

마찰재의 물성 및 트라이볼로지 특성에 영향을 미치는 주요 성형인자

김성진 · 김광석 · 장 호[†]

고려대학교 신소재공학과

Manufacturing Parameters Affecting Physical Properties and Tribological Behavior of Brake Linings

Seong Jin Kim, Kwang Seok Kim and Ho Jang[†]

Department of Advanced Materials Engineering, Korea University

Abstract—The Taguchi method, a robust experimental design, was used to optimize manufacturing parameters of a brake lining during hot pressing and heat treatment. A friction material containing 15 ingredients was employed for this experiment and friction and wear tests were carried out by using a pad-on-disk type tribotester. Sixteen brake linings with different manufacturing conditions were examined according to a parameter design. From the results of the signal-to-noise (S/N) ratio and the analysis of variance (ANOVA), the cause and effect of the manufacturing parameters on physical properties (hardness and porosity) and friction and wear characteristics of brake linings was obtained.

Key words—taguchi method, manufacturing parameter, tribological behavior, brake lining.

1. 서 론

자동차용 마찰재는 10종 이상의 기본원료로 구성되어 있는 복합재료로서 사용되는 원료의 종류와 제조방법에 따라 물성 및 마찰특성이 결정된다[1-4]. 일반적으로 마찰재의 제조공정은 원료의 계량 및 혼합, 열성형(hot pressing), 열처리(heat treatment), 후처리(finishing)의 순서로 제작되며, 제조조건은 첨가되는 원료의 종류 및 상대량에 따라 다르게 설정된다. 특히, 열성형 단계에서 설정되는 온도, 압력, 시간은 결합제(binder)로 첨가되는 페놀수지의 경화특성에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다[5,6]. 현재 자동차용 마찰재에 사용되는 결합제는 내열성과 인성(toughness)을 향상시키기 위해 알킬변성시키거나 교차결합(cross linking) 밀도를 증가시킨 노볼락(novolac) 계열의 2단계 페놀수지(two stage resin)가 주로 사용되고 있다. 페놀수지의 경화조건은 경화제

(curing agent)의 종류 및 함량, 촉매의 농도, 메틸렌 결합의 위치 등에 따라 성형온도와 시간이 결정되므로 마찰재 열성형시 결합제의 열적특성을 파악하는 일은 매우 중요하다[5,7].

마찰재 제조시 페놀수지에 따른 최적의 경화시간을 측정하는 표준방법으로는 B단계 변성시간(B-transformation time, ISO 8987A & B)과 gel 시간(ISO 9396B) 분석이 주로 사용되고 있으며, 그 이외에도 흐름도(flow distance)와 열분석 방법을 통해 경화조건을 예측하고 있다[5]. 그러나 마찰재는 페놀수지 이외에도 다양한 원료를 포함하고 있기 때문에 구성원료의 종류 및 함량에 따라 성형조건이 변화되며 이에 따른 모든 성형조건에 대한 물성 및 마찰특성을 평가하기에는 상당한 시간과 노력을 필요로 한다. 따라서 최소의 실험횟수를 통한 최적의 성형조건을 도출하기 위해서는 결합제에 대한 열적특성을 정확히 파악하고 이로부터 통계적 실험계획법을 활용하는 것이 가장 적합한 접근방법이라 할 수 있다.

[†]주저자 · 책임저자 : hojang@korea.ac.kr

따라서 본 연구에서는 마찰재 제조시 결합제로 사용된 페놀수지의 경화특성을 분석하였으며, 통계적 분석 방법의 하나인 다구찌 실험계획법(Taguchi robust experimental design)을 이용하여 최소한의 실험을 통하여 특성치에 가장 영향을 주는 주요인자를 밝혀내고 이들로부터 최적의 결과를 도출하고자 하였다. 특히, 다구찌 실험계획의 파라미터 설계(parameter design)를 이용하여 제어인자(controllable factor)에 대한 손실함수(loss function)와 S/N비(signal-to-noise ratio)를 계산하여 마찰재의 마찰 및 마모특성에 영향을 주는 주요인자를 분석하였다.

