

Cu-Sn-Co본드 CBN휠에 의한 철강재료 연삭

崔成國·崔政喆*

아주대학교 재료공학과

Grinding Steel and Iron Materials with Cu-Sn-Co Bonded CBN Grinding Wheels

Sung-Kook Choi, Jeong-Cheol Choe*

Dept. of Materials and Eng., Ajou Univ

초록 다이아몬드와는 달리 CBN은 철족 재료 연삭시 화학적 마모가 거의 없다. 이러한 장점으로 인해 CBN휠이 철강 재료 연삭에 널리 사용되고 있는 것이다. 그러나 CBN휠의 성능은 CBN을 붙잡고 있는 결합체에 크게 의존한다. 오늘날 널리 사용되는 결합체인 주석 청동 합금은 내마모성에 한계가 있다. 주석 청동 합금의 내마모성을 증대시키기 위해 Co를 첨가하였다. 이러한 기지합금에 젖음성을 향상시키기 위해 Co코팅 CBN을 사용하였다. 기지합금에 20%Co를 첨가한 것이 입계에서 연속적인 δ 상 생성, 취성 증가에 따라 자생작용이 활발하였다. 가장 높은 연삭비를 나타낸 것은 Cu-15wt%Sn, Cu-33wt%Sn, Co를 40:40:20으로 제작한 휠이었다.

Abstract CBN(Cubic Boron Nitride) unlikely to diamond has a slightest chemical wear on grinding iron family materials. This merit brings CBN grinding wheel to widely use referring to grinding iron and steel parts. However, the performance of CBN grinding wheels depends on bonding materials which are bonded to CBN abrasives. Out of widely used bonding materials today, tin bronze alloy has limit to wear resistance. In order to increase the wear resistance of tin bronze alloy, Co is added in matrix of which composition results in Cu-Sn-Co. In addition to this matrix, Co coated CBN abrasives are used to increase the wettability with metal components. When 20wt% Co is added on tin bronze matrix, the effect of self dressing becomes active the increasing the brittleness. Because δ phase having the brittleness was formed between Co and tin bronze of α phase. The highest grinding ratio is shown when Cu-15wt%Sn, Cu-33wt%Sn and Co are mixed with ratio of 40:40:20.

1. 서론

고온 고압에서 합성된 CBN의 연구는 최근 들어 많은 관심을 보이고 있다. 이것은 다이아몬드와 비슷한 물성을 갖고 다이아몬드보다 내열성, 화학적 안정성 등이 우수하기 때문이다.

일반적으로 BN의 구조에는 섬아연광형(cBN), 울츠광형(wBN), 육방정형(hBN)의 3가지가 있다. 또한 합성법의 차이로부터 능면체 구조의 것(rBN), 난층 구조의 것(tBN), 비정질상의 것(aBN)의 존재도 알려지고 있다.¹⁾ 이 중에서 가장 높은 경도를 갖는 cBN(이하 상업적으로 CBN 이라고 한다)은 다이아몬드에 이어서 단단하며 Knoop경도는 4,700kg/mm²이다. 그리고 온도 의존성에서 볼 때 다이아몬드는 600°C 근처에서 급격한 경도하강을 나타내나 CBN의 경우는 1000°C까

지 완만한 하강을 보여준다. 또한 철족 재료와 화학반응을 일으키지 않고 높은 열전도를 나타낸다.²⁾

이러한 발군의 CBN지립을 유용하게 하기 위해서는 결합체의 선택이 중요하다. 결합체 중에서는 장수명의 우수성을 갖는 금속 결합체가 최근 해외에서 많은 연구가 진행되고 있으나³⁾ 국내에서는 거의 찾아볼 수 없는 실정이다. 그래서 종전부터 일반적으로 사용되고 있는 금속 결합체인 Cu-Sn계 합금을 중심으로 필자들이 연구해 온 바 레진 보다는 장수명이기는 하나 자생작용(연삭시 피삭재 절분 및 파쇄 다이아몬드에 의해 본드가 마모되어 가는 현상)부족으로 기대에는 미치지 못하는 결과를 낳았다.⁴⁾

이러한 문제를 보완하기 위해 고 인성 원소인 Co를 첨가, 결합체에 자생작용을 증대시키는 연구를 행하였다. 즉 본 연구에서는 Cu-

+Sn계 합금에 Co첨가량을 변화시켜 소결한 시편과 연삭시험휠로 기계적 성질, 연삭비, 연삭동력을 측정된 후 최적의 Co조성에 관해 조사하였다.

2. 실험 방법

조직을 관찰하고 경도 및 항절력을 측정하기 위한 시편은 Table 1과 같은 조성으로

Table 1. Chemical composition of specimens.

Specimen NO.	Cu-15Sn (wt%)	Cu-33Sn (wt%)	Co (wt%)	CBN (wt%)
Reference Sample	50	50	0	3.85
1	76Cu-24Sn			
	45	45	10	
2	68Cu-22Sn-10Co			
	40	40	20	
3	61Cu-19Sn-20Co			
	35	35	30	
4	53Cu-17Sn-30Co			
	30	30	40	
	46Cu-14Sn-40Co			

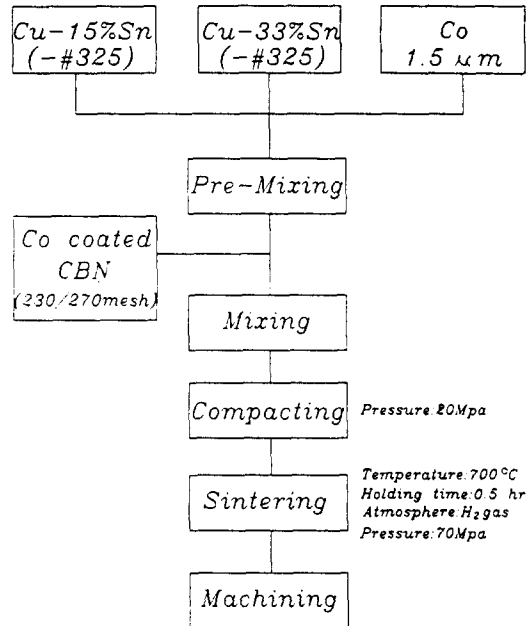


Fig. 1. Manufacturing flow chart of CBN grinding wheels.

