

나노기술을 이용하는 식품산업

강위수

강원대학교 생물산업공학전공

Application of Nano Technology to Food Industry

Wie-Soo Kang

Biological System Engineering, Kangwon National University

Abstract

If dietary fibers used in food and oriental medicine industry are processed using a twin screw extruder and ultra fine grinder, dietary fibers with a particle size below 10 μm , which easily dissolve in water and form colloidal dispersed phase, can be mass produced. A twin screw extruder can heat, mix, separate, compress, orientate, expand and form dietary fibers through one process under high shear and high temperature conditions. An ultra fine grinder equipped with centrifugal classifier can break the cell wall of extruded fibers under high shear stress and grind the extruded fiber into super fine powder of 0.1 to 10 μm in particle size at -20 to 40°C, so that the solubility of fiber is improved with the increased hydrophilic colloid. The new technology to obtain nano-scaled materials will be a substantial unit operation with high potential in food industry.

Key words: twin screw extruder, ultra fine grinder, nano technology

서 론

식품, 의약품, 한방재 산업 분야에 Nano과학이 필요한 시대가 왔다. 즉 식품, 한방재, 화장품, 제약 등의 산업에서 사용하고 있는 원재료의 고유한 영양성분, 색, 향기, 풍미 등이 최대한 보존시킬 수 있도록 가공하여야 하고, 액체속에서 유효 성분이 쉽게 용해될 수 있는 콜로이드 입자 크기 범위인 0.1~10 μm 까지 초미분말화 기술인 나노과학이 식품 산업에도 요구되고 있는 실정이다.

최근 한방재는 건강식품으로서 대체하는 과정에서 원재료의 고유성분이 보존된 상태에서 손 쉽게 차거운 물에 용해될 수 있는 친수성 콜로이드계 입자까지 초미분말화 할 수 있게 되면, 국민들은 일반적인 커피나 차 처럼 다양하게 초미분말화한 한방

재를 손쉽고 용이하게 음용하게 됨으로서 국민 건강 증진에 기여도가 클 것이며, 이를 이용한 다양한 건강 식품이 개발되어 국가 경쟁력에 큰 역할을 할 수 있을 것이다.

곡물 및 약용식품의 영양성분, 향기 등의 입자크기가 1~100 μm 범위이지만 분말 가공 처리 방법으로 재료의 유효 성분을 용출하기 위해서는 분쇄 가공된 분말 입자의 크기는 최소한 10 μm 이하가 요구되며, 재료의 고유한 향이 휘발하지 않으면서, 분쇄 효율을 향상시키기 위해서는 저온 또는 초저온 분위기에서 초미분쇄하여야 한다.

가열처리 방법인 고온·고압에서 고전단력이 발생하는 이축압출성형 방법을 이용해서 섬유질이 많이 포함된 한방재를 처리하면 살균작용, 독성제거가 될 뿐 아니라, 세포벽 파괴 등에 의하여 다양한 수용성 식이섬유의 량이 증가할 수 있게 된다. 또한 한방재에서도 다양한 모양으로 제형 할 수 있고, 초미분쇄기를 이용하여 압출성형 방법으로 가열처리된 한방재를 초미분쇄기로 초미분화하여 경제적으로 양산화 할 수 있는 기술에 대한 개발이

Corresponding author: Wie-Soo Kang, Biological System Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea.
Phone: 03-250-6494, Fax: 033-250-6494
E-mail: kangwiso@kangwon.ac.kr

요구되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 분말가공 처리 과정에서 곡류, 약용 식물들의 고유한 성분, 맛, 향기 등을 최대한 보존하면서 살균처리, 독소제거, 수용성 식이섬유량을 향상시키기 위해서는

첫 번째 : 초미분쇄기를 이용한 초미분말화 기술 개발

두 번째 : 초저온 또는 저온 분위기에서 분쇄 할 수 있는 분쇄 system

세 번째 : 이축 압출성형-초미분쇄 가공처리로 초미분말화 기술에 대한 문헌을 조사하였다.

식물세포벽의 구조

식품산업에서 사용되는 식품 분말의 미세구조는 Fig. 1처럼 1~100 μm 범위이고, 세포벽은 200~500 μm 범위이다. 한방산업, 의약품산업과 식품산업에서 재료의 입자 크기를 3 μm 정도로 초미분쇄 시키면 표면적이 증가됨으로 용해도가 우수한 콜로이드계의 고체 분산상을 만들 수 있다. 분산계의 분산매와 분산상의 물리적 특성은 입자의 크기, 입자모양과 굴곡성, 입자표면의 성질(예, 전기적 성질 등), 입자-입자 사이의 상호작용 등에 따라 달라진다. 콜로이드는 액체에 용해가 잘 되는 친수성 콜로이드와 용해가 안 되는 소수성 콜로이드로 구별되어진다.

최근 초미분쇄기를 이용하여 단백질을 3 μm 이하로 초미분말화 시키면 단백질 내부에 존재하는 소수성 부분이 노출되어 미세분말 표면의 친유성 성향을 증가시킬 수 있다. 이렇게 미세 분말화된 단백질은 식품산업 분야에서 심각한 건강문제를 일으키고 있는 지방을 대체하는데 사용하고, 또한 물속에 있는 기름은 소수성이지만 단백질이 첨가되어지면 초미분말화된 단백질 표면에 기름이 흡착되어서 친수성화 된다. 실제 cake 에서도 Table 1처럼 전분

Table 1. Type and sizes of particle in cake batter

Molecules(sugars, lipids, proteins)	0.5 nm to 10 nm
Protein 'micelles'	30 nm to 300 nm
Oil droplets	100 nm to 10 μm
Fat crystals	200 nm to 50 μm
Starch granules	1 μm to 30 μm
Air bubbles	5 μm to 50 μm

의 입자크기 30 μm이하로 되면은 친수성 콜로이드 분산상으로 존재함을 알 수 있다. 곡류나 한방재의 원료도 10 μm이하로 초미분말화 한다면 이들 콜로이드 분산상은 차가운 물에도 쉽게 용해될 수 있을 것이다.

식품의 원료로 사용되어지고 있는 과채류와 곡류의 세포벽은 microfibril 물질인 cellulose와 matrix 물질인 hemicellulose, pectin, 당단백질 그리고 enclusting 물질인 lignin으로 이루어져 있다(Fig. 2). 그리고 이들은 서로 공유결합, 수소결합, 이온결합, 소수결합 등으로 강하게 연결되어져 있어서 식물조직을 외부의 공격으로부터 보호 할 수 있다. 세포벽 구성물질의 대부분은 인체 내에서 소화되지 않으며 식이섬유 dietary fiber로서 생리적 기능에 영향을 미친다.

이들 식이섬유는 용해도에 따라 water-soluble dietary fiber와 water-insoluble dietary fiber로 분류된다. water insoluble dietary fiber는 소화기관을 통과하면서 다량의 수분을 흡수해서 대변의 용적을 증가 시켜주고, 장내 통과시간을 줄여줄 뿐만 아니라 전분의 가수분해를 억제하고 포도당의 흡수를 지연시키는 생리작용을 한다. 반면에 water soluble dietary fiber는 3차원 구조의 젤을 형성하는데 이 젤은 식품의 장내 통과를 지연시키고 포도당의 흡수를 방해한다. 특히 혈중에 존재하는 콜레스테롤의

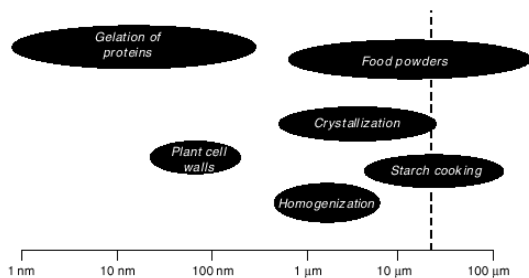


Fig. 1. Scale of food processes and elements on the microstructure.

