

## Process Evaluation for Reliability Insurance: An Industrial Case Study

Yeon Woong Hong<sup>1)</sup>

### Abstract

In this paper, we calculate the premium rate of reliability insurance policy for brake pads for automobiles using real failure data obtained from use-condition. We try process capability analysis for the manufacturing process of brake-system. We describe the performance factors which have an effect on failure characteristics of brake pads. We also obtain the maximum likelihood estimates of shape and scale parameters of the fitted Weibull distribution for brake pads.

**Keywords** : reliability insurance, rate-making, brake pads, Weibull distribution, process capability analysis, maximum likelihood estimator, field data

### 1. 서 론

품질관리와 신뢰성기술은 그 역사적인 발전이나 기업에의 도입과정이 다르다고 할 수 있으나, 철저한 품질보증을 위해서는 불가분의 관계에 있다. 불신뢰의 원인은 제조상의 결함이나 오과용 등 설계제품에 있어서 품질관리의 전제 없이는 그 실현이 불가능하다고 할 수 있다. 신뢰성 기술로 고장이 적은 훌륭한 시스템이 설계되어 있더라도 제품으로 구체화 되는 제조공정에서 품질관리를 소홀히 하면 오히려 결함을 더 많이 양산하는 결과를 가져올 수도 있게 된다.

오늘날 품질문제는 6시그마 품질경영 체제로 향하고 있다고 할 수 있다. 기존의 품질관리에서는 제조시점에서의 품질(불량, 결점)을 문제 삼았다고 한다면, 현대적인 TQM(Total Quality Management)의 개념 하에서는 요구된 시점까지 똑같은 품질(성능, 기능)수준을 유지할 것을 요청하고 있으며, 이것이 바로 품질보증의 요체인 것이다. 그러므로 품질보증을 위해서는 신뢰성기술의 여러 기법과 사고를 이용하지 않고는 어려운 것이다.

---

1) 경북 영주시 풍기읍 동양대학교 전자상거래정보산업학부 부교수  
E-mail : ywhong@phenix.dyu.ac.kr

신뢰성의 특성중 하나는 시간적 품질의 보증에 있다. 미래 특정시점의 품질, 즉 신뢰성을 보증하고 신뢰성의 저하로 발생하는 물적 피해를 배상할 목적으로 공보험적 차원에서 시행중인 신뢰성보험제도도 신뢰성 기술과 더불어 중요한 기능을 수행하고 있다.

신뢰성보험제도는 국내 기업체가 생산한 부품 및 소재에 대하여 신뢰성평가센터(RAC; Reliability Assessment Center)에서 신뢰성을 평가하고 이를 수요기업이 사용할 때 인증한 부품 및 소재의 신뢰성 상실로 인하여 수요기업이 입은 경제적 손실을 보장하는 보험으로 일종의 손해보험이다. 신뢰성 보험의 도입으로 부품 및 소재의 수요기업은 한국산 제품사용에 따른 리스크를 회피할 수 있으며 생산자에게는 신뢰성의 상실로 인한 배상에 따른 재정적 손실을 예방 또는 보전할 수 있는 여건이 조성되어 부품·소재 생산업체의 경영안정화와 국산 부품 및 소재산업의 발전에 기여할 것으로 전망된다(홍연웅(2004a)).

신뢰성보험제도는 <표 1>에 정리한 바와 같이 부품·소재업체가 제조물을 수요기업에 제조·판매함에 따라 안게 되는 위험인 부품·소재의 결함 등으로 인한 보증책임, 회수비용, 배상책임 및 기업휴지위험 등을 종합하여 담보한다(한국수출보험공사, 2003).

