

내부마찰 측정장치의 소개

金 在 煥*

■ 차 례 ■

- 1. 서 론
 - 2. 내부마찰측정
 - 2.1. 자유감쇄법
 - 2.2. 강제진동법
 - 2.3. 기타 측정법
 - 3. 결 론
- 참고문헌

1. 서 론

일반적으로 고분자물질에서 중합도와 조직양상(morphology)은 그 물질의 전기적, 기계적 특성을 결정하는 중요한 인자들이며 고분자물질조직내의 분자쇄완화과정(relaxation process of molecular chain)의 해명은 물성연구에 유용한 방법이다. 따라서 내부마찰측정은 교변응력장내에서 분자쇄의 완화과정을 관측하는 가장 효과적인 수단이 되는데, 이때에 주기적으로 변화하는 기계적인 외력이 가해지던, 주기적으로 변화하는 전기적 응력인 전계가 가해지던, 다같이 에너지 흡수를 발생하여 온도 및 주파수분산을 갖게 되는데 기계적 완화와 유전적 완화간의 상호 비교연구¹⁾는 대단히 흥미있는 과제이며 유전완화현상의 연구를 촉진시키는 수단으로 긴요하다고 본다. 왜냐하면 고분자물질내 분자쇄의 완화과정은 유전손실, 기계적내부마찰 뿐만아니라 도전특성을 결정하는 요소이고 이들 간에는 상호 불가분의 관계가 있기 때문이다. 그리하여 유전손실에 관한 연구의 보조수단으로 여러가지 기계적 내부마찰측정장치가 고안되어 사용되는데 사용목적에 따라 계속하여 그의 구조와 특성을 개량해가고 있다. 내부마찰실험주파수에 따라 그의 기계적인 구조와 특성이 달라지는데 지금까지 알려진 내부마찰측정방법으로는 자유감쇄법(free

decay method), 강제진동법(forced vibration method), 비공진강제진동법(non-resonance forced vibration method) 및 초음파법(ultrasonic method) 등이 있다.²⁾ 이상의 모든 내부마찰실험방법에 관한 실험장치는 그 기계의 동작특성에 따라 실험주파수가 극히 한정되어 있어 연속적인 변화를 시킬 수 없으므로 완화효과를 연속적으로 추적하기 위하여 온도를 변화시키는 방법이 널리 사용되고 있다.

이상에서 소개한 방법들중 본인들이 국산제작실험에 성공한바 있는 장치는 자유감쇄법에 속하는 연회진자장치(torsion pendulum device) 이므로 이 장치를 중심으로 내부마찰측정원리와 그의 장치에 관하여 소개하고자 한다.

2. 내부마찰측정

2.1 자유감쇄법

(1) 원리

고분자물질은 고체 상태라도 탄성과 동시에 점성을 가지고 있는 점탄성체로서 Newton의 점성요소와 Hook 탄성요소로된 Voigt 모형 또는 Maxwell 모형 및 이들이 결합된 복잡한 모형들로서 등가적으로 표시된다. 이 물질은 응력과 이에 대한 응답인 변형사이에 반드시 시간지연을 수반하는바 그 이유는 점성요소내의 에너지소모 때문이며 이 에너지소모가 내부마찰손실(internal fric-

* 正會員 : 光云大學 電氣工學科 教授 · 工博

tion loss) ³⁾ 이 된다.

이 내부마찰손실은 응력사이클간에 소모되는 에너지 ΔW 와 시료내에 저축된 최대탄성에너지 W_{st} 사이의 비인 $\Delta W / W_{st}$ 로 규격화한 비손실율로 정의하며 이 값은 다음에서와 같이 시료의 내부마찰에 의한 자유감쇄진동을 관측함으로써 알 수 있다. 지금 그림 1과 같은 염회진자장치 (torsion pendulum device) 에서 정현파상의 응력이 관성추를 통해서 시료에 인가되면 변형은 일반적으로 약간의 상차각 δ_C 만큼 늦게 나타나며 이때의 응력 σ 와 변형 r 를 복소수형으로 표시하면

$$\sigma^* = \sigma_0 \exp(j\omega t) \text{ 가 되고}$$

$$r^* = r_0 \exp(j(\omega t - \delta_C)) \text{ 가 된다.}$$

응력과 변형의 관계는

$$r^* = J^* \sigma^* = \sigma^* / G^* = (J' - jJ'') \sigma^*$$

$$= |J| (\cos \delta_C - j \sin \delta_C) \sigma^*$$

가 되고

또 $\tan \delta_C = J'' / J'$ 는 역학적 손실계수 (mechanical loss factor)라 하는데 이 손실계수의 의미는 다음에서와 같이 기계적 진동의 1/4 사이클간에 시료내에 흡수되는 에너지를 계산함으로써 잘 설명될 수 있다.

