

분리-Hopkinson 압력봉 방법을 이용한 폴리카보네이트의 정적 및 동적 탄성계수 값의 비교

인하대학교 기계공학과 이 역섭
인하대학교 기계공학과 대학원 백 중대

1. 서 론

일반적으로 거의 모든 재료의 기계적인 물성치들이 여러가지 하중조건에 의해 변화하는데 그 중 탄성계수는 하중속도, 온도, 재료의 특성에 따라 변화한다.

지금까지 국내에서의 연구동향을 보면 하중속도가 탄성계수에 미치는 영향에 대한 연구보고는 미약한 실정이다.

구조물의 하중이 정적이거나 혹은 충격하중이냐의 구분은 하중의 상승시간(rise time)을 구조물의 가장 긴 주기에 비교하여 결정한다. 만약 하중의 rise time이 구조물의 최장 주기의 1/2보다 작을 경우에는 충격하중으로 취급하며 rise time이 최장주기의 3배이상일 경우에는 정적하중으로 간주한다. 충격하중이 작용되는 경우에는 하중의 크기 뿐만 아니라, 하중이 작용되는 시간 및 衝動(impulse) (하중-시간 곡선하의 면적)을 알아야 한다. 이에 비하여 정적하중이 작용할 경우에는 하중의 크기만 알면 된다.

기계들이나 구조물내에서 여러가지의 방법으로 충격하중이 생성된다. 몇가지 예를 들어보면 다음과 같다.

빠른 속도로 움직이는 하중	: 다리의틀 지나가는 기차가 발생시키는 하중
직접충격하중	: 단조 해머의 낙하 하중
갑자기 작용되는 하중	: 내연기관의 연소기간 동안 발생하는 충격하중
관성하중	: 비행기나 자동차가 충돌하는 동안에 가속도에 의해서 발생하는 하중

본 연구에서는 Split-Hopkinson 압력봉 방법을 사용하여 상온에서 고인성 유리질 중합체 재료인 Polycarbonate에 대하여 스프링 충을 이용, 빠른속도로 직접적인 충격하중을 전달하는 실험 장치를 제작하였다. 총탄이 시편봉의 끝에 충격되어지면 종탄성파가 발생되고 봉에 붙여진 스트레인 게이지로 부터 탄성응력파에 의한 변형량과 탄성응력파 속도를 정밀하게 측정하여 이들 측정값을 탄성응력파 이론에 적용하여 동적 탄성계수값을 결정하였다. 이 값을 정적 인장시험에 의해 구한 정적 탄성계수값들과 비교함으로써 동적 충격하중이 작용하는 부재에 대해서는 동적탄성계수 값을 사용해야 함을 실험적으로 증명하였다.

2. 기초 이론

2-1 탄성응력파 이론

응력파는 하나의 고체 재료가 다른 평형 상태의 물질에 타격을 주어 평형 상태가 깨질때 생겨난다. 탄성 응력파에는 기본적인 두 종류의 파형으로 종탄성파와 횡탄성파가 있다. 일반적으로 봉은 단면적에 비해 길이가 월등한 것을 말하며, 봉에 발생하는 응력파는 길이 방향으로 전파하는 압축파와 인장파로 구분할 수 있는데 압축파의 진행방향은 질점 속도방향과 같은 방향이고 자유단에서 반사하는 인장파의 진행방향과 질점 속도방향은 반대이다.

2-2 Split-Hopkinson Pressure bar

- Split-Hopkinson 압력봉 (Pressure bar) 기술 은 1913년 Bertram Hopkinson이 원형봉 끝면에 총탄을 쏘았을때의 압력-시간의 관계에 흥미를 갖고 만든 것으로 응력파에 관한

연구를 할 수 있는 간단한 기술이다. 변화하는 압력 파형의 위치-시간을 보여주는 Lagrange diagram과 Split-Hopkinson 압력봉의 한 예를 Fig.2-1에 나타내었다. 간단하게 이 그림을 설명해보면,

- 1) Striker가 bar No.1에 속도 V_0 로 충격을 주면 bar No.1 끝단에 ρCV_0 의 압축 응력파가 생긴다(ρ =밀도, C =탄성 응력파의 속도). 그 응력파형의 진전시간 $2L/C$ 는 충격봉의 길이 L 과 탄성응력파의 속도 C 에 의해 결정 된다.
- 2) bar No.1에 발생된 파형이 시험시편에 부딪히는데 파형의 일부는 bar No.1으로 반사 되거나 bar No.2로 흡수 된다.
- 3) 시편의 변형은 반사된 파형의 시간 적분에 비례하고 응력은 흡수된 파형에 비례한다. 시편에서 같은 거리에 붙여진 스트레인게이지로 부터 이들 두 파형들은 응력-변형 선도 형태에 대해 동일한 시간에서 동일하게 나타난다.

