

## 자성연마용 Fe-WC 복합지립의 조직특성

이영란<sup>†</sup> · 배승열 · 권대환 · 안인섭 · 김유영\*

경상대학교 재료공학부, 생산기술연구소

\*진주산업대학교 기계공학과

### Characteristics of Fe-WC composite powders for Magnetic Abrasive

Y.R. Lee<sup>†</sup>, S.Y. Bae, D.H. Kwon, I.S. Ahn and Y.Y. Kim\*

Division of Materials Science and Engineering & RIIT, Gyeongsang National University

\*Department of Mechanical Engineering, Chinju National University

(2001년 8월 27일 받음, 2001년 10월 10일 최종수정본 받음)

**Abstract** In order to improve the grindability of magnetic abrasive, Fe-WC magnetic abrasives were made by a plasma melting method after ball milling at various times. This study aims to investigate homogeneously distributed hard phases in Fe matrix and strong bonding between the Fe-matrix and the hard phase. According to XRD, SEM and OM observation, Fe-WC magnetic abrasive powders exhibit the best grindability by plasma melting for 30h ball milling. As a result of magnetic abrasive polishing, the surface roughness,  $R_{max}$  5.0 $\mu$ m, before magnetic abrasive polishing, was reduced to  $R_{max}$  2.4 $\mu$ m. The new magnetic abrasive polishing process is thought to be the useful methods for the automation of three dimensional surface polishing.

**Key words** : magnetic abrasive, magnetic abrasive polishing

### 1. 서 론

고도기술에 의해 제품은 소형화 · 대량화 · 다종화 · 복잡화를 요구하며, 이에 맞춰 생산공정 역시 기계화 · 자동화 되어 가고 있다. 그러나 제품생산의 마지막 공정인 연마공정은 아직도 숙련공의 수작업에 의존하고 있는 실정으로서 제품생산의 완전한 자동화 · 기계화는 이루어지지 않고 있다.<sup>1)</sup> 제품생산의 자동화 · 기계화를 위해 자기연마법이 개발되었다. 자기연마법은 이러한 장점 외에도 비자성재료의 자기연마가 가능하며 복잡한 형상이 있는 면이나 곡면연마에 있어서도 공구와 가공물의 비접촉으로 연마입자에 유연성이 있으므로 복잡형상의 가공물에도 적용이 가능하다는 장점이 있다.

자기연마법의 기본적인 장치는 연마공구인 전자석과 자성지립(자성연마입자) 그리고 연마공구를 장착 · 회전시킬 수 있는 동작기계로 구성되어 있다. Fig. 1은 자기연마장치를 나타낸 것이다. 연마공구와 가공물 사이에 수 mm의 간극을 주고, 이 간극에 자성지립을 채우고 전류를 통하면 자화된 지립은 연마공구의 틈에서 가공물까지 브러쉬상을 형성하게 된다.<sup>2)</sup> 이 상태에서 연마공구를 회전시키면 자성지립이 회전하면서 가공물의 표면을 연마시키게 된다.<sup>3)</sup> 이러한 자기연마법은 복잡하고 다양한 형상을 갖는 금형제품의 연마가공에 주로 이용되며, 그 외 각종 기계제품의 연마가공에 응용되고 있고 앞으로 반도체, 전자 · 통신분야에서 요

구하는 극정밀 가공에도 사용될 것으로 기대된다.

