자동차용 마찰재의 성형조건에 따른 마찰 특성에 관한 연구

김 광 석 · 장 호
고려대학교 공과대학 재료금속공학부

The Effect of Manufacturing Parameters of Automotive Friction Materials on Friction Characteristics

Kwang Seok Kim · Ho Jang
Division of Materials Science and Engineering, Korea University

Abstract- The effect of manufacturing parameters such as molding and curing conditions on friction characteristics of friction materials were studied using a pad-on-disk type friction tester. The optimal manufacturing condition for the best friction characteristics were investigated using friction materials containing 15 ingredients employing Taguchi robust design experiment. The friction characteristics were strongly affected by pressing time, pressing temperature, pressing pressure, curing time, curing temperature.

Key words- manufacturing parameters, molding, curing conditions, friction characteristics, Taguchi robust design experiment.

1. 서 론

마찰재는 자동차 제동 시스템의 주요 부분으로서, 10여종 이상의 기본원료를 phenolic resin으로 결합시킨 복합재료(composite)이며, 사용되는 원료의 종류와 배합방법 그리고 제조공정에 따라 마찰특성이 결정된다[1-4].

자동차용 마찰재는 열경화성 수지를 70~95°C 이상에서 용융시켜 마찰재의 성분입자들을 결합시켜 성형한다. 이 과정에서 일부 마찰재 성분들(cashew, rubber 입자 등)이 고온 고압의 성형조건 하에서 화학반응을 하거나 또는 마찰재 성분에 포함되어 있는 수분의 영향으로 본성형 과정에서 기체를 발생시켜 강도에 영향을 미치게 된다. 마찰재의 제작에 수반되는 성형조건은 본성형 시에 주어지는 온도, 압력, 시간과 본성형 후의 열처리 온도와 시간을 의미하며 이러한 성형은 제동시의 마찰특성에 많은 영향을 미친다[5].

현재 자동자용 마찰재의 마찰특성에 관한 연구는 주로 마찰재 성분과 조성비에 따른 연구에 초점을 맞추고 있으며, 마찰재의 성형 조건에 따른 마찰특성에 관한 연구는 마찰재 제조업체를 중심으로 조업 위주의 경험에 의존하여 일부 진행 되어왔다[1].

성형조건에 따른 마찰특성에 관한 객관적

이고 체계적인 연구를 위해서는 '어떤 요인이 얼마만큼의 영향을 미치는가,' 또는 '어떤 조건이 가장 적합한 결과를 도출하는가' 하는 문제와 '어떠한 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험 횟수로 최대의 정보를 얻을 수 있는가' 하는 문제를 해결해야 한다. 본 연구에서는 이를 위해 다구찌 실험 계획법(Taguchi robust design experiment)을 사용하여 연구하였다.

Table 1. S/N ratio of each characteristics

구분	S/N ratio
망소특성	$10\log\left[\frac{1}{n}\frac{(S_m - V)}{V}\right] = 20\log\left(\frac{\bar{y}}{s}\right)$
망대특성	$-10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right]$
망목특성	$-10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right]$
n : 데이터의 수 V : 분산 σ^2의 추정 값 S_m : 모평균 μ 제곱의 추정 값 y_i : 데이터 값 $\bar{y}$: y의 평균 값 s : σ의 추정 값	

통계적 분석방법 중 하나인 다구찌 실험계획법은 최소한의 실험 횟수를 통하여 얻어진 결과로부터 특성치에 영향을 주는 원인을 객관적이고 계량적으로 평가할 수 있는 방법이다. 계량화 판단은 S/N 비(signal-to-noise ratio)로 하며, 그 값은 Table 1에서 보는 바와 같이 망소특성(smaller-the-better characteristics), 망대특성(larger-the-better characteristics), 망목특성(nominal-the-best characteristics)에 따라 다르게 정의 된다[6].

각 특성에서 S/N 비가 최대가 되는 인자가 가장 큰 영향을 미치는 요인이고, 그 수준의 조합이 최적의 실험조건이 된다.

