

동계 소결마찰재의 소결조건에 따른 마찰특성 고찰

김상호, 김기열, 정진현, 이범주, 정동윤*
대우중공업 중앙연구소 소재기술팀, *육군사관학교

The Effect of Sintering Condition On Tribological Behavior
in the Cu-Base Sintered Friction Materials
S. H. Kim, K. Y. Kim, J. H. Jeong, B.J. Lee, D. Y. Chung

Abstract : The effect of sintering condition on tribological behavior in the Cu-base sintered friction materials was studied through pin-on-disk type wear tester. Especially, the experiment was focused on making a comparative study between pressured sintering and pressureless sintering. Pressureless sintering process shows more stable friction coefficient and lower wear rate than pressure sintering process. This result is related to pore size and density of pore in the sintered materials.

Key word : Pressureless sintering, Friction coefficient, Wear rate, Pore size.

1. 서론

최근의 산업기계, 산업용차량, 항공기 및 철도차량이 고속화, 대형화, 고하중화됨에 따라 제동시스템이 담당하는 제동 에너지가 점차 커져 기존의 유기계 마찰재로는 더 이상 안정된 마찰특성을 얻을 수 없게 되었다. 이에 따라, 내열성이 높고, 고속, 고하중에서도 높은 마찰계수와 낮은 마모량을 가지는 동계소결합금 마찰재가 개발되어 적용되고 있다.

동계소결마찰재는 주로 순수 Cu, 혹은 Cu-Sn, Cu-Zn을 기지(matrix)로 하여 마찰조절제(friction modifier), 고체윤활제(solid lubricant)를 첨가하여 만든다. 동계소결마찰재의 제조공정은 크게, 분말의 혼합, 성형, 소결로 나눌수 있으며, 소결은 다시 가압소결과 무가압소결로 나누어질 수 있다. 가압소결은 소결시 일정한 압력을 성형체에 작용시키는 방법으로

가압력에 따라 소결밀도와 기공의 량을 조절할 수 있다. 반면, 무가압소결은 압력의 작용없이 소결을 실시함으로 소결밀도가 낮고 내부기공의 량이 많아지게 된다. 일반적으로 소결기계부품의 경우 기계적 성질은 밀도가 높을수록 향상되므로 가능한 고밀도의 소결품 제조가 요구된다. 하지만, 소결마찰재에 있어서는 마찰조절제와 고체윤활제를 잘 고착시켜줄수 있을 정도의 강도만 확보하면, 밀도를 변수로 하여 마찰특성에 영향을 주는 것으로 알려져 있는 내부기공량을 조절할수 있다. 소결마찰재의 기공량조절은 성형과 소결공정에서 가능하며, 본 연구는 특히, 가압과 무가압소결 그리고 무가압소결온도 조절을 통하여 내부기공이 마찰특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한, 생산 측면에서는 작업의 연속성이 무엇보다 중요함으로 가압소결의 경우와

비교하여 연속로에서 작업이 가능한 무가압소결공정 적용을 함께 검토하여보았다.

2. 실험

2-1 시편의 제조

본 실험에 사용된 마찰시편은 표. 1의 조성을 가지는 청동기지 소결마찰재이다. 각각의 분말을 편석이 발생하지 않도록 혼합한 다음 3~4ton/cm²의 압력으로 이론 밀도의 80%가 되도록 30 x 30 x 15mm로 성형하였다. 가압소결하는 시편은 820℃에서 이론밀도의 90%가 되도록 시편을 제작하였고, 무가압시편은 820, 870, 930℃에서 혼합가스 분위기(H₂:N₂=1:1)에서 소결하여 제작하였다. 제조된 시편의 현미경 조직을 Fig. 1에 나타내었다. 본실험에 사용된 시편의 구분을 표. 2에 나타내었고, 소결후의 밀도변화와 부피변화를 Fig. 2에 나타내었다.

