

식품에서 활성성분 전달에 대한 물리학적 접근

이 경 애
식품기능연구본부

I. 서론

복잡한 식품 매트릭스에서 활성성분의 새로운 기능성 창출은 식품 산업에 있어서 중요성이 증가되고 있다. 다양한 식품 제품으로 사용되는 활성 성분이란 향, 비타민, 무기물과 같은 전통적인 것과 프로바이오틱 미생물, 여러 종류의 생리활성물질과 같은 비교적 새로운 것을 포함한다.

식품 제품에서의 활성성분의 응용은 물리적, 화학적인 다양한 요소에 대한 민감성에 의해 생물학적 기능의 소실, 화학적 분해, 불완전한 방출 등을 야기하기 때문에 혁신적인 접근방법을 종종 요구한다. 이러한 것은 많은 활성성분들의 높은 민감성뿐 아니라, 많은 식품 제품과 매트릭스 조건의 복잡성 때문에 시도되고 있다. 또한, 제품의 안전, 성상, 저장 조건, 소비자에 의한 조작 용이성, 신선함, 감각적 특성들은 활성성분의 도입에 의해 달라지지 않아야 한다.

의약품, 농화학, 화장품 산업과 같은 타 분야와 비교하면, 활성성분을 함유하는 제품의 개발은 이

러한 다중 조건을 동시 만족시켜야 하는 식품산업에서 더 요구된다. 대부분의 비식품 분야에서는 활성성분의 전달이 그 제품의 기본적인 목적이며, 조성, 제조과정, 저장조건은 이 활성성분의 작용 극대화를 위해 조절될 수 있다. 또한, 식품 산업에서 성분, 제조과정, 저장 조건에 관한 규정은 엄격하며 가격 마진은 의약품산업 등에 비해 훨씬 낮다.

식품에서 활성성분들의 도입을 위해 적용된 것이 보호작용 또는 서방성(controlled release)을 위한 캡슐화 시스템의 사용이다. 결과적으로, 유리상 탄수화물, 지방, 생체고분자 복합체 등의 다양한 식품 재료에서 식품의 활성성분을 캡슐화하는 많은 기술이 개발되어 왔다. 기술과 캡슐화 물질의 선정은 종종 시행착오적이며, 물리화학적 현상에 대한 기본적 이해에 근거하지 않을 수가 있다.

인스턴트 음료, 츄잉 껌, 건조 또는 냉동 식품 등과 같은 온도, 수분작용의 조절 조건하에서의 간단한 식품 체계에서는 시행착오적 접근방법이

종종 성공적인 것으로 나타났으나, 냉장식품, RTD, shelf-stable food 등과 같은 복잡한 식품 제품에서는 이러한 방법이 대체로 적합하지 않다. 이러한 것은 활성성분과 식품 매트릭스의 작용에 영향을 주는 많은 물리, 화학, 생물학적 요소들에 대한 합리적인 규명이 시행착오적인 접근법으로는 충분치 않다는 것을 나타내는 경우이다.

본문은 그 목표가 물질과학, 물리화학, 생물물리학 등의 과학적인 원칙에 의해 분석되는, 새로운 접근방법을 소개한다. 그 과학적인 이해는 장래에 가장 확실히 선택될 수 있는 잠재적 해법 전략을 개발하는데 이용된다. 비용, 제조 용이성, 적응성과 같은 기술적인 부분을 감안하면, 이러한 여러 가능한 해법들이 궁극적으로 실제 식품 제품에 사용될 수 있다.

본 접근방법의 중요한 이점은, 잘 이해되지 않아 궁극적으로 효과가 없는 기술과 같은, 어떤 문제를 해결하는 특정한 기술에 초점을 맞추지 않는다는 것이다. 반면에 장래의 기술에 의해 이루어지는 최종적인 응용과 확실한 사양에 주안점을 두고 있다. 그러한 개발은 과학적인 기초에 근거할 때 촉진된다는 것이 명백하게 될 것이다.

비록 이 분야가 현재는 중요하게 개발되지 않더라도, 우리는 두 사례 연구의 방법에 의해 합리적인 전달(delivery) 전략을 탐색하는 접근방법의 원리와 과학적인 개발의 역할을 설명하려고 시도한다. 두 사례 모두 전체적인 전달 분야의 중요한 부제로서의 활성성분 안정화에 초점을 맞추었으며 여기서는 탄수화물의 유리화 상태(glassy state)에 대한 캡슐화 물질에 대해서 과학적 논의를 제한한다. 그 두 사례 연구로부터 몇몇 기능성은 활성성분의 캡슐화로 매우 바람직하게 나타난다.

이러한 기능성과 가능성이 다수 나열되며, 또한 제한성도 나열된다. 탄수화물 물리학에서의 최근 개발된 주요 사안도 논의된다. 마지막으로 식품 응용을 위한 전달 시스템의 개발에 대한 본 접근방법의 의미를 논의한다.

II. 본론

1. 전달 시스템에서의 'Retro'-디자인

활성성분의 전달을 위한 'Retro'-디자인에서, 식품 응용은 그 중심에 있으며 여기에서부터 그 식품 제품으로 활성성분을 적용하는 타당한 기술을 발견하기 위해 체계적으로 작업한다. Retro-디자인의 원리는 유기합성에서 개발되었기 때문에 최종 산물에서 원료물질까지 모든 단계와 진행을 체계적으로 평가한다. 유기 화학에서는, 그런 retro-디자인이 모든 가능한 반응 경로와 중간체의 평가를 통하여 원하는 산물로 유도하며, 반응 수율, 반응 단계의 수, 시작 물질의 유용성 등에 대한 합리적 검토에 근거하여 유리한 반응경로를 선정하게 한다. 또한, 그 접근방법은 아직 존재하지 않지만 시도해 볼만한 화학적 전환을 인정함으로써 유용한 것으로 증명되었다. 식품 분야에서, 유사한 retro-접근방법이 매우 유용하다는 것, 특히 활성성분을 함유하는 복잡한 식품 제품의 개발에 유용하다는 것을 우리는 경험한 한 바 있다.