본 연구에서는 다구찌 실험계획법을 이용하여 마찰재 제조 시 본성형과 열처리의 수준별 조건이 마찰특성에 미치는 영향을 정량적으로 고찰하였으며, 또한 마찰특성을 향상시킬 수 있는 최적의 성형조건을 도출하였다.

2. 실험 방법

2-1. 실험 장치

본 실험에 사용된 마찰시험기는 pad-on-disk 형태의 정속 마찰 시험기이다.

시험기에 장착되는 마찰재는 1cm x 1cm x 0.7cm 크기의 육면체 형태이며, 상대 디스크는 실제 상용화 되어 있는 회주철 로터를 주물 가공하여 마찰 시험기에 장착할 수 있도록 6cm의 직경과 2.5cm의 두께로 제작하여 사용하였다.

2-2. 시험 마찰재

자동차용 마찰재는 일반적으로 10가지 이상의 원료가 사용되며, 본 연구에서는 15가지의 원료로 시험 마찰재를 제작하였으며, 마찰재의 개략적인 조성은 Table 2에 나타내었다.

일반적으로 마찰재의 제작 공정은 혼합, 예비성형, 본성형 및 열처리로 크게 나뉘어지며, 본 실험에서는 Table 3에서 보는 바와 같이 상용화 되어있는 방법을 기준으

로 하여 다구찌 실험계획법에 적용 가능 토록 5 개의 인자(factor)에 대해 각각 4 개의 수준(level)으로 설정하고, 시편은 각각 본성형 조건 및 열처리 조건을 조합하여 16 개의 마찰재를 제작하였다.

Table 2. Composition of friction materials

Raw materials	vol. %	wt. %
Phenolic resin (Xyloke)	16	8
Aramid fiber	15	17
Lubricants	10	11
Abrasive	5	9
Fillers	39	49
Friction modifiers	15	6

Table 3. Manufacturing parameters of friction materials

factor \ level		# 1	# 2	# 3	# 4
본성형	Time (min.)	6	8	10	12
	Temp (℃)	150	175	200	225
	Pressure (kgf/cm^2)	250	275	300	325
열처리	Time (hrs)	4	6	8	10
	Temp (℃)	175	200	225	250

인자는 실험에 있어서 데이터의 산포에 영향을 준다고 생각되는 원인 중에서 실험에 직접 영향을 주는 원인으로 본성형 조건(시간, 온도, 압력)과 열처리 조건(시간, 온도)이 되며, 수준은 실험을 하기 위한 인자의 데이터 값으로 각각 4 가지로 설정하였다.

2-3. 실험 조건

마찰시험에 앞서 burnishing 을 시행한 후 끌기 시험(drag test)으로 마찰특성을 고찰하였다.

Burnishing 은 마찰재 표면의 균일한 접촉과 열적 안정화를 위해 본 실험 전에 실시하는 전처리 과정으로서, 400rpm, 8kgf/cm^{2}의 조건으로 10 초간 20 회 시행한 후, 같은 조건에 80℃의 초기 제동 온도로 끌기 시험을 300 초간 10 회 실시 하였다.

마찰계수는 load cell 을 통해 측정된 토크(torque)량과 가압력을 이용하여 측정하였고, 회전하는 상대 디스크의 표면 온도는 적외선 온도측정기(Infrared heat tracer, 3M IR-16)를 사용하였다.

마찰재의 경도는 Rockwell Hardness 의 S Scale 의 볼을 사용하여 경도를 측정하였고, 마찰재의 두께 변화는 실험전과 실험후의 두께를 micrometer 를 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 경도에 영향을 미치는 인자 및 수준

본성형 및 열처리 조건이 경도에 미치는 영향을 분석하기 위해 각 조건에 따라 마찰재를 제조한 후 Rockwell Hardness tester 로 경도를 측정하였다. 경도에 영향을 미치는 효과에 대한 분석은 최대 S/N 비의 수준 조합을 갖는 조건을 찾음으로써 알 수 있다.

분석결과 경도에 영향을 미치는 인자는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 본성형 압력(4 수준), 열처리 시간(4 수준), 본성형 시간(1 수준), 본성형 온도(4 수준), 열처리 온도(1 수준) 순이었다.