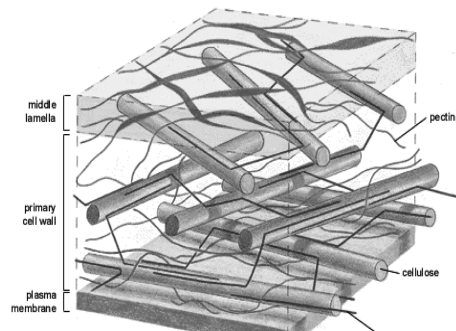


Fig. 2. Structure of Plant cell wall.

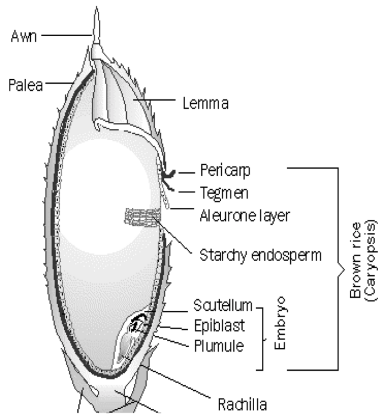


Fig. 3. Grain morphology.

함량을 감소시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 불용성 상태의 식물 세포벽을 수용화 시켜서 수용성 식이 섬유 함량을 증가시킬 수 있다면 이는 식이섬유의 생리적인 특성을 다양화시킬 수 있을 뿐만 아니라 한방재에 존재하는 유효성분을 용출시키는데 도움을 줄 것이다.

열매를 식용으로 하는 식물류인 곡류에 있어서 가장 바깥 쪽은 왕겨(껍질부분)로 둘러싸여져 있으며, 그 내부는 피부, 배유, 배아로 되어있다(Fig. 3). 과피와 종피로 이루어져 있는 피부는 배아와 배유를 보호하는 부분으로 조섬유, 회분, 조지방을 많이 함유하고 있으며, 특히 세포막은 묽은 산이나 알칼리에 용해하기 어려운 섬유로 되어있다. 이 부위에는 단백질, 지방, 비타민 B1이나 무기질이 많이 들어 있으나, 딱딱하고 거친 조직으로 이루어져 있어서 보통 2차 도정과정에서 대부분이 제거 된다. 배아는 곡류 알맹이 아래 부분에 있는데 발아 할 때 뿌리나 잎과 같은 새로운 식물체를 형성하는 번식 기관이므로 지질, 단백질, 무기질이 많이 들어 있으며, 기타 영양성분들도 다양하게 많이 있으나 도정할 때 제거된다. 배유는 곡류의 대부분을 차지하는 먹을 수 있는 부분으로 전분을 많이 함유하고 있으며 피부와 배아부는 식이섬유와 생리활성 물질을 많이 함유하고 있다. 쌀의 전분입자의 크기는 2~12 μm, 밀, 보리는 25 μm, 메밀은 12.5 μm, 감자는 45 μm, 고구마는 15 μm 정도 이며 일반적으로 전분 입자를 1~30 μm 크기로 초미분말화 시키면 전분은 수용성이 우수한 겔 식품을 만드는데 이용되어질 수 있다.

곡물과 약용 식물에 함유된 고유 성분은 열수에

서 추출하였으나, 고온·고압하에서 고 전단력으로 섬유질을 분쇄→혼합→혼련→팽화 또는 호화 시키면 펙틴, 헤미셀룰로오스 등의 섬유질이 식이 섬유화 될 수 있는 압출성형 가공기술이 개발되어야 하고, 또한 이를 물에 용해가 잘 되도록 초미분말화 가공기술이 개발되어야 한다. 즉 압출성형기술과 저온에서 초미분말화 기술이 융합된 기술이 식품산업에 개발되어야 한다.

초미분 저온 분쇄기

국내에서는 박 등(1993, 1995, 1996)이 연구를 통해 독일에서 구입한 유체에너지 분쇄기인 jet mill을 이용하여 식이 섬유량이 38%인 미강을 초미분쇄 시키면서 공기분급기의 분급속도 9,000에서 21,000 rpm 까지 회전시켜 3.7 μm 구형인 초미분말에서 식이섬유함유량 25.2-31.5%로 식이섬유 함량의 약 80%이상을 추출하였다. 미분말화 동부가 조분말 동부보다 유효력은 약 3배 증가되었고, 약 85% 수준으로 동부 전분의 건식회수가 가능하였고, 최소한의 물로 세척 한 후에는 좋은 품질의 동부목 제조가 가능함을 연구 조사하였다. 마의 점질물 분리한 결과 분쇄 생성물의 입자의 크기가 10-15 μm 까지 미분말화 할 수 있었고, 미분말 입자들은 점질물의 주성분인 식이섬유와 단백질 함량이 분급하지 않은 마 분말보다 2.5-9배 정도 농축되고, 수분용해지수는 1.5-3.0배 이상 증가되는 결과를 조사하였다. 즉 마로부터 점질물을 분리, 농축하기 위해서는 5-30 μm 크기의 입자까지 초미분쇄하여야 한다고 조사하였다. 탈지대두박 재활용하기 위해서 실험한 결과 식섬유가 20%인 타원형 분말이면서 4.0-14.2 μm 입자 크기 범위였고, 초미분말을 케익에 10% 정도까지 대체하였을 때 콩 특유의 비린 냄새가 강하지 않았음이 조사되었다. 또한 대두피는 단백질이 20%, 식이섬유가 50% 이상 함유되어 식이 섬유 소재인 원료를 초미분말화 결과 공기 분급기에 따라 미분획은 3.1-5.5 μm이고, 조분획은 9.9-20.0 μm 였으며 케익과 쿠키의 제조에 있어서 밀가루를 대두피 분말로 10% 정도 수준 까지 할 수 있다고 보고함으로써 국내의 곡류를 이용하여 초미분말 하였을 경우 충분히 겔 식품을 생산 할 수 있음을 분석하였으며, 국내에서도 강의 연구진들에 의하여 초미분말화 분쇄기가 개발되어 국내에서도 선식 및 건강식품에 초미분말을 사용 할 수 있게 되었다.

초미분쇄기

최근의 분쇄공학에서는 고밀도, 고집적, 고농축의 제품생산을 위한 초미립분말에 대한 요구가 커지고 있다. 특히 초미립분말의 입도 조절에 대한 요구는 증가하고 있다. 일반적인 산업분야에서는 초미립자의 경향을 나타내는 $d_{97}=100\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 사이에서의 Cut Size를 가진 가진 제품이 요구된다. 이와 같이 초미세분말을 생산하는 분쇄기를 초미분쇄기라고 한다.

건조분말의 초미분쇄에는 분급장치가 내장되어 있거나 별도로 외부에 부착되어 있는 고속의 충격분쇄기(Impact mill)나 제트밀(Jet mill)이라고 부르는 유체에너지밀이 사용된다. 또한 습식 초미분쇄에는 콜로이드밀(colloid mill)이 사용된다.

최근에 섬유질로 구성된 식품 및 한방재료 가공 산업에서의 분쇄가공기술은 입도가 $90\% < 10\ \mu\text{m}$ 이하이고 평균입도 $3\ \mu\text{m}$ 이하의 분말이 요구되고 있다. 그러나 Table 2에서 보듯이 일반적인 분쇄기로서는 섬유질 재료를 평균입도 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 분포를 가진 제품을 생산하기가 매우 어렵기 때문에 분쇄→추출→농축→진공건조→분말의 공정을 통하여 제조되는 경우가 많다. 이러한 공정의 축소와 섬유질 재료의 초미분쇄를 위해 고 전단력으로 분쇄할 수 있는 새로운 형식의 분쇄기가 개발되었다. 새롭게 개발된 초미분쇄기는 기존분쇄기에서 일정범위의 입도분포를 가진 최종제품생산을 위해 요구되던 별도의 분급시설을 분쇄기 내부의 회전장치를 이용함으로써 분급시설의 공정을 단축하였다. Table 2는 유체에너지 분쇄기에 분급장치가 내장된 분급내장형분쇄기(Turbo Mill)와 기존의 식품분쇄기의 특징을 비교 분석하였다.