2-2 마찰시험

본 연구에 사용되어진 마찰시험기(Fig. 3)는 Pin-On-Disk형의 정속식 마찰시험기이다. 접촉면에서 평형을 유지하며 실험할수 있도록 좌우 2개의 시편을 설치하였다. 시험시 작용한 응력은 4~8kg/cm²이며, 속도는 12~20m/s로 변화시켜 가며 실험을 하였다. 마찰시험은 총 6단계로 구성되어 있으며, 1, 2단계는 외부 열원의 공급없이 마찰열에 의하여 디스크의 온도가 상승하는 구간이며, 3, 4단계는 외부 열원에 의하여 온도가 350℃가 되도록 하였으며, 5, 6 단계에서는 분위기 온도를 450℃로 상승시켜서 온도에 따른 마찰특성을 고찰하였다. 각 단계는 1000회전씩 5

회의 반복실험으로 이루어지며, 각 회마다 2분씩의 휴지시간을 두었다. 실험중 마찰계수는 정상상태의 마찰계수를 측정하기 위하여 초기 300회전까지의 마찰계수는 제외한 나머지 700회를 평균한 것이다. 마모량의 측정은 각 단계마다 시험이 끝난후 시편의 초기값에 대한 무게차이를 측정하고 밀도와 단면적으로 나누어서 환산한 두께차이로 각단계별로 비교하였다. 본실험의 상대재는 GC25의 회주철 디스크로 경도가 HB180이다. 각시편의 조직과 마찰면은 광학현미경, SEM, EDX로 관찰하였다.

3 결과 및 고찰

3-1 소결조건에 따른 마찰특성

마찰특성은 마찰계수, 마모량(내마모성), 마찰계수 안정성의 3가지 관점에서 평가하는 것이 바람직하다. 철도차량용 소결마찰재에 있어서, 마찰계수는 약 0.3-0.4정도가 적합한 것으로 평가되며, 마모량은 적을수록 좋지만, 본 정속마찰 시험 있어서 각단계 마다 10μm미만이면 우수한 것이며, 무엇보다 중요한 것은 마찰계수 안정성으로 평균 마찰계수의 0.03이내 이면 우수한 마찰재라 할수있을 것이다.

본실험에서는 소결조건 즉, 가압소결(P1)과 무가압소결(N1)에 따른 마찰특성을 고찰하기 위해 동일온도인 820℃에서 시편을 가압과 무가압으로 제작하여 정속식 마찰시험하였다. Fig. 4은 온도, 압력 및 속도에 따른 마찰계수 및 마모량의 변화를 나타낸 것이다.

P1, N1 모두 각단계의 마찰계수가 0.25~0.40수준이며 온도증가에 따라 감소하

는 경향을 보인다. N1의 경우 150°C 구간 (1, 2단계)에서 마찰계수의 stability가 좋지 않았으나, 그 이후의 모든 구간에서 매우 안정되며 특히 고온에서는 매우 안정하다. 반면, P1은 고온영역에서 마찰계수의 fluctuation이 심하게 나타났다.

N1은 전영역에 걸쳐 마모량이 10 μ m 이하로 우수하나, P1은 고온영역에서 마모량이 증가하는 현상을 보이고 있다. 특히, N1의 경우 고온의 일부조건에서는 마모량이 마찰시험 후 무게가 감소하는 것이 아니라, 오히려 증가하는 현상을 나타내기도 한다.

3-1-1 고온영역에서의 마찰시험 결과

외부열원과 마찰열에 의해 마찰면의 온도가 상승하면 이로 인하여 마찰재의 금속표면은 분위기중의 산소와 결합하여 산화된다. 무가압소결의 경우 밀도가 낮고 내부에 상대적으로 많은 기공이 존재한다. 이러한 기공은 대부분 open pore로 고온의 분위기중에서 내부로의 산화통로 역할을 할것이다. 이러한 것은 Fig.5의 각 시편을 온도증가에 따른 무게증가량을 측정함으로써 쉽게 증명이 된다. 기공의 량이 적은 가압소결시편은 무게 증가량이 매우 적는데 비해 기공의 량이 많은 무가압시편의 경우는 400°C 이상에서 무게가 급격히 증가한다.

Fig.6는 350°C 온도 구간에서 P1과 N1의 압력 증가에 따른 마찰특성을 나타낸 것이다. N1은 가압력 증가에 따라 마찰계수가 감소하며 마모량은 거의 변화가 없어 보인다. 반면, P1은 압력 증가에 따라 마찰계수가 증가하며 또한, 마모도 함께 증가하는 현상을 보여주고 있다. 이것은

마찰면에 형성된 안정한 산화피막층의 파괴가 이시점에서부터 일어나는 것으로 추정된다. Fig. 4의 고온영역에서 마찰계수의 fluctuation은 이러한 관점에서 보아야 할 것이다. 고온에서 기지금속의 약화로 인하여 안정한 산화피막이 더 이상 견디지 못하고 부분적으로 파괴되어 금속/금속 접촉으로 인해, 마찰면에서 응착마모와 소성유동이 발생하기 때문으로 생각된다. 실제로 마찰면의 온도를 열전대를 이용하여 측정한 결과 Fig. 7과 같이 동일 조건에서 부가압 소결의 경우가 가압 소결에 비하여 100-200°C 정도 낮게 관찰되었다.

