

철계 소결체의 피삭성 향상에 관한 연구

임 태 환*

A Study on the Improvement of Machinability of Sintered Ferrous Parts

Tae-Whan Lim*

요 약 철계 소결체에 피삭성을 향상시키는 원소(C, Mn, P) 및 화합물(MnO, CaF₂, SiO₂)을 Fe + 0.7%C 소결체에 첨가하여 실험한 결과, 0.15%SiO₂ + 0.15%MgO를 첨가하여 소결한 후 증기처리를 실시한 소결체가 가장 우수한 피삭성을 나타내었다.

Abstract Various elements which can improve the machinability of sintered ferrous materials were added into the sintered Fe + 0.7%C. From the results of the machinability test, it was found that the sintered part containing 0.15%SiO₂ + 0.15%MgO, which was sintered followed by a steam treatment, exhibited the superior machinability.

Key Words : Sintering, Machinability, Steam treatment, Ferrous materials

1. 서 론

현재, 새로운 오토모티브(주)에서는 Fe-C계 합금을 사용하여 자동차용 볼(water) 펌프(pump)용 부품, 충격소버(shock absorber)용 피스톤(piston), 디젤 엔진용의 고강도 부품 등을 생산하고 있다. 부품의 제조는 분말 야금법(금형성형+소결법)을 적용하여 분말의 혼합, 금형성형, 고상소결, 후가공[제품의 치수를 얻기 위한 재가압(sizing), 표면연마(grinding), 내·외경 및 홀(hole) 가공, 연삭 등] 등의 공정으로 생산된다. 위와 같은 소결 부품의 제조에 있어서 가장 큰 문제점의 하나는 후가공 처리에 많은 시간이 소비되고, 가공이 어려운 단점이 있다[예를 들어, 충격 소버용 피스톤은 내·외경(연삭 및 연마) 및 구멍(drill)가공을 한다]. 따라서, 제품의 강도 및 내마모성은 유지되면서 소결 부품의 피삭성을 향상시킬 수 있는 소결체를 개발하여야 한다. 피삭성 향상 소결 부품이 개발되면, 에너지 절약 및 환경의 green화, 생산성의 증대에도 기여할 수 있어 약 2~3억 원(년)의 제품원가를 절약할 수 있다.

현재, 피삭성을 향상시키는 원소로는 C, S, P, Ca, Mn, Pb 등이, 합금으로는 Mns, CaS, MnP, CaP, PbS, Mn₂C, Ca₂C, Pb₂C 등[1]이, 산화물로는 SiO₂, Enstatite(MgSiO₃)

등[2, 3]이 거론되고 있으나, 이와 같은 원소, 합금 및 화합물을 Fe-C계 분말에 첨가할 때 몇 % 첨가하는지, 합금 및 화합물의 경우 어떤 조성비(예를 들어, MnS의 경우 Mn과 S의 비율)로 첨가하는지, Fe 분말에 단독으로 첨가하는지, 용해시켜 첨가하는지 전혀 알 수가 없다.

따라서 본 연구에서는 피삭성을 향상시키는 원소, 합금 및 화합물을 철계 분말에 첨가하여 성형, 소결한 소결체 및 소결 후 증기처리를 실시한 소결체에 대하여 치밀화 특성평가, 기계적 특성평가, 피삭성 실험 등을 계통적으로 조사하여 피삭성 향상 소결 합금을 제조하고자 한다.

2. 실험 방법

원료 분으로는 주로 양산용으로 사용되고 있는 Fe + 0.7%C 혼합분(Fe 분의 입도 : 150 μm, C분의 입도: -44 μm) 및 Fe + 0.7%C + χ%M(M : 성분을 알 수 없는 피삭성 향상 금속분말)혼합분을 사용하였다.

피삭성을 향상시킬 목적으로 첨가용 분말로는 Mn 분말(입도 : -44 μm), P 분말(입도 : 150 μm), CaF₂ 분말(입도 : -44 μm), SiO₂ 분말(입도 : -44 μm), MgO 분말(입도 : -44 μm)을 사용하였다. 피삭성 향상 시험용 분말로는 Fe + 0.7%C 혼합분말에 0.75%CaF₂ 분말을 첨가한 후 P 및 Mn 분말의 량을 변화시켜 만들었고, 이 이외도 필요에 의하여 Fe + 0.7%C혼합분말에 SiO₂

*선문대학교 공과대학 재료화학공학과
Tel: 041-530-2343

및 MgO를 첨가한 Fe + 0.7%C + 0.15%SiO₂ + 0.15% MgO 혼합분말도 만들었다. 위의 분말 혼합은 V형 믹서기를 이용하였다.

