

# 고압 효소 액화 기술과 아임계수 가수분해 기술의 식품 산업 현황 및 전망

## Food Industry Status and Future Trend of High-Pressure Enzymatic Liquefaction Technology and Subcritical Water Hydrolysis Technology

이종원, 홍근표\*(Jong Won Lee, Geun-Pyo Hong\*)

Department of Food Science & Biotechnology, and Carbohydrate Bioproduct Research Center, Sejong University

### I. 서론

유엔 식량농업기구(FAO)에 따르면 전 세계적으로 폐기되는 식품은 연간 약 13억 톤이 발생한다는 보고가 있었다(FAOSTAT, 2021). 또한 농식품 수출정보에 따르면 식품 부산물은 70% 이상이 쓰레기로 분류되어 활용되지 못하고 퇴비화, 사료, 매립이나 소각되며, 유엔환경계획(UNEP)이 보고한 '2024 음식 폐기물 지수 보고서'에 따르면 식품 폐기물이 발생하는 온실가스는 전 세계 배출량의 8~10%를 차지하고 있어 환경오염에 상당한 영향을 미치고 있다. 국내 식품 기업에서는 제조공정에서 발생하는 부산물이 연간 3천 톤으로, 이 중 70%를 환경부담금으로 지불하고 음식물 쓰레기로 처리하는 비용이 발생하고 있다. 국내에서는 연간 약 550만 톤의 식품을 폐기하며, 이를 처리하는 비용만 1조 960억 원에 달하며 국내 식품 기업은 부산물의 처리비용이 부담되는 실정이다. 특히 단백질 기반, 섬유질 기반 등 다양한 부산물이 배출되고 있으며, 식품 부산물의 고부가가치 식품으로 개발되지 못하고 바이오 연료나 바이오 플라스틱 등으로 주로 전환하고 있는 실정이다.

업사이클링(upcycling)은 업그레이드(upgrade)와 리사이클링(recycling)의 합성어로 폐기물이나 부산물과 같은 상품성이 떨어지는 원료 등에 신기술을 적용하여 고부가가치 상품으로 창출하는 것으로, 리사이클링은 원료의 최소한의 변경으로 본질적 형태로 다른 제품으로 생산하는 것이지만 업사이클은 한층 더 확장된 개념으로 기존의 폐기물이나 부산물 원료를 새로운 고부가가치 상품으로 변환하는 것이다. 가구 및 의류 등 다양한 산업에서는 새로운 고부가가치 생산을 위해 많은 시도가 있었으며, 최근에는 식품 분야에서도 많은 각광을 받기 시작하였다. 푸드 업사이클링은 쓰레기를 줄임으로써 환경 오염 및 기후 변화에 대응하는 친환경적이고 지속가능한 푸드테크(Food Tech)로 주목받고 있으며, 부산물은 유기화합물이 풍부한 바이오매스 자원 중 하나로 업사이클링 활용 시 부가가치가 매우 높아 식품산업에 경쟁력을 부여할 수 있다. 업사이클링 푸드 산업의 전 세계 규모는 2022년 기준 약 530억 달러(한화 약 70조 원)으로 세계

\*Corresponding author: Geun-Pyo Hong

Department of Food Science & Biotechnology, and Carbohydrate Bioproduct Research Center,

Sejong University, Seoul, Korea

Tel: +82-2-3408-2913

Fax: +82-2-3408-4319

E-mail: gphong@sejong.ac.kr

에서 가장 많은 식품 폐기물을 배출하는 미국은 다양한 업사이클링 푸드 관련 기업들이 성장하고 있다(한국농수산물유통공사, 2022). 특히 2019년 10월 미국은 미국 업사이클링 푸드협회를 결정하여 업사이클링 푸드 정의, 업사이클링 푸드 인증 기준을 마련하고 인증마크를 발표하는 등 활발하게 활동하고 있지만, 최근 국내에서 국가 연구 개발 사업 등 본격적인 연구 착수가 진행됨에 따라 국내 기업 등 많은 연구가 이루어질 것으로 예상된다.

## II. 본론

### 1. 축산 부산물의 발생과 기능성 소재 국산화 필요성

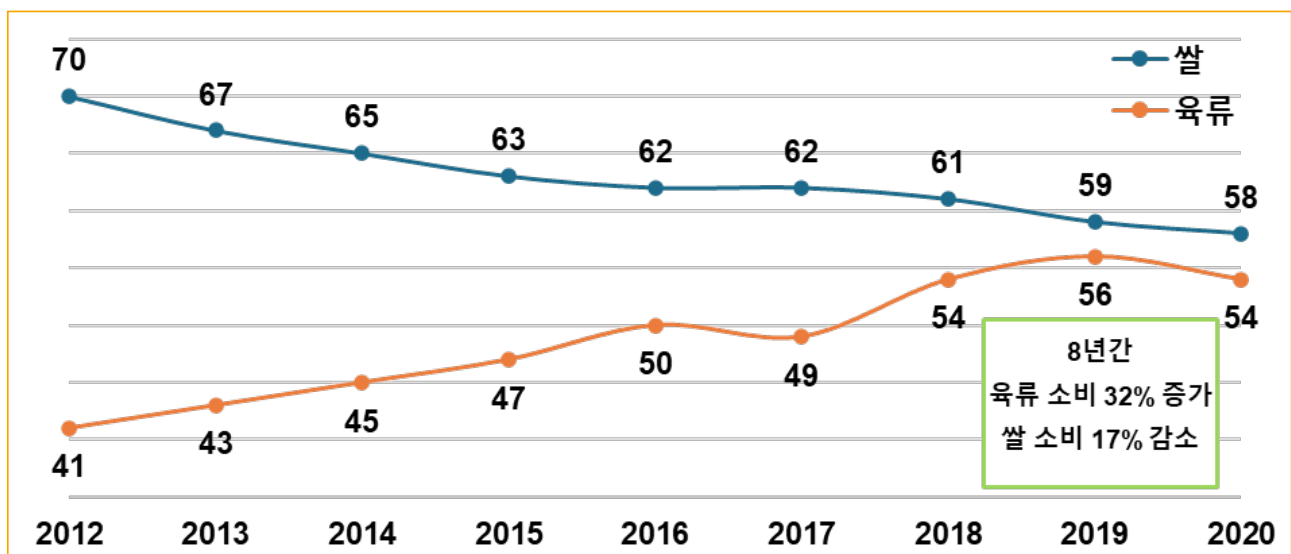
육류는 가치가 매우 높은 축산물이며, 전 세계적으로 동물성 단백질의 주요 공급원으로 섭취하고 있다. 특히, 한국육류유통수출협회의 보고에 따르면, 쌀이 주식인 우리나라에서도 2020년 기준 한국인 1인이 1년 간 섭취한 육류는 54kg으로 같은 해 1인당 쌀 소비량인 58kg과 맞먹는 것으로 나타났다(그림 1). 이러한 추세가 지속될 경우 조만간 육류 소비량이 쌀 소비량보다 많아질 것으로 예상된다. 또한, 육류의 소비가 증가함에 따라 낙농업 시

