

論 文

분사구조에 의한 입자강화 금속기지 복합재료의 제조시 액적의 열적거동과 미세조직에 대한 고찰

김명호, 배차현\*, 정해용\*, 박홍일\*\*

Microstructure and Thermal Behaviors of Droplets During the Formation of Particle Reinforced Metal Matrix Composites by Spray Casting Process

Myung-Ho Kim, Cha-Hurn Bae\*, Hae-Young Jeong\* and Heung-Il Park\*\*

Abstract

Particle-reinforced metal matrix composites via the Osprey spray casting process were fabricated by injecting second phase particles of Al2O3 (<40μm) and W(6μm) into the spray of Cu droplets, and the thermal behaviors of the composite droplets during flight were considered theoretically on the basis of mixing modes between the Cu droplets and the reinforced particulates injected.

It was found that the W-injected spray is comprised of particle-embedded droplets, and the Al2O3-injected spray comprises particle-attached droplets.

From the predicted results of the thermal behaviors of the composite droplets and preforms produced, it is concluded that the thermal behaviors of the composite droplets during flight, and during the subsequent deposition are strongly influenced by its mixing modes between the reinforced particulates and Cu droplets during flight.

1. 서론

신재료의 개발 및 특성개발을 목적으로 최근에는 응고현상을 적극적으로 이용하는 기술이 관심의 초점이 되고 있다. 특히 용융금속을 급속응고시켜 (>10<sup>3</sup> K/s) 결정입의 미세화, 과포화 고용 및 비평형 결정질상의 생성등 응고를 제어하는 기술은 기존의 합금화 개념을 초월하여 새로운 고성능 강화재료의 신개발법으로 그 응용범위를 확대하여 나아가고 있다.

이러한 급속응고에 의한 금속의 특성개발에 관한 연구중 특히 분사구조기술은 급속응고와 성형

(consolidation)을 동시에 얻을 수 있어, 무편석의 미세조직을 가진 신합금을 제조하는 기술로서 현재까지 다양한 연구가 진행되어 왔다[1-10].

분사구조란 용융금속을 불활성보호 분위기하에서 분무화(atomization)하여 미세한 액적(drop)들로 분사하면 기판(substrate)위에 고속으로 충돌케 되어 매우 얇은 판상으로 적층되며, 잇따른 액적들의 충돌로 인하여 적층응고되어져 이론 밀도가 90% 이상되는 성형체(preform)를 형성하는 새로운 금속소재 가공기술이다. 이때 용융금속의 분무화 및 분사방법은 고압의 불활성 가스에 의한 방법(gas atomization)이나 원심력에 의한

울산대학교 금속공학과(Department of Metallurgical Engineering, University of Ulsan)

\*부산공업대학 재료공학과(Department of Materials Engineering, Pusan National University of Technology)

\*\*부산공업대학 생산가공공학과(Department of Production & Joining Engineering, Pusan National University of Technology)

기계적 방법(centrifugal atomization)등이 있다. 이들 적층응고된 재료를 기관에서 분리하여 열간 또는 냉간가공하면 치밀한 소재가 얻어진다.

이와 같이 분사주조법은 0.25-2.5 Kg/s 정도의 매우 높은 적층속도로 용탕에서부터 단일공정에 의하여 균질한 성형체를 제조할 수 있으며, 이들 성형체는 용사법과는 달리 적층응고된 액적간의 경계가 존재하지 않고, 등축정이 균일하게 분포되어 있으며(입자 크기 20-200 μm 정도), 또한 합금 원소의 거시적 편석이 존재하지 않는 특성을 가지고 있음은 물론, 분말야금법상의 많은 이점(조직의 미세화등)을 얻을 수 있으면서 기존의 분말야금공정에서 필수적인 체질, 환원처리, 분말혼합, 성형, 소결등의 공정을 대폭적으로 생략할 수 있으므로 새로운 소재의 제조법으로서 제조공정의 에너지 절감 효과를 가져올 수 있어 그 중요도가 점차 증대되어 가고 있다.

또한 분사주조법은 액적의 분사와 동시에 제2상의 미세한 고상 강화입자(1-50 μm)를 분사하여 줌으로서 제2상의 중력 편석없이 시편 전면에 균일 분포된 near net shape의 복합재료를 제조할 수 있을 뿐 아니라 제2상의 입자의 첨가분율(0-35%)을 폭넓게 조절할 수도 있다.[11,12]. 또한 입자화되어 비산하는 액적에 반응성 가스를 분사하여 줌으로서 분산강화형 복합재료를 제조할 경우 연속적이고도 in-situ한 미세조직의 조절가능성이 제시되고 있다[13]. 그러므로 분사주조법에 의한 입자강화 금속기지 복합재료의 제조는 분말야금공정이나 중간 주조공정을 거치지 않고 응용금속에서 직접 near net shape를 가진 반제품의 생산이 가능할 뿐 아니라, 경제성과 생산성을 높일 수 있는 가능성을 제시하고 있어 최근에 크게 주목을 받고 있다.

본 연구에서는 Osprey 분사주조법을 이용하여 금속의 표준적 특성을 지닌 Cu를 기지 금속으로 하고, Cu액적과의 젖음성(wettability) 및 비중에 있어 비교적인 특성을 갖는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자와 W 입자를 선정하여 Cu기지 입자강화 복합재료를 제조함에 있어, Osprey분사주조법의 특성적 공정에 의하여 발생하는 액적 및 강화입자의 비행 거동과 이들 복합화된 액적들의 열적거동, 그리고 이들 복합화된 액적들과 이들의 적층에 의하여 형성된 적층성형체의 미세조직을 검토하여 보았다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험장치 및 시편제작

본 연구에 사용한 Osprey 분사주조 장치는 DREXEL 대학에 설치된 것으로 Fig.1에 나타난 바와 같다. Cu(99.9%)의 용해는 spray chamber의 상부에 위치한 고주파 유도 용해로에서 용해하였다. 용해시 Cu용탕의 산화를 방지하기 위하여 도가니 내를 질소가스 보호분위기로 유지하였으며, chamber도 질소가스로 purging하였다. 용융 온도보다 약 100℃ 정도 과열된 Cu 용탕을 직경 4.5mm인 텅다시의 노즐을 통하여 흐르도록 하면서 이 용탕류를 1.0MPa 압력의 질소가스로 분무하면서 W 입자(<6μm) 또는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자(<45μm)를 각각 동시에 분사하였다. 분사시 분말이 서로 붙어 덩어리로 분사되는 현상을 방지하기 위하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자 및 W입자를 건조조에 넣어 105±5℃, 1 시간 동안 건조한 후 실온으로 냉각시켜 250mesh 체로 해립하여 사용하였다.

