



저자:
하스무크 파텔, 소냐 파텔
(사우스다코타 주립대학교)

편집:
로버트 부사이어 (카이뉴트라)

검토:
산타누 아가르왈 (미국낙농협회)

서론

단백질은 필수 식이 성분으로 건강하고 균형 잡힌 식사를 위해서는 충분한 섭취가 중요하다. 그만큼 식습관에서 단백질의 효과를 인식하고 이에 대한 지식을 갖춘 소비자들이 오늘날 점차 증가하고 있는 추세이며, 소비자들은 허기를 달래주고 에너지를 유지시키면서 몸의 성능을 최대화하는 단백질의 중요성을 인지하고 있다. 그중에서도 유제품은 고품질·다용도·다기능 단백질의 중요한 원천으로, 유제품 단백질을 제품에 함유시키고자 하는 식품 제조업체들이 많아지고 있다. 우유 단백질이 훌륭한 영양원인 동시에 용해성, 열안정성, 겔화, 거품 형성, 유화(乳化) 등 완제품에 다양한 기능적 효과를 더할 수 있을 뿐 아니라 소비자들이 원하는 클린 라벨(clean label, 쉽고 간결한 성분 표기)을 제공할 수 있기 때문이다.

우유는 여러가지 영양·기능적 효과가 있는 복잡하고 역동적인 영양 시스템을 가지고 있으며, 가공 정도 및 우유의 특성, 섭취 방법에 따라 그 작용이 달라질 수 있다. 우유단백질은 매우 복잡한 특성을 지니고 있어 전단(剪斷), 열처리 등 유제품 및 식품업계에서 사용하는 대부분의 가공조건에 민감하게 반응한다. 가공을 하면 우유단백질 구조에 변화가 생길 수 있고 이러한 변화는 단백질의 변성, 응집, 상호작용을 일으킨다. 단백질 상호작용의 유형과 범위는 시간-온도의 조합과 같은 가공조건, 제품의 성분조성, pH, 단백질농도, 이온강도 등 여러 요인에 따라 달라질 수 있다. 이러한 단백질의 변화는 용해성, 겔화, 열안정성, 유화와 같은 유제품 성분의 기능적 특성에 영향을 줄 수 있어 결과적으로 완제품의 기능에도 영향을 미친다. 한편, 우유단백질의 기능성이 열처리로 인해 변화하면 요거트, 제빵 제품, 과자류 등 유제품 및 식품의 식감이 개선될 수도 있다. 따라서 유제품 단백질과 그 기능성을 이해하면 유제품 및 식품의 완제품뿐 아니라 유제품 성분에 대하여 기능적 특성을 맞춤형으로 적용할 수 있을 것이다.

본 기술보고서는 우유단백질의 복잡성, 단백질의 유형 및 특징, 서로 다른 유제품 단백질 연구에 대한 식품 제조업체들의 이해를 돕고자 한다. 또한 가공조건이 유제품 단백질의 기능에 영향을 미치는 과정을 살펴보고, 품질 개선을 통해 유제품 단백질을 이용한 식품 신제품을 개발할 수 있는 방안을 제시한다. (보고서의 목차는 16페이지를 참조)

단백질 구조

아미노산은 단백질의 기본 구성단위이며, 아미노산의 특정 서열은 단백질의 구조, 배좌(配座), 특성을 결정한다. 아미노산의 유형에 따라 다른 배좌의 단백질이 생겨날 수 있으나 단백질 배좌는 다양한 분자력에 의해 안정화된다. 단백질 배좌를 규정하는 분자력에는 정전기적 상호작용, 수소결합, 이황화결합, 쌍극자-쌍극자 상호작용, 소수성(疏水性) 상호작용, 반데르발스의 힘이 있다(그림 1).^{1,2,3}

단백질의 고유 구조는 1차, 2차, 3차, 4차 네 개의 다른 차원으로 구성되어 있다(그림 2). 1차 구조는 공유결합으로 연결된 폴리펩티드 사슬인 특정한 아미노산 서열이다(그림 2a). 아미노산 결사슬 사이의 분자력에 의해 1차 구조가 규칙적으로 꼬여 2차, 3차 구조가 형성되는데, 가장 낮은 자유 에너지 상태의 독특하게 꼬인 고유 구조가 발생된다. 규칙성을 띤 2차 구조는 일반적으로 가장 흔한 단백질 구조로 알파-나선 구조와 베타-병풍 구조가 있다. 알파-나선 구조는 아미노산 사슬이 나선형으로 꼬이면서 나타나고 펩티드 결합의 원자 간 수소결합에 의해 안정화된다. 베타-병풍 구조는 일련의 아미노산 사슬이 선형으로 정렬하면서 형성되는데(그림 2b), 이 구조는 가닥구조 사이의 수소결합에 의해 안정화된다.

3차 구조는 단백질 내에 존재하는 다양한 배열이 3차원적으로 배치된 상태를 말한다. 분자 간·분자 내 상호작용이 섬세하게 균형을 이루어 입체적 구조가 형성되고 이는 수소결합, 소수성 상호작용, 반데르발스의 힘, 정전기적 상호작용에 의해 유지된다(그림 2c). 4차 구조는 개별적 단백질 분자의 수퍼 집합체이다. 4차 구조는 두 개 이상의 폴리펩티드 사슬 간 상호작용의 결과로 생겨나고(그림 2d), 비공유결합 상호작용을 통한 공간 배치에 의해 다중결합 단백질을 형성한다.^{2,5}

단백질 변성

단백질 변성 혹은 단백질이 펼쳐진다는 것은 고유 구조에서 안정화된 힘이 깨지거나 어떤 변화가 생김을 의미한다. 단백질 변성으로 인해 단백질은 고유의 구조를 상실하거나 고유 구조가 풀린다. 이렇듯 열, 압력, 전단, pH나 이온강도 등 구성 조건이 변하면 단백질은 고유의 구조를 상실할 수 있다. 소형의 천연단백질 분자가 풀리기 시작하면서 무질서하고 무작위적 구조로 변한다(그림 3). 구성이나 가공 조건에 따라 공유결합(예: 이황화결합) 또는 비공유결합(예: 반데르발스의 힘, 정전기적 상호작용)과 같은 분자 간·분자 내 결합을 통해 연결된 단백질 응집체가 생겨날 수 있다. 일반적으로 변성이라는 용어에는 비정상적 형태처럼 2차 구조의 변화 없이 3차 구조에 약간의 변화가 생기는 경우에서부터 2차 구조에 주요한 변화가 생겨 3차 구조도 변하는 경우 등 여러 형태의 변성이 포함될 수 있다는 점에 주목해야 한다.

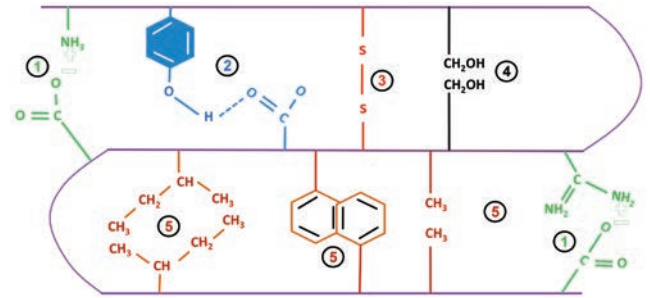


그림 1. 단백질의 안정력을 보여주는 도식:

1. 정전기적 상호작용 2. 수소결합 3. 이황화결합
4. 쌍극자-쌍극자 상호작용 5. 소수성 상호작용¹

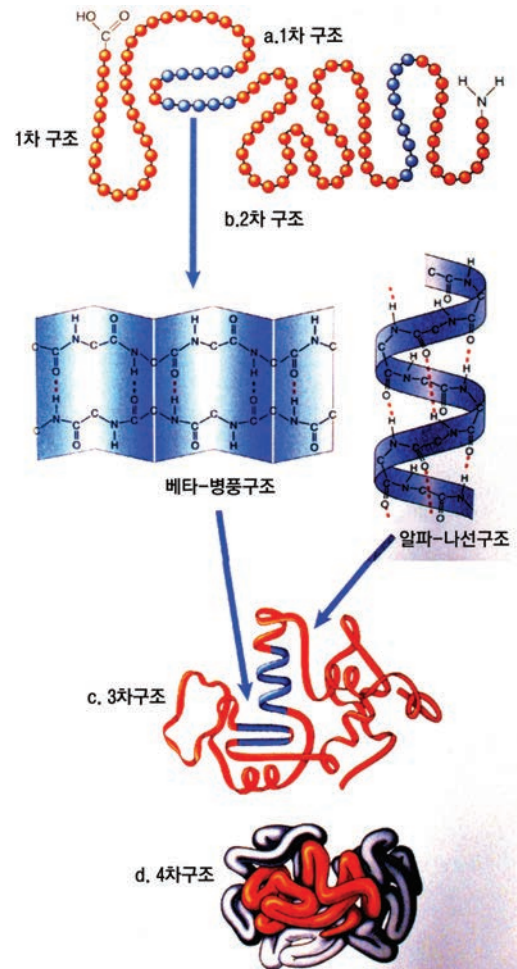


그림 2. 단백질의 1~4차 구조 도식:

