



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

가열처리 대두 두유의 기능성 변화와
이를 이용한 대두요거트 제조 특성



2025년 8월

국립부경대학교 글로벌수산대학원

식품산업공학과

박정민

공학석사학위논문

가열처리 대두 두유의 기능성 변화와
이를 이용한 대두요거트 제조 특성

지도교수 양지영

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2025년 8월

국립부경대학교 글로벌수산대학원

식품산업공학과

박정민

박정민의 공학석사 학위논문을 인준함

2025년 8월 22일



위 원 장 농학박사 조 승 목 ①

위 원 약학박사 김 영 목 ①

위 원 농학박사 양 지 영 ①

목 차

Abstract	iii
I. 서론	1
II. 실험 재료 및 방법	6
1. 실험 재료	6
2. 대두의 보관 및 세척	6
3. 대두의 가열 처리 조건 및 두유 제조	7
4. 유산균 음료 제조	8
5. 두유의 고형분 측정	8
6. 두유의 산가 과산화물가 측정	9
7. 두유의 구성아미노산 분석	10
8. 두유의 지방산 조성 분석	10
9. 두유, 유산균 음료의 pH 측정	11
10. 두유, 유산균 음료의 총 폴리페놀 및 총 플라보노이드 함량 측정	12
11. 두유, 유산균 음료의 항산화 활성 측정	12
12. 유산균 음료의 산도 측정	13
13. 유산균 음료의 유산균 수 측정	14
14. 유산균 음료의 관능평가	14
15. 통계 처리	15

Ⅲ. 결과 및 고찰	17
1. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 고형분 변화	17
2. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 pH 변화	20
3. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 지방 산패 변화	20
4. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 구성아미노산 변화	22
5. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 지방산 변화	24
6. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 총 폴리페놀 및 플라보노이드 변화	28
7. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 항산화 활성 변화	30
8. 발효 시간에 따른 유산균 음료 pH 변화	32
9. 발효 시간에 따른 유산균 음료 산도 변화	34
10. 발효 시간에 따른 유산균 음료 유산균 수 변화	36
11. 발효 시간에 따른 유산균 음료 총 폴리페놀 및 플라보노이드 변화	38
12. 발효 시간에 따른 유산균 음료 항산화 활성 변화	42
13. 대두기반 유산균 음료와 우유 유산균 음료의 관능 특성 비교	45
Ⅳ. 요약	48
Ⅴ. 참고문헌	50

Functional Changes in Soymilk Prepared from Heat-Treated Soybeans and Its Application to Soy Yogurt Production

Jung-Min Park

Department of Food Science and Engineering
Graduate School of Global Fisheries
Pukyong National University

Abstract

To identify optimal processing conditions for enhancing the functional and manufacturing properties of plant-based alternative milk and yogurt, changes in the functional components of soy milk prepared using soybeans (*Glycine max*) subjected to various heat treatment methods were investigated. By systematically analyzing the effects of these treatments on antioxidant compounds and fermentation efficiency, this study aimed to provide a scientific basis for the development of high-functional plant-based fermented beverages. The samples were divided into four groups: untreated, high-temperature dry-roasted, stepwise temperature-controlled dry-roasted, and wet heat-treated. Soy milk and yogurt produced from each group were evaluated for antioxidant activity (DPPH, ABTS), total polyphenol and flavonoid content, pH changes, titratable acidity, and viable lactic acid bacteria count.

As a result, dry-heat-treated groups exhibited higher antioxidant activity in both soy milk and yogurt compared to the wet-heat-treated group. This enhancement is attributed to the effective disruption of the soybean cell wall structure by dry heat, which facilitated the release of antioxidant compounds and created a more favorable substrate environment for lactic acid bacteria fermentation. Notably, soy milk prepared from stepwise temperature-controlled dry-roasted soybeans demonstrated superior functionality compared to that from

high-temperature dry-roasted soybeans. These findings suggest that dry heat treatment, especially with stepwise temperature control, can be a more effective approach than conventional wet heat treatment for producing high-functional plant-based fermented beverages and offer valuable insights for future product development and functional food research.



I. 서론

전 세계 식품산업은 현재 기후 변화, 소비자 가치관 변화, 그리고 윤리적 식품 소비 확대라는 복합적인 도전에 직면해 있다. 특히 축산업은 메탄과 아산화질소 등 강력한 온실가스의 주요 배출원으로 지목되며, 지구 온난화의 가속화에 직접적인 영향을 미치고 있다. 최근 유엔 식량농업기구(FAO)는 축산업이 전 세계 인위적 온실가스 배출의 약 12 ~ 16%를 차지하며, 이 중 소와 양 등 반추동물의 생산이 가장 큰 비중을 차지한다고 보고하였다(FAO, 2023).