강 등(2003)에 의하여 개발된 Turbo 분쇄기는 분쇄시 발생되는 열을 30°C 이하까지 냉발열시킬 수 있으면서 고전단력으로 섬유질이 많이 포함된 재료를 $1\sim 10\ \mu\text{m}$ 범위 까지 초미분말화 하도록 개발되었

으며 이를 Turbo mill이라 하였다. Turbo mill의 분쇄와 분급과정을 설명하며 다음과 같다. Fig. 4에서와 같이 투입재료는 투입장치를 활용하여 투입구(S)를 통하여 분쇄기에 공급되어진다. 여기에서 투입재료는 일정하게 분포되고 임펠러(F2)의 1차날개(F)를 이용하여 강제소용돌이 발생으로 재료를 축 중심으로 유도하고 1차 날개에 의하여 발생하는 원심력을 이용하여 1차 트랙(H), 2차 트랙(I)으로 재료를 이송함과 동시에 충격, 전단, 압축력으로 재료를 1차로 미립화 시키며 최종적으로 3차 트랙(J)을 이용하여 분쇄와 동시에 입자분리를 위한 경계층을 만든다. 즉 Size reduction 효과는 충격을 가하는 임펠러의 날개와 분쇄트랙에서 부딪치는 2중의 충격작용으로 분쇄할 수 있도록 설계하였다.

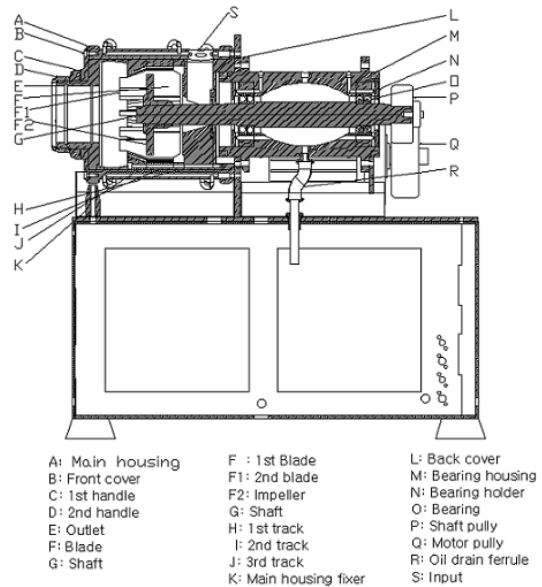


Fig. 4. Turbo mill with equipped with centrifugal classification.

Table 2. Comparison of mill

Estimation item	Turbo mill	Hammer mill	Pin mill	Roller mill
Grinding mechanism	shear, impact compression	attrition, compression, impact	attrition, compression, impact	compression, impact, shear, attrition
Particle range (μm)	10~1	$10^3\sim 10$	$10^2\sim 10$	$10^4\sim 103$
Pulverizing temperature	30°C	110°C	110°C	50°C
Specific energy (kWh/tonne)	100~1000	5~20	20~100	2~4
Cooling method	Freezing cycle	Water jacket	Water jacket	-
Size control method	Motor speed conversion	Size net conversion	Size net conversion	Re-pulverization
Cleaning method	Simple	Simple	Simple	Simple
Cellulose material	Super fine	Fine	Very fine	Coarse

운전공기는 투입구(S)를 거쳐서 분쇄기로 들어온다. 그리고 분쇄영역에서 임펠러(F2)와 1차, 2차 날개와 분쇄트랙(H, I, J) 사이를 흐르게 된다. 분쇄된 생산물은 공기흐름에 혼입되어 미분은 배출구(E)를 통하여 분쇄영역을 떠나고 조분은 원심력에 의하여 3차트랙의 경계층을 따라 돌면서 투입구(S)로 재투입되어 분쇄와 분급과정을 반복하게 하였다.

배출구를 통하여 배출된 재료는 하향흐름의 회수장치(항상 필터를 거쳐 집진장치에 수집)에서 공기로부터 분리되어야만 한다. 배출구(E)의 공간형상은 원심력과 항력을 이용한 미분과 조분의 분리를 가능케 하는 구조로 되어있어 분급되지 않은 재료의 배출을 방지한다.

Fig. 5는 폐회로 Turbo mill 시스템을 보여주고 있다. 폐회로 시스템의 구성은 분진발생과 자동화공정의 실현을 위해 재료의 저장(material storage)→자동이송장치(Auto supplier)→1차, 2차 분리기(1st, 2nd separator)→집진기(dust collector)의 순서로 되어 있으며 컴퓨터에 의한 자동제어(MMI; man machine interface)를 기반으로 한 데이터의 산출 및 제품생산을 제어할 수 있게 설계되었다.

Turbo mill의 분급원리

Fig. 6은 원심분급의 기본원리를 보여주고 있으며 분급원리는 반경방향에 존재하는 힘들의 균형으로부터 이해되어진다. 입자는 임펠러의 날개를 통해 분급zone에 공기로 수송되어지는데 분급은 다음의 가정하에서

- ① 입자는 구형이다.
- ② 입자들 사이에는 상호작용은 존재하지 않고
- ③ 입자와 원주공기속도 사이에는 미끄럼이 존재

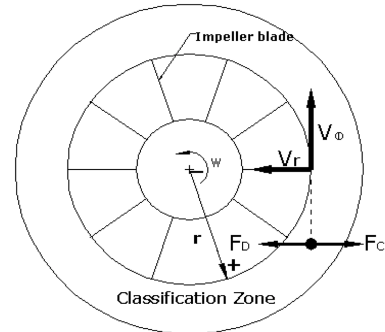


Fig. 6. Basic principle of centrifugal classification.

하지 않으면서

- ④ Coriolis의 힘(여기에서는 원심력방향에 수직으로 작용하는 힘)은 무시되고
- ⑤ 가속도로 인한 힘은 무시된 상태에서 분급이 된다.

분급에서 만약 원심력이 항력보다 훨씬 크면 입자는 조분으로 편향되어질 것이고 만약 원심력이 항력보다 더 작으면 입자는 미분으로서 로터를 통하여 공기로 수송되어질 것이다. 원심력과 항력이 같은 경우에 입자크기를 Cut size라고 부른다.

회전하는 유동장에서 무중력 상태에서 입자밀도 ρ_p 가 유체밀도보다 훨씬 크다고 가정하면, r방향에서의 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$m_p \frac{dv_{r,p}}{dt} = F_D + m_p \frac{v_{\theta,p}^2}{r} = F_D + F_C; F_C = m_p \frac{v_{\theta,p}^2}{r} \tag{1-1}$$

여기에서 m_p 는 입자질량, v_{rp} 과 $v_{\theta p}$ 는 입자의 반

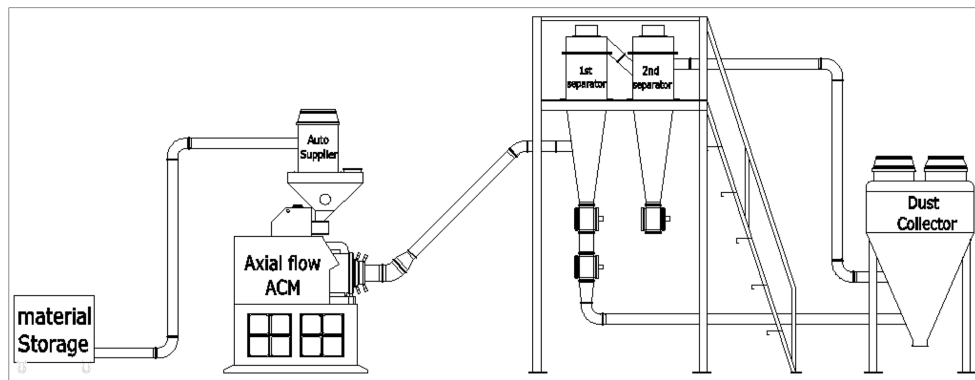


Fig. 5. Turbo mill system.

