

## 다이아몬드 공구용 코발트계 합금 결합제의 제조 및 기계적 성질

이 기 선 · 정 승 부\*

공주대학교 공과대학 신소재공학부

\*성균관대학교 공과대학 금속재료공학부

### Fabrication Process and Mechanical Properties of Co-based Metal Bond in Diamond Impregnated Tools

Kee Sun Lee and Seung Boo Jung\*

Division of Advanced Materials Engineering, Kongju National University, Kongju, 314-701

\*School of Metallurgical and Materials, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746

(2000년 5월 23일 받음, 2000년 7월 5일 최종수정본 받음)

**초 록** Diamond 공구용 Co-0.5C-(15~20)Cr-20Ni-8W-(2~7)Fe 합금 결합제를 볼밀링(ball-milling) 법과 기계적 합금화(mechanical alloying) 법으로 합성하였다. stearic acid의 첨가 유무에 상관없이 Co-0.5C-(15~20)Cr-20Ni-8W-(2~7)Fe 합금의 경우 6시간 동안 합금화된 금속 분말에서 미세접합(micro welding) 현상이 균일하게 관찰되었다. stearic acid를 첨가하지 않을 때는 부분적으로 조대화된 분말이 형성되었으나 2% 첨가한 경우 미세하고 판상의 분말이 얻어졌다. stearic acid가 첨가된 복합분말을 열간 압축하여 기계적 성질을 평가한 결과 굽힘강도 1100MPa, 경도 약 46H<sub>RC</sub>의 특성을 나타냈다.

**Abstract** Co-0.5C-(15~20)Cr-20Ni-8W-(2~7)Fe alloy bond in diamond-impregnated abrasive tool was synthesized by ball-milling and mechanical alloying process. When the powders were mechanical alloyed for 6h, micro-welding in most metal powders was observed irrespective of addition of stearic acid. Without stearic acid in metal powders, partially coarse powders were obtained, which could be unfavorable to the densification of composite powders. The addition of stearic acid of 2% was effective in the formation of fine, plate like composite powders. The hot-pressed compacts showed rupture strength of 1100MPa and hardness of about 46H<sub>RC</sub>, respectively.

**Key words** : Co metal bond, Mechanical alloying, Hot pressing, Metal bond

### 1. 서 론

내마모 절·연삭 공구 중에서 다이아몬드 절삭공구는 암석류, 건축물, 도로 보수, 고경도 합금류, 엔진 재료, 유리류 및 각종 내화물류 등의 정밀·연삭에 광범위하게 사용되고 있다.<sup>1~5)</sup> 그림 1은 다이아몬드 휠을 나타낸 것으로 연삭재층(abrasive layer)과 샹크(shank) 부가 접합되어 있다. 절·연삭재층은 결합제와 인조 다이아몬드 입자가 혼합되어 있어 공구의 주요 기능을 담당한다. 이러한 결합제 본드로써 비트리파이드(vitrified)<sup>5)</sup> 및 금속 등이 사용되지만 난가공성 재료의 절단용으로는 금속계가 사용되고 있다.<sup>2)</sup> 이러한 결합제의 요구조건으로는 1) 적당한 내마모성, 2) 내충격성, 3) 우수한 소결성, 4) 다이아몬드 입자와의 결합성, 5) 저 열팽창, 6) 우수한 열전도성 등이 있다.<sup>2)</sup> 금속 기지를 형성하는 일반적인 원소는 Fe, Ni, Co, W, Cu 및 이들의 합금이고, 첨가제로써 C, P, Ti, Mo, Sn, Cr, Nb 등이 있다.<sup>2)</sup> 80Cu-20Sn 및 90Cu-10Sn 등과 같은 청동계 합금도 일부 채택되고 있으나 다이아몬드 분말을 절단(cutting) 혹은 연마(glazing over)하는 작용이 있어 난가

공성 재료에 적용되기 어려운 문제점을 갖고 있다.<sup>6)</sup> 금속계 결합제(Metal bond) 중에서는 순수한 Co 금속이 상용화되어 있으나, 가격이 높고, 내마모성이 부족한 문제점이 있어 Co 합금으로 개발되고 있다. 이 연구에서는 금속계 결합제를 개발하기 위해 다음의 몇가지 원칙을 적용하여 새로운 결합제를 제조하였다. 첫째, 기지금속은 Co를 기초로 한다. 이는 소결성이 여타 금속에 비해 우수하고 내마모성 및 내산화성이 우수하기 때문이다. 둘째, Cr을 첨가해서 Co의 농도를 낮춘다. Cr은 다이아몬드와의 젖음성(wettability)이 우수하다고 알려져 있으며<sup>2)</sup>, 탄화물 형성에 유리하고, 경도를 증가시키며 가격이 저렴하다. 셋째, 온도에 따른 동소변태를 억제하기 위해 Ni 및 Fe를 첨가함으로써 상온에서도 연성이 우수한 FCC 구조를 갖도록 한다.<sup>7)</sup> 이외에 W 및 C 등을 첨가하여 경도를 증가시키고 향후 다이아몬드 입자와 결합시에 우수한 계면 특성을 갖도록 조성을 선정하였다. 또한, 이러한 분말의 합성기술로써 기존의 볼밀링 공정과 기계적 합금화 공정을 적용하여 비교하였다. 이 연구의 범위는 Co 합금 분말의 합성 및 소결체 제조와 평가로 한정하였다.