이때 15Kg의 Cu 장입량을 GMR(Gas: Metal Ratio)=2.6으로 고정하여 약 56초 동안 분사적층하였으며, 강화입자의 분사용탕량(15kg)의 체적비로 15 v/o를 목표로 하였다. 기관은 직경이 120mm로서 atomizer로부터 350mm 거리에 위치하였으며, 분사축에 대하여 35°의 경사각을 유지

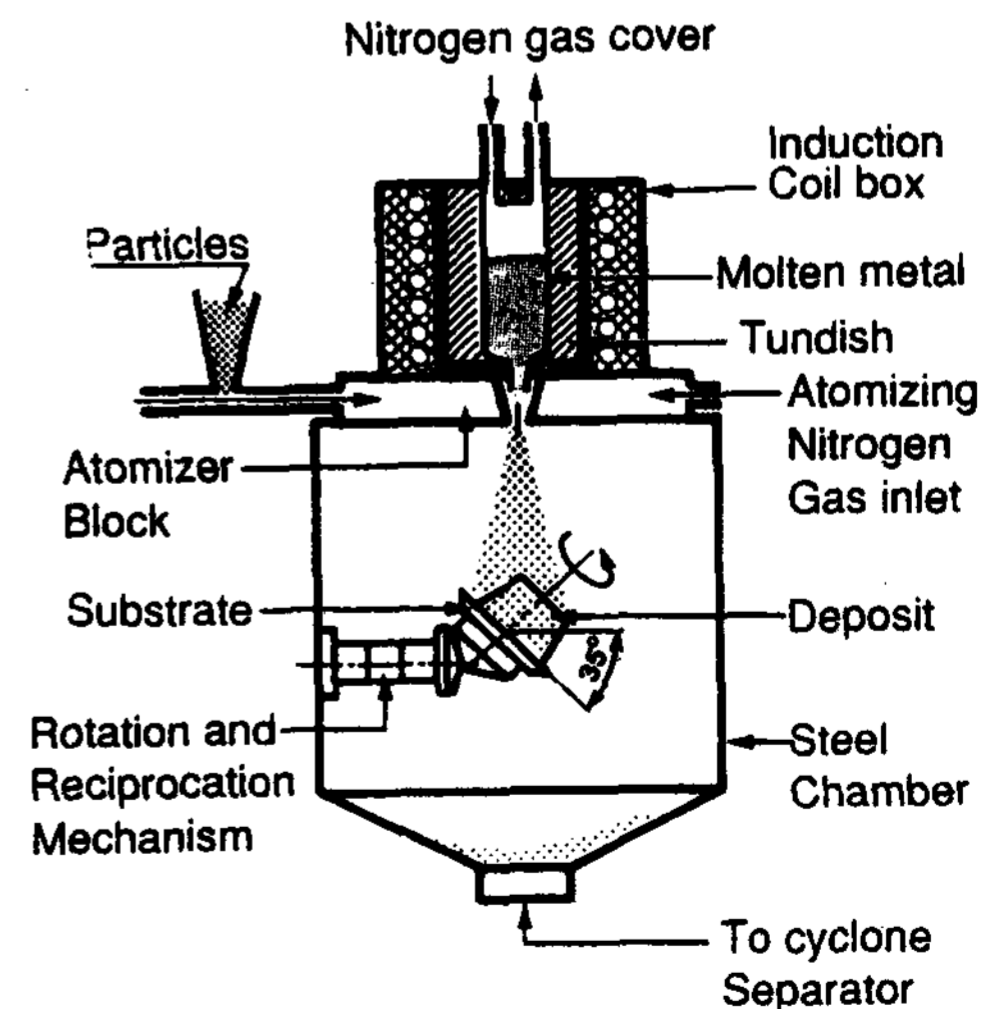


Fig. 1. Schematic illustration of Osprey spray-cast equipment

하면서 185rpm으로 회전시켰다. 그 결과 제조된 적층성형체의 크기는 직경 120mm, 높이가 약 100mm정도 이었다.

### 2.2 조직관찰

액체의 크기는 기판상에 적층되지 않고 과분사되어 cyclone에 집적된 분말을 채집하여 표준체를 이용하여 분말의 크기분포를 조사하였다. Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Cu-W의 적층성형체와, 과분사된 분말의 미세조직은 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>와 H<sub>2</sub>O을 5:1로 혼합한 전해액에서 전해연마 및 전해에칭하여 관찰하였다. 조직관찰시 결정립의 크기, 액적의 형상 및 강화입자의 분포특성은 주사 전자현미경을 이용하였으며, 이 때 측정된 강화입자의 분포분율 및 결정립 크기등의 정량적 분석은 화상분석장치를 이용하였다. 적층성형체의 결정립 크기, 강화입자의 분포 및 기공등은 적층성형체의 분사축의 높이 방향과 분사축으로부터 반경거리에 따라 구분하여 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 액적의 특성

Fig.2(A) 및 Fig.2(B)는 각각 과분사된 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Cu-W분말을 SEM으로 관찰한 것으로서, 이에 의하면 Cu액적의 표면상에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자가 상당량 부착하여 복합화되어 있는 양상을 보이고 있는데 반하여, Cu액적의 표면에 부착된 W입자는 거의 관찰되지 않고 Cu액적 표면이 매우 매끈함을 알 수 있다.

이들 과분사된 분말입자를 표준체를 이용하여

screen한 결과, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 또는 W입자가 복합화된 액적의 분포는 평균크기가 150 μm에서 최대치를 보였다. 그리고 입자의 산란분포도는 150 μm±1.4σ이었다. 이들 크기가 150 μm인 액적들의 현미경조직을 기초로 화상분석한 결과, 형상비(장축 방향의 길이/단축 방향의 길이)가 1-1.2이었으며, 이로부터 이들 액적들의 형상은 거의 등축 구형에 가깝다는 것을 알 수 있었다.

### 3.2 액적과 강화입자의 비행속도

Osprey분사구조법으로 액적과 강화입자를 동시 분사하여 입자강화 복합재료를 제조할 경우, 액적내 강화 입자의 분포는 액적의 냉각거동 및 액적과 강화입자간의 상대비행속도차에 의하여 결정될것으로 예상된다.

그러나 분사가스의 속도가 매우 빠르고 교란이 심하여 액적의 비행속도를 실험적으로 측정하는 것은 사실상 불가능하다. 그러나 액적들이 분무되자마자 표면에너지에 의하여 구형을 유지하고, 또한 강화입자의 형상도 구형이라면, 그리고 액적과 강화입자가 직선적으로 비행한다고 가정하면, 액적과 강화입자의 비행속도는 다음의 force balance식을 이용하여 수치적으로 유추하여 볼수있다[1].

$$F = ma = 0.5C_D \rho_g V_r^2 A_c + mg \dots (1)$$

Fig.3은 (1)식에 해당되는 물성치를 대입하여 수치해석으로 계산한 결과를 나타낸 것이다. 이때 산란분포도가 가장 큰 150 μm크기의 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Cu-W 분말들은, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>나 W이 15 v/o복합화

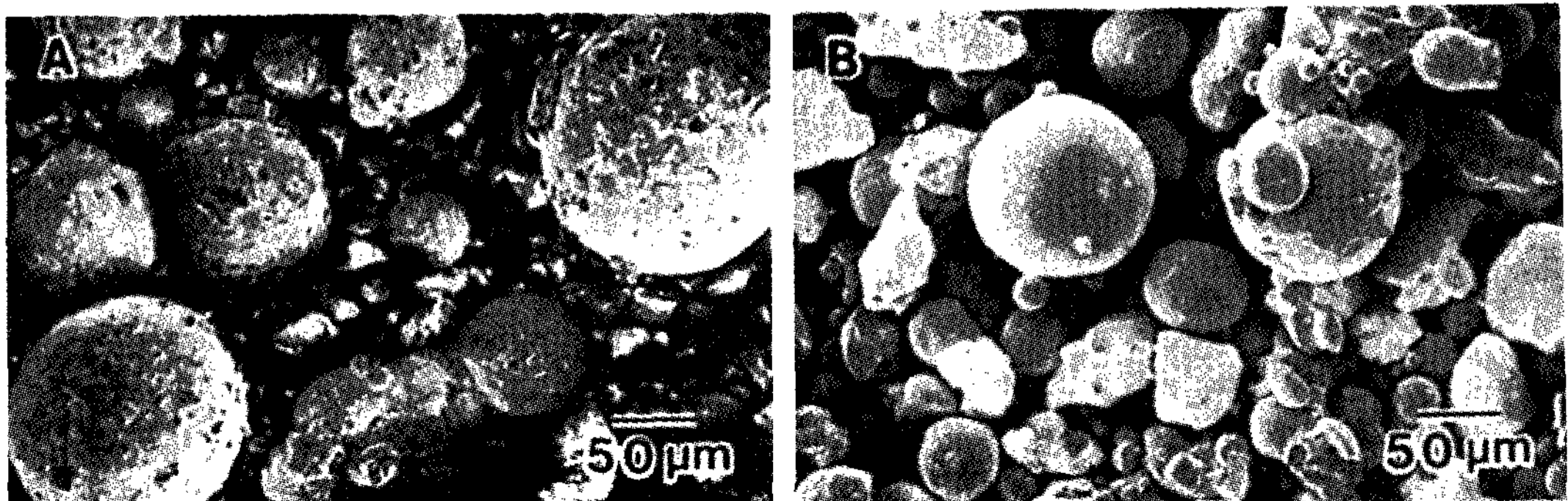


Fig. 2. SEM views of Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(A) and Cu-W(B) powders oversprayed

