

〈 논문 〉

폴리카보네이트(PC)의 가속 피로수명 시험을 위한 시간-온도 호환성

김 규 호*

(2006년 3월 6일 접수, 2006년 4월 20일 심사완료)

Time-Temperature Superposition Behavior for Accelerated Fatigue Lifetime Testing of Polycarbonate(PC)

Gyu-ho Kim

Key Words: Accelerated Lifetime Testing(가속수명시험), Time-Temperature Superposition(시간-온도 호환), Shift Factor(호환상수), Polymer(고분자재료), S-N Curve(S-N 곡선)

Abstract

Time-temperature superposition has been studied to determine the long-term fatigue life over millions of cycles for glassy polymers. The superposition is supposed to make an accelerated lifetime testing (ALT) technique possible. Dog-bone shaped specimens made of carbon filled Polycarbonate (PC) were tested under fatigue, based on the stress-lifetime approach (*S-N* curve). Fatigue-induced localized yield-like deformation is considered as the defect leading to fatigue and its evolution behavior is characterized by a modified energy activation model in which temperature is considered as fatigue acceleration factor. This model allows the reduced time concept to account for effects of different temperature in short-term fatigue data to determine long-term fatigue life through the use of time-temperature superposition that is applicable under a low frequency and isothermal conditions. The experimental results validated that the proposed technique could be a possible method for accelerated lifetime testing (ALT) of time-dependent polymeric materials.

기호설명

f : 하중 주파수
 σ : 응력
 σ_a : 최대 응력크기
 ϵ : 변형률
 ϵ^p : 소성변형률
 ϵ_c^p : 임계 소성변형률
 T : 절대온도

T_{ref} : 기준온도
 T_g : 유리전이온도
 η : 내부 점성
 ΔH : 활성화 에너지 벽
 R : 기체상수
 $a(T)_{T_{ref}}$: 시간-온도 호환상수
 N_f : 파괴 하중사이클 수

1. 서 론

최근 들어서 구조용 열가소성 고분자재료의 사용분야가 늘어나고 있다. 자동차의 범퍼, 출입문, 각종 유리창 등, 항공기의 캐노피(canopy), 각종

* 회원, 공군사관학교 교수부 기계공학과

E-mail : ghkim@afa.ac.kr

TEL : (043)290-6476 FAX : (043)297-6661

계기관, 실내 장착물, 벤튜브(ventube) 등, 일반기계류에서의 축, 베어링, 기어 등 많은 분야에서 그 예를 들 수 있다. 이들 중 몇몇 구조물(부품)들은 피로하중조건에서 사용되어 진다.

피로하중 하에서 사용되고 있는 구조물에 대해 사용수명 동안의 구조적 건전성(Structural Integrity)을 보장하기 위해서는 재료가 가지는 장기간에 걸친 피로수명특성을 반드시 알아야 한다. 하지만 고분자재료로 만들어지는 제품들은 상대적으로 짧은 생산/공급주기를 가지고 있는데, 이 때문에 적절한 가속기법이 없는 상황 하에서 실제적인 장기간의 피로시험 수행은 효과적이지도 못하고 경제적이지도 못할 수 있다. 따라서 신뢰할 수 있고 단기간이 소요되는 가속피로수명 시험기법에 대한 연구는 필요할 것으로 판단된다. 본 연구는 구조용 열가소성 고분자재료에 대한 가속피로수명 시험기법을 개발하기 위한 목적으로 그 일부분에 해당하는 시간-열 호환(time-temperature superposition)특성을 분석하는 것으로 이루어진다. 시간-열 호환특성은 고온하의 금속 크리프에서도 나타나고 있다.⁽¹⁾

비정질의 열가소성 고분자재료는 열을 가함에 따라 부드러워지거나 녹는 성질이 있으며 주로 긴 사슬모양의 공유결합 분자들로 구성된 재료를 말한다.⁽²⁾ 긴 사슬들은 서로 엉키어 존재하는데 이로 인해 재료가 점탄성 하에서의 응력-변형을 변화와 열-기계적인 거동에 영향을 주는 주요인으로 작용한다.⁽³⁾

반복적으로 작용하는 하중에 대한 점탄성 반응은 응력-변형을 곡선의 히스트리시스(hysteresis)⁽⁴⁾를 야기하게 된다. 히스트리시스에 의한 에너지 손실은 주로 열적 영향을 유발하게 된다. 이러한 열적 영향으로 고분자재료 내에서는 피로하중이 작용하는 동안에 온도가 올라가기도 한다. 이러한 온도상승은 실험조건에 따라 시편의 피로수명을 단축하기도하고 혹은 연장하기도 한다.