어느 경우에 있어서도 혼합분말에는 윤활제로 0.8% 스테아린산 아연을 첨가한 후 양산용 자동 프레스를 사용, 7 ton/cm²의 압력으로 성형체를 작성하였다. 소결은 생산용 메시 벨트(mesh belt)연속로를 사용하여 ENDO 변성가스 분위기 중, 1125°C의 온도에서 30분간 실시하였다. 소결 후 필요에 따라서는 600°C의 온도에서 시간당 2.2 kg의 증기압력으로 60분간 증기처리도 실시하였다. 제조된 소결체에 대하여는 소결체의 밀도측정, 조직관찰, EDX에 의한 성분분석, 산소·탄소분석, 로크웰 경도(H_RB) 측정, 피삭성 시험 등을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

먼저, Fe + 0.7%C + χ %M(피삭성 향상 분말)분말에

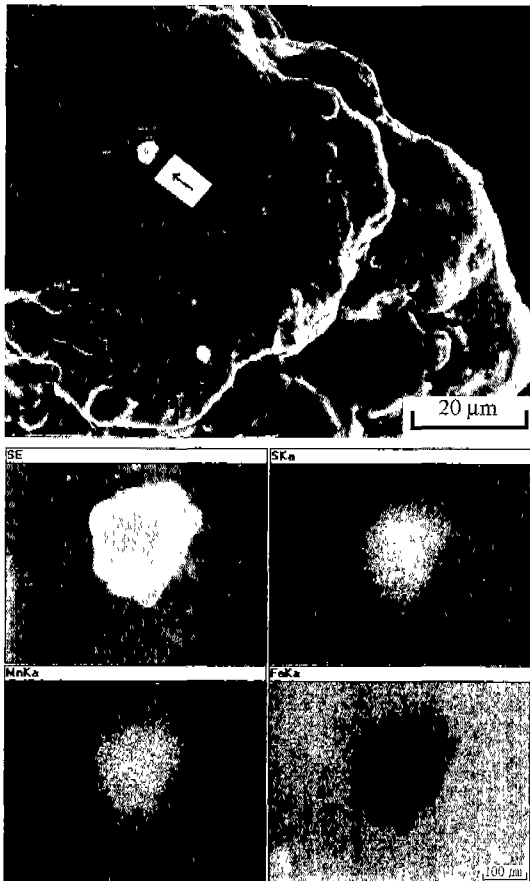


Figure 1. SEM micrograph and S, Mn, Fe, X-ray images of Fe + 0.7%C + χ %M powder

서 피삭성 향상 원소(χ %M)의 성분을 조사하고, χ %M이 어떠한 형태로 첨가(혼합분 또는 합금분)되어 있는지를 알아보기 위하여 EDX가 부착된 전자 현미경(SEM)를 이용하여 피삭성 향상 원소의 형태를 면 분석한 결과를 Figure 1에 나타내었다.

그 결과, 피삭성 향상 원소는 Mn과 S로 합금의 MnS 형태로 첨가되어 있는 것을 알 수 있다. Figure 2에는 Fe + 0.7%C + χ %M 소결체의 SEM 조직 사진 예를 나타내었다. 그 결과, 소결체에는 30~40 μ m의 기공이 잔류하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 소결체의 여러 면에서 기공 주변의 성분분석을 실시한 결과, 소결체의 기공부분에는 Ca 및 Si의 농도가 높게 나타났다. 따라서 피삭성 향상 원소로는 MnS 이외에 Ca도 첨가되어 있는 것을 알 수 있다.