본성형 시간은 6 분에서 지대한 영향을 미쳤으며, 그 이상의 시간은 경도에 미치

는 영향이 미소했다. 본성형 온도는 175℃와 225℃ 근방에서의 영향이 컸다. 그리고 본성형 압력에 있어서는 325kgf/cm² 미만의 조건에서는 그 영향이 미소함을 알 수 있다.

열처리는 통상 180-200℃에서 6시간 정도 실시하는데 위의 분석결과 175℃이상의 온도에서는 온도의 영향은 미소하고, 시간은 10시간에서 그 영향이 가장 크게 나타났다.

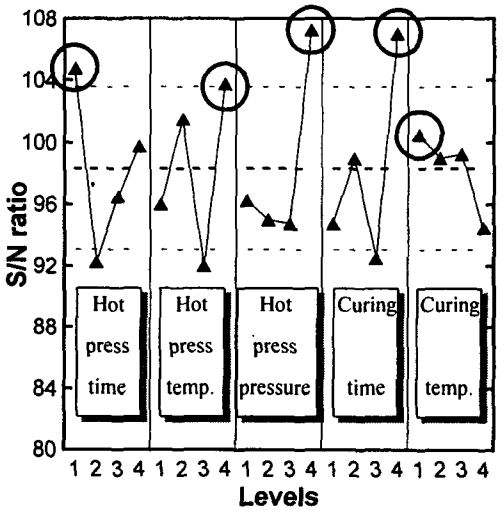

Fig. 1. S/N ratio of each factor and level for hardness value (thick dash-line is an average S/N ratio and thin dash-lines are error ranges).

좀더 정확한 영향 인자를 도출하기 위해 S/N ratio가 가장 낮은 열처리 온도의 영향을 없는 것으로 처리했을 때에도(Fig. 1에서 가는 점선의 범위로써 오차 처리(pooling 처리)) 열처리 온도 이외의 인자는 오차범위에 속해 있지 않기 때문에 경도에 미치는 영향 인자로 간주 할 수 있다.

3-2. 마찰계수에 영향을 미치는 인자 및 수준

마찰계수에 어떠한 인자가 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 가압력과 속도를 8kgf/cm², 400rpm으로 고정하고 300초간의 끌기시험을 10회 반복하였다.

계량화의 판단을 망대특성 조건으로 간주하였을 때 마찰계수에 영향을 미치는 인자는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 본성형 시간(2수준), 열처리 시간(4수준), 본성형 압력(3수준), 본성형 온도(4수준), 열처리 온도(4수준) 순이었다.

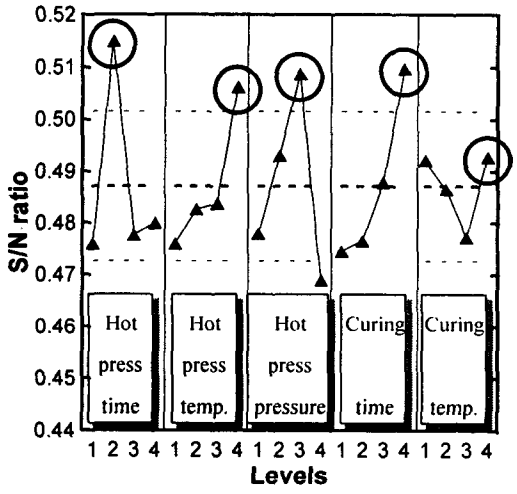

Fig. 2. S/N ratio of each factor and level for friction coefficient(thick dash-line is an average S/N ratio and thin dash-lines are error ranges).

본성형 시간은 8분에서의 영향이 지대했으며, 그 이외의 시간은 마찰계수에 미치는 영향이 미소 하였다. 본성형 온도는 225℃에서 그 영향이 가장 크게 나타났다. 그리고 본성형 압력에 있어서는 압력의 증가에 따라 영향이 커지다가 300kgf/cm²의

조건에서 가장 크고 그 이상의 조건에서 현저히 작아졌다.

