

승용차용 브레이크 패드의 공정분석 및 수명분포 탐색

홍연웅¹

동양대학교 경영관광학부

접수 2009년 1월 28일, 수정 2009년 5월 11일, 게재확정 2009년 5월 18일

요약

본 연구에서는 소형 승용차용 브레이크 패드 공정의 공정능력분석과 패드의 마모수명 분포를 실제 데이터를 이용하여 추정하였다. 정규분포와 2모수 와이블분포 및 로지스틱분포 모두 마모수명데이터를 적합한다고 분석되었다. 추정된 수명 분포로부터 얻어진 백분위 수명은 브레이크 패드의 설계기준 설정이나 고객의 품질요구수준 평가에 활용될 수 있을 것이다.

주요어: 백분위수명, 브레이크 패드, 수명분포추정, 와이블분포, 정규분포.

1. 서론

자동차에 있어 제동장치는 움직이는 차량의 속도제어 및 정지목적으로 이용되며, 제동장치 대부분을 차지하는 마찰식 브레이크는 차량의 운동에너지를 마찰열 에너지로 바꾸고 이것을 대기로 방출시켜 정지 또는 감속시키는 작용을 한다. 자동차 제동장치에서 가장 주된 역할을 담당하는 마찰재는 반복적인 미끄럼 마찰과 큰 토오크를 견디어야 하는 매우 가혹한 요구조건으로 특별한 기능을 갖추어야 한다. 자동차에 사용되는 대표적 마찰재로는 드럼브레이크용 브레이크 라이닝, 디스크브레이크용 디스크 패드와 클러치용의 클러치페이싱이 있다.

최근에는 엔진 및 서스펜션의 발달과 운전자의 다양한 습관, 마찰재에 대한 안전 및 환경조건 등에 따라 브레이크에 요구되는 성능은 보다 다양하고 엄격해지고 있다.

마찰재에 관한 기존의 논문은 대부분이 화학적·물리적·기계적 특성에 관한 연구 (Vries와 Wagner, 1992; Terhech 등, 1995; Kubota 등, 2000)이며, 여태인 (2002)은 패드의 온도와 마모율과의 관계식으로부터 패드의 수명을 물리적으로 계산하였다.

본 연구에서는 국내 A사가 제조한 소형 승용차용 브레이크 패드를 K사의 차량에 장착하여 사용조건에서 주행하여 수집된 마모 데이터를 대상으로 브레이크 패드의 수명분포를 추정한다. 아울러 추정된 수명분포로부터 백분위수명을 추정하여 브레이크 패드의 설계 기준이나 품질요구수준을 객관적으로 결정하는데 도움을 주고자 한다.

2. 브레이크 패드 공정의 분석

브레이크 패드는 구성 물질에 따라 세라믹 (ceramic)이나 탄소 복합 재료 등을 사용한 무기마찰재, 페놀수지 등 유기화합물을 결합한 유기마찰재로 구분되며, 일반 승용차는 모두 유기마찰재로 제조된 브레이크 패드를 사용한다. 이는 유기마찰재가 제동할 때 소음과 진동이 적기 때문이다. 브레이크 패드는

¹ (750-711) 경북 영주시 풍기읍 교촌리, 동양대학교 경영관광학부, 교수. E-mail: hong@dyu.ac.kr

기본적으로 마찰계수가 높고 변형이 적으며 속도·면압·온도 등의 사용 범위가 넓고 마모가 적어야 하며, 충분한 열적, 기계적 강도와 디스크에 손상을 주지 않음과 동시에 열전도율이 좋아야 한다. 또한 자동차를 장기간 운행하지 않은 경우 물과 습기에 의한 요인으로 마찰재와 디스크에 부식을 야기할 수 있는데, 이와 같은 환경에서도 본래의 물질적 성능을 유지할 수 있어야 한다. 부가적으로 제동 성능과 직접적인 관계는 없으나 제동할 때 소음이 발생하지 않아야 하고 제동 느낌 또한 좋아야 한다.