식품에서의 활성성분의 전달을 위한 retro-디자인 접근방법을 채택하는 것에 있어서, 요구하는 활성성분의 기능성과 작용을 정확하게 정의하는 것이 필요하다(Diagram 1). 이 목표는 활성성분의 요구된 기능성과 작용을 확인한다. 예를 들면 어떤 식품의 조리중 주어진 시간에 충분한 양의 향의 방출, 식품에서 정해진 양의 비타민의 존재 또는 프로바이오틱 미생물의 최소 생존수, 보존이나 섭취중 생리활성물질의 활성형 상태의 유지 등이 있다.

또 활성성분의 물리, 화학, 생물학적 특성과 식품 매트릭스내의 조건을 분석하게 된다(Diagram 1). 활성성분의 그런 특성에는 phase behavior, molecular mobility와 같은 물리적인 특성과 화학 반응, 그리고 생리적, 감각적 특성이 유지되는 조건들이 포함된다.

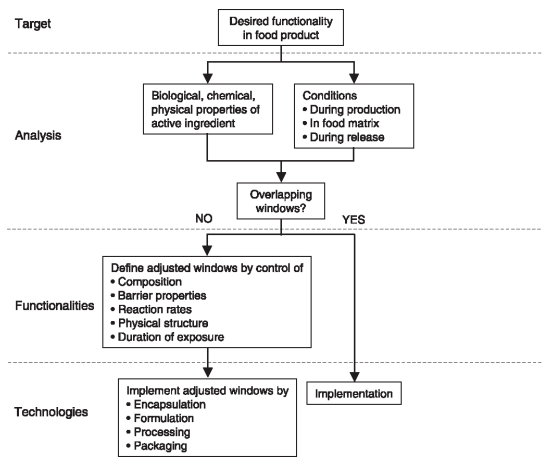


Diagram 1. Outline of a retro-design approach towards the optimization of the functionality and performance of active ingredients in complex food matrices.

일반적으로, 어떤 특정한 식품 제품에 대해, 우리는 그 활성성분의 응용에 상응하는 식품 매트릭스 조건을 적합하게 하는데 있어서 매우 제한된 융통성을 가지고 있다. 그래서 산물의 조성, 제조 공정, 보관조건 등에 있어서 활성성분의 응용과 제품개발자가 정한 제한점 간에는 종종 큰 모순이 존재한다. 결과적으로, 어떤 때에는 식품 매트릭스의 조건이 그 활성성분의 안정성과 기능성에 해로운 것인데도 받아들여져야 한다. 그런 상태에서는, 활성성분과 제품은 부적합(incompatible)하다고 할 수 있으며 활성성분의 기능성과 작용을 만족시키는 성공적인 제품개발은 불가능한 것으로 보인다.

그러나 활성성분의 작용 유지 조건과 식품 매트릭스에 의한 제한성의 조건을 명확히 식별하면, 활성성분과 식품 매트릭스의 부적합성을 해결하는 기능성을 확인할 수 있다. 이러한 기능성은 활성성분과 식품 매트릭스의 상호작용 분석에 기반하며, 아직 특정한 기술과 관계있지는 않다.

사실, 이렇게 정의된 기능성은 현존하는 연계기술을 가지고 있지 않을 수도 있다. 기능성이란 개념을 소개하는 중요한 이점은 Diagram 1에 나타

난 바와 같이 여러 다른 요소들의 최적 조합을 위해서 기술의 선택을 더 뒤의 단계로 지연한다는 것이다. 따라서, 이것은 신규 기술이 특정한 응용을 만족시켜야 한다는 요구성을 확실하게 정의한다.

정의된 기능성에 기반하여 우리는 적절한 기술을 선택하거나 개발하는 위치에 있게 된다. 이것은 전달이나 캡슐화 시스템의 이용을 포함하며, 또한 다른 활성성분과 원료를 사용하는 식품 제품의 재제형화(reformulation), 또는 식품 제품의 다른 구조를 유도한다 (Diagram 2). 또한, 활성성분과 식품 제품 간의 부적합성에 대한 원인을 명확히 식별하면, 제조 과정의 작은 조정이 활성성분의 작용을 강화하게 된다는 것이 때때로 판명된다. 이러한 방법들에 의해, 우리는 활성성분과 식품 제품의 부적합성을 제거하려고 시도할 수 있다.

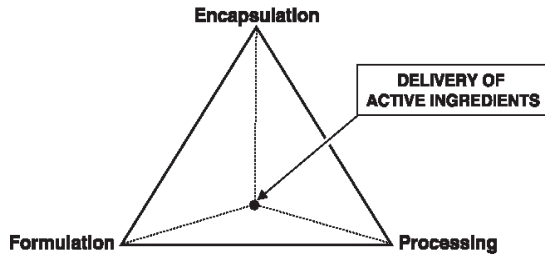


Diagram 2. Technologies for the delivery of active ingredients in foods. Encapsulation is the isolation of the active ingredient within the food product using food-grade materials. Formulation encompasses the structuring of the active ingredient, often on molecular or nanoscale levels using food-grade ingredients interacting with the active ingredient. By adaptation of the processing conditions, the adverse effects on the active ingredient may be minimized, or the performance of active ingredient may be maximized. Packaging extends beyond a narrow definition of delivery approaches as it generally uses non-food grade materials and processes and is not included in the diagram.

Retro-디자인에 기반하는 접근방법은 활성성분을 포함하는 진보된 식품 제품의 개발에서 캡슐화 시스템의 시행착오적 평가에 많은 중요한 이점을 가지고 있다. 첫째, 초점은 식품 제품과 그 기능성에 있으며, 캡슐화 기술에 있지 않다. 둘째, retro-디자인 접근방법에 이어서, 최적화된 캡슐화 시스템이나 과정을 식품 제조 공정을 위한 선택이 다른 단계에 진행되며, 여러 조건에서의 작용 평가, 부작용, 비용 등의 관점에서 최대한 유연성을 가지게 된다. 마지막으로, 이것은 혁신적인 식품 제품의 개발에서 일어나는 문제 해결을 위해 과학적인 지식의 체계적인 이용을 촉구하며 효과적으로 기술적 간격을 규명하는데 도움을 준다.

