

## 원심분무에 의한 Uranium Silicide 분산핵연료의 제조와 특성

김창규 · 김기환 · 국일현 · 강석중\*

한국원자력연구소

\*한국과학기술원 무기재료공학과

## Preparation and Characterization of Uranium Silicide Dispersion Nuclear Fuel by Centrifugal Atomization

Chang-Kyu Kim, Ki-Hwan Kim, Il-Hyun Kuk and Suk-Joong L. Kang\*

Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-606, Korea

\*Department of Ceramic Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received February 25, 1994)

**ABSTRACT** Two kinds of  $U_3Si$  powders and  $U_3Si$  dispersed nuclear fuel meats have been prepared by conventional comminution process and a newly developed rotating disk atomization process. In contrast to angular shape and broad size distribution of the conventionally processed powder, the atomized powder was spherical and showed narrow size distribution. For the atomized powder, the heat treatment time for the formation of  $U_3Si$  by a peritectoid reaction was reduced to about one tenth, thanks to microstructure refinement by rapid cooling of about  $5 \times 10^4$  K/s. The extruding pressure of atomized  $U_3Si$  powder and Al powder mixture was lower than that of comminuted  $U_3Si$  and Al powder mixture. The elongation of the atomization processed fuel meats was much higher than that of the comminution processed fuel meats and remained over 10% up to 80 wt% of  $U_3Si$  powder fraction in the fuel meats. It appears therefore that the loading density of  $U_3Si$  in fuel meat can be increased by using atomized  $U_3Si$  powder. The atomized spherical particles were randomly distributed, while the comminuted particles with angular and longish shape were considerably aligned along the extrusion direction. Along the transverse direction of the extrusion the electrical conductivity of the atomization processed fuel meats was appreciably higher than that of comminution processed fuel meats. This tendency became pronounced as  $U_3Si$  content increased. Because the thermal conduction which is believed to be proportioned to the electrical conduction in the nuclear fuel meats occurs in radial direction, the atomization processed fuel can be better used in research reactors where high thermal conductivity is required.

### 1. 서 론

핵연료 및 원자로재료의 조사성능평가, 방사성 동위원소 제조 및 중성자를 이용하는 재료물성분석 등의 목적으로 다목적 연구용 원자로(Multi-purpose Research Reactor)가 활용되고 있다. 다목적 연구용 원자로에 사용되고 있는 핵연료 중 현재도 이용되고 있고 앞으로도 이용도가 높은 핵연료는 알루미늄 기지에  $U_3Si$  입자가 분산된 물질이다. 이 핵연료는

$U_3Si$  분말과 알루미늄 분말과의 혼합물을 압출방법으로 성형하여 제조한다. 일반적으로  $U_3Si$  분말은 우라늄과 실리콘을 원료로 하여 유도가열방법으로 진공 또는 불활성 분위기에서 합금을 제조하고 합금괴를 열처리하여  $U_3Si$ 로 포석변태시킨 다음 분쇄하여 제조한다.<sup>1)</sup> 그러나  $U_3Si$ 는 질긴 성질을 갖고 있어서 분쇄에 의한 분말제조에는 기계장치 뿐만 아니라 조파쇄와 파쇄간의 분말처리 등 복잡한 처리공정이 필요하다. 또한 제조된  $U_3Si$  분말입자의

형태는 모서리가 비교적 많고 길쭉하면서 불규칙한 형상을 갖는다. 분말압출에 의한 핵연료 성형에서 모서리가 많은 단단한  $U_3Si$  핵연료 입자는 경도가 낮은 알루미늄 기지물질의 유동성을 저하시키는 역할을 한다. 또 예리한 모서리와 불규칙한 형상은  $U_3Si$  핵연료 분말 함량이 증가될수록 핵연료 입자와 알루미늄 계면에 기공을 형성하는 경향이 있으며 핵연료의 열전도성 및 기계적 특성의 방향 의존성을 심화시킨다.