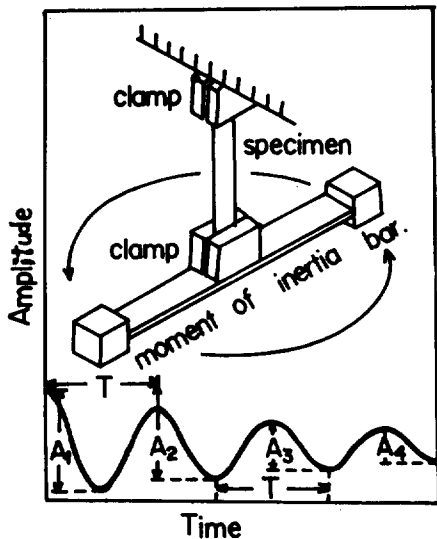


그림 1. 전단탄성을 및 내부마찰측정용 염회진자장치와 감쇄곡선

지금 교변응력과 변형을 각각 $\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$, $r = r_0 \sin(\omega t - \delta_C)$ 라 할때 1/4주기 사이에 흡수되는 에너지는

$$W_G = \int_0^{\pi/2\omega} \sigma \left(\frac{\partial r}{\partial t} \right) dt = \int_0^{\pi/2\omega} \omega \sigma_0 r_0$$

$$(\cos \omega t \sin \omega t \cos \delta_C + \sin^2 \omega t$$

$$\sin \delta_C) dt = \sigma_0 r_0 \left(\frac{\cos \delta_C}{2} \right.$$

$$\left. + \frac{\pi \sin \delta_C}{4} \right)$$

가 되며,

여기서 $\delta_C = 0$ 일때 괄호내의 제 2항은 소멸되므로 이것은 1/4 사이클 당의 내부마찰손실을 표시하고 제 1항은 시료내에 저장된 최대탄성에너지를 의미한다. 지금 ΔW 를 한 사이클 당의 내부마찰손실, W_{st} 를 저장된 최대탄성에너지라 하면,

$$\frac{\Delta W}{W_{st}} = \frac{4 \times \frac{\pi}{4} \sin \delta_C}{\cos \delta_C / 2} = 2 \pi \tan \delta_C$$

가 되고,

$$\Delta W = \pi \sigma_0 r_0 \sin \delta_C = \pi \sigma_0^2 J'' = \pi r_0^2 G''$$

가 된다.

여기서 $\Delta W / W_{st}$ 는 아래의 식에서 알 수 있는 바와 같이 자유감쇄진동곡선에서 진폭의 대수감쇄율 (logarithmic decrement) $A = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}$ 의 2배에 상당하므로 내부마찰손실 특성은 그림 2와 같은 A곡선에서 알 수 있다.

지금 $\frac{A_n}{A_{n+1}} \simeq 1$ 일때 $A_n = x$, $A_{n+1} = x - \Delta x$ 라 하면

$$A = \ln \frac{x}{x - \Delta x} \simeq \frac{1}{2} \frac{\Delta x}{x} \left(\frac{2x - \Delta x}{x} \right)$$

$$= \frac{(A_n - A_{n+1}) \cdot (A_n + A_{n+1})}{A_n^2}$$

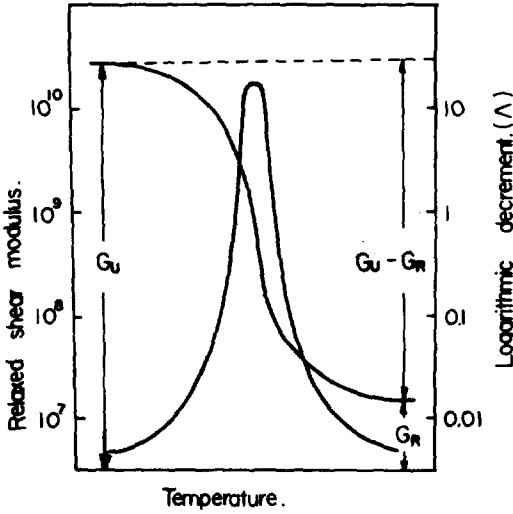
$$= \frac{1}{2} \frac{A_n^2 - A_{n+1}^2}{A_n^2} = \frac{W_{st(n)} - W_{st(n+1)}}{2W_{st(n)}}$$

$$= \frac{\Delta W}{2W_{st(n)}} = \frac{1}{2} \times 2 \pi \tan \delta_C$$

$$= \pi \tan \delta_C$$

가 된다.