- a. 1차 구조 b. 2차 구조 c. 3차 구조 d. 4차 구조⁴

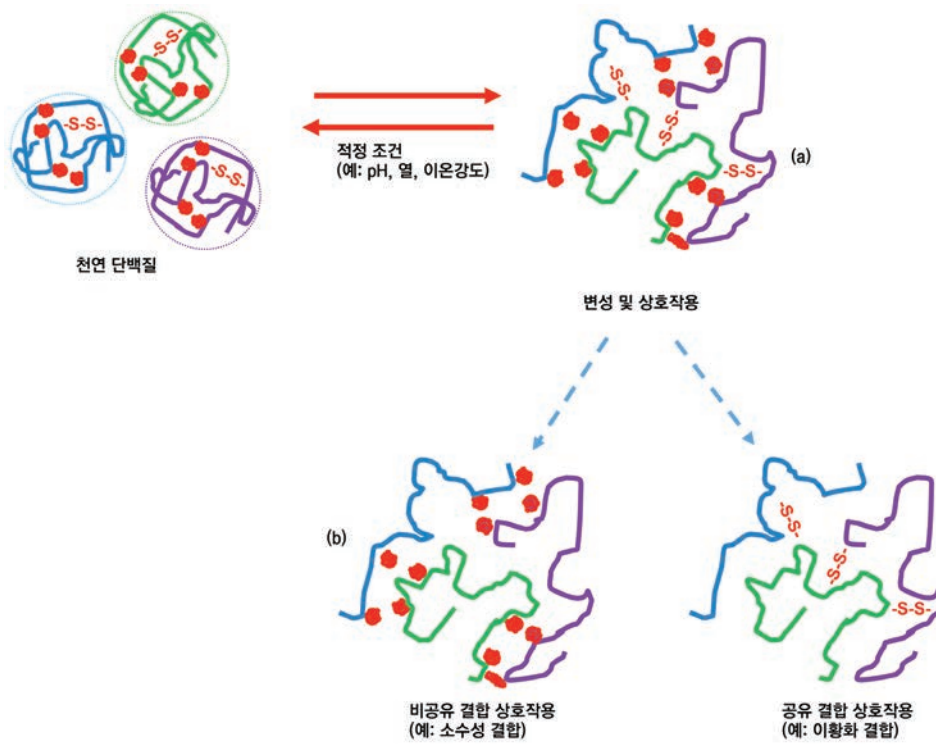


그림 3. 천연단백질 구조의 열 유발성 변화의 도해: a. 단백질의 변성 및 응집, b. 공유 및 비공유 단백질 상호작용의 형성

우유단백질: 식별, 구조, 물리화학적 특성

우유는 물, 지방, 유당, 단백질, 무기물을 포함한 복잡한 생물학적 유체이다(표 1). 물은 구성 성분이 용해되어 있거나 현탁액으로 존재하는 연속상이다. 유당과 소량의 무기염은 용액에서 발견되고 단백질과 나머지 무기물은 콜로이드 현탁액에서 발견된다.

젖소 우유 kg당 30~35g의 단백질이 함유되어 있는데, 이러한 단백질은 크게 카제인과 유청단백질의 두 가지 유형으로 분류할 수 있다.^{6,7} 카제인은 주로 콜로이드 상태로 존재하고 유청단백질은 용해된 상태로 존재한다. 카제인과 유청단백질은 서로 다른 기능적 특성을 지니며, 수용액의 상태와 구조에 따라 다른 역할을 한다.

카제인과 유청단백질의 구조는 매우 상이하기 때문에 유제품과 식품 제조의 근간이 되는 물리화학적 특성도 다르다. 카제인과 유청단백질의 특성 비교는 (표 2)에 요약되어 있다. 표에 기술된 카제인과 유청단백질의 특성에 비추어 보면 우유단백질 특성이 식품 내 우유단백질의 작용에 영향을 미치고 있음이 분명하다. 카제인의 침전(沈澱)을 예로 들어보자. 발효나 직접적인 산성화에 의해 우유의 pH가 낮아질 경우 요거트나 코티지 치즈와 같은 제품이 생산되며, 레닛(rennet)을 함유한 카파-카제인(k-CN)의 응고를 통해 치즈가 만들어진다.

표 1. 소 원유의 평균 성분조성⁶

성분	% (W/W)/우유
물	87.30
유당	4.60
지방	3.90
단백질	3.30
카제인 단백질	2.60
유청단백질	0.70
무기물	0.70
유기산	0.20

카파-카제인은 알파-s1-, 알파-s2-, 베타 카제인을 포함하는 네 가지 주요 카제인 분자 중 하나이다. 알파 카제인과 베타 카제인은 칼슘에 의해 즉시 침전되는 소수성 단백질이다. 카파-카제인은 이와는 매우 다른 분자로 칼슘에 의해 침전되지 않는다. 카제인이 분비되면 자체 회합으로 미셀(micelle)이라는 응집체를 형성하는데 미셀에서는 카파-카제인과의 상호작용으로 인해 알파 카제인과 베타 카제인의 침전이 발생하지 않는다. 즉, 일반적으로 카파-카제인은 우유단백질을 대부분 수용성으로 만들어주어 즉시 응고되지 않게 한다.

표 2. 카제인과 유청단백질의 대표적인 물리화학적 특성 비교⁸

특성	카제인	유청단백질
구조	명확한 2차, 3차, 4차 구조의 부족, 무작위로 꼬인 고리구조	명확한 3차, 4차 구조
아미노산 성분조성	황 함유 아미노산 함량 낮음, 프롤린 함량 높음	상대적으로 황 함유 아미노산 함량 높음, 프롤린 함량 낮음
물리적 상태	카제인 미셀이라는 거대 콜로이드 응집체로 존재	pH에 따라 단량체-팔량체 형태의 구형 단백질로 존재
pH 4.6 용해성	pH4.6 불용성	pH4.6 용해성
열안정	매우 열 안정적임(살균, 초고온(UHT)이나 레토르트 가공 등의 강한 열처리를 견딜 수 있음)	열에 불안정함(특히 90°C 이상의 고온이 가해질 경우 완전한 변성이 일어날 수 있음)
제한적 단백질 분해나 에탄올에 의한 응고	특정 제한적 단백질 분해(예: 레닛응고)나 에탄올에 의해 응고될 수 있음	효소나 제한적 단백질 분해 또는 에탄올에 의해 즉시 응고될 수 없음

카제인

카제인은 우유의 주요 단백질로 젖소 우유에 포함된 총 질소물질의 80%를 차지하며 다양한 미셀의 형태로 존재한다. 1969년 처음 보고서가 발표된 이래 다양한 카제인 미셀 구조 모델이 제시되었다.⁹ 카제인은 양친매적 성질로 인해 표면 활성이 높고 유화가 잘된다. 또한 상대적으로 전하가 높고, 프롤린은 풍부하지만 시스테인의 함량은 매우 낮다.¹⁰ 이러한 카제인 미셀의 구조와 특성에 대해서는 상세한 개요가 발표된 바 있다.¹¹

카제인에는 2차, 3차 구조가 적게 포함되어 있어 고온에서 상당히 안정적이다. 하지만 강한 열처리 시 탈인산화, 단백질 분해와 같은 변화가 발생한다. 마이야르 반응과 같은 축합반응과 리시노알라닌의 형성 결과, 카제인 중합반응이 일어날 수 있다. 열처리 시 카제인 미셀에 생기는 변화에는 유체역학적 직경의 증가, 제타전위 및 수화작용의 감소, 미셀-카제인 분리현상 등이 있으며^{12,13} 이에 대한 상세한 검토가 이미 이루어진 바 있다.^{14,11}

카제인 미셀은 가공조건, pH, 이온환경에 따라 결합하거나 분리될 수 있다. 이는 카제인 미셀의 중요한 특성으로 요거트, 치즈, 카제인나트륨과 같은 다양한 제품 및 기능성 유제품 성분의 근간을 이룬다(그림 4).

열안정성, 레닛 응고성, 레닛 겔의 강도 및 이액현상과 같이 기술적으로 중요한 우유의 특성은 칼슘이온(Ca²⁺)의 영향을 크게 받는다. 칼슘이온과 카제인의 결합은 주로 포스포세린 잔여물과 카르복시산 결사슬을 통해 일어난다.

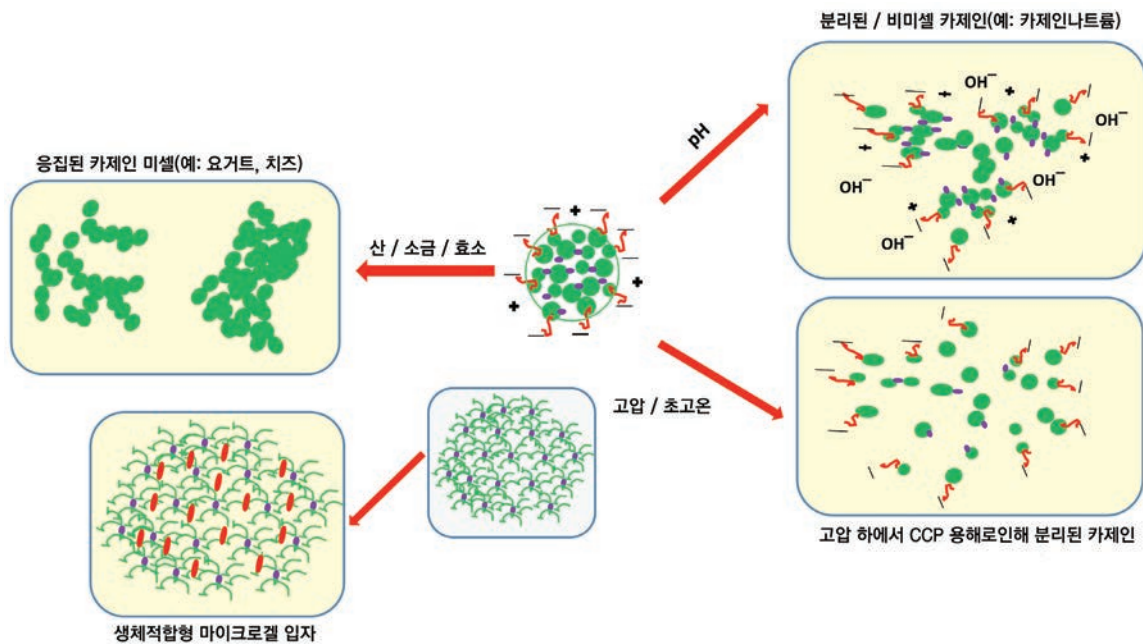


그림 4. 우유단백질의 기능성을 변화시키는 다양한 방법.¹⁵ 가공 및 구성조건 변화에 의해 영향을 받는 카제인 미셀의 변화를 보여주는 도해

유청단백질

유청단백질이란 산성 유청을 얻기 위해 pH 4.6, 20°C에서 등전점 침전법을 사용하거나 감성 유청을 얻기 위해 레닛을 이용하여 제한적 단백질 분해 기법으로 카제인을 응고시킨 이후 용해된 단백질을 말한다.^{16,17} 두 가지 유청의 평균 성분조성은 (표 3)에 제시된 바와 같다.

유청단백질은 젖소 우유에 포함된 총 질소물질의 약 20%(리터 당 5~7g)를 차지하며, 주요 유청단백질에는 유청단백질의 농도 순에 따라 베타-락토글로불린(β -LG), 알파-락트알부민(α -LA), 소혈청알부민(BSA), 면역글로불린(Ig)이 있다.³ 카제인과는 대조적으로 대부분의 유청단백질은 폴리펩티드 사슬을 따라 소수성/친수성 아미노산이 다소 균일하게 분배되어 있는 구형(球形) 단백질이다.

