Journal of Korean Powder Metallurgy Institute
Vol. 15, No. 5, 2008

자기펄스 압축성형법에 의한 다이아몬드 공구용 세그먼트 분말 성형

윤종수 · 이정구[a] · 이민구[a] · 이창규[a] · 박문석[b] · 홍순직*
공주대학교 신소재공학부, [a]한국원자력연구소, [b]신한다이아몬드㈜

Consolidation of Segment Powder for Diamond Tool by Magnetic Pulsed Compaction

J. S. Yun, J. G. Lee[a], M. K. Lee[a], C. K. Rhee[a], M. S. Park[b] and S. J. Hong*
Division of Advanced Materials Engineering, Kongju National University, 275, Budae-dong, Cheonan, Chungnam, 330-717, Korea
[a]Nuclear Nano Materials Development lab. Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Dukjin-dong Yuseong-gu Daejeon 305-353, korea
[b]Shinhan diamond, 450-100 10L 36B Namdong-Gu, Incheon, Korea
(Received August 28, 2008; Accepted October 2, 2008)

Abstract This article presents the successful consolidation of the mixed Co and Diamond powders for a drilling segment by the combined application of magnetic pulsed compaction (MPC) and subsequent sintering, and their properties were analyzed. Homogeneous hardness (Hv 220) and density (97%) of sintered bulks fabricated by MPC were obtained by the new technique, where higher pressure has been employed for short period of time than that of general process. A fine microstructure and homogeneous hardness in the consolidated bulk were observed without cracks. Relatively higher drilling speed of 9.61 cm/min and life time of 6.55 m were found to the MPCed specimens, whereas the value of the specimens fabricated by general process was 11.71 cm/min and 7.96 m, respectively. A substantial improvement of mechanical properties of segment was achieved through this study.

Keywords : Magnetic pulsed compaction (MPC), Core drill, Diamond, Co powder

1. 서 론

다이아몬드는 최고의 경도와 강도 외에 열전도율이 높고, 열팽창 계수가 작으며, 내산화성이 좋기 때문에 공업용으로 필수 불가결한 재료로 널리 알려져 있다. 이와 같은 다이아몬드는1950년대에 미국 GE사에서 인조 합성다이아몬드 제조 기술의 발달로 공업용에 쓰이는 천연 다이아몬드의 대부분을 인조합성 다이아몬드로 대체하고 있다[1].

인조 합성다이아몬드는 제조조건을 변화시킴으로써 천연 다이아몬드보다 형상제어가 쉽고, 경도 및 내마모성이 우수하여 석재, 콘크리트 및 아스팔트 등의 각종 경질 난삭재의 절단, 연마, 가공 등의 석재절단용 다이아몬드공구로 널리 활용되고 있다[2, 3]. 다이아몬드공구는 일반적으로 몸통을 이루는 철계 코어(steel core)에 다이아몬드와 결합재로 구성된 세그먼트(Segment)를 부착하여 사용하는데 세그먼트는 다이아몬드 입자와 다이아몬드 입자를 잡아주는 결합재(Bond Material)로 이루어진 복합체이다. 다이아몬드 공구의 결합재로는 주로 철, 구리, 텅스텐, 코발트, 니켈 또는 서로의 합금을 사용하는데, 결합재는 다이아몬드 입자를 세그먼트의 표면에 고착시켜 절삭기능을 발휘하도록 하는 중요한 역할을 한다[4]. 따라서 다이아몬드와의 접합강도가 높아야 하며, 정상 상태의 절삭이 이루어지도록 내마모성을 갖고 있어야 한다. 또한, 절삭 과정에서 세그먼트의 온도가 높아

*Corresponding Author : [Tel : +82-41-521-9387; E-mail : hongsj@kongju.ac.kr]