자기연마법에서 가장 중요한 변수는 연마입자인 자성지립이다. 자성지립은 연마특성을 떨 뿐만 아니라 자성을 띄어야 하므로, 강자성체와 연마재의 복합체여야 한다. 자성지립을 가공면에 일정한 가압력으로 접촉하여 연마시키므로, 이 입자의 연마특성에 따라 가공물의 연마특성이 결정된다고 해도 과언이 아니다. 자성지립이 가져야 할 조건은 고온경도가 높으며 내마모성이 좋아야 한다. 또한 입자탈락이 일어나지 않게 하기 위해 큰 인성을 가져야 하며 자성지립 내에서 기지인 자성체와 연마재의 균일한 분포와 강한 결합이 무엇보다 중요하다.<sup>4)</sup>

기존의 자성지립은 PPM (Plasma Powder Melting) 법을 이용하여 자성지립을 제조하였다.<sup>5~7)</sup> 이 방법으로 제조된 자성지립은 밀도차이에 의한 편석이 발생하여 기지와 연마재간의 결합이 약하다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 기지와 연마재간의 균일한 분포와 강한 결합을 얻고자 하였으며, 연마재로는 높은 경도를 갖는 WC 분말, 기지재로는 강자성체인 Fe분말을 사용하였다. Fe기지에 연마재를 60vol.% 첨가하여 플라즈마 용융법으로 제조된 자성지립의 조직특성과 분포를 관찰하고자 하였다.

### 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 원료분말은 WC (대한중석, 0.85 $\mu$ m) 와 Fe(LSM Co., 100mesh 이하) 를 사용하였다. Fe-

<sup>†</sup> E-mail: lee-rany@hanmail.net

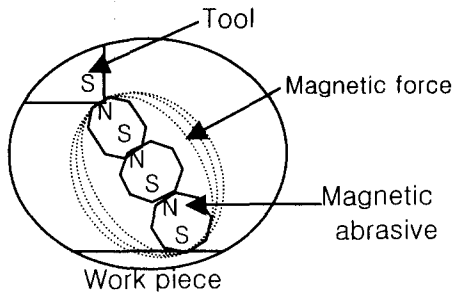


Fig. 1. Schematic diagram of polishing test machine.

60vol.%WC 조성으로 10h, 20h 및 30h 동안 각각 습식볼 밀 분쇄를 행하였다. 볼과 분말의 비는 10:1이고 산화방지를 위해서 n-hexane을 사용하였으며, 양호한 성형성을 위하여 파라핀을 첨가하여 혼합매개체로 사용하였다.<sup>8,9)</sup> 혼합된 분말의 n-hexane을 제거하기 위하여 50°C에서 12h 동안 건조시켰다. CIP (Cold isostatic press)를 이용해 2000bar의 압력으로 150sec 동안 성형하였으며, 높이 3mm, 직경 60mm의 판상형 성형체를 제조하였다. 성형체를 약 1500°C의 온도에서 5min 동안 플라즈마 용융하였다. 제조된 소결체는 직접과쇄법으로 과쇄시켜 분급하였다. 제조된 자성지립의 형태와 크기는 주사전자현미경 (Scanning electron microscope)으로 관찰하였으며, XRD (X-ray diffraction)를 이용하여 자성지립의 상 변화를 분석하였다.

각 크기로 분급된 자성지립을 사용하여 표면연마기로 습식 연마시험이 행하여졌다. 가공물과 연마공구 사이에 자성지립을 충전시킨 후 연마공구를 회전시키면 자성지립과 가공물 사이의 마찰력에 의해 가공물의 표면이 연마된다. 각각의 볼밀링 시간에 따라 플라즈마 용융법으로 제조된 자성지립을 이용하여 연마후 가공물의 표면거칠기 및 지립의 크기와 형태를 관찰되었다. 가공물은 금형강 재료인 HP4M을 사용하였으며, 10min 및 20min 동안의 자기연마 시험 후 표면조도기로 가공물의 표면거칠기를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 자성지립의 조직분석

Fig. 2는 자성지립 제조에 사용된 원료분말을 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. 구형과 불규칙한 형태가 혼합

되어있는 Fe의 평균입도는 30 $\mu$ m 이하이며, WC의 경우는 불규칙하고 각진 형태로서 평균크기는 약 1 $\mu$ m이었다.