한편 기계적 완화에서 Nowick⁴⁾의 단일완화모



Unit is arbitrary.

G_u is unrelaxed, and G_R is relaxed shear modulus.

그림 2. 동력학적인 기계적 성질

형에 의하면 복소컴플라이언스의 주파수응답은

$$J^* = J_u + \frac{J_R - J_u}{1 + j\omega\tau} = J' + jJ''$$

$$J' = J_u + \frac{J_R - J_u}{1 + \omega^2\tau^2}$$

$$J'' = \frac{(J_R - J_u)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}$$

로 표시되므로

$$\tan \delta_G = \frac{J''}{J'} = \frac{(J_R - J_u)\omega\tau}{J_R + J_u\omega^2\tau^2}$$

인데 만일 $J_R - J_u \ll J_u$ 라면

$$\tan \delta_G \approx \frac{J_R - J_u}{J_u} \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}$$

가 되므로

$$A = \pi \frac{J_R - J_u}{J_u} \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}$$

로 표시된다.

다음으로 활성화에너지를 H 라 할때

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{H}{KT}$$

임으로 윗식들로부터 주파수가 일정할 때 온도 T 에 대한 J , $\tan \delta_G$ 및 A 의 완화특성을 관측할 수 있을 것이며, 그림 2는

온도변화에 따른 단일완화과정을 $G = J^{-1}$ 및 A 에 대하여 나타낸 것이다.

다음으로 전단탄성을 G 는 관측된 감쇄자유진동의 주기로부터 계산될 수 있으며 이 값을 윗식에 대입하고 변형하여 검토결과를 전개하면 원형단면적을 가진 시료에 대하여 전단탄성을⁵⁾은 $A \leq 1$ 범위에서는

$$G = \frac{1.53 \times 10^{-1} I}{r^4 T_p^2}$$

$A > 1$ 의 아주 높은 제동범위에서는

$$G = \frac{I}{K_0 T_p^2} (4\pi^2 + A^2)$$

단, A_n : 감쇄파형의 진폭

J_R : 완화컴플라이언스(relaxed compliance)

J_u : 비완화컴플라이언스(unrelaxed compliance)

$\frac{J_R - J_u}{J_u}$ 완화강도(relaxation strength)

ω : 각주파수

G'' : 전단탄성율(shear modulus)의 허수부

σ_0 : 응력의 최대치

τ_0 : 변형의 최대치

τ : 완화시간

K_0 : $\pi r^4 / 2 L$

K : 볼츠만 상수 = $1.37 \times 10^{-23} [J/^\circ C]$

r : 시료의 반지름

L : 시료의 길이 *

(2) 측정장치

(ㄱ) 자유감쇄법에 의한 염회진자장치

시료를 선형(wire)이나 얇은 막대(thin rod) 모양으로 만들어 염회진자장치에 매달아 비틀림운동을 이르기도록 하여 시료의 내부마찰을 측정할 수 있도록 한 장치인데 일찍이 Coulomb이 사용한 장치를 발전시킨 Chevenard나 Boulanger에 의한 $K\hat{e}$ 형 염회진자장치($K\hat{e}$ type torsion pendulum)와 고온영역에서 사용할 수 있도록 Norton에 의해 고안된 가역형 염회진자장치(inverted torsion pendulum)의 두 종류가 있다.⁶⁾

