엔지니어링 플라스틱 소재의 피로특성에 대한 응용프로그램 개발

장천수† · 박범규† · 김철수* · 김정규**

Development of Application Program for Fatigue Characteristics of Engineering Plastics

Cheon-Soo JANG, Bum-Gyu PARK, Chul-Su KIM, Jung-Kyu KIM

Key Words: Engineering Plastic(엔지니어링 플라스틱), Weibull Distribution(와이블 분포), Probabilistic *S-N* Curve(*P-S-N* 선도), Relational Model(관계형 모델)

Abstract

In this study, in order to perform more efficiently reliability design and integrity assessment of structural members, the relational database management program on the engineering plastics was constructed. This program contained 476 grades for 14 kinds of the engineering plastics and was developed using MS-access and MS-visualbasic. This program consists of 3 modules; search condition, probabilistic characteristics of material property, evaluation of *P-S-N* curve. We perform fatigue test for probabilistic durability analysis and this results input the database program to estimate *P-S-N*.

1. 서 론

엔지니어링 플라스틱(engineering plastic, EP)은 강재와 유사한 기계적 · 열적 특성 및 내부식성, 충격 흡수 기능을 가지므로 기계류 부품의 경량화 및 생산성 향상에 크게 기여하는 소재이다[1~4]. 그리고 EP의 수요는 전기, 전자, 자동차 산업 등의 급속한 발전에 따라 세계시장에서 크게 증가하는 추세이다. 따라서 급증하는 EP의 수요에 맞추어 이미 상용화되거나 개발된 EP소재들은 제품의 설계측면에서 이들의 다양한 기계적, 열적 특성에 대한 시험평가와 함께 이에 대한 효과적인 자료정리가 필요하다. EP 부품의 기계적, 열적, 피로(fagigue) 특성에 관한 자료는 파손을 방지하기 위한 안전 및 신뢰성설계에 있어서 매우 중요하다.

† 한양대학교 기계설계학과 대학원
E-mail : pbg22@ihanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0563, FAX : (02)2291-6707
* 한국철도대학 차량기계과
** 한양대학교 기계설계학과

Li 등[5]은 반복하중이 무정형 polycarbonate의 기계적 특성 변화에 미치는 영향에 대한 연구를 수행 하였으며, Goral 등[6]은 유한요소 해석을 통하여 EP 소재를 사용하는 자동차 부품 설계에 대한 연구를 수행 하였다. 또한 Ramsteiner 등[7]은 고분자 소재에서 크레이지(craze)의 확장에 의한 피로균열 진전 거동에 관한 연구를 수행하였다.

그러나 대상부품의 안전설계를 위해서는 확률론적 해석(probabilistic analysis)을 통한 신뢰도(reliability) 평가가 필요하다. 실제 설계에 있어서 재료특성 값의 데이터를 얻기 위한 시험은 시간적, 경제적 또는 기술적인 이유 때문에 매우 제한적이다. 또한 이들 데이터들은 실험조건의 차이, 측정오차 등으로 인하여 신뢰도를 충분히 확보하지 못하고 있다. 따라서 부품의 안전성과 신뢰도를 향상시키기 위해서는 얻어진 데이터의 관리를 위한 응용프로그램을 구축하고 이를 이용하여 강도 및 피로수명 특성을 확률론적으로 평가

하는 것이 중요하다

따라서 본 연구에서는 국내에서 생산된 EP의 기계적, 열적 특성과 피로특성치 데이터의 효율적인 이용을 위해서 데이터 관리 및 확률론적 특성을 평가할 수 있는 응용프로그램을 개발 하고자 한다.

2. 자료집의 구축

일반적으로 EP부품의 설계에서 가장 중요한 특성은 내열성(thermostability), 물리적 특성(physical properties), 성형성(moldability), 기계적 특성(mechanical properties)등이다. 내열성의 대표적 인자에는 열변형온도 (heat distortion temperature : HDT)이며, 이는 시험편에 일정하중을 가했을 때 변형이 시작되는 온도를 의미한다. 물리적 특성과 성형성에 대한 대표적 인자는 비중(specific gravity)과 유동지수(melt index)이며, 기계적 특성의 경우에는 인장강도, 연신율, 록웰경도(rockwell hardness), IZOD 충격강도(impact strength) 등이다. 그리고 피로특성에 관한 인자는 피로강도, 피로한도 및 S - N 선도상의 재료상수들이다. Table 1은 EP의 특성 인자들에 관한 단위와 평가규격을 정리한 것이다.

