

## 비정질/다이아몬드 복합재료에서 상분율과 비정질-다이아몬드 입자 크기 비가 성형특성에 미치는 영향

신수민 · 김택수\* · 강승구<sup>a</sup> · 김정곤<sup>b</sup>

한국생산기술연구원, <sup>a</sup>신한다이아몬드 공업(주), <sup>b</sup>시립인천전문대학

### Effects of Phase Fraction and Metallic Glass-Diamond Size Ratio on the Densification of Metallic Glass/Diamond Composite

Sumin Shin, Taek-Soo Kim\*, Seung-Koo Kang<sup>a</sup> and Jeong Gon Kim<sup>b</sup>

Korea Institute of Industrial Technology Songdo-dong, Incheon 406-840, Korea

<sup>a</sup>Shinhan Diamond Industrial Co., Ltd., Songdo-dong, Incheon 406-850, Korea

<sup>b</sup>Incheon City College, Dowha-dong, Incheon 402-750, Korea

(Received March 3, 2009; Revised March 31, 2009; Accepted April 6, 2009)

**Abstract** In the present study, Zr-base metallic glass(MG)/diamond composites are fabricated using a combination of gas-atomization and spark plasma sintering (SPS). The densification behaviors of mixtures of soft MG and hard diamond powders during consolidation process are investigated. The influence of mixture characteristics on the densification is discussed and several mechanism explaining the influence of diamond particles on consolidation behaviour are proposed. The experimental results show that consolidation is enhanced with increasing diamond/Metallic Glass(MG) size ratio, while the diamond fraction is fixed.

**Keywords** : Metallic glass, Diamond, Composite, Densification behavior, Diamond tool

## 1. 서 론

다이아몬드공구(diamond tool)는 제트 엔진, 자동차, 전자 부품 등의 정밀 기계공구를 비롯하여 치과 및 의료용 그리고 건설 석재 공구용에 이르기 까지 다양한 산업 분야에서 여러 가지 용도로 사용되고 있다. 이러한 다이아몬드공구는 피삭재를 자르거나 연마하는 다이아몬드와 그리고 다이아몬드가 쉽게 탈락되지 못하도록 잡아주는 역할을 하는 본드로 구성되어 있다. 다이아몬드공구의 기지로 주로 사용되는 금속 본드는 다른 결합제와 비교해서 다이아몬드를 보유하여 지탱하는 능력 및 본드의 강도 그리고 내마모성이 우수하다. 이러한 이유로 금속기지 다이아몬드공구는 profile 가공 등의 공구의 형상 유지력이 요구되는 분야와 전해연삭, 통전복합연삭 등의 금

속 본드의 도전성을 이용한 가공분야에 사용되며 컴퓨터 및 핸드폰 단말기의 액정유리 연삭 등에 많이 사용되고 있다. 뿐만 아니라 목공기공용 톱날, 초경, 자동차부품 등 그 사용범위가 확대되고 있는 추세이다[1]. 본 연구에서는 다이아몬드공구의 수명 향상 및 적용 범위를 확대하기 위해 기존의 Cu-Sn, Fe-Co, Co 등의 금속 기지 보다 기계적 특성, 내마모 및 내식성 등의 특성이 우수하다고 보고되는 비정질(metallic glass)합금을 다이아몬드공구의 기지 소재로서 이용하였다[2]. 기계적 특성 및 외부 환경에 대한 저항성이 우수한 비정질 합금을 다이아몬드공구의 기지 재료로서 적용하게 될 경우 다이아몬드공구의 특성 향상에 큰 영향을 미칠 것이라 판단되며, 또한 이러한 비정질 기지 다이아몬드 복합재료에 관한 연구가 계속적으로 진행되고 있다[3, 4].