Fe-60vol.%WC의 조성으로 10h, 20h 및 30h 동안 볼밀링 후 수거한 분말을 XRD로 분석한 결과가 Fig. 3에 보여진다. 초기 WC 분말의 XRD 분석결과 W<sub>2</sub>C상이 관찰되었는데 이 상은 WC 제조 시 반응온도가 충분히 높지 않거나 반응시간이 충분하지 못할 때 나타나는 상으로 알려져 있다.<sup>8)</sup> 볼밀링 시간이 증가함에 따라 피크의 폭이 넓어지고 강도가 낮아지는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 볼밀 시간 증가에 따른 strain의 축적과 입자 미세화에 의한 결과라고 생각된다. 또한 Fe와 WC 이외의 상은 존재하지 않는 것으로 보아 단순히 혼합된 상태임을 알 수 있다.

Fig. 4는 각 시간대 별로 볼밀링된 후 플라즈마 용융법으로 제조된 자성지립의 XRD 분석결과이다. 볼밀 후 플라즈마 용융법으로 제조된 자성지립의 경우 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C의 새로운 상을 생성하였다. 앞서서도 언급했듯이 W<sub>2</sub>C상은 WC시초분말(상용 WC분말)에 존재하는 상이며, 그 양은 비교적 균일하다. Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 라는 복합탄화물은 원료분말을 분쇄하여 미세화하면, 분말의 산소 흡착에 의해서 합금내의 탄소량이 부족할 때 생기는 것으로, 이 복합탄화물이 조직 내에 생성됨으로써 항절력이 감소하나 복합탄화물 자체의 경도가 높기 때문에 전체적인 경도는 증가하게 된다.<sup>10-12)</sup> 또한 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 상은 볼밀링 시간에 따라 혼합 분말의 탄소분해 반응성이 증가함으로써 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 복합탄화물의 양이 증가하는 것으로 판단된다. 볼밀링 시간의 증가에 따라 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 양은 증가하지만 WC, Fe의 양이 감소하는데, 이는 Fe와 WC가 결합하여 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C의 상을 생성시킨 결과라고 생각

Table 1. Conditions for magnetic polishing of HP4M work-piece.

Initial roughness	R <sub>a</sub> 0.55 $\mu$ m
	R <sub>max</sub> 5.0 $\mu$ m
Polishing gap	1.2mm
Tool revolution	1000rpm
Lubricant	WD-40
Polishing distance	10mm
Polishing time	10min, 20min

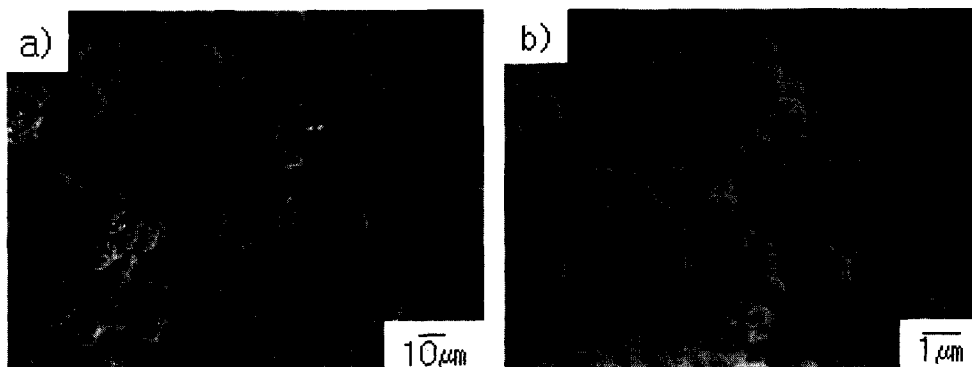


Fig. 2. SEM morphology of raw powders a) Fe and b) WC.