지는 것이 일반적이므로 고온에서 결합재와 다이아몬드 입자 간의 결합력 및 고온 강도의 변화가 적은 결합재의 선택이 필요하다. 다이아몬드가 공구재료로서 뛰어난 것은 비교할 수 없는 높은 경도와 강도, 화학적 안정성 그리고 열 확산성이 뛰어나다는 장점을 갖고 있기 때문이다. 이와 같은 특성 때문에 연질 금속의 절삭에 있어 날이 파손되거나 마모되는 일이 없을 것으로 생각되지만, 실제로는 칩핑, 결손 등 취성 손상이나 점진적인 마모가 생긴다. 다이아몬드 절삭공구의 열 화학적인 마모는 각종 피절삭재료에 대하여 서로 다른 기구에 기준으로 하여 발생한다. 이와 같은 세그먼트는 현재 일반프레스 공정을 이용하여 냉간성형체를 만든 후 가압 또는 무가압 소결 방식으로 성형하여 제조되고 있다. 그러나 초기 분말의 크기 또는 초기 냉간성형체의 낮은 밀도 때문에 가압 또는 무가압 소결 공정을 이용하고 있어서 제조공정상에서 많은 문제점을 갖고 있다. 이에 본 연구에서는 자기펄스 압축성형장치를 이용하여 세그먼트의 성능을 향상시키고자 한다. 자기펄스 압축성형장치는 기존의 성형방법 보다 짧은 시간(마이크로 초) 동안에 초 고압의 높은 압력을 가하여 분말의 치밀화를 가능하게 하므로 성형 및 소결온도를 낮출 수 있을 뿐만 아니라 원료와 유사한 미세조직을 얻을 수 있다[5, 6]. 또한, 성형시간 단축과 자동화가 가능하여 다른 장비에 비하여 경제성이 있는 장점을 갖고 있다. 본 연구에서는 석재절단용 코어드릴(Core Drill)의 끝에 용접되는 세그먼트(segment)를 신성형장치인 자기펄스 압축성형장치(MPC: Magnetic Pulsed Compaction)를 이용하여 냉간성형 한 후 소결된 소결체의 특성 평가와 콘크리트 천공시험을 수행하였으며, 이에 대한 간단한 연구결과를 보고하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에 이용된 코발트 및 다이아몬드 분말은 신한다이아몬드공업㈜로 부터 조달 받았으며 각각의 분말은 적당한 비율로 혼합하여 복합분말을 만든 후 자기펄스 압축성형 공정과 일반 프레스 공정을 이용하여 냉간성형체(세그먼트)를 제조한 후 소결하였다. 분말의 입도분석은 BECKMANCOULTER LS13320 장비를 이용하여 분석되었으며, 평균입도 크기는 1.9 μm를 나타냈다. 연구에 이용된 자기펄스 압축성형장치는 전도성이 있는 코일에 전류가 흘러 비오사바르 법칙에 의해 일정 크기의 자기장이 발생되는 단계와; 시간에 따라 변화하는 자기장 속에 전도체를 위치시켜 페러데이 법칙에 의해 기전력을 형성시키는 단계; 저항이 있는 전도체에 발생된 기전력에 의해 옴 법칙에 의하여 전류가 흐르게 하는 단계; 초기에 발생한 자기장과 새롭게 형성된 전류 사이에 로렌츠 힘이 작용하도록 하여 이로부터 발생된 힘이 한쪽 방향으로 작용하면서 이 힘에 의해 압축력이 발생하여 분말의 성형이 이루어지도록 하는 단계로 이루어진 자기펄스 압축성형 원리를 이용하는 것이다[7, 8]. 그림 1은 본 연구에 이용된 자기펄스 압축성형 장치의 외형을 나타내고 있으며 냉간성형체의 압력은 1.2 GPa로 1초 이하의 짧은 시간에 성형이 이루어진다. 이처럼 자기펄스 압축성형장치로 제조된 냉간성형체는 무가압소결 방법으로 885°C에서 115분간 소결하였다. 예비성형체의 밀도는 부피와 무게를 측정하여 계산하였고, 소결체의 밀도는 아르키메데스법으로 측정하여 평균값을 나타냈다. 제조된 소결체의 파단면 및 미세조직은 전계방출 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscopy: FE-SEM)으로 관찰하였으며, 상 분석은 Cu 타겟이 장착된 X-선 회절분석기로 40~80° 범위에서 분석되었다. 소결체의 경도는 비커스 경도시험기를 이용하여 19.6(N)으로 10초 동안 하중을 가하여 10회 이상 측정하여 평균값을 나타냈다. 최종 소결체(세그먼트)는 천공드릴 끝 부분에 용접하여 철근이 박혀있는 콘크리트를

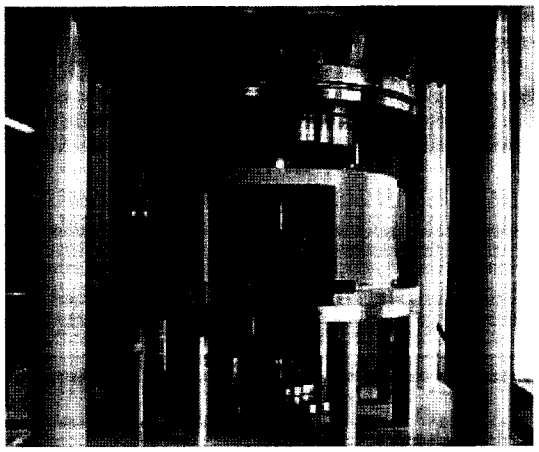

Fig. 1. Magnetic pulsed compaction pressing system used in this research for pre-compaction.

