

다구치 방법을 이용한 복합재료 자동차용 마찰재의 마찰특성에 관한 연구

이정주* · 김윤해**

A Study on the Friction Characteristics of Automotive Composites Brake Pads Using Taguchi Method

Jung-Ju Lee, Yun-Hae Kim

Key Words: Friction Materials (마찰재), Taguchi Method (다구치방법), Composite Materials (복합재료), Braking systems(브레이크 시스템), Orthogonal Matrix(직교배열), Robust design(강건설계)

Abstract

It has many variables and factors to design the friction materials for automotive brake pads. In this study, the friction and wear characteristics of automotive brake pads have been studied using 1:1 full size dynamo meter. Using conventional manners, it takes a great of time and efforts to know that it affects the each raw materials for friction characteristics. For the purpose of examining the effect of each major raw materials, we used the more convenient Taguchi L9(3⁴) orthogonal matrix and 1/5 scale dynamo machine for evaluation of the friction characteristics of composite brake pads.

1. 서론

자동차의 브레이크는 차량의 운동에너지를 다른 형태의 에너지(마찰열)로 전환시키는 장치이다. 승용차에 사용되고 있는 것은 엔진브레이크를 제외하면 차량의 운동에너지를 마찰에 의해 열로 변환하여 대기중에 발산시키는 장치로서 Disc Brake 또는 Drum Brake가 이에 해당된다. 1980년대 중반까지 마찰재의 강화재로 많이 사용되던 석면은 우수한 열적 안정성과 높은강도, 저렴한 가격으로 마찰재에 많이 사용되어 왔으나, 1980년대 후반 석면이 미국환경보호국(EPA)에서 발암물질로 보고함에 따라 비석면계 마찰재가 개발되었다.¹⁾

주로 유기 Matrix를 사용하는 자동차 브레이크용 마찰재는 결합제(Binder)로 사용되는 수지와

* 한국해양대학교 대학원

** 한국해양대학교 기계소재공학과

강화용 섬유(Reinforcement fiber), 마찰조정제(Friction modifier), 연마제(Abrasive), 충전제(Filler)로 구분되는 10~20여종의 기본원료로 구성되는 복합재료로, 각 원료의 종류와 배합방법, 그리고 제조공정에 따라 Pad의 마찰특성이 결정된다.²⁾

따라서 이러한 수많은 재료들의 특성을 평가하는데 있어서 고전적인 실험방법은 많은 노력과 경제적 손실이 뒤따르는 것이 필연적이다. 예를 들면 완전요인 실험으로 4가지 항목의 각각의 3가지씩 변수를 가진다면 3⁴=81회의 실험을 실시하여야 한다. 그러나 다구치 실험계획법을 이용하여 가법모델을 근거로 한 통계학적 실험법을 사용하면 이것은 9회의 실험으로 완전요인 실험과 같은 효과와 정확성을 보장받게 된다. ³⁾⁴⁾

다구치 공법은 강건설계(Robust Design)이라고도 하며, 품질에 관계되는 여러 가지 요인들 중에서 가장 영향이 큰 인자를 골라 최적화 함으로써 품질을 개선하는 품질공학의 한 방법이다.⁵⁾

따라서 본 실험에서는 다구치 실험계획법을 이

용하여 복합재료 자동차 브레이크용 마찰재의 각각의 원재료가 전체의 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 실험장치 / 방법

2.1 실험방법

2.2.1 마찰재 배합 구성비

일반적으로 자동차용 마찰재는 10~20여가지의 재료를 사용하여 제조하나, 본 연구에서는 기본 원재료의 마찰특성을 조사하기 위해 제조에 필요한 15종의 재료를 사용하여 실험계획법의 L9(3⁴)의 배열을 이용하기 위한 조성을 배치하였다.

Table 1. Factors and level of raw materials

		Level (V%)		
		1	2	3
A	Aramid Fiber	16	8	0
	Ceramic Fiber	0	8	16
B	Xylene Modified Resin	18	9	0
	Phenolic Straight Resin	0	9	18
C	Solid lubricant	10	8	6
	Friction modifier	6	8	10
D	BaSO ₄ (Filler)	33	16.5	0
	CaCO ₃ (Filler)	0	16.5	33
	Others	-	-	-

이 때 초기단계의 인자 상호작용은 무시하였다. Table 1에서 A,B,C,D이외의 나머지 성분들의 구성비는 v%기준으로 각 실험당 일정비로 고정시켰다.

