

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.9.740

SHPB 기법과 확률이론을 이용한 고분자재료의 동적거동특성 및 건전성 평가

이억섭* · 김동혁†

(2008년 3월 3일 접수, 2008년 8월 18일 수정, 2008년 8월 25일 심사완료)

Reliability Estimation and Dynamic Deformation of Polymeric Material Using SHPB Technique and Probability Theory

Ouk Sub Lee and Dong Hyeok Kim

Key Words : Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB, 홉킨슨압력봉), High Strain Rate(고 변형률 속도), Pulse Shaper(펄스 조정기), PP(Poly Propylene, 폴리프로필렌), POM(Poly Oxy Methylene, 폴리옥시메틸렌), Reliability(신뢰성), FORM(일계신뢰성방법), SORM(이계신뢰성방법), Failure Probability(파손확률), Reliability Index(신뢰도지수), Sensitivity Index(민감도지수), Johnson-Cook Model(존슨-쿡 모델)

Abstract

The conventional Split Hopkinson Pressure Bar (C-SHPB) technique with aluminum pressure bars to achieve a closer impedance match between the pressure bars and the specimen materials such as hot temperature degraded POM (Poly Oxy Methylene) and PP (Poly Propylene) to obtain more distinguishable experimental signals is used to obtain a dynamic behavior of material deformation under a high strain rate loading condition. An experimental modification with Pulse shaper is introduced to reduce the non-equilibrium on the dynamic material response during a short test period to increase the rise time of the incident pulse for two polymeric materials. For the dynamic stress strain curve obtained from SHPB experiment under high strain rate, the Johnson-Cook model is applied as a constitutive equation, and we verify the applicability of this constitutive equation to the probabilistic reliability estimation method. The methodology to estimate the reliability using the probabilistic method such as the FORM and the SORM has been proposed, after compose the limit state function using Johnson-Cook model. It is found that the failure probability estimated by using the SORM is more reliable than those of the FORM, and the failure probability increases with the increase of applied stress. Moreover, it is noted that the parameters of Johnson-Cook model such as A and n, and applied stress affect the failure probability more than the other random variables according to the sensitivity analysis.

기호설명

$\dot{\epsilon}$: 변형률 속도	L	: 시편의 길이
$\epsilon_{specimen}$: 시편의 변형률	E	: 압력봉의 탄성 계수
$\sigma_{specimen}$: 시편의 응력	A_p	: 압력봉의 단면적
		A_s	: 시편의 단면적
		C_0	: 압력봉에서 탄성과 전파 속도
		ϵ_I	: 입력 변형률
		ϵ_R	: 반사 변형률
		ϵ_T	: 투과 변형률
		A	: 초기항복응력

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : kdonghyeok77@yahoo.co.kr
TEL : (032)860-7315 FAX : (032)868-1716
* 회원, 인하대학교 기계공학부

B	: 변형률 경화상수
C	: 변형률 속도 경화지수
n	: 변형률 경화지수
ϵ	: 등가소성 변형률
$\dot{\epsilon}^*$: 무차원 등가소성 변형률
RE	: 저항성분의 확률변수
LO	: 하중성분의 확률변수
PF	: 파손확률
Φ	: 표준정규확률분포함수
μ_X	: 확률변수 X 의 평균
S_X	: 확률변수 X 의 표준편차
β	: 신뢰도지수
κ_i	: 곡률
SI_{X_i}	: 변수 X_i 의 민감도 지수

1. 서론

산업의 발전과 함께 고도화된 기술을 응용하는 현대 사회에서 활용되는 기계구조물은 다양한 외부 경계조건과 혹독한 환경에 노출되는 경우가 많다. 이와 같은 기계구조물의 운용에 신뢰성과 건전성을 부여하기 위해서는 설계 단계에서 그 구조물을 구성하는 재료의 실제 사용조건에 대응하는 기계적 물성치에 대한 정보를 정확하게 알고 있어야 한다. 그러나 일반적으로 기계구조물의 설계에 사용되는 재료의 거동특성에 대한 정보는 정적 하중과 같은 단순 조건에서 정적 인장시험장치를 통해 획득된 것이 대부분이다. 실제 사용되는 가혹한 동적 하중하의 경계조건에 대해 충분한 고려가 이루어지지 않고 있는 것이다. 이것은 부정확한 설계 정보를 사용하여 구조물 설계가 수행된다는 의미이고 이렇게 설계 제작된 기계 구조물에 대한 신뢰도와 안전도는 충분하지 않을 수밖에 없다.⁽¹⁻⁹⁾

기계 구조물의 설계 및 파손해석에 있어서 모든 변수들을 단일 값으로 보는, 기존의 결정론적 방법을 이용하는 것은 실제 변수들의 데이터가 통계적인 특성을 따라 흩어져 분포하기 때문에 해석에 불확실성이 야기되므로 적절치 않다. 따라서 이러한 변수들의 분포 특성을 함께 고려할 수 있는 확률론적 방법을 이용한 기계 구조물의 설계 및 파손해석의 필요성이 높아지고 있다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

변형률 속도에 따라 하중은 정적인 하중과 동적인 하중 그리고 충격하중으로 분류되고 하중이 가해지는 시간이 짧아질수록 일반적으로 재료는 빠른 변형률 속도로 변형한다. 정적인 하중과는 달

리 동적 하중에서의 변형은 짧은 시간 동안 이루어지며 관성의 효과도 중요하므로 상대적으로 실험방법에 대한 어려움이 있기 때문에 동적 하중하에서의 재료의 거동 해석은 쉽지 않다.⁽⁵⁻⁸⁾

동적 하중 조건에서는 충격에 의하여 급격히 방출되는 에너지가 재료를 고변형률 속도로 변형 시키게 된다. 이 고속도 변형은 수 μ sec 정도의 매우 짧은 시간 동안에 일어나기 때문에 변형되는 상황을 정밀하게 측정하기 위해서는 특수한 실험장치 및 측정 시스템들이 필요하며, 동적 실험 데이터에 대한 해석 절차를 면밀하고 정확하게 수행하여야 한다.^(4,5)

기계 구조물을 구성하는 고분자 재료는 경량화와 내열성, 내식성 그리고 내충격성 재료로 사용빈도가 점차 늘어나고 때로는 고속과 고온의 가혹한 환경에 노출되기도 한다. 고분자 재료는 기계적 부하(진동, 충격), 온도, 습도, 자외선, 오존 등의 외부 경계조건에서 노출되는 시간이 길어지면 설계 시 요구되는 성능특성치가 요구 수준보다 저하되는 열화(Degradation)현상이 발생된다. 고분자 재료의 열화는 기계구조물의 신뢰도를 유지하기 위해 요구하는 고분자 재료의 기능을 수행하지 못하거나 요구 성능을 만족하지 못하게 하여 기계구조물 전체의 고장이나 파손으로 이어져 대형 사고를 유발시키는 원인이 된다. 그러므로, 고분자 재료의 열화현상이 발생하는 시점 즉, 열화수명을 정밀하게 예측할 수 있다면, 고분자 재료가 사용되는 기계구조물의 고장이나 파손을 미연에 방지하여 신뢰성과 건전성을 높일 수 있을 것이다.^(3,5)

본 연구는 저자가 기본적인 SHPB 기법에 펄스조정기법(Pulse shaper technique)을 도입하여, SHPB 압축 시험과 펄스조정기법을 이용하여 고분자 재료 특성 파라미터의 성능저하에 가장 큰 영향을 미치는 온도의 영향을 규명한 결과를 이용하여, 동적 하중을 받는 고분자 재료인 PP 와 POM 의 기계적 성질과 열화상태를 정량적으로 분석하는 실험과정과 실험결과 분석 방법을 제시하고, 고분자 재료를 사용한 기계구조물의 설계 시 확률적으로 예측 및 해석하는 방법론을 제시하고자 한다.