본 연구에서는 이상의 문제점을 근본적으로 해결하기 위하여 원심분무방법을 이용하여 용탕으로부터 바로 구형의  $U_3Si$  분말을 제조하였다. 제조된 분말의 특성으로서 입자형태를 관찰하고 입자크기 분포를 측정하였으며 분말입자조직의 변화를 관찰하였다. 구형  $U_3Si$  분말과 파쇄된 부정형의  $U_3Si$  분말을 이용하여 핵연료를 제조할 때의 가공성형성과 각각의 핵연료 심재의 인장특성을 측정, 비교하였다. 또 핵연료 사용시의 중요 특성의 하나인 열전도도를 비교하기 위하여 압출방향과 횡방향의 전기전도도를 측정하였다. 작은 시편에 대한 정확한 열전도도 측정은 실제로 어렵기 때문에 핵연료에서와 같이 열이 주로 자유전자에 의하여 전달되는 경우<sup>2)</sup> 전기전도도를 측정함으로써 시편간의 상대적 열전도도를 비교할 수 있다.

## 2. 실험방법

가공파쇄방법과 원심분무방법으로 두 종류의  $U_3Si$  분말을 제조하였다. 파쇄  $U_3Si$  분말을 제조하기 위하여 실리콘금속과 감손우라늄을 원료로 하여 DU-3.9 wt%Si의 장입조성( $U_3Si$  조성: U-3.78 wt%)으로 진공 유도가열 방법으로 용해한 다음 Cu주형을 사용하여 주조하였다. 주조물을 800°C에서 72시간 동안 진공열처리하여  $U_3Si$ 로 변태시키고 NC선반에서 U-drill 가공방법으로 파쇄한 다음 shatter box로 충격 분쇄하여 파쇄  $U_3Si$  분말을 제조하였다. 구형의  $U_3Si$  분말을 제조하기 위하여 원심분무장치를 제작하였다. 우라늄은 공기와 반응이 매우 심하므로 분무장치내에는 진공분위기 또는 불활성 분위기가 유지되도록 하였다. 유도가열방법으로 용융합금하고 노즐(nozzle)을 통하여 약 25,000 rpm으로 회전하는 원반에 용탕이 낙하되도록 하여 원심력에

의하여 분무되도록 하였다. 원심분무장치에는 원반 회전속도를 기록하는 장치를 내장하였으며 용탕의 낙하거리를 조정하기 위하여 상하좌우방향으로 원반을 이동시킬 수 있는 장치를 설치하였다. 분말의 크기와 분포를 체가름(sieving)에 의한 분급 또는 광산란(light diffraction)방법으로 측정하였다. 분말 입자의 미세조직은 분말을 예폭시로 마운팅하고 연마한 다음 70 ml  $H_2O$  + 72 ml  $HNO_3$ (70%) + 1 ml HF(47%) + 3.4 g citric acid 용액을 적신 솜뭉치로 부식시켜서 관찰하였다. 광학현미경 및 주사전자현미경으로 조직을 관찰하였으며 EDX(Energy Disperse Spectroscopy) 또는 X-선 회절로 상분석하였다. 또한 원심분무의 급속응고효과가 포석열처리에 미치는 영향을 알아보기 위하여 원심분무된 분말을 석영관에 진공봉입하고 시간별로 열처리한 미세조직을 관찰하였다.  $U_3Si$  입자형태와 배합비에 따른 핵연료 성형성을 비교하기 위하여 V-mixer를 사용하여 알루미늄과  $U_3Si$  분말을 혼합한 다음 200톤 용량의 수직압출기로 약 400°C로 예열된 혼합분말을 직경 10 mm 다이에서 압출속도 20~25 mm/s, 압출비 33으로 압출성형하면서 압출압력을 측정하였다. 압출중에는 분말의 산화를 방지하기 위하여 Ar 분위기를 유지시켰다. 압출봉을 ASTM E-8<sup>3)</sup>의 small size round test 시편 규격으로 가공하여 MTS model 810 (10 ton 용량) 재료시험기로 인장성질을 측정하였다. 인장속도는  $8.3 \times 10^{-3}$  mm/s로 하였으며 항복강도, 인장강도, 연신율을 측정하였다. 시편의 변형량은 1 인치 촛점거리의 길이변화로 부터 구하였다. 핵연료 봉내의  $U_3Si$  입자 배열상태를 알아보기 위하여 압출방향과 횡방향으로 절단한 단면을 광학현미경과 SEM으로 관찰하였다.