50mm*10mm*7mm의 막대 형상으로 제작하였다. 1차, 2차 혼합에 사용된 혼합기는 터블러형이며 혼합시간 및 회전수는 60분과 400RPM이다. 혼합된 합금분을 SKD-11종 금형에 넣어 15ton 프레스로 20Mpa의 힘을 주어 성형하였다. 이어서 산화 방지를 위해 수소분위기 터널 형태 전기로에서 700°C 30분간 소결한 후 치밀한 소결체를 얻기 위하여 70Mpa의 압력으로 Hot Pressing⁶⁾하였다. 그 후 상온으로 냉각시킨 후 금형을 해체하여 시편을 추출하였다.

추출된 시편을 #200 사포로 연마하고 #1000 알루미나 분말을 이용하여 래핑하였다. 이어서 Aqueous Ferric Chloride 부식액(FeCl₃ 10g+HCl 130cc+H₂O 120cc)으로 수초간 부식하여 광학현미경으로 조직을 관찰하였다. 사진 촬영(500배)이 끝난 시편의 경도는 로크웰 경도기를 사용하여 B스케일(100kg 하중 1/16" 스틸 볼)로 측정된 후 항절력을 측정하기 위해 만능재료 시험기를 사용하였다.⁶⁾

한편 연삭비 및 소모전력을 측정하고 CBN 층의 파단면을 측정하기 위해 Fig. 1과 같은 공정으로 CBN휠을 제작하였다. 이 때 사용된 Cu-Sn은 Fig. 2(a)와 같이 분부분이며 Co는 Fig. 2(b)에서 같이 아주 미세한 0.5~2μm크기였다. 또 CBN지립은 Fig. 2(c)와 같이 (111)면이 잘 발달된 230/270 US Mesh, 고인성의 것을 사용하였다.⁷⁾ 또한 기지와 CBN과의 젖음성을 향상시키기 위해 Fig. 2(d)에서와 같은 Co 코팅된 CBN을 이용하였다.⁸⁾ 제작된 CBN휠은 150mm*5mm*3mm 크기였으며 평면연삭기축에 장착되었다. 피삭재는 200mm*100mm크기의 FC25(H_RB 87-88)와 SKH-51종(H_RC 62-64)를 사용하였으며 주속도 1500m/min, 테이블 속도 15m/min, 절입량은 각각 50μm와 6μm로 하였다.

연삭액은 수용성 CBN전용액을 50배액 9ℓ/min로 사용되었으며 총연삭량 5mm를 연삭하고 연삭기로부터 탈착된 후 마모량을 측정하여 연삭비(다이아몬드층 1CC 마모됨에 따른 피삭재 마모량)를 산출하였고 병행해서 휠 축의 소모전력도 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Cu에 대한 Sn의 고용도는 520°C에서 15.8

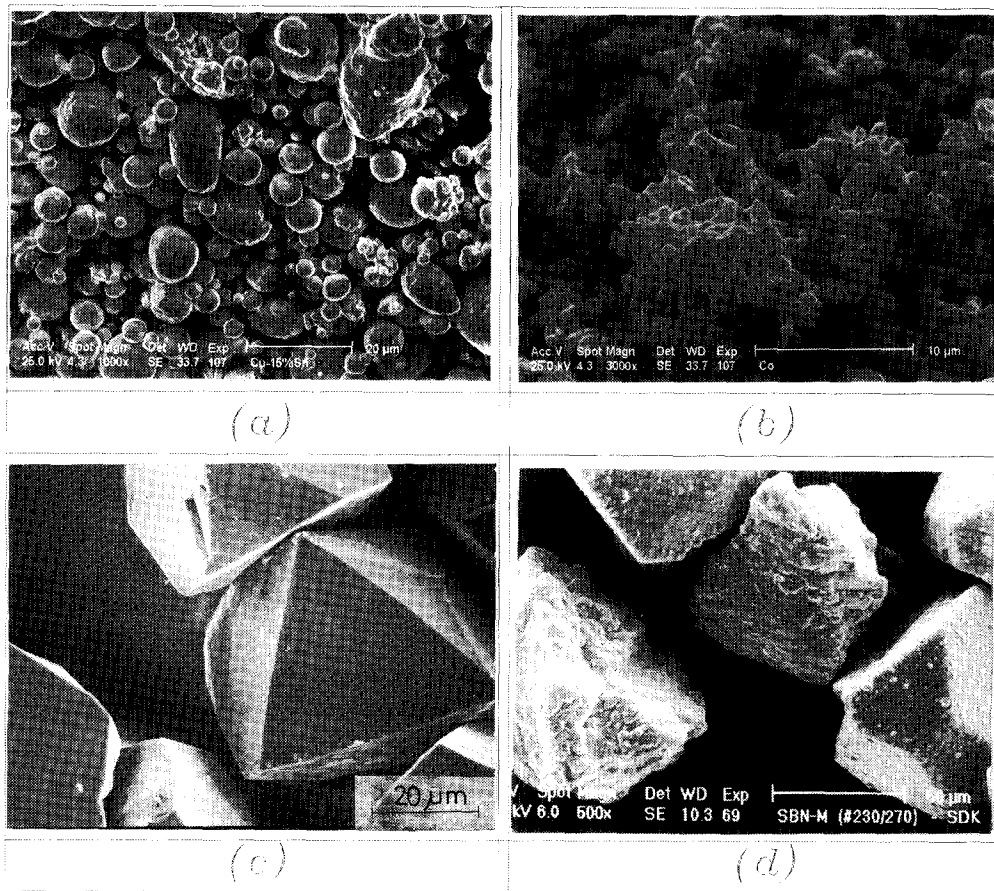


Fig. 2. SEM micrographs of (a) atomized Cu-15%Sn powders, (b) Co powders, (c) CBN abrasives and (d) Ni coated CBN abrasives.