① $K\hat{e}$ 형 염회진자장치⁷⁾

그림 3은 그의 장치도이며 규정주파수는 1[Hz] 내외인데 관성환에 장치한 추의 무게와 시료의 크

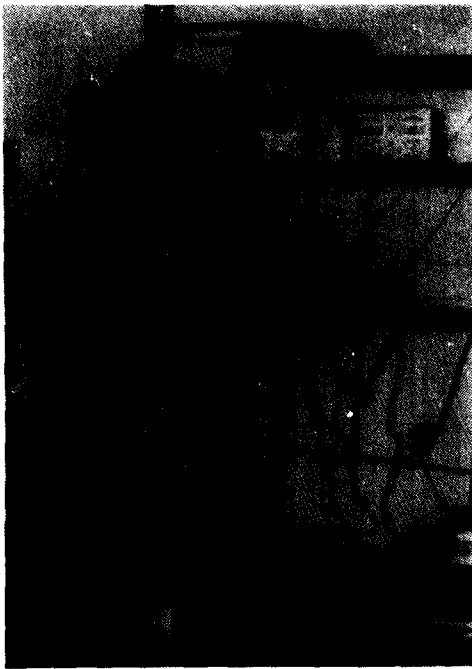
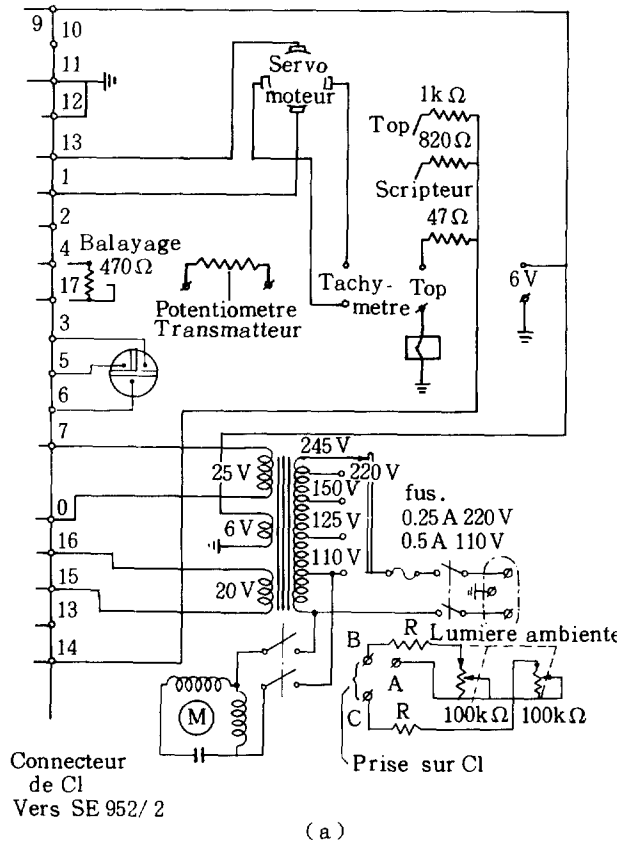
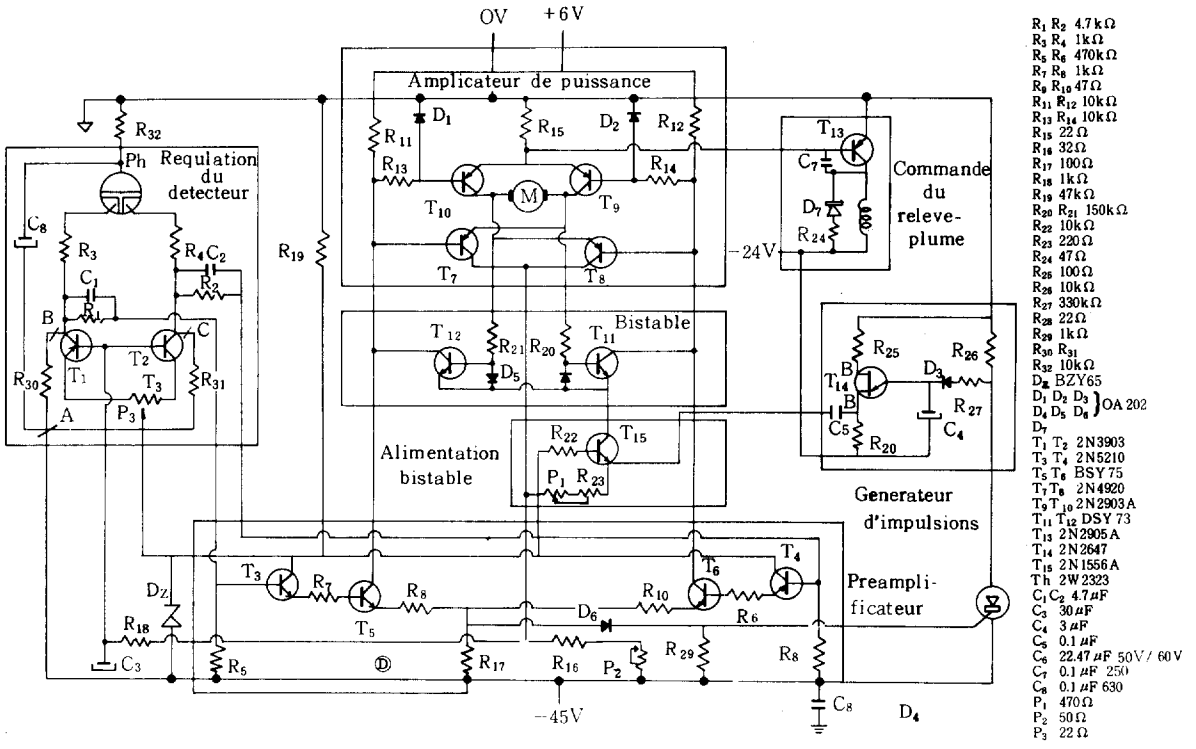


