

## 중앙 투입 형식의 나노급 입자 원심 분리기 제작에 관한 연구

황교선\*

(논문접수일 2010. 3. 18, 심사완료일 2010. 6. 7)

### A Study on the Centrifuge Fabrication for a Nano Size Particle Having a Central Supply Tube

Gyo-Seon Hwang\*

#### Abstract

As a super high speed small-sized centrifugal separator which is operated by the center inputting method has solved two difficulty problems, it can be made use of developing the new composition through the making of Nano particle (50~100nm) by high speed revolution and alleviation of unbalanced shapes inside the disk continuously throwing slurry in the central part. Uses the air spindle and the centrifugal machine production will be able to manufacture the Roh class fine particle under boil.

**Key Words** : Spray Noozl(스프레이노즐), Rotary atomizer(로타리오토마이저), Air spindle(에어스핀들), Air bearing(에어베어링), Centrifuge(원심분리기)

## 1. 서론

나노급 미세 입자 제조방법으로는 볼 밀(Ball Mill)분쇄 방식과 고압에너지를 이용하는 재래식 고압 Spray Nozzle 및 유체의 운동에너지를 이용하는 이류체 분사 방식, 고속 회전에 의한 원심력을 이용하는로타리 오토마이저(Rotary atom-izer)등이 있다. 기존방식으로 분류되는 고압 Spray

Nozzle 및 이류체 분사 방식은 분무된 입자의 크기가 불균일하게 생성되었으며, 일부입자는 상당히게 커서 이로 인하여 분말제가 많이 소모되는 비효율적인 단점이 있으므로 나노급 미세 입자 제조는 거의 불가능하다.

본 연구에서는 에어스핀들을 이용하여 고속회전에 의한 분리기 제어방식으로 나노급 미세 입자를 제조할 수 있는 원심 분리기 제작을 하고자 한다.

\* 한국폴리텍IV대학 컴퓨터응용기계과 (hgseon@kopo.ac.kr)  
주소 : 300-700 대전시 동구 가양2동 91-2

미세 입자<sup>(1)</sup>의 제품가치는 크기, 균일성 및 순도에 있다. 예를 들면, 입자 직경이 2 배로 큰 경우 정상적인 입자의 8 배에 상당하는 에너지가 소모된다. 그러므로 상기 2 배의 입자크기는 효율을 8 배 감소하게되고 작용시간도 8배 지연되어 생산효과를 감소 시킨다.

상기와 같은 물리적 현상으로 각종 물질의 미세입자의 크기가 작을수록 효율이 높아지며 더욱 각 물질의 미세 입자의 측면에서는 특이한 물리 성질의 변화도 발견되고 있다. 시스템 제어 설비측면에서도 고압 Spray Nozzle식은 제어 작동 반응 관련 기계장치의 신뢰성에 있어서도 단순히 모터 회전에 의한 원심력을 이용하여 분무하는 Rotary Atomizer의 기능보다는 낮은 것으로 알려져 있다.

본 연구의 미세 입자 생성용 원심분리기는 고속회전 운동 에너지에 의한 원심력을 이용하여 회전디스크의 노즐을 통하여 배출하는 과정에서 미세 입자를 생성시키는 장치이다. 현재 국내에서 이용되고 있는 원심분리기는 중대형급으로 4,000rpm 정도의 비교적 저속으로 한정되어 있으며, 중대형 고속 10,000rpm 급 원심 분리기를 미국, 일본, 네델란드를 포함한 일부 선진국으로부터 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 정밀기계 제작기술을 바탕으로 80,000rpm급 초고속 고주파 모터를 이용하여 “중양 투입 방식의 초고속 소형 원심 분리기”를 제작하여 낙후된 국내 원심 분리기 기술 수준을 개선하고자 한다.

중양 투입 방식의 초고속 소형 원심 분리기는 초고속 회전 및 진동 충격완화의 2가지 고난도 기술 문제점을 해결함으로써, 연속적으로 액적을 중양으로 투입하여 디스크 내부에서의 불균형 형상 완화, 고속 회전에 의한 나노급 미립자(50~100nm)를 제조하여 신소재 개발에 이용될 수 있다.