위와 같은 결과가 얻어졌음에도 불구하고 본 실험에서 피삭성 향상 원소로 황(S)을 사용하지 않고, 다른 원소 및 합금, 화합물을 사용한 것은 S가 소결로의 메시 벨트 및 발열체를 오염시켜로의 수명을 단축시키기 때문이다. Figure 3에는 Fe + 0.7%C, Fe + 0.7%C χ %M 소결체 및 Fe + 0.7%C + 0.75%CaF₂ 소결체의 밀도에

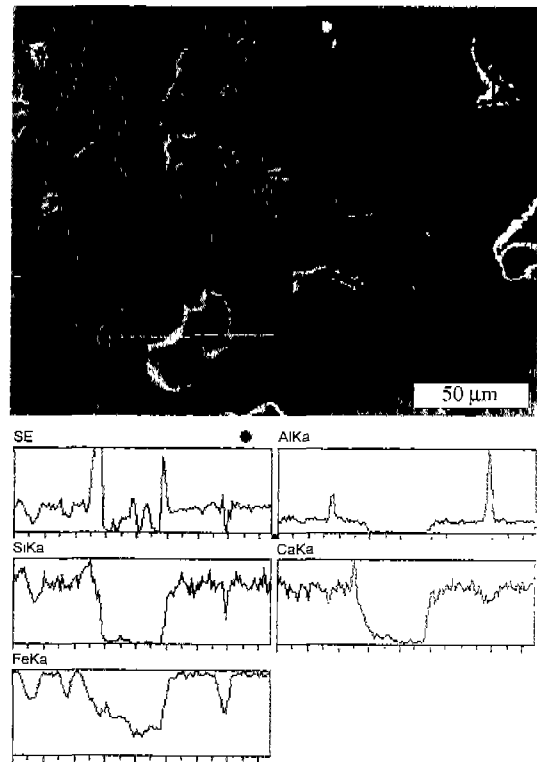


Figure 2. SEM micrograph and S, Mn, Fe, X-ray images of Fe + 0.7%C + χ %M powder

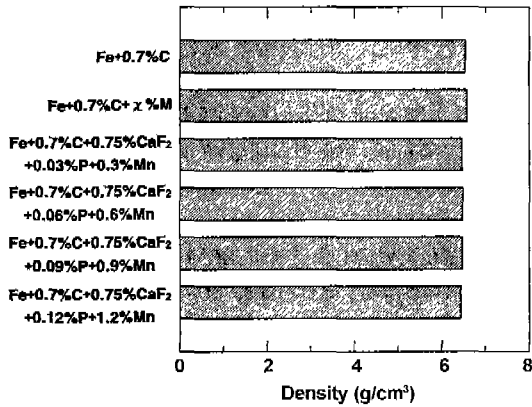


Figure 3. Density of Fe + 0.7%C, Fe + 0.7%C + χ %M and Fe + 0.7%C + (0.03~0.12) %P + (0.3~1.2)%Mn sintered compact

미치는 0.03~0.12%P + 0.3~1.2%Mn 첨가의 영향을 나타내었다. 그 결과 Fe + 0.7%C, Fe + 0.7%C + χ %M 소결체의 밀도는 각각 6.52, 6.57 g/cm³로 나타났다. 또한, Fe + 0.7%C + 0.75%CaF₂에 Mn + P를 첨가한 소결체의 밀도는 Mn + P의 첨가량 증가와 더불어 약간 저하하는 경향을 나타내었다. 예를 들어, 첨가량이 가장 많은 0.12%P + 1.2%Mn 첨가에서 소결체의 밀도는 6.45 g/cm³로 나타났다.

다음은 Fe + 0.7%C에 피삭성 향상 원소인 0.75% CaF₂ 분말을 첨가하고, Mn + P 분말의 양을 변화시켜

제작한 소결체에서 첨가분의 소결체 중 존재 형태를 알아보기 위하여 SEM 조직관찰 및 EDX에 의한 성분 분석을 실시하여 Figure 4에 나타내었다. 그 결과, CaF₂는 고립된 기공 주변에 존재하고, Mn은 Fe에 고용되지 않고 Mn분 말 형태로 존재하고, P는 어느 경우에 있어서나 Fe 중에 균일하게 고용되어 있는 것을 확인하였다.

Figure 5에는 각 소결체의 광학 현미경 조직 사진(연마면) 예를 나타내었다. 조직적으로 소결체의 밀도의 결과와 일치하여 기공이 존재하는 것을 알 수 있다.

Figure 6에는 소결체의 부식면 조직 사진 예를 나타내었다. Fe + 0.7%C 및 Fe + 0.7%C + χ %M 소결체의 조직은 모두 α , α + Fe₃C(pearlite)의 조직으로 되어 있었고, χ %M이 첨가된 소결체에서는 약간의 개재물(항화물)이 관찰되었다. Fe + 0.7%C + 0.75%CaF₂에 Mn + P 분말의 양을 변화시켜 제작한 소결체의 경우는 Mn 및 P의 양이 증가하면서 α + Fe₃C의 양은 감소하여 조직적으로도 Mn + P 무첨가 소결체의 조직과 전혀 다른 것을 알 수 있다. Mn에 의하여 오스테나이트의 조직[4]으로 되었다고 생각하였다.