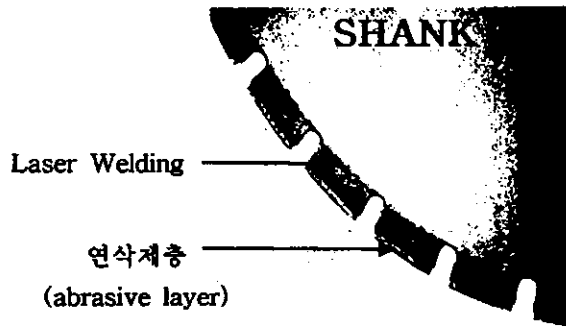


Fig. 1. Cross-section of abrasive layer-shank in typical cutting wheel.

## 2. 실험 방법

실험에 사용되는 분말의 종류는 Co, W, Ni, Fe, Cr, C 등이었으며, 입도는 Cr을 제외하고 1~5 $\mu$ m 범위의 분말로 정하였다. Cr은 제2연마제 및 내마멸성이 우수한 입자로서 50~60 $\mu$ m 범위 크기의 분말을 사용하였다. 분말 조성은 Co-0.5C-(15, 20)Cr-20Ni-8W-(2, 7)Fe로 정하였다. 분말의 혼합 및 합성법으로 볼밀링(ball-milling) 법과 기

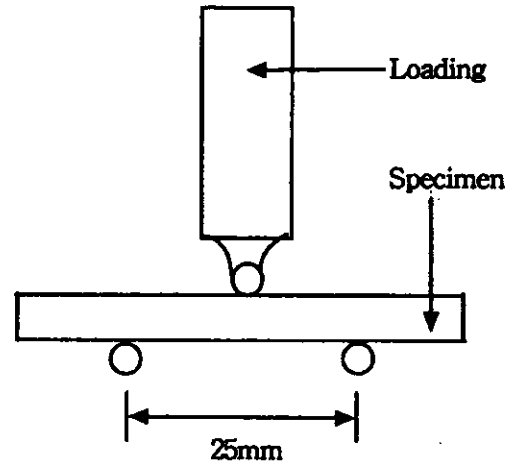


Fig. 2. Illustration for 3-point bend test of hot-pressed specimens.

계적 합금화(mechanical alloying) 법을 이용하여 합성하였다. 볼밀링에 사용된 Jar의 재질은 테프론(teflon) 이며, ball은 직경 6 $\phi$ 의 stainless steel을 사용하였다. 회전 속도는 200rpm으로 고정하여 2시간 동안 실시하였다. 분말의

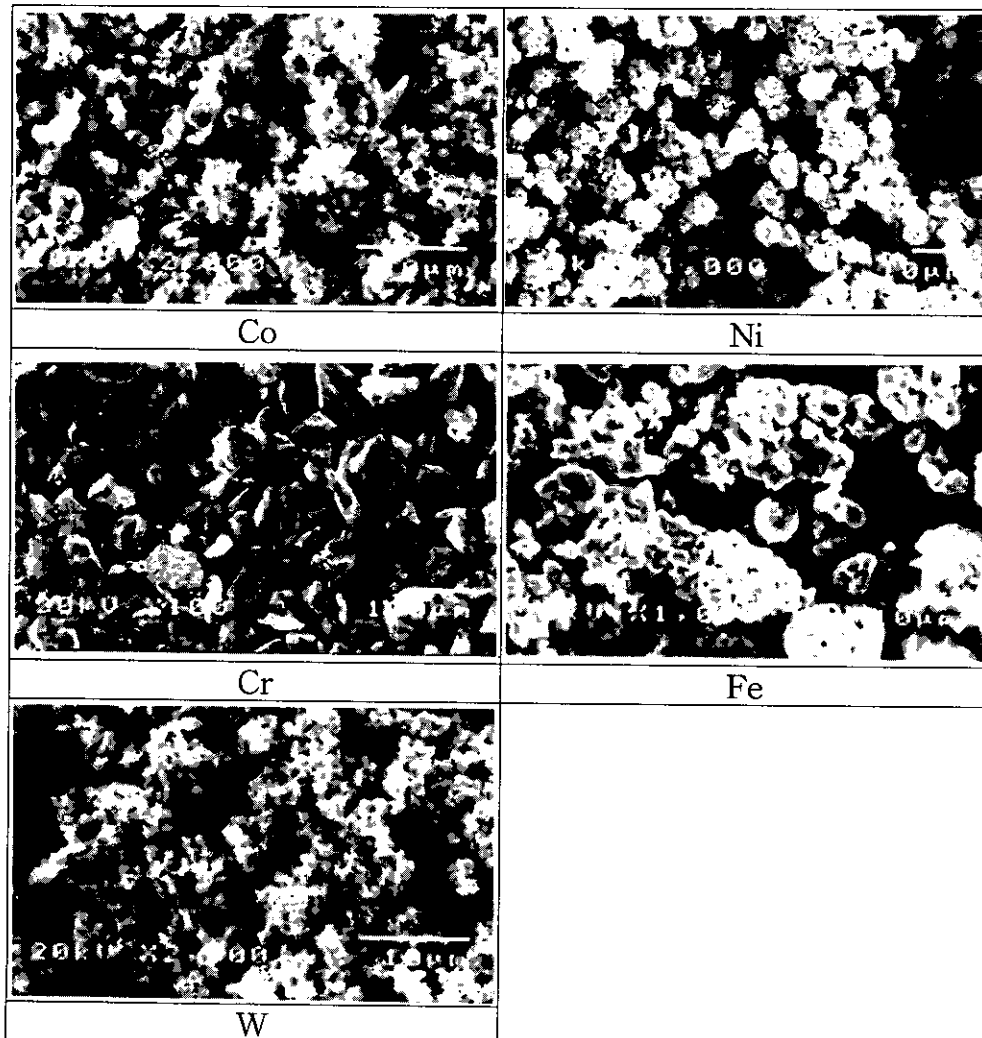


Fig. 3. Morphology of starting powders used for hot pressing process.

