〈 논문 〉

폴리아세탈 소재의 확률론적 변형률-수명선도 평가

장천수* · 김철수** · 박범규*** · 김정규†

(2006년 3월 31일 접수, 2006년 8월 7일 심사완료)

An Evaluation of Probabilistic Strain-Life Curve in Polyacetal

Cheon-Soo Jang, Chul-Su Kim, Bum-Gyu Park and Jung-Kyu Kim

Key Words: Engineering Plastics(엔지니어링 플라스틱), Polyacetal(폴리아세탈), Standard Normal Distribution(표준정규분포), Weibull Distribution(와이블 분포), Probabilistic Strain-Life Curve(확률론적 변형률-수명 선도)

Abstract

In order to evaluate variation of fatigue life of mechanical components including engineering plastics, it is important to estimate probabilistic strain-life curves to accurately define the variation of fatigue characteristics. This paper intends to provide new assessment of $P-\varepsilon-N$ (probabilistic strain-life curves) for considering the variation of fatigue characteristics in polyacetal. The fatigue strain controlled tests were conducted under constant 50% humidity and room temperature condition by a universal testing machine at strain ratio, $R=0$. A practical procedure is introduced to evaluate probabilistic strain-life curves. Three probabilistic distributions were used for generating $P-\varepsilon-N$ curves such as normal, 2-parameter and 3-parameter Weibull. In this study, 3-parameter Weibull distribution was found to be most appropriate among assumed distributions when the probability distributions of the fatigue characteristic were examined using chi-square and Kolmogorov-Smirnov test. The more appropriate $P-\varepsilon-N$ curves for these materials are generated by the proposed method considering 3-parameter Weibull distribution.

1. 서 론

기계류 부품 산업분야에서는 제품의 소형화, 경량화, 대량생산에 필요한 가공성 향상 및 에너지 절감을 위하여 다양한 플라스틱 소재들을 개발 및 생산하고 있다. 이런 재료들 중에서 엔지니어링 플라스틱(Engineering Plastic, EP)은 기계적 · 열적 특성 및 내부식성, 충격 흡수 기능을 가지므로 기계류 부품의 경량화 및 생산성 향상에 크게 기여하는 소재이다. 이중에서 폴리아세탈(polyacetal)은 높은 강도 및 성형치수안정성을 가지므로 자동차 산업분야에서 이의 사용량이 최근 10여년 동안 300% 이상 증가하는 추세이다.[1-4] 그러나 이 소재의 열화 및 피로 특성에 관한 연구는 충분하지 않으므로 이를 사용한 기계류 부품의 파손 사례가 빈번히 보고되고 있다.[5-6] 따라서 EP을 사용한 기계류 부품의 안정성을 확보하기 위해서는 이 소재의 피로 특성에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

EP의 기계적 및 피로특성 평가에 대한 기존연구들[7-12]을 살펴보면, Ramsteriner 등[8]은 인장응력

* 회원, 한양대학교 기계공학과
E-mail : csjang@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0563 FAX : (02)2291-6707
** 한국철도대학 철도차량기계과
*** 현대· 기아자동차 연구개발본부
† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과

하에서 플라스틱의 피로균열진전거동을 평가하였고, Li 등[9] 및 Xiaowei 등[10]은 무정형 폴리카본네이트(amorphous polycarbonate)에 대하여 이의 기계적 특성에 미치는 피로 손상의 영향을 평가하였다. 국내의 경우, 김충현 등[11]은 플라스틱 스퍼기어에 대한 피로강도 및 수명향상에 관한 방법을 제시하였다.

그러나 EP부품은 소재의 점소성(viscoplasticity)으로 인하여 탄성 및 소성 영역을 명확히 구분하기 어려우므로 응력-수명 방법(stress-life approach)에 의한 피로수명을 평가하기 어렵다. 또한 EP는 뛰어난 성형성으로 기하학적 형상이 복잡한 부재에도 적용 되고 있으며, 이에 따라 응력 집중으로 인한 국부적인 소성 변형이 일어날 가능성이 높기 때문에 변형률-수명 방법(strain－life approach)에 의한 EP의 피로수명 평가가 중요하다. EP의 기계적 및 피로특성은 사용 환경에 민감하며, 이들 특성의 변동성은 금속재보다 매우 크다. 따라서 EP 부품의 건전성을 확보하기 위해서는 결정론적인 관점보다 확률론적인 변형률－수명선도(probabilistic strain－life curve, $P-\epsilon-N$ curve)의 평가가 필요하다.

