

식품 지질의 소화, 흡수를 조절하기 위한 식품 조직의 설계

Designing Food Structure to Control Digestion and Absorption of Food Lipids

최희돈 | 기능소재연구단

Hee Don Choi | Functional Materials Research Group

기술소개

식품 특성, 소화와 흡수의 상관관계에 대한 이해가 증가함에 따라 영양성이 증진된 식품의 설계와 제조가 쉬워지고 있다. 이러한 정보는 저장, 운송 및 이용 시 생리활성 성분을 GI tract 내의 특정 부위에서 방출하거나 특정 성분의 생체이용성을 증가 또는 감소시킬 수 있는 식품 matrix를 설계하는데 이용될 수 있다. 생리활성 성분들이 어떤 식품 matrix에서 감소된 생체이용률을 가지기 때문에 영양성분의 생체이용률에 대한 식품조직의 영향에 대한 이해를 증진시키는 것은 health claim을 확립하는데 중요한 부분으로 강조되었으며, 지질 소화 관련 연구는 지난 수십 년간 그 중요성이 더욱 강조됐다. 식품에서의 지질 생체이용률은 비만과 동맥경화 등의 만성질환에 대한 관심 때문에 큰 주목을 받고 있다. 지질 소화를 조절하는 것은 혈청 지질 수준을 변경하고 포만감을 증진시킴으로써 인체 건강을 증진시킬 수 있다. 소화과정 중 대부분의 지질은 기계적인 힘, 그리고 단백질, 계면활성물질,

인지질, 소화효소 등의 존재에 의해 붕괴되고 O/W emulsions를 형성하게 된다. 지질 섭취의 상당한 비율이 가공식품 emulsions의 형태이지만 이들 emulsions의 안정을 위한 계면 구조와 중요성에 대한 소화 조건의 효과에 대한 정보가 별로 없는 실정이다. 본고에서는 지질의 섭취, 소화, 흡수 시 발생하는 물리화학적 및 생리학적 과정을 간단히 리뷰하고 이러한 정보가 지질의 생체이용률을 변화하기 위해 식품조직을 설계하는데 어떻게 이용될 수 있는지를 보여주고자 한다.

내용요약

지질의 생체이용률

섭취 전에 식품은 정확한 농도의 특정 지질 성분으로 이루어진다. 지질이 GI tract를 통과함에 따라 이들 성분의 일부는 흡수 전에 화학적으로 변형(가수분해, 산화 등)되고 따라서 흡수된 형태와 섭취

된 형태는 다르게 된다. 이러한 차이는 지질의 연속적인 소화와 흡수 거동에 영향을 미치게 되기 때문에 지질에 일어나는 화학적 변화, 이들 변화의 속도 그리고 이들에 영향을 미치는 요소들을 아는 것은 중요하다.

장쇄지방산은 장세포로 운송되어도 거기에서 TAGs로 환원되고 간을 우회하여 림프계로 들어가며 심장 부근의 혈류로 들어가는 지단백으로 된다. 반면 중쇄, 단쇄 지방산은 이와 같은 경로를 따르지 않는 대신 장세포로 확산되고 간문맥을 경유하여 혈류로 직접 통과하게 되며 이를 통해 간으로 들어가 대사되고 체순환으로 들어간다. 식품성분이 체순환에 도달하면 여러 조직에 분포하게 되고 여기에 저장, 이용 또는 배설된다. 이들 여러 과정의 상대적 속도는 인체 내의 특정 위치에서의 지질 및 그 대사물의 농도의 시간 의존성을 결정한다. 특정 활성지점에서의 특정 지질 성분의 농도-시간 관계는 인체의 건강에 유익한 또는 유해한 영향을 결정하게 될 것이다. 결론적으로 특정 지질 성분의 효용성을 확립하기 위하여 특정 부위에서의 성분 농도를 결정하는 것은 상당히 중요하다.

