

다꾸치법에 의한 무섬유 세라믹 브레이크 마찰재의 제조변수에 대한 고찰

여정구 · 최성철[†]
한양대학교 세라믹공학과

Investigation of Manufacturing Parameters for Non-fibrous Ceramic Brake Pads using Taguchi Method

Jeong-Gu Yeo and Sung-Churl Choi[†]

Department of Ceramic Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(2003년 8월 8일 받음, 2003년 12월 19일 최종수정본 받음)

Abstract In the present study, ceramic brake pads without fiber phases were manufactured by the low temperature heat treatment below 700°C. The manufacturing parameters of ceramic brake pads and those levels were investigated by the analysis results of signal-to-noise ratios, ANOVA based upon the Taguchi method. The ceramic brake pads prepared in the M₉ experiment had a friction coefficient of 0.30~0.55 very close to the target coefficient (0.35~0.45) of commercial brake pads utilized in the automobiles. The frictional properties of ceramic brake pads could be stabilized with the adjustment of amounts of lubricating additives. The optimum preparation conditions as well as batch formulations for the fabrication of non-fibrous ceramic brake pads were finally determined using Taguchi method in this study.

Key words Ceramic brake, Taguchi method, Friction, Wear

1. 서 론

브레이크 마찰재료는 자동차의 여러 부품 중에서도 운전자의 안전과 관련하여 품질의 신뢰성(reliability) 및 내구성(durability)이 요구된다. 운전시의 다양한 환경과 운전자의 습성에 상관없이 일정한 제동력을 가져야하기 때문에 마찰재의 개발에는 많은 시간과 노력이 뒤따른다. 지금까지의 브레이크 마찰재료는 석면섬유(asbestos fibers)를 강화재로 사용하는 유기 마찰재를 사용해왔으나, 석면 자체의 환경문제 및 인체 유해성에 따른 문제점의 제기로 석면 사용규제가 국내외적으로 점차 강화되었고 현재는 석면섬유를 대체할 수 있는 새로운 마찰재료의 개발을 위해 노력하고 있는 실정이다.¹⁾ 석면 섬유의 대체 재료로서는 아라미드 섬유, 금속 섬유, 유리 섬유, 탄소 섬유 등이 개발되고 있으나,^{2,3)} 석면 섬유에 비해 제조 원가의 상승과 석면에 준하는 제품특성의 발현 등 여러 가지 면에서 개선이 필요한 상태이다. 다른 연구노력으로써 고가의 섬유 사용량을 줄이는 대신 석면에 준하는 마찰특성을 가지는 세라믹 재료를 그 대안으로 강구하게 되었다.

세라믹 마찰재는 마찰재의 경량화로 에너지절감 효과가 있고, 유기 마찰재의 약점인 내열성 부족으로 인한 과마모 현상^{4,5)}을 극복할 수 있으며, 고온에서 마찰계수가

급격히 떨어지는 fade 특성⁶⁾을 극복할 수 있다. 또한 여러 온도범위에서 일정한 마찰계수를 보이고 있어 제동의 안전성이 뛰어난 장점 등을 가지고 있다. 그러나, 세라믹스의 높은 경도로 인한 대면공격성 현상과 제동소음의 증가 등의 문제점들이 남아있으며, 세라믹스가 갖는 고유한 특징인 고융점의 강한 결합력은 유기계 마찰재보다 좋지 못한 제조성(manufacturability)을 나타내 아직까지 많은 개선이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 석면의 대체재로써 세라믹스를 사용하여 브레이크 마찰재의 제조를 목적으로 원료의 배합조성 및 제조공정조건을 확립하고자 한다.

브레이크 마찰재에는 여러 기능을 하는 다양한 재료들이 혼합되어있으며, 크게 나누어 내열성을 갖는 열경화성(thermosetting) 페놀수지(phenolic resin) 류의 결합재(binders), 기계적 강도를 부여하는 섬유상(fibers)들로 이루어진 구조재, 충전재(filler), 그리고 마찰성능을 조절하기 위한 첨가제(lubricants) 등으로 구분된다.⁷⁾ 각각의 구성 성분들이 마찰재의 성능, 즉 기계적 특성 및 마찰마모성능에 미치는 역할은 상호 보완적으로 충전재인 BaSO₄가 마찰성능에도 기여하는 등의 복합적으로 작용하게 된다. 바꾸어 말하면, 여타 제조부품과 달리 다양한 재료들(섬유질, 세라믹스, 금속 등)의 혼합체로 이뤄진 마찰재의 경우, 어느 하나의 성분이 최종물성에 미치는 효과를 개별적으로 분별하기 어려우며, 원료가 갖는 고유한 물성과 제조공정조건과의 상호작용을 고려한다면 단

[†]E-Mail : choi0505@hanyang.ac.kr

순한 물성치의 나열만으로 그 배합조성을 결정하는 작업은 매우 장시간의 반복실험이 요구됨을 예상할 수 있다. 지금까지의 많은 연구노력이 시행착오(trial and error)적 반복실험에 국한되었으며, 실제 브레이크 제작현장의 기술이 그러한 경험률에 바탕을 두고 있는 실정이다. 이러한 애로점을 해소하기 위해 본 연구에서는 품질관리를 위한 강건설계(robust design) 기법으로 산업현장에서 사용되고 있는 다투치 방법(Taguchi method)을 이용하였다.

