

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.6.763

HIPS(HR-1360) 재료의 피로 특성 평가

강민성* · 구재민* · 석창성*[†] · 박재실**

* 성균관대학교 기계공학부, ** 삼성전자

Fatigue Characteristic of High Impact Polystyrene(HR-1360) Materials

Min Sung Kang*, Jae Mean Koo**, Chang Sung Seok*[†] and Jae Sil Park**

* Dept. of Mechanical Engineering, SungKyunKwan Univ.

** SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.

(Received February 4, 2010 ; Revised April 19, 2010 ; Accepted April 20, 2010)

Key Words: Fatigue(피로), Fatigue Fracture(피로 파괴), High Impact Polystyrene(HIPS), Composite (복합재료), Polymer(중합체), S-N Curve(S-N 선도)

초록: 최근에는 물류비용의 증가로 인한 경제적 문제 해결과 사용자의 편의성, 효율 증대를 위하여 많은 사무용 기기 및 가전제품의 부품이 고분자 복합재료로 대체되고 있다. 금속 재료와 비교해 볼 때 이러한 고분자 복합재료는 내구 한도가 낮고 환경에 따라 변형이 심하여 사용 횟수의 증가 및 사용 시간의 증가로 인해 피로 파괴 문제가 빈번하게 발생하고 있다. 본 논문에서는 최근 많이 사용되고 있는 HIPS(High Impact Polystyrene, HR-1360) 재료를 대상으로 하여 20℃(상온), 40℃, 60℃ 환경 조건에서의 정적 강도 특성을 평가하였으며, 피로 시험을 통하여 HIPS 재료의 피로 수명(S-N) 선도를 구하였다. 또한 마이크로 비커스 경도 시험기를 이용한 경도 시험을 통해 인장강도와 내구 한도를 예측해 보았다.

Abstract: In recent times, there has been considerable interest in HIPS (High Impact Polystyrene) materials for their use in construction of office equipments, home electronics, housing for electronics appliances, packing containers, etc. However, these materials suffer from problems caused by fatigue fracture. Further, their strength is substantially affected by environmental conditions. Therefore, in this study, the effect of temperature was analyzed by performing a tensile test and a fatigue test. It was observed that the yield strength, the ultimate strength, and the fatigue life decreased relatively with an increase in temperature. Further, an S-N curve can be predicted by using the results of the tensile test and a micro-Vickers hardness test.

1. 서 론

피로란 재료가 반복 응력이나 반복 변형을 받아 구조물의 일부에서 점진적인 영구변형이 생기고 상당한 기간 동안 반복되면 균열이 생기거나 완전 파괴에 이를 수도 있는 현상이다. 대부분의 기계 및 구조물은 사용 시 변동하중 상태에 놓이는 경우가 많고 이에 따라 변동응력이 작용되며 그 재료의 정적강도(static strength)보다 상당히 작은 값이라도 오랫동안 반복되면 파괴가 발생하게 되는데 이를 피로파괴(fatigue fracture)라 한다.

현재 많은 사무용 기기 및 가전 제품 등은 경제적인 요인과 제품의 경량화로 인해 부품의 많은 부

분이 고분자 복합 재료로 대체되고 있다.⁽¹⁾

금속 재료를 사용할 경우, 대부분 사용 응력이 피로한도 이하이기 때문에 피로파괴로 인한 문제가 많이 발생하지 않지만, 금속에 비해 내구 한도가 매우 낮고 변형이 심한 고분자 복합 재료인 경우 피로 파괴로 인한 문제가 빈번히 발생하고 있다.

