

식품의 미세구조와 식품가공공학의 관계

이 부 용
 특용작물이용팀

1. 서 론

식품은 가공되기 전의 원료상태에서는 물론이고 가공후에도 나름대로의 변형된 미세구조(microstructure)를 갖고 있다. 식품공학에서 식품의 구조는 식품의 다른 모든 이화학적 성질과 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 미세구조 엔지니어(microstructural engineer)들은 식품가공을 어떤 식품이 처음에 갖고 있던 구조를 유지시키거나, 변형시키거나, 파괴하거나, 새로운 구조를 창조하는 과정으로 간주하고 있다(그림 1).

식물성 식품의 수확후 처리기술 뿐만 아니라 동물성 식품조직의 사후처리에서도 원재료가 갖고 있던 고유한 구조를 유지시키는 것이 가장 중요한 포인트이다. 구조가 변하게 되면 식품의 조직감, 풍미, 영양성, 전체적인 기호도가 매우 떨어지는 현상이 나타나기 때문이다. 따라서 젤이나 에멀전과 같은 반고체나 액체상태의 식품도 저장이나 유통시까지 구조가 유지되어야만 품질을 유지할 수 있는 것이다.

식품가공의 주목적은 원래 갖고 있던 식품의 구조를 변형시키는 것이다. 원료는 정제된 성분으로 변환되고 이 성분들은 열전달, 물질전달, 성형 등의 단위조작을 거쳐서 원하는 제품이 되는 것이다. 식품가공시 원래 구조가 일부 제한적으로 파괴되는 현상은 늘 있는 것으로서 크기만 줄이는 분쇄 조작

시에도 일어나는 보편적인 현상이다. 식품구조의 창조는 새로운 밀레니엄을 맞이한 식품산업의 가장 큰 화두이다. 식품산업에서 제품개발과 품질개선은 주로 영양성분과 식품의 주요 성분을 소비자들이 좋아하는 조직감과 형태의 구조속에 집어 넣는 작업이기 때문이다.

식품가공을 이해하는데 있어서 식품의 미세구조가 이처럼 중요한데도 불구하고 왜 식품공학자들에게 외면당해 왔을까? 다음 4가지의 그럴듯한 변명이

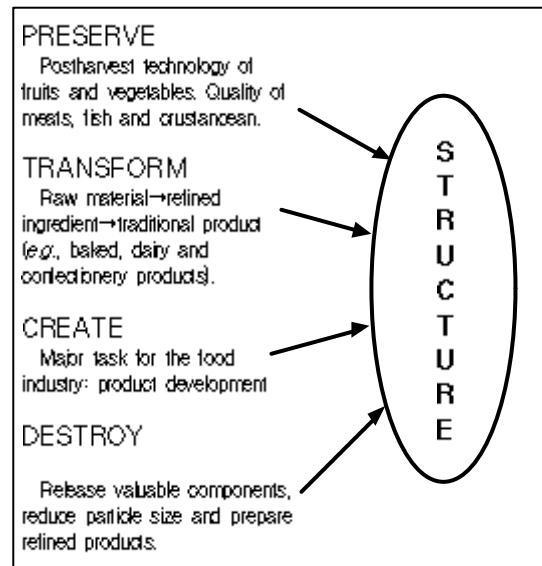


그림 1. 식품가공과 식품구조 사이의 관계

있다. 첫째, 지난 100년 동안 식품산업은 기존의 집에서 만들어 먹던 전통식품을 대량생산할 수 있는 안전하고 믿을 만한 대량 생산공정의 개발에만 관심을 기울여 왔다. 둘째, 개혁과 품질개선은 최근까지도 식품시장의 주요 추진요소가 되지 못하였다. 셋째, 식품공학자들이 식품의 구조가 제품의 특성과 밀접한 관계에 있다는 것을 잘 알지 못하였다. 마지막으로 식품의 구조가 제품의 품질에 영향을 미친다는 것을 알고 있었다고 할지라도, 어느 정도인지 정량화 할 수 있는 적절한 기술들이 개발되지 못하였기 때문이다.

2. 식품가공공학(Food Product Engineering)과 화학공학(Chemical Engineering)

20세기의 식품공학 발전은 주로 인접한 화학공학이나 기계공학분야의 발달에 힘입은 것이다. 단위조각의 적용이나 기계화, 자동화를 채택하여 거시적인 측면에서 식품산업이 오늘날과 같이 신뢰성 있는 대량생산체제를 갖추게 된 것이 사실이다. 여기서는 다가오는 10년간 재료과학과 생물학의 지식들이 거시적인 측면(macrolevel) 보다는 미시적인 측면(microlevel)에서 20세기 화학공학과 기계공학이 미친 영향 이상으로 식품산업에 큰 충격과 변화를 줄 것이라는 관점에서 기술해 나가자 한다.