핵연료의 압출방향 전기전도도는 약 10 cm 이상 길이로 핵연료 봉을 절단가공하여 측정하였다. 시편의 양단에 Hewlett Packard사의 power supply 6033 A로 정전류를 통전하고, 시편의 양단내에 10 cm 거리인 두점에서의 전압을 Keithley 제품의 nano-voltmeter로 전압을 측정하여 시편의 칫수, 통전한 정전류, 측정된 전압으로부터 전기전도도를 계산하였다. 횡방향의 시편은 직경이 10 mm인 압출봉을 milling하여 가공한 길이가 9 mm, 사각두께가 2.5 mm인 사각봉이었다.

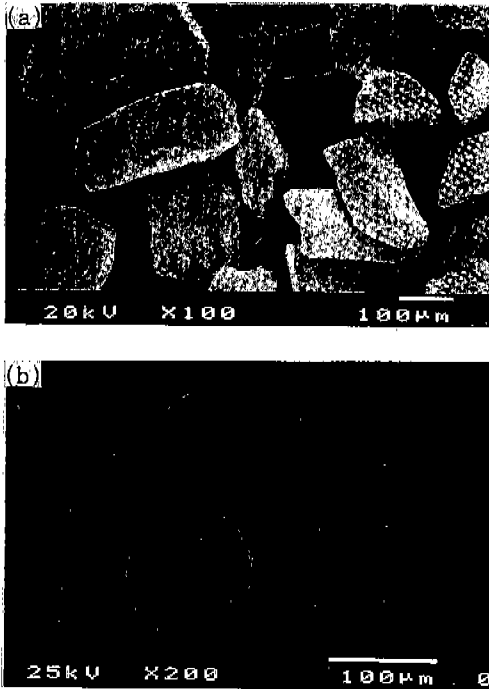


Fig. 1. Particle shapes of (a) comminuted and (b) atomized  $U_3Si$  particles.

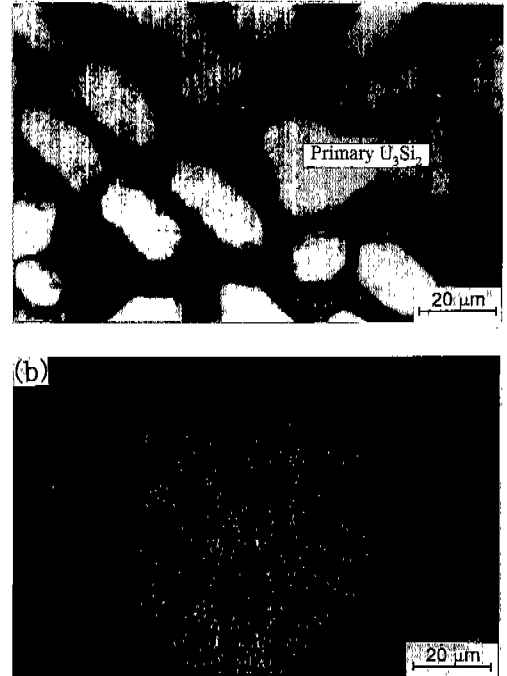


Fig. 2. Microstructures of (a) cast  $U_3Si$  ingot and (b) atomized  $U_3Si$  particle.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1. 분말특성

기계가공파쇄와 충격분쇄방법으로 제조된  $U_3Si$  분말은 그림 1과 같이 입자의 형태가 길쭉한 형상 (aspect ratio 1.4)이고 모서리가 있는 각진 형태이다. 길쭉한 형상은 선반에서 U-drill가공파쇄에 의한 것으로 충격파쇄만으로 제조한 분말입자의 표면은 각지고 불규칙하나 등방적이다. 원심분무방법으로 제조된  $U_3Si$  분말입자는 대부분 구형으로 원심분무된 용탕적의 표면장력에 의하여 표면이 대체로 매끄럽다. 분산핵연료에서는 사용중 알루미늄 기지와와의 반응에 의하여 팽윤 (swelling) 현상이 발생하기도 한다. 따라서 핵연료의 팽윤을 억제하기 위하여는 같은 입자부피에 대하여 되도록 비표면적이 작아야 한다. BET 방법으로 두 종류의 분말에 대하여 비표면적을 분석한 결과 파쇄분말의 비표면적이 원심분무분말보다 약 50% 정도 컸다. 결국 팽윤현상의 억제라는 점에서 원심분무 구형분말이 유리함을 알 수 있다.