최근 $P-\epsilon-N$ 선도 평가는 금속재료를 대상으로 피로특성의 변동성을 정량화 하기위하여 많은 연구들이 수행되어왔다.[13~16] 예를 들어, ASTM E 739- 91[14]은 탄성과 소성영역을 각각 구분하여 유의수준(confidence level)에 따른 평가 방법을 제시 하였다. 이 방법은 표본수 및 다양한 유의수준의 선택으로 인하여 정확한 확률분포 특성을 평가할 수 없으므로, Williams 등[16]은 경험적인 방법으로 Owen의 허용한계치(Owen tolerance limits, K-factor)[17]를 이용하여 $P-\epsilon-N$ 선도를 평가하였다. 이 방법은 주어진 유의수준과 표본수에 따라 K-계수를 Owen 허용한계치의 표(K-factor table for Owen tolerance limits)에서 정하고, 이 값은 탄성 및 소성변형률-수명선도의 재료상수들에 곱하여 평가한다. 그러나 이들 연구들은 EP 보다 피로수명의 변동성이 작은 금속재료에 국한된 것으로서, 이러한 방법들을 EP 소재에 적용하는 것은 부적절하다.

본 연구에서는 자동차 부품산업에서 많이 사용되는 강도 및 성형안정성이 높은 5종의 폴리아세탈을 대상으로 이들 재료의 피로특성 변동성을 고려한 $P-\epsilon-N$ 선도를 평가하기 위한 기법을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 시험 방법

2.1 재료 및 시험편

Fig. 1은 인장 및 피로시험에서 사용할 시험편 형상을 나타낸 것이다. 시험편은 피로강도에 영향을 미치는 웰드라인(weld line)을 제거하기 위해서 1게이트(gate) 사출기로 성형하여 제작하였으며, 성형조건은 60~80℃ 금형 온도 및 50~100MPa의 사출 압력이다. 그리고 성형된 시험편은 ASTM D 638-02 규정[18]에 따라 온도 23℃ 및 습도 50%에서 40 시간 동안 시효시킨 후 인장 및 피로시험에 사용하였다.

Table 1은 각 재료에 대한 인장강도 및 연신률을 정리한 것이다. 인장시험은 ASTM D 638-02 규정[18]에 따라 5mm/min의 변위제어로 수행되었다. 이 표에서 평균 및 표준편차는 각 재료에 대하여 10개의 시험편에서 얻어진 것이다. Fig. 2는 F1533재의 응력-변형률 선도의 일례를 나타낸 것이다.

2.2 피로 시험

피로시험은 23℃ 및 습도 50%에서 1.5톤용 유압서어보식 피로시험기(MTS 858 system)를 이용하여 수행하였다. 피로시험편은 두께 3.2mm의 얇은 판형이므로 피로시험 동안 좌굴(buckling)되기 쉽다. 따라서 본 시험에서는 이를 방지하기 위하여 ASTM D 695-91[19]에 따라 I자형 좌굴방지 장치(antibuckling device)를 부착하여 면외변위를 방지하면서 수행되었다. 시험은 변형률제어하에 각각의 재료에 대하여 변형률진폭(strain amplitude, ϵ_a) 0.75~6%의 영역에서 5단계의 수준을 결정하고, 피로수명의 변동성을 고려하기 위하여 각 수준에서 4회에 걸쳐 수행하였다. 변형률 비(strain ratio, R)는 0이고, 실험주파수는 1Hz의 정현파형이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 변형률진폭에 대한 피로수명 평가

Fig. 3은 F1533재 및 F1003H의 변형률진폭에 대한 $R=0$에서 변형률-수명선도($\epsilon-N$ curve)를 나타낸 것이다. 그림에서 원형(○)마크는 전변형률진폭(total strain amplitude, ϵ_t)에 대한 피로수명이

다. 또한 사각형(□) 및 삼각형(△) 마크는 각각 소성 및 탄성 변형률진폭에 대한 자료들이며, 이들의 회귀선은 각각 점선 및 일점쇄선이다. 그리고 이들두 회귀선이 만나는 지점, 즉 탄성 및 소성변형률 진폭이 같은 천이변형률진폭(transition strain amplitude)은 Table 2와 같다. 그리고 실선(—)은 전변형률진폭에 대한 피로수명의 회귀선으로서, 이 관계식은 식 (1)과 같다.

$$\epsilon_m = \epsilon_e + \epsilon_p = A(N_f)^b + C(N_f)^d \qquad (1)$$

여기서 ϵ_m은 파손확률(failure probability, P_f) 50%에서 주어진 피로수명에 대한 전변형률진폭이며, N_f는 ϵ_m에 대한 피로수명이다. 그리고 ϵ_e 및 ϵ_p는 각각 탄성 및 소성변형률 진폭이다.