Figure 7에는 소결 후 증기처리 실시한 소결체의 광학 현미경 조직 사진 예를 나타내었다. 조직적으로 기공 및 결정립 계에 산화물이 채워져 있는 것을 알 수 있다. 이 Fe 산화물의 종류(성분)을 알아보기 위하여 EDX 분석 결과, Fe의 산화물 Fe₂O₃, Fe₃O₄, FeO 중 결정구조가 치밀한 Fe₃O₄ 산화물인 것을 확인하였다.

Tables 1, 2에는 각 소결체의 산소·탄소량을 분석하

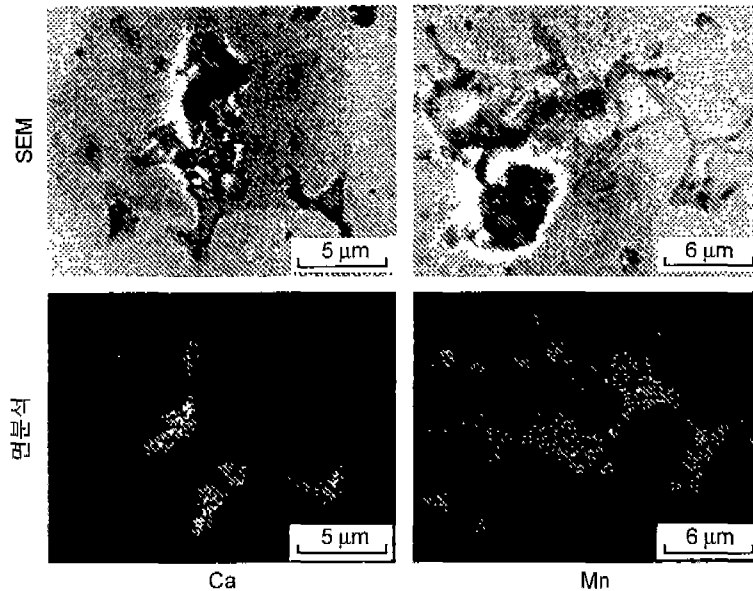


Figure 4. SEM micrograph and Ca, Mn X-ray images of Mn + P added sintered compacts

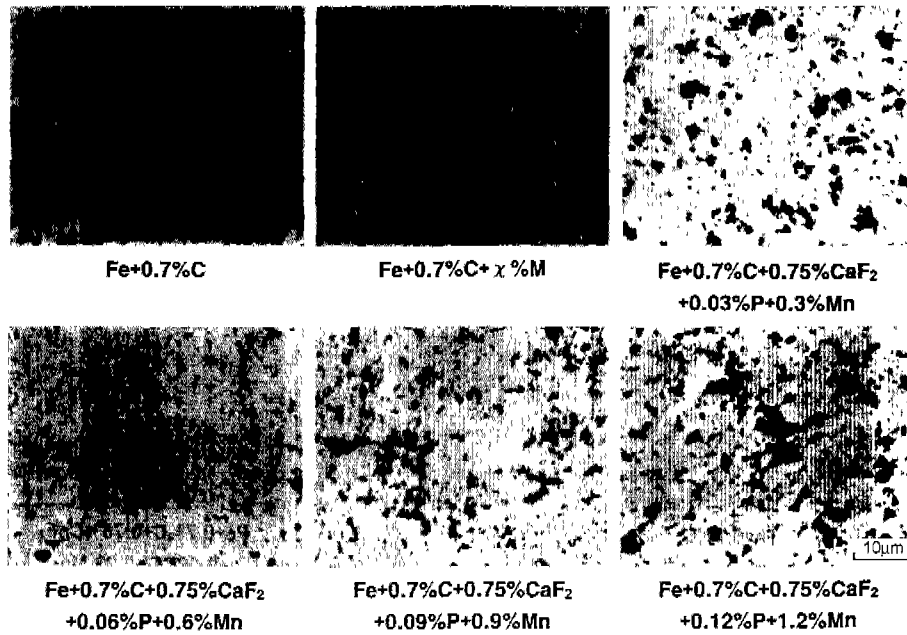


Figure 5. Examples of optical microstructures of various sintered compacts (as-polished)

