

# 용융 분무에 의한 질산암모늄 액적의 분열 메카니즘

## Disintegration Mechanism of Ammonium Nitrate Droplets by Melt Spray

안진환\*      김재경\*      김준형\*\*      구기갑\*  
Jin-Hwan Ahn      Jae-Kyeong Kim      Jun-Hyung Kim      Kee-Kahb Koo

### Abstract

The pressurized spray system with nitrogen gas was designed to fabricate the spherical AN(ammonium nitrate) particles. When AN melt was sprayed from a nozzle with equivalent diameter of 0.28mm into an ambient dry air, the ligament breakup mechanism of the molten AN was found to be responsible for the droplet formation(or disintegration) of AN melt. In the experimental range of spray temperature with 170~200°C and atomization pressure with 0.1~0.4MPa, the spherical AN particles with mean diameter of 130~250µm were obtained.

Keywords : Ammonium Nitrate, Ligament Breakup Mechanism, Melt Spray

### 1. 서론

우주 항공 및 군용 목적으로 널리 이용되고 있는 고체 추진제의 구성 성분은 기체를 발생시키는 고체 산화제(oxidizer)와 결합제(binder)로 사용되는 유기 고분자 성분이다. 고체 산화제는 일반적으로 과염소산염과 질산염이 주로 이용된다. 이들 중, 질산암모늄은 저렴하고, 화학적 안정성, 높은 질소 함량, 낮은 마찰 민감도와 연소 온도 등 추진제의 산화제로 뛰어난 물리 화학적 특성을 갖고 있지만, 조해성(hygroscopicity)으로 인한 결정형 전이(polymorphic transition), 낮은 에너지 밀도와 연소 속도로 인해서 많은 제약을 받아왔다. 질산암모늄의 대체 물질로 과염소산암모늄(ammonium

perchlorate)이 1960년대 이후 개발되었으며 현재까지 고체 복합 추진제의 산화제로서 널리 이용되고 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 과염소산암모늄은 연소과정에서 HCl이 발생되어 성층권 오존층 파괴, 발사장 주위 토양 오염과 갑상선 질환 문제를 일으키며 추진제에 포함된 aluminium 성분에 의해 연무가 발생되어 발사체 위치 노출, 레이저 유도 시스템의 장애가 발생된다. 그러므로 미국을 비롯한 선진국에서는 무연 추진제(smokeless propellant)이면서 비부식성, 발사 위치 은폐를 목적으로 질산암모늄이 다시 주목을 받고 있다. 특히, 평균 입경 범위가 50~200µm인 구형 질산암모늄 입자는 추진제 조성물 제조 단계에서 고분자 결합제(polymeric binder), 금속(Al, Mg), 연소 속도 개선제 등 여러 성분의 혼합 과정에서 충분한 결정 강도를 유지하며 충전성, 혼화성, 흐름성, 작업 안정성을 높이며 균일한 연소 특성을 얻을 수 있으므로 군사적인 용도로 매우 적합하다.

공업적으로 구형 질산암모늄 입자는 99.5% 질산암

† 2009년 1월 29일 접수~2009년 3월 20일 게재승인

\* 서강대학교 화공생명공학과(Sogang University)

\*\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 구기갑(koo@sogang.ac.kr)

모늄 용융물을 냉각 기체로 채워져 있는 분무탑에서 노즐을 통한 분무, 냉각을 거쳐 제조된다. 질산암모늄 용융물이 액적 상태로 분무탑에서 분무되어 주위 기체와 접촉되면 액적 표면에서 액적 내부로 점점 고액 계면이 이동되면서 고화가 진행된다. 고화된 질산암모늄 입자의 입도 분포와 평균 입경은 노즐의 기하학적 구조, 분무 기체의 압력, 온도, 유량에 의해 제어되며 액적의 분열 메카니즘(breakup mechanism)과 밀접한 관련이 있다. 즉, 추진제로 적합한 입도 분포와 평균 입경의 질산암모늄 입자를 제조하기 위해서는 분무 노즐에서 생성되는 질산암모늄 액적의 생성과정에 대한 규명이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 수분 접촉이 최소화될 수 있도록 비활성 기체로 가압되는 압력 용기와 분무 노즐을 이용하여 질산암모늄 용융물로부터 구형 질산암모늄 입자를 제조하였으며 분무 공정에서 최종적으로 얻어진 질산암모늄 입자의 평균 입경과 입도 분포로부터 질산암모늄 용융물의 분열 메카니즘(disintegration mechanism)에 대한 규명이 수행되었다.