2. SHPB 기법

2.1 기본 가정 및 이론

SHBP 실험에서 봉끼리 완전 접촉된 시편에서의 길이 방향과 반경 방향의 관성 효과 등에 대한 운동방정식의 해는 이미 Pochhammer⁽³⁾와 Chree⁽⁹⁾ 등에 의해서 구해졌다. 그 결과는 SHPB 기법에 응용되었고, 응력파가 파장이 λ 인 순수 코사인파

(cosine wave)가 반경 R 인 봉을 전파할 경우, $R/\lambda \ll 1$ 일 때 응력파에 의한 축 변위와 응력은 봉의 단면에 걸쳐 균일하다는 사실이 발견되었다.⁽⁵⁾

SHPB 실험 장치로 실험을 수행할 때 압력봉 내에서 전파하는 응력파의 중요한 특성중의 하나는 축 방향으로의 응력파 전파속도가 그 파장(wave length)에 따라 변한다는 것이다. 이것은 파의 분산(wave dispersion)을 발생시키게 되며, 결과적으로 시편의 동적 응력-변형률 거동에 악영향을 끼치게 되므로 유의 하여야 한다.⁽⁵⁾

2.2 시편의 균일 단면 변형

입력봉 내에서의 탄성과 전파이론이 수학적으로 예견될 수 있음에 반해 시편의 변형은 소성과 전파와 마찰에 의한 영향을 고려해야 하기 때문에 해석에 어려움이 따른다. 따라서 마찰의 영향은 점성이 있는 윤활제인 그리스를 사용하여 최소화하였으며, 시편의 기하학적인 형상을 조정하여 SHPB 기법을 이용한 고변형률 속도에서는 갑작스러운 입자들의 가속화 때문에 길이 방향이나 반경 방향의 관성을 최소화하였다. 본 연구에서는 관성을 최소화하기 위한 시편의 길이, L 과 직경, D 의 비는 시편의 푸아송 비, ν 를 이용한 식, $L/D = \sqrt{3\nu/4}$ 을 이용하여 길이 5mm, 직경 10mm로 결정하였다.

2.3 SHPB 기법에서 응력과 변형률 속도 측정

SHPB 실험 기법은 기본적으로 충격봉(Striker bar), 입력봉(Incident bar)과 출력봉(Transmitted bar)으로 이루어져 있다. 각각의 봉은 같은 재질로 이루어져 있으며 직경이 동일하다. 각각의 봉을 전파하는 응력파를 1 차원으로 만들고 높은 변형률 속도로 시편을 변형 시킬 수 있도록 입력봉과 출력봉의 길이가 충격봉의 길이의 최소 2 배가 되어야 하고, 봉의 길이와 직경의 비율은 100 으로 하여 1 차원 탄성파가 발생하도록 하였다.

시편은 중력의 영향과 관성의 영향을 최소화 하기 위한 기하학적인 형상으로 입력봉과 출력봉 사이에 위치하게 된다. Fig. 1 은 SHPB 실험에서 발생한 압축 탄성파가 입력봉과 출력봉을 통하여 전파하는 거동을 나타낸 것이다.

압축공기에 의해 충격봉이 입력봉에 충돌하게 되면 압축 응력파가 발생된다. 이 응력파는 입력봉을 통하여 1 차원적으로 입력봉과 시편의 계면을 향하여 전파된다. 입력봉과 시편의 계면에서 도달한 응력파는 입력봉과 시편의 임피던스 차이에 의해 일부는 반사되고, 일부는 시편을 투과한다. 여기서 투과한 응력파는 시편과 출력봉의 계면을 통과하여 출력봉 끝 단까지 전파하게 된다. 시편 내에서 발생하는 동적 응력, 동적 변형률 그리고 변형률 속도는 각 봉에 부착된 스트레인 게이지 출력값을 통해 다음과 같이 산정된다. 식 (1), (2), (3)은 시편의 응력과 변형률, 변형률 속도를 산정하는데 사용된 식이다.⁽⁵⁾

$$\sigma_{specimen} = E \left(\frac{A_p}{A_s} \right) \epsilon_T \tag{1}$$

$$\epsilon_{specimen} = \frac{-2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R dt \tag{2}$$

$$\dot{\epsilon}_{specimen} = \frac{d\epsilon(t)}{dt} = \frac{-2C_0}{L} \dot{\epsilon}_R(t) \tag{3}$$

2.4 펄스조정기를 이용한 SHPB 실험

본 연구에서는 탄성파를 조정하기 위하여 펄스조정기(Pulse Shaper)를 이용하였으며 충격봉과 입력봉 사이의 충격면에 펄스조정기를 위치시켰다⁽⁸⁾. Fig. 2 는 입력봉의 충격면에 펄스조정기를 부착시켜 수정한 SHPB 실험 장치도 및 실제 실험장치 사진을 보여 주고 있다.

펄스조정기를 사용하지 않는 기존의 SHPB 실험 기법에서는 입력봉과 시편의 계면(Front end)과 시편과 출력봉과의 계면(Back end)에 작용하는 응력의 크기가 다르게 된다. 즉, 시편이 동적 응력의 평형상태가 되지 못하고, 일정하지 않은 변형률 속도로 변형하여 정확한 실험 결과를 얻을 수 없게 된다. 이러한 실험오차를 줄이기 위하여 입력봉의 충격면에 펄스조정기를 부착하여 SHPB 기법을 개선하였다. 압축공기에 의해 발사된 충격봉이 입력봉의 충격면에 있는 펄스조정기에 충격 하중을 주게 되면, 펄스조정기는 소성 변형을 일으키고, 응력파는 입력봉을 향하여 전파된다.

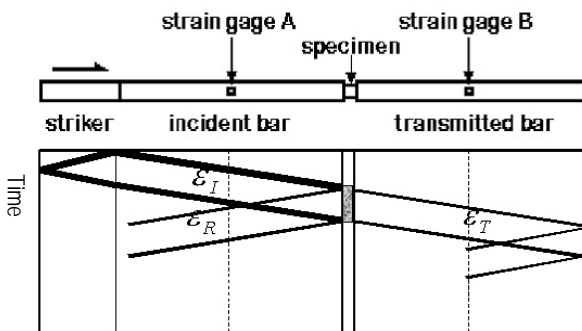


Fig. 1 A schematic diagram of specimen and elastic stress wave propagation for the compressive SHPB test

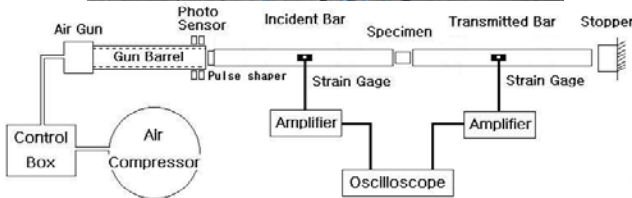


Fig. 2 Photo and Schematic of the SHPB experimental setup

이때 입력봉에서 측정되는 입사파의 진폭이 급격하게 신장되는 부분의 시간(Rising time)이 길어지게 된다. 펄스조정기에 의해 개선된 SHPB 기법에서는 시편 내에서 동적 응력 상태가 평형상태가 되고, 일정한 변형률 속도에 의한 변형 상태를 얻을 수 있다.⁽⁴⁾

2.5 구성방정식

재료의 거동에 대한 기술적인 정보를 공학설계에 이용하기 위해서는 구성방정식이 필요하게 된다. 또한 재료 혹은 구조물의 기계적인 변형거동을 수치해석적으로 해석할 경우 그 결과의 정확성은 재료의 변형거동을 나타내는 구성방정식의 특성에 크게 영향을 받게 된다. 일반적으로 재료의 동적변형 거동을 총체적으로 완전하게 나타내는 것을 불가능하고 실험조건과 실험결과에 따르는 한계성을 가진 경험적인 구성방정식의 형태로 나타내어 진다.

구성방정식은 일반적으로 변형률, 변형률 속도, 온도, 내부상태변수 등의 함수로 표현되는데 본 연구에서는 가장 널리 쓰이는 Johnson-Cook 모델을 이용하였다. Johnson-Cook 모델은 아래와 같은 식으로 표현된다.⁽⁷⁾

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \cdot [1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*] \cdot [1 - (T^*)^m] \quad (4)$$

여기서 A 는 초기항복응력, B 는 변형률 경화상수, C 는 변형률 속도 경화지수, n 은 변형률 경화지수, ε 은 등가소성 변형률, $\dot{\varepsilon}^* (= \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0)$ 는 무차원 등가소성 변형률 속도, $\dot{\varepsilon}$ 는 등가소성 변형률 속도, $\dot{\varepsilon}_0$ 는 기준 등가소성 변형률 속도(=1.0/sec), $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, T 는 현재온도, T_m 은 재료의 용융온도, T_r 은 실온, m 은 재료의 열 열화지수이다.

실온에서 수행하는 SHPB 실험에서는 무차원 등가 온도(T^*)가 무시되며 식 (4)는 다음의 식과 같이 단순화 된다.

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \cdot [1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*] \quad (5)$$

위 식에서 첫번째 괄호부분은 재료의 변형률 경화효과를 나타내고, 두번째 괄호 부분은 변형률 속도 경화를 나타낸다. 변형률 경화 효과와 관련된 상수인 A , B , n 은 응력-변형률 선도를 이용하여 산출하고, 변형률 속도 경화를 나타내는 항의 상수 C 는 변형률 속도에 따른 초기 항복응력에 관한 그래프를 이용하여 산출한다.

