

다구찌 로버스트 실험계획법에 의한 자동차용 마찰재의 성형조건과 마찰특성과의 상관관계에 관한 연구

김 광 석 · 장 호
고려대학교 재료금속공학부

The Correlation between Manufacturing Parameters and Friction Characteristics of Automotive Friction Materials by Taguchi Robust Experimental Design

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 was studied using a pad-on-disk type friction tester. Friction materials containing 15 ingredients were investigated for an optimal manufacturing condition for the best friction characteristics employing Taguchi robust experimental design. The main effects were different for mechanical properties and friction characteristics and were strongly influenced by manufacturing conditions. An optimum manufacturing condition was obtained to achieve the best friction characteristics concerning mechanical properties(hardness, porosity, wear resistance), friction stability, and change of rotor temperature.

Key words-manufacturing parameters, molding conditions, curing conditions, mechanical properties, friction characteristics, Taguchi robust experimental design.

1. 서 론

마찰재는 자동차 제동 시스템의 주요 부품으로서, 10 종 이상의 기본원료를 열경화성 수지인 페놀수지로 결합시킨 복합재료(composite)이며, 사용되는 원료의 종류와 배합방법 그리고 제조공정에 따라 마찰특성이 결정된다[1-4]. 마찰재의 제작과정은 고온고압의 성형조건 하에서 진행되며, 이 과정에서 일부 마찰재 성분들(cashew, rubber 등)이 화학반응을 하거나 또는 마찰재 성분에 포함되어 있는 수분

의 영향으로 성형 과정에서 기체를 발생시켜 재질에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 마찰재의 제작은 본성형과 열처리로 이루어지며 각 단계에서 주어지는 온도, 압력, 시간은 제동시의 마찰특성에 많은 영향을 미친다[5]. 따라서 성형에 필요한 최적의 조건을 도출하기 위해 다양한 실험이 진행되고 있다. 그러나 다양한 원료를 포함하고 있는 마찰재는 원료의 종류 및 상대량에 따라 성형조건이 변화되고, 성형에 필요한 변수가 과다하여 최적의 성형조건 도출의 방법으로 통계적 실험계획법을 이

용한다[6].

통계적 분석방법 중 하나인 다구찌 실험 계획법은 최소한의 실험 회수를 통하여 얻어진 결과로부터 특성치에 영향을 주는 원인과 가장 적합한 결과를 도출할 수 있는 조건을 객관적이고 계량적으로 평가할 수 있는 방법이다. 계량화의 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 정의된다. 각 특성에서 S/N 비가 최대가 되는 인자(factor)가 가장 큰 영향을 미치는 요인이고, 그 수준(level)과의 조합이 최적의 실험조건이 된다[6].

최소의 실험으로 최대의 결과를 도출하기 위해 직교배열표(orthogonal arrays)가 사용된다. 직교배열표란 인자의 수가 많을 경우 실험회수를 최소화하고 주효과와 각 인자간의 교호작용(interaction)을 검출할 수 있도록 실험계획을 간단히 작성해 놓은 표를 말한다. 여기에서 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 이에 해당되며, 수준은 실험을 하기 위한 인자의 데이터 값으로 각 인자의 실제값에 해당된다.

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

Table 1. S/N ratio of each characteristics

구분	S/N ratio
망소특성	$10 \log \left[\frac{1}{n} \frac{(S_m - V)^2}{V} \right]$ $= 20 \log \left(\frac{\bar{y}}{s} \right)$
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^2 의 추정값 S_m : 모평균 μ 제곱의 추정값 y_i : 데이터 값 \bar{y} : y의 평균값 s : σ 의 추정값	

2. 실험 방법

본 실험에서는 유압을 이용하여 하중을 가하는 pad-on-disk 형태의 정속 마찰시험기를 이용하였다. 시험기에 장착되는 마찰재는 2cm×2cm×0.7cm 크기의 육면체 형태이며, 상대재인 디스크는 실제 상용화 되어 있는 회주철 로터를 주물 가공하여 마찰 시험기에 장착할 수 있도록 12cm의 직경과 2.5cm의 두께로 제작하여 사용하였다. 본 연구에서는 15가지의 기본원료를 포함한 유기질 마찰재를 대상으로 진행되었으며, 연구대상 마찰재의 개략적인 조성은 Table 2에 나타내었다.