반면, 식물성 기반 식품은 육류에 비해 온실가스 배출량이 현저히 낮고, 토지 및 수자원 사용량도 적어 지속 가능한 대안으로 주목받고 있다. 최근 발표된 연구에 따르면, 동물성 식품의 평균 온실가스 배출량은 식물성 식품보다 약 두 배 이상 높으며, 토지 사용량은 50 ~ 100배까지 차이가 나는 것으로 나타났다(Tubiello et al., 2021; Our World in Data, 2020). 이러한 배경은 단순한 환경적 고려를 넘어, 소비자들의 윤리적 가치 전환과 건강 지향적 식습관의 변화로 이어지고 있다. 특히 동물권 존중, 사육 환경에 대한 문제의식, 공장식 축산에 대한 비판 등이 결합 되며, 단순한 ‘고기 대체’를 넘어서 ‘윤리적 소비와 건강한 삶’을 위한 식물성 식품 선택이 확산되고 있다(Mintel, 2025). 이는 지속가능성이라는 전 지구적 아젠다와 함께, 식단이 개인 건강뿐 아니라 환경·공중보건에 미치는 영향을 고려하는 패러다임의 전환을 반영되고 있다(Springmann et al., 2023). 이러한 흐름 속에서 식물성 대체식품 시장은 전 세계적으로 급성장하고 있다. 시장 조사에 따르면, 전 세계 식물성 식품 시장 규모는 2022년 기준 약 400억 달러에 달하며, 2030년까지 1,600억 달러 이상으로 성장할 것으로 예측이 보고되었다.(Statista, 2024). 기존 유제품 및 육류 제조 기업들도 이러한 변화에 적극 대응하며, 식물성

제품군 확장에 참여하고 있다. 이는 단순한 일시적 트렌드가 아니라, 기후 위기 대응 및 지속 가능한 식생활로의 구조적 전환이 이루어지고 있는 신호라 할 수 있다. 따라서 식품공학 및 식품 가공 분야에서도 지속가능성을 고려한 원료 선택, 기능성과 영양학적 가치가 뛰어난 식물성 소재 개발, 그리고 제조 공정의 효율화는 핵심 연구 주제로 부상하고 있다. 이는 미래 식품 시스템 구축을 위한 과학적·기술적 기반 마련이라는 점에서 그 의미가 크다(Good Food Institute, 2021). 식물성 원료를 이용한 식품은 탄소발자국을 줄이고, 식물 기반 자원의 재활용을 통해 지속 가능한 식품 시스템 구현에 기여할 수 있다(Peydayesh et al., 2021) 이에 따라 현대 사회에서는 고령화, 만성질환 증가, 그리고 웰빙 트렌드 확산에 따라 건강을 중시하는 식물성 대체식품 섭취 패턴이 급속히 보편화되고 있다. 개인의 건강 증진과 질병 예방을 목적으로 기능성 식품 및 식물성 기반 대체식품에 대한 소비자들의 관심이 꾸준히 증가하는 추세를 보이고있다(Sharma et al., 2024). 현대 식품산업은 건강, 환경, 식이 제한을 고려한 대체식품 개발의 필요성에 직면하고 있다. 특히 유당 불내증이나 우유 단백질 알레르기 등으로 인해 유제품 섭취에 제약을 받는 인구가 증가하고 있으며, 전 세계 인구의 약 65% 이상이 어느 정도 유당불내증을 경험한다고 보고된다(Narang & Pilyugin, 2007). 이러한 상황은 식물성 대체 음료, 특히 유산균 발효를 통한 기능성 식물성 음료 개발의 관심을 증가시키고 있다.

