〈 논문 〉

가전제품용 경첩의 신뢰성 추정

문지섭† · 김진우* · 신재철* · 김명수**

(2004년 9월 30일 접수, 2005년 3월 22일 심사완료)

Reliability Estimation of Door Hinge for Home Appliances

JiSeob Moon, JinWoo Kim, JaeChul Shin and MyungSoo Kim

Key Words: Accelerated Life Test(가속수명시험), Brittle Fracture(취성파괴), B_{10} Life(B_{10}수명), Creep (크리프), Eyring Model(아이링 모델), Failure Mechanism(고장메커니즘), Glass Transition Temperature(유리전이온도), Load-Strength Interference Model(부하-강도 간섭모델)

Abstract

This paper presents the reliability estimation of door hinge for home appliances, which consists of bushing and shaft. The predominant failure mechanism of bushing made of polyoxymethylene(POM) is brittle fracture due to decrease of strength caused by voids existing, and that of shaft made of acrylonitrile-butadiene-styrene(ABS) is creep due to plastic deformation caused by excessive temperature and lowering of glass transition temperature by absorbed moisture. Since the brittle fracture of bushing is overstress failure mechanism, the load-strength interference model is used to estimate the failure rate of it along with failure analysis. By the way, the creep of shaft is wearout failure mechanism, and an accelerated life test is then planned and implemented to estimate its lifetime. Through the technical review about failure mechanism, temperature and humidity are selected as accelerating variables. Assuming Weibull lifetime distribution and Eyring model, the life-stress relationship and acceleration factor, B_{10} life and its lower bound with 90% confidence at worst case use condition are estimated by analyzing the accelerated life test data.

기호설명

A : 상수
AF : 가속계수
B : 상수
C_1 : 상수
F : 응력
L : 인가된 부하
N : 표준정규분포
n : 상수
P : 강도가 부하보다 클 확률
$P_{failure}$: 부하가 1회 인가될 때 고장확률
R : 신뢰도
RH : 상대습도
S : 재료의 강도
SM : 안전여유
T : 절대온도
T_g : 유리전이온도
t_r : 파단시간

† 책임저자, 회원, 대우일렉트로닉스(주) 품질신뢰성연구소
E-mail : jsmoon@dwe.co.kr
TEL : (032)510-7829 FAX : (032)523-6082
* 대우일렉트로닉스(주) 품질신뢰성연구소
** 수원대학교 산업정보공학과

x^2 : 카이제곱
Z : 검정통계량

그리스문자

ϕ : 표준정규누적분포
α : 유의수준
β : 형상모수
η : 특성수명
μ_L : 문열림 토크의 평균
μ_S : 부싱 강도의 평균
σ_L : 문열림 토크의 표준편차
σ_S : 부싱 강도의 표준편차

하첨자

a : 실사용 조건
d : 가속시험 조건

1. 서 론

고분자 재료인 엔지니어링 플라스틱은 운송, 건설, 전기전자 제품에 사용되며, 특히 POM(polyoxymethylene)과 ABS(acrylonitrile-butadiene-styrene)는 가전제품의 문 경첩(door hinge) 등에 사용되고 있다.

POM은 가장 결정성이 큰 열가소성 수지 중 하나로 고강도, 내피로성, 내크리프성, 치수 안정성 등의 장점이 있는 반면에 강산과 강알칼리에 비교적 약하며, 성형수축률이 커서 변형에 유의해야 한다. ABS 수지는 아크릴로니트릴(acrylonitrile), 부타디엔(butadiene), 스티렌(styrene) 모노머로 이루어진 삼원 공중합체로, SAN(styrene acrylonitrile copolymer)으로 이루어진 매트릭스에 부타디엔 고무상을 적절한 입자 크기로 분포시킨 다상의 고분자 수지이다.[1] ABS 수지는 아크릴로니트릴의 내약품성과 스티렌의 우수한 가공성, 부타디엔의 유연성과 내충격성을 겸비한 우수한 수지로 다양한 용도에 광범위하게 응용되어 왔다. 그러나 응력에 취성적이고, 고온 노출시 부타디엔 고무의 불포화기로부터 기인하는 내열성이 약점으로 지적되고 있다.