그동안 불행하게도 화학공학자들은 공학에서 기본이 되는 구조의 개념을 무시해 오고 있다. 최근 들어서 소비자들 각자에게 맞는 개인적인 맞춤제품을 요구하고 생물가공(bioprocessing)과 생물재료(biomaterials)의 등장에 의해서 그 중요도를 인식하기 시작했다. 표 1에 화학공학과 식품가공공학의 차이점이 여러 가지 측면에서 설명되어 있다.

표 1에서 볼 때 그동안 식품가공공학에 영향을 미쳐왔던 고전적인 화학공학의 이론들은 점차 영향력이 감소하면서 재료과학과 생물학에 관련된 이론과 지식들의 도움으로 식품조립화(Food fabrication)가 더욱 발전 될 것이다.

주요 화학, 제약, 식품산업에서 기존 제품의 구조

표 1. 식품가공공학과 화학공학의 차이점들

Subject	Chemical Engineering	Food Product Engineering
Support Sciences	Physical chemistry, chemistry, physics	Physical chemistry, biochemistry, (micro) biology, materials science
Focus	Macrolevel (unit operations)	Microlevel (properties)
Raw materials	Mostly inorganic or organic(synthesis)	Mostly biological origin and a few chemical compounds
State of raw materials	Largely Newtonian liquids and gases, and some non-Newtonian fluids	Deals mostly with viscoelastic solids and non-Newtonian liquids
Type of solids	Mostly homogeneous, sometimes porous, inert	Mostly structured, cellular, or phase-separated, reactive
Main Products	High volume, commodities	High number of units, specialties
Product evaluation	Purity and performance	Desirable functional properties, convenience
Product stability	Largely inert or moderately stable	Highly unstable and perishable products
Packaging	Bulk packaging and handling of commodities	Unitized and protective packaging
Consumer evaluation	Price(gas), performance (plastics)	Eating properties, safety, convenience, nutrition

에 대한 중요도가 증가하고 있지만 그동안 화학공학을 공부한 졸업생들이 구조에 대한 이해가 부족하여 생기는 문제가 매우 많았다는 것이 일반적인 인식이다. 따라서 화학공학에서도 재료의 구조를 살펴보는 공부를 시키고 숙달시켜야 한다는 것이다.

3. 미세구조적인 접근

그림 2는 식품가공에서 미세구조적인 접근이 어떻게 이루어지는지를 나타내주고 있다.

식품개발을 담당하는 공학자들은 식품의 많은 특성이 구조에서 비롯된다는 것을 잘 알고 있으며, 식품가공도 식품속에 존재하는 유용성분들을 계획된 구조속으로 편입시키는 과정이라고 이해하고 있다. 이와 같이 계획된 구조(engineered structure)는

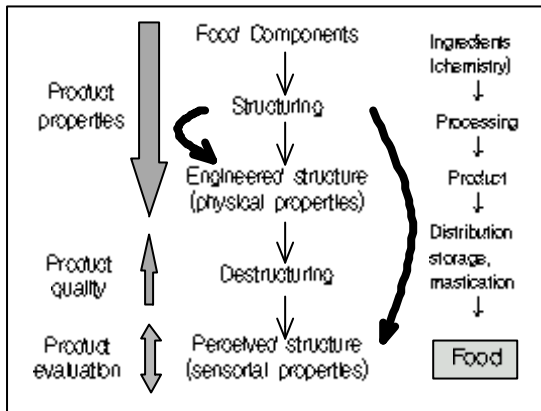


그림 2. 식품공학과 구조성질에 대한 미세구조적 접근

열역학이나 생화학적으로 불안정하여, 제품이 생산 라인에서 생산되어 나오자마자 구조가 변하기 시작한다. 그렇지만 이러한 구조가 갖는 물리적 특성의 대부분은 다른 물질에 적용되는 것과 동일한 표준점정법으로 평가될 수 있다. 그림 2에서 왼쪽면의 개발되는 식품의 전망성 측면에서 보면 식품가공의 각 단계들은 결국 식품에 소비자와 시장이 원하는 품질을 부여하는데 필요한 단위조작이며, 이 조작들은 최종적으로 소비자들에 의해서 관능적으로 평가된다.

식품의 구조와 특성사이의 관계는 구조를 알면 그 식품의 가공학적 특성을 알게 되어 식품이 어떻게 반응할지를 예측할 수 있을 정도로 밀접하다(그림 2의 굵은 화살표). 식품의 특성은 식품의 구성 성분과 구조적 요소들이 여러 가지 농도 수준에서 반응하는 결과에 따라 결정되는 것이다. 따라서 미세구조적인 접근법에 의하여 식품의 구조와 특성간의 관계를 이해하면 해석이 도출되며, 그 제품이 입속에서 느껴지는 감촉에 대한 구조적 해석들이 가능해지는 것이다(그림 2의 가운데 부분).

재료과학자들은 구조의 특성을 파악하기 위한 기법을 선정하고 주요요소들의 크기를 밝혀내기 위하여 구조의 단계(level of structure)를 정의하였다. 크기에 의해서 표 2와 같이 구조를 여러 단계로 나누어서 단위조작 공정에 따른 이해와 설명을 실시하고 있다.