광산란(light diffraction) 방법으로 측정된 분무

$U_3Si$  분말의 입자분포는 Gaussian 분포를 나타내었으며 평균입자크기는  $100 \mu m$ , 중앙입자크기  $101 \mu m$ , mode값  $111 \mu m$ 이었다. 핵연료에서 적정  $U_3Si$  입자크기는  $45 \sim 150 \mu m$ 로서<sup>4)</sup> 입자크기가 너무 작으면 비표면적이 증가하여 팽윤이 심해지며 입자크기가 너무 크면 핵연료 입자내의 온도가 과도하게 증가하기 때문이다. 원심분무된 입자의 경우, 상기 입자크기 범위내에 약 98%가 들어 있었다. 반면 파쇄방법으로 제조하면 일반적으로 -325 mesh의 미세한 분말이 약 15% 정도 있게 된다. 따라서  $U_3Si$  분말의 수율면에서도 원심분무구형 분말이 우수하다.

원심분무된 분말입자의 미세조직은 급속응고효과에 의하여 그림 2와 같이 합금괴의 미세조직보다 미세하였다. 합금주괴에서 초정  $U_3Si_2$  입자의 크기는 약  $15 \mu m$ 이지만 원심분무 분말입자에서는 대체로  $2 \mu m$  이하였다. 원심분무입자조직의 초정입자는 분말입자 크기가 작을수록 더 미세화되었는데 입자의 크기가 작을수록 급냉효과가 증가되었기 때문이다. 이러한 원심분무법에 의한 초정입자의 미세화로 초

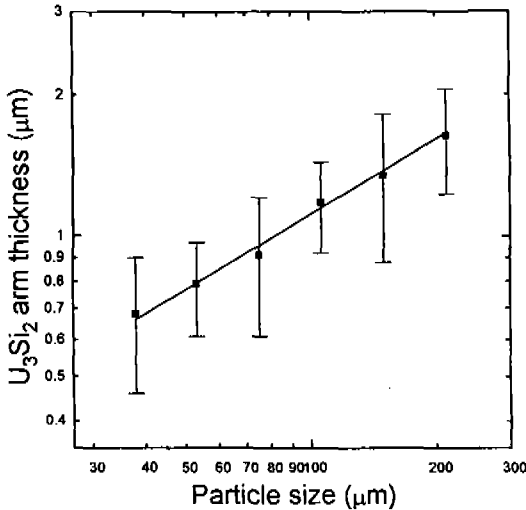


Fig. 3. Relation between primary U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> arm size and atomized particle size.

정 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>와 기지 우라늄으로부터의 U<sub>3</sub>Si 포석변태는 약 6시간에 완전히 일어났으나 합금주괴에서의 포석변태는 약 72시간 후에 완료되었다. 따라서 분무 입자를 사용할 경우 열처리시간을 크게 단축시킬 수 있었다. Horata 등<sup>5)</sup>은 급냉응고 중에 석출하는 2차 수지상의 간격(secondary arm spacing)과 분말입자 직경의 관계에서 각 log값은 직선적인 식 (1)과 같이 비례관계가 있다고 하였다.

$$\log(S_{II}) = 1.4n \log(d) + C \quad (1)$$

여기서 S<sub>II</sub>는 2차 수지상의 간격, d는 분말입자의 직경, n과 C는 상수이다. 그림 3은 분말입자의 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 초정입자 또는 수지상크기(dendrite arm thickness)를 측정된 결과와 입자크기와의 관계를 각각 log scale로 나타낸 것이다. 그림에서 거의 직선적인 비례관계가 있어 Horata의 계산식이 적용될 수 있음을 볼 수 있다. 원심분무 분말입자의 냉각속도는 합금 주괴의 냉각속도가 측정가능한 범위에서 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 초정입자크기와 냉각속도를 식 (1)에 대입하여 외삽(extrapolation)방법으로 원심분무분말 입자의 냉각속도를 계산하였다. 핵연료에 적합한 입자크기인 100 μm 구형분말에서 관찰된 초정 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 입자크기인 약 1 μm의 경우, 냉각속도는 약 5×10<sup>4</sup> K/s인 것으로 계산되었다.