본 연구 Fig. 1의 생성된 미세 입자에 도시한바와 같이 분말제품을 제조하는 원심 분리기/로타리 오토마이저를 개발한다. 상기와 같이 제조된 미세 입자의 산업분야는 신소재 개발, 반도체 원료 제조용, 의약 제조용, 세라믹 제조용에 많



Fig. 1 Fresh fine particle

이 이용되며 효과가 크고, 기존의 압력식 노즐 분무 장치보다 미립자의 형태, 크기 분포 측면에서 품질이 우수하여 수요가 점차 증가하고 있으며 특히 반도체, 산화 알루미늄, 규소, 첨가제, 폴리우레탄등 100여종의 산업에 적용되고 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 미세 입자의 역학적 해석

본 기술의 최종 목표치는 30,000rpm 이상의 초고속 회전 상태에서 생성되는 50nm 크기의 나노급 미세 입자를 제조하며, 균등 분포치는 50~100nm 능한 중양 투입 형식의 나노급 입자 원심분리기/로타리 오토마이저를 개발하며 미세 입자의 거동은 다음과 같은 실험 식<sup>(2)</sup>으로 관측할 수 있다.

### 2.2 해석

#### 2.2.1 반경방향의 분사 속도

본 기술의 최종 목표치는 30,000rpm 이상의 초고속 회전 상태에서 생성되는 50nm 크기의 나노급 미세 입자를 제조하며, 균등 분포치는 50~100nm 가능한 중양 투입 형식의 나노급 입자 원심 분리기/로타리 오토마이저를 개발하며 미세 입자의 거동은 다음과 같은 실험식으로 관측할 수 있다.

$$Vr = 0.043 \sqrt[3]{\frac{\rho n^2 N^2 d Q^2}{\mu h^2 n^2}} \quad (1)$$

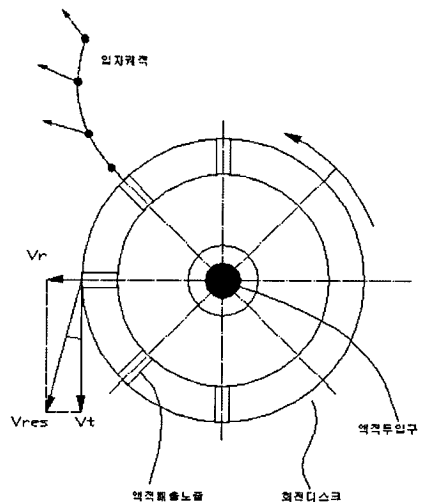


Fig. 2 Rotary disk coat participle flow pattern attitude of format

(1)에서 분사속도를 구하기 위하여 지름  $d$ : ft, 점도  $\mu$ : cP, 디스크높이  $h$ : ft, 회전수  $N$ : rpm, 액적 공급량  $Q$ : ft<sup>3</sup>/min, 액적의 밀도는  $p$ : lb/ft<sup>3</sup>를 적용하였다.

(1) 접선방향의 분사 속도  

$$V_t = \pi d N \tag{2}$$

(2) 합성속도  

$$V_{res} = \sqrt{V_t^2 + V_r^2} \tag{3}$$

(3) 분사각도<sup>(3)</sup>  

$$\alpha = \tan^{-1}(V_r/V_t) \tag{4}$$

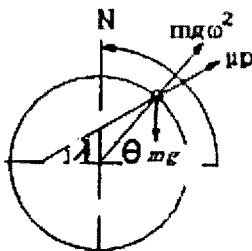
식(3)에서 합성속도는 (1)과 (2) 합 of 的 齣값을 근으로 하여 구한다. 또한 식(4)의 분사각도는 반경방향의 분사속도를 접선방향의 분사속도로 나눈값이다. 회전디스크의 분무 입자의 거동 해석에서의 미세 입자 운동방향의 각도는 다음과 같이 구할 수 있으며 각각의 액적 물질의 물성치에 따른 회전 디스크의 설계에 주요 인자이다.

**2.2.2 운동방향의 각도**

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{\mu + v(\cos\theta - \mu\sin\theta)}{1 - v(\mu\cos\theta + \sin\theta)} \tag{5}$$

식(5)에서 운동방향의 각도는 아래와 같이 적용 하였다.

