

자전 고온 반응 합성법에 의한 AlN 분말의 제조

I. AlN 분말의 제조

신재선 · 안도환 · 김석윤 · 김용석

홍익대학교 금속 재료 공학과

(1996년 5월 28일 접수)

Fabrication of AlN Powder by Self-propagating High-temperature Synthesis

I. Synthesis of AlN Powder

Jae-Sun Shin, Do-Hwan Ahn, Suk-Yoon Kim and Yong-Seog Kim

Dept. of Metallurgy and Mater. Sci., Hong-Ik Univ.

(Received May 28, 1996)

요 약

질화 알루미늄(AlN)을 SHS(Self-propagating High-temperature Synthesis: 자전 고온 반응 합성법)법에 의하여 제조하였다. AlN은 알루미늄 분말과 질화 알루미늄 분말을 혼합하여 합성하였으며, SHS 반응시 AlN의 합성에 영향을 주는 주요 변수로는 성형 밀도, 반응 가스 압력, 반응 회석제인 AlN의 함량, 알루미늄 분말의 크기 등이 고려되었다. 또한 완전한 AlN을 합성하는데는 AlN의 반응 회석제와 반응 가스인 질소 압력을 각각 50%와 0.8 MPa를 가하였을 경우 가능하였다. 반응된 AlN의 크기와 순도는 상업적으로 사용되는 탄소 환원 질화법으로 합성된 AlN과 유사하였다.

ABSTRACT

The aluminum nitride was synthesized by the self-propagating high-temperature synthesis (SHS). The synthesis was used aluminum powder mixed with AlN powder as reactant and the control factors affected to synthesis were considered compact density, pressure of reaction gas, AlN diluent content and aluminum powder size. The SHS reaction conducted with a reactant containing 50% AlN diluent under 0.8 MPa nitrogen gas pressure yielded a complete conversion of aluminum powder to AlN powders. The size and purity of AlN produced were found to be comparable with that of AlN produced by the carbothermal nitrogen method.

Key words: SHS, AlN, Aluminum, Compact density, Nitrogen pressure, Diluent, Catalyst

I. 서 론

질화 알루미늄은 높은 열전도도(single crystal : 320 W/mK) 및 전기 저항성($\rho > 10^{13} \Omega\text{cm}$), 비교적 낮은 유전 상수($K=8.9$ at 1 MHz at room temperature), Si와 유사한 열팽창 계수 등의 특징을 가지고 있으며 이러한 특징으로 인하여 고집적 기판 재료로의 사용이 매우 기대되고 있다^{1,2}. 특히 반도체가 고집적화 됨에 따라 단위 부피당 방출되는 열량이 증가하여 기존에 쓰이는 기판 재료로는 기기의 신뢰성을 유지하기가 어려워지고 있다. 따라서 기판내에 발생하는 열을 외부로 쉽게 방출할 수 있는 재료가 요구되고 있으며 세라믹 재료 중 비교적 높은 열전도도를 가지는 질화 알루미늄의 적용이

기대되고 있다.

질화 알루미늄을 합성하는 방법에는 직접 질화법, 탄소 환원 질화법, 부유 질화법 등이 있으나 상업적으로는 직접 질화법과 탄소 환원 질화법이 주로 사용되고 있다^{3,4}. 직접 질화법(Direct Nitridation Method)은 알루미늄 분말을 질소나 암모니아 가스 분위기에서 약 1200~1500°C로 가열하여 질화시키는 방법으로 반응 장치가 간단하고 손쉬운 공정이나 완전한 질화 반응이 어렵기 때문에 균질화 처리 등의 후처리 공정이 필요한 번거러움이 있다. 탄소 환원 질화법(Carbothermal Reduction Method)은 알루미늄 분말과 과잉의 탄소를 혼합한 후 질소 분위기하에서 1700~1800°C로 가열하여 수 시간 동안 유지시켜 합성하는 방법이며 높은 반응 온도와

순수한 질화 알루미늄을 얻기 위해서는 부가적인 질화 단계가 요구되어 생산 단가가 높은 편이다.

고온 자전 반응 합성법(Self-propagating High-temperature Synthesis ; SHS)은 높은 에너지 효율과 빠른 생성 속도 및 기존의 방법에 비해 고순도의 생성물을 얻을 수 있다는 장점으로 인하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 최근에는 이 방법으로 인하여 치밀화 된 질화 알루미늄 분말을 합성하기도 하였다⁹⁾. 이 연구에서는 반응대에 의해 높은 에너지가 전달되어 반응이 지속되는 반응대 전파법이 이용되었다. 그러나 이 연구에서는 약 100 MPa의 매우 높은 질소 압력을 가압하여 질화 알루미늄을 합성하였으며, 이것으로 인하여 이 방법은 실험실적인 적용에 그치고 있는 것이 사실이다. 따라서 보다 실용적이고 생산적이기 위해서는 약 1 MPa 이하의 비교적 저압의 질소 압력에서 질화 알루미늄의 생성이 가능해야 할 것이다.