외국의 경우 순간적인 충격하중의 응력해석에 있어서 이와 같은 Split-Hopkinson 압력봉 방법을 사용해서 실험결과를 얻어 분석한 연구가 많이 발표되고 있으나 국내에서의 연구는 많지 않다.

2-3 탄성응력파를 이용한 질점의 속도와 운동 에너지와 변형 에너지의 결정

탄성응력파의 진전에 따른 봉의 임의의 질점의 거동과 운동 에너지와 변형 에너지의 관계를 이해하기 쉽게 하기 위해

Fig.2-1에 임의의 시간 t 에서의 상황을 나타내었다.

이 그림에서

x : bar의 임의의 질점

C_L : 종탄성파의 속도

V_0 : bar의 임의의 질점의 속도

x 에서 질점의 운동의 속도는 ou/et 이고 V_0 로 표시한다.

$$\sigma_0 = EV_0/C_L \quad \text{-----}(2-1)$$

$$= \rho_0 C_L^2 V_0 / C_L = \rho_0 C_L V_0 \quad \text{-----}(2-2)$$

$$V_0 = \sigma_0 / (E \rho_0)^{1/2}$$

Fig. 2-1에서 압축 영역의 길이는 $C_L t$ 이며 만약 봉이 원래 정지하고 끝면이 일정한 속도 V_0 와 함께 움직인다면 전체 길이는 시간 t 에서 일정한 속도 V_0 로 움직인다. 충격에 기인한 길이 $C_L t$ 의 운동량 변화의 계산은

$$(A_0 \rho_0 C_L t) V_0 = (\sigma_0 A_0) t$$

이므로

$$\sigma_0 = \rho_0 C_L V_0 \quad \text{-----}(2-2)$$

충격 발생에 의해 끝면은 길이 $V_0 t$ 만큼 움직인다. 압축 영역에서 스트레인은 $V_0 t / C_L t$ 이므로

$\sigma_0 = EV_0 / C_L$ 식 (2-2)에 대입하면,

$$E = \frac{V_0}{C_L} = \rho_0 C_L V_0 \quad \text{와}$$

$$C_L = (E / \rho_0)^{1/2} \quad \text{-----}(2-3)$$

$$a: \text{운동 에너지} = \frac{1}{2} m V_0^2 = \frac{1}{2} A_0 \rho_0 C_L t V_0^2$$

$$b: \text{변형 에너지} = \frac{P^2 L}{2AE} = A_0 (C_L t) \frac{\sigma_0^2}{2E}$$

이것은 다시

$$A_0 (C_L t) \frac{\sigma_0^2}{2E} = A_0 (C_L t) \frac{(\rho_0 C_L V_0)^2}{2E}$$

$$= \frac{1}{2} A_0 (C_L t) \rho_0 V_0^2$$

로 표시 되어지는데 충격에 의한 운동 에너지가 변형 에너지로 보존됨을 보여준다. 이 연구에서는 이러한 이론에 의

거하여 총탄의 운동에너지가 polycarbonate봉의 변형 에너지로 전부 전환되어진다고 가정한다.

3. 실험 방법 및 실험 결과에 대한 고찰

3-1. 실험 장치

시편 polycarbonate는 단면적이 $(4.2 \times 19.3) \text{mm}^2$, 길이 373.6mm로 비중은 1.227이다. 이 봉은 길다란 V형 받침대 위에 고정된 아크릴 원형 디스크에 시편과 같은 크기의 throw-off bar와 함께 마찰없이 끼워져 있다(Fig.3-1). Fig.3-2에 실험장치의 개략도를 그려놓았다. Throw-off bar는 시편의 바로 뒤에 인접하여 있음으로써 시편의 총 변형을 보존하고 시편의 끝으로 부터의 탄성용력파의 반사를 최소화한다. 스트레인게이지(gage factor 2.06, 저항 120 Ω)는 시편의 중간정도에 붙인다. 이 스트레인게이지의 연결선은 Wheatstone bridge box(120 Ω)를 통해 신호 증폭기로 들어가게 되고 여기서 다시 오실로스코프로 연결되어 변형-시간 양상이 오실로스코프 화면상에 나타나게 된다. 오실로스코프 트리거는 내부 트리거 단자를 이용한다.