장도 크게 성장하고 있다. 우리나라 국내 원유 생산량은 2023년 5월 164,208 kL로 2011년 11월 148,836 kL와 비교하여 원유 생산량이 증가하고 있다(낙농진흥회, 국내 원유생산통계). 하지만, 국내 우유 소비 총량은 2020년 4,138,116 ton으로, 2018년 4,345,185 ton보다 감소하였으며, 국내 1인당 연간 우유 소비량은 2020년 80.10 kg으로 2018년 83.90 kg에 미치지 못하고 감소하는 추세를 나타나기 시작하였다(낙농진흥회, 통계청, 2020).

육류 산업이 성장함에 따라 도축 과정에서 발생하는 부산물뿐만 아니라 축산 산업에서 비롯되는 잉여 우유 등의 부산물이 발생한다. 더욱이 전 세계적으로 축산 부산물의 생산량은 증가하는 추세를 보이고 있으며, 이는 농업 기술의 발전과 더불어 축산 시설의 현대화, 사육 환경의 개선 등으로 축산 산업이 성장함에 따라 부산물의 증가를 야기한다. 특히, 소 도축장에서 발생하는 평균 부산물 발생량은 275 kg/ton으로 동물 중량의 약 27.5%, 염소와 양의 경우 평균 부산물 발생량은 2.3 kg/a head로 전체 중량의 약 4%가 발생한다(Kulkarni et al., 2015). 우유 소비의 감소는 결국 우유의 재고를 증가시키며, 일반적으로 폐기 되는 원유는 분유로 가공하여 저장하는데 2021년 6월 기준 분유 재고는 1만 1,681 ton에 이르며

그림 1. 한국인 1인당 육류와 쌀의 연간 소비량

단위: kg



출처: 한국육류유통수출협회, 통계청.

지속적인 재고 증가를 보이고 있다. 세계적으로 발생하는 축산 부산물의 대부분은 여전히 폐기물로 폐기되거나 낮은 가치로 사용되는 실정으로, 축산 부산물을 활용하기 위한 여러 연구가 진행되어오고 있다(Di Bernardini et al., 2011; Lasekan et al., 2013). 하지만, 축산 부산물의 절반 이상은 특이한 이화학적 특성으로 인해 정상적인 소비에 적합하지 않아 잠재적인 비용을 증가시키고 있다(Jayathilakan et al., 2012).

2008년 기준 건강기능식품의 국내 총 생산액은 8,031억 원으로 2007년 대비 약 11%의 증가 추세를 보이고 있다. 특히 개별인정형(예: 가르시니아카보지아 추출물, 공액 리놀렌산, 코엔자임 Q10 등) 제품의 경우 2006년 이후 급격한 상승세를 보이며 2008년에는 생산액이 5배 이상 증가하기 시작하였고, 특히 소비자가 선호하는 기능성은 비만, 면역력 증진, 아토피 등의 순서로 건강기능식품을 찾는 수요가 많아지고 항산화에 관한 관심도 많이 집중되고 있다. 또한 세계적으로, 2007년 NBJ(Nutrition Business Journal)에 따르면 세계 기능성식품 시장은 약 2,100억 달러이며, 세계시장의 85%를 미국, 유럽, 일본 등으로 선진국 중심으로 기능성 소재 산업이 활발하게 이루어지고 있으며, 선진국의 공통된 핵심 건강기능식품 소재로는 항산화제, 칼슘, 글루코사민 등이 꼽혔고, 프로바이오틱스 등도 주목을 받고 있다. 국내의 건강기능식품 생산실적은 '15년 1조 8,230억 원으로 '14년 1조 6,310억 원에 비해 7.4% 성장하며 지속적으로 시장이 성장하고 있다(식품의약품안전처). 시장 규모 또한 크게 성장하는 것으로 보이며, 건강기능 식품에 대한 국내 관심이 높아지고 있지만, 국내 기능성 원료 국내 제조 현황은 여전히 수입에 크게 의존하는 모습을 보이고 있어 기능성 소재의 국산화가 필요한 실정이다.

## 2. 축산 부산물의 소재화 잠재력

축산 부산물은 매우 다양하지만 일반적으로 다량의 단백질을 포함하고 있으며, 필수 아미노산, 미네랄 및 비타민과 같은 다양한 bioactive compounds를 함유하고 있

다(Honikel et al., 2008). 특히 다량의 단백질은 생리활성 펩타이드 생산에 유리한 소재로서 축산 부산물의 생리활성 업사이클링이 가능하고 식품 산업뿐만 아니라 제약 등 다양한 산업에 활용 가능성이 크다.