## 2. 실험

시약급 분말 상태의 질산암모늄(Junsei Chemical Co., Ltd, min.99.0%)은 105℃의 진공 오븐에서 최소 3일 이상 수분이 제거된 후 사용되었다. 건조에 의해 질산암모늄 표면 수분은 충분히 제거되었지만, 결정 구조 내부의 수분은 제거되지 않은 것으로서 판단된다. Fig. 1은 용융 질산암모늄을 가압 분무 실험 장치이다. 분무 노즐(Spray Systems Co., USA)은 스테인리스 재질로 노즐 구경의 상당 지름(equivalent diameter)은 0.28mm이며 출구 형태는 타원형이다. 육안으로 확인한 결과, 질산암모늄은 분무에 앞서 완전히 용융된 상태를 유지하였으며, 수분이 완전하게 제거된 고순도 질소(Daesung Industrial Gases Co.)로 가압되었다. 가압 용기의 상부에 부착되어 있는 덮개와 테플론 재질의 튜브를 통해서 질소 가스가 공급되었으며, 용기에 공급되는 질소의 압력은 실린더에 부착되어 있는 압력 제어기와 밸브로 조절된다. 질산암모늄의 분무기체로서 이용되는 고순도 질소가스에서 수분 함량이 엄격하게 제어되는 것은 질산암모늄 용융물에서 수분 흡수와 질산암모늄 액적의 결정형 전이의 방지 때문이다. 본 실험에서 고압 질소 가스는 가압 용기로부터

고속으로 질산암모늄 용융물을 분무시킴으로서 노즐에 의해서 생성된 액막(liquid sheet)을 빠르게 분열시킨다. 노즐부는 노즐, 스트레이너(strainer), 접속 유니언으로서 구성되어 있다. 다공성 스트레이너는 스테인리스 재질로서 용융되지 않은 질산암모늄 덩어리나 이물질 등을 제거하여 질산암모늄 용융물로부터 안정한 액막을 형성하도록 한다. 스트레이너의 공극 크기는 약 190 $\mu$ m이다. 접속 유니언은 노즐 지지대와 압력 용기의 하부를 연결하는 부품이다.

본 분무 장치에서는 실험 1회 당 약 70g 질산암모늄 용융물로부터 생성된 액적이 실온으로 유지되고 있는 스테인리스 재질의 사각 용기에 낙하되었으며 구형입자로 회수되는데, 질산암모늄 용융물의 분무 온도와 분무 압력은 각각 170~200℃, 0.1~0.4MPa 이었다. 회수된 질산암모늄 입자는 톨루엔에 분산되었으며 광학 현미경을 이용하여 입자의 형상, 입도 분포, 평균 입경을 관측하였다. 광학현미경에 의해 촬영된 질산암모늄 시료의 사진으로부터 이미지 분석 소프트웨어(Image-Pro Plus 5.0, Cybernetics)를 통하여 입자의 형상과 입도 분포를 관측하였다.

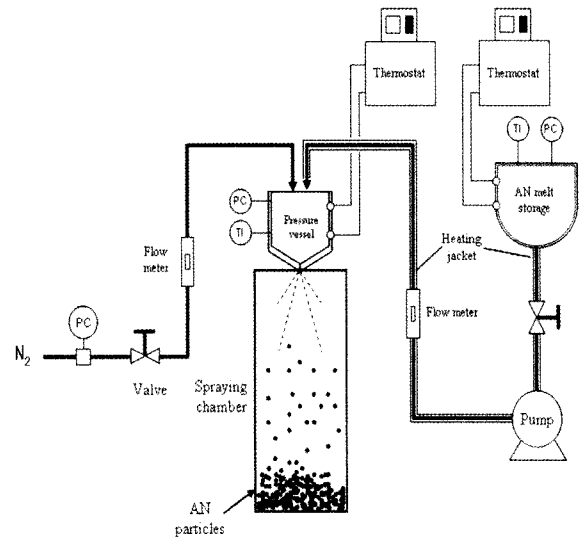


Fig. 1. 용융 질산암모늄 분무 장치

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2와 3은 분무 온도 170℃에서 분무 압력을 0.1 MPa, 0.3MPa, 0.4MPa로 변화시켰을 때 얻어진 질산암