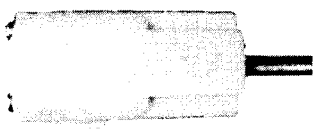
이와 같은 엔지니어링 플라스틱의 단점의 보완 및 성능 향상을 통한 고 신뢰성의 확보를 위해 많은 연구가 이루어졌다. ABS의 내열성을 향상시키기 위하여 부타디엔 고무를 아크릴고무, EPDM 혹은 염소화 PE(polyethylene)로 대치한 ASA, AES, ACS 등의 개발이 이루어지고 있으며, 또한 PC(polycarbornate)와 같은 방향족 환을 포함한 내열성이 우수한 수지를 이용하여 배합함으로써 물성을 보완하고 있다.[2]

본 논문에서는 가전제품용 문 경첩의 신뢰성을 추정하는 문제를 다룬다. 신뢰성은 아이템이 정해진 기간동안 주어진 조건에서 요구기능을 만족스럽게 수행할 수 있는 가능성으로, 고 신뢰성을 보증하기 위해서는 재료 및 공정분석을 위한 기술적 평가, 잠재 고장부위와 관련 고장메커니즘 규명, 가속수명시험, 전산해석, 그리고 종합적인 고장분석(failure analysis) 등이 유기적으로 수행되어야 한다.[3]

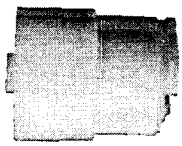
가전제품용 문 경첩은 Fig. 1과 같이 부싱(bushing)과 샤프트(shaft)로 이루어져 있으며, 부싱은 POM, 샤프트는 ABS를 재료로 사용하고 있다.

부싱은 가전제품의 문과 몸체의 연결부로서 문의 회전축 역할을 하며 이곳에 샤프트가 결합되면서 문을 지지하는 가전제품용 문 경첩으로서의 역할을 하게 된다.

경첩의 재료로서 기존에 사용한 알루미늄 다이캐스팅은 샤프트 케이스에 인가되는 스프링의 인장하중 및 부싱에 인가되는 회전 토크(torque)에 대해 충분한 내력을 가지고 있지만, 원가절감



(a) Shaft



(b) Bushing

Fig. 1 Structure of door hinge for home appliances

을 위해 대체되어진 고분자 수지는 장기간 사용 시 일정 하중에 의한 변형 및 파괴가 우려되므로 신뢰성 평가를 필요로 한다.

경첩의 고장 메커니즘은 POM으로 만들어진 부싱의 취성파괴(brittle fracture)와 ABS로 만들어진 샤프트 케이스의 크리프파괴(creep fracture)로 구분할 수 있다. 과부하(overstress)에 의한 고장 메커니즘인 취성파괴는 부하-강도 간섭모델 (load-strength interference model)을 이용하여 비틀림 응력으로 인한 부싱의 고장확률을 추정한다. 그리고, 마모(wear-out) 고장 메커니즘인 샤프트 케이스의 크리프파괴는 가속수명시험을 통하여 추정한다. 기존의 ABS에 대한 가속수명시험은 하중 및 온도 스트레스만을 고려하고 있어[4-7] 실제 부품의 수명을 제대로 반영하지는 못하는 문제점이 있었다. 본 연구에서는 실제 사용조건에서 ABS의 수명에 영향을 미칠 수 있는 온도와 습도를 동시에 고려하여 가속시험을 실시하고, 수명-스트레스 사이의 관계식과 가속계수, 사용조건에서 B_{10} 수명을 추정한다.

2. 경첩의 고장메커니즘

본 절에서는 가전제품용 경첩의 고장 메커니즘에 대하여 소개한다. 경첩의 고장은 부싱의 취성파괴와 샤프트 케이스의 크리프파괴로 구분할 수 있다.

2.1 부싱의 고장메커니즘

부싱의 재료인 POM은 자체 변형이 거의 없어 인장 잔류응력 또는 노치(notch)가 존재하는 부위에서 아주 적은 에너지로 파괴될 수 있다. 즉, 샤프트가 회전할 때 발생하는 비틀림 응력이 경첩 사출공정에서 재료가 적게 채워져 형성된 내부의 기공(void)에 집중되면 취성파괴를 일으킬 수 있다. Fig. 2는 전형적인 취성파괴의 단면을 나타낸다.