3. 파손 확률 이론

3.1 일계신뢰성방법(FORM)

본 연구에서는 모든 변수들을 정규분포이며 확률분포가 평균과 표준편차에 의해서 결정되는 것으로 가정하고 확률이론 중 FORM(first order reliability method)을 사용하였다. FORM은 한계상태방정식(limit state function; LSF)의 Taylor 급수 전개식의 1 차 항만 사용하여 파손확률을 구하는 방법으로 파손확률에 대한 상대적 지표인 신뢰도지수(reliability index)를 산정하는 방법이다. 파손확률 해석을 수행하기 위해서는 파손에 대한 기준이 필요하고 이는 한계상태방정식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁻¹⁶⁾

$$Z = RE - LO \quad (6)$$

여기서 RE 은 저항성분의 확률변수이고, LO 은 하중성분의 확률변수이다. RE 과 LO 이 정규분포를 갖는 확률변수이므로 새로운 확률변수 Z 도 정

규분포를 갖고 파손확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PF = P[Z < 0] = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{S_Z \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{Z - \mu_Z}{S_Z}\right)^2\right\} dZ \quad (7)$$

여기서 새로운 확률변수 U 를 $U = (Z - \mu_Z)/S_Z$ 와 같이 정의하면 식 (7)의 파손확률은 다음과 같다.

$$PF = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{U^2}{2}\right\} dU = P[Z < 0] = \Phi(-\beta) \quad (8)$$

이때 파손확률 PF 와 표준정규분포함수인 Φ 사이에 식 (8)의 관계가 성립하도록 하는 β 를 신뢰도지수라고 하며 다음과 같이 나타낸다.

$$\beta = \frac{\mu_Z}{S_Z} = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{S_R^2 + S_L^2}} \quad (9)$$

신뢰도지수를 구하는데 있어 식 (9)를 사용하기 위해서는 한계상태방정식이 선형(linear)이어야 한다. 만약 한계상태방정식이 비선형(nonlinear)인 경우에는 식 (9)를 사용하여 신뢰도지수를 구할 수 없게 된다.

한계상태방정식이 비선형인 경우에 신뢰도지수를 구하는 방법으로 Rackwitz 와 Fiessler 는 Fig. 3 과 같은 과정으로 신뢰도지수를 계산하는 방법을 제안하였다. 먼저 파손의 기준이 되는 한계상태방정식을 정의하고, 초기값은 각 확률변수가 갖는 평균을 입력한다. 표준 정규확률분포 공간에서의 평균과 표준편차를 산출하고 한계상태방정식의 각 확률변수에 대한 편미분 값을 이용하여 신뢰도 지수와 새로운 확률변수값을 산출한다. 본 연구에서는 신뢰도지수가 임의의 값($\Delta\beta \leq 0.001$)에 수렴할 때까지 Fig. 3 의 과정을 반복하여 신뢰도지수를 계산한 이후에 식 (8)을 이용하여 파손확률을 구하였다.⁽⁹⁻¹⁶⁾

3.2 이계신뢰성방법(SORM)

FORM 방법은 한계상태방정식을 일차식으로 선형 근사하므로 Fig. 4 에서 보는 것과 같이 한계상태방정식의 곡률특성을 고려할 수 없기 때문에, 표준정규분포 확률 변수 공간에서 원점으로부터 한계상태방정식까지의 최단거리가 같기만 하면 한계상태방정식의 모양에 관계없이 동일한 파손확률을 갖는 것으로 나타나는 단점이 있다.

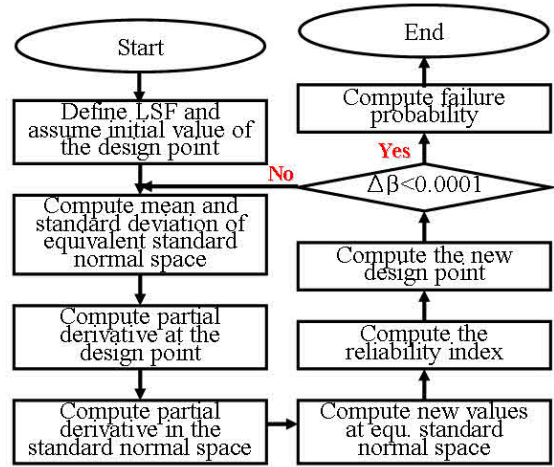


Fig. 3 Processing of computing the reliability index

한계상태방정식의 곡률은 한계상태방정식을 Taylor 급수 전개하였을 때 2 차식과 관계가 있다. FORM 이 가진 단점을 보완하기 위해 한계상태방정식의 이차항까지 포함하는 근사식을 이용함으로써 한계상태방정식의 곡률을 고려하는 방법이 제안되었으며 이러한 방법을 SORM(second order reliability method)이라 한다.

본 연구에서는 다음 식과 같이 표현되는 Breitung 이 제안한 근사식을 사용하였다.⁽¹⁰⁻¹⁶⁾

$$PF_{SORM} = \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \beta \kappa_i)^{-1/2} \quad (10)$$

여기서 κ_i 는 원점에서 한계상태방정식까지의 최단 거리가 되는 점에서의 곡률을 나타내고, β 는 FORM 을 이용하여 계산한 신뢰도 지수이다. 곡률은 Fig. 5 에 나타낸 방법을 이용하여 산출할 수 있다. 각 변수의 방향코사인을 이용하여 R_0 행렬을 구성하고, Gram-Schmidt 방법을 이용하여 R 행렬을 산출한다. 각 확률변수에 대한 이차편미분값으로 구성된 D 행렬과 앞에서 구한 R 행렬을 이용하여 A 행렬을 구하고, 곡률 κ_i 는 A 행렬의 고유값(eigenvalue)으로부터 구한다.

각 확률변수들이 파손확률에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해서 민감도 지수(Sensitivity Index)를 사용하였다. 민감도 지수는 아래와 같이 정의된다.

$$SI_{X_i} = \frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial X_i}\right)}{\left(\sqrt{\sum \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i}\right)^2}\right)} \quad (11)$$

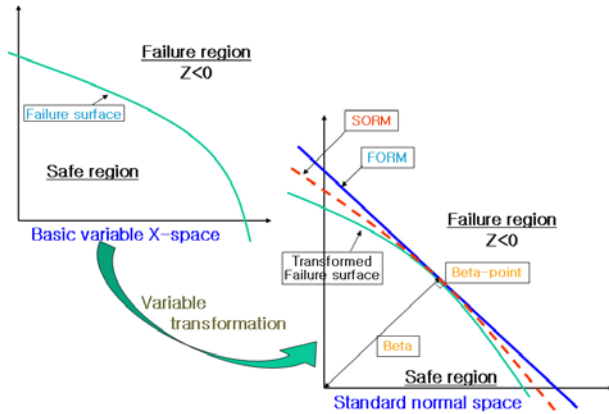


Fig. 4 Geometric concept of reliability index and basic concept of FORM(first-order reliability method)

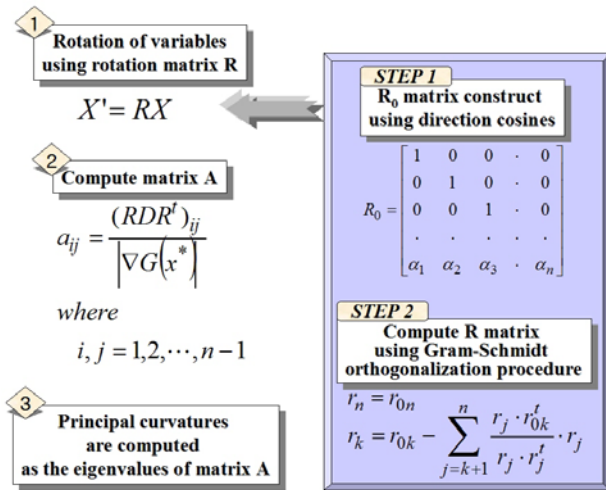


Fig. 5 Process of computing the principal curvatures

여기서 $\delta Z / \delta X_i$ 는 한계상태방정식의 확률 변수 X_i 에 대한 편미분을 나타낸다.