Table 2. L9(3⁴) Orthogonal matrix table

No.	The array of factors and level			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	2	1
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

2.2.2 마찰재의 제조방법

시험편의 제작은 Weighing, Mixing,

Pre-forming, Hot pressing, Curing의 순서로, 9 가지 배합비에 따라 평광한 후 600초간 Mixing 하여 섬유를 개면하여 Balling 현상이 없음을 확인하였다. 그 후 예비성형하고 150ton 성형Press로 온도 140℃, 성형압력 400kgf/cm²의 조건으로 10분간 성형하였다. 열처리 공정에서는 공기 대류식 가열로에서 온도 300℃에서 6시간 동안 유지하였다. 승온속도는 열처리 공정에서 주요 변수로 작용한다. 6) 승온 속도가 너무 크면 부풀음 현상이 발생하므로 본 연구에서는 3℃/min의 승온속도로 행하였다.

2.2.3 시험기 / 시편 제조

본 실험에서 사용한 시험기는 1/5 Scale dynamo meter⁷⁾로서 Caliper type형 입출력 자동 제어 시스템으로 임의의 설정온도 / 습도에서 기본 성능 시험 및 마모시험을 자동 수행가능하고 제동 중 Sound press level 및 Noise 분석이 가능한 시험기이다.

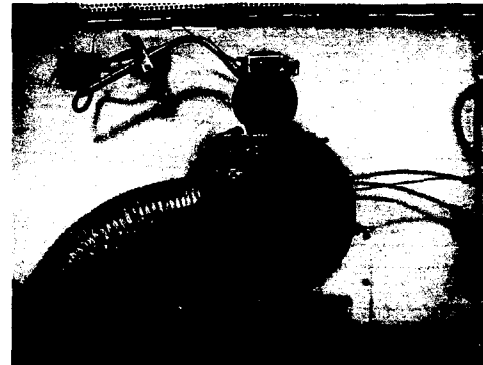


Fig. 1. The configuration of the braking systems.

Fig. 1에서 보여지는 바와 같이 중앙에 원형의 Disc에 온도측정을 위한 Thermo couple을 4.5cm의 길이로 원주방향으로 삽입하고 Caliper를 장착하게 된다. 여기에 진동Hz를 측정하기 위한 진동자와 dB을 측정하기 위한 Micro phone이 위치하고 있고 주위에는 온/습도 조절을 위한 환풍장치가 장착되어 있다.

본 시험기의 최대 관성은 0.3kgfms², 최대 RPM은 3,500rpm이며, 최대액압 150kg/cm²으로 최대 토크 35kgfm(감속도 1.14G상당)까지 가능하다.

Table 3. Test mode of 1/5 scale tester

Test name	Test pattern	Speed (km/h)	Brake Time	Deceleration(G)	Temp(°C)/Time(sec)
Preburnish	Time	50	10	0.3	120sec
1st Eff.	Temp.	50/100	8/8	0.1~0.8	80°C
Burnish	Temp.	65	50	0.35	150°C
2nd Eff.	Temp.	50/100/130	8/8/8	0.1~0.8	80°C
1st Rebur.	Temp.	65	15	0.35	120°C
Emergency	Temp.	80	4	0.1~0.25	80°C
Base line	Temp.	50	3	0.3	80°C
1st Fade&reco.	Time	100/50	9/15	0.45/0.3	120sec
2nd Rebur.	Temp.	65	15	0.35	120°C
Base line	Temp.	50	3	0.3	80°C
2nd Fade&reco.	Time	100/50	14/15	0.45/0.3	120sec
3rd Rebur.	Temp.	65	15	0.35	80°C
3rd Eff.	Temp.	50/100/130	8/8/8	0.1~0.8	80°C

시험편은 45mm×18mm×5t의 규격으로 성형한 Brake pad를 절단하여 마찰면은 연마지석으로 일정하게 표면 연마하였다.