유청단백질은 카제인 단량체 아단위(亞單位)의 양친매성이 부족하기 때문에 이로 인해 독특한 기능적 특성을 지니게 된다.¹⁸ 유청단백질 분자는 프롤린 함량이 매우 낮아 나선 함량이 높은 공 모양의 입체 형태를 띠며 이로 인해 열에 의한 변성에 매우 약하다.²⁰

표 3. 감성 유청과 산성 유청의 단백질 성분조성^{18,19,17}

단백질	전체 유청단백질 중 대략적 비율	
	산성 유청	감성 유청
베타-락토글로불린	54	45
알파-락트알부민	23	18
소혈청알부민	6	5
면역글로불린	6	5
카제인 유래 펩타이드	2	20
효소	2	2
인지질-단백질 복합체	5	5

유청단백질은 유청분말, 농축유청단백질(WPC), 분리유청단백질(WPI) 등의 식품영양성분으로 시판되고 있다. WPC와 WPI는 그 특별한 영양학적 가치와 유화, 용해성, 열이나 압력에 의한 겔화 등 중요한 기능적 특성으로 인해 식품업계에서 중요한 성분으로 여겨진다.^{21,22} 시판되는 WPC의 성분조성은 매우 다양하며^{23,24} 농도, 계절적 변이, 유청의 종류(유청원), WPC 생산 시 사용되는 가공법 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는다(표 4).

수소결합, 소수성결합, 공유결합이 영향을 받을 경우 유청단백질에 변성이 발생한다.¹⁸ 유청단백질에 변성이 발생하면 일반적으로 3차원적 고유 구조에 묻혀 있던 소수성 아미노산 결사슬이 드러나게 되어 반응성이 증가하게 된다. 설프하이드릴-이황화물 교환반응과 소수성 상호작용을 통해 펼쳐진 단백질 분자는 서로 결합하여 응집체를 형성할 수 있고(그림 3) 크기가 커지면서 물에 녹지 않는 상태로 변한다. 강한 열처리 시 다른 단백질 분자와의 상호작용이 유발될 수 있고, 그 결과 단백질 농도, 가열·냉각률, pH, 이온강도 등 여러 요인에 따라 분자 내 결합과 분리가 일어나 침전이나 겔화가 발생한다.^{25,26,18,2,14,3} 열처리로 유도될 수 있는 우유단백질의 변화는 (표 4)에 요약되어 있다.

표 4. 열처리로 유도될 수 있는 단백질 변화²⁷

단백질 변성	응집 또는 중합	겔화
1차 구조와 연관된 펩티드 결합의 파열을 동반하지 않고 2차, 3차 또는 4차 형태에 생기는 변화. 변성 후 최종 형태는 전체적으로(무작위적 코일형태) 또는 부분적으로 펼쳐진 폴리펩티드 구조에 해당.	응집이나 중합, 침전, 응고, 엉킴이란 용어는 분자량이 높은 거대 복합체의 형성으로 이어지는 불특정 단백질-단백질 상호작용을 의미.	천연 및/또는 (부분적으로) 변성된 단백질의 질서정연한 응집현상으로 3차원적 네트워크 구조를 형성. 이러한 구조에서는 단백질-단백질, 단백질-용액 상호작용이 균형을 이루어 상당량의 물을 함유할 수 있는 정돈된 매트릭스를 생성.

우유단백질의 구조-기능 관계

우유단백질의 구조와 기능 사이의 관계는 최종 제품에서 우유단백질의 역할을 좌우한다. 우유는 콜로이드 시스템이다. 내·외적 요인이 단백질 내, 단백질 간 상호작용에 영향을 미친다. 변성, 응고, 분자 수준의 단백질-단백질 상호작용의 정도에 영향을 미치는 외적 요인에는 온도, 단백질 농도, pH, 이온강도, 이온의 종류, 가공조건과 전단, 열, 고압이나 초음파처리 같은 외부에너지가 있다. 내적 요인에는 소수성, 정전기적 상호작용, 이황화결합, 분자무게, 아미노산 성분조성이 있다(그림 5).²⁸

외적요인	내적요인
온도	아미노산 성분조성
압력	분자무게
pH	소수성
단백질 농도	정전기적 상호작용
이온강도	이황화결합 및 자유 설프하이드릴기의 수
소금의 종류 (일가, 이가)	

그림 5. 단백질-단백질 상호작용에 영향을 미치는 요인²⁸

음식의 구조는 그 최종 제품의 외형, 모양, 질감, 식감, 생체이용률, 영양성분 전달을 결정짓는다. 따라서 특정 구성 및 가공조건을 이용해 특정 단백질-단백질 상호작용을 조정할 수 있고 이는 서로 다른 구조를 지닌 식품의 개발로 이어진다. 단백질 상호작용의 유형은 음식계통의 환경에 따라 달라지는데 이는 (그림 6)에 요약되어 있다. 따라서 단백질 구조와 단백질-단백질 상호작용에 대한 지식은 식음료 최종 제품의 개발뿐 아니라 특정 기능성을 지닌 유제품 성분의 개발에도 사용되고 있다.

우유단백질의 변성 및 응고 경로와 같은 가공 결과를 바꾸려면 구조-기능 관계, 단백질-단백질 상호작용, 기능적 특성에 대한 지식을 결합해야 한다. 예를 들어 우유단백질은 뛰어난 안정성, 보수성(保水性), 유화성을 지니고 있다. 안정제와 유화제의 사용을 최소화하는 등 클린 라벨 식품의 개발을 위해 이러한 특성을 최적화 할 수 있다. 맞춤형 식품구조를 얻기 위해서는 단백질의 물리화학적 특성, 가공 및 구성변수 간 상호작용에 대한 지식을 결합해야 한다.

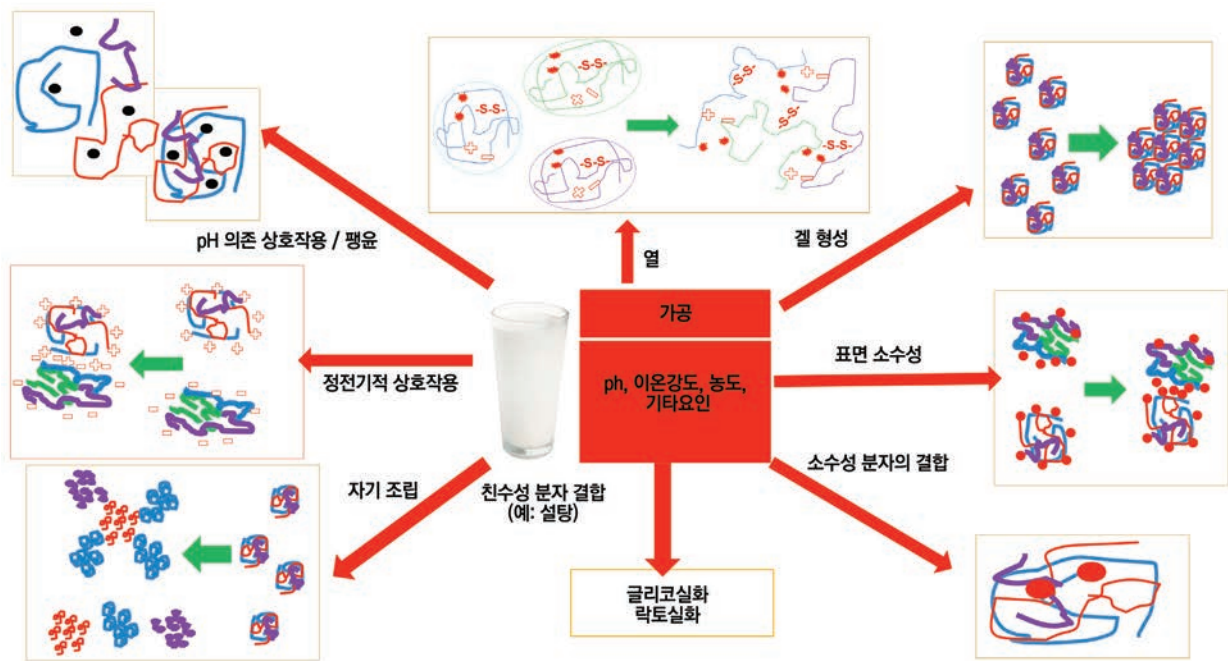


그림 6. 다양한 가공변수 및 구성조건에 영향을 받는 단백질 상호작용의 조작 가능성을 보여 주는 도해

음식계통 내에서 다른 성분-단백질의 상호작용 및 단백질의 구조, 단백질-단백질 상호작용에 변화가 생기면 최종 제품의 겔화, 점도 등 질감 및 기능적 특성이 생긴다. 단백질은 다른 단백질과 상호작용하거나 탄수화물, 지방, 무기물과 같은 음식계통에 존재하는 다른 성분과도 상호작용할 수 있다. 이 과정에서 단백질계통은 좀 더 복잡해 지나 새로운 질감을 지닌 식품의 개발이 가능해 진다. 예를 들어 지방질을 포함하고 있는 작은 입자 크기의 지방 덩어리가 있는 단백질 겔은 질감이 부드럽고 겔 강도가 높다고 보고된 바 있다.³⁰ 이는 음식계통 내의 단백질과 지방질의 상호작용을 조작하여 최종 제품의 질감과 부드러운 정도를 조정할 수 있음을 시사한다.

특정 pH의 단백질 분자의 전하는 단백질의 정전기적 반발과 상호작용에 영향을 주기 때문에 중요하다(그림 7).^{31,32} 반발력은 단백질 용액의 pH를 바꾸거나 단백질 용액에 이온이나 소금을 첨가하여 바뀔 수 있으며, 이러한 과정을 통해 맞춤형 단백질-단백질 상호작용이 가능하다.