<표 1> 신뢰성 보험의 담보위험 및 내용

담보위험	주요 내용
제조물 보증책임	부품·소재업체가 제조, 판매한 제조물이 양도된 후, 부품·소재의 결함으로 법률상 배상해야 할 손해중 수리비용 또는 대체가격
제조물 회수비용	부품·소재업체가 제조·판매한 부품이 회수가 불가피하게 된 경우 회수에 따른 제반비용 보상
제조물 배상책임	부품업체가 제조·판매한 부품이 양도된 후 그 제조물로 생긴 제3자의 신체상해 또는 재물손해로 부품업체가 부담하여야 할 법률상 손해배상금액
기업휴지 위험	부품업체가 제조·판매한 부품이 제 3자 양도된 후 그 제조물의 결함으로 인해 제3자에 기업휴지손해가 발생한 경우 그 상실이익

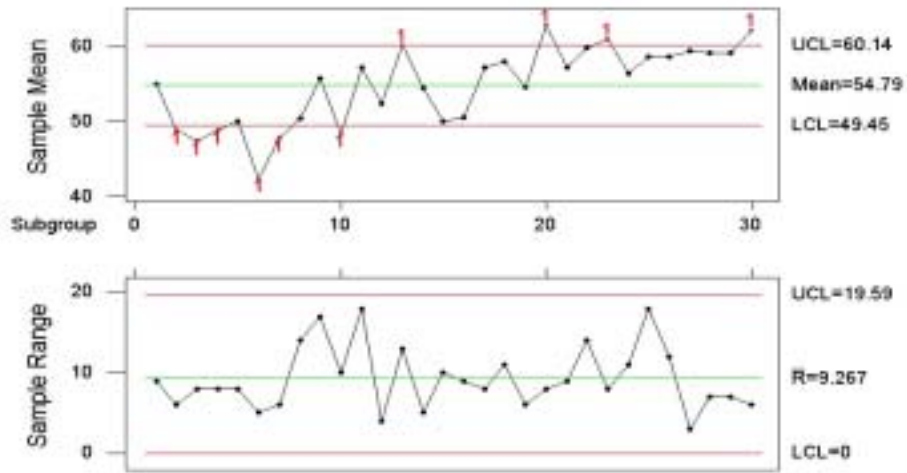
본 연구에서는 신뢰성보험 상품의 가장 중요한 부분이라고 할 수 있는 보험요율을 국내사의 소형자동차용 브레이크 패드를 대상으로 산출하고자 한다. 특히 정성적 평가 요소 가운데 하나인 공정능력을 평가하고 이를 효율산출시 할인 또는 할증에 반영하는 방법에 대하여 사례 중심으로 연구한다.

## 2. 공정능력평가

브레이크 패드 공정은 일반적으로 ‘열성형-열처리-연마-스코칭(scotching)-분체도장-건조-조립-포장’의 순서로 구성되어있다. 공정단계별로 품질특성치가 다를 수 있지만 브레이크의 품질에 가장 큰 영향을 미치는 CTQ(critical to quality)로 본 연구에서

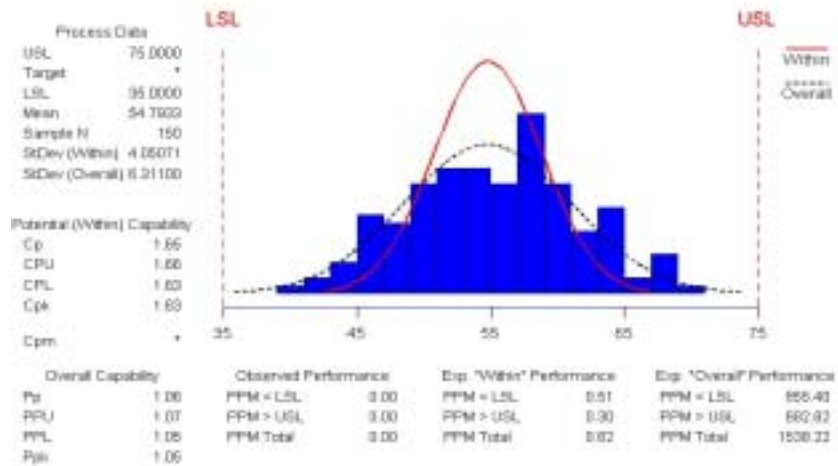
는 완성단계의 압축률로 선정하였다. 압축률은 차량의 페달스트로크, 필링, 브레이크 액 소비량, 브레이크 끝림 등에 영향을 미치는 인자로 A사의 규격하한과 상한은 각각 35와 75를 적용하고 있다. <그림 1>과 <그림 2>는 압축률에 대한 평균-범위( $\bar{X} - R$ ) 관리도 및 공정능력분석결과이다. 활용된 압률 자료는 2002년 4월 1일부터 2002년 12월 24일까지 약 9개월 동안 압축률 시험기에서 시험한 시료이다.