2. 다구찌 실험계획

다구찌 실험계획은 주로 직교배열표(table of orthogonal arrays)를 작성하여 인자(factor)들의 실험횟수를 최소화하고 각 인자간의 교호작용(interaction)을 검출할 수 있도록 설계되어 있다[8,9]. 본 연구에서는 마찰재의 성형조건이 마찰 및 마모특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 본성형과 열처리 조건을 대상으로 5인자와 4수준(level)으로 설정하였으며(Table 1), 각 인자간의 교호작용이 미소하였으므로 $L_{16}(4^5)$ 배열을 적용하여 16회 실험횟수를 설계하였다(Table 2). 각 인자에서의 4수준은 결합제의 경화특성에 따라 제조조건의 범위를 설정하였다. 특히, 실험결과의 특성을 고려하여 망소(smaller-the-better) 및 망대(larger-the-better)특성을 다르게 정의하였으며, 손실함수로부터 최대의 S/N비와 분산분석법(analysis of variance, ANOVA)을 이용하여 지배적 인자와 최적조건을 분석하였다.

3. 실험방법

본 실험에서 사용된 마찰재는 비석면 유기질(non-

Table 1. Manufacturing parameters and their levels for Taguchi method

Factors		Levels				
		1	2	3	4	
Hot Pressing	Time (min)	A	6	8	10	12
	Temp (°C)	B	150	175	200	225
	Pressure (MPa)	C	27.0	29.5	32.0	34.5
Heat Treatment	Time (hr)	D	4	6	8	10
	Temp (°C)	E	175	200	225	250

Table 2. Experimental layout of an $L_{16}(4^5)$ orthogonal array (the numbers in each column indicate the levels for the specific factors)

Experiment No.	Factor A	Factor B	Factor C	Factor D	Factor E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

Table 3. Ingredients in the brake lining manufactured for this study

Ingredients	Vol.%	Ingredients	Vol.%
Phenolic resin	16	Reinforcing fiber	32
Lubricants	10	Abrasives	5
Fillers	22	Friction modifiers	15

asbestos organic) 재료로서 결합제, 강화섬유, 고체윤활제, 연마제, 충전제 및 마찰조절제 등을 혼합하여 제조하였다(Table 3). 마찰재의 제조공정은 혼합과 예비성형후 직교배열표의 설계에 따라 본성형과 열처리 조건을 변화시켜 총 16가지의 마찰재를 제작하였다. 마찰재의 물성평가는 경도(surface hardness)와 기공률(porosity)을 대상으로 하였다. 마찰재의 표면경도는 Rockwell 경도기(Akashi® Rockwell, ARK-600)의 S규격으로 측정하였으며, 기공률은 수은 기공측정기(AutoPore II 9220 V3.03)를 이용하여 345 MPa의 압력까지 측정하였다.

본 연구에서 마찰 및 마모시험은 pad-on-disk 형태의 정속 마찰시험기를 이용하였으며 시험기의 개략도는 앞서 발표한 바 있다[3]. 마찰시험은 CITT(constant initial temp test) 시험과 CINT(constant interval test) 시험을 통해 마찰계수의 변화량을 고찰하였으며, 구체

Table 4. Friction test procedure used in this work

Burnish	Number of applications: 2, Initial brake temperature (IBT): 80°C, Pressure: 0.6 MPa, Speed: 600 rpm (2.8 m/s), Duration: 300 sec
Constant initial temperature test (CITT)	Number of applications: 10, IBT: 80°C, Pressure: 0.6 MPa, Speed: 600 rpm (2.8 m/s), Duration: 300 sec
Constant interval test (CINT)	Number of applications: 10, IBT: room temp., Pressure: 0.5 MPa, Speed: 600 rpm (2.8 m/s), Duration: 20 sec, Interval: 10 sec