다투치 실험계획법은 예상되는 제어인자(control factors)와 그 수준(levels)에 따라 상대적으로 적은 수의 실험만으로 각 인자들이 제반물성에 미치는 영향을 파악함으로써 최적 설계할 수 있는 장점을 지니고 있다.^{8,9)} 또한, 기존 제조공정상의 애로점들을 그대로 유지한채 주된 공정변수를 변화시킴으로써 최종산물의 특성을 최대화시킬 수 있다는 점에서 산업현장에서 널리 쓰이고 있다.¹⁰⁻¹²⁾ 최종적으로 본 연구에서는 세라믹 브레이크 마찰재의 개발을 위해 다투치법을 이용하여 마찰재를 구성하는 주요 성분들의 조합수준을 결정하고, 제조공정상의 각 인자들의 상대적인 기여도를 조사하였다. 실험결과치의 분석을 위해서 확률통계적 분산분석법(analysis of variation, ANOVA)과 신호대 잡음비(signal-to-noise ratios)를 이용하였으며, 궁극적으로는 마찰재 제조를 위한 최적화된 공정조건을 확립함으로써 세라믹 브레이크 마찰재의 활용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 다투치법에 의한 실험계획

다투치 실험계획법에 있어서 M_9 (3^4) 형태의 직교배열을 사용하였다.⁸⁾ 제어인자 4개를 설정해 각 제어인자당 3개의 수준을 결정하여 총 9번의 실험을 시행하는 방식으로, 각각의 제어인자와 수준은 마찰재의 제조공정조건에 근거하여 설정하였다. 본 연구에서는 총 두 번의 실험(각각 'M₉' 과 'N₉' 으로 명명함)을 행하였으며, 각각의 인자와 수준은 Table 1과 Table 2에 나타내었으며, 각 인자와 수준에 따른 실험계획을 Table 3에서와 같이 M_9 직교배열표(orthogonal array table)를 사용하였다.

Table 1. Control factors and those levels in the M_9 (3^4) experiment

Level	Factor	SiC (vol%)	Mixing	Temperature (°C)	Resin fraction (%)
	A	B	C	D	
1	3	Wet (45min)	550	18	
2	5	Dry (45min)	600	28	
3	10	Dry (45min)	650	40	

Table 2. Control factors and those levels in the N_9 (3^4) experiment

Level	Factor	Temperature (°C)	Resin fraction (%)	Graphite fraction (vol%)	Cokes fraction (vol%)
	A	B	C	D	
1	550	18	0	0	
2	600	28	8	6	
3	650	40	16	12	

Table 3. Orthogonal array table used in the M_9 (3^4) and N_9 (3^4) experiments

Exp. No.	Factor	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	1	2	
7	3	1	3	2	
8	3	2	1	3	
9	3	3	2	1	

2.1. M_9 (3^4) 실험계획

기존에 나와 있는 연구보고에 의하면, ZrO_2 , Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 , ZrB_2 , TiB_2 , BN 등의 분말을 첨가해 마찰재의 마찰계수를 높인 시도가 있었으며, 이런 재료들의 마찰계수는 대략적으로 0.1~0.8의 범위에 있었다.¹³⁻¹⁶⁾ 이중 높은 경도값을 가진 SiC 를 첨가하여 마찰성능의 향상을 꾀하고자 하였으며, SiC 첨가량을 첫번째 인자로 하였다. 두 번째 제어인자로서 혼합방식을 고려하였다. 7, 8종 이상의 원료가 혼합되는 마찰재의 특성상 혼합효율이 중요하다고 판단하였으며, 습식 및 건식 혼합법을 상호 비교·평가하였다. 준금속(semi-metallic) 및 석면계 마찰재의 실제조공정에서는 주로 V형 혼합기(V-mixer)가 사용되고있으며, 본 실험에 있어서 V형 혼합기를 사용하는 경우 많은 양의 원료가 필요로 하고 원료의 손실이 많기 때문에 그와 비슷한 효과를 얻을 수 있는 건식 분쇄방식으로 대체하였다. 그리고, 1차 열처리 온도 조건에 대하여 조사하기위해 $600 \pm 50^\circ C$ 의 온도를 세 번째 제어인자로서 정하였다. 이후에 보여주는 M_9 실험결과에 따라, $600^\circ C$ 이상의 고온에서 성형한 시험편을 제조하여 마찰재의 강도 보안을 위한 실험도 행하였다. $800^\circ C$ 까지의 온도에서 열처리하여 제조한 시험편의 물

성을 분석하였으며, 다른 제조공정과 조성은 M_9 실험계획과 동일하게 수행하였다.

마지막으로 종래에 결합재로 사용되던 열경화성 페놀수지(phenolic resin)의 사용을 검토하였다. 본 실험에서 제조한 마찰재는 종래의 강화성분인 섬유상을 배제하고 세라믹스를 주된 지지상으로 구성하였으며, 이러한 구성성분의 변화는 제조공정에 있어서 낮은 성형온도와 세라믹스의 높은 용점으로 인해 시험편의 취급(handling)에 있어 어려움이 발견되었다. 이에 수지(resin)의 고형분량을 달리하면서 그 영향을 고찰하였다.

2.2. N_9 (3^4) 실험계획

앞서 계획하였던 M_9 실험결과를 토대로, N_9 (3^4) 실험의 제어인자와 수준을 결정하였다. 특히, 고체 윤활재로 많이 사용되는 황수연석(molybdenite, MoS_2) 성분 대신 흑연(graphite)과 코크스(cokes)를 첨가하여 마찰성능의 개선을 도모하였으며,¹⁷⁾ 다른 제조공정은 M_9 실험계획과 동일하게 진행하였다.

3. 실험 방법

본 연구에서는 석면(asbestos) 섬유를 대체할 세라믹스 원료로서 기존의 브레이크 제품의 충전재(filler)로 주로 사용되고있는 $BaSO_4$, $CaCO_3$, Al_2O_3 , ZrO_2 등의 원료분말들을 활용하였다. 마찰성능을 조절하기위한 SiC 및 충전재료 등의 세라믹 분말 이외에 Al , Cu 와 같은 금속분말, 흑연(graphite), 코크스(cokes) 등의 윤활제(lubricants)를 각각의 실험계획에 따라 조합하여 사용하였다. 각각의 원료들은 국내 브레이크 마찰재 제조업체에서 사용하고있는 원료들이며, 세라믹 분말의 경우 수십 μm 의 직경을 갖는 저품위 분말들을 실험에서 사용하였다.