특히 대두(Soybean)는 풍부한 영양성분과 기능성 물질을 동시에 함유하고 있어 식물성 대체식품 개발에 있어 핵심적인 원료로 자리매김하고 있다. 대두는 고품질 식물성 단백질의 공급원일 뿐만 아니라, 이소플라본, 식이섬유, 사포닌 레시틴 및 다양한 항산화 물질과 같은 생리활성 성분을 다량 포함하고 있다(Xie et al., 2023). 특히 이소플라본은 식물성 에스트로젠으로서 체내에서 에스트로젠 수용체에 작용하여 항산화, 항염증, 심혈관 질환 예방 등

다양한 건강상 이점을 제공하는 것으로 보고되고 있다(Udayakumar et al., 2022). 이외에도 대두 유래 항산화 물질은 활성산소종 제거를 통해 세포 손상 방지 및 노화 억제에 기여할 수 있어 건강기능식품 및 기능성 음료의 주요 소재로 각광받고 있다. 항산화 물질은 체내 활성산소로 인한 산화적 스트레스를 억제함으로써 노화 방지, 항염증, 항암 등의 다양한 생리활성 기능을 수행한다(Udayakumar et al., 2022). 이에 따라 대두 유래 항산화 성분의 활성도를 극대화하여 건강 기능성을 높이는 기술 개발이 매우 중요해지고 있다. 그러나 대두의 생리활성 물질은 생체이용률이 낮거나, 열이나 가공 과정 중 손실될 위험이 존재한다는 문제가 있다(Peirutén et al., 2022). 따라서 대두에 포함된 주요 항산화 물질을 안정화 시키고 기능성을 극대화하기 위한 효과적인 전처리 기술에 대한 연구가 요구된다. 최근에는 전통적인 가열법 외에도 건식 가열처리와 같은 비정형 열처리 기술이 주목받고 있다. 건식 가열처리는 식품에 수분 없이 고온을 가하는 열처리 방법으로, 기존의 수분 가열법보다 식품의 물리적, 화학적 특성을 보다 세밀하게 제어할 수 있다는 장점이 있다(Sharma et al., 2024). 특히 대두에 건식가열을 적용하면, 이소플라본과 같은 폴리페놀계 항산화 성분이 열에 의해 구조적 변화를 겪어 항산화 활성이 증가하는 경향을 보인다(Tong et al., 2024). 건식가열 중에 발생하는 Maillard 반응은 새로운 항산화 능력을 가진 화합물을 생성할 뿐만 아니라, 기존 대두 성분의 기능성을 강화시키는 역할을 한다(Udayakumar et al., 2022). 또한 이 과정은 비효소적 갈변 반응을 유도하여 관능적 특성(색, 맛)을 개선할 수 있다는 장점도 있다(Rasika et al., 2021). 건식 가열처리한 대두 음료의, 플라보노이드 함량 및 총 항산화 능력이 유의미하게 증가함을 보고하였다(Peirutén et al., 2022). 이러한 결과는 건식 가열이 대두 기반 식품의 건강 기능성 향상에 있어 매우 유망한 기술이라고 판단되었다.

식물성 대체 유산균 음료는 기존의 유제품 기반 발효 음료(요거트, 요구르

트 등)에 비해 다양한 장점을 가지고 있다. 특히 유당불내증 환자, 비건 소비자, 심혈관 질환 예방을 지향하는 사람들에게 대체 음료로 인기를 끌고 있다 (Xie et al., 2023; Cichońska & Ziarno, 2021). 대두는 발효 기질로서도 매우 적합하다. 고단백, 고이소플라본 함량으로 인해 프로바이오틱스 (Lactobacillus, Bifidobacterium 등) 성장에 유리한 환경을 제공하며, 발효 과정 중 향산화 활성 증가와 같은 부가적 기능을 부여할 수 있다(Sharma et al., 2024). 특히 대두 기반 음료에 유산균을 접종하여 발효할 경우, 일반적인 우유 발효보다 더 높은 향산화 활성과 생균수 유지 능력을 가진다 (Rasika et al., 2021). 하지만 기존 대두 음료의 한계점으로는 비린 맛 문제, 항영양소 존재, 발효 후 관능적 품질 저하 등이 지적되어 왔다. 이를 극복하기 위해 건식가열처리와 같은 전처리 기술이 함께 적용되면서, 기호성과 기능성을 동시에 향상시키는 방법이 연구되고 있다(Tong et al., 2024). 현재까지 대두의 기능성 성분을 강화하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔으나, 전처리 조건(온도, 시간)에 따른 향산화 물질의 변화와 발효 후 품질 특성까지 통합적으로 분석한 연구는 매우 제한적이다. 특히, 건식 가열 처리에 따른 향산화 활성 증진 효과와 이를 기반으로 한 식물성 유산균 음료 개발을 연계한 체계적인 접근이 부족한 실정이다. 이에 따라, 향산화 기능성 향상과 발효 적합성을 동시에 고려한 가공 조건을 제시할 수 있는 연구가 필요한 상황이다.