Fig. 3은 샤프트가 삽입되는 부위에 존재하는 기공을 X-ray로 관찰한 결과이며, Fig. 4는 시험에서 취성파괴가 일어난 파단면을 SEM으로 관찰한 것으로 다수의 기공이 존재하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 5에서 단면이 매끈하고 반사적인 표면 특성을 보이는 균열의 시작점, 물결무늬(river line)를 보이며 균열의 시작 부위로부터 전파되는 중간 파단부, 균열이 빠르게 성장하여 일어난 부위로 거친 파괴표면을 보이는 최종 파단부의 순서로 취성파괴가 진행되었음을 보여준다.[8]

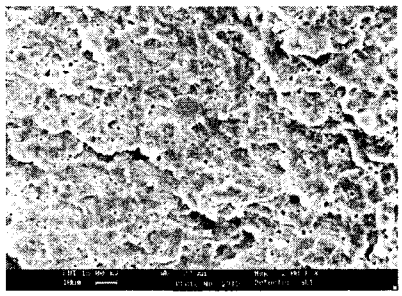


Fig. 2 Brittle fracture surface

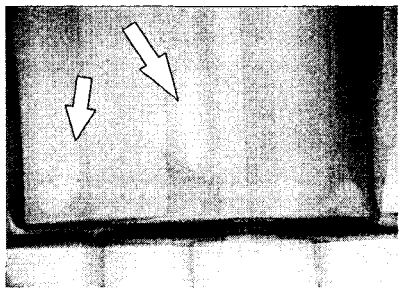


Fig. 3 Voids inside of the shaft

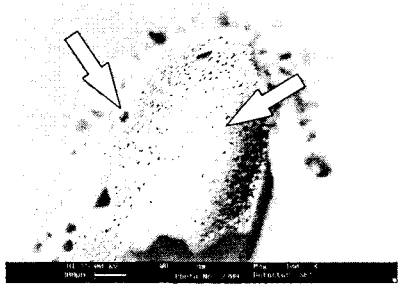


Fig. 4 Voids on the brittle fracture surface

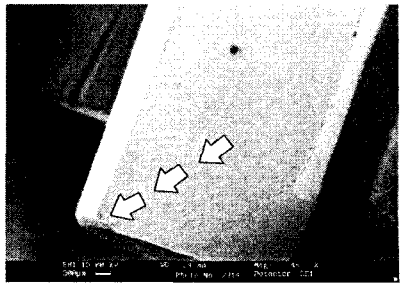


Fig. 5 Propagation of brittle fracture surface

2.2 샤프트 케이스의 고장메커니즘

일반적으로 고분자의 크리프 고장메커니즘은 일정 하중을 연속해서 가하면 변형이 시간과 더불어 증가하고 하중을 제거해도 변형이 원래대로 되돌아오지 않는다. 또한, 일정 하중을 연속해서 인가하면 반발력이 시간과 더불어 감쇠해 가며, 시간이 더 경과하면 파괴에 이른다. 즉, 크리프에 의한 파괴시간은 응력이 증가할수록, 온도가 높을수록 짧아진다.[9] 한편, 스티렌 고분자에서의 크리프는 크레이징(crazing) 메커니즘에 의해 야기된다.[10] 작은 미세균열(craze)은 최대 주요 응력방향에 수직한 면에서 생기며, 재료 속에 있는 긁힌 부분, 먼지입자, 비균일 부분과 같이 응력집중이 높은 곳에서 시작한다. 크레이징은 일종의 항복(yield)현상으로 파괴전에 발생하고 크레이징 전에는 탄성거동(elastic behavior)을 보인다. 가교결합(cross-linking)되어 있는 고분자의 분자와 분자간에 존재하는 크레이징은 외부충격을 흡수하는 완충 역할을 하지만 장시간동안의 정적하중(인장하중)에 대해서는 오히려 분자와 분자간의 결합력을 저하시켜 크리프파괴를 가속시킨다.

Fig. 6은 가전제품용 경첩의 샤프트 구조를 나타낸 것으로, ABS 하우징 내에 코일스프링이 삽입되어 있고 스프링의 하중에 의하여 캠(cam)의 습동 면에 마찰력이 발생하여 가전제품의 문을 지지하는 토크가 샤프트에 발생한다. 제품의 문이 닫혀 있는 상태에서 샤프트 케이스에 항복응력 이하의 일정한 응력이 장시간 인가되므로 최대응력을 받고 있는 케이스 양 끝단부에 Fig. 7과 같이 크리프파괴가 발생한다.