시험편의 제조를 위해서, 먼저 세라믹 원재료와 금속분말, 윤활제 등을 각각의 실험계획법에 따라 정해진 배합 비율로 칭량하였다. 이때, 세라믹 분말들은 $CaCO_3$ 는 20 vol%로, Al_2O_3 는 5 vol%로, 그리고 ZrO_2 는 10 vol%로 고정시키고 남은 양은 충전재로 쓰이는 $BaSO_4$ 로 채웠다. 지르코니아 볼을 사용하여 건식 혹은 습식 분쇄방식으로 24시간 혼합한 후, 성형성을 향상시키기 위해 poly(vinyl alcohol) (PVA, $Mr = 9,000 \sim 10,000$, Aldrich) 5wt% solution을 혼합분말에 첨가하여 바(bar) 형태의 시험편을 500 kgf/cm^2 압력으로 성형하였다. 성형편은 각각의 온도에서 2시간동안 1차 열처리를 행한 후, 각기 다른 고형분량을 갖는 열경화성 페놀수지(Phenolite KC, Kangnam Chemical Co. Ltd., Seoul, Korea)를 60분 동안 침적(dipping)시켰으며, $80^\circ C$ 에서 2시간동안 건조하였다. 건조가 끝난 시험편을 오븐에 넣고 $180^\circ C$ 에서 5시간동안 유지시키며 2차 열처리를 행하였으며, 최종적으로 시험편의 표면 연마를 행하여 시험편을 얻었다.

제조한 세라믹 브레이크 시험편의 기계적 물성과 실용용가능성을 알아보기 위하여 마찰성능을 시험하였다. 제

조한 시험편의 겉보기 밀도를 아르키메데스 원리를 응용한 무게 측정법으로 구하였다. 시험편의 3점 곡강도(3-point flexural strength)는 만능시험기(universal testing machine, 500 kgf load cell, AGS-500D, Shimadzu, Japan)를 사용하여 측정하였다. 곡강도시험용 시험편은 $40 \times 10 \times 5.5 \text{ mm}^3$ 크기로 제작하였으며, 측정시 상부 span의 길이를 10 mm, 하부 span의 길이를 30 mm로 하였고, 0.5 mm/min 의 속도로 하중을 가하였다. 시험편의 경도는 다이아몬드 형태의 피라미드 압자(대면각 $\alpha = 136^\circ$)를 부착한 빅커스 경도계(Vickers hardness tester, DVKH-1, Tokyo testing machine MFG. Co. Ltd., Japan)를 이용하여 측정하였다. 측정을 위해 제조한 시험편을 임의의 크기로 잘라내어 경면가공을 한 후, 1 kg의 하중을 $50 \mu m/sec$ 의 속도로 15초동안 하중을 가하여 압흔을 얻어냈다.

브레이크 마찰재의 마찰성능을 시험하기위해 널리 사용되고있는 pin-on-disc 형태의 정속마찰시험기를 사용하였다.¹⁸⁾ 측정하고자 하는 시험편을 $20 \times 10 \times 5.5 \text{ mm}^3$ 의 크기로 제조하여 일정속도로 회전하는 원판에 가압하는 방식의 정속마찰 시험기(scale machine, Sangsin Brake Ind. Co. Ltd., Taegu, Korea)로 마찰계수(friction coefficient, μ)와 마모량(wear fraction, W_a), 조도(roughness, R_{max}) 등을 측정하였다. 구체적인 시험방법과 조건은 다음과 같다; 테스트용 시험편을 $20 \times 10 \times 5.5 \text{ mm}^3$ 크기로 제작하여 500 rpm으로 회전시키면서 1 kg/cm^2 의 페드면압을 받는 동안에 100회 제동하는 방식으로 상대재(FC25 rotor, 60 mm diameter)에 대해 실험하였으며, 이때 운전 모드는 자동, 관성이며 시간주기는 25초였다. 마찰시험이 끝난 시험편에 대해 주사전자현미경(SEM, JSM-840A, JEOL, Japan)으로 마찰면을 관찰하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. M_9 (3^4) 직교배열표에 따른 실험계획법

M_9 실험계획에 따라 제조한 시험편의 겉보기 기공율을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 전체적으로 시험편의 겉보기 기공율은 20~40% 정도의 값을

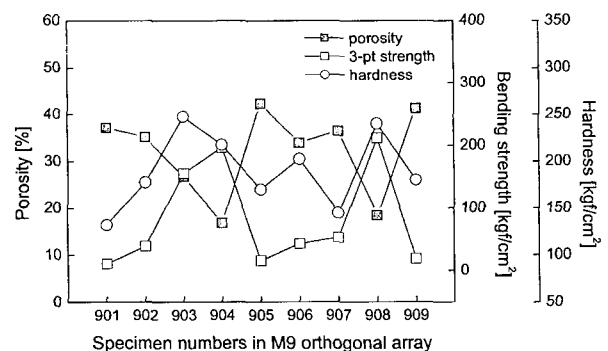


Fig. 1. Apparent porosities and mechanical properties of the specimens prepared in the procedure of M_9 experiment.