재료의 피로 특성 평가는 피로 하중을 받는 기계류 부품의 설계에 필수적인 자료로 실험을 통해서 얻어져야만 한다. 특히, 복합 재료는 기지상 및 보강상의 부피 분율과 기계적 성질 사이의 복잡한 상호 작용, 섬유와 장축-단축비 그리고 두 상간의 접합 강도에 따라 피로 반응이 달라진다. 또한, 환경조건에 크게 영향을 받아 하중방향(인장, 압축), 온도 및 반복 주파수도 피로 거동에 영향을 미친다.⁽²⁾

[†] Corresponding Author, seok@skku.edu

따라서, 본 연구에서는 인장 시험을 통하여 HIPS(High Impact Polystyrene, HR-1360) 재료의 20℃(상온), 40℃, 60℃에서의 항복강도, 인장강도 등의 기계적 특성을 평가하고자 한다. 또한, 이러한 인장 시험 데이터를 이용하여 피로 시험에 필요한 시험 하중을 결정하고 피로 시험을 수행하여 HIPS(HR-1360) 재료의 피로 특성을 나타내는 S-N 선도를 구하고자 한다. 또한 재료의 브리넬 경도 값을 이용하여 인장강도를 예측하는 방법들 중에서 Mitchell⁽³⁾가 제안한 식을 이용하여 본 재료의 인장 강도와 내구 한도를 예측해 보았으며, 실제 인장 강도와 피로 시험 결과와 비교해 보았다.

본 연구에서 수행된 HIPS(HR-1360) 재료의 피로 특성 평가 결과는 이 소재를 사용한 제품 및 부품의 피로 수명 평가에 필수적인 자료로서 활용될 것으로 기대된다. 이러한 연구 결과를 이용하면 HIPS(HR-1360) 재료의 피로 수명 설계가 가능할 것이다.

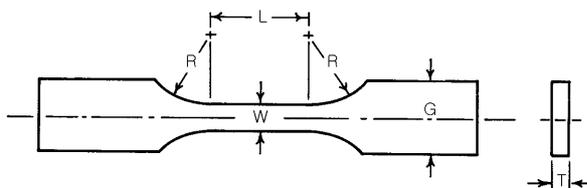
2. 본 론

2.1 시험재료

본 피로 특성 평가 시험에 사용된 재료는 HIPS(HR-1360) 고분자 복합 재료이다.

Table 1 Condition for injection molding of HIPS(HR-1360)

Pre-drying	80 ~ 85℃, 2 ~ 3hr
Cylinder Temp.	190 ~ 240℃
Injection Pressure(kg/cm ²)	700 ~ 1300
Mold Temp.	50 ~ 75℃



W = 12.90 mm, G = 18.80 mm
T = 3.25 mm, L = 58.00 mm

Fig. 1 Test specimen (tensile and fatigue)

HIPS(HR-1360)는 스티렌에 고무를 5~10% 첨가하여 제작한다. HIPS(HR-1360)의 재료물성치는 고무상의 입자 크기와 함량, 고무와 기질(matrix)의 접합 강도, 균질성에 크게 의존한다. HIPS(HR-1360)는 우수한 기계적 성질과 가공성, 구조성을 갖고 있으며, 충격강도와 내열성 또한 매우 우수하다.

HIPS(HR-1360) 재료의 가공품은 일반적으로 가전 제품의 하우징(housing), 사무용 기기, 포장 컨테이너 등에 쓰인다. Table 1에서는 HIPS(HR-1360)의 사출 성형 조건을 나타내었다.

2.2 시편 및 시험장비

인장 시험 및 피로 시험에 사용된 시편의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 가공에 의한 방향 흡집을 제거하기 위하여 에머리페이퍼(#1200)를 사용하여 길이 방향으로 연마하였다.

시험 장비로는 0.1ton(Instron model 8841) 및 25ton 용량의 전기유압식 재료시험 시스템(Instron model 1332)을 사용하였고, 본 시험을 시작하기 전에 하중, 변위 및 변형율에 대한 교정을 실시하여 시험기의 정밀도를 확인하였다.

모든 시험의 제어, 데이터 처리 및 결과 해석은 PC를 사용하여 수행하였다. 고온시험에서는 환경로(Environmental chamber)를 사용하였으며, 강제 순환 방식에 의해 ±1℃ 범위 내에서 온도를 조절하였다. 인장 시험에서는 고온용 COD 게이지(Capacitec model B)와 증폭기(Capacitec model SP 3200)를 사용하여 각각 게이지 변위(gage length)와 하중선 변위(load line displacement)를 측정하였다.

