

|||||||  
論 文  
|||||||

원심분사주조법에 의한 Cu-X(=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,W)<sub>p</sub> 복합재료의 미세조직 및 복합화

배차현 · 정해용

Compositing Modes and Microstructures of Cu-X(=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,W)<sub>p</sub> Composite  
by Centrifugal Spray-Cast Deposition

Cha-Hurn Bae, Hae-Yong Jeong

Abstract

Particle reinforced metal matrix composites(MMCs) via a centrifugal spray-cast deposition(CSD) process were fabricated by injecting second phase particles(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><40 μm, W<17.3 μm) into copper melt on the atomizing disc. Compositing modes were investigated by combining microstructures and mathematical modeling between Cu droplets and the reinforced particles injected. The Cu/W<sub>p</sub> powders were shown that the W particles penetrate and get embedded in the Cu droplets. It is considered that the W particles composite preferentially in Cu melt on the atomizing disc. On the other hand, the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles did not penetrate into the Cu droplets on the atomizing disc but get attached in surface of Cu droplets during the flight. It is considered that the compositing may be attained in the flight distance which the relative velocity between Cu droplet and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle is maximum. The microstructure of the Cu/W<sub>p</sub> and the Cu/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>p</sub> composite preform was strongly influenced by compositing modes of droplets, and after subsequent deposition it was comprised as it is called the dispersed type and the cell type of microstructure, respectively. (Received July 24, 1997)

1. 서 론

분사주조법은 Singer[1]에 의하여 스트립(strip) 제조 방법으로 기본개념이 제시되고, 공정개발은 주로 Osprey Metals Ltd.에 의하여 추진되어 Osprey™ 프로세스[2]로 알려진 후 이에 대한 실용화의 연구가 활발히 추진되고 있다. 고압가스에 의한 가스분사 주조법과 기계적 원심력에 의한 원심분사 주조법으로 대별되는 분사주조법은 용융금속을 불활성 보호분위기하에서 분무화(atomization)하여 생성되는 미세한 액적(droplet)을 기판위에 고속으로 충돌시켜 매우 얇은 판상으로 적층하며, 후속하는 액적들의 적층에 이어 응고를 통하여 고밀도의 적층성형체를 형성하는 신소재 제조기술이다[3-5]. 이와 같은 공정상의 특성을 이용하여 분사주조법은 액적의 분사와 동시에 폭넓은 첨가분율로 제2상의 미세한 고상 강화입자를 분사[6]하여 줌으로서 제2상 강화입자가 중력편석 없이 시편 전면에 균일하게 분포된 near net shape(NNS)의 입자강화 복합재료를 제조[7]할 수 있으므로, 경제성과 생

산성 향상의 잠재력이 크기 때문에 새로운 입자강화 복합재료의 제조법으로 주목을 받고 있다.

따라서 본 연구에서는 금속기지에 제2상의 강화입자를 복합분사할 수 있는 원심분사 주조장치를 이용하여, Cu 기지에 제2상의 강화입자로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자 또는 W 입자가 복합분사주조된 금속기지 복합재료의 제조를 검토하였다. 이에 따라 분사공정 특성에 따른 Cu 액적의 응고 및 미세조직 등을 관찰하여 Cu 기지에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자 또는 W 입자가 강화되는 복합화 거동을 수학적 모델화와 조합하여 검토하였다.

2. 실험방법

전기동(>99.9%)을 유도용해로(3 kHz, 50 kW)에서 용해하여, 1250°C(또는 1183°C)로 승온한 후 인동(Cu-45%P)으로 탈산하고 진정한 용탕 5 kg을 Fig. 1과 같은 원심분사주조 장치에서 직경 3.5 mm의 노즐이 삽입된 흑연 도가니형 턴디시에 주입하여 2750 rpm으로 회전하고 있는 분사원반상(R50×t20 mm)에 자유낙하

부경대학교 공과대학 재료공학과(Dept. of Materials Eng., Pukyong National University)

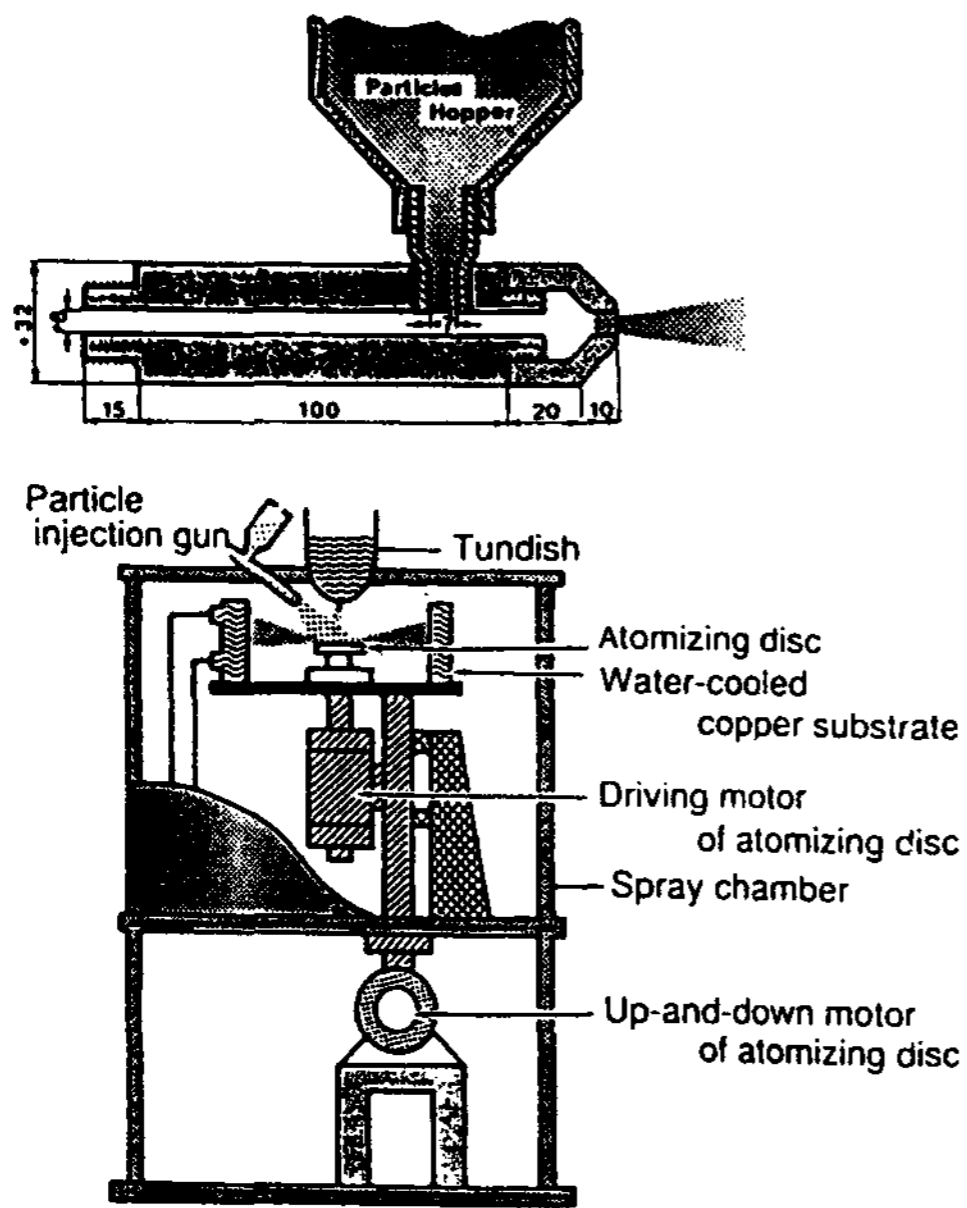


Fig. 1. Schematic illustration of the centrifugal spray-casting apparatus.

시켜 원심분사구조하였다. 이때 분사되는 미소 액적들의 산화를 억제하기 위하여 분사실내에 아르곤가스를 계속 취입하면서 Cu 용탕의 분사와 동시에 입자분사기를 사용하여 아르곤가스(2.0 kg/cm<sup>3</sup>)로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 W 입자를 각각 분사하였다. 강화입자로 사용된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 W 입자크기는 각각 <40 μm 및 <17.3 μm였다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 W 입자는 건조로에서 105±5°C, 1시간 건조한 후 실온으로 냉각시켜 체(sieve)로 해립하여 분사하였으며, 강화입자의 분사위치는 턴디시에서 자유낙하한 용탕류가 충돌하는 분사원반상의 중심으로 하였다.