경속도와 접선의 속도이다. F_D 는 항력이고 는 원심력이다. 구형입자에서 질량은 다음과 같이 주어진다.

$$m_p = \frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 \quad (1-2)$$

여기서, D_p 는 입자의 지름이다. 단지 스토크식에서 입자를 생각하면, F_D 는 스토크법칙으로 주어진다. (F_D 는 유체저항이다.)

저항계수 C_D 와 입자레이놀즈수의 Re_p 관계에서 Stokes 영역 $10^4 < Re_p < 2$ 로 가정하면, $C_D = 24/Re_p$ 된다.

$$(R_{ep} = \frac{D \cdot v_r \cdot \rho}{\mu})$$

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v_r^2}{2} = \frac{24\mu}{D \cdot v_r \cdot \rho} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\rho \cdot v_r^2}{2}$$

$$= 3\pi\mu D_p v_r \quad (1-3)$$

여기에서, μ 와 v_r 은 유체 동점도계수($N \cdot S/m^2$)와 반경속도이다. 방정식 (1-1)에 식(1-2)와 (1-3)넣을 넣으면 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 \frac{dv_{r,p}}{dt} = 3\pi\mu D_p v_r + \frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 \frac{v_{\theta,p}^2}{r} \quad (1-4)$$

$$\left(\frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 \frac{v_{\theta,p}^2}{r} \rightarrow \text{구의체적, } V_s = \frac{4\pi r^3}{3} \rightarrow \frac{\pi D^3}{6}\right)$$

원심분급으로 인하여, Fig. 8에서처럼 F_C 는 F_D 에 반대편에서 작용할 것이다. F_C 가 +r향으로 반경 바깥쪽에서 작용하기 때문에, 주유동흐름은 $v_r < 0$ 이 되

도록 -r방향으로 반경 안쪽에 있다. F_C 가 D_p^3 에 비례적이고, F_D 가 단지 D_p 에 비례적인 동안에 F_C 는 입자가 공기로부터 제거되어질 수 있게 더욱 더 적절하게 만들어지며 D_p 가 증가할 때 지배적인 힘이 된다. 이론적 컷사이즈 D_{PC} 는 방정식(1-4)에서 입자가 속도 $\left(\frac{dv_{r,p}}{dt}\right)$ 를 0으로 놓음으로써 결정되어진다.

$$D_{PC} = \sqrt{\frac{18\mu v_r}{\rho_p v_{\theta,p}^2}} \quad (1-5)$$

Turbo mill의 분급은 아래와 같은 조건하에서 성립한다.

- ① 유동장은 강제소용돌이가 되어져야한다.
- ② 유입되는 공기는 로터와 같은 속도를 가지고 있다.
- ③ 덩어리입자는 흩어져야만 한다.
- ④ 공기와 입자들 사이의 운동량의 변화는 최소가 되어져야 한다.
- ⑤ 초미립자를 분급하기 위해서는 고속의 원주속도가 요구된다.

Fig. 7은 원심분급 이론에 의해 실제 설계 제작된 turbo mill를 보여주고 있다.

Turbo mill의 저온 분쇄시스템

일반적인 분쇄공정에서 열은 아주 작은 크기로 입자가 파괴되어질 때 발생되어진다. 이와 같이 발생된 열은 항상 제품의 향과 품질의 저하를 초래한다. 예를 들어 향료 분쇄 시 제품온도는 42~95°C까지 상승하게 되는데 이것은 향료의 oil과 함수량에 따라 변한다.(Pruthi & Misra, 1963) 그러나 향료는

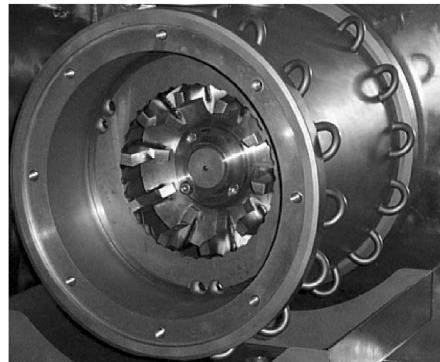
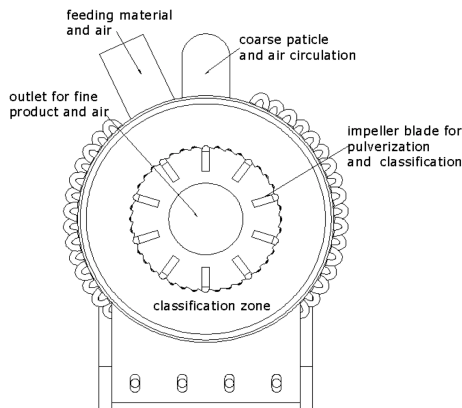


Fig. 7. Classification of turbo mill.

이와 같은 온도상승으로 인하여 휘발성의 오일 또는 향성분의 중요한 일부분을 잃는다. 향료들에서 휘발성오일의 손실은 무려 육두구37%, 육두구의 껍질14%, 계피17%와 오레가노17%에 이르는 것으로 보고되었다.(Andres, 1976) caraway 열매의 분쇄 시 휘발성오일의 손실은 분쇄온도가 -17°C에서 45°C로 증가 시 32%가 된다고 발표되었다.(Wolf & Pahl, 1990) 이러한 휘발성오일의 손실은 초저온분쇄기술로 정확히 감소되어질 수 있었다.(Pruthi, 1980) 기존의 초저온분쇄기술은 -195.6°C에 액체 질소를 이용하여 향료를 예냉하고 분쇄조작동안에 발생한 열을 흡수함으로써 희망했던 저온을 유지하기 위한 냉각을 제공하였다. 또한 저온을 유지하기 위해 액체질소에서 기체질소 상태로의 증발은 향료품질의 개선을 위한 비활성의 건조공기를 만들어 휘발성오일의 손실을 줄임과 동시에 향료의 단위 질량 당 향 농도를 그대로 간직할 수 있게 하였다. 그러나 액체질소와 같은 소모성 가스의 사용은 생산단가의 상승을 유발하여 식품산업과 같이 대량생산과 대량 소비산업에서는 가격경쟁력을 확보하기가 어렵다. 또한 Fig. 8, 9에서와 같은 초저온 분쇄시스템을 구

축을 위해서는 특수 재질을 이용한 분쇄장비제작과 대규모 가스저장 시설의 구축이 요구되었다. 그러므로 경제적이며 안정적인 새로운 형식의 저온 분쇄 시스템의 개발이 요구 되어져왔다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 비소모성 냉매를 이용한 냉동공학을 분쇄기술에 접목시키는 저온 분쇄시스템기술이 개발되었다. 이 기술을 활용하면 분쇄부의 온도를 -30°C~120°C까지 획기적으로 낮출 수 있고 경제적이며 안정적인 제품생산이 가능하므로 이에 대한 기술개발이 요구되고 있는 실정이다.

Fig. 10, 11은 새롭게 개발된 Turbo mill에 적용된 냉각시스템 구성도와 실제 제작된 모습을 보여주고 있다. 각 부분을 설명하면 우선 냉동기에서 증발기의 역할은 분쇄기에서 분쇄와 구동부 그리고 분쇄 시 이용되는 Air chamber→증발기 저압증기를 압축기의 흡입관까지 옮겨주는 통로인 흡입관→냉매 증

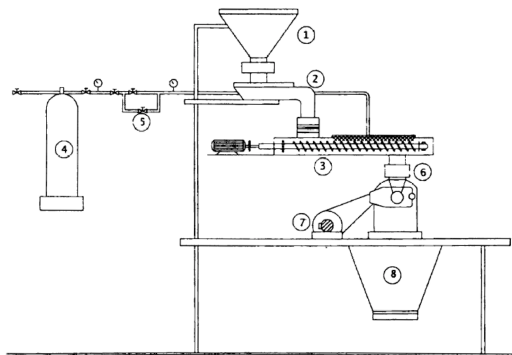


Fig. 8. Schematic diagram of the cryogenic grinding system using liquid nitrogen.