\*Corresponding Author : [Tel : +82-32-850-0409; E-mail : tskim@kitech.re.kr]

분말 야금법(P/M)에 의한 벌크 비정질/다이아몬드 복합재료 제조는 시편의 크기나 형상에 제한을 받을 뿐만 아니라 제 2상의 종류에 따라서 그 특성 제어 가 용이한 장점이 있어 산업적으로 응용 가능성이 매우 높다. 비정질 분말은 일반적으로 과냉각액상영역(supercooling liquid region;  $T_g$ )에서 가압하여 성형을 실시하는데, 이는 비정질 합금이 이 온도 구간에서 초소성 변형을 나타내기 때문이다. 그러므로 P/M 공정을 이용함으로써 비교적 낮은 온도에서 진밀도에 가까운 벌크 비정질 합금을 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 연구팀에서는 이전 연구에서 급속가열/냉각이 가능한 방전플라즈마소결(Spark Plasma Sintering; SPS)을 이용하여 성형 공정 중 비정질의 결정상의 생성을 억제하여, 초기 비정질 합금의 특성 변화 없이 그대로 유지된 기계적 특성이 우수한 비정질/다이아몬드 복합재료 제조를 성공적으로 수행하였다<sup>3)</sup>. 그래서 본 연구에서는 사전의 연구 수행결과를 바탕으로 비정질/다이아몬드 복합재료를 SPS 공정을 이용하여 제조하였다.

한편, 다이아몬드의 크기 및 분율은 다이아몬드공구의 적용분야를 결정하는 중요한 인자이다. 예를 들어, 석재 건설용 공구에는 주로 100~1000  $\mu\text{m}$  크기의 다이아몬드가 약 10~30 vol.%가 포함되어 있는 것을 이용하지만, 전자부품의 초정밀/초미세 가공에 사용되는 PCD(polycrystalline diamond)는 약 0.1~10  $\mu\text{m}$ 의 크기의 다이아몬드가 최대 ~90 vol.%이상 함유되어 있다. 따라서 다이아몬드공구의 다이아몬드 분율 및 크기에 따라서 다이아몬드공구를 제조하는 공정은 크게 고상소결과 액상소결로 나뉘며, 상대적으로 다이아몬드 분율이 높은 PCD의 경우에는 주로 액상 가압 소결을 이용하여 제조된다. 하지만 다이아몬드공구 제조를 위한 액상소결 공정은 높은 온도에서 공정이 실시되기 때문에 다이아몬드의 탄화(carbonization) 반응을 억제하기 위해 높은 성형 압력을 필요로 하며 상대적으로 낮은 생산성 등의 단점이 있다. 뿐만 아니라, 공정의 냉각속도가 느리기 때문에 비정질 합금의 결정화를 유발할 수 있으므로 비정질 기지를 이용한 다이아몬드공구 제조에는 적합하지 않다. 한편, 고상소결의 경우 비정질/다이아몬드 복합재료의 성형공정의 과냉각액상 온도영역에서 초소성 거동을 보이는 비정질 입자와 상대적으로 경한 다이아몬드 입자는 서로 다른 치밀화 거동을 나

타낸다. 일반적으로 치밀화 공정에서 변형이 되지 않는 경한 재료의 분율이 높아질수록 복합재료의 성형성은 감소되기 때문에 고상소결을 이용한 다이아몬드의 함유량이 약 50 vol.% 이상인 고분율 다이아몬드공구 제조 방법은 보고되지 않고 있다.

그래서 본 연구에는 비정질/다이아몬드 복합분말의 각 상 분율 및 크기 비(size ratio)에 따른 비정질/다이아몬드 복합재료의 벌크화 거동에 관한 연구 수행을 통하여, 향후 초정밀/고기능성 공구로서 적용 가능한 고분율(다이아몬드 분율 : 약 70 vol.% 이상) 다이아몬드 복합재료를 고상 소결공정으로 제조하기 위한 방안을 제시하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 가스아토타미저 공정으로 제조된  $\text{Zr}_{65}\text{Al}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{15}$  조성의 비정질 분말을 비정질/다이아몬드 복합재료의 기지로 사용하였다. 비정질 분말의 제조 공정과 비정질/다이아몬드 성형 공정에 관한 실험 방법은 Ref. 3에 보다 자세하게 나타내었다. 가스 분무를 통해 제조된 Zr계 비정질 분말과 다이아몬드 분말을 여러 가지 부피비로 각각 혼합하였다. 두 분말의 균일한 혼합을 위하여 분말과 볼의 비를 10:1로 장입하여 20 rpm으로 5시간 turbular 혼합기로 혼합을 실시하였다. 사용된 다이아몬드 분말의 입도는 1-3  $\mu\text{m}$ , 15-25  $\mu\text{m}$ , 100-130  $\mu\text{m}$  3종류였으며, 비정질 분말의 입도는 10-32  $\mu\text{m}$ , 63-90  $\mu\text{m}$ 인 것을 이용하였다. 성형 후 비정질/다이아몬드 복합재료의 밀도는 아르키메데스 원리(archimedeian principle)를 이용하여 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