2.2. 시험방법

Table 1의 조성을 다구치 직교배열 L9(3⁴)을 이용하여 인자를 섬유, 수지, 윤활제/마찰조정제, 충전재로 각각 4개로 분류하고 각 인자별 수준을 3가지로하여 9개의 시험편을 제작하여 실험하였다. 이 때 각 인자별 수준의 배치는 두 종류별로 묶어 고정하였는데, 이는 각각의 특성이 다른 인자에 영향을 미치는 것을 배제하고 보다 알맞은 배합의 영향을 조사하기 위함이었다.

본 연구의 1/5 Scale dynamo tester 시험은 소형 승용차의 Front brake system을 기준으로 JASO C 406 P1 mode를 기본으로하여 변경된 방법을 사용하였다. 이를 Table 3에 나타내었다. 이때 시험 제원은 Test Inertia 0.3kgfms², Tire effective radius 160mm, Rotor radius 55.0mm, Cylinder area 3.88cm²로 일반 2,000-3,000cc급의 승용차를 기준으로 한 것이다.

효력시험(Effectiveness)은 Torque 일정 제어방식으로 하였다. 설정 Torque는 제동 감속도 0.1~0.8G 상당의 범위로 측정점을 8점으로 하고 마찰계수 μ 는 다음과 같이 계산하였다.

$$\mu = \frac{T}{2APr} \quad (\text{Eq. 1})$$

이 때, A : Wheel cylinder area(m²)
 T : Braking torque (kgf·m)
 P : Braking press (kgf/cm²)
 r : Tire effective radius (m)

으로 시험시 매회 제동시 Torque와 Press가 측정되어 μ 가 자동계산되고, 각 항목의 평균 μ 를 산출하여 실험 Data로서 활용하였다.

실험 후 마모량은 시험전후 두께를 각각 3점의 두께를 mm단위로 소수점 3자리까지 마이크로미터로 측정하고 평균치의 차이에 의해 계산하였다. 그리고 각 마모무게(g)를 역시 소수점 3자리까지 전자저울로 측정하였다.

Fade율은 고온하에서 마찰계수의 지속적인 유지성을 나타내는 것으로 평가기준은 Base line 마찰계수와 Fade시 최저 마찰계수와와의 비이다.

Noise index %는 전체 제동 횟수를 기준으로 70dB이상의 Noise 회수를 기준으로 평가하였다.

각 실험에서 얻어진 Data는 전체 평균마찰계수, Pad 마모량, Fade율, Noise index의 각 인자별 S/N비(Signal-to-noise ratio)를 산출하고 분산분석(ANOVA : Analysis of variance)표로 정리하여 각 인자의 기여% 및 최적의 조건을 찾아내었다.

3. 실험결과 / 고찰

3.1 실험결과

각 실험별 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Data of each experiment

Test No	Mean Friction coefficient	Pad wear (mm)	Noise rate (%)	Fade rate (%)
1	0.41	0.211	0.6	90
2	0.402	0.316	62.7	90
3	0.422	0.335	30	93.6
4	0.466	0.338	9.9	86
5	0.428	0.267	67	98.5
6	0.443	0.272	46.2	100
7	0.473	0.229	14.3	97.5
8	0.515	0.276	13	84.5
9	0.436	0.285	16	100

3.2 평균마찰계수의 결과 / 고찰

평균마찰계수의 Data를 망대특성(Lager-the-best type characteristic)으로 평가하여 마찰계수를 높이는데 가장 기여를 하는 인자를 Table 5의 분

산분석표로 나타내었다.

Table 5. The ANOVA of mean friction coefficient S/N ratio in experiment.