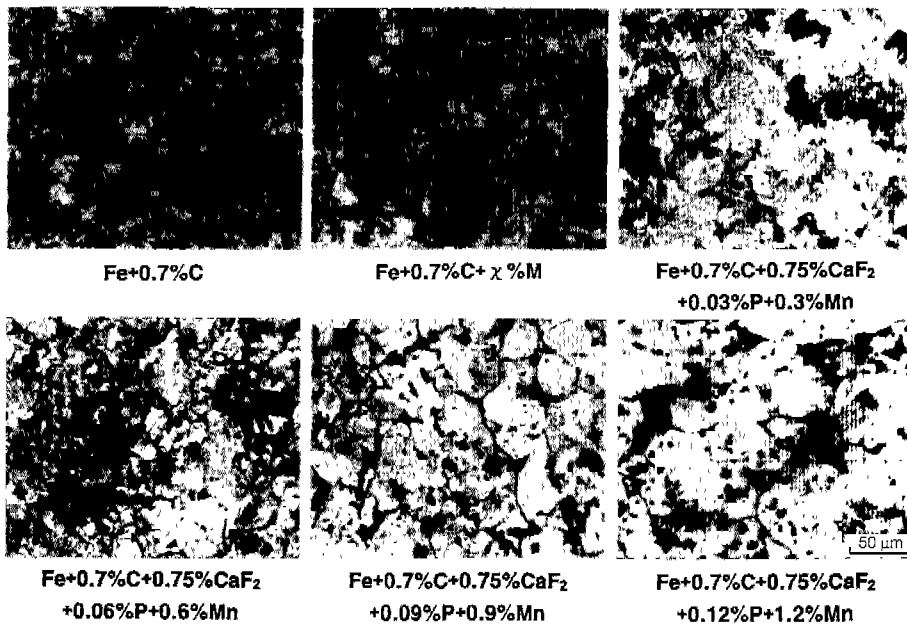


Figure 6. Examples of optical microstructures of various sintered compacts (etched)

여 나타내었다. 먼저 소결체의 산소량을 보면, Fe + 0.7% C 소결체 및 Fe + 0.7% C + χ % M 소결체에서 각각 0.418%, 0.724%로 나타났고, Fe + 0.7% C + 0.75% CaF₂ 소결체의 경우는 Mn + P 첨가 원소의 증가와 더불어 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히 첨가 원소량이 많은

0.12% P + 1.2% Mn 첨가 소결체의 산소량은 0.796%로 되어 무첨가 소결체에 비하여 약 2배 정도 높은 것을 알 수 있다. 또한 소결체의 탄소량은 Fe + 0.7% C 소결체 및 Fe + 0.7% C + χ % M 소결체에서 각각 0.718%, 0.677%로 나타났다. Fe + 0.7% C + 0.75% CaF₂ 소결체

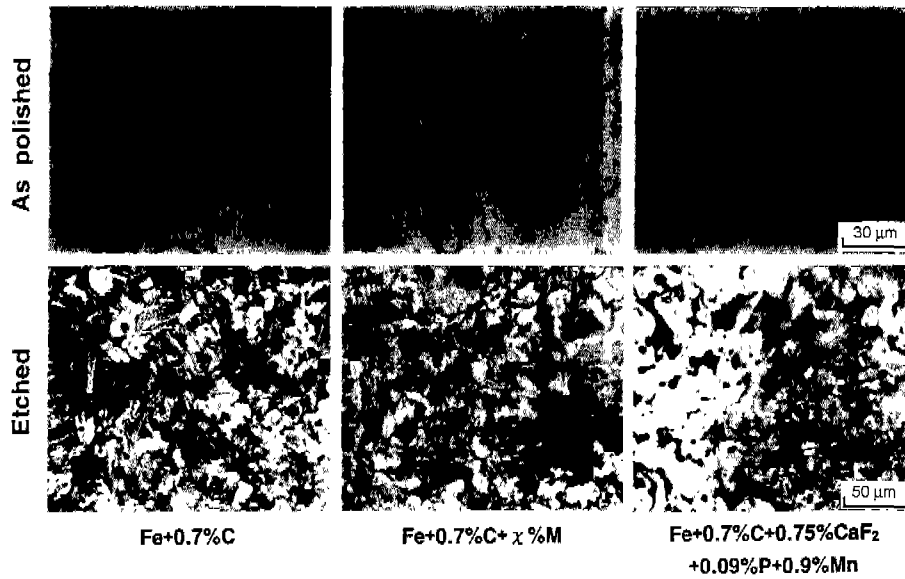


Figure 7. Examples of optical microstructures of various sintered compacts with steam treatment