<그림 1>의 평균관리도는 우상향의 경향성을 가진 것으로 판단되며 상당수의 점들이 관리하한선과 관리상한선을 벗어나 공정이 안정적이지 않음을 알 수 있다.



<그림 1> 압축률에 대한 평균-범위 관리도

한편 <그림 2>의 공정능력분석에서는 공정능력지수가 1.85에 이를 정도로 매우 우수한 상태를 알 수 있다. 이는 공정의 관리상태가 불안정하지만 허용공차에 여유가 있어 대부분의 생산품이 규격한계 내부에 놓여있다고 판단된다.



<그림 2> 압축률에 대한 공정능력분석

종합하면 여유 있는 규격한계 때문에 안정상태를 벗어난 공정이 합리화될 수 없으므로 <그림 1>의 경향성을 나타나게 하는 원인의 규명이 필요하며, 문제의 해소를 통하여 획기적으로 공정능력개선을 기대할 수 있을 것이다. 결국, 압축률에 영향을 미치는 인자를 최상의 상태로 제어할 수 있을 경우, A사의 품질 및 신뢰성 수준은 몇 단계 개선이 가능하다고 판단된다.

### 3. 신뢰성 데이터 분석

#### 3.1 FMEA

브레이크 패드의 잠재적 고장형태와 그 영향을 분석해 보면 다음과 같다. 우선 브레이크 패드의 효력 부족과 불안정으로 제동거리가 초과되어 속도 안정성과 액압 안정성 등에 하자가 발생할 수 있다. 또한 패드의 재질 진단 및 접촉면 박리 등으로 제동 불량현상이 발생할 수 있다. 제동시의 소음 및 진동과 강성부족 및 윤활 부족으로 인한 조기 마모현상, 부식고착으로 인한 시동불량문제, 열팽창으로 인한 브레이크 끌림 현상 등이다(KS R 0079(2002), KS R 0080(2002), KS R 0088(2004), 표 2 참조).

<표 2> 승용차용 브레이크 패드의 FMEA(1)

잠재적 고장 형태	고장의 잠재적 영향	심각도	고장의 잠재적 원인/발생과정
효력부족 효력 불안정	- 통상시, 저온시 초기 제동 거리 초과	5	-효력을 발생시키는 원료량의 부족 또는 윤활제량의 과다
	- 열이력후제동거리 초과	5	-유기물의 내열성 부족, 바인더량의 부족 또는 경화불량에 따른 원료지력의 저하
	- 속도 안정성 - 액압 안정성 - 온도 안정성 - 1회 제동중의 토크 변화에 의한 제동거리초과	5	-유기원료의 열분해가스 다량 방출에 따른 페이드 현상 -유기원료의 내열성 부족 -과열부하(단위면적당 에너지 과다)
접촉면 박리	- 제동 불량	7	-접착력 부족에 의해 제동력이 떨어짐. -방청처리 부족에 의해 접촉면에 녹이 발생하여 마찰제가 떨어짐 -녹속진 성분, 환경으로 발생한 접촉면의 녹에 의해 마찰제가 떨어짐.

<표 2> 승용차용 브레이크 패드의 FMEA(2)

잠재적 고장 형태	고장의 잠재적 영향	심각도	고장의 잠재적 원인/발생과정
재질 전단	- 제동불량	7	-전단력 부족에 의해 제동력이 떨어짐.
소음악화	- 소음발생	3	- $\mu$ 상승에 의한 소음 발생 -댐핑성 부족에 의한 진동흡수능력 저하와 면압 불균일화 -디스크 이착필름에 의한 $\mu$ 거동 및 정/동 $\mu$ 차이 상승 -열팽창에 의한 브레이크 끌림
디스크 조도/DTV 성장	- 진동발생	3	-연삭성이 늘어나 디스크를 불균일하게 연삭시킴
조기마모	- 교환주기가 짧아짐	3	-윤활부족에 의한 마모악화 -강성부족에 의한 마모증대
부식고착	- 차량시동 불량	3	-부식촉진성분, 환경으로 발생한 부식에 의해 대면과의 교착

### 3.2 데이터 분석

본 절에서는 <표 3>에 제시된 바와 같이 시장에서 수집된 브레이크 패드의 수명 데이터(표본크기=24, A사가 제공한 자사제품의 고장데이터)를 대상으로 신뢰성분석을 실시한다.