모늄 입자의 광학현미경 사진과 입자의 입도 분포 변화를 나타낸 것이다. 분무 압력이 증가함에 따라 누적 입도 분포 곡선은 점점 좁아지는 경향을 보이고, 질산암모늄 입자는 0.1MPa에서 100~500 $\mu$ m 범위이고, 0.3 MPa에서는 100~330 $\mu$ m, 0.4MPa에서 50~200 $\mu$ m 범위였다.

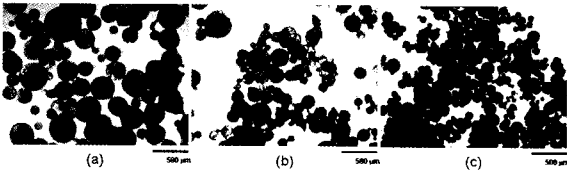


Fig. 2. 분무 압력에 따른 질산암모늄 입자의 광학현미경 사진 (a) 0.1MPa, (b) 0.3MPa, (c) 0.4MPa(분무 온도 170 $^{\circ}$ C)

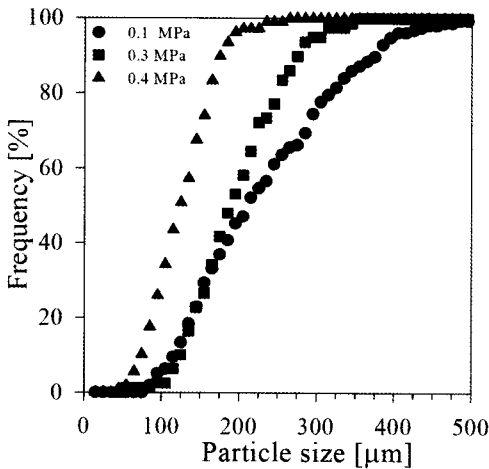


Fig. 3. 분무 압력에 따른 질산암모늄 입자의 입도 분포 변화(분무 온도 : 170 $^{\circ}$ C)

Fig. 4는 분무 압력을 0.3MPa로 고정하고 분무 온도를 170, 190, 200 $^{\circ}$ C로 변화시켰을 때 얻어지는 질산암모늄 입자의 광학 현미경 사진을 나타낸 것이고, Fig. 5는 제조된 질산암모늄 입자의 누적 입도 분포를 나타낸 것이다. 분무 온도가 높아짐에 따라 질산암모늄 입자의 평균 입경은 감소됨을 알 수 있다. 분무 온도에 관계없이, 누적 입도 분포 곡선의 폭과 형태는 큰 차이가 없다. 그러므로 본 연구에서 고려된 분무 온도 범위에서 온도 변화는 액막의 분열 메커니즘에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 실험 결과로부터, 질산암모늄 용융물의 액막 분열 메커니즘은 가장

자리 분열(rim breakup), 공기역학적 파에 의한 분열(aerodynamic wave breakup), 천공에 의한 분열(perforation breakup), 공기 충돌 분열(air impact breakup) 등 여러 메커니즘이 혼합된 형태가 아닌 단일 분열 메커니즘이 지배적으로 일어남을 시사한다. 또, 액막의 분열이 가장자리(rim) 또는 선단 부분(front edge)에서 지배적으로 일어나지 않으므로 불균일한 액적 분포가 발생되지 않았음을 의미한다<sup>[2~4]</sup>.