펩타이드는 일반적으로 단백질의 기본 성분인 아미노산이 50개 이하로 결합되어 있으며, 단백질처럼 독특한 생물학적 활성을 보이는 생체 유래 물질이다. 축산 부산물은 다량의 단백질을 포함하고 있으며, 특히 단백질 상태로 존재할 때에는 기능이 발현되지 않고 특정 효소의 작용이나 저분자의 펩타이드로 분해되면 기능을 발휘하는 다양한 종류의 생리활성 펩타이드(bioactive peptide)의 특징을 가지게 된다. 하지만 축산 부산물의 단백질에 대한 펩타이드 가수분해에 관한 연구는 전무한 실정으로 소재화 연구에 주목을 받고 있다.

소 혈액( $\alpha, \beta$ -글로블린, BSA,  $\gamma$ -글로블린, 피브리노겐)을 파파인으로 가수분해한 추출물 중  $\gamma$ -글로블린 가수분해물의 다량의 티로신과 류신에 의한 항산화특성을 보이며, 피브리노겐 가수분해물 속 아스파르트산과 글루타민과 같은 음전하를 띠는 성분에 의해 항산화활성이 더 크다. 또한  $\gamma$ -글로블린과 피브리노겐 가수분해물은 암세포의 세포증식을 억제한다(O'Sullivan et al., 2017). 또한 혈액 내에 헤모글로빈은 단백질 분해에 의해 생성된  $\alpha$  107-136 펩타이드는 *M. luteus* A270, *L. innocua*, *E. coli* 및 *S. enteritidis*에 대하여 항균 효과를 보인다(Daoud et al., 2005). 락토페린(lactoferrin)은 당단백질로 펩신으로 분해하면 N-말단 부위에 해당하는 Phe17-Phe41 부위에서 락토페리신(bovine lactoferricin)이라는 펩타이드가 생성되는데 이는 세균이나 곰팡이, 바이러스를 억제하고, 락토페린보다 수십 배 이상 강한 항균 활성을 띄게 된다. 우유 유래의 락토페리신을 중화시킬 수 있는 산성 펩타이드인 마가이닌 유전자와 락토페리신 유전자를 융합하여 숙주에 대한 항균력을 일시적으로 소거하는 펩타이드를 발현시킨다(Nan Wu et al., 2022). 우유 단백질의 as-casein에서 유래한 펩타이드는 자유 라디칼 중간체 및 반응 생성물을 제거하거나 산화-환원회로를 차단하여 Lox 촉매 반응에 작용한

다(Rival S. G et al., 2001).

소 아킬레스건 속의 콜라겐을 박테리아 콜라겐 분해효소를 이용하여 가수분해한 콜라겐 펩타이드는 D1과 E2를 통해 안지오텐신 전환효소를 억제하여 고혈압을 개선한다(Banerjee et al., 2012). 소 혈액에서 추출한 BSA를 파파인 효소를 이용한 가수분해에서 tripeptide SLR와 dipeptide ER는 안지오텐신 전환효소, 레닌 및 DPP-IV 억제하여 항 고혈압 특성을 보인다(Lafarga, T. et al., 2016). 또한 우유 단백질의 특정 펩타이드가 안지오텐신 전환효소의 역할을 저해하여 안지오텐신 II로 전환되는 것을 막아 혈압의 상승을 억제하며(그림 2), 특히 카세인 단백질로부터 분해된 혈압강하 펩타이드로는 카소키닌이 알려져 있고 이들의 아미노산 서열은 알파-카세인, 베타-카세인, 카파-카세인으로부터 발생한다(Nan Wu et al., 2022).

분지사슬 아미노산에 의한 인슐린 분비 촉진 기전과 음식물의 소화 과정 중 위장관에서 췌장에서 인슐린 분비 촉진, glucagon의 분비를 감소시켜 혈당을 감소시키는 역할을 담당하는 내분비 호르몬의 일종인 GLP-1의 작용에 영향을 미치는 기전으로, 생리적 환경에서 GLP-1은 이를 가수분해하여 불활성화 시키는 DPP-4에 의하여 빠르게 분해되어 생물학적 활성을 소실하기 때문에 DPP-4 억제제는 제 2형 당뇨의 새로운 치료방법으로 주목을 받고 있다(Alan Connolly et al., 2014).

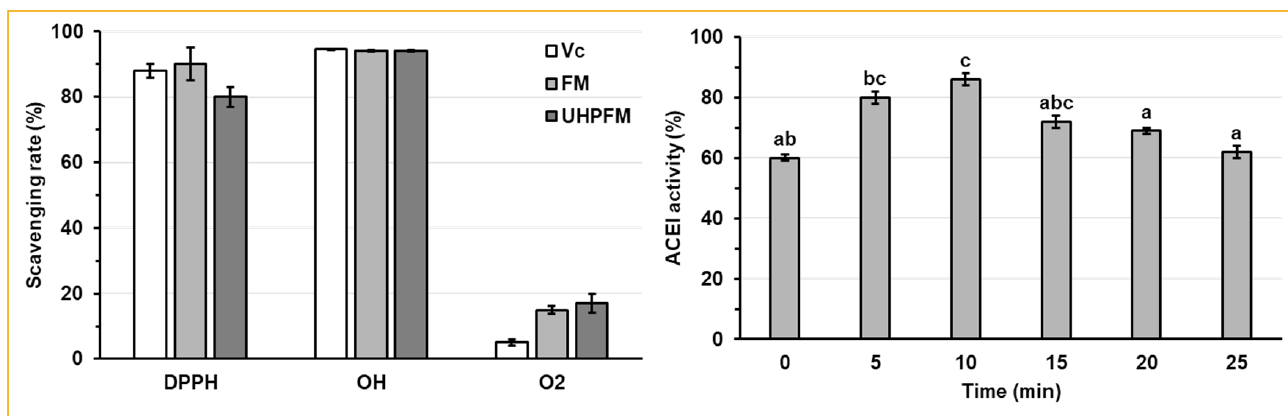
돼지 태반을 효소 가수분해하여 생성된 cyclophosphamide는 세포와 조직의 손상을 감소시키고 NK세포 활성을 증가시키며 혈중 림프구 함량을 증가시키는 등 면역과 관련된 인자들을 증가시켜 면역력 증진에 도움을 준다(김건남 et al., 2022).

