

석재가공용 다이아몬드 톱의 제조 및 특성

이현우 · 전우용* · 이오연 · 설경원

전북대학교 신소재공학부

The fabrication and characterization of hard rock cutting diamond saw

Hyun-Woo Lee, Woo-yong Jeon*, Oh-yeon Lee and Kyeong-won Seol

Division of Advanced Materials Engineering, Chonbuk National University, Chonju, 561-756, Korea.

*Division of Dental Engineering, Gwangyang health College, Gwangyang, 545-703, Korea.

(Received 16 September 2004 ; Accepted form 14 October 2004)

Abstract The purpose of the present study is to determine an optimum composition using cheaper powders keeping with high performance of hard rock cutting diamond saw blade. With 50Fe-20(Cu-Sn)-30Co specimen, a part of Co was replaced by Ni(5%, 10%, and 15%, respectively). These specimens were hot pressed and sintered for predetermined time at various temperature. Sintering is performed by two different methods of temperature controlled method and specimen dimension controlled method. In order to determine the property of the sintered diamond saw blade, 3 point bending tester, X-ray diffractometer, and SEM were used. As the Co in the bond alloy was replaced by Ni, the hardness of the specimen increased. Thus the 50Fe-20(Cu-Sn)-15Co-15Ni specimen showed the maximum hardness of 104(HRB). The results of 3 point bending test showed that flexure strength decreased along with increase in Ni content. This is attributed to the formation of intermetallic compound(Ni₃Sn) determined by X-ray diffraction. The fracture surface after 3 point bending test showed that diamond was fractured in the specimen containing 0%, 5%, and 10%Ni, and the fracture occurred at the interface between diamond and matrix in the specimen containing 15%Ni. The cutting ability test showed that the abrasive property was not changed in the specimen containing 0%, 5%, and 10%Ni. The optimum composition determined in this study is 50Fe-20(Cu-Sn)-20Co-10Ni.

Key words : Diamond saw blade, Diamond tools, Metal bond, Metal powder sintering

1. 서 론

다이아몬드공구의 성능은 수명, 가공 정밀도, 절삭 저항 및 제조원가 등에 의해 평가되는데, 특히 대형 톱 제조 시 세그먼트(segment)의 품질수준 및 톱날몸체(shank)의 강도와 평탄도가 절삭성능에 영향을 미치는 중요한 인자가 된다. 따라서 저렴하면서도 우수한 품질의 다이아몬드 톱을 제조하기 위해서는 다이아몬드 지립의 입도와 형상, 금속분말의 원가와 배합 조성에 따른 소결체의 특성, 제조방법 및 본드재의 내마멸성 등을 고려하여야 한다.

이와 같은 다이아몬드 톱에 사용되는 금속본드소

재는 연삭 중에 걸리는 부하에 대하여 다이아몬드가 이탈되지 않도록 잡아주어야 하고, 또한 최대의 절삭 효율을 나타내기 위하여 금속본드재가 적당히 마멸하여 연삭이 진행되는 동안 다이아몬드 지립이 점차 마멸되면서 그 하층의 새로운 다이아몬드가 계속 노출되어야 하는 금속학적인 요구조건을 만족하여야 한다¹⁻¹⁷⁾.

소결용 다이아몬드공구에 사용되는 금속 본드재는 Cu-Sn계, Cu-Zn계, Co계, Ni계 및 WC계 등이 있으며¹⁸⁾, 암석의 절단용 지석에 사용되는 소재로는 다이아몬드와의 결합성이 우수하고, 비교적 낮은 소결 온도에서도 적절한 경도와 우수한 내산화성을 지니

고 있는 Co분말이 많이 사용되고 있다. 그러나 Co 분말은 Fe, Cu, Ni 분말에 비하여 상대적으로 가격이 비싸기 때문에 제조원가 상승의 한 요인이 되고 있다. 따라서 고가의 Co 분말을 저가의 Fe 분말이나 Ni, Cu, Sn 분말 등으로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다¹³⁾.

따라서 본 연구에서는 다이아몬드 톱의 원가절감 방안의 하나로써 고가의 Co 분말 대신 저가의 Ni 분말로 대체하여 Co가 다량 함유된 조성과 동등 수준의 기계적 특성과 공구 수명을 출현함으로써 원가 절감에 기여하는데 중점을 두어 최적의 배합조성과 소결조건을 결정하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 시료의 제작

본 연구에서는 50Fe-30Co-20(Cu-Sn)을 기본 조성으로 하여, 고가의 Co분말을 저가의 Ni 분말로 대체하였을 경우, 각 조성별 소결체의 밀도, 경도 및 마멸성의 변화를 측정하고자 Table 1과 같은 조성으로 시편을 제작하였다.