적인 시험조건은 Table 4에 나타내었다. 마찰재의 마모량은 CITT 마찰시험 전후의 체적마모량(mm³)과 작용하중(N) 및 미끄럼거리(m)를 계산한 후 비마모율(specific wear rate, mm³/Nm)을 환산하여 비교 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 결합제의 열적특성 및 실험조건 결정

본 연구에 사용된 페놀수지(Xylok™, developed by Mid-land Silicones Ltd.)는 Fig. 1에 볼 수 있듯이 페놀과 aralkylether을 축합중합시킨 열경화성 수지로서 높은 교차결합밀도로 인해 우수한 고온특성을 나타내어 마찰재의 결합제로 사용되고 있다[7,10]. 결합제의 경화온도는 열분석을 통해 예측가능하므로 Xylok™ 수

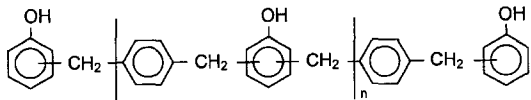


Fig. 1. Molecular structure of modified novolac phenolic resin used as a binder in this work.

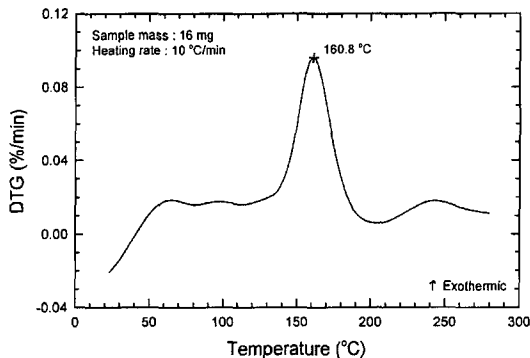


Fig. 2. DTG (derivative thermogravimetric analysis) of novolac resin showing an exothermic reaction with HEXA(hexamethylenetetramine) between 130 and 200°C.

지의 시차열중량분석(thermogravimetry)을 실시하였다 (Fig. 2). 그림에서 볼 수 있듯이 130-200°C 온도범위에서 나타난 반응은 페놀수지에 첨가되는 경화제(HEXA)와 수지와의 반응을 나타낸 것으로서 경화온도의 범위를 평가할 수 있다. 페놀수지의 경화온도는 경화제의 종류와 함량에 따라 다르게 나타내므로 반드시 열분석을 통해 마찰재의 열성형 온도를 설정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 시편의 두께와 열손실을 고려하여 150-225°C의 온도에서 실험조건을 설정하였다. 열성형에 소요되는 결합제의 경화시간은 B단계(rubbery stage)로부터 완전히 경화되는 C단계(cured stage)까지 소요되는 시간으로서 gel 시간과 B단계 변성시간을 고려하여 마찰재의 열성형 시간을 6-12분으로 결정하였으며 열성형 가압력은 마찰재 제조조건을 참고하여 25-35 MPa의 면압범위를 설정하였다. 마찰재의 열처리(post-curing) 작업은 결합제의 경화정도를 균일하게 하고 예기치 않은 열팽창(swelling)을 감소시키기 위해 페놀수지의 유리전이온도(T_g, glass transition temperature) 이하에서 6시간이상 수행된다. 본 연구에서는 열처리 조건에 따른 효과를 비교하고자 4-10시간으로 175-250°C의 열처리 온도구간을 설정하였다.

4-2. 물성특성에 영향을 미치는 성형인자

마찰재의 물성특성인 경도 및 기공률의 실험결과와 S/N비를 Table 5에 나타내었다. 마찰재의 경도는 망대 특성으로 분석하였으며 기공률도 증가할수록 마찰재의 탄성계수(elastic modulus)를 감소시켜 제동시 소음이 감소되는 것으로 알려져 있으므로[11] 망대특성을 적용하였다. 망대특성의 경우 S/N비의 계산식은 다음과 같다[8,9].