표 2. 구조와 크기의 여러단계들과 과실류 가공에서 그들의 연관성

Level of structure		Structure	Scale (μm)	Engineering relevance (examples)
Macroscopic	+4	Tree	10 ⁶	Mechanical harvesting
	+3	Fruit	10 ³	Packing operation
	+2	Fruit piece	10 ⁰	Dicing and slicing
	+1	Fruit particle	10 ³	Pumping of a slurry
Microscopic	-1	Cells	10 ⁴	Pressing
	-2	Starch granules	10	Heating
	-3	Pores	1	Impregnation
	-4	Cell walls	10 ¹	Freezing
	-5	Cell membranes	10 ²	Extraction
	-6	Sugars	10 ³	Osmotic dehydration
	-7	Water	10 ⁴	Freeze drying

먼저 가장 큰 차이점은 거시적구조(bulk or macroscopic level)와 미세구조(microscopic level) 사이에서 요구되는 것들로서, 예를 들어 표 2에서 보면 한그루의 나무로부터 과일의 기본구성성분인 설탕에 이르기까지 크기가 수십단계나 감소하는 것을 알 수 있다. 단계별로 그 단계에 적용되는 가공학적 단위조작은 모두 다르지만, 동일한 단위조작이 여러 단계에 적용되기도 하고 단계별로 각각 별도의 조작이 행해지기도 한다.

이와 같은 분석법이 다른 식품시스템(과일이 아닌 다른 식품)에 적용되어도 결과는 동일할 것이다. 가공식품의 기능적 특성은 주로 미세구조적인 면으로부터 영향 받는데 그 크기는 100μm~0.01μm 범위의 단계에서 주로 나타난다. 이것은 관능감사에 의한 조직감 특성의 해석에서도 매우 유용하며, 재료과학분야에서는 수십년간 제품의 특성이 구조에 따라 달라진다고 알려져 왔다.

가공공정공학에서 제품이 중심이 되는 제품공학으로 척도의 기준이 이동하면 재료의 특성을 구명하고 분석을 위한 데이터를 수집하는 접근법과 기법도 변해야 한다. 화학공학자나 기계공학자들은 그들이 경험하지 못하고 다루어 보지 않은 제품의 특성에 영향을 주는 요소들과는 친숙하지 않다. 예를 들어 지

방입자, 전분입자, 세포벽, 세포막, 기포, 결정, 겔 구조 등은 그들에게는 익숙치 못한 요소들인 것이다. 현재 현미경 기술의 발달로 재료의 구조를 보는 것이 가능해지고, 이것이 미세구조분석과 결합되어 이미지 가공법(image processing)이 각 단계의 해석에 필요한 데이터를 공급할 수 있게 되었다.

많은 것은 없지만 재료의 미세구조가 제품의 특성에 어떻게 영향을 미치는지(바람직한 측면과 바람직하지 않은 측면 모두에서)에 대한 몇가지 예들이 다음에 기술되어 있다.

4. 구조와 전달현상 (Transport Phenomena)

전달현상과 그 현상을 정량적으로 모델링하는 것이 식품공학의 주요역할이지만, 모델링이라는 것은 해결하고자 하는 점을 미리 정하지 않고는 이해되지 않는 작업이다. 모델링은 일들이 어떻게 되어가는지를 대면하여 해석할 수 있어야만 되고, 순서를 경험해야 하며, 중요한 상호작용을 명확하게 해석하여 새로운 가설을 제시할 수 있어야만 한다. 지금까지 식품공학자들은 전달현상을 연구하는데 있어서 물리적 모델에 거의 주의를 기울이지 않고 "black box" 접근법을 선호하여 왔다는 사실에 주목해 볼 필요가 있다.

식품이나 생물질 재료들의 전달현상은 구조에 따라 크게 달라진다. 식품공학은 전달현상을 연구하는 기본적인 변수들에게가 구조변수를 도입시킴으로써 엔지니어링과학(engineering science)에 큰 기여를 할 수 있다. 구조는 우수한 현미경 기법에 의해 가시화되어야 하며, 그로부터 실제적인 물리적 모델들이 유도되고, 그 모델을 기초로 하여 기본식들과 컴퓨터적 해석 방법들이 적용되어야 하는 것이다.

분자확산에 대한 Fick의 법칙은 공학자들에 의해, 종종 응용시 발생하는 심각한 제한 요소들을 무시하면서까지, 식품의 물질전달 현상을 모델화 하는데 사용되어 왔다. Fick 법칙의 식물에서 보면 식품의 구조와 구조적 변화에 대한 효과가 가공과정중에 수

시로 차수가 변하는 소위 유효확산계수(effective diffusion coefficient)에 간접하게 숨겨져 왔다.