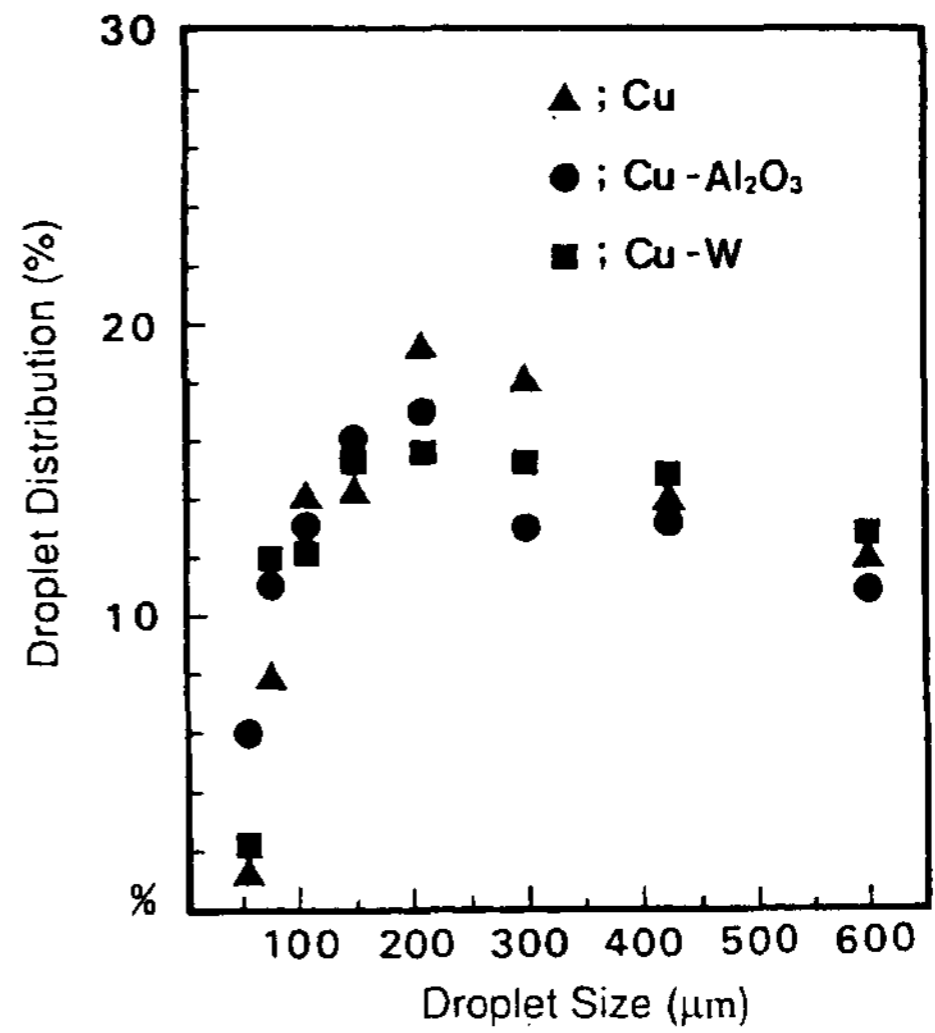


Fig. 2. Size distribution of Cu, Cu/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>p</sub> and Cu/W<sub>p</sub> droplet produced by CSD process.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 분말의 미세조직 및 강화입자의 복합화

Photo 1은 Cu의 단독분사와 그리고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자 또는 W 입자를 동시 분사하여 복합화된 상태로 채취된 각각의 분말상태를 나타내며, 이들 분말을 표준체로 분류한 결과 Fig. 2와 같이 직경이 100 μm 이상되는 분말이 약 90% 이상을 나타내었고, 특히 분말크기가 200~300 μm 범위인 분말의 분포가 30~40%를 나타내었다. 또한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자 및 W 입자가 동시 분사되어도 Cu의 단독분사시와 거의 유사한 분포를 나타내었다.

Photo 2(A), (B)는 Cu 용탕 및 강화입자를 동시 분사하여 채취한 Cu/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>p</sub> 복합분말 및 Cu/W<sub>p</sub> 복합분

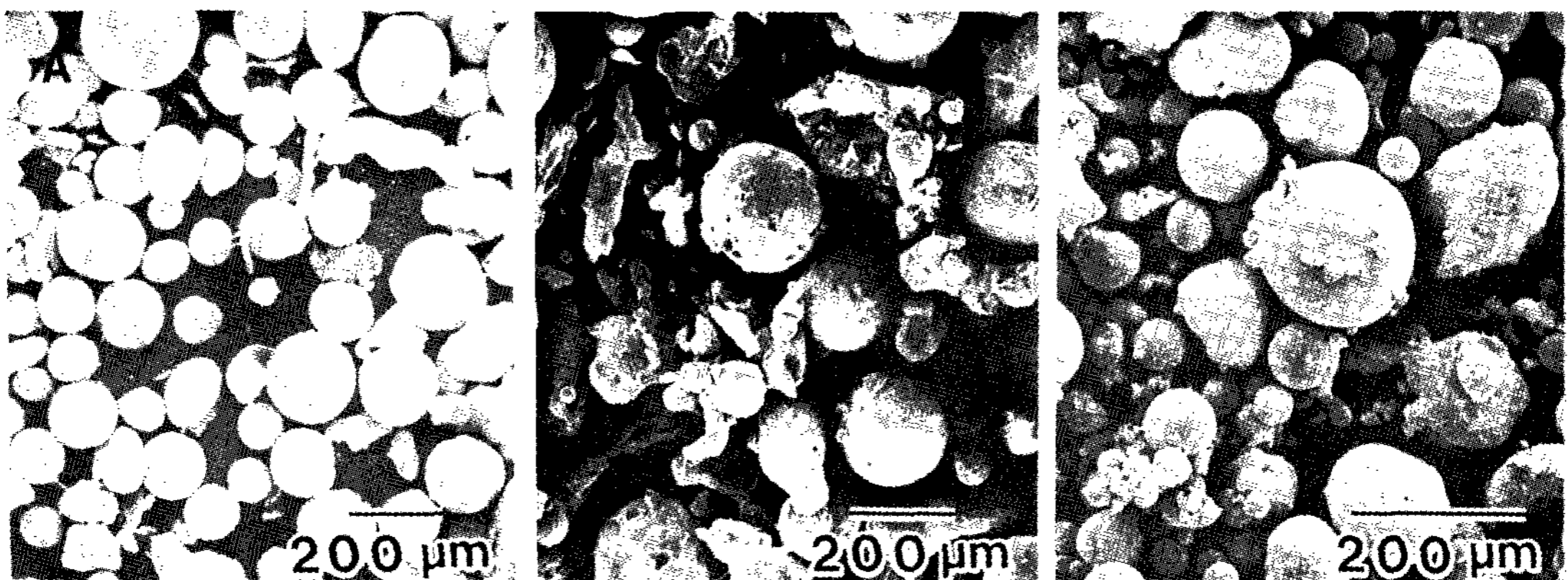


Photo 1. SEM views of (A) Cu, (B) Cu/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>p</sub> and (C) Cu/W<sub>p</sub> powders.