일반적으로 마찰재의 제작 공정은 혼합, 예비성형, 본성형 및 열처리로 크게 나뉘

어지며, 본 실험에서는 Table 3 에서 보는 바와 같이 상용화 되어있는 방법을 기준으로 하여 다구찌 실험계획법에 적용 가능토록 5 개의 인자에 대해 각각 4 개의 수준으로 설정하고, 시편은 각각 본성형 조건 및 열처리 조건을 조합하여 16 개의 마찰재를 제작하였다.

Table 2. Raw material ingredients of friction materials

Raw materials	vol. %	wt. %
Phenolic resin (Xylok)	16	8
Reinforcing fibers	32	37
Lubricants	10	11
Abrasive	5	9
Fillers	22	29
Friction modifiers	15	6

Table 3. Manufacturing parameters of friction materials

level		# 1	# 2	# 3	# 4
		factor			
본성형	Time (min)	15	18	21	24
	Temp (°C)	175	200	225	250
	Pressure (kgf/cm ²)	275	300	325	350
열처리	Time (hrs)	4	6	8	10
	Temp (°C)	175	200	225	250

일반적으로 4 수준 인자의 경우는 인자의 수준이 2 나 3 으로 적당하지 않다고 판단되었을 때 적용하며, 2 수준 인자에서의 직교배열표를 응용하여 사용한다. 본 실험에서 시행한 4 수준 5 인자의 경우는

2 수준계에서 사용되는 L₁₆, L₃₂ 이 사용된다. L₁₆, L₃₂ 방법 중 선택의 기준은 각 인자간 교호작용의 유무이다. 본 실험의 예비 실험결과 각 인자간의 교호작용이 미소하였으므로 교호작용을 고려하지 않은 L₁₆(4⁵) 방법을 적용하였다[6,7].

마찰특성을 측정하기 위해서 시험 전에 burnishing 을 시행하였으며 정속에서의 끌기시험(drag test)으로 마찰특성을 고찰하였다. Burnishing 은 마찰재 표면의 균일한 접촉과 열적 안정화를 위해 본 실험 전에 실시하는 전처리 과정으로서, 600rpm, 6kgf/cm² 의 조건으로 600 초간 시행하였으며, 그 후 같은 조건에서 80°C의 초기 제동 온도로 300 초간 10 회의 끌기시험을 실시하여 마찰계수를 측정하였으며, 실험전과 실험후의 마찰재의 두께변화로 마찰재의 마모량을 측정하였다. 또한 상온에서 속도를 400, 600, 800rpm 으로 변화 시키면서 5kgf/cm² 의 압력으로 20 초간의 끌기시험을 10 회 실시하여 마찰계수의 안정성과 로터의 온도상승 추이를 관찰하였다. 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 사용하여 측정하였다. 마찰재의 경도는 Rockwell hardness 의 S scale 의 볼을 사용하여 경도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 경도에 미치는 영향

결과에 영향을 미치는 주 효과를 분석하기 위해서는 S/N 비가 최대가 되도록 만족시키는 인자 및 수준 조합을 구해야 한다. 마찰재의 성형조건이 경도에 미치는 주효

과는 특성치가 최대가 되도록 하는 최대 S/N 비의 수준 조합을 찾는 망대특성으로 분석하였다. 분석결과 경도에 가장 큰 영향을 미치는 인자 및 수준은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 열처리 온도(2 수준), 본성형 압력(2 수준), 본성형 시간(4 수준), 열처리 시간(3 수준), 본성형 온도(3 수준) 순이었다.

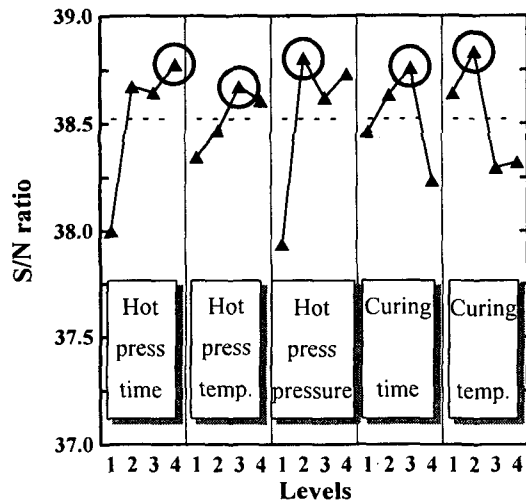


Fig. 1. S/N ratio of each factor and level for hardness value (thick dash-line is an average S/N ratio).

