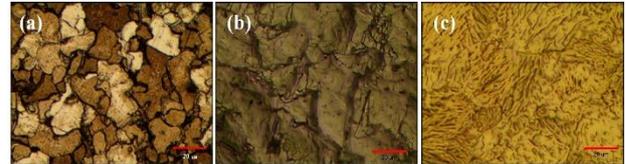


Fig. 2 Optical micrographs of (a) S10C, (b) Al6061 and (c) Cu-Zn specimens

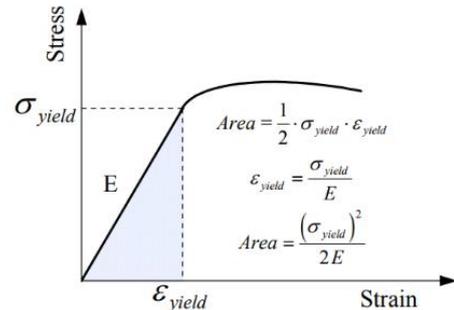


Fig. 3 Calculation of modulus of resilience

hydroxide 10g과 Zinc chloride 1g으로 하였으며, Cu-Zn는 증류수와 Nitric acid를 각각 50ml로 하였다. 미세조직을 관찰한 결과 S10C는 0.1% 저탄소강으로서 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 일반적인 α-ferrite 조직을 보여주고 있으며, Fig. 2(b)는 Al6061의 일반 공정조직을 보여주고 있다. Fig. 2(c)는 Brass(Cu 65 - Zn 35)의 일반 미세조직사진을 보여주고 있다.

3. 시험방법

3.1 Strain energy density & Modulus of resilience

일반적으로 인장응력-변형률 시험을 통하여 다양한 기계적 특성을 평가할 수 있지만, 그 중에서도 변형률 에너지밀도 즉, 인성(toughness)은 파괴가 일어나기 전까지 소성변형을 통한 재료의 에너지 흡수력으로 정의되며, 이는 응력-변형률 곡선에서 파괴까지의 밑면적으로 나타낸다. 이와 함께 탄력(resilience)은 탄성변형에 따른 에너지 흡수력과 하중 제거에 따른 에너지의 회복력을 의미하며, Fig. 3과 같이 항복점까지의 응력-변형률 곡선의 밑면적으로 표현하며, 단위는 두 축의 곱인 J/m³으로,

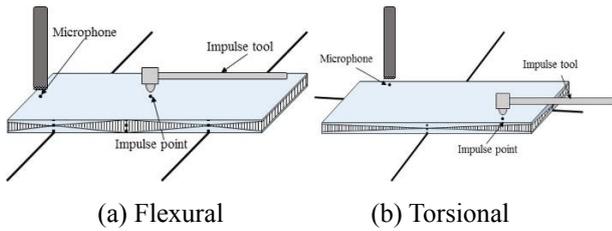


Fig. 4 Dynamic Elastic & Shear Modulus Test Method

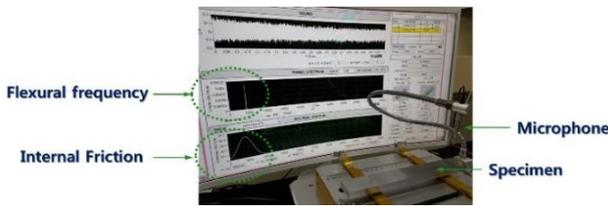


Fig. 5 Typical test apparatus and program for IET

재료의 단위 체적당 흡수 에너지로 나타낸다.