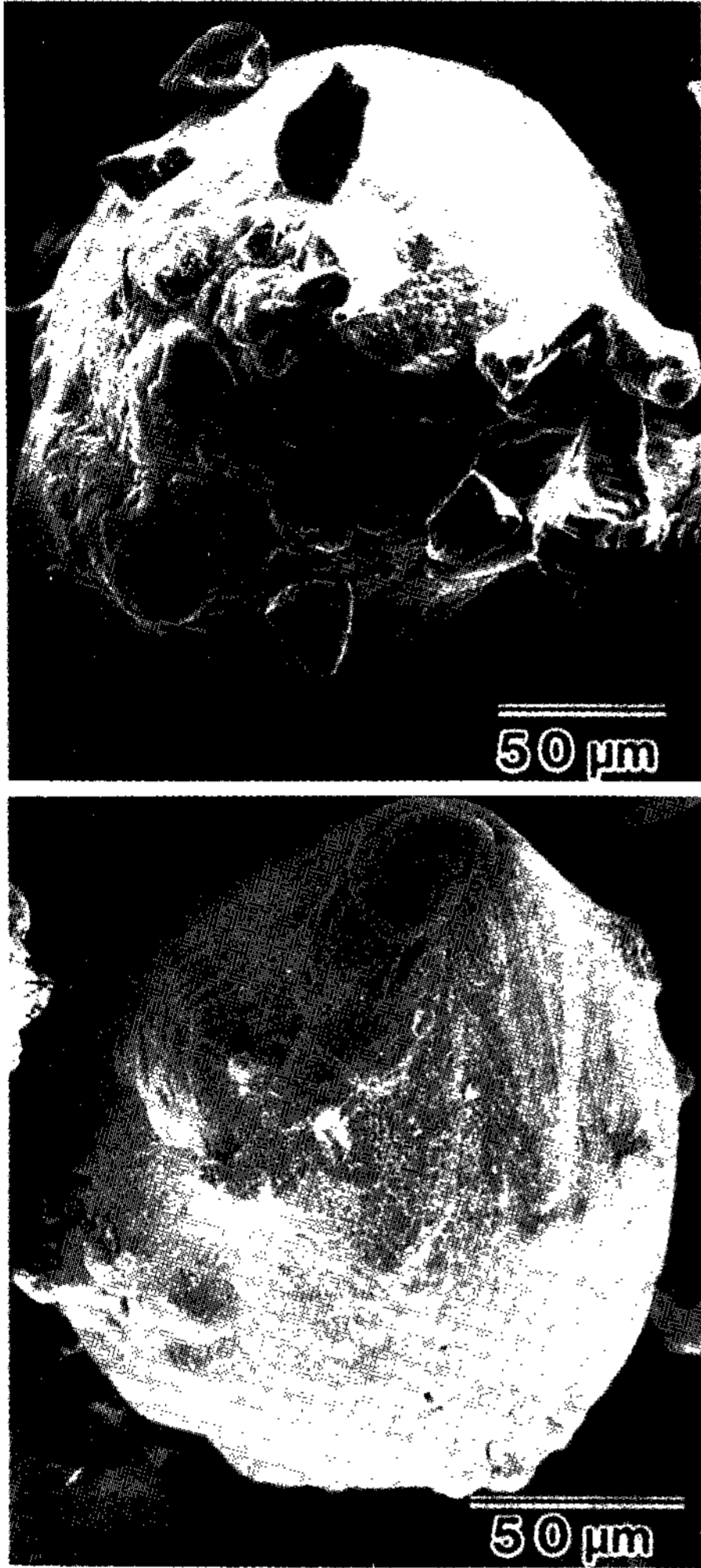


Photo 2. Surface morphologies of (A) (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>p</sub> attached droplet and (B) W<sub>p</sub> embedded droplet.

말의 형상을 관찰한 것이다. Photo 2(A)에서 알 수 있는 바와 같이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 분사된 경우 구형의 Cu 액적표면에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 부착된 형태를 뚜렷하게 보이고 있으나, Photo 2(B)에서 W 입자가 분사된 경우는 Photo 1(A)의 순Cu 분말의 매끄러운 표면상태와 비교에서 알 수 있는 바와 같이 Cu 액적속에 W 입자가 침투된 형태를 나타내고 있다.

분사원반상에서의 복합화는 분사원반상에 존재하는 액상의 표면장력과 분사되는 강화입자가 분사원반상에 충돌할 때의 힘과의 평형관계에서 우선 예측할 수 있다. 따라서 강화입자의 분사속도는 분사가스의 속도와 같다고 가정할 때 분사원반상의 액상에 충돌

하는 강화입자의 힘은 다음과 같이 정리된다.

$$F = P_e A_e + mg / \cos \theta \quad (1)$$

여기서 P<sub>e</sub>: 노즐출구에서의 압력,  
A<sub>e</sub>: 노즐출구의 단면적,  
g: 중력가속도,  
θ: 강화입자의 입사각

(1)식을 이용하여 분사원반상의 액상에 충돌하는 강화입자의 힘을 계산한 결과 약 13.9N으로, 이 값은 Cu액상의 용융온도에서의 표면장력(1.285 N/m)[8] 보다 약 10.8배 정도 더 큰 값으로 노즐출구에서의 강화입자의 마찰 손실을 고려한다 하여도 Cu 액상의 표면장력을 극복하기에는 충분한 것으로 여겨진다. 이것은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자나 W 입자 모두 분사원반상에서 Cu 액상속으로 침투가능함을 의미한다. 그러나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자의 밀도(3960 kg/m<sup>3</sup>)는 액상 Cu의 밀도(8000 kg/m<sup>3</sup>)보다 2배 이상 작기 때문에 분사원반상에서 밀도 차이에 의한 부상이 예상되나, W 입자의 밀도(19300 kg/m<sup>3</sup>)는 액상 Cu의 밀도보다 2배 이상 크기 때문에 분사원반상의 Cu 액상중에 침투된 상태로 존재할 가능성이 크다. 따라서 분사원반상에서 부력에 의하여 부상이 예상되는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자는 W 입자의 경우보다 분사원반상에서 복합화가 용이하지 않을 것으로 판단된다.

분사원반상에 접촉하고 있는 반구형 액적의 단면적에 작용하는 계면에너지와 분사원반의 원심력과 평형이 깨질 때 액적이 비행하기 시작하는 것으로 가정하면 다음과 같이 주어진다.

$$A\gamma_v = mV^2/R \quad (2)$$

여기서 A: 액적의 단면적  
γ<sub>v</sub>: 액적의 계면에너지(= 1.285 N/m at 1083°C)  
R: 분사원반의 반경(=50 mm)

그리고 액적의 비행에 대한 공기저항을 고려하면[9] 다음과 같다.

$$ma = F_{drag} (= A_c \rho_g V_f^2 C_D / 2) \quad (3)$$

여기서 A<sub>c</sub>: 액적의 단면적  
ρ<sub>g</sub>: 가스의 밀도(=1.2876 kg/m<sup>3</sup>)  
V<sub>f</sub>: 액적과 가스간의 상대 비행속도(V<sub>g</sub>-V<sub>d</sub>)  
C<sub>D</sub>: 항력계수(=0.28+6/Re<sup>1/2</sup>+21/Re)  
Re: Reynold's No.(=dV<sub>r</sub>/ν=d<sub>p</sub>V<sub>r</sub>/μ)

