

# 동계 소결 마찰재의 기공율에 대한 마찰특성 고찰

## The Tribological Behavior On Porosity In Cu-Based Sintered Friction Materials

김 기열, 정 진현, 이 범주, 김 재곤, 권 성태\*, 최 경진\*

대우중공업

\* 한국 철도산업 기술연구원

### 1. 서론

금속 소결 마찰재는 수지형 마찰재 보다 고온에서의 마찰특성 즉, 마찰계수와 내마모성이 뛰어나 항공기나 고속전철등 고하중, 고부하의 제동 장치에 주로 사용되고 있다.<sup>1)2)</sup> 소결 마찰재는 기지 금속의 종류에 따라 철계 또는 동계 소결 마찰재로 구분하며, 첨가원소로는 마찰시 발생하는 토오크를 제어할 수 있는 마찰 조절제와 습동부의 스틱-슬립등을 제어할 수 있는 윤활제등이 있다. 소결 마찰재료의 개발은 제동 상대재인 디스크와 함께 차량의 제동력 요구 수준에 부합하는 마찰력을 유지하며, 내마모성이 보장되도록 하는 데 있으며, 제동시 발생하는 열을 신속하게 발산시킴으로 마찰 디스크의 열적 부담을 감소하며, 상대 디스크의 공격성을 최소화하는 등 다양한 요구가 만족되어야 한다.

이러한 금속 소결마찰재는 1900년대 부터 개발이 시작되어 현재까지 약 100년이 되고 있지만 마찰재료 특성에 관한 공개된 자료는 미미한데, 이것은 기지부, 마찰조절제, 윤활제등 통상 5종이상의 다양한 재료들이 마찰현상에 복합적으로 작용함으로 연구 분석이 쉽지 않으며, 소결마찰재 제조업체들의 자사 기술보호등이 엄격하여 자료가 비교적 공개되지 않았기 때문이다. 현재까지 알려진 소결마찰재의 재료특성에 관한 연구는 첨가되는 원소들에 대한 것<sup>3)4)5)</sup>과 제조공정에 관한 것<sup>6)7)</sup>으로 크게 나누어 지며, 높은 마찰계수와 낮은 마모율을 목표로 진행되고 있으며, 또한 적용 환경에 따라 디스크의 공격성, 소음<sup>8)</sup>, 열발산등에 관한 연구도 있다.

소결마찰재의 기공은 소결체의 기본 특성으로 제조공정에 따라 다양하게 형성되며, 기공량이 증가 할 수록 소결체의 강도나 경도를 낮추는 결과를 초래하지만, 수지형 마찰재료의 경우 일정량의 기공이 오히려 마찰특성에는 양호한 결과를 나타냈다. 소결 마찰재의 경우, 기공량은 제작공정상 성형압과 소결 가압력을 선정하는 기준이 되는 것이지만 아직까지 정량화된 결과가 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구는 동계소결 마찰재의 제조공정에서 기본적으로 내재되는 기공이 마찰특성에 어떠한 영향을 주며 또한 이러한 영향에 따라 최적 마찰특성을 나타내는 기공량을 제시하고자 하였다.

소결마찰재의 기공율은 성형체 밀도와 소결 가압력을 임의로 변화시켜 기공량을 조절하였고, 이렇게 만들어진 시편들은 정속식 마찰시험기를 이용하여 마찰특성을 평가하였다. 결과의 분석은 반복이 있는 이원 배치법을 이용한 통계 수단을 사용하여 분산분석을 실시하고, 최적의 마찰특성을 나타내는 성형체 밀도와 소결 가압력을 제시하고자 하였다.

### 2. 실험방법

연구에 사용한 소결 마찰재의 화학 조성은 아래 표1과 같다. 마찰조절제로 Ni, Fe, SiO<sub>2</sub>등이 사용되었고, 윤활제로는 Graphite, MoS<sub>2</sub>, Pb등이 사용되었다.

Table 1. Chemical composition of specimen

element	matrix	friction modifier	lubricant
weight%	60	30	10

각 분말들은 편석이 발생하지 않도록 혼합한 후 두께 4mm, 외경 40mm인 디스크형 압분체로 2-4ton/cm<sup>2</sup>으로 성형하고, 810℃, 환원 분위기에서 2시간 가압소결을 실시하였다. 이때 성형체 밀도는 3.84, 4.51, 4.81g/cm<sup>3</sup>과 같이 3가지로 하였으며, 가압소결시 가압력은 12.5, 25, 37.5kgf/cm<sup>2</sup>으로 하였다. 표2는 3가지 성형체 밀도에 대한 기공률을 비이론 밀도를 통하여 계산한 값으로 나타내 보았다.