2. 사례 연구(1) : 부정형 식품 분말에서 복잡한 향 혼합물의 캡슐화 및 안정화

식품 분말이나 과립에서 향 또는 추출물의 안정화에 대해 생각해 보자. 이것은 인스턴트 음료, 유제품 분말, 주방용 분말제품, 용해성 커피와 같이 매트릭스가 대부분 유리상 탄수화물로 구성되는 어떤 분말형태의 식품 제품일 수 있다. 보관 중에 식품제품의 향의 질과 강도는 줄어들어 식품의 품질이 확실하게 저하된다. 이러한 향의 질과 강도 저하는 물리, 화학적인 과정에 의한 향 성분의 소실과 관계가 있다. 물리적 과정은 기본적으로 그 식품 매트릭스에서의 향 성분의 확산과 함께 식품 매트릭스 구성분에 의한 향 성분의 물리적 결합으로 구성된다. 화학적 과정은 산화, 가수분해에 의한 향 성분의 분해 및 식품 매트릭스와의 화학반응, 부산물 생성 등으로 구성된다.

향의 소실을 막기 위해, 캡슐화 시스템이 통상 사용된다. 이러한 시스템의 사용은 향 소실의 원인이 알려지고 그것이 캡슐화 매트릭스의 특성에 의해 억제될 경우 매우 성공적이었다. 유리상의 부정형 탄수화물에 기반하는 캡슐화 시스템은 저장

기간 동안 향의 방출률을 낮추는 것과 산소에 의한 향의 산화율을 낮추는데 매우 효과적이었다. 두 과정은 유리상 탄수화물 매트릭스를 통해 객체 분자(guest molecule)가 확산하는 매우 느린 과정을 수반한다. 부정형의 유리상 탄수화물에 있어서 캡슐화 시스템의 기능성은 향 성분과 산소의 확산 방지에 기인함에 따라, 그러한 시스템을 최적화하는 전략은 분명히 필요하다. 확산율은 탄수화물 매트릭스의 수분작용 저하나 적절한 탄수화물 조성의 선택과 같은 원료 특성의 제어에 의해 최소화할 수 있다. 또한, 과립 형태의 변형에 의해, 향 성분의 방출율이나 산소의 포집율을 최소화할 수 있다. 일반적으로 과립 구조가 크고 구멍이 작을수록 효과적인 전달률은 적어진다(Fig. 1a).

식품산업에서 최근 주요 관심사는 주방 및 제빵 제품에서 사용되는 topnote(향의 일종)와 같이 매우 민감한 향이나 추출물을 사용하는 경우이다. 또한, 향의 포집을 위한 매트릭스는 곡물 제품이나 용해성 커피 매트릭스와 같이 종종 화학적, 구조적으로 이질적인 식품 매트릭스이다. 이런 복잡한 시스템에서, 향의 소실은 조화롭게 작용하는 복수의 효과에 기인하며, 그것은 효과적인 안정화 전략의 선택을 복잡하게 한다. 이러한 복잡함 때문에, 첫번째 단계는 향의 운동성(aroma mobility), 분해, 방출의 기초가 되는 과정의 양적인 이해를 늘이는 것이다(Diagram 3). 예를 들면, 우리는 커피 추출물로 구성되는 유리상 탄수화물 매트릭스와 유리상 매트릭스 양쪽에서 커피 향의 안정성을 고려한다(Fig 1).

알콜, ester, ketone, thiol과 같이 ppb-ppm 범위로 있는 커피 향의 향 성분은 많은 화학적 기능성을 나타낸다. 만일 물리적 과정만이 향 소실의 원인이라면, 유지력(retention)은 vapor pressure, oil-to-water partition coefficient와 분자 크기 등과 같은 물리적 특성에만 의존해야 한다. 유리상 시

시스템에서 투과물의 확산운동은 그것의 분자 크기와 관계있어, 여러 향 성분의 유지력을 분자 볼륨에 따라 분석하였다(Fig.1b).

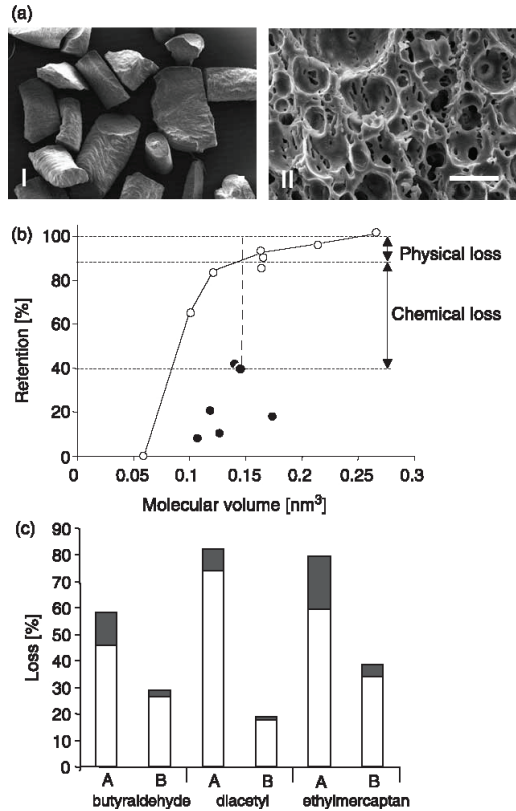


Fig. 1. Diffusion and degradation of flavor compounds encapsulated in a complex food matrix largely consisting of amorphous carbohydrates: (a) granule morphology is an important parameter to optimize when the stability of encapsulated flavors is determined by diffusional losses (evaporation, oxidation by environmental oxygen). When chemical reactions with the matrix are of importance, particle morphology ceases to be a relevant parameter: (I) extruded carbohydrate granules; (II) freeze-dried granules; bar 100 μm ; (b) flavor retention in coffee-based carbohydrate matrix in the glassy state after storage

for 42 days at 37 $^{\circ}\text{C}$ and a water activity of 0.33. By plotting the flavor retention in a product prototype as function of the molecular volume of the various flavor compounds in the flavor composition, a separation of the flavor retention data into two distinct groups is observed. The open symbols denote the flavor compounds of which the retention is related to their molecular volume. These flavor compounds may be considered to be chemically stable in the matrix and their losses are caused by evaporation of the flavor into the surrounding atmosphere. The retention of a number of flavor compounds is much lower than predicted on basis of their molecular volume (filled symbols). These flavor compounds are chemically unstable in this particular prototype matrix. The fraction of the flavor lost owing to chemical degradation may be estimated by subtracting the calculated physical loss for a hypothetical chemically stable flavor molecule from the total loss; (c) loss of three key compounds from coffee aroma after storage (42 days, 37 $^{\circ}\text{C}$, water activity 0.33) for two different spray-dried encapsulation matrices: A, coffee-based matrix; B, maltodextrin matrix (DE-10). The height of the bar indicates the total loss of the flavor compound, divided in physical loss (black bar) and chemical loss (open bar). Adapted with permission from Ubbink and Reineccius (2002).