복합재료의 성형공정(consolidation)에서 혼합분말을 구성하고 있는 각 분말의 변수(parameter) 즉, 분말 크기, 분율, 형상 및 강도 등은 성형체의 최종 특성에 큰 영향을 미치는 요소이다. 본 연구에서는 다이아몬드공구에 있어서 절삭 및 연마 효율이 극대화될 수 있는 다이아몬드 분율이 높은 비정질/다이아몬드 복합재료를 제조하기 위해, 비정질/다이아몬드 복합재료의 각 분말의 분율 및 비정질과 다이아몬드 입자 크기에 따른 복합재료의 벌크화 거동을 관찰 하

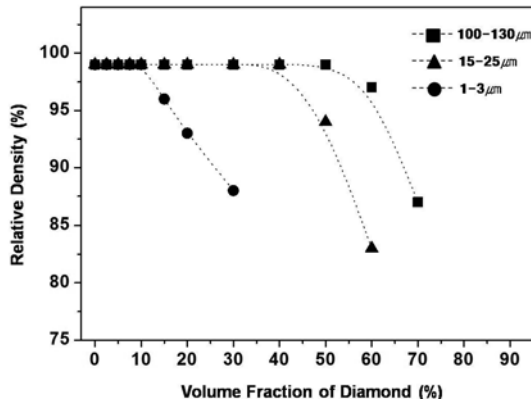


Fig. 1. Relative densities of MG/Diamond composites with various volume fraction and size distributions of diamond particle.

였다. 그림 1은 SPS 공정을 이용하여 성형한 복합재료의 다이아몬드 부피 분율-성형체의 상대 밀도(relative density) 곡선을 다이아몬드 입자 크기에 따라 각각 나타내었다. 비정질 분말의 입도 분포는 약 63-90 μm인 것을 이용하였다. 그림에 나타난 바와 같이 복합재료의 다이아몬드 분율이 일정한 부피 비(1-3 μm: 10 vol.%, 15-25 μm: 40 vol.%, 100-130 μm: 50 vol.%) 이상이 되면 복합재료의 상대밀도가 감소되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 상대적으로 난소결성 재료인 다이아몬드의 부피 분율의 증가에 기인한다고 할 수 있으며, 다이아몬드 분율은 비정질/다이아몬드 복합재료의 소결특성에 큰 영향을 미치는 요소라는 것을 알 수 있다.

일반적으로 복합재료의 성형공정에서 다이아몬드와 같이 변형이 일어나지 않는 경한(hard) 재료가 존재할 경우 치밀화 과정에 다음과 같은 영향을 미치게 된다[5].

- 1) 변형이 되지 않는 경한 재료는 조밀화에 기여하지 않으며, 그러므로 연한 지지 재료(matrix-비정질)는 기공을 채우기 위한 많은 변형이 요구된다.
- 2) 다이아몬드 입자들 사이에 발생한 기공들은 쉽게 제거되지 않으며 폐 기공(closed pore)일 경우 제거가 불가능하다.
- 3) 외부에서 가해주는 압력은 다이아몬드 입자들의 재배열에 소모되며, 이로 인해 지지 재료에 가해지는 실질적인 압력은 감소한다.

그러므로 복합재료의 다이아몬드 분율이 증가하게

되면 다이아몬드 입자 사이에서 기공(porosity)이 발생하게 되고, 이를 제거하기 위해서는 연한 지지인 비정질 분말의 보다 많은 변형이 요구지만 제한적인 요소에 의해 지속적인 치밀화 과정의 한계에 도달하게 된다. 이러한 현상으로 인해 복합재료 내에 기공은 제거되지 못하고 잔류하게 되며, 다이아몬드의 부피 분율이 증가할수록 복합재료의 성형 밀도는 감소하게 되는 결과가 나타나게 된다.