Table 2. Porosity of compacts which used in study

density of compacts	3.84 g/cm <sup>3</sup>	4.51	4.81
porosity %	30%	18%	12.5%

소결이 끝난 시편은 당사에서 제작한 정속식 마찰시험기를 사용하여 마찰특성을 평가 하였다. Fig.1은 정속식 마찰시험기의 개략도로서, 마찰상태 디스크는 GC25인 회주철을 사용하였으며, 표3에 나타난 것과 같이 16m/sec의 일정 속력으로 마찰시험을 실시 하였다.

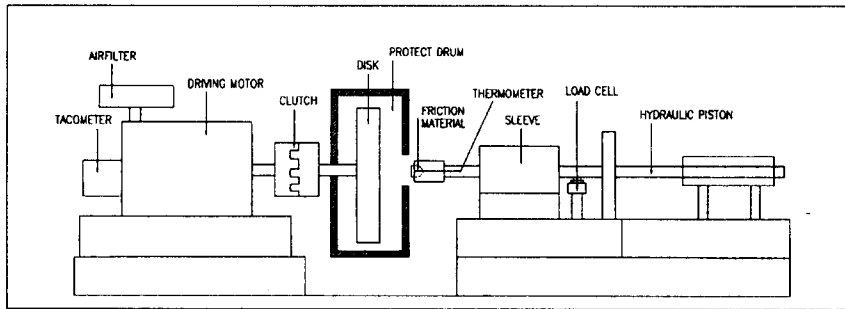


Fig.1 Schematic diagram of constant speed friction tester

Table 3. Condition of friction test in constant speed friction tester

condition of friction test	mated disk	rubbing speed	pressure	area of specimen
value	GC25	16m/sec	4kgf/cm <sup>2</sup>	9cm <sup>2</sup>

Fig.2는 정속식 마찰시험기를 이용한 마찰시험의 실시 방법을 나타낸 것으로 디스크 회전수 1,000회전간 마찰시험을 실시한 후 2분간을 쉬는 것을 1회 마찰시험으로 하여 5회의 마찰시험을 실시 하였다. 마찰계수는 각회에서 디스크 회전수 330-1,000회 기간에 발생한 토크의 평균값을 이용하여 마찰계수를 계산하였고, 마모율은 5회 마찰 시험 후, 시험 전후의 부피 감소량을 평균 토크와 거리로 나누어 나타냈다. 매 시험마다 시편에 열전대를 설치하여 마찰시험할 때 발생하는 마찰열을 측정하였으며, 인위적인 열원을 디스크에 가하여 마찰특성을 마찰표면의 온도 변화에 따라서도 평가해 보았다.

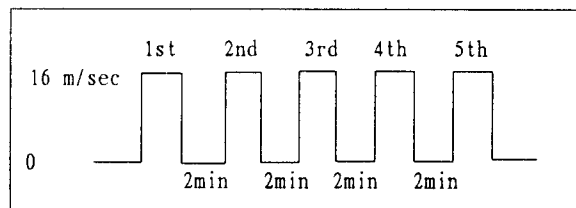


Fig.2 Procedure of Friction test

마찰시험 전후의 마찰면 조직변화를 관찰하기 위하여 SEM, OM등을 사용하였고, 소결체의 소결정도를 파악하기 위하여 Rockwell 경도기를 사용하여 R scale의 경도를 확인 하였다.

### 3. 시험 결과

표4는 소결 마찰재의 기공율 변화에 의한 마찰 특성 평가를 위하여 반복이 있는 이원 배치법을 이용한 변위 선정 방식을 나타냈다. 이러한 통계적 수단을 사용하는 경우, 실험시 발생하는 오차 범위를 확인하여 특성 평가에 대한 신뢰도를 높일 수 있으며, 특히 마찰시험의 경우 평가에 대한 오차 범위가 크기 때문에 이러한 통계적 수단이 반드시 필요할 것으로 생각된다.