Table 1. Contents(mass%) of oxygen in various sintered compacts

	ENDO gas, Ts = 1398 K, ts = 1.8 ks					
	Fe + 0.7%C + 0.8%Zn-St	Fe + 0.7%C + χ %M + 0.8%Zn-St	Fe + 0.7%C + 0.75%CaF ₂ + 0.8%Zn-St			
			0.03%P + 0.3%Mn	0.06%P + 0.6%Mn	0.09%P + 0.9%Mn	0.12%P + 1.2%Mn
Oxygen content (mass %)	0.4178	0.7244	0.3434	0.6261	0.7491	0.7956

Table 2. Contents (mass%) of carbon in various sintered compacts

	ENDO gas, Ts = 1398 K, ts = 1.8 ks					
	Fe + 0.7%C + 0.8%Zn-St	Fe + 0.7%C + χ %M + 0.8%Zn-St	Fe + 0.7%C + 0.75%CaF ₂ + 0.8%Zn-St			
			0.03%P + 0.3%Mn	0.06%P + 0.6%Mn	0.09%P + 0.9%Mn	0.12%P + 1.2%Mn
Carbon content (mass %)	0.7183	0.6773	0.7064	0.7327	0.7606	0.8178

의 탄소량은 Mn + P 첨가량의 증가와 더불어 증가하여 0.12%P + 1.2%Mn 첨가에서 0.818%로 가장 높게 나타났다.

Table 3에는 각 소결체의 로크웰(H_RB) 경도값을 나타내었다. 증기처리 전 소결체의 경도를 보면, Fe + 0.7%C 소결체 및 χ %M 첨가 소결체에서 각각 69.7, 78.7의 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또한, Fe + 0.7%C + 0.75%CaF₂ 소결체의 경우는 Mn + P 첨가량의 증가와 더불어 경도 값은 증가하여 0.09%P +

0.9%Mn 첨가에서 최대 91.1을 나타내고, 그 이상의 첨가에서는 저하하였다. 특히 P와 Mn이 각각 0.06, 0.6% 이상 첨가된 소결체의 경우, Fe + 0.7%C 소결체 및 χ %M 첨가 소결체에 비하여 경도의 향상이 크게 인정되지 않고[5], 조직적으로는 다른 조직을 나타내고 있는 것으로 보아 0.06%P + 0.6%Mn 이상 첨가 소결체의 조직은 오스테나이트 조직이라고 생각한다.

또한, 어느 경우에 있어서나 소결체의 경도값은 증기처리된 소결체가 증기처리 되지 않은 소결체에 비하여

Table 3. Rockwell hardness (H_{RB}) of various sintered compacts

	ENDO gas, $T_s = 1398\text{ K}$, $t_s = 1.8\text{ ks}$					
	Fe + 0.7%C + 0.8%Zn-St	Fe + 0.7%C + $\chi\%$ M + 0.8%Zn-St	Fe + 0.7%C + 0.75%CaF ₂ + 0.8%Zn-St			
			0.03%P + 0.3%Mn	0.06%P + 0.6%Mn	0.09%P + 0.9%Mn	0.12%P + 1.2%Mn
Without steam treatment Hardness (H_{RB})	69.7	78.7	82.4	84.4	91.1	88.5
With steam treatment Hardness (H_{RB})	99.4	99.6	102.9	103.3	104.6	105.9

10~30 정도 높은 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 증기처리에 의해 소결체의 기공을 결정 구조적으로 치밀한 Fe_3O_4 산화물(흑피막)로 채웠기 때문이라고 판단된다.