폴리에스터(polyester), 폴리아미드(polyamide), 폴리카보네이트(polycarbonate), 폴리아세탈(polyacetal), 변성 PPO(modified - polypheylene oxide)같은 5대 범용EP들은 기계적, 화학적, 전기적, 열적 성질과 가격 등이 적당하게 조화되어 있어 수요의 대부분을 차지하고 있다[(1)~(3)]. 따라서 데이터베이스 프로그램에 입력될 데이터는 이들 5대 범용 EP를 대상으로 하였다.

응용프로그램 구축을 위해 수집된 자료는 국외 및 국내의 대표적인 EP 생산업체인 GE-Plastic Co.과 KEPITAL Co.의 연구 결과들로부터 제공받은 것이다. Table 2는 이들 데이터의 구성 및 분류를 정리한 것이다.

3. 응용프로그램 구축

3.1 응용프로그램의 설계

데이터 관리를 위한 응용프로그램은 크게 관계형 모델 (relational model), 계층형 모델 (hierarchical model), 네트워크형 모델 (network model)등이 있으며, 본 연구에서는 가장 많이 사용되는 관계형 모델을 채택하였다. Fig. 1은 관계형 모델에 준한 응용프로그램의 전체 구조를 나타낸 것이다. 데이터 관리 시스템(database management system)에 사용되는 프로그램은 현재 널리 이용되고 있는 모델중의 하나인 Microsoft사의

Table 1 Units and test standard of plastic properties

특 성		단 위	ASTM	비 고
물리적 특 성	비 중	-	D792	-
열 적 특 성	유동지수	g/10min	D1238	230℃/3.8kg
	HDT 1	˚F	D648	4.6kg$_f$/㎠-unannealed
	HDT 2	˚F	D648	18.6kg$_f$/㎠-unannealed
	HDT 3	˚F	D648	18.6kg$_f$/㎠-annealed
기계적 특 성	인장 강도	psi	D638	5mm/min
	연 신 율	%	D638	5mm/min
	굴곡 강도	psi	D790	-
	굴곡 탄성율	psi	D790	-
	록웰 경도	HR	D785	-
	IZOD 충격강도	ft·lb$_f$/in	D256	notch, 23°C

Table 2 Number of data in database

Company	Crystallization	Product name	Resin	Number of grade
GE-Plastic	Crystalline	CYCOLAC	ABS/PC	26
		LEXAN	PC	161
			PPC	4
	Amorphous	GELOY	ASA/PC	2
			ASA	7
			ASA/PVC	4
		NORYL	PPE/PS	89
	Blend (Crystalline + Amorphous)	VALOX	PBT	82
			PBT/PET	2
		XENOY	PBT/PC	25
			PC/PET	9
		NORYL GTX	PPE/PA	19
			PPE/PS/PA	1
	소 계			431
KEPITAL	Amorphous	KEPITAL	POM	45
총계				476

MS-ACCESS를 사용하였다. 또한 확률론적 특성 평가 및 피로 특성평가를 위한 운용시스템 유틸리티는 MS-Visual Basic을 이용하였다. 데이터의 불필요한 반복을 피하기위하여 서로 같은 속성들(attributes)은 하나의 테이블로 표현하고, 테이블간의 관계를 설정하는 정규화(normalization)를 수행하였다.

Fig. 2는 EP의 확률론적 특성 평가를 위하여 개발된 응용 프로그램의 구성도를 나타낸 것이다. 이 프로그램은 총 3단계로서 검색조건, 확률론적 해석 및 *P* - *S* - *N* 선도 (probabilistic *S* - *N* curve)를 평가하는 순서로 구성되어 있다.