축산 부산물인 태반 펩타이드는 항산화 효소 활성을 증가시켜 자외선으로부터의 ROS를 제거하여 피부 보습 및 주름 개선 신호 경로 및 주요 구성인자 활성을 조절하여 피부 건강에 도움을 주며, HA(염증, 세포이동 및 상처 치유 역할)과 sphingomyelin(세포 손상 신호전달 역할)의 분비량을 증가시켜 세포의 보습효과를 준다. 또한, 자외선에 의해 생성되어 피부 손상에 영향을 주는 염증성 cytokine 생성을 억제함으로써 피부 건강을 개선한다(이은지 et al., 2023).

### 3. 축산부산물의 펩타이드 소재화 기술의 한계

효소적 가수분해와 미생물을 이용한 발효 가수분해 공정은 동물이나 식품 단백질에서 생리활성 펩타이드의 생산에 적용할 수 있는 자연적 기술을 제공합니다. Membrane reactors를 통해 효소를 회수하고 단백질 기반 가수분해 생성물인 펩타이드를 대규모로 가공하는 것이 가장 좋은 방법으로 알려져 있으나, 반응조에서 fouling의 문제로 연속공정에 어려움이 있다. 또한 분해

그림 2. 발효유의 항산화 효과와 안지오텐신 전환효소 억제 활성



출처: Nan Wu et al., 2022.

와 분리 과정은 장시간 소요되며 기술이 복잡하고 생산량이 낮아 비용이 많이 들어가는 단점이 있다(표 1).

펩타이드로의 분해 과정에서 펩타이드의 활성화 효소 처리에 의한 가스 발생으로 인한 독성 가능성과 가수분해에 걸리는 상당한 시간과 비용, 연속식 생산 공정화 방안 부재로 안정적으로 소재를 확보하는데 허들이 존재하여 소재와 적용 제품의 가격을 증가시키는 원인이 된다(표 2). 또한, 소재를 적용한 제품의 가격이 높고 국내에서 자체 생산할 수 있는 생산 기반이 전무하다.

효소 공정은 효소를 첨가 후 24~48 시간, 많게는 72시간까지 효소 반응을 발효조 또는 배양기에서 이루어진다. 산업용 발효조 또는 배양기는 15~350 L로 매우 다양하지만, 산업적으로는 낮은 수준의 효율을 얻고 있는 실정이다. 효소 공정에서 가장 큰 단점으로 꼽히는 긴 효소 반응 시간은 산업적인 큰 비용 발생을 야기시키고 식품 부산물의 낮은 가수분해 효율, pH 민감도, 온도, 용매 등 주변 환경에 따른 구조 변성과 촉매 활성 저하는 산업적 scale-up에 치명적인 단점으로 꼽히며, 이는 산업적 생

산에서 제조원가를 상승시킨다.

#### 4. 고압 효소 액화와 아임계수를 적용한 새로운 소재화 기술

효소 공정을 개선하기 위해 물리적 공정 중 초고압을 활용한 효소 가수분해는 많은 연구가 진행되어오고 있다. 특히 고압 영역(10~500 MPa)을 통한 식품의 연화 작용은 원료의 조직을 유연하게 만드는 효과가 있으며, 연화된 조직 사이로 효소가 빠르게 침투하여 효소 공정을 개선할 수 있다. 400 MPa 이상의 압력에서는 초고압 처리에 의한 살균 효과를 나타내지만 200 MPa 이하의 압력에서는 다양한 효소의 활성을 향상시킬 수 있다. 이에 부산물 단백질을 소재화 하기 위해 초고압 기반 가수분해 연구는 활발히 진행 중에 있다(Chun et al., 2014). 또한 최근에는 Lab-scale에서 pilot-scale 장치로 연구가 많이 되어 있어 단시간에 원료의 물성을 변화시켜 효소 공정의 단점인 긴 효소 반응 시간과 낮은 수율을 보완하기에 충분한 복합

표 1. 생물학적 펩타이드 생산 기술 현황

| 기술             |                | 특징                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 연구현상<br>가수분해방법 | 효소<br>가수분해     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 펩타이드는 펩신이나 트립신, 키모트립신을 다른 단백질 분해효소인 alcalase, thermolysin, subtilisin 등과 함께 이용하여 가수분해 후 분리 정제된다.</li> <li>• 상업적으로 이용되는 8가지 protease로 단일 처리하여 수용성 단백질의 가수분해는 혼합처리보다 peptide 생성이 적다.</li> </ul>               |
|                |                | 장점                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                |                | 단점                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                | 막여과<br>가수분해    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 배지를 포함하는 막여과 생물반응기의 펩타이드의 생산은 연속적으로 유도된 발효물을 동일한 유속으로 여과막까지 순환시켜 여과물과 투과물을 유지한다.</li> </ul>                                                                                                                 |
|                |                | 장점                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                |                | 단점                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                | 미생물 이용<br>가수분해 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 유산균 발효와 추가적인 미생물 유래 단백질 분해효소의 처리에 의하여 혈압강화 효과가 뛰어난 펩타이드인 Gly-Thr-Trp와 Gly-Val-Trp가 새롭게 보고되었다.</li> <li>• 미생물을 적용하여 가수분해할 수 있으며, 가수분해 조건(pH, 온도, 이온 강도, 효소, 시간)은 효소의 최적 조건과 필요한 가수분해 정도에 따라 결정된다.</li> </ul> |
|                |                | 장점                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 산업적이용          | 효소<br>가수분해     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 단백질 가수분해물의 생산을 위한 가장 일반적인 방법이다.</li> </ul>                                                                                                                                                                  |
|                |                | 단점                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                | 막여과<br>가수분해    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 연속공정이 가능하며 효소의 자유로운 활동성 및 촉매의 재사용 또는 보존이 가능하다. 효소 및 막의 선택에 의한 생성물은 특성의 조절이 가능하다.</li> <li>• 배치 생산에 비해 생산성이 3배 증가하게 된다.</li> </ul>                                                                           |
|                |                | 장점                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                | 효소 고정<br>가수분해  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 프로테아제를 사용한 단백질 가수분해 방법으로 지속적으로 도입되고 있다.</li> </ul>                                                                                                                                                          |
|                |                | 장점                                                                                                                                                                                                                                                   |



공정이다.