피로하중이 작용하게 되면 국부적으로 변형이 발생하게 되는데 이러한 변형은 항복근처 그리고/혹은 항복후기에서의 거동을 보이게 된다.⁽⁵⁾ 고분자 재료의 피로현상에서 국부적인 유사항복(소성)변형은 특별한 흥미를 가지게 하는데 왜냐하면 궁극적으로 그것이 초기 피로균열 시작점을 제공하기 때문이다. 국부적인 유사항복(소성)변형은 주로 전단항복(shear yielding)과 크레이즈 형성

(craze formation)이 서로 관련하는 기구로서 이해된다.⁽⁶⁾ 따라서 이 두 가지 요소는 피로균열의 시작과정에 깊이 관여하는 기구가 될 것으로 판단된다.

전단항복(shear yielding)은 항복 바로 이후부터 일어나는 소성변형 거동중의 한 형태로서 재료의 연성화(softening)를 유발하는 전단 띠(shear band)가 발생하는 상태를 말한다.⁽⁷⁾ 몇몇의 연구결과들은 피로균열들이 이러한 전단 띠들의 교차점들에서 생성되는 미세공극들(micro-voids)로부터 시작된다고 판단하고 있다.⁽⁸⁾ Kramer⁽⁹⁾는 연구를 통하여 폴리스티렌(polystyrene: PS)에서 나타나는 전단 띠의 발생을 분석하였으며 또한 이러한 현상이 응력과 온도의 영향을 받는다는 사실도 밝혔다.

크레이즈 형성(craze formation)은 주축응력이 수직으로 작용하는 면에 응력집중이 나타나고 이로 인해 미세공극들이 생겨나서 그 형태가 발전해 나가는 것을 말한다.⁽⁶⁾ 몇몇의 연구결과들은 크레이즈 형성이 균열끝단에서 발생하는데 소성변형 영역이 일정크기 이상으로 확대된 후에야 이루어진다고 관찰하였다.^(10,11) 이것은 크레이즈 형성도 전단항복과 유사한 특성으로 설명되어질 수 있음을 암시한다. 왜냐하면 크레이즈 형성 역시 그 시작을 위해서는 일정크기의 국부적인 소성변형을 필요로 하기 때문이다.

재료에 내재한 많은 결함들 또는 불균일성 등은 미세균열로서 이해되며 이를 바탕으로 하는 손상 역학(damage mechanics)은 S-N 곡선에서 보이는 피로수명 전체 기간에 걸쳐 비선형 점탄성 거동특성이 존재함을 보여준다.⁽¹²⁾ 이것은 열-기계적 하중조건이 변화함에 따라 피로수명 또한 변화될 수 있음을 의미한다. 실제로 많은 연구를 통하여 고분자재료에 나타나는 온도 의존성, 하중주파수 의존성 등에 관한 정성적인 분석이 진행되어 왔다.⁽¹³⁾ 하지만 정량적인 의존특성에 관한 연구는 아직 충분치 못한 실정이다. 최근에 들어와 고분자 재료에 대한 가속피로시험이 연구되기 시작하였다.

Miyano 등^(14,15)은 열경화성 탄소섬유강화플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP)에 대하여 서로 다른 온도와 하중주파수 하에서의 피로수명을 관찰하였으며, 실험결과를 바탕으로 다른 온도와 하중주파수에서의 피로거동을 예측하였다. 그들은 인장시험을 통하여 얻은 시간-온도/

시간-주파수 호환성(time-temperature/ time-frequency superposition)과 시간-온도/ 시간-주파수 호환상수(time-temperature/ time-frequency shifting factor)를 결정하였으며 이를 S-N 곡선에 활용하여 피로수명을 예측하였다.

S-N 곡선 상에서 가속시험에 의한 피로수명 예측은 정량적인 피로가속인자를 결정하는 것이 그 핵심이 될 것이다. 피로가속에 영향을 미치는 인자로는 온도, 습도, 하중주파수, 응력크기 등이 고려될 수 있다. 이러한 인자들은 고분자재료에 있어서 시간의존적인 유사항복(소성)변형을 유발하는데 기여하고 있으며, 이러한 유사항복(소성)변형은 비선형 점탄성 모델을 사용하여 적절히 표현될 수 있을 것이다.

본 연구는 가속피로수명 시험기법을 개발하기 위한 연구들 중의 하나로 열가소성 고분자재료의 시간-온도(time-temperature superposition)특성을 분석하여 이를 바탕으로 피로가속인자를 정량적으로 결정하는데 그 목적이 있다. 이는 직접적으로 단기간의 가속된 피로시험을 이용하여 실제 장기간의 피로수명을 예측하기 위한 것이다. 정량적인 피로가속인자는 비선형 점탄성 모델들이 표현하는 유사항복(소성)변형의 의존성을 고려하고 이를 특성화 하는데 관심을 가질 것이다.