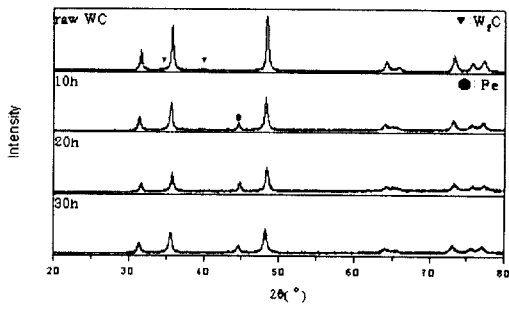


Fig. 3. XRD pattern of powders after ball milling for various times.

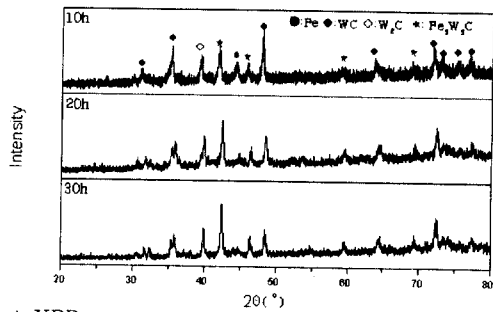


Fig. 4. XRD pattern of magnetic abrasive for various ball milling times.

된다.<sup>7)</sup>

각각의 시간으로 볼밀링 후 플라즈마 용융법으로 제조한 자성지립의 단면을 광학현미경으로 관찰한 결과가 Fig. 5에 보여진다. 볼밀링 시간이 증가할수록 자성지립 내의 기지와 연마재의 분포는 균일해지고 연마재내의 분산입자가 미세해지는 것을 확인할 수 있다. 또한 10h동안 볼밀링을 행하였을 경우, 53.37%이던 WC의 부피분율이 볼밀링 시간이 증가할수록 초기 함유량인 60vol.%에 가까워지는 것을 알 수 있다. 이는 볼밀링 시간이 증가하면서 연한 분말

인 Fe는 계속적으로 환상화되고, 경한 분말은 더욱 미세화되어 결국 냉간압접의 평형이 이루어져 분말이 경해지고 분산입자의 평균크기가 감소되기 때문이다.

기지와 연마재가 균일하게 분포하는 30h 동안 볼밀링된 후 플라즈마 용융법으로 제조된 자성지립을 이용하여 주사전자현미경으로 Fe와 WC의 표면을 line scanning한 결과는 Fig. 6에 표시되었다. Line scan은 시편의 5곳을 측정하였으며, 그림은 약 8 $\mu$ m의 크기를 갖는 WC 입자 하나를 분석한 결과를 나타낸 것이다. Fe와 WC가 확산하여 결합되고 있음을 관찰할 수 있다. 이는 순간적인 높은 열에 의해 기지와 연마재가 상호 확산 함으로써 계면에 반응층이 생성된 결과라고 생각된다.

### 3.2 연마특성 분석

시편의 연마특성 평가는 각 시간별로 볼밀링 한후 플라즈마 용융법으로 제조된 자성지립을 이용하여 Table 1의 조건으로 행하였다. 가공물은 10min 및 20min 동안 자기연마 후 표면 거칠기를 측정하였으며 초기 최대 값은 5.0 $\mu$ m이었다.

플라즈마 용융법으로 제조된 자성지립의 형상을 주사전자현미경으로 관찰한 결과가 Fig. 7에 보여진다. 각 지립의 평균입도는 170 $\mu$ m이며 각진 형상을 나타내고 있다.

플라즈마 용융법으로 제조된한 평균 입자크기가 170 $\mu$ m인 자성지립을 이용하여 Table 1의 조건으로 10min 및 20min 동안 자기연마한 시편의 표면 거칠기를 Fig. 8에 나타내었다. 30h 동안 볼밀링 후 제조된 자성지립을 자기연마한 경우 10h 및 20h 동안 볼밀링 후 제조된 자성지립을 이용한 경우보다 훨씬 낮은 2.5 $\mu$ m의 표면거칠기를 보였다. 이는 기지인 Fe 및 연마재의 균일한 분포와 높은 경도를 갖는 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 상의 존재에 의한 것이라 생각된다.