Table 4. Valuable table of two-way Factorial Design

compact density pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	3.84g/cm <sup>3</sup> (30%)* A class	4.51g/cm <sup>3</sup> (18%) B class	4.81g/cm <sup>3</sup> (12.5%) C class
12.5	A1	B1	C1
25.0	A2	B2	C2
37.5	A3	B3	C3

\*( porosity percent )

Fig.3은 각 시편의 소결후 밀도를 나타낸 것으로 횡축이 가압력이며, 종축은 밀도를 나타냈다. 성형체 밀도가 높을수록, 가압력이 클수록 소결 후 밀도는 증가하였다.

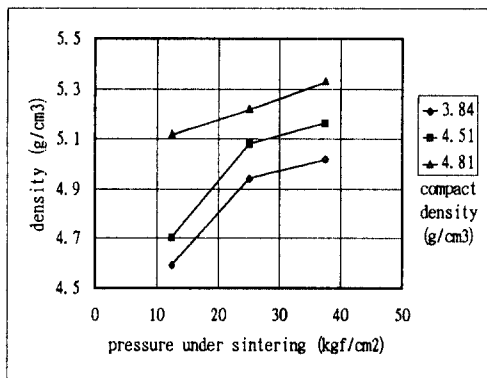


Fig.3 Density on sintered specimens

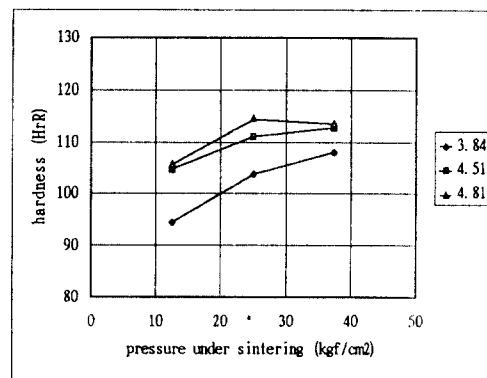


Fig.4 Hardness of specimens after pressure sintering

Fig.4는 각 조건의 시편을 소결한 후 소결정도를 Rockwell 경도기를 이용하여 R scale로 측정된 값이다. 일반적으로 소결체의 경도는 소결체의 소결 상태를 추측해 볼수 있기 때문에 소결마찰재의 경도값은 기지부의 소결상태를 평가할 수 있는 중요한 요소이다. 실험에 사용된 모든 시편에서 가압력이 증가할 수록 소결체 경도는 상승하였고, 흥미 있는 것은 성형체 밀도가 4.51g/cm<sup>3</sup>이상인 B,C계열의 시편과 비교하여 성형체 밀도가 3.84g/cm<sup>3</sup>인 A계열 시편의 경우, 소결후 경도값이 상대적으로 크게 낮다. 이것은 Fig.3의 각 시편의 소결 후 밀도 분포와 비교할 때, 소결후 경도값은 성형체 밀도가 어느정도 확보된 상태에서 가압소결을 실시해야 높은 값을 얻을 수 있으며, 성형체 밀도가 A계열과 같이 낮은 경우는 소결시 상당히 높은 소결 가압력이 필요한 것을 알수 있다. 하지만 소결시 가압력 상승은 소결 조직에 방향성을 주게 되는 것으로 특히 Graphite등이 가압력에 수직방향으로 늘어서는 층상구조 현상을 일으키며, 마모량이 증가하는 현상을

나타내기도 한다. 이상과 같은 결과에 따라 소결 마찰제에서 지지부의 강도를 확보하기 위해서는 성형체 밀도가  $4.5\text{g/cm}^3$  이상이 되어야 할 것으로 예상된다.