$$SN_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

여기서, SN_L은 망대특성의 S/N비를 나타내며 n은 측정횟수, y_i는 측정값이다. 따라서 S/N비가 클수록 특성

Table 5. Experimental results and S/N ratios for surface hardness and porosity

Experimental No.	Hardness(HR _s)	S/N ratio (dB) Larger-the-better	Porosity(%)	S/N ratio (dB) Larger-the-better
1	73	37.3	14.22	23.06
2	86	38.7	21.53	26.66
3	82	38.3	12.34	21.83
4	78	37.8	21.97	26.84
5	87	38.8	15.73	23.93
6	75	37.5	20.26	26.13
7	92	39.3	13.84	22.82
8	90	39.1	17.50	24.86
9	85	38.6	13.69	22.73
10	91	39.2	19.06	25.62
11	81	38.2	17.90	25.06
12	86	38.7	19.06	25.60
13	86	38.7	10.92	20.76
14	85	38.6	15.32	23.71
15	89	39.0	17.38	24.80
16	87	38.8	14.72	23.36

Table 6. The analysis of variance (ANOVA) for surface hardness and porosity

Factors	Surface hardness			Porosity		
	Sum of squares	Mean square	Contribution (%)	Sum of squares	Mean square	Contribution (%)
A	1.40	0.47	27.79	6.40	2.13	13.89
B	0.27	0.09	5.31	22.05	7.35	47.87
C	1.93	0.64	38.34	8.08	2.69	17.54
D	0.66	0.22	13.09	5.19	1.73	11.26
E	0.78	0.26	15.47	4.35	1.45	9.44

치가 최적조건에 근접함을 의미한다.

따라서 S/N비의 산출결과로부터 분산분석법을 적용하여 실험결과에 따른 지배적 인자를 검출할 수 있다. Table 6에 제곱합(sum of squares)을 이용하여 각 특성치의 인자에 따른 기여도(contribution)를 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 물성특성에 영향을 미치는 성형인자는 열처리 조건보다는 열성형 조건에 민감함을 알 수 있다. 특히, 경도특성에 영향을 주는 주요인자는 열성형 가압력과 열성형 시간이며, 기공률은 열성형 온도가 가장 지배적 인자로 나타났다. 이러한 결과를 통해 경도특성의 최대 S/N비를 나타내는 최적의 조합은 29.5 MPa의 열성형 가압력과 12분의 열성형 시간을 도출할 수 있었다. 기공률은 결합제의 흐름도에 크게 좌우됨으로써 열성형 온도에 의해 크게 영향을 받은 것으로 사료되며 이때 최적의 온도는 2수준의 175°C로 나타났다.

4-3. 마찰 및 마모특성에 영향을 미치는 성형인자

마찰재의 마찰특성은 CITT와 CINT 시험을 통해 각 10회의 반복시험을 수행하여 마찰계수의 안정성(friction stability)을 고찰하였다. CITT 시험은 일정한 초기온도에서 열이력에 따른 마찰계수의 변화를 평가하기 위한 방법이며 CINT 시험은 일정시간 간격으로 연속적으로 마찰시험을 수행함으로써 온도 상승에 따른 마찰계수의 변화를 고찰하기 위한 방법이다. 마찰계수의 안정성은 반복시험시 마찰계수의 변화에 따른 표준편차를 환산하여 망소특성으로 평가하였으며 마모특성도 적을수록 우수한 특성이므로 망소특성을 적용하였다(Table 7).

$$SN_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

여기서, SN_s 는 망소특성의 S/N비를 나타내며 기호설

Table 7. Experimental results and S/N ratios for μ_{SD} (standard deviation of μ) and W_s (specific wear rate)