그림 2는 입도 분포가 1-3 μm인 다이아몬드 입자가 약 15 vol.% 함유된 비정질/다이아몬드 복합재료 소결체의 미세조직을 나타낸 결과이다. 그림에 나타난 것과 같이 성형체의 상대밀도가 약 94%인 복합재료의 미세조직은 비정질 분말의 계면에 다이아몬드 입자가 고르게 분포된 영역(b: A 영역)과 다이아몬드 입자들이 비정질 분말 계면에 고르게 분포되지 못하고 군집체(cluster)를 이루고 있는 영역(c: B 영역)이 각각 공존한다는 것을 알 수 있다. 상대적으로 다이아몬드 입자가 고르게 분포된 영역에는 다이아몬드-비정질, 비정질-비정질 분말 간의 결합이 대부분 형성되어 있으며, 분말간의 계면은 치밀화 과정이 완전히 진행된 것으로 보인다. 하지만 그림 2(c)에서는 비정질 분말 사이에 다이아몬드 입자들이 뭉쳐지는 현상(aggregation)이 발생한다는 것을 알 수 있다. 이러한 영역에서는 다이아몬드-다이아몬드 입자간의 결합이 주류를 이루게 되며, 다이아몬드 입자의 불완전한 치밀화로 인하여 성형 공정 후 이들 사이에는 기공들이 제거 되지 못하고 잔류하게 된다는 것을 예측 할 수 있다. 그러므로 다이아몬드 입자의 뭉침 현상은 비정질/다이아몬드 복합재료의 성형 밀도에 큰 영향을 미치게 되며, 다이아몬드 분율이 증가 할수록 다이아몬드 입자의 aggregation은 보다 많은 지역에서 넓게 분포하게 되며, 이로 인 기공 또한 증가될 것이라고 사료된다.

비정질/다이아몬드 복합재료의 상 분율에 따른 성형성에 대한 고찰을 위해 그림 3에 복합재료의 다이아몬드 분율에 따른 비정질/다이아몬드 복합분말 치밀화 과정에서 혼합 분말의 배열상태(arrangement)를 도식화하여 나타내었다[6]. 다이아몬드 분율이 상대적으로 적은 경우(isolated diamond) 대부분의 다이아몬드 입자들은 비정질 입자 사이에 고르게 분포하게 되며, 복합분말의 치밀화 과정에 큰 영향을 미치지 않는다(그림 3a). 하지만, 복합재료의 다이아