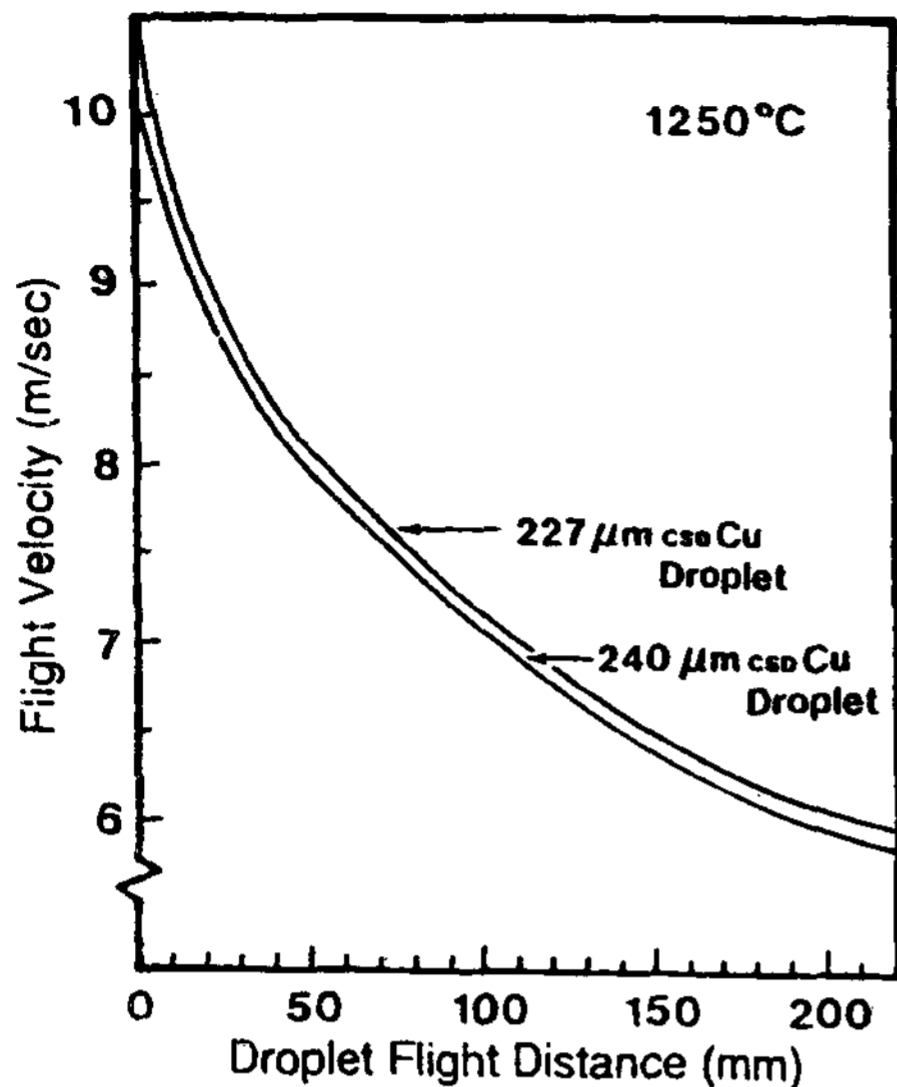


Fig. 3. Calculated Velocity for a Cu droplet with flight distance from atomizing disc rotated 2750 rpm in CSD process

상기 (2)식 및 (3)식을 정리하여 계산한 결과를 비행 거리에 따라 액적의 비행속도 변화로 나타낸 것이 Fig. 3이다. 분사원반의 회전속도를 2750 rpm으로 하여 계산한 200~300 μm 크기의 액적에 대응하는 초기 비행속도는 약 9~11 m/s 임을 알 수 있다

강화입자의 초기 비행속도는 분사원반의 원심력이 분사원반의 용탕에 낙하한 강화입자의 용탕과의 부착일(Work of Adhesion)을 극복할 때 강화입자는 분사원반을 이탈해 분사된다고 가정하여 이들 관계식을 나타내면 다음과 같다.

$$d \cdot W_{ad} = mV^2/R \tag{4}$$

여기서 d: 액적의 직경

$$W_{ad}: \text{부착일} [= \gamma_v(1 + \cos\theta)]$$

$\gamma_v$ : 표면에너지

$\theta$ : 접촉각

강화입자의 비행속도는 상기 (3)식과 (4)식을 정리하여 계산하였다. 입자크기가 40 μm인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자의 접촉각이 Cu의 용융온도에서 약 155°인 것을 감안하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자의 비행속도를 계산한 결과 약 1.73 m/s가 된다. 그리고 입자크기가 17.3 μm인 W입자의 접촉각을 45°로 하여 계산하면, W입자의 비행속도는 10.9 m/s이다. 따라서 크기가 227 μm인 Cu 액적의 초기 비행

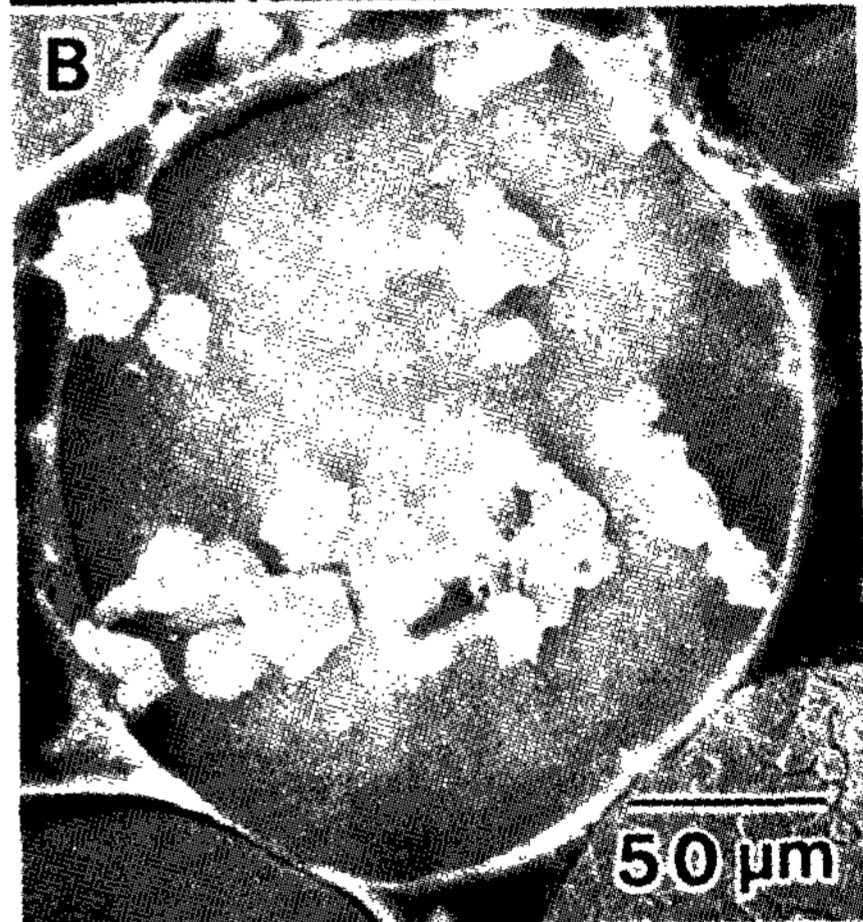
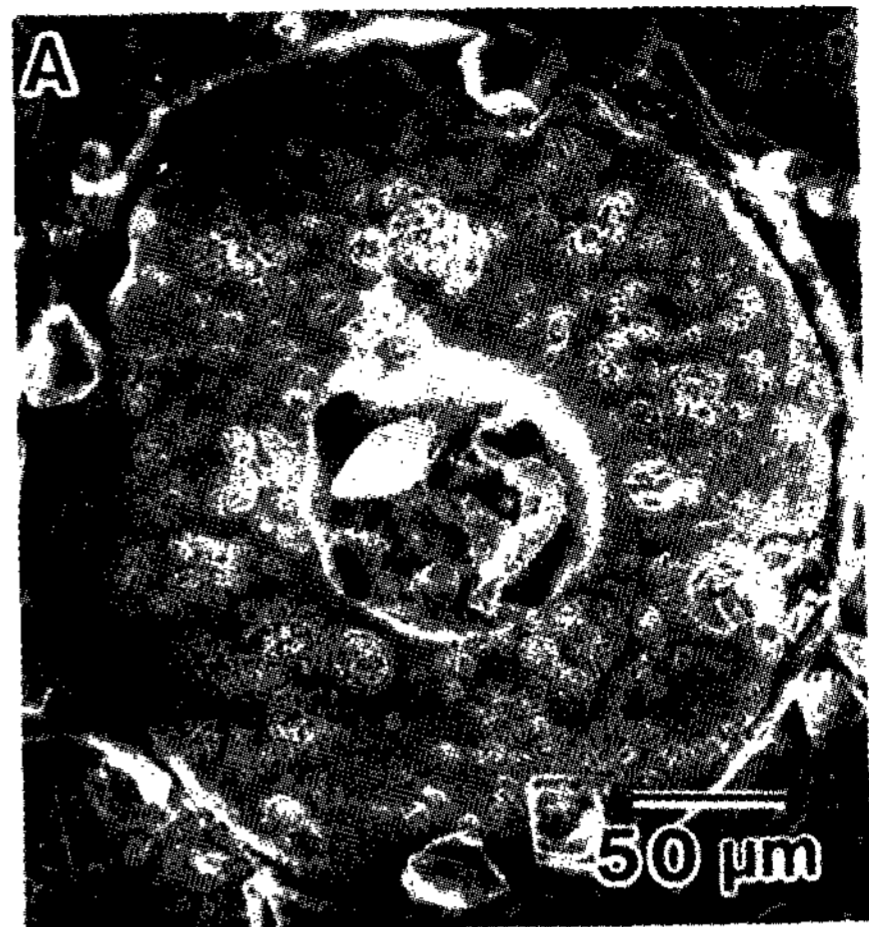


Photo 3. Microstructures of (A) (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>P</sub> attached droplet and (B) W<sub>p</sub> embedded droplet.