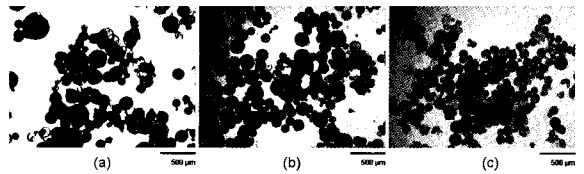


Fig. 4. 분무 온도에 따른 질산암모늄 입자의 광학현미경 사진 (a) 170 $^{\circ}$ C, (b) 190 $^{\circ}$ C, (c) 200 $^{\circ}$ C(분무 압력 0.3MPa)

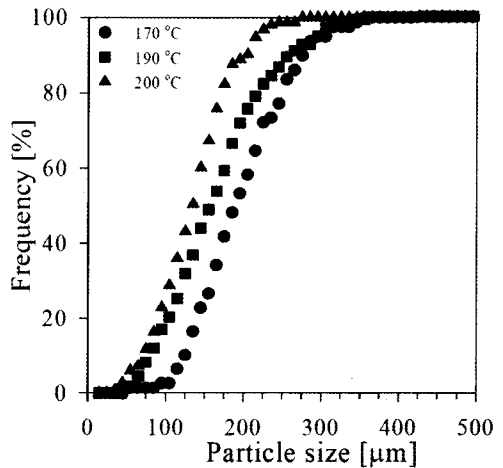


Fig. 5. 분무 온도에 따른 질산암모늄 입자의 입도 분포 변화(분무 압력 0.3 MPa)

Fig. 6은 질산암모늄 입자의 평균 입경을 분무 조건으로부터 계산된 질산암모늄 용융물의 점도 함수로 나타낸 것이다. 질산암모늄의 점도는 문헌에서 보고된 값이 이용되었다<sup>[2]</sup>. 분무 온도가 170 $^{\circ}$ C 일 때, 평균 입경은 약 234 $\mu$ m이며 같은 온도에서 압력이 0.3MPa, 0.4MPa로 증가함에 따라 입경은 200 $\mu$ m, 131 $\mu$ m로 감소함을 보여주고 있다. 또한 분무 압력을 0.3MPa으로 고정하고 온도를 170, 190, 200 $^{\circ}$ C로 변화시켰을 때, 질산암모늄 입자의 평균 입경은 약 200 $\mu$ m에서 168 $\mu$ m,

139 $\mu\text{m}$ 로 감소되었다. 즉 질산암모늄 용융물의 점도가 증가함에 따라서 질산암모늄 입자의 평균 입경은 증가함을 알 수 있다. 그러므로 질산암모늄 용융물의 액막이 분열되는 과정에서 점도가 중요한 역할을 하는 것으로 해석된다.

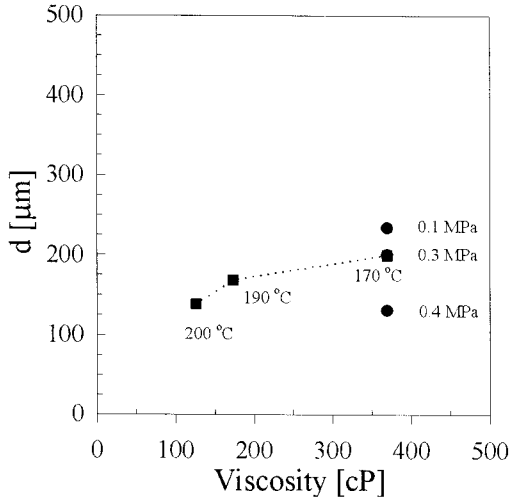


Fig. 6. 질산암모늄의 점도에 따른 평균 입도의 변화

압력 용기에서 액체가 노즐을 통해서 분무되는 경우, 액막의 전체적인 형태는 노즐 내부에서 유선의 공간적인 위치에 의해 결정된다. 본 연구에서 이용된 노즐처럼 입구 형상이 타원형인 경우, 노즐 입구의 양끝에서 분무되는 두 개의 액체 흐름이 노즐 중앙부에서 만나며 박막 형태의 액막이 형성된다. 분무속도의 가속에 의해서 노즐의 양 끝부분 액막의 가장 자리는 부채꼴 형태로 점점 얇아지며 노즐 중앙부를 기점으로 액막의 선단과 가장자리 부분에서 액막의 분열이 관측된다<sup>[1]</sup>. 노즐로부터 분무된 액막에서 공기역학적 또는 천공에 의한 교란이 발생되어 점점 성장되면 액막은 불안정한 액체 덩어리(ligament)로 분열된다. 분열된 액체 덩어리는 더욱 분열되어 다양한 입도 분포의 액적이 생성된다. 그러므로, 액막 분열 메카니즘의 규명은 추진제로 적합한 입도 분포와 평균 입경을 갖는 질산암모늄 입자를 제조하기 위한 기본적인 단계이다.