그러나 물질전달이 재료의 내부로부터의 확산에 의해 일어나지 않는 경우도 발생하는데 이 경우에도 구조는 중요한 영향을 계속 미치고 있다는 점을 간과해서는 안된다. 예를 들면 용매추출시 세척 등이 위와 같은 경우이나 세포물질의 크기를 작게 할수록 추출속도가 빨라지는데 세포가 작게 조각지면서 표면적이 커져서 세포물질들이 용매와 접촉하는 시간과 확률이 높아지기 때문이다. 대상 추출물에 적합한 용매가 선정되면, 좀더 빠르고 완벽한 추출이 일어날 수 있도록 물질의 구조가 사라져서 정제단계가 방해받지 않는다(예를 들어 기름을 헥산(hexane)으로 추출할 때와 마찬가지로). 그러나 위와 같지 못한 경우(대부분의 생물질들은 수용액 추출을 하게 된다)에는 추출효율을 높이기 위해서 재료의 구조가 파괴되는 것을 피할 수 없다(사탕수수로부터 설탕을 추출하는 경우처럼).

Fick의 확산이 2차 함수로 나타나는 물질전달의 독특한 경우는 감자스틱을 튀길 때 일어나는 수분의 방출과 기름의 흡수현상이 그 예이다. 튀김이라는 것은 조직이 수분을 잃고 수분이 빠져나간 자리를 기름이 채우는 과정이다. 이때 수분은 수증기 거품의 형태로 조직의 세포층으로부터 빠져나가게 된다. 튀김기에서 꺼내면 기름의 대부분은 재료의 표면에 흡수되어 있지만 일부는 재료의 갈라진 틈새나 세포층의 빈공간을 통해서 내부로 침투해 들어간다. 또한 튀긴후 냉각시에 표면에 있는 기름들은 재료의 조직내부에 있는 수증기가 식으면서 생기는 음압(negative pressure)에 의해서 조직내부로 빨려들어 가게 된다. CLSM(Confocal Laser Scanning Microscopy) 현미경은 아주 얇은 깊이로 재료의 표면을 주사하여 3차원의 영상을 나타내는 기기이다. CLSM으로 튀긴 감자칩의 표면 세포를 보면 대부분의 감자세포가 손상받지도 않고 기름도 거의 없는 것을 볼 수 있다. 반면에 기름을 머금은 층들의 구조는 세포주위가 계란포장박스같이 배열되어 있는 것을 알 수 있다. 이와같이 다른 기름으로 세포내부

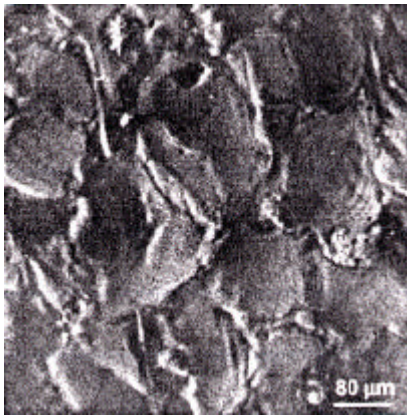


그림 3. 튀긴 감자칩 표면의 기공 분포

에 까지 침투된 기름들은 다른 기름에 다시 튀기면 다른 기름으로 쉽게 치환되기도 한다(그림 3).

5. 기계적 특성들 (Mechanical Properties)

어떤 식품의 기계적특성(특히 조직감 등)에 영향을 가장 크게 미치는 요소중에 구조만큼 관계가 깊은 것이 없다고 공학자들은 생각하고 있다. 비슷한 성분들을 함유하고 있는 식품이라도 가공 중에 부여받은 구조에 따라 아주 다른 기계적 특성을 나타낸다. 기계적 모델들이 조합식품(composites)과 세포물질들에 대해 적용될 수 있다 할지라도 그 모델들을 직접 식품에 적용하기 위해서는 먼저 구조와 상(Phase) 부분이 결정되어야 하며, 이때 현미경적 기법이 중요한 역할을 하게 된다.

공기와 물은 구조가 형성되는데 필요한 2개의 필수 구성요소이나 공기를 함유한 식품은 열역학적으로 불안정하므로 공기방울은 점성의 액체나 점탄성의 매질로 둘러 싸여져야 한다. 젤(gel)은 많은 양의 물을 상온에서 고체화 할 수 있는 방법으로 식품 기술자들에 의해 매우 선호되는 기술이다. 조합식품이나 젤 식품의 구조와 특성사이의 관계가 불일치하는 경우는 주로 미세구조의 구성으로부터 나타나기 때문에 여기서는 젤과 같은 조합식품(composite

gels)의 기계적 특성에 대한 구조의 영향이 예로서 검토될 것이다.