SHS 반응시 알루미늄을 완전히 질화 반응시키기 위해서는 반응 가스 압력, 성형 밀도, 반응 온도, 반응 촉매제 등이 공정 변수로 작용하게 된다. 반응 가스인 질소는 반응물의 기공을 통하여 반응대에 전달하게 된다. 따라서 반응 가스를 반응 제면에 공급하는 속도가 반응에 의해서 소모되는 속도보다 클 수 있도록 반응 가스 압력을 유지하여야 한다. Skibska¹⁰⁾ 등은 반응물의 기공도가 증가할수록 Si이 Si₃N₄로 전환되는데 필요한 질소 가스 압력을 줄일 수 있다고 주장하였다. 따라서 질화 알루미늄을 합성시키기 위해서는 반응물의 기공도와 반응 가스 압력 사이에 적절한 조건을 조절해야 할 것이다.

SHS 반응에서의 반응 속도는 매우 빠르기 때문에 질화 알루미늄의 합성시 반응 온도는 거의 질화 알루미늄의 단일 반응 온도에 도달하게 된다(4470K). 그러나 질화 알루미늄의 승화 온도는 2670K이므로 질화 반응을 일으킬 경우 질화 알루미늄의 상당 부분은 기상으로 존재하게 된다. 기체상의 질화 알루미늄 가스의 파괴화도에 따라 질화 알루미늄은 원형 또는 휘스커 형태로 응축하게 된다. 따라서 균일한 질화 알루미늄 분말을 얻기 위해서는 반응 온도가 질화 알루미늄의 승화 온도를 넘지 않아야 할 것이다. SHS 반응시 반응 온도는 질화 알루미늄을 희석제로 첨가하여 조절할 수 있으며, 따라서 질화 알루미늄 희석제의 함량이 질화 알루미늄 분말의 형상에 영향을 미치게 될 것이다.

Haussonne⁷⁾ 등은 알루미늄 분말에 LiCl를 첨가하여 질소 분위기에서 직접 질화법으로 질화 알루미늄을 제조하였다. LiCl를 반응 촉매제로 사용하여 질화 반응시 알루미늄 분말 표면에 생성되는 질화 알루미늄 반응층의

부동태화를 방지하였으며 그것으로 인하여 비교적 낮은 온도인 약 800~1200°C에서 질화 알루미늄 분말을 합성하였다. 따라서 반응 촉매제를 첨가함으로써 SHS 반응시 합성되는 질소 가스 압력을 낮출 수 있을 것이다.

본 연구에서는 반응 희석제, 질소 가스 압력, 반응물의 성형 밀도, 알루미늄 분말의 크기, 반응 촉매제 등의 공정 변수를 조절하여 적절한 질화 알루미늄의 합성 조건을 구하고자 하였다.

2. 실험방법

알루미늄 분말과 질화 알루미늄 분말을 알루미늄과 불과 함께 spex mill에서 약 3시간 동안 건식 혼합하였다. 알루미늄과 불과 분말과의 무게비는 약 1 : 10을 유지하였다. 본 연구에서는 각각 5 μm, -325 mesh, -100+200 mesh, -40 mesh 크기의 알루미늄 분말(Cerac, USA)을 사용하였으며, 반응 희석제인 질화 알루미늄 분말(Tokuyama Soda, Japan)은 평균 입도 1.5 μm를 사용하였다. 각 분말에 대하여 입도 분석기(Model 22, Fritsch Co Japan)를 이용하여 입도 분포를 알아보았으며 Table 1에 나타내었다. 혼합한 분말은 graphite 반응기에 적용한 후, 성형 밀도를 반응기를 가볍게 두드려(tapping) 조절하였다. 이 때 성형 밀도는 10~45%로 변화시켰다. Fig. 1은 본 실험에 사용한 반응 장치의 모식도이다. 반응은 칸탈선으로 점화시켰으며 반응 온도는 pyrometer와 thermocouple을 사용하여 측정하였고, 질소 가스 압력은 0.1~1 MPa까지 변화시키며 반응시켰다. 반응 속도는 혼합 분말에 일정 거리 간격으로 thermocouple을 장입하여 thermocouple간의 거리를 각 thermocouple이 최고 온도에 도달한 시간의 차로 나누어서 계산하였다. 반응

Table 1. The Average Particle Size of Aluminum and Aluminum Nitride Used in This Study. The Particle Size was Analyzed by the Laser Diffraction Particle Size Analyzer (Model 22, Fritsch Co, Japan).