3.3 구성방정식을 이용한 한계상태방정식 정의 확률론적 방법인 FORM 과 SORM 을 이용하여 파손확률을 산출하여 구조물의 건전성을 평가하기 위해서는 먼저 한계상태방정식을 정의하여야 한다. 한계상태방정식을 정의할 때는 구조물의 파손기준을 설정하여야 한다. Von-Mises 파손평가기준을 이용할 경우 항복응력은 실험결과로부터 유도한 구성방정식에서 구할 수 있다. 본 연구에서는 연신율법(Extension-Under-Load-Method)를 이용하여 항복응력을 산출하였다. 연신율법이란 응력-변형률 곡선에서 직선부가 거의 나타나지 않는 경우에는 0.2% 오프셋(Offset) 방법을 사용할 수 없기 때문에 응력-변형률 곡선에서 총 변형률이 0.5%가 되는 점에서 응력-변형률 곡선으로 수직선을 그어 만나는 점의 응력을 항복응력으로 정하는 방법이다.

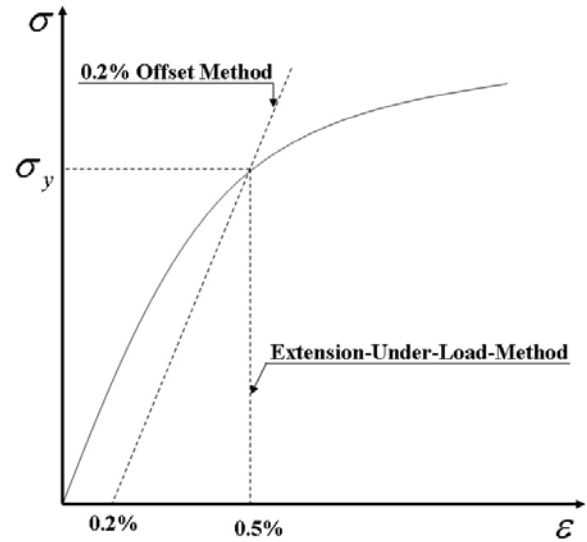


Fig. 6 Stress-Strain diagram for determination of yield stress by the Extension-Under-Load-Method and 0.2% Offset Method

즉 한계상태방정식(Z)는 항복응력(σ_{y_JC})과 외력에 의해 구조물에 작용하는 응력(σ_a) 사이의 차이로 정의할 수 있으며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z = \sigma_{y_JC} - \sigma_a \quad (12)$$

여기서 $\sigma_{y_JC} > \sigma_a$ 이면 구조물이 안전한 경우이고 $\sigma_{y_JC} < \sigma_a$ 이면 구조물의 파손이 발생하는 경우이다.

4. 실험방법

기계적 강도가 우수하고, 내충격성, 내열성, 가공성, 전기절연성이 우수하여 산업전반에 다양하게 사용되고 있는 플라스틱 재료는 탄성과 전파속도와 임피던스가 매우 낮다. SHPB 실험장비를 이용하여 재료의 동적 거동특성을 해석하기 위해서는 압력봉과 시편 사이에 적절한 임피던스 차이를 두어 탄성과의 전파가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 A17075-T6511 압력봉을 사용하여 플라스틱재료에 대하여 압력봉과 시편과의 임피던스 차를 줄여 동적 하중에 대한 높은 응답률을 얻을 수 있었다.

또한 SHPB 실험기법에서 가장 기본 가정이 되는 시편의 일정한 변형률 속도와 시편에서의 동적 응력 평형상태를 이루기 위해 펄스조정기법을 사용하였다. 본 연구에서는 압력봉과 시편의 적절한

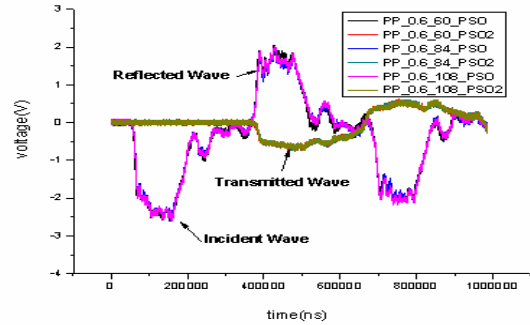
임피던스 차와 펄스조정기법을 통해 신뢰도를 높인 SHPB 실험 기법을 사용하여 PP와 POM을 고온에 일정시간 노출시켜 열화시킨 시편에 대해 다양한 변형률 속도에 따른 동적 거동 특성에 대한 실험을 수행하였다.

충격봉은 직경 16mm, 길이 300mm를 사용하였고 입력봉과 출력봉은 각각 직경 16mm, 길이 1,600mm를 사용하였다. 또한 시편의 재료는 PP와 POM을 사용하였고 직경 10mm, 길이 5mm의 크기로 준비하였다. PP와 POM의 고온에서의 열화되었을 때의 고속충격 특성을 SHPB 실험을 통해 알아보기 위해 각 재료 용점의 약 50%, 70%, 90% 정도인 PP의 경우 60°C, 84°C, 108°C의 온도에서, POM의 경우 82.5°C, 116°C, 148°C의 온도에서 각각 10일 동안 노출시켜 시편을 열화시켰다. 다양한 변형률 속도를 얻기 위해 SHPB 실험은 0.6bar, 0.8bar, 1.0bar, 1.2bar에서 수행하였다. 본 연구에서 사용한 펄스조정기 재료는 Cu-11000으로 직경 10mm, 길이 2mm로 제작하여 충격봉과 입력봉의 계면에 위치시켰다. 또한 펄스조정기가 있을 경우와 없는 경우에 각각 SHPB 실험을 수행하여 비교 검토하였다.

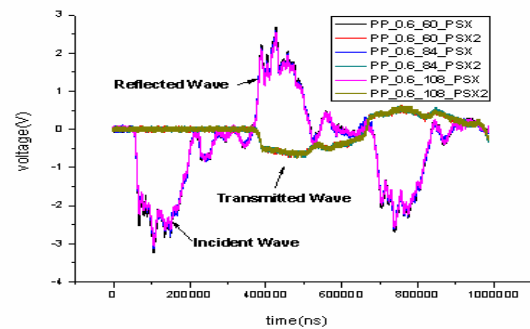
5. 실험 결과 및 해석

PP와 POM 시편의 고온에서 열화되었을 때의 고속충격 특성을 확인하기 위해 A17075-T6511 압력봉에 펄스조정기를 부착한 경우와 부착하지 않은 경우로 나누어 0.6abr, 0.8bar, 1.0bar, 1.2bar에서 SHPB 실험을 수행하였고, 여러 가지 압력의 결과 중 0.6bar에 대한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 열화정도에 따라 파형은 거의 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있고, 특히 동일한 온도에서 열화시킨 시편은 동일한 파형을 나타내어 실험의 반복성이 우수한 것을 확인하였다.

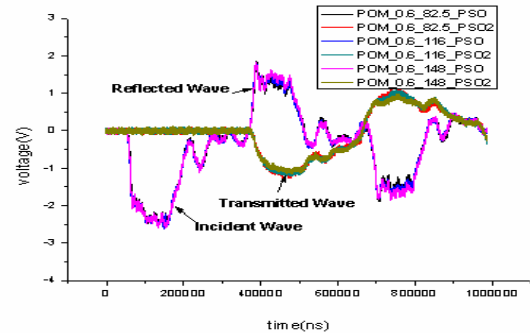
SHPB 실험기법은 시편에 짧은 시간에 급격한 에너지를 방출하기 때문에 입사파의 진폭이 급격하게 신장되는 부분의 시간(Rising time)이 매우 짧게 된다. Fig. 7 (b), (d)의 입력파에서 펄스조정기를 사용하지 않은 경우 탄성파가 지속되는(Duration)구간은 동적 하중이 일정하지 못한 채 변동이 심한 것을 볼 수 있고, 시편에 일정하지 못한 하중을 가하고 있음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 7 (a), (c)에서 보는 것과 같이 펄스조정기를 사용한 경우에는 입력파에서 파가 지속되는(Duration) 구간의 하중이 펄스조정기를 사용하지 않는 경우와 비교해 볼 때 많이 일정해지고 변동 또한 많이 줄어든 것을 알 수 있다.