보였으며, 일반적인 세라믹스의 열처리 과정에서 보여주는 밀도치와 비교해보면 상대적으로 낮은 밀도를 갖는 것을 알 수 있었다. 이는 본 연구에서 제조한 브레이크 테스트용 시험편의 치밀화가 거의 일어나지 않은 것으로 판단할 수 있으며, 이것은 제조시 선택한 열처리온도가 700°C 미만으로 치밀화 과정을 유도하기엔 낮은 온도이었기 때문으로 사료된다. Fig. 1에서 보여준 기공율 값을 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, S/N ratio)로 환산하여 각각의 공정변수가 기공율에 미치는 영향을 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 2A에 나타내었다. 신호대 잡음비는 제품의 특성치에 대한 제어인자들의 상대적 기여도(contribution)를 수치화한 것으로, 제조공정상의 주요 변수들의 설계에 있어 공정변수에 대한 특성치의 강건성(robustness)을 표시하는 척도이다.⁸⁾ Fig. 2A에서 보듯이 D 인자인 수지상의 변화에 매우 민감하게 변화하는 거동을 보여주었다. 이러한 결과로부터 페놀수지의 침적(resin dipping) 과정에서 세라믹 기지상 내부로 스며들어 간 수지가 열처리후 고형분만이 내부에 잔존하게되어 내부의 기공을 제거하는 것으로 추측되며, 이러한 효과는 높은 고형분량일수록 커지게 되어 적절한 함량을 지닌 수지상의 사용이 매우 중요함을 짐작할 수 있었다.

세라믹 마찰재의 기계적 특성을 만능시험기와 빅커스 미세경도시험기를 사용하여 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 기공율과 함께 나타내었다. 굴곡강도(flexural strength)와 경도(hardness) 값은 각각 5번 이상 측정을 행하여 그 평균값을 구하였다. Fig. 1에서 보듯이, 강도와 경도는 전

반적으로 비슷한 경향을 보여주고있으며, 특히 수지(resin)의 고형분양이 많을수록 즉, 40% resin을 사용한 3, 4, 8번 시험편이 높은 수치를 보이고 있었다. 기존의 연구결과에서 유기계 브레이크 패드의 경우 350~500 kgf/cm²의 강도치를, 그리고 실생산되고 있는 국내 비석면계 브레이크 패드가 250~400 kgf/cm²의 굴곡강도값을 가지는 것으로 알려져있으며,¹⁹⁾ 본 실험에서 제작한 세라믹 브레이크는 그보다 약간 낮은 강도를 보이고있음을 알 수 있었다. 향후 취급용이성 및 내구성을 고려할 때 기계적 물성을 향상시킬 연구가 필요할 것으로 사료된다.

기공율의 분석예와 마찬가지로, 각각의 제어인자가 강도 및 경도에 미치는 영향을 신호 대 잡음비(S/N ratio)로 환산하여 Figs. 2B와 2C에 나타내었다. 각 제어인자의 수준별 신호 대 잡음비의 변화에서, D 인자인 수지상의 기여도가 가장 큰 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 앞서 기공율에서 나타난 경향과 일치하는 것이다. 또한, 앞서 Fig. 2의 결과에서 세라믹 마찰재의 밀도 및 강도 특성에 미치는 기여를 분석하였을 때, 수지상을 차지하면 성형 온도의 변화가 다른 인자들보다 상대적으로 큰 기여를 하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향성은 실제 시험편의 제조과정에서 예측할 수 있었는데, M₉ 실험계획에 따라 550°C에서 1차 열처리한 시험편은 시험편의 이송이나 다루는 도중에 깨지는 경우가 있었으며, 수지 침적처리(resin dipping) 이후에는 부서진 경우도 발견되었다. 본 실험에서 선택한 550°C의 온도는 적절한 성형강도를 부여하지 못할 것으로 생각하며, 매우 낮은 강도를 갖는 것으로 생각된다. 600°C 이상의 다른 온도에서 열처리한 시험편은 대체적으로 양호한 상태를 보이고 있으며, 어느 정도의 취급(handling) 강도를 유지하였다. 따라서, 본 조성을 갖는 무섬유계 세라믹 마찰재의 제조를 위해서는 적어도 600°C 이상의 온도에서 열처리하는 것이 바람직할 것으로 판단하였다. 그러나, 마찰재의 밀도를 향상시키기 위해 그 이상의 온도, 다시말해 700°C 이상의 고온에서 열처리하는 것 또한 적절치 못한 것으로 예상된다. 열처리 온도만을 변화시키고, 다른 제조조건은 최종적인 M₉ 실험계획법의 결과로부터 결정된 최적화된 제조조건과 동일하게 시험편을 제조하였을 때, 700~800°C의 온도범위에서 제조한 시험편의 경우 수지(resin) 침적 후 시험편 측면방향으로 균열이 발생하여 이후의 특성평가를 할 수 없었기 때문이다. 이러한 현상은 세라믹 구성성분 중 하나인 CaCO₃의 700~800°C 영역에서의 열분해반응에 기인하는 것으로 사료되며,²⁰⁾ 위 온도범위에서의 마찰재 제조는 불가능할 것으로 예상되었다.

M₉ 마찰재 시험편의 마찰마모 성능시험을 행하였으며, 그 결과를 Figs. 3, 4에 나타내었다. 마찰계수(frictional coefficient, μ)와 마모량(wear fraction, W_a)을 측정된 결과, M₉ 시험편 대부분이 $\mu = 0.35 \sim 0.45$ 의 마찰계수값을 가지고있으며, 마모량도 $W_a = 0.15$ 이하로 적은 편이었다(Fig. 3 참조). 지금까지의 연구결과에서 자동차용 브레이크 패드의 마찰계수는 $\mu = 0.1 \sim 0.8$ 정도의 넓은 폭을