그림 3. 내부마찰 측정장치(Kê형)

기를 조정함으로써 실온에서 0.1 [Hz] 까지 낮출 수 있게 되어 있다. 시료의 온도는 액체질소로 얻을 수 있는 온도 -195.8 [°C] 로부터 150 [°C] 까지 변화시킬 수 있도록 장치되어 있고 저온은 액체질소용기와 보일러에 의하여, 상온이상의 온도 조절은 시료의 온도분포를 균일하게 하기 위하여 전압조정기로 조정되는 4개의 가열기에 의한다. 가동환부분에 붙어서 시료에 매달려 떠있는 맨 아랫부분의 축은 횡진동의 흔들림을 방지하기 위하여 기름컵에 담겨 있다. 그리고 지름의 온도를 측정함과 동시에 일정한 온도를 유지하기 위하여 장치내부에 써머커플을 장치하여 이것을 외부의 자동온도조절장치와 연결시켰다. 저온에서의 수분의 관내응결을 방지하기 위하여 진공펌프를 가지고 유리관내부의 기압을 0.4 [Torr] 정도의 진공도로 유지시켜서 진공계로 진공도를 관측한다. 또한 시료내의 비틀림 (torsion, 捻力) 을 주기 위한 구동은 두개의 직류로 여자된 관성환의 상부에 고정된 전자석에 의한다. 비틀림에 의한 시료의 자유감쇄 진동상태의 기록은 시료하부에 부착된 작은 거울 (10 [mm] × 10 [mm] mirror) 과 조사등의 도움을 얻어 시료의 비틀림에 따라 움직이는 거울로부터 반사되는 광속이 Batist가 고안했다고 하

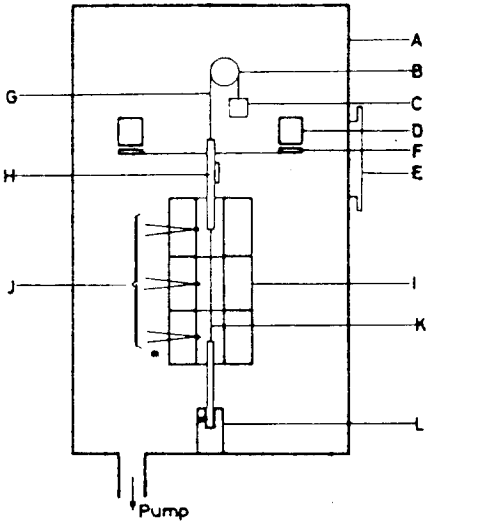
는 자동광점추적장치 (photodyne)에 장치된 이동식 조도계에 투사된다. 광속이 조사되지 않은 상태 하에서는 계속하여 좌우로 왕복운동만을 하던 이동식 조도계는 광점이 비추면 그 광점에 붙잡혀서 광점을 따라 움직이게 되어 있어 시료의 온도변화에 따른 비틀림을 민감하게 크게 증폭하여 후면에 장치된 기록용지상에 자동적으로 기록한다. 기록된 감쇄곡선으로부터 대수감쇄율과 단탄성율을 계산해 내는 일은 Völkl 과 Schilling 에 의해 시도되었다. 최근에 본인들이 광운대학에 설치되어 있는 전자계산기 FACOM에 의해서 평균대수감쇄율을 계산한바 있는데 이 program을 소개하면 표 1과 같다. 광속을 받아서 이 광속에 기인된 전류가 다시 증폭되어 목적하는 동작을 할 수 있도록 하기 위해서는 두 저항변에 광전물질인 CdS 전지와 일정한 직류전압 (22 V DC) 이 삽입된 Wheatstone bridge 회로가 필요하게 되는데 그의 단선결선도의 보기는 그림 4 (a), (b) 와 같다.