전분현탁액과 단백질 용액은 가열후 젤을 형성하는데 동일농도라면 단백질젤이 더 단단하다. 특히 피경전분과 유청단백질(whey protein)들은 각각 60°C와 75°C 이상으로 물과 함께 가열하면 구조가 정렬-비정렬 전이(order-disorder transition)를 거치게 되고, 냉각시 정렬된 구조는 젤이라고 부르는 고분자 그물구조(network)를 이루게 된다. 전분이 혼합된 단백질 젤은 전분과 단백질의 혼합비율에 따라 강도가 다른 조합젤이 되지만, 보다 영향을 미치는 것은 젤화의 과정이다. 전분과 유청단백질 혼합물이 가열될 때 전분입자는 수화되어 팽윤되고 65~70°C에서 호화된다. 이때 그 시스템으로부터 물이 제거되고 독특한 상(phase)으로 나누어지는 것이다. 유청단백질의 경우는 젤화 온도가 75°C에 도달했을 때 변성되고 좀더 높은 농도에서 그물구조의 응집물(aggregate)을 형성하게 된다. 전분과 단백질의 상대적인 혼합비에 따라서 형성되는 혼합조합젤의 강도가 단백질만으로 이루어진 젤보다 더 높거나 낮을 수 있다.(동일한 가용성고형분 양일지라도). 이렇게 혼합된 조합젤들은 낮은 농도의 전분만으로 이루어진 젤은 기계적 특성이 매우 빈약하지만, 전분이 적게 함유 되어도 기계적 특성과 리올로지적 특성이 크게 증가한다. 전분이 차지하는 부피분율(volume fraction)이 작을지라도 수화된 전분입자 주위에 젤화된 강력한 단백질 그물구조가 형성되기 때문에 전분이 혼합된 조합젤의 강도가 순수한 단백질만으로 이루어진 젤보다 더 큰 것이다(그림 4).

그러나 전분양이 증가하면 상역전(phase inversion) 현상이 일어나 전분이 혼합된 조합젤의 연속상(continuous phase)이 되어 버린다(그림 4에서 전분농도가 5~7%사이에 위쪽 사각형 속의 큰 타원형 입자가 연속상인 전분이다.). 이렇게 되면 조합젤의 강도가 감소한다. 이런 과정을 OLISM과 같은 비디오 현미경으로 관찰하면 변화 과정중의 구조뿐만 아니라 최종적으로 형성된 젤의 구조까지도 관찰되어 각 단계별로 부피분율이 측정될 수도 있고

Starched-filled gels : Effect of microstructure on nonlinear mechanical behaviour

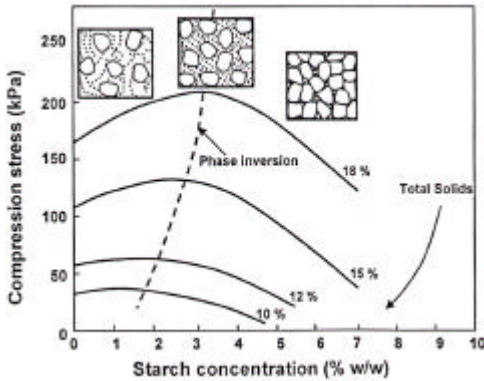


그림 4. 카사바 전분과 유청분리 단백질 혼합젤의 압축강도

형성된 젤의 기계적 특성을 이해하는데 표준식들이 적용될 수도 있다.

따라서 앞으로 식품의 구조에 대한 연구가 더욱 발전되려면 현미경적 기법에 의해 구조형성에 대한 주요 기작의 이해가 시작되고, 그 이해는 여러 가지 실험적 데이터(리올로지 데이터, DSC 데이터, DMA 데이터 등)들에 의해 보완되어야만 한다. 그 다음 이런 유용한 구조적 데이터들과 구조의 조그만 변화에 따르는 특성을 예측할 수 있는 여러 가지 사실들에 바탕을 둔 수학적 모델식들이 도출되어야만 하는 것이다.

6. 제품 리올로지(Product Rheology)

흐름성이 좋은 액체상태의 식품에 구조가 있다고 생각하는 것이 언젠스일 수도 있지만, 뉴튼유체의 이론적인 흐름특성과 실질적인 흐름특성 사이의 차이점들은 결국 용매중에 분산되어 있는 분산질(고분자물, 액체나 고체 입자물)의 구조적 측면에서 그들이 서로 어떻게 반응하는가에 따라 추정·해석되고 있다. 리올로지는 식품 단위조작의 설계시 매우 중요한데 실제로 공학자들은 대상물질의 정도에 따라 달라지는 복잡한 식들과 무차원 상수값에 직면해 있다.

대부분의 액상식품들은 2 상계 액체시스템(에멀전), 생체고분자 용액, 입자현탁액처럼 비뉴튼 유체이다. 비뉴튼 유체의 흐름 특성은 전단속도에 따라 다르게 나타나는 겔보기 정도(apparent shear viscosity)라는 유일한 변수에 의해서만 파악되고 있는 실정이다. 바꿔 말하면 그 유체의 어떤 한순간에서의 구조를 정도로 대변하는 것으로서 그 순간의 흐름에 대한 저항값(정도)일뿐 시간에 따라 구조가 변화하는 것을 겔보기 정도만으로는 나타낼 수가 없는 것이다. 실제 반응하는 힘은 잠재적인 힘으로서 액상유체라 할지라도 탄성력이 내재되어 있으므로 점탄성이 관찰되고 있다. 현탁액의 구조적 영향에 대한 언급은 Macosko(1994)에 의해 시작된 이래로 최근에 Rao(1999)에 의해 보편적인 주제로 자리잡고 있는 상태다.