현재 대부분의 대두 음료 제조는 대부분 습식공정을 기반으로 하며, 대두를 24시간 불려 가열한 후 마쇄하고 여과, 살균 등의 복잡한 단계를 포함해 에너지 소비 증가 및 생산 효율 저하라는 한계를 가진다. 이에 따라 건식 가열처리를 통해 대두의 향산화 성분 증진과 함께 공정 단순화 및 생산성 향상을 시도하고자 하며 건식 가열처리를 적용한 대두의 향산화 활성 변화를 분석하고, 이를 이용하여 유제품 대체 가능한 식물성 유산균 발효음료를 개발

하고자 한다. 이를 통해 기능성, 지속가능성, 제조 효율성을 모두 고려한 식물성 발효 식품의 개발 가능성을 탐색하고자 한다.

따라서, 건식 가열 처리된 대두로부터 제조한 두유의 항산화 활성 및 기능적 특성을 분석하고, 이를 기질로 활용하여 유산균 발효 음료를 제조한 후, 발효 전후의 항산화 활성, pH 변화, 유산균 수 변화 및 관능적 특성 등을 기존의 습식 가열 처리 두유 기반 음료와 비교하고자 한다. 이를 통해 건식 가열 전처리가 대두 기반 식물성 유산균 음료의 기능성 향상 및 발효 적합성에 미치는 영향을 과학적으로 검증하고, 기능성 · 지속가능성을 동시에 갖춘 식물성 발효 식품 개발의 가능성을 모색하고자 한다.



II. 실험 재료 및 방법

1. 실험 재료

대두는 2024년 10월에 수확된 ‘대립종’ 품종의 국산 콩으로, 경상남도 사천시 콩사랑 농가에서 재배된 것을 2024년 5월에 오프라인으로 직접 구매하였다. 수확 후 실온에서 보관하였으며, 실험에 앞서 수세척하여 전처리에 사용하였다.

발효종균은 이탈리아 Sacco System사(Cadorago, Italy)의 동결건조 복합 스타터인 LYOFASST SYAB 1을 온라인에서 구매하여 사용하였다. 본 스타터는 *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, *Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis*를 포함하고 있으며, 제조사 기준으로 총 유산균 수는 1×10^{11} CFU/g 이상인 제품을 사용하였다.

2. 대두의 보관 및 세척 방법

대두는 입고 후 실온에서 보관된 것을 원료로 하였으며, 식품가공 제품의 원료 및 첨가물로 사용하기 위해 전처리하였다. 전처리 과정은 대두 선별 후 곡물세척기(Wonder Washer, WineKIT, Korea)를 이용하여 세척하는 단계로 구성되었다. 세척은 10°C의 정제수 5 L를 사용하여 약 3분간 수행하였으며, 세척 후 표면 수분을 제거한 뒤 다음 단계로 진행하였다.

3. 대두의 가열 처리 조건 및 두유 제조

대두에 총 네 가지의 열처리 조건을 적용하여 두유를 제조하였다. 무처리군(UN, untreated)은 열처리 과정을 거치지 않은 생 대두를 사용하였으며, 10℃의 정제수에 16시간 동안 침지 한 후, 침지 된 대두 100 g과 정제수 500 g을 혼합하여 오토펄스 믹서(HPM-820, Hanil Electric Co., Ltd., Seoui, Korea)를 이용해 마쇄하고 여과하여 얻은 액상을 시료로 사용하였다. 건식 가열 처리군은 대두를 곡물볶음기(통돌이 전기 볶음솥, Taekwang F.M.P, Daegu, Korea)를 이용하여 180℃에서 10분간 가열한 후, 150℃로 낮춰 추가로 10분간 가열하는 단계적 온도 조절 건식 가열 처리와, 180℃에서 연속 20분간 가열하는 고온 건식 가열 처리로 구분하였다. 각각의 열처리된 대두는 분쇄기(DSCH-22000, Duksan Co., Ltd., Siheung, Korea)를 이용해 120 mesh 크기로 분쇄하여 STDSP (stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy powder) 및 HDSP(high temperature dry-roasted soy powder)로 제조하였다. 이들 분말 100 g을 정제수 500 g과 혼합 및 교반 한 후 80 mesh 체로 여과하고, 100℃에서 30분간 가열 살균한 뒤 오토펄스 믹서(HPM-820)로 균질화하여 각각 STDSM (stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk) 및 HDSM (high temperature dry-roasted soy milk) 시료로 제조하였다. 습식 가열군은 무처리군과 동일하게 10℃ 정제수에 16시간 동안 침지한 후, 침지된 대두 100 g과 정제수 500 g을 함께 마쇄하고, 혼합물을 100℃에서 10분간 가열한 뒤 80 mesh 체로 여과하였다. 여과된 액상은 다시 100℃에서 30분간 가열 살균 후, 균질화하여 WHSM (wet heat-treated soy milk) 시료로 제조하였다.