이온강도 증가 시 정전기적 반발력의 감소가 나타나는 이유 중 하나가 이것이다.³³ 일가 소금, 이가 소금과 같이 소금의 유형 역시 단백질-단백질 상호작용과 형성된 겔 유형에 영향을 미친다. 겔 미세구조를 변화시키는 데 필요한 소금의 농도는 호프마이스터 계열상 소금의 순위에 달려 있다.³⁴

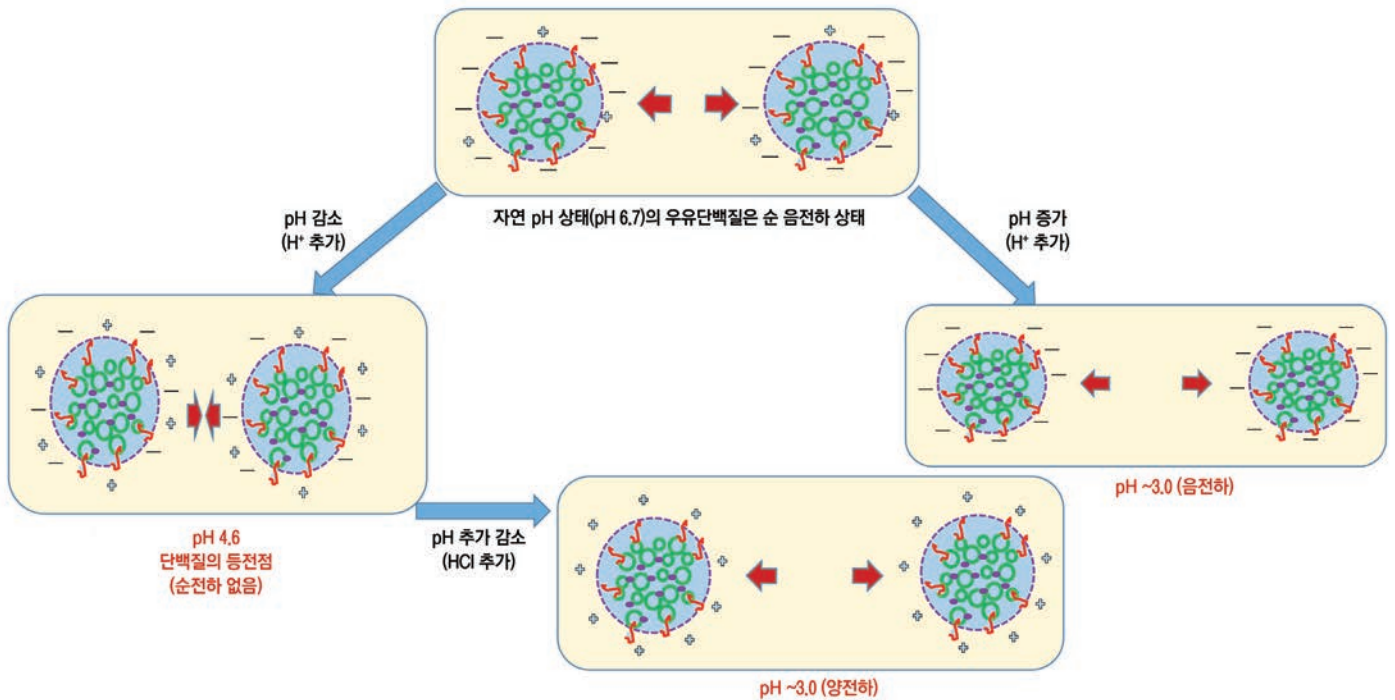


그림 7. 순 음전하: 단백질 분자의 전하 및 단백질 상호작용에 대한 pH의 영향을 보여주는 도해³⁵

우유단백질의 기능

우유단백질은 훌륭한 영양원인 동시에 유용한 기능적 특성을 가진 최종 제품을 만드는데 중추적인 역할을 담당한다. 유제품 성분은 식품 산업에서 기능성 원료로서 다양하게 응용된다(표 5). 전지분유(WMP), 탈지분유(SMP), 농축우유단백질(MPC), 농축유청단백질(WPCs), 분리유청단백질(WPIs)과 같은 성분은 영양 음료 및 식사 대용 음료 또는 환원 유제품을 만드는데 사용된다.

이러한 식품과 음료는 대부분 초고온 처리 또는 레토르트 멸균과 같은 강한 열처리를 하여 제품의 유통기한을 연장하고 사람이 소비하기에 적합하도록 식품 안전을 확보한다. 따라서 즉석음료(RTD) 제품처럼 단백질 계통의 용해성 유지가 필요한 응용 식품과 음료에 사용할 유제품 성분은 열안정성이 있어야 하고 일반적으로 사용되는 강한 열처리를 견뎌낼 수 있어야 한다.

열안정성이란 단백질이 가공 과정에서 또는 가공 직후에 혼탁도가 심하고 점도(粘度)가 증가하고 상분리(相分離), 침전 또는 겔화(gel化)가 일어나는 등의 손상 없이 강한 열처리 가공 과정을 견뎌내는 능력을 말한다.⁴¹ 우유의 열안정성은 우유단백질의 안정성 기능이다.⁴² 열을 가하면 변성, 응집으로 이어지고 결과적으로 혼합물이 비후되거나 겔화될 가능성이 있다.⁴³ 열안정성이 이상적인 상태에서 유청단백질의 변성과 응집이 해가 될 수도 있다. 열안정성이 낮으면 가공 과정에서 다음과 같은 결과가 나타난다.

- 가공 처리될 수 있는 고형 물질(총 고형 물질)의 농도 제한
- 가공 처리의 효율성 감소
- 가공 처리 과정에서 처리 시간과 온도를 견뎌낼 수 있는 능력 감소

따라서 식품과 음료에 사용할 성분을 선택할 때, 가공 처리 과정과 관련하여 가장 중요하게 고려하는 사항 중 하나가 열안정성이다.

특히 유청단백질에서는 열에 의한 변성, 응집, 겔화가 일어날 수 있다(그림 8). 식품에서 원하는 식감과 질감을 얻기 위해 필요한 열유발성 겔을 만드는 능력은 유청단백질이 가진 중요한 기능적 특성 중 하나다. 이러한 겔은 '미세한 가닥' 또는 '미립자'로 분류된다(외견상, 미세구조 또는 리올로지 특성). 이러한 구조의 유형으로 인해 최종 제품의 질감 특성이 달라지는 것이다. 또 비공유(대부분 소수성(疏水性)) 및 이황화물-연계 단백질 응집체가 유청단백질이 응집되고 겔화하는 동안 만들어질 수 있다.^{44,45,46}

표 5. 유제품 성분의 대표되는 기능적 특성 및 최종 응용 제품^{36, 37, 38, 39, 40}

번호	특성	내용	최종 응용 제품의 예
1	수분결합	수분 함량을 높게 유지하기 위해 제품 성분과 상호작용	육류제품, 제빵제품 과자류, 모조치즈 냉동 디저트, 조리식품
2	점도	기타 제품 성분들, 농도, 단백질 구조 및 모든 요소가 기여하는 열처리 가공과의 상호작용	수프와 소스, 요거트 푸딩, 음료
3	유화	섞이지 않는 두 액체(예: 물과 기름)를 유화 상태로 유지하는 능력	커피크림 대용품, 아이스크림 샐러드 드레싱, 소시지(고기유화물) 수프, 소스, 디핑소스 마요네즈, 가공치즈
4	거품형성	공기-물 계면에서 안정적으로 거품을 형성하는 능력, 이는 탁월한 휘핑 능력(예: 제품에 공기를 끌어 담을 수 있는 능력)을 제공	아이스크림, 냉동디저트 거품크림과 토핑 기포성 당과(사탕과 과자)제품 (예: 누가, 마시멜로) 케이크와 무스머랭
5	겔화	교차연결된 단백질을 이용하여 식품에 물리적 구조를 부여, 특정 응용 식품에서 입에 닿는 맛을 개선	요거트, 제빵 커스터드, 과자류 육류제품, 조리식품
6	용해성/열안정성	pH, 무기물의 양, 열처리 과정의 변화와 같은 다양한 조건에 추가하여, 상이한 가공 조건과 농도 하에서 용액 상태를 유지하는 능력	초고온처리 멸균환원우유 수프와 소스 유아영양과 임상영양, 커피 크림 대용품, 스포츠음료 단백질 강화 주스음료
7	불투명도/투명도	음료의 불투명도에서 고산성 스포츠음료의 투명도에 이르는 시각적 속성	강화우유음료 단백질 스포츠음료 초콜릿 사탕과 과자/캐러멜 소스, 드레싱
8	향미/발색현상	일반적으로 마이야르 반응과 관련되는 것으로, 일정하게 갈색을 내고 캐러멜맛을 내는 것과 같은 이상적인 특성을 제공	과자류, 캐러멜 부드러운 사탕과 당과류 코팅 구운 제품 (밀가루반죽, 케이크, 머핀, 크래커) 소스/수프

단백질의 겔화는 열처리를 통해 이루어져 왔으나 물리적, 화학적 가공 과정을 거쳐서도 가능하다.⁴⁷ 물리적 방법 중 하나가 압력이다. 화학적 방법으로는 산성화, 효소의 교차연결, 소금의 사용을 들 수 있다. 이러한 처리를 함으로써 단백질의 구조가 변하고 용액 내에서 단백질 간에 그리고 단백질과 다른 성분 간에 상호작용이 일어난다. 각각의 겔의 특성은 단백질 농도, pH에 의한 변성의 정도, 온도, 이온강도 및 압력과 같은 요인에 따라 다양하게 나타난다.⁴⁸ 단백질-단백질 상호작용과 단백질-용액 상호작용 역시 겔의 유형과 특성에 영향을 줄 뿐만 아니라 단백질 겔화에 영향을 주는 요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려졌다.^{49,31}

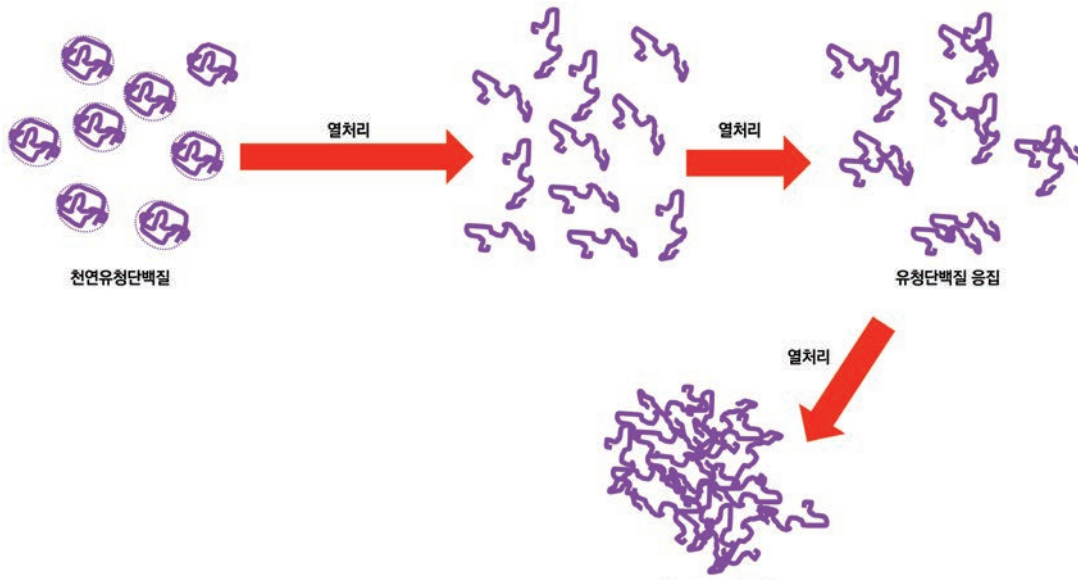


그림 8. 초고온처리 또는 레토르트멸균과 같이 유청단백질 용액의 강한 열처리 효과를 보여주는 예. 유청단백질 용액에 강한 열처리를 하면 유청단백질이 변성, 응집, 겔화 또는 과도하게 비후된다