먼저 정보를 검색하는 부분은 기계적, 물리적, 열적 특성을 이용하여 특정 정보를 검색할 수 있으며, 제조회사의 상품명(brand name)과 수지(resin) 별로도 검색이 가능하다. 두 번째 확률론적인 해석부분에는 2모수 와이블 분포(2-parameter Weibull distribution)로 가정하고 각 강도의 변동성을 평가 하였으며, 이들에 대한 확률밀도 함수(probability distribution function, PDF)와 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF)의 그래프를 표현 한다. 마지막 단계는 소재의 피로특성의 변동성을 고려한 *P* - *S* - *N* 선도에 대한 평가 결과를 표현하는 것이다.

3.2 데이터 검색 및 결과

Fig. 3은 응용프로그램으로부터 원하는 정보를 검색 할 수 있는 검색 창이며, 이는 두 부분으로 나뉘어져 있다. 사용자는 Fig. 3(a)와 같이 검색하고자 하는 상표와 수지를 선택하여 정보를 확인할 수 있다. 또한 사용자가 검색하고자 하는 상표와 수지에 대한 정보가 없다면, Fig. 3(b)와 같이 주요한 검색조건을 입력하여 원하는 정보들을 볼 수 있다. Fig. 3(b)의 검색조건들을 살펴보면, 열변형 온도(HDT1)와 유동지수 그리고 기계적 특성인 탄성계수, 인장강도, IZOD 충격강도, 록웰경도 등이 논리곱(logic product, "and")의 형태로 구성되어 있다.

Fig. 4는 Fig. 3에서 검색조건을 입력한 후에 얻은 결과를 나타내는 창이다. 본 창은 재료의 기계적 특성(인장강도, IZOD, 충격강도, 록웰경도, 굴곡강도, 굴곡탄성률)과 물리적 특성(비중), 열적 특성(유동지수, HDT)들에 대한 평균값들을 표현하는 창이다. 검색결과에서 굵게 표시되는 그레