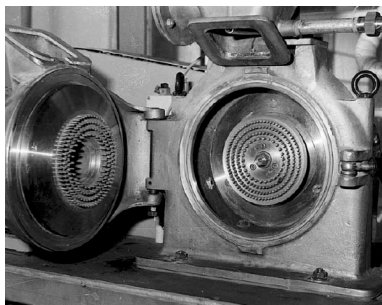


Fig. 9. Grinding zone of pin mill in the cryo-grinding process.

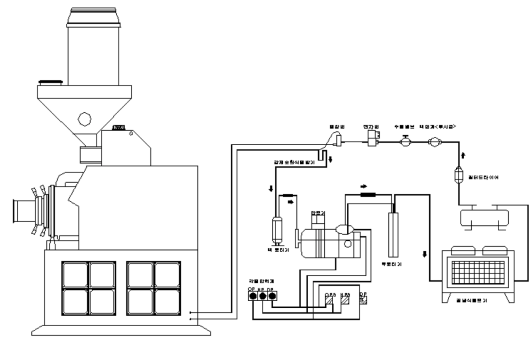


Fig. 10. Design of cooling system of turbo mill.



Fig. 11. Low temperature super fine Turbo Mill (HKP-50).

기의 온도와 압력을 응축 가능하도록 높임과 동시에 냉매순환의 주동력역할을 하는 압축기→압축기 토출 관으로부터 나오는 고압, 고온의 증기를 응축기까지 운반하는 통로인 고압관→고온의 냉매증기로부터 응축매체로 열전달표면을 통해 열을 통과시키는 역할을 하는 응축기→응축된 액을 보관하여 필요에 따라서 증발기에 필요한 액을 일정하게 공급해 주는 수액기→수액기로부터 냉매유량 조절기까지 액 냉매를 운반해 주는 통로인 액 관→증발기로 들어가는 냉매 액의 유량을 조절하고 액관에 있는 고압의 액체냉매를 필요한 저온도에 상당하는 포화압력까지 저하시켜 바람직한 저온에서 냉매가 증발하도록 하는 냉매 유량조절장치 등으로 구성되어 있다.

한방재처럼 고유한 성분을 보존하기 위해서는 저온 system을 갖춘 초미분쇄기의 분쇄기술개발에 대한 연구가 수행되어야 한다.

Turbo Mill의 성능평가

1) 재료의 입도분석

분쇄생성물의 입도분포는 Mie의 광산란 이론을 적용한 Particle Size Analyzer(Malvern Ins. Ltd, Mastersiser-2000, U. K)를 이용하여 분석하였다. 각각의 재료는 Dry dispersion에서 3회 반복하여 얻어진 데이터의 평균값을 이용하여 입자의 입도를 측정하였다.

실험재료별 분석결과는 Table 3과 같다. 버섯류의 경우에 평균입도가 약 7~10 μm의 분포를 나타내었으며 섬유질로 분류되는 감초~인진쑈에서는 6~24 μm의 평균입도를 나타내었다. 또한 홍삼과 쌀에서는 평균입도가 7~10 μm이하로 나타났다.

2) SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용한

재료의 입자형상분석

초미립화에 따른 입자의 형상을 비교하면 버섯류의 경우 Table 3에서와 같이 평균입도의 차이를 SEM을 이용하여 입자의 미립화 경향을 쉽게 비교할 수 있음을 알 수 있다(Fig 12). 특히 대표적 섬유질 재료인 감초는 초미립화 경향을 나타내는 입자의 구형화가 상당히 진행되었음을 알 수 있다.

이와 같이 초미분 저온 분쇄기를 이용하면 d90=10 μm, 평균입도3 μm를 가진 제품생산이 가능함으로서 액체에 고체 콜로이드 분산상으로 존재할 수 있다.

압출성형과 초미분쇄기를 이용한 식품 재료 초미분말화

식품 압출 성형 공정은 고온, 고압, 고전단 조건에서 단시간에 식품 재료를 처리하는 방법으로 식품 재료의 물리화학적 변화 즉 전분의 호화, 단백질 조직화, 효소 불활성화, 살균, 독성 제거 등을 수행할 수 있다. 또한 스크류 조합의 변화로 고전단력을 발생시키므로 섬유질이 많이 포함된 식품재료의 세포벽 조직을 붕괴시켜 용해도를 증가시키는데 압출 성형 공정이 이용되고 있으며, 압출 성형의 원리를 이용하여 식이 섬유가 많이 포함된 식품재료의 압출 성형에 대해 국내외에서 많이 연구하고 있다.

식물 조직의 세포벽은 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 펙틴, 리그린, 당단백질 등으로 구성되어 있다. 불용성 상태로 존재하는 식품 세포벽의 구조를 수용화시키기 위해 화학적, 효소적, 물리적 방법을 이용하여 처리하고 있다. 화학적 방법은 산이나 알칼리를 사용하며, 효소적 방법은 세포벽 성분을 가수분해할 수 있는 효소를 사용하여 처리한다. 물

Table 3. Particle size analysis in food materials pulverizing with HKP-50

Materials for experiments	Circumferential velocity of impeller m/s (rpm)	Particle Size(μm)				Moisture content (%)	Throughput (kg/h)
		d ₁₀	d ₅₀	d ₉₀	Vol. weighted mean D		
Tricholoma magnivelare	110 (8000)	1.568	7.546	22.611	10.09	8	25~35kg
Licorice Root	110 (8000)	1.09	4.195	14.387	6.404	8	20~30kg
Thea sinensis	110 (8000)	1.044	4.662	18.061	7.411	8	40~60kg
Angelica gigas	110 (8000)	2.173	9.473	36.36	18.46	8	40~50kg
citrus	90 (7000)	2.737	13.731	42.884	19.205	8	50~60kg
Artemisa capillaris THUNB	110 (8000)	2.346	14.612	53.825	24.314	8	30~50kg
Ginseng steamed red	110 (8000)	1.295	7.235	21.791	9.632	8	50~60kg
Rice	110 (8000)	1.944	6.382	15.216	7.652	8	45~60kg

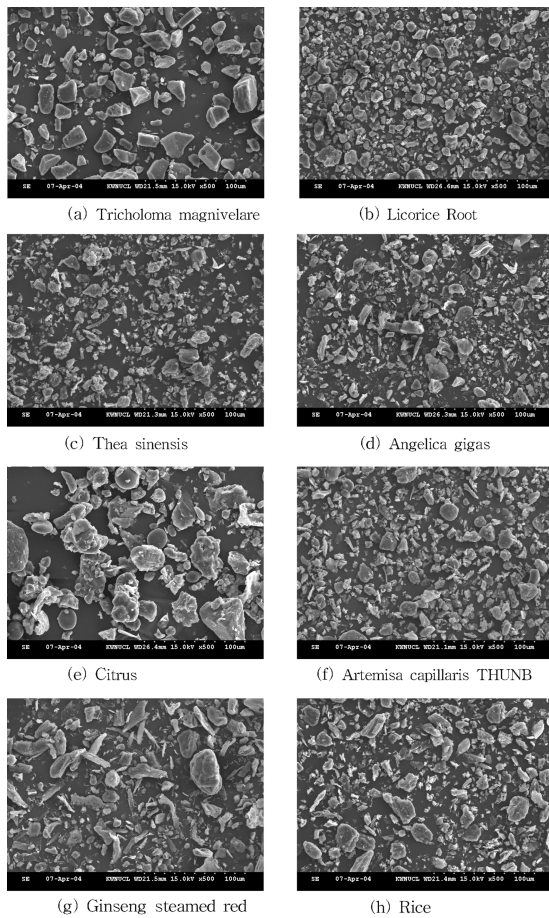


Fig. 12. Scanning Electron Microscope of food materials pulverizing with HKP-50.