브레이크 패드는 10종류 이상의 재료가 각각의 목적에 부응하도록 적절하게 배합된 복합물질로 전형적인 생산공정은 그림 2.1과 같다. 브레이크 패드의 품질수준에 영향을 미치는 요소는 재료 및 공정이 연관되어 있지만 특히 재료의 혼합비율과 열처리 과정이 가장 중요하며, 생산단계에서의 패드의 품질수준은 압축률로 측정된다.



그림 2.1 브레이크 패드(pad) 공정

동일 용광로에서 동시에 열처리된 패드 제품군을 하나의 로트 (lot)로 정의하면 생산량에 따라 월 3~4회 제조되는 각 로트로부터 5개씩의 시료를 랜덤하게 추출하여 공정을 관리한다. 표 2.1은 2007년 4월부터 9개월 동안 시료군의 크기를 5로 하여 30회 추출하여 계측된 A사의 압축률 자료이다.

A사가 적용하는 압축률의 규격상한과 하한은 각각 75%와 35%이다. 그림 2.2는 압축률에 대한 평균-범위 ($\bar{X} - R$)관리도와 공정능력분석 결과이다. 평균 관리도로부터 10개의 군이 관리한계선을 이탈하고 우상향의 추세선이 존재하는 것으로 판단되어 공정이 관리 상태에 있지 않음을 알 수 있다. 그러나 단위 (batch)생산방식인 열처리 공정의 기술적 한계 때문에 관리한계선을 이탈한 시료군을 제거하고 새로운 관리한계선을 작성하여 공정관리에 적용하는 적극적 방식은 적용하지 않는다. 특히 관리상태인 범위 관리도와 동시에 살펴보면 군내변동보다 군간 변동이 큼을 알 수 있는데, 결국 열처리 로트별 변동, 즉 용광로간 변동이 주요 원인인 것으로 판단하고 있다. 한편 현재의 기술력으로 이를 극복하는 것이 매우 어려워 회사에서는 규격한계 내에 들어가면 정상이라고 경험적으로 판단한다. 공정능력지수도 1.65로 비교적 안정적이라고 판단할 수 있다.

3. 브레이크 패드의 구조 및 고장데이터 분석

3.1. 브레이크 패드의 형상과 구조

브레이크 형식은 전륜이 패드와 디스크 형태이고, 후륜은 라이닝과 드럼형태이다. 브레이크 패드 수는 바퀴당 안쪽 및 바깥 쪽에 1개씩 총 4분으로 구성되어 있다. 그림 3.1은 브레이크 패드가 캘리퍼

표 2.1 브레이크 패드의 압축률 자료

시료군 번호	측정치(%)					시료군 번호	측정치(%)				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
1	49	53	57	58	58	16	51	46	49	55	52
2	48	46	51	47	52	17	57	57	54	62	56
3	48	49	43	46	51	18	58	57	58	53	64
4	54	51	47	46	46	19	58	54	52	57	52
5	53	54	48	46	49	20	62	63	59	67	63
6	41	40	45	44	42	21	59	54	52	60	61
7	44	48	50	48	49	22	58	57	55	60	69
8	47	60	49	50	46	23	64	64	59	56	62
9	50	55	51	56	67	24	54	64	53	57	54
10	44	50	49	45	54	25	54	49	62	67	61
11	57	58	68	53	50	26	60	58	64	52	59
12	55	51	53	52	51	27	60	61	58	59	59
13	55	56	56	66	68	28	60	58	64	57	57
14	55	52	53	57	55	29	58	57	56	62	63
15	51	46	48	49	56	30	59	60	64	65	63