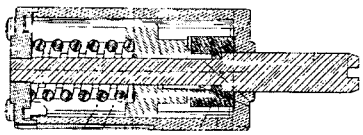


Fig. 6 Structure of the shaft

Fig. 7 Creep failure in the shaft

Fig. 8은 가속수명시험에서 크리프파괴를 일으킨 샤프트 케이스의 파단면을 나타낸 것으로 샤프트 내부에 삽입되어 있는 스프링의 인장하중에 수직한 방향으로 크레이즈가 발생하며 결국엔 이와 같은 취성파괴로 이어진다. 파단의 진행 상태 및 파단면은 앞서 분석한 POM과 동일한 양상을 보여주고 있다.

3. 경첩의 신뢰성 추정

3.1 부싱의 고장률 예측

우발 고장메커니즘인 부싱의 취성파괴에 의한 고장확률 또는 신뢰도는 부하-강도 간섭모델을 적용하여 추정할 수 있다.[11] 부하-강도 간섭모델은 인가된 부하(L))가 재료의 강도(S)를 초과했을 때 파손이 발생한다고 가정하는 모델로서, 부하와 강도의 확률분포로부터 강도가 부하보다 클 확률 $P(S \leq L)$을 추정하여 고장확률을 추정할 수 있다.

부하와 강도의 확률분포가 서로 독립이고, 각각 평균이 μ_L, μ_S, 표준편차가 σ_L, σ_S인 정규분포를 따르면, 즉 $S \sim N(\mu_S, \sigma_S^2)$이고 $L \sim N(\mu_L, \sigma_L^2)$이면 부하가 1회 인가될 때 고장확률은

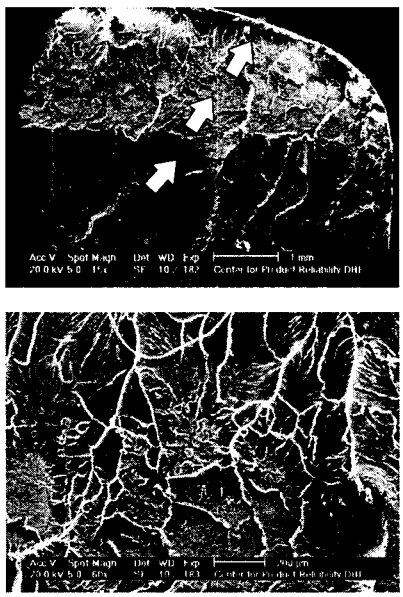


Fig. 8 Crack propagation and impact fracture surface

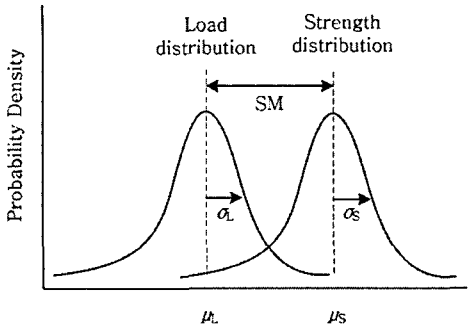


Fig. 9 Distribution of load and strength

Table 1 Result of Anderson-Darling normality test (P value)

Strength	Load	Remarks
0.252	0.113	P value more than 0.05

$$P_{failure} = P(S \leq L) = \Phi\left(-\frac{\mu_S - \mu_L}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_l^2}}\right)$$
$$= \Phi(-SM) \quad (1)$$

이며, 여기서 SM(safety margin)은 안전여유로 강도와 부하의 표준화된 평균 차이를 의미한다. Fig. 9는 부하-강도 간섭모델의 개념을 나타낸 것이다.

부싱의 취성파괴에 의한 고장확률을 추정하기 위하여, 샤프트가 회전하면서 발생하는 문 열림 토크를 토크 게이지로 측정하여 부하 데이터를 수집하였고, 부싱의 설계 강도에 대한 데이터를 측정하였다. Fig. 10은 부하와 강도 데이터를 정규확률 용지에 타점한 결과이며, Table 1은 정규성 검정에 대한 결과이다.