3-2. 보정

-오실로스코프의 보정은 보정단자에 시험봉을 이용 조정하는데 오실로스코프의 화면상에서 전압은 오차가 없이 맞auer겠으나 시간에 대해서는 $1000 \times 10^{-6} \text{s}$ 가 $1080 \times 10^{-6} \text{s}$ 로 $80 \times 10^{-6} \text{s}$ 의 오차가 나타나므로 8%정도를 탄성용력파의 진전 시간에서 조정해 주었다.

증폭기의 특성으로는 Wheatstone bridge의 shunt calibration기법을 이용함으로써 실험에서 단락된 bridge의 저항의 증가로 변형을 알 수 있게 했고 calibration line을 지정해 주었다. 한 예로 본 연구에서는 증폭기의 실험 조건을 압축시험(충격이 압축으로 작용하므로)에 맞게 조정 하였으며 이 경우 변형량의 calibration line이 오실로스코프 화면상의 두칸으로 나타났으며 변형률은 $1000 \times 10^{-6} \epsilon$ 으로 표시된다

4. 실험 결과 및 고찰

4-1. 동적 탄성계수의 결정

-동적탄성계수를 구하기 위해서는 봉의 중탄성파의 속도를 알아야 하는데 throw-off bar없는 장치에서 얻어지는 연속적인 파형을 보고 알 수 있다. 첫 번째 나타나는 음의 파형은 압축파로 탄성용력파가 스트레인게이지를 처음 지나가면서 나타난 것이며 양의 파형은 봉의 끝에서 인장으로 반사되어 오는 탄성용력파에 의한 것이고 두 번째 음의 파형은 다시 압축으로 봉의 앞면으로부터 되돌아온 탄성용력파에 의한 것이다. 즉, 용력파는 봉의 길이의 두 배 만큼을 진전한 것이므로 두 음의 파형사이 시간과 거리를 이용하여 탄성용력파의 속도가 결정된다. 탄성용력파의 전파거리는 $2 \times 37.36 \times 10^{-2} \text{m}$ 이고 탄성용력파의 진행시간(Fig.4-1)은 10차례의 실험 결과를 평균하면 $510 \times 10^{-6} - (510 \times 0.08) = 469.2 \times 10^{-6} \text{s}$ 이므로 속도(C_L)는 식 $C_L = 2L/t$ 으로부터 1592.5m/s 로 얻어진다. 또한 $E = \rho C_L^2$ 에서 동적탄성계수로 3112 MPa을 구할 수 있고 기초 이론에서의 식들을 이용하면

$$\epsilon = \frac{V_0}{C_L} \text{에서}$$

V_0 : Polycarbonate봉의 임의의 질점의 속도

ϵ 값은 $1580 \times 10^{-6} \epsilon$ 으로 실험에서 얻어졌으므로 $V_0 = 2.516 \text{m/s}$ 임을 알 수 있고

식 (2-2)를 이용하면

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \rho_0 C_L V_0 = 1.227 \times 10^3 \times 1592.5 \times 2.516 \\ &= 4.916 \text{MPa} \end{aligned}$$

이다. 여기에서 Polycarbonate의 비중 ρ_0 값은 직접 Polycarbonate의 질량과 부피를 측정하여 밀도=질량/부피라는 식에 대입하여 결정하였다.

여기서 운동 에너지와 변형 에너지를 계산해 보면

$$\begin{aligned} a: \text{운동 에너지} &= \frac{1}{2} m V_0^2 = \frac{1}{2} A_0 \rho_0 C_L t V_0^2 \\ &= 11.76 \times 10^{-2} \text{N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

여기서 m 은 시편의 질량으로 $37.159 \times 10^{-3} \text{kg}$

$$b: \text{변형 에너지} = \frac{P^2 L}{2AE} = A_0 (CLt) \frac{\sigma_0^2}{2E}$$

$$= 11.76 \times 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{m}$$

이때 총탄의 운동 에너지가 봉의 변형 에너지로 모두 전환되어진다고 가정하였으므로 운동 에너지를 이용 총탄의 속도를 계산하면

$$\frac{1}{2} m_1 V_1^2 = 0.5 \times 1.062 \times 10^{-4} \times V^2 = 8.836 \times 10^{-2}$$

여기서 m_1 은 총탄의 질량으로 $1.062 \times 10^{-4} \text{kg}$ 이므로

$$V_1 = 47.06 \text{m/s}$$

로 구해진다.