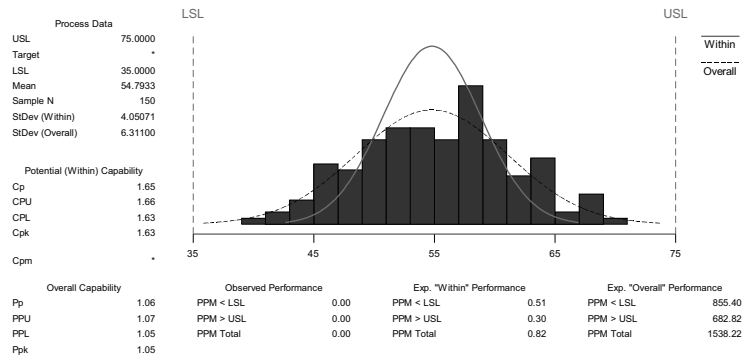
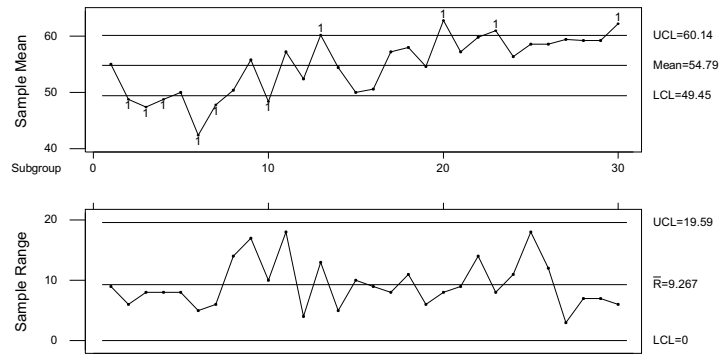


그림 2.2 압축률에 대한 $\bar{X} - R$ 관리도 및 공정능력분석

(caliper)에 장착되어 작동되는 상태를 나타내며 그림 3.2는 브레이크 패드의 해부도이다. 센서는 마찰재가 마모한계 기준 (일반적으로 2.5mm)에 도달했는지 여부를 감지하는 역할을 하며, 면취부는 마찰재의 소음 저감 역할, 분체도장은 제품의 외관을 보호하는 기능, 심 (shim)은 제동시 발생하는 열이 실린더로 전달되지 못하도록 하고 진동을 감소시켜 소음 발생을 최소화하는 역할, 상층마찰재는 디스크와 마찰을 발생하여 제동력을 발휘하며, 그루빙 (grooving)은 마찰재의 열발산 및 소음 저감 역할, 하층재는 단열 및 접착력을 강화하는 역할을 한다. 그리고 접착재는 백 플레이트와 마찰재를 접착시키며, 백 플레이트는 캘리퍼에 고정시키는 철판으로 유압실린더가 힘을 미치는 부분이다. 일반적으로 패드에 요구되는 기본적인 품질성능으로는 높은 마찰계수와 작은 산포, 속도, 면압, 온도 등의 넓은 사용범위, 내마모성, 내페이드성, 적은 로터 (rotor) 공격성, 저소음, 저진동 등이다.



그림 3.1 디스크 브레이크 시스템

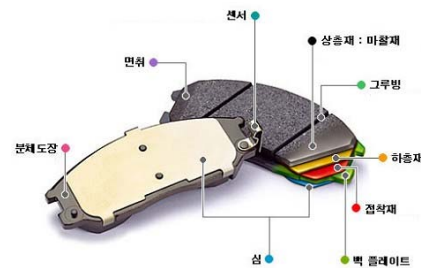


그림 3.2 브레이크 패드 해부도

브레이크 라이닝 및 패드의 경우 내구성에 중점을 둔 제품과 안락성에 중점을 둔 제품간의 수명 차이가 많고, 사용 조건에 따라서도 수명에 차이가 많기 때문에 여러 가지 제품의 여러 사용 조건에 대한 많은 수명 데이터를 획득하여 보완하여야 할 것으로 사료된다.

3.2. 브레이크 패드 마모 데이터의 분석

브레이크 패드의 수명시험 방법에는 다이내모미터 (dynamometer) 시험기를 사용하는 방법, KS R 1117 (2004)에 따른 실차시험 (road test)방법 및 실제사용조건 (use condition)에서 시험하는 방법 등 세 가지 있다. 다이내모미터 시험은 일종의 가속수명시험법이고 실차시험법은 약식 수명시험으로 두 방법 모두 실제사용조건 시험에 비하여 매우 짧은 시간이 소요되나, 차량의 다양한 운행환경을 고려하기 어려운 단점이 있다.