열처리 온도에 의한 영향은 작게 나타났으며, 열처리 시간은 시간의 증가에 따라 영향이 지속적으로 증가했으며, 10 시간에서 가장 크게 나타났다.

좀더 정확한 영향 인자를 도출하기 위해 S/N ratio 가 가장 낮은 열처리 온도의 영향을 없는 것으로 처리했을 때에도(Fig. 2 에서 가는 점선의 범위로써 오차 처리) 경도 분석과 동일하게 열처리 온도 이외의 인자는 오차범위에 속해 있지 않았다. 즉, 열처리 온도 이외의 인자의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

3-3. 마찰재의 마모량에 영향을 미치는 인자 및 수준

마찰재의 마모량은 실험 전, 후의 두께를 micrometer 로 측정한 값을 비교하였다.

결과분석은 특성치가 최소가 되도록 하는 최대 S/N 비의 수준 조합을 찾는 망소특성으로 분석하였다.

분석결과 마찰재의 마모량에 영향을 미치는 인자는 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 열처리 시간(4 수준), 본성형 온도(2 수준), 본성형 압력(4 수준), 본성형 시간(1 수준), 열처리 온도(3 수준) 순이었다.

본 실험 조건에서의 최대 S/N 비의 조건, 즉 마찰재의 마모량이 최소가 되는 조건은 본성형을 325kgf/cm^{2}의 압력으로 175℃에서 6 분간 성형하고, 225℃에서 10 시간 동안 열처리를 하는 경우로 나타났다.

본성형 시간은 6 분에서의 영향이 가장 컸으며 그 이상의 시간은 마모량에 미치는 영향이 적었다. 본성형 온도는 175℃에서의 영향이 컸다. 그리고 본성형 압력에 있어서는 325kgf/cm^2 미만의 조건에서는 그 영향이 적으며, 325kgf/cm^{2}의 조건에서의 영향이 지대함을 알 수 있다.

열처리는 225℃이상의 온도에서 10 시간 이외의 수준에서의 영향이 미소한 것으로 나타났다.

경도 및 마찰계수의 분석과는 달리 각 인자간의 영향력의 정도(S/N ratio)의 차이가 적어 오차처리를 하지 않았다.

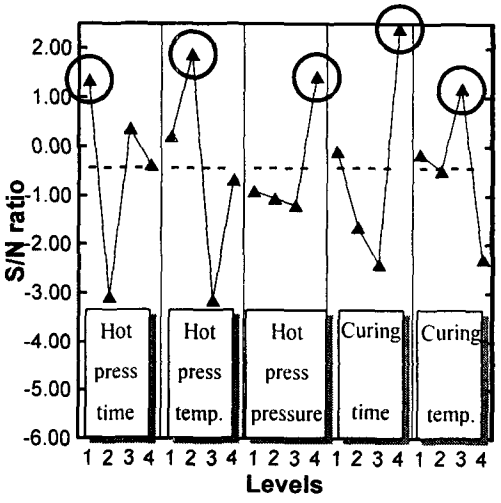

Fig. 3. S/N ratio of each factor and level for amount of wear (thick dash-line is an average S/N ratio).

3-4. 로터의 온도에 영향을 미치는 인자 및 수준

승용차의 경우 정상적인 제동에서 로터 본체의 온도는 150-370℃ 이상까지 상승된다[7]. 반면 전륜 브레이크에 사용되는 디스크 패드의 온도는 370℃ 이상의 온도까지 상승되는 것으로 알려져 있으며[8], 국부적인 마찰계면에서의 온도는 1000-1100℃ 까지 증가하는 것으로 추측되어진다[9].

마찰 계면에서의 급격한 온도 상승은 고

온에서 마찰계수가 급격히 저하되는 현상의 원인이 되는 것으로 알려져 있다[10]. 또한 제동시 차체가 진동하는 현상인 judder를 발생시키는 원인이 된다[11].

그러므로 제동시 마찰재 계면에서의 온도가 높지 않도록 하는 것이 중요하다.