또한 A, b, C, d는 각 재료에 대한 재료상수 값이다. Table 3은 각각 5종의 폴리아세탈에 대한 전변형률진폭에 대한 피로수명의 관계식을 정리한 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 F1533의 피로수명은 각각의 변형률진폭에서 변동성을 가지므로 결정론적인 방법보다 확률론적 접근방법으로 평가하는 것이 매우 필요하다.

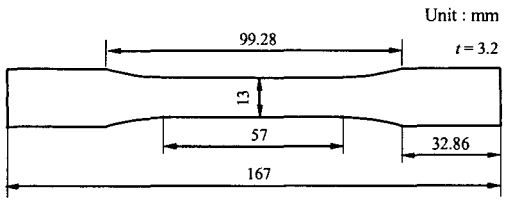


Fig. 1 Configuration of fatigue test specimen

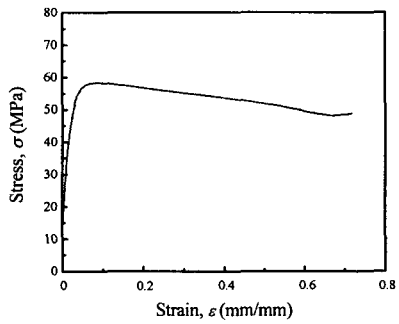
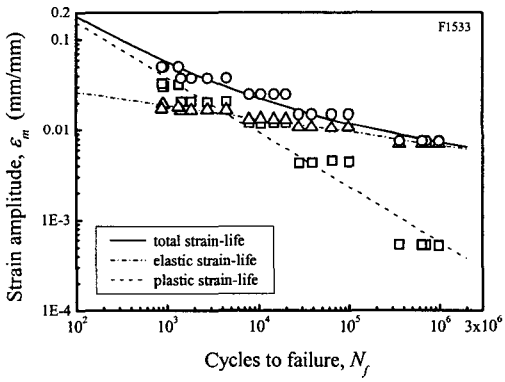


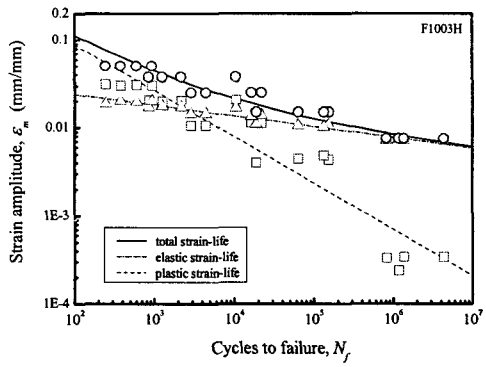
Fig. 2 Stress - strain curve of F1533

Table 1 Mechanical properties

Materials	Ultimate tensile strength (MPa)		Elongation (%)	
	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
F2003	51.2	9.8	59.0	12.0
TX11H	55.4	6.6	54.0	8.3
F1003H	62.0	1.9	78.1	11.3
F2503H	46.0	4.9	52.2	11.2
F1533	52.2	8.1	67.7	5.5



(a) F1533



(b) F1003H

Fig. 3 Strain - life curve

Table 2 Fatigue transition point of polyacetals

Materials	F2003	TX11H	F1003H	F2503H	F1533
Number of cycles	1089	11343	2591	5166	4676
Strain amplitude(%)	0.0141	0.0164	0.0144	0.0127	0.0149

Table 3 Strain - life curve of polyacetals

Materials	$\varepsilon - N$ curve at P_f=50%
F2003	$\epsilon_m = 0.039\,(N_f)^{-0.143} + 0.347\,(N_f)^{-0.460}$
TX11H	$\epsilon_m = 0.076\,(N_f)^{-0.164} + 0.549\,(N_f)^{-0.376}$
F1003H	$\epsilon_m = 0.042\,(N_f)^{-0.151} + 1.005\,(N_f)^{-0.526}$
F2503H	$\epsilon_m = 0.060\,(N_f)^{-0.182} + 3.474\,(N_f)^{-0.656}$
F1533	$\epsilon_m = 0.052\,(N_f)^{-0.148} + 2.588\,(N_f)^{-0.609}$