Factor	S/N ratio			ϕ	S	V	F	C(%)
	1	2	3					
A	-7.71	-7.03	-6.49	2	2.27	1.13	11.59	61.60
B	-6.96	-7.02	-7.26	2	0.15	0.076	0.77	4.10
C	-6.86	-7.25	-7.12	2	0.24	0.12	1.23	6.53
D	-7.44	-7.16	-6.63	2	1.02	0.51	5.22	27.77
e				0	0	-		
Total				8	3.68			
(e)				4	0.39	0.098		

본 실험에서 F비를 고려해 볼 때, 최고의 마찰계수를 나타내는 조건은 A3B1C1D4가 되고, 평균 마찰계수에 가장 영향이 큰 인자는 A인자인 Fiber였다. 그 중 Ceramic fiber의 영향이 가장 크게 나왔는데, 이는 Ceramic fiber가 내열성이 우수하여 상대적으로 내열성이 약한 Aramid fiber보다 고온에서 안정성과 자체의 화학성분상의 경도가 높기 때문에 마찰계수가 높게 안정되는 것으로 사료된다. 그리고 그 다음이 D인자인 충전제이다. CaCO₃가 33v% 첨가된 것이 마찰계수를 향상시키는 역할을 한다. 일반적으로는 마찰제와 윤활제가 마찰계수에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있지만 본 연구에서는 영향이 적었는데 이는 다른 조건에 비해 전체적으로 그 양이 작았기 때문이라고 사료된다.

3.3 마모량의 결과 / 고찰

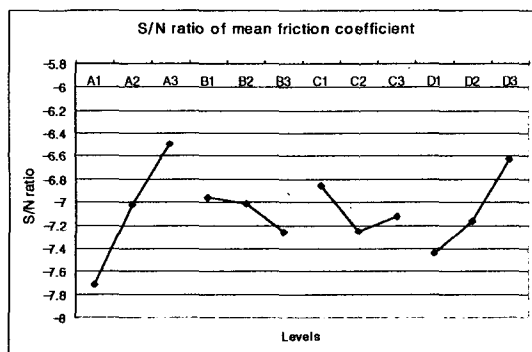


Fig. 2 S/N ratio of each factor and level for mean friction coefficient.

시편의 마모량(mm)의 Data를 망소특성 (Smaller-the-better type characteristic)으로 평가하여 마모량을 최소한으로 줄이는데 가장 기여를 하는 인자를 추출하기 위해 분산분석을 한 것을 Table 6에 나타내었다.

F비를 고려하면, 본 실험에서 마모에 가장 큰 영향을 미치는 것은 충전제, 마찰조정제가 영향을 미치는 것으로 나타났다. 가장 마모가 작을 것으로 나타나는 조건은 A3B1C1D1이 되는데, BaSO₄는 무기충진제로 내마모성에 뛰어난 효과가 나타났고, ZrO₂가 6v%, Sb₂S₃가 10v%첨가된 것이 역시 거의 같은 기여율을 나타내었는데, 이는 경도가 높은 마찰조정제의 양이 최소일때이고, 비정질 결정구조인 Sb₂S₃가 최대일 때 ; 중, 고온에서 윤활작용을 하며 마모를 줄이는 것으로 사료된다. B인자인 Binder resin은 변성수지가 Straight수지에 비해 마모성이 좋은 것으로 나타났고, 본 연구에서는 섬유유의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

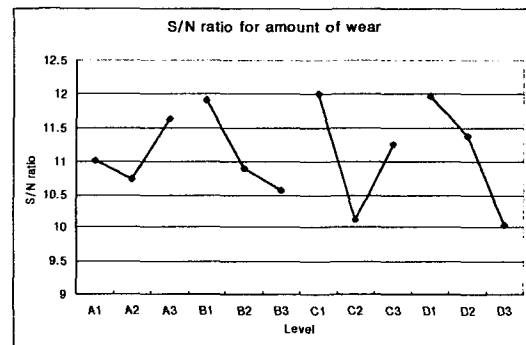


Fig. 3. S/N ratio of each factor and level for amount of mean wear.

3.3 Fade율의 결과 / 고찰

본 시험의 Fade율을 망대특성으로 평가하여 전체적으로 마찰계수의 차를 가장 작게 하는데 기여를 하는 인자를 선별하였다.

F비에 의해 인자의 기여율을 살펴보면 가장 큰 기여를 하는 인자는 68%로 충전제이고 그 다음이 B인자인 수지로 19%의 기여를 보이고 있다.

Straight 수지가 열적안정성을 보이며 안정된 마찰계수를 나타내어 Fade에는 유리한 것으로 나타났고 충전제는 반씩 혼합한 2수준이 가장 좋은 내 Fade성을 나타내었다.

Table 6. The ANOVA of amount of mean wear S/N ratio in experiment.