2.3 인장 시험

인장 시험은 ASTM E8⁽⁴⁾과 ASTM E21⁽⁵⁾, ASTM D638⁽⁶⁾의 기준을 만족하도록 하였다.

고온 시험은 시편의 3점에서 온도를 측정하여 ±1℃에서 정상상태로 2시간 유지시킨 후에 수행하였다. 압축응력과 굽힘에 민감하므로 시험기와 시험편의 측정결과 하중제어에 주의하였다.

항복강도는 0.2% 오프셋법을 사용하여 결정하였다. 인장강도는 ASTM E8에 따라 최대하중을 원단면적으로 나누어 결정하였으며, 또한 시험에서 얻어진 하중-변위 선도로부터 공칭응력-공칭변형률 선도를 얻었다.

2.4 피로 시험

피로 시험은 ASTM E466⁽⁷⁾과 ASTM E468,⁽⁸⁾ ASTM E739⁽⁹⁾의 기준을 만족하도록 하였다.

상온(20°C)의 경우 Instron사의 0.1ton 유압식 만능 시험기를 사용하여 최대 1,000,000 cycle까지의 피로 시험을 수행하였고, 고온(40°C, 60°C) 시험의 경우에는 1,000~100,000 cycle까지의 시험을 수행하였다. 시험을 위한 모든 시험 장비는 표준 시험법의 조건을 만족하도록 하였다.

Table 2 Summary of tensile test results

Temperature			Spec.1	Spec.2	Spec.3
Room Temp. (20°C)	Yield Strength (MPa)	Upper	28.2	22.9	23.3
		Lower	24.6	21.2	21.6
	Ultimate Strength (MPa)	30.5	27.0	28.6	
40°C	Yield Strength (MPa)	Upper	22.2	22.7	-
		Lower	20.3	21.2	-
	Ultimate Strength (MPa)	24.9	25.3	-	
60°C	Yield Strength (MPa)	Upper	16.8	16.2	-
		Lower	15.7	15.2	-
	Ultimate Strength (MPa)	17.1	17.8	-	

3. 결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과 및 고찰

20°C, 40°C, 60°C의 HIPS(HR-1360) 재료의 인장 시험에서는 하중-변위(load-displacement) 선도를 구하여 공칭응력-공칭변형률 선도를 구하였다.

시험 결과로부터 구한 항복강도, 인장강도 값을 정리한 결과는 Table 2와 같다. 온도 변화에 따른 인장 시험 결과는 Fig. 2와 같이 나타났다.

상온(20°C)에서 고온(40°C, 60°C)으로 시험 온도가 증가할수록 Fig. 3에 보이는 바와 같이 항복강도와 인장강도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 20°C, 40°C, 60°C에서 각각의 항복강도와 인장강도의 차를 살펴보면, 20°C 인장시험을 기준으로 항복강도는 40°C 인장시험에서 약 8.2% 저하하고, 60°C 인장시험에서는 약 31.6% 저하된 것으로 나타났다. 항복강도의 저하률이 약 8.2%에서 약 31.6%로 23.4%가 더 저하되어 HIPS(HR-1360) 재료는 시험 온도 증가에 따라 항복강도의 감소 경향이 더욱더 큼을 알 수 있다. 20°C 인장시험에서의 HIPS (HR-1360) 재료의 인장강도는 약 28.7MPa이다. 또한 20°C 인장시험을 기준으로 인장강도에서도 40°C 인장시험에서 약 12.5% 저하하고, 60°C 인장시험에서는 약 39.2% 저하된 것으로 나타났다. 인장강도의 저하률이 약 12.5%에서 약 39.2%로 26.7%가 더 저하되어 HIPS(HR-1360) 재료는 시험 온도 증가에 따라 인장강