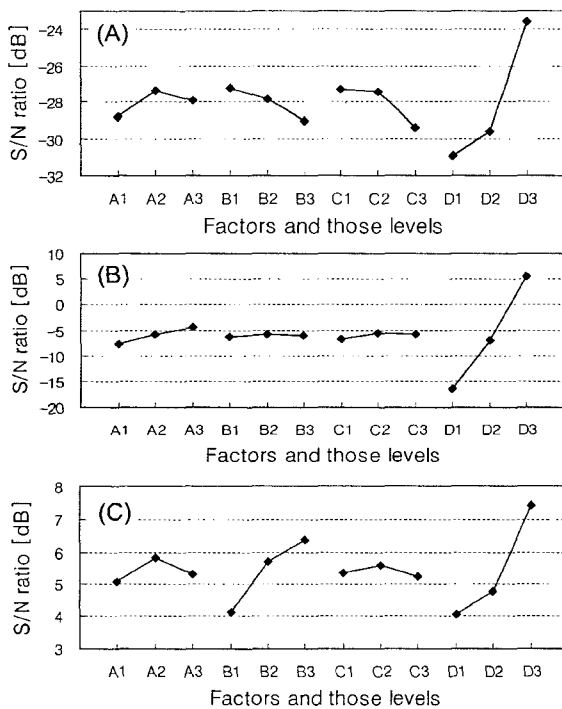


Fig. 2. Signal-to-noise ratios diagram of the properties of the specimens prepared in the procedure of M₉ experiment; (A) apparent porosities, (B) 3-point bending strength, and (C) Vickers hardness.

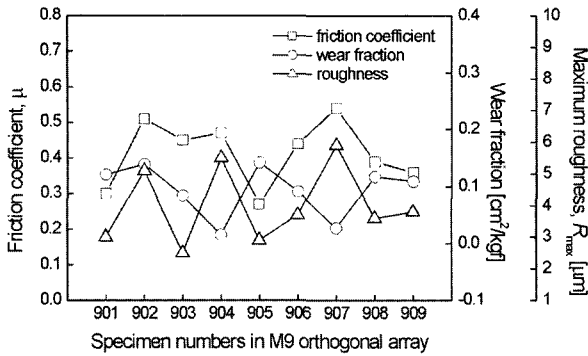


Fig. 3. Frictional properties of ceramic brake pads as a variation of specimens prepared in the procedure of M₉ experiment.

가진다고 보고되고있고, 상업적으로 북미 지역 내에서 운행되는 자동차용 마찰계수가 $\mu = 0.35 \sim 0.45$ 의 값을, 그리고 구주 및 아시아 지역에서 운행되는 자동차용 마찰계수는 이보다 약간 큰 $\mu \geq 0.45$ 의 값을 가지는 것으로 알려져 있다.²¹⁾ 마찰마모 시험을 행할 때의 다양한 환경과 시험조건에 대한 종합적인 고려를 차치하고서라도 마찰계수의 수치만을 비교하였을 때, 본 실험에서 제조한 세라믹 마찰재의 마찰마모 성능은 상용화된 자동차용 마찰계수의 요구조건에 매우 유사한 마찰계수를 가지는 것으로 알 수 있으며, 기존의 구조재로 첨가되는 석면 섬유나 금속 섬유를 배제하고 세라믹스를 주성분으로 하여 제조한 마찰재의 실용용 가능성이 높을 것으로 기대되었다. 그러나, 각 시험편마다 마찰계수의 변동폭이 커서 마찰계수를 안정시킬 부수적인 첨가물이 필요함을 알 수 있었다. 마찰계수의 변동은 마찰시험을 끝낸 시험편의 표면 거칠기를 측정된 결과에서도 예상할 수 있었다. Fig. 3에서 보듯이, 각 제조조건에 따른 시험편의 표면 거칠기는 일정한 경향성을 찾기 어렵지만, 전반적으로 마찰계수의 경향과 비슷하게 나타났다. 본 실험의 경우와 같이, 같은 재질의 금속 상대재에 대한 세라믹 마찰재의 마찰과정은 세라믹 성분들의 고강도 고경도 특성으로 인해 마찰마모 시험동안 세라믹 성분의 연삭(grinding)은 일어나기가 힘들며, 주로 연마(abrasive) 마모기구에 의해 진행된다.²²⁾ 따라서, 고강도 세라믹 연마재의 존재에 의해 마찰계수가 증가하는 동시에 마찰재의 표면거칠기도 증가하는 것으로 짐작할 수 있다.

Fig. 3에서 제조한 세라믹 마찰재의 목표값으로 정했던 마찰계수 영역에 해당하는 실험조건은 903, 906, 908, 909 등이었으며, Fig. 1에 나타난 강도와 경도 등의 시험편 특성과 연관되었을 때, 903(3% SiC 첨가, 40% 수지, 건식혼합, 650°C 열처리)과 908(10% SiC 첨가, 40% 수지, 건식혼합, 550°C 열처리)의 제조공정조건이 가장 적절한 마찰재 성능을 보이는 것으로 판단하였다. 이러한 공정인자가 마찰마모 특성에 미치는 상대적인 기여도를 조사하기위해 신호대 잡음비와 분산분석표를 구하였으며 그 결과를 Fig. 4와 Table 4와 Table 5에 나타내

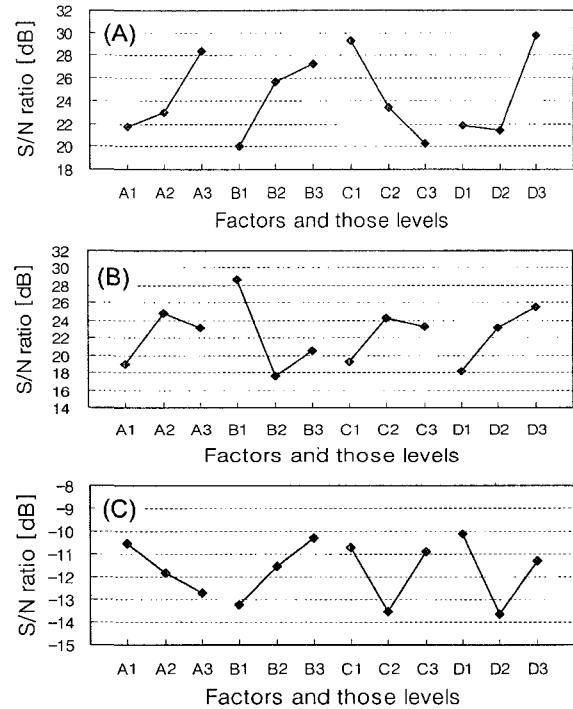


Fig. 4. Signal-to-noise ratios diagram of the properties of the specimens prepared in the procedure of M₉ experiment; (A) frictional coefficients, (B) wear fractions, and (C) maximum surface roughness.