- $\lambda$ : 미세 입자 운동방향의 각도
- $\theta$ : 디스크상의 입자의 위치 각도
- $N$ : 디스크의 회전속도
- $v$ : 입자상의 원심력/중력 비
- $\mu$ : 입자의 동마찰 계수중력(mg), 마찰력( $\mu P$ ), 원심력( $m r \omega^2$ )



**Fig. 3 The rotary disk as a matter of which rotates at high speed**

**2.3. 원심분리기(로타리 오토마이저) 시스템 설계**

**2.3.1 중앙 액적 투입 장치**

현재 국내외적으로 유통되고 있는 디스크형식의 원심 분리기는 공급관이 회전축과 분리된 별도의 좌우 대칭형 2개 이상의 공급관으로 액적을 디스크에 공급하는 구조로서 투입되는 디스크내부에서의 액적의 불균형 배치 상태로 인하여 초기 임계 진동에 의한 기기 파손이 발생하며 또한 하부 디스크 및 디스크 바닥재가 회전축과 일체로 형성되어 있어 중앙 회전축을 통한 액적 공급이 불가능하다. 본 연구에서 개발 하고자하는 중앙 투입 형식의 나노급 입자 원심 분리기는 회전축에 직접 액적을 공급하여 무게 중심이 디스크 중심체에 있음으로 상기 진동 현상을 최소화시킬 수 있으며 미립자를 크기별로 분류할 수 있다. 따라서 본 연구 과제인 중앙 투입 형식의 나노급 입자 원심 분리기는 회전축에 직접 액적을 공급하여 무게 중심이 디스크 중심체에 있음으로 상기 진동 현상을 최소화시킬 수 있으며 더욱 미립자를 크기별로 분류할 수 있도록 전조실 내부 구조를 개선시킨다.

**2.3.2 회전 디스크 무게 경감**

기존 원심 분리기의 디스크 구조는 회전축 끝부분에서 무거운 디스크 일체형으로 부착되어진 외팔보 형식으로 심한 진동 현상을 수반하여 국내 기술 수준으로는 제작상의 한계가 있다. 따라서 본 기기는 디스크의 무게를 최대한 경량화하고 무게 중심을 베어링부와 최대한 근접시키어 진동 충격을 최소화 한다. 일반 원심 분리기는 주요 무게 중심인 하부디스크 및 디스크 바닥재가 회전축의 끝단에 부착되어 있다.

**2.3.3 장탈착 및 정비보수 용이한구조**

Fig. 4에서 회전축을 이용한 액적 투입 구조로서 불균일한 중량차이로 야기되는 진동을 방지 하기 위해 구조 설계를 하였다 기존 디스크 구조물은 일체 성형물로서 작업이후 공급 액적이 디스크 내 부에서 건조되고 고착되어 정비 유지 작업이 필요 한 경우 전체 디스크를 분리하고 진동 세팅에 장 시간 소요되는 어려움이 있다. 따라서 본 연구과 제는 고유 기술로서 분해 조립이 용이한 디스크 구조를 개선하여 디스크내부에서 발생하는 잦은 찌꺼기 고형물 제거를 위한 사후 수리, 교체를 용이하게 하기 위하여 체결용 볼트로서 디스크의 분 해 조립을 용이하게 함과 동시에 무게를 경감 시킨다