식품 섭취와 조직 내의 지질 성분의 증가된 농도와 최초 양상 사이에는 lag period가 존재한다. 이 lag period의 지속은 지질 성분이 식품 matrix로부터 방출되고 소화, 흡수 및 특정 부위로 운송되는 시간에 의해 결정된다. 그래프의 전체적인 형태는 성분의 방출, 소화, 흡수, 이송, 이용 및 배설의 상대적 속도뿐만 아니라 성분의 농도가 어디에서 측정되느냐(혈액, 간, 근육, 지방조직, 변)에 의해 결정된다.

식품성분의 생체이용률에 영향을 미칠 수 있는 요소들을 고려해볼 때 지질의 소화·흡수의 속도와

정도에 대한 영향 관계를 구별 짓는 것이 중요하다. 어떤 요소들은 최종 함량에 영향을 미치지 않으면서 지질 성분이 소화·흡수되는 속도에 영향(점도를 증가시키지만 지질에 결합하지 않는 식이섬유)을 줄 수 있는 반면, 어떤 요소들은 소화·흡수되는 지질의 최종 함량에 영향을 미친다(지질과 비가역적으로 결합하는 식이섬유). 만일 어떤 식품성분이 GI tract 내에서 충분한 시간을 소비한다면 소화·흡수 속도는 그들의 총량 보다는 덜 중요할 것이다. 반면 소화·흡수 속도가 충분히 느려진다면 그 성분의 생체이용률을 감소시킬 것이다.

지질의 생체이용률 조절 유화 구조

인체에 의한 저작, 소화, 흡수에 영향을 미치는 주요 요소들에 대한 정보는 지질의 생체이용률을 조절하기 위한 전략 개발에 이용될 수 있다. 어떤 식품에서는 지질의 생체이용률을 증가하는 것이 바람직한 반면(낮은 소화·흡수율을 갖는 생리활성 지질, 효율적인 지질 소화·흡수를 방해하는 병을 가진 사람을 위한 식품 개발), 어떤 식품에서는 특정 지질의 생체이용률을 감소시키는 것이 중요하다(관상동맥질환 위험이 있는 사람). 이 장에서는 지질의 소화와 흡수를 조절하기 위해 사용될 수 있는 유화 구조 접근에 대한 정보를 제공하고자 한다.

Food matrix의 설계

섭취된 지질 입자는 단백질, 탄수화물, 천연 또는 제조물질로 구성된 식품 matrix에 박혀있다(Fig. 1). 지질은 lipases에 의해 소화되기 전에 노출되어야 하기 때문에 이러한 시스템에서는 위장과 소장 내

에서의 지질 소화의 속도와 정도가 GI tract가 지질을 둘러싼 matrix를 얼마나 빨리 쪼갤 수 있는지에 달려있다. 식품 matrix는 물리적 파쇄, 침식, 용해와 같은 여러 과정을 거쳐 조각화하며, pH, 이온강도 또는 효소활성의 변화에 의해 시작된다. 식품 matrix의 붕괴, 용해, 소화 속도는 matrix의 크기와 노출된 표면적, matrix 내에 존재하는 분자들의 형태와 농도(특정 단백질, 다당, 무기질 이온), 분자들을 matrix 내에 유지하는 결합의 성질(정전기, 소수성, 수소결합, 공유결합), 작은 분자(효소, 산, 소화산물)의 이송에 대한 matrix의 투과도에 의존한다. 그러므로 서로 다른 분해속도, 용해속도, 투과도를 갖는 식품 matrix의 형성은 생체이용률을 조절하고 또는 소화관 내의 특정 부위에서 지질 성분의 방출을 목표로 하는 유용한 방법이 될 수 있다.

식품제조업자가 미시 또는 거시적 matrix 내에 지질 입자를 가둬 두기 위해 지질 입자 주위의 단일 또는 혼합 생물고분자 system의 겔화 조절, 생물 고분자 또는 기타 wall materials를 함유하는 O/W 유화물의 탈수, 또는 지질 입자 함유 전분 matrix의 열처리 또는 압출성형 등 사용할 수 있는 방법이 매우

많다. 그럼에도 불구하고 *in vitro* 혹은 *in vivo* model을 이용하여 지질의 소화에 대한 식품 matrix 설계의 영향에 대한 체계적인 연구가 별로 없다.