<표 3> A사의 소형 승용차용 브레이크 패드의 수명 데이터(km)

51,600, 51,800, 52,700, 53,700, 56,800, 59,200, 61,300, 66,200,  
76,400, 76,800, 77,800, 80,800, 81,100, 82,000, 82,000, 82,400,  
84,000, 87,700, 93,400, 98,000, 98,000, 101,000, 114,000, 118,000

적합도 검정에는 Chi-square검정, Kolmogorov-Smirnov 검정 및 Anderson-Darling 검정 등이 있지만 본 연구에서는 MINITAB(2002)에서 제공되는 Anderson-Darling 기준을 적용한다. Anderson-Darling의 검정값은 다음 식과 같이 얻어진다.

$$A_n^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} [F_n(x) - \hat{F}(x)]^2 w(x) \hat{f}(x) dx \tag{1}$$

여기서  $n$ 는 표본의 크기,  $F_n(x) = N_x / n$ ,  $N_x$ 는  $x$  이하의 관찰치 개수,  $\hat{F}(x)$ 는 귀무가설로 설정한 확률분포함수에서 확률변수의 크기가  $x$  이하일 확률을 나타낸다.  $\hat{f}(x)$ 는 귀무가설로 설정한 확률분포함수에서 확률변수가  $x$ 일 확률을 나타내며,

$w(x)$ 는 일종의 가중치함수(weight function)로서  $w(x) = 1/\{\hat{F}(x)[1 - \hat{F}(x)]\}$ 이다. 이 가중치의 크기는 확률분포함수의 좌우 말단(tail)에 접근하면서 점차 확대되도록 고안되었기 때문에 귀무가설이 된 모형과 표본분포의 양쪽 말단부분에서 나타나는 확률밀도의 차이(discrepancy)를 상대적으로 민감하게 포착할 수 있다(Law & Kelton(1991), pp. 392-393).

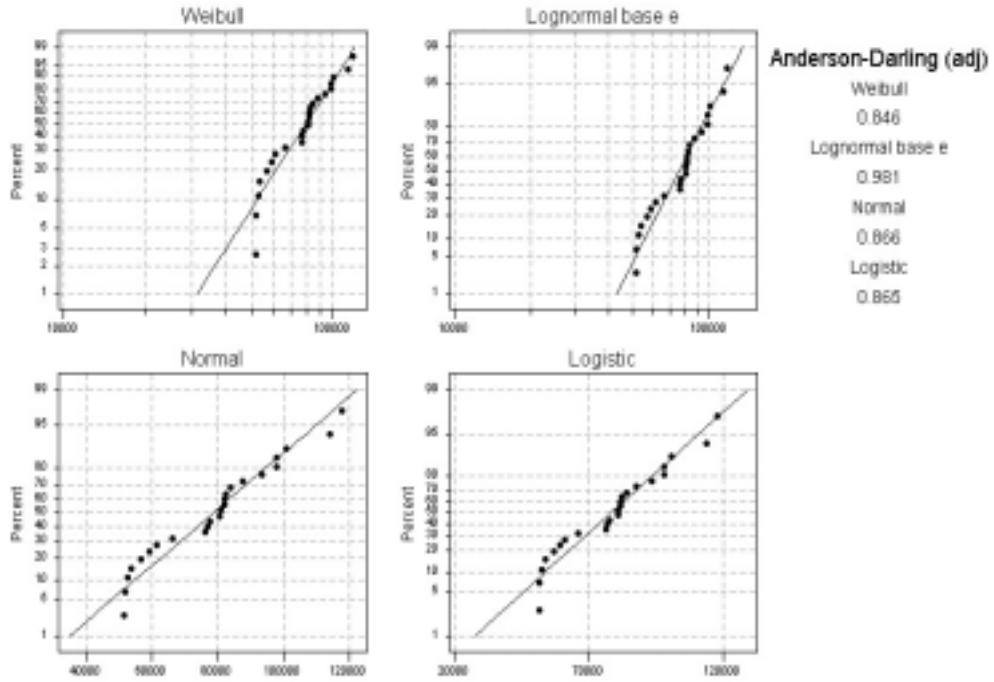
<표 3>의 자료를 이용하여 MINITAB에서 와이블분포, 대수정규분포, 정규분포 및 로지스틱분포등 4가지 분포에 적합한 결과 <그림 3>과 같이 나타났으며 Anderson Darling 기준에서 비교하면 와이블분포의 적합도가 근소한 차이지만 가장 우수하게 나타났다(표 4 참조). 이러한 결과는 기계류의 수명분포가 일반적으로 와이블분포를 따른다는 가정과 일치한다. <그림 4>는 와이블 확률지에서 적합된 직선과 95% 신뢰대를 보여주고 있다. <표 5>는 와이블 모수의 최우추정치를 나타내고 있다.