속도는 10.5 m/s이므로 크기가 40 μm인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자와의 상대 비행속도의 차이는 약 8.8 m/s이고, 크기가 17.3 μm인 W 입자와의 상대비행속도 차이는 0.4 m/s이다.

상기에서 고찰한 바와 같이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자는 비행중에 상대비행속도의 차이에 의해 복합화가 이루어지고, W입자는 분사원반상에서 우선적인 복합화가 이루어진 결과로 보여진다. 그러므로 Photo 2(A)와 같은 복합화 형태를 갖는 Cu/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>P</sub> 분말의 단면조직은 Photo 3(A)와 같이 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 액적표면에 부착되는 조직을 나타내고, Photo 2(B)와 같은 복합화 형태를 갖는 Cu/W<sub>p</sub> 분말의 단면조직은 Photo 3(B)와 같이 W 입자가 액적속에 침투된 조직에 대응하고 있음을 알 수 있다.

R. C. Ruhl[10]에 의하면 Biot number(=hd/k<sub>d</sub>)가 약

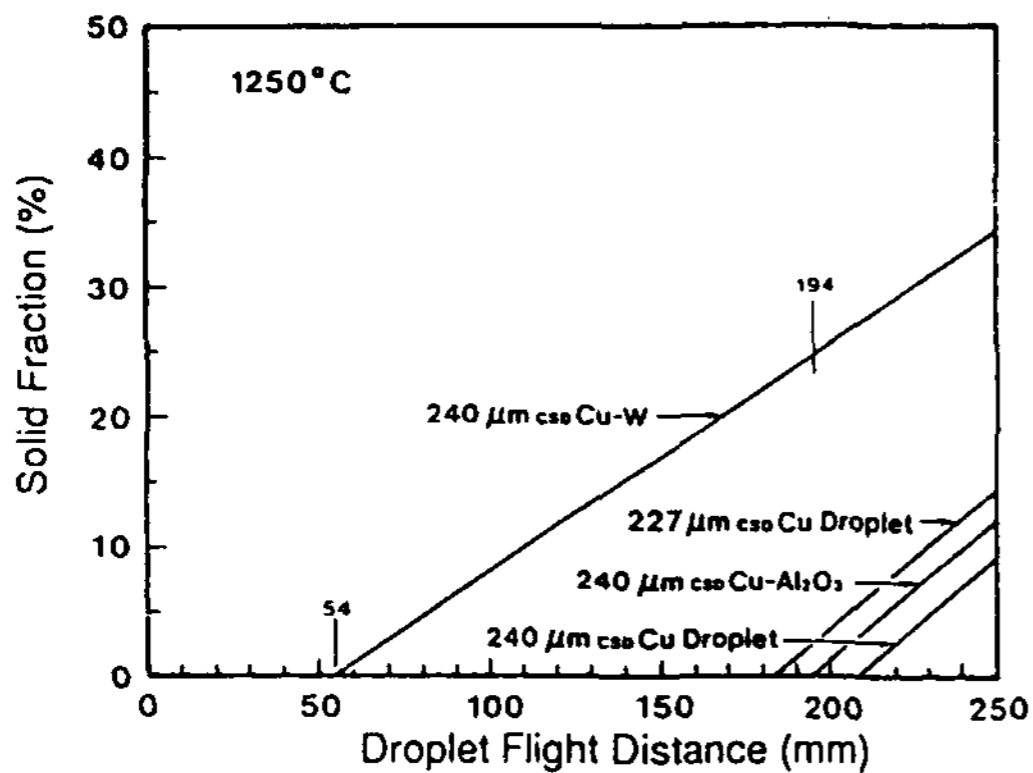


Fig. 4. Predicted solid fraction of Cu droplet with the flight distance sprayed at 1250°C.

0.01보다 작으면 액적과 주위가스간의 열전달은 계면 율속이 된다. 원심분사주조법으로 제조된 240 μm 액적의 Biot number는 약  $2.9 \times 10^{-4}$  정도이므로 열전달은 주위 공기와의 계면율속으로 이루어진다. 즉 크기가 240 μm인 액적의 열전달계수는 약  $2 \times 10^2 \text{ W/M}^2/\text{K}$  이고, Cu에 대한 열전도도(Kd)는 용융온도에서 대략  $1.6 \times 10^2 \text{ W/M/K}$ 이기 때문에  $Bi \approx 2.9 \times 10^{-4}$ 이다. 따라서 원심분사주조법으로 제조된 액적은 Newton 냉각 조건을 만족하게 되어 액적내부의 온도구배를 무시할 수 있다고 가정하였다. 이같은 가정으로 Cu 액적의 응고율은 다음 식을 이용하여 구하였다. 여기서 액적의 열전달계수(h)는 Ranz와 Marshall의 경험식[11]에 근거하였다.

$$dS_F/dt = 6h(T_d - T_g)/d\rho_d\Delta H_F \quad (5)$$

여기서 h: 액적의 열전달계수  $[=K_g(2.0+0.6Re^{0.5}Pr^{0.33})/d]$

$K_g$ : 가스의 열전도도

Re: Reynold's Number

Pr: Prandlt's Number

$\rho_d$ : 액적의 밀도( $\rho_{Cu}=8000 \text{ kg/m}^3$ )

$H_F$ : 액적의 용융잠열( $Cu=205.4 \text{ kJ/kg}$ )

$T_d, T_g$ : 액적 및 가스의 온도

dt: 액적이 단위구간을 비행하는 시간

dT: 액적의 온도강하

$dS_F$ : 액적의 고상율

Fig. 4는 (5)식을 이용하여 각각 1250°C에서 분사된 크기가 227 μm 및 240 μm인 Cu 액적의 비행거리에 따른 응고율 변화를 계산하여 나타낸 것이다. Fig. 4에

서 알 수 있는 바와 같이 227 μm 크기의 Cu 액적은 분사원반과 기판간의 거리인 194 mm에 도달할 때까지 충분한 액상율을 유지하고 있기 때문에 Cu 액적에 강화입자가 분사비행중 복합화될 가능성이 충분하다는 것을 알 수 있다. 한편 240 μm 크기의 Cu/W<sub>p</sub> 액적은 비행거리 55 mm에서 응고되기 시작하여 비행거리 194 mm에 이르면 응고율이 25%가 되었다. 따라서 복합화된 액적도 기판에 적층할 수 있는 충분한 액상율을 가지고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 액상율을 근거하여 강화입자의 복합화가 비행중은 물론 기판에 적층시에도 이루어질 가능성이 높음을 예상할 수 있다.

### 3.2 적층성형체의 미세조직 및 모델화

Photo 4(A), (B)는 각각 1183°C 및 1250°C에서 분사주조된 Cu 성형체의 미세조직을 나타낸다. Photo 4(A)는 1183°C에서 분사주조된 Cu 성형체의 미세조직을 나타내며, 분사된 미소액적이 비행하는 도중에