마찰시험시 발생하는 마찰열이 마찰특성에 미치는 영향을 관찰하기 위해서는 마찰재의 온도보다는 반드시 로터의 온도를 기준으로 하여 시험 해야 한다. 이는 로터 양면의 온도편차와 마찰재와 로터간의 온도차이로 인해 온도 측정위치에 따라 시험결과가 다르게 나타나기 때문이다[12].

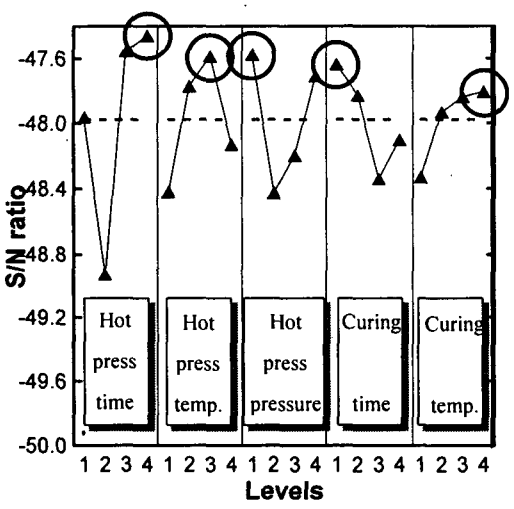

Fig. 4. S/N ratio of each factor and level for temperature of rotor (thick dash-line is an average S/N ratio).

결과분석은 특성치가 최소가 되도록 하는 최대 S/N 비의 수준 조합을 찾는 망소특성으로 분석하였다.

분석결과 로터의 온도에 영향을 미치는 인자는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 본성형 시간(4 수준), 본성형 압력(1 수준), 본성형 온도(3 수준), 열처리 시간(1 수준), 열처리 온도(4 수준) 순이었다.

그러나 마찰재에 따른 온도의 상승률은 그 차이가 비교적 미소하여 성형조건에 따른 영향이 크지 않으리라 사료된다.

3-5. 마찰재의 최적 성형 조건

경도와 마찰재의 마모량의 관계를 Fig. 5에 도식하였다. 경도가 증가할수록 마찰재의 마모량이 감소함을 알 수 있었다.

주효과는 마찰특성에 따라 다르게 나타났다. 각 마찰특성별 영향을 미치는 인자를 Fig. 6에 도식하였다.

이를 토대로 하였을 때 본실험에서 마찰특성을 가장 향상시킬 수 있는 마찰재 제작조건은 본성형을 6분동안 225℃의 온도 300kgf/cm^2 이상의 압력으로 성형하고, 열처리는 175℃ 이상의 온도에서 10시간동안 실시하는 것이었다.

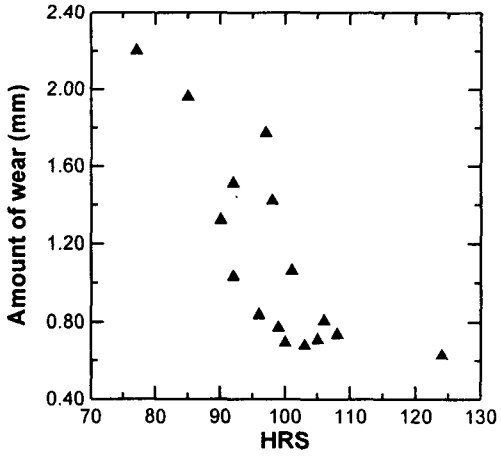

Fig. 5. HRS vs. wear amount of friction materials. It showed that wear amount of friction materials was decreased as hardness increased.

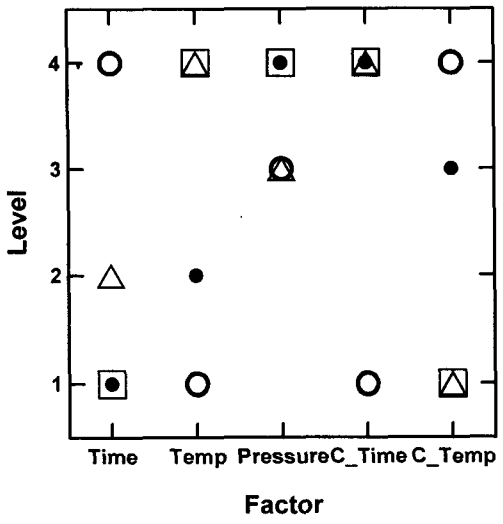

Fig. 6. The main effects and levels on friction characteristics in automotive friction materials.(□ : hardness △ : friction coefficient ● : wear amount of friction materials ○: rotor temperature).