4-2. 정적 탄성계수의 결정

정적 탄성계수 값을 알기 위해서는 먼저 스트레인게이지를 붙이지 않은 인장시편을 인장시험기를 통하여 실험 함으로써 대략적인 안정한 탄성구간을 알아봐야 한다. 그 이유는 인장시험기에서의 하중속도가 0.5mm/min. - 500mm/min의 구간에서 조정되어질 수 있는데 500mm/min.의 하중속도에서 탄성구간을 모를 경우 polycarbonate와 같은 고인성 중합체 재료는 순식간에 소성구역으로 천이되어 버리기 때문이다.

정적실험 장치의 개략도가 Fig.4-2에 그려져 있다.

Fig.4-3은 정적실험에서 하중속도에 변화를 주었을 때의 응력-변형 선도인데 탄성계수는 0.5mm/min.의 하중속도에서 2233Mpa, 500mm/min.의 하중속도에서는 2567Mpa로 구해졌다.

Fig.4-4에는 정적 및 동적실험에서 구한 탄성계수 값들을 하중속도에 대해서 나타내었다.

5. 결론

-본 연구에서의 실험결과로 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

1) 본 연구에 사용된 Split-Hopkinson 압력봉을 제작함에 있어 신뢰성있는 동적탄성계수값을 구하기 위해서는 다음 두 가지 사항에 유의해야 했다.

i) 탄성응력파의 속도가 1592.5m/s로 아주 빠르고 스트레인게이지의 게이지길이가 5mm임을 고려하여 시편길이의 측정오차와 스트레인게이지의 오차를 줄이기 위해 단면적에 비해 충분히 길게 봉을 제작하였다($A_0=81.06\text{mm}^2, L=373.6\text{mm}$)

ii) 총탄의 운동에너지가 가능한 한 전부 시편봉의 변형 에너지로 전환되어지도록 시편봉과 아크릴 원형판의 시편봉이 끼워지는 부분에서의 마찰력을 최소화 시키기 위해 시편봉과 아크릴 원형판을 정밀가공 해야 한다.

2) Polycarbonate와 같은 고인성인 중합체 재료에서는 하중속도에 따른 탄성 계수값의 차이가 크다는 것을 정적 탄성계수값과 본 연구에서와 같이 빠른 하중속도의 동적인 충격하중을 받는 시편에서 얻어진 동적 탄성계수값과 비교하여 다음과 같은 사실을 확인 하였다. 실험역학 편람에 나타난 정적탄성계수값인 2400Mpa과는 29.7%, 0.5mm/min.의 하중속도에서의 정적탄성계수값 2233Mpa과는 39.4%, 500mm/min.의 하중속도에서 정적탄성계수값 2567Mpa과는 21.2%의 오차가 생긴다.

참고 문헌

1. Clark, A.B.J.

"Static and dynamic calibration of a photoelastic model material CR-39,"

Proc. Soc. Exptl. Stress Anal., Vol. 14,

No. 1, pp 195-204.

2. Clark, A.B.J. and R.J. Sanford

"A comparison of static and dynamic properties of photoelastic materials"

Experimental Mechanics June 1963.

3. C.A.Ross, W.H.Cook, L.L.Wilson

"Dynamic tensile test of composite material using a Split-Hopkinson pressure bar".

Experimental Techniques Nov. 1984.

4. W. Johnson

Impact strength of materials pp 1-37

Edward Arnold Ltd. 1972

5. Kolsky, H.

Stress waves in solids.

Dover Publication, Inc. N.Y. 1963

6. W.F. Hosford, R.M. Caddell

Metal Forming

pp 80-84 Pentice Hall 1983

7. Dave Lineback (Editor)

Experimental Stress Analysis Note Book Issue 8

Measurements Group Inc. April 1988

8. Dave Lineback (Editor)

Experimental Stress Analysis Note Book Issue 9

Measurements Group Inc. Sep. 1988

9. A.S. Kobayashi (Editor)

Handbook on Experimental Mechanics pp 79-103, 162-263

SEM, Inc., Prentice Hall 1987

10. J.W. Dally & W.F. Riley

Experimental Stress Analysis

McGraw-Hill, N.Y. 1978

11. J.L. Lewis & J.D. Campbell

"The development and use of a torsional Hopkinson bar apparatus"

Experimental Mechanics pp 520-524 Nov. 1972

12. K. Kishida & K. Senda

"New experimental method for determining dynamic stress-strain relation of metals"

Experimental Mechanics pp 567-571 Dec.