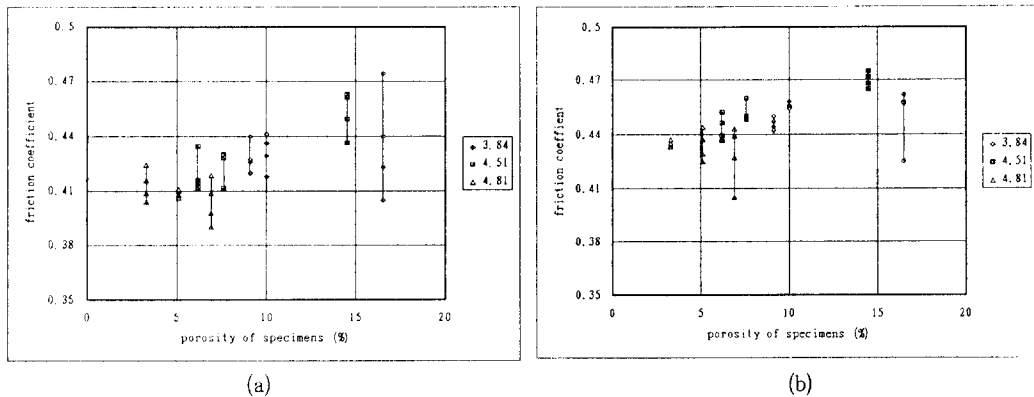


Fig.5 Friction coefficient of specimens which were made by two-way Factorial design.  
(a) without external Heat (b) with external Heat

Fig.5는 이원배치법의 통계적 수단에 따라 선정한 시편들을 정속식 마찰 시험기를 이용하여 얻은 마찰 계수를 나타낸 그래프이다. 횡축은 각 조건에 따라 시편이 가지고 있는 기공율을 표시하였고 종축은 마찰 계수를 나타냈다. (a)는 마찰시험시 외부 열원의 공급이 없이 실시한 마찰시험 결과이며, (b)는 외부 열원을 통해 마찰디스크를 약  $250^{\circ}\text{C}$ 까지 가열 후 시험한 결과를 나타냈다. 마찰계수는 기공율이 증가할 수록 커지는 것을 볼수 있으며, 성형체 밀도가 외부 열원의 공급이 있는 (b)의 경우 16.5% 기공율(A1시편)에서 마찰 계수가 감소함을 볼수 있다. 열원이 없는 (a)의 경우에서도 16.6% 기공율은 마찰계수의 범위가 너무 넓어 마찰계수의 안정성에 문제가 있는 것으로 생각된다.

Fig.6은 각각의 시편에 대한 마모율을 나타낸 것으로 역시 횡축은 기공율이며, 종축은 마모율을 나타낸다. 마모율은 기공율 변화에 따라 큰 변화는 없지만 외부 열원이 있는 (b)의 경우 기공율 증가에 따라 약간 감소하였다.

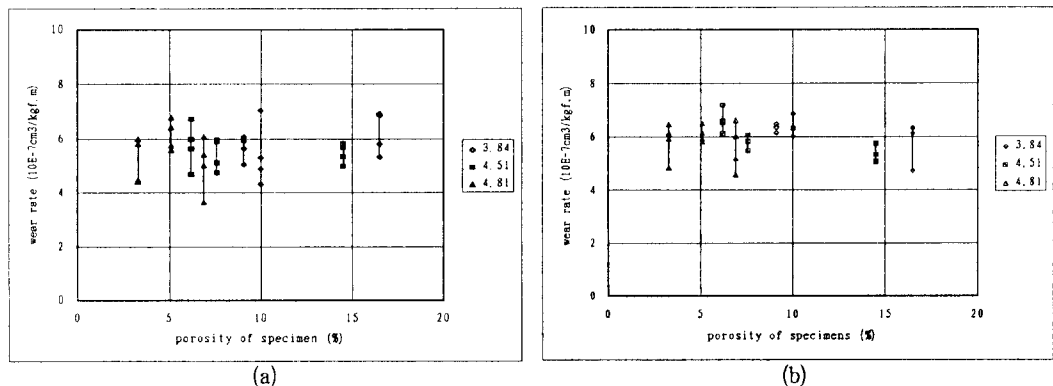


Fig.6 Wear rate of specimens  
(a) without external Heat (b) with external Heat

Fig.5-6에서 얻어진 마찰시험 결과는 반복이 있는 이원배치법의 통계적 수단을 이용하여 분산 분석을 실시 하였다. 부록1은 분산 분석 결과를 나타낸 것으로 (1)는 외부 열원이 없는 경우의 마찰계수 (2)는 이때의 마모율 (3)은 외부 열원이 있는 경우의 마찰계수, (4)는 이때의 마모율을 각각 나타냈다. 마찰계수에 영향을 주는 주요 요인은 성형체 밀도이며, 또한 소결 가압력과는 교호 작용이 있는 것으로 나타났고, 마모

율은 단지 외부 열원이 있을 경우 가압력에 따라 영향을 받는 것으로 평가 되었다. 이러한 결과를 통하여 가장 적절한 성형체 압력과 소결 가압력은 표 4에서 B1 조건이었다. 이것은 앞서 Fig4-5에서 확인한 결과와 일치되고 있다.