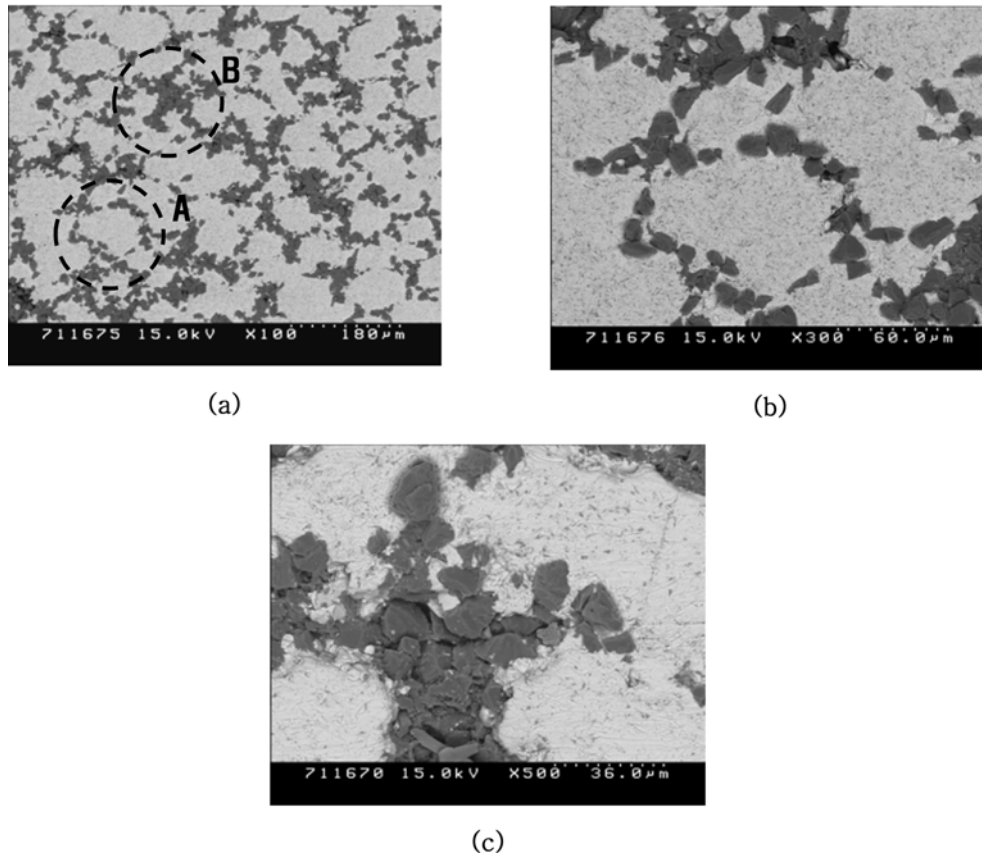


Fig. 2. BSE microstructure of the composites containing 15 vol.%(a) diamonds with 1-3 $\mu$ m size distribution; (b) and (c) highly magnified microstructure is marked A and B respectively.

몬드 분율이 증가하게 됨으로서 고르게 분산된 후 잉여의 다이아몬드 입자들이 비정질 분말 사이에 뭉쳐지는 현상(aggregate)이 발생하게 된다는 것을 알 수 있다(그림 3b). 이로 인해 미세 기공들이 다이아몬드 입자 사이에 발생하게 되며, 이 기공들이 제거되기 위해서는 비정질 기지의 보다 더 큰 변형(heavy deformation)이 필요하게 되므로 성형 공정에서 보다 많은 성형 시간과 높은 압력이 요구되게 된다. 그러므로 복합재료에서 다이아몬드 분율이 높아질수록 계속해서 잔류 기공이 증가하게 된다. 이렇게 복합재료에서 다이아몬드 입자의 뭉침 현상이 발생될 경우에는 비정질/다이아몬드 복합재료의 완전히 치밀화된 성형체를 얻기가 어렵게 되어 성형체 밀도를 감소시키는 결과를 초래하게 될 뿐만 아니라 향후 복합재료의 특성에도 큰 영향을 미치게 된다.

또한, 복합재료의 다이아몬드가 상당히 높은 비율로 존재하게 되면 다이아몬드 입자들이 네트워크를 형성하게 되어 비정질 분말이 다이아몬드 입자들 사이에 고립되게 되는 현상(percolation)이 생기게 된다(그림 3c). 다이아몬드 분율이 적은 경우, 연한 지지(matrix-비정질)의 변형에 의해 치밀화 과정이 일어나지만 비정질 분율에 비해 다이아몬드의 분율이 매우 높을 경우에는 오히려 다이아몬드 입자가 지지(matrix)가 되게 되며, 성형체의 치밀화는 거의 불가능하게 되는 것이다. 뿐만 아니라 외부에서 가해지는 압력은 연한(soft)입자의 변형에 사용되어 지는 것이 아니라 다이아몬드 입자의 재배열과 그리고 경한 기지의 변형과 분쇄(fragmentation)에 대부분 이용되고 보고되고 있다[6]. 그러므로 비정질/다이아몬드 복합재료에서 비정질 입자의 'percolation' 현상이 발생하게 되면 성형체의 소결은 불가능해진다.

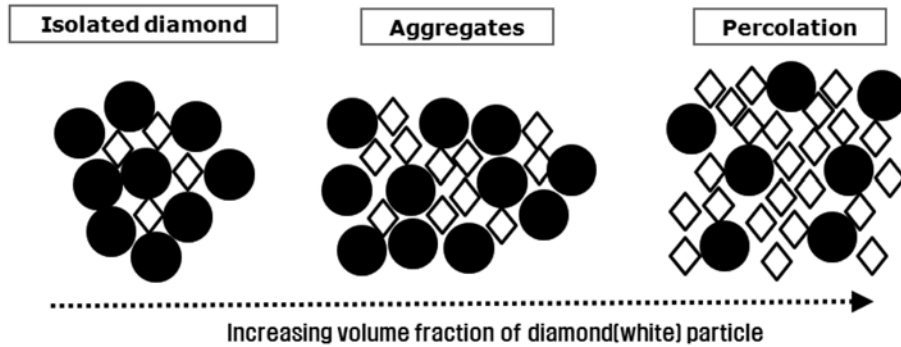


Fig. 3. Schematic microstructure of powder mixtures according phase fraction [6].