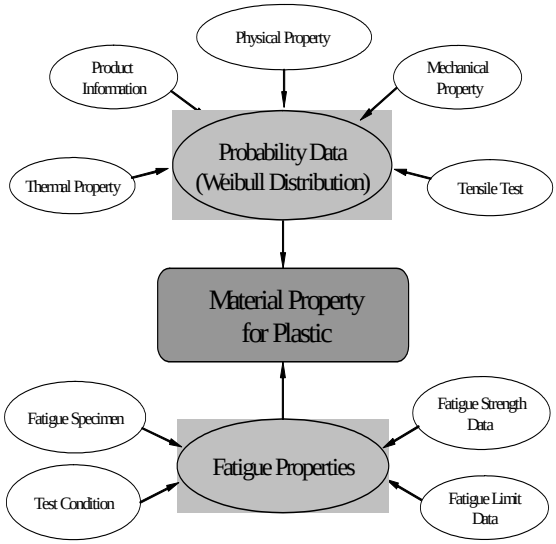


Fig. 1 The diagram of database Relationship

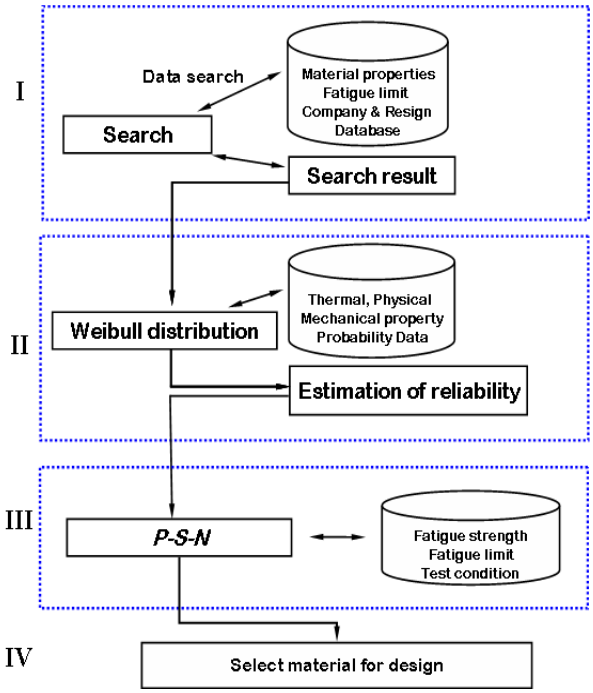
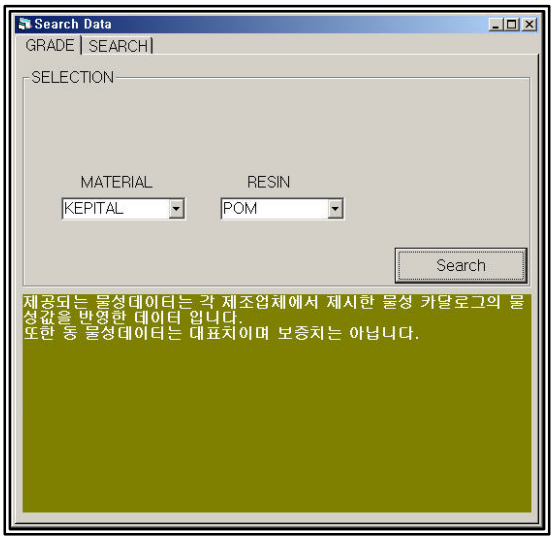
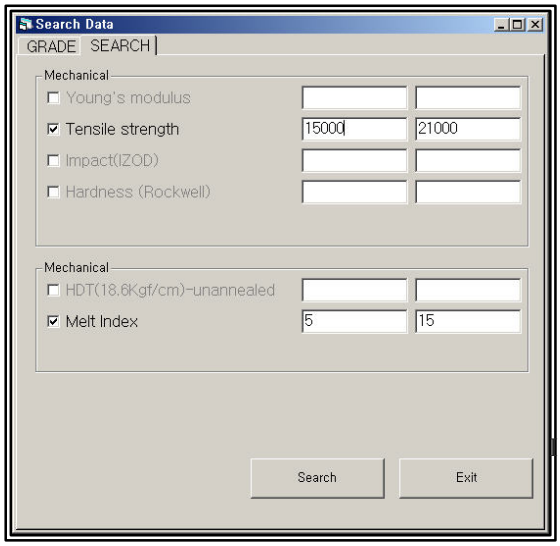


Fig.2 Procedure of the application program for reliability analysis with database system

이드들(예: No. 3)은 피로시험 데이터를 포함하고 있는 재질의 데이터이며, 나머지 그레이드 재질들(예: No. 1, 2 and 4)은 피로시험 데이터를 포함하지 않은 재질들의 데이터이다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 아세탈 수지인 FG2025 그레이드의 인장강도가 20623psi(142MPa)로서 다른 그레이드 재질 보다 가장 높았으며, 연신율도 높다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 설계자는 원하는 물