천공하여 천공속도와 시제품의 수명을 평가하였다. 이때 천공속도는 피삭재가 완전 천공되었을 때의 시간으로 측정하였으며, 시제품의 수명은 천공 후 세그먼트의 마모높이와 피삭재의 천공단면적을 계산하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 자기펄스 압축성형(MPC: Magnetic Pulsed Compaction)장치를 이용하여 천공드릴용 세그먼트의 주 원료인 코발트와 다이아몬드 혼합 분말의 성형 및 소결체의 천공 특성평가에 대한 연구를 수행하였다. 일반적으로 석재 절단용으로 사용되는 다이아몬드 입자 함량은 부피 비로 25%이며, 다이아몬드의 크기나 형상에 따라 기계적 특성들이 변화될 수 있다. 그림 2(a)는 본 연구에 이용된 다이아몬드의 형상과 크기를 나타내는 주사전자현미경 사진으로서 형상은 전형적인 6각형을 나타내고 있으며, 크기는 약 500 μm를 나타내고 있다. 다이아몬드 공구의 결합재료는 다이아몬드 입자를 세그먼트의 표면에 고착시켜, 절삭 기능을 발휘하도록 하는 중요한 역할을 하는데 본 연구에서는 강도와 내마모성이 우수한 것으로 알려진 코발트 분말을 사용하였으며 사용된 코발트 분말의 형상은(그림 2(b))에 나타냈고, 입도분석 결과는 그림 3에 나타냈다. 분말형상은 침상형에 가까운 불규칙한 형상을 하고 있으며, 분말입자 크기 분포는 1-7 μm이고, 평균입자의 크기는 1.9 μm이다. 위에서 언급한 것과 같이 코발트 분말은 다이아몬드 분말과 적당한 혼합 비율로 섞어서 예비성형체를 만들고, 소결하여 최종적으로 세그먼트를 만들게 된다. 그림 4는 자기펄스 압축성형장치로 냉간성형된 성형체(위)와 소결된 소결체(아래)의 형상과 표면상태를

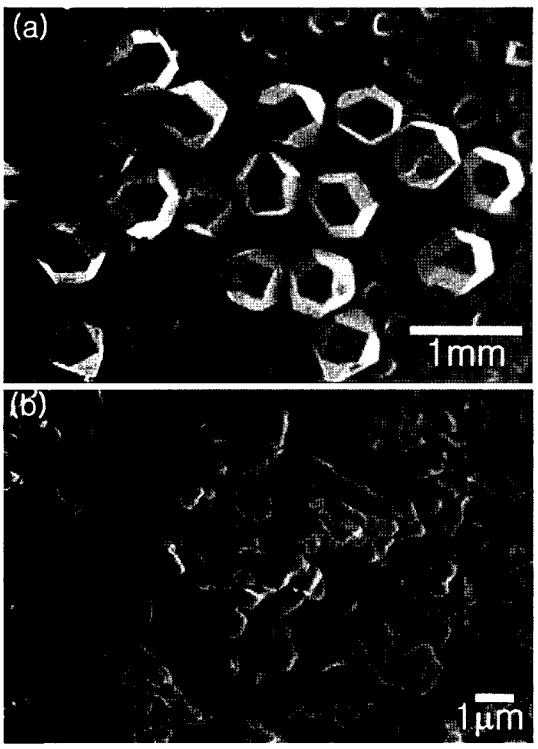

Fig. 2. SEM micrograph (a) diamond particles and (b) Co particles.

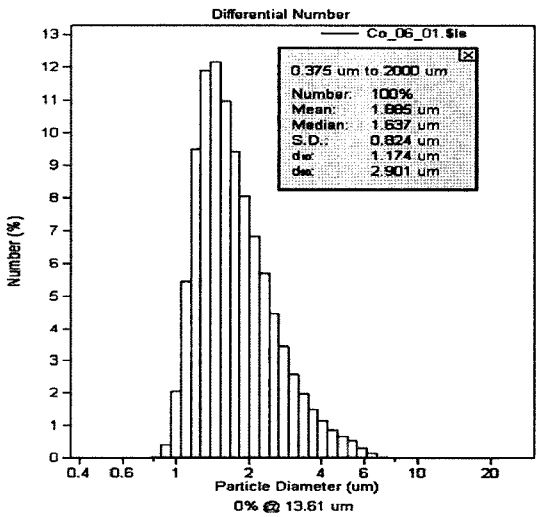

Fig. 3. Size distribution of Co particles.