즉, 무가압시편은 다량의 내부 기공을 통하여 마찰면에서 요구하는 산화물을 이미 확보할 수 있으므로 마찰면에 필요하는 산화물층을 쉽게 공급할 수 있으므로 인하여 고온에서 특히 안정된 마찰 특성을 나타내는 것으로 추정된다.

3-1-2 마찰면의 온도

가압소결한 시편과 무가압 시편의 차이는 마찰시험결과 소결재에서 측정된 온도의 차이이다. Fig. 7과 같이 가압소결의 경우 통상 마찰시험 6단계를 거치면 열전대를 통한 마찰면의 온도가 약 320-450°C에 이르게 되는데 비하여, 무가압시편의 경우 220-250°C로 약 100-200°C 정도 낮게 나타난다.

이것은 가압소결과 무가압소결의 마찰계수가 비슷한 수준으로 마찰시 발생하는 마찰열의 차이는 없는 것으로 보아야 하며 단지, 가압과 무가압소결 시편의 열전도도의 차이에 의한 것으로 판단된다. 실제 열전도 측정결과 무가압소결한 시편의 열

전도도가 높게 나타났다. 또한 내부에 존재하는 pore가 heat sink로 작용할 것으로 판단된다. 또한, 이미 언급한 바와 같이 가압 소결시편의 경우 마지막 6단계의 마찰시험에서 마찰계수의 fluctuation이 크게 나타나고 마모가 증가하는 현상이 동반되므로 산화피막의 파괴가 발생하는데, 이러한 변화는 순간적으로 마찰열을 증가시키는 한 원인이 되며, 무가압의 경우는 안정된 산화피막으로 인하여 마찰열이 적게 발생할 수 있다.

3-1-3 마찰시험 전후 마모량 증가

가압시편과 무가압시편의 또 다른 차이는 마찰시험 전후 시편의 무게가 증가하는 현상이다. 이것은 마찰면 온도가 높은 경우 즉, 마찰시험 5, 6 단계에서 자주 나타나는 현상으로 마찰시험시 발생하는 열과 주변 산소에 의하여 마찰재는 산화가 발생하고 이러한 산화는 공기중의 산소를 얻기 때문에 무게 증가는 당연하다. 가압시편의 경우 마찰시 떨어져 나가는 debris의 량이 산화로 인한 무게 증가보다 크기 때문에 시험전후 무게가 감소하지만, 무가압의 경우 비표면적의 증가로 산화될 수 있는 site가 상대적으로 크기 때문에 산화량의 증가가 debris 방출량보다 크게되어 시험 전후 무게는 오히려 증가하는 것으로 나타났다고 생각된다. 이것은 debris 방출량이 작았기 때문에 가능한 현상으로 마모두께의 감소를 나타내는 것은 아니다. 이것을 확인해 보기 위하여 마찰전후 무게 측정과 마찰재 두께 측정을 동시에 실시 하여 보았다. 그 결과 두께가 감소했음에도 불구하고 무게는 증가하는 경우가 나타났다. 즉 내부에 존

재하는 기공표면에서 산화가 크게 일어나고 있음을 확인하였다.

3-1-4. 공격성 실험

소결마찰재에 있어서 마찰재자신의 마찰성질 특히, 내마모량도 중요하지만 상대재인 디스크의 내마모성도 고려되어야 한다. Fig. 8은 본실험에 사용된 시편 P1, N1, N2, N3의 마찰시험기를 통해 공격성을 실험한 결과로 총 거리 10km(2m/s)을 실험후 디스크의 표면을 조도로 측정하였다. 실험결과 P1, N1, N2, N3모두 비슷한 수준의 공격성을 가진 것으로 나타났다.