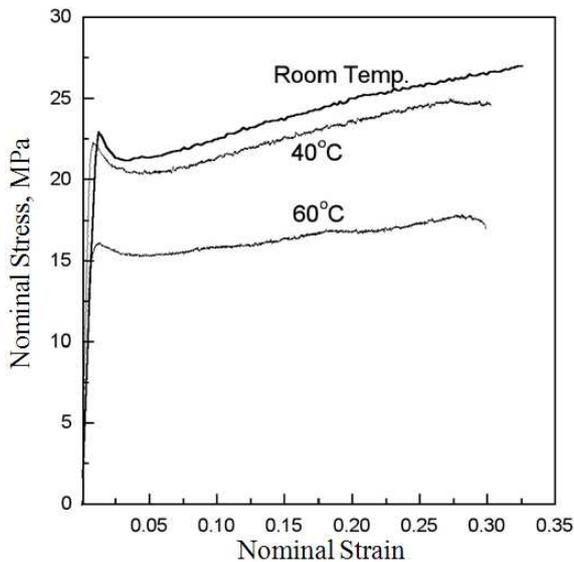


Fig. 2 Tensile test results

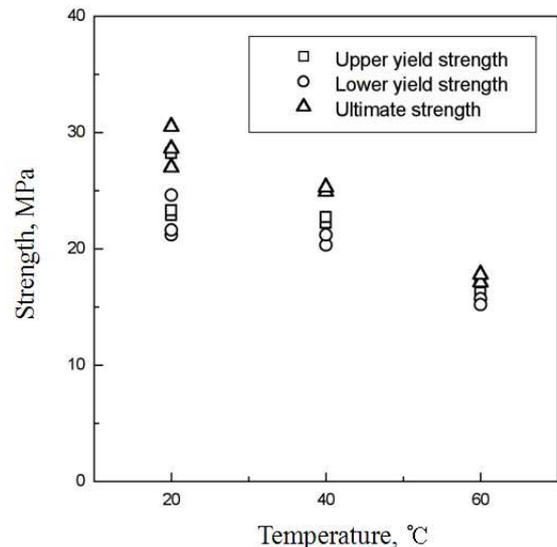


Fig. 3 Strength at various temperature

Table 3 Summary of fatigue test result

Load Max. (kg)	Room Temperature		40°C		60°C	
	Maximum Stress (MPa)	Life (Cycle)	Maximum Stress (MPa)	Life (Cycle)	Maximum Stress (MPa)	Life (Cycle)
95	21.9	2,646	-	-	-	-
90	20.7	8,150	-	-	-	-
90	20.7	7,670	-	-	-	-
85	19.6	19,663	19.6	4,060	-	-
80	18.4	41,590	18.4	13,750	-	-
75	-	-	-	-	17.3	2,860
70	16.1	70,340	16.1	41,670	16.1	3,170
70	-	-	16.1	51,580	-	-
65	-	-	15.0	43,000	15.0	7,890
60	13.8	157,130	-	-	13.8	18,840
55	12.7	288,134	-	-	12.7	29,000
50	11.5*	1,027,200	-	-	-	-

* Not broken specimen

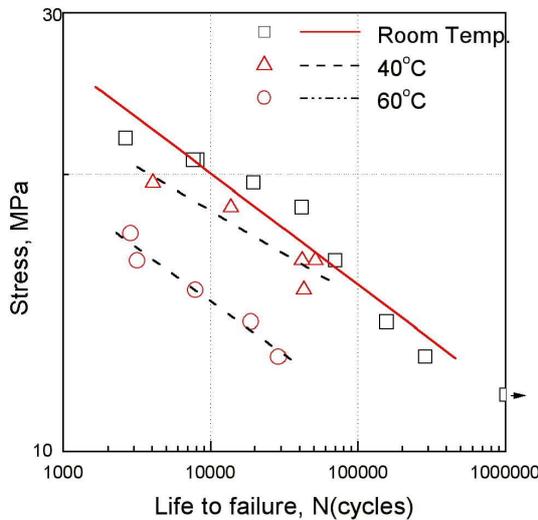


Fig. 4 Fatigue test results

도의 감소경향은 항복강도의 경향과 유사하였다. 따라서 본 시험재료는 시험 온도 증가에 따라 항복강도와 인장강도의 감소 경향이 더욱더 커지고 항복강도보다 인장강도의 저하률이 더욱 큼을 확인하였다.