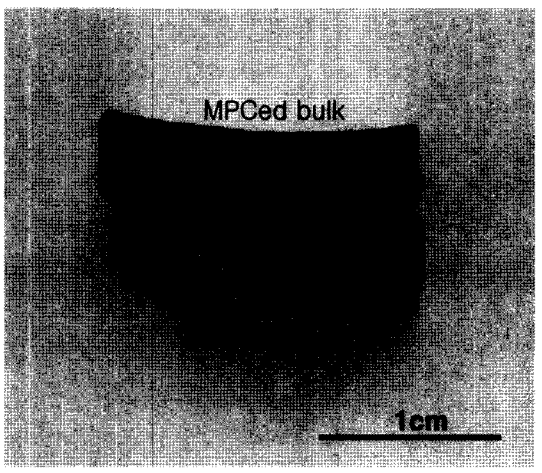

Fig. 4. Photos of MPCed bulk and sintered bulk.

나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 자기펄스 압축성형장치를 이용하여 복잡한 형상의 세그먼트를 냉간 성형할 경우 1.2 GPa의 압력까지는 냉간성형체 표면에 크랙이나 결함을 관찰 할 수 없었으나 1.2 GPa 보다 높은 성형압력에서는 표면에 크랙이 형성되었다. 연성 금속분말의 경우 분말의 압축에 따라 입자들의 변형과 입자간의 결합에 의해 충진도가 높아지고, 주된 변형은 입자들 간의 접촉 점에서 발생하며 이러한 접촉 점 증가는 기공크기 및 기공률을 감소시키므로 높은 밀도를 갖게 된다[9]. 그러나 취성이 강한 재료는 소성변형이 일어나기 어려워 입자충전 중에 접촉 점이 증가하기 어렵고, 축적된 과도한 탄성에너지를 이형과정에서 이완시키지 못하고 박리현상이 소결체에서 발생하게 된다.

이처럼 제조된 냉간성형체의 상대밀도는 자기펄스 압축성형장치로 성형한 경우는 79%를 나타냈지만 일반프레스 공정으로 성형한 경우는 67%로 다소 낮은 밀도 값을 나타냈다. 최종 소결체의 상대 밀도는 두 시편 모두 97%를 나타냈다. 자기펄스 압축성형을 할 경우는 초기 냉간성형체의 밀도가 일반 프레스 공정보다 높아서 최종 소결체의 밀도에서 많은 차이가 있을 것으로 기대하였으나 최종 소결체의 밀도에서 차이가 없는 것은 885℃ 115 분의 소결 조건에서는 양쪽 모두 충분한 소결이 진행되어 소결밀도에 차이가 없는 것으로 판단된다. 그러나 차 후 연구에서는 소결온도나 시간을 낮추어서 수행 한다면 최종 소결체의 밀도에서 차이를 나타낼 수 있을 것으로 기대된다. 냉간성형체와 비교한 소결체의 수축률은 자기펄스 압축성형장치로 성형한 경우 약 2~4%를 나타난 반면에 일반공정을 이용한 경우는 약 14%의 수축률을 나타냈다. 이와 같은 이유는 자기펄스 압축성형장치의 매우 높은 압력은 분말간의 치밀화를 극대화시켜 소결과정에서 수축률이 감소하였기 때문이며, 특히, 압축방향으로의 수축률은 거의 변화가 없었다. 이처럼 자기펄스 압축성형장치를 이용하여 수축률을 기존 공정과 비교하여 낮출 수 있다는 것은 최종제품의 치수정밀도를 높이는데 매우 긍정적인 결과라고 할 수 있다.