3-2 소결온도에 따른 마찰특성

기공의 량에 의해 따른 마찰특성을 고찰하기 위해 마찰재를 소결온도를 달리하여 무가압소결로 시편을 만들고 정속마찰 실험을 하였다. 소결온도는 고상소결인 820℃, 액상의 량이 약 20%인 870℃, 액상의 량이 약50%인 930℃에서 각각 소결하였으며 소결방법과 실험방법은 상기한 바와 같다. Fig. 9은 각시편의 기지의 소결정도를 나타낸 것으로 소결온도가 증가할수록 결정립이 조대해지고 큰 기공들이 증가함을 보여준다. Fig. 10은 porosimeter로 pore를 측정한 결과로 소결온도증가에 따라 기공의 절대량이 증가하며 큰 기공의 량이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 11는 무가압으로 각 소결온도에서 시편을 제작하여 정속마찰실험한 결과이다. N2는 1단계에서 다소의 마찰계수 변화가 있지만, 그이후 안정된 마찰계수값

을 나타내며, N3는 저온영역과 저속의 고온영역에서 불안정한 마찰계수를 나타낸다. 마모량은 소결온도가 증가할수록 전체마모량은 많은 것으로 나타났다. 이러한 것은 고온에서 소결할수록 pore량의 증가로 표면적은 증가하지만, 결정립의 성장으로 내부까지 산화하지 않는 pore가 존재하는 것이라 추정된다.

4. 결론

소결조건에 따른 마찰특성을 고찰하기 위해 Pin-on-Disk형 정속마찰실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 가압소결한 마찰재 보다 무가압소결한 마찰재가 보다 낮은 마모량과 안정된 마찰계수를 가지며, 특히, 고온에서 마찰특성은 월등히 좋은 것으로 나타났다.

② 실험조건중 무가압 870℃에서 소결이 가장 안정적인 마찰계수를 나타내며 마모량도 양호한 것으로 나타났다.

③ 가압소결한 마찰재와 무가압소결한 마찰재의 공격성은 같은 수준이었다.

④ 무가압소결의 우수한 마찰특성으로 연속소결작업이 가능한 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1) 정동윤, 김기열, 조정환 “ B₄C첨가에 따른 동계소결합금 마찰재의 마찰특성 변화에 관한 연구, 윤활학회지 Vol. 12, No 3, 1996

2) 송진, 황순홍, 공호성, 최웅수, 정동윤, 허무영, “Brake Pad용 청동기지 복합

재료의 마찰, 마모특성에 관한 연구”, 한국윤활학회 1996, 제 23회 춘계학술대회, pp 63-75. 1996

3) Development of Friction Materials for High-speed Brakes. N. K. Myshkin, V.V.Meshkov

4) Powder-Metal-Based Friction Material. A. Jenkins. POWER METALLURGY, 1969, Vol.12, No.24

표. 1 시편의 화학적 조성 및 평균입도

구 분	Cu	Sn	Mo	Fe	Ni	SiO ₂	Gr	B ₄ C
첨가량(wt%)	58.5	6.5	5	10	4	5	7	4
평균입도(μm)	33	20	26	30	13	140/19	510	153

표. 2 본실험에 사용된 시편의 구분

구 분	소결조건	소결온도(°C)	밀도(g/cm ³)	pore량(cc/g)
P1	가압소결	820	5.62	0.0073
N1	무가압소결		4.24	0.0564
N2		870	4.00	0.0664
N3		930	3.55	0.0887