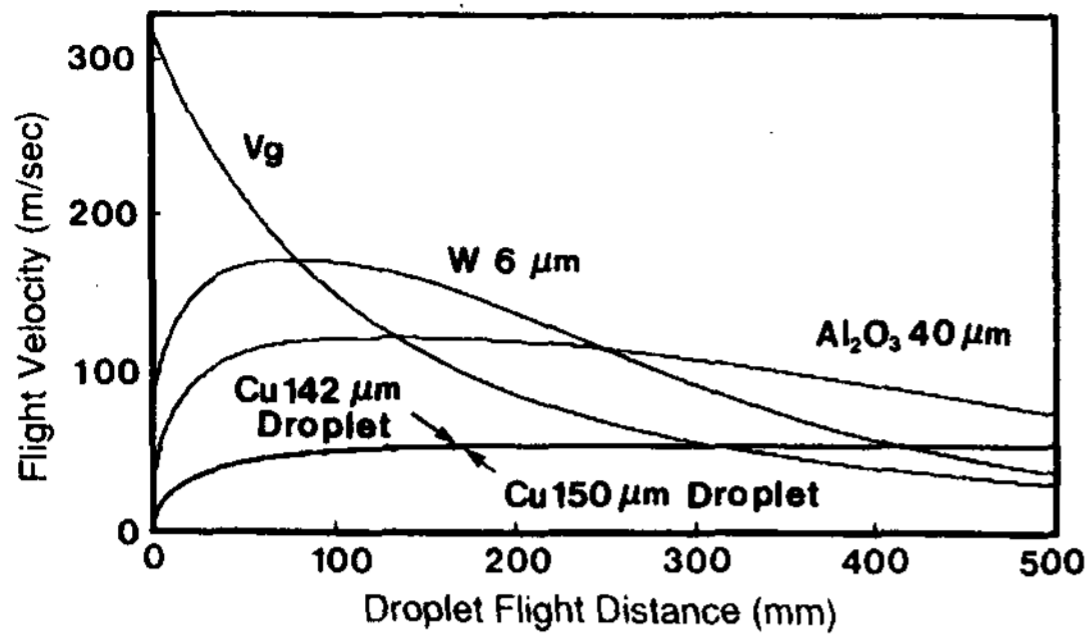


Fig. 3. Calculated velocity variation of gas, copper droplets and injected particles

되기 이전에는 이론적 계산에 의하면 그 크기가 142 $\mu\text{m}$ 이므로, 이 크기의 순수한 Cu액적의 비행 거동도 함께 나타내었다. 이에 의하면 비행하는 동안 액적 및 강화입자의 비행 속도는 초기에 급격히 증가하여 최대값에 도달한 후 완만하게 감소하며, 비행거리가 증가할수록 분사가스 속도와 액적의 비행속도는 거의 일치한다. 또한 Cu액적과 강화입자간 비행속도의 차이는 초기 비행거리에서 최대 차이를 나타낸 후, 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러므로 액적의 분사와 동시에 크기가 작은 강화입자를 분사할 경우 액적과 강화입자의 복합화는 액적내로의 침투가 용이한 초기 비행거리에서 이루어질 가능성이 매우 클 것으로 여겨진다.

그리고 Fig.4는 복합화된 액적의 비행속도를 나타낸 것이다. 이들 복합화된 액적들의 비행속도를 구함에 있어 복합화된 액적들의 밀도는 복

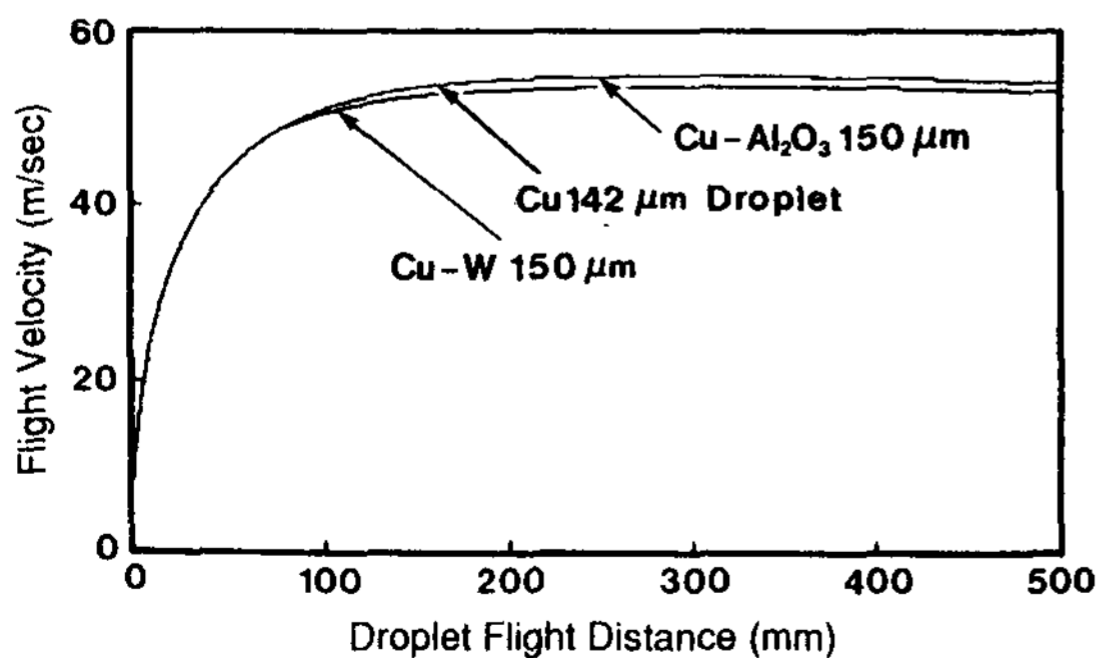


Fig. 4. Predicted velocity variation of composite droplets with flight distance

합화된 강화입자의 비중과 체적분율에 따라 증가 또는 감소된 효과를 나타냄을 고려하였다. 이에 의하면 큰 차이는 보이지 않으나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자가 15v/o 복합화된 150 $\mu\text{m}$ 크기의 액적의 비행속도는 복합화되지 않은 142 $\mu\text{m}$ 크기의 Cu액적보다 비행속도가 약간 커짐을 알수있다. 그러나 W입자가 15v/o 복합화된 150 $\mu\text{m}$  크기의 액적의 비행속도는 복합화되지 않은 142 $\mu\text{m}$  크기의 Cu액적보다 비행속도가 약간감소함을 알수 있다. 즉 Cu보다 비중이 작은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 복합화된 액적의 비행속도는 약간의 증가를 나타내고, 반면에 Cu보다 비중이 무거운 W입자가 복합화된 액적의 비행속도는 약간 감소함을 알수 있다.