Experimental No.	μ_{SD}	S/N ratio (dB)	μ_{SD}	S/N ratio (dB)	W_s	S/N ratio (dB)
	(CITT)	Smaller-the-better	(CINT)	Smaller-the-better	($\times 10^{-6}$ mm ³ /Nm)	Smaller-the-better
1	0.019	34.425	0.023	32.765	7.706	102.264
2	0.003	50.458	0.025	32.041	8.219	101.703
3	0.018	34.895	0.056	25.036	10.788	99.341
4	0.013	37.721	0.041	27.744	9.761	100.211
5	0.021	33.556	0.048	26.375	8.733	101.177
6	0.019	34.425	0.041	27.744	4.110	107.724
7	0.016	35.918	0.025	32.041	6.678	103.507
8	0.012	38.416	0.029	30.752	6.678	103.507
9	0.009	40.915	0.038	28.404	7.706	102.264
10	0.013	37.721	0.025	32.041	19.007	94.422
11	0.013	37.721	0.029	30.752	19.007	94.422
12	0.014	37.077	0.024	32.396	16.953	95.415
13	0.018	34.895	0.050	26.021	12.843	97.827
14	0.014	37.077	0.044	27.131	13.870	97.158
15	0.015	36.478	0.049	26.196	9.247	100.680
16	0.011	39.172	0.025	32.041	6.165	104.202

Table 8. The ANOVA for CITT and CINT friction test

Factors	CITT			CINT		
	Sum of squares	Mean square	Contribution (%)	Sum of squares	Mean square	Contribution (%)
A	33.14	11.05	14.09	18.69	6.23	16.50
B	40.67	13.56	17.29	14.78	4.93	13.05
C	22.74	7.58	9.66	18.03	6.01	15.91
D	46.00	15.33	19.55	27.46	9.15	24.23
E	92.71	30.90	39.41	34.34	11.45	30.31

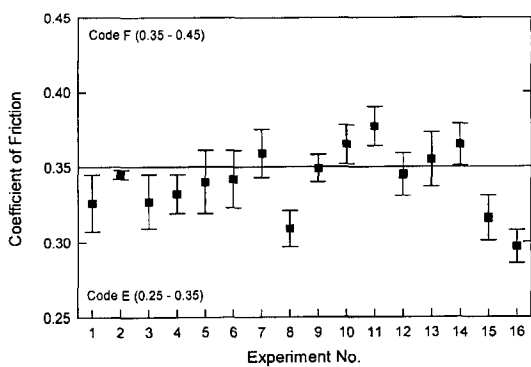


Fig. 3. Average friction coefficient measured during CITT friction test.

명은 식(1)과 같다.

마찰재의 마찰 및 마모특성에 대한 통계분석을 적용

하기 전에 마찰재가 자동차의 제동에 적합한지를 고찰하기 위해 평균마찰계수를 측정하였다(Fig. 3). 직교배열표에 따라 제조된 16가지의 마찰재는 0.3-0.4의 마찰계수의 분포를 나타내었으며 이는 SAE J866 규격[12]에 의거하여 코드 E와 F의 범위에 포함되는 수준임을 확인하였다.

Table 8은 마찰시험결과에 따른 분산분석표로서 마찰계수의 안정성에 영향을 미치는 성형인자의 기여도를 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 마찰특성에 기여하는 주요인자는 마찰시험방법과 무관하게 모두 열처리 조건에 민감하며, 특히 열처리 온도에 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 열처리 온도의 경우 S/N비의 분석결과는 Fig. 4와 같이 두가지 마찰시험에서 유사한 경향을 나타냈으며, 2수준(200°C)에서 최적의 조건을 제시하였다.

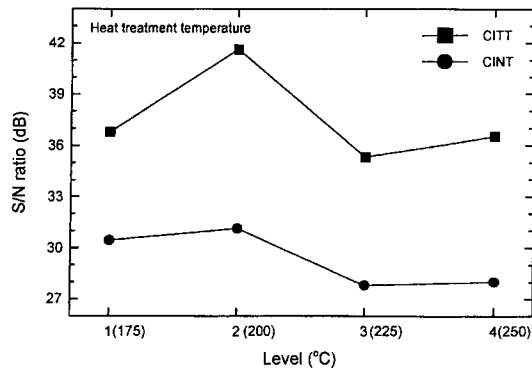


Fig. 4. Signal-to-Noise ratio responses for the two different friction tests.