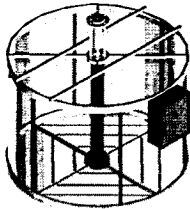


Fig. 4 Centrifugal machine constructional drawing

### 2.4 회전디스크의 구조 설계 및 제작

Fig. 5는 연구과정에서 제작한 회전디스크로서 최적의 균일한 미소 입자 생성을 위한 노즐 배출구 설계를 하였으며, 고속회전에 따른 원심력에 기초한 운동에너지를 이용하여 원주상에 형성된 노즐을 통하여 액적을 분사하여 미립화하는 VAN ED Wheel 형식으로서 가공 하였다. 기존 디스크 구조물은 일체 성형물로서 작업이후 공급 액적이 디스크 내부에서 건조되어 고착되어 정비 유지 작업이 필요한 경우 전체 디스크를 분리하고 진동 세팅에 장시간 소요되는 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5와같이 고유기술로서 분해 조립이 용이한 디스크 구조를 개선하여 디스크내부에서 발생하는 잦은 찌꺼기 고형물 제거를 위한 사후 수리, 교체를 용이하게 하기 위하여 체결용 볼트로서 디스크의 분해 조립을 용이하게 함과 동시에 무게를 경감 시켰다. 생성되는 입자의 크기는 전자 현미경 관찰 결과  $3\mu\text{m}$ - $50\mu\text{m}$  정도로서 불균일한 분포상태 및 비교적 큰 형태로서 작은 크기의 나노급 미세 입자 제조에는 매우 높은 아연 분말파우더를 사용하면 정교한 회전 디스크 노즐팁 및 초고속 회전에 의한 원심 에너지에 의하여 직경이 100nm 크기의 나노급 미세 입자의 생성이 가능하다.

#### 2.4.1 회전디스크 및 에어스핀들

용융 아연(Zn)의 분말 파우더를 제조하는 경우 회전디스크의 열팽창에 의한 불균형 발생으로 인한 진동 및 회전체

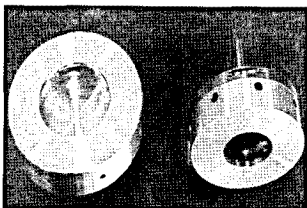


Fig. 5 Center committed rotary disk

기계의 고장을 방지하기 위하여 열에 강하고 열팽창률이 작은 인코넬 특수 합금을 소재로 이용하여 회전디스크를 추가 제작할 필요가 있다. 일반적으로 회전디스크는 고속 공기 흐름 속에서 공기 입자와의 충돌로 인하여 표면이 박리되는 피팅 현상이 발생하므로 회전디스크의 내구성을 강화하기 위하여 아노다이징 처리할 필요가 있다. 그러나 원심 분리기의 회전디스크는 회전 운동에너지를 압력 에너지로 변환하여 유체상태의 액적을 압력 노즐 스프레이에서와 같이 분무하는 장치로서 본 연구에서는 회전디스크의 구동축과 동력원인 모터로 주축이 일체형으로 이루어져 주축의 고속회전이 가능하도록 마찰이 거의 없는 에어 베어링으로 구성된다.

그러나 기존의 볼 베어링은 볼 자체가 100% 구가 아니기 때문에 축 회전의 정확도가 떨어지고 고속회전시 진동이 발생될 뿐만 아니라 마찰로 인해 고속회전이 불가능한 반면 에어 베어링은 공기의 동압(動壓) 효과에 의하여 베어링 역할을 함으로써 회전축에 저항이 없고 최대 240,000rpm의 고속회전이 가능하며 진동이 없고 정밀도가  $1\mu\text{m}$  정도로 뛰어나므로 일반 베어링을 이용한 터보압축기보다 내구성이 우수한 에어 베어링을 초고속 원심분리기/로타리 오토마이저에 적용한다.

#### 2.4.2 에어 베어링

에어 스피들 및 고주파 고속모터를 채용한 이유는 회전속도가 높으면 원심력에 의하여 미세 입자의 크기가 더욱 작아지게 할 수 있으며 에어 베어링을 적용하는 이유는 다음과 같다.

- (1) 공기 냉각 효과: 에어베어링에서 배출되는 다량의 공기를 이용하여 본체 내부 구조 및 전동 모터를 냉각시킨다.
- (2) 오일 프리 효과: 오일 볼 베어링을 에어베어링으로 대체하여 이용함으로써, 생산 제품에 대한 오일 오염이 없다.
- (3) 미세입자 생성: 로타리 오토마이저의 회전 속도를 증가 시킴으로써 나노급 미세 입자를 제조할 수 있다 원심력의 크기는<sup>(4)</sup> 불균형의 크기와 회전속도의 제곱을 곱한 값에 비례하고 이 원심력이 어느 값 이상으로 되면 회전 기계의 기능을 저하시킨다. 기능 저하의 정도에는 회전체의 불균형 및 회전속도의 크기가 직접 영향을 미치지 않지만, 이것만으로 기능저하의 정도를 추정할 수 없으므로, 베어링의 치수, 강성, 회전체 및 정지부분의 중량등 회전체와 베어링의 특성을 종합하여야 비로소 추정될 수 있는 것이다.