시편의 제작은 각 분말의 균일한 혼합을 위하여 Table 1의 중량비율로 정량한 후, 8 mm 강구와 함께 회전원통형 ball mill에 넣고 회전속도 10 rpm으로 약 3시간 동안 혼합하였다. 또한 분말중량의 3 wt%의 파라핀 왁스를 결합제로 첨가하고 핵산을 용매로 하여 100°C의 가열판에서 가열하여 왁스처리 하였다. 이렇게 제조된 분말은 다시 26.0×11.7×8.0 mm의 금속몰드에 충전하여 일축 압축법에 의해 약 200 MPa의 압력을 가하여 예비성형 하였다.

결합제로 첨가한 파라핀 왁스는 관상로에서 약 4 시간 동안 가열하여 제거하였는데, 이때 상온에서 200°C까지는 노 내의 공기를 제거하고 불활성 분위기를 유지하기 위하여 알곤가스를 사용하였고, 200°C~400°C까지는 환원성 분위기를 유지하기 위하

여 수소가스를 이용하여 탈왁스 처리 하였다. Fig. 1에 탈왁스 처리 중 노 내의 온도분포를 나타내었다.

소결은 성형체를 흑연몰드로 감싸고 여기에 전류를 통전해줌으로써 흑연몰드에서 발생하는 저항열로 소결이 이루어지는 통전가압소결방식을 이용하였으며, 통전가압소결장치의 구성은 소결체를 둘러싸고 있는 흑연몰드, 소결 시 압력을 공급하는 유압펌프와 유압 실린더, 분위기 조절을 위한 진공챔버와 진공펌프, 설정온도에 따라 전류량을 자동 조절하는 프로그램타입의 PID 온도제어기, 전원 공급 장치 등으로 구성 되어 있다. 주변장치로는 소결체에 가해진 압력을 load cell에서 감지하여 측정할 수 있는 디지털 압력계, 소결체의 수축율을 측정할 수 있는 디지털 변위 측정장치(Linear Variable Differential Transformer : LVDT) 등이 부착되어 있다. 이 통전가압 소결방식은 일반적인 가열 소결 방식에 비하여 극히 짧은 시간에 비교적 균일한 소결체를 얻을 수 있다는 장점이 있어 다이아몬드 톱의 세그먼트 제조에 널리 사용되고 있다.

소결조건으로는 통전가압 소결 시의 온도조건을 정량화하기 위하여, 소결 시 흑연몰드를 통하여 소결체에 전달되는 전류의 양을 자동 제어함으로써 온도를 조절하는 온도제어 방식과 소결체의 재현성 향상을

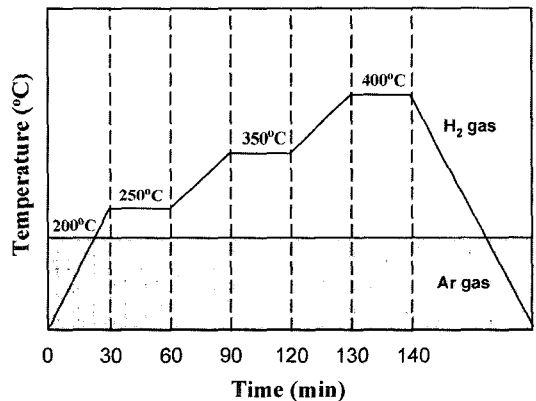


Fig. 1. Schematic diagram of dewaxing process.

Table 1. Chemical composition of specimens by weight fraction.

Chemical composition	Size(mm)	Diamond added	Cu-Sn powder
50Fe-30Co-20(Cu-Sn)	26×11.7×8	2.0%	Cu : Sn=8 : 2
50Fe- 5Ni-25Co-20(Cu-Sn)			
50Fe-10Ni-20Co-20(Cu-Sn)			
50Fe-15Ni-25Co-20(Cu-Sn)			

위한 치수(수축율)제어에 의한 소결방식을 적용하였다. 온도제어 방식은 소결압력 300 MPa, 소결온도 650°C, 700°C, 750°C, 800°C에서 소결하였으며, 치수제어 방식은 소결전후의 소결체의 수축률(두께변화)이 35%가 되도록 소결압력 300 MPa, 소결온도 750°C에서 소결을 실시하였다.

2.2. 특성평가

위와 같은 방법으로 제조한 시료는 디지털 변위 측정 장치를 이용하여 1/100 mm까지 선 수축율을 측정하였으며, 소결체의 겉보기밀도 및 기공율은 수분침침법(KSL 3114)에 의하여 측정하였다. 경도측정은 Rockwell B scale(하중 100 kg, 1/16인치 강구)을 사용하여 측정하였고, 각 조성별로 제작한 소결체의 인성 및 굽힘 강도를 측정하기 위하여 JIS 규격(R 1601-1981)에서 정한 표준시험법을 이용, Instron사(Model 4483)의 만능시험기(Universal testing machine : UTM)로 3점 굽힘 시험을 실시하였다.