%이고 α 고용체를 만든다. 그러나 이 합금은 편석이 심하기 때문에 보통상태에서 균질한 α 고용상 만이 되는 것은 Sn 7~8% 까지로서 그 이상이 되면 β 상이 나타나며, 580°C부근에서 α 와 γ 로 공석하고 γ 는 다시 510°C부근에서 $\alpha+\delta$ 로 공석한다. 그래서 보통 Sn10%의 청동에서도 급랭하면 β 가, 서랭하면 δ 가 나타난다. α 는 물론 Cu와 같은 면심 입방체이지만 β 및 γ 는 체심 입방, δ 는 Cu_3Sn_8 인 복잡한 화합물이다. 따라서 본 시편의 조성인 Sn24%의 청동 기지에서의 예상 가능한 상은 $\alpha+\delta$ 상이다. 이 중 δ 상은 기공을 많이 가질 가능성이 많아 기계적으로 약한 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 그러나 기술적으로 중요한 것은 이러한 δ 상 이상온에서 안정하다는 것이다. 또한 약 350°C에서 평형일 경우는 δ 가 다시 공석 반응으로

α 고용체와 ϵ 상으로 분해된다. ϵ 상은 약 38.4%의 Sn을 함유하고 Cu_3Sn 화합물이며 사방정 단위격자로 64개의 원자가 존재한다. 열처리에서는 이러한 분해가 일어나지 않으므로 조직에는 α 상 및 $(\alpha+\delta)$ 공석이 존재하게 되는 것이다. 그러나 15~40%Sn을 함유한 Cu-Sn의 합금의 응고 거동은 매우 복잡하여 오늘날까지 아직도 완전하게는 규명되지 않고 있다.¹⁰⁾ 더우기 본 연구에 사용된 원재료는 응고 거동에 의해 제조된 분무분이나, 이들은 다시 소결 거동에 의해 소결이 진행함으로 응고 거동과는 약간 다른 양상을 띄게 되어 실제 도출된 실험결과를 분석하여 고찰하는 데는 어려움이 있었다.

이번 실험에 사용된 Cu-15%Sn은 α 고용체이고 Cu-33%Sn은 δ 고용체로서 이들 주석형

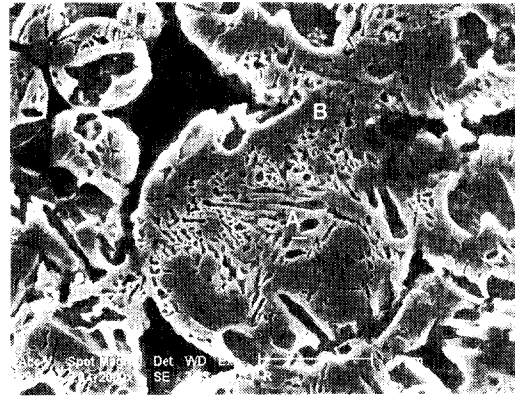
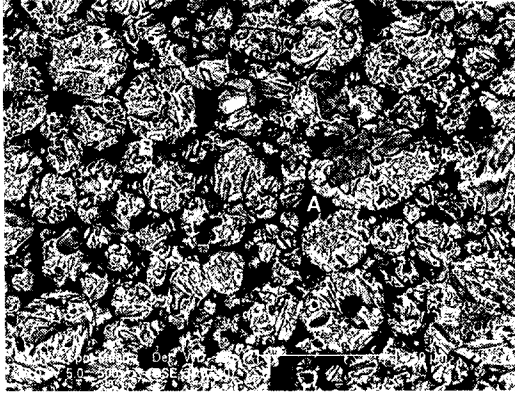


Fig. 3. SEM micrograph of the specimens sintered with only Cu-Sn powders.

동분말만 사용하여 기준 시편을 제작한 결과 Fig. 3과 같은 조직사진을 보여주고 있다. 이 Fig. 3은 SEM사진으로 큰 입자와 작은 입자가 비교적 잘 결합하고 있음을 알 수 있으나 많은 기공을 포함하는 것같이 보여진다. 따라서 기공이 예상되는 부분인 Fig. 3의 A를 확대하여 EDS에 의한 dot mapping을 실시한 결과 Fig. 4와 같이, Cu mapping 사진에서 Cu의 dot가 없는 부분과 Sn mapping 사진에서 Sn의 dot가 없는 부분이 중첩되어 있어 기공임을 확인하였다. 이러한 기공은 입자와 입자간의 목 성장이 충분히 이루어지지 않은 결과에 기인된 것으로 사료된다. 그리고 목 성장이 어떠한 양상으로 진행되는가를 알아보기 위해 입자의 중심과 목부분의 조성을 3회 이상 반복해서 EDS로 분석하였다. Fig. 4에서 A와 B지역을 조사하였는데 입자 중심의 A 조성은 Cu-26%Sn, 목부분의 B 조성은 Cu-28%Sn으로 목부분의 Sn함량이 높아진 것을 Fig. 5에서 알 수 있었다. 따라서 목부분의 소결 거동은 저 융점 원소가 먼저 확산하여 그 농도가 높아짐을 확인하였다.

이것은 Fig. 3의 B부분을 확대한 조직 사진인 Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 Sn의 함량이 점차로 줄어들어 골격상의 구조를 갖게 되었고 EDS분석에서도 Cu-24%Sn으로 나타났음으로 일반적인 다성분계 액상 소결의 경우와 잘 일치한다고 볼 수 있다. 따라서 δ 상인 Cu-33%Sn분말이 α 상인 Cu-15%Sn과 상호 확산에 의해 ($\alpha+\delta$)상의 취약한 구조를 형성

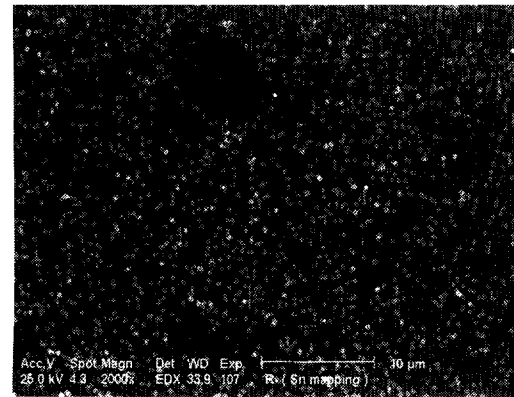
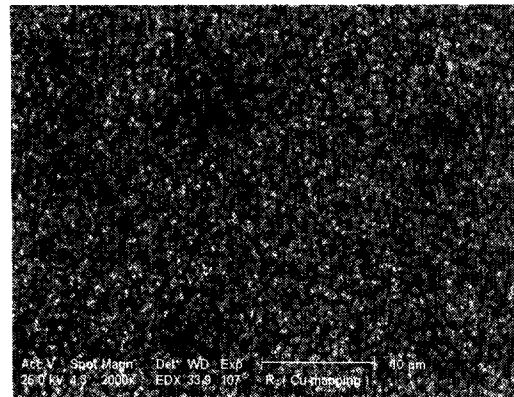
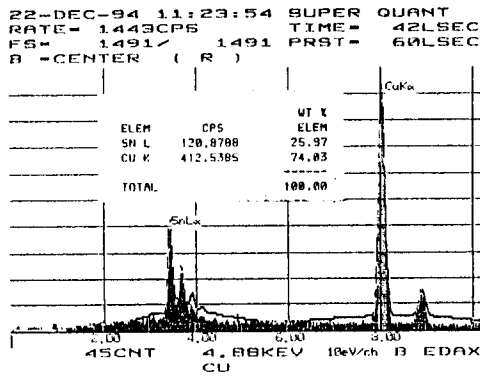