Powder	Mean Size (μm)	Powder Size in Cumulative %	
		98%	2%
Al 5 μm	2.1	15.77	0.43
-325 mesh	10.1	56.22	1.34
-40 mesh	34.02	160.22	6.99
-100+200 mesh	134.7	550	58
AlN	1.5	8.7	0.3

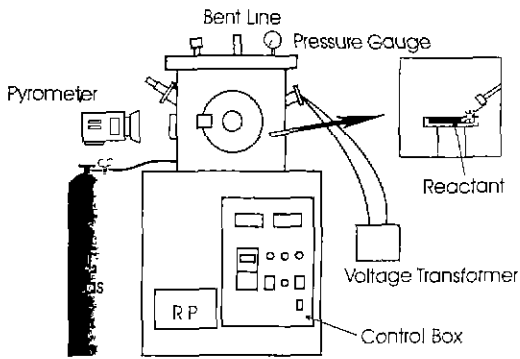


Fig. 1. A schematic diagram of the experimental setup used in this study.

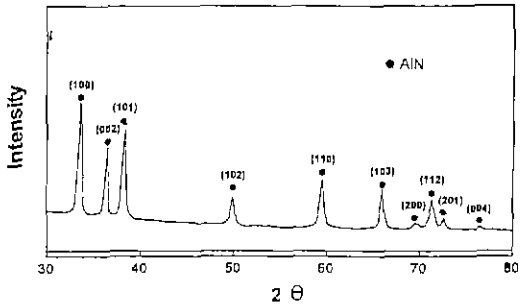


Fig. 2. XRD patterns of the SHS reaction product under 0.8 MPa nitrogen pressure. The AlN diluent content was 50% and compaction density was 25%TD.

물의 미세 구조 및 성분은 SEM, XRD 등으로 분석하였으며 반응물의 산소 및 질소 함량은 LECO TC-436으로 분석하였다. 반응된 질화 알루미늄의 입도를 알아보기 위해 반응물을 약 1시간 동안 ball mill한 후 레이저 입도 분석기를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 성형 밀도의 SHS 반응에 대한 영향

반응물의 성형 밀도를 이론 밀도(TD)의 10~45%까지 5% 단위로 변화시키면서 반응시켰다. 성형 밀도가 25%TD일 때 0.8 MPa의 질소 압력하에서 반응이 안정하게 전파되었다. 이 때의 반응 회석제인 AlN의 함량은 50로 유지하였다. XRD분석 결과 Fig.2에서 볼 수 있듯이 완전한 AlN으로의 전환이 이루어졌음을 알 수 있었다. 성형 밀도를 10%TD 이하로 감소시켰을 경우 SHS 반응은 불안정하게 되어 완전히 전파되지 못하고 중단되었다. 반면에 성형 밀도를 40%TD 이상으로 증가시켰을 경우

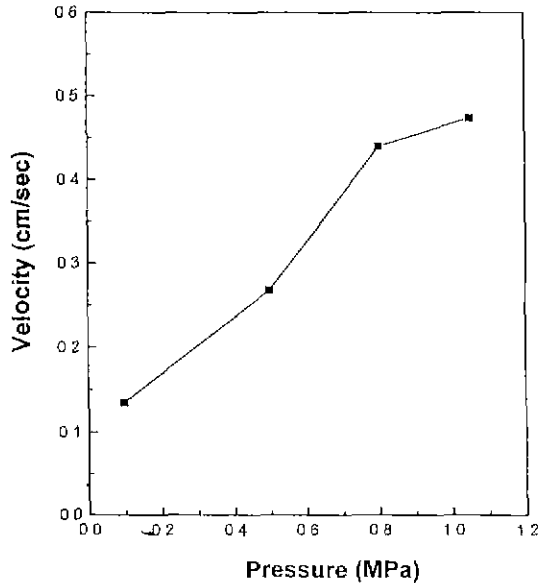


Fig. 3. The SHS reaction front velocity as a function of the nitrogen gas pressure. The AlN diluent content was 50% and compaction density was 25%TD

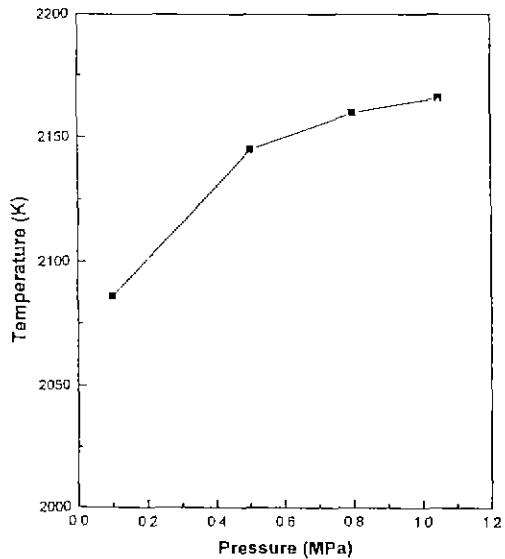


Fig. 4. Combustion temperature of the SHS reaction at different nitrogen pressure.