<표 4> 후보 분포의 적합도 비교

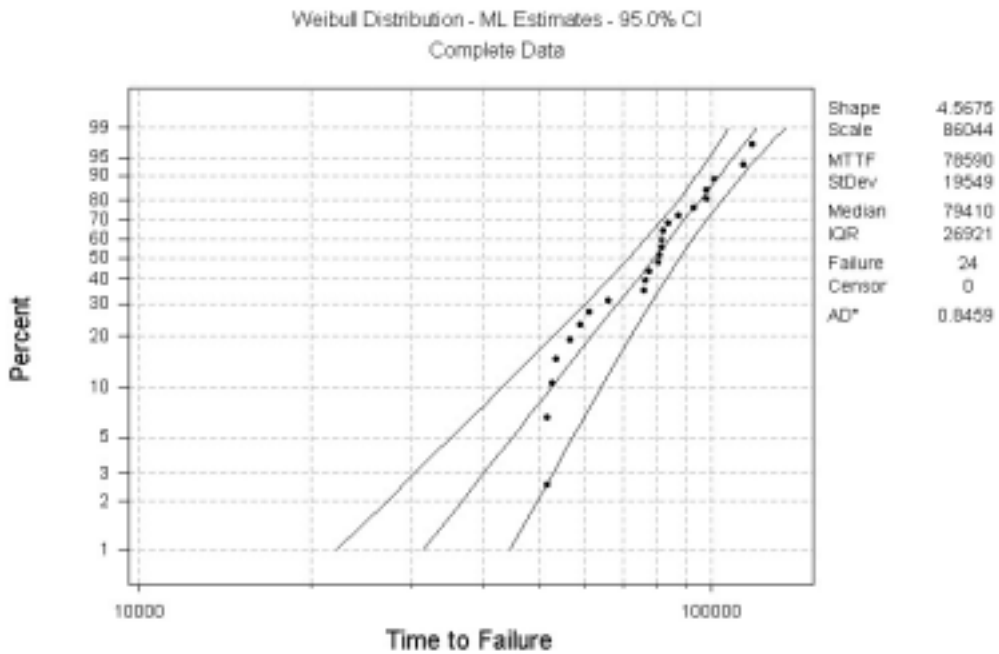
분포	Anderson-Darling통계치	평균수명(km)	표준오차
와이블	0.846	78,589.8	4,005.18
대수정규	0.981	78,653.1	3,978.94
정규	0.866	78,612.5	3,839.46
로지스틱	0.865	78,305.4	3,967.30

<표 5> 와이블 모수의 추정치

모수	최우추정치	표준오차	95%신뢰구간
형상모수	4.5675	0.7108	(3.3667, 6.1966)
척도모수	86,044	4,069	(78,428, 94,400)
평균수명(km)	78,589.76	4005.181	(71,119.07, 86,845.21)
Median	79,409.66	4185.490	(71,615.75, 88,051.77)
제1사분위수	65,502.46	4791.332	(56,753.74, 75,599.82)
제3사분위수	92,423.12	4149.760	(84,637.35, 100925.1)