이 결과값은 시험 마찰재 4 번에 해당하는 것으로 시험 마찰재 16 개의 평균값과 비교해 보았다. Table 4 에서 보는 바와 같이 최적조건으로 성형된 마찰재가 다른 마찰재보다 모든 조건에서 양호한 것으로 나타났다.

Table. 4 Comparison between average values of 16 friction materials and values of specimen 4

	average	specimen #4
Hardness(HRs)	98	124
Friction coefficient	0.49	0.51
Amount of wear (mm)	1.14	0.635
Temperature change of rotor(℃)	252	250

4. 결 론

Pad-on-disk 형태의 마찰마모 시험기를 이용하여 성형조건에 따른 마찰특성을 분석한 결과는 아래와 같았다.

1. 경도에 영향을 미치는 인자는 본성형 압력, 열처리 시간, 본성형 시간, 본성형 온도, 열처리 온도 순이었다.
2. 마찰계수에 영향을 미치는 인자는 본성형 시간, 열처리 시간, 본성형 압력, 본성형 온도, 열처리 온도 순이었다.
3. 마찰재의 마모량에 영향을 미치는 인자는 열처리 시간, 본성형 온도, 본성형 압력, 본성형 시간, 열처리 온도 순이었다.
4. 로터의 온도변화에는 마찰재의 성형조건의 영향이 크지 않았다.
5. 본실험에서 마찰특성을 가장 향상시킬 수 있는 마찰재 제작조건은 본성형을 6 분동안 225℃의 온도 300kgf/cm^2 이상의 압력으로 성형하고, 열처리는 175℃ 이상의 온도에서 10 시간동안 실시하는 것이었다.

후 기

본 연구는 1998 년도 한국과학재단 지원 특정기초연구(과제번호: 98-0200-02-01-3)에 의한 결과의 일부입니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고 문헌

1. 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제 13 권, 제 1 호, pp.34-41, 1997.

2. M. G. Jacko, P. H. S. Tsang and S. K. Rhee, "Automotive friction materials evolution during the past decade," Wear, vol.100, pp.503-515, 1984.
3. M. G. Jacko and R. T. Ducharme, "Simulation and characterization of used brake friction materials and rotors," SAE 730191, 1973.
4. B. J. Briscoe, I. Ramirez and P. J. Tweedle, "Friction of aramid fiber composite," *Proc. Int. Conf. on Disc Brakes for Commercial Vehicles, London*, 1988, The Institution of Mechanical Engineers, London, pp.15-29.
5. Gedroan, "Facts about friction," P & Enterprise, 1995.
6. 박성현, "현대 실험 계획법," 민영사, pp.631-658, 1998.
7. M. G. Jacko and S. K. Rhee, in M. Grayson(ed), "Encyclopedia of composite materials and composition," Wiley, pp.144-154, 1983.
8. M. G. Jacko, "Physical and chemical changes of organic disc pads in service," Wear, vol. 46, pp.163-175, 1978.
9. Anold E. Anderson, "Friction and wear of automotive brakes," ASM Handbook vol.18, Friction, lubricant, and wear technology, pp569-577.
10. J. M. Herring, "Mechanism of brake fade in organic brake pad linings," SAE Trans, 670146, 1967.
11. M. J. Haigh, H. Smales and M. Abe, "Vehicle judder under dynamic braking caused by disk thickness variation," The Institution of Mechanical Engineers, C444/022, 1993.
12. 김성진, 장 호, "자동차 제동시 나타나는 마찰재의 마찰특성에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제 13 권, 제 3 호. pp. 10-19, 1997.