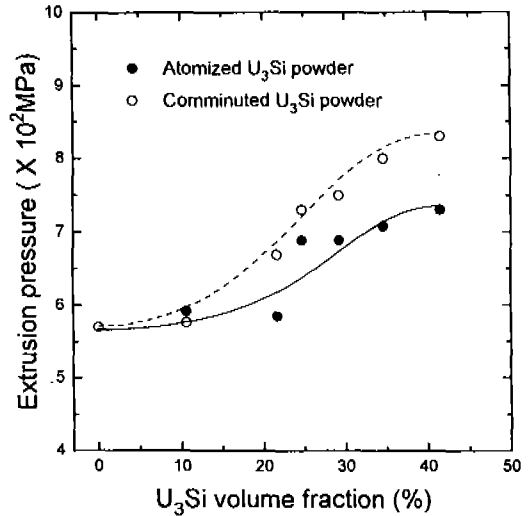


Fig. 4. Variations of extrusion pressure with U<sub>3</sub>Si powder fraction for two kinds of U<sub>3</sub>Si powders.

### 3.2. 핵연료 가공성

그림 4는 U<sub>3</sub>Si 입자형태와 배합비에 따른 압출압력의 변화를 나타낸 결과이다. U<sub>3</sub>Si 분말배합비가 증가할수록 전반적으로 압출압력이 증가하나 원심분무핵연료가 과쇄분말핵연료보다 낮은 압력에서 압출성형되었다. 그 차이는 배합비가 증가할수록 증가하였다. 즉 구형 U<sub>3</sub>Si 분말을 사용함으로써 소성가공성이 향상되었다. U<sub>3</sub>Si 분말과 알루미늄분말의 혼합분말의 압출성형에서는 알루미늄의 강도가 U<sub>3</sub>Si의 강도보다 현저히 낮기 때문에 알루미늄분말이 소성가공되며 U<sub>3</sub>Si 입자는 거의 변형되지 않고 입자형태를 그대로 유지한다. 따라서 알루미늄은 U<sub>3</sub>Si 입자사이에서 기지를 이루면서 소성변형되는데 모서리진 분말입자사이에서 기지물질인 알루미늄의 변형은 압출다이가 평평하며 직각인 압출과 유사하고 구형분말입자 사이에서의 변형은 경사진 다이에서의 압출과 유사하다고 볼 수 있다. Eisbein<sup>6)</sup>은 압출다이의 경사각도에 따라 최대 40%까지 압출압력의 차이가 있다고 보고한 바 있는데 이 원리에 의하여 분말입자의 형태에 따라 압출압력의 차이가 나타난 것으로 생각된다. U<sub>3</sub>Si 분말배합비가 높을수록 입자사이의 소성변형거동은 압출비가 높은 압출과 같기 때문에 압출변형경사각 영향이 더 두드러지게 나타나 입자형태에 대한 압출압력차가 증가된다고 사료

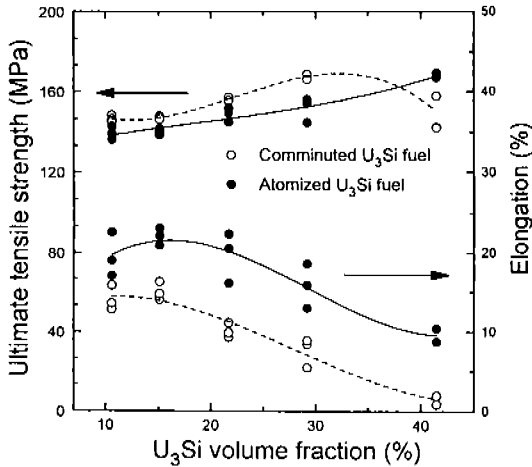


Fig. 5. Tensile properties at room temperature of two kinds of fuel meats with various U<sub>3</sub>Si powder fractions.

된다.