이 경우 많은 향성분이 그 분자의 볼륨과 관련 되지 않았다. 결과적으로, 이러한 물질들의 낮은 유지력은 제품으로부터 향성분의 확산적 소실에 의한 것이 아니라 그 식품 시스템 안에서 발생하는 화학 반응에 의한 것이다. 이 방법에 의해, 우리는 다양한 캡슐화 매트릭스에서의 개별적 향 소실에 있어서 화학적 물리적 요소의 상대적인 중요

성을 빨리 식별할 수도 있다(Fig. 1c).

향 소실을 감소시키기 위해 필요한 기능성을 정의할 필요가 있다. 이것들은 확실히 화학 반응의 조절이 필요하며, 더욱 상세한 화학 지식이 중요하게 될 것이다. 정의된 기능성에 기반하여 필요하다면 적절한 기술은 선택될 수 있다(Table 1). 예를 들면, 유리상에서 부정형 탄수화물은 향 성분과 산소에 대한 장벽 특성을 강화하기 위해 사용될 수 있다. 화학적으로 비활성인 매트릭스는 향 분자와 캡슐화 매트릭스의 성분 사이에 반응물을 감소시키는 데 사용될 수 있다. 또한 반응성이 있는 향 성분은 개별적으로 캡슐화 될 수 있다.

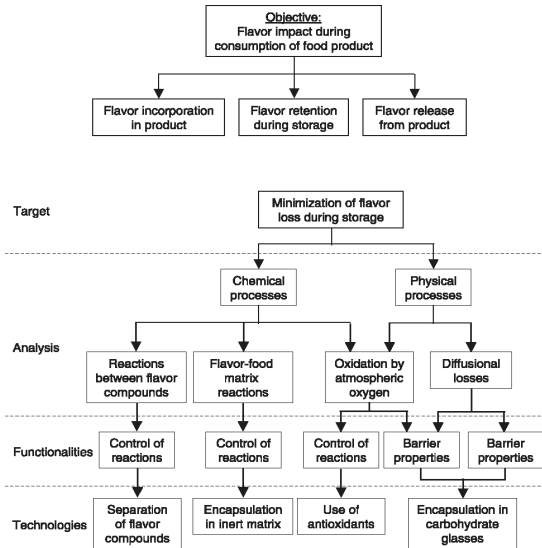


Diagram 3. Retro-analysis of the delivery of flavors in food matrices.

3. 사례 연구(2) : 식품 매트릭스에서 생균제(probiotics)의 안정성

생균제는 소화관과 비뇨생식기에서 장과 장내 세균 조절에 있어서의 건강상 유익성 때문에 매우 주목되고 있다. 일반적으로, 생균제는 장내 미생물 균형을 개선함으로써 숙주 생물에 유익한 영향을 미치는 생균 식품 첨가물로 여겨진다. 젖산균과 비피도균 이외에, 프로피온산균이 강력한 생균제

로서 점점 대두되고 있다. 식품 응용을 위한 생균제의 선별은 안전성, 효능, 기능성과 안정성과 같이 상충되는 요구도를 기반으로 진행된다.

대부분의 생균제 균주, 특히 비피도균은 식품 제품의 생산과 저장, 소비 중에 발생하는 스트레스에 대해 낮은 생존률을 가지는 민감한 미생물이다. 미생물의 많은 부분이 식품 제품의 소비 이전에 그들의 생존 능력을 잃기 때문에 생균제를 식품 제품의 활성성분으로서 적용하는 것은 직접적이지 않다. 이러한 소멸은 제품의 저장기간중 1 log 보다 일반적으로 더 크다. 많은 기술과 전략이 식품 제품에서 가공과 저장중 생균제의 생존을 증가시키기 위해 사용가능하거나 개발되고 있다. 그러나 이런 기술과 전략의 응용 범위는 보통 조건에 따라 제한적이다.

생균제의 안정성 문제를 해결하는 한 방법으로서 살아있는 균 대신에 생균제 추출물이나 isolate를 사용하는 것이 있으며, 몇몇 연구에서 살아있지 않은 생균제도 유익한 효과를 나타내는 것으로 연구되었다(Diagram 4). 그러나 최근의 의견은 생균제 추출물과 isolate가 완전하게 살아 있는 생균제를 대신할 수는 없다는 것이다. 그러므로, 생균제 식품 제품을 개발할 수 있게 하는 식품 매트릭스 내 미생물 안정화의 효과적인 기술이 요구된다.

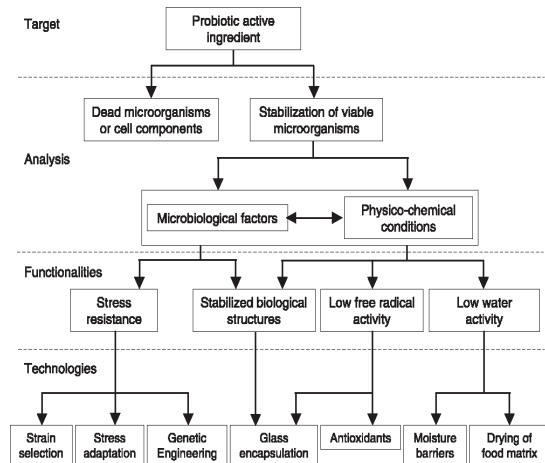


Diagram 4. Retro-analysis of the delivery of probiotics in food matrices.