(b)

그림 4. photodyne 단선 결선도



A: 진공통, B: 도르래, C: 평형추, D: 전자석
E: 창, F: 연철, G: 지지선 (Mo 선), H: 거울,
I: 가열노, J: 열전쌍, K: 시료, L: 조임쇠

그림 5. 가역형 열회진자장치의 원리도

② 가역형 열회진자장치

Ke 형 열회진자에 있어서는 시료가 관성추의 무게로 인하여 계속적으로 장력을 받게 된다. 그러므로 고온에서는 이로운 변형효과를 피하기 위하여 그림 5에 표시된 바와 같이 열회진자를 거꾸로 뒤집어서 사용하는것이 바람직하다. 이 열회진자에서는 시료가 밑에 고정되어 있고 관성추는 시료 연결선의 상단에 부착되어 있어 그의 중력에 의하여 시료를, 실험하기에 알맞도록 일정한 장력으로 유지시켜 준다. Okuda 는 실온과 He온도간에서 사용할 수 있는 가역형 열회진자를 사용했는데 그 구조는 그림 6과 같으며 진자의부로부터 작동하는 치차기구 (齒車機構)가 시료를 비틀도록 되어있다. 이 방법에 의하면 -189 [°C]와 27 [°C]간의 온도에서 변형에 따른 내부마찰을 연구할 수 있다.

이 외에도 Martinet 등에 의하여 가변 주파수용 진자를 비롯한 개량된 진자를 많이 고안하여 사용해왔다.

표 1. 평균대수감쇄율 계산 프로그램

```

FACOM ROS/V5  FORTRAN 5  -770127- V01-L14
83.03.17  PAGE  1
OPTIONS IN FFFECT (FORTS1)
DBJFCT,NOSTACK,SOURCF,HQMAP,NOISN,EBCDIC,NOAUTODL,NOSEQUENCE,NOASTERISK,NOFNPRINT,
OPT(0),FMTRFA( 256),FLAG(W),DFBUG(STD)

C
C
C    CALCULATION OF LOGARITHMIC DECREMENT FOR LDPE
C    PROGRAMMER BY  KIM JAE HWAN
C
0001    DIMENSION A(100,11), B(100,10), C(100,10), D(100), NO(100)
0002    DOUBLE PRECISION A, B, C, D
0003    DATA C,D/1000*0.00 00, 100*0.00 00/
C
C    A : A1-DATA GROUP
C    B : A2-DATA GROUP
C    C = LN(A1/A2)
C    D : THE AVERAGE OF C-GROUP
0004    8 FORMAT(8A4)
0005    7 FORMAT(6X,'-- ',8A4,' --',//)
0006    9 FORMAT(///10X,'ERROR : *** THE NUMBER OF DATA IS ZERO ***')
0007    10 FORMAT(11F5.1/5X,10F5.1)
0008    12 FORMAT(6X,11(F5.1,5X)/16X,10(F5.1,5X)/)
0009    13 FORMAT(1H1//30X,'** THE TABLE OF LOGARITHMIC DECREMENT AND ITS AV-
CERAGE **'//16X,'-- ',5A4,'--',///3X,'NO',4X,'TEMP',4X,'NUM OF
CDATA',4X,'AVFRAG',8X,'DATA1',10X,'DATA2',10X,'LAMBDA',13X,'DATA1',
C10X,'DATA2',10X,'LAMBDA')
0010    14 FORMAT(//1X,13,3X,F5.1,7X,13,7X,D10.3,2(3(4X,D10.3),4X))
0011    19 FORMAT(39X,2(3(4X,D10.3),4X))
0012    N=0
0013    READ(5,8) TIT1,TIT2,TIT3,TIT4,TIT5,TIT6,TIT7,TIT8
0014    WRITE(6,7) TIT1,TIT2,TIT3,TIT4,TIT5,TIT6,TIT7,TIT8
0015    16 N=N+1
0016    READ(5,10) (A(N,J),J=1,11),(B(N,K),K=1,10)
0017    IF(A(N,1)) 18,17,17
0018    17 WRITE(6,12) (A(N,J),J=1,11),(B(N,K),K=1,10)
0019    GO TO 16
0020    18 N=N-1
0021    DO 50 I=1,N
0022    J=1
0023    15 IF(B(I,J).EQ.0.) GO TO 20
0024    DEGR1=A(I,J+1)/B(I,J)
0025    C(I,J)=ALOG(DEGR1)
0026    J=J+1
0027    GO TO 15
0028    20 NN=J-1
0029    IF(NN.EQ.0) GO TO 60
0030    TOTAL=1.
0031    DO 30 K=1,NN
0032    TOTAL=TOTAL*A(I,K+1)/B(I,K)
0033    D(I)=ALOG(TOTAL)/FLOAT(NN)
0034    NO(I)=NN
0035    50 CONTINUE
C
C    PRINT OUTPUT DATA
0036    WRITE(6,13) TITLE1, TITLE2, TITLE3, TITLE4, TITLE5
0037    DO 55 I=1,N
0038    NODAT=NO(I)
0039    WRITE(6,14) I,A(I,1),NO(I),D(I),(A(I,J+1),B(I,J),C(I,J),J=1,2)
0040    IF(NODAT=2) 55,55,51
0041    51 DO 54 K=3,NODAT,2
0042    NN=K+1
0043    WRITE(6,19) (A(I,J+1),B(I,J),C(I,J),J=K,NN)
0044    54 CONTINUE

FACOM ROS/V5  FORTRAN 5  -770127- V01-L14  FTMAIN
83.03.17  PAGE  2
0045    55 CONTINUE
0046    GO TO 70
0047    60 WRITE(6,9)
0048    70 STOP
0049    END