Factor	Amount of wear			ϕ	S	V	F	C (%)
	S/N ratio							
	1	2	3					
A	11.01	10.73	11.63	2	1.27	0.63	0.599	8.15
B	11.91	10.89	10.57	2	2.96	1.48	1.401	19.05
C	12	10.11	11.26	2	5.45	2.72	2.579	35.08
D	11.96	11.37	10.03	2	5.86	2.93	2.774	37.72
e				0	0	-		
Total				8	15.5			
(e)				4	4.22	1.06		

Table 7. The ANOVA of S/N ratio for fade rate in experiment.

Factor	Fade rate			ϕ	S	V	F	C (%)
	S/N ratio							
	1	2	3					
A	39.54	39.52	39.44	2	0.02	0.01	0.111	0.70
B	39.23	39.47	39.81	2	0.51	0.26	3.113	19.44
C	39.25	39.56	39.69	2	0.31	0.16	1.889	11.80
D	39.69	39.93	38.88	2	1.80	0.90	10.90	68.06
e				0	0	-		
Total				8	2.64			
(e)				4	0.33	0.082		

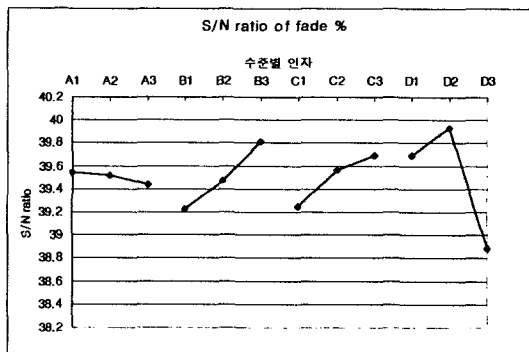


Fig. 4. S/N ratio of each factor and level for mean friction coefficient.

본 시험에서 Fade에 가장 적합한 배합은 A1B3C3D2로 나타났고, 섬유는 거의 영향이 없었다. 그리고 수지는 Straight수지를 단독으로 사용한 것이 내Fade성이 좋아지는 경향을 보였고, 고온에서는 마찰조정제의 양이 많을수록 좋은 내Fade성을 나타내었다. BaSO₄는 단독으로 사용될 때보다는 CaCO₃를 함께 사용하는 것이 내 Fade성에는 가장 좋은 것으로 나타났다.

3.4 Noise율의 결과 / 고찰

본 시험의 Noise율을 망소특성으로 평가하여 가장 작은 Noise를 나타내는 데 기여를 하는 인자는 B인자인 수지로서 49%의 기여율을 나타내었다. F비를 살펴보면 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났고, C인자의 마찰조정제가 역시 어느정도 영향을 나타내었다. 일반적으로 마찰조정제의 양이 지나치면 Noise에 상당한 악영향을 주고 대면공격성이 크게 나타난다고 알려져 있지만 본 시험에서는 그 양이 상대적으로 작아 수지의 영향보다는 작은 것으로 나타났다.

Table 8. The ANOVA of S/N ratio for noise rate in experiment.

Factor	Noise rate			ϕ	S	V	F	C (%)
	S/N ratio							
	1	2	3					
A	-20.35	-29.81	-23.16	2	144.85	72.42	0.80	11.65
B	-12.86	-31.58	-28.97	2	616.88	308.44	3.39	49.60
C	-17.05	-26.65	-29.72	2	282.41	131.21	1.44	21.10
D	-18.72	-30.78	-23.91	2	219.55	109.78	1.21	17.65
e				0	0	-		
Total				8	1243.69			
(e)				4	564.40	91.10		

최적의 배합구성은 A1B1C1D1으로 나타나는데, 섬유는 Aramid 섬유보다 상대적으로 경도가 높은 세라믹섬유가 Noise에는 유리하지 않고, 수지는 결합력이 강한 Straight수지가 변성수지보다는 Noise에 좋지 않았다.

C인자의 마찰조정제의 양은 6v%, 고체윤활제 10v%가 가장 좋은 수준으로 나타났는데 이는 고체윤활제의 양이 많을수록 Noise에 대해 좋았다. 충전제는 BaSO₄단독으로 사용한 것이 좋은 결과로 나타났다.