혼합 분말을 이용한 복합재료의 소결에서 경한 입자와 연한 입자의 입도 비는 소결 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[7]. 그림 1에서 다이아몬드 입자 크기가 1-3  $\mu\text{m}$  인 경우 성형체의 상대 밀도가 감소되는 다이아몬드의 한계 분율(threshold fraction)은 약 10%로 나타났으며, 반면에 15-25  $\mu\text{m}$ , 100-130  $\mu\text{m}$ 의 경우에는 각각 40%, 55%의 다이아몬드 분율에서 성형체의 밀도가 감소되는 것으로 관찰 되었다. 이러한 결과는 다이아몬드의 크기가 상대적으로 비정질 분말에 비해 작을수록 성형이 가능한 다이아몬드 한계 분율이 감소된다는 것을 알 수 있다. 다시 말해, 다이아몬드/비정질 크기 비(size ratio)가 증가될수록 다이아몬드 분율이 높은 비정질/다이아몬드 복합재료 제조가 가능하다는 결과를 나타낸다.

비정질과 다이아몬드 분말의 크기 비가 비정질/다이아몬드 복합재료의 성형특성에 미치는 영향에 대한 고찰을 위해 그림 4에 비정질 입도 분포가 10-32  $\mu\text{m}$ , 63-90  $\mu\text{m}$ 인 비정질/다이아몬드 복합재료의 상대밀도와 비커스 경도에 관한 결과를 나타내었다. 또한 각각의 복합재료의 미세조직 사진을 그림 5에 나타내었다. 복합재료에 사용된 다이아몬드의 입도분포는 15-25  $\mu\text{m}$ 이며, 약 60 vol.%의 부피 분율을 포함한 성형체를 제조하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이 비정질의 입도 분포가 작을수록 다시 말해, 다이아몬드/비정질 분말의 크기 비가 증가할수록(약 0.25에서 약 1.1로 증가) 성형체의 상대 밀도가 높다는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 복합재료의 기계적 특성과 내마모 특성에 큰 영향을 미치는 성형체의 경도 역시 높은 결과를 나타내었다. 이는 그림 5(a)에

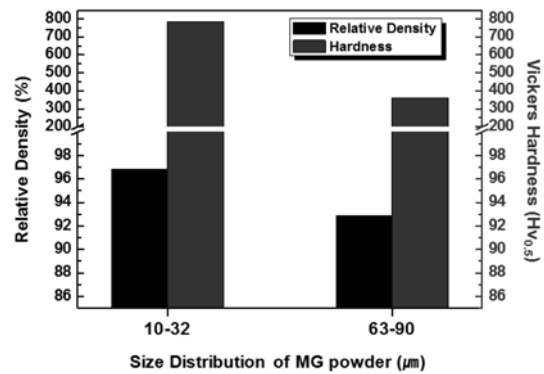


Fig. 4. Relative densities and hardness of the composites (containing 60 vol.% diamond) with the size distribution of metallic glass powder.

나타난 바와 같이 상대적으로 고 분율 다이아몬드 복합재료에서 입자 크기 비가 작은 경우(약 0.25) 미세 조직이 ‘percolation’ 형태(그림 3 참조)로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 하지만 크기 비가 큰 경우(약 1.1-그림 5b)에는 비정질 입자의 표면적 증가로 인해 다이아몬드 입자들의 뭉침 현상(aggregation)이나 ‘percolation’ 현상이 나타나지 않고 대부분이 비정질 분말 사이에 고립된 형태(isolated diamond-그림 3a)로 나타난다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 비정질/다이아몬드 복합 분말에서는 분말의 배열(arrangement)에 따라 비정질-비정질, 비정질-다이아몬드, 다이아몬드-다이아몬드 3종류의 결합 형태가 존재하게 된다. 성형 공정에서 상대적으로 비정질-비정질 결합이나 비정질-다이아몬드 결합은 치밀화 과정이 용이하지만, 다이아몬드-다이아몬드 결합은 다이아몬드가 변형을 수반하지 못함으로 계면