3.2 확률론적인 변형률-수명 선도

Fig. 4는 표준 정규분포에 따른 $P-\epsilon-N$선도의 평가를 위한 흐름을 나타낸 것이다. 먼저 전변형률진폭 ϵ_i에서 얻어진 피로수명 자료들로부터 Table 3과 같이 P_f=50%에서 $\epsilon_m - N_f$ 선도를 구한다. 그리고 주어진 피로수명 N_f에서 각 변형률 단계의 변동성을 정량화하기 위한 확률변수(random variable, X_i)는 식 (2)과 같다.

$$X_i = \log\epsilon_i - (\log\epsilon_m + \log\epsilon_t) \qquad (2)$$

여기서 ϵ_t 은 천이수명(transition life)에 대한 변형률진폭이다.

한편, 확률변수 X_i가 표준정규분포(standard normal distribution)[20]에 따른다고 가정하면 이의 추정되는 누적분포함수는 식 (3)과 같다.

$$\Phi(X_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{X_i} \exp\left(\frac{-X_i^2}{2}\right) dX_i \qquad (3)$$

여기서 $\Phi(X_i)$는 X_i의 표준누적 정규분포값이다. 그리고 X_i의 표준편차(standard deviation), $S_t(X_i)$[17]는 식 (4)와 같다.

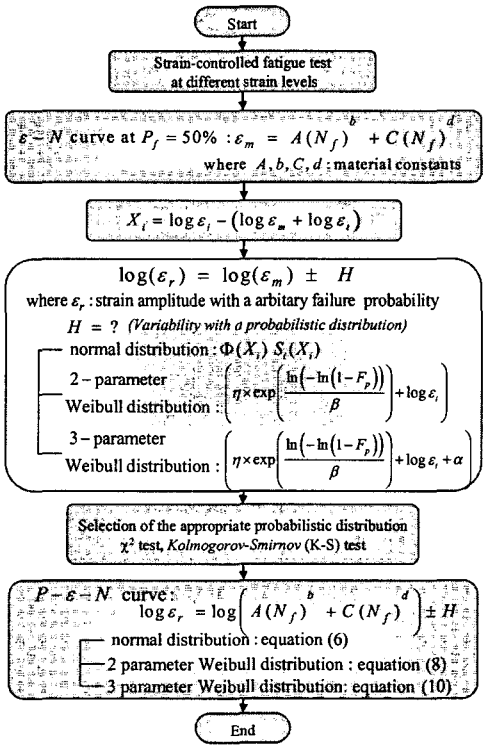


Fig. 4 The flowchart of the new procedure for estimation of the $P-\epsilon-N$ curve of polyacetals

$$S_t(X_i) = \left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\{X_i - X_m\}^2\right]^{1/2} \qquad (4)$$

여기서 n과 X_m은 각각 표본수 및 확률변수 X_i의 평균값이다. 이로부터 주어진 수명에 대한 임의의 파손확률에 따른 전변형률진폭(ϵ_r)은 식 (5)와 같다.

$$\log(\epsilon_r) = \log(\epsilon_m) \pm \Phi(X_i)\,S_t(X_i) \qquad (5)$$

여기서 ϵ_r는 주어진 파단수명에 대한 임의의 파손확률에서의 변형률진폭의 예측값이며, 첨자

r은 임의의 파손확률 값이다. 이로부터 표준정규분포에 따르는 $P-\epsilon-N$ 선도는 식 (1)과 식 (5)로부터 식 (6)과 같다.

$$\log(\epsilon_r)=\log\left\{A(N_f)^b+C(N_f)^d\right\} \pm \Phi(X_i)S_t(X_i) \quad (6)$$

또한 X_i가 2-모수 와이블분포(2-parameter Weibull distribution)[20]를 따른다고 가정하면 이의 추정되는 누적분포함수(cumulative distribution function)는 식 (7)과 같다.