농후용액(때로는 묽은 용액에서도)에서 반비례적인 흐름특성이 나타나는 주 이유는 구조적 요인 때문이다. 이와 같은 현상은 근본적으로 용액을 구성하는 입자의 브라운 운동(Brownian motion)과 같은 속도분포장(velocity distribution field)의 변화에 기인되는 수력학적(hydrodynamic) 효과로서, 입자 모양의 변화, 액체입자의 파괴, 입자의 형태와 방향성, 입자끼리의 인력, 농축액의 경우 분획끼리의 혼합 등이 모두 영향을 미친다.

요약하면 흐름특성이 복잡한 유체로 구성된 제품은 대개시간에 따라 흐름특성과 리올로지적 성질이 변화하는 구조를 갖고 있다. 리올로지 특성을 해석하는데 구조적 모델의 사용이 계속 증가하여 왔다. 이는 용액의 리올로지적 행동이 각 구성요소의 흐름성과 그들의 반응에 따라 달라진다는 것을 명백히 입증하는 것이라 하겠다. 따라서 분자나 초분자(super-molecule) 수준에서 흐름동안 일어나는 구조의 관찰은 기능적인 모델식을 유도할 수 있을 정도의 리올로지 데이터들과 밀접한 연관성이 있어야 한다. 이와 같은 접근방식은 제품개발이나 개선 뿐만 아니라 구성성분을 변화시킬 때에도 큰 자극제가 될 수 있다.

7. 미세구조와 상안정성(Phase Stability)

미세구조 수준에서 보면 대부분의 고체식품들은 몇 개의 상(phase) 갖고 있는 다영역 시스템(multidomain system)이다. 이 상들은 열역학적으로 평형상태에 있지 않기 때문에 상들간이나 상과 외부환경 사이에 구성성분(주로 수분)의 이동이 일어날 수 있다. 식품의 안정성을 예측하기 위해서 사용된 기존의 데이터들(수분활성도, 유리전이온도 등)은 다량의 시료에 대해 표준분석법으로 평균치를 구한 것이었다.

현미경이나 분광학적 기법과 연합된 미세탐침기법의 발달 덕분에 특정지역에 존재하는 개개의 상(phase)들을 구성하는 구성성분과 상태를 가시적으로 살펴보는 것이 가능해 졌다. 다만 미세탐침(Raman microprobe)은 고해상력으로 수분존재하에서 1 μ m 크기의 단백질, 지방, 탄수화물을 검출할 수 있으며, 그 성분이 결정형으로 존재하는지 아니면 무정형(amorphous)인지도 판별할 수 있다. 적외선 미세탐침(Infrared microprobe)은 주로 식물세포벽과 아밀로펙틴의 결정성을 연구하는데 사용되어 왔다.

많은 식품물이 유리전이 온도 이하라도 낮은 수분함량에서는 비평형의 무정형상태나 유리질(glassy solid)

과 같은 안정한 상태로 존재한다. 유리상태의 매우 낮은 이동성으로 인하여 화학적인 불활성화(inertness)와 구조적 안정성이 생기는 것이다. 따라서 유리상태를 떠나서 상전이가 일어나면 제품의 품질이 떨어지게 된다. 위와 같이 무정형의 상태로 안정화 되어 있는 물질의 예를 들면 건조식품, 냉동식품, 제빵제품, 냉동건조식품, 캡슐화된 성분들이 있다.

제과, 제빵, 건조 제품 등에 존재하는 설탕은 온도나 수분함량, 시간에 따라 형성되는 속도는 다르지만 열역학적으로 안정한 결정형인 고무질 상태(rubbery state)로 존재하는 경우가 많다. 때때로 최종제품 상태에서 설탕이 결정형으로 남아 있어서 제품의 품질이 떨어지는 경우가 많다. 유제품에서는 유당(lactose)이나 당질입류에서 설탕이 문제가 되기도 한다. 고무질-결정형 전이(rubber-crystalline transition)는 DSC(Differential Scanning Calorimeter)에서 발열반응(exotherm)으로 나타난다. 한편 고분자과학에서 결정의 성장은 편광현미경에 의해 직접 관찰되고 있다.