또한 본 연구에서는 제품의 절삭능력 및 각종 석재의 절삭특성을 측정하기 위하여 각 조성별로 제작된 소결체를 직경 8 인치의 톱날몸체(steel shank)에 각각 4개씩 용접하여 다이아몬드 톱날을 제작하였으며, 절삭시험 시 톱날의 회전속도는 2000 rpm, 석재를 이동시키는 대차의 속도는 1.25 m/min, 1회 절삭 이동시의 절삭 깊이는 5 mm로 하여, 6시간 가동시킨 후 세그먼트의 길이변화와 절삭 시 절삭기에 걸리는 전류량을 측정하였다.

X선 회절분석은 RIGAKU, D/MAX-111A X선 회절장치를 이용하였으며, 타겟으로는 Cu 타겟을 사용하였고, 회절선측정은 40 kV, 30 mA에서 $10^\circ < 2\theta < 120^\circ$ 범위에서 실시하였다.

미세조직관찰은 주사전자현미경(JEOL, JSM 6400)을 이용하여 관찰하였고, 각 조성별로 EDS(energy dispersive spectroscopy, Oxpord Link ISIS)를 사용하여 정성분석 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 선수축률

일반적으로 소결체의 상대밀도는 소결전과 소결후의 두께 변화량에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Fig. 2는 온도제어에 의한 통전기압소결시험에서

소결압력을 300 MPa로 고정시키고 소결온도를 650°C, 700°C, 750°C, 800°C로 변화시켰을 때 소결체의 수축률을 나타낸 것이다. 650°C~750°C구간에서는 수축율이 급속하게 증가하다가 750°C~800°C 구간에서는 더 이상 수축되지 않거나 수축률의 증가가 완만해지는 경향을 보였으며, 각 조성별로 근소한 차이는 있으나 온도 구간별 수축율 변화는 동일한 경향을 나타내었다.

3.2. 상대밀도

온도제어에 의한 소결체의 상대밀도를 Fig. 3에 나타내었다. 온도제어에 의한 소결에서는 50Fe-20(Cu-Sn)-25Co-5Ni와 50Fe-20(Cu-Sn)-20Co-10Ni 조성이 대체적으로 높은 밀도값을 나타냈으며, 각 조성 모두 온도가 증가할수록 높은 밀도값을 나타내었다. 이는 소결체의 수축율 측정결과와도 잘 일치하고 있다. 여러 소결체의 평균밀도가 750°C부근에서 가장 양호한 것으로 볼 때, 가장 적합한 소결온도를 약 750°C로 추정하고, 치수제어에 의한 소결시험에서는 소결온도가 약 750°C로 유지되도록 소결압력과 전류량을 고정시키고 소결 전, 후의 소결체의 치수변화가 일정(수축율 35%)하도록 소결시간을 달리하여 소결하였다.

치수제어에 의한 소결실험에서 Ni 함량 변화에 따른 소결체의 밀도를 Fig. 4에 나타내었다. 이 경우 각 조성 모두 근소한 차이의 밀도 값을 나타내었다.

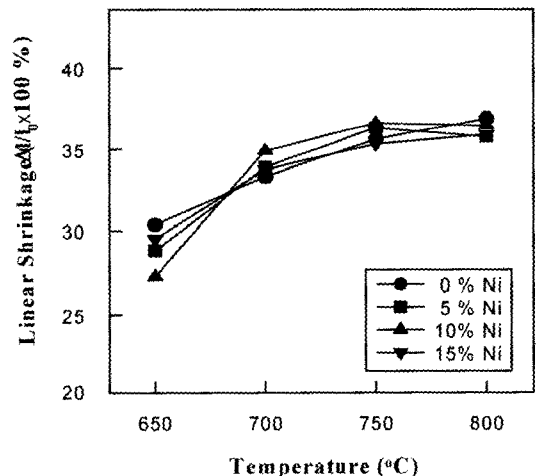


Fig. 2. Effect of sintering temperature on the linear shrinkage of the compacts with replacing Co with Ni.

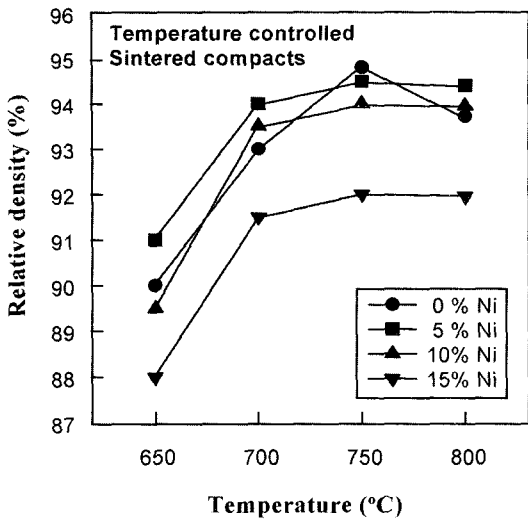


Fig. 3. Change of the relative density of sintered compacts with temperature according to replacement of Co with Ni.