<그림 3> 브레이크 패드 자료에 4가지 분포의 확률지 타점



<그림 4> 와이블 확률지

## 4. 보험요율 산출

### 4.1 위험률 산출

손해보험의 요율을 산출하는 방식에는 과거의 보험요율을 손해율의 변화에 따라 인상 또는 인하하는 방법인 손해율법(loss ratio method)과 종래의 요율 유무와 관계없이 보험요율을 산출하는 방법인 순보험료법(pure premium method)의 두 종류가 있다(한국손해보험요율산정회, 1988). 신뢰성보험의 경우 2003년도에 개발되어 시판된 만큼 손실빈도(loss frequency) 및 손실규모(loss severity) 등 기초통계가 없을뿐만 아니라 국내외의 유사상품도 전무하여 경험통계에 입각한 요율산출은 현실적으로 불가능하여 통계이론적으로 접근하는 방법이 유일하다고 판단된다. 즉, 3장에서 추정된 고장분포에 기초하여 연간보험요율을 산출하는 방법이다. 결국 신뢰성 보험의 요율은 개별요율(individual rate)방식의 예정요율제(schedule rate)를 따르는 것이 합리적일 것이다. 예정요율제는 개별리스크의 물리적 특성에 따라 정해진 만큼의 요율을 인상 또는 인하하는 방식(이경룡, p. 270)으로 최근 신뢰성분석에서 확산되고있는 고장물리(physics of failure)적 접근 방식이 매우 유효하다고 판단된다.

<표 4>로부터 추정된 와이블 생존분포를 이용하여 연간고장률을 구하면

$${}_1q_x = \frac{S(x) - S(x+1)}{S(x)}, x=0,1,2,\dots \quad (2)$$

이다. 여기서  ${}_1q_x$ 는  $x$  년과  $x+1$ 년 사이의 고장률을 의미하며

$$S(x) = \exp\left[-\left(\frac{x}{86044}\right)^{4.5675}\right], \quad (3)$$

이다. 승용차의 연평균 주행거리를 15,000km, 보증기간을  $n$ 년이라고 할 때 연도별 고장률은 <표 6>과 같다. 평균주행거리를 보증하는 방식으로 보험상품을 설계할 경우 3년차부터 고장률이 급격하게 상승함을 알 수 있고, 5년차에는 고장률이 40%를 초과하여 보험료가 매우 비싸게 책정되어야함을 알 수 있다. 보증기간을 2년 30,000km로 책정할 경우 연평균0.4079%의 패드가 고장 날 것으로 추정된다. 여기서 보증기간과 보험요율이 상호 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있으며 보증기간이 길수록 보험자와 피보험자 모두 더욱더 큰 리스크와 높은 수준의 보험료를 부담해야할 것이다.

<표 6> 브레이크 패드의 주행거리별 연간고장률

보증기간(년)	연간주행거리(km)	연간고장률(%)
1	15,000	0.0343
2	30,000	0.7814
3	45,000	4.4626
4	60,000	15.1319
5	75,000	40.6722



### 4.2 보험료 산출 예시

보험료는 부보대상기업의 매출액규모, 사업비율(통상 15% 책정), 안전할증률(일반적으로 10~15%)등을 적용하여 다음식과 같이 산출한다(한국수출보험공사(2003), 홍연웅(2004b)).

$$\text{보험료} = \text{연고장률(또는 연평균고장률)} \times (1 + \text{안전율}) / (1 - \text{사업비율}) \times \text{담보부분별가중치} \times \text{조정매출액} \times \text{보상한도계수} \times \text{할인할증요율} \quad (4)$$

<표 6>에서 산출한 연간평균고장률 0.4079%를 식(4)에 대입하고 부보대상기업의 조정매출액규모, 사업비율(통상 15%를 적용하나 여기서는 0%), 안전할증률(일반적으로 10~15%를 적용하나 여기서는 0%) 등을 적용하여 보험료를 산출한다. 나머지 항목은 <표 7>에서 제시된 보험계약자 현황자료 및 보험계약내용, 보상한도계수 등을 반영하고, 2장에서 평가한 공정능력지수와 회사의 재무상태를 평가한 내용, 개별할인 및 할증, 중소기업할인을, 소급담보할증률, 담보물평가 등을 종합하여 최소 -30%부터 최대 30%까지 할인 또는 할증하면 <표 7>의 제5행에 제시된 보험료를 얻을 수 있다.