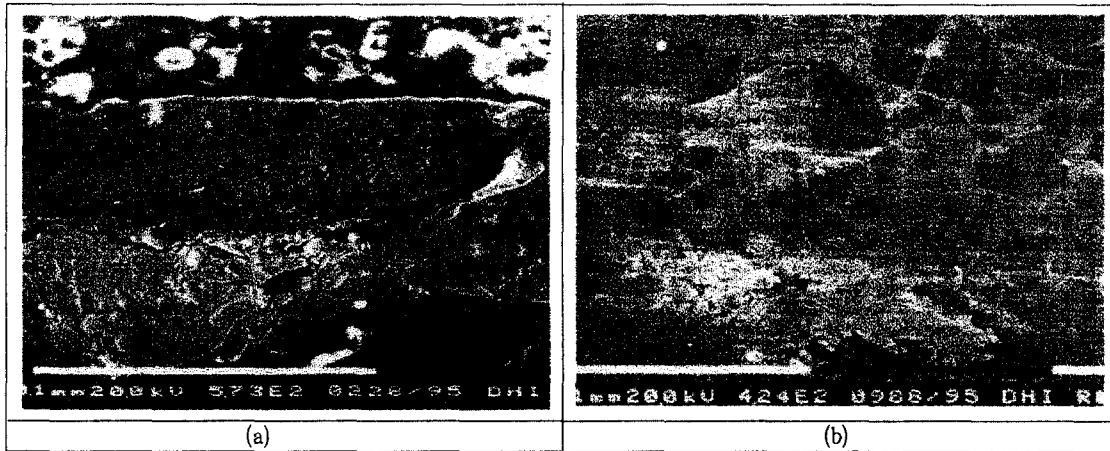


Fig.7 Microstructure of specimens by SEM

(a) deposit of debris in surface pore or hole which consists of harden particles and fragments of  $\text{SiO}_2$

(b) friction surface with fragments of  $\text{SiO}_2$

마찰시험이 끝난 후, 소결 마찰재의 마찰단면을 관찰한 결과, Fig.7(a)와 같이 기공율이 큰 시편의 표면 기공 속에는 주로 산화물로 형성되었을 debris들이 퇴적된 형상으로 존재하고 있었으며<sup>9)</sup>, 산화 피막층이 얇게 덮혀져 있음을 관찰 하였다<sup>10)</sup>. 또한 debris 퇴적층에는 마찰조절제로 첨가한  $\text{SiO}_2$ 의 파편들이 존재하고 있었으며, 디스크와 직접 접촉한 마찰면을 관찰한 결과, Fig.7(b)와 같이  $\text{SiO}_2$ 의 부서진 파편들이 산화층면에서 혼재 되어있다. 따라서 소결체에 존재하는 큰 기공은 마찰시 마찰에 의하여 발생하는 debris들을 모아 주는 장소가 되며, 퇴적된 경질의 산화물인 debris와 마찰조절제로 첨가된  $\text{SiO}_2$ 의 파편들은 마찰시 마찰표면에서 또다른 마찰조절제의 역할을 수행함으로써 마찰특성을 향상시킨 것으로 생각되어 진다.

#### 4. 결론

1. 소결마찰재의 제작 공정에서 형성되는 기공은 소결마찰재의 마찰특성에 영향을 주며, 특히 마찰계수에 영향을 준다. 이것은 마찰면에 존재하는 기공이 경질의 debris와 마찰조절제인  $\text{SiO}_2$ 의 파편들을 모아 퇴적시키며 또다른 마찰조절제의 역할을 수행하기 때문으로 생각되어 진다.

2. 마찰시험 결과를 반복이 있는 2원 배치법의 통계적 수단을 이용한 결과, 성형체 단계에서 형성되는 기공량이 마찰특성에 가장 영향을 많이 주며, 소결시 가압력에 대하여서는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

3. 최적의 기공은 성형체 단계에서 18%를 형성하고 소결후 14.5%의 기공을 유지하도록 한 경우이며, 이때 마찰계수는 0.452-0.470, 마모율은  $5.29-5.44 \times 10^{-7} \text{cm}^3/\text{kgf.m}$ 이었다.