었다. 북미지역의 자동차용 브레이크 패드의 마찰계수의 평균치인 0.40을 세라믹 마찰재의 목표값으로 정하였으며, 이 값과의 분산(variance)을 구하여 제조공정인자의 기여도를 평가하였다. Fig. 4에서 보여준 제어인자와 그 수준별 신호대 잡음비의 비교결과, 마찰계수와 마모량에 비해, 표면 거칠기에 기여하는 각 인자들의 영향도는 그 신호대 잡음비의 변동폭이 상대적으로 적어 상대적인 기여도를 비교하기 어려운 것으로 나타났다. 이에 반해, 마찰계수와 마모량과 각 인자들의 기여도는 서로 일관적인 경향을 보이지 않았으며, 대략적으로 마찰계수의 경우 C 인자인 열처리 온도와 D 인자인 수지의 기여도가 크고, 마모량의 경우 B 인자인 혼합방식의 변화가 다른 인자들에 비해 상대적으로 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. Table 4의 분산분석표의 결과에서도 이를 구체적으로 확인할 수 있는데, 세라믹 브레이크 마찰재의 성능시험평가에서 마찰계수에 가장 중요한 영향을 미치는 조건으로 D3(40% 수지)에서 가장 큰 신호대 잡음비(S/N = 29.706 dB)를 보였으며 대체적으로 다른 인자가 갖는 신호대 잡음비의 변화폭과 유사한 것으로 봐서 개별적인 인자들의 상대적인 기여도는 구별하기 어려웠다. 마찰계수의 신호대 잡음비에서 두번째로 큰 값을 갖는 C1의 조건(550°C 열처리)은 상대적으로 낮은 성형밀도에 기인하는 결과로 짐작되며, 기본적인 마찰재의 성형성 및 취급 용이성을 고려할 때 최적의 조건으로 보기 어려울 것이다. 또한, 마모량의 경우에는 B1(습식혼합)에서 S/N = 28.732 dB의 가장 큰 수치를 보였다. 이상과 같은 결

Table 4. ANOVA results from the experimentally obtained data of frictional coefficients (μ) in M_0 experiment (objective value of $\mu = 0.40$)

Factor	Average S/N ratio			Freedom	Square sum	Ave. square	F
	1	2	3				
A	21.731	22.926	28.345	2	74.50	37.275	0.93
B	20.058	25.631	27.313	2	86.506	43.253	1.07
C	29.320	23.410	20.273	2	126.606	63.303	1.57
D	21.893	21.403	29.706	2	130.229	65.114	1.62
Error				0			
(Error)				4	161.056	40.264	
Sum				8	417.890	208.945	

Table 5. ANOVA results from the experimentally obtained data of wear fractions (W_a) in M_0 experiment

Factor	Average S/N ratio			Freedom	Square sum	Ave. square	F
	1	2	3				
A	18.999	24.751	23.087	2	52.549	26.275	1.11
B	28.732	17.577	20.528	2	200.441	100.221	4.22
C	19.267	24.290	23.280	2	42.362	21.181	0.89
D	18.183	23.111	25.543	2	84.358	42.179	1.78
Error				0			
(Error)				4	94.911	23.728	
Sum				8	379.711	189.855	

과로부터, 세라믹 마찰재의 마찰마모성능은 원료의 배합 뿐만 아니라 제조공정상의 성형방식 및 열처리 조건 등에 따라 복합적인 영향을 받는 것임을 알 수 있으며, 마모 특성이 시험방법, 시험조건, 상대재료(counter materials) 및 시험편의 모양 등에 따라 바뀔 수 있는 상대적인 특성임을 고려할 때 그리 놀랄만한 사실은 아니다. 마찰성능과 앞서 조사한 시험편의 기계적 특성을 Fig. 2와 Fig. 4에서 보여준 신호대 잡음비를 비교하였으나, 마찰재의 두 특성에 미치는 인자별 상대적인 기여도의 일관성이 결여 되어 밀접한 연관성을 본 실험결과에서는 찾기 어려웠다.

M_0 직교배열표로 구성된 실험계획법에 따라 제조한 세라믹 마찰재의 물성을 분석한 결과로부터 가장 적절하다고 판단되는 제조공정조건을 확립할 수 있었다. D 인자인 수지(resin)상의 고형분량이 증가할수록 시험편의 기공율과 기계적 강도 및 경도를 증가시켰고, 마찰재의 형상유지와 관련된 기계적 물성에 가장 큰 영향을 주고있으며, 마찰성능에 미치는 효과는 다른 인자와 함께 복합적으로 기여하고있는 것으로 나타났다. A 인자인 SiC의 첨가는 마찰재의 마찰마모성능에 영향을 미치고있으며, SiC의 함량이 3, 5, 10 vol%로 증가할수록 큰 기여를 한다. 혼합방식의 변화(B인자)는 강도의 발현에 대해 다른 인자에 비해 영향이 작았지만, 습식 혼합공정보다는 건식을 사용하는 것이 마찰재의 성능과 경도 면에서 좋은 결과를 보이고있다. 성형온도(C인자)의 경우, M_0 시험편의 기계적 물성에 전반적으로 작은 영향을 미치고 최종 물성에 미치는 전반적인 기여도가 작아 본 실험계획에서

선정한 성형온도의 정확한 수준을 결정하기가 어려우며, 고온열처리시 마찰재의 열화현상을 고려할 때 대략적인 온도 범위는 600~700°C로 예상되었다. 따라서, M_0 실험에서의 최적 설계조건으로는 A3, B3, D3으로 정할 수가 있었다. 즉, SiC 분말을 10 vol%까지 첨가한 원료를 건식 공정으로 혼합하여 40wt% 수지(resin)상으로 침적시킨 성형체를 600~700°C에서 열처리하여 제조하는 것이다. 위 결과에서 마찰계수의 안정화를 도모하기 위해서는 흑연 등의 윤활재를 첨가하는 것이 필요할 것이며, 다음의 N_0 실험계획에서 그 효과를 검토하였다.