그림 5는 원료 분말인 Co 분말과 소결과정에서 상변화 또는 산화물 형성 여부를 알아보기 위하여 소결체의 X-선 회절분석 결과를 보여주고 있다. 원료인 Co 분말의 분석 결과에서는 Co 피크만 관찰되었으

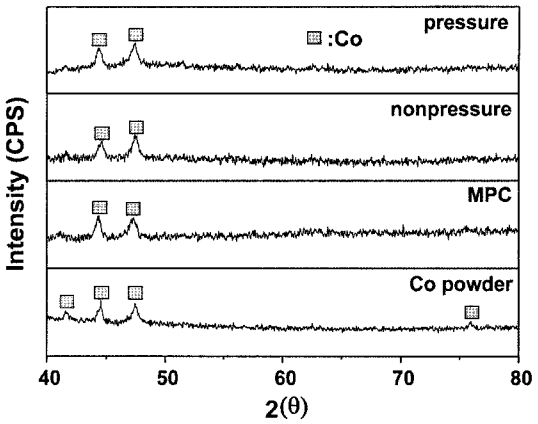

Fig. 5. XRD traces of Co powder and sintered bulks.

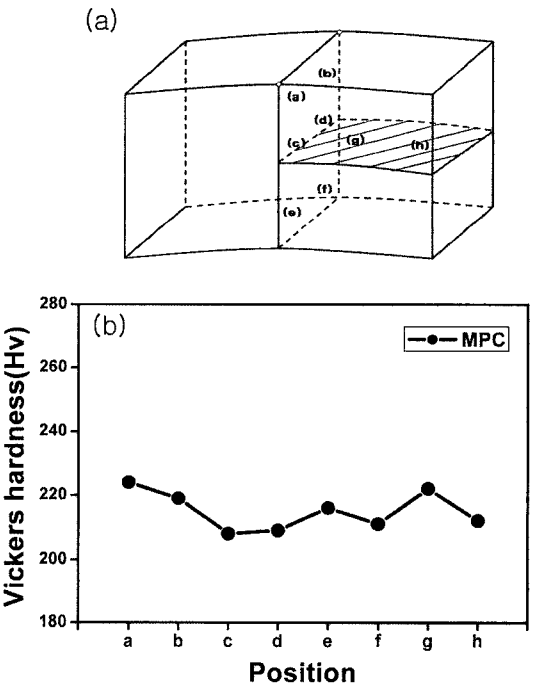

Fig. 6. Vickers hardness of sintered bulk with indented positions; (a) Schematic view of sintered body and (b) Vickers hardness

며, 각각의 공정으로 제조된 소결체에서도 다른 산화물이나 불순물의 피크는 관찰되지 않았다. 일반적으로 분말 성형체의 밀도분포를 알아보기 위해서는 간단한 방법으로 경도분석을 통하여 균질성 여부를 평가한다. 이에 본 연구에서도 최종 소결체(세그먼트)의 위치에 따른 경도를 측정하여 그 결과를 그림 6에 나타냈다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 소결체

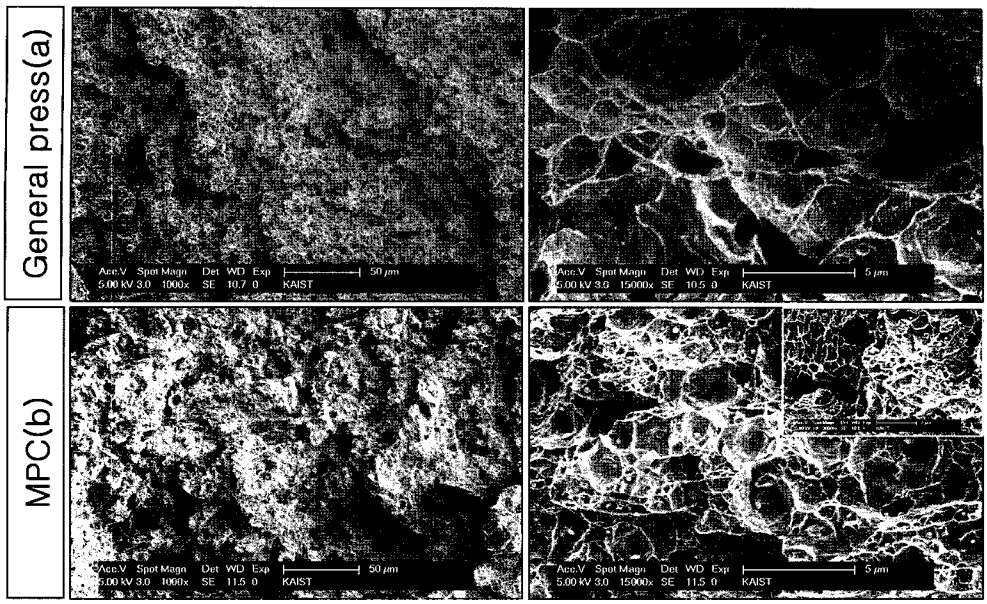

Fig. 7. SEM micrographs of the fracture surfaces of sintered bulks (a) fabricated by general process and (b) fabricated by MPC.