에는 반응물은 쉽게 점화되지 않았으며 XRD 분석 결과 반응 생성물에 미반응된 금속 알루미늄이 남아 있는 것으로 나타났다. 이것은 반응열의 전달을 위한 반응물의 접촉 면적과 질소 가스의 반응물로의 침투 여부에 관계되는 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에 있어서는

성형 밀도를 약 25%TD로 고정하였다.

3.2. SHS 반응시 질소 가스 압력의 영향

반응 가스 압력을 0.1~1 MPa까지 변화시켜 반응 온도와 반응 속도를 측정하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 반응 속도는 반응 가스 압력에 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있었다. 반응 온도는 반응 가스 압력이 0.5 MPa에서 1.0 MPa로 증가함에 따라 2140K에서 2170K 정도로 약 30℃ 정도 약간 증가하였다(Fig. 4). Fig. 5는 질소 가스 압력을 변화시켰을 때 생성된 반응물의 내부 SEM 사진이다. 반응 가스 압력이 0.1 MPa와 0.5 MPa일 경우 구형의 미반응된 알루미늄 분말이 관찰되었다(Fig. 5(a), 5(b)). 0.5 MPa의 압력에서 합성하였을 경우 반응 생성물의 표면에는 미세한 AlN분말과 휘스커 형상의 AlN이 관찰되었다(Fig. 5(c)). 반응 압력을 0.8 MPa로 증가시켰을 경우 AlN으로의 완전한 전환이 이루어졌으며 미반응된 알루미늄은 관찰되지 않았다(Fig. 5(d)). 합성된 AlN은 약

0.5~3 μm의 입도 분포를 가졌으며 AlN분말이 부분적으로 소결된 듯한 형상이 보이기도 하였다.

3.3. 반응 희석제의 반응 온도에 대한 영향

AlN의 합성시 반응 희석제의 함량에 따르는 단일 반응 온도는 다음 식에 의하여 계산할 수 있다.

$$-(1-f)\Delta H_{f,298}^0 = \int_{298}^{T_{ad}} C_{p(AlN)} dT \quad (1)$$

이때, f는 반응 희석제인 AlN의 분율, $\Delta H_{f,298}^0$ 은 AlN의 형성 에너지이며 $C_{p(AlN)}$ 은 AlN의 열용량을 나타낸다^[11]. Fig. 6은 식 (1)을 이용하여 계산한 결과로서 반응 희석제의 함량이 증가할수록 단일 반응 온도는 감소하는 것을 알 수 있다. 반응 희석제의 함량이 40% 이하일 경우 단일 반응 온도는 AlN의 승화 온도보다 높게 되며, 희석제의 함량이 75% 이상으로 증가시켰을 경우에는 1800K 이하로 감소하게 된다. 한편 이 온도는 SHS 반응에서 안정적인 반응이 일어날 수 있는 최소 온도로 제시되고 있다^[2].

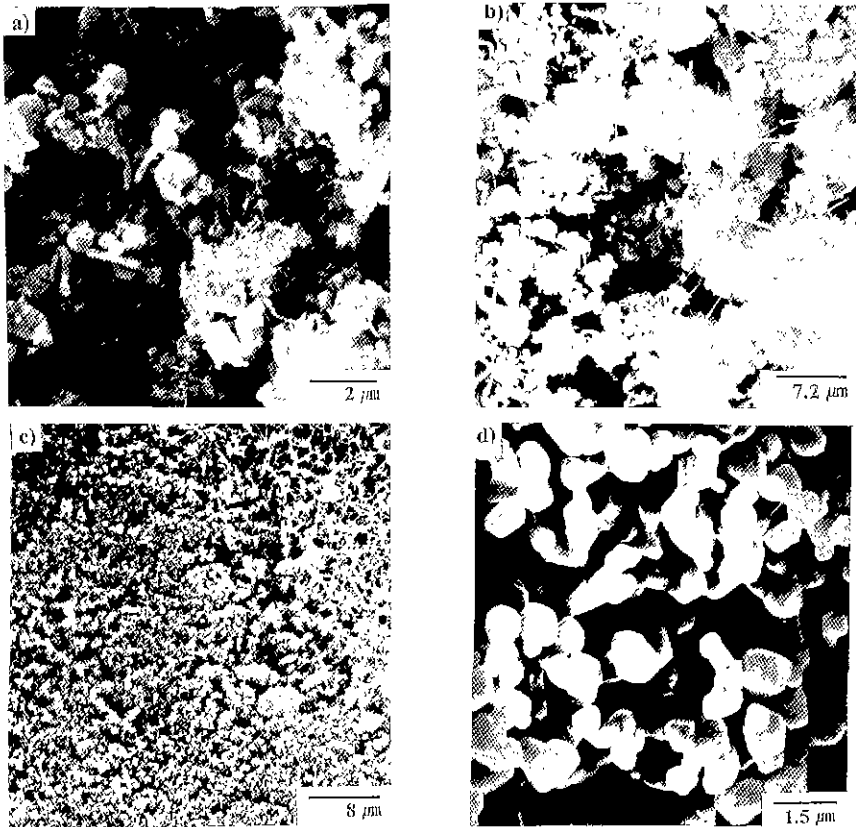


Fig. 5. Effect of the nitrogen gas pressure on the morphology of AlN products. (a) 0.1 MPa, (b) 0.5 MPa, (c) surface morphology of reaction product under 0.5 MPa, and (d) 0.8 MPa