정규성 검정 결과에 따르면 부하와 강도의 분포가 정규분포를 따른다고 가정할 수 있으므로 식 (1)을 이용하여 부싱의 고장확률을 다음과 같이 추정하였다.

Fig. 11과 12는 부싱의 양품 시료와 기공 및 수축이 발생한 불량 시료에 대하여 각각 파괴 토크

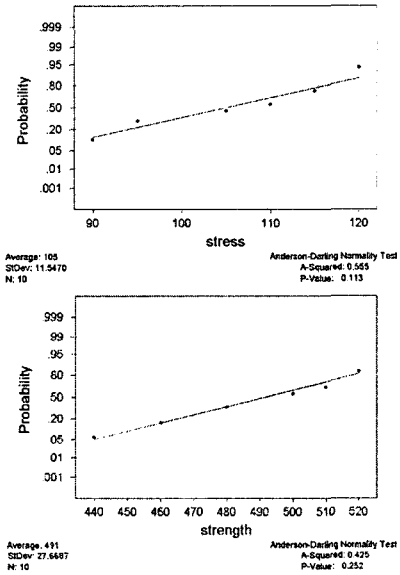


Fig. 10 Normal probability plot for load and strength of bushing

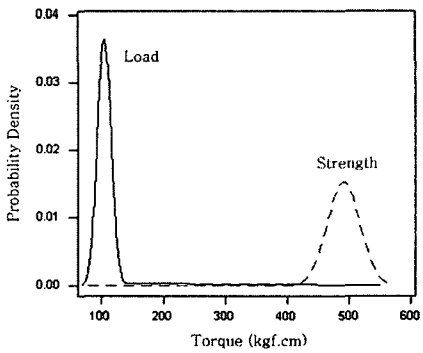


Fig. 11 Load and strength of good sample

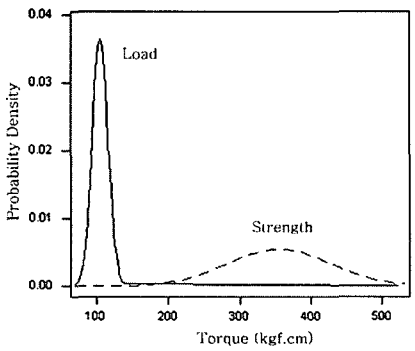


Fig. 12 Load and strength of failure sample

Table 2 Reliability estimation of bushing

	Safety margin	Reliability
Failure sample	-2.97	0.9985
Good sample	-13.57	1

와 문 열림 토크에 대한 부하-강도 분포에 대한 분석 결과이다. 여기서, μ_S는 부싱 강도(파괴 토크)의 평균, μ_L은 문 열림 토크의 평균, σ_S는 부싱 강도의 표준편차, σ_L는 문 열림 토크의 표준편차이다.

부하-강도 간섭 모델에 의해 신뢰도를 계산한 결과를 Table 2에 나타내었다.

3.2 샤프트 케이스의 수명예측

3.2.1 가속수명시험 조건 설정

확산지배반응인 크리프가 온도에 영향을 받는다는 것은 일반적인 사실이다. 한편, 금속과 달리 고분자의 크리프는 습기에 의하여 기계적 특성 및 거동에 상당한 영향을 받는다. 즉, 고온에서 흡수된 습기는 가소제(plasticizer) 역할을 하여 유리전이온도(T_g)를 낮추고[12,13] 이는 고분자의 기계적 강도를 저하시킨다.

따라서, 본 연구에서는 응력을 일정하게 고정시키고, 온도와 습도를 가속수명시험의 변수로 고려하여 시험조건을 결정하였다.

가속수명시험에서 재료의 물성이 변하지 않고, 고장모드와 메커니즘이 사용조건과 동일하도록 최대 스트레스 수준을 결정하는 것이 중요하다. ABS는 80℃에서 크리프 계수(초기 응력과 시간에 따른 변형률의 비)가 0이 되므로, 80℃ 이상에서는 ABS의 물성이 변하게 된다.[14] 따라서 시험의 온도조건은 60℃와 70℃로 설정하였고, 습도는 불포화 수준인 85%와 95%로 결정하였다. Table 3은 온도와 습도 조합에 따른 4개의 가속수명시험 조건과 각 시험조건에서의 시험 샘플의 수를 나타낸 것이며, 샘플 수는 와이블 분석을 하기 위해 필요한 최소 5개 이상을 배치하였다.