Fig. 9는 자성지립을 20min 동안 연마시험 후 입자형상

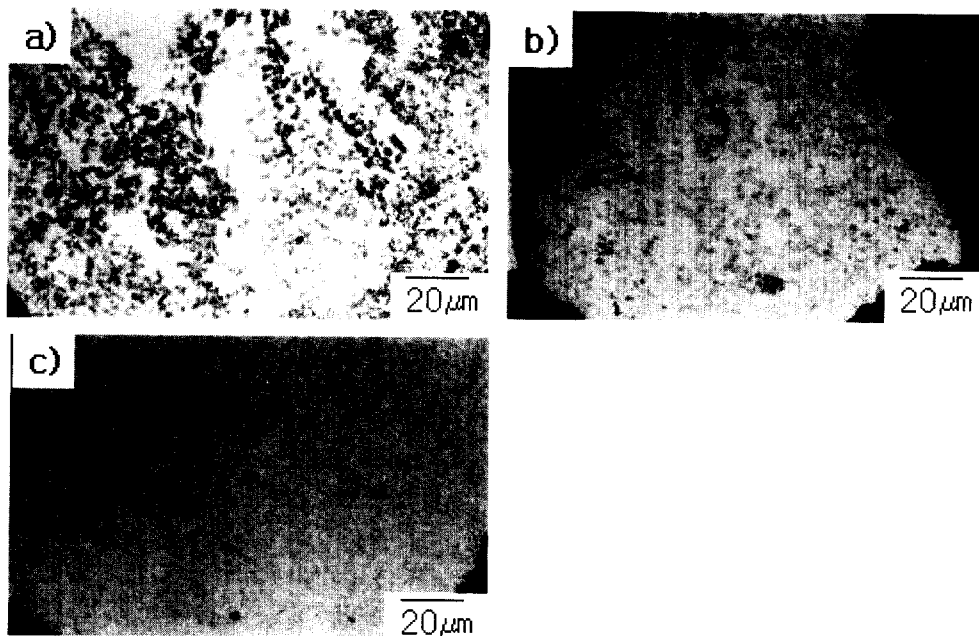


Fig. 5. Optical microstructure of Fe-WC magnetic abrasives prepared by plasma method after ball milling of a) 10h(Fe-48.5vol.WC), b) 20h(Fe-53.37vol.%WC) and c) 30h(Fe-57.50vol.%WC).

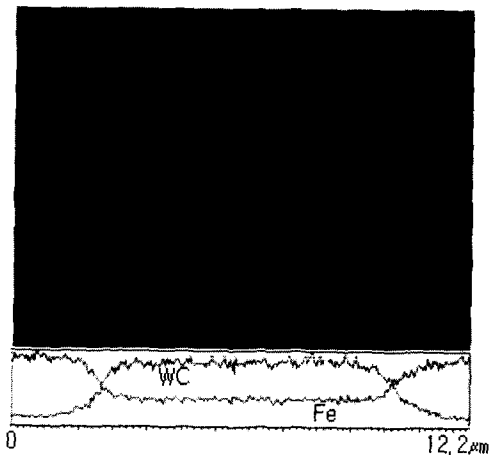


Fig. 6. SEM morphology and line scanning of Fe-WC magnetic abrasive for 30h ball milling.