열처리 및 우유단백질: 기능상의 효과

열처리는 제품을 미생물학적으로 안전하게 만들며 제품의 유통기한을 연장하고 유제품의 기능적 특성을 변화시키기 위해 유제품 산업에서 사용하는 필수 단위 공정이다.^{17,14,44,50,51} 유제품 가공에서 사용하는 가장 일반적인 열처리의 예를 (표 6)에 나열했다.^{17,14}

표 6. 우유 및 유제품의 상업적 가공 과정에서 사용하는 일반적인 열처리^{17,14}

열처리	온도/시간 조건
가온처리	65°C/30 초
저온살균	72°C/15 초
분말우유 전열처리	80 - 120°C/2 - 10 분
요거트 제조를 위한 전열처리	90°C/5 - 10 분
초고온살균	140°C/3 - 20 초
멸균/레토르트처리(배치/용기 내)	110 - 120°C/5 - 20 초

이러한 열처리를 통해 단백질은 다양한 정도로 변성, 응집, 상호작용한다.^{50,52,53} 면역글로불린, 락토페린, 소혈청알부민은 열에 의한 가공 과정에서 민감하게 반응한다. 상업적 저온살균 시 이 단백질 성분들에서 부분 변성이 일어난다. 베타-락토글로불린과 알파-락트알부민은 분말우유 제조를 위한 예열처리와 초고온처리 과정에서 광범위하게 변성이 된다. 열처리 강도에 따라, 이황화 결합 또는 소수성으로 연결된 응집체를 통해서 연결된 이 두 단백질이 형성하는 고분자 중량 응집체의 비율이 달라진다. 또한 베타-락토글로불린, 알파-락트알부민, 소혈청알부민의 이분자체, 삼분자체와 같은 용해성 응집체의 형성과 더불어, 카제인(κ -CN 및 α s2-CN)과 유청단백질 사이에 이황화물 결합에 의해 연결된 복합체가 형성된다.^{50,54,52} 이러한 가공으로 인해 발생하는 상호작용 역시 특정한 기능적 특성과 관련될 수 있다.

카제인과 유청단백질을 함유한 우유에 열을 가하면 유청단백질은 카제인 미셀과 상호작용하여 카제인-유청단백질 복합체를 만든다(그림 9).^{55,56,52,53} 대부분의 연구결과를 보면, 분자 간 이황화결합으로 이어지는 티올/이황화 교환반응이 베타-락토글로불린의 열유발성 응집과 카제인을 비롯한 기타 단백질과의 상호작용에서 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다. 또한, 분자 간 공유(이황화물)결합에 의한 응집과 마찬가지로, 비공유 상호작용(소수성 또는 이온성 상호작용) 역시 우유단백질의 열유발성 상호작용에 관련되어 있음이 여러 연구를 통해 보고된 바 있다. 베타-락토글로불린과 카파-카제인의 상호작용이 많은 유제품들의 기능성 면에서 매우 중요한 것으로 여겨져 왔으며, 베타-락토글로불린의 고유 구조 내에 존재하는 두 개의 유황화물 가교와 자유 설프하이드릴기는 카파-카제인과의 열유발성 상호작용에서 중요한 역할을 담당한다(그림 9).^{57,14,58,59,52}

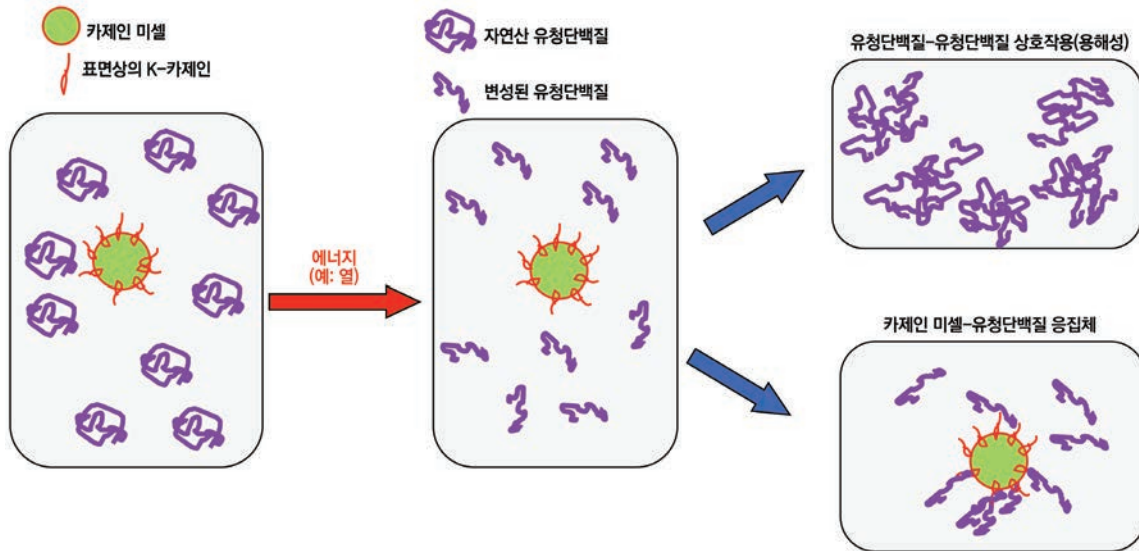


그림 9. 열처리된 우유 계통에서 일어날 수 있는 단백질 상호작용의 도해

유청단백질의 열유발성 겔화,³ 분말우유, 연유 및 멸균유제품의 열안정성 개선을 위한 전열처리,^{60,61} 분말우유의 기능적 특성 개선⁶² 및 요거트의 질감 개선⁶³ 등은 우유단백질이 지닌 열유발성 기능의 효과로 잘 알려져 있다. 이에 대해서는 상세하게 검토되었다.⁵²

열처리 및 유청단백질: 기능상의 효과

열을 가하면 유청단백질이 변성하고 단백질 계통 안에서 다른 유청단백질(용어의 기술은 (표 5) 참조)과 상호작용하여 용해성 응집체 또는 불용성 응집체(겔)를 만든다.^{64,65,66,67,68,69,70,46,71,72,73} 특히 배좌의 변화, 결합 형태의 변화, 이황화물 결합 교환 및 소수성 결합의 변화를 통한 단백질 사이의 응집체 형성 면에서, 각기 다른 유청단백질이 열처리에 서로 다른 반응을 나타낸다. 유청단백질마다 열전이 온도가 다르기 때문에(표 7) 각 유청단백질의 변성 형태에 뚜렷한 차이가 나타난다. 유청단백질 계통의 이질성 또는 각각의 단백질이 열에 대해 다른 반응을 보이기 때문에 총 유청단백질의 열변성 및 응집은 구성 단백질의 집단적 반응을 반영한다.⁷⁴

표 7. 유청단백질의 열변성 온도 및 엔탈피^{25,75,17}

유청단백질	TD (°C)	TTR (°C)	ΔH (kJ/mol)
베타-락토글로불린	78	83	311
알파-락트알부민	62	68	253
소혈청알부민	64	70	803
면역글로불린	72	89	500

TD=초기 변성온도; TTR=시차주사열량계 피크 최대값의 온도; ΔH=변성 엔탈피

단백질 기능성을 위한 열처리의 상업적 응용

1. 요거트

요거트 제조 시 일반적으로 우유에 예열처리(예: 10분간 90°C)를 하는데, 이는 요거트의 질감, 미세구조, 리올로지 특성을 개선하는 것으로 알려져 있다.^{76,77} 베타-락토글로불린과 카제인 사이의 열유발성 상호작용이 설프하이드릴-이황화물 교환을 거쳐, 요거트의 질감을 개선하는 데에도 중추적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다.^{14,52} 또한 예열된 우유로부터 만들어진 요거트는 미가열된 우유로부터 만들어진 요거트보다 겔화 시 pH가 더 높고 상당히 단단한 겔을 만든다.^{76,63,56,78}

2. 분말우유

특정한 기능적 특성을 가진 분말우유를 생산하기 위하여 그 제조 과정에서 우유에 다양한 예열 처리를 가한다. 탈지분유는 대략 저열, 중열, 고열 분말로 구분한다. 이 분류는 일반적으로 유청단백질 질소 지수(WPNI)에 근거한다. WPNI는 분말 내에 존재하는 비변성 유청단백질의 양이다. 이러한 탈지분유의 구분은 분말우유 제조 과정 특히 예열처리, 증발, 건조 과정에서 사용되는 특정 열처리의 결과로 발생하는 유청단백질의 변성과 관련이 있다.⁵¹ 변성된 유청단백질과 카제인 미셀 간의 상호작용이 궁극적으로 분말우유의 기능성에 영향을 미치며, 또한 이러한 단백질 상호작용이 증발, 건조와 같은 추가 가공 과정에서 카제인 미셀이 어떻게 반응하는 지에도 영향을 줄 수 있다.⁷⁹ 증발하는 동안, 주로 미셀의 응집 또는 유청단백질과 미셀의 결합 때문에 카제인 미셀의 크기가 증가한다.

고단백 분말의 제조 과정에서 한외여과 특히 건조에 앞선 희석여과에 의한 우유의 농축이 콜로이드성 인산칼슘을 용해시킬 수 있고, 그 결과, 카제인 미셀의 구조를 이완시켜 카제인 미셀이 부풀어 오를 수 있다. 농도가 증가하면 온전한 미셀에서 팽윤되고 분산된 상태로, 최종적으로는 더 작게 조각난 상태로 미셀의 구조가 점진적으로 와해된다. 이러한 카제인 미셀의 변화로 인해 우유 계통의 분무건조 과정에서 단백질-단백질 상호작용이 더욱 증가하고 결과적으로 성분의 기능성에 영향을 미친다.^{79,80,81}

우유단백질의 기능적 특성에 대한 비가열성 변화

점도, 겔화, 유화와 같은 우유단백질의 안정성과 기능적 특성을 다음과 같은 과정을 통해 변화시킬 수 있다.