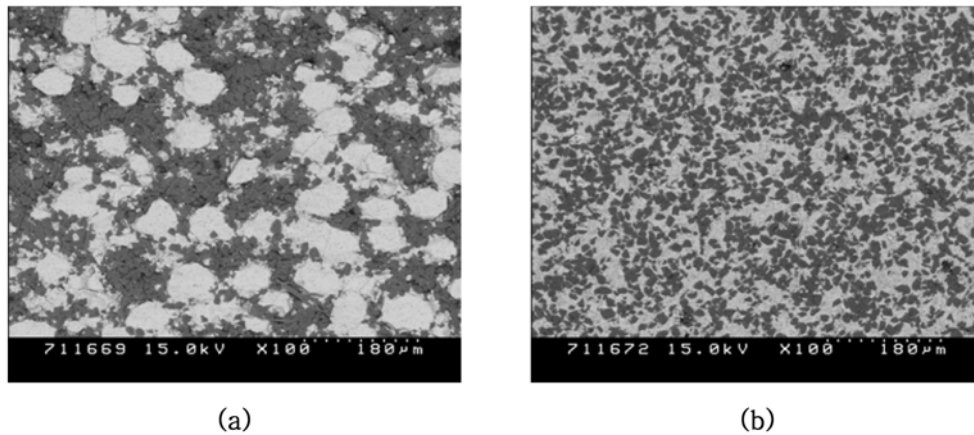


Fig. 5. Microstructure of the composites (containing 60 vol.% diamond having a 15-25  $\mu\text{m}$  size distribution) with the size distribution of metallic glass powder; (a) 63-90  $\mu\text{m}$  and (b) 10-32  $\mu\text{m}$ .

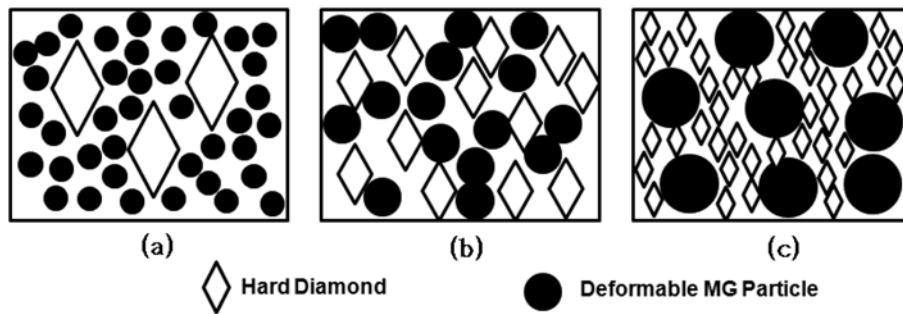


Fig. 6. Schematic drawing of packing arrangements of powder composite with different diamond size. (a) larger diamond particles, (b) similar sized diamond particles and (c) smaller diamond particles [8].

에서의 결합은 발생하지 않을 뿐만 아니라, 군집체 (cluster)를 이루거나 네트워크 형성 그리고 기공의 shielding 역할을 함으로써 치밀화를 방해하게 된다. 그림 6은 일정한 다이아몬드 분율에서 다이아몬드 입자 크기에 따른 분말의 배열 상태를 도식화 하여 나타낸 그림이다[8]. 그림 6(a)에 나타난 바와 같이 다이아몬드 입자의 크기가 상대적으로 비정질 분말에 비해 클 경우에 분말 배열은 비정질-비정질간의 결합이 주류를 이루게 되며, 다이아몬드 입자들 사이의 결합은 제한적이게 된다. 그러므로 성형 공정 중 치밀화 공정은 빠르고, 낮은 응력에서 용이하게 발생하게 된다. 반면, 그림 6(c)와 같이 다이아몬드 크기가 비정질에 비해 매우 작은 경우에는 비정질 입자 사이에 다이아몬드 입자들이 채우게 되며, 대부분의 결합 형태는 다이아몬드-다이아몬드로 구성되게 됨으로써 치밀화가 감소되게 된다. 그러므로 구성하는 각

분말들의 상 분율이 일정하더라도 분말의 크기 비에 따라 혼합분말의 배열 상태가 달라질 수 있으며, 성형체의 상대밀도에 큰 영향을 미치는 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 다시 말해, 비정질/다이아몬드 크기 비는 비정질/다이아몬드 복합분말의 벌크화 거동에 큰 영향을 미치게 되며, 다이아몬드의 부피 분율이 증가 할수록 크기 비의 영향이 보다 더 증가 될 것이라 예상된다.