양은 charge당 50g을 사용하였다. 기계적 합금화(mechanical alloying)는 0.1atm의 Ar 분위기에서 6, 12, 24, 48시간 동안 진행되었다. 성형체 제조에 필요한 분말은 합금화 및 압점이 가능한 시간으로 선정하였다. Impeller의 주축 회전속도는 300rpm, ball은 6mm $\phi$ 의 stainless steel을 사용하였다. 장입 분말과 ball의 무게비는 1:30으로 유지하였다. 윤활제인 stearic acid의 첨가 유무에 따른 효과를 관찰하였다. 합성된 분말의 소결은 열간 압축(hot pressing) 법을 사용하였다. 소결 온도는 1223~1323K, 금형 재질은 흑연, 가압력은 400MPa이었다. 가열 속도는 573K/min.이었으며, 1차로 673K에서 1분간 유지한 후에 다시 승온하여 가압 온도에서 4분 동안 유지하고, 자연 냉각하였다. 소결체의 크기는 6 $\times$ 4 $\times$ 40(mm)이었다. 제조된 소결체의 표면을 연마하여 불순물을 제거한 후 소결 밀도를 측정하였다. 기계적 성질을 평가하기 위해 경도는 Rockwell 및 Vickers 경도계로 측정하였으며, 굽힘강도(bend strength)는 3점 굽힘(3-point bend test) 시험법으로 측정하였다. 기계적 합금화 과정에서 결정구조 변화는 X-ray diffraction으로 분석하였으며, target은 CuK $\alpha$  2 $\theta$ 는 20~80 $^{\circ}$ 이었다. 분말과 소결체의 미세조직 및 조성 분포는 주사전자현미경과 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy) 등을 이용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 주사전자현미경으로 관찰한 1~5 $\mu$ m 크기의 실험에 사용된 순수 금속 분말을 나타낸 것이다. 분말의 표면은 불규칙하거나 sponge 형태를 나타내고 있다. 이와 같이 미세한 금속 분말을 사용하는 이유는 분말의 크기가 감소될수록 소결 밀도는 증가되기 때문이다.

그림 4는 윤활제를 사용하지 않고 기계적으로 합성된 분말의 단면 조직을 나타낸 것이다. 6시간 동안 합성된 분말의 형태를 순수 분말과 비교할 때 분말의 크기가 다소 증가되었고, 심한 소성 변형으로 연신된 형태를 나타냈다. 이로부터 분말간의 미세접합(micro-welding)에 의해 기계적 합금화가 진행됨을 알 수 있었다. 대부분의 기계적 합금화 공정이 조대한 크기의 분말로부터 출발하여 합성되는 것과 비교할 때 흥미로운 결과로 보인다. 합금화가 12시간으로 증가되면서 다시 분말의 크기가 미세화 되었다. 계속된 변형에 의해서 미세 접합된 분말들이 분쇄된 것으로 보이며, 시간이 경과함에 따라서 반복적으로 나타났다. 따라서, 적어도 6시간 동안 기계적 합금화 공정을 통해 미세 압점이 가능하였다. 이러한 결과는 중요한 의미를 갖는데, 금속분말 성형 공정의 문제점인 다성분계 분말의 분산성을 개선할 수 있는 방법으로 기계적 합금화 공정이 적용될 수 있기 때문이다. 이렇게 합성된 분말의 소결체는 우수한 분산성으로 인해 기계적 성질의 재현성이 향상되며, 연삭제 층의 품질 향상 및 수명 연장에 기여할 것으로 판단된다.

그림 5는 기계적 합금화 시간에 따른 분말의 결정구조 변화를 나타내는 X-ray 회절 결과이다. 6시간에서는 순수한 peak이 주로 나타난 것으로 볼 때 합금화보다는 접합 현상이 주로 나타났다. 12시간에서도 유사한 현상이 관찰되었다. 그러나, 24시간의 경우는 X-ray peak 강도가 감소되면서 분말들의 합금화가 진행되는 것이 관찰되었다. 이러한 결과는 주사전자현미경을 통해서 관찰된 분말의 단면 미세 조직과 일치된 결과이다. 이 연구에서는 다성분계 분말들의 균일한 분산이 목적이므로 적어도 6시간이면 균일하게 분산된 복합 분말(composite powder)의 합성이 가능한 것으로 나타났다.