Table 1은 Fig. 3과 5의 질산암모늄 용융물의 분무 조건에 따라 노즐 구경을 기준으로서 계산된 질산암모늄 용융물의 압력, 온도, 분무 시간, 무차원수(dimensionless number)를 나타낸 것이다.

Table 1. 분무 조건과 무차원 수

압력 [MPa]	온도 [°C]	분무 시간 [s]	We	Oh	Re
0.1	170	85	19.91	1.76	2.53
0.3	170	N.A	N.A		
0.4	170	24	249.8	1.76	8.9
0.3	190	38	97.9	0.82	12.1
0.3	200	46	65.3	0.59	13.7

$$We = \rho_{NH_4NO_3} d_{nozzle} V^2 / \sigma_{NH_4NO_3}$$

$$Oh = \mu_{NH_4NO_3} / (\sigma_{NH_4NO_3} \rho_{NH_4NO_3} d_{nozzle})^{0.5} = We^{0.5} / Re$$

$$Re = \rho_{NH_4NO_3} d_{nozzle} V / \mu_{NH_4NO_3}$$

질산암모늄 용융물의 액막 분열 메카니즘을 규명하기 위해서 필요한 무차원수 We, Oh, Re는 다음과 같은 질산암모늄 용융물의 물성값으로부터 계산되었다. 질산암모늄의 물성값이 유효한 온도 범위는 170~200 °C 이다. 질산암모늄의 표면 장력은 보고된 문헌이 없기 때문에 질산암모늄과 유사한 알칼리 금속의 질산염 또는 알칼리토금속 질산염으로부터 추정된 평균값이다<sup>[5-7]</sup>.

$$\rho_{NH_4NO_3} [kg/m^3] = 1410.4 \sim 1428.21$$

$$\sigma_{NH_4NO_3} [kg/s^2], \text{ 추정치} = 0.11 \sim 0.116$$

$$\mu_{NH_4NO_3} [kg/(m \cdot s)] = 0.370 \sim 0.126$$

Rashed<sup>[8]</sup>는 분무 액체와 공기가 동일한 방향으로 이동하는 물리적 조건에서 비대칭 교란에 의한 액막 분열 메카니즘을 연구하였으며  $We \cdot (1-U)^2 > 1$  일 경우 공기역학적 파에 의한 분열(aerodynamic wave breakup)을 보고하였다. U는 공기 속도( $U_2$ )와 액막 속도( $U_1$ )의 비이다. 본 연구에서 질산암모늄 용융물은 가압 상태에서 정지 상태의 공기에 분무되고 있으므로 U는 0이다. 그러므로  $We > 1$  일 경우, 노즐에서 분무되는 질산암모늄 용융물의 액막은 공기역학적 파에 의한 분열(aerodynamic wave breakup mode)에 의해 일어난다. 이와 같은 분열은 노즐에서 분무된 액막의 직접 분열에 의해 액적이 생성되는 기구(sheet breakup)와 액막에서 불안정한 액체 덩어리(ligament) 생성과 2차 액적 분열을 거치는 액적 생성 기구(ligament breakup)로 나뉜다. Ford와 Furnidge의 연구 결과에 의하면, 레이놀즈수가

1000 이상인 난류 영역에서 분무 액체의 점도 변화는 액적의 입도 분포와 평균 입경에 영향을 미치지 않았지만 레이놀즈수가 20 이하인 층류 영역에서 분무 액체의 점도가 상승되었을 때 액막이 불안정한 액체 덩어리(ligament)로 전환되는 비율이 증가되었으며 액막이 액적(droplet)으로 직접 분열되는 비율이 감소됨을 보고하였다. 즉, 점도가 높은 액체가 층류영역에서 분무되었을 때 액막의 분열 메커니즘이 sheet breakup에서 ligament breakup으로 전환되는 현상이 관측되었다. 이는 점도의 영향에 의해 액막의 중앙 부분보다 가장 자리에서 분열이 촉진되고 액적의 부피 중앙값 지름( $d_{VMD}$ )가 커지는 현상이 나타나기 때문이다<sup>[2]</sup>.