3.2.2 수명분포의 적합성 검토 및 가속성 검정

가속수명시험을 통하여 수집된 데이터에 적합한 수명분포를 가정하기 위하여 와이블, 지수, 대수정규분포의 우도함수(likelihood function) 값을비교하였다. Table 4는 3개 수명분포의 우도함수 값을 나타낸 것으로, 우도함수 값이 가장 큰 와이블분포가 가장 적합한 수명분포로 나타났다.

또한, 4개의 가속수명시험 조건에서 와이블분포의 형상모수 β가 동일한지를 검정하기 위해 우도비 검정(likelihood ratio test)을 유의수준

Table 3 Accelerated life test conditions

Conditions	Relative humidity(%)	Temperature (℃)	Number
1	85	60	5
2	95	60	10
3	85	70	10
4	95	70	5

Table 4 Likelihood function values for the life distribution

Distribution	Weibull	Exponential	Lognormal
Likelihood function	-163.491	-193.454	-165.638

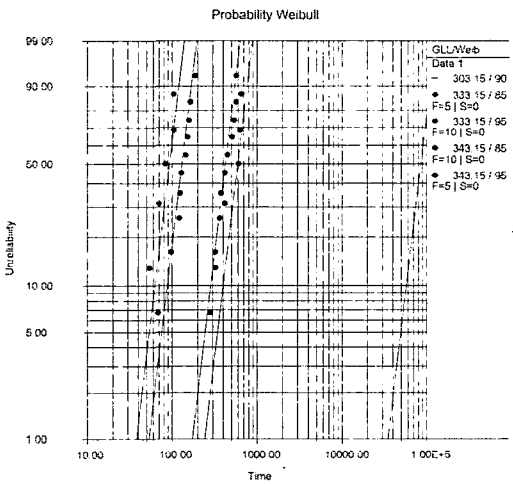


Fig. 13 Weibull probability plot for test data

(significance level) α=0.05에서 수행하였다. 이때, 검정통계량 Z의 값은 0.01463 으로 $\chi^2_{0.05}(3)$=7.815 보다 작으므로 형상모수 값이 다르다고 할 수 없으며, 따라서 β가 동일하여 가속성은 성립한다고 할 수 있다. Fig. 13은 가속수명시험에서 관측된 고장시간을 시험조건별로 와이블 확률용지에 타점한 것이다. 각 시험조건별 데이터들이 직선에 가깝게 배치되어 있고, 각 시험조건의 수명분포 추정선이 서로 평행하게 나타난 것을 볼 수 있으며, 이로부터 와이블 분포가 적합하고 시험조건 사이에 가속성이 성립한다는 것을 알 수 있다.

3.2.3 수명-스트레스 관계식의 추정

일반적으로 고분자의 크리프 파괴를 설명하는 Larson-Miller 식은 응력(F)과 온도(T) 및 파단시간(t_r)의 관계를 다음과 같이 정의하고 있다.

$$F = T(log(t_r) + C_l) \tag{2}$$

여기서, C_l은 실험적으로 결정되는 상수이다. 이때, 응력 F가 일정하면 파단시간 t_r은

$$t_r = exp(A) \cdot exp(B/T) \tag{3}$$

이며, 여기서 $A = -C_l$, $B = F$이다. 식 (3)은 아레니우스(Arrhenius) 관계식의 형태로서, 이는 크리프가 확산지배반응이므로 1차 크리프와 정상상태(2차 크리프) 거동을 아레니우스 관계식으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

한편, 본 연구에서는 응력을 일정하게 고정시키고, 온도와 습도를 가속수명시험의 변수로 고려하고 있으므로 습도에 의한 영향을 반영할 수 있는 아이링 모델을 가정하였다.

$$t_f = exp(A) \cdot (RH)^{-n} exp(B/T) \tag{4}$$

여기서 A, B, n은 상수, RH는 상대습도, T는 절대온도이다.

와이블 분포와 아이링 모델을 가정하고, 소프트웨어 ALTA를 이용하여 가속수명시험 데이터를 분석한 결과는 다음과 같다.