```

2.2 강제진동법

갈대모양이나 길고 가느다란 조각으로 시료를 진동할 수 있도록 그림 7 (a)와 같이 진동편을 만들어 한 끝을 조인다. 진동편의 주파수를 변화시키면 자유단의 진폭은 시편의 공진주파수와 같은 주파수에서 최대가 된다. 구동부분은 구조상 소

형으로 제작한다.

그림중 1은 강력자석편이다. 1〔Hz〕스택의 C-R 발전기에서의 전기진동이 코일 2를 거쳐서 기계진동으로 변환되어 스프링강 (spring steel) 의 설편 (舌片) 3을 진동시킨다. (설편의 주파수특성은 저이 500〔Hz〕이하의 주파수범위에서 평탄하다). 4는 시험편으로서 작은 볼트와 너트로 설

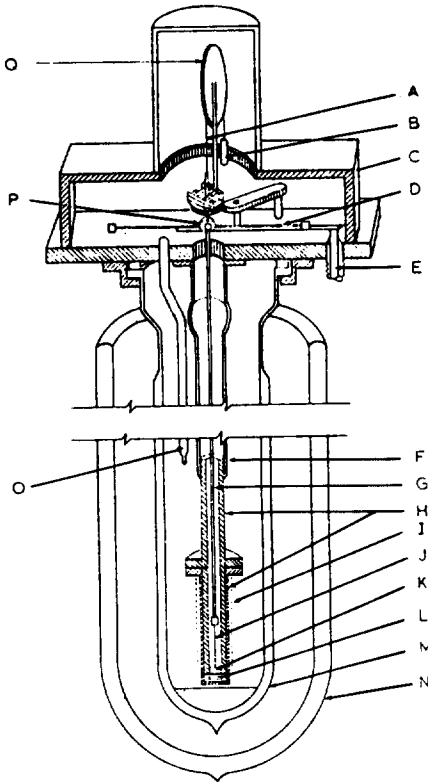


그림 6. 가역형 영회진자장치

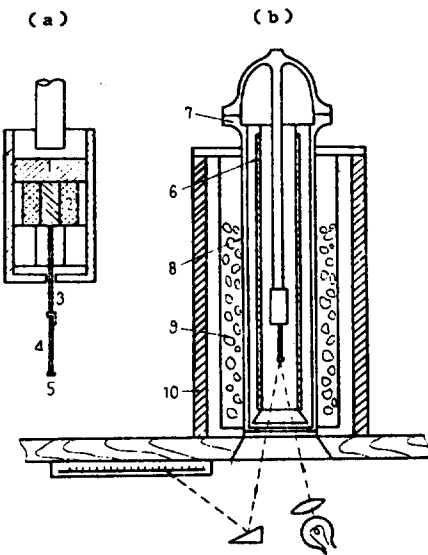


그림 7. 강제진동법

편의 하단에 취부되어 진동할 수 있게 되어 있다. 그 하단의 진폭은 그곳에 고정된 작은 거울 5의 반사에 의해서 그림 7 (b)와 같이 램프와 스케일법으로 확대되어 읽을 수 있게 된다. 이와같이 그림 8에서 알 수 있는바와 같이 공진곡선의 반가폭(半價幅)에서 내부마찰이 공진주파에 영율(Young modulus)이 구해진다. 그림 7 (b)는 장치의 설명도이다. 상기한 구동부분은 진공가능한 유리 원통 7속에 삽입된다. 시험편은 금속원통 6과 적당히 감겨진 니크롬선에 의하여 그 상하 양단의 온도차를 거의 1(°C) 이내로 유지시키면서 200(°C)까지 높일 수가 있다. 유리용기 외측에는 냉각용 고정탄소 9를 넣고 그의 외측에는 열의 침입을 방지하기 위하여 진공부분과 보온재 10으로 둘러싼 일종의 보온병을 이루고 있다.

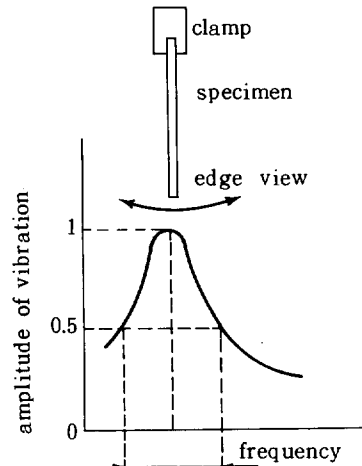


그림 8. 강제진동법의 공진곡선

2.3 기타 측정법

이상의 내부마찰측정 방법 이외에도 비공진강제진동법(non-resonance forced-vibration methods)과 초음파법(ultrasonic method) 등이 있다.

3. 결 론

이상에서 내부마찰손실측정을 위한 측정장치를 소개하였는데 이 장치들은 유전손실측정장치 및 열자극전류측정장치 등과 같이 장치하여 유전특성과 기계적내부마찰특성을 비교 연구하기 위한 것이다.