Table 1에서, 질산암모늄 용융물은 레이놀즈수가 20 이하인 층류영역에서 분무되며 분무 액체의 점도 범위가 100~370cP이므로 액적 분열 메커니즘은 ligament breakup에 의해 지배적으로 일어날 가능성이 있다.

Ford와 Furnidge는 차원 해석을 통하여, sheet breakup에 의해서 생성되는 액적의 부피 중앙값 지름( $d_{VMD}$ )에 대한 관계식을 다음과 같이 제시하였다<sup>[2-4]</sup>.

$$d_{VMD}V \propto \left( \frac{Q\sigma_L^2}{r\theta\rho_L^2V^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

식 (1)에서 V는 노즐에서 분무되는 액막의 속도, r은 노즐 입구에서 액막이 분열되는 지점까지 거리, Q는 노즐에서 분무되는 액막의 부피 유속,  $\sigma_L$ 은 분무 액체의 표면 장력,  $\rho_L$ 은 분무 액체의 밀도,  $\theta$ 는 분무 각도이다.

그러므로, 질산암모늄 용융물의 분무 실험에서 얻어지는 액적의 부피 중앙값 지름( $d_{VMD}$ ), 분무 속도, 분무 각도, r값을 이용하여 질산암모늄 용융물이 sheet breakup 메커니즘에 의해 분열되는지 확인할 수 있다.

Fig. 7은 sheet breakup 메커니즘을 확인하기 위하여 식 (1)로부터 계산된 값을 나타낸 것이다.  $Q^2/(r\theta\rho_{NH_4NO_3}V^2)$  값이 증가함에 따라  $d_{VMD} * V$ 는 감소됨을 알 수 있다. 질산암모늄 용융물이 sheet breakup, 즉, 노즐에서 생성된 액막이 ligament 생성 없이 액적으로 직접 분열될 경우, 식 (1)의 플롯에 의한 기울기는 약 1/3이어야 하지만 Fig. 7에서 계산된 기울기는 -0.54로서 일치하지 않았다. 그러므로, Table 1의 분무 조건에서 질산암모늄 용융물의 액적 생성 기구는 sheet breakup 기구를 따르지 않는 것으로 판단된다.

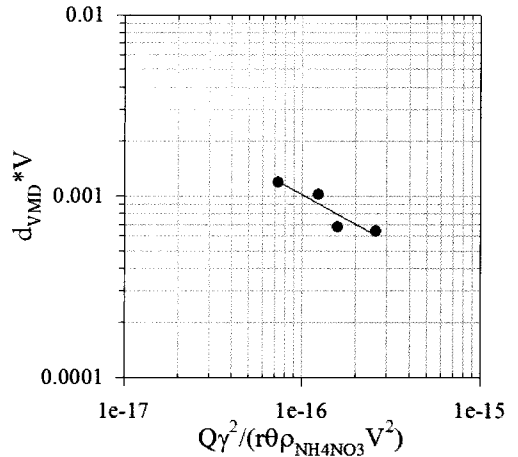


Fig. 7. Sheet breakup 메커니즘

Ford와 Furnidge는 액막의 1차 분열에 의해서 생성되는 ligament( $d_L$ )의 직경과 ligament의 분열에 의해 생성되는 액적의 평균 입경( $d_{VMD}$ )을 예측할 수 있는 관계식으로 식 (2)을 제시하였다.