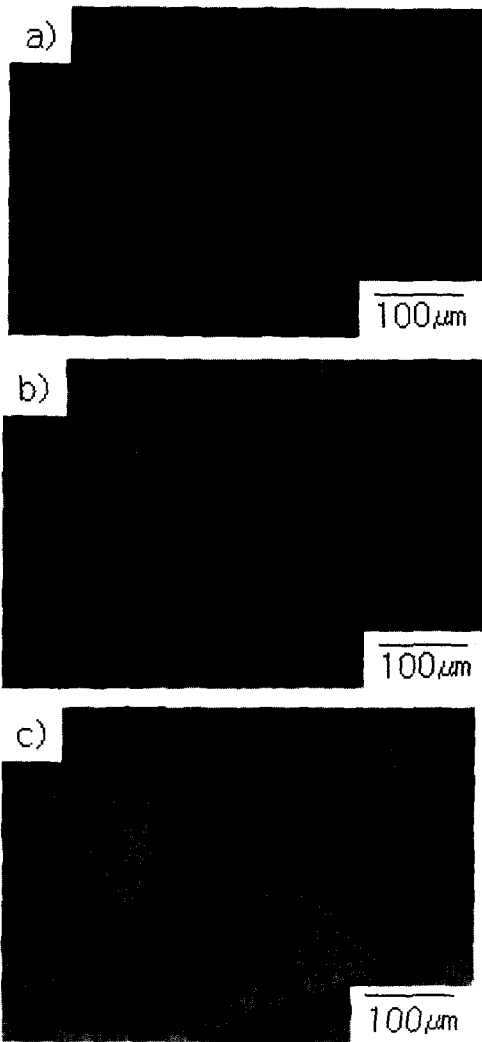


Fig. 7. SEM morphology of magnetic abrasive powders before polishing test for ball milling of a) 10h, b) 20h and c) 30h.

을 관찰한 결과이다. 10h 및 20h 동안 볼밀링 후 제조된 자성지립의 경우 20min 동안의 연마에서 자성지립이 파쇄되어 표면이 거칠어졌으나, 30h 동안 볼밀링 후 제조된 자

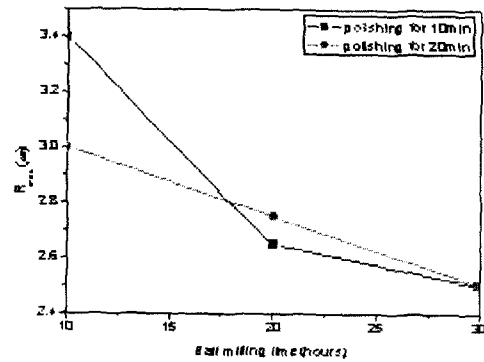


Fig. 8. Surface roughness after magnetic polishing of HP4M workpiece.

성지립의 경우는 지립의 파쇄가 거의 없으며 초기 형태를 그대로 유지하고 있다. 이러한 자성지립의 수명과 연마특성 향상은 앞의 XRD와 OM 관찰결과를 고려할 때 기지와 연마재간의 균일한 혼합과 높은 경도값을 갖는 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 상의 증가에 기인하였다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Fe에 WC의 분말을 60vol.%로 칭량하여 여러 시간동안 볼밀링한 후 플라즈마 용융법으로 제조한 자성지립을 이용하여 조직특성의 분석 및 연마시험을 행함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다

- 1) 볼밀링 시간이 증가할수록 WC 입자가 미세해지고 균일해졌으며, 자성지립의 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 상의 양이 증가하였다.
- 2) 30h 동안 볼밀링 후 제조된 자성지립을 이용하여 자기연마한 결과, 최대 표면거칠기가 2.5μm로 자기연마 전보다 50% 정도 낮은 표면거칠기를 보였다.
- 3) 자성지립의 내부에 기지와 연마재의 분포가 균일할수록 또한 Fe<sub>3</sub>W<sub>3</sub>C 복합탄화물의 양이 많을수록 연마특성이 높았다.