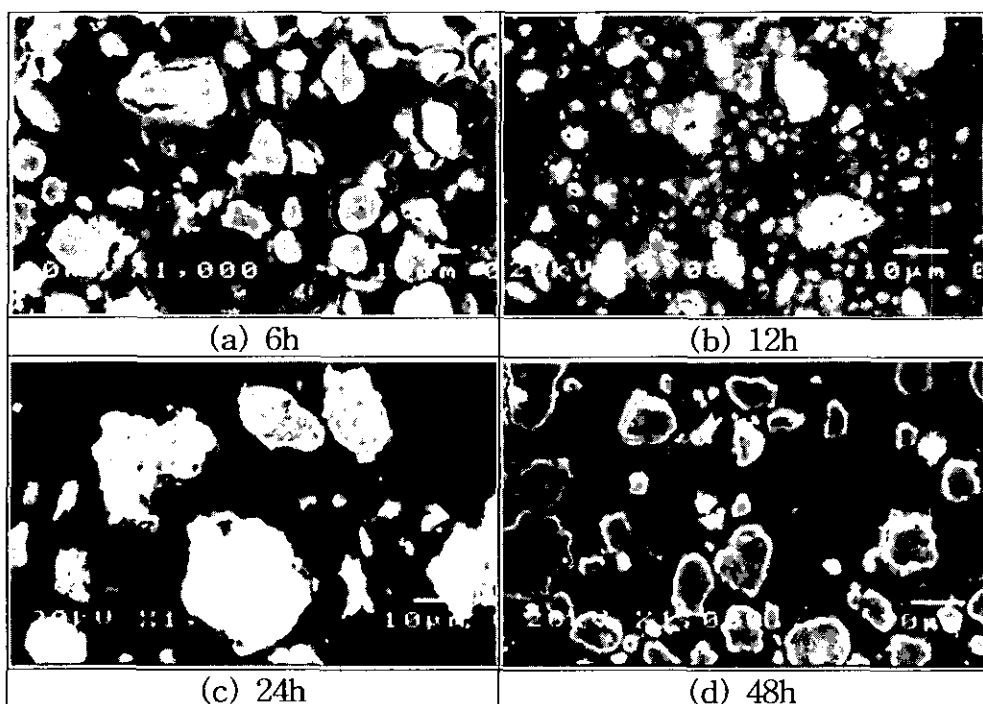


Fig. 4. Microstructure evolution of mechanical alloyed Co-0.5C-20Cr-20Ni-8W-2Fe powders.

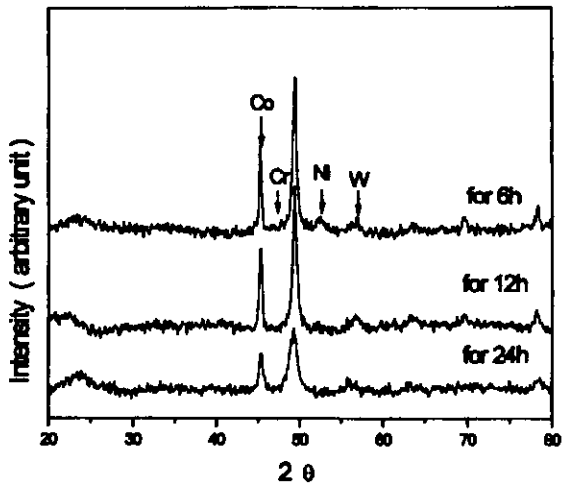


Fig. 5. X-ray diffraction results of mechanical alloyed Co-0.5C-20Cr-20Ni-8W-2Fe powders.

그림 6은 윤활제를 첨가하지 않고 6시간 동안 기계적 합금화 한 분말내의 성분원소 농도 분포를 EDS-map을 통해서 조사한 결과로서 Cr, Fe, Co, Ni, W 원소에 대해 조사하였다. 분말내에서 대부분의 원소들은 비교적 고르게 분포하였다. 이러한 결과로부터 완전한 합금화가 아닌 미세 접합으로 다성분계 복합 분말을 합성할 수 있었다.

소결체의 경도를 측정된 결과 불밀링한 분말을 1273K에서 소결한 경우 경도가 28H<sub>RC</sub>로 나타났고, 기계적 합금화를 6시간 동안 실시한 분말의 동일온도에서 경도는 30H<sub>RC</sub>를 상회하였다. 두가지 경우에 대해서 소결 밀도는 각각 94, 92% 정도로 낮게 나타났다. 경도가 기대치 보다 낮은 이유는 소결체의 소결밀도가 낮기 때문으로 생각된다.

소결체의 강도를 평가하기 위해 3점 굽힘시험(3-point bending test)을 실시하였다. 굽힘시험에서는 표면의 거칠기가 중요하므로 이를 억제하기 위해서 emery paper #1500까지 연마하였다. 그 결과 불밀링한 분말의 소결체는 약 850MPa의 강도를 나타냈다. 이는 순수한 Co 분말 소결체의 항복강도 약 850MPa와 유사하다. 기계적 합금화

를 6시간 동안 실시한 소결체의 강도는 900MPa 로써 약간 개선되었다. 그러나 12시간 동안 합금화 한 경우는 오히려 감소하는 경향을 나타냈다.

이와같이, 경도와 강도가 낮은 주요 요인은 소결체의 밀도가 감소되었기 때문이라 생각된다. 밀도가 낮은 이유는 기계적 합금화 과정에서 비정상적으로 성장된 조대한 분말과 조대한 Cr 분말이 소결을 지연시킨 것으로 보인다. 열간 압축 온도를 1273K 이상으로 증가시키면 소결 밀도를 증가시킬수는 있으나 금형 재질인 흑연의 수명 단축 및 추후에 이러한 결합체에 추가 될 다이아몬드 입자의 고온 열화를 억제하기 어려운 문제점이 있어<sup>8,9)</sup> 일반적으로 1273K 이상으로 온도를 증가시키지 않는다.