3.2 Impulse Excitation Technique

IET(Impulse Excitation Technique)법은 ASTM E1876 규격으로 시편에 충격 가진을 주어 재료의 고유주파수 종파와 횡파를 정확하게 찾아내는 방법으로, Fig. 4에 표시된 방법과 같이 직사각형 시편 형상을 교점선(node line) 위에 올려놓고 충격점(impulse point)에 시편을 타격하고 그 음향신호를 비접촉 Microphone을 통해 받아 분석하여 Flexural & Torsional Frequency를 측정한다. 여기에서 Flexural Frequency의 경우 Fig. 4(a)와 같이 교점선(node line)을 시편 양 끝단에서 0.224 L 위치에 두고 시편의 정 중앙부에 가진을 하고 Microphone은 한쪽 끝단부 상부에 위치시킨다. 또한 Torsional Frequency는 Fig. 4(b)와 같이 교점선(node line)을 시편의 십자형으로 두어 가진과 Microphone 위치를 대각선으로 하여 음향을 발생시킨다. 이렇게 녹음된 음향을 Fig. 5에서 보이는 프로그램과 같이 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통해 각각의 고유주파수 값을 도출한 다음 시편의 길이(length), 폭(width), 두께(thickness), 무게(weight) 등을 식 (1), (2), (3)에 대입하면 각각 동탄성계수 및 전단계수, 푸아송비를 쉽게 계산할 수 있다. 본 실험에서는 각각 S10C, Al6061, Cu-Zn(65-35) 재료에 대하여 $L: 100\text{mm} \times b: 25\text{mm} \times t: 4\text{mm}$ 의 IET법 측정을 위하여 동일 시편규격으로 준비하였다.

3.2.1 Dynamic elastic modulus

동탄성 계수의 계산은 시편의 Flexural frequency를 구하여 아래의 식 (1)에 대입하여 구할 수 있다.^(3,4)

$$E = 0.9465(m f_f^2 / b)(L / t^3) T_1 \quad (1)$$

m : weight of specimen, b : width of specimen
 L : length of specimen, t : thickness of specimen
 f_f : flexure frequency, T_1 : correction factor

3.2.2 Dynamic shear modulus

동전단 계수의 계산은 시편의 Torsional Frequency를 측정하여 아래의 식 (2)에 대입하여 구한다.^(3,4)

$$G = \frac{4Lm f_t^2}{bt} [B / (1 + A)] \quad (2)$$

m : weight of specimen, b : width of specimen
 L : length of specimen, t : thickness of specimen
 f_t : torsional frequency, B, A : correction factor

B 와 A 는 치수에 대한 보정계수로서, 계산식은 아래와 같다.

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

$$A = \frac{[0.5062 - 0.8776(b/t) + 0.3504(b/t)^2 - 0.0078(b/t)^3]}{[12.03(b/t) + 9.892(b/t)^2]}$$

식 (1)과 (2)에서 구해진 동탄성 계수(E)와 동전단 계수(G)를 이용하여 식 (3)과 같이 Poisson's ratio를 계산할 수 있다.^(3,4)

$$\mu = (E/2G) - 1 \quad (3)$$

3.2.3 Damping ratio(Internal friction)

재료측면에서의 감쇠비(damping ratio) 또는 내부마찰(internal friction)은 외부진동에 의한 재료의 결정구조 내에서 진폭의 점진적인 감소는 진동 흡수 에너지로 표현될 수 있다. 이는 다양한 재료의 결합 즉 미세균열(micro crack), 기공(pore), 입계(grain boundary), 전위(dislocation) 그리고 결정의 원자, 분자적 크기의 구조결함에 대한 중요한 연구내용으로도 활용될 수 있다.^(6,7) 이와 관련하여 Fig. 6은 이러한 재료의 감쇠비(damping ratio) 또는 내부마찰(internal friction)을 측정할 수 있는 기본이론으로 시계열 해석법(Time Series Analysis Method)과 스펙트럼 해석법(Spectrum Analysis Method)이 있다. Fig. 6(a)는 시계열 해석법으로 감쇠진동 파형의 자유 진동 부분으로부터 2점 피크 이상을 읽어 들여 산술 평균한 값으로 구할 수 있으며, Fig. 6(b)는 스펙트럼 해석법으로 선택된 고유 주파수 f_0 피크 레벨로부터 FWHM(Full Width Half Maximum: $\Delta f : f_2 - f_1$)값과의 관계로부터 구할 수 있다.^(6,7)