#### 참고문헌

1. 三好隆志, 濟藤勝政 外, 金形みがき 作業の知 獲得と 自動化 に関する研究, 形技術, 第 6 卷, 濟 8 號 77~75 (1991).
2. Lee Young Ran, Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, 8 (2001).
3. Hitomi Yamaguchi, Takeo shinmura, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 21 (2000) 237.
4. T. Shinmura, H. Yamaguchi, JSME Int. J., [C] 38 (1995) 798.
5. Masahiro Anzai and Takeo Nakagawa, The Fabrication of Fe-Carbide Composite using Plasma-Powder-Melting Method and It's Properties., ISTJ [C] (1990) 57.
6. Koichi Masuki, Masuhiro Anzai and Takeo Nakagawa, Magnetic Abrasive Finishing using PPM Magnetic Abrasive., JSPE 56-05 (1990) 935.

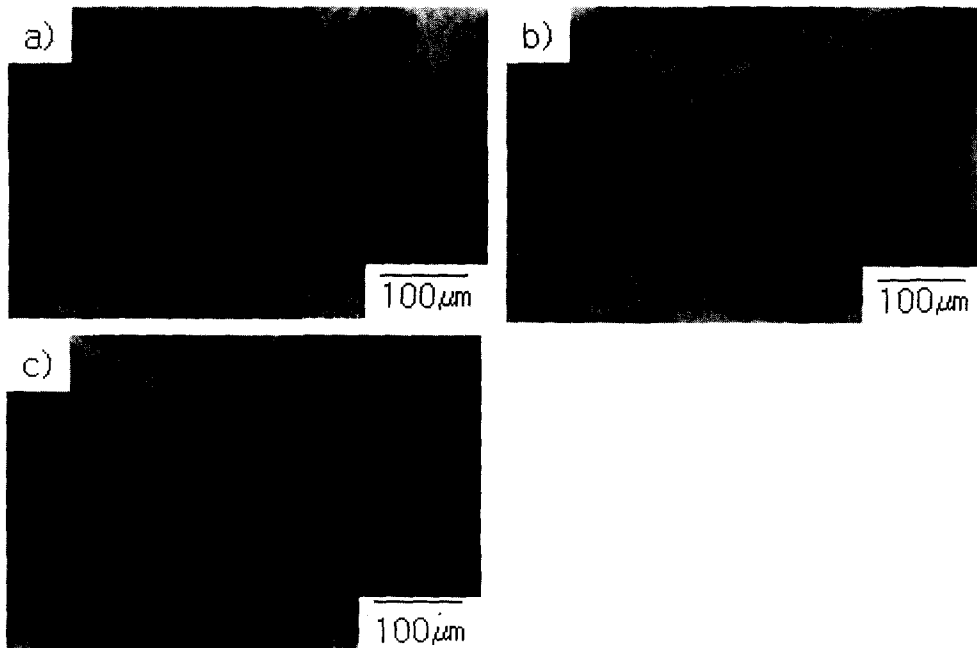


Fig. 9. SEM morphology of magnetic abrasive powders after polishing test of 20min for ball milling of a) 10h, b) 20h and c) 30h.

7. Masahiro Anzai, Koichi Masaki, Hiroshi Endo, Toru Sudo, Takeo Nakagawa, Pressing Effect of PPM Magnetic Abrasives by Pickling Treatment., 砥粒加工學會誌.
8. In-Eung Kim, Effect of Carbon Addition on the Properties of WC-12%Fe-3%Ni Alloy., KAIST (1981).
9. Dae-Hwan Kwon, A Study of WC-Co Hardmetal Powder Properties Fabrication by Directed Carburization., GSNU (1998).
10. H. Suzuki and H. Kubota, The Influence of Binder Phase Composition on the Properties of WC-Co Cemented Carbides., Planseeberichte für Pulvermetallurgid, **14** (1996).
11. V. K. Sarin, Morphology of eta Phase in Cemented WC-Co Alloys., Modern Development of Powder Met. **10** (1993).
12. D. N. French and D.A Thomas, The Nature and Effects of Excess Carbon Defects in WC-Co Alloys on Mechanical Properties., Int. of Powder Met. **3** (1967).