입자크기 조절

평균 지질 입자의 크기가 감소함에 따라 위장 또는 췌장 lipases가 부착하기에 용이하게 노출된 지질의 표면적이 커지기 때문에 위장과 소장에서의 지질 가수분해 속도는 증가한다. 유화지질의 lipases 촉매 소화의 *in vitro* 실험은 지질 가수분해 속도가 입자크기의 감소에 따라 증가한다고 하였다. 원리상 위장과 소장의 지질 입자의 크기를 조절함으로써 지질 소화의 속도와 정도를 조절할 수 있다. 이는 유화를 제조하기 위해 사용되는 유화제 성질과 균질조건을 변화함으로써 이루어진다. 그럼에도 불구하고 O/W 유화를 위장에 투여한 *in vivo* 연구에서는 지질 가수분해 정도가 지질 입자의 초기 크기 (0.7, 10 μm)에 크게 영향 받지 않는 것으로 나타났다. *In vivo*와 *in vitro* 실험 결과의 차이의 원인 중 하나는 지질 입자의 크기가 섭취 후 변하기 때문이

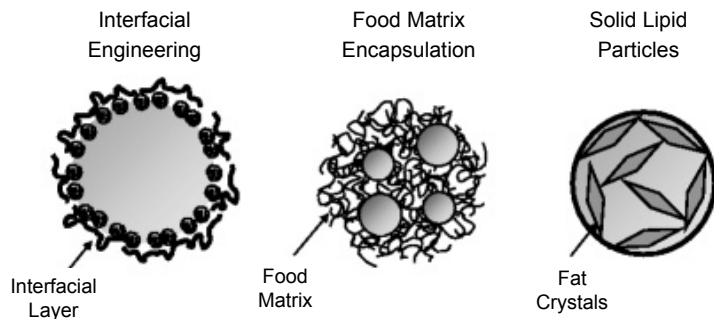


Fig. 1. Possible means of structuring emulsified lipids to alter their bioavailability (McClement DJ *et al.*, Food Biophys, 3, 219–228, 2008).

다. 덧붙여 지질 가수분해 속도에 변화가 있다 할 지라도 인체의 GI tract 내에서 모든 지질이 분해되기에는 충분한 시간이 경과해야 한다는 것이다. 그러므로 지질 소화 초기 속도의 차이는 모든 지질이 궁극적으로 소화되기 때문에 소화관에서 식품이 남는 비교적 긴 시간에 걸쳐 중요하지 않게 된다.

식품은 입에서 위장, 소장까지 통과하면서 GI tract에서 일어나는 화학적, 효소적, 물리적 기작과 관련된 합체, 붕괴, 용해 과정 때문에 지질 입자 크기에 상당한 변화가 일어난다. 입에서 소장까지 통과하는 동안 초기 입자크기, 계면 조성에 따라 지질 입자 크기는 증가, 감소 또는 거의 같은 크기를 유지하거나 한다. 인지질에 의해 초기 안정화된 섭취된 지질 입자의 최종 평균입자크기는 초기 입자크기와는 별개로 10~20 μm 사이라고 알려져 있다. 초기 지질 입자가 이 범위보다 크면 위장에서 붕괴되고 더 작으면 합체되는 경향이 있다. 위장에서 입자 붕괴속도가 입자 합체속도와 균형을 이룰 때 안정한 상태가 되었다. 반면 단백질-안정화 지질 입자를 이용한 연구에서는 소화과정을 거처도 입자는 작은 상태를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 지질 입자를 둘러싼 oil-water 계면에서의 분자 형태가 입자의 합체와 붕괴에 영향을 미치고 노출된 지질 표면적에 영향을 미침을 나타낸다. 결론적으로 지질의 소화율을 조절하기 위해서는 입자크기와 계면조성을 모두 조절하여야 함을 알 수 있다.