Table 1. Functionalities, working principles and technologies in the delivery of active ingredients in foods

Functionality	Principle	Technology	Status
<i>Control of migration</i>			
Oxygen	Amorphous carbohydrates in glassy state	Spray-drying Extrusion	Successful in dry state, problematic in moist matrices
Water (vapor and liquid)	Lipid coatings	Spray-chilling Fluidized-bed coating	Limited functionality, in particular in complex food systems or on small particles
Organic molecules (e.g. flavor compounds)	Amorphous carbohydrates in glassy state, polysaccharide films Phase partitioning	Various	Successful in dry state, satisfactory in low moisture states Effective when large differences in hydrophobicity between organic compound and bulk of food matrix; equilibrium distribution attained
<i>Control of release</i>			
	Hydrogels (coacervates, alginate complexes, gelatine capsules) Emulsions and complex fluids	Complex coacervation, nozzle techniques for bead preparation Emulsification, self-assembly	Many successful applications known. Shelf life is often an issue. Emulsions are often used, but have limited functionality. Applications of self-assembly are in infancy.
	High molecular weight starches and starch derivatives	Extrusion	Numerous applications developed
<i>Reaction control</i>			
General	Separation of reactants Change of local conditions (e.g. pH) Quenching in glassy state Complexation of reactant	Phase-separated or fractionated systems Liposomes/vesicles Glassy carbohydrates Proteins, cyclodextrins hydrocolloids	Few examples known; further exploration desirable
Oxidation	Antioxidants	Various	Widely used
<i>Bioavailability of poorly soluble active ingredients</i>			
	Increase of solubility by surfactants, proteins, oils Increase of specific surface area	High-speed homogenization Self-assembly Micronization	Sensitivity to changes in environmental conditions; specificity of solutions First applications are developed, similarity to pharmaceutical approaches
<i>Stabilization of fragile biological materials</i>			
Heat	Amorphous carbohydrates in glassy state	Freeze-drying, Spray-drying	Successful in dry state, problematic in moist matrices
Light			

Diagram 4에 나타난 바와 같이 생균제 생존의 관점에서 가공과 식품 매트릭스 조건을 맞추기 위해 그리고 가공과 소비 조건하에서 생존능을 증진시키기 위해서, 생균제 배양시 생존 능력을 잃는 메카니즘과 생균제 미생물의 스트레스 반응 메카니즘에 대한 이해가 필요하다. 예를 들면, 일반적

으로 우리는 탈수된 식품 제품에 있는 생균제 미생물의 응용을 기본적으로 0.3 -0.5 사이의 수분작용으로 고려한다. 탈수된 식품 제품은 일반적으로 실온에서 1-2 년의 저장기간을 갖는다. 이 조건하에서, 생균제 미생물은 아직 완전히 밝혀내진 못한 메카니즘에 의해 일반적으로는 몇 달 이내에

그들의 생존 능력을 잃을 것이다. 그럼에도 불구하고 이런 탈수된 상태에서 생균제의 안정성을 위한 전략은 환경 조건의 변화에 대한 생균제 배양물의 반응을 관찰하는데 기반을 둔다. 탈수된 제품에서 생균제 안정성 문제 해결의 한 방법으로, 배양물을 극도로 건조하게 되면 생균제의 생존률은 수분작용이 저하됨에 따라 급격히 증가된다. 이것은 제품 매트릭스를 요구하는 수분함량으로까지 건조하여 달성될 수 있다. 이것은 제품 무게가 1-10% 까지 줄어들게 되므로 비용이 많이 드는 방법이다. 또한, 극히 건조한 제품을 만드는 것은 질감과 맛과 용해성처럼 다수의 제품 특성을 변경할 수 있다.

수분의 영향으로부터 생균제 미생물을 보호하는 다른 전략은 원료에 있는 건조한 biomass를 캡슐화하여 물에 대한 장벽을 형성하는 것이다. 식품 재료로 구성된 필름의 코팅에 의한 수분 차단은 일시적인 것인데, 지방질과 같이 hydrophobic한 식품 재료일 경우도 적정 수분 전달률이 있기 때문이다(Table 1).

수분을 차단하는 것이 저장기간 동안 생균제의 생존 능력을 강화함에도 불구하고 이 개선의 원인이 명확치 않으나 산화작용 등 다양한 반응시의 수분작용에 관련되거나 수분에 의한 생체 거대 분자의 conformation 변화와 관련 될 수는 있다. 산화 과정이 미생물의 안정성에 영향을 미치는 것으로 판명된다면, 수분작용의 조절이 원하는 보호를 하지 못하는 경우에는 항산화제를 사용할 수 있다. 또, 생균제 안정성에 대한 산화 반응의 영향은 유리상 부정형의 탄수화물처럼 높은 산소 장벽 특성을 가진 재료로 만들어진 미생물 캡슐화로 억제할 수 있다.

하나의 특정 기술이 다중의 기능을 가지고 있

을 수 있다. 예를 들면, 유리상 탄수화물은 수소 결합에 의해 생체구조와 반응하는 물리적으로 안정한 매트릭스를 형성함으로써 지방막, 단백질, 핵산 등과 같이 민감한 생물학적 구조체의 안정화에 중요한 역할을 하는 것으로 여겨진다.

논의된 바와 같은 물리화학적 전략에 근거한 안정화 전략은 미생물학에서도 찾아볼 수 있다. 균주의 선정이 첫번째 중요점이지만, 원하는 적용을 위해서는 스트레스 적응성 또한 생균제 생존력 조절이 중요한 전략이다. 스트레스 적응성은 거의 치사량 또는 점차로 증가하는 양의 스트레스를 주어 세포의 적응 반응을 자극하여 미생물이 유사하지만 더 강한 스트레스에 견딜 수 있게 하는 것이다. 예를 들면, Talwalkar와 Kailasapathy (2004)은 미생물 세포를 요구르트내 용존산소 농도를 점차 증가시켜 처리함으로써 요구르트내 높은 용존산소 스트레스에 적응하는 만들었다. 이러한 적응 과정은 복잡한 생물학적 과정이며, 일례로서 HSPs와 같은 스트레스 특이적 단백질 또는 GSP 등 일반 스트레스 단백질에 의해 조절된다. 전체의 genome sequence의 생물정보를 포함한 유전학적인 도구가 미생물의 적응과 보호에 대한 분자 메카니즘의 이해를 증가시키는데 점점 더 이용된다.