의 수직 부분(a, b, c, d, e, f)과 수평 부분(c, d, g, h)에서 경도 값이 큰 차이 없이 균일한 경도분포를 나타냈다. 자기펄스 압축성형장치로 성형된 재료는 높은 성형 압력 때문에 소결체의 위치에 따른 밀도 변화가 작아서 균일한 경도 값을 나타낸 것으로 판단된다. 이처럼 소결체의 균일한 경도 분포는 코어드릴의 석재 천공 과정에서 균일한 응력과 마모를 받기 때문에 제품의 특성 개선에 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

그림 7은 일반공정과 MPC 공정으로 제조된 소결체의 파단면을 SEM으로 관찰한 것으로 두 재료 모두 연성파괴 모드를 보여주고 있다. 그러나 MPC 공정으로 제조된 소결체가 일반 공정으로 제조된 소결체에 비하여 많은 dimple 들이 관찰되었으며, 광학현미경으로 측정할 수 없었던 입자의 크기도 예측할 수 있었다. MPC 공정으로 제조된 소결체는 일반 공정보다 결정립의 크기가 작으며 많은 dimple 들이 관찰되었다. 또한, 고배율 사진에서 볼 수 있는 것과 같이 MPC 공정에서 더 많은 연성파괴 모드를 관찰할 수 있다. 또한, 일부 완전히 소결되지 않은 미세한 분말들이 양쪽 공정에서 관찰되었다.

본 연구에서는 위의 연구결과에서 나타낸 것과 같이 자기펄스 압축성형장치를 이용하여 냉간성형 후 소결된 소결체의 기계적 강도가 양호하여, 소결된 세그먼트를 천공용 코어드릴에 용접한 후 철근이 포함된 콘크리트를 이용하여 천공시험을 수행하였다. 그림 8(a)는 자기펄스 압축성형장치로 성형된 소결체를 레이저 용접으로 코어 드릴에 부착한 사진으로서 총 12의 세그먼트를 접합하여 그림 8(b)에서 볼 수 있는 것과 같이 철근이 포함된 콘크리트를 12개 천공하여 코어드릴의 천공속도 및 세그먼트의 마모에 대한 실험을 수행하였다. 그림 8(c)는 천공시험 후 천공된 콘크리트의 형상을 나타내고 있다.

위에서와 같이 본 연구에서 제조된 세그먼트와 일반 공정으로 제조된 세그먼트를 이용하여 천공시험을 한 결과를 표 1에 나타냈으며, 결과에서 볼 수 있는 것과 같이 똑 같은 실험조건에서 자기펄스 압축성형장치로 성형한 세그먼트가 일반공정으로 제조된 시편 보다 더 빠른 천공속도와 긴 수명을 나타냈다. 이와 같은 결과는 MPC 공정으로 성형된 세그먼트를 이용하면 세그먼트 전체에서 균일한 경도 분포와 우수한 내마모 특성으로 짧은 시간에 더 많은 콘크리트를 천공할 수 있다는 결과를 나타내고 있다.