- 우유단백질의 물리화학적 변화(예: 열, 전단, 고압가공, 초음파 처리, pH, 이온강도, 이온전하 조작)
- 효소 수정(예: 단백질의 트랜스글루타미나아제(TGase) 교차연결)
- 화학적 수정(예: 숙시닐화, 락토실화, 리간드 결합)

이러한 처리 방법은 고객의 기대에 부응하는 우유단백질의 기능적 특성을 만들기 위하여 사용될 수 있다.

TGase를 이용한 우유단백질의 효소 교차연결과 변화가 겔 강도, 수분함량⁸³, 산성 겔의 점도^{84,85,86} 증강 등 우유단백질의 기능적 특성을 강화시키는 것으로 알려졌다.⁸² 이는 고무를 추가하지 않고도 저지방 요거트의 제조가 가능하도록 만들며,⁸⁶ 온도 또는 물리적 충격 변화에 의해 일어나는 혈청분리 또는 이액현상이 발생하지 않도록 도울 수 있다. 또한 우유단백질의 TGase 처리는 우유단백질의 열안정성을 강화시킬 수 있다.^{87,88,89} 효소 변화 역시 우유단백질의 표면 활동(표면 활성)과 유화를 향상시킬 수 있다.⁹⁰

우유단백질의 숙시닐화와 같은 화학적 변화를 통해⁹¹ 음이온 천연단백질과 순 양전하를 띤 단백질 유도체 사이에서 정전기적으로 안정적인 복합체를 형성함으로써 새로운 제품을 개발할 수 있다. 단계 이행을 거쳐 얇은 막 층을 계층화하기 위한 카제인나트륨 미셀하의 미세액막층화는 식품 유화액의 안정성 유지에 있어서 중요한 역할을 수행할 수 있다.^{92,90}

고객이 요구하는 모양, 질감, 향미를 갖춘 요거트를 만들기 위해 미셀라카제인 대 비미셀라카제인 비율을 최적화하고 또한 농축우유단백질(MPC)과 농축미셀라카제인(MCC)의 기능적 특성(용해성, 유화, 열안정성)을 향상시키기 위해, 우유단백질을 이산화탄소 처리하는 방식이 최근 많이 사용되고 있다.⁹³

또 다른 처리 방법으로는 고압가공(HPP)이 있다. 이는 식품의 기능적 특성에 변화를 주는 것을 비롯하여 식품이 가진 다양한 측면을 보존하고 변화시키기 위한 가공 처리 방법이다.^{94,95,96,97,98} 고압가공은 단백질을 변화시키는 물리적 도구로 알려져 있다. 따라서 변화된 질감과 기능적 특성을 가진 새로운 유제품을 만들 수 있다. 미생물학적으로 안전하고 영양이 풍부한 것이 특징이며, 클린라벨이 붙어 있는 “프레쉬라이크(freshlike)” 식품이다. 만족스러운 유통기한을 가진 식품을 원하는 소비자들의 수요가 증가하고 있기 때문에, 식품의 가공과 보존을 위해 고압가공이 수용되고 있다.^{99,94,95,96} 단백질의 고유 구조를 안정화시키는 결합들 사이의 정밀한 평형 상태를 고압가공을 통해 변화시킴으로써 단백질의 변성, 응집, 겔화가 일어난다.^{100,101,102,103,104} 고압가공의 효과는 열처리의 효과와 다르며 단백질의 유형, pH, 이온강도, 적용압력, 가압온도, 압력처리시간에 따라 그 효과가 결정된다.^{105,102,106,107} 이러한 불안정성으로 인해 응집 현상, 겔 형성과 같은 압력에 기인하는 기능성 및 유청단백질의 물리적 특성·리올로지 특성·미세구조 특성이 영향을 받을 수 있다.^{108,109,110,111} 우유단백질에 대한 고압가공의 효과를 포괄적으로 다룬 장에서 자세한 내용을 살펴볼 수 있다.^{53,112,51,113}

초음파를 이용한 가공 처리는 응용 식품 및 유제품 분야에서 떠오르는 기술이다. 초음파란 인간이 청취할 수 있는 주파수 이상의 음파 (18 kHz 이상)를 말한다. 초음파가 액체를 통과할 때, 액체 속의 기포 핵이 기포 결합과 정류 확산에 의해 커지는데, 이 기포들이 임계 크기에 도달하면 열핵 또는 열손실 없는 단열에 가까운 상태 하에서 붕괴하여 주위 액체에 강렬한 전단력(剪斷力), 난류, 미세유동이 일어나는 극한 상황이 만들어진다. 이것이 음향 공동화이며¹¹⁴ 이러한 물리적 효과가 식품의 가공에 사용된다. 초음파에 의한 물리적 효과를 유제품 가공과 유청 한외여과의 강화,¹¹⁵ 제품 점도의 축소,¹¹⁶ 유지방구 균질 및 발효 특성 변화,¹¹⁷ 락토오스의 초음파 결정화,¹¹⁸ 치즈블록 절단¹¹⁹과 같은 응용 분야에서 사용하는 경우가 증가하고 있다.

초음파 시스템을 통해 효율적인 대규모의 연속 흐름을 이용하는 것이 점차 용이해짐에 따라 유럽과 미국에서 이러한 가공 처리가 실험실 수준에서 상업적 운용의 장으로 이동할 수 있게 되었다.¹²⁰ 초음파를 이용한 가공 처리 자체가 중요한 식품-가공 기술로서 자리매김하고 있으며, 초음파 가공 처리를 통해 유제품 단백질-카제인과 유청-의 기능적 응용을 변화시킬 수 있다. 초음파 가공이 상업적이지 대규모로 확대될 것이고, 초음파 가공에 투자한 자본 또한 어려움 없이 회수할 수 있을 것이다.¹²⁰

결론

우유와 우유단백질은 자연이 만들어낸 매력적이고 복합적인 계통으로서 영양이 풍부하고 맛이 뛰어난 상당히 다양한 종류의 식품과 음료로 가공될 수 있다. 식품과학과 기술의 진화와 더불어 우리는 우유단백질을 이용할 수 있는 방법을 끊임없이 학습하고 있다. 이는 영양적, 기능적 이점을 증대하여 식품 산업을 발전시키고 판매를 촉진하기 위함이다. 오늘날의 식품 소비자들은 그 어느 때보다 더 분별력이 있으며 질감뿐 아니라 개선된 맛과 새로운 제품을 원하며 단순하고 명확한 식품성분표를 붙일 것을 요구한다. 우유와 우유의 성분은 식품학자들로 하여금 소비자의 기대를 만족시킴과 동시에 그 이상을 달성하는 기회를 점점 더 광범위하게 제공하는 특별한 위치를 점하고 있다.

유제품 성분 연구에 관한 더 많은 정보를 원할 경우, ThinkUSADairy.org 또는 USDairy.com를 방문하십시오. 유제품 성분을 이용한 신제품 또는 제품 개선에 대한 지원을 받으려면, techsupport@ThinkUSADairy.org를 방문하셔서 유제품 기술 지원(Dairy Technical Support) 부서에 연락하십시오.