따라서 본 연구에서 SHS 반응은 AlN 반응 회석제의 함량을 30~70%인 범위로 변화시켰고 질소 압력은 0.8

MPa에서 실시하였다. Fig. 7은 AlN 회석제의 함량에 따르는 실제 반응 온도의 변화를 측정된 결과이다. 반응

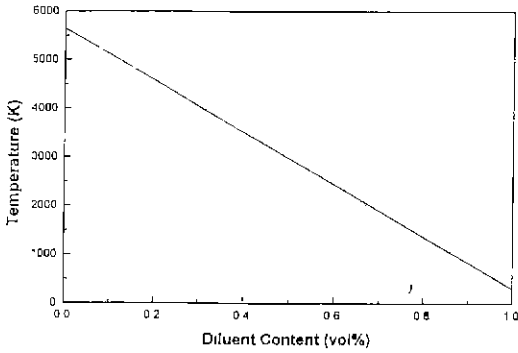


Fig. 6. Effect of the diluent content on the adiabatic temperature of AlN formation reaction.

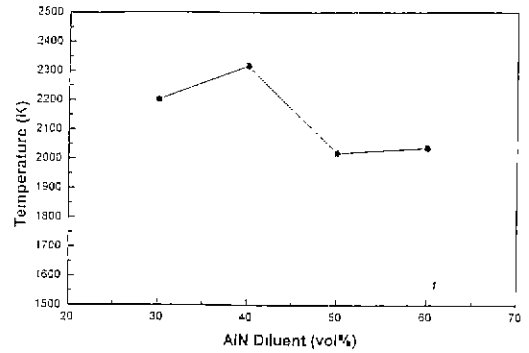


Fig. 7. Combustion temperature of the AlN formation reaction at different diluent contents.

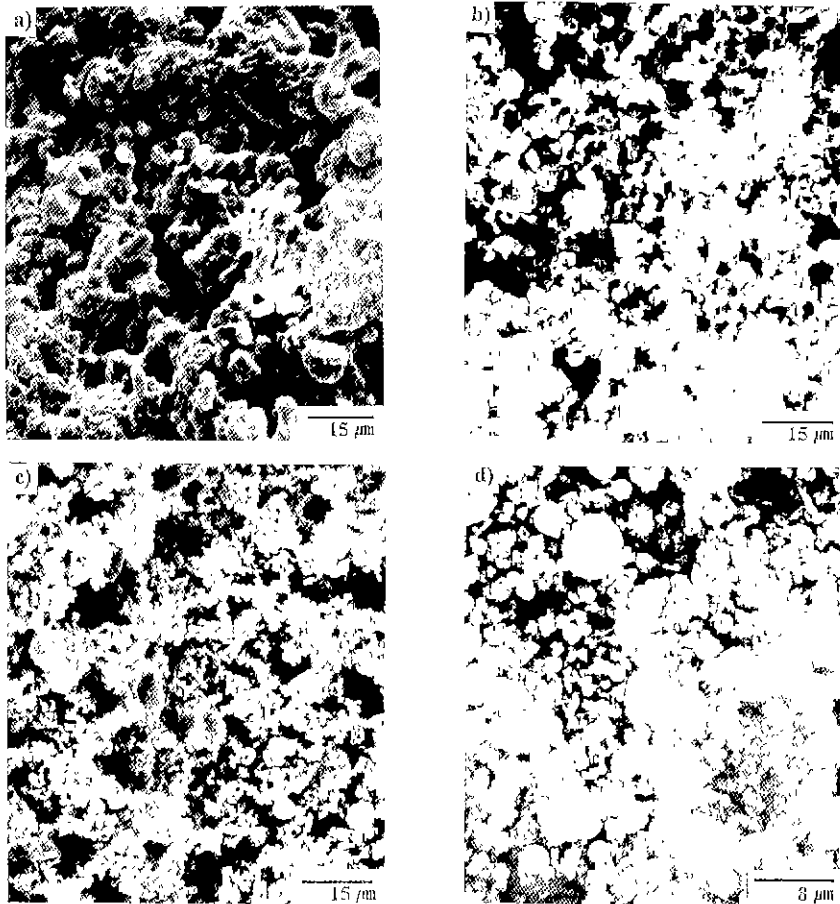


Fig. 8. SEM micrographs of the AlN product with various amount of AlN diluent. (a) 30%, (b) 40%, (c) 60%, and (d) 70%.