리적 방법으로는 autoclaving, popping, blanching, 압출성형 등을 사용한다. 이중 압출 성형공정은 단 시간에 고온, 고압, 고전단에서 가공처리 하므로 식물세포벽의 조직을 완화시켜 수용화를 증대시키는 데 많이 이용된다.

강 등(2003, 2004)은 식이섬유를 많이 함유한 한방재료를 가공하기 위해 한방재 가공 산업용 연속 혼련 압출 성형기를 제작하였으며 Fig. 13, 14와 같이 이단 압출 성형기 시스템을 설계 및 제작하였다. 한방재료를 상부의 이축 압출 성형기에 정량으로 투입하기 위해 공급장치를 제작하였으며, 고수분, 고섬유질의 한방재료를 고속으로 분쇄, 전단, 혼련, 반죽, 분산 등을 할 수 있는 동방향 이축 압출 성형기 및 동력 장치를 설계 및 제작 하였으며, 상부에서 압출 성형한 한방재를 균일하게 성형 및 제형

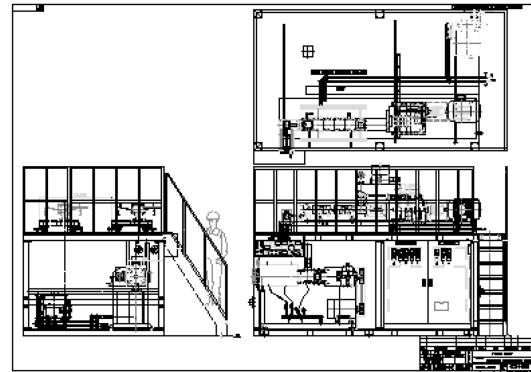


Fig. 13. Design of continuous mixing extruder for oriental medicine herb processing.



Fig. 14. Continuous mixing extruder for oriental medicine herb processing.

할 수 있는 단축 압출 성형기의 스크류 및 동력 장치를 설계 및 제작하였다.

Screw는 압출성형기에 있어서 가장 중요한 역할을 하며, 한방재료의 종류에 따라 Screw의 디자인 및 배열도 달라진다. 연속혼련압출성형기의 상단에 설치한 이축압출성형기는 동방향 회전 맞물림형(Intermeshing Co-rotating type)으로 완전 맞물림 형태의 스크류가 바렐 내에 투입된 식품원료를 이송, 혼합하며 바렐 내에서 물질의 적체가 일어나지 않게 하여 다양한 형태를 가지며 수분함량이 많은 한방재료를 처리 할 수 있으며, 스크류가 고속으로 회전하여 압출 성형하므로 고섬유질 한약재료를 분쇄, 분산 및 혼합할 수 있는 장점이 있다. 스크류는 얻고자 하는 한방제품의 특성에 따라서 다양한 형상으로 설계할 수 있다. 이축 압출성형기에 사용한 스크류 형상은 2조 Screw(2 lobe screw)와 3조 Screw(3 lobe screw)가 있으며 여기에서 Conveying screw, Kneading disk reverse screw가 있다. 일반적으로 식

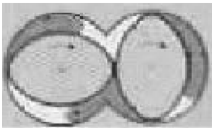
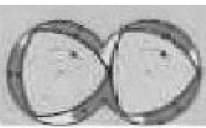
폼 압출 성형에서는 흡이 깊은 2조 screw를 이용하여 압출 성형을 하나 한약재료는 섬유질을 많이 함유하고 있어 전단을 주어 분쇄 및 분산을 용이하게 하기 위해서 흡이 얇은 3조 스크류를 중간에 설치하였으며 Table 4에 각각의 기능을 비교하였다.

Conveying screw는 원료를 바렐의 투입부에서 다 이까지 균일하게 이송시키기 위해서 사용하며, 충진도를 증가시켜 균일한 압력으로 압출 성형하기 위해서 다이에 가까워질수록 Conveying screw의 Lead가 1.5에서 0.75까지 감소한다. kneading disc 및 reverse screw는 원료의 흐름을 막아 혼합, 반죽, 분산 등을 증가시키기 위해서 사용하며, 정방향(30°, 45°, 60°), 중립(90°), 역방향(reverse 30°, reverse 45°, reverse 60°)가 일반적으로 사용된다. Kneading disc 및 reverse screw에 따른 스크류의 기능은 Table 5와 같다.

Fig. 15에서 보듯이 원시료 상황버섯(a)을 SEM으로 관찰한 결과 그림 b와 같이 식이섬유가 관찰되었고 터보 분쇄기로 분쇄한 분말에서는 다량의 침상 섬유질로 구성되었고(c), 더운물에 분쇄된 시료가 쉽게 용해되지 않음을 알 수 있었다(e). 압출 성

형한 시료에서는 처리과정중 조직이 새롭게 괴상으로 구성되었음을 분석할 수 있었고(d), 더운물에는 시료가 압출 성형 과정 중에 발생하는 고온, 고압, 전단력에 의하여 cellulose chain으로 구성된 다량의 섬유질의 기본 구조가 변경되어 glucan monomer 형태의 다당체로 변화되어 무정형 상태의 구형화가 일어났고 친수성이 증가되면서 분산상이 된 콜로이드 용액이 되었음을 분석할 수 있었다(f).

Table 4. Comparioson of 2 and 3 lobe screw

	2 lobe screw	3 lobe screw
screw shape		
groove type	deep groove	shallow groove
conveying dimension	big (1.5-2)	small(1)
conveying capacity	many	small
shear stress	low	high
mixability	low	high
Temperature	low	high

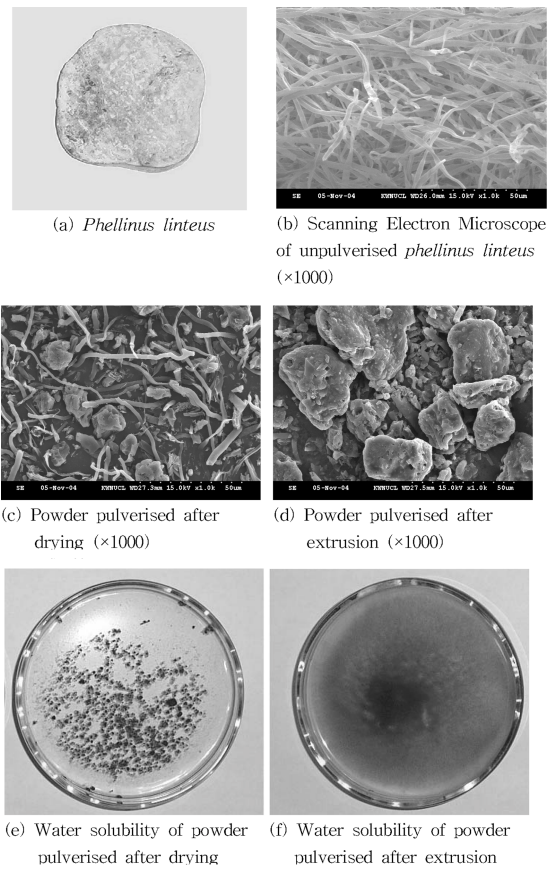


Fig. 15. Phellinus linteus.

Table 5. Comparison of kneading disc and reverse screw

	bad		normal		good
dispersity	KB(R)	RS/RS	RS/KB(R)	KB(N)	KB(L)
pressure	KB(R)	RS/RS	RS/KB(R)	KB(N)	KB(L)
temperature	KB(R)	RS/KB(R)	KB(N)	RS/RS	KB(L)
Specific energy	KB(R)	RS/KB(R)	KB(N)	RS/RS	KB(L)
Residence time	KB(R)	KB(L)	RS/KB(R)	KB(N)	RS/RS

*KB=Kneading Block, RS=Reverse Screw, R=Right turn, N=Neutral, L=Left turn

일반적으로 다량의 섬유질을 많이 포함된 한방재료에서는 시료를 조파쇄 한 후 물에 끓여서 추출된 고형분을 복용하거나, spray 건조 또는 동결 건조 방법으로 건조하여 분말 재료를 생산하고 있는 실정이다. 재래식 방법은 복잡한 생산 공정으로 인하여 한약재의 고유한 색, 향, 풍미 등이 변화, 영양 성분 및 유효성분의 손실의 증가, 추출 공정 후 박이 발생하기 때문에 이러한 문제점은 고온 고압 고전단력으로 재료를 압출 성형한 후 초미분쇄기로 초미분말 하면 친수성이 우수하여 용해도가 증가되어 해결 되었음을 알 수 있었다.