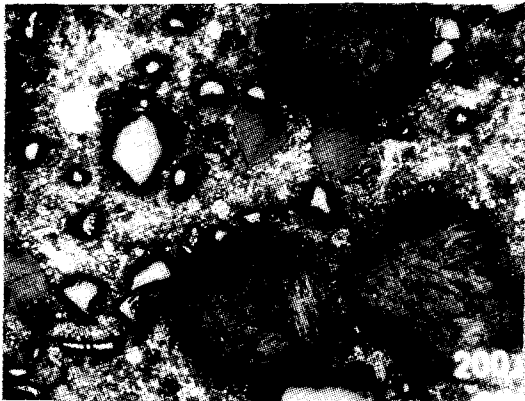


Fig. 1 실험에 사용된 동계소결마찰재 조직

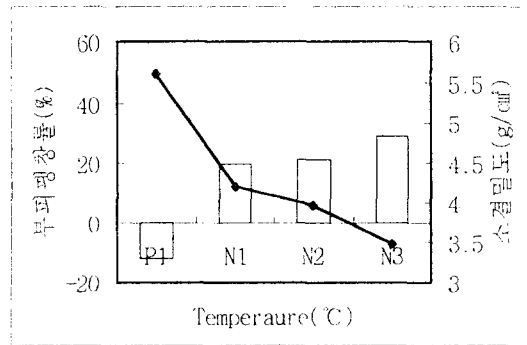


Fig. 2 소결밀도의 변화와 부피변화

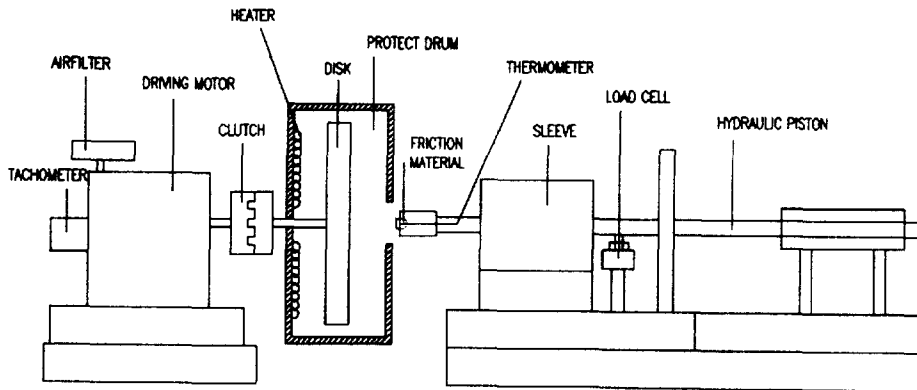


Fig. 3 실험에 사용된 Pin-On-Disk형 정속마찰시험기

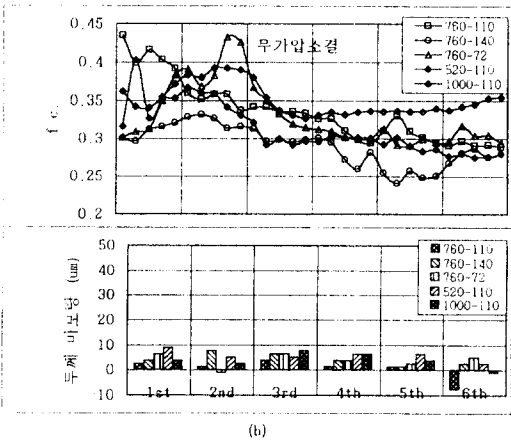
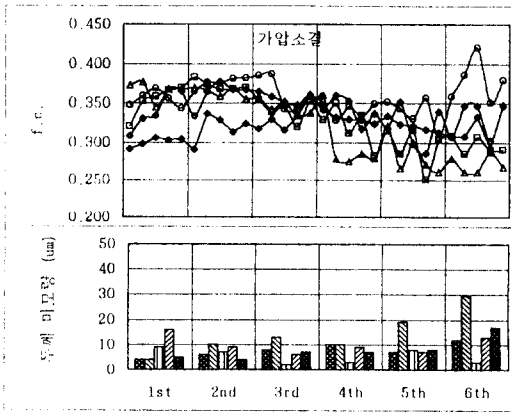