Table 5 Estimates of parameters

Parameter	Estimate	95% confidence interval	
		Lower	Upper
β	4.741	3.556	6.320
A	-32.134	-38.510	-25.760
B	1.731×10^4	1.517×10^4	1.946×10^4
n	-3.010	-4.700	-1.320

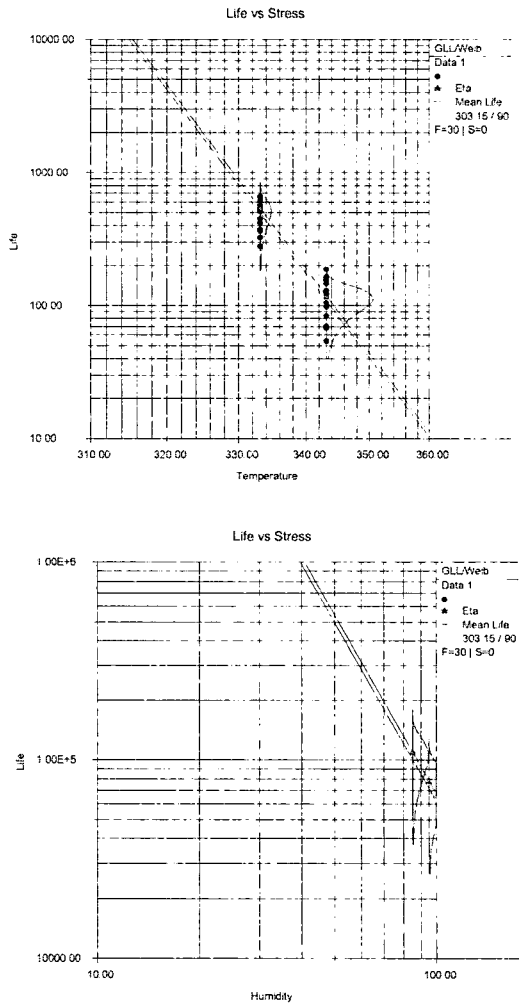


Fig. 14 Life-stress relationship for temperature and humidity

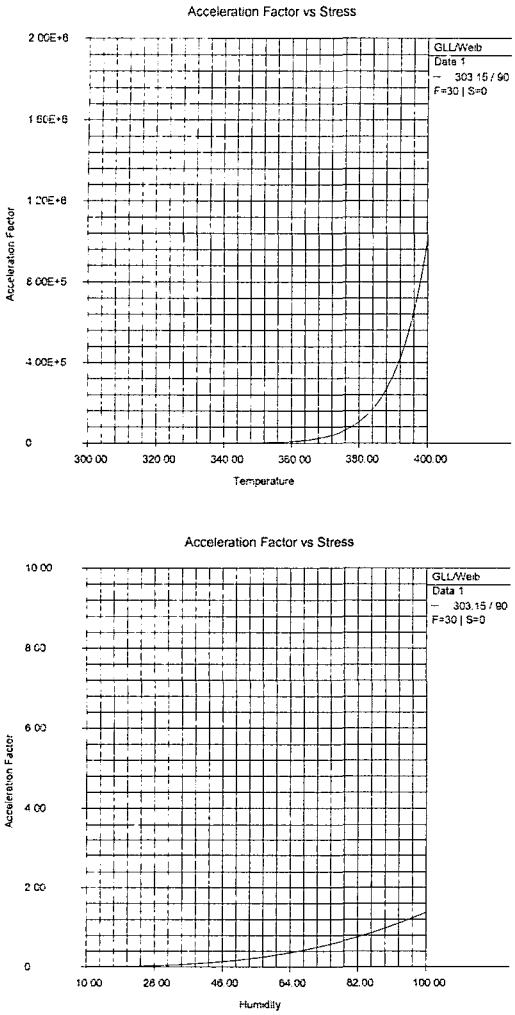


Fig. 15 Accelerated factors for temperature and humidity

따라서, Table 5로부터 수명-스트레스 관계식과 가속계수는 다음과 같이 추정된다.

$$\eta(T, RH) = \frac{e^{-32.1344} \cdot e^{\frac{1.7314\times 10^4}{T}}}{RH^{3.0097}} \quad (5)$$

$$AF(T, RH) = exp\left[1.7314 \times 10^4 \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_d}\right)\right] \cdot \left(\frac{RH_d}{RH_a}\right)^{3.0097} \quad (6)$$