표 3.1 사용조건에서 얻어진 브레이크 패드 수명(km)

51600, 51800, 52700, 53700, 56800, 59200, 61300, 66200, 76400
76800, 77800, 80800, 81100, 82000, 82000, 82400, 84000, 87700
93400, 98000, 98000, 101000, 114000, 118000

표 3.1은 A사의 브레이크 패드를 장착하는 1994년에 출시되어 1997년에 단종된 K사의 소형 승용차로부터 관측된 24건의 브레이크 패드 수명 데이터를 오름차순으로 정리한 것이다. K사의 차량정비정보 시스템에서 1997년에 생산된 차량을 대상으로 각 차량에 최초로 장착된 패드의 수명이 모두 관측 가능한 차량 6대를 임의 추출하였으며, 100km이하의 주행거리는 질사하였다. 단, 공정관리단계에서 생산된 패드와 마모시험단계에 사용된 패드의 생산 시점이 상이한데 이는 브레이크 패드를 실제사용조건에서 시험하는데 많은 시간이 소요되기 때문이다.

표 3.2 다양한 분포의 적합도 비교

분포	R^2	로그우도값	p값	
			K-S검정	χ^2 검정
정규	.958	-270.276	.929	.991
로지스틱	.932	-270.902	.889	.996
2모수 와이블	.941	-270.491	.880	.989
로그로지스틱	.893	-270.889	.854	.996
3모수 와이블	.934	-271.297	.731	.996
로그정규	.931	-270.064	.813	.990