식품 제품에서의 생균제 안정성의 문제가 아직 해결되지 않았지만, 생균제 안정성을 결정하는 다양한 물리화학적, 생물학적 요소에 대한 것을 푸는 합리적인 방법을 제공함에 따라 "retro-디자인" 개념에 기반하는 구조적 분석이 유용하다는 것이 기대된다. 그러므로 최종적인 전략은 하나의 과정 단계나 성분을 고려하여 최적화 되지 않을 것이며 그 목표 제품과 요구하는 제품 사양의 관점에서 해결하여야 할 것이다.

4. 캡슐화 기능성 확립에서 재료과학의 역할

전달 시스템에서 요구하는 기능적 특성은 일반적으로 활성성분과 매트릭스간 부적합성을 보완하고자 하는 필요성에 기반한다. 이러한 시스템을 위한 가장 중요한 기능들은 Table 1에 요약되어 있으며, 전달 기능과 잠재된 기술의 원리 사이의 관계를 나타낸다. Table 1을 보면 많은 기술은 단지 제한된 범위의 조건하에서만 적용할 수 있다는 것이 분명하다. 또한, 다수의 기능성에 있어서는 어떤 적합한 기술도 아직 사용되지 않을 수 있다. 특히, 식품시스템에서 수분 이동률을 국소적으로 감소시키는 장벽은 food-grade 재료를 사용해서는 어려운 것으로 증명되었다.

Table 1에 나열된 기능성에서, 식품 원료의 재료적 특성은 중요한 역할을 한다. 장벽 특성, 복잡한 생체 분자를 안정화하는 구조형성과 같이 핵심적인 기능성은 지질, 단백질, 탄수화물과 그들의 복합체 등 food-grade 재료의 물리적 특성에 대한 상세한 지식이 요구된다. 지난 수십년 동안, 식품 재료과학은 큰 발전을 하였다. 최근에는 식품재료의 분자수준, 나노수준에서의 특성을 확립하는데 주로 초점이 맞추어졌다. 이것은 장벽 특성, 확산, 상 변이와 구조적 재배열과 같은 물리적 현상의 기초가 되는 분자 메카니즘의 이해를 증진시키는데 공헌할 것이라고 예상된다. 식품 재료와 식품 시스템의 특성은 일반적으로 두 독립적 매개변수인 온도와 수분 함량의 기능으로서 연구할 필요가 있다(Fig 2a). 다음으로, 식품 재료의 하나로서 유리상의 부정형 탄수화물의 분자 및 나노 수준 연구에 대한 것을 설명하고자 한다. 설명한 바와 같이, 이 물질은 식품 매트릭스로서, 그리고 활성성분의 캡슐화 재료로서 중요하다.

부정형 탄수화물의 재료과학적 중요점은, 탄수

화물류 식품의 공정과 안정성 예측에 사용되어온, 유리 전이(glass transition)이다. 유리상태(glassy state)와 고무상태(rubbery state)를 분리하는 유리 전이온도(Tg)는 부정형 매트릭스의 분자 운동성 정도를 나타낸다. 고무 상태에서는 매트릭스 분자의 translational 및 rotational 운동이 가능하나, 유리상태에서는 큰 규모의 분자 운동이 억제된다. 부정형 매트릭스의 Tg는 그 조성에 따라 다르며, 저분자물질에서는 일반적으로 고분자 물질보다 낮은 유리상 전이 온도를 가진다(Fig. 2b). 부정형 탄수화물에서 특히 중요한 점은 수분 함량이나 수분 작용이 증가할수록 유리상 전이 온도가 급격히 저하한다는 점이다(Fig. 2a).

매트릭스 탄수화물의 대규모의 운동이 유리상태에서는 억제되지만, 유리상태에서 물, gas와 저분자 운동에서 보는 바와 같이 매트릭스 안에 있는 작은 규모의 재구성은 가능하다. 또, neutron scattering, electron paramagnetic resonance, positron annihilation lifetime spectroscopy와 같은 분광기술을 이용하면, 부정형 탄수화물 매트릭스의 온도 변화, 수분 함량 변화가 유리상태에서도 탄수화물 매트릭스의 국소적 구조와 역학에 큰 영향을 가지고 있다는 증거를 확인할 수 있다(Fig. 2c). 나노미터나 준나노미터 수준에서의 구조와 역학은 유리상 탄수화물의 장벽기능과 단백질처럼 민감한 생체물질에 대한 탄수화물의 보호효과를 이해하는데 매우 중요하다. 결론적으로 분자 및 나노 수준에서 일어나는 과정을 이해하는 것이 식품재료의 장벽기능을 최적화하는데 필요하다. 이러한 지식은 분무건조나 유동층건조, 용융압출(melt extrusion)과 같은 다양한 가공기술에 의해 제공되는 캡슐화 시스템에 중요하다.

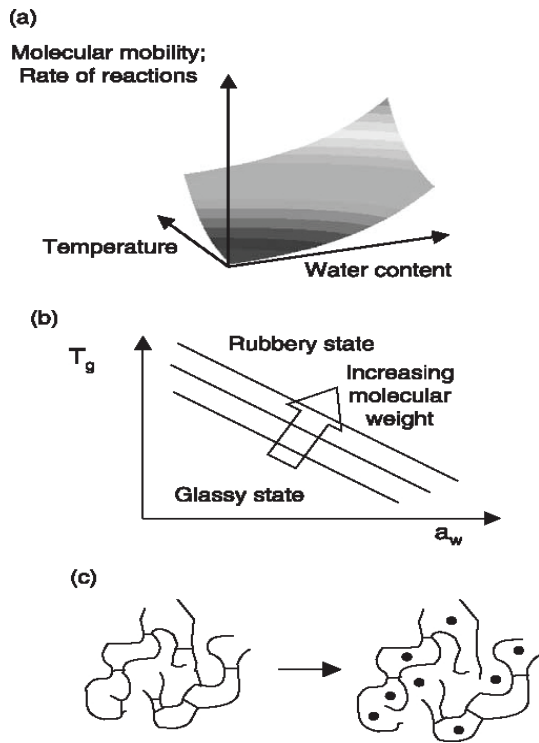


Fig. 2. Materials science of amorphous carbohydrate matrices: (a) in food matrices, the molecular mobility and the rate of reactions depend exponentially on both temperature and water content. Consequently, food properties need investigation as a function of two independent parameters; (b) the glass transition of an amorphous carbohydrate matrix decreases strongly with increasing water content or water activity. An increase of the average molecular weight leads to an increase of the T_g at the constant water content or water activity; (c) a molecular interpretation of the interaction of water with amorphous carbohydrates. In dry state, the hydroxyl groups on the sugar residues form hydrogen bonds (left diagram). Water absorbed into the system leads to plasticization both by interference with the hydrogen bonding between the carbohydrate chains and by creation of additional free volume (right diagram).