Fig. 4 가압소결과 무가압소결의 압력, 속도 및 온도에 따른 마찰특성

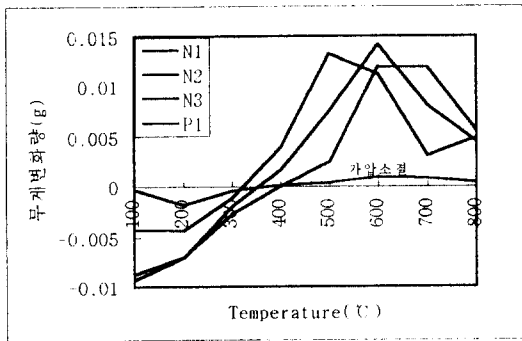


Fig. 5 온도에 따른 무게변화량

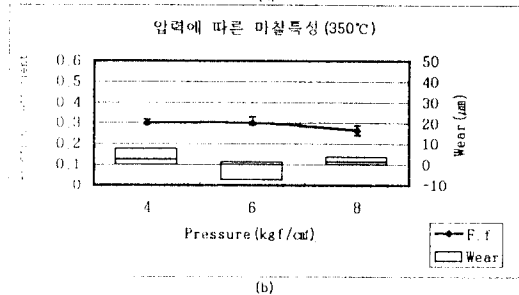
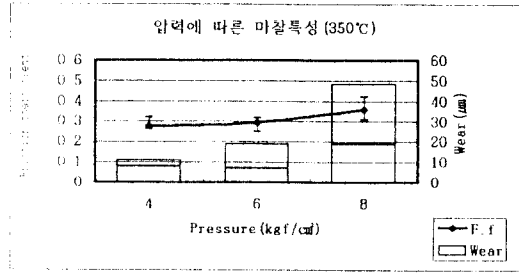


Fig. 6 고온영역에서 압력에 따른 마찰특성 (a)가압소결 (b)무가압소결

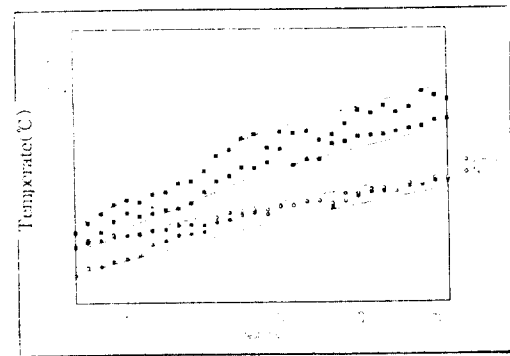


Fig. 7 실험조건에 따른 표면온도변화

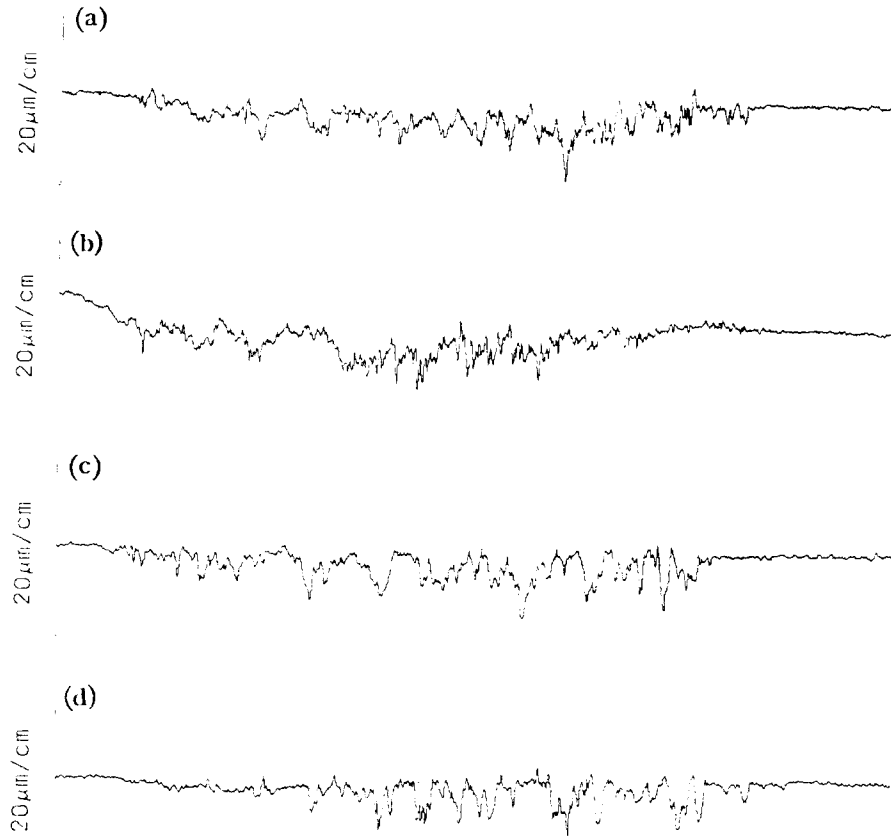


Fig. 8 실험조건에 따른 표면조도 (a)P1 (b)N1 (c)N2 (d)N3

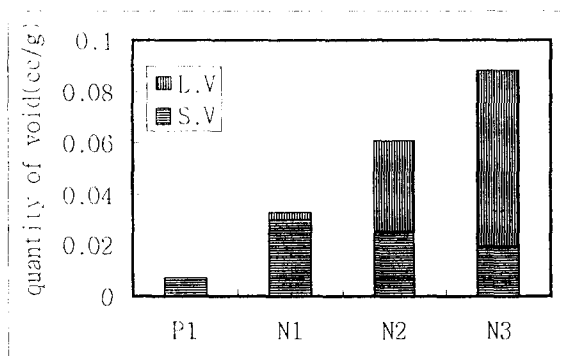


Fig. 10 소결조건에 따른 pore분포(S.V=small void 4 μ m이하,L.V=large void 20~70 μ m)