본성형 시간은 18분 이상의 온도에서 영향정도가 급격히 상승하였으며, 24분에서 가장 크게 나타났다. 본성형 온도는 온도 증가에 따라 영향정도가 증가하면서 225℃에서의 영향이 가장 컸다. 본성형 압력에 있어서는 300 및 350kgf/cm²에서 영향정도가 크게 나타났다. 열처리는 통상 180-200℃에서 6시간 정도 실시하는데 위의 분석결과 225℃이상의 온도에서는 온도의 영향은 미소하고 200℃에서 영향정도가 가장 컸으며, 시간은 8시간에서

그 영향이 가장 크게 나타났으며 10시간에서는 영향정도가 현저히 감소하였다. 각 인자간의 영향력의 정도(S/N 비)의 차이가 적어 오차처리에 의한 검증을 하지 않았다.

3-2. 마찰재의 기공율에 미치는 영향

일반적으로 마찰재의 기공률(porosity)을 증가 시키면 제동시 진동을 줄이는데 매우 유리하며, 브레이크 잡음을 줄이기 위해서는 기공률이 10% 이상이 되어야 하는 것으로 알려져 있다. 기공률의 증가는 마찰재의 탄성계수(elastic modulus)를 감소시킨다. 탄성계수가 감소하면 energy-power 흡수 능력(absorbing capacity)이 증가하고, 마찰계수는 상승하며, hot spot의 크기가 감소한다[8] 마찰재의 기공율에 관한 결과분석은 특성치가 최대가 되도록 하는 최대 S/N 비의 수준 조합을 찾는 망소특성으로 분석하였다. 분석결과 마찰재의 마모량에 가장 큰 영향을 미치는 인자 및 수준은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 본성형 온도(2 수준), 본성형 압력(2 수준), 열처리 시간(4 수준), 열처리 온도(4 수준), 본성형 시간(3 수준) 순이었다.

본성형 시간은 15분 이상의 시간에서 내마모성에 영향이 컸으며 24분에서는 크게 감소하였다. 본성형 온도는 175 및 225℃에서의 영향이 크게 나타났다. 그리고 본성형 압력에 있어서는 300kgf/cm²에서 가장 크게 나타났으며, 그 이외의 조건에서는 그 영향이 미소함을 알 수 있었다. 열처리 온도는 250℃에서의 영향이 가장 크게 나타났으며, 열처리 시간은 8시간 이하의 수준에서의 영향이 미소한 것으로 나타났다. 경도 분석과 동일하게 각 인자간의 영향력의 정도(S/N 비)의 차이가 적어 오차처리에 의한 검증을 하지 않았다.

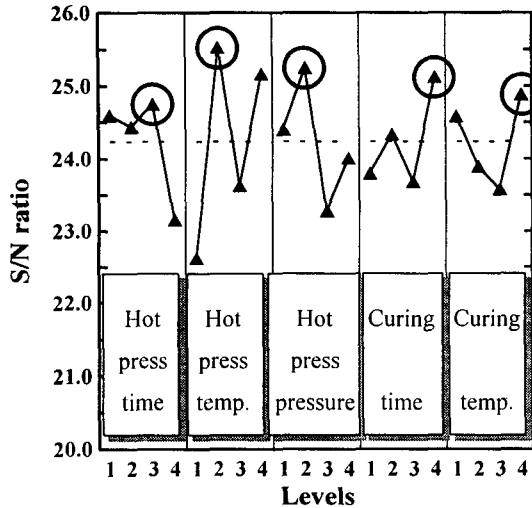


Fig. 2. S/N ratio of each factor and level for porosity (thick dash-line is an average S/N ratio).