$$d_{VMD} = 2.07d_L(1 + Oh)^{-1/6} \quad (2)$$

본 연구에서는 ligament diameter( $d_L$ )에 대한 정확한 측정성이 불가능하므로 본 연구 조건과 유사한 점성 액체에 대해 보고된 ligament diameter( $d_L$ ) 추정식으로 식 (3)을 사용하였다<sup>[4]</sup>.

$$\frac{d_L}{d_{nozzle}} = 0.89 \left( \frac{K}{We} \right)^{1/3} \left( \frac{\rho_{air}}{\rho_L} \right)^{1/3} \times \left( 1 + 0.58K^{1/3}We^{7/6} \left( \frac{\rho_{air}}{\rho_L} \right)^{4/3} Oh \right)^{1/5} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\rho_{air}$ 는 분무 조건에서 주위 공기의 밀도이며, K는 thickness parameter이며 식 (4)로부터 계산된다.

$$K = \frac{A_o}{2\sin(\theta/2)} \quad (4)$$

식 (4)에서  $A_o$ 는 노즐 입구의 단면적이며  $\theta$ 는 노즐 입구에서 분무 각도이다.

질산암모늄 용융물의 액적이 주위 공기에 의해서

냉각될 때, 고화와 수축에 의한 직경 변화가 없는 것으로 가정된다면 식 (2)에 의해 계산된 질산암모늄 액적의 입경과 고화된 질산암모늄 입자의 입경은 동일할 것이다. Fig. 8은 식 (2)로부터 계산된 질산암모늄 용융물의 ligament breakup에 의한 액적의 부피 중앙값 지름( $d_{VMD}$ )과 동일 조건에서 분무 공정으로 얻어진 질산암모늄 입자의  $d_{VMD}$ 을 비교한 그림이며 실험값이 이론적인 예측치보다 약 85~170 $\mu\text{m}$  정도 작음을 알 수 있다.

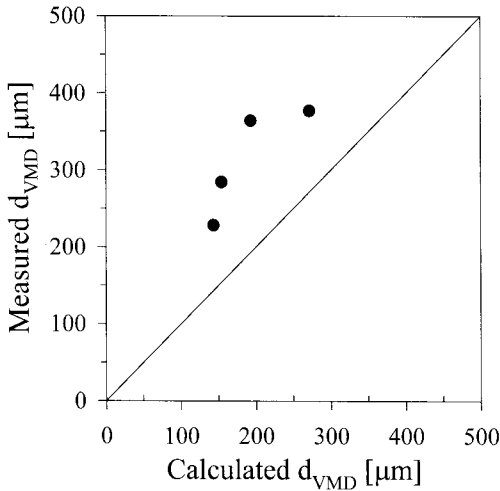


Fig. 8.  $d_{VMD}$  계산치(식 (2))와 실험치의 비교

실험치와 이론 예측값과의 차이는 ligament diameter ( $d_L$ ) 추정 오류, 질산암모늄 입자의 부피 중앙값 지름 ( $d_{VMD}$ ) 측정 과정에서 내포된 오차, Dombrowski와 Johns에 의해서 제시된 식 (2)에서 분무 액체의 점도 범위가 2~20cP인 점, ligament breakup 이후 생성된 액적의 2차 합일(coalescence)와 2차 분열(secondary breakup) 등이 원인으로 해석된다.

Fig. 9는 분무 공정에서 얻어진 질산암모늄 입자의 부피 중앙값 지름( $d_{VMD}$ )을 평균 입경( $d$ )과 식 (3)에서 계산된 ligament 지름( $d_L$ )과 비교한 것이다. 이 그림에서 질산암모늄 액적의 ligament 지름( $d_L$ )는 분무 공정에서 얻어진 질산암모늄 입자의 평균 입경( $d$ ) 또는 부피 입경( $d_{VMD}$ )과 매우 유사함을 알 수 있다. 그러므로, 질산암모늄 용융물로부터 생성된 액막은 액적으로 직접 분열되는 형태(sheet breakup)보다는 ligament로서 1차적으로 분열되고 더 이상의 합체나 분열 없이

ligament가 표면 장력에 의해 액적으로 전환된 후, 주위 기체에 의한 고화가 이루어짐을 알 수 있다.