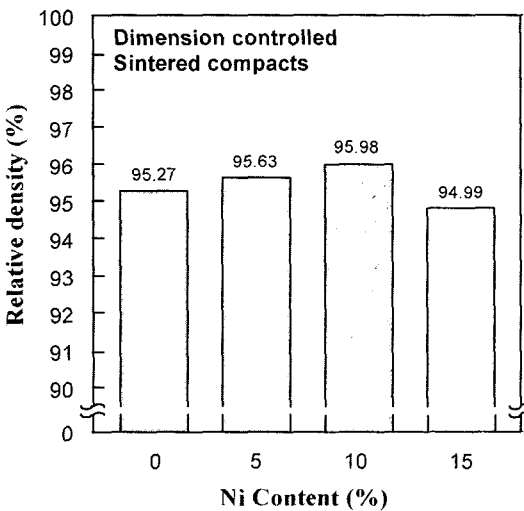


Fig. 4. Relative density of sintered compacts with different Ni content.

따라서 Co분말을 Ni로 대체하더라도 Co분말의 비중과 Ni 분말의 비중이 같기 때문에 밀도변화에는 그다지 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

3.3. 경도변화

소결체의 경도는 질삭공구의 내마멸성과 밀접한 관계가 있으므로 금속결합재는 절적한 경도를 가지고 있어야 한다. Fig. 5는 소결온도를 650°C, 700°C,

750°C, 800°C로 변화시켰을 때, 각 조성별 소결체의 경도값을 나타낸 것으로 소결온도가 높아질수록 높은 경도값을 나타내었으며, 미소하지만 Ni 함량도 경도값 증가에 기여하는 것으로 생각된다. 또한 Fig. 3와 비교해 볼 때, 밀도가 높을수록 경도값도 높아짐을 알 수 있다. Fig. 6은 치수제어에 의한 소결시험(수축율 35%, 750°C, 300 MPa)에서 각 조성별 경도값을 나타낸 것으로 역시 Ni 함량이 증가함에 따라 경도값도 증가함을 알 수 있다.

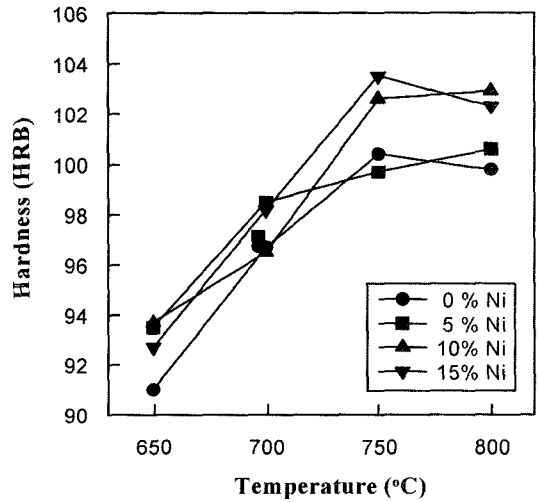


Fig. 5. Change of the hardness of sintered compacts with sintering temperature according to replacement of Co with Ni.

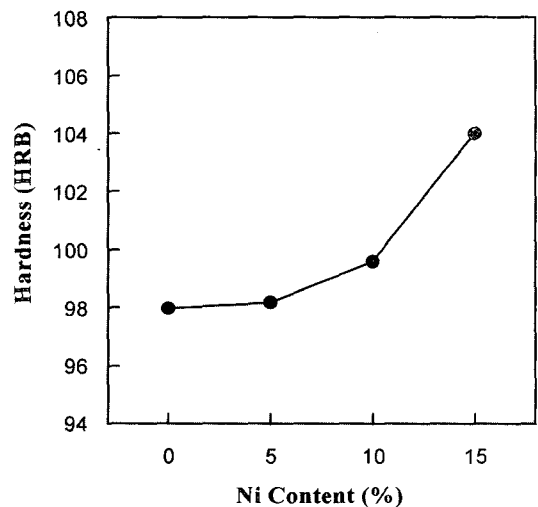


Fig. 6. Change of the hardness of sintered compacts with different Ni content.

3.4. 굽힘강도

Fig. 7은 50Fe-20(Cu-Sn)-30Co조성에 Co 대신 Ni를 각각 5%, 10%, 15% 대체한 소결시편의 굽힘강도값을 나타낸 것이다. Ni 함량이 증가함에 따라 굽힘강도값이 크게 저하되는 것을 알 수 있다. 이것은 경도값이 증가 할수록 취성파괴의 특성이 증가하기 때문에 굽힘강도 값이 낮아지는 것으로 생각된다.