온도는 반응 회석제의 함량을 30%에서 40%로 증가시켰을 경우 약간 상승하며 40%에서 50%로 증가시켰을 경우 감소하는 것이 관찰되었다.

Fig. 8은 AlN 반응 회석제의 함량에 따르는 합성된 AlN의 형상이다. 반응 회석제의 함량이 30%일 경우, 생성된 AlN은 매우 응집된 듯한 형상을 보이며 응집된 크기는 30 μm 이상이였다(Fig. 8(a)). 반응 회석제의 함량이 40%까지 증가시키면 AlN은 각각 고립된 분말 형상을 보이며 분말의 크기는 약 0.5~3 μm 의 범위를 가지는 것을 볼 수 있다(Fig. 8(b)). 이러한 형상은 Fig. 5(d)의 반응 회석제가 50%일 경우와 매우 유사하다. 반응 회석제를 60%와 70%로 증가시킬수록 미반응된 알루미늄 분말(Fig. 8(c)와 8(d)의 구형 분말)이 반응물 내부에서 관찰되었으며 형상은 매우 불균일해졌다. 특히 70%의 반응 회석제일 경우에는 반응물의 내부에 AlN 휘스커가 관찰되었다. 이러한 결과로부터 반응 회석제의 함량은 40~50%일 경우에 가장 적합한 것으로 나타났다.

반응 회석제의 함량에 따르는 반응 전파 속도를 측정하였다(Fig. 9). 반응 회석제의 함량이 30%에서 40%로 증가함에 따라 반응 속도는 0.35 cm/sec에서 0.45 cm/sec로 증가하였다. 반응 회석제가 40%와 50%일 경우의 속도는 유사하게 관찰되었다. 한편 반응 회석제의 함량을 60%로 증가시켰을 경우 반응대 전파 속도가 0.45 cm/sec에서 0.28 cm/sec로 감소하였다. 여기서 반응 회석제를 30%에서 40%로 증가시켰을 경우 반응 전파 속도가

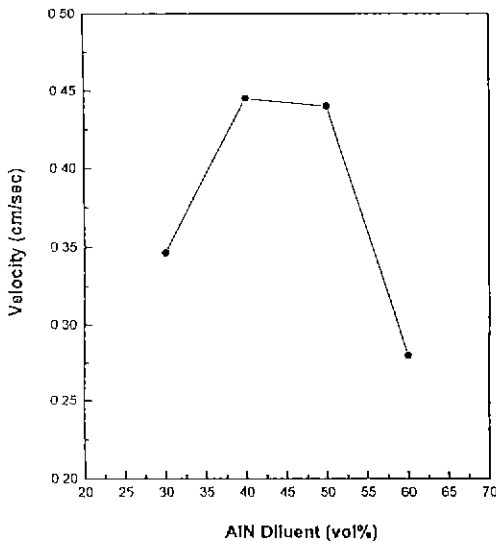


Fig. 9. Effect of diluent content on the propagation speed of SHS reaction.

증가한 것은 반응 회석제가 많을수록 반응 온도가 감소하여 반응 전파 속도가 감소하는 일반적인 경향에 반대되는 현상이다. 반응 전파 모델¹³⁾에 따르면 반응 전파 속도는 반응 온도가 감소할수록 감소하는데, 앞의 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 반응 온도는 반응 회석제가 증가할수록 감소할 것이 예상되기 때문이다. 결국 반응 회석제가 30%~40%의 범위에 있을 경우 SHS 반응은 반응 온도 이외의 다른 변수에 의하여 지배되는 것으로 보인다.

3.4. 알루미늄 분말의 AlN 형상에 미치는 영향

Fig. 10은 서로 다른 알루미늄 분말의 크기에 따르는 반응 전파 속도의 변화를 나타내고 있다. 이때의 반응 회석제와 반응 질소 압력은 각각 50%와 0.8 MPa로 고정하였다. 알루미늄 분말의 크기가 증가할수록 반응 속도는 감소하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 분말의 크기를 -40 mesh로 증가시켰을 경우 반응 속도는 다시 증가하였다. 제조되는 AlN의 형상과 크기는 알루미늄 분말의 크기에도 역시 영향을 받는 것으로 나타났다¹⁴⁾. 알루미늄 분말의 크기가 -325 mesh일 경우 제조된 AlN 분말의 크기(Fig. 11(b))는 5 μm 의 알루미늄 분말을 사용하였을 경우(Fig. 11(a))보다 약간 증가하였다. -325 mesh, -100+200 mesh와 -40 mesh의 알루미늄 분말을 사용하였을 경우에는 생성된 AlN 분말은 뭉침 현상이 매우 두드러졌다(Fig. 11(c), (d)).