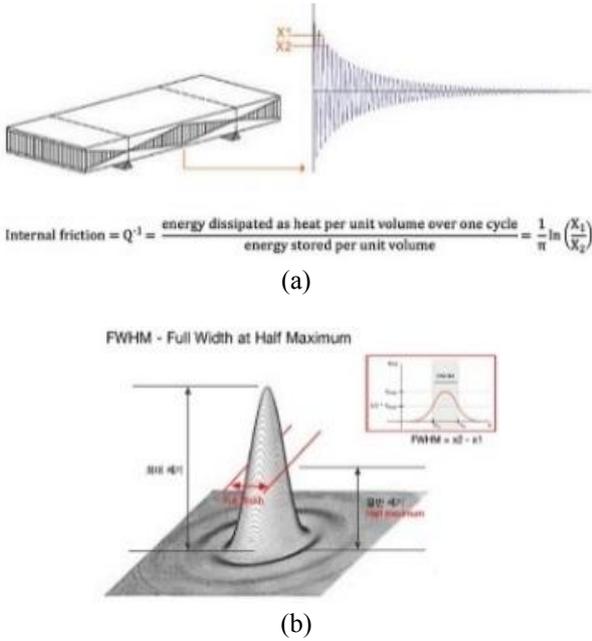


Fig. 6 Typical method for measuring damping ratio : (a) Time series analysis method, (b) Spectrum analysis method

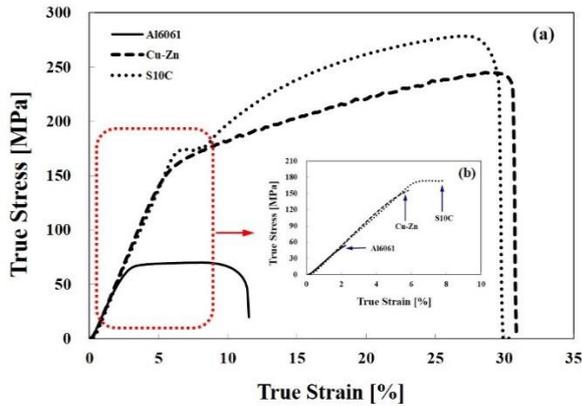


Fig. 7 Stress – strain curves of structural materials

4. 시험결과 및 고찰

4.1 Strain energy density & Modulus of resilience

Fig. 7(a)는 S10C, Al6061, Cu-Zn 재료에 대한 진응력 대 진변형률에 대한 그래프로서, 항복강도와 최대인장강도는 S10C 재료가 가장 높게 나타남을 알 수 있었으며, 특히 상항복점과 하항복점이 동시에 나타남을 알 수 있다. 이는 일반적인 탄소강에서 보이는 현상으로 침입형 원소에 의한 전위의 응력장으로 설명되어진다. Fig. 7(b)는 각 구조재료에 대한 항복강도까지의 선도를 확대 표시한 그래프로서 탄력계수를 계산하는데 설정된 그래프 값으로 Table 2에 각 3가지 재료에 대한

Table 2 Test Results of SED & MR

List	S10C	Al6061	Cu-Zn
Strain energy density [J/mm ³]	62.0	6.7	57.3
Modulus of resilience [J/mm ³]	6.08	0.84	4.87

Table 3 Test Results of E, G, μ

List	S10C	Al6061	Cu-Zn
E [GPa]	209.8	68.7	103.9
G [GPa]	81.4	27.3	38.2
μ	0.288	0.259	0.360