$$F_p(X_i)=1-\exp\left(-\frac{X_i}{\eta}\right)^{\beta} \quad (7)$$

여기서 β와 η는 각각 2-모수 와이블분포의 형상모수(shape parameter)와 크기모수(scale parameter)이다. 그리고 식 (7)에 양변에 로그를 두 번 취하고, Fig. 4의 절차에 따라 정리하면, 2-모수 와이블분포 $P-\epsilon-N$ 선도는 식 (8)과 같다.

$$\log(\epsilon_r)=\log\left\{A(N_f)^b+C(N_f)^d\right\}+\log\epsilon_t + \left[\eta\times\exp\left(\frac{\ln\{-\ln(1-F_p(X_i)\}}{\beta}\right)\right] \quad (8)$$

그리고 X_i가 3-모수 와이블분포(3-parameter Weibull distribution)[20]를 따른다고 가정하면 이의 추정되는 누적분포함수(cumulative distribution function)는 식 (9)와 같다.

$$F_p(X_i)=1-\exp\left\{-\frac{(X_i-\alpha)}{\eta}\right\}^{\beta} \quad (9)$$

여기서 α는 3-모수 와이블분포의 위치모수(location parameter)이다. 이로부터 2-모수 와이블분포의 $P-\epsilon-N$ 선도의 식 (8)과 동일한 과정으로 유도하면, 3-모수 와이블분포 $P-\epsilon-N$ 선도 식은 식 (10)과 같다.

$$\log(\epsilon_r)=\log\left\{A(N_f)^b+C(N_f)^d\right\}+\log\epsilon_t+\alpha + \left[\eta\times\exp\left(\frac{\ln\{-\ln(1-F_p(X_i)\}}{\beta}\right)\right] \quad (10)$$

Table 4 Mean and standard deviation of X_i

Materials	F2003	TX11H	F1003H	F2503H	F1533
Mean	0.002	0.002	0.003	0.001	0.001
Standard deviation	0.061	0.052	0.108	0.039	0.071

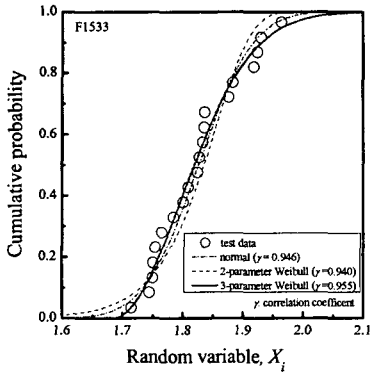
Table 5 Results of K-S and χ^2 test for polyacetals

		F2003	TX11H	F1003H	F2503H	F1533
K-S test	Normal	0.122	0.142	0.201	0.100	0.142
	2-parameter Weibull	0.112	0.189	0.246	0.147	0.192
	3-parameter Weibull	0.088	0.120	0.193	0.065	0.112
	limit	0.294	0.294	0.294	0.294	0.294
χ^2 test	Normal	3.703	1.392	0.769	2.711	5.102
	2-Parameter Weibull	3.713	3.156	3.558	**10.380***	**9.778***
	3-parameter Weibull	3.711	1.312	0.522	1.538	4.084
	limit	5.921	5.921	5.921	5.921	5.921

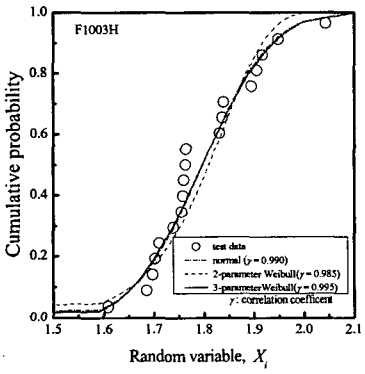
3.3 폴리아세탈 수지의 $P-\epsilon-N$선도

Table 4는 5종의 폴리아세탈에 대한 확률변수 X_i의 평균 및 표준편차를 정리한 것이다. X_i의 표준편차는 피로특성의 변동성을 의미하므로 피로특성의 변동성이 가장 큰 재료은 F1003H이다.