#### 5. 참고문헌

1. 정동운,김재곤, "Development of the Friction Materials for High Speed Train", 자동차공학회지, vol.16, No.5, pp41, 1994.

2. T.Hanazawa, "Cermets for Friction Materials", 鐵と鋼, vol.73, No.7, pp786, 1987.
3. V. Dufek, "The Effect of Different Graphite Qualities on the Properties of Sintered Bronze-Based Friction Materials" Powder Mat. Int., Vol.2, No.1, pp10, 1970.
4. Y. Tsuya, K. Umeda, M. Kitamura, "Optimum Concentration of Solid Lubricant in Compact", Lubrication Engineering, August, pp402, 1976.
5. A. Jenkins, "Poeder-Metal-Based Friction Materials" Powder Met. vol.12, No.24, pp503, 1969.
6. T. Hanazawa, "Friction Materials as the Composite Materials", Ceramics, vol.8, No.3, pp186, 1973.
7. Ben T. Collins, C. P. Scheider, "Sintered Metal Friction Materials", Modern Development of Powder Metallurgy, pp160, 1965.
8. T. Fukaya, K. Yanagi, M. Matsuzaki, "Brake Noise Problems" 自動車 技術, vol.31, No.9, pp803, 1977.
9. 정진현, 김기열, 이범주, 김재곤, 정동윤, "The Effect of Mo addition on the Friction Properties of Cu Base Sintered Friction Material" Proceeding of '95 KPMI in KFST Bldg, pp15, 1995.
10. 김기열, 이범주, 김재곤, 정동윤, "On the Friction Properties of the Solid Lubricant Added Cu-Base Sintered Material", Proceeding of '94 KPMI in HanYang Uni. pp12, 1994.

부록 1. 이원 배치법을 이용한 마찰특성의 분산 분석표

1. 외부 열원이 없는 경우 (마찰계수)

분산 분석						
변동의 요인	제공합	자유도	제공 평균	F 비	P-값	F 기각치 (5%)
소결 가압력	0.0007712	2	0.0003856	2.161364	0.1346811	3.354131195
성형체 밀도	0.0042792	2	0.0021396	11.993305	0.0001874	3.354131195
교호작용	0.0020337	4	0.0005084	2.8498988	0.0431162	2.727766457
잔차	0.0048167	27	0.0001784			
계	0.0119007	35				

주 1. 성형체 밀도는 중요한 인자, 약간의 교호작용 있음.

2. 외부 열원이 없는 경우 (마모율)

분산 분석						
변동의 요인	제공합	자유도	제공 평균	F 비	P-값	F 기각치
소결 가압력	0.1617576	2	0.0808788	0.1200495	0.8873473	3.354131195
성형체 밀도	0.3239742	2	0.1619871	0.2404397	0.7879477	3.354131195
교호작용	3.6457118	4	0.9114279	1.3528448	0.2763155	2.727766457
잔차	18.190227	27	0.6737121			
계	22.321671	35				

주 1. 변동요인이 모두 기각됨, 마모율에 대하여 인자 특성이 없음.

3. 외부 열원이 있는 경우 (마찰계수)

분산 분석						
변동의 요인	제공합	자유도	제공 평균	F 비	P-값	F 기각치
소결 가압력	0.0004496	2	0.0002248	2.577891	0.094496	3.354131195
성형체 밀도	0.0034484	2	0.0017242	19.774132	5.141E-06	3.354131195
교호작용	0.0013488	4	0.0003372	3.8671551	0.01308	2.727766457
잔차	0.0023542	27	8.719E-05			
계	0.007601	35				

주 1. 성형체 밀도는 중요한 인자, 약간의 교호작용 있음.

4. 외부 열원이 있는 경우 (마모율)

분산 분석						
변동의 요인	제공합	자유도	제공 평균	F 비	P-값	F 기각치
소결 가압력	2.9392667	2	1.4696333	5.2618974	0.0117563	3.354131195
성형체 밀도	0.89915	2	0.449575	1.6096651	0.2185574	3.354131195
교호작용	1.9290333	4	0.4822583	1.726685	0.1732096	2.727766457
잔차	7.541025	27	0.2792972			
계	13.308475	35				

주 1. 소결가압력이 마모율에 영향을 줌, 교호작용은 없음.