한방재를 압출성형 후 초미분말화 하면, 헤미셀룰로스가 다당이 되고, 세포막이 파괴되어 수용성이 증가된 초미분말인 콜로이드 분산상이 다량으로 생산할 수 있음을 알 수 있었다. 이는 식품 산업에서도 나노 기술을 활용할 수 있어서 이를 활용할 범위는 대단히 넓을 것이라고 사료된다.

결 론

식품 및 한방재 산업에서 이용되어지고 있는 재료들을 저온 초미분쇄기 혹은 이축 압출성형기와 저온·초미분쇄기를 사용해서 가공처리하게 되면, 물에 용해 할 수 있는 입자의 크기 $10\ \mu\text{m}$ 이하 콜로이드 분산상인 식이섬유를 대량으로 생산할 수 있다. 그러므로 이러한 나노 기술은 섬유질이 많이 포함되어 있어서 가공하기 매우 어려운 한방재를 가공하는 기술에 응용되어질 수 있다. 강한 전단력과 고온을 이용하는 Twin screw extruder는 한 공정을 통해 식이섬유를 열처리하고, 혼합하고, 분리하고, 압착하고, 배열하고, 팽창시키고, 성형시킬 수 있다. 이로 인해 전분은 수화되고, 팽윤되고, 호화되고, 무정형화 되거나 분해된다. 단백질에서는 변성이 일어나고 분자 간 결합에 의해 조직화된다. 효소에서는 불활성화가 일어나고 미생물은 사멸되거나 살균된다. 독성물질은 파괴되고 악취는 제거된다. 조직은 팽창해서 밀도가 변화되며 식이섬유는 섬유사이의 결합력이 약해져서 수용화 되어지는 양이 증가한다. Turbo mill speed가 $80\sim 150\text{m/sec}$ 인 centrifugal classifier가 장착된 초미세분쇄기는 $-20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 의 저온상태에서 곡물이나 한방재료의 식이섬유 세포벽을 강한 전단력을 이용해서 $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$ 크기의 초미세분말화시킬 수 있다. 이러한 친수성 콜로이드 분산상의 양이 증가된 분말은 한방산업에서

도 일반적으로 물에 용해가 잘 되는 차처럼 응용할 수 있는 양산기술이 확보되었다. 그러므로 이 두 기술이 식품과 한방산업에 응용되어진다면, 현재 이용되고 있는 다른 기술과 비교해서 더 많은 양의 유효성분과 향기성분을 보전시킬 수 있고 색깔도 더 잘 보전시키고, 더 많은 수용성 식이섬유를 형성하고, 생리활성 물질을 더 많이 추출해 낼 수 있고, 더 많은 양의 식이섬유를 콜로이드 분산상으로 만들 수 있을 것이다. 이러한 가공기술을 이용한 한방재 신상품은 고품질로 대량생산할 수 있어 국제 경쟁력을 갖게 되고, 고부가가치화 할 수 있기 때문에 식품산업에서도 나노과학이 응용되어야 할 시기가 왔다. 이러한 목표를 달성하기 위해서 아래의 기술들이 연구 수행되어야 한다.

- (1) 향기 및 휘발성 정유가 함유된 식품과 한방 재료를 초미분말로 분쇄시킬 수 있는 초저온 냉동 기술의 개발
- (2) Extruder를 이용한 다양한 성형기술의 개발
- (3) 한방재를 이용한 다양한 콜로이드 분산상의 젤 식품 개발

문 헌

- 강석호. 1995. 분체공학. 회중당
- 강위수. 2001. 식품분쇄용 세라믹 롤 재료 개발과 기계적 특성평가. 한국농업기계학회지 **26**(1): 47-56
- 강위수, 강화석, 양승기, 목효균, 이해익. 1999. 세라믹 롤러와 금속 롤러의 쌀 분쇄 생성물 특성 분석. 한국농업기계학회 1999년 동계학술대회 논문집 384-389
- 강위수, 강화석, 이귀현, 양승기, 목효균. 1999. 세라믹 롤러와 금속 롤러의 쌀 분쇄 소요에너지 분석. 한국농업기계학회 1999년 동계학술대회 논문집 384-389
- 강위수, 양승기, 목효균, 최상근, 이해익. 2000. 세라믹과 회주철 치형롤 분쇄기를 이용하여 고추분쇄시 전단력 증가가 분쇄 생성물에 미치는 영향 분석. 한국농업기계학회지 2000년 동계학술대회 논문집 **5**(1): 226-271
- 강위수, 양승기, 목효균, 이해익. 1999. 치형 세라믹 롤러와 금속 롤러의 고추 분쇄생성물 특성 분석. 한국농업기계학회 1999년 하계학술대회 논문집 **4**(2): 234-239
- 강위수, 이강열, 정태균. 2003. 생물산업용 초저온 초미분 Turbo-분쇄기 산업화 기술에 관한 연구. 산업자원부 연구보고서
- 강위수, 김동은, 이관섭, 김병욱. 2004. 한방재 가공용 연속 혼련 압출 성형기 실용화 기술 개발. 산업자원부 연구 수행중
- 강위수, 이귀현, 양승기, 목효균, 박인근. 2000. 고추분쇄시 회전비 증가에 따른 치형롤 분쇄 기의 분쇄 소요