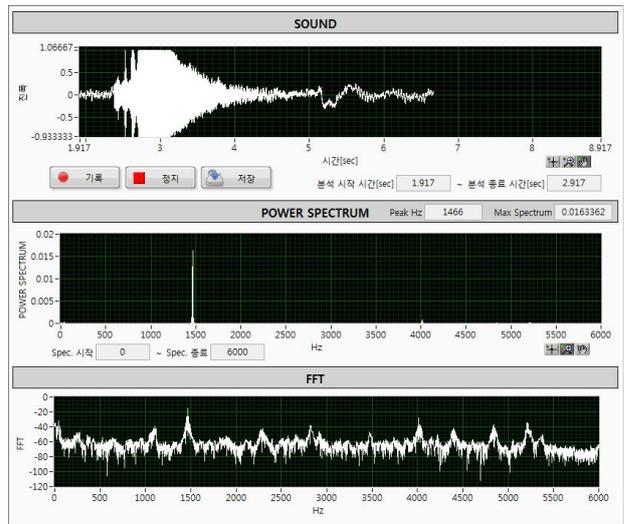


Fig. 8 Natural frequency selection program through sound FFT analysis

변형률 에너지 밀도(SED : Strain Energy Density) 즉, 인성(toughness)값과 탄력계수(MR : Modulus of Resilience)의 정량적인 데이터값을 보여주고 있다. 이와 같이 Al6061 재료가 각각 6.7J/mm³과 0.84J/mm³으로 가장 낮음을 알 수 있었다.

4.2 IET(Impulse Excitation Technique)

Fig. 8은 IET법을 이용한 기본적인 음향 녹음과 함수의 근사값을 계산하는 알고리즘인 FFT(Fast Fourier Transform)분석을 통하여 고유주파수를 측정할 수 있는 프로그램을 보여주고 있다. 이에 각각의 Flexural Frequency와 Torsional Frequency를 찾아내고 식 (1), (2), (3)에 대입하여 각각 동탄성계수 및 전단계수, 푸아송비값을 Table 3에 표기하였으며, Al6061 재료가 동탄성계수 68.7GPa, 동전단계수 27.3GPa 값으로 가장 낮은 것으로 확인할 수 있었으며, 이는 진응력 대 진변형률 그래프에서의

Table 4 Measurement results of natural frequency and frequency variation

Material	S10C	Al6061	Cu-Zn
f_0 [Hz]	2,653	5,615	3,793
Δf [Hz]	2.58	3.96	2.91

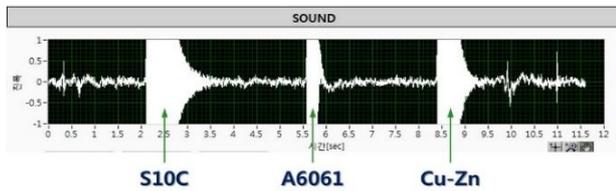


Fig. 9 Acoustic amplitude over time for structural materials

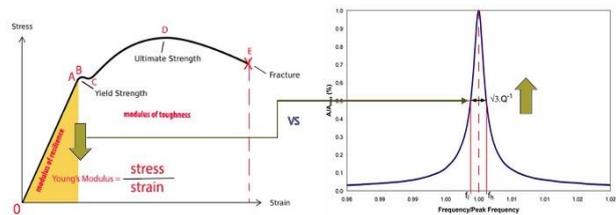


Fig. 10 Comparison of resilience energy and FWHM

탄력계수(modulus of resilience)와 직접적인 상관관계가 있는 것으로 판단할 수 있었다. 또한 재료 내부에 생기는 수직 응력에 따른 가로 변형과 세로 변형의 비인 푸아송비는 Al6061 재료가 0.259로 가장 낮음을 확인할 수 있었다.

4.2.1 Damping ratio(Internal friction)

Fig. 9는 각 3가지 재료에 대한 시간에 따른 음향 진폭량을 보여주는 것으로서 FFT 분석을 통한 고유주파수값과 선정된 피크의 스펙트럼 해석법(Spectrum Analysis Method)을 통하여 FWHM(Full Width Half Maximum) 값의 변화량을 평가할 수 있다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 S10C 재료의 진폭량이 가장 크게 측정됨을 알 수 있으며, 이에 대한 결과값은 Table 4에 각각 재료에 따른 고유주파수 값(f_0)과 주파수 변화량($\Delta f: f_2 - f_1$)으로 표기하였다. Δf 값이 가장 큰 Al6061의 경우 S10C, Cu-Zn 재료에 비하여 감쇠비(damping ratio) 즉, 내부마찰(internal friction)이 그만큼 크다는 것을 의미하며, 가진 진동의 흡수에너지가 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 Table 5와 Fig. 10에서 보는 바와 같이 Al6061재료가 가장 낮은 동탄성 계수를 가지는 것은 원자간 결합력이 약하다는 것을 알 수 있으며, 탄력계수(modulus of resilience)가 작다는 것은 탄성변형에 따른 에너지 흡수력이 작은 것을 의미