그림 7은 주사 전자현미경(SEM)으로 관찰한 굽힘 시험편의 파면 조직 사진이다. 불밀링한 시편의 경우 조대한 Cr 입자와 기지(matrix)의 계면에서 균열이 생성되었고, 기지 조직에서는 연성 파괴의 전형적인 형태인 dimple 조직이 관찰되었다. 보다 세밀한 분석을 위해 그림 8과 같이 EDS 분석을 실시하였다. 기지조직은 초기의 Co 합금 조성과 유사하게 분석되었으며, Cr 입자로 예상되는 영역을 정량 분석한 결과 순수한 Cr으로 확인되었다. 균열 생성 부분을 확대하여 관찰한 결과, 균열은 순수한 Cr 입자와 기지조직과의 반응층 경계에서 생성되었음을 확인할 수 있었다. 이러한 반응층은 고온 압축과정에서 조대한 순수 Cr 입자가 기지내로 확산되면서 생성된 것으로 보인다. 따라서, Co 기지에 대한 Cr의 고용 효과는 크지 않은 것으로 보였다. 윤활제 없이 6시간 동안 기계적 합금화한 경우 균일한 파괴 양상을 보였으나 파면 형태가 취성파괴로 나타났다. 경도 역시 높게 나타났다. 이는 Cr이 Co 기지에 고용되어 기지 조직을 강화시킨 것에 기인하였다. 그러나, 윤활제 없이 기계적 합금화한 분말의 소결체 밀도가 기대했던 것 보다 낮게 나타났다. 이는 복합 분말의 합성 공정에서 부분적으로 분말의 조대화가 일어났기 때문이라고 판단되었다.

이렇게 비정상적으로 조대화된 복합 분말을 균질화하기 위해 윤활제를 첨가하여 기계적 합금화를 시도하였다. 또

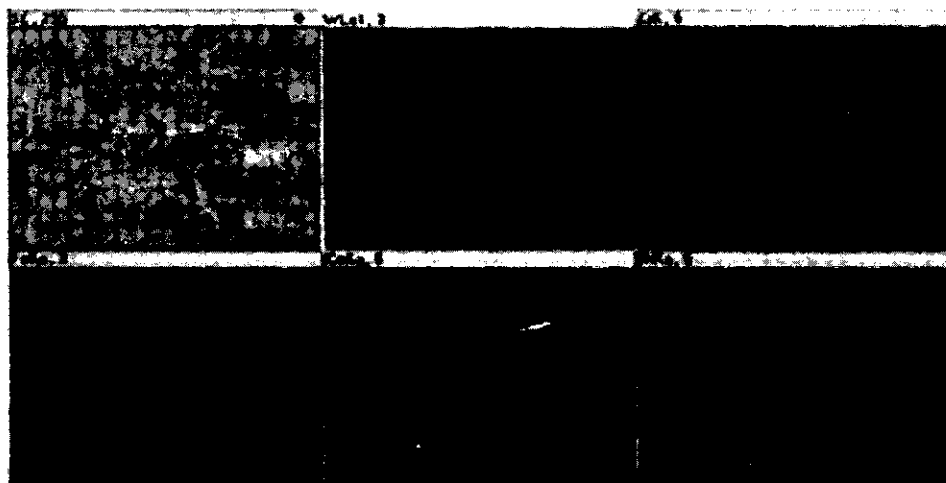


Fig. 6. EDS map showing the homogeneously distributed components in Co-0.5C-20Cr-20Ni-8W-2Fe powders mechanical alloyed for 6h.

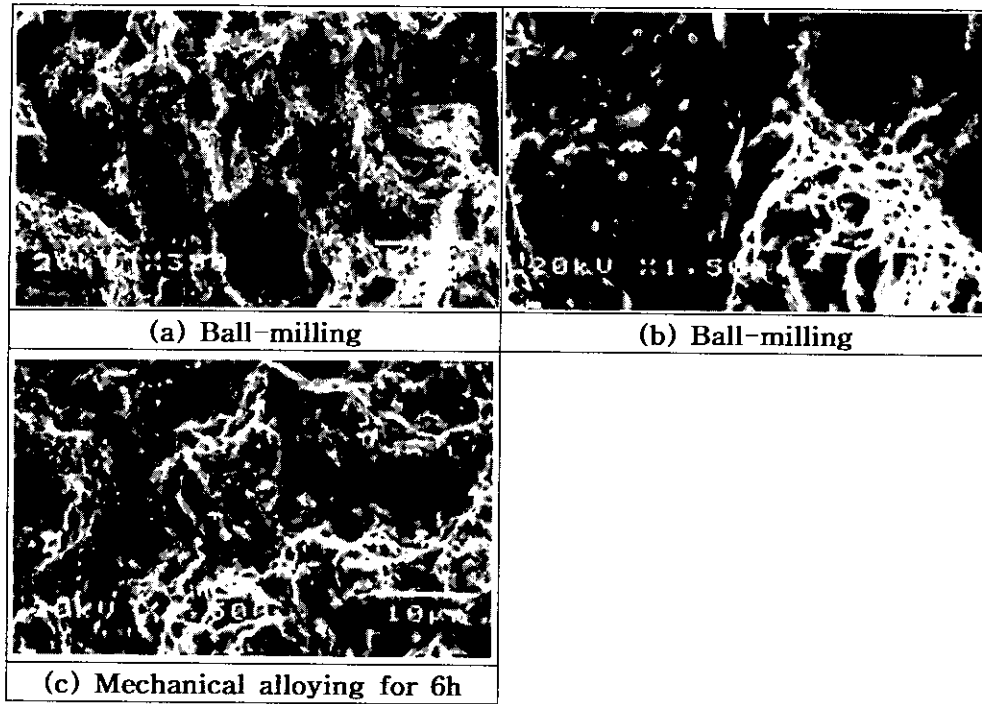


Fig. 7. Microstructures showing fracture surface of Co-0.5C-20Cr-20Ni-8W-2Fe alloy consolidated by hot pressing at 1273K.