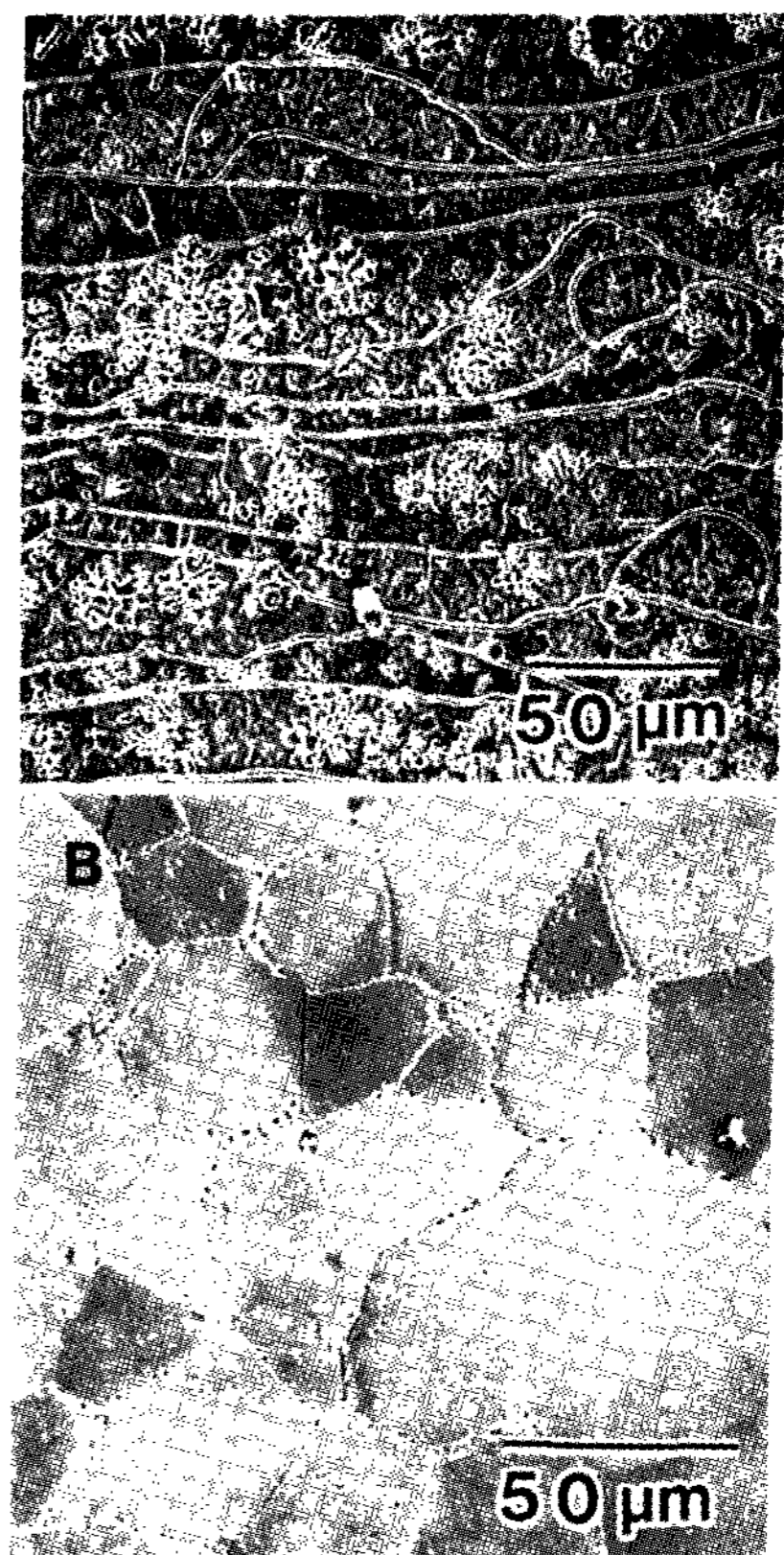


Photo 4. Microstructures of Cu preform sprayed at (A) 1183°C and (B) 1250°C, respectively.

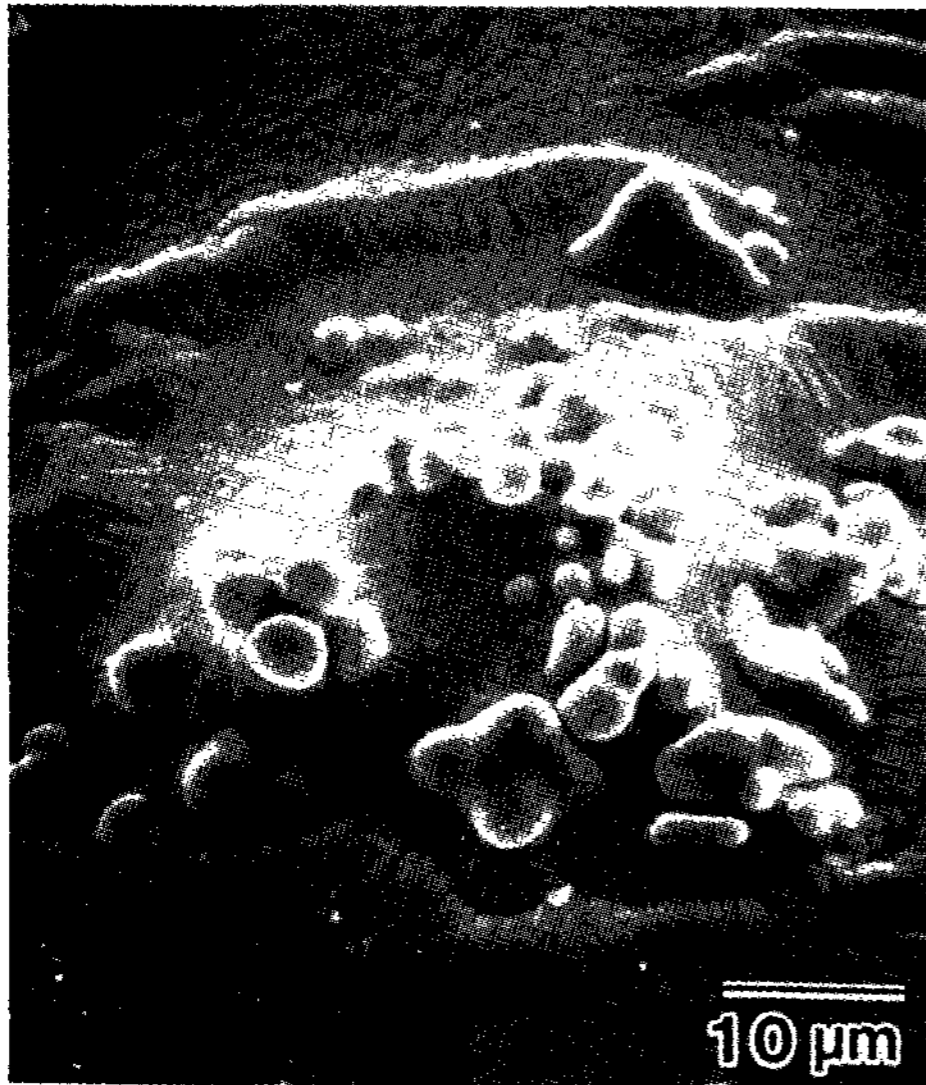


Photo 5. Fragmentation of dendrite structure in a partially solidified droplet during deposition.

부분적으로 응고가 진행된 액적들이 적층되면 나타날 수 있는 전형적인 분사적층조직을 보이면서 상당량의 수지상이 관찰되고 있다. 그리고 적층된 splat중에는 수지상이 생성되지 않은 splat도 관찰되고 있다. 그리고 Photo 4(B)는 1250°C에서 분사주조된 Cu 성형체의 미세조직을 나타낸다. 여기서 등축정의 전형적인 분사주조조직을 관찰할 수 있다. 이는 Fig. 4에서 비행중 액적의 온도강하 및 응고율 변화에서 알 수 있는 바와 같이 240 μm 크기의 Cu 액적이 194 mm에 도달할 때 액적은 완전한 액상으로 적층되었기 때문에 적층경계가 없는 등축정의 주조조직을 나타낸 것으로 판단된다. 또한 Photo 5는 1183°C에서 분사적층된 성형체의 상부 표면을 SEM으로 관찰한 것이다. 여기서 부분적으로 응고가 진행하고 있는 액적속의 수지상이 적층시에 파단되고 있음을 볼 수 있다. 만약 액적이 적층된 후에 고상이 생성된 것이라면 Photo 4(A)에서와 같은 조직이 되지 않고 모든 splat에서 수지상 조직이 관찰되어야 할 것이다.