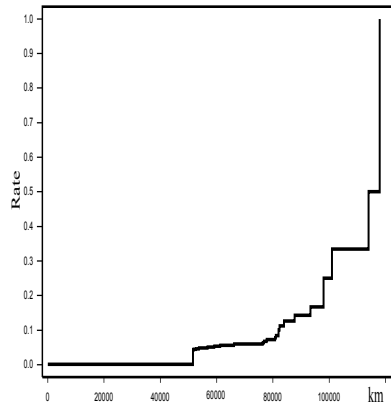


그림 3.3 고장률도

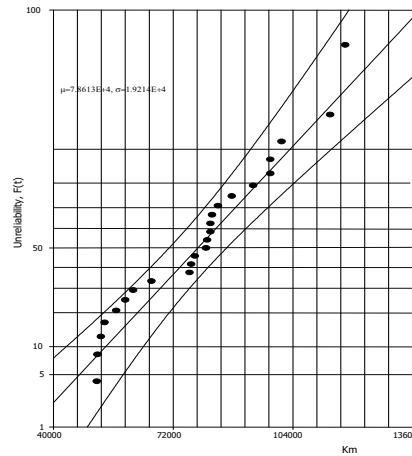


그림 3.4 정규확률지 타점

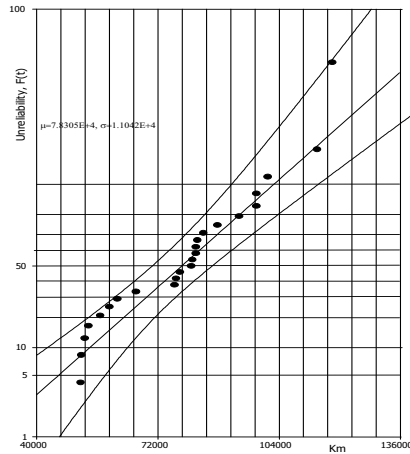


그림 3.5 로지스틱 확률지 타점

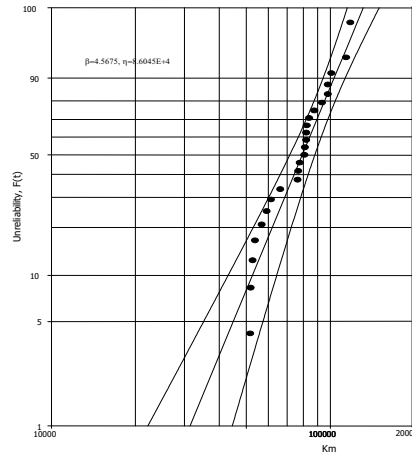


그림 3.6 2모수 와이블 확률지 타점

그림 3.3은 표 3.1의 데이터를 이용하여 작도한 고장률도이다. 고장률도로부터 브레이크 패드는 증가고장률임을 알 수 있다. 표 3.2는 증가 고장률을 가지는 정규분포, 로지스틱분포, 로그로지스틱분포, 2모수 와이블 분포, 3모수 와이블 분포 및 로그정규분포에 대하여 결정계수 (R^2)와 로그우도함수값,

Kolmogorov-Smirnov(K-S) 검정 및 카이제곱 적합도 검정의 유의확률 (p 값)을 나타낸 것이다. 결정계수 (R^2)값은 로그로지스틱 분포를 제외한 나머지 분포가 모두 0.931 이상이고, 로그우도함수값은 여섯 가지 분포 모두 차이가 거의 없음을 알 수 있다. K-S 검정과 카이제곱 검정에서도 여섯 가지 분포 모두가 패드의 마모수명을 적합한다고 알 수 있으나 정규, 로지스틱 및 2모수 와이블 분포의 p 값이 나머지 세 분포의 p 값 보다 큼을 알 수 있다. 종합적으로 판단하면 정규분포와 로지스틱 분포 및 2모수 와이블 분포의 적합성이 상대적으로 우수하다고 할 수 있다. 그림 3.4~3.6은 관측된 마모수명을 정규확률지, 로지스틱확률지 및 2모수 와이블확률지에 95% 신뢰대와 함께 타점한 모양이다.

표 3.3은 정규분포, 2모수 와이블분포 및 로지스틱분포의 추정결과를 나타낸다. 정규분포를 활용할 경우에는 비음의 값을 가지는 수명변수를 고려하여 분포의 좌측 꼬리 (left-tail)부분이나 하위 백분위수 (low percentile)를 적용할 때 주의해야할 것이다. 로지스틱분포도 정규분포와 마찬가지로 수명 X 가 음수일 확률 $P(X < 0)$ 이 0이 아닌 경우에는 적용시 신중한 주의를 요구한다. 비음의 수명 특성을 고려하여 정규분포와 로지스틱분포를 브레이크 패드의 분포로 활용하기 위해서는 패드의 산포를 줄여 $P(X < 0) = 0$ 이 되도록 품질수준을 향상시켜야 할 것이다. 그림 2.2에서 보았듯이 공정의 안정성을 제고하면 브레이크 패드 수명의 산포를 줄일 수 있을 것으로 판단되며, 이 경우 정규분포 또는 로지스틱 분포를 적용하여도 현실적으로 음의 수명문제는 발생하지 않을 것이다.

끝으로 기계 부품 및 금속 소재류의 분포로 많이 사용되는 와이블분포는 자동차부품인 와이퍼 모터 (홍연웅 등, 2004) 및 라디에이터 (홍연웅, 2005)와 더불어 브레이크 패드의 수명분포도 채택할 수 있을 것이다.

표 3.3 분포의 추정

분포	모수	최우추정치	95% 신뢰구간
정규분포	평균	78612	(71087, 86137)
	표준편차	19214	(14175, 24960)
와이블분포	형상모수	4.5675	(3.3667, 6.1966)
	척도모수	86044	(78428, 94400)
로지스틱분포	위치모수	78305	(70530, 86081)
	척도모수	11042	(7943, 15352)

3.3. 분석 결과의 활용

브레이크 패드 마모수명분석은 보증수명을 결정하거나 설계기준 등을 정하는 것을 주요 목적으로 한다. 특히 보증수명을 정할 때는 전체 제품 중 $100p\%$ 가 고장나는 시점인 백분위수명 B_{100p} 을 사용한다. 여기서 p ($0 \leq p \leq 1$)는 제품의 중요도나 시장환경 등을 고려하여 결정하는데 항공 부품의 경우 0.01 또는 0.1, 기계 부품의 경우 0.05 또는 0.10 등을 적용한다.