그림 9는 자기펄스 압축성형장치로 성형된 세그먼트를 이용하여 콘크리트 천공시험을 하고 난 후 소결체의 표면을 분석한 주사전자현미경 사진이다. 그

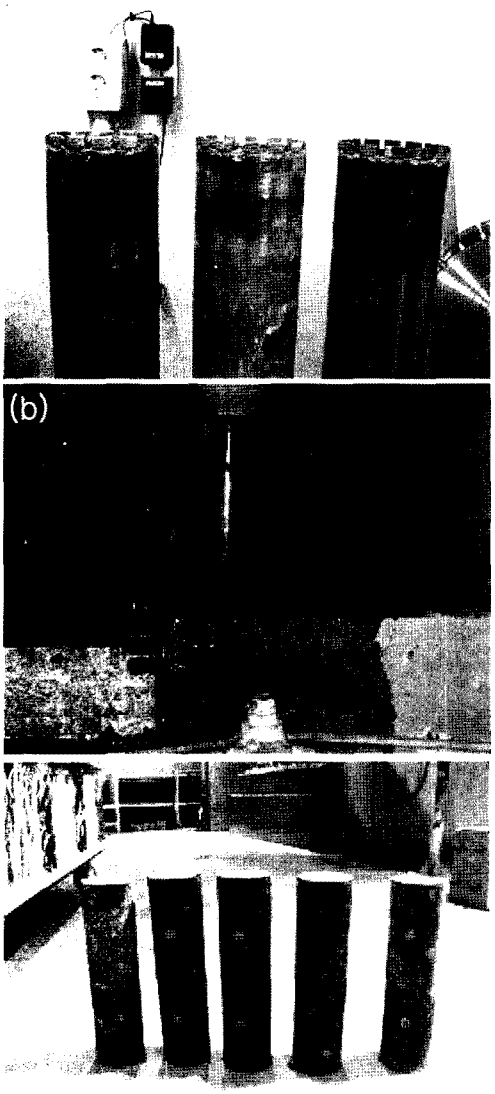

Fig. 8. Penetration testing of sintered bulks fabricated by MPC processing; (a) welded segment, (b) penetrating of concrete, (c) penetrated concretes

림에서 볼 수 있는 것과 같이 다이아몬드가 균일하게 분포하고 있으며, 기지재료는 다이아몬드를 따라 길게 연마된 트랙(화살표)을 나타내고 있다. 또한, 연마된 트랙의 길이를 측정하여 마모도를 나타나기도 하지만 본 연구에서는 정확한 값을 얻기가 어려웠다. 높은 연마에너지에 의하여 다이아몬드가 갈려나가거나(a) 연마에 의하여 일부 다이아몬드가 파괴되는(b) 것을 관찰 할 수 있다. 그림 10은 일반프레스로 성

Table 1. Drilling speed and life time of the segments fabricated by MPC and general process

Experimental conditions	Tool life (m)	Drilling speed (cm/min)
General press	7.96	11.71
MPC	6.55	9.61

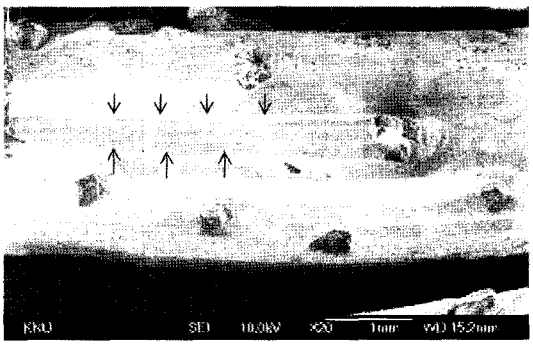

Fig. 9. Worn surface of the sintered segment after penetration testing.

형된 시편으로써 코발트 기지와 다이아몬드가 강한 결합을 이루고 있음에도 강한 전단응력에 의하여 다이아몬드의 일부가 파괴되어 크랙(그림 10(a))을 형성하고, 크랙을 형성한 다이아몬드는 계속적인 응력에 의하여 빠져나가 (그림 10(b))서 기지금속에 분산(그림 10(c))된 현상을 나타내고 있다. MPC 공정으로 성형된 소결체에서는 이와 같은 현상들이 일반 공정에 비하여 적게 나타났다. 이처럼 다이아몬드 금속결합체의 특성은 일차적으로 다이아몬드의 크기와 형태 그리고 함유량에 의존되며 연마성능은 다이아몬드의 집중도가 높아질수록 높아져서 그 연마조건에 따라 최대의 성능을 찾아내는 것이 중요하다. 또한, 다이아몬드 금속결합체 세그먼트의 마모기구는 복잡하고, 매우 강한 마모도를 나타내기 때문에 이들 재료의 정확한 마모실험이 어렵다. 이에 본 연구에서는 앞으로 이들 재료의 마모기구에 대한 좀더 깊은 연구를 수행할 예정이다.