Fig. 5는 1183°C에서 분사주조된 Cu 성형체의 적층 두께에 따른 기공율과 splat 두께변화를 나타낸 것으로, 성형체의 적층두께가 두꺼워질수록 기공율과 splat의 두께가 크게 변화했다. 적층성형체의 하부, 즉 기관의 냉각효과가 크게 작용하는 초기 적층부에서는 불규칙한 형상의 큰 기공(<200 μm)이 면적비로 13%

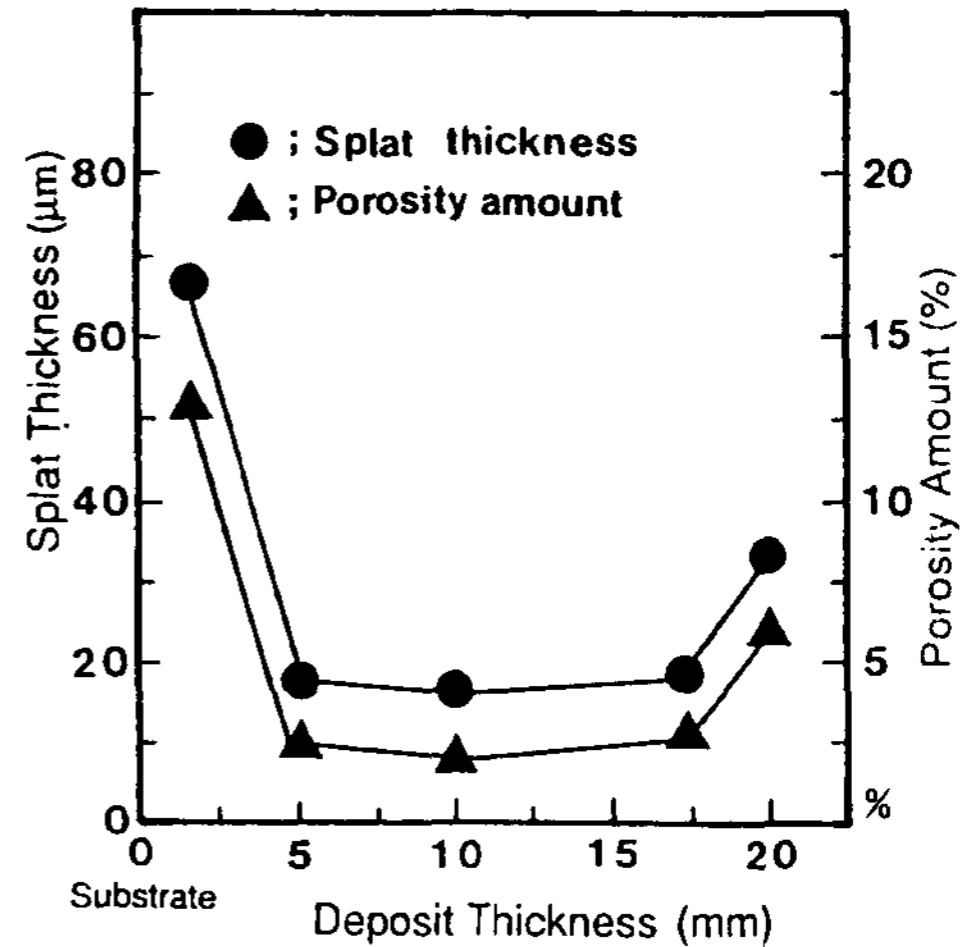


Fig. 5. The splat thickness and the porosity amount with the thickness of deposit sprayed at 1183°C.

정도 산재하고 있으며, splat의 평균두께는 약 67 μm 이었다. 그러나 적층두께가 2 mm 이상될 때 부터 기공율은 낮아지면서(<2.5%) 기공의 형상은 미소한 구형(<15 μm)으로 변화했으며, splat의 평균두께 역시 얇아졌다. 한편 분사말기에 적층된 성형체의 상부는 성형체의 중앙에 생긴 기공보다는 다소 큰 구형의 기공(<30 μm)이 6% 정도 관찰되면서 splat의 평균두께는 약 33 μm를 나타내었다. 여기서 기공의 형상, 크기 또는 기공율은 적층되고 있는 splat의 두께와 서로 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Photo 6(A), (B)는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자 또는 W 입자를 각각 동시 분사하였을 때 적층성형체의 초기 적층부의 단면조직을 나타낸다. Cu/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>p</sub> 성형체에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자는 splat 경계에 분포하는 조직을 나타낸 것은 분사원반상에서 독립적으로 분사된 Cu 액적과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 비행중의 상대적인 비행속도차로 Cu 액적표면에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 부착하여 복합된 후 연속적으로 적층된 결과라 볼 수 있다. Cu/W<sub>p</sub> 성형체에서 W 입자가 splat 내부에 분포하고 있는 조직을 보인 것은 분사원반상의 용탕속에 W 입자가 우선 복합된 후 W 입자가 복합된 액적이 연속적으로 적층된 결과라 볼 수 있다.

그런데 성형체의 미세조직에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자와 접촉하고 있는 splat의 기지조직은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자와 접촉하지 않는 기지조직과는 달리 국부적으로 급냉되었음을 볼 수 있다. 그러나 W 입자가 복합된 경우는 W 입자와 접촉한 기지나 W 입자가 접촉하고 있지 않는 기지조직 모두 조직적인 변화는 관찰되지 않았다. 이것은

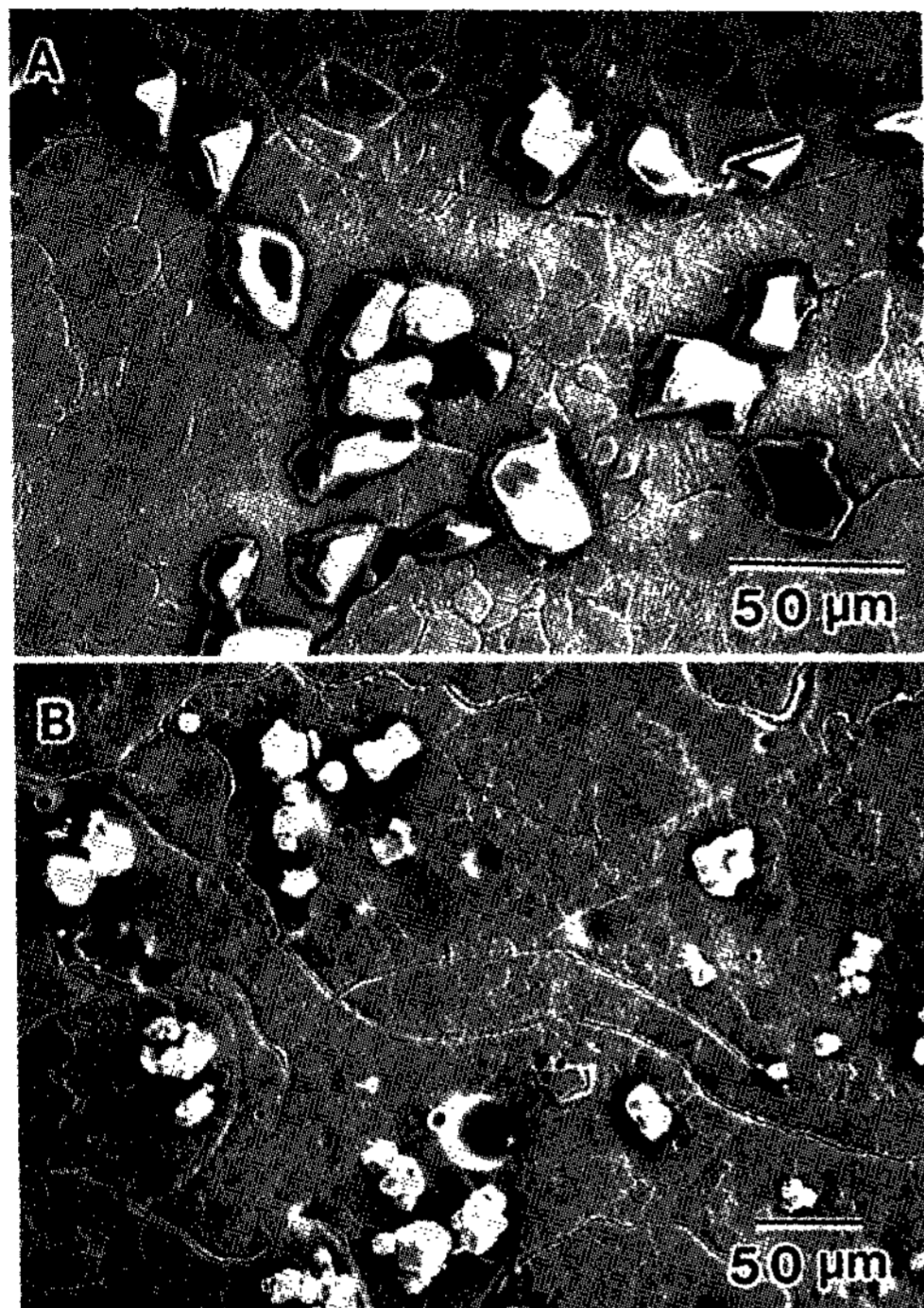


Photo 6. Microstructure of (A) Cu/( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )<sub>p</sub> and (B) Cu/W<sub>p</sub> preform sprayed at 1250°C.