3.5. 반응 촉매제의 AlN의 형상에 미치는 영향

반응 촉매제가 AlN의 형상에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 AlCl_3 를 반응 촉매제로써 사용하였다. 3 wt%의 AlCl_3 를 첨가하였으며 이때에도 반응 회석제와 반응 질소 압력은 각각 50%와 0.8 MPa로 고정하였다.

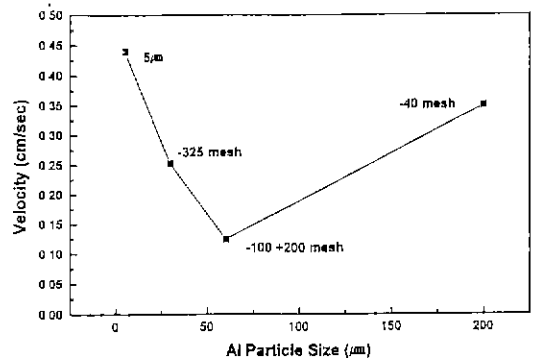


Fig. 10. Effect of aluminum particle size on the propagation speed of SHS reaction.

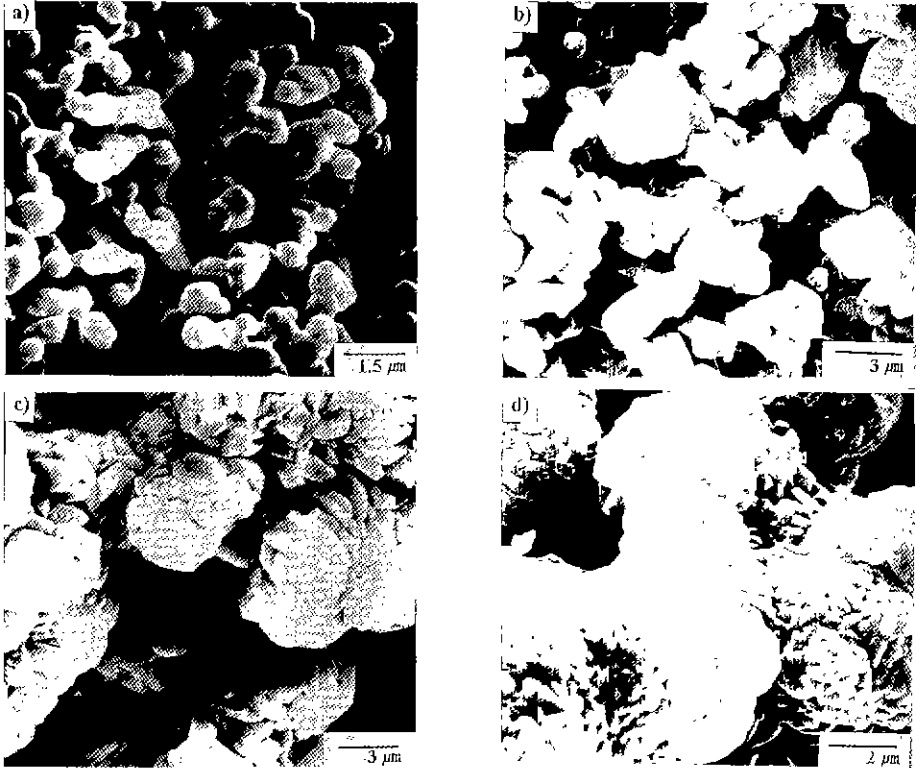


Fig. 11. SEM micrographs of the AlN powders produced using different aluminum powder size. (a) 5 μm , (b) -325 mesh, (c) -100+200 mesh, and (d) -40 mesh.



Fig. 12. SEM micrograph of the AlN powders produced using the reactant containing AlCl_3 reaction aid.

반응 생성물은 균일한 크기를 가졌으며 어떠한 응집체도 볼 수 없었고 Fig. 11(a)와 비교하여 분말간의 접촉면이

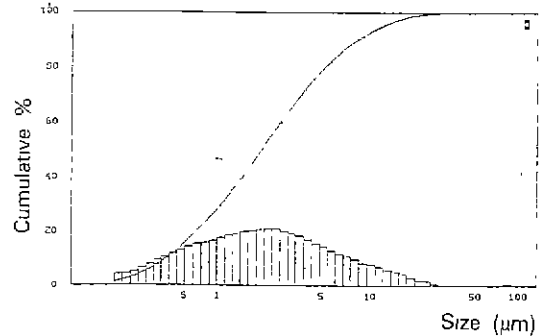


Fig. 13. AlN powder size distribution by the laser diffraction particle size analyzer.