III. 결론

최근 식품 개발에서 요구하는 것은 민감한 활성 성분을 더욱 복잡한 식품 제품에 사용하고자 하기 때문에 종종 상충되는 부분이 있어, 식품에서의 전달 시스템(delivery system) 개발과 응용이 매우 주목 받고 있다. 많은 경우에 활성성분의 물리적 화학적인 특성과 전달 시스템의 기능성이 별로 이해되지 않았기 때문에, 확립된 캡슐화 기술을 목적에 따른 변경 없이 적용하는 것은 어렵다. 본 논문에서는, 식품 적용에 있어서 활성성분의 기능성에 초점을 맞추고, 체계적인 방법으로 캡슐화 기술과 같은 다양한 기술에 역추적하는 접근법을 제시한다. 이러한 접근법의 이점은 그 최종적인 제품 응용이 주안점이며 특정 기술 자체가 아니라는 점과, 제품 품질과 안정성을 결정하는 여러 요소를 감안하기 위해 기술의 선정을 뒷단계로 연기하여야 한다는 점이다. 또한, 전달 문제의 많은 점을 체계적으로 평가하기 때문에 과학적 지식의 차이가 분명해지고 연구로부터의 결과는 용이하게 채택된다. 우리는 식품에서의 활성성분 전달에 대한 향후의 노력이 생체물질학, 물리화학, 생물물리학과 캡슐화 기술 간의 유기적인 과학적 발달을 가져올 것으로 기대한다.

IV. References

1. Angell, C. A. (1988). Perspectives on the glass transition. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 49, 863-870.
2. Beales, N. (2003). Adaptation of microorganisms to cold temperatures, weak acid preservatives, low pH, and osmotic stress: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 3, 1-20.
3. Benczé di, D., & Blake, A. (1999). Encapsulation and the controlled release of

- flavours. *Leatherhead Food RA Food Industry Journal*, 2.
4. Cicerone, M. T., & Soles, C. L. (2004). Fast dynamics and stabilization of proteins: Binary glasses of trehalose and glycerol. *Biophysical Journal*, 86, 3836-3845.
 5. Cohen, M. H., & Turnbull, D. (1959). Molecular transport in liquids and glasses. *Journal of Chemical Physics*, 31, 1164-1165.
 6. Corey, E. J., & Cheng, X.-M. (1989). *The logic of chemical synthesis*. New York: Wiley.
 7. Crawford, D., & Davies, K. (1994). Adaptive response and oxidative stress. *Environmental and Health Perspectives*, 10(Suppl. 10), 25-28.
 8. De Angelis, M., & Gobbetti, M. (2004). Environmental stress responses in *Lactobacillus*: A review. *Proteomics*, 4, 106-122.
 9. De Roos, K. B., & Mansencal, R. (2003). Poor performance of flavourings in heat processed products: a problem of poor flavour retention or poor flavour release? Flavour research at the dawn of the twenty-first century, *Proceedings of the Weurman Flavor Research Symposium*, 10th, Beaune, France, June 25-28, 2002.
 10. Desmond, C., Fitzgerald, G. F., Stanton, C., & Ross, R. P. (2004). Improved stress tolerance of GroESL-overproducing *Lactococcus lactis* and probiotic *Lactobacillus paracasei* NFBC 338. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(10), 5929 - 5936.
 11. Franks, F. (1985). *Biophysics and biochemistry at low temperatures*. Cambridge: Cambridge University Press.
 12. Fuller, R. (1992). *Probiotics: The scientific basis*. London: Chapman & Hall.
 13. Gibbs, B. F., Kermasha, S., Alli, I., & Mulligan, C. N. (1999). Encapsulation in the food industry: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 50, 213-224.
 14. Goubet, I., Le Quere, J. L., & Voilley, A. J. (1998). Retention of aroma compounds by carbohydrates: Influence of their physicochemical characteristics and of their physical state. A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 1981-1990.
 15. Guin, S. (2004). Microencapsulation: Industrial appraisal of existing technologies and trends. *Trends in Food Science and Technology*, 15, 330-347.
 16. Kilburn, D., Claude, J., Mezzenga, R., Dlubek, G., Alam, A., & Ubbink, J. (2004). Water in glassy carbohydrates: Opening it up at the nanolevel. *Journal of Physical Chemistry B*, 108, 12436-12441.
 17. Kilburn, D., Claude, J., Schweizer, T., Alam, A., & Ubbink, J. (2005). Carbohydrate polymers in amorphous states: An integrated thermodynamic and nanostructural investigation. *Biomacromolecules*, 6, 864-879.
 18. Kosanke, J. W., Osburn, R. M., Shuppe, G. I., & Smith, R. S. (1992). Slow rehydration improves the recovery of dried bacterial populations. *Canadian Journal of Microbiology*, 38(6), 520-525.