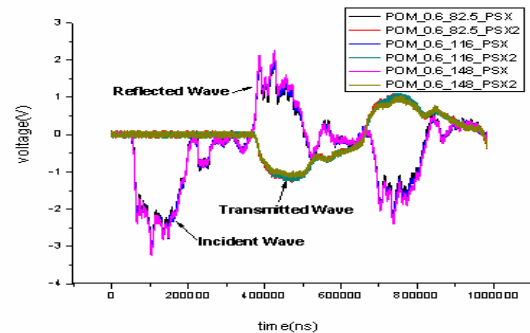
(a) With Pulse shaper for PP



(b) Without Pulse shaper for PP



(c) With Pulse shaper for POM



(d) Without Pulse shaper for POM

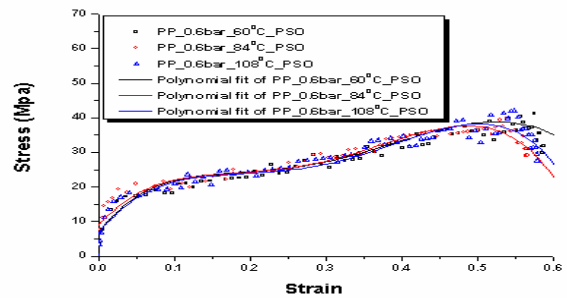
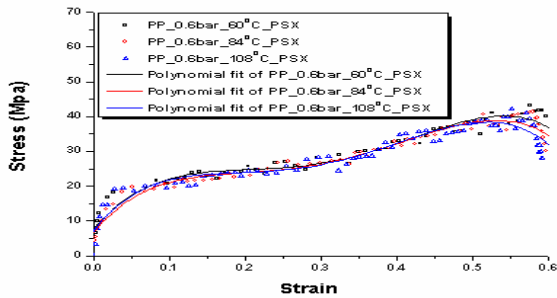
Fig. 7 Typical diagram for voltage vs. time obtained by using the A17075-T6522 pressure bar at 0.6bar with and without Pulse shaper

Table 1 The strain rate according to experimental pressure and existing Pulse shaper for POM specimen

	With Pulse Shaper			Without Pulse Shaper		
	82.5 °C	116 °C	148 °C	82.5 °C	116 °C	148 °C
0.6bar	4400s ⁻¹	4260 s ⁻¹	3930 s ⁻¹	4400 s ⁻¹	4260 s ⁻¹	3930 s ⁻¹
0.8bar	4570 s ⁻¹	4420 s ⁻¹	4080 s ⁻¹	4570 s ⁻¹	4420 s ⁻¹	4080 s ⁻¹
1.0bar	5010 s ⁻¹	4860 s ⁻¹	4480 s ⁻¹	5010 s ⁻¹	4860 s ⁻¹	4480 s ⁻¹
1.2bar	5110 s ⁻¹	5010 s ⁻¹	4560 s ⁻¹	5110 s ⁻¹	5010 s ⁻¹	4560 s ⁻¹

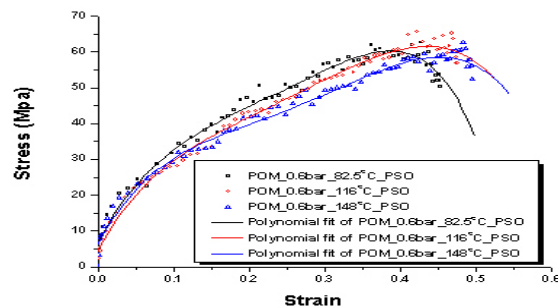
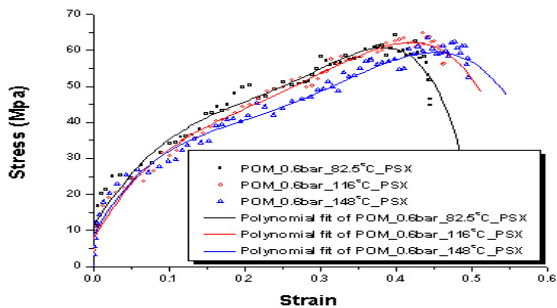
Table 2 The strain rate according to experimental pressure and existing Pulse shaper for PP specimen

	With Pulse Shaper			Without Pulse Shaper		
	60 °C	84 °C	108 °C	60 °C	84 °C	108 °C
0.6bar	2320s ⁻¹	2300 s ⁻¹	2280 s ⁻¹	2320s ⁻¹	2300 s ⁻¹	2280 s ⁻¹
0.8bar	2340 s ⁻¹	2320 s ⁻¹	2290 s ⁻¹	2340 s ⁻¹	2320 s ⁻¹	2290 s ⁻¹
1.0bar	2470 s ⁻¹	2450 s ⁻¹	2440 s ⁻¹	2470 s ⁻¹	2450 s ⁻¹	2440 s ⁻¹
1.2bar	2680 s ⁻¹	2650 s ⁻¹	2640 s ⁻¹	2680 s ⁻¹	2650 s ⁻¹	2640 s ⁻¹



(a) Without Pulse shaper degraded at 82.5 °C, 116 °C, 148 °C for PP

(b) With Pulse shaper degraded at 82.5 °C, 116 °C, 148 °C for PP



(c) Without Pulse shaper degraded at 82.5 °C, 116 °C, 148 °C for POM

(d) With Pulse shaper degraded at 82.5 °C, 116 °C, 148 °C for POM

Fig. 8 Typical stress-strain diagram without and with Pulse shaper at 0.6bar

3 가지 온도에서 각각 10 일 동안 열화 시킨 PP 와 POM 시편에 대하여 펄스조정기를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 각각 SHPB 실험한 결과 데이터를 이용하여 산출한 동적 응력-변형률 곡선을 Fig. 8 에 나타내었다. 실험 데이터

를 이용하여 곡선 맞춤(Curve Fitting) 한 곡선을 함께 나타내었다. SHPB 실험은 0.6bar, 0.8bar, 1.0bar, 1.2bar 의 4 가지 압력에 대하여 수행하였지만 Fig. 8 에는 0.6bar 에 대한 결과만 나타내었고, 비록 본 지면에는 나타내지 않았지만 다른 압력에 대해서

Table 3 Parameters of Johnson-Cook model obtained from SHPB experiment for POM

	Pulse shaper	Temp. (°C)	A		B		n		C	
			Mean	C.O.V	Mean	C.O.V	Mean	C.O.V	Mean	C.O.V
0.6bar	O	82.5	2.37396	0.032	94.82413	0.0013	0.49661	0.0032	0.01439	2.69E-03
		116	1.04576	0.065	97.12043	0.0013	0.53429	0.0029	0.0151	2.46E-03
		148	1.41979	0.054	80.65408	0.0012	0.45413	0.0034	0.01559	2.81E-03
	X	82.5	5.02528	0.022	85.96669	0.0017	0.4552	0.0048	0.01344	3.12E-03
		116	2.89296	0.029	92.54485	0.0014	0.50026	0.0036	0.01518	2.56E-03
		148	1.69765	0.066	76.0727	0.0015	0.40342	0.0051	0.01559	2.74E-03
0.8bar	O	82.5	2.33046	0.032	98.22079	0.0013	0.5037	0.0030	0.01426	3.57E-03
		116	2.59742	0.031	90.09236	0.0013	0.47984	0.0034	0.01279	2.99E-03
		148	2.68799	0.034	79.04443	0.0014	0.44471	0.0042	0.0168	3.23E-03
	X	82.5	0.59044	0.238	86.28435	0.0015	0.38079	0.0053	0.01108	3.00E-03
		116	0.68933	0.159	92.37448	0.0016	0.45477	0.0044	0.0132	2.96E-03
		148	4.97082	0.023	81.55007	0.0015	0.47997	0.0046	0.0158	3.37E-03
1.0bar	O	82.5	0.85333	0.124	102.16582	0.0010	0.41154	0.0035	0.01101	2.07E-03
		116	0.86382	0.097	101.78489	0.0011	0.46635	0.0030	0.01232	3.02E-03
		148	1.59195	0.056	126.52728	0.0030	0.72371	0.0041	0.01487	2.93E-03
	X	82.5	1.97187	0.090	97.22401	0.0014	0.35889	0.0055	0.01092	3.35E-03
		116	1.43955	0.112	94.43905	0.0014	0.36899	0.0053	0.011	3.59E-03
		148	0.95292	0.147	86.55619	0.0014	0.37079	0.0051	0.01392	4.87E-03
1.2bar	O	82.5	0.77357	0.118	106.24517	0.0010	0.44503	0.0031	0.01014	2.64E-03
		116	0.55626	0.162	104.7308	0.0011	0.45383	0.0032	0.01051	2.53E-03
		148	0.18609	0.555	88.97399	0.0012	0.40082	0.0039	0.0109	3.32E-03
	X	82.5	2.24641	0.073	101.15648	0.0014	0.3878	0.0052	0.01034	3.79E-03
		116	2.50437	0.048	105.57017	0.0012	0.41511	0.0039	0.01072	3.58E-03
		148	1.65969	0.110	85.31316	0.0015	0.33395	0.0063	0.01198	5.50E-03

도 비슷한 결과가 나온 것을 확인하였다. Fig. 8 에서 펄스조정기를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 항복응력 및 압축강도가 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 또한 동일한 응력에서 높은 온도에서 열화된 시편이 낮은 온도에서 열화된 시편보다 변형률이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

또한 PP 와 POM 시편에 대하여 SHPB 실험 데이터로부터 각 압력별, 열화온도별로 산출된 변형률 속도를 부록의 Table 1 과 Table 2 에 정리하였다. Table 1 과 Table 2 로부터 압력별, 열화 온도별 변형률 속도가 거의 비슷하지만 실험압력이 높아질수록 변형률 속도가 증가하는 것을 알 수 있고, 열화온도가 높아질수록 변형률 속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 펄스조정기가 있는 경우와 없는 경우에는 변형률 속도가 비슷한 것을 알 수 있다.