3.5. 절삭성 시험

절삭중에 모터에 걸리는 전기부하량은 곧 톱에 걸리는 부하량과 비례하며 절삭성이 양호한 경우 톱에 걸리는 전기 부하량이 적어지므로, 소결된 제품의 절삭성을 시험하기 위하여 실제 현장에서 사용되고 있는 절삭기에 전압, 전류 측정장치를 부착한 절삭성시험기로 전류량의 변화를 측정하였다. Fig. 8은 Co 대신에 Ni를 각각 0%, 5%, 10%, 15% 대체하여 소결한 다이아몬드 톱의 절삭 중에 걸리는 전류량 변화 값의 평균을 각 조성별로 비교하여 나타낸 것으로 거의 비슷한 값을 나타내고 있으나, 50Fe-20(Cu-Sn)-15Co-15Ni조성이 타 조성에 비하여 높은 전류값을 보이고 있다. Fig. 9는 각 조성별로 절삭시험 후 세그먼트의 마모량을 나타낸 것으로써 50Fe-20(Cu-Sn)-15Co-15Ni조성이 가장 많이 감소하였다. 이는 다이아몬드와의 결합성이 우수한 Co분말이 Ni로 대체되면서 점차 결합성이 저하되어 다이아몬드

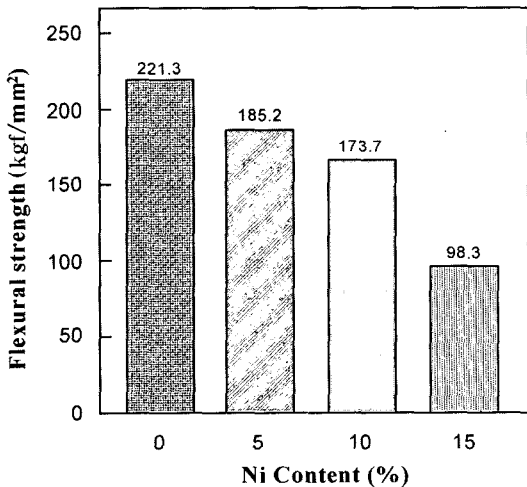


Fig. 7. Flexural strength of the sintered compacts with different Ni content.

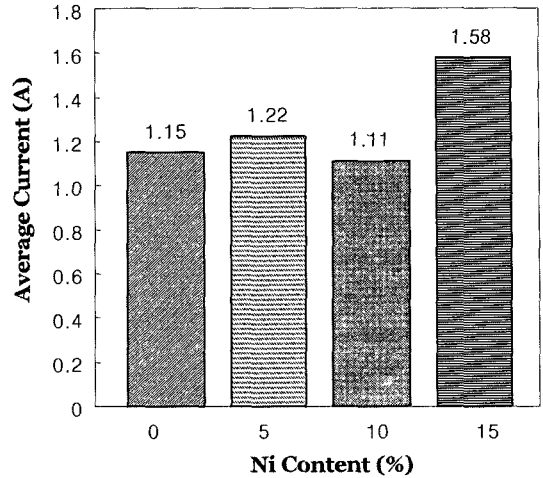


Fig. 8. Average current of the diamond saw blade with different Ni content.

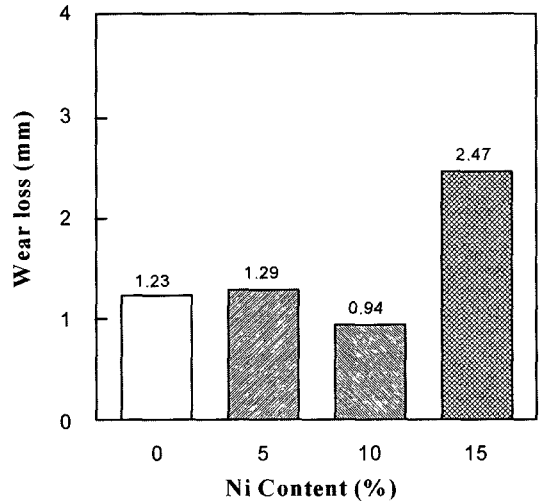


Fig. 9. Wear loss of the diamond saw blade segment with different Ni content.

지립이 충분히 마모되지 못하고 탈락하기 때문으로 생각된다. 즉, 금속본드 소재가 연삭 중에 걸리는 부하에 다이아몬드가 이탈되지 않도록 잡아주지 못함으로써 절삭성과 수명 면에서 타 조성보다 다소 뒤떨어지는 것으로 판단된다.

3.6. X-선 회절시험

Fig. 10은 각 조성별 소결체의 X-선 회절시험결과이다. 50Fe-20(Cu-Sn)-30Co 조성과 50Fe-20(Cu-Sn)-25Co-5Ni 조성의 경우, 주로 α-Fe의 회절피크만이 관