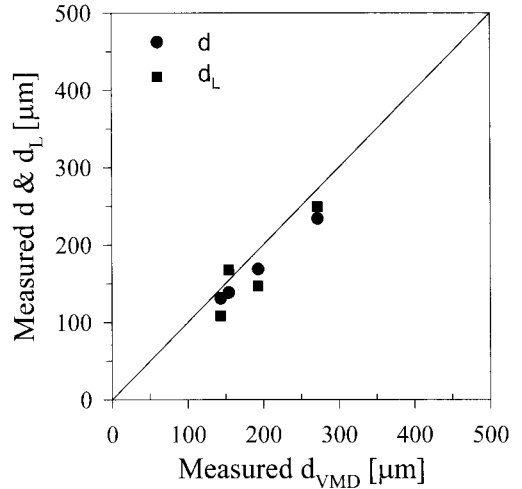


Fig. 9.  $d_L$  계산치(식 (3))와  $d$ ,  $d_L$  실험치의 비교

#### 4. 결론

본 연구에서는 용융 분무에 의한 질산암모늄 입자 제조시 분무 압력과 온도가 질산암모늄 입자의 평균 입경과 입도 분포에 미치는 영향을 관찰하였다. 분무 온도 170 $^{\circ}\text{C}$ 에서 분무 압력이 0.1MPa에서 0.4MPa로 증가됨에 따라 입자의 평균 입경은 234 $\mu\text{m}$ 에서 131 $\mu\text{m}$ 으로 감소되었고, 분무 압력을 0.3MPa으로 고정하고 온도를 170 $^{\circ}\text{C}$ 에서 200 $^{\circ}\text{C}$ 으로 증가시켰을 때 평균 입경은 200 $\mu\text{m}$ 에서 139 $\mu\text{m}$ 로 감소함을 알 수 있었다.

Ford와 Furnidge가 제시한 공기역학적 파에 의한 분열(aerodynamic wave breakup)에 의해 질산암모늄 용융물의 분열 메커니즘을 해석해 본 결과 노즐 내에서 질산암모늄 용융물의 흐름은 층류이며 ligament breakup에 의해 액적이 생성되는 것으로 해석된다. 그러므로, 낮은 레이놀즈수 흐름에서 질산암모늄 용융물의 액적 분열은 점도에 큰 영향을 받게 된다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊은 감사를 드립니다.

(계약번호 UD070020AD).

## Reference

- [1] Oommen, C. and Jain, S. R., "Ammonium Nitrate : A Promising Rocket Propellant Oxidizer", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 67, No. 3, pp. 253~281, 1999.
- [2] Ford, R. E. and Furnidge, C. G., "The Formation of Drops from Viscous Newtonian Liquids Sprayed Through Fan-jet Nozzles", *British Journal of Applied Physics*, Vol. 18, No. 3, pp. 335~348, 1967.
- [3] Dombrowski, N. and Fraser, R. P., "A Photographic Investigation into the Disintegration of Liquid Sheets", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 247, No. 924, pp. 101~130, 1954.
- [4] Dombrowski, N. and Johns, W. R., "The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets", *Chemical Engineering Science*, Vol. 18, No. 3, pp. 203~214, 1963.
- [5] Booth, D. H. and Vinyard, V. C., "Density and Viscosity of Ammonium Nitrate, Ammonium Nitrate-potassium Chloride and Ammonium Nitrate-ammonium Phosphate Melts", *Journal of Applied Chemistry*, Vol. 17, pp. 86~88, 1987.
- [6] Sada, E., Katoh, S. and Damie, H. G., "Surface Tension of Some Molten Salt Hydrates by the Pendant Drop Technique", *Journal of Chemical Engineering Data*, Vol. 29, No. 2, pp. 117~119, 1984.
- [7] Pandey, J. D. and Gupta, U., "Surface Tension of Binary Molten Salt Mixtures", *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 86, No. 26, pp. 5234~5237, 1982.
- [8] Rashed, M., Ghazi, M. A. and Elbanna, "Aerodynamic Instability of a Liquid Sheet Sprayed with an Air Stream", *J. Phys. D. : Appl. Phys.*, Vol. 12, pp. 1679~1684, 1979.