재료 혹은 구조물의 기계적인 변형 거동의 기술적인 정보를 설계나 수치 해석적으로 이용할 경우에는 구성방정식이 필요하게 된다. 본 연구에서는 고온에

일정시간 동안 노출시켜 열화시킨 POM 과 PP 의 동적 변형거동 특성을 분석하기 위하여 SHPB 실험을 수행하여 응력-변형률 선도와 변형률 속도를 산출하였다. 이로부터 POM 과 PP 의 구성방정식을 얻기 위해 Johnson-Cook 모델을 적용하였고, 구성방정식을 이루는 각 계수를 결정하여 Table 3 과 Table 4 에 각각 정리하였다. Table 3 과 4 에 나타난 평균은 선도로부터 결정한 각 계수의 값이고, C.O.V 는 과손확률을 계산하기 위해 각 변수를 확률변수로 보고 선도로부터 계수를 결정할 때 편차를 이용하여 계산한 값이다.

Johnson-Cook 모델을 이용하여 구성방정식을 구하고 이를 설계 및 해석에 이용할 경우 기존의 결정론적 방법에서 사용하듯이 변수들을 하나의 값으로 보면 변수들의 불확신성으로 인해 해석 결과의 신뢰도가 떨어지게 된다.

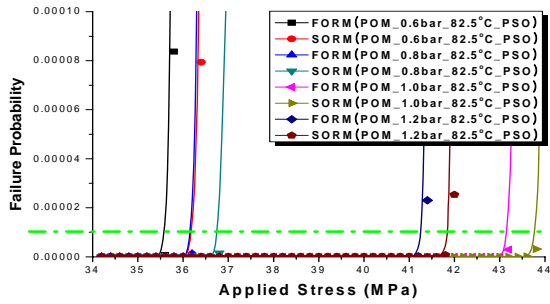
따라서 본 연구에서는 기존의 결정론적 방법이 아닌 확률론적 방법 중 FORM 과 SORM 을 이용하여 설계 및 구조물의 건전성을 평가하기 위하여

Table 4 Parameters of Johnson-Cook model obtained from SHPB experiment for PP

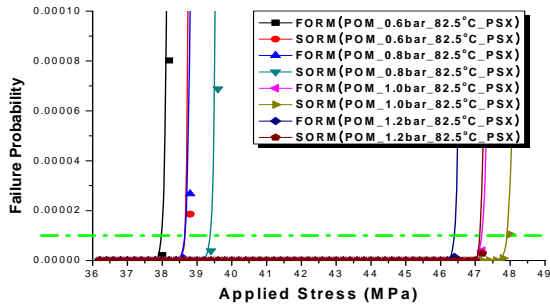
	Pulse shaper	Temp. (°C)	A		B		n		C	
			Mean	C.O.V	Mean	C.O.V	Mean	C.O.V	Mean	C.O.V
0.6bar	O	82.5	4.1652	0.029	42.57255	0.0023	0.42585	0.0079	0.01795	4.51E-03
		116	6.57937	0.015	40.06545	0.0023	0.45503	0.0075	0.01649	4.84E-03
		148	3.55036	0.034	42.51693	0.0024	0.41825	0.0081	0.01649	4.55E-03
	X	82.5	2.9448	0.052	41.01392	0.0028	0.36067	0.0100	0.01719	4.83E-03
		116	3.82274	0.030	41.63218	0.0023	0.42188	0.0077	0.01815	4.45E-03
		148	2.22853	0.068	40.86845	0.0028	0.35168	0.0098	0.01683	4.56E-03
0.8bar	O	82.5	2.51053	0.055	45.75436	0.0026	0.42463	0.0089	0.01883	4.12E-03
		116	7.59705	0.016	43.29989	0.0032	0.55326	0.0093	0.02019	4.28E-03
		148	4.85295	0.026	42.97553	0.0026	0.45085	0.0087	0.02055	4.12E-03
	X	82.5	5.55402	0.028	40.28811	0.0033	0.40774	0.0115	0.01878	4.95E-03
		116	7.2252	0.018	41.25274	0.0035	0.49864	0.0105	0.02046	4.40E-03
		148	3.44301	0.045	42.84599	0.0029	0.39343	0.0105	0.01918	4.28E-03
1.0bar	O	82.5	5.07653	0.030	43.74071	0.0028	0.38238	0.0095	0.0202	5.19E-03
		116	3.18088	0.046	45.60464	0.0025	0.38263	0.0087	0.01969	4.92E-03
		148	3.8336	0.038	46.93908	0.0025	0.41223	0.0086	0.01971	4.30E-03
	X	82.5	3.18787	0.049	44.64624	0.0027	0.37609	0.0094	0.02179	4.58E-03
		116	0.87171	0.259	46.4926	0.0036	0.32087	0.0117	0.02085	4.79E-03
		148	1.31059	0.162	46.64366	0.0034	0.33204	0.0115	0.02062	4.51E-03
1.2bar	O	82.5	1.74088	0.087	46.50908	0.0025	0.34972	0.0084	0.02183	4.61E-03
		116	6.06051	0.022	43.50318	0.0027	0.43829	0.0092	0.02236	4.74E-03
		148	2.57521	0.061	45.80168	0.0026	0.37643	0.0093	0.02209	4.34E-03
	X	82.5	1.22321	0.198	46.34423	0.0039	0.32368	0.0127	0.02282	4.45E-03
		116	1.29443	0.192	46.40134	0.0040	0.32187	0.0131	0.02216	4.65E-03
		148	5.80585	0.026	42.80127	0.0030	0.42716	0.0105	0.02396	4.15E-03

한계상태방정식을 구하고, 파손확률을 산출하였다. POM 과 PP 에 대하여 작용응력의 변화에 따른 파손확률의 변화를 펄스조정기의 유무에 따라 압력별, 열화온도별로 Fig. 9 과 Fig. 10 에 나타내었다. 여기서 작용응력은 한계상태방정식인 식 (12)에서 σ_a 를 의미한다. 각 경우에 대하여 작용응력이 증가함에 따라 파손확률도 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 각 경우에 대하여 작용응력이 특정 응력을 넘어서면 파손확률이 급격히 증가한다. 또한 FORM 을 이용하여 산출한 파손확률이 SORM 을 이용하여 산출한 파손확률보다 크게 나타난다. 이 경우 한계상태방정식에서 항복응력을 기준으로 설계하게 되고, 응력-변형률 선도에서 항복응력 근처는 선도의 곡률이 가장 큰 부분이다. FORM 은 한계상태방정식의 Taylor 전개식의 1 차항까지, 즉 선형근사를 하지만, SORM 은 2 차항까지 고려하므로 선도의 곡률을 고려할 수 있다. 즉 FORM 과 SORM 을 이용하여 산출한 파손확률은 당연히 다

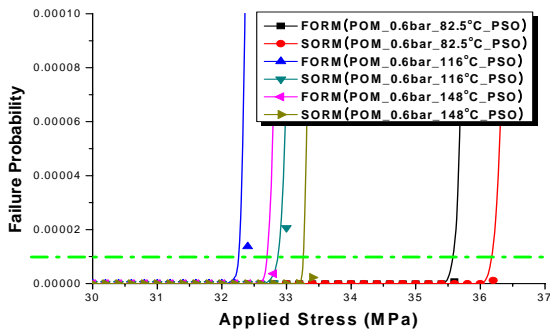
를 수 밖에 없고, SORM 이 한계상태방정식의 곡률을 고려하기 때문에 FORM 보다는 SORM 을 이용하여 산출한 결과가 더 정확하다고 할 수 있다. 비록 Fig. 9 와 Fig. 10 에는 PP 와 POM 시편에 대하여 0.6bar 의 실험 압력에 대한 다양한 열화온도에 따른 파손확률 산출 결과와 열화시킨 최저 온도에 대한 다양한 실험압력에 따른 파손확률산출 결과 만을 나타내었지만 다른 모든 경우에 대해서도 비슷한 경향이 나타나는 것을 확인하였다. Fig. 9 와 Fig. 10 에서 $PF = 10^{-5}$ 에 위치시킨 점선은 목표신뢰성(Target Reliability)의 경계를 나타내는 선이다. 안전한 구조물이라도 파손확률이 “0”인 경우는 없다고 볼 수 있다. 따라서 파손확률을 이용하여 구조물의 건전성 평가하기 위해서는 파손여부에 대한 기준이 필요하고 이 기준이 목표신뢰성이 될 수 있다. 확률이론을 이용하여 산출한 파손확률이 목표신뢰성보다 작으면 그 구조물은 안전하다고 할 수 있고, 또한 목표신뢰성을 기준으로 설계변수