3-3. 마찰재의 마모량에 미치는 영향

내마모성에 관한 결과분석은 망소특성으로 분석하였다. 분석결과 마찰재의 마모량에 가장 큰 영향을 미치는 인자 및 수준은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 본성형 시간(2수준), 열처리 온도(2수준), 열처리 시간(4수준), 본성형 압력(1수준), 본성형 온도(1수준) 순이었다.

본성형 시간은 18분에서 내마모성에 영향이 가장 컸으며 그 이상의 시간은 마모량에 미치는 영향이 적었다. 본성형 온도는 175 및 250℃에서의 영향이 크고 그 이외의 온도에서는 미소했다. 그리고 본성형 압력에 있어서는 275kgf/cm²에서의 영향이 가장 크게 나타났다. 열처리 온도는 200℃ 이외의 온도에서의 영향이 미소하였고, 열처리 시간은 8시간 이하의 수준에서의 영향이 미소한 것으로 나타났다.

좀더 명확한 영향 인자를 도출하기 위해 S/N ratio가 가장 낮은 본성형 온도의 영

향을 배제했을 때에도(Fig. 3에서 가는 점선의 범위로써 오차 처리:pooling 처리) 본성형 온도 이외의 인자는 오차범위에 속해 있지 않기 때문에 내마모성에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

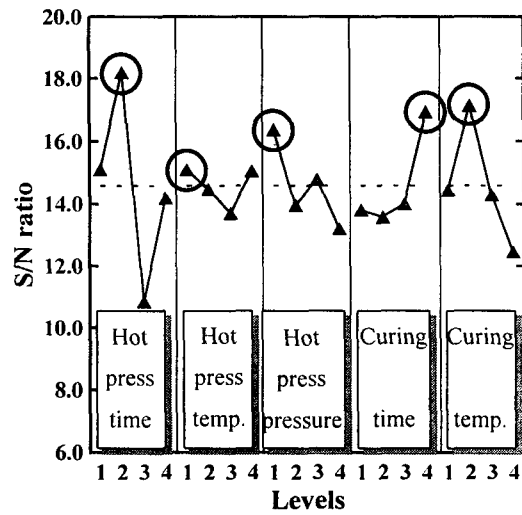


Fig. 3. S/N ratio of each factor and level for amount of wear (thick dash-line is an average S/N ratio and thin dash-lines are error ranges).

3-4. 마찰계수에 미치는 영향

마찰계수에 어떠한 인자가 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 가압력을 6kgf/cm², 회전속도를 600rpm으로 고정하고 80℃의 초기제동온도에서 300초간의 끌기시험을 10회 반복하였다. 계량화의 판단을 특성치가 목표값에 접근 하도록 하는 최대 S/N비의 수준 조합을 찾는 망목특성 조건으로 분석하였으며, 망목특성의 목표값은 16개 시편의 평균마찰계수인 0.35로 설정하였다. 분석결과 마찰계수에 영향을 미치는 인자 및 수준은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 본성형 압력(2수준), 본성형 온도(2수준), 열처

리 온도(3 수준), 열처리 시간(4 수준), 본성형 시간(3 수준) 순이었다.

본성형 시간은 15분 이상의 시간에서의 영향이 크게 나타났으며, 24분에서는 마찰계수에 미치는 영향이 크게 감소하였다. 본성형 온도는 175 및 200°C에서 가장 크게 나타났으며, 그 이상의 온도에서는 크게 감소하였다. 본성형 압력에 있어서는 300kgf/cm²의 조건에서 가장 크고 그 이상의 조건에서 현저히 작아졌다. 열처리 온도 및 시간에 의한 영향은 225°C, 10시간일 때 가장 크게 나타났으며, 그 이외의 조건에서는 미소하였다. 각 인자간의 영향력의 정도(S/N 비)의 차이가 적어 오차처리에 의한 검증을 하지 않았다.