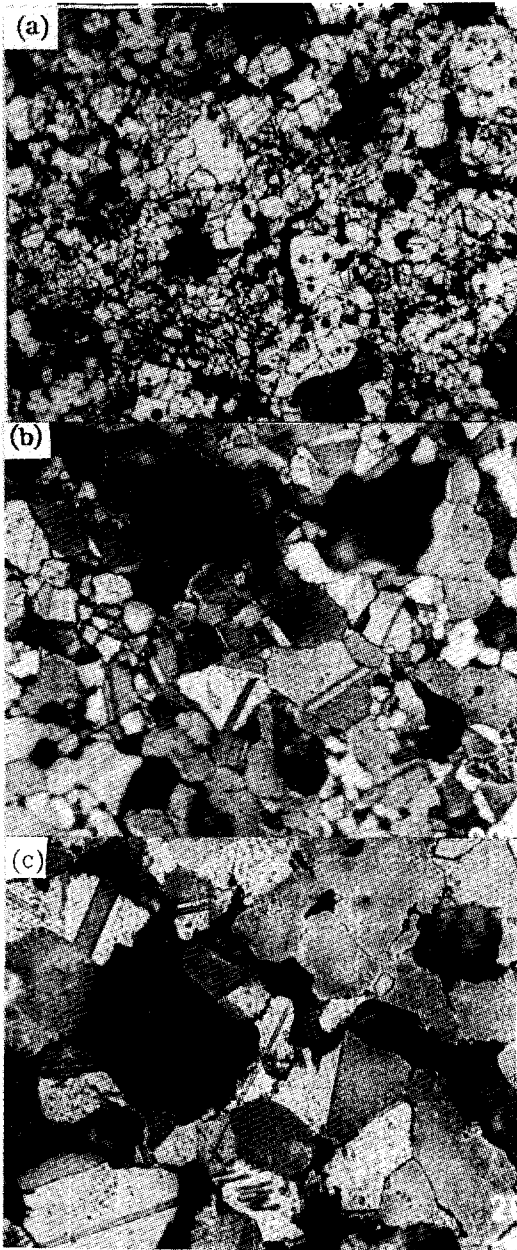


Fig. 9 부가압소결의 온도에 따른 조직변화
 (a) 820°C (b)870°C (c)930°C

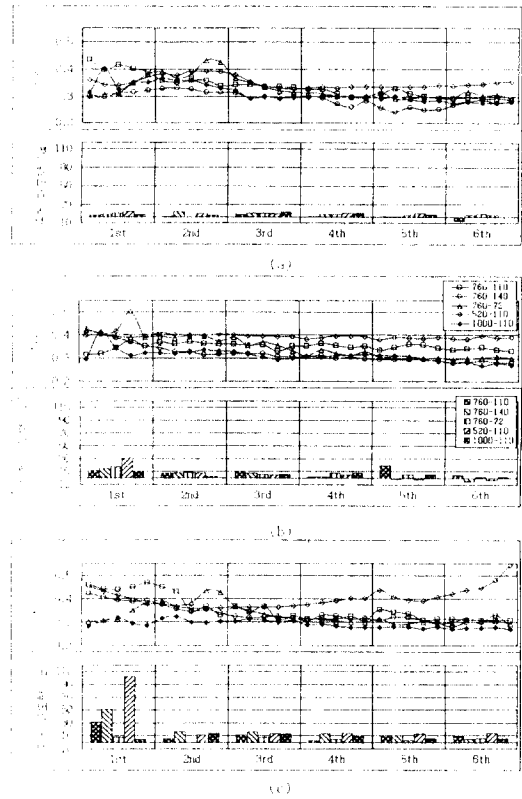


Fig. 11 부가압소결의 마찰성질