### 3.3 복합화된 액적의 열전달계수

분무화 가스와 함께 동시에 분사되는 액적들은 강제적인 대류분위기중에 있게 되므로 비행거리가 증가 할수록 가스중에 노출되는 시간이 증가하여, 액적들은 주변의 가스로 더욱 많은 열을 잃게되어 냉각 및 응고가 일어난다. 이때 비행거리에 따른 이들 복합화된 액적들과 가스간의 열전달 계수의 변화를 Ranz와 Marshall의 경험식[14]으로 부터 구하여보면 Fig.5와 같다. 이에 의하면 W입자가 복합화된 150 $\mu\text{m}$ 크기 액적의 열전달 계수는 복합화되지 않은 142 $\mu\text{m}$  크기의 순수한 Cu액적보다 작다. 그리고 그림에는 뚜렷이 나타나지 않으나, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 복합화된 150 $\mu\text{m}$  크기의 액적의 열전달 계수는 W입자가 복합화된 액적의 열전달 계수보다 더 작음을 알수 있다. 이는 복합화된 액적의 열전달계수는 액적의 크기는 물론 복합화되는 강화입자의 비

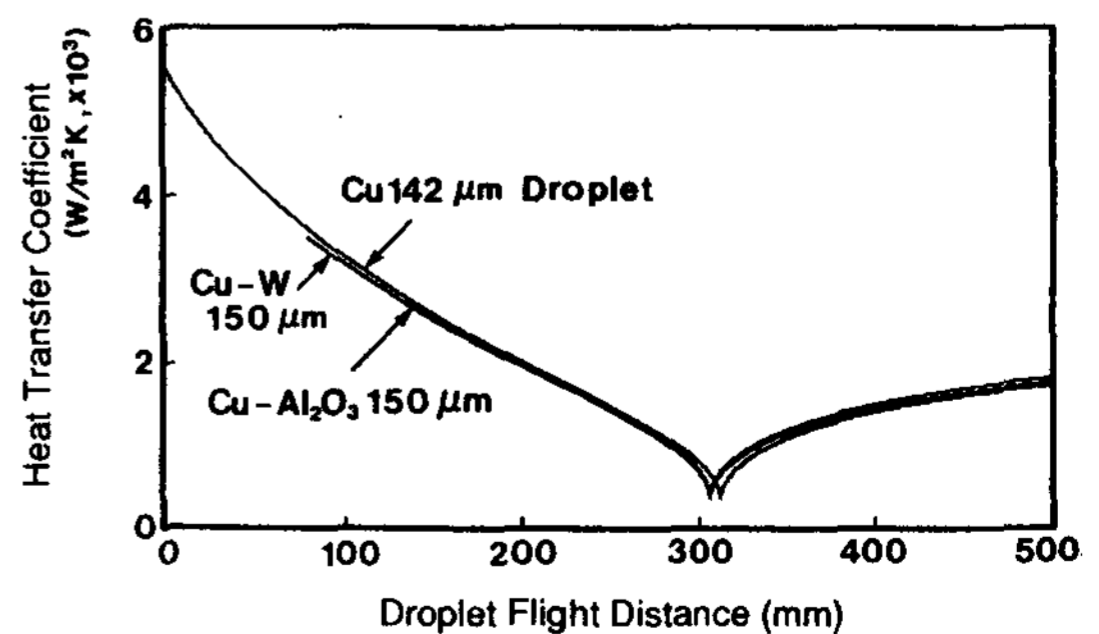


Fig. 5. Calculated variations of heat transfer coefficient with flight distance

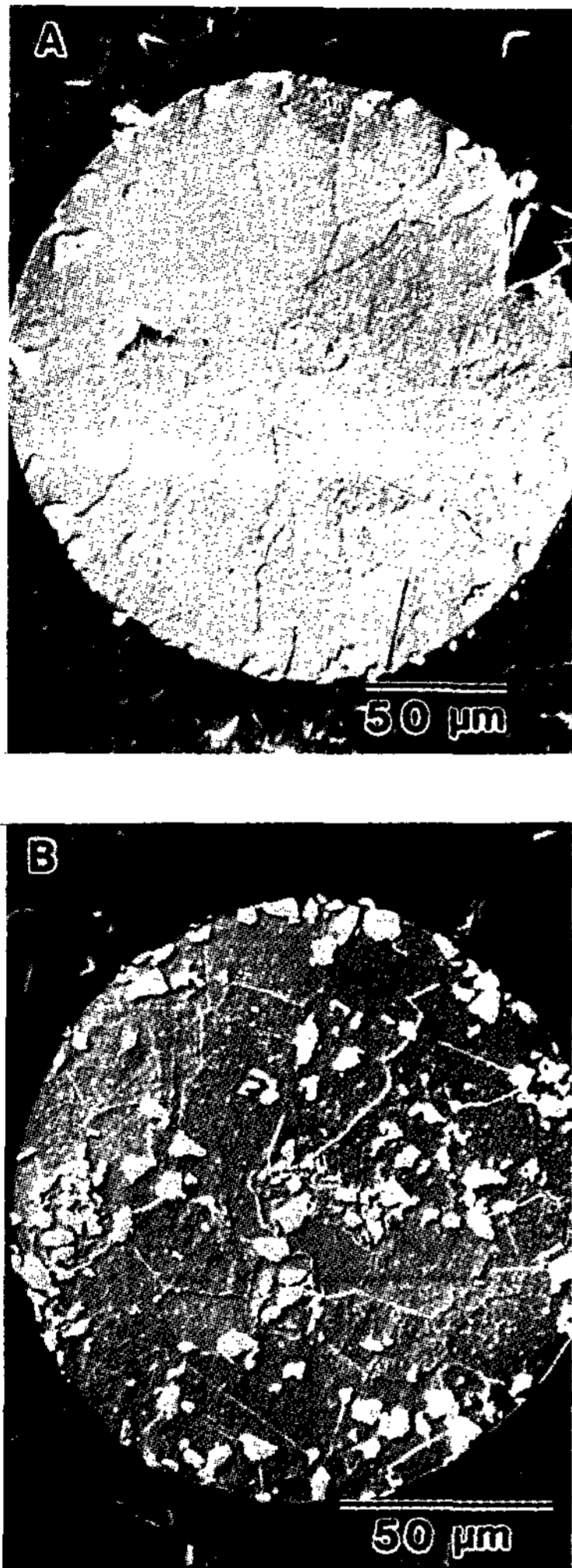


Fig. 6. Microstructure of particle-attached droplet of Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(A) and particle-embedded droplet of Cu-W(B)

중에도 의존함에 기인한다. 그리고 비행거리가 증가함에 따라 열전달계수 곡선상에 변곡점이 나타남은 액적과 가스간의 상대속도가 이 지점에서 0이기 때문이다.

3.4 복합화된 액적의 냉각

Osprey분사주조 장치에 의하여 분무화되는 Cu 액적들은 Newton의 냉각조건[15]을 만족하게 되어 액적 내부의 온도구배가 없으며, 또한 복사에 의한 열손실은 방열에 의한 열손실보다 매우 적으므로 없는 것으로 가정하면, 복합화된

액적의 온도변화는 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{6h(T_d - T_g)}{d[(1 - V_p)C_d\rho_d + V_pC_p\rho_p]} \dots\dots\dots(2)$$

그러나, Fig.6에 나타낸 과분사된 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 액적의 단면 미세조직에 의하면, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자는 Cu액적속으로 침투하지 못하고 단지 Cu액적의 표면상에 부착하여 복합화되어 있는 양상을 보이고 있으며, 이에 반하여 과분사된 Cu-W분말의 단면 미세조직에 의하면 W 입자들은 액적 내부에 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이와 같이 분사 비행중에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 Cu액적속으로 침투하지 못하고 Cu액적의 표면에만 주로 부착되어 복합화되는 이유는, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자의 비중(3.96g/cm<sup>3</sup>)은 Cu액적의 비중(8.0g/cm<sup>3</sup>)에 비하여 매우 작고, Cu액적에 대한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 젖음성도 좋지 않을 뿐만 아니라, 강화입자가 액적에 침투하기 위하여는 액적의 표면 장력 보다 더 큰 운동에너지가 필요하며 이러한 운동에너지는 액적과 강화입자간의 상대 비행속도로 부터 얻을 수 있으나, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자의 경우 그 비행속도와 Cu액적간의 상대비행속도 차이가 비교적 작기 때문이라고 여겨진다. 그러나 Cu-W분말의 경우, W입자가 Cu액적 내부에 침투하여 균일하게 분포되어 있음은, Cu액적의 비중에 비하여 W입자의 비중(19.3g/cm<sup>3</sup>)이 약 2.5배 정도 더 크고, W입자는 Cu액적에 대한 젖음성이 좋으면서, Cu액적과의 상대 비행속도 차이도 크기 때문이라고 여겨진다.