한편, 폴리아세탈 수지들의 피로특성에 대한 변동성을 합리적으로 평가하기 위해서는 가정된 확률분포의 적합성에 대한 검증이 필요하다. 이의 검증은 K-S 검정(Kolmogorov-Smirnov test)[20] 및 χ^2검정(Chi-square test)[20]을 이용하여 평가할 수 있다. Table 5는 유의수준(significance level) 5%에서 K-S 검정 및 χ^2검정의 결과를 정리한 것이다. Table 5에서 * 는 K-S 및 χ^2 검정에서 제한치(limit value)를 초과한 값이다. Table 5에서 보는 바와 같이 5종 폴리아세탈에 대한 각각의 검정값들 중 3모수-와이블 분포가 가장 작으므로 X_i는 3모수-와이블 분포가 가장 적합함을 알 수 있다. 일례로 Fig. 5는 F1533재 및 F1003H재의



(a) F1533



(b) F1003H

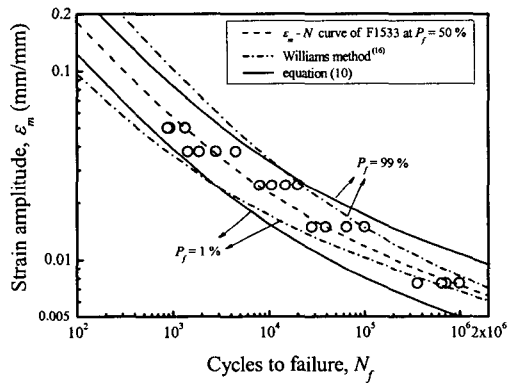
Fig. 5 Comparison of cumulative distribution functions of X_i

X_i에 대한 각각의 누적분포함수를 나타낸 예이다.

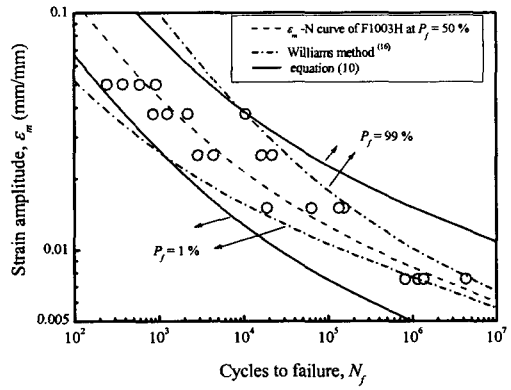
Table 6은 파손 확률 P_f=1 및 99%에서 5종의 폴리아세탈재들의 $P-\epsilon-N$선도에서 재료상수를 각각 정리한 것이다. 일례로서, Fig. 6은 F1533재 및 F1003H재 의 $P-\epsilon-N$선도를 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 본 연구에서 제안된 방법의 평가결과이고, 일점쇄선은 Williams 방법[16]의 평가결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 이 방법의 결과는 고수명 영역에서 시험자료의 변동성을 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 폴리아세탈에 대한 피로특성의 변동성은 Fig. 4의 절차에 따라 식 (10)을 이용하여 평가하는 것이 합리적이다.

Table 6 material constants of $P-\epsilon-N$ curve at P_f=1 and 99%

Material	Failure probability	A	b	B	d	H
F2003	P_f =1%	0.039	-0.143	0.347	-0.460	-0.133
	P_f =99%	0.039	-0.143	0.347	-0.460	0.168
TX11H	P_f =1%	0.076	-0.164	0.549	-0.376	-0.103
	P_f =99%	0.076	-0.164	0.549	-0.376	0.137
F1003H	P_f =1%	0.042	-0.151	1.005	-0.526	-0.227
	P_f =99%	0.042	-0.151	1.005	-0.526	0.257
F2503H	P_f =1%	0.060	-0.182	3.474	-0.656	-0.073
	P_f =99%	0.060	-0.182	3.474	-0.656	0.111
F1533	P_f =1%	0.052	-0.148	2.558	-0.609	-0.124
	P_f =99%	0.052	-0.148	2.558	-0.609	0.210



(a) F1533



(b) F1003H

Fig. 6 $P-\epsilon-N$ curves of F1533 and F1003H obtained by two methods and test results

4. 결 론

본 연구에서 EP중에서 5종 폴리아세탈재의 확률론적 피로특성을 평가하기 위하여 얇은 판재형 시험편으로부터 변형률제어 피로시험을 수행하였고, 이로부터 $P-\epsilon-N$ 선도 평가 기법을 제안하였다. 이의 결과는 다음과 같다.

(1) 각 5종의 폴리아세탈재에 대한 파손확률 50%에서 $\epsilon-N$선도를 평가하였다.