4. 결 론

본 연구에서는 신성형공정인 자기펄스 압축성형장치를 이용하여 천공드릴용 세그먼트 재료인 코발트와 다이아몬드 혼합분말을 냉간성형한 후 소결한 소

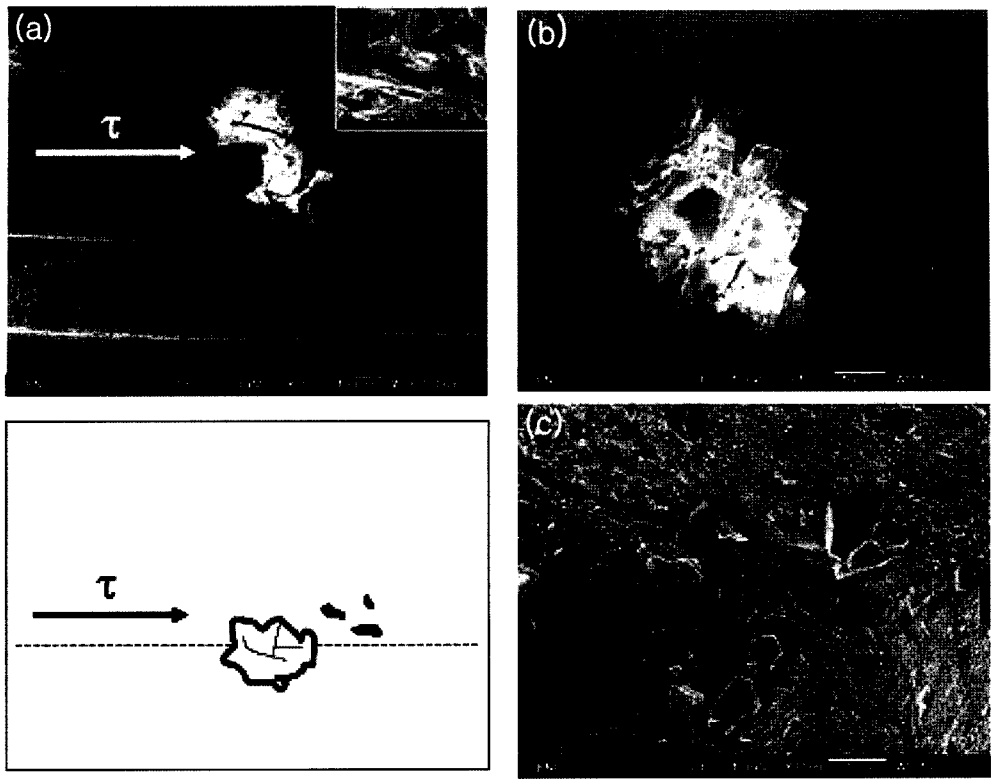

Fig. 10. Worn surface showing the fracture mode of diamond after penetration testing. cracking of diamond, (b) evolution of cracked surface of diamond and (c) diamond bits in the matrix

결체의 특성 평가 및 천공시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

1. 자기펄스 압축성형장치를 이용한 코발트와 다이아몬드 혼합분말의 성형성 평가에서는 1.2GPa 의 압력으로 성형된 소결체에서는 표면 크랙이나 결함을 관찰할 수 없었으나, 1.2 GPa 이상의 압력에서는 표면에 크랙이 형성되었다.

2. 자기펄스 압축성형장치로 성형된 소결체는 97% 이상의 최종 소결 밀도를 나타냈으며, 수축률은 2-4%로 기존 공정 보다 7배 낮은 수축률을 나타냈다. 소결체의 경도는 Hv 220으로 소결체 전체에서 균일한 분포를 나타냈다.

3. 자기펄스 압축성형장치로 성형된 시편은 기존 공정으로 제조된 시편 보다 천공속도가 빠르고, 마모율이 낮게(tool life가 크게) 나타났다.

4. 이상과 같은 연구결과를 정리하면 자기펄스 압축성형기술은 기존 유압 성형 방식의 한계성과 다이아몬드공구의 특성에 의해 얻을 수 없는 높은 성형밀도와 균일한 성형체를 얻을 수 있었다.

감사의 글

"본 연구는 산업자원부의 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환인 '차세대소재성형기술개발사업단'의 연구비 지원으로 수행되었습니다." 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Ralf Riedel Handbook of Ceramic Hard Materials Wiley-VCH New-York, 527-549.
[2] V. Blank, M. Popov and G. Piovarov: Dianmond Realt. Mater., **8** (1999) 1531.
[3] H. W. Lee: Doctor Thesis, Hongik University, Seoul, Korea (2003).
[4] D. Dwan: Mater. Sci. Tech., **40** (1998) 225.
[5] G. H. Lee and C. K. Rhee: J. Kor. Inst. Met. & Mater., **9(4)** (2003) 425.
[6] B. H. Rabin, G. E. Korth and R. L. Willianson: J. Am.

Ceram. Soc., **73** (19990) 2156.
[7] J. K. Lee, S. J. Hong, M. K. Lee and C. K. Rhee: J. Korean Powder Metall. Inst., **12(5)** (2005) 345. (*Korean*)
[8] R. C. Kang, M. K. Lee, W. W. Kim, C. K. Rhee and S. J. Hong: J. Korean Powder Metall. Inst., **15(1)** (2008) 37. (*Korean*)
[9] H. W. Lee, J. H. Lee, H. W. Jun and H. Moon: J. Kor. Ceram. Soc., **37(2000)** 1072 (*Korean*).