즉, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자는 Cu액적의 표면에 부착하는 형식으로 복합화(particle-attached droplet)되고, W입자는 Cu액적의 내부에 침투하는 형식으로 복합화(particle-embed droplet)됨을 알 수 있었다.

그리고 1000℃에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자의 열전도도는 5.44 W/mK인 데 비하여 W입자의 열전도도는 111 W/mK로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자의 열전도도가 W입자의 열전도도보다 약 20배 정도 작다. 그러나 150μm크기의 Cu 액적내에 강화입자가 15 v/o복합화 되어 있을 경우, 상온 상태로 부터 1083℃까지 승온 될때에 흡수할수 있는 열량은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자의 경우 약 88.1 KJ 정도이나, W입자의 경우에는 약 55.5 KJ정도로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자에 비하여 cm<sup>3</sup> 적다.<sup>(15)</sup>

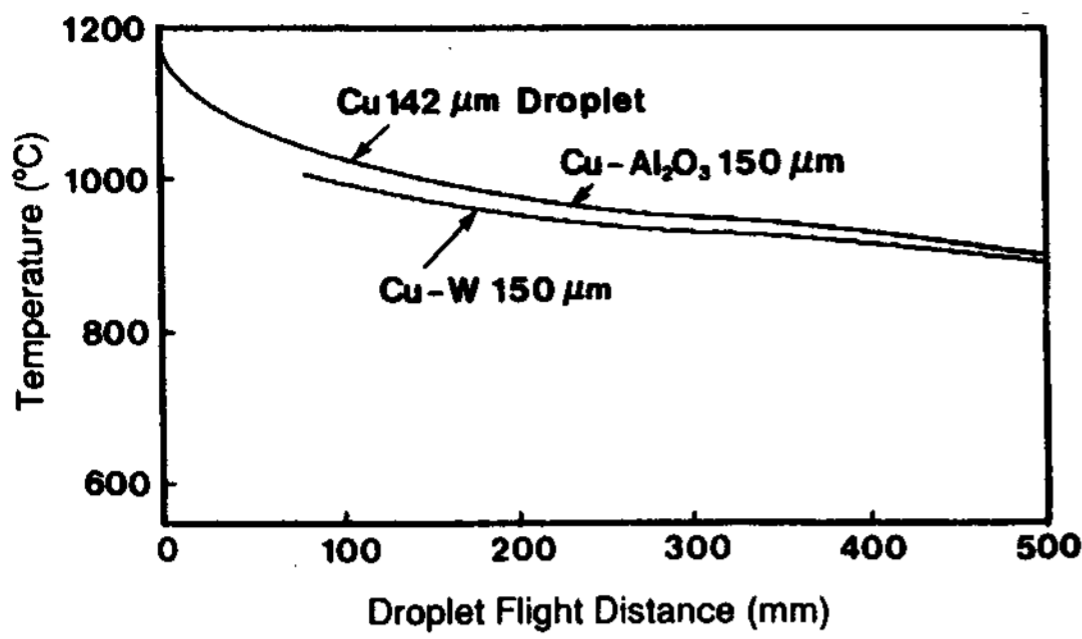


Fig. 7. Calculated variation of temperature of composite droplets with flight distance

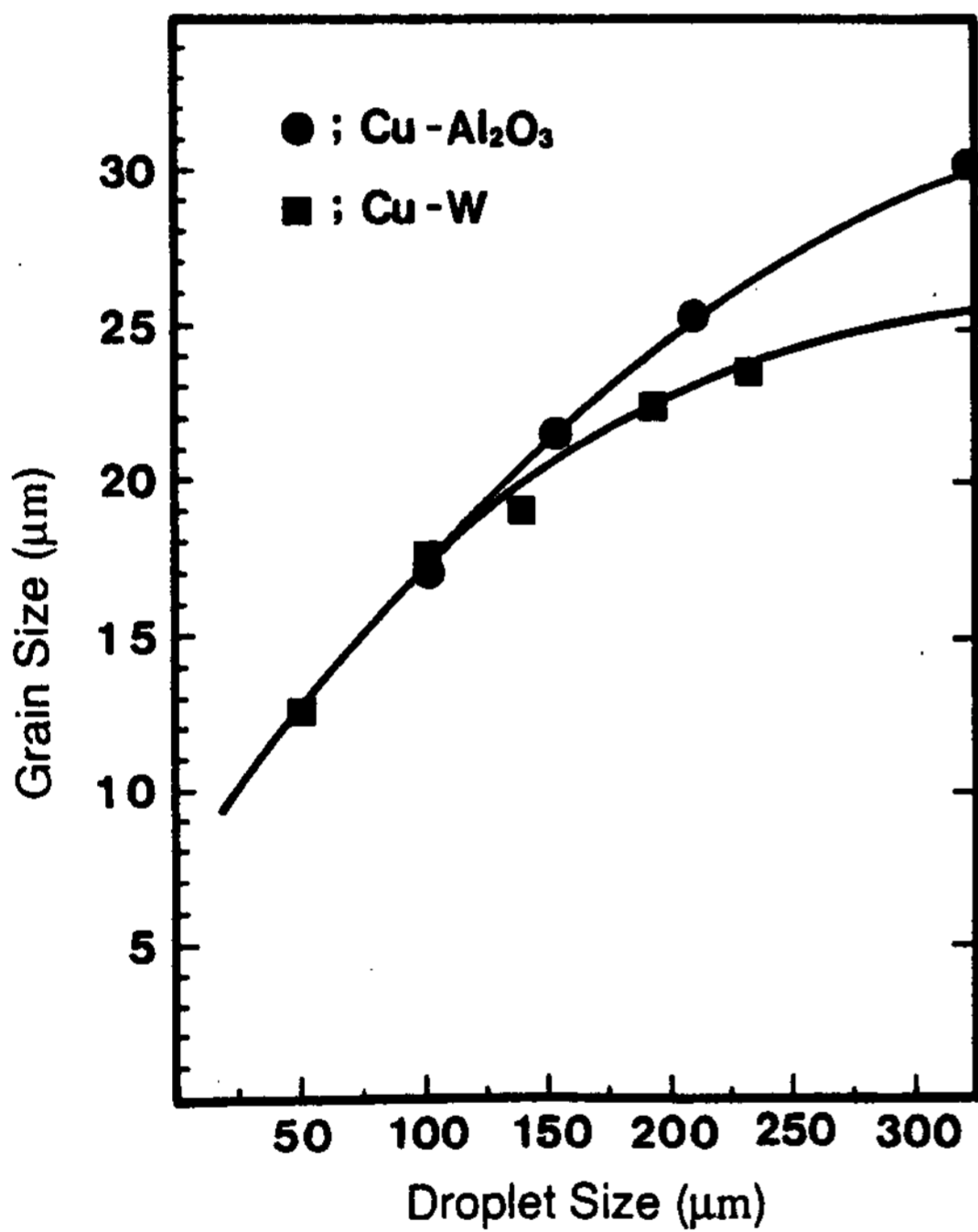


Fig. 8. Dependence of grain size on droplet size for composite droplets oversprayed

따라서 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합화 액적들의 경우에는, 열전도도가 나쁜 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자가 단지 Cu액적의 표면에 부착되어 복합화되어 있는 상태이기 때문에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자는 비록 흡열 가능량은 크나 비행중 Cu액적의 열량을 거의 흡수하지 못한다고 가정할 수 있다. 그러나 Cu-W복합화 액적의 경우에는 열전도도가 매우 좋은 W 입자들이 Cu액

적의 내부에 침투하여 고르게 분포함으로써, 분사비행중 W입자는 Cu액적의 열량을 충분히 흡수할수 있다고 가정할 수 있다.