4.2. N_0 (3^4) 직교배열표에 따른 실험계획법

Fig. 3에서 나타난 마찰재의 마찰계수값의 변동폭을 줄이고자, 다른 인자들을 고정한 채 마찰성능을 향상시키는 SiC 원료 대신에 흑연(graphite)과 코크스(cokes)의 윤활재료를 첨가하는 N_0 (3^4) 직교배열표를 계획하였으며, M_0 실험과 동일한 조건하에서 성능시험을 행하였다. 이때의 제어인자와 그 수준들을 Table 3에 정리하였다. 각각의 제어인자에 미치는 상대적인 기여도를 신호대 잡음비를 구하여 Fig. 5에 도식화하였다. N_0 직교배열표에 따른 실험결과, 마찰마모 성능에 미치는 윤활효과는 신호대 잡음비의 수치를 비교로부터 M_0 마찰재의 성능에 비해 상대적으로 큰 영향을 미치지 않는 반면, 전체적으로 마모량을 줄이고 마찰계수의 안정을 가져왔음을 알 수 있었다. C 인자인 흑연(graphite)의 윤활효과는 마모량의 신호대 잡음비(S/N ratio)가 함량이 증가할수록 감소하였

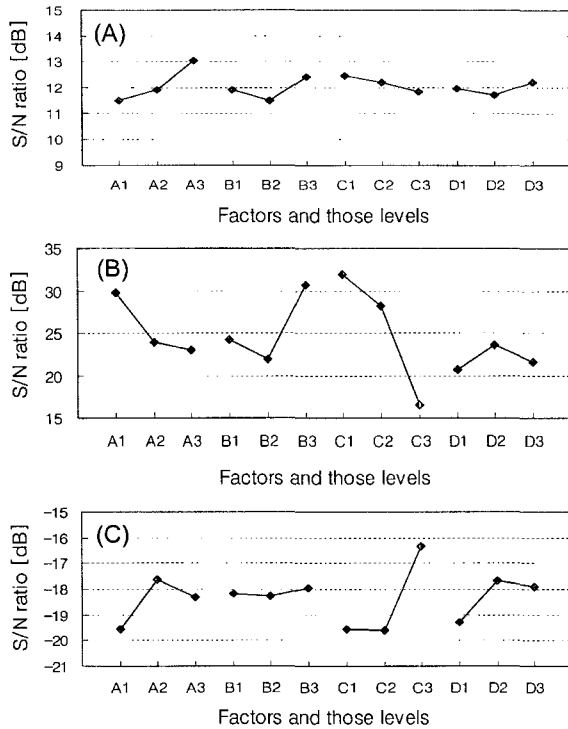


Fig. 5. Signal-to-noise ratios diagram of the properties of the specimens prepared in the procedure of N_9 experiment; (A) frictional coefficients, (B) wear fractions, and (C) maximum surface roughness.

고, D 인자인 코크스의 함량은 세라믹 마찰재의 물성에 대체적으로 기여하는 정도가 작았다. 그러나, N_9 실험계획에 따라 제조한 세라믹 마찰재는 윤활재의 사용으로 인하여 전반적인 마찰계수(μ)값이 0.12~0.20 정도로 측정되어, M_9 실험계획에 따라 제조한 세라믹 마찰재의 마찰계수값보다 낮으며 마찰계수의 목표치($\mu = 0.35 \sim 0.45$)와도 약간의 차이가 있었다. 이러한 결과는 N_9 실험에 있어 M_9 실험의 마찰재 성분보다 다량의 윤활재가 조합되어 마찰마모과정동안 충분한 윤활작용으로 마찰계수의 안정을 가져온 것으로 판단된다. 또한, N_9 실험계획법에 따라 제조한 세라믹 마찰재의 낮은 마찰계수값은 마찰계수의 성능을 크게 좌우하는 마찰재의 함량과도 연관성이 있는 것으로 생각된다. 고강도 세라믹스(예를 들어, SiC 성분)의 첨가는 연마(abrasive) 마모기구에 의한 마찰계수의 증가 효과를 가져온다고 알려져 있다.²²⁾ 그러나, 그러한 마찰계수의 증가를 가져오기 위해서는 마찰재 원료 조성에 고강도 세라믹스를 충분한 양만큼 첨가해야 할 것으로 생각된다. 실제로 N_9 실험에서 첨가한 윤활재의 양은 SiC 첨가량 (N_9 실험의 경우 5%로 고정하였음) 보다 3배 이상(최대 16%) 첨가되었으며, 이러한 윤활재의 공급이 N_9 마찰마모시험에서 세라믹 마찰재의 마찰계수값을 $\mu = 0.12 \sim 0.20$ 으로 M_9 실험치보다 낮춘 것으로 이해할 수 있다. 앞서 행했던 마찰계수의 신호대 잡음비의 비교결과로부터 SiC 함량의 최적조건이 3% (M903 시편) 또는 10% (M908 시편) 임을 알 수 있었



Fig. 6. Scanning electron microphotographs of the surface in specimen prepared in the experimental procedure of $N90$ followed by the frictional test.