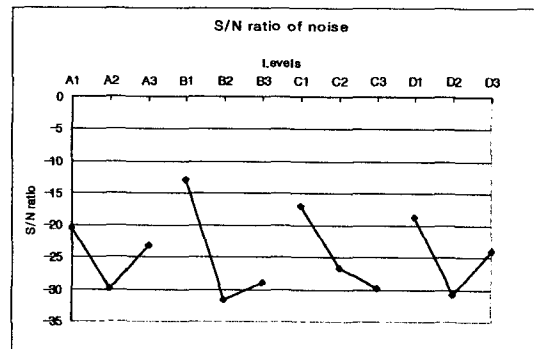


Fig. 5. S/N ratio of each factor and level for mean friction coefficient.

4. 결 론

다구치 L9(3⁴) 직교배열을 이용하여 마찰재의 마찰특성에 대해 실험한 결론은 다음과 같다.

1) 본 시험에서 평균마찰계수를 높이는데 가장 큰 인자는, Aramid 섬유보다 상대적으로 경도가 높고 내열성이 우수한 Ceramic fiber 16v%가 첨가된 인자였고 다음이 충전재 순이었다. 충전재는 CaCO₃의 양이 많을수록 평균마찰계수가 높아지는 경향을 나타내었다.

3요인중 평균마찰계수를 상승시키는데 가장 효과가 큰 인자 배치는 A3B1C1D3였다.

2) 성능시험 전체기준으로 평균 마모량을 최소화하는 데 효과가 큰 인자 배치는 A3B1C1D3였고 이 중 기여율이 가장 큰 인자는 충전재와 마찰조정제였다. 각각 37%와 35%로 거의 비슷한 기여율을 나타내었고, 수지 또한 19%의 기여율을 나타냈다. 1)결과에서의 평균마찰계수와는 달리 BaSO₄가 많을수록 마모에는 큰 영향을 주는 경향을 띄었는데, 이는 마모와 마찰계수가 반비례하는 특성을 그대로 반영하는 결과였다.

3) Fade율을 최소화하는데 효과가 큰 인자의 수준 배치는 A1B3C3D2였고, 이 중 가장 큰 기여인자는 역시 충전재가 68%였고, 수지가 19%의 기여율을 나타내었다. 충전재는 각각 16.5v%씩 섞인 수준이 가장 좋은 내Fade율을 나타내었고, 그 다음은 Straight수지의 양이 증가할수록 좋은 내Fade성을 나타내었다.

4) Noise를 최소화하는데 효과가 큰 인자의 수준 배치는 A1B1C1D1으로 나타났다. 이 중 가장 큰 기여인자는 49%의 수지로 역시 변성수지가 Noise에 좋은 것을 알 수 있었다. 그 다음이 21%의 C인자로서 고체윤활제의 양이 증가할수록 Noise에 좋은 경향을 나타내었다. 이는 상대적으로 경도가 높은 마찰조정제의 양이 많을수록 Noise에는 불리한 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

5. 후 기

본 연구는 상신브레이크 공업(주)지원에 의해 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) A.E. Anderson, "Friction Materials Performance Issues", in Proceedings of Fibers in Friction Materials Symposium, Friction Materials Standard Institute, 1987.
- (2) 상신브레이크 기술연구소 "마찰재 Aramid 섬유 대체기술 개발"1995.
- (3) Madhav.S.Phadke, "Quality Engineering using Robust Design", AT&T Bell Lab. 1992
- (4) G.S. Peace, "Taguchi Methods. A Hands-On Approach to Quality Engineering," Addison - Wesley, 1993.
- (5) 矢野 宏 "おはなし品質工学-タグチメソッド入門-", 日本規格協會,1990.
- (6) Katushiro Shibata, Akira Gato, Satoshi, Yoshida, Yuichi Azuma, and Koji Nakamura, "Development of Brake Friction Materials", SAE Tech. Series, 930806
- (7) KS R 4024 -1994, JASO C418-91, ISO 7881-1987(Road vehicles-Brake linings - Evaluation of friction Coefficient Identification), SAE J661 AUG87(Brake Lining Quality Control Test Procedure) and SAE paper 710249.