계면 조성 조절

위에서 언급한 바와 같이 지질 입자를 둘러싼 계면의 성질은 지질 소화와 흡수에 영향을 미칠 수 있다. 첫째, 계면의 성질은 입, 위장, 소장 내에서 지

질 입자의 붕괴 또는 합체에 대한 안정성에 영향을 미치는데 이는 효소에 노출된 지질의 표면적에 영향을 미친다. 둘째, 계면성질은 지질 입자 표면에 흡착하고 또 입자 내의 비극성 물질에 작용하는 위장 또는 췌장 lipases(colipases, 인지질, 담즙산염 포함)의 능력에 영향을 미친다. 만일 lipases가 입자 표면에 흡착할 수 없고 지질 근처에 올 수 없다면 지질은 소화되지 않을 것이다. 식품에서 지질 입자를 둘러싼 계면의 초기 조성과 구조는 유화를 제조하는 유화제와 균질조건에 의해 조절될 수 있다. 입으로 들어가는 입자의 계면 특성(조성, 전기적 전하, 두께, 계면장력, 레올로지)을 조절하는 것은 입자표면에 흡착하려는 효소와 계면활성물질의 능력뿐만 아니라 붕괴 및 합체되는 입자의 경향에 영향을 미친다. 유화된 지질이 입, 위장, 소장에 들어간 후 액상 내에 존재하는 계면활성물질과 지질 입자 표면에 초기 흡착된 것들 사이에 경쟁적 흡착 때문에 시간이 지남에 따라 계면 조성에 상당한 변화가 생긴다. 이 과정은 존재하는 다양한 계면활성물질의 상대적인 농도와 계면활성에 의존하며, 가장 높은 계면활성과 농도를 가진 것들이 계면을 지배하게 된다. 인체에서 분비된 천연 계면활성물질의 농도가 식품 자체에서 유래한 계면활성물질의 농도보다 훨씬 크다면 계면조성은 인지질, 지방산, 담즙산염, 효소 등의 천연물질에 의해 지배될 것이다. 그럼에도 불구하고 지질 입자의 계면특성을 주의 깊게 설계함으로써(계면활성이 매우 높은 유화제 사용, 계면의 상호결합, 효소 저항성 계면 형성) 시스템 내에서 일어나는 경쟁적 흡착 정도를 조절할 수 있다.

식품에서 지질 입자의 계면 특성을 조절할 수 있는 강력한 수단은 layer-by-layer(LBL) electrostatic

deposition method이다. 이 방법을 사용하여 지질 입자를 둘러싼 계면의 전하, 두께, 투과도, 환경 반응성을 조절할 수 있다. LBL 접근방법은 반대 전하를 띤 고분자를 입자 표면에 연속적으로 붙일 수 있고 또한 물리적, 효소적, 화학적 방법으로 상호결합시킬 수 있다. 효소적 분해와 치환에 저항적인 생물 고분자(단백질, 다당)로부터 두껍고 비투과성의 계면을 형성함으로써 지질의 생체이용률을 감소시킬 수 있다. 또한 친유성 성분을 캡슐화하고 계면의 환경(pH, 특정효소의 이온강도)에 대한 반응성을 조절함으로써 특정 작용부위에서 친유성 성분을 방출하는 것이 가능하다. 유화지질의 계면특성을 조절하기 위한 다른 접근방법은 마이알 반응에 기초한 공유결합된 단백질-탄수화물 계면(covalently cross-linked interfacial protein-polysaccharide)을 형성하는 것이다.

Lipid phase의 물리적 상태 조절

대부분의 식품에서 lipid phase는 체온에서 대개 액체이지만 어떤 식품의 경우에는 전적으로 또는 부분적으로 결정성이다. 또한 solid lipid particles (여기에서는 lipid phase가 최소한 부분적으로 결정성)에 기초한 전달 시스템은 최근 친유성 기능성 성분의 캡슐화, 보호, 전달을 위해 개발되었다. 그러므로 지질 소화 및 흡수에 대한 lipid phase의 물리적 상태의 영향을 이해하는 것이 중요하다. Lipid phase의 결정성은 유화 지질을 소화시키는 능력(TAGs를 FFAs와 MAGs로 전환)을 변경하거나 소화산물의 흡수를 변경(혼합 micelles에서의 가용화 및 이송)한다. 장쇄지방산은 다가 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+}) 존재 시 불용성의 soaps를 생성하고 그에 의