Table 9. The ANOVA for wear test

Factors	Sum of squares	Mean square	Contribution (%)
A	109.71	36.57	51.91
B	5.08	1.69	2.41
C	22.04	7.35	10.43
D	29.95	9.98	14.17
E	44.54	14.85	21.08

마찰재의 마모특성은 마찰재에 첨가되는 원료의 열분해(pyrolysis) 특성과 열에 의해 크게 변성된 마찰층의 내구성 등에 영향을 받으며, 특히 마찰막의 거동과 밀접한 관계를 가지고 있다[3,10]. 본 연구에서는 마모특성에 영향을 미치는 성형조건중 열성형 시간에 크게 영향을 받았으며 최적수준은 8분으로 나타났다(Table 9). 이는 결합체의 열적특성에 따라 최적의 경화시간이 존재함을 나타내며 과경화시 오히려 마모특성을 저해하는 것으로 평가된다.

5. 결 론

마찰재의 물성 및 마찰특성에 영향을 미치는 성형조건을 주요인자를 고찰하기 위해 다구찌 실험계획법을 이용하였으며 분산분석법을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마찰재의 성형조건은 결합체로 사용되는 페놀수지의 열적특성인 경화시간과 경화온도에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.
2. 마찰재의 경도와 기공률에 영향을 미치는 성형조건은 열성형 조건에 민감하게 나타났으며, 특히 경도

에 영향을 주는 지배적 인자는 열성형 기압력이며 기공률은 열성형 온도가 주요인자로 작용하였다.

3. 마찰재의 마찰계수의 안정성에 기여하는 주요인자는 열처리 과정이 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 마모특성은 열성형 시간이 지배적 인자임을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Kim, S. J., Jang, H., "Friction Characteristics of Non-Asbestos (NAO) and Low-Stee Friction Material: The Comparative Study," KSTLE International Journal, Vol.1, No.1, pp.1-7, 2000.
2. Jang, H., Kim, S. J., "The Effects of Antimony Trisulfide (Sb_2S_3) and Zirconium Silicate ($ZrSiO_4$) in the Automotive Brake Friction Material on Friction Characteristics," Wear, Vol.239, pp.229-236, 2000.
3. Kim, S. J., Cho, M. H., Lim, D. -S., Jang, H., "Synergistic Effects of Aramid Pulp and Potassium Titanate Whiskers in the Automotive Friction Material," Wear, Vol.251, pp.1484-1491, 2001.
4. Jang, H., Lee, J. S., Fash, J. W., "Compositional Effects of the Brake Friction Material on Creep Groan Phenomena," Wear, Vol.251, pp.1477-1483, 2001.
5. Knop, A., Scheib, W., Chemistry and Application of Phenolic Resins, Springer-Verlag, Berlin, 1979.
6. Mark, H. F., Encyclopedia of Polymer Science and Technology: Plastics, Resins, Rubbers, Fibers, Vol.10, pp.60-61, Interscience Publishers, New York, 1964.
7. Salamone, J. C., Polymeric Materials Encyclopedia, Vol.7, pp.5035-5039, CRC Press, Boca Raton, 1996.
8. Montgomery, D. C., Design and Analysis of Experiments, Chap.14, pp.622-641, John Wiley & Sons, New York, 1997.
9. Peace, G. S., Taguchi Methods: A Hands-on Approach, Addison-Wesley, Reading, 1993.
10. Kim, S. J., Jang, H., "Friction and Wear of Friction Materials Containing Two Different Phenolic Resins Reinforced with Aramid Pulp," Tribology International, Vol.33, pp.477-484, 2000.
11. Ohkawa, S., "Elasticity-An Important Factor of Wet Friction Materials," SAE Technical Paper 911775, pp.168-178, 1991.
12. Friction Coefficient Identification System for Brake Linings, SAE (Society of Automotive Engineers) Recommended Practice, J866 MAR 35.