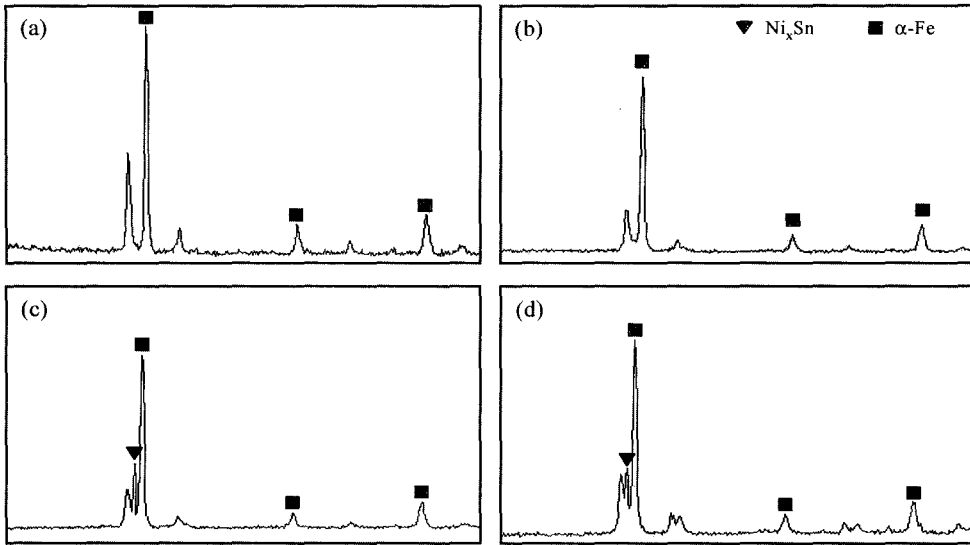


Fig. 10. X-ray diffraction patterns of the sintered compacts. (a) 50Fe-20(Cu-Sn)-30Co (b) 50Fe-20(Cu-Sn)-25Co-5Ni (c) 50Fe-20(Cu-Sn)-20Co-10Ni (d) 50Fe-20(Cu-Sn)-15Co-15Ni

찰되었으나, 50Fe-20(Cu-Sn)-20Co-10Ni 조성과 50Fe-20(Cu-Sn)-15Co-15Ni 조성에서는 Ni_xSn 금속간화합물 피크가 동시에 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 Ni_xSn 금속간화합물은 Fe, Co 기지 내에 산재해 있으며 취성을 가지는 화합물로 알려져 있다. 즉, Ni의 함량이 증가함에 따라 Ni과 Sn이 취성을 가진 금속간 화합물을 형성하게 되고, 이 금속간화합물이 기지조직의 연성과 다이아몬드와의 결합성을 저하시킴으로써 절삭성과 수명에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 50Fe-20(Cu-Sn)-15Co-15Ni 조성에서 절삭성의 저하가 큰 것으로 보아, Ni 함량 10%가 Co를 Ni로 대체할 수 있는 임계 조성으로 생각된다.

3.7. 미세조직 관찰

Fig. 11은 각 조성별 소결체의 파단면을 주사전자 현미경으로 관찰한 사진이다. 50Fe-20(Cu-Sn)-30Co 조성의 경우 분말의 결합에 의하여 생긴 기공들의 결합이 끊어지면서 발생한 미세한 물결패턴들이 존재하는 연성파괴의 양상을 나타내며, Ni의 함량이 증가할수록 물결패턴들의 수가 적어지고 미세한 입계파괴의 형상을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 각 조성별 소결체의 파단면 중 다이아몬드 표면을 관찰한 사진으로 50Fe-20(Cu-Sn)-30Co,

50Fe-20(Cu-Sn)-25Co-5Ni, 50Fe-20(Cu-Sn)-20Co-10Ni 조성은 다이아몬드가 파괴되어 탈락되어 있으나, 50Fe-20(Cu-Sn)-15Co-15Ni 조성의 경우 다이아몬드와 기지와의 계면에서 파괴가 발생하였다. 이는 50Fe-20(Cu-Sn)-15Co-15Ni 조성이 타 조성에 비해 다이아몬드와의 결합성이 양호하지 못함을 입증해 준다.

Fig. 13는 50Fe-20(Cu-Sn)-20Co-10Ni 조성의 기지 중에 박혀있는 다이아몬드의 노출에서부터 탈락까지의 과정을 나타낸 사진이다. 이처럼 기지조직 내에 박혀있는 다이아몬드 지립이 서서히 노출되면서 일정량 마모되는 동안 금속본드 소재가 다이아몬드 지립과의 결합강도를 유지함으로써 다이아몬드 지립이 너무 빨리 탈락하지 않도록 하는 것이 공구의 절삭성과 수명에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결 론

석재가공용 다이아몬드 톱의 원가절감을 목적으로 최적의 배합조성과 소결조건을 찾기 위하여 50Fe-20(Cu-Sn)-30Co를 기본조성으로, 여기에 Co를 Ni로 각각 5%, 10%, 15% 대체시켜 통전가압소결을 실시한 후, 소결체의 밀도, 경도, 굽힘강도, 절삭성 시험 및 파단면 관찰 등을 행한 결과 다음과 같은 결론을