이와같은 상응성연구는 일찍이 Mikhailov와 Borisova에 의해서 시작된 이래 오늘에 이르기 까지 많은 연구를 거듭하여 왔으나 아직도 측정장치의 오차 감소와 측정기록의 자동화 등에 개량을 거듭 하고 있다. 또한 주파수범위의 확대와 측정온도범위의 증대에 따른 측정장치외 새로운 고안 및 개량도 계속되고 있다. 이에따라 지금까지 유전재료의 유전 완화 및 기계적 완화연구에 역점을 주어오던 연구 방향이 금속재료 연구에도 미치게 될것이다. 아울러 제반 측정결과에 대한 전산화처리가 체계화 되어가고 있다.

참고문헌

- 1) N.G. McCrum, B. E. Read, G. Williams ; Anelastic and dielectric effects in polymer solids, Jone Wiley:New York, pp. 356-377, 1967.
- 2) Kim, Bong-Heup ; An internal friction study of morphology and radiation effects in low density polyethylene, Thesis submitted to universite Libre de Bruxelles. pp. 49-56, 1972.
- 3) R. de Batist ; Internal friction of structural defects of crystalline solids, North-Holland Publishing Company, pp. 36-110, 1972 .
- 4) Ibid. (1), pp. 7-15, 1967
- 5) Lawrence E. Nielsen ; Mechanical properties of polymers, Van Nostrand Reinhold Co. pp. 140-143, 1962.
- 6) Ibid (3), pp. 82-86, 1972 .
- 7) 김봉흡, 강도열, 김재환 ; “線膨脹溫度 特性에 의한 低密度 폴리에틸렌의 遷移溫度에 對한 考察” 大韓電氣學會, vol. 30, No. 7, pp. 51-57, 1981.
- 8) Ibid (3), pp. 85-91, 1972.
- 9) 粟谷丈夫, 赤井光, 阪上善胤 ; “高分子材料의 内部摩擦” 日本機械學會, 第26卷161號, pp. 148-151, 1960.