References

- 1 Privalov PL, Gill SJ. Stability of protein structure and hydrophobic interactions. *Adv Protein Chem.* 1988;39:191-234.
- 2 Paulsson M. *Thermal denaturation and gelation of whey proteins and their adsorption at the air/water interface.* Lund: Lund University, Sweden; 1990.
- 3 Singh H, Havea P. Thermal Denaturation, Aggregation and Gelation of Whey Proteins. In: Fox PF, McSweeney PFH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:1257-1283.
- 4 Nishiura J. Lecture 2: Structures and Properties of Biological Molecules: Proteins. Retrieved from Brooklyn College Biology 4: http://academic.brooklyn.cuny.edu/biology/bio4fv/page/3d_prot.htm.
- 5 Considine T, Patel HA, Anema SG, Singh H, Creamer LK. Interactions of milk proteins during heat and high hydrostatic pressure treatments — A Review. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2007;8(1):1-23.
- 6 Walstra P, Jenness. R. *Dairy Chemistry and Physics.* John Wiley & Sons, New York; 1984.
- 7 Fox PF. Milk Proteins: General and Historical Aspects. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:1-48.
- 8 O'Mahony JA, Fox PF. Milk Proteins: Introduction and Historical Aspects. In: McSweeney PLH, Fox PF, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1A, Proteins: Basic Aspects.* 4th ed. New York, NY: Springer Science+Business Media; 2013:43-85.
- 9 Huppertz T. Chemistry of caseins. In: McSweeney PLH, Fox PF, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1A: Proteins: Basic Aspects.* 4th ed. New York, NY: Springer Science+Business Media; 2013:135-160.
- 10 Swaisgood HE. Chemistry of the caseins. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:139-201.
- 11 de Kruijff CG, Holt C. Casein Micelle Structure, Functions and Interactions. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:233-276.
- 12 Fox PF. Heat-induced coagulation of milk. In: Fox PF, ed. *Developments in Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* London, England: Applied Science Publishers; 1982:189-228.
- 13 Singh H, Creamer LK. Heat stability of milk. In: Fox PF, ed. *Advanced Dairy Chemistry—1 Proteins.* 2nd ed. London, England: Elsevier Applied Science Publishers; 1992:621-656.
- 14 Singh H. Heat-induced changes in casein, including interactions with whey proteins. In: Fox PF, ed. *Heat-induced Changes in Milk,* 2nd ed. Brussels, Belgium: International Dairy Federation; 1995:86-104.
- 15 Huppertz T, Smiddy MA, de Kruijff CG. Biocompatible Micro-Gel Particles from Cross-Linked Casein Micelles. *Biomacromolecules.* 2007;8(4):1300-1305.
- 16 Donovan M, Mulvihill DM. Thermal Denaturation and Aggregation of Whey Proteins. *Ir J Food Sci Tech.* 1987;11(1):87-100.
- 17 Jelen P, Rattray W. Thermal denaturation of whey proteins. In: Fox PF, ed. *Heat-induced changes in milk.* 2nd ed. Brussels, Belgium: International Dairy Federation; 1995:66-85.
- 18 Mulvihill DM, Donovan M. Whey Proteins and Their Thermal Denaturation - A Review. *Ir J Food Sci Technol.* 1987;11:43-47.
- 19 Pearce RJ. Thermal denaturation of whey protein. *Int Dairy Fed Bull.* 1989;238:17-23.
- 20 Sawyer L. β -Lactoglobulin. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:319-386.
- 21 de Wit JN. Thermal Stability and Functionality of Whey Proteins. *J Dairy Sci.* 1990;73(12):3602-3612.
- 22 Mulvihill DM. Production, functional properties and utilization of milk protein products. In: Fox PF, ed. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1, Proteins.* London, England: Elsevier Applied Science; 1992:369-404.
- 23 Morr CV, Foegeding EA. Composition and functionality of commercial whey and milk protein concentrates and isolates: a status report. *Food Technol.* 1990;44(8):100-112.
- 24 Huffman LM. Processing of whey for use as a food ingredient. *Food Technol.* 1996;50(2):49-52.
- 25 de Wit JN. Functional properties of whey proteins in food systems. *Neth Milk Dairy J.* 1984;38:71-89.
- 26 de Wit JN. *The use of whey protein products. A review.* Ede, Neth: NIZO; 1989.
- 27 Messens W, Van Camp J, Huyghebaert A. The use of high pressure to modify the functionality of food proteins. *Trends Food Sci Technol.* 1997;8(4):107-112.
- 28 Phillips LG, Whitehead DM, Kinsella J. Protein Gelation. In: Phillips LG, Taylor SL, eds. *Structure—Function Properties of Food Proteins.* San Diego, CA: Academic Press, Inc.; 1994:179-204.
- 29 Livney YD. Milk proteins as vehicles for bioactives. *Curr Op Colloid Interface Sci.* 2010;15(102):73-83.
- 30 Sikorski ZE. *Chemical and functional properties of food components.* 2nd ed. Lancaster, PA: Technomic Publishing Company, Inc.; 1997:119-160.
- 31 Kinsella JE, Rector DJ, Phillips LG. Physicochemical properties of proteins: Texturization via gelation, glass and film formation. In: Yada RY, Jackman RL, Smith JL, eds. *Protein Structure—Function Relationship in Foods.* New York, NY: Springer Science+Business Media; 1994:1-21.
- 32 Zayas JF. *Functionality of Proteins in Foods.* Berlin: Springer-Verlag; 1997:310-365.
- 33 Foegeding EA, Bowland EL, Harding CC. Factors that determine the fracture properties and microstructure of globular protein gels. *Food Hydrocolloids.* 1995;9(4):237-249.
- 34 Bylund G. *Dairy processing handbook.* Lund, Sweden: Tetra Pak Processing Systems AB; 1995.
- 35 Mulvihill DM, Kinsella JE. Gelation of β -Lactoglobulin: Effects of Sodium Chloride and Calcium Chloride on the Rheological and Structural Properties of Gels. *J Food Sci.* 1988;53(1):231-236.
- 36 Huppertz T, Patel H. Advances in Milk Protein Ingredients. In: Ghosh D, Das S, Debasis B, Smart RB, eds. *Innovation in Healthy and Functional Foods.* London, England: CRC Press; 2012:363-386.
- 37 Morr CV. Functional properties of milk proteins and their use as food ingredients. In: Fox PF, ed. *Development in Dairy Chemistry.* London, England: Applied Science Publishers; 1982:375-379.
- 38 DairyGood website. dairygood.org. Accessed June 24, 2015.
- 39 Canadian Dairy Commission website. <http://www.milkingredients.ca/>. Accessed June 24, 2015.
- 40 Patel H. Prepared Food Application of Milk Powders and Dairy Ingredients. In: Lagrange V, ed. *Reference Manual for U.S. Milk Powders: 2015 Revised Edition.* Arlington, VA: US Dairy Export Council; 2015.
- 41 Burrington KJ, Agrawal S. *Technical Report: Whey Protein Heat Stability.* Arlington, VA: US Dairy Export Council; 2012.
- 42 Singh H. Heat stability of milk. *Int J Dairy Technol.* 2004;57(2-3):111-119.
- 43 Singh H, Fox PF. Heat stability of milk: pH-dependent dissociation of micellar K casein on heating milk at ultra high temperatures. *J Dairy Res.* 1985;52(4):529-538.
- 44 Patel HA, Singh H, Anema SG, Creamer LK. Effects of Heat and High Hydrostatic Pressure Treatments on Disulfide Bonding Interchanges among the Proteins in Skim Milk. *J Agric Food Chem.* 2006;54(9):3409-3420.
- 45 Havea P, Singh H, Creamer LK, Campanella OH. Electrophoretic characterization of the protein products formed during heat treatment of whey protein concentrate solutions. *J Dairy Res.* 1998;65(1):79-91.
- 46 Havea P, Singh H, Creamer LK. Heat-induced aggregation of whey proteins: comparison of cheese WPC with acid WPC and relevance of mineral composition. *J Agric Food Chem.* 2002;50(16):4674-4681.
- 47 Aguilera JM. Gelation of whey proteins. *Food Technol.* 1995;49(10):83-89.

- ⁴⁸ Totosaus A, Montejano JG, Salazar JA, Guerrero I. A review of physical and chemical protein-gel induction. *Int J Food Sci Tech*. 2002;37(6):589-601.
- ⁴⁹ Hermansson, AM. Aggregation and denaturation involved in gel formation. In: Pour-EI A, ed. *Functionality and Protein Structure*. ACS Symposium Series 92. Washington, DC: American Chemical Society; 1979:81-103.
- ⁵⁰ Patel HA, Anema SG, Holroyd SE, Singh H, Creamer LK. Methods to determine denaturation and aggregation of proteins in low-, medium- and high-heat skim milk powders. *Lait*. 2007;87(4-5):251-268.
- ⁵¹ Patel HA, Carroll T, Kelly AL. Nonthermal Preservation Technologies for Dairy Applications. In: Chandan RC, Kilara A, Shah NP, eds. *Dairy Processing & Quality Assurance*. Ames, IA: Wiley-Blackwell; 2008:465-482.
- ⁵² Anema SG. The whey proteins in milk: thermal denaturation, physical interactions and effects on functional properties of milk. In: Thompson A, Boland M, Harjinder S, eds. *Milk Proteins: From Expression to Food*. 1st ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc.; 2009:239-281.
- ⁵³ Patel HA, Creamer LK. High pressure-induced interactions involving whey proteins. In: Thompson A, Boland M, Singh H, eds. *Milk Proteins: From Expression to Food*, 1st ed. Food Science and Technology: International Series. New York, NY: Elsevier Inc.; 2009:205-227.
- ⁵⁴ Considine T, Patel HA, Singh H, Creamer LK. Influence of binding of conjugated linoleic acid and myristic acid on the heat- and pressure-induced unfolding and aggregation of β -lactoglobulin B. *Food Chem*. 2007;102(4):1270-1280.
- ⁵⁵ Anema SG, Li Y. Further Studies on the Heat-induced, pH-dependent Dissociation of Casein from the Micelles in Reconstituted Skim Milk. *Lebensm Wiss Technol*. 2000;33(5):335-343.
- ⁵⁶ Anema SG, Li Y. Association of denatured whey proteins with casein micelles in heated reconstituted skim milk and its effect on casein micelle size. *J Dairy Res*. 2003;70(1):73-83.
- ⁵⁷ Jang HD, Swaisgood HE. Characteristics of the interaction of calcium with casein submicelles as determined by analytical affinity chromatography. *Arch Biochem Biophys*. 1990;283(2):318-325.
- ⁵⁸ Corredig M, Dalgleish DG. The mechanisms of the heat-induced interaction of whey proteins with casein micelles in milk - effect of protein concentration at pH 6.75 and 8.05. *Int Dairy J*. 1999;9(3):233-236.
- ⁵⁹ Cho Y, Singh H, Creamer LK. Heat-induced interactions of β -lactoglobulin A and κ casein B in a model system. *J Dairy Res*. 2003;70(1):61-71.
- ⁶⁰ O'Connell JE, Fox PF. Heat-Induced Coagulation of Milk. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins*. 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:879-945.
- ⁶¹ Nieuwenhuijse JA, van Boekel MAJS. Protein Stability in Sterilised Milk and Milk Products. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins*. 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:947-974.
- ⁶² Kelly AL, O'Connell JE, Fox PF. Manufacture and Properties of Milk Powders. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins*. 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:1027-1061.
- ⁶³ Lucey JA, Singh H. Acid Coagulation of Milk. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins*. 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:1001-1026.
- ⁶⁴ McSwiney M, Singh H, Campanella OH. Thermal aggregation and gelation of bovine β lactoglobulin. *Food Hydrocolloids*. 1994;8(5):441-453.
- ⁶⁵ McSwiney M, Singh H, Campanella OH, Creamer LK. Thermal gelation and denaturation of bovine β -lactoglobulins A and B. *J Dairy Res*. 1994;61(2):221-232.
- ⁶⁶ Gezimatı J, Creamer LK, Singh H. Heat-induced Interactions and Gelation of Mixtures of β -Lactoglobulin and α -Lactalbumin. *J Agric Food Chem*. 1997;45(4):1130-1136.
- ⁶⁷ Prabakaran S, Damodaran S. Thermal Unfolding of β -lactoglobulin: Characterization of Initial Unfolding Events Responsible for Heat-Induced Aggregation. *J Agric Food Chem*. 1997;45(11):4303-4308.
- ⁶⁸ Manderson GA, Hardman MJ, Creamer LK. Effect of Heat Treatment on the Conformation and Aggregation of β -lactoglobulin A, B, and C. *J Agric Food Chem*. 1998;46(12):5052-5061.
- ⁶⁹ Manderson GA, Creamer LK, Hardman MJ. Effect of heat treatment on the circular dichroism spectra of bovine β -lactoglobulin A, B, and C. *J Agric Food Chem*. 1999;47(11):4557-4567.
- ⁷⁰ Havea P, Singh H, Creamer LK. Characterization of heat-induced aggregates of β lactoglobulin, α -lactalbumin and bovine serum albumin in a whey protein concentrate environment. *J Dairy Res*. 2001;68(3):483-497.
- ⁷¹ Schokker EP, Singh H, Pinder DN, Norris GE, Creamer LK. Characterization of intermediates formed during heat-induced aggregation of β -lactoglobulin AB at neutral pH. *Int Dairy J*. 1999;9(11):791-800.
- ⁷² Schokker EP, Singh H, Creamer LK. Heat-induced aggregation of β lactoglobulin A and B with α -lactalbumin. *Int Dairy J*. 2000;10(12):843-853.
- ⁷³ Hong Y-H, Creamer LK. Changed protein structures of bovine β lactoglobulin B and α -lactalbumin as a consequence of heat treatment. *Int Dairy J*. 2002;12(4):345-359.
- ⁷⁴ de Wit JN, Klarenbeek G. Effects of Various Heat Treatments on Structure and Solubility of Whey Proteins. *J Dairy Sci*. 1984;67(11):2701-2710.
- ⁷⁵ Kinsella JE, Whitehead DM. Proteins in Whey: Chemical, Physical, and Functional Properties. *Adv Food Nutr Res*. 1989;(33):343-438.
- ⁷⁶ Lucey JA, Singh H. Formation and physical properties of acid gels: a review. *Food Res Int*. 1998;30(7):529-542.
- ⁷⁷ Tamime AY, Robinson RK. *Yoghurt: Science and Technology*. 2nd ed. Boca Raton, FL: Woodhead Publishing Ltd. and CRC Press LLC; 1999.
- ⁷⁸ Anema SG, Li Y. Effect of pH on the Association of Denatured Whey Proteins with Casein Micelles in Heated Reconstituted Skim Milk. *J Agric Food Chem*. 2003;51(6):1640-1646.
- ⁷⁹ Singh H. Interactions of milk proteins during the manufacture of milk powders. *Lait*. 2007;87(4-5):413-423.
- ⁸⁰ Patel H, Huppertz T. Effects of High-pressure Processing on Structure and Interactions of Milk Proteins. In: *Milk Proteins: From Expression to Food*. 2nd ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc.; 2014:243-267.
- ⁸¹ Patel H, Patel S. *Technical Report: Milk Protein Concentrates: Manufacturing and Applications*. Arlington, VA: US Dairy Export Council; 2014.
- ⁸² Nonaka M, Tanaka H, Okiyama A, et al. Polymerization of Several Proteins by Ca^{2+} -Independent Transglutaminase Derived from Microorganisms. *Agric Biol Chem*. 1989;53(10):2619-2623.
- ⁸³ Kuraishi C, Yamazaki K, Susa Y. Transglutaminase: Its utilization in the food industry. *Food Rev Int*. 2001;17(2):221-246.
- ⁸⁴ Faergemand M, Sorensen MV, Jorgensen U, Budolfsen G, Qvist KB. Transglutaminase: effect on instrumental and sensory texture of set style yoghurt. *Milchwissenschaft*. 1999;54:563-566.
- ⁸⁵ Bonisch MP, Huss M, Weit, K, Kulozik U. Transglutaminase cross-linking of milk proteins and impact on yoghurt gel properties. *Int Dairy J*. 2007;17(11):1360-1371.
- ⁸⁶ Yüksel Z, Erdem YK. The influence of transglutaminase treatment on functional properties of set yoghurt. *Int J Dairy Technol*. 2010;63(1):86-97.
- ⁸⁷ O'Sullivan MM, Kelly AL, Fox PF. Effect of Transglutaminase on the Heat Stability of Milk: A Possible Mechanism. *J Dairy Sci*. 2002;85(1):1-7.
- ⁸⁸ O'Sullivan MM, Kelly AL, Fox PF. Influence of transglutaminase treatment on some physico-chemical properties of milk. *J Dairy Res*. 2002;69(3):433-442.
- ⁸⁹ Mounsey JS, O'Kennedy BT, Kelly PM. Influence of transglutaminase treatment on properties of micellar casein and products made therefrom. *Lait*. 2005;85:405-418.
- ⁹⁰ Kralova I, Sjöblom J. Surfactants Used in Food Industry: A Review. *J Dispers Sci Technol*. 2009;30(9):1363-1383.
- ⁹¹ Ibel K, May RP, Kirschner K, Szadkowski H, Mascher E, Lundahl P. Protein-decorated micelle structure of sodium-dodecyl-sulfate--protein complexes as determined by neutron scattering. *Eur J Biochem*. 1990;190(2):311-318.
- ⁹² Dickinson E, Golding M, Povey M. Creaming and Flocculation of Oil-in-Water Emulsions Containing Sodium Caseinate. *J Colloid Interface Sci*. 1997;185(2):515-529.
- ⁹³ Marella C, Salunke P, Biswas AC, Kommineni A, Metzger LE. Manufacture of modified milk protein concentrate utilizing injection of carbon dioxide. *J Dairy Sci*. 2014;98(6):3577-3589.