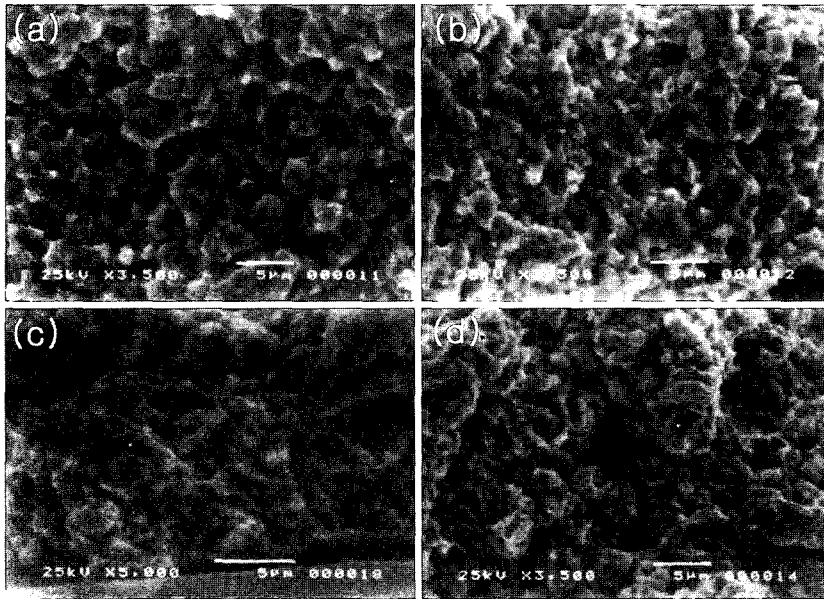


Fig. 11. Scanning electron micrographs of the fracture surface of sintered compacts.
 (a) 50Fe-20(Cu-Sn)-30Co (b) 50Fe-20(Cu-Sn)-25Co-5Ni
 (c) 50Fe-20(Cu-Sn)-20Co-10Ni (d) 50Fe-20(Cu-Sn)-15Co-15Ni

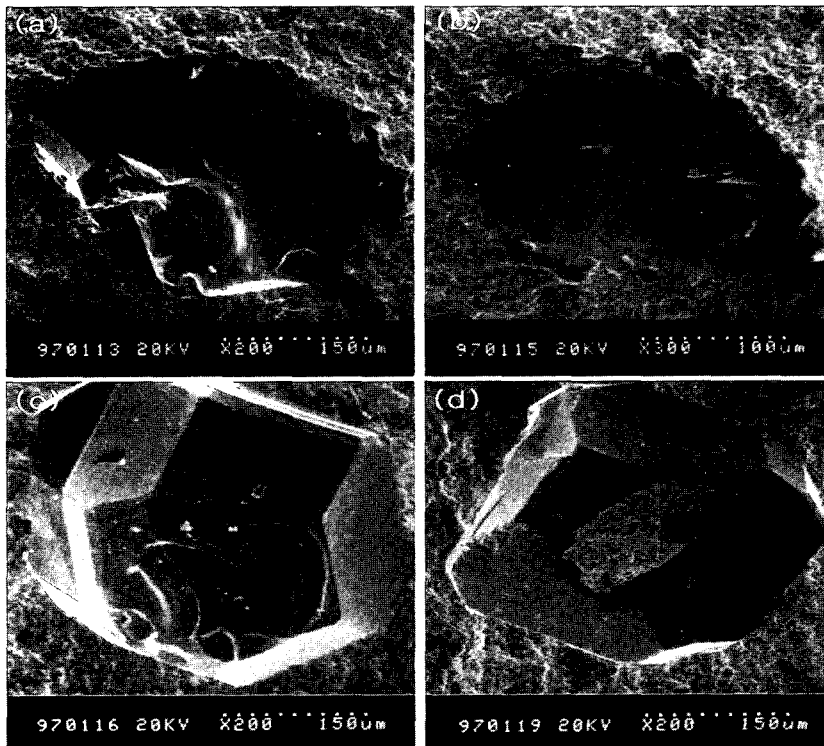


Fig. 12. Scanning electron micrographs of the fracture surface of diamond saw blades.
 (a) 50Fe-20(Cu-Sn)-30Co (b) 50Fe-20(Cu-Sn)-25Co-5Ni
 (c) 50Fe-20(Cu-Sn)-20Co-10Ni (d) 50Fe-20(Cu-Sn)-15Co-15Ni