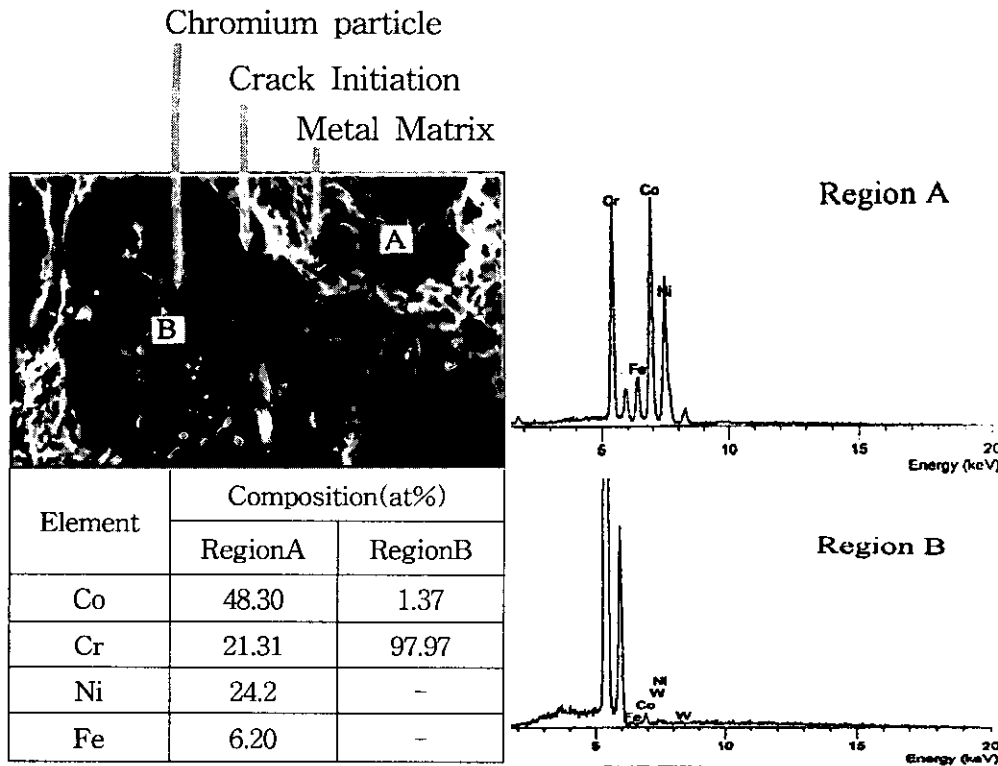
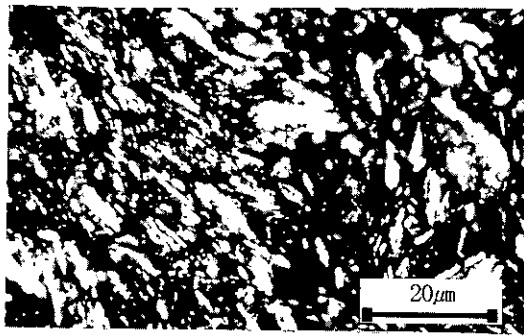


Fig. 8. Microstructure showing inter-particle fracture between chromium particle and reaction layer and EDS analysis on fracture surface of Co alloy consolidated with conventional ball-milled powders.

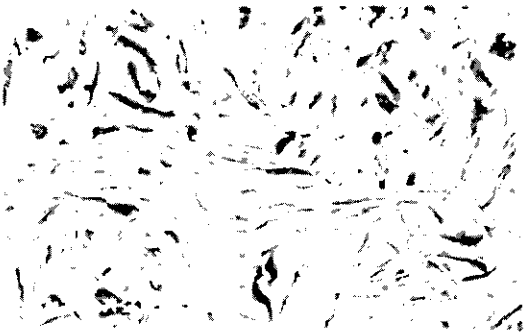
한, 합금조성에서 Cr의 함량을 감소시키고 대신에 Fe의 조성을 증가시킴으로써 취성을 개선하도록 조성을 조절하였다.

그림 9(a)는 기계적 합금화법으로 Co-0.5C-15Cr-20Ni-7Fe-8W 합금 분말을 합성하는 과정에서 윤활제로

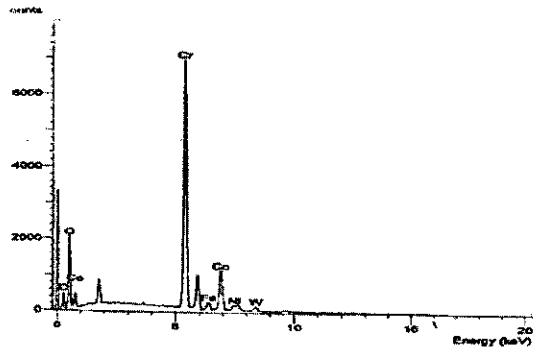
stearic acid를 2% 첨가하여 분말의 형태변화를 관찰한 것이다. 윤활제를 첨가하였을 경우 비교적 구형의 분말이 주류를 이룬 것과는 달리 aspect ratio가 크고 미세한 판상의 분말이 주로 관찰되었다. 이러한 분말의 형태 변화는 열간 압축법으로 성형하기에 유리한 분말형태이며, 분말의 성형