해 지질 소화를 지연시킨다는 보고가 다수 있다. 그럼에도 불구하고 소화 중 유화 지질로부터의 친유성 성분의 방출속도는 lipid phase의 결정성과 조직 구성에 의존한다. 예를 들면 친유성 성분의 방출속도는 지질 입자의 결정성이 증가함에 따라 감소한다고 보고되었다. 최근의 연구는 solid tripalmitin 입자가 동일 크기의 liquid tripalmitin 입자보다 lipase에 의해 천천히 소화됨이 보고되었다. 이러한 연구결과들은 친유성 생리활성물질의 소화와 방출속도를 조절하기 위하여 solid lipid particles를 사용하는 것이 가능함을 보여준다.

이용분야

식품산업에서는 특정 영양적 performance를 위해 식품을 설계, 제조하고자 시도하기 때문에 특정 식품 성분의 저작, 섭취, 소화 및 흡수의 물리화학적 기초에 대한 지식의 중요성은 점점 더 커지고 있다. 그럼에도 불구하고 식품과 인체와의 관계는 초기 식품의 조성, 성질, 구조, 개인의 식품 소비 특성(연령, 성, 유전, 건강 등)과 기타 요소(소비시간, 전에 섭취한 식품, 식품온도)에 의존하는 다양한 분자적, 물리화학적 및 생리학적 과정을 동반하기 때문에 매우 복잡하다. 이러한 중요한 분야에 대한 이해를 발전시키기 위해서는 식품과학자, 생화학자, 생물물리학자, 영양학자, 심리학자 등 다양한 분야의 전문가들이 통합된 접근을 하여야 할 것이다. 특히 과학자들은 소화, 흡수 과정 중 발생하는 복합적인 물리화학적 변화를 이해하기 위한 연구를 더욱 심도있게 수행하여야 하고 식품 성분의 생체이용률을 증가 또는 감소시킬 수 있는 식품을 설

게하기 위한 효과적인 방법을 개발하기 위해 획득한 정보를 활용하여야 할 것이다. 이 목표를 달성하기 위하여 소화, 흡수 중 발생하는 복잡한 물리화학적 및 생리학적 현상들을 모니터링 하기 위한 적절한 실험 프로토콜(*in vivo*, *in vitro*)을 확인하고 증명하는 것이 중요할 것이다. 그렇게 함으로써 식품과학자와 영양학자들은 이들 현상들을 조절할 수 있는 특정 식품 matrix를 설계하기 위하여 입자의 계면 특성을 조절하고, 생물고분자 matrix 내에 지질을 캡슐화 함으로써 또는 효소 가수분해 반응에 관여하는 성분들을 첨가하는 등 지질 소화와 흡수에 영향을 미치는 구조적 및 물리화학적 요소에 대한 정보를 활용할 수 있을 것이다. 이들 식품 matrix는 특정 지질의 생체이용률을 증가 또는 감소시키거나 혹은 GI tract 내의 특정 부위에서 생리활성 물질을 방출하는데 활용될 수 있을 것이다.

● 참고문헌 ●

1. Lundin L, Golding M, Wooster TJ, Understanding food structure and function in developing food for appetite control, *Nutr Dietetics*, **65**, S79-S85, 2008

2. McClement DJ, Decker EA, Park Y, Weiss J, Designing food structure to control stability, digestion, release and adsorption of lipophilic food components, *Food Biophys*, **3**, 219-228, 2008

3. Norton I, Moore S, Fryer P, Understanding food structuring and breakdown: engineering approaches to obesity, *Obes Rev*, **8**, 83-88, 2007

4. Singh H, Ye A, Horne D, Structuring food emulsions in the gastrointestinal tract to modify lipid digestion, *Prog Lipid Res*, **48**, 92-100, 2009

5. van Aken GA, Relating food emulsion structure and composition to the way it is processed in the gastrointestinal tract and physiological responses: What are the opportunities?, *Food Biophys*, **5**, 258-283, 2010

최 희 돈 농학박사

소 속 : 한국식품연구원 기능소재연구단
 전문분야 : 식품신소재 연구
 E-mail : chdon@kfri.re.kr
 T E L : 031-780-9068