이미 언급한 바와 같이 비정질/다이아몬드 복합재료에서 각 분말의 분율과 크기 비는 성형공정에서 분말 배열상태에 큰 영향을 미치게 되며, 그 결과는 성형체의 밀도로 귀결된다. 본 연구에서는 복합재료의 상 분율과 각 분말의 크기 비의 상관 관계에 관한 결과를 나타내었다. 그림 7은 비정질/다이아몬드 복합재료의 성형공정에서 다이아몬드/비정질 크기 비에 따른 복합재료의 'percolation' 한계 다이아몬드 분율

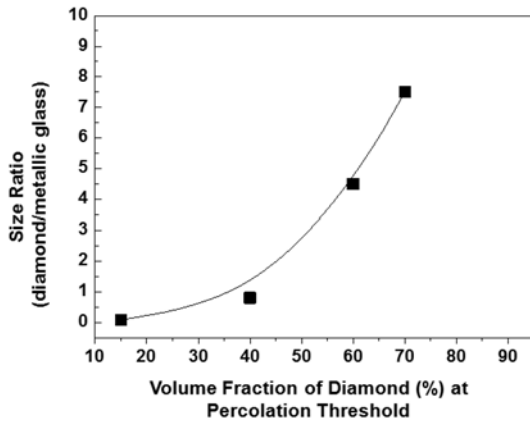


Fig. 7. Volume fraction of diamonds at percolation threshold as a function of size ratio, obtained from experimental results.

에 관한 결과를 그림 1의 결과를 이용하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 비정질/다이아몬드 복합재료를 완전히 치밀화 시키기 위해서는 다이아몬드 분율이 증가 할수록 다이아몬드/비정질 크기 비가 증가해야 된다. 즉, 70 vol.% 다이아몬드를 함유한 복합재료를 제조하기 위해서는 다이아몬드 입자 크기가 비정질 분말보다 적어도 7배 이상은 되어야만 성형이 가능하다는 결과를 실험적으로 보여준다. 그러므로 다이아몬드 분율이 높은 비정질/다이아몬드 복합재료를 제조하기 위해서는 다이아몬드 입자에 비해 미세한 비정질 분말이 요구된다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 가스아토마이저 공정에 의해 제조

된  $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$  조성의 비정질 분말을 이용하여 SPS 공정을 이용하여 비정질/다이아몬드 복합재료를 제조하였다. 또한 비정질/다이아몬드 복합분말의 분율 및 크기 비가 복합재료 벌크화 거동에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과 다이아몬드 분율이 증가 할수록 비정질/다이아몬드 복합재료의 성형 밀도는 감소되었으며, 다이아몬드 입도가 작을수록 일정한 다이아몬드 분율에서 복합재료의 성형 밀도가 낮게 나타났다. 뿐만 아니라, 다이아몬드 입도와 비정질 입도에 따른 성형 밀도 변화를 관찰한 결과 다이아몬드/비정질 크기 비가 증가 될수록 비정질/다이아몬드 복합재료의 성형성이 향상되었으며, 고분율(70 vol.% 이상)다이아몬드 복합재료를 제조하기 위해서는 다이아몬드/비정질 입도 비가 약 7 이상이 되어야 된다는 결론을 도출하였다.

#### 참고문헌

- [1] P. Buzdon and H. P. Suer: Ind. Diamond Rev., **48** (1988) 73.
- [2] M. Tokita: Mater. Sci. Forum, **83** (1999) 308.
- [3] S. Shin, M. S. Song and T. S. Kim: Mater. Sci. & Eng. A, **499** (2009) 525.
- [4] M. E. Siegrist, D. P. Steinlin and J. F. Löffler: Mater. Sci. & Eng. A, **447** (2007) 298.
- [5] G. Jiang, W. Wu, G. S. Daehn and R. H. Wagoner: Acta Mater., **48** (2000) 4331.
- [6] D. Bouvard, Powder Technology, **111** (2000) 231.
- [7] C. D. Turner, M. F. Ashby: Acta Metallurgica, **p44** (1996) 4521.
- [8] B. N. Singh: Powder Metall, **14** (1971) 277.