(a)



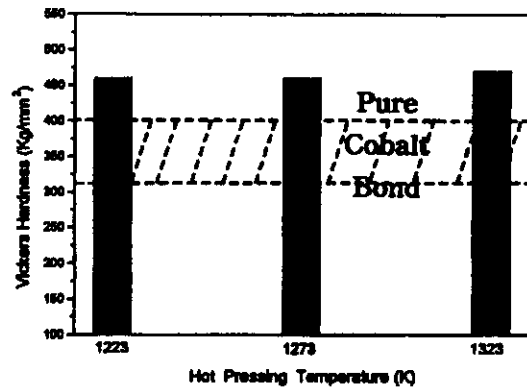
(b)



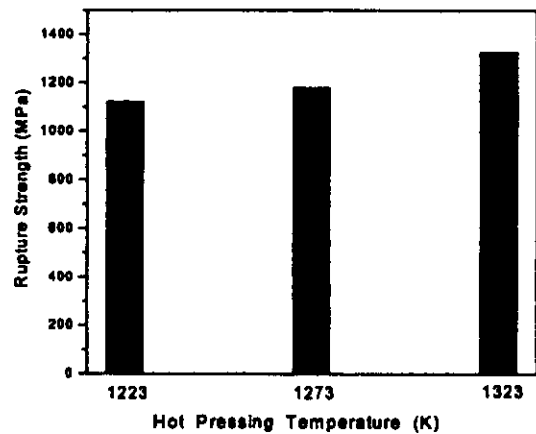
(c)

Fig. 9. Microstructure and micro-analysis in Co-0.5C-15Cr-20Ni-8W alloy by mechanical alloying with 2% stearic acid at 1223K. (a) powders (b) hot-pressed compact (c) EDS analysis of dark region in (b)

성 (formability) 을 개선하는데도 효과적이다. (b)는 950 °C에서 열간압축한 소결체의 미세조직이다. 분말간의 기공이 관찰되지 않은 것으로 보아 치밀화가 잘 이루어진 것으로 판단된다. 소결 밀도를 평가한 결과 약 8.25g/cc가 얻어졌다. 이를 이론 밀도 8.39g/cc와 비교하면 약 98%의 소결밀도에 해당한다. (c)는 소결체 조직내에서 검은 부분을 EDS 법으로 정량 분석한 결과이다. (c)에 나타난바와 같이 Cr으로 판명되었다. 초기에 미세 분말과 조대한 Cr 입자가 기계적 합금화 과정에서 부분적으로 분쇄되어 판상의 형태를 나타내며 다른 분말과 접합 및 합금화가 이루어지지 못하고 고립된 형태로 존재하고 있음을 확인하였다. 윤활제를 첨가하지 않고 기계적 합금화한 분말에서 Cr 분말이 덩어리 형태를 나타낸 것과 비교할 때 미세한 판상의 Cr 분말



(a)



(b)

Fig. 10. Vickers hardness (a) and rupture strength (b) in Co-0.5C-20Cr-20Ni-8W alloy with 2% stearic acid at 1223K.

은 소결중에 기지에 쉽게 용해될수 있기 때문에 기계적 성질의 개선에 유리하다고 판단되었다.

그림 10(a)는 열간 압축법으로 소결한 Co-0.5C-15Cr-20Ni-8W-7Fe 합금 소결체의 성형 온도에 따른 경도 변화를 나타낸다. 대부분이 460MPa 이상의 높은 경도를 나타냈다. 이것은 로크웰 경도로 46H<sub>RC</sub>에 해당한다. 순수한 Co 소결체의 경도 30~36H<sub>RC</sub>과 비교할 때 적어도 1.3배 이상 향상된 결과이다. 내마멸성은 일반적으로 경도에 비례하기 때문에 결합제로써 유리한 결과로 볼수 있다. 굽힘강도 역시 1100MPa 이상의 높은 값을 나타냈다. Co 합금의 항복 강도가 850MPa 정도임을 감안하면 괄목할만한 결과이다. 이러한 높은 파괴 강도를 나타내는 이유를 조사하기 위해서 그림 11과 같이 파면을 SEM으로 관찰하고 정성분석을 실시하였다. 윤활제를 첨가하지 않고 기계적으로 합성한 분말의 성형체에서는 주로 취성파괴(brittle fracture)로 파괴가 진행되었으나 이 경우는 연성-취성 파괴의 복합 형태로 나타났다. 즉, 판상의 결정립계에서는 취성파괴가 일어나고 이러한 판 사이의 지역에서는 부분적으로 연성파괴를 나타내는 dimple 조직이 나타났다. 따라서, 윤활제를 첨가한 분말의 성형체가 우수한 기계적 특성을 나타냈고, 이는 기존의 순수 Co 금속 결합체나 Co 합금 결합체의 특성을 능가함과 동시에 경제적 측면에서도 비싼 코발트 분말