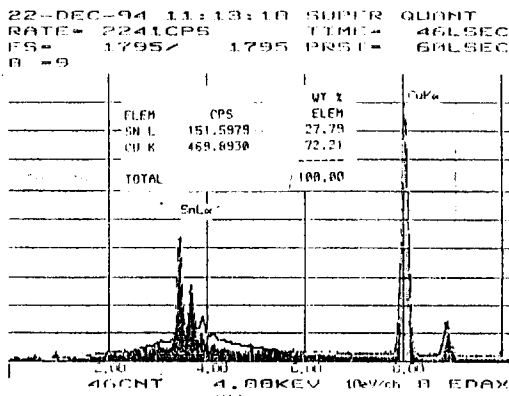
Fig. 4. SEM micrograph and dot mapping of the pore in Fig. 3, A.

하기 때문에 이러한 조직으로서는 CBN과 같은 경질 입자를 붙잡아 주기에는 미약함으로 인성이 큰 Co와 같은 원소를 첨가하게 된다.

Fig. 7은 앞서 기술한 Cu-15%Sn(α 상), Cu-33%Sn(δ 상)에 Co를 각각 10%, 20%, 30%, 40%까지 첨가한 시편의 조직사진이다. Fig. 7



(a)



(b)

Fig. 5. EDS Analysis of composition in the (a) center and (b) neck on grain.

의 (a), (b), (c)에서 보는 바와 같이 검은 부분, 밝은 부분 그리고 그 중간 정도의 부분으로 나누어져 있는데 Fig. 7에서 A부분을 확대하여 EDS분석을 행한 결과 약 $3\mu\text{m}$ 이내의 검은 점이 Co, 흰 부분이 δ 상, 그 중간 부분이 α 상임을 알 수 있었다. 다시말해서 Fig. 8의 a,g,Co의 부분을 EDS분석한 것이다. 또한 Fig. 7의 (d)에서는 흰 부분과 검은 부분으로 분포되어 있는데 흰 부분이 α 상, 검은 부분이 Co이었다. 그 중간 부분은 약 $10\mu\text{m}$ 이하의 약간 밝은 부분으로 분포되어 있으며 EDS분석에 의해 δ 상으로 나타났다. Fig. 7에서 보면 (a)에서 (d)까지 α 와 δ 상 주위에 Co가 산재하며 그 양이 증가하면서 편석이 심해지고 있는 것을 알 수 있다. 특히 30%와 40%의 Co

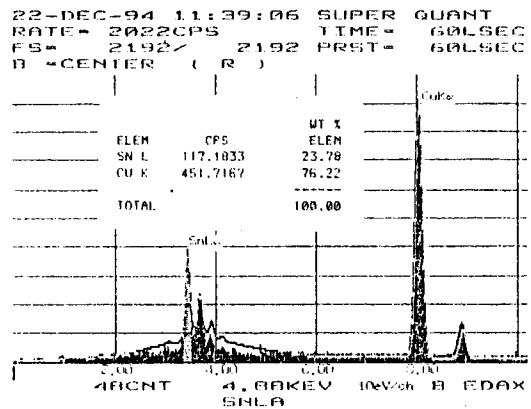


Fig. 6. Analysis of composition in the grain with skeleton shape.

가 첨가된 것은 더욱 편석이 심하였다. 또한 기계적 성질이 약한 δ 상이 연속적으로 분포되어 있는 시편은 20% Co첨가의 시편이었다. 이것은 Fig. 8의 확대 조직으로 알 수 있듯이 희게 보이는 부분이 δ 상으로, 연속적으로 α 상과 Co사이에서 존재한다.

한편 조성별로 기공이 어떠한 형태로 존재하는지 그 미세조직을 알아보기 위해 Fig. 9와 같이 확대하여 조직사진을 촬영하였다. 각 사진에서 왼쪽 것이 SE로, 오른쪽 것이 BSE로 촬영된 것으로 (a)에서는 B부분에서 검게 나타난 곳이 기공이었으며 그 크기는 약 $1\mu\text{m}$ 로 추정된다. (b)에서도 B부분의 검은 곳이 기공으로서 약 $0.4\mu\text{m}$ 정도의 크기를 하고 있다. 이렇게 Co의 함량이 증가함에 따라 기공의 크기가 줄어들기 시작하여 (c)에서 약 $0.2\mu\text{m}$ 로 극소화된 후 (d)에서는 기공이 전혀 나