공급장치에서 분사되는 저온의 차가운 공기에 의하여 액

적 상태의 고온의 미립자는 고체상태의 미세 입자 파우더 제품이 형성된다. 따라서 액적 상태의 고온의 미립자는 크기가 작을수록 단위 체적당 표면적을 증대시키며, 열 효율 또는 화학반응효율을 극대화됨으로서 비교적 짧은 자유낙 하시간 동안 충분히 고형화 파우더 미세입자로 변환되고 냉각 건조실의 하부에 설치된 파우더 제품 배출구를 통하여 집하 될 수 있다.

이후 파우더 제품 집하 과정 이후에는 미세 입자가 혼합된 공기를 대기로 배출하게되면 대기오염문제가 발생하므로 미세 입자를 제거한 청정 공기를 대기로 배출할 필요가 있다. 냉각 건조실에서 배출되는 공기중의 일부분의 파우더 미세입자는 사이클론 여과장치의 내부를 지나는 동안 회전식 기류에 의하여 원심분리효과에 의하여 회수되어 사이클론 여과장치의 하부에 설치된 파우더 제품 배출구를 통하여 집하된다.

나머지 미세 입자가 혼합된 공기는 FAN에 의하여 유인되고 백필터 및 직선형 사이클론을 포함한 집진 설비를 통과하는 동안 불순물은 탱크의 내부에 케이크 형태로 걸러지고 정화된 청정공기만이 대기로 배출 시킨다.

### 3. 실험결과 및 고찰

제품의 성능시험은 30,000rpm이상으로 고속 회전하고 있는 로타리 오토마이저에서 분사시키며 중력에 의하여 낙하 된다. 파일롯 실험용 원심분리기에서는 하부에 배치된 모터의 구동축에 회전디스크를 직결 구동한 중앙 액적 투입형식의 원심분리기를 제작하여 미세입자의 제조 실험을 수행하였다.특히 중량이 가벼운 미세 입자의 공기중 부유를 방지하기 위하여 건조실을 제작하여 실험을 하였으며, 향후 고온 액적의 미립자를 냉각하여 압축공기를 이용한 냉풍방식의 냉각 장치를 제작하여 왁스 대신 용융온도가 비교적 높은 고부가가치 미세 입자를 제조할 수 있다.

Fig. 6은 미세 입자를 에어스핀들(air spindle)을 이용하여

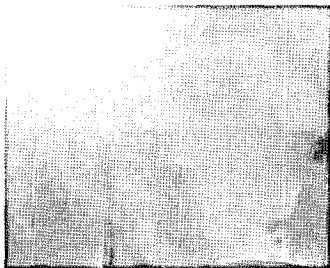


Fig. 6 The fine particle which sprays

회전디스크가 30,000rpm 이상으로 회전하고 있는 초고속 원심 분리기에서 낙하된 미세 입자장면을 사진 촬영한 것이다. 현재 왁스의 미세 입자의 크기는 전자 현미경 관찰 결과로서 비철 금속 아연의 100nm급 미세 입자의 생성이 가능하다. 본 연구에서는 원심분리기의 성능 실험을 위하여 Fig. 7과 같이 1.5Kw급 에어 스피들에 회전디스크를 장착하고 파일롯 원심분리기를 제작하여 실험을 실시 하였으며,용융 온도가 비교적 낮은 왁스를 녹인 액적을 이용하여 30,000rpm 초고속 성능 실험을 수행하여 왁스 미세입자를 생성하는데 성공하였다. 향후 본 연구 내용을 기초하여 고온 용융온도를 갖는 반도체 소재의 미세 입자, 폴리우레탄 및 귀금속의 미세입자를 제조하는 원심분리기의 로타리 오토마이저를 핵심 기술인 미세입자 제조장치와 주변설비를 확장하여 고부가가치 첨단 파우더 제품 양산용 종합 시스템 제작에 적용할 수 있다. 미립자<sup>(4)</sup> 제품의 크기, 형태 및 분포도의 연구결과에서 살펴보면 원 심 분리기 또는 로타리 마이저에서 분사된 미세 입자는 전자현미경으로 Fig. 8와 같이 살펴보면 원심 분리기 또는 로타리 마이저에서 분사된 미세 입자는 전자현미경으로 Fig. 8와 같이 크기, 분포도 및 형태를 측정 하였다. 미세