(a) Condition of search I



(b) Condition of search II

Fig. 3 Search form in the application program

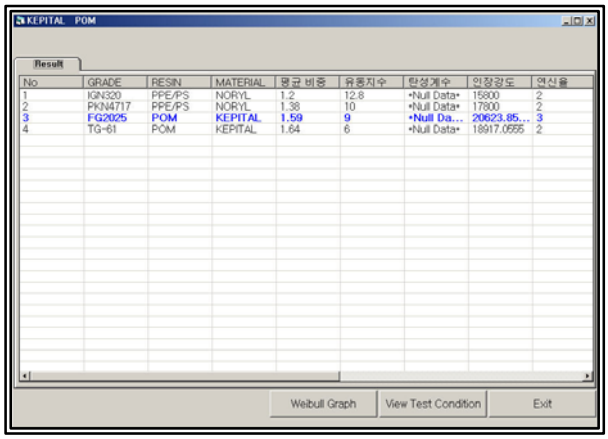


Fig. 4 Searched result form in the application program

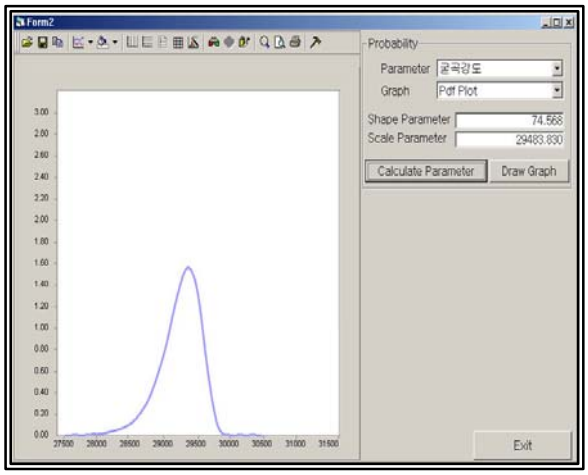


Fig. 5 Results of probabilistic analysis with the 2-parameter Weibull distribution in the application program

성치 조건의 수준을 검색조건 창에서 입력하고, 검색결과 창에서 각각의 재질 물성치들을 검토함으로써 부품의 재질을 선택할 수 있다.

3.3 기계적 특성의 확률론적 평가

검색된 EP 데이터는 변동성이 존재하므로 이를 정량화하기 위해서 재료 특성에 대한 2모수 와이블 분포 모수 평가가 필요하다. 본 연구에서 2모수 와이블 분포의 모수는 식 (1)과 같은 메디안순위법(median rank)과 최소자승법(least square)을 이용하여 평가 하였다[14].

$$F(t) = \frac{r - 0.3}{n + 0.4} \qquad (1)$$

여기서 r은 확률변수의 랭크, n은 샘플의 수 이다. Fig. 5는 이와 같은 방법으로 평가된 KEPITAL사의 FG2025 그레이드의 굴곡강도에 대한 확률론적 평가 결과이다.

3.4 시험조건 및 P - S - N 선도

Fig. 6은 피로특성치 자료의 검색을 위한 피로시험 조건들을 나타내는 창이다. 본 창은 응력비, 하중의 형태(예:축하중, 굽힘하중), 시험편 형상, 시험속도(예:주파수), 시험제어방법(예:하중제어)으로 구성되었다. 설계자가 원하는 시험조건의 자료를 선택하고 "Graph" 버튼을 누르면, S - N 선도 또는 P - S - N 선도를 볼 수 있다. 예를 들어 GE-Plastcs의 ABS 수지인 AR 그레이드의 피

로특성 평가 결과는 Fig. 7과 같다. 본 창의 오른쪽값은 파손확률 P_f = 50%에서 식 (2)의 재료상수들과 피로강도에 대한 표준편차, 피로한도 기준사이클수 등이다.

$$\Delta\sigma = A(N_f)^{b_1} \qquad (2)$$

또한 Fig. 7의 왼쪽의 분할그림은 양대수좌표(log-log scale)상에서 주어진 파손확률(P_f = 10%, 50% 및 90%)에서 *P - S - N* 선도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이 재질의 피로수명은 동일한 피로강도에서 변동성이 나타나므로, 이를 사용하는 부품의 피로수명은 확률적 관점에서 평가해야 된다고 사료된다

4. 결 론

본 연구에서는 엔지니어링 플라스틱 소재(476종류)를 대상으로, 부품의 안전성 및 신뢰성을 평가하기위한 기초자료인 기계적, 열적, 물리적 및 피로특성 등의 데이터 관리를 위한 응용프로그램을 구축하였다. 또한 이들 데이터의 확률론적 평가를 위한 기능을 제공하여 사용자 편의를 제공하였다.

응용프로그램 구축에는 관계형 모델이 사용되었으며, 재료의 정보를 쉽게 표현하기 위하여 재료의 상세 데이터를 속성 테이블로 나누었으며, 이를 정규화하여 개체연관도를 구성하였다.

구축된 응용프로그램은 크게 세부분으로 구성되었다. 이는 기계적 특성 및 열적 특성을 이용하여 검색하는 부분, 소재의 특성들을 2모수 와이블 분포로 확률론적으로 해석한 부분 그리고 피로특성을 확률론적으로 평가하는 부분으로 구성하였다.