현미경을 이용하면 실제처리 공정을 실험실적으로 축소시켜서 시료주위에 축소된 모델환경으로 수분과 온도조건 등을 부여하여 가시적으로 구조적 변화들

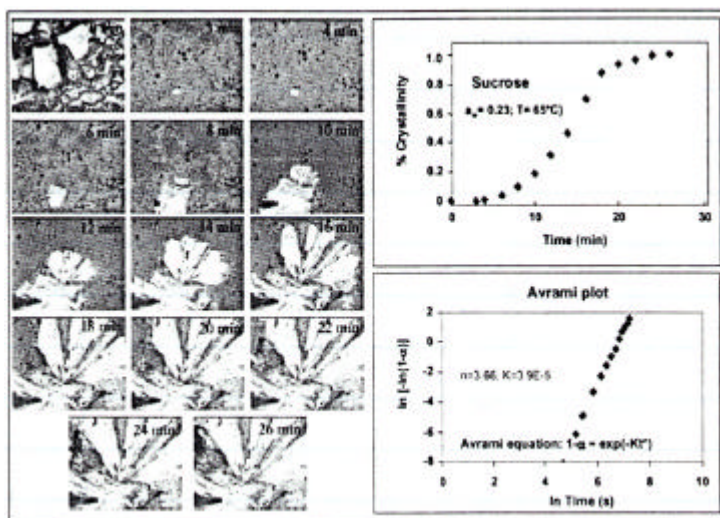


그림 5. 고무질상(rubbery phase)으로부터 설탕결정의 성장 모습

관찰할 수 있다. 현미경에 가열과 냉각공정이 프로그램 되어 있는 "hot-stage"가 부착되어 있어서 시간에 따른 온도변화를 기록하면서 세포의 냉동과 해동에 대한 연구를 할 수 있는 장비도 개발되어 있다. 그림 5는 일정한 수분함량과 온도에서 시간에 따른 설탕 결정의 성장을 관찰한 사진들이다.

그림 5에서 결정형성 속도는 이미지 분석을 사용하여 정량화 할 수 있다. 이미지 분석에서는 시간경과에 따른 결정의 크기와 면적의 변화를 관찰하고 판단할 수 있으며, Avrami 식에 의해 데이터들이 모델화 될 수도 있다.

8. 표면의 구조

표면형태학(Surface topography or surface morphology)은 고체 제품의 중요한 물리적 특성중 하나로서 제품의 시각적, 관능적 측면 뿐만 아니라 가공공정중이나 저장, 사용시에도 큰 영향을 미친다. 표면형태는 화학적 물리적 반응이 일어나는 비표면적(specific surface area)과 관계가 깊다. 또한 마케팅 측면에서 보더라도 소비자가 제품으로부터 받는 첫 인상은 바로 제품의 표면이다. 지적하고 싶은 점은 이처럼 중요한 제품의 표면 특성이 그동안 식품공학자들에게는 주요 요소로 인식되지 못하였다는 것이다.

육안으로는 매우 매끈하게 보이는 표면도 현미경으로 보면 아주 거친 경우가 많다. 거칠다(rough)는 표현을 뇌는 여러 가지 의미로 표현할 수 있다. 예를 들어 뇌는 30~50 μ m 크기의 입자가 칩에 접촉되면 모래같은 표면(sandy surface)처럼 느끼지만, 눈으로는 초콜릿 표면에 약간 울퉁불퉁한 지방결정이 핀 것 정도로만 감지하기도 한다. 따라서 제품의 표면이 더 매끈해지거나 더 거칠어 지는 것을 판단하는 기준으로 제품이 절대적으로 어느정도 거친 상태인가를 아는 것이 중요하다.

재료과학자들은 물질의 표면과 형태학적으로 관련된 현상을 이해하기 위해서 광범위한 영역에서 표면을 특성화하여 왔다. 표면 데이터를 인지하는 기술에

서 최근 발전은 SLPS(Scanning Laser Profilometry Systems), interferometry, atomic probe, confocal scanning microscopy, 기타 다른 기기들을 활용하여 1 μ m 이하의 입자에 대해서도 고해상도의 3차원(x, y, z) 영상을 얻을 수 있게 되었다. 이 과정은 표면의 겉보기 면적(apparent area)을 결정하기 위해서 타일조각을 이어붙이는 것과 같은 반복적인 패치워크방법(patchwork method)을 사용한 면적-크기 분석(area-scale analysis)에 의해서 수행된다.

재료 표면의 면적-크기 분석은 2개의 특징적인 변수의 계산으로부터 수행된다. 하나는 SRC(Smooth-Rough Crossover) 척도으로써 표면이 얼마나 매끄럽게 보이는가에 대한 기준값이며 유클리드 기하학으로 해석된다. SRC로 판단할 때 표면이 거칠게 나타나면 fractal기하학으로 특성을 파악할 수도 있다.

그림 6은 상대적인 면적이 SRC 위에서는 1에 근접하고 SRC 아래에서는 1보다 뚜렷하게 큰 것을 나타내 주고 있다. 따라서 SRC는 재료의 표면에 대한 물리적 해석을 하는 변수로서 SRC위에서의 값은 재료가 얼마나 매끄러운가에 대한 척도이고, SRC 아래에서의 값은 얼마나 거칠은가에 대한 척도가 된다.