그림 5는 상온 인장강도 및 연신율을 나타낸 것으로 U<sub>3</sub>Si 분말 배합비가 증가함에 따라 인장강도는 강도가 높은 U<sub>3</sub>Si 입자에 의한 강화효과로 전반적으로 증가하며 파쇄분말로 제조한 핵연료 심재의 인장강도가 원심분무분말로 제조한 핵연료 심재의 인장강도 보다 높다. 그림 6은 압출방향단면과 횡방향단면의 미세조직이다. 구형의 원심분무입자는 대체로 균질하게 방향성이 없이 분포되었으나 길쭉한 파쇄분말입자는 대부분 압출방향으로 배열되어 있다. 방향성을 갖고 배열된 길쭉한 파쇄분말입자는 핵연료 봉의 길이 방향으로 Al 기지물질을 강화시키는 효과가 있어 파쇄분말 핵연료가 더 높은 강도를 나타낸 것으로 생각된다. 그러나 U<sub>3</sub>Si 분말 배합비 80%에서는 파쇄분말핵연료의 인장강도가 크게 감소되어 원심분무핵연료의 인장강도보다 더 낮다. 이 결과는 U<sub>3</sub>Si 분말의 함량이 증가함에 따라 압출시에 U<sub>3</sub>Si 분말입자사이의 기지물질인 알루미늄의 변형량이 더 커져서 파쇄분말핵연료의 경우 요철이 심한 입자표면까지 기지상이 충전되기가 어렵고 따라서 원심분무핵연료보다 기공이 더 많이 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. U<sub>3</sub>Si 분말배합비 29.2 vol% (70 wt%)까지는 두 종류의 핵연료 모두 기공이 1.5% 미만으로 차이가 거의 없으나 분말배합비 41.5 vol% (80 wt%)에서는 모두 기공이 증가되면서 파쇄분말의 핵연료가 4.6 vol%로 되어 원심분무핵연료의 2.8

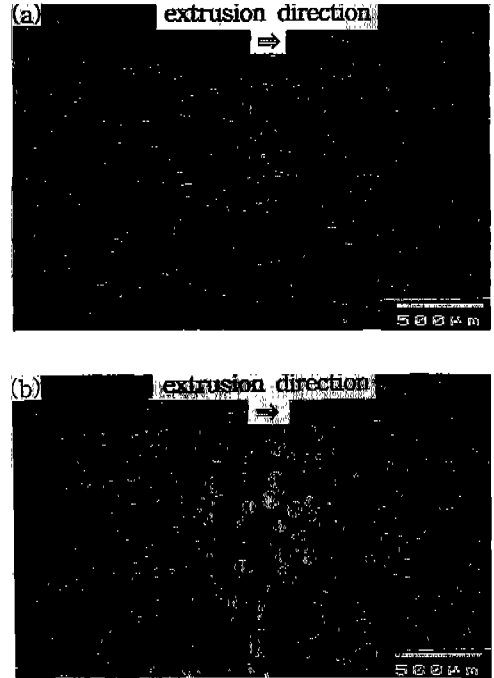


Fig. 6. Longitudinal cross sections of (a) comminuted and (b) atomized U<sub>3</sub>Si particle dispersion fuel meats.

vol%보다 많았다.

연신율은 U<sub>3</sub>Si 량이 15.1 vol%(50 wt%)까지 변함이 없으나 21.7 vol%(61 wt%) 이상에서 크게 감소됨을 보였다(그림 5). 입자형태별로 비교하면 15.1 vol%(50 wt%)까지 원심분무핵연료의 연신율이 약 23% 정도로 파쇄분말핵연료의 연신율 약 15%로 보다 월등히 높다. 분말함량이 그 이상으로 높아질수록 연신율은 거의 같은 정도로 감소되어 분말배합비 80 wt%에서 원심분무핵연료의 연신율은 약 10% 정도로 되며 파쇄분말핵연료의 연신율은 약 2%로 아주 취약하였다. 핵연료 제조시 연신율은 보통 5~10% 정도는 되어야 하므로 파쇄분말로 핵연료를 제조할 경우 U<sub>3</sub>Si의 량을 약 70 wt%까지 밖에 높일 수 없는 반면 원심분무구형 분말을 사용할 경우에는 U<sub>3</sub>Si 분말 80 wt% 연료봉의 연신율이 파쇄분말 70 wt% 연료봉의 연신율보다 높아 80 wt% 이상까지도 U<sub>3</sub>Si 분말배합비를 증가시킬 수 있을 것이다. 따라서 분무분말을 사용함으로써 U<sub>3</sub>Si 함량을 높인 핵연료의 제조가 가능할 것이다.