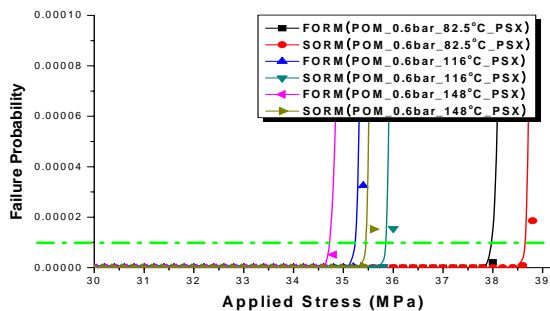
(a) With Pulse shaper according to the experimental pressure



(b) Without Pulse shaper according to the experimental pressure

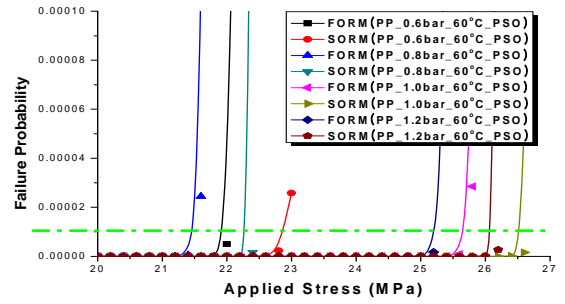


(c) With Pulse shaper according to the degradation temperature

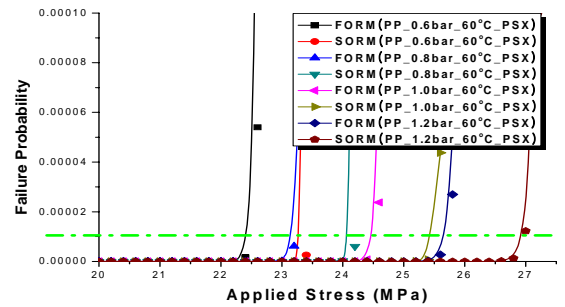


(d) Without Pulse shaper according to the degradation temperature

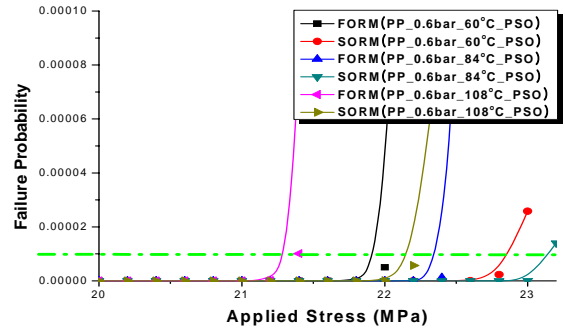
Fig. 9 Relationship between failure probability and applied stress for POM specimen



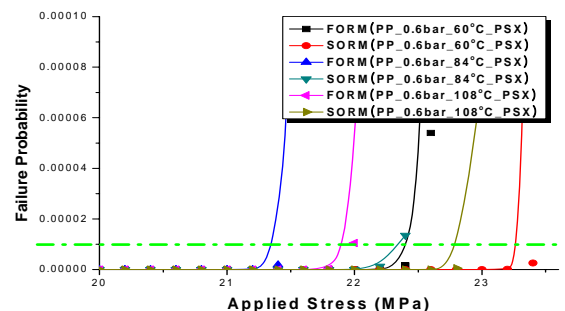
(a) With Pulse shaper according to the experimental pressure



(b) Without Pulse shaper according to the experimental pressure



(c) With Pulse shaper according to the degradation temperature



(d) Without Pulse shaper according to the degradation temperature

Fig. 10 Relationship between failure probability and applied stress for PP specimen

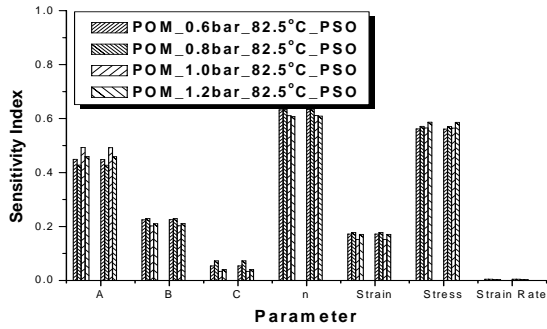
의 적절한 값을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 목표신뢰성을 $PF^T = 10^{-5}$ 로 가정하고, 다양한 변형률 속도와 열화 온도에 따라 유도한 구성방정식을 사

용하여 파손확률을 산출하고, 목표신뢰성을 기준으로 최대 사용 가능한 작용응력 및 여러 가지 경계조건을 각각 산출할 수 있다.

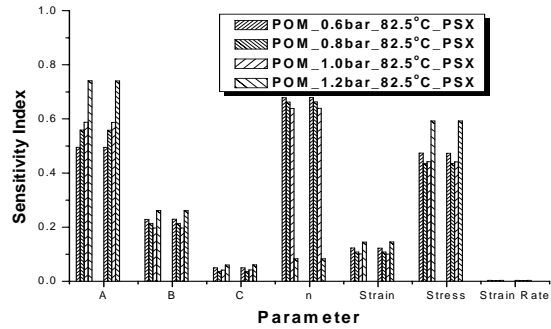
Fig. 9 와 Fig. 10 에 나타난 파손확률 결과 그래프와 목표신뢰성으로부터 실험 시 펄스조정기가 있는 경우와 없는 경우의 작용 가능한 최대응력은

POM 의 경우 약 8%의 차이가 나고, PP 의 경우 약 4%의 차이가 나는 것을 알 수 있다.

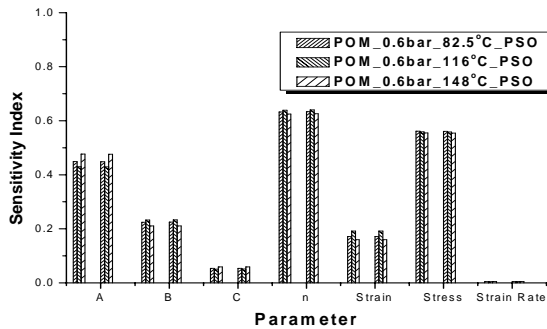
Fig. 11 에는 POM 과 PP 시편의 경우에 실험압



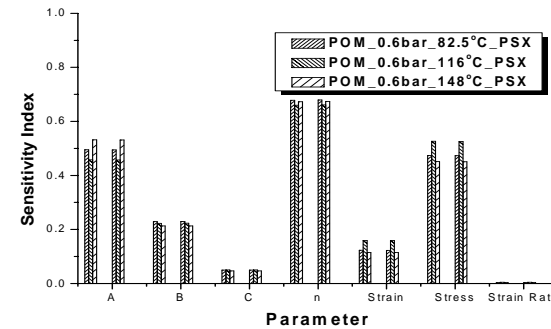
(a) Change in experiment pressure for POM with Pulse shaper



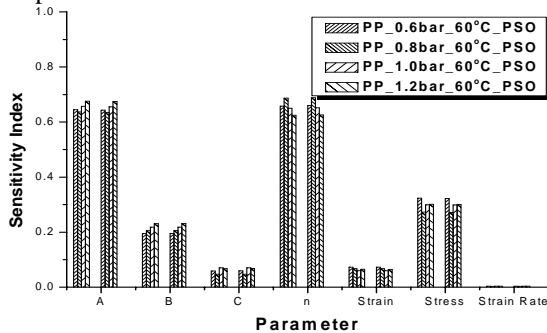
(b) Change in experiment pressure for POM without Pulse shaper



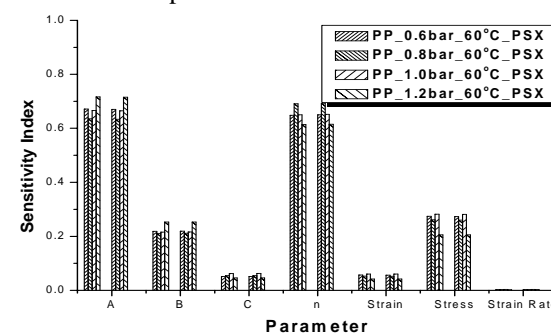
(c) Change in degradation temperature for POM with Pulse shaper