다양한 물리적 최신 공정에 대한 기술은 표 2로 단백질 원 바이오매스에서 펩타이드 생산에 대한 연구는 활발하게 진행되어 가고 있다. 일반적인 가수분해 기술은 산, 효소 가수분해가 활용되고 있다. 하지만 산업적인 측면에서는 효율적인 가수분해 기술 도입이 시급한 상황으로, 아임계수 가수분해 기술은 전처리 없이 물의 임계점(~374℃) 이하의 조건에서 고압(0.1~22 MPa)의 가수분해 기술로서 처리 시간이 짧고 높은 효율을 제공하는 고효율, 저비용 가수분해 기술이다. 아임계수 가수분해 기술은 물을 용매로 활용하는 Green technology이며, 일반적인 물리적 공정과 같이 용매의 조성, 압력 및 온도, 유지 시간 등 주요 매개 변수에 따라 가수분해 효율과 생리활성 기능을 조

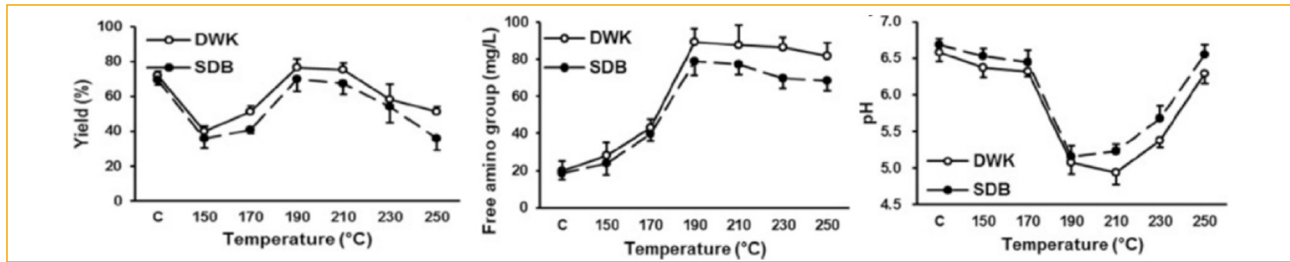
절할 수 있다. 그 중 가수분해 효율에 크게 기여하는 매개 변수는 온도이며, 최적 조건은 원료의 종류에 따라 가수분해의 특성이 달라지게 된다(그림 3).

특히, 물은 상온에서 극성이 높은 용매로서 수많은 수소 결합 구조로 인해 유전상수가 높기 때문에 추출 용매로 적합하지 않아 에탄올 등을 많은 유기 용매로 사용한다. 하지만, 아임계수 기술을 적용하면 물의 온도가 증가함에 따라 유전 상수, 점도와 표면 장력은 점차 감소하게 되고 확산의 특성은 증가하게 되면서 메탄올, 에탄올과 같은 유전 상수를 나타내며 추출 및 가수분해가 된다(Zhang et al., 2020). 특히, 물 분자의 해리는 200~300℃에서 가장 높으며 양성자는 아임계수 기술 기반에서 중요한 가수분해 역할을 한다.

표 2. 물리적 펩타이드 가수분해 최신 기술 현황

| 기술   | 분류                                            | 특징                                                                                                                                                                                                              |
|------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 펩타이드 | 곡류 단백질                                        | • 탈지된 쌀겨를 증류수와 함께 용기에 부은 후 밀봉하여(180~280℃) 5 min 가수분해 후 얼음 수조에 냉각시킴                                                                                                                                              |
|      | 조류 단백질                                        | • 조류와 물을 반응기에 넣은 후(205~325℃), 20.7MPa 반응기 체류 시간(9~10s) 조건에서 가수분해후 원심분리하여 여과시킴                                                                                                                                   |
|      | 육류 단백질                                        | • BSA를 증류수에 용해하여 제조한 후 반응기에 넣어 밀봉하여 20℃/min에서 목표 온도(240~300℃)로 가열한 후 40℃로 즉시 냉각                                                                                                                                 |
|      | 대두 단백질                                        | • 대두분말을 증류수에 현탁하여 4℃에서 교반 후 SWP 반응기에 옮겨 밀폐하고 6℃/min 가열하여 내부 압력 22MPa 내부온도(150~250℃)에 가수분해 후 4℃ 증류수에 냉각<br>• 고속 임펠러 균질기를 사용하여 5~15%농도로 분산시킨 다음 회분식 아임계수 장치를 이용하여 설정온도(230~270℃), 15~20분 가열 후 냉각하여 대두단백질 수열분해액 회수 |
|      | 장점                                            | • 아임계수는 저렴하고 손쉽게 구할 수 있으며, 화학적으로 안전하고 환경적으로 무해<br>• 비교적 단시간 내에 가수분해가 이루어짐<br>• 전처리 없이 복잡하지 않은 가수분해 수율 제공<br>• 생리활성 물질에 추출이 용이함                                                                                  |
|      | 단점                                            | • 연속식에 관한 연구가 전무한 실정으로 산업화가 어려움                                                                                                                                                                                 |
|      | 어류 부산물 단백질                                    | • 균질한 민어 내장을 반응기에 넣은 후 반응 온도(19.85~449.85℃)에서 최대 온도까지(60min) 가수분해 후 냉각수 재킷에서 냉각                                                                                                                                 |
|      | 콜라겐 단백질                                       | • 지방을 초임계 추출장치에 투입하여 이산화탄소를 공급하여 압력 200~400 bar, 온도 20~50℃로 유지하여 콜라겐 추출                                                                                                                                         |
|      | 장점                                            | • 비교적 낮은 임계온도, 임계압력을 가지고 있어 다른 용매에 비해 추출이 용이<br>• 수 초~수 분 이내에 추출이 용이함<br>• 낮은 온도에서 가수분해되어 원물의 변화가 적음                                                                                                            |
|      | 단점                                            | • 물질의 용해가 떨어져 수율이 떨어짐                                                                                                                                                                                           |
|      | 태반 펩타이드                                       | • 태반을 적출 후 이물질 제거하고 70~100℃ 증류수에 40~80분 열처리한 후 분해효소를 첨가하여 태반을 가수분해                                                                                                                                              |
|      | 장점                                            | • 효소 작용에 있어 쓴맛, 냄새의 발생을 억제시키는 기술<br>• 장시간 고온처리를 하지 않아 각종 생리활성 물질을 보존할 수 있음<br>• 부패 미생물, 병원성 미생물의 세포막을 붕괴시켜 사멸<br>• 단백질 변성을 일으켜 영양소의 파괴를 최소화하여 안전하고 높은 품질 제공                                                     |
|      | 초고압 처리 (High hydrostatic pressure processing) | 대두 단백질                                                                                                                                                                                                          |
|      | 장점                                            | • 분리 강낭콩 단백질을 23℃ 200,400 및 600MPa에서 15분간 처리<br>• 단백질 형태 및 구조의 변화를 일으켜 질감과 맛 개선, 단백질 가수분해물, 기능적, 소화율 향상                                                                                                         |
|      | 단점                                            | • 식품 효소 및 박테리아 포자의 압력내성에 의해 비활성화를 위한 고압력 필요                                                                                                                                                                     |