또 하나의 변수는 복잡성(complexity)으로서 면적-크기 분석에 대해서는 ASFC(Area Scale Fractal Complexity)값으로 표현된다. 이 복잡성 변수는 기

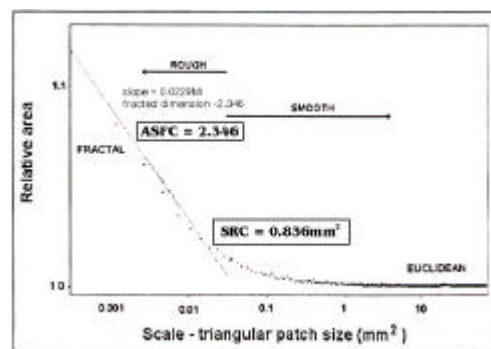


그림 6. 초콜릿 바(bar) 표면의 특성 파악

돌기가 log-log 척도의 그래프에서 -1000까지 해당 하는데 fractal 차원으로 면적-크기 그래프로 전환 하면 -3값(-1000의 log 값은 -3이므로)의 기울기가 된다. ASFC값이 크다는 것은 재료의 표면이 SRC아래에서 매우 복잡하고 번잡스럽다는 것을 나타내 주는 것이다.

9. 앞으로 더 연구해야 할 사항들

과거에는 경험과 관련하여 고전적인 화학공학과 물리학적 지식만으로도 거시적 수준에서는 식품가공 중에 일어나는 현상들을 설명할 수 있었다. 그러나 이와 같은 접근방식은 식품가공공학의 기본원리에 제한적인 기여 밖에는 못해 왔으며, 식품재료가 복잡해지면서 더욱 활용성이 제한되어 미시적 수준에서는 정량화된 데이터를 얻기가 더욱 힘들어졌다.

재료의 구조는 식품공학자들이 간과해 왔던 가장 중요한 변수로서 식품의 특성을 좀 더 잘 이해하고 가공과 조립화 기술의 발전을 이룩하기 위해서는 분석의 크기를 세포수준으로까지 미시적으로 감소시켜야 한다. 현미경적 기법, 비디오 기법, 이미지분석 기법 등의 많은 기법들이 미시적 수준에서의 구조분석에 도움이 되고 있다. 또한 식품은 한가지 구조로 머물고 있는 것이 아니라, 입속에 들어와 부서지고, 압착되면서 구조가 변형되는 것처럼, 변화하는 과정속에서 분석이 이루어져야 한다는 것을 명심해야 한다.

이와같은 경향들은 식품학 주변의 생물학과 재료 과학분야의 개념, 기법, 기기들에 의해서 큰 도움을 받게 될 것이다. 따라서 식품공학자들은 이런 맥락에서 대학과 산업체에서 다른 인접분야와도 다방면으로 협력을 이루는 훈련을 받아야 한다. 제품의 조립화와 새로운 구조의 창조는 식품의 안전성과 영양성을 높이는 새로운 방법인 것이다.

참 고 문 헌

1. Aguilera, J.M. and Stanley, D.W. 1999. "Microstructural Principles of Food Processing and Engineering." 2nd ed. Aspen Publishing Co., Gaithersburg, md.
2. Aguilera, J.M. and Baffico, P. 1997. Structure-mechanical properties of heat-induced whey protein/starch gels, *J. Food Sci.* 62: 1048-1053, 1066.
3. Bailey, J.E. 1998. Mathematical modeling and analysis in biochemical engineering: Past accomplishments and future opportunities, *Biotechnol. Progr.* 14: 8-20.
4. Brown, C.A., Charles, P.D. Johnsen, W.A., and Chesters, S. 1993. Fractal analysis of topographic data by the patchwork method, *Wear* 161: 61-61.
5. Campbell, G.M., and Mougeot, E. 1999. Creation and characterization of aerated food products. *Trends Food Sci. Technol.* 10: 283-296.
6. Gekas, V. 1992. "Transport Phenomena in Foods and Biological Materials." CRC Press, Boca Raton, Fla.
7. Kalab, M., Allan-Wojtas, p., and Shea Miller, S. 1995. Microscopy and other imaging techniques in food structure analysis. *Trends Food Sci. Technol.* 6: 177-186.
8. Macosko, C.W. 1994. "Rheology: Principles, Measurements and Applications." VCH Publishers, New York.
9. Pedreschi, F., Aguilera, J.M., and Brown, C.A. 2000. Characterization of food surfaces using scale-sensitive fractal analysis, *J. Food Proc. Eng.* 23: 127-143.
10. Pedreschi, F., Aguilera, J.M., and Arbidua, J.J. 1999. CLSM study of oil location in fried potato slices. *Microscopy Analysis* 37: 21-22.
11. Rao, M.A. 1999. "Rheology of Fluid and

- Semisolid Foods." Aspen Publishing Co., Gaithersburg, Md.
12. Roos, Y. 1994. "Phase Transitions in Foods." Academic Press, New York.
13. Villadsen, J. 1997. Putting structure into chemical engineering. Chem. Eng. Sci. 52: 2857-2864
14. Wilson, R.H. 1995. Recent developments in IR spectroscopy and microscopy. In "Physicochemical Aspects of Food Processing," ed. S.T. Beckett, pp. 177-195. Aspen Publishing Co., Gaithersburg, Md.
15. Windhab, E.J. 1995. Rheology in food processing. In "Physicochemical Aspects of Food Processing," ed. S.T. Beckett, pp. 80-116. Aspen Publishing Co., Gaithersburg, Md.
- 〈출처: Food Technology 54(11), 56, 2000〉
-
-
-