2. 피로수명의 시간-온도 호환

고분자 재료에 피로하중이 작용하게 되면 국부적으로 심한 소성변형을 야기하는데 구체적으로는 크립(creep), 전단 항복, 크레이즈 그리고 미세균열들이 발생하게 된다. 하중에 의해 발생하는 국부적인 소성변형은 재료 자체가 가지는 고유한 점탄성 성질의 영향으로 시간의존적인 특성을 지니게 된다. 점탄성 재료의 비선형 점소성 거동(nonlinear viscoplastic behavior)을 잘 설명하고 있는 액티베이션 모델(activation model)⁽¹⁶⁾은 피로에 의해 유발되는 국부적인 소성변형을 설명하는데 사용되어 질 수 있다.

사인파(sinusoidal wave) 형태의 변동하중을 고려할 때, 분자차원의 활성화 에너지 벽(activation energy barrier)은 최대 하중이 작용하는 시기에 가장 낮은 상태가 될 것이다. 따라서 하나의 하중 사이클 동안에 발생하는 소성변형의 대부분은 작용하중의 크기가 가장 클 때 형성된다고 할 수

있다. 즉,

$$\left(\int_0^{1/f} \epsilon^p(t) dt \right)_T = \left(\frac{d\epsilon^p}{dN} \right)_T \approx \left(\frac{d\epsilon^p}{dN} \right)_{T, \sigma_a}, \quad (1)$$

여기서, f , σ , ϵ 은 하중 주파수, 응력, 변형률이며 σ_a , ϵ^p , T 는 최대 응력크기, 소성변형률, 절대 온도를 나타낸다.

하나의 하중 사이클 동안에 발생하는 국부적인 소성변형의 크기를 온도함수에 의존하면서 물질 내부의 점성형태로 특성화되는 아르히니우스적인 관계(Arrhenius-type relation)로 표시할 수 있다. 즉,

$$\left(\frac{d\epsilon}{dN} \right)_{T, \sigma_a} = A' \eta_{T, \sigma_a}^{-1} = A \exp \left(- \frac{\Delta H_{\sigma_a}}{RT} \right), \quad (2)$$

여기서, η , ΔH , R 은 각각 내부 점성, 분자구조의 이동에 필요한 활성화 에너지 벽, 기체상수를 말하며 A' , A 는 임의의 상수를 말한다. 이러한 국부적인 소성변형은 점탄성 재료가 일정한 온도, 응력 크기와 하중 진동수를 가지는 조건들을 가지고 있으며, 더욱이 하중 주파수는 충분히 작아서 히스트리시스에 의한 열적 영향을 받지 않는 조건도 가지고 있다.

임의의 기준온도(reference temperature)에서의 국부적인 소성변형은 다음과 같이 표현될 것이다.

$$\left(\frac{d\epsilon}{dN} \right)_{T_{ref}, \sigma_a} = A' \eta_{T_{ref}, \sigma_a}^{-1} = A \exp \left(- \frac{\Delta H_{\sigma_a}}{RT_{ref}} \right). \quad (3)$$

축소된 시간모델(reduced time model)⁽¹⁷⁾은 비선형 현상을 축소된 시간개념을 이용하여 설명하고 있다. 이 모델은 점탄성 재료에서 이완현상(relaxation phenomenon)이 발생하는 기간은 변형과정 동안에 가지는 열역학적인 상태에 의존함을 나타내고 있다. 이러한 축소된 시간모델은 비선형적인 변형거동을 시간-온도 호환(time-temperature superposition)으로 설명하고 있다.

변형에 관련하여 재료가 가지는 내재적인 시간(internal governing time)을 $\psi(t)$ 라 하고 시간 호환

상수(time shift factor)를 $a(T)_{T_{ref}}$ 라고 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{d\tau}{a_{T_{ref}}} = \int_0^t \frac{d\tau}{\eta_T/\eta_{T_{ref}}}, \quad (4)$$

$$\log(a(T)_{T_{ref}}) = \log\left(\frac{\eta_T}{\eta_{T_{ref}}}\right) = \frac{\Delta H_{\sigma_c}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right). \quad (5)$$

일정 응력 크기를 가지는 하나의 하중 사이클 동안 발생하는 국부적인 소성변형을 임의의 기준 온도 T_{ref} 에서 예측가능하게 하는데 다음과 같이 그것을 고려할 수 있다. 즉,

$$\left(\frac{d\epsilon^p}{dN}\right)_T = A' \eta_T^{-1} = A' a(T)_{T_{ref}}^{-1} \eta_{T_{ref}}^{-1} = a(T)_{T_{ref}} \left(\frac{d\epsilon^p}{dN}\right)_{T_{ref}} \quad (6)$$