다음은 Fe + 0.7%C, Fe + 0.7%C + $\chi\%$ M 소결체 및 Fe + 0.7%C + 0.75%CaF₂에 Mn + P의 첨가량을 변화시켜 제작한 각 소결체에 대하여 홀 가공을 통해 드릴이 파손될 때까지의 소결체 가공수를 Figure 8에 나타내었다. 그 결과, Fe + 0.7%C 소결체는 1개 가공 후 파손되었고, $\chi\%$ M을 첨가한 소결체는 291개 가공 후 파손되었다. 그러나 앞에서 전술한 바와 같이 황(S)은 소결체의 내마모성을 저하시키고, 소결료를 오염시켜 소결로의 수명을 단축시키는 역할을 하므로 황(S)의 사용은 배제하는 것이 바람직하다고 생각한다.

다음으로 P + Mn의 첨가량 증가에 따른 가공 수를 보면 0.03%P + 0.3%Mn, 0.06%P + 0.6%Mn, 0.09%P + 0.9%Mn, 0.12%P + 1.2%Mn 첨가 소결체에서 각각 35, 19, 24, 66개 가공되어 0.12%P + 1.2%Mn 첨가 소결체가 가장 우수한 피삭성을 나타내었다. 또한 최근 논문[2, 3]에 의하면 산화물 첨가가 재료의 피삭성을 향

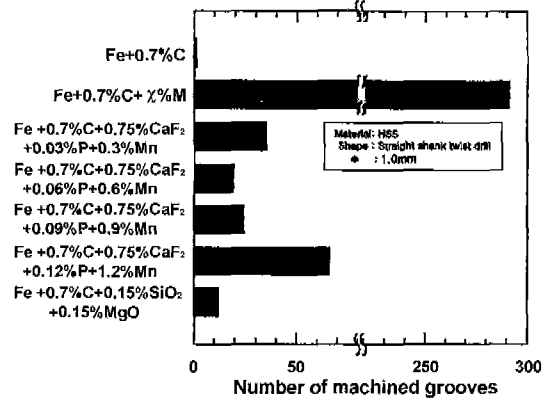


Figure 8. Number of machined grooves of various sintered compacts

상시키는데 우수한 역할을 한다는 보고가 있으므로 Fe + 0.7%C 소결체에 0.15%SiO₂ + 0.15%MgO를 첨가하여 홀 가공 실험한 결과도 Figure 8에 병행하여 나타냈으나, 12개의 가공 후 드릴은 파손되었다.

Figure 9에는 Fe + 0.7%C, Fe + 0.7%C + $\chi\%$ M 소결체 및 Fe + 0.7%C에 15%SiO₂ + 0.15%MgO를 첨가한 소결체에 대하여 증기처리 전과 후의 드릴 홀 가공에 의한 피삭성 실험 결과를 비교하여 나타내었다. 가공수는 어느 경우에 있어서나 증기처리 후가 증기처리 전에 비하여 2.4~35배 높게 나타났다. 특히 0.15%SiO₂ + 0.15%MgO 첨가 소결체의 경우는 증기처리 전에는 12개 가공 후 드릴이 파손되었으나, 증기처리 후에는 429개 가공 후 파손되어 그 차이가 월등한 것을 알 수 있다. 따라서, 0.15%SiO₂ + 0.15%MgO 산화물 첨가로 소결체의 피삭성 향상 및 소결로 오염 문제를 동시에 해결하였다. 또한, 산화물이 첨가되었으므로 소결체의 내마모성도 산화물 무첨가 소결체에 비하여 양호하리라 기대된다.

앞으로 내마모성을 유지하면서 $\chi\%$ M 첨가 소결체와 동일한 정도의 가공수와 나타내는 소결체를 얻기 위하여는 첨가 산화물(SiO₂ + MgO)의 분말입도 분포가 중요하므로 소결체의 피삭성에 미치는 첨가 산화물의 분

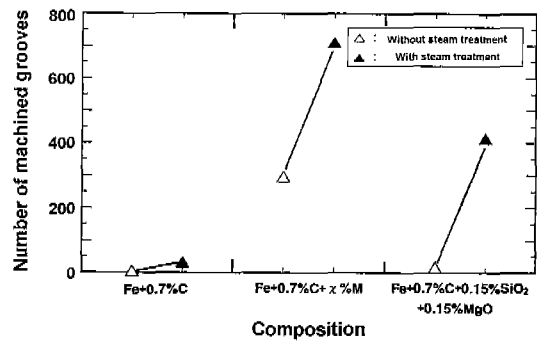


Figure 9. Effects of composition, steam treatment on number of machined grooves

말입도 영향을 조사할 필요가 있다고 생각한다.