Fig.7은 이러한 가정하에 (2)식을 이용하여 비행거리에 따른 Cu액적 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 W입자가 각각 복합화된 액적들의 온도변화를 나타낸 것으로, 이에 의하면 액적의 온도는 비행거리가 증가할수록 낮아지며, 특히 W입자가 복합화된 액적의 온도는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 복합화된 액적의 온도보다 약 100°C정도 더 낮은 온도를 나타냄을, 즉 냉각속도가 더 빠름을 보여주고 있다.

이러한 가정에 따른 계산 결과는 Fig.8에 나타낸 과분사된 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>분말 및 Cu-W분말의 크기에 따른 결정립의 크기변화에 대한 측정 결과와도 잘 일치함을 알수있다. 즉, 이에 의하면 과분사된 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>분말의 결정립 크기는 과분사된 Cu-W 액적의 냉각속도보다 느리다는 계산 결과를 입증하는 증거라 할수 있다. 그리고 분말의 크기가 증가할수록 결정립의 크기는 증가하며, 이러한 현상은 액적의 크기가 증가함에 따라 분사비행중 그 냉각속도가 느려짐에 기인하며, 이는 식(2)로 부터 쉽게 유추하여 볼수있다.

이와같이 분사비행중 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 복합화된 Cu액적의 냉각속도가 W입자가 복합화된 Cu액적의 냉각속도보다 작게 나타남은, 결국 Cu 액적과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자 또는 W입자 간의 복합화 양식 (mixing modes)의 차이가 주요 원인이라고 할 수 있다.

### 3.5 복합화된 액적의 응고

액적의 과냉도는 균일 핵생성 이론[16]에 근거하여 계산될수도 있다. 그러나 액적의 과냉을 이론적으로 계산하는데 필요한 고액 계면에너지에 대한 신뢰할만한 자료가 드문 실정이다. 그리고 본 연구에 있어서는 제2상의 강화입자가 액적의 표면이나 내부에 복합화된 경우에 있어서의 응고현상이므로, 본 연구에서는 액적의 응고시 과냉은 일어나지 않는다고 가정하고 다음의 식을 이용하여 Cu 액적 및 복합화된 액적들의 고상율을 계산하였다.

$$\frac{dS_F}{dt} = \frac{6h(T_d - T_g)}{d[(1 - V_p)C_d \rho_d \Delta T + (1 - V_p)\rho_d \Delta H_F + V_p \rho_p \Delta T]} \dots\dots\dots (3)$$

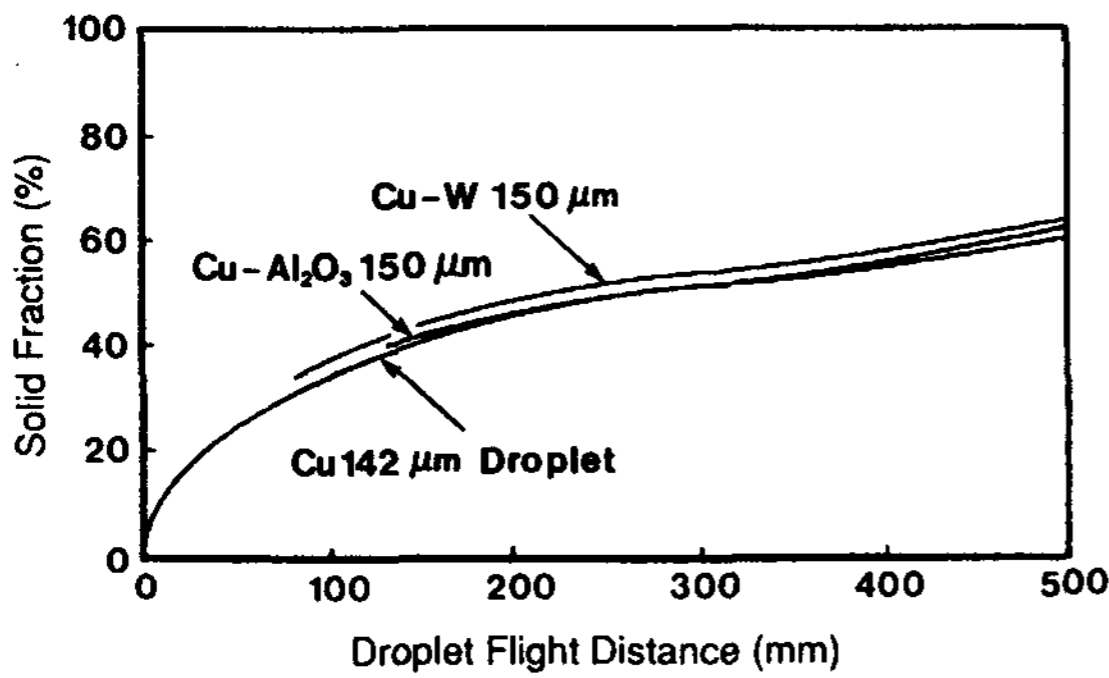


Fig. 9. Calculated variation of solid fraction of composite droplets with flight distance