19. Krochta, J. M., Baldwin, E. A., & Nisperos-Carriedo, M. O. (1994). Edible coatings and films to improve food quality. Basel: Technomic.
20. Lamb, R. (1987). Spray chilling. *Food Flavour Ingredients: Processing and Packaging*, 9, 39-43.
21. Larochea, C., Finea, F., & Gervais, P. (2005). Water activity affects heat resistance of microorganisms in food powders. *International Journal of Food Microbiology*, 97, 307-315.
22. Leslie, S. B., Israeli, E., Lighthart, B., Crowe, J. H., & Crowe, L. M. (1995). Trehalose and sucrose protect both membranes and proteins in intact bacteria during drying. *Applied and Environmental Microbiology*, 61(10), 3592-3597.
23. Levine, H., & Slade, L. (1986). A polymer physico-chemical approach to the study of commercial starch hydrolysis products (SHPs). *Carbohydrate Polymers*, 6, 213-244.
24. Lukaski, H. C. (2004). Vitamin and mineral status: Effects on physical performance. *Nutrition*, 20, 632-644.
25. Mantere-Alhonen, S. (1995). Propionibacteria used as a probiotic-A review. *Lait*, 75, 447-452.
26. Mateev, Yu. I., Grinberg, V. Ya., & Tolstoguzov, V. B. (2000). The plasticizing effect of water on proteins, polysaccharides and their mixtures. Glassy state of biopolymers, food and seeds. *Food Hydrocolloids*, 14, 425-437.
27. Menting, L. C., Hoogstad, B., & Thijssen, H. A. C. (1970). Diffusion coefficients of water and organic volatiles in carbohydrate-water systems. *Journal of Food Technology*, 5, 111-126.
28. Mezzenga, R., Schurtenberger, P., Burbidge, A., & Michel, M. (2005). Understanding foods as soft materials. *Nature Materials*, 4, 729-740.
29. Potts, M. (1994). Dessiccation tolerance of prokaryotes. *Microbiological Reviews*, 58(4), 755-805.
30. Prasad, J., McJarrow, P., & Gopal, P. (2003). Heat and osmotic stress responses of probiotic *Lactobacillus rhamnosus* HN001 (DR20) in relation to viability after drying. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(2), 917-925.
31. Richardson, D. (1996). Probiotics and product innovation. *Nutrition and Food Science*, 4, 27-33.
32. Risch, S. J., & Reineccius, G. A. (1988). Flavor eucapsulation. ACS symposium series 370. Washington, DC: American Chemical Society.
33. Risch, S. J., & Reineccius, G. A. (1995). Encapsulation and controlled release of food ingredients. ACS symposium series 590. Washington, DC: American Chemical Society.
34. Rodriguez-Huezo, M. E., Pedroza-Islas, R., Prado-Barragan, L. A., Beristain, C. I., & Vernon-Carter, E. J. (2004). Microencapsulation by spray drying of multiple emulsions containing carotenoids. *Journal of Food Science E: Food Engineering and Physical Principles*, 69, E351-E359.
35. Ross, R. P., Desmond, C., Fitzgerald, G. F., & Stanton, C. (2005). Overview of the

- technological hurdles in the development of probiotic foods. *Journal of Applied Microbiology*, 98, 1410-1417.
36. Roos, Y. H. (1995). Phase transitions in foods. New York: Academic Press.
37. Roos, Y. H., & Karel, M. (1991a). Plasticizing effect of water on thermal behavior and crystallization of amorphous food models. *Journal of Food Science*, 56, 38-43.
38. Roos, Y. H., & Karel, M. (1991b). Phase transitions of mixtures of amorphous polysaccharides and sugars. *Biotechnology Progress*, 7, 49-53.
39. Roy, D. (2005). Technological aspects related to the use of bifidobacteria in dairy products. *Lait*, 85, 39-56.
40. Salminen, S., Ouwehand, A., Benno, Y., & Lee, Y. K. (1999). Probiotics: How should they be defined? *Trends in Food Science and Technology*, 10(3), 107-110.
41. Schoonman, A., Ubbink, J., Bisperink, C., Le Meste, M., & Karel, M. (2002). Solubility and diffusion of nitrogen in maltodextrin/protein tablets. *Biotechnology Progress*, 18, 139-154.
42. Shah, N. P. (2000). Probiotic bacteria: Selective enumeration and survival in dairy foods. *Journal of Dairy Science*, 83(4), 894-907.
43. Shi, J., Mazza, G., & Le Maguer, M. (2002). Functional foods: Biochemical and processing aspects *Functional foods and nutraceuticals series* (Vol. 2). Boca Raton, FL: CRC press.
44. Sigler, K., Chaloupka, J., Brozmanova, J., Stadler, N., & Hofer, M. (1999). Oxidative stress in microorganisms-I. Microbial vs. higher cells--Damages and defences in relation to cell aging and death. *Folia Microbiologica*, 44(6), 587-624.
45. Slade, L., & Levine, H. (1995). Glass transitions and water-food structure interactions. *Advances in Food and Nutrition Research*, 38, 103-269.
46. Soper, J. C. (1995). Utilization of coacervated flavors. In S. J. Risch, & G. A. Reineccius (Eds.), *Encapsulation and controlled release of food ingredients*. ACS Symposium series 590. Washington, DC: American Chemical Society.
47. Talwalkar, A., & Kailasapathy, K. (2004). Oxidative stress adaptation of probiotic bacteria. *Milchwissenschaft*, 59(3/4), 140-143.
48. Tromp, R. H., Parker, R., & Ring, S. G. (1997). Water diffusion in glasses of carbohydrates. *Carbohydrate Research*, 303, 199-205.
49. Ubbink, J., & Reineccius, G.A. (2002). Mobility, clustering and phase separation of small molecules in amorphous carbohydrate matrices. *Abstracts of Papers*, 223rd ACS National Meeting, Orlando, FL, AGFD-035.
50. Ubbink, J., & Schoonman, A. (2003). Flavor delivery systems. *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*, on-line edition. New York: Wiley.
51. Van den Dries, I. J., Van Dusschoten, D., Hemminga, M. A., & Van der Linden, E. (2000). Effects of water content and molecular weight on spin probe and water mobility in malto-oligomer glasses. *Journal*

- of Physical Chemistry B, 104, 10126-10132.
52. Vrentas, J. S., & Duda, J. L. (1978). A free volume interpretation of the influence of the glass transition on diffusion in amorphous polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 22, 2325-2339.
53. Weinbreck, F., Minor, M., & de Kruif, C. G. (2004). Microencapsulation of oils using whey protein/gum arabic coacervates. *Journal of Microencapsulation*, 21, 667-679.
54. Whitcombe, M. J., Parker, R., & Ring, S. G. (2005). Oxygen solubility and permeability of carbohydrates. *Carbohydrate Research*, 340, 1523-1527.
55. Winkel, C. (2005). Stability of aroma chemicals. In D. J. Rowe (Ed.), *Chemistry and technology of flavors and fragrances* (pp. 244-260). Boca Raton, FL: CRC press.
56. Wood, B. J. B. (1992). *The lactic acid bacteria in health and disease The lactic acid bacteria* (Vol. 1). London: Elsevier.
57. Zimmermann, M. B. (2004). The potential of encapsulated iron compounds in food fortification: A review. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 74(6), 453-461.
- <출처 : Trend in Food Sci. Technol. 17, 244-254, 2006>