많은 연구를 통하여 여러 종류의 노치(notch)를 가진 무정질의 고분자 재료로 만들어진 시편들의 경우 균열이 시작하기 직전까지 노치 주위에 고려해야 할 정도의 소성변형 영역이 발생함을 관찰하였다.⁽¹⁸⁾ 만일 피로손상이 국부적인 소성변형의 형태로 선형적으로 축적되고 또한 이렇게 축적된 소성변형의 크기가 일정한 수준의 임계크기로 발전할 때에 거시적인 피로균열이 시작된다고 가정하게 되면 주어진 응력크기에서 S-N곡선 상에서의 피로수명은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\left(\frac{d\epsilon^p}{dN}\right)_T = \left(\frac{\epsilon_c^p}{N_f}\right)_T, \quad (7)$$

$$\left(\frac{N_f}{\epsilon_c^p}\right)_T = A' \eta_T = A' a(T)_{T_{ref}} \eta_{T_{ref}} = a(T)_{T_{ref}} \left(\frac{N_f}{\epsilon_c^p}\right)_{T_{ref}} \quad (8)$$

여기서 ϵ_c^p , N_f 는 임계 소성변형률, 파괴 하중사이클 수이다. 그러므로,

$$\log(N_f)_{T_{ref}} = \log(N_f)_T - \log(a(T)_{T_{ref}}) \quad (9)$$

방정식 (9)에 나타나고 있는 의미는 다음과 같다. 주어진 응력크기와 온도 하에서 S-N 곡선상의 피로수명은 그와 다른 온도 하에서의 피로수명과 시간-온도 호환을 이용하여 예측되어 질 수

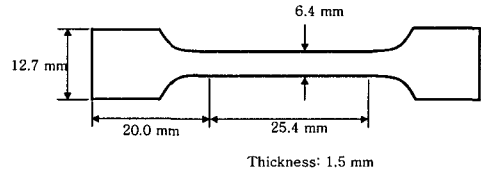


Fig. 1 Geometry of Specimen

있다. 즉, S-N 곡선에서 상대적으로 높은 온도 하에서 만들어진 단기간의 피로수명 자료를 대수형태의 시간 스케일(logarithmic time scale)을 따라 수평으로 이동하게 되면 보다 낮은 온도 하에서의 장기간의 피로수명을 예측할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 시편 준비

실험재료는 상업적으로 널리 쓰여지고 있는 구조용 고분자 재료인 탄소입자 함유 폴리카보네이트(carbon particle filled polycarbonate)를 사용하였다. 재료의 상업 제품명은 Lexan ML 6339R 인데 General Electric(GE)사에서 생산한 것으로 항복강도는 62MPa 이고 탄성계수는 1.6-2.4GPa 이며 유리전이온도(glass transition temperature: T_g)는 145 ℃이다.

실험시편은 ASTM 표준 638D에 의해 제작되었고 dog-bone 형태의 노치없는 상태이며 모두 사출성형(injection-molding)기법으로 만들어졌다. 각각의 시편은 폭 6.4mm, 두께 1.5mm 그리고 측정길이(gauge length)는 25.4mm이다. Fig. 1은 실험시편의 형태를 보여주고 있다.

시편에 내재하고 있는 알려지지 않은 열적 그리고/또는 하중적인 이력(previous thermal and/or loading histories)를 제거하기 위해 어닐링(annealing)을 하였다. 먼저 시편을 100 ℃에서 3시간을 둔 후 140 ℃에서 6시간을 두었다. 그런 다음 온도를 약 0.5 ℃/분의 속도로 서서히 실온까지 내린 후 53±1%의 함수통에서 12일간 보관한 다음 실험을 실시하였다. 또한 모든 시편은 자외선이 차단된 공간에 저장하였다. 이러한 과정을 통하여 시편은 모두 동일한 열적/하중적 이력을 가지는 것으로 간주하였다. 한편으로 고분자 재료가 가지는 physical aging 현상도 모든 시편에서

동일한 상태로 존재 하는 것으로 가정하였으며 이로 인한 실험결과에의 영향이 S-N곡선 상에서 나타나지 않을 것으로 고려되었다.

3.2 실험 장치

MTS 사의 유압 하중 장비와 Instron 사의 digital controller(Fastrack 8800)을 사용하였다. 또한 온도조절과 설정이 가능한 Instron 사의 temperature chamber 내에서 시편에 피로하중을 주었으며 자료획득은 LabView를 이용하여 실시하였다. 시편에 준 하중 진동수는 0.5Hz로 고정하였다. 이는 히스테리시스로 인한 열적 영향이 없는 충분히 낮은 주파수로 간주되었다. 실온보다 높은 온도 하에서 피로실험을 할 경우 2시간동안 미리 해당온도에 충분히 노출시켜 모든 실험장비들이 동일한 온도조건에서 작동될 수 있도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

먼저 27℃ 실온에서 장기간의 피로실험 자료를 구하였다. 상대적으로 긴 시간동안 0.5Hz의 하중 주파수로 수행되었으며 그 결과를 이용하여 Fig. 2에서 보이고 있는 S-N 곡선을 만들었다. 응력 크기가 16MPa에 이르면 피로수명이 10⁶ 사이클을 넘었다. 여기서 이 응력크기를 피로강도 (fatigue strength)로 간주하였으며 해당실험을 중단하였다. 그림에서 보이는 데이터들은 평균값이며 그에 상응하는 오차범위도 나타나있다.