1968

13. J.D. Chalupnik

"Dynamic deformation of metals under high Hydrostatic pressure"

Experimental Mechanics pp 547-554 Nov. 1966

14. T.R. Wilshaw & J.M. Kelly

"response of circular clamped plates to square-wave stress pulses"

Experimental Mechanics pp 450-458 Oct. 1968

15. B.W. Abbott & R.H. Cornish

"A stress-wave technique for determining the tensile strength of brittle materials"

Experimental Mechanics pp 148-153 May. 1965

16. E. Kreyszig

Advanced engineering mathematics pp 507-509

John Wiley & Sons, Inc. Fifth Edition

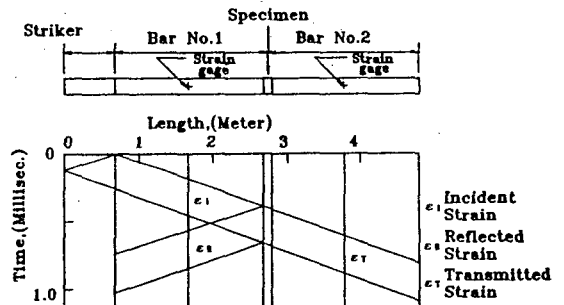


Fig.2-1 Compressive split-Hopkinson pressure-bar schematic and Lagrange diagram

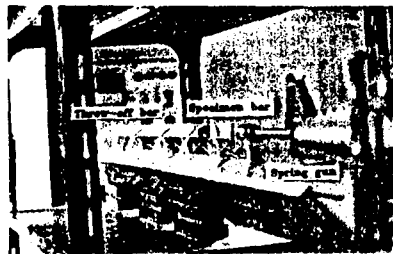


Fig.3-1 Split-Hopkinson pressure bar

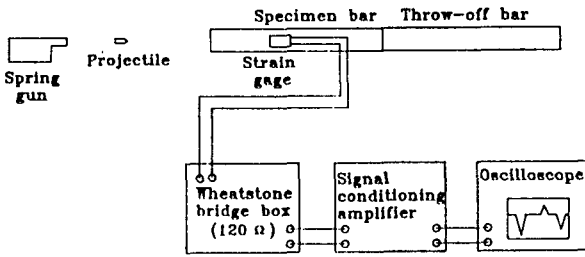


Fig.3-2 Schematic diagram of experimental system for the Split-Hopkinson pressure bar

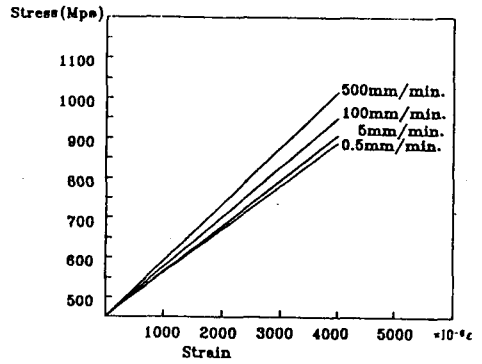


Fig.4-3 Variation of elastic coefficient by strain rate in static test

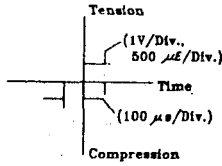
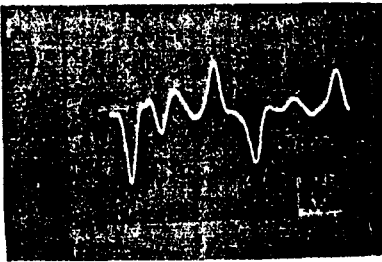


Fig.4-1 탄성용력파의 시간에 따른 진전

(y축:1V/div.,500μs/div.,x축:100μs/div.)

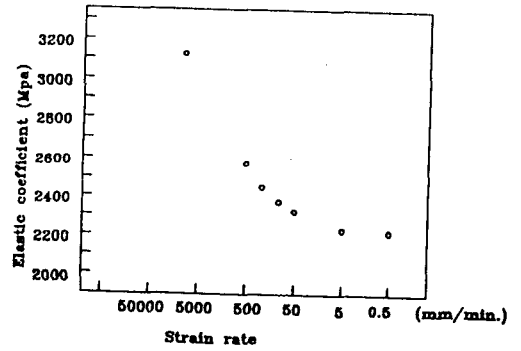


Fig.4-4 A comparison of static and dynamic elastic coefficient

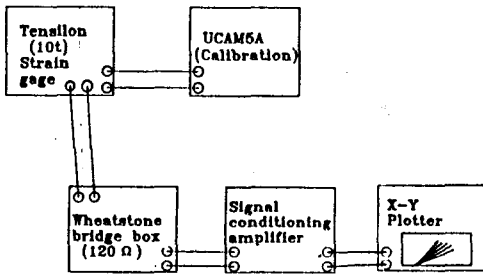


Fig.4-2 Schematic diagram of experimental system for the static test.