으며, M_9 실험에서 SiC 첨가량이 3~10%까지 변화시켰을 때 마찰계수의 변화는 일관된 경향성을 보이고 있지 않았다(Fig. 3 참조). 이러한 현상으로부터 본 실험에서 첨가한 SiC 함량이 마찰계수에 미치는 SiC 함량변화 효과는 윤활재의 첨가 효과보다 상대적으로 미약하게 나타난 것으로 생각되며, 세라믹 마찰재의 마찰계수 목표치에 근접시키기 위한 N_9 실험계획법에 따른 세라믹 마찰재의 혼합조성에 추가적으로 SiC 이외의 적절한 연마재(abrasive materials)의 배합이 필요하다는 것을 알 수 있다.

이상의 실험결과를 토대로, 최적화된 제조공정에 의해 제조한 세라믹 마찰재의 마찰성능시험후 마찰재 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 제조된 세라믹 브레이크 마찰재의 표면은 균열 발생과 마찰방향으로의 wear debris 발생에 의한 매끈한 마찰면(윤활막)이 관찰되었으며, 입자간 전단력에 의한 미끄러짐에 의해 진행되는 것을 확인할 수 있었다.^{5,7,19)} 그러나, 마찰마모시험동안 여러 마모기구가 진행된 후의 최종적인 마찰면 상태를 가시적으로 관찰하였기 때문에 어느 마모기구가 주로 진행되었는지 설명하는 것은 이 단계에서 무리한 작업일 수 있으며, 향후 세라믹 마찰재의 마모기구에 대한 구체적인 연구가 진행될 필요가 있다.

5. 결 론

BaSO₄, CaCO₃ 등을 중심으로 Al₂O₃, ZrO₂, SiC 등의 세라믹을 강화재로 첨가하여 900°C 이하의 온도에서 열처리함으로써 안정한 마찰성능을 보이는 세라믹 브레이크 마찰재를 제조할 수 있었다. 이는 기존의 브레이크 공정과 많은 차이가 있으나, 세라믹을 기본으로 한 마찰재는 그에 따른 적절한 제조공정이 필요하며 이를 확립할 수 있었다. 따라서, 기존의 브레이크 마찰재의 개발을 위해 세라믹스의 이용이 가능할 것으로 판단되며, 제조가능한 공정변수를 확립할 수 있었다. 다꾸치 실험계획법에 의하여 결정된 최적화된 제조공정조건은 마찰성

능의 향상을 위해 SiC 분말을 10 vol%까지 첨가한 배합원료분말을 건식공정으로 혼합하여 600~700°C의 온도 영역에서 열처리하여 성형한 시험편을 40%의 고품분량을 지닌 수지상에 침적시키는 것이다. 제조공정조건의 변화에 대한 마찰계수의 안정성은 윤활재의 첨가로 개선시킬 수 있었으며, 제조한 세라믹 마찰재의 표면 관찰결과로부터 전단력에 의한 균열 형성 및 윤활막의 형성이 마모과정동안 진행되었음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구의 수행에 있어서 원재료의 공급과 마찰마모 성능시험을 도와주신 상신 브레이크 주식회사에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. M. K. Stanford and V. K. Jain, *Wear*, **251**(1-12), 990 (2001).
2. B. K. Friley, B. E. McNeese, and J. T. Trainor, *SAE Tech. Series*, #911951.
3. K. Shibata, A. Gato, S. Yoshida, Y. Azuma, and K. Nakamura, *SAE Tech. Series*, #930806.
4. M. B. James and J. M. Newton, *Powder Technology*, **34**(1), 29 (1983).
5. M. Eriksson and S. Jacobson, *Tribology International*, **33**, 817 (2000).
6. S. K. Rhee, *Wear*, **28**(2), 277 (1974).
7. M. Eriksson, F. Bergman, and S. Jacobson, *Wear*, **232**, 163 (1999).
8. W. Y. Fowlkes and C. M. Creveling, *Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development*, Prentice Hall, NY, U.S.A. (1995).
9. H. J. Kim and Y. G. Kweon, *J. Kor. Inst. Met. Mater.(in Kor.)*, **35**(3), 374 (1997).
10. J. S. Tsai, *J. Mater. Sci.*, **30**(8), 2019 (1995).
11. W. D. Yang and K. M. Hung, *J. Mater. Sci.*, **37**(7), 1337 (2002).
12. J. Y. Kim, D. S. Lim, S. R. Lee, E. S. Byun and G. H. Lee, *J. Kor. Ceram. Soc.(in Kor.)*, **32**(11), 1315 (1995).
13. J. C. Sikra, J. E. Krysiak, P.R. Eklund, and R. Ruh, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **53**(8), 581 (1974).
14. T. Jimbo and S. Hironaka, *J. Ceram. Soc. Japan*, **104**(7), 620 (1996).
15. M. Ohgoshi, M. Fujita, and S. Hironaka, *J. Ceram. Soc. Japan*, **104**(7), 659 (1996).
16. M. Bai and Q. Xue, *Tribology International*, **30**(4), 261 (1997).
17. H. E. Sliney, *Tribology International*, **15**(5), 303 (1982).
18. M. Iwasa, Y. Toibana, S. Yoshimura and E. Kobayashi, *Yogyo-Kyokai-Shi*, **93**(2), 73 (1985).
19. V. M. Malhotra, P. S. Valimbe and M. A. Wright, *Fuel*, **81**, 235 (2002).
20. W. D. Kingery, H. K. Bowen and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd ed., Wiley, NY, U.S.A. (1976).
21. Y. Lu, C. F. Tang and M. A. Wright, *J. Appl. Polymer Sci.*, **84**, 2498 (2002).
22. K. C. Ludema, *Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology*, CRC Press, FL, U.S.A. (1996).