### 3.3. 전기전도 특성

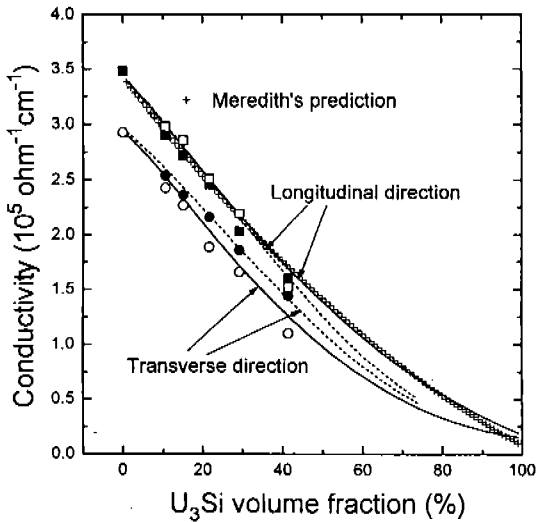


Fig. 7. Measured electrical conductivities of  $U_3Si$ -Al dispersion fuel meats: longitudinal (■) and transverse (●) conductivities of atomization fuel meats; longitudinal (□) and transverse (○) conductivities of comminution fuel meats.

그림 7은 분말입자의 종류와 배합비에 따른 핵연료의 전기전도도를 측정된 결과이다. 전반적으로 압출방향의 전기전도도가 횡방향의 전기전도도 보다 높다. Staniek<sup>7)</sup>이 전자투과현미경으로 관찰한 알루미늄분말의 압출물 조직에 의하면 알루미늄분말 표면의 산화물 두께는 약 50  $\mu m$ 로 압출시에 끊어져 띠(stringer) 형태로 되었으며 알루미늄 분말입자가 압출방향으로 길게 변형되면서 서로 융착된 사이에 존재하였다. 따라서 그림 7과 같이 핵연료 심재가 방향별로 전도도 차이가 있는 것은 주로 알루미늄 분말입자 산화물피막이 압출방향으로 분산되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 기공 및 미세한 이물질도 압출방향으로 존재함에 따라 전기전도도 차이가 나타난 것으로 판단된다.

압출방향으로의 전기전도도는 파쇄분말 핵연료가 원심분무분말핵연료보다 다소 높다. 이것은 길쭉한 입자가 길이 방향으로 배열되어 전자의 흐름을 방해하는 단면적이 구형입자보다 작기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 높은 배합비에서는 원심분무핵연료가 더 높은 전기전도도를 보였는데 앞에서 기술한 바와 같이 파쇄분말 핵연료에서 기공이 많이 형성되었기 때문인 것으로 생각된다. 횡방향의 전기전도

도는 원심분무 핵연료가 파쇄분말 핵연료 보다 더 높으며  $U_3Si$  분말배합비가 증가될수록 그 차이가 더 증가됨을 보인다. 이러한 결과는 압출방향으로 배열된 길쭉한 입자가 횡방향의 전자흐름에 대한 방해면적이 구형입자가 보다 더 넓기 때문인 것으로 생각된다. 또한  $U_3Si$  분말 배합비가 높을수록 그 차이가 증가하는 것은 전자흐름에 방해하는 면적이 분산분말함량이 높을수록 커지고 파쇄분말핵연료의 기공량이 더 증가되었기 때문인 것으로 생각된다.