그림 3. 아임계수 기술을 통한 대두 품종별 가수분해물 특성



출처: K. Ramachandraiah et al., 2017.

아임계수 가수분해 기술은 부산물 자원에서 가장 효과적인 가수분해 효율을 제공하고 있다. 특히, 가열만으로 식품 부산물을 가수분해하여 수 분 이내에 생리활성이 우수한 단백질, 섬유질 기반의 가수분해물을 제공하며, 효소 가수분해물에서 발생하는 쓴맛을 해결할 수 있는 장점도 있다(Lee et al., 2024). 또한 부산물의 원료별로 가수분해의 최적 조건을 찾아 생리활성 펩타이드 생산이 가능하며 아임계수 가수분해 기술은 세계적으로 주목을 받고 있는 신기술의 영역이다(Zhang et al., 2020).

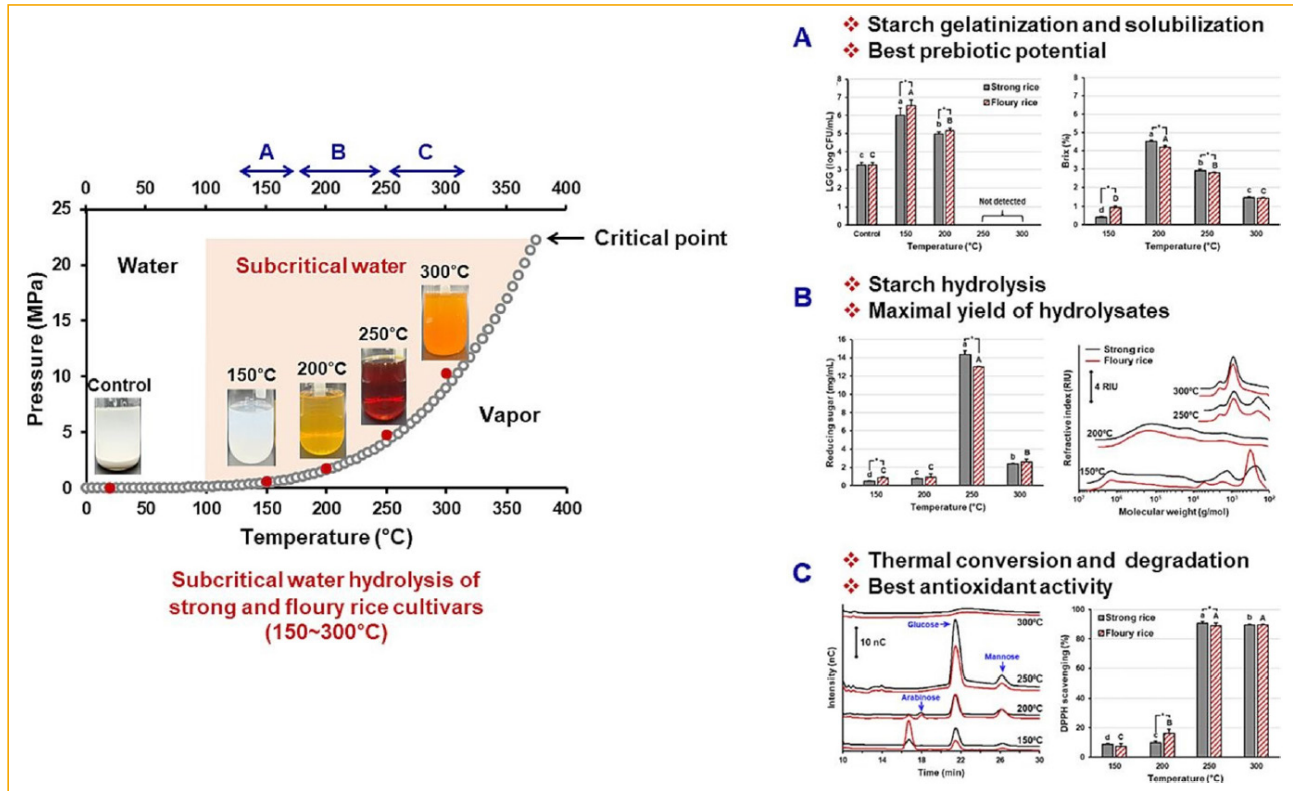
Rogalinski et al.(2005)은 290°C, 25 MPa, holding time 65 sec 아임계수 가수분해 처리를 통해 소 혈청 알부민에서 가장 높은 아미노산 함량을 보인다는 보고가 있다. 특히, 알라닌의 36.7%가 가수분해되어 있었고 최대 글리신 함량을 나타내며 알라닌 수율보다 글리신 수율이 높았다. Koh et al.,(2019)의 보고서에서도 280°C, 3.8 MPa, without holding time 아임계수 가수분해 처리에서 가장 높은 유리 아미노산 함량을 나타냈으며, 다량의 글리신과 알라닌 함량을 나타냈다는 보고가 있다. 아임계수 온도의 최대 아미노산 함량 차이는 장치의 성능과 holding time의 차이 때문에 발생하지만 온도의 큰 차이는 없었다. 특히 온도가 증가할수록 분자량의 변화는 분명하였으며 300°C의 처리에서는 아미노산의 더 많은 열적 변성으로 인해 가스로 분해되어 펩타이드 생산에는 좋지 않았지만 그 이하의 온도에서는 펩타이드를 생산하는 효과적인 기술임을 보여준다. 따라서 아임계수 가수분해 단계에서 식품 부산물의 공정 체계화 및 표준화가 가능하며, 기술의 통합을 통해 효과적인 식품 부산물 유래 생리활성 소재를 확보할 수 있다(그림 4).