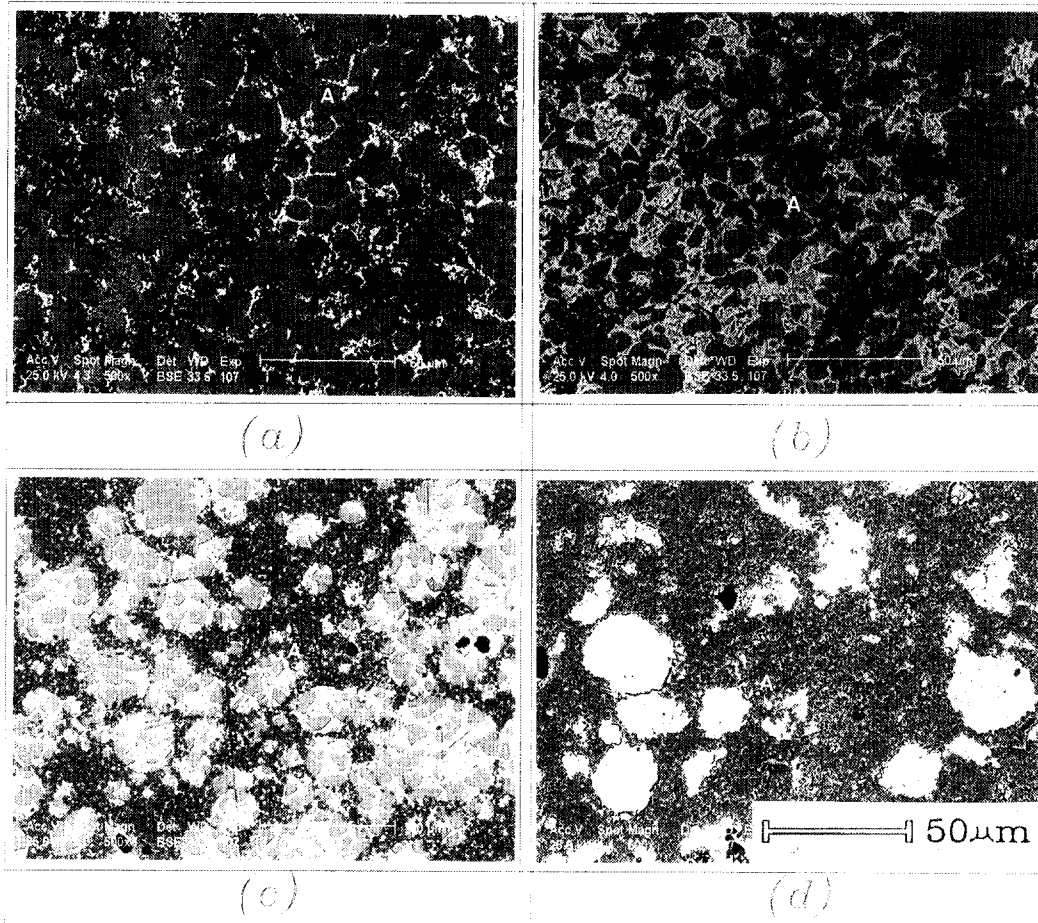


Fig. 7. SEM micrographs of the specimens with (a)10% Co, (b)20% Co, (c)30% Co and (d)40% Co.

타나지 않았다. 이것은 미세한 Co가 기공을 채워 주기 때문에 Co양이 증가할수록 기공이 줄어들어 가는 현상이 일어나기 때문이다.

이어서 본드의 기계적 성질을 알아보았다. 일반적으로 연삭 계면에서의 가장 중요한 2가지 요인은 입자의 파쇄성과 본드에 의한 입자의 파지력이다. 다시 말해서 미세적인 수준에서 연삭 거동을 결정하는 데 중요한 역할을 하는 것이다. 본드 그 자체가 측정 가능한 경도, 항절력 및 탄성 계수같은 거시적인 기계적 성질을 갖고 있어도 그들 간에 직접적인 상호관계는 기대할 수 없다.¹¹⁾ 즉 경도가 높다고 해서 휠 성능이 올라가는 것은 아닌 것이다.

한편 각 시편의 기계적 성질을 알아보기에

앞서 소결의 신뢰성을 알아보기 위한 참고사항으로 각시편의 밀도를 전자비중계로 측정하였는데 8.56g/cm³에서 8.69g/cm³까지 Co의 증가에 따라 약간의 증가는 있었다. 여기서 약간의 증가는 밀도가 8.9g/cm³인 Co가 8.56g/cm³밀도의 기준 시편인 Cu-Sn에 계속 첨가되어 상대적으로 밀도가 높아 졌기 때문이다. 그러나 급격한 변화가 없는 것으로 보아 소결상의 문제점은 없는 것으로 판단된다.

이어서 경도를 측정된 결과는 H_rB103-105의 범위로 큰 변화는 보이지 않아 역시 정량적으로 기지의 강고함을 확인할 수 없었다. Fig. 10은 각시편의 항절력을 나타낸다. Co가 포함되지 않은 시편의 항절력은 20kg/mm²로 아주 낮은 값을 보여주었는데 이것은 Fig.