3.2 피로시험 결과 및 고찰

2.2 절의 시편을 준비한 후 2.4 절의 방법에 따라 피로시험을 수행하였다.

HIPS 재료의 경우, 인장-압축의 피로시험을 수행하게 되면 고무를 첨가하지 않은 폴리스티렌

(PS) 또는 스티렌-아크릴로나이트라이트 복합 중합체(SAN)의 경우보다 고무상 때문에 균열의 발생과 전파 기간이 모두 감소한다. 이는 부하 cycle 동안에 균열이 닫히는 부분에서 발생한 압축하중 때문에 미세 섬유들이 잔금이 가면서 심하게 파손되게 된다.^(10~12)

그러므로, 본 연구에서는 탄성 구간 내에서 하중비 R=0.1, 10Hz로 피로시험을 수행하였으며 각 온도별 시험 결과를 Table 3에 정리하였다. 상온(20°C)에서의 시험은 1,000,000 cycle까지 시편이 파단하지 않을 때까지 하중을 변화시켜가며 수행하였다. 고온(40°C, 60°C)의 피로시험은 1,000 ~ 100,000 cycle 범위 내에서 시편이 파단되는 하중 범위까지 수행하였다.

피로 손상의 양상을 살펴보면, 일반적인 복합재의 양상이 나타난다고 되어있으며, 분산상과 기질(matrix)과의 계면박리, 적층간의 층간분리, 기질 사이의 균열 발생·진전, 분산상의 파괴 등으로 반복수의 증가에 의해 파손에 이르렀다. 피로시험 도중, 섬유와 모재와의 계면분리와 섬유의 파단에 의해 빛이 산란되는 계면이 생겨 반복수의 증가에 따라 재료가 흰색으로 변화였다.

온도별 피로시험 결과는 Fig. 4와 같다. 상온(20°C)에서 고온(40°C, 60°C)으로 피로시험 온도가 증가할수록 같은 응력하에서의 피로 수명이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 인장시험에서의 결과와 같이, 20°C, 40°C, 60°C에서 각각의 같은 응

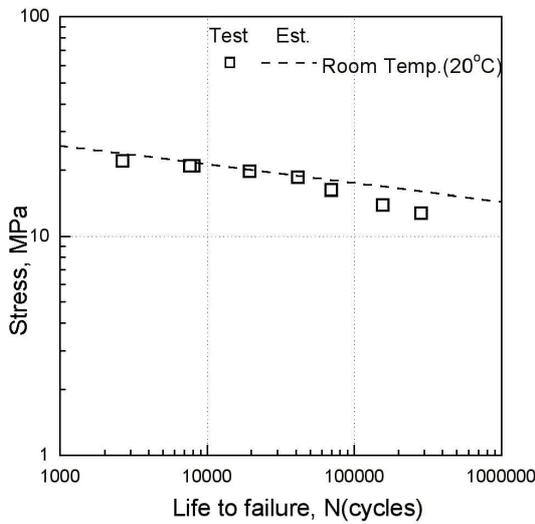


Fig. 5 Fatigue test results and estimated graph of room temperature

력하에서의 피로 수명이 감소하는 경향을 살펴보면, 20°C와 40°C의 차보다 40°C와 60°C의 차가 더 크게 나타나 본 시험재료는 피로시험 온도 증가에 따라 같은 응력하에서의 피로 수명이 감소 경향이 큰 것으로 나타났다.

20°C에서의 반복수 1,000,000 cycle 추정 HIPS(HR-1360) 재료의 내구한도는 약 11.5MPa이다.