4. 결 론

소결체의 피삭성에 미치는 각종 첨가원소의 영향을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Fe + 0.7%C + χ %M(피삭성 향상 원소)분말에서, 첨가 원소 χ %M는 주로 합금분의 MnS 및 Ca인 것을 알 수 있었다.

2. Fe + 0.7%C, Fe + 0.7%C + χ %M 소결체 및 Fe + 0.7%C + 0.75%CaF₂에 0.03~0.12%P + 0.3~1.2%Mn을 첨가한 소결체에 대하여 밀도를 측정된 결과 6.45~6.57 g/cm³의 범위로 나타났다.

3. 소결체의 조직관찰 결과 Fe + 0.7%C, Fe + 0.7%C + χ %M 소결체는 α , α + Fe₃C의 조직으로 되어 있고, Mn + P 분말의 양을 변화시켜 제작한 소결체의 경우는 Mn 및 P의 양이 증가하면서 α + Fe₃C의 양은 감소하여 조직적으로도 Mn + P 무첨가 소결체와 전혀 다른 조직으로 되었다.

4. 소결체의 산소량을 보면, Fe + 0.7%C 소결체 및 Fe + 0.7%C + χ %M 소결체에서 각각 0.418%, 0.724%로 나타났으나, Fe + 0.7%C + 0.75%CaF₂의 경우는 Mn + P 첨가 원소의 증가와 더불어 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히 0.12%P + 1.2%Mn 첨가 소결체의 산소량은 0.796%로 되어 무첨가 소결체에 비하여 약 2배 정도 높은 것을 알 수 있다.

또한 소결체의 탄소량은 Fe + 0.7%C 소결체 및 Fe + 0.7%C + χ %M 소결체에서 각각 0.718%, 0.677%로 나타났다. Mn + P 첨가 소결체의 경우는 Mn + P 첨가량의 증가와 더불어 증가하여 0.12%P + 1.2%Mn 첨가에서 0.818%로 가장 높게 나타났다.

5. 소결체의 경도값(H_RB)을 보면, Fe + 0.7%C 소결

체 및 Fe + 0.7%C + χ %M 소결체는 각각 69.7, 78.7로 나타났고, Fe + 0.7%C + 0.75%CaF₂에 Mn + P를 첨가한 경우는 Mn + P 증가와 더불어 상승하여 0.09%P + 0.9%Mn 첨가에서 최대 91.1을 나타냈다.

6. Fe + 0.7%C + 0.75%CaF₂에 Mn + P의 첨가량을 변화시켜 제작한 소결체에 대하여 피삭성 실험을 실시한 결과, 0.03%P + 0.3%Mn, 0.06%P + 0.6%Mn, 0.09%P + 0.9%Mn, 0.12%P + 1.2%Mn 첨가에서 각각 35, 19, 24, 66개 가공되었다. 또한, Fe + 0.7%C에 0.15%SiO₂ + 0.15%MgO를 첨가한 소결체는 12개의 가공 후 파손되었다.

7. Fe + 0.7%C, Fe + 0.7%C + χ %M 소결체 및 Fe + 0.7%C + 0.15%SiO₂ + 0.15%MgO 소결체에 대하여 증기처리 전과 후의 피삭성을 비교한 결과, 0.15%SiO₂ + 0.15%MnO 첨가 소결체의 경우는 증기처리 전에는 12개 가공 후 드릴이 파손되었으나, 증기처리 후에는 429개 가공 후 파손되어 그 차이가 큰 것을 알 수 있다.

결론적으로 0.15%SiO₂ + 0.15%MgO 산화물 첨가로 소결체의 피삭성 향상 및 소결로 오염 문제를 동시에 해결하였다. 또한, 산화물이 첨가되었으므로 소결체의 내마모성도 산화물 무첨가 소결체에 비하여 양호하리라 기대된다.

참고문헌

- [1] 門間 改三, “鐵鋼材料學”, 實教出版, pp. 187, 1989.
- [2] 粉體粉末冶金協會 講演概要集, pp. 288, 1997년 春季大會.
- [3] 遠藤 弘之, “粉體および粉末冶金”, pp. 466, 44권, 1997.
- [4] 김수영, 양훈영, “금속재료학”, 문운당, pp. 245, 1983.
- [5] 長谷川 捻, “機械材料”, 實用機械文庫, pp. 3-15, 1979.