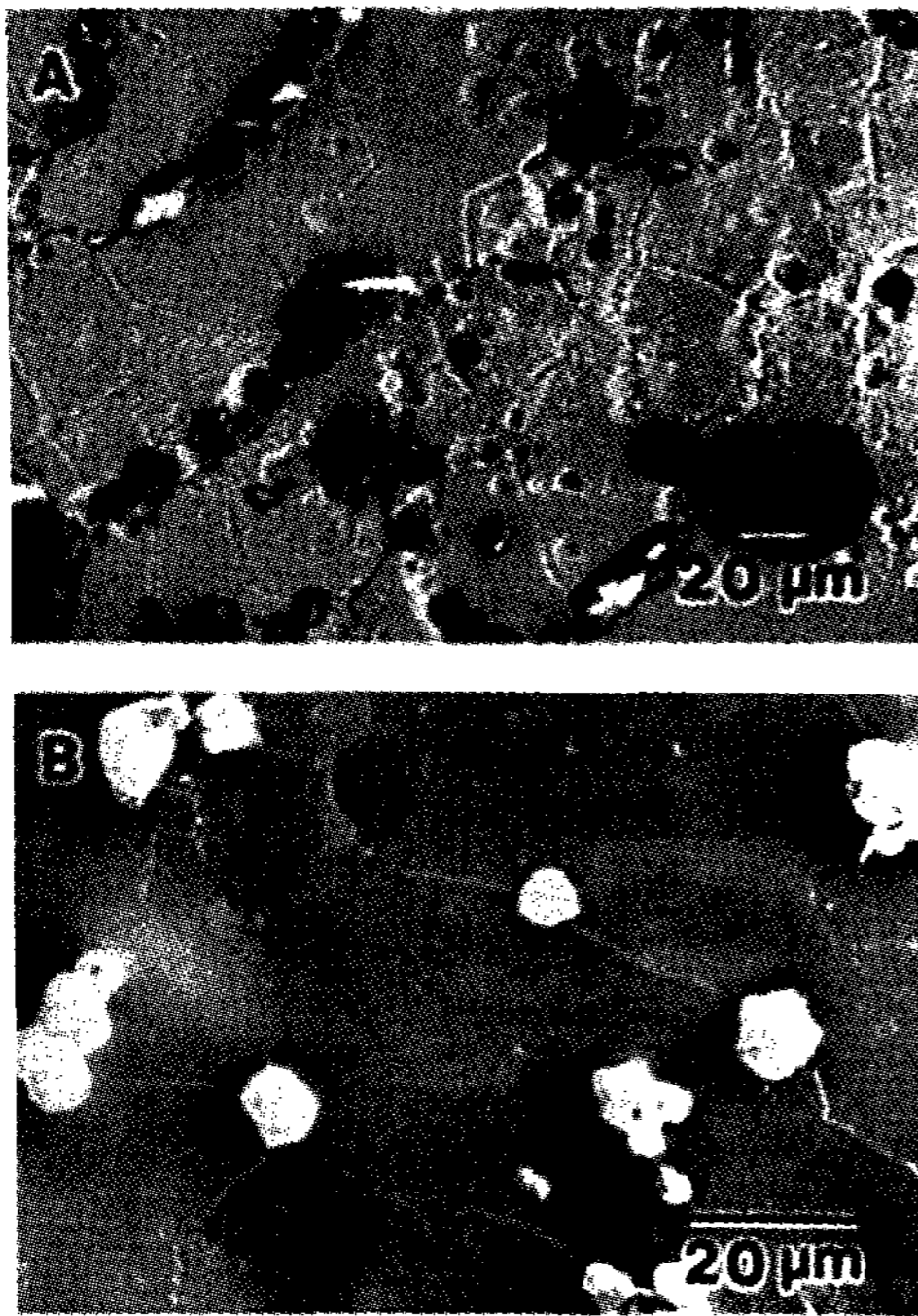


Fig. 10. Microstructure of Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(A) and Cu-W preforms spray-cast by Osprey process

Fig.9은 상기(3)식을 이용하여 계산된 Cu액적과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 또는 W입자가 복합화된 액적의 고상율을 비교하여 나타낸 것이다. 이에 의하면 Cu액적의 크기가 작을수록, 그리고 비행거리가 증가할수록 고상율은 증가하고 있다. 그리고 크기가 142μm인 분사 비행중인 Cu 액적의 경우,

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자와 만날 경우 복합화가 가장 일어나기 쉽다고 할수있는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자와의 상대 비행속도가 최대인 64mm 지점에서의 고상율은 약 39%이며, W입자와의 상대속도 차이가 가장 큰 40mm 지점에서의 고상율은 약 31%정도로서, Cu액적은 이들 강화 입자가 복합화하기에 충분한 액상율을 포함하고 있다고 할수있다. 그리고 본 분사주조장치에 있어 기관까지의 거리인 비행거리 350mm지점에서의 고상율은, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자가 15 v/o 복합화된 Cu액적의 경우 약 58%정도이며, W입자가 15 v/o 복합화된 액적의 경우에는 약 61%에 이르고 있음을 알수있다. 이와같이 이들 복합화된 Cu 액적들은 기관위에 적층 성형되기에 적당한 액상율[10]을 포함하고 있으므로 Fig.10에 나타난 바와 같이 적층성형체의 미세조직이 분사적층조직이 아닌 분사주조조직을 나타내는 것으로 여겨진다.

### 3.6 적층성형체의 미세조직 특성

이들 복합화된 액적들의 적층에 의하여 이루어진 성형체의 결정립 크기를 측정하여 본 결과, Fig.11에 나타난 바와 같이 액적의 결정립 크기 (Fig.8 참조)보다 적층성형체의 결정립의 크기가 더 조대함을 알수 있었다. 이는 본 분사주조의 경우 액적의 적층속도가 0.27 Kg/s로 매우 클 뿐 아니라, 성형체의 적층 높이가 증가함에 따라 기관 또는 성형체 위표면으로의 열방출이 억제되어 적층응고가 종료된 직후 잇따라 결정립 성장이 일어남에 기인한다고 볼수 있다.

그리고 특이하게도 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 적층성형체의 결정립 크기가 Cu-W 적층성형체의 결정립 크기보다 매우 작게 나타나고 있다. 이러한 결과는 Fig.

8에 나타난 과분사된 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말의 결정립 크기가 Cu-W 분말의 결정립의 크기보다 약간 조대하다는 측정 결과와 대치되는 결과이다. 이에 관하여 고찰하여 보면 다음과 같다. 즉 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합화 액적의 경우 이미 앞에서 고찰한 바와같이 Cu액적의 표면에 부착되어 복합화된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자는 열전도도가 나쁘므로 분사비행중 Cu액적의 열을 거의 흡수하지 못한 상태로 기관에 도달하여 적층된다. 그러나 Cu-W복합화 액적의 경우에 W 입자는 Cu 액적내로 침투하여 균일하게 분포된 상태로 복합화되며 또한 열전도도가 좋으므로 분사비행중 Cu액적의 열을 빠

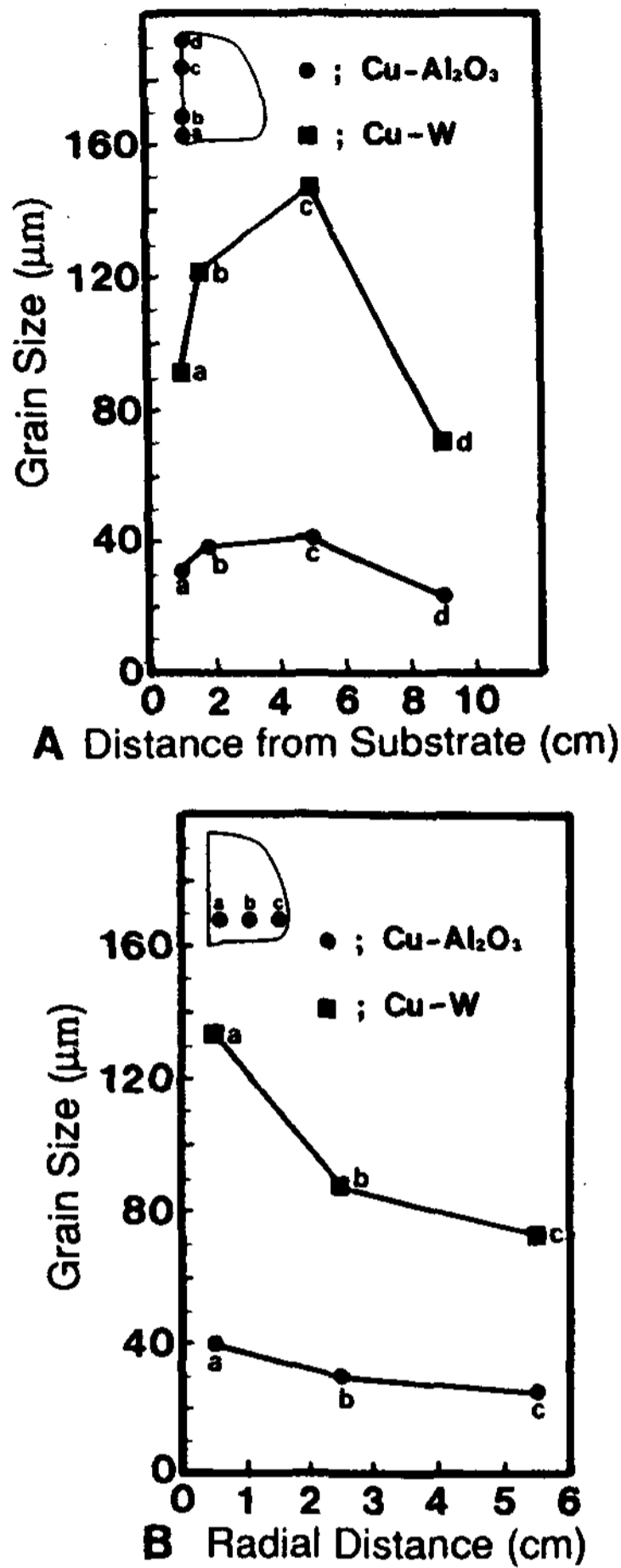


Fig. 11. Variation of grain size with distance from substrate(A) and radial distance(B) of composite preform spray-cast by Osprey process