Fig. 14는 온도와 습도에 대한 수명-스트레스 관계식을 나타낸 것이고, Fig. 15는 온도와 습도에 대한 가속계수를 나타낸 것이다. 크리프 수명은 습도보다 온도에 의하여 가속됨을 알 수 있다. 한편, 경첩의 열악한 사용조건을 30℃, 상대습도 90% 조건으로 가정하였을 때, 식 (5)로부터 $\eta(303.15, 90)$ = 92,610으로 추정되며, 따라서 B_{10} 수명의 추정치는 57,610(시간), 90% 단측 신뢰하한은 35,200(시간)으로 추정된다. 따라서 열악한 사용조건에서도 4년 이상은 보증할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 부싱의 취성파괴와 샤프트 케이스의 크리프 파괴를 중심으로 가전제품용 경첩의 신뢰성을 추정하는 문제를 다루었다.

샤프트의 회전 토크와 부싱의 강도 데이터를 분석하고 부하-강도 간섭모델을 적용하여, 샤프트 취성파괴 확률을 추정하였고, 온도와 습도 가속수명시험을 통하여 샤프트 케이스의 크리프 파괴 수명-스트레스 관계식과 사용조건에서 B_{10} 수명의 추정치와 신뢰하한을 추정하였다.

한편, 부싱의 취성파괴, 샤프트 케이스 크리프 파괴 파면을 SEM을 이용하여 분석하여 필드에서 발생하는 고장 메커니즘과 일치함을 확인하였다.

본 연구의 결과는 가전제품용 부품의 보전 및 예비부품계획 수립 혹은 목표 신뢰도를 만족하는 적합한 엔지니어링 플라스틱 선정을 위한 자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

(1) Bucknall, C. B., 1997, Toughened Plastics, Applied Science Publishers Ltd., p. 90.

(2) Lee, Q., et al., 2002, "Compatibility and Thermal Properties of Poly (acrylonitrile- butadiene-styrene) Copolymer Blends with Poly (methylmethacrylate) and Poly(styrene -co- acrylonitrile)," *Polymer Science*, Vol. 85, pp. 2652~2660.

(3) Kim, J. W., 2004, "Methodology for Pipe System Reliability Prediction," The 2nd International Symposium on the Safety Enhancement of Building and Special Works, Vol. 9, p. 25.

(4) 大石不二夫, 成澤郁夫., 1987, "プラスチック材料

の壽命," 日刊工業新聞社.
(5) 大友 曉., 1985, "プラント機器の壽命予測技術の現狀," 配管技術, Vol. 27, p. 70.
(6) 木原重光., 1988, "クリープ壽明評評價と損傷計測," 化學工學, Vol. 52, p. 294.
(7) 早川 淨(編), 1989, 高分子材料の壽命とその豫測, IPC出版, 第1章 各種の環境におかれた 高分子材料の壽命とその豫測.
(8) Scheirs John, 1999, Compositional and Failure Analysis of Polymers, John Wiley & Sons, Ltd., p. 360.
(9) Morgan, R. J., O'Neal, J. E. and Fanter, D. L., 1980, "The Effect of Moisture on the Physical and Mechanical Integrity of Epoxies," *J. Materials Science*, Vol. 15, pp. 751~764.
(10) JAR, P. Y. B., et al., 2002, "Mechanical Properties and Deformation Mechanisms in High Thermal Resistnat Poly (acrylonitrile-butadiene- styrene) Under Static Tension and Izod Impact" Polymer Science, Vol. 85, pp. 17~24.
(11) O'connor, Patrick D. T., 1992, Practical Reliability Engineering, John Wiley & Sons, pp. 95~109.
(12) Adamson, M. J., 1980, "Thermal Expansion and Swelling of Cured Epoxy Resin Used in Graphite/Epoxy Composite Materials," *J. Materials Science*, Vol. 15, pp. 1736~1745.
(13) El-Saad, A., Darby, M.I. and Yates, B., 1990, "Moisture Absorption by Epoxy Resins: The Reverse Thermal Effect," *J. Materials Science*, Vol. 25, pp. 3577~3582.
(14) Scheirs John, 1999, Compositional and Failure Analysis of Polymers, John Wiley & Sons, Ltd., p. 335.