<표 7> 보험료 산출예시

구분	예 시(1)			예 시(2)		
보험계약자 현황	○ 위험률 : 0.4079% ○ 연간매출액 : 50억원초과 100억원 이하 (조정계수 0.35)			○ 위험률:0.4079% ○ 연간매출액 : 100억원 초과 200억원 이하(조정계수 0.25)		
보험계약 내용	○ 보험기간 : 2년 ○ 보상한도 : 보증책임 5억원 (대응계수 1.46)			○ 보험기간 : 2년 ○ 보상한도 : 보증책임 10억원 (대응계수 1.89)		
할인할증률	-30%	0%	30%	-30%	0%	30%
보험료(원)	7,295,292	10,421,845	13,548,399	13,491,293	19,273,275	25,055,258

### 5. 결론

본 연구는 소형승용차용 브레이크 패드 대한 신뢰성보험의 효율을 산출하는 과정을 다루었다. 승용차에 장착된 패드의 사용현장에서 얻어진 고장데이터는 와이블 분포에 우수하게 적합됨을 발견하였고, 이에 따른 와이블 분포의 모수의 최우추정치를 구하였다. 브레이크 패드의 품질에 가장 큰 영향을 미치는 압축률의 실데이터(real data)를 수집·분석하여 공정의 관리상태여부 및 공정능력상태를 평가한 결과 안정적인 공정 관리를 할 수 있으면 보다 저렴한 보험료율을 적용할 수는 가능성도 발견하였다. 브레이크 패드의 추정된 고장분포를 토대로 보험료를 산출하는 과정을 예시하였다. 향후 충분한 경험통계가 집적되면 손해율법이나 신뢰성(credibility)이론 등을 적용하여

요율을 조정할 수 있을 것이다(김태곤(1991a), (1991b), 박승전(1992)). 이에 대한 조정 방법은 다음 연구과제로 남겨둔다.

끝으로 브레이크 패드는 내구성에 중점을 둔 제품과 안락성에 중점을 둔 제품간의 수명 차이가 많고, 또한 사용 조건에 따라서도 수명에 차이가 많기 때문에 여러 가지 제품의 여러 사용 조건(자가용, 택시등)에 대한 많은 수명 데이터를 수집하여 합리적인 보험료율의 산정에 지속적인 보완이 있어야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 김태곤.(1991a), 손해보험요율산정의 이론과 실무(1), 보험개발연구, No.2, 99-110.
2. 김태곤.(1991b), 손해보험요율산정의 이론과 실무(2), 보험개발연구, No.3, 102-115.
3. 박승전. (1992), 손해보험요율산출의 개선방안, 보험개발연구, No. 6, 113-117.
4. 이경룡, (2002), 보험학원론, 영지문화사.
5. 한국손해보험요율산정회, (1988), 손해보험요율산정의 기초이론.
6. 한국수출보험공사, (2003), 신뢰정보보험약관.
7. 홍연웅. (2004a), 제조물 리스크 경영, 청솔.
8. 홍연웅. (2004b), 신뢰정보보험요율체계개선방안에 관한 연구, 한국수출보험공사.
9. KS R 0079, (2002), 브레이크 라이닝 패드의 마멸 다이너모미터 시험 방법.
10. KS R 0080, (2002), 브레이크 라이닝, 패드의 물리적 성질 시험 방법.
11. KS R 1088, (2004), 자동차용 디스크브레이크 패드의 압축 시험 방법.
12. Law, Avervill M., and W. David Kelton.(1991), Simulation Modeling & Analysis. McGraw-Hill, New York.
13. MINITAB Release 13, Minitab Inc.(2002).

[ 2005년 3월 접수, 2005년 5월 채택 ]