르게 흡수하여 상당히 축열된 상태로 기관에 도달하여 적층 된다. 이들 복합화된 액적들이 연속적으로 기관위에 적층되면, Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 분사비행중 흡열하지 못한 열용량이 큰 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자는 적층성형체내에서 강력한 흡열원으로 작용하여 적층성형체의 결정입 성장을 어느정도 억제할수 있으나, Cu-W의 경우 W입자는 이미 분사비행중 상당히 축열된 상태이므로 적층성형된 후에는 흡열원으로서의 기능이 미미할 것이다. 따라서 결정입성장이 충분히 일어나지 못한 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 적층성형체의 결정입 크기는, 결정입성장이 충분히 일어난 Cu-W 적층성형체의 결정입 크기보다 미세하게 될 것이다.

#### 4. 결론

Osprey 분사주조법을 이용하여 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Cu-W 복합재료를 제조함에 있어, Cu액적 및 강화입자의 비행거동과 이들 액적들의 열적거동, 그리고 이들 복합화된 액적들과 이들의 적층에 의하여 형성된 적층성형체의 미세조직을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Cu액적 및 강화입자의 비행속도는 비행초기에 급속하게 증가하고 비행거리의 증가에 따라 상대비행속도의 감소율이 크기 때문에 액적과 강화입자간의 복합화는 상대 비행속도 차이가 가장 큰 비행초기에 이루어질 것으로 여겨진다.

2) Osprey분사주조법에 의하여 제조된 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>액적 및 Cu-W액적의 미세조직을 비교조사한 결과, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자는 Cu 액적의 표면에 부착하는 형식으로 복합화된 조직을, 그리고 W입자는 Cu 액적의 내부에 침투하여 균일하게 분포하는 형식으로 복합화된 조직을 나타내었다.

3) 분사비행중에는 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 액적의 냉각속도가 Cu-W 액적의 냉각속도보다 느리며, 이는 Cu 액적의 표면에 부착되어 복합화한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자는 비행중 Cu액적의 열량을 거의 흡수하지 못하나, 열전도도가 매우 좋은 W입자들은 Cu액적의 내부에 침투하여 고르게 분포하기 때문으로 여겨진다.

4) 크기가 142μm인 분사비행중인 Cu액적의 경우, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자와의 상대 비행속도 차이가 가장 커 복합화가 일어나기 쉬운 지점에서의 고상율은 약 39%이며, W입자와의 상대 비행속도 차이가 가장 큰 지점에서의 고상율은 약 31%정도로서, 강화입자가 복합화되기에 충분한 액상율을 포함하고 있음을 알수있었다.

5) 기관에 적층될 때의 고상율은, Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15v/o) 액적의 경우 약 58% 정도, Cu-W(15v/o) 액적의 경우 약 61%정도로서, 이들 복합화된 Cu 액적들은 기관위에 적층 성형되기에 적당한 액상율을 포함하고 있으므로 적층성형체의 미세조직은 분사적층조직이 아닌 분사주조조직



을 나타내는 것으로 여겨진다.

6) 미세조직 관찰 결과 액적의 결정립 크기보다 적층성형체의 결정립 크기가 더 조대함을 알 수 있었으며, 이는 기관위에 적층된 성형체가 응고후 잇따라 결정립 성장을 진행함에 기인한다고 여겨진다.

7) Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 적층성형체의 결정립 크기는 Cu-W 적층성형체의 결정립 크기보다 매우 작으며, 이는 액적표면에 부착되어 복합화되어 있던, 분사비행중 흡열하지 못한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>입자가 적층성형시 열소멸원(heat sink)으로 작용하여 적층성형체의 결정립성장을 어느정도 억제하였기 때문이라고 여겨진다.

### 참 고 문 헌

1. M.H.Kim: "Structure and Properties of Spray-cast Deposits", Ph.D. Thesis, University of Sheffield, (1982)
2. P.C.Mathur: "Analysis of the Spray Deposition Process", Ph.D. Thesis, Drexel University, (1988)
3. S. Annavarapu: "Spray Casting of Steel Strip: Modeling and Experimental Studies", Ph.D. Thesis, Drexel University, (1989)
4. P.Mathur, S.Annavarapu, D.Apelian and A.Lawley: JOM, Vol.41, No.10, (1989) 23
5. R.W.Evans, A.G.Leatham and R.G.Brooks: Powder Metallurgy, Vol.28, No1, (1985)13
6. E. Gutierrez-Miravete, E.J.Lavernia, G.M.Trapaga, J.Szekely and N.J.Grant: Metall. Trans., Vol. 20A, No.1, (1989)71
7. A.R.E.Singer: Metals and Materials, 4, (1970) 246
8. A.G.Leatham, R.G.Brooks, J.S.Coombs and A.J.W.Ogilvy: ICSF'90, (1990) 4.1
9. T.C.Willis, J.White, R.M.Jordan, I.R. Hughes: 3rd Int. Conf. on Solidification Processing, Sheffield(1987)21,
10. M.H.Kim and B.S.Chun: Bulletin of the

- Korean Institute of Metals and Materials, vol. 4, No.4, (1991)342
11. T.C.Willis, J. White, R.M.Jordan and I. R.Hughes: 3rd Int. Conf. on solidification Processing, Sheffield(1987)21
12. T.C.Willis: Metals and Materials, 4 (1988)485
13. Y. Unigame: "An Analysis of Oxide Dispersion Strengthening of Ferrous Alloys during Spray Casting", M.S.Thesis, Drexel University, (1989)
14. G.H.Geiger and D.R.Poirier: "Transport Phenomena in Metallurgy", Addison-Wesley Pub. (1973)250
15. E.A.Brandes: Smithells Metals Reference Book, 6th Edition, Butterworths Ltd., (1983)
16. P.Haasen: "Physical Metallurgy" Cambridge University Pub. (1978)

### 후기

이 논문의 일부는 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

### 부록

m	: 액적 또는 강화입자의 질량
a	: 가속도
V <sub>d</sub> , V <sub>g</sub>	: 액적 및 가스의 속도
C <sub>d</sub>	: 항력계수 (= 0.28 + 6 / Re <sup>1/2</sup> + 21 / Re)
Re	: Reynold's number (= V <sub>r</sub> d / ν <sub>g</sub> = dρ <sub>g</sub> V <sub>r</sub> / μ <sub>g</sub> )
V <sub>r</sub>	: 가스 와 액적간의 상대 비행속도 (= V <sub>g</sub> - V <sub>d</sub> )
d	: 액적의 직경
ν <sub>g</sub>	: 가스의 동점성 계수 (ν <sub>N2</sub> = 1.74 × 10 <sup>-5</sup> Kg / m · sec)
A <sub>c</sub>	: 액적 또는 강화입자의 단면적
g	: 중력 가속도 (= 9.8 m / sec <sup>2</sup> )
h	: 액적의 열전달계수
C <sub>d</sub> , C <sub>p</sub>	: 액적 및 강화입자의 비열
ΔH <sub>F</sub>	: 액적의 용융잠열 (Cu = 205.4 KJ / Kg)
T <sub>d</sub> , T <sub>g</sub>	: 액적 및 가스의 온도
S <sub>F</sub>	: 액적의 고상율
V <sub>p</sub>	: 강화입자의 체적율