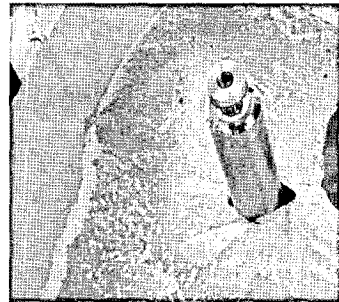


Fig. 7 In compliance with the centrifugal machine, the fine particle which fell

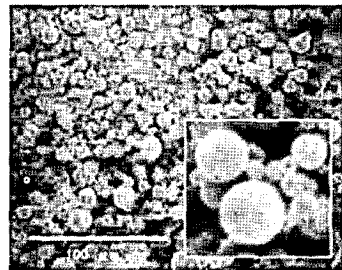


Fig. 8 Size and form of fine particle

**Table 1** The fine particle which follows number of revolution

회전수(rpm)	10,000	20,000	30,000
입자지름크기( $\mu\text{m}$ )	12.4	5.3	2.7
입자분포도( $\mu\text{m}$ )	12.4~160.7	5.3~90.9	2.7~46.7
35,000	40,000	45,000	
0.92	.27	.1	
0.92~25.6	.27~13.4	.1~8.3	



**Fig. 9** Center committed centrifugal machine

입자의 크기가 작고, 분포도는 균등하고 형태는 진원에 가까울수록 양질의 파우더 제품이라고 할 수 있다.

연구과정에서 원심분리기의 설계수정 및 시제품의 성능 측정을 위하여 알루미늄 재질의 초정밀 경량 소형 회전 디스크를 설계, 제작을 하였고 왁스 용액을 이용하여 미세 분말 파우더를 생성하여 작동 성능 시험에 성공을 하였으며, 높은 회전수에 비례하여 작은 미세입자 생성이 우수하다는 결과를 얻었다. 성능 시험 과정에서 회전수(rpm)을 기준으로 분말 파우더 입자의 형태 크기 및 분포도를 전자현미경을 이용하여 Table 1에서와 같이 측정하였다.

본 연구에 개발된 중양투입식 원심 분리기는 Fig. 9와 같다.

## 4. 결론

본 연구에서 중양 투입식 고속 회전 원심 분리기 개발은 각종 첨단물질의 나노급 크기의 미세 입자 분말 파우더 제조용으로 사용되며 향후 건조실 및 냉각 고형화 장비를 포함한 주변시스템을 보완하여 미세입자 제조장비 제작에 많은 도움이 예상된다.

- (1) 본 연구에서는 원심분리기 실험 과정에서 성능 측정을 위하여 재료 공급을 비철금속 파우더(아연), 컴퓨터 케이스 및 부품 제조용 소소재 분말 파우더 원료로 한정하였다.
- (2) 향후 본 연구내용을 기초하여 고온 용융 온도를 갖는 반도체 소재와 귀금속의 미세입자를 원심 분리기 또는 로타리 오토마이저등을 이용하여 나노급 미세입자를 제조할 수 있는 제조 장치 및 주변 설비를 장착하여 고부가치 제품 양산용 종합 시스템 원심분리기 제작에 적용할 수 있다.
- (3) 본 연구에서 제시되는 중양 액적투입 형식의 원심분리기는 에어스 핀들에 회전디스크를 장착하여 고속 회전시 마찰감소와 진동이 제거 되고 무게를 경감시켰다.
- (4) 향후 본 연구에서 개발된 원심 분리기는 송풍 팬을 이용하여 흐름의 속도를 조절함과 동시에 싸이클론 집진장치로 유인하는 송풍팬의 문제점을 개선 보완할 필요가 있다.

## 참고 문헌

- (1) Masters, K., 1979, *Spray Drying Handbook*, John Wiley & Sons, New York, pp. 35~65.
- (2) Masters, K., 1972. *Spray Drying*, Leonard Hill Books, London, pp. 66~106.
- (3) Lee, J. M., 2009, *For engineering dynamics*, Kyobo published, Republic of Korea, pp. 179~203.
- (4) Masters, K., 1976, *Spray drying an introduction to principles, operational practice, and applications*, Wiley, New York, pp. 37~87.