더 작음을 알 수 있었다(Fig. 12). Fig. 13은 반응 생성물을 볼 밀링한 후의 입도 분포를 나타내고 있다. 입도 분포는 가우시안 분포를 나타내고 있으며 평균 입도는 약 1.5 μm 임을 알 수 있다. 이에 비하여 반응 촉매제를 사용하지 않은 경우에는 평균 입도가 약 2.5 μm 이었고, 최대 입경은 약 60 μm 정도로 넓은 입도 분포를 나타내었다.

한편 본 실험에 의하여 합성된 질화 알루미늄 반응물의

Table 2. Chemical Compositions of AlN Powders Produced by Different Processing Methods.

Company	Process	Nitrogen (wt.%)	Oxygen (wt.%)
Cerac	Unknown	33.36	1.64
Tokuyama Soda	Carbothermal Reduction	33.2	0.96
Lab	SHS	33.1	1.03

질소와 산소의 성분을 분석하여 Table 2에 나타내었다. 비교를 위하여 탄소 환원 질화법에 의하여 제조된 AlN 분말의 성분을 분석하였으며 질소와 산소의 함량이 서로 유사함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 SHS 공정에 의하여 AlN을 제조하였다. SHS 반응시 AlN의 합성에는 여러 가지 변수가 작용하였으며 최적의 AlN을 합성하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다. 먼저 성형 밀도는 질소 가스 반응대에 충분한 속도로 공급되기에 필요한 범위(~25%TD)로 유지하고, 질소 압력은 0.8 MPa 정도가 적절하였다. 회석재의 함량은 40%~50% 정도에서 우수한 반응 특성을 나타내었고, 반응물인 알루미늄은 분말 입도의 크기가 작을수록 생성된 AlN의 분말이 미세하게 나타났다. 반응 촉매제를 사용할 경우에는 생성된 분말의 입도를 더욱 미세하게 하는 효과를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 과학재단 특정기초(95-0300-16-01-3)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다

REFERENCES

1. Alan W. Weimer and William G. Moore. "Rapid Process for Manufacturing Aluminum Nitride Powder," *J. Am. Ceram. Soc.*, 77(1), 3-18 (1994).

2. C.A. Slack, "Nonmetallic Crystals with High Thermal Conductivity," *J. Phys. Chem. Solid.*, 34, 321-35 (1973).
 3. W. Werdecker and F. Aldinger, "Aluminum Nitride-An Alternative Ceramic Substrate for High Power Applications in Microcircuits," *IEEE Trans Compon., Hybrids, Manuf. Technol.*, CHMT-7(4), 399-404 (1984).
 4. N. Kuramoto and H. Taniguchi, "Transparent AlN Ceramics," *J. Mater. Sci. Lett.*, 3, 471-74 (1984).
 5. Y. Kurokawa, K. Utsumi, H. Takamizawa, T. Kamata, and S. Noguchi, "AlN Substrate with High Thermal Conductivity," *IEEE Trans Compon., Hybrids, Manuf Technol.*, CHMT-8(2), 247-52 (1985).
 6. L.M. Sheppard, "Aluminum Nitride. A Versatile but Challenging Material," *J. Am. Ceram. Soc Bull.*, 69(11), 1801-12 (1990)
 7. J.M. Haussonne, J. Lostec, J.P. Bertot, L. Lostec, and S. Sadou, "A New Synthesis Process for AlN," *J Am Ceram Soc. Bull.*, 72(5), 84-90 (1993).
 8. B. Forslund and J. Zheng, "Carbothermal Synthesis of Aluminum Nitride at Elevated Nitrogen Pressure: Part 2 Effect of Process Parameter on Particle Size and Morphology," *J. Mater. Sci.*, 28, 3132-36 (1993).
 9. S.D. Dunmead, J.B. Holt, and D.D. Kingman, "Simultaneous Combustion Synthesis and Densification of AlN," *Combustion and Plasma Synthesis of High Temperature Materials* edited by Z.A. Munir and J.B. Holt, VCH 1990.
 10. M. Skibbska, A. Szulc, A.S. Mukasyan, V.A. Shugacv, and A.A. Shryaev, "Microstructure Peculiarities of Silicon Nitride Formed by SHS Under High Nitrogen Pressure (Part III): The Effect of Nitrogen Pressure on SHS Si₃N₄ Morphology and Phase Composition," *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2(3), 247-259 (1993)
 11. *Smithells Metals References Book*, edited by E.A. Brandes and G.B. Brook, Seventh Edition
 12. Z.A. Munir, "Synthesis of Temperature Materials by Self-Propagating Combustion Methods," *J Am Ceram Soc. Bull.*, 67(2), 342-349 (1988).
 13. J. Suhrhmanyam and M. Vijayakumar, "Self-Propagating High-Temperature Synthesis," *J. Mater. Sci.*, 27, 6249-6273 (1992).
 14. 안도환, 전형조, 김석운, 김용석. "자진 고온 반응 합성법에 의한 AlN 분말의 제조; II. Al 분말로부터 AlN 분말의 형성 기구," *요업 학회지에 발표 예정.*