## 5. 신기술의 기술적 한계와 발전 방향

초고압 기반 고압 효소 액화 기술의 연구 대부분은 효소 가수분해를 위한 전처리 공정으로서 효소와 기질을 100~300 MPa의 압력으로 최대 1시간 이내 처리한 연구가 대부분이며 고압 환경을 유지하여 효소 활성에 대한 연구는 전무한 실정이다. 하지만, 최근 식품 부산물에 대해 최대 24시간 고압 환경을 유지하여 효소 활성에 관한 연구가 진행됨에 따라 고압 효소 가수분해 공정을 적용한 단백질 기반 생리활성 펩타이드 생산에도 기대를 할 수 있으며(손창근 et al., 2023), 저비용 고효율 식품 부산물의 소재화가 가능하다.

아임계수 기술은 모두 단시간 내 처리하여 고효율의 장점이 있으나 모두 Lab-scale의 장비만으로 연구가 진행되어오고 있으며, 현재 보고된 아임계수 기술의 최대 처리 용량의 장비는 20 L 규모로 pilot-scale의 성능 평가 연구 수행 및 산업화가 어렵다(표 3). 이를 보완하기 위하여 최근에는 반연속 기술이 도입되어 가수분해에 소요되는 반응기 come-up time을 20분 내외로 단축시키고 있지만(Zhang et al., 2020), 여전히 장치의 scale-up에 관한 연구와 방안은 전무한 실정이지만 반연속 기술이 고도화되고 scale-up에 관한 연구가 꾸준히 이루어지면서 연속식 기술 개발로 선진화된 초격차 기술 확보와 동시에 아임계수 기술을 통한 저비용 고효율 생리활성 소재의 산업화에 기대를 할 수 있다.

그림 4. 아임계수 가수분해를 통한 쌀 가수분해물의 소재화 잠재력



출처: Lee et al., 2024.

표 3. 아임계수 가수분해 기술 현황

|       | 배치식                                                                                                                                                                                                                                | 배치식                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 배치식                         | 반연속식                         |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 처리 용량 | <p>1: Air Tank<br/>2: Pressure gauge<br/>3: Safety valve<br/>4: Electric heater<br/>5: High pressure reactor<br/>6: Impeller (stirrer)<br/>7: Cooling bath<br/>8: Separator<br/>9: Needle valve<br/>10: Temperature controller</p> | <p>Figure 1. Schematic diagram of subcritical water extraction system: (1) nitrogen cylinder; (2) manometer; (3) input gas valve; (4) thermometer for temperature measurement; (5) control air control valve; (6) extraction vessel; (7) heating system; (8) digital temperature controller; (9) main switch; (10) switch for the vibrating platform.</p> |                             |                              |
| 성능    | 용량: 150 mL<br>유지 압력: 1.3~6.0 MPa                                                                                                                                                                                                   | 용량: 1.7 L<br>유지 압력: 30 bar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 용량: 500 mL<br>유지 압력: 5 MPa  | 용량: 110 mL<br>유지 압력: 15 MPa  |
| 참고문헌  | Park, J. N et al., 2012                                                                                                                                                                                                            | Radovanović, K et al., 2023                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Alonso-Riaño, Pet al., 2023 | Sganzerla, W. G et al., 2022 |

### III. 결론

전세계적으로 발생하는 축산 부산물은 업사이클링 잠재력이 우수한 소재로서 환경적인 측면뿐만 아니라 기능

성 소재의 수입 의존도가 높은 우리나라에서 활용 가치가 높은 자원이다. 축산 부산물에는 다량의 단백질이 포함되어 있어 생리학적 기능이 높은 펩타이드 생산에 유리하다. 효소 공정의 효율을 개선하기 위한 많은 연구와 아임계



수 가수분해 기술의 적용은 축산 부산물 산업에 새로운 가능성을 제시할 수 있다. 효소의 긴 반응 시간과 낮은 수율 등의 문제로 인해 산업적으로 큰 비용과 어려움을 겪고 있으며 초고압을 활용하면 시간이 단축되며, 아임계수 가수분해 기술 적용을 통해 전처리 과정 없이 단시간에 생리활성 펩타이드 생산이 가능하다. 축산 부산물의 물리적 공정 적용은 산업적인 생산에서의 효율성과 경제성을 제고하는데 기여할 것으로 기대되며, 이를 통해 고효율이며 저비용의 국산 생리활성 펩타이드 소재 생산으로 식품 산업뿐만 아니라 제약 산업에도 잠재력을 가지고 있으며 산업적 scale-up에 관한 연속식 기술 개발에 관심이 집중될 것으로 예상된다.