다음으로 27℃, 60℃, 80℃ 그리고 100℃에서의 단기간 피로실험을 실시하였다. 그 결과는 Fig. 3에 나타나있다. 그림을 통하여 보면 낮은 온도(27℃)에서는 측정된 데이터들로 유추되는 곡선의 기울기가 상대적으로 높으며 점차 온도가 올라감에 따라 기울기가 낮아진다는 것을 알 수 있다. 더욱이 인접한 두 곡선 간에는 서로 부드럽게 겹쳐지는 부분이 존재하는 것을 알 수 있다. 이러한 곡선들은 수평으로 서로 이동하여 하나의 부드러운 곡선이 새롭게 만들어 질 수 있음을 보여주고 있다. Fig. 4는 새롭게 생산된 마스터 곡선 (master curve)을 표시하고 있다.

S-N 곡선들의 수평이동을 가능하게 해주는 요인은 고분자 재료가 가지는 시간-온도 호환 특성이며 정량적인 시간-온도 호환상수는 인접한 두 곡선들이 부드럽게 연결되는 상태에서 결정된다.

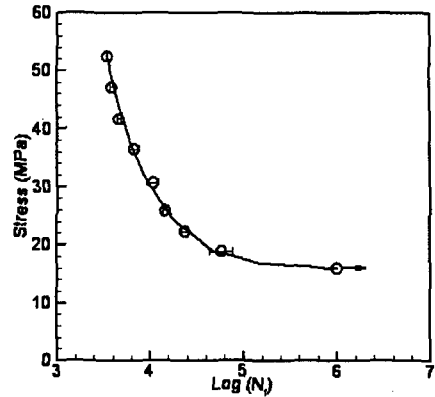


Fig. 2 Long-term S-N curve at room temperature (27°C)

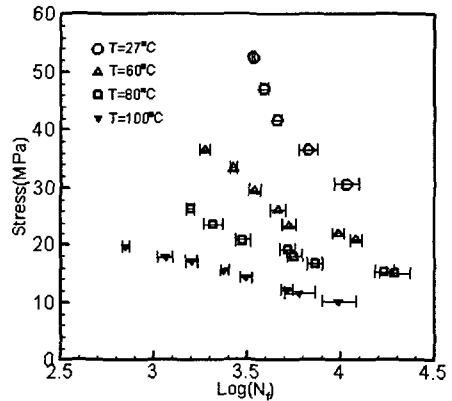


Fig. 3 Short-term S-N curves at different temperatures

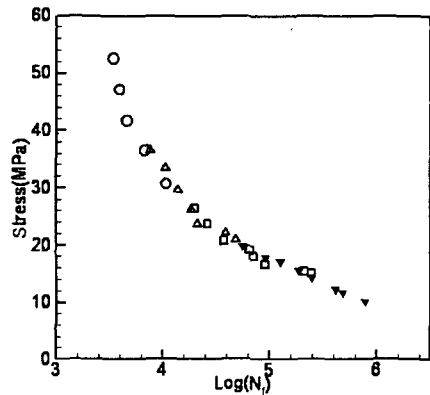


Fig. 4 Generation of Master S-N curve

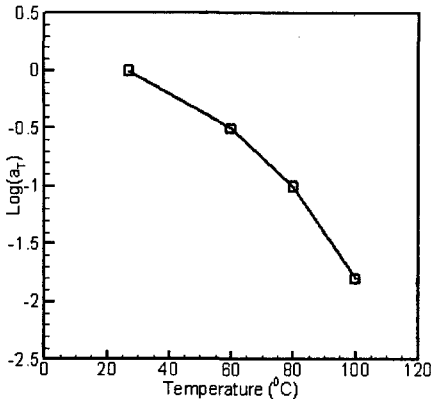


Fig. 5 Shift factors for the Master S-N curve

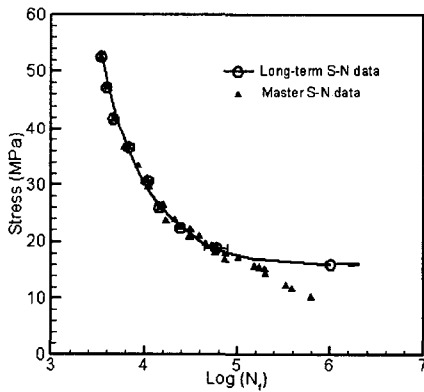
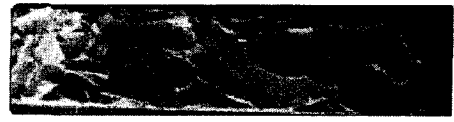


Fig. 6 Comparison of actual long-term S-N data and master S-N data generated time-temperature superposition

Fig. 5는 온도에 따른 시간-온도 호환상수 값을 보여준다.