이상의  $U_3Si$  분말형태에 따른 배열을 감안하여 분쇄분말의 경우 직육면체의 입자가 엮물리는 배열과 일열배열의 중간정도로 분포된 것으로 하고 구형분말인 경우에는 무질서하게 분포되었다고 가정하여 직열, 병렬합성방법(serial and parallel addition method)<sup>8)</sup>으로 상대적인 전기전도도를 계산하였다.<sup>9)</sup> 그림 7에서 실선과 점선들을 컴퓨터계산 결과로서 기존의 입자의 형태와 분포를 감안하지 않은 Meredith식<sup>10)</sup>보다 입자배열에 따른 실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

실제 봉상핵연료의 사용에 있어 핵연료 내부의 열은 반경방향 즉 압출에 수직한 방향으로 발산되므로 횡방향으로의 열전도도도 중요하다. 원심분무 구형분말의 경우 전기전도도가 더 높다는 것은 열전도도가 더 높아 핵연료의 성능이 더 우수할 것임을 의미한다. 따라서 기계적 성질, 전도도를 고려할 때 원심분무된  $U_3Si$  구형분말은 기존의 파쇄분말보다 핵연료의  $U_3Si$  함량을 높이고 사용성능을 향상시킬 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

$U_3Si$  입자가 알루미늄 기지상내에 분산된 연구용 원자로의 핵연료는 이제까지 파쇄, 분쇄 공정을 거쳐 제조되어 왔다. 본 연구에서는 기존  $U_3Si$  분말제조 공정상의 어려움을 극복하고 보다 우수한  $U_3Si$  분말과 핵연료를 제조하기 위하여 원심분무법을 이용하여 구형의  $U_3Si$  분말을 제조하였으며 분말특성과 핵연료 가공, 성능특성을 측정하였다. 제조된 구형  $U_3Si$  분말은 모서리가 많고 모양이 길쭉하고 불규칙한 기존 파쇄분말에 비하여 입도분포가 좁고 비표면적이 2/3 정도로 낮았다. 이 결과는  $U_3Si$  분말 회수율을 증가시킬 수 있고 핵연료 사용시에 핵연료 입자와

기지의 열반응에 의한 팽윤을 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다. 또 구형  $U_3Si$  분말은 급속응고효과에 의하여 조직이 미세화되었으며  $U_3Si$  포석반응을 위한 열처리시간이 약 1/10 정도로 단축되었다. 제조된 구형  $U_3Si$  분말을 이용하였을 때  $U_3Si$  분말과 알루미늄 분말 혼합물의 압출압력이 더 낮았으며 압출봉의 연신율은 증가되었다. 따라서 기존 분말에 비하여 보다 우라늄함량이 높은 핵연료를 제조할 수 있을 것으로 판단된다. 원심분무  $U_3Si$ 를 이용하여 제조된 핵연료의 전기전도도는, 압출과 수직인 방향인 횡방향으로 파쇄분말 핵연료의 전기전도도 보다 더 높았으며 그 차이는  $U_3Si$  배합비가 높을수록 컸다. 열전달이 전자의 이동에 의해 주로 결정되는 알루미늄 기지의 핵연료재료에서 전기전도도는 열전도도와 비례하므로 구형  $U_3Si$  분말을 이용할 경우 핵연료의 성능향상이 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. D. F. Sears, L. C. Berthiaume and L. N. Herbert: in *Proceedings of International RERTR Meeting*, Gatlinberg, Tennessee, USA, ANL/RERTR/TM-9 (1986) 247
2. I. J. Hastings, J. R. Macewan and L. R. Bourque: *J. of the Am. Ceram. Soc.*, **55** (1972) 240
3. Annual Book of ASTM Standards, 03.01 (1987) 176
4. J. C. Wood, M. T. Foo, L. C. Berthiaume, L. N. Herbert, J. D. Schaefer and D. Hawley: in *Proceedings of International RERTR Meeting*, Argonne, Illinois, USA, ANL/RERTR/TM-6 (1984) 167
5. A. Horada, T. Kato and K. Kusaka: *Progress in Powder Metallurgy*, **41** (1985) 479
6. K. Laue and H. Stenger: *Extrusion, American Society for Metals*, (1976) 55
7. G. Staniek: *Observation of Oxide Skin in Powder Metallurgy Aluminum Alloys*, Report No. AFWAL-TR-83-4157, USA (1983)
8. A. Simpson and D. Struckers: *Building Services Engineering Research Technology*, **7** (1986) 78
9. C. K. Kim: *Preparation and Characterization of Uranium Silicide Dispersion Nuclear Fuel by Centrifugal Atomization*, Ph. D. Thesis, KAIST (1994)
10. R. E. Meredith and C. W. Tobias: *J. Electrochemical Soc.*, **108** (1961) 286