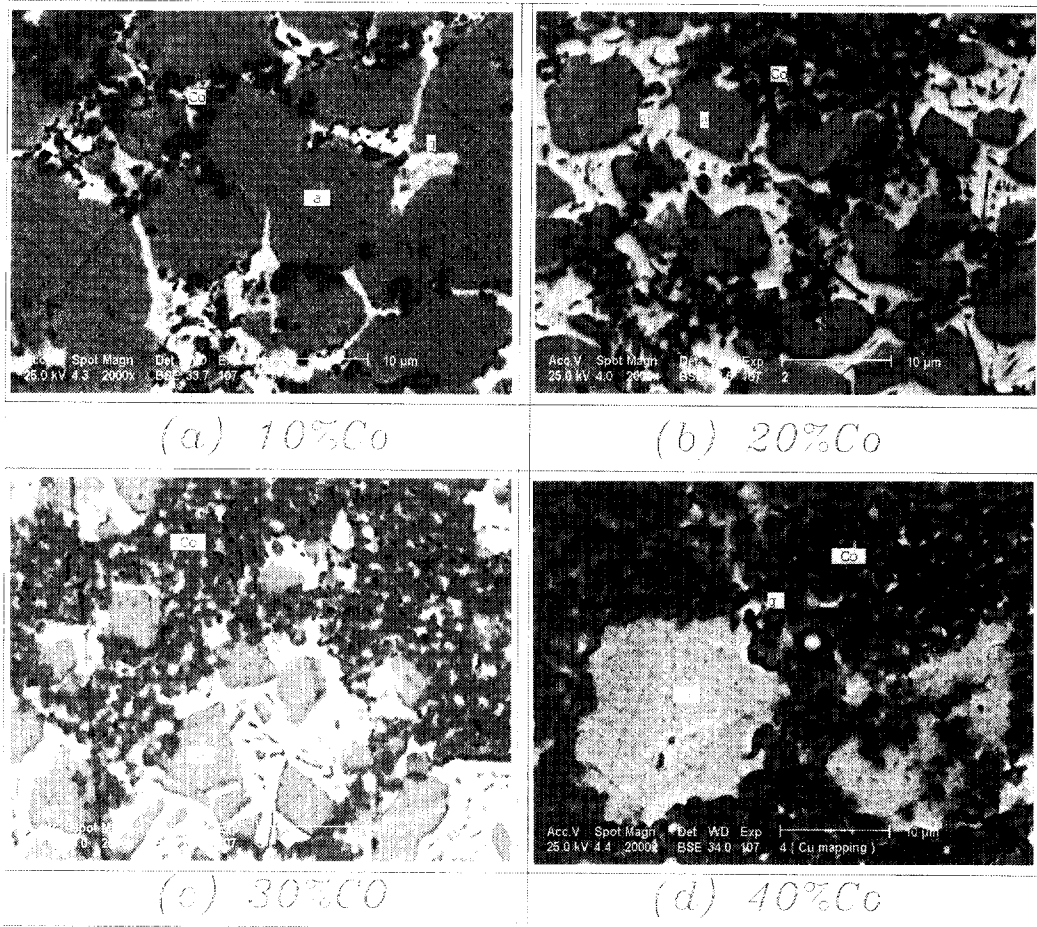


Fig. 8. SEM micrographs of A zone of Fig. 7.

3에서 보여준 많은 기공에 의한 것으로 사료된다. 10%Co의 경우는 $81\text{kg}/\text{mm}^2$ 으로서 상대적으로 높은 값을 나타내고 있는 것으로 보아 기공이 대부분 Co에 의해 채워진 것에 의한 것으로 판단된다. 그러나 20%Co의 경우는 $71\text{kg}/\text{mm}^2$ 으로 10%CO의 것보다 낮았는데 이것은 입계에서 연속적으로 생성된 δ 상이 취약한 구조를 갖고 있기 때문에 이러한 현상이 일어났다고 볼 수 있다. 30%Co와 40%Co의 경우는 입계에서 Co양이 급격히 증가함에 따라 δ 상의 생성이 억제되어 높은 항절력값을 갖게 되었다고 사료된다.

조직관찰이 끝난 후 곧 이어 연삭시험이 행해졌는데 Fig. 11에 FC25 연삭 결과를 Fig. 12에 SKH-51을 연삭한 결과를 연삭비와 소

모동력으로 나타내었다. Fig. 11에서 보면 주석청동합금으로 만들어진 휠에서 가장 낮은 연삭비와 소모동력을 나타내었는데 이것은 많은 기공의 존재와 인성이 큰 Co의 미함유에 기인된 것으로 사료된다. 계속해서 Co가 증가함에 따라 연삭비와 소모전력(일반적으로 연삭비가 증가함에 따라 같이 상승함)이 증가하다가 20%Co가 함유된 휠에서 최대값을 나타내고 더이상 Co가 증가하면 오히려 감소하는 현상을 보이고 있다. 이러한 경향은 앞서 기술해 온 바와 같이 취약한 δ 상이 입계에서 연속적으로 존재하여 연삭시 CBN의 마모와 함께 적절히 본드도 마멸되어 최적의 연삭기구를 유지하기 때문으로 사료된다. 이러한 경향은 SKH-51을 연삭했을 때도 비슷한 결과를

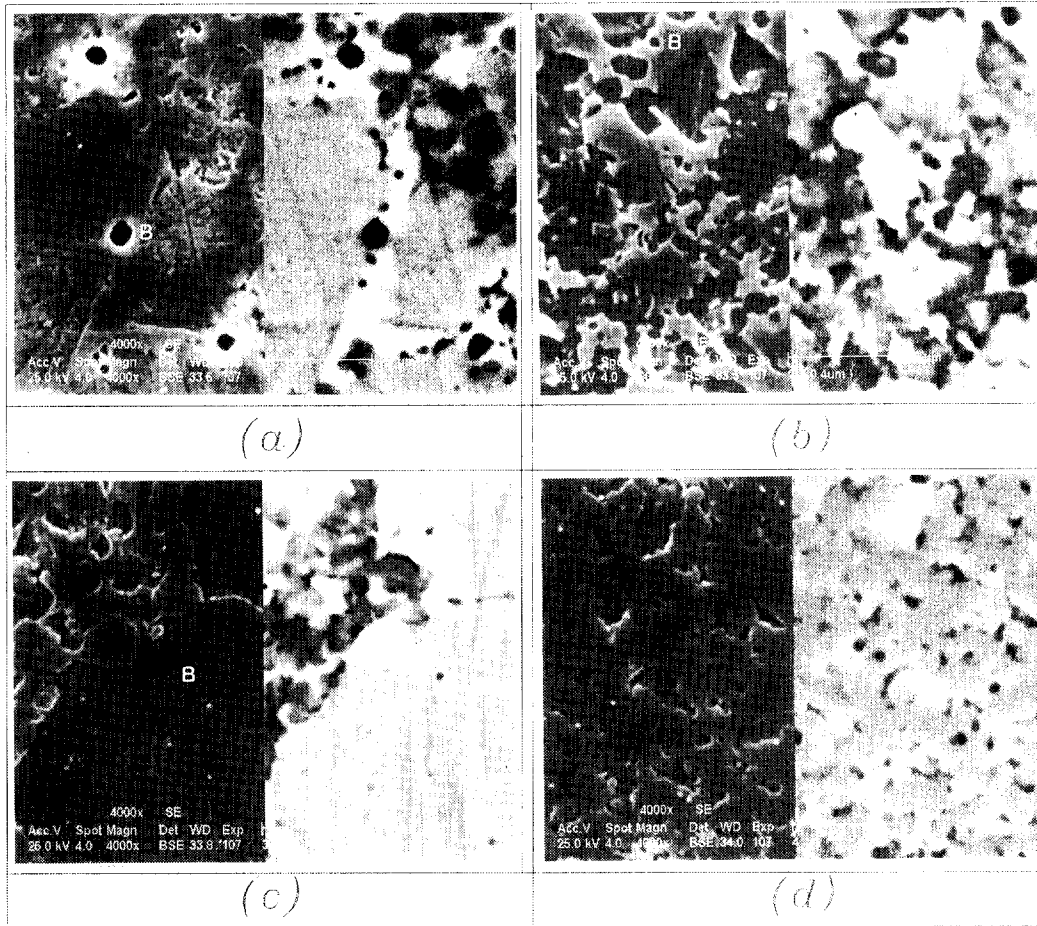


Fig. 9. SEM micrographs of the specimens with the pore; the right is photographed by SE, the right is photographed by BSE.