Fig. 6에서는 실제의 장기간 S-N 데이터와 시간-온도 호환을 이용하여 만들어진 마스터 곡선을 비교하였다. 응력 크기가 클 경우에는 마스터 데이터와 실제 데이터와의 일치성이 매우 높게 나타나고 있다. 하지만 응력 크기가 감소함에 따라 실제와 예측치 사이에 차이를 보이고 있다. 이 실험에서는 피로수명이 $10^{5.2}$ 사이클까지는 시간-온도 호환을 이용한 예측이 잘 맞고 있으나 그 이상의 피로수명에서는 일치하지 않고 있다. 이것은 시간-온도 호환 특성만을 고려해서는 실제의 장기간 피로수명예측에 충분한 도구가 되지



(a) $\sigma_a = 47 \text{ MPa}$, $\log(N_f) = 3.6$



(b) $\sigma_a = 42.5 \text{ MPa}$, $\log(N_f) = 3.65$



(c) $\sigma_a = 36.5 \text{ MPa}$, $\log(N_f) = 3.85$



(d) $\sigma_a = 26 \text{ MPa}$, $\log(N_f) = 4.5$



(e) $\sigma_a = 19 \text{ MPa}$, $\log(N_f) = 4.8$

Fig. 7 Fracture surfaces at room temperature (27°C)

못한다는 것을 말해주고 있다.

시간-온도 호환을 이용한 피로수명 예측이 효과적이지 못한 이유에 대한 분석이 필요하다. 이를 위하여 피로에 의해 파괴된 시편들의 파단면을 분석하였다. 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 18배의 배율로 파단면분석을 실시하였으며 실온(27°C)에서의 파단면은 Fig. 7에 나타나 있다.

실온의 경우 높은 응력 크기에서는 연성 파괴모드가 지배적으로 나타나고 있다. 하지만 응력 크기가 작아지면서 파괴모드는 점점 취성으로 나타난다. 응력크기가 36 MPa 이상일 때는 상대적으로 변형이 쉽게 일어나고 파단면에 crease-like 그리고/혹은 flap-like 파괴가 일어나는 것으로 관찰된다. 그리고 국부적인 소성변형이 여러 곳에서 독립적으로 생성되어 발달하는 것으로 보인다. 이러한 소성변형 영