Table 5 Comparison of E, MR and Δf values

Material	S10C	Al6061	Cu-Zn
E [GPa]	209.8	68.7	108.4
Modulus of resilience [J/mm ³]	6.08	0.84	4.87
Δf [Hz]	2.58	3.96	2.91

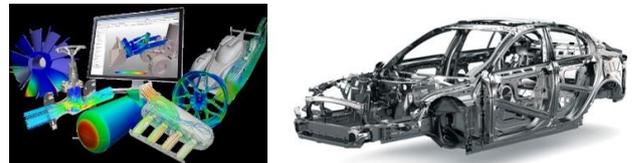


Fig. 11 CAE analysis of an important component material



Fig. 12 Dental, Display and Semiconductor Component Materials

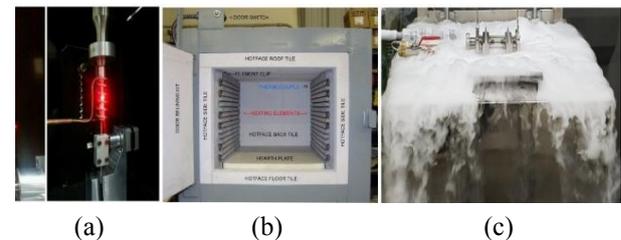


Fig. 13 Various atmosphere types of (a) induction resistance, (b) furnace and (c) cryogenic

한다. 그에 반해 음향진동의 개념에서는 그만큼 진동의 흡수에너지는 크다는 것으로 판단할 수 있었다.

5. 적용사례 및 응용분야

Fig. 11은 기계, 항공 및 자동차등 동적부품 분야에서 대부분 기본 재료물성 관련 자료를 정통적인 데이터북 자료를 활용하여 재료구조 및 강도 해석을 추진하였지만, 최근 점차 고성능화된 다양한 첨단재료에 따른 데이터 물성 확보에 어려움을 가지고 있는 실정이다. 이에 선진기업에서는 재료의 고유물성에 대한 데이터 정보에 배타적인 입장에 있는 상황이다. 이와 더불어 기계부품재료의 물성을 평가하기 위하여 다양한 시험법이 활용되고 있지만 시편 제작이나 시험방법에 있어서 복잡할 뿐 아니라 정밀 평가에 있어서도 고가의 장비

와 고도의 시험평가기술이 요구되고 있다. 이중 전통적인 정적인 방법에 비하여 음향 고유주파수를 이용한 동적인 방법은 측정이 간단하고 빠르면서도 정확한 평가결과를 확보할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 이와 관련하여 최근 국내에서도 부품정밀해석에 적용되고 있는 사례로는 터빈이나, 임펠러 등 동력부품재료나 자동차분야에서 알루미늄 복합재나 분말야금부품, GFRP, CFRP 등 최첨단 부품재료에 다양하게 적용되고 있으며, Fig. 12와 같이 의료재료나 디스플레이, 반도체 부품재료에도 적극적으로 응용 확대되고 있는 실정이다.