후기

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

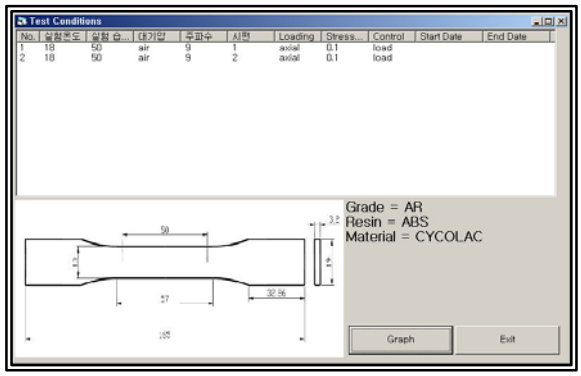


Fig. 6 Fatigue test condition

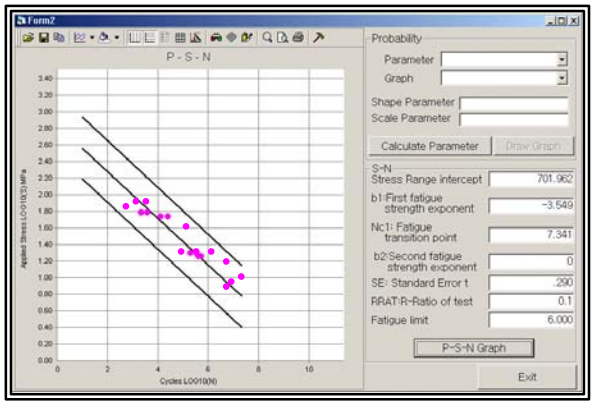


Fig. 7 Estimation of fatigue parameter and *S-N* curve

참고문헌

(1) Lim J. C, 1996, “Engineering Plastic for Automobile Part," *Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry Polymer Symposium*, pp. 1~19.

(2) Kim N. J, 1990, “Special Engineering Plastic," *Polymer Science and Technology*, Vol. 1, No. 3, pp. 162~177.

(3) Min B. K, 1987, “Engineering Plastic,” *News & Information for Chemical Engineers*, Vol. 5, No. 1, pp. 10~16.

(4) http://www .geplastics.com/dfss/servlet/visualizer

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

(6) T. Goral, 2000, "Materials Modeling for

Engineering Thermoplastics in FEA Under High-Strain Loading," *Society of Automotive Engineers*, Inc. 2000-01-1167.

(7) F. Ramsteiner, T. Armbrust, 2001, "Fatigue Crack Growth in Polymers," Polymer Testing, No. 20 pp. 321~327.

(8) M. Sugimoto, M. Ishikawa, K. Hatada, 1995, "Toughness of Polyproplene," *Polymer*, Vol. 36, No. 19, pp. 3675~3682.

(9) M. Ishikawa, 1995, "Stability of Plastic Deformation and Toughness of Polycarbonate Blended with Poly(acrylonitrile - butadiene - styrene)copolymer," *Polymer*, Vol. 36, No. 11, pp. 2203~2210.

(10) C. Y. Tang, W. B. Lee, 1995, "Damage Mechanics Applied to Elastic Properties of Polymers," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 52, No. 4, pp. 717~729.

(11) A. I. Rifani, A. F. Grandt, 1996, "A Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Crack Growth in A Complex Cross Section," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 3, No. 4, pp. 249~265.

(12) M. Ishikawa, K. Ushui, Y. Kondo, K. Hatada, S. Gima, 1996, "Effect of Tie Molecules on The Craze Strength of Polypropylene," *Polymer*, Vol. 37, No. 24, pp. 5375~5379.

(13) J. Zhou, A. D'Amore, D. Zhuang, T. He, B. Li, L. Nicolais, 1996, "Tension-Tension Fatigue Failure Behavior of Poly(Phenylene ether Ketone)(PEK-C)," *Polymer*, Vol. 37, No. 11, pp. 2103~2111.

(14) R. B. Abernethy, 1996, *The New Weibull Handbook*, 2nd Edition, SAE Professional Development, pp. 2 ~ 7.