## 감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: 2022R1A6A1A03055869)으로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김건남, 김민주, 윤선명, 권민주, 신동엽, 이학용, & 박영미. 2022. 돈태반 효소 가수분해물의 cyclophosphamide에 의한 면역 저하 동물 모델에 미치는 면역 증진 효과. 한국식품과학회지, 54, 2 : 155-162.
2. 손창근, 최은정, 류왕보 & 홍근표. 2023. 고압효소 배양이 경질미와 분질미의 가수분해 효율 및 가수분해물의 특성에 미치는 효과. 한국식품과학회지, 55, 4 : 378-383.
3. 이은지, 장영선, and 홍인기. 2023. 양태반 펩타이드 분말의 피부 보습 및 주름 개선 효과. 한국식품영양과학회지 52, 10 : 1013-1034.
4. 통계청. 2021년 양곡 소비량조사 결과(2022. 01. 27).
5. 한국육류유통수출협회.([http://www.kmta.or.kr/kr/data/stats\\_spend.php](http://www.kmta.or.kr/kr/data/stats_spend.php))
6. 한국농수산물유통공사. 2022년 10월 2주 식품시장 뉴스레터.
7. Alan Connolly, Charles O, Piggott, Richard J, FitzGerald. 2014. *In vitro*  $\alpha$ -glucosidase, angiotensin converting enzyme and dipeptidyl peptidase-IV inhibitory properties of brewers' spent grain protein hydrolysates. Food Research International 56 : 100-107.
8. Alonso-Riaño P, Ramos C, Trigueros E, Beltrán S, Sanz MT. 2023. Study of subcritical water scale-up from laboratory to pilot system for brewer's spent grain valorization. Industrial Crops and Products, 191 : 115927.
9. Banerjee, Pradipta C, Shanthi. 2012. Isolation of novel bioactive regions from bovine achilles tendon collagen

- having angiotensin I-converting enzyme-inhibitory properties. *Process Biochemistry* 47. 12 : 2335–2346.
10. Chun JY, Jo YJ, Min SG, Hong GP. 2014. Effect of high pressure on the porcine placental hydrolyzing activity of pepsin, trypsin and chymotrypsin. *Korean J. Food Sci. An.* 34 : 14–1
  11. Daoud R, Dubois V, Bors-Dodita L, Nedjar-Arroume N, Krier F, Chihib NE, Guillochon D. 2005. New antibacterial peptide derived from bovine hemoglobin. *Peptides*, 26, 5 : 713–719.
  12. Di Bernardini R, Harnedy P, Bolton D, Kerry J, O'Neill E, Mullen AM, Hayes, M. 2011. Antioxidant and antimicrobial peptidic hydrolysates from muscle protein sources and by-products. *Food Chemistry*, 124, 4 : 1296–1307.
  13. Faostat. 2021. Crops and livestock products. Retrieved from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Accessed July 5, 2–23.
  14. Honikel, Karl O. 2008. Composition and calories. *Handbook of processed meats and poultry analysis*. CRC Press. 211–230.
  15. Jayathilakan K, Sultana K, Radhakrishna K, Bawa AS. 2012. Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 49 : 278–293.
  16. Kulkarni VV, Devatkal S. 2015. Utilization of byproducts and waste materials from meat and poultry processing industry. *Meat Science*, 11, 1 : 1–10.
  17. Lafarga T, Aluko RE, Rai DK, O'Connor P, Hayes M, 2016. Identification of bioactive peptides from a papain hydrolysate of bovine serum albumin and assessment of an antihypertensive effect in spontaneously hypertensive rats. *Food Research International*, 81 : 91–99.
  18. Lasekan A, Bakar FA, Hashim D. 2013. Potential of chicken by-products as sources of useful biological resources. *Waste Management*, 33 : 552–565.
  19. Lee JW, Choi EJ, Ryu WB, Hong GP. 2024. Characterization of temperature-dependent subcritical water hydrolysis pattern of strong and floury rice cultivars and potential utilizations of their hydrolysates. *Food Chemistry*, 445 : 138737.
  20. Nan Wu, Yue Zhao, Yurong Wang, Quan Shuang. 2022. Effects of ultra-high pressure treatment on angiotensin-converting enzyme(ACE) inhibitory activity, antioxidant activity, and physicochemical properties of milk fermented with *Lactobacillus delbrueckii* QS306. *Journal of Dairy Science* 105 : 1837–1847.
  21. O'Sullivan, Siobhan M. 2017. Anti-proliferative activity of bovine blood hydrolysates towards cancer cells in culture. *International Journal of Food Science & Technology* 52. 4 : 1049–1056.
  22. Park JN, Ali-Nehari A, Woo HC, Chun BS. 2012. Thermal stabilities of polyphenols and fatty acids in *Laminaria japonica* hydrolysates produced using subcritical water. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 29 : 1604–1609.
  23. Radovanović K, Gavarić N, Švarc-Gajić J, Brezo-Borjan T, Zlatković B, Lončar B, Aćimović M. 2022. Subcritical water extraction as an effective technique for the isolation of phenolic compounds of *Achillea species*. *Processes*, 11, 1 : 86.
  24. Ramachandraiah K, Koh BB, Davaatseren M, Hong GP. 2017. Characterization of soy protein hydrolysates

produced by varying subcritical water processing temperature. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43 : 201–206.

25. Rival SG, Boeriu CG, Wichers HJ. 2001. Caseins and casein hydrolysates. 2. Antioxidative properties and relevance to lipoxygenase inhibition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 4 : 295–302.
26. Rogalinski T, Herrmann S, Brunner G. 2005. Production of amino acids from bovine serum albumin by continuous sub-critical water hydrolysis. *The Journal of Supercritical Fluids*, 36, 1 : 49–58.
27. Sganzerla WG, Viganó J, Castro LEN, Maciel-Silva FW, Rostagno MA, Mussatto SI, Forster-Carneiro T. 2022. Recovery of sugars and amino acids from brewers' spent grains using subcritical water hydrolysis in a single and two sequential semi-continuous flow-through reactors. *Food Research International*, 157 : 111470.
28. Zhang J, Wen C, Zhang H, Duan Y, Ma H. 2020. Recent advances in the extraction of bioactive compounds with subcritical water: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 95 : 183–195.