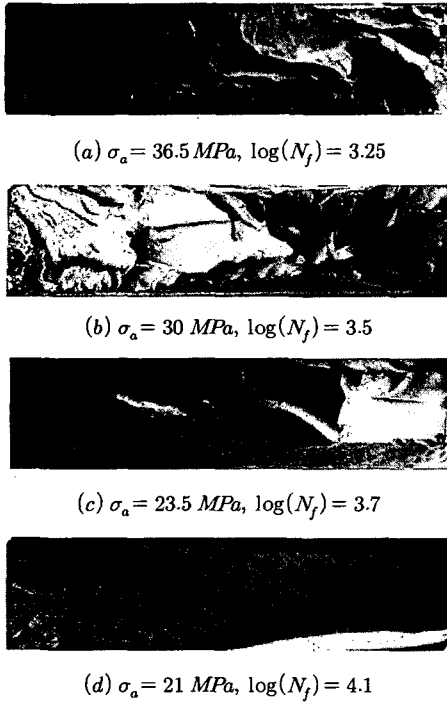


Fig. 8 Fracture surfaces at 60 °C

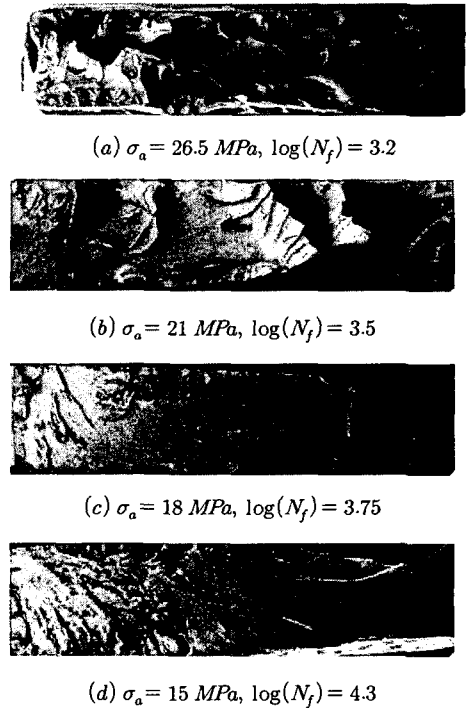


Fig. 9 Fracture surfaces at 80 °C

역들이 하중 사이클이 증가함에 따라 서로 연결되어 최종적으로는 3차원 형태의 피로 파단을 야기하게 된다. 응력 크기가 낮은 경우에는 소성변형을 일으키는 영역의 크기가 작게 나타나고 그 깊이 또한 작아지는 것으로 나타난다. Fig. 7(d)을 보면 매끈한 취성 파단면이 보이며 Fig. 7(e)에서는 명백한 균열 시작점과 균열진행을 포함하는 전형적인 고 사이클 피로 특성을 볼 수 있다. Fig. 8에서는 60 °C 상황하의 파단면들을 볼 수 있다. 이 파단면들 또한 상대적으로 높은 응력에서는 연성 파단이 주도적으로 일어나고 낮은 응력에서는 취성에 가까운 파단이 일어난다. 응력 크기가 21MPa 일 때 취성 파단이 나타나는데 이는 27 °C 하에서 36.5MPa과 26MPa의 응력 크기일 때 나타나는 파단 현상과 유사하게 보인다. 상대적으로 높은 온도와 상대적으로 낮은 응력 조건인 경우를 고려할 때 이러한 현상에 주목할 필요가 있다. 이 현상은 온도에 의하여 피로 과정이 가속된다는 특징을 현상학적으로 뒷받침해주고 있다. 주어진 응력크기의 상태에서

피로손상 추적과정이 온도상승의 도움으로 가속화될 수 있다. 다시 말하면 실제의 피로수명의 예측이 그보다 높은 온도에서의 피로수명 데이터와 시간-온도 호환에 의한 피로 가속인자인 호환 상수를 사용할 때 가능해질 수 있다는 의미이다.

Fig. 9에서는 80 °C 상황하의 파단면들을 볼 수 있다. 응력 크기가 21MPa 이상으로 높은 경우에는 매우 연성인 파단면이 관찰되고 있다. 응력 크기가 18MPa 이하인 경우에도 여전히 연성 파단면이 지배적으로 나타나고 있으며 Fig. 6(e)에서 보이는 것처럼 피로손상의 시작과 진행방향을 판단할 만한 단일한 특징이 크게 나타나지 않고 있다.

Fig. 10에서는 100 °C 상황하의 파단면들을 볼 수 있다. 이 파단면들은 주어진 응력 크기에 상관없이 연성 파단형태를 보이고 있다. 아주 낮은 응력상태에도 불구하고 취성인 경우는 찾아볼 수 없다. Fig. 6에서처럼 응력 크기가 작아짐에 따라 나타나는 연성에서 취성으로의 전이현상은 80 °C와 100 °C에서는 보이지 않는다.

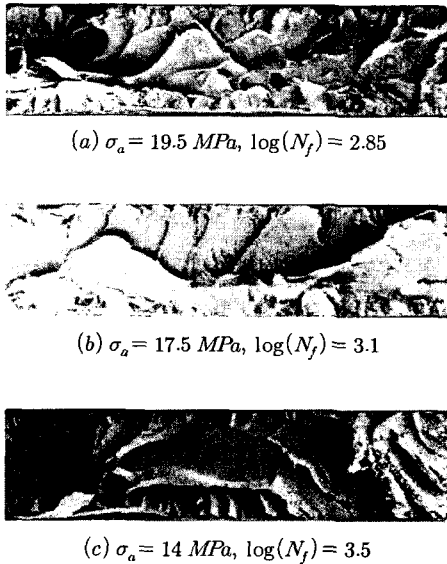


Fig.10 Fracture surfaces at 100 °C

SEM을 이용한 파단면 관찰로부터, 상대적으로 큰 응력/낮은 온도와 낮은 응력/높은 온도에서 서로 유사한 파단면 형태를 얻을 수 있다. 또한 피로조건 하에서 응력크기를 증가시키거나 그리고/혹은 온도를 증가시킴으로써 동일한 소성변형 과정이 유발할 수 있음을 보여주고 있다. 온도가 60 ℃ 인 경우 시간-온도 호환의 과정에서도 연성에서 취성으로의 파괴모드 전이현상이 그대로 나타나고 있으나, 80 ℃ 이상에서는 연성에서 취성으로의 전이현상이 더 이상 유지되지 못하고 단지 연성 파괴모드만이 지배적으로 나타난다. 이것은 온도가 일정 높이 이상으로 증가할 경우 시간-온도 호환성만을 활용을 하는 것에는 제한이 존재함을 보여주고 있다.

5. 결론

무정질의 열가소성 고분자재료인 탄소입자 함유 폴리카보네이트(carbon particle filled Polycarbonate)에 대한 가속화 된 피로수명 시험기법을 연구해 보았다. 온도에 의해 영향을 받는 비선형 점탄성의 기계적 성질을 이용하여 가속피로시험기법을 개발하였다. 본 연구는 S-N 곡선으로 대표되는 피로수명의 예측에 중점을 두었다. 서로 다른 온도 하에서 만들어진 단기간의 S-N 데이터들은 기

준온도(reference temperature)에 의한 데이터를 중심으로 S-N 도표 상에서 수평으로의 상호 이동을 통하여 하나의 새로운 마스터 S-N 곡선을 만들 수 있었다.