나타냈다는 것을 Fig. 12에서 알 수 있다. 다만 피삭재의 재종에 따라 연삭비가 4100과 522로 크게 차이가 나고 있는 것은 주철의 일종인 FC25가 취성이 강한 재질로서 비교적 연삭성이 좋기 때문이고 고속도강인 SKH-51은 Co가 함유되어 있는 인성이 강한 재질로서 연삭성이 아주 좋지 않기 때문이다. 따라서 기지의 합금은 경도를 유지하면서 얼마나 취성을 갖게 되는가에 그 성능이 좌우되는 것이다. 즉 기지의 경도를 높히면서 항절력을 낮게 유지한 경우가 가장 효율적인 본드로서 사용될 수 있다. 그러나 항절력을 무한정 내릴 수는 없으므로 일정한 기준치 이상으로 유지해야 CBN입자를 강고히 파지할 수 있기

때문이다.

연삭이 끝난 휠은 파단면을 관찰하기 위해 파괴하여 SEM으로 관찰하였다. Fig. 13은 CBN입자의 파단면 및 입자 주위의 결합 상태를 나타낸다. 이번에 사용된 CBN입자는 Co를 코팅한 것으로 기지의 합금과의 젖음성과 정합성을 좋게 하여 금속 결합을 높혀주기 위함이다. 다시 말해서 일반적으로 CBN의 코팅에는 Ti코팅된 것을 사용하나, 여기서 Co코팅 CBN을 사용하게 된 것은 417°C에서 입방정으로부터 육방정으로 변태하기 때문에 변태시 응력을 줄이기 위한 Co-Co결합을 유도하기 위해 Co코팅된 것을 사용하였다.

그러나 실제로 Co-Co결합은 700°C에서 총

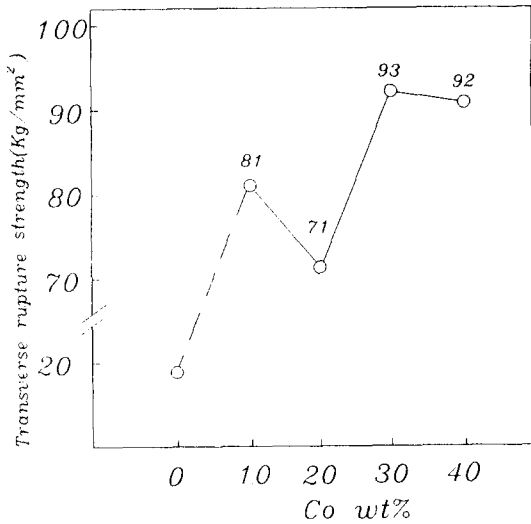


Fig. 10. Transverse rupture strength of specimens.

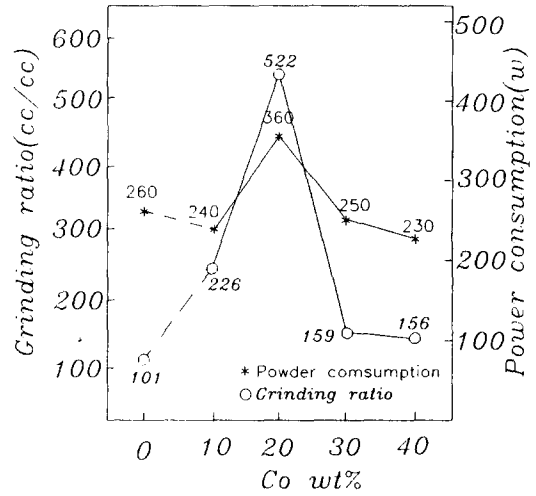


Fig. 12. Variation of grinding ratio and power consumption by addition of cobalt on grinding SKH-51.

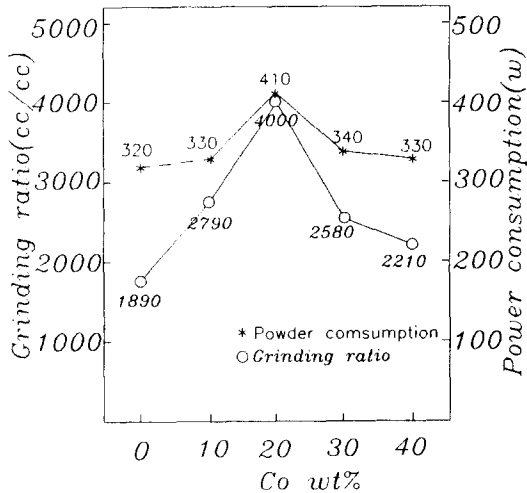


Fig. 11. Variation of grinding ratio and power consumption by addition of cobalt on grinding FC25.

분히 일어나지 않은 결과로 인해¹²⁾ 효과는 없었다. 단지 δ 상이 젖음성이 좋은 관계로 CBN 위에 코팅된 Co와 충분히 결합하고 있는 것이 20%Co의 경우 뚜렷하였다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 δ 상이 기지의 합금 중에 연속적으로 분산되어 있는 20%Co의 경우는 CBN이 입내 파괴가 일어났으며 기타의 경우는 전부 입계 파괴가 일어난 것을 알 수 있다. 이

것은 CBN위에 Co가 남아있으면 입계 파괴로 볼 수 있어 20%Co의 경우만 입내 파괴로 볼 수 있기 때문이다. 이러한 입내 파괴 현상은 기지 합금과 코팅 층이 젖음성이 좋아 그에 따른 결합력이 증가함으로써 기지합금 중에 CBN입자가 강고히 존재하기 때문이다. 따라서 취약한 δ 상이 효율적으로 마멸해 감으로써 CBN의 마멸 속도와 적절히 균형을 이루게 되고 연속해서 새로운 CBN입자를 노출시켜 자생작용의 원활성을 유지해 줌으로써 휠의 성능을 최대한으로 끌어 낼 수 있는 것이다.

따라서 본 연구에서는 주석청동합금에 Co를 첨가함으로써 기지 합금의 인성을 증대시키면서 내마모성을 향상시킬 계획이었으나 Co첨가량의 증가와 더불어 인성이 비례적으로 향상되지 않고 일정한 첨가량에서 최저 인성치가 나타남을 알 수 있었다.