4. S-N 선도의 예측

4.1 인장시험을 이용한 S-N 선도의 예측

20°C에서의 인장시험과 피로시험을 바탕으로 S-N 선도를 예측하였다. 수명 1,000 cycle과 일치하는 응력을 인장강도의 90%로 예측을 하고, 수명 1,000,000 cycle의 내구한도와 일치하는 응력을 인장강도의 50%로 예측하였다. 수명 1,000 cycle과 내구한도를 연결하는 선으로 HIPS(HR-1360) 재료의 20°C에서의 S-N 선도를 예측하여 Fig. 5와 같이 나타내었다. 전체적인 예측선도는 시험치와 비슷한 경향을 띄고 있지만 내구한도에 가까워질수록 오차가 커지고 있다. 그러나, 금속재료를 대상으로한 S-N선도 예측방법을 고분자 복합 재료인 HIPS(HR-1360)에 적용하여 S-N선도를 구할 수 있었다.

4.2 경도시험을 이용한 S-N 선도의 예측

경도시험을 통해 인장강도를 예측하는 방법으로 여러 연구자들이 제안한 식이 있는데 식을 살

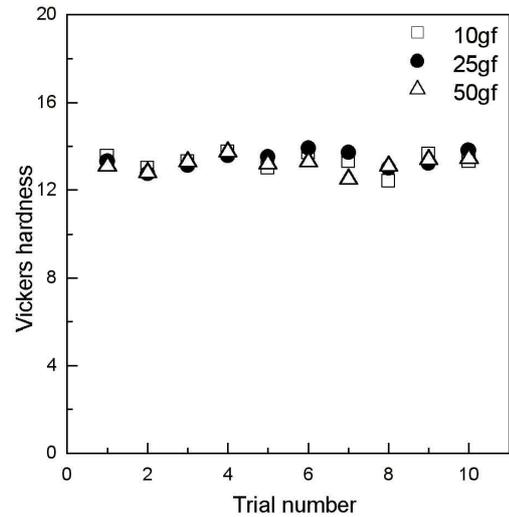


Fig. 6 Vickers hardness test results of room temperature

펴보면 다음과 같은 식이 있다. Mitchell⁽³⁾의 식,

$$\sigma_B = 3.45 \times HB \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Roessle 과 Fatemi⁽¹³⁾의 식,

$$\sigma_B = 0.0012 \times (HB)^2 + 3.3 \times HB \text{ (MPa)} \quad (2)$$

Bäumel 과 Seeger⁽¹⁴⁾의 추천식,

$$\sigma_B = 3.29 \times HV - 47 \text{ (MPa)} \text{ for } HV \leq 445 \quad (3)$$

등이 있다. 위 식들 처럼 경도와 인장 강도의 관계식에서 경도로서 브리넬 경도를 사용하는 경우와 마이크로 비커스 경도를 사용하는 경우가 있다. 이러한 경도 값을 이용하여 재료의 물성을 예측하는 데에는 재료의 성질 및 필요에 따라 여러 경도 값을 사용할 수 있다.⁽¹⁵⁾

본 연구에서는 마이크로 비커스(Micro Vickers) 경도시험기로 HIPS(HR-1360) 재료의 경도값을 측정하였다. 비커스 경도값을 브리넬 경도값으로 환산하여 HIPS(HR-1360) 재료의 인장강도와 내구한도를 추정하였다.

Akashi사의 MKV-H2 마이크로 비커스 경도시험기(시험가능하중 1~2000gf)를 사용하여 시험하중 10gf, 25gf, 50gf에 대하여 각각 10회, 10초씩 하중을 가하여 시험하였다. Fig. 6는 마이크로 비커스 경도시험 결과를 나타내고 있다.

보간법을 이용하여 비커스 경도값을 브리넬 경도값으로 추정하여, Mitchell⁽³⁾이 제안한 Thumb's

rule을 이용하여 인장강도를 추정하였다. 마이크로 비커스 경도 값 13.27MPa을 보간법으로 브리넬 경도 값으로 추정하면 약 8MPa이다. 이 브리넬 경도와 인장강도와의 관계식을 나타내면 다음 식과 같다.

$$S_u(\text{MPa}) \approx 3.445 \times H_B \quad (4)$$

$$= 3.445 \times 8 = 27.56(\text{MPa})$$

또한, 이 브리넬 경도와 내구한도와의 관계식을 나타내면 다음 식과 같다.

$$S_e(\text{MPa}) \approx 1.723 \times H_B \quad (5)$$

$$= 1.723 \times 8 = 13.78(\text{MPa})$$

마이크로 비커스 경도시험으로 추정된 20°C에서의 인장강도와 내구한도와 3.1절과 3.2절에서 구한 시험 값과 비교해 보면, 인장강도는 약 4%의 오차가 나타났고, 내구한도는 약 20%의 오차가 나타났다.