표 3.3의 추정된 정규분포와 로지스틱분포에서 음일 확률이 각각 0.00002와 0.00083로 매우 작으므로 와이블 분포와 더불어 브레이크 패드의 하위 백분위수명을 추정하는데 사용할 수 있다고 판단된다. 표 3.4는 세 가지 분포의 B_1 , B_5 , B_{10} 수명을 추정한 결과이다. 정규분포의 B_1 , B_5 , B_{10} 수명이 다른 두 분포에 비하여 높게 추정되었으며, 브레이크 패드에 주로 적용하는 B_{10} 수명은 세 가지 분포 모두 50,000km 이상으로 추정되었다.

4. 결론

본 연구에서는 실제사용조건에서 얻어진 소형 승용차용 브레이크 패드의 수명자료를 이용하여 브레이크 패드의 수명분포를 추정하였다. 정규분포, 2모수 와이블분포 및 로지스틱분포가 브레이크 패드 마모

표 3.4 백분위 수명의 추정

백분위(%)	마모분포	백분위수명(km)	95% 신뢰구간
1.0	정규분포	34855	(20369, 49342)
	2모수 와이블분포	31428	(22176, 44540)
	로지스틱분포	27564	(9085, 46043)
5.0	정규분포	47674	(36131, 59216)
	2모수 와이블분포	44906	(35153, 57364)
	로지스틱분포	45791	(32518, 59065)
10.0	정규분포	54507	(44352, 64663)
	2모수 와이블분포	52571	(43011, 64255)
	로지스틱분포	54042	(42858, 65226)

데이터를 잘 설명하는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 브레이크 패드의 설계기준 및 평가기준의 설정 및 브레이크 패드의 교체주기 설정 등에 활용될 수 있을 것이다.

향후에는 고장데이터가 발생한 실제사용조건에 대한 설명변수를 추가하여 Cox모델 등을 적용하거나, 다이내모미터 시험이나 실차시험데이터와 병행하는 연구가 요구된다.

참고문헌

- 여태인 (2002). 디스크 브레이크 패드 수명 해석에 관한 연구. <한국자동차공학회 논문집>, **10**, 199-205.
- 홍연웅 (2005). 자동차용 방열기의 신뢰성 보험요율에 관한 연구. <한국데이터정보과학회지>, **16**, 383-389.
- 홍연웅, 권용만 (2004). 와이퍼 모터의 신뢰성 보험요율에 관한 연구. <한국데이터정보과학회지>, **15**, 49-57.
- KS R 1117 (2004). <승용차용 브레이크 실차시험방법>, 지식경제부 기술표준원.
- Kubota, M. Hamabe, T. Y. Nakazono, Fukuda, M. and Doi, K. (2000). Development of a light brake rotor: A design approach for achieving an optimal thermal, vibration and weight balance. *JSAE Review*, **21**, 349-355.
- Terhech, M. Menory, R. R. and Hensler, J. H. (1995). The friction and wear of automotive gray cast iron under dry sliding conditions, *Wear*, **180**, 73-78.
- Vries, A. and Wagner, M. (1992). The brake judder phenomenon, *SAE Technical Paper Series*, Society of Automotive Engineers, 920554(SP-914), 25-33.

A study on the production process and wear life distributions of brake pads for passenger cars

Hong Yeon Woong¹

School of Management, Dongyang University

Received 28 January 2009, revised 11 May 2009, accepted 18 May 2009

Abstract

In this paper, we studied process capability analysis for brake-pad manufacturing system and considered Weibull, normal and logistic distributions for density estimation of wear life of brake pads for a passenger car with a real data. These three distributions are seem to work well. Estimated percentiles of brake pads can be used to evaluate the design criteria and customers' need for brake pads.

Keywords: Brake pads, density estimation, field data, normal distribution, Weibull distribution.

¹ Professor, School of Management, Dongyang University, Youngju, Kyungbuk 750-711, Korea.
E-mail: hong@dyu.ac.kr