4. 결 론

메탈 본드 CBN휠의 기지재료로 사용되는 주석 청동 합금(Cu-15%Sn, 50%와 Cu-33% Sn, 50%의 합금)에 Co원소를 10%, 20%, 30%, 40%를 첨하여 제작한 시편과 연삭 휠의 기계적 성질 변화와 연삭성능을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

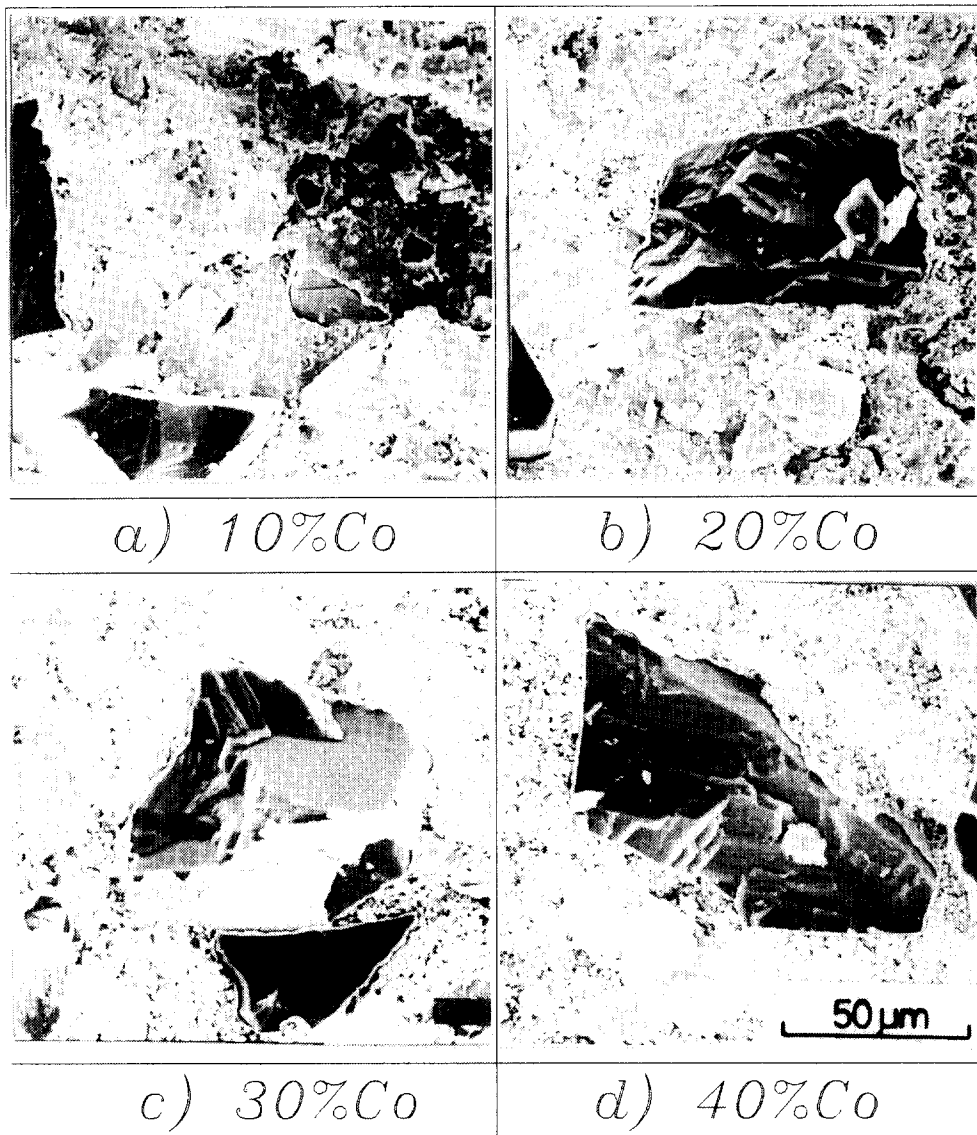


Fig. 13. Fractographies of CBN abrasives surrounded with matrix.

- 1) Co의 증가에 따른 시편의 로크웰 경도값은 변화가 없었는데 이것은 1/16"볼의 넓은 범위의 영역을 압입함에 따라 큰 차이를 나타내지 못한 것으로 사료된다.
- 2) 20%Co를 첨가한 것이 가장 항절력이 낮았는데 이것은 주석 청동의 δ상이 α상과 Co주위에 연속적으로 존재함으로써 취약한 구조의 기지합금을 형성하기 때문으로 사료된다.
- 3) 20%Co를 첨가한 것이 연삭비 및 소모전

력이 가장 높았다. 이것은 기지 재료가 δ상의 취약한 구조를 하고 있기 때문에 자생작용이 향상되어 CBN입자와의 마멸속도와 본드의 마모 속도가 잘 균형을 이루고 있기 때문이라고 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) 上月秀徳, 元上宗之 : 日本金屬學會誌, 56, 565 (1992)
- 2) 横川和彦, 横川宗彦 : "CBN研削加工技

- 術”, 17, 工業調査會, 東京, 日本, (1988)
- 3) 福井保夫, 長田鈍夫: 特開昭59-182064
- 4) 최성국, 서형석, 최정철: 한국주조공학회지, 12(4), 49 (1992)
- 5) 榛葉久吉, 三谷裕康: “粉末冶金學”, 14, 157, コロナ社, 東京, 日本, (1985)
- 6) 實踐教育研究會: “機械工學基礎實驗試驗編”, 17, 工業調査會, 東京,, 日本, (1987)
- 7) 飯塚榮一: New diamond, 16, 22 (1990)
- 8) ナイジチ, ウマスキ, ラフリネンコ: “ダイヤモンドの接着技術”, 69, オーム社, 東京, 日本, (1992)
- 9) 日本熱處理技術協會: “入門金屬材料と組織”, 69, 大河出版, 東京, 日本, (1984)
- 10) H. Scumann: “금속조직학”, 493, 학문사, 서울, 한국, (1993)
- 11) J.L.Metzer: “Superabrasive grinding”, 50, Butterworth, Cambridge U.P., Cambridge, England (1986)
- 12) 石丸安彦: “粉末冶金の基礎と應用”, 技術書院, 東京 (1993) 138