F2003: $\epsilon_m = 0.039(N_f)^{-0.143} + 0.347(N_f)^{-0.460}$

TX11H: $\epsilon_m = 0.076(N_f)^{-0.164} + 0.549(N_f)^{-0.376}$

F1003H: $\epsilon_m = 0.042(N_f)^{-0.151} + 1.005(N_f)^{-0.526}$

F2503H: $\epsilon_m = 0.060(N_f)^{-0.182} + 3.474(N_f)^{-0.656}$

F1533: $\epsilon_m = 0.052(N_f)^{-0.148} + 2.588(N_f)^{-0.609}$

(2) 5종 폴리아세탈재에 대한 피로특성의 변동성은 K-S 및 χ^2검정 결과로부터 3모수-와이블 분포에 의한 평가가 가장 적합하였다.

(3) Williams 방법은 제안식 (10)에 비하여 고수명영역에서 피로수명의 변동성을 과소평가 하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지정 한양대학교 신뢰성 분석연구센터의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Min, B. K., 1987, "Engineering Plastic(EP)," *Chemical Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 10~16.

(2) Lim, Y. S., 1996, "Engineering Plastic for Automotive Parts," *Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry*, Polymer Symposium, pp. 1~19.

(3) Cho, G. G., Je, D. K. and Lim, J. T., 1998, " Plastic Technology for Lightness of Automobile Parts," *Korea Institute of Industrial Engineers/The Korean Operations and Management Science Society, 98' Spring Association Conference*, pp. 1~5.

(4) Underwood, G. S., 2002, "Wear Performance of Ultra-Performance Engineering Polymers at High PVs," *Society of Automotive Engineers, 02' SAE World Congress*, 2002-01-0600.

(5) Blanco, A., 2003, "Plastics Failure Analysis and Prevention," *Society of Plastics Engineers* , Vol. 59, Iss.8.

(6) Parrington, R. J , 2000, "Fractography of metals and Plastics," *Engineering Brookfield Center*, Vol. 56, Iss. 12; pp. 54~60.

(7) Chowdhury, S. R. and Narasimhan, R., 2000, "A Finite Element Analysis of Quasistatic Crack Growth in a Pressure Sensitive Constrained Ductile Layer," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 66, pp. 551~571.

(8) Ramsteiner, F. and Armbrust, T., 2001, "Fatigue Crack Growth in Polymers," *Polymer Testing*, Vol. 20, pp. 321~327.

(9) Li, X., Hristov, H. A., Yee, A. F. and Gidley, D. W., 1995, "Influence of Cyclic Fatigue on The Mechanical Properties of Amorphous Polycarbonate," *Polymer*, Vol. 36, No. 4, pp. 759~765.

(10) Xiaowei, Li, Hristo, A. H., Albert F. Y. and David, W. G., 1995, "Influence of Cyclic Fatigue on the Mechanical Properties of Amorphous Polycarbonate," *Polymer*, Vol.36, No.4, pp.759~765.

(11) Kim, C. H., Ahn, H. S., Chong, T. H., 2002, "Experimental Study for Durability Enhancement of Plastic Spur Gear," *Trans. of the KSME*, Vol.26, No.29, pp. 1914~1922.

(12) Kim, J. W., 1984, "An Analysis of the Fracture Initiation of Falling Type Impact Test for Toughnened Rigid Plastics," *Trans. of the KSME*, Vol.8, No.4, pp. 385~392.

(13) Sugair, A. and Kiremidjian, F. H., 1990, "Low-cycle Fatigue Data Statistical Analysis And Simulation," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 37, No.3, pp. 691~696.

(14) ASTM E739-91, 1998, Standard Practice for Statistical Analysis of Linear Or Linearized Stress-Life(*S-N*) and Strain-life(*e-N*) Fatigue data, pp. 631~637.

(15) Baldwin, J. D. and Thacker, J. G, 1995, "A Strain-Based Fatigue Reliability Analysis Method," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 117, pp. 229~234.

(16) Williams, C. R., Lee, Y. L. and Rilly, J. T., 2003, "A Practical Method for Statistical Analysis of Strain-Life Fatigue Data," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, pp. 427~436.

(17) Shen CL, Wirsching, PH, Cashman, GT, 1996," Design Curve to Characterize Fatigue Strength," *Journal of Engineering Material Technology ASME*, No. 118, pp. 535~541.

(18) ASTM D638-03, 2003, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, *ASTM*.

(19) ASTM D695-02a, 2002, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, *ASTM*.

(20) Haldar, A. and Mahadevan, S., Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering design, *John Wiley & Sons*, pp.106~120.