- 에너지 분석. 한국농업기계학회 2000년 동계학술대회 논문집 **5**(1): 272-277
- 강위수, 최상근. 2001. 식품 가공용 기류식 분쇄기의 역 형이 풍압에 미치는 영향. 한국농업기 계학회지 2001년 동계학술대회 논문집 **6**(1): 245-250
- 구경형, 박동준. 1998. 미분쇄/공기분급을 이용한 동부 전분의 추출. 1998년 한국식품과학회지 **30**(1): 118-124
- 구경형, 박동준, 김승호. 1996. 초미세분쇄/공기분급을 이용한 대두피 분획물의 특성과 응용. 1996년 한국식품과학회지 **28**(3): 506-513
- 김동수. 1997. 고품질 식품생산을 위한 경제적 냉동분쇄 기술. 식품과학과산업 **30**(4): 134-141
- 김동은, 성재모, 김태웅, 심태흡, 양승기, 강위수. 2003. 동방향 이축 압출 성형기를 이용한 붉은자루 동충하초 가공 연구. 강원대학교 농업과학연구소 논문집 **14**: 49-58
- 김동훈. 1988. 식품화학. 탐구당
- 김일혁 외 17인. 1991. 신약품식물학. 학창사
- 박동준, 구경형, 김승호. 1996. 초미세분쇄/공기분급을 이용한 탈지대두박 분획물의 특성과 응용. 한국식품과학회지 **28**(3): 497-505
- 박동준, 구경형, 목철균. 1993. 초미세분쇄/공기분급을 이용한 탈지미강 분획의 특성과 응용. 한국식품과학회지 **25**(6): 769-774
- 박동준, 구경형, 목철균. 1995. 찹쌀의 초미세분쇄/공기분급 특성과 유과제조공정 개선. 한국 식품과학회지 **27**(6): 1008-1012
- 서창훈, 이종원, 도재호, 김나미, 양재원, 장규섭. 2003. 분쇄방법에 따른 고려홍삼분말의 품 질특성. 한국식품영양학회지 **32**(3): 370-374
- 송재철, 박현정. 1997. 최신 식품가공학. 유림문화사
- 송재철, 박현정. 2000. 식품물성학. 울산대학교 출판부
- 이갈열. 2004. Turbo mill의 일펠러를 이용한 메밀의 공기분급. 강원대학교 석사논문
- 이범진, 한진. 2000. 제형의 원리와 기술. 신일상사
- 이부용, 박동준, 구경형, 김현구, 목철균. 1994. 초미세분쇄/공기분급을 이용한 마의 점질물 분리. 한국식품과학회지 **26**(5): 596-602
- 신혜현, 이선희, 박보선, 임태수, 황재관. 2003. 전곡립의 압출성형 및 효소처리에 의한 수용화. 한국식품과학회지 **35**(5): 849-855
- 최대석. 1989. 생약학. 동명사
- 황재관, 김종태, 홍석인, 김철진. 1994. 압출성형에 의한 식물 세포벽의 수용화. 한국식품영양학회지 **23**(2): 358-370
- Barrett, A.H. and M. Peleg. 1995. Applications of Fractal Analysis to Food Structure. *Lebensm-Wiss. u-Technol* **28**(6): 553-563
- Bertrand, D., D. Guibert, JP. Melcion and G. Duc. 1999. Evaluation of the transition matrix for comminuting pea seeds in an impact mill using a linear neural network. *Power Technology* **105**(1-3): 119-124
- Dickinson E. and G. Stainsby. 1985. Colloids in food. Applied Science Publishers
- Drzikova, B., G. Dongowski, E. Gebhardt and A. Habel. 2005. The composition of dietary fiber-rich extrudates from oat affects bile acid binding and fermentation in vitro. *Food Chemistry* **90**(2): 181-192
- Ettelaie, R. 2003. Computer simulation and modeling of food colloids. *Current Opinion in Colloid and Interface Science* **8**(5): 415-421
- Fengel, D. and G. Wegener. 1983. Wood chemistry ultra-structure reactions. Walter de Gruyter
- Gao, Y., S. Tse and H. Mak. 2003. An active coolant system for applications in surface grinding. *Applied Thermal Engineering* **23**(5): 523-537
- Goswami, T.K. and M. Singh. 2003. Role of feed rate and temperature in attrition grinding of cumin. *Journal of Food Engineering* **59**(2-3): 285-290
- Hatakqwq, I., Y.Y. Linko and P. Linko. 1996. Novel mechanical treatments of biomaterials, *Lebensm-Wiss u-Technol* **29**(5): 395-406
- Havet, M. and F. Hennequin. 1999. Experimental characterization of the ambience in a food-processing clean room. *Journal of Food Engineering* **39**(3): 329-335
- Hogekamp, S., M. Stang and H. Schubert. 1994. Jet agglomeration and dynamic adhesion forces. *Chemical Engineering and Processing* **33**(5): 313-318
- Huth, M., G. Dongowski, E. Gebhardt and Flammet. 2000. Functional properties of dietary fiber enriched extrudates from barley. *Journal of Cereal Science* **32**(2): 15-128
- Jeffery, O., H. Sham, Y. Zhang, W.H. Finlay, W.H. Roa and R. Lobenberg. 2004. Formulation and characterization of spray-dried powders containing nanoparticles for aerosol delivery to the lung. *International Journal of Pharmaceutics* **269**: 457-467
- Jung, J. and M. Perrut. 2001. Particle design using supercritical fluids : Literature and patent survey. *The Journal of Supercritical Fluids* **20**(3): 179-219
- Khadatkar, R.M., S. Kumar and S.C. Pattanayak. 2004. Cryofreezing and cryofreezer. *Cryogenics* **44**(9): 661-678
- Knez, Z. and E. Weidner. Particles formation and particle design using supercritical fluids. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* **7**(5): 353-361
- Levis, S.R. and P.B. Deasy. 2001. Production and evaluation of size reduced grades of microcrystalline cellulose. *International Journal of Pharamaceutics* **213**(1): 13-24
- Lowrison and G. Charles. 1974. *Crushing and Grinding: The size reduction of solid materials.* Butterworths
- ManoHar, B. and B.S. Sridhar. 2001. Size and shape characterization of conventionally and cryogenically ground turmeric(Curcuma domestica) particles. *Powder Technology* **120**(3): 292-297
- Mendonga, S., M.V.E Grossmann and R. Vehe. 2000. Corn bran as a fiber source in expanded snacks. *Lebensm-Wiss u-Technol* **33**(1): 2-8
- Mura, P., M. Cirri, M.T. Faucci, J.M. Gines-Dorado and

- G.P. Bettinetti. 2002. Investigation of the effects of grinding and co-grinding on physicochemical properties of glisentide. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* **30**(2): 227-237
- Nair, P.B.R. 1999. Breakage parameters and the operating variables of a circular fluid energy mill Part I, *Power Technology* **106**(1-2): 45-53
- Nair, P.B.R. 1999. Breakage parameters and the operating variables of a circular fluid energy mill Part II, *Power Technology* **106**(1-2): 54-61
- Onwulata, C.I., R.P. Konstance, P.W. Smith and V.H. Holsinger. 2001. Co-extrusion of dietary fiber and milk proteins in expanded corn products, *Lebensm-Wiss u-Technol* **34**(7): 424-429
- Paul, S. and A.B. Chattopadhyay. 1995. Effects of cryogenic cooling by liquid nitrogen jet on forces, temperature and surface residual stresses in grinding steels. *Cryogenics* **35**(8): 515-523
- Prasher, C.L. 1987. *Crushing and Grinding Process Handbook*. John Wiley, New York
- Rehinan, Z., M. Rashid and W.H. Shah. 2004. Insoluble dietary fiber components of food legumes as affected by soaking and cooking processes. *Food Chemistry* **85**(2): 245-249
- Sandro, T.G., G.S. Lopes, O. Fetibello-Filho, A.R.A. Nogueira and J.A. Nobrega. 2002. Homogenization of breakfast cereals using cryogenic grinding. *Journal of Food Engineering* **51**(1): 59-63
- Schubert, H., 1987. Food particle technology. Part I: Properties of particles and particulate food systems. *Journal of Food Engineering* **6**(1): 1-32
- Singh, K.K. and T.K. Gosqami. 1999. Design of a cryogenic grinding system for spices. *Journal of Food Engineering* **36**(4): 359-368
- Solanki, S.N., R. Subramanian, V. Singh, S.Z. Ali and B. Manonar. 2004. Scope of colloid mill for industrial wet grinding for batter preparation of some Indian snack foods. *Journal of Food Engineering* (In press)
- Sonaglio, D., B. Bataille and M. Jacob. 1997. Effects of extrusion and formulation parameters on the production of paracetamol-microcrystalline cellulose extrudates. *Pharmaceutica Acta Helvetiae* **72**(1): 69-74
- Svihus, B., K.H. Klovastad, V. Perez, O. Zimonja, S. Sahlstrom, R.B. Schuller, W.K. Jeksrud and E. Prestlokken. 2004. Physical and nutritional effects of pelleting of broiler chicken diets made from wheat ground to different coarsenesses by the use of roller mill and hammer mill. *Animal Feed Science and Technology* **117**(3-4): 281-293
- Teunou, E., J.J. Fitzpatrick and E.C. Synnott. 1999. Characterisation of food powder flowability. *Journal of Food Engineering* **39**(1): 34-37
- Vasanthan, T., J. Gaosong, J. Yeung and J. Li. 2002. Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking. *Food Chemistry* **77**(1): 35-40
- Vranjes, M. V. and C. Wenk. 1995. The influence of extruded vs. untreated barley in the feed, with and without dietary enzyme supplement on broiler performance. *Animal Feed Science and Technology* **54**(1): 21-32
- Wu, Y.V. and D.C. Doehlert. 2002. Enrichment of β -glucan in oat bran by fine grinding and air classification. *Lebensm-Wiss u-Technol* **35**(1): 30-33
- Zhang, M., C. Zhang and S. Shrestha. 2004. Study on the preparation technology of superfine ground powder of *Agrocybe chaxingu* Huang. *Journal of Food Engineering* (In press)