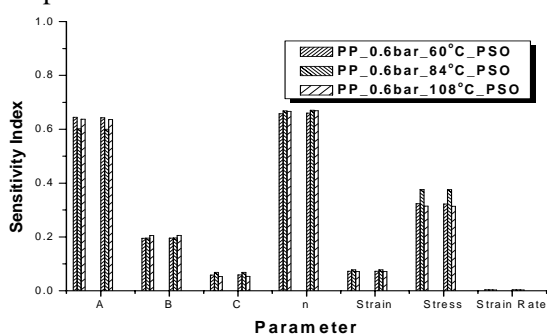
(d) Change in degradation temperature for POM without Pulse shaper



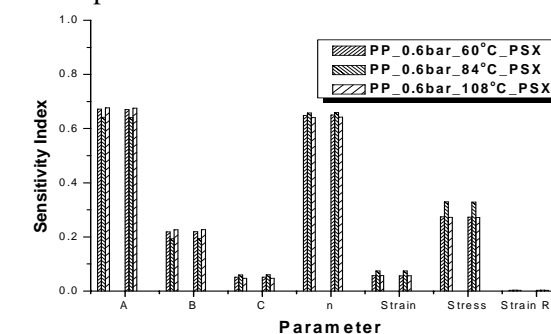
(e) Change in experiment pressure for PP with Pulse shaper



(f) Change in experiment pressure for PP without Pulse shaper



(g) Change in degradation temperature for PP with Pulse shaper



(h) Change in degradation temperature for PP without Pulse shaper

Fig. 11 Sensitivity of parameters according to the variation of experimental pressure and degradation temperature for POM and PP

력 및 열화온도의 변화에 따라 각 변수들이 파손 확률에 미치는 영향을 민감도지수(Sensitivity Index)를 이용하여 나타내었다. 또한 FORM 을 이용하여 파손확률을 산출하기 위해서는 신뢰도지수(Reliability Index)를 계산하여야 하고 이 과정에 반복법(Iteration method)을 사용하게 되는데, 반복(Iteration) 전후의 민감도지수를 각각 나타내어 반복에 의해 각 변수들이 파손확률에 미치는 영향의 변화를 확인하도록 하였다. 각 그래프에서 가로축에 있는 각 확률변수에 대하여 좌측과 우측에 두 개의 그래프가 나타나있는데, 이중 좌측에 있는 그래프가 반복 전의 민감도 지수를 나타내고 우측에 있는 그래프가 반복 후의 민감도 지수를 나타낸다.

Fig. 11 에서 보는 것과 같이 POM 과 PP 에 대하여 파손확률에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 A, n, 작용응력인 것을 알 수 있다. 이 세변수가 파손확률에 미치는 영향은 실험압력의 변화에도, 열화온도의 변화에도, 반복 전후에도 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다.

따라서 확률론적 방법을 이용하여 구조물의 건전성을 해석하거나 설계하는 경우, 파손확률에 큰 영향을 미치는 세 변수에 대하여 변수값의 선정에 주의를 기울여야 할 것이다. A 와 n 은 Johnson-Cook 모델의 상수이므로 응력-변형률 선도를 이용하여 구성방정식을 구할 때 변수값 선정에 주의를 기울여야 할 것이다. 또한 작용응력은 실제 한계상태방정식에서 다른 방정식으로 나타내어지는 경우가 대부분 이므로 작용응력을 나타내는 변수들의 변수값 선정이 해석 결과에 큰 영향을 미칠 것임을 예측할 수 있다.

6. 결 론

펄스조정기를 사용하여 개선된 SHPB 실험기법과 알루미늄 충격봉을 사용하여 POM, PP 등의 플라스틱 재료가 고온에서 열화된 경우 고변형률 속도 하중 하에서의 동적 변형 특성에 대한 실험적인 연구와 설계 및 해석시 확률론적 이론을 적용을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 플라스틱과 같은 저장도와 저밀도의 재료에 대하여 알루미늄 A17075-T6511 압력봉을 사용하여 시편과 압력봉에 적절한 임피던스 차이를 주어 정확하고 신뢰성 있는 실험 결과를 얻을 수 있음을 규명하였다.

(2) 변형률 속도에 따른 열화된 플라스틱 재료

의 동적 거동 특성은 변형률 속도가 증가할수록 항복응력과 압축강도가 조금 증가하지만 증가량이 미비하다는 것을 밝혔다.

(3) 펄스조정기가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 항복응력 및 압축강도가 거의 변화가 없이 비슷한 결과를 나타내는 것을 확인하였다.

(4) Johnson-Cook 모델을 이용하여 고변형률 속도하에서 응력-변형률 선도에 대한 구성방정식을 구할 수 있고 이를 이용하여 확률론적 구조물 건전성 평가 방법에 적용 가능함을 알 수 있었다.

(5) FORM 과 SORM 에 의해 산출된 파손확률은 큰 차이가 있고, 이중 한계상태방정식의 곡률을 고려하는 SORM 에 의해 산출한 파손확률이 신뢰성이 있다는 것을 알 수 있다.

(6) 작용응력이 증가할수록 파손확률은 증가하고 목표신뢰성을 이용하여 적절한 작용응력을 예측할 수 있다.

(7) 민감도 지수를 이용하여 파손확률에 가장 큰 영향을 미치는 변수가 A, n, 작용응력임을 알 수 있고, 확률론적 방법을 이용하여 구조물의 건전성을 해석하거나 설계하는 경우 이들 변수값의 선정에 주의를 기울여야 함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2006 년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-001-D00002).

참고문헌

- (1) Kolsky, H., 1949, "Stress wave in solid," Dover, New York.
- (2) Hopkinson, B., 1941, "A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of Explosives or by the Impact of Bullets," *Phil. Trans. A.*, Vol. 213, pp. 437.
- (3) Pochhammer, L., 1876, "On the Propagation Velocities of Small Oscillations in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder," *J. Reine Angewandte Math.*, Vol. 81, p. 324.
- (4) Davies, R. M., 1948, "An Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar," *Phil. Tran. A.*, Vol. 240, pp. 375.
- (5) Follansbee, P. S., 1985, "The Hopkinson Bar, in Metals Handbook Ninth Edition, Mechanical Testing," *American Society for Metals*, Vol. 8, pp. 198~203.
- (6) Lee, O. S. and Kim, G. H., 2000, "Thickness Effects on Mechanical Behavior of a Composite Material(1001P) and Polycarbonate in Split Hopkinson

- Pressure Bar Technique,” *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 19, pp.1805~1808.
- (7) Gray, G. T., 2000, “ASM handbook Vol.8, Mechanical Testing and Evaluation,” ASM International Material park, U.S.A.
- (8) Chen, H., Song, B., Frew, D. J. and Forrestal, M. J., 1989, “Dynamic Small Strain Measurement of a Metal Specimen with a Split Hopkinson Pressure Bar,” *Experimental Mechanics*, Vol. 43, pp. 20~23.
- (9) Chree, C., 1889, “The Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates, Their Solutions and Applications,” *Cambridge Phil. Soc. Trans.*, Vol. 14, pp. 250.
- (10) Ahammed, M., 1998 “Probabilistic estimation of remaining life of a pipeline in the presence of active corrosion defects,” *International Journal of Pressure Vessels and piping*, Vol. 75, No. 4, pp. 321~329.
- (11) Herbert, H., 2004, “Systems Reliability and Failure Prevention,” Artech House, London.
- (12) Lee, O. S. and Kim, D. H., 2006, “The Reliability Estimation of Pipeline Using FORM, SORM and Monte Carlo Simulation with FAD,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20, No. 12, pp. 2124~2135.
- (13) Mahadevan, S. and Haldar, A., 2000, “Reliability Assessment Using Stochastic Finite Element Analysis,” John Wiley & Sons.
- (14) Mahadevan, S. and Haldar, A., 2000, “Probability, Reliability and Statistical Method in Engineering Design,” John Wiley & Sons.
- (15) Melchers, R. E., 1987, “Structural Reliability Analysis and Prediction,” John Willey & Sons.
- (16) Lee, O. S. and Kim D. H., 2005, “Reliability Estimation of Buried Gas Pipelines in terms of Various Types of Random Variable Distribution,” *International Journal of KSME*, Vol. 19, No. 6, pp. 1280~1289.