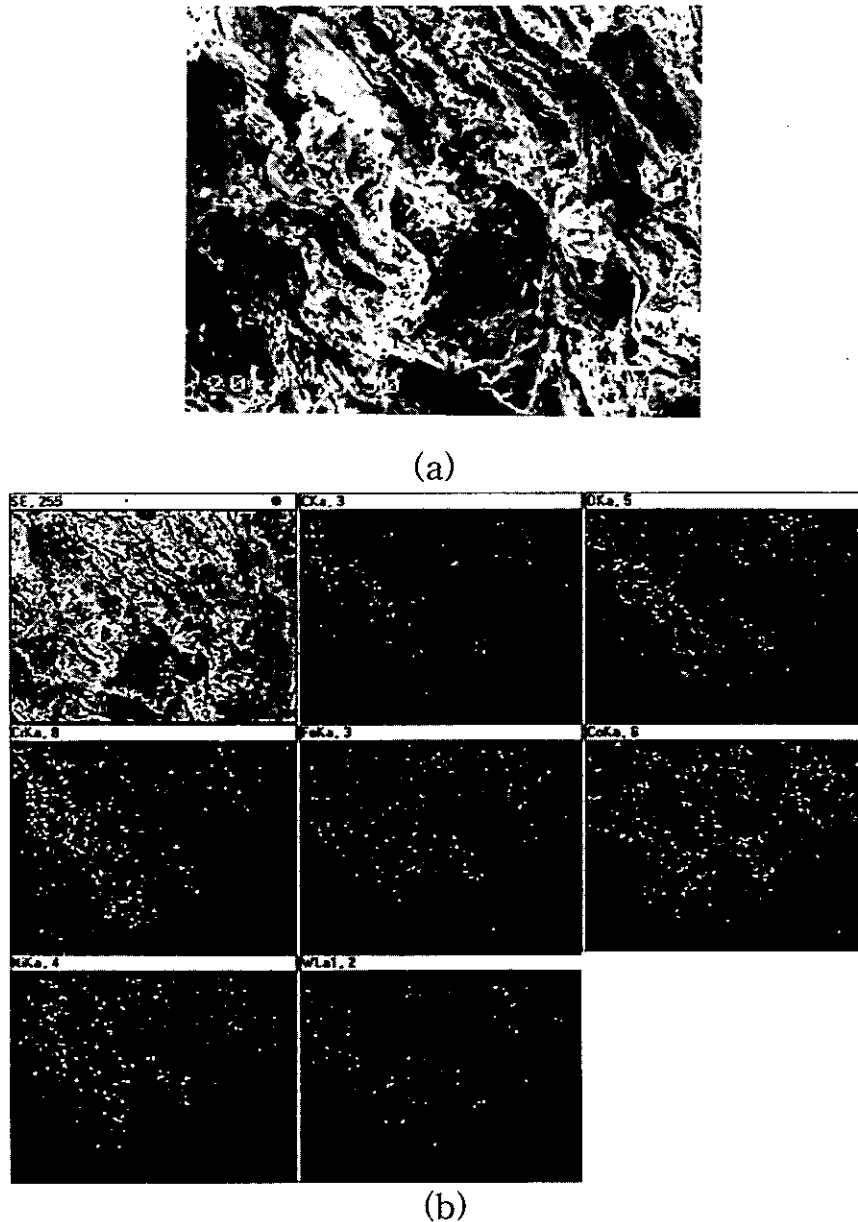


Fig. 11. Fracture surface (a) and EDS map (b) in Co-0.5C-15Cr-20Ni-8W alloy by mechanical alloying with 2% stearic acid at 1223K.

을 50% 이상 저렴한 성분 분말로 대체하는 효과가 있어 향후 다이아몬드 분말과 혼합하여 완전한 연삭층을 제작하기에 유리한 결과로 판단되었다.

#### 4. 결 론

Diamond 공구용 Co-0.5C-(15~20)Cr-20Ni-8W-(2~7)Fe 합금 결합제를 ball-milling 법과 기계적 합금화 (mechanical alloying) 법으로 합성하였다. 윤활제인 stearic acid의 첨가 유무에 상관없이 Co-0.5C-(15~20)Cr-20Ni-8W-(2~7)Fe 합금의 경우 6시간 동안 합금화 된 금속 분말에서 미세 접합 (micro welding) 현상이 균일하게 관찰되었다. 윤활제를 첨가하지 않을 때는 부분적으로 조대화된 분말이 형성되었으나 윤활제를 2% 첨가한 경우 미세하고 판상의 분말이 얻어졌다. 윤활제가 첨가된 복합 분말

을 1223~1323K에서 350kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 열간 압축하여 기계적 성질을 평가 한 결과 굽힘강도 1100MPa 이상, 경도 약 46H<sub>RC</sub>의 로 우수한 특성을 나타냈다.

#### 감사의 글

이 연구는 1998년 학술진흥재단의 기초중점연구 지원 신소재연구분야 (과제명: 난가공성 신소재의 정밀가공용 절삭필 개발을 위한 결합재 층과 지지체 기계적 성질 및 접합 특성에 관한 연구 중에서 제 2세부과제) 과제로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 李種文, 機械工業, 23, 6, 88 (1993).
2. J.D. Dwan, *Materials Science and Technology*, 14, 896

- (1998).
3. R.M. German : *Powder Metallurgy Science*, New Jersey, Metal Powder Industries, Federation, 209, (1984).
  4. J. Konstanty : *Ind. Diamond Rev.* 51, 1, 27 (1991).
  5. T. Tanaka, *Int. J. JSPE*, 26, 1, 27 (1992).
  6. F.V. LENEL, *Powder metallurgy principles and applications*, New Jersey, Metal Powder Industries Federation, 492 (1980).
  7. V. Kuzucu, M. Ceylan, H.Celik and I. Aksoy, *J. Materials Processing Technology*, 74, 141 (1998).
  8. R.L. Mehan and I. E. Hibbs, *Ind. Diamond Rev.*, 44, 128 (1984).
  9. P.A. Bex and G.R. Shafto, *Ind. Diamond Rev.*, 44, 128 (1984).