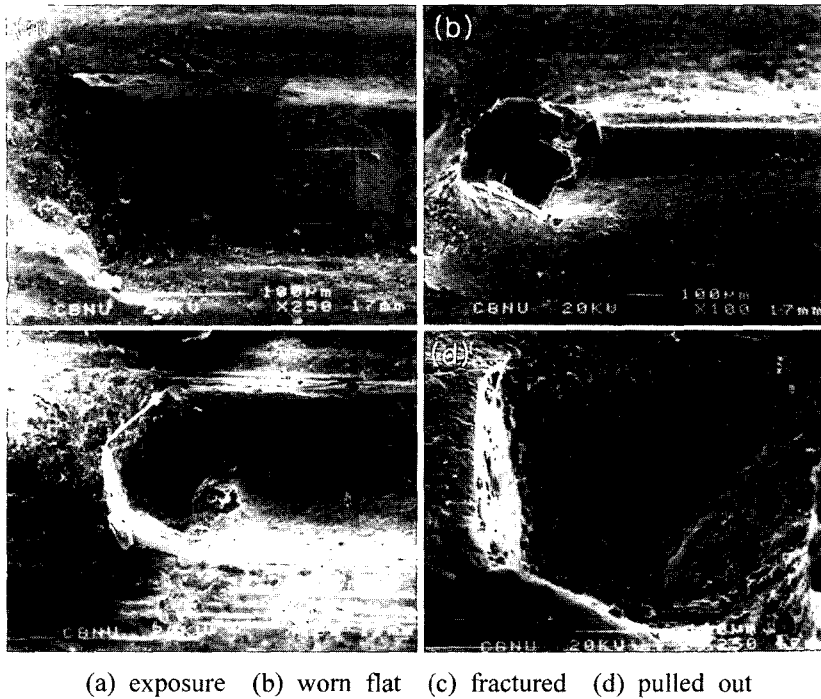


Fig. 13. Scanning electron micrographs of the diamond saw blade of 50Fe-20(Cu-Sn)-20Co-10Ni. (a) exposure (b) worn flat (c) fractured (d) pulled out

얻을 수 있었다.

1. Ni 함량이 증가함에 따라 소결체의 경도는 증가하는 반면, 굽힘 강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 Ni 함량이 증가할수록 Sn과 Ni이 기지조직 내에 Ni_xSn의 금속간화합물을 형성함으로써 취성을 증가시키고 연성을 저하시키기 때문인 것으로 생각된다.

2. 절삭성시험을 통하여 소결체의 마모량과 전력 부하량을 측정된 결과, Ni 대체량 10%까지는 기본 조성에 비해 큰 차이를 보이지 않았으나, Ni를 15% 대체하였을 경우에는 전력 부하가 높게 걸리고 소결체의 마모량이 크게 나타났다. 또한, 3점 굽힘시험 후 소결체의 파단면을 관찰한 결과, Ni 함량 0%, 5%, 10%에서는 다이아몬드가 파단 되었으나, Ni 함량 15%인 조성에서는 다이아몬드가 기지조직에 붙어 있지 못하고 다이아몬드와 기지와의 계면에서 파단이 발생하였다. 이는 다이아몬드와의 결합성이 우수한 Co 분말이 Ni 분말로 대체되면서 점차 금속본드와 다이아몬드 지립간의 결합성이 저하되어 다이아몬드 지립이 쉽게 탈락해 버리기 때문인 것으로 판단된다.

3. 이상의 결과를 종합해 볼 때, 50Fe-20(Cu-Sn)-20Co-10Ni 조성이 다이아몬드 톱의 기계적 특성과 공구 수명을 유지하면서, 고가의 Co 분말을 저가의 Ni 분말로 대체 할 수 있는 임계 조성으로 판단된다.

참고문헌

1. Bligh. H. Stockwell : "An Introduction to Metallurgy of Diamond Tools", Developed by MACRO div. of Kennametal. ed. Macro Technology Team, Companions for Industrial Diamond Publishing. 4-5.
2. R. L. Mehand and S. C. Hayden : Friction and Diamond Materials and other Ceramics against Metal, *Wear*, **74** (1981-1982) 195.
3. S. Mashima : *Ceramic(Japan J.)*, **(22)9** (1987) 792.
4. L. F. Hibbs and R. H. Wentorf : "Borazon and Diamond Compact Tools", *High Temp. High Pressure*, **6** (1974) 409.
5. W. F. Sharp : Properties and Applications of Composition Diamond Coating, *Wear*, **32** (1975) 315.
6. Y. Fukano : *New Diamond* **6**, **(3)2** (1987) 43.
7. M. W. Bailey, L. K. Hedges : Crystal Morphology identification of diamond and ABN. *Ind. Dia. Rev.*, **(55)504** (1995) 11.

8. S. Yamaoka : *New Diamond* 6, (3)2 (1987) 43.
9. S. Somiya et al., *Sintering '91*, Trans Tech Publications, Canada, (1991) 301.
10. H. T. Hall : *Science*, **169** (1970) 868.
11. 犬狀英夫, 見意一兄 : 加工工具への 利用 (切削工具ソトホイール), 323.
12. 한국공구공업 협동조합, 한국공구공업총람, (1997) 58, 75, 131.
13. 이오연 : Co-Cu-Sn계 압분체의 소결특성, 1991년 공업기술원 기술지도 보고서, (1991) 335.
14. 이준근 : J. of Korea Powder Metallurgy Institute, (2)1 (1995) 8.
15. 문기동, 이종국, 김덕준, 김환, 한국재료학회지, (5)7 (1995) 829.
16. K. Wakashima, T. hirano and M. Niino. : Proc. ESA Symp. ESASP-303, **June** (1990) 97.
17. Stephen Clackson and Moreton Moore, An x-ray study of some argyle diamonds, *Ind. Dia. Rev.*, (52) 1992 192.
18. 은광용 : 다이아몬드 공구 제조 기술 발전, 제3회 분말야금 기술강좌(IV)별책, 대한금속학회편, (1989).