1000°C에서  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자의 열전도도( $5.44 \text{ Jm}^{-1}\text{k}^{-1}$ )[12]는 W 입자의 열전도도( $111 \text{ Jm}^{-1}\text{k}^{-1}$ )보다 20배나 낮으면서,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자의 비열( $0.878 \text{ Jg}^{-1}\text{k}^{-1}$ )은 W 입자의 비열( $0.151 \text{ Jg}^{-1}\text{k}^{-1}$ )보다 무려 6배나 큰  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자가 Cu 액적표면에 돌출된 상태로 부착된 액적이 연속적으로 적층될 때,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자가 강력한 열소멸원(heat sink)으로 작용하였기 때문이고, W 입자는 분사원반상에서 우선적으로 복합된 후 적층되어 열소멸 효과를 거의 나타낼 수 없었기 때문인 것으로 여겨진다.

원심분사주조법에 의한 강화입자의 복합화는 분사 비행중 Cu 액적에 대한  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자의 표면부착특성과 분사원반상에서 W 입자의 침투특성으로 고찰되었다. 이상의 실험결과를 바탕으로 원심분사주조법에서  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자가 비행중에 Cu 액적에 부착하여 복합화되는 과정과 W 입자가 분사원반상에서 복합화되는 과정을 도식적으로 나타낸 것이 Fig. 6(A)이다. 이들 미세조직을 보면  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자는 Cu 액적의 표면에 부착하는 형식으로 복합화되고, W 입자는 Cu 액적의 내부에 침투하는 형식으로 복합화 됨을 알 수 있다. 이같은 각각의 복합화에 의하여 나타날 수 있는 Cu/( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )<sub>p</sub>

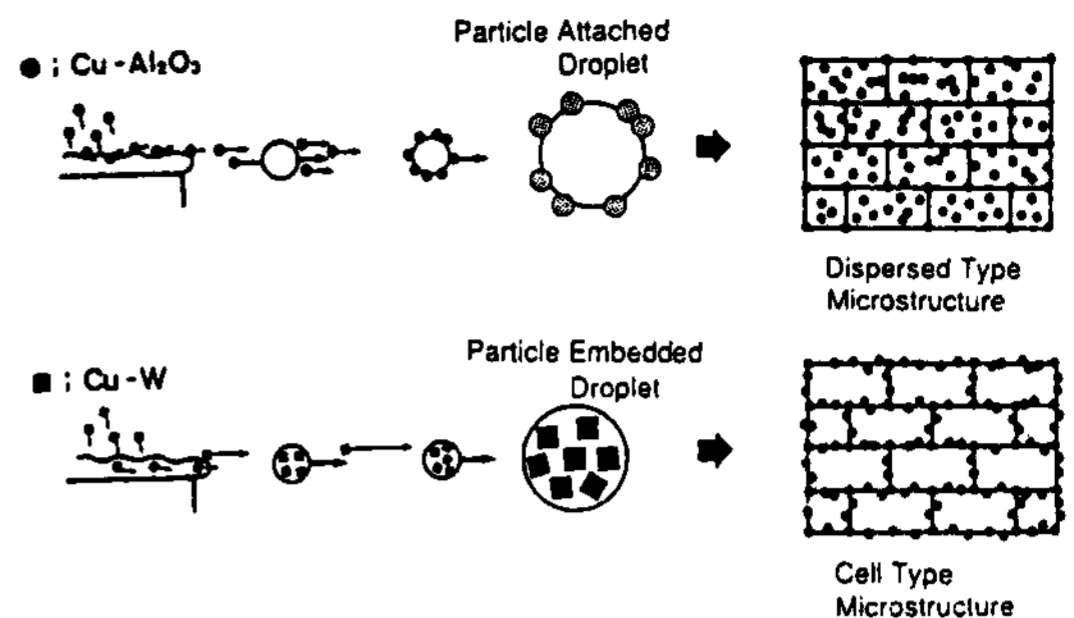


Fig. 6. Schematic compositing modes of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle and W particles in CSD process.

성형체 및 Cu/W<sub>p</sub> 성형체의 복합조직을 비교한 것이 Fig. 6(B)이다. 복합화된 각각의 액적들이 기판상에 연속적으로 적층되면 Cu/( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )<sub>p</sub> 성형체는 이른바 세포 형태로, 그리고 Cu/W<sub>p</sub> 성형체는 분산형태의 복합조직으로 응고되고 있음을 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

원심분사주조법을 이용하여 입자강화 복합재료의 제조 가능성을 제시하기 위하여, Cu액적에  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자와 W 입자를 각각 분사하여 얻어진 액적과 적층성형체의 조직관찰과 수학적 모델화를조합하여 복합화 거동을 고찰한 결과는 다음과 같다.

1) 채취된 Cu, Cu/( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )<sub>p</sub> 및 Cu/W<sub>p</sub> 분말은 크기가 100 μm 이상되는 분말이 약 90% 이상을 나타내었고, 특히 분말크기가 200~300 μm 범위인 분말의 분포는 30~40% 범위를 보였다.

2) W입자는 분사원반상에서 Cu 용탕속에 미리 복합화되고,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자의 복합화는 Cu 액적과의 상대 비행속도차가 큰 분사비행중에 이루어지며, 이러한 복합화 기구를 조직적으로 확인하였다.

3) 성형체의 적층조직에서  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자와 접촉하고 있는 splat의 기지조직은 W 입자와 접촉하고 있는 splat의 기지조직과는 달리 국부적으로 급냉된 응고조직을 보였다. 이는 Cu 액적표면에 돌출된 상태로 부착하여 복합화된  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자가 강력한 열소멸원(heat sink)으로 작용하였기 때문으로 여겨진다.

4) 원심분사주조법에서 Cu 액적에 대한  $\text{Al}_2\text{O}_3$  및 W 입자가 복합화, 그리고 Cu/( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )<sub>p</sub> 성형체 및 Cu/W<sub>p</sub> 성형체의 복합화를 도식화한 결과,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자는 Cu 액적의 표면에 부착하는 형식으로 복합화(particle-

attached) 되고, W 입자는 Cu 액적의 내부에 침투하는 형식(*particle-embedded*)으로 복합화되어  $\text{Cu}/(\text{Al}_2\text{O}_3)_P$  성형체는 소위 세포형태(*cell-type*)의 복합조직으로, 그리고  $\text{Cu}/\text{W}$  성형체는 분산형태(*dispersed-type*)의 조직으로 복합화함을 나타냈다.

본 연구는 1996년도 부경대학교의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] A. R. E. Singer : *Metals and Materials*, 4(1970) 246.
- [2] Osprey Metals Ltd : U. K. Patent No. 147, 239 : *J. Inst. Metals*, 100(1972) 185.
- [3] R. W. Evans, A. G. Leatham and R. G. Brooks : *Powder Metallurgy*, 28-1(1985) 13.
- [4] E. Gutierrez-Miravete, E. J. Lavernia, G. M. Trapaga, J. Szekely and N. J. Grant : *Met.Trans.*, 20A-1(1989) 71.
- [5] P. C. Mathur, D. Apelian and A. Lawley : *Acta. Metall.*, 37-2(1989)429.
- [6] T. C. Williams : *Metals and Materials*, 4(1988) 485.
- [7] 김명호, 배차현, 정해용, 박홍일 : *한국주조공학회지*, 12-4(1992) 326.
- [8] W. D. Kingery : *Ceramic Bulletin*, 35(1956) 108.
- [9] Kim, M. H. : "The structure and Properties of Spray-Cast Deposits", Ph. D Thesis, Univ. of Sheffield, U.K. (1982).
- [10] R. C. Ruhl : *Mat. Sci. Eng.*, 1(1967) 313.
- [11] W. E. Ranz and W. R. Marshall : *Chem. Eng. Progress*, 48(1952).
- [12] E. A. Brandes : *Smithells Metals Reference Book*, 6th ed., Butterworths & Co, (1983) 8-41.