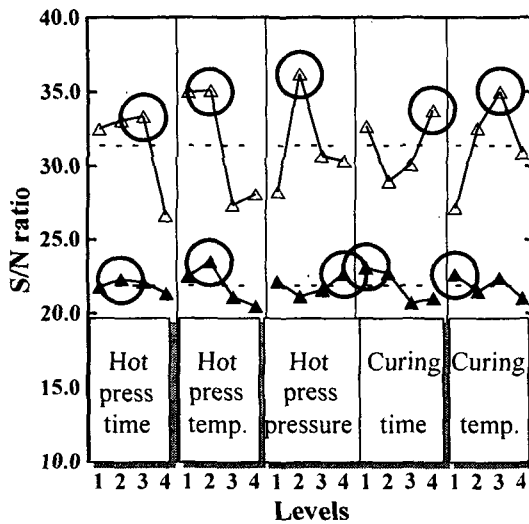


Fig. 4. S/N ratio of each factor and level for friction coefficient and friction stability (Δ : friction coefficient, \circ : friction stability, thick dash-line is an average S/N ratio).

3-5. 마찰계수의 안정성에 미치는 영향

자동차용 마찰재는 차량이 제동될 수 있는 일정한 수준의 마찰계수를 가져야 하

며, 마찰조건의 변화에도 그 값이 일정하게 유지되어야 한다. 마찰계수의 변화가 심하면 토크값의 변화량이 심하다는 것을 의미하며, 이는 브레이크 떨림현상(brake judder)을 유발하는 원인이 되는 것으로 알려져 있다[1].

마찰계수의 안정성에 어떠한 인자가 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 상온에서 5kgf/cm²의 압력으로 속도를 400, 600, 800rpm으로 변화 시키면서 20초간의 끌기 시험을 10회 반복하여 나타난 첫번째 끌기 시험시의 마찰계수와 10회째의 마찰계수의 차이로써 마찰계수의 안정성 정도를 판단하였다.

마찰계수의 안정성에 미치는 주효과를 판단하기 위해 망소특성 조건으로 분석하였으며, 각 속도에서의 마찰계수의 안정성 정도를 종합하여 S/N 비로 변환하여 분석하였다. 분석결과 마찰계수의 안정성에 영향을 미치는 인자 및 수준은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 본성형 압력(2 수준), 본성형 온도(1 수준), 열처리 온도(2 수준), 본성형 시간(2 수준), 열처리 시간(3 수준) 순이었다. 본성형 시간은 15분 및 18분에서의 영향이 크게 나타났으며, 그 이외의 시간에서는 미소하였다. 본성형 온도는 200°C에서 가장 크게 나타났으며, 그 이외의 온도에서는 미소하였다. 본성형 압력에 있어서는 350kgf/cm²의 조건에서 가장 크게 나타났다. 열처리 온도는 175 및 225°C에서 영향 정도가 크게 나타났으며, 시간은 4시간일 때 가장 크게 나타났다. 각 인자간의 영향력의 정도(S/N 비)의 차이가 적어 오차처리에 의한 검증을 하지 않았다.

3-6. 마찰계면의 온도상승에 미치는 영향

마찰계면에서의 온도 변화에 대한 분석은 망소특성으로 분석하였으며, 분석결과 S/N

비의 값이 작고 차이가 미소하여 성형조건에 따른 영향이 크지 않으리라 사료된다. 이러한 결과는 마찰재에 사용된 기본 원료 중 마찰열에 영향을 미치는 물질들이 성형과정에서 가해진 온도, 압력, 시간에 의해 변화하여 나타난 것으로 사료된다.

3-7. 마찰재의 최적 성형 조건

성형조건에 따른 주효과는 경도, 기공률, 마찰계수, 내마모성, 마찰계면에서의 온도 상승 추이 등으로 나타나는 마찰특성에 따라 각각 다르게 나타났다. 최적의 성형조건을 도출하기 위해 각 S/N 비를 종합하여 성형조건이 각 마찰특성에 영향을 미치는 인자를 Fig. 5에 도식하였다.