⁹⁴ Datta N, Deeth HC. High pressure processing of milk and dairy products. *Aust J Dairy Technol.* 1999;54(1):41-48.

⁹⁵ Datta N, Deeth HC. High pressure processing. In: Roginski H, Fuquay JW, Fox PF, eds. *Encyclopedia of Dairy Sciences.* London, England: Academic Press; 2003:1327-1333.

⁹⁶ Huppertz T, Kelly AL, Fox PF. Effects of high pressure on constituents and properties of milk. *Int Dairy J.* 2002;12(7):561-572.

⁹⁷ Trujillo AJ, Capellas M, Saldo J, Gervilla R, Guamis B. Applications of high-hydrostatic pressure on milk and dairy products: a review. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2002;3(4):295-307.

⁹⁸ Claeys WL, Indrawati O, Van Loey AM, Hendrickx M. Review: are intrinsic TTIs for thermally processed milk applicable for high-pressure processing assessment? *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2003;4(1):1-14.

⁹⁹ Balny C, Masson P. Effects of high pressure on proteins. *Food Rev Int.* 1993;9(4):611-628.

¹⁰⁰ Balci AT, Wilbey RA. High pressure processing of milk - the first 100 years in the development of new technology. *Int J Dairy Technol.* 1999;52(4):149-155.

¹⁰¹ Tedford L-A, Kelly SM, Price NC, Schaschke CJ. Interactive Effects of Pressure, Temperature and Time on Molecular Structure of β -Lactoglobulin. *J Food Sci.* 1999;64(3):396-399.

¹⁰² Fertsch B, Müller M, Hinrichs J. Firmness of pressure-induced casein and whey protein gels modulated by holding time and rate of pressure release. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2003;4(2):143-150.

¹⁰³ Patel HA, Singh H, Anema SG, Creamer LK. Effects of heat and high hydrostatic pressure treatments on the aggregation of whey proteins in whey protein concentrate solutions. *Food New Zealand.* 2004;4(3):29-35.

¹⁰⁴ Patel H, Patel S. Major Characteristics of Milk Powders and Test Methods. In: Lagrange V, ed. *Reference Manual for U.S. Milk Powders: 2005 Revised Edition.* Arlington, VA: US Dairy Export Council; 2005.

¹⁰⁵ Messens W, Van Camp J, Huyghebaert A. The use of high pressure to modify the functionality of food proteins. *Trends Food Sci Technol.* 1997;8(4):107-112.

¹⁰⁶ Huppertz T, Fox PF, Kelly AL. High pressure treatment of bovine milk: effects of casein micelles and whey proteins. *J Dairy Res.* 2004;71(1):97-106.

¹⁰⁷ Huppertz T, Fox PF, Kelly AL. High pressure-induced denaturation of α -lactalbumin and β -lactoglobulin in bovine milk and whey: a possible mechanism. *J Dairy Res.* 2004;71(4):489-495.

¹⁰⁸ Walkenström P, Hermansson A-M. High-pressure treated mixed gels of gelatin and whey proteins. *Food Hydrocoll.* 1997;11(2):195-208.

¹⁰⁹ Van Camp J, Feys G, Huyghebaert A. High Pressure Induced Gel Formation of Haemoglobin and Whey Proteins at Elevated Temperatures. *Lebensm Wiss Technol.* 1996;29(1-2):49-57.

¹¹⁰ Van Camp J, Messens W, Clément J, Huyghebaert A. Influence of pH and Calcium Chloride on the High-Pressure-Induced Aggregation of a Whey Protein Concentrate. *J Agric Food Chem.* 1997;45(5):1600-1607.

¹¹¹ Arias M, López-Fandiño R, Olano A. Influence of pH on the effects of high pressure on milk proteins. *Milchwissenschaft.* 2000;55:191-194.

¹¹² Patel HA, Huppertz T. Effects of High-pressure Processing on Structure and Interactions of Milk Proteins. In: *Milk Proteins: From Expression to Food.* 2nd ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc.; 2014:243-267.

¹¹³ Patel HA, Carroll T, Kelly AL. Nonthermal Preservation Technologies for Dairy Applications. In: Chandan R, ed. *Dairy Processing and Quality Assurance.* 2nd ed. Ames, Iowa: Wiley-Blackwell; 2015.

¹¹⁴ Ashokkumar M, Mason TJ, Sonochemistry. In: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.* Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2007. doi:10.1002/0471238961.1915141519211912.a01.pub2.

¹¹⁵ Muthukumaran S, Kentish SE, Ashokkumar M, Stevens GW. Mechanisms for the ultrasonic enhancement of dairy whey ultrafiltration. *J Membrane Sci.* 2005;258(1-2):106-114.

¹¹⁶ Zisu B, Schleyer M, Chandrapala J. Applied ultrasound to reduce viscosity and control the rate of age thickening of concentrated skim milk. *Int Dairy J.* 2013;31(1):41-43.

¹¹⁷ Wu H, Hulbert GJ, Mount JR. Effects of ultrasound on milk homogenization and fermentation with yogurt starter. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2008;1(3):211-218.

¹¹⁸ Zisu B, Sciberras M, Jayasena V, Weeks M, Palmer M, Dincer TD. Sonocrystallisation of lactose in concentrated whey. *Ultrasonics Sonochem.* 2014;21(6):2117-2121.

¹¹⁹ Arnold G, Leiteritz L, Zahn S, Rohm H. Ultrasonic cutting of cheese: Composition affects cutting work reduction and energy demand. *Int Dairy J.* 2009;19(5):314-320.

¹²⁰ Patist A, Bates D. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2008;9(2):147-154.

INDEX

구분	페이지
서론	1
단백질 구조	2
단백질 변성	3
우유단백질: 식별, 구조 및 물리화학적 특성	3
카제인	4
유청단백질	5
우유단백질의 구조-기능 관계	6
우유단백질의 기능	8
열처리 및 우유단백질: 기능상의 효과	10
열처리 및 유청단백질: 기능상의 효과	11
단백질 기능성을 위한 열처리의 상업적 응용	12
우유단백질의 기능적 특성에 대한 비가열성 변화	12
결론	13
참고문헌	14