새로운 마스터 S-N 곡선은 장기간의 실제 피로수명을 예측가능하게 해 주었다. 피로수명이 10^{5.2} 사이클까지는 실제와 예측치가 일치하였다. 하지만 그 이상에서는 차이를 나타내었다. 파단면 분석을 통하여 이러한 실제와 예측치 사이의 차이는 파괴모드의 차이에 기인하는 것을 발견하였다. 즉, 실온에서는 피로에 의한 파괴모드가 연성에서 취성으로의 전이현상을 가지고 있지만 유리전이온도(T_g)에 가까워지는 높은 온도 하의 피로 파단면에서는 연성 파괴모드만 나타났다. 이로 인해 시간-온도 대치를 이용한 단기간의 마스터 S-N 곡선이 실제의 S-N 곡선을 부분적으로 예측할 수 있게 해 주었다.

참고문헌

- (1) Kim, W. G., Yoon, S. N., Ryu, W. S. and Yi, W., 2005, "Creep-Life Prediction and Standard Error Analysis of Type 316LN Stainless Steel by Time-Temperature Parametric Methods," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 29, No. 1, pp. 74~80.
- (2) Painter, P. C., Coleman, M. M., 1997, *Fundamentals of Polymer Science*, Technomic Publishing Company, Inc. Pennsylvania.
- (3) Kozlov, G. V., Novikov, V. U., 2001, "A Cluster Model for the Polymer Amorphous State," *Physics-Uspekhi*, Vol. 44, No. 7, pp. 681~724.
- (4) Beardmore, P., Rabinowitz, S., 1974, "Cyclic Deformation And Fracture in Polymer," *Applied Polymer Symposium*, No. 24, pp. 25~29.
- (5) Argon, A. S., Bulatov, V. V., Mott, P. H., Suter, U. W., 1994, "Plastic Deformation in Glassy Polymers by Atomistic and Mesoscopic Simulation," *Journal of Rheology*, Vol. 39, No. 2, pp. 377~399.
- (6) Kinloch, A. J., Young, R. J., 1983, *Fracture behavior of polymers*. Applied Science Publishers, London and New York.
- (7) Xiao, C., Jho, J. Y., Yee, A. F., 1994, "Correlation Between the Shear Yielding Behavior and Secondary Relaxation of Bisphenol A Polycarbonate and Related

- Copolymers," *Macromolecules*, Vol. 27, pp. 2761~2768.
- (8) Chau, C. C., Li, J. C. M., 1981, "Fracture of Shear Bands in Atactic Polystyrene," *Journal of Materials Science*, Vol. 16, pp. 1858~1873.
- (9) Kramer, E. J., 1975, "The Growth of Shear Bands in Polystyrene," *Journal of Polymer Science and Polymer Physics*, Vol. 13, pp. 509~525.
- (10) Yamamoto, T., Furukawa, H., 1995, "Relationship Between Molecular Structure and Deformation-Fracture Mechanism of Amorphous Polymers; 2. Crazing stress," *Polymer*, Vol. 36, pp. 2393~2396.
- (11) Ishikawa, M., 1995, "Stability of Plastic Deformation and Toughness of Polycarbonate Blended with Poly (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) Copolymer," *Polymer* Vol. 36, pp. 2203~2210.
- (12) Wang, B., Lu, H., Kim, G., 2002, "A Damage Model for the Fatigue Life of Elastomeric Materials," *Journal of Mechanics of Materials*, Vol. 34, No. 8, pp. 475~483.
- (13) Crawford, R. J., Benham, P. P., 1975, "Some Fatigue Characteristics of Thermoplastics," *Polymer*, Vol. 16, pp. 908~914.
- (14) Miyano, Y., Nakada, M., Kudoh, H., Muki, R., 1999, "Prediction of Tensile Fatigue Life Under Temperature Environment for Unidirection CFRP," *Advanced Composite Materials*, Vol. 8, No. 3 pp. 235~246.
- (15) Miyano, Y., Nakada, M., Kudoh, H., Muki, R., 2000, "Determination of Tensile Fatigue Life of Unidirectional CFRP Specimens by Strand Testing," *Mechanics of Time-dependent Materials*, Vol. 4 pp. 127~137.
- (16) Adam, G., Gibbs, J. H., 1965, "On the Temperature Dependence of Cooperative Relaxation Properties in Glass Forming Liquids," *Journal of Chemical Physics*, Vol. 43, pp. 139~146.
- (17) Knauss, W. G., Emri, I., 1981, "Nonlinear Viscoelasticity Based on Free Volume Consideration," *Computer & Structures*, Vol. 13, pp. 123~128.
- (18) Takemori, M. T., Matsumoto, D. S., 1982, "An Unusual Fatigue Crack-tip Plastic Zone: The Epsilon Plastic Zone of Polycarbonate," *Journal of Polymer Science and Polymer Physics Edition* 20, pp. 2027~2040.