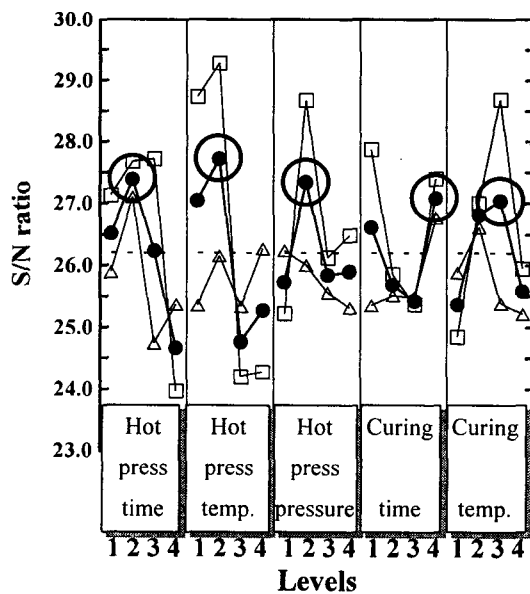


Fig. 5. S/N ratio of each factor and level for optimum manufacturing conditions (△: mechanical properties, □: friction characteristics, ●: optimum conditions and the thick dash-line is an average S/N ratio).

이를 토대로 하였을 때 본 실험에서 기계적 성질(경도, 기공률, 내마모성)을 가장 향상시킬 수 있는 마찰재 제작조건은 본성형을 18분동안 175 또는 225℃의 온도와 275kgf/cm²의 압력으로 성형하고, 열처리하는 200℃의 온도에서 10시간동안 실시하는 것이었다. 반면 마찰특성(마찰계수의 안정성, 마찰계면의 온도상승 추이)을 향상시킬 수 있는 마찰재의 제작조건은 본성형을 18 또는 21분 동안 200℃의 온도와 300kgf/cm²의 압력으로 성형하고, 열처리하는 225℃의 온도에서 4시간동안 실시하는 것이었다.

위의 결과를 종합하였을 때 모든 조건을 향상시킬 수 있는 최적의 성형조건을 분석할 수 있으며, 그 조건은 본성형을 18분 동안 200℃의 온도와 300kgf/cm²의 압력으로 성형하고, 열처리하는 225℃의 온도에서 10시간동안 실시하는 것이었다.

4. 결 론

자동차 브레이크용 마찰재의 성형조건이 마찰특성에 미치는 영향을 다구찌 실험계획법을 이용하여 분석하였다. 본 연구에서는 마찰재의 강도, 기공률, 마찰계수, 내마모성, 마찰계면에서의 온도 상승 추이를 대상으로 성형시의 압력, 온도, 시간 그리고 열처리시의 온도와 시간을 변수로 16개의 마찰재를 제조하여 실험하였다.

상기한 바와 같이 마찰특성에 따른 주효과는 각기 다르게 나타났으며, 성형조건이 마찰특성에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

마찰재의 기계적 성질을 최대화 할 수 있는 조건은 본성형을 18분동안 175 또는 225℃의 온도와 275kgf/cm²의 압력으로 성

형하고, 열처리는 200℃의 온도에서 10 시간동안 실시하는 것이었다.

마찰계수를 안정화 시킬 수 있는 조건은 본성형을 18 또는 21 분동안 200℃의 온도와 300kgf/cm²의 압력으로 성형하고, 열처리는 225℃의 온도에서 4 시간동안 실시하는 것이었다. 반면 마찰계면에서의 온도 상승 추이는 S/N 비의 값이 매우 작고 그 차이가 미소한 것으로 미루어 마찰재의 성형조건의 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

위의 모든 조건을 향상시킬 수 있는 최적의 성형조건은 본성형을 18 분동안 200℃의 온도와 300kgf/cm²의 압력으로 성형하고, 열처리는 225℃의 온도에서 10 시간동안 실시하는 것이었다.

이러한 결과는 페놀수지의 종류 및 상대량이 변하면 따라서 변화할 수 있으며 따라서 기본원료의 배합이 다른 마찰재의 최적 성형조건을 도출하기 위해서는 재실험을 통하여 확인함이 바람직한 것으로 사료된다.

후 기

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

참 고 문 헌

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, pp.746-754, 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*, The Institution of Mechanical Engineers, London, pp.15-29, 1988.
5. Gedroan, "Facts about friction," P & Enterprise, 1995.
6. 박성현, "현대 실험 계획법," 민영사, pp.423-658, 1998.
7. Douglas C. Montgomery, "Design and analysis of experiments," John Wiley and Sons, Arizona state university, 4th Edition, pp.575-642, 1996.
8. Satoshi Ohkawa, "Elasticity-An important factor of wet friction materials," SAE, 911775, pp.168-178, 1991.