5. 결 론

HIPS(HR-1360) 재료의 피로 특성 평가를 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 인장시험 결과의 경우, 상온(20°C)에서 고온(40°C, 60°C)으로 시험 온도가 증가할수록 HIPS(HR-1360) 재료의 항복강도와 인장강도가 감소하는 경향이 나타났다. 또한, 시험 온도 증가에 따라 항복강도와 인장강도의 감소 경향이 더욱더 큼을 알 수 있었다.

(2) 피로 시험 결과의 경우, 인장시험에서의 결과와 같이 20°C와 40°C의 차보다 40°C와 60°C의 차이가 더 크게 나타나 본 시험재료는 시험 온도 증가에 따라 같은 응력하에서의 피로 수명의 감소 경향이 더 큰 것으로 나타났다.

(3) 인장시험을 이용한 S-N 선도의 예측 결과, 전체적인 예측 선도는 시험치와 비슷한 경향을 보이고 있지만 내구한도에 가까워질수록 오차가 커지고 있다.

(4) 마이크로 비커스 경도시험 결과를 이용한 S-N 선도의 예측은 인장강도는 오차 범위가 적었지만, 내구한도는 오차 범위가 크게 나타났다.

후 기

본 논문은 2 단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업, 2009

년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0055842).

참고문헌

- (1) Dhingra, A. K. and Doherty, T. P., 1993, "Future Trends in Advanced Fibers and Composite Materials Technology," *Advanced Composites '93 International Conference on Advanced Composite Materials*, pp. 29~34
- (2) Jae-Kyoo Lim, Han-Ju Park and Yon-Jig Kim, 1999, "Environmental Effect Evaluation on Strength Properties of Short Fiber Reinforced PP Composites," *Trans. of the KSME(A)*, Vol.23, No. 5, pp.772~779
- (3) Mitchell, M.R., 1979, "Fundamental of Modern Fatigue Analysis for Design," *Fatigue and Microstructure*, American Society for Metals, Metals Pack, pp. 385~437.
- (4) ASTM Standard E8, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM Philadelphia
- (5) ASTM Standard E21, "Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials," *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM Philadelphia
- (6) ASTM Standard D638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM Philadelphia
- (7) ASTM Standard E466, "Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials," *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM Philadelphia
- (8) ASTM Standard E468, "Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials," *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM Philadelphia
- (9) ASTM Standard E739, "Standard Practice for Statistical Analysis of linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data," *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM Philadelphia
- (10) Thorkildsen, R. L., 1964, *Engineering Design for Plastics*, E. Baer(Ed.), Van Nostrand-Reinhold, New York, p. 279.

- (11) Sauer, J. A. and Chen, C. C., 1983, *Adv. Poly. Sci.*, Vol. 52/53, p. 169.
- (12) Sauer, J. A. and Chen, C. C., 1985, *Thouhening of Plastics*, Plastics and Rubber Institute, London, UK, p. 26.
- (13) Roessle, M.L. and Fatemi, A., 2000, " Strain Controlled Fatigue Properties of Steels and Some Simple Approximations," *International Journal of Fatigue*, Vol.22, pp. 495~511.
- (14) Bäümel, A. Jr and Seeger, T., 1990, "Metals Data for Cyclic Loading," Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- (15) Kwang-Soo Lee and Ji-Ho Song, 2006, "Estimation Methods for Strain-Life Fatigue Properties From Hardness," *Annual Fall Conferences of the KSME*, pp. 7~12.