Fig. 13은 IET(Impulse Excitation Technique)법에 대하여 다양한 온도분위에서 측정할 수 있는 방법으로, 고온의 경우는 고주파 유도저항 방법이나 박스로 타입, 그리고 극저온 방법으로 액화질소에서도 쉽게 장치 시스템을 구축하여 평가할 수 있는 다양한 적용시스템을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 S10C, Al6061, Cu-Zn(65-35) 구조재료에 대하여 IET(Impulse Excitation Technique)법을 이용한 동탄성계수, 푸아송비 및 감쇠비(damping ratio) 즉, 내부마찰(internal friction) 측정평가 원리와 결과값을 비교 평가하고자 하였으며, 재료의 변형 에너지 흡수력과 관련된 변형률 에너지밀도(strain energy density) 및 탄력계수(modulus of resilience)와의 연관성에 대하여 상관관계를 평가한 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) S10C, Al6061, Cu-Zn(65-35) 재료에 대하여 ASTM E8 인장시편 규격의 시험결과 최대인장강도는 각각 270MPa, 75MPa, 240MPa 연신률은 각각 29%, 12%, 31%이었다. 또한 변형률 에너지밀도(strain energy density)와 탄력계수(modulus of resilience)는 Al6061 재료가 각각 $6.7\text{J}/\text{mm}^3$, $0.84\text{J}/\text{mm}^3$ 로 가장 낮게 확인되었다.

(2) IET(Impulse Excitation Technique) 법을 이용한 동탄성계수 및 푸아송비를 측정한 결과 S10C, Al6061, Cu-Zn(65-35) 재료에 따라 각각 209.8GPa, 68.7GPa, 103.9GPa 및 0.288, 0.259, 0.360으로 확인되었으며, 측정된 Flexural Frequency에 대한 FWHM(Full Width Half Maximum) 분석결과 각각 2.58Hz, 3.96 Hz, 2.91 Hz로 Al6061재료가 가장 높은 고유주파수와 주파수 변화량($\Delta f: f_2-f_1$)을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 높은 주파수 변화량은 재료의 내부마찰(internal friction)값을 평가하는데 중요한 변수로 활용될 수 있다.

(3) 이와 같이 Al6061 재료가 가장 낮은 동탄성계수를 가지는 것은 potential energy 개념으로 원자간 결합력이 약하다는 것을 의미하며, 탄력계수(modulus of resilience)가 작다는 것은 탄성변형에 따른 에너지 흡수력이 작은 것을 의미한다. 그에 반해 고유주파수가 가장 높다는 것은 원자간 spring model 개념으로 음향전파시간이 작다는 것을 의미하며, 그만큼 음향진동의 흡수에너지는 크다는 것으로 판단할 수 있다.

(4) 최근 활발하게 적용되고 있는 사례로는 기계, 항공 등 정밀부품분야에서 터빈이나, 임펠러 등 동력부품재료나 다양한 분야에서 알루미늄 복합재나, 분말야금부품, GFRP, CFRP 등 최첨단 부품재료에 적용되고 있으며, 세라믹재료, 디스플레이 및 반도체 부품재료에도 확대 요청되고 있는 실정이다. 추가적으로 다양한 고온 및 저온 분위기에서도 쉽게 측정장치 시스템을 구축하여 평가할 수 있는 응용분야를 소개하였다.

후 기

“본 논문은 2017 년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구 수행된 연구임.” [No.2017R1D1A3B03033524]

참고문헌 (References)

- (1) www.mbrosia.co.kr
- (2) Callister, W. D., "Materials Science and Engineering: an Introduction," 7th Edition, pp. 235~245
- (3) ASTM E 1876 - 01
- (4) Park, J. H. and Lee, Y. T., 1997, "Elastic Modulus Measurement Method and Application," Vol. 9, No. 1, *Mechanical and Material*, pp. 138~149.
- (5) Cho, I. S., Hwang, J. H., Oh, J. Y., Kim, H. C., Oh, S. H., Lee, C. S. and Park, I. G., 2015, "Durability Assessment of Polyoxymethylen Using Ultrasonic Fatigue Testing," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 39, No. 8, pp. 781~785.
- (6) Gimenez, S., Vleugels, J. and Van der Biest, O., 2008, "In Situ Investigation of Dewaxing and Sintering of Stainless Steel Powder Compacts by Impulse Excitation," *Scripta Materialia*, Vol. 58, pp. 985~988.
- (7) Montecinos, S., Tognana, S. and Salgueiro, W., 2016, "Determination of the Young's Modulus in CuAlBe Shape Memory Alloys with Different Micro-structures by Impulse Excitation Technique," *Materials Science & Engineering A*, Vol. 676, pp. 121~127.