4. 유산균 음료 제조

제조된 세 가지 두유 시료(STDSM, HDSM, WHSM)는 유산균 발효를 통해 기능성 음료로 가공되었다. 발효에 사용된 스타터는 상업용 혼합 유산균 제제인 SYAB 1 (Sacco S.r.l., Italy)이며, 각 시료에 대해 최종 부피 기준 0.1% (v/v)의 농도로 접종하였다. 이후, 43℃에서 9시간 동안 항온배양기(BF-150IN, BioFree Co., Ltd., Seoul, Korea)를 이용하여 발효를 진행하였으며, 발효가 종료된 시료는 실온에서 냉각한 후 후속 분석에 활용하였다.

발효 시료는 사용된 두유의 열처리 조건에 따라 다음과 같이 구분된다. STDSM 사용한 발효 음료는 STDSY (stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk + SYAB 1)로, HDSM를 사용한 경우는 HDSY (high temperature dry-roasted soy milk + SYAB 1)로, 그리고 WHSM를 이용한 발효 음료는 WHSY(wet heat-treated soy milk + SYAB 1)로 명명하였다. 또한, 발효 시간 경과에 따른 항산화 활성 변화를 평가하기 위해, 발효 개시 후 0시간, 3시간, 6시간, 9시간, 24시간 시점에서 각 시료를 채취하여 분석에 활용하였다.

5. 두유의 고형분 측정

고형분 함량은 AOAC 공식 방법 925.23 (AOAC, 2005)을 일부 변형하여 측정하였다. 각 시료 3 ~ 5g을 알루미늄 접시에 정량하여 담은 후, 항온건조기(WFO-600SD, EYELA, Rikakikai Co., Ltd., Tokyo, Japan)를 이용하여 105℃에서 16시간 이상 건조하였다. 건조 후에는 진공 데시케이터

(Vacuum Desiccator, Sanplatec Corp., Osaka, Japan)에서 실온으로 냉각시킨 뒤 잔류 고형분의 무게를 측정하였다. 고형분 함량은 전체 시료 대비 잔류 고형분의 비율(%)로 계산하였으며, 실험은 3회 반복하여 수행하였다.

6. 두유의 산가 과산화물가 측정

산가는 식품공전(MFDS, 2019)에서 제시한 지질 품질 분석법에 따라 측정하였다. 건조된 시료 5~10 g을 에탄올:에테르 혼합용액(1:2, v/v) 100 mL에 녹인 후, 1% 페놀프탈레인 에탄올 용액을 지시약으로 첨가하였다. 이후 0.1 N KOH 용액으로 적정하였으며, 옅은 분홍색이 30초 이상 유지되는 시점을 종말점으로 판단하였다. 지방산가는 다음과 같은 식을 이용하여 mg/g 단위로 계산하였으며, 모든 실험은 3회 반복하여 수행하였다.

$$\text{산가}(mgKOH/g) = (V \times N \times 56.1) \div W$$

V: 적정에 사용된 KOH 용액의 부피(mL)

N: KOH 용액의 농도(N)

W: 시료의 무게(g)

56.1: KOH의 분자량

과산화물가는 지방의 1차 산화 산물인 과산화물의 양을 측정하기 위해 AOCS 공식 방법(AOCS Cd 8b-90)을 일부 변형하여 분석하였다. 시료 5 g을 정확히 칭량하여 혼합 용매(빙초산:클로로포름= 3:2, v/v) 30 mL에 용해한 후, 포화된 KI 용액 0.5 mL를 첨가하여 암실에서 1분간 반응시켰다. 이후 증류수 30 mL와 전분 지시약을 첨가한 뒤, 0.01 N Na₂ S₂ O₃ 용액

으로 적정하여 엷은 청색이 소실되는 시점을 종말점으로 판단하였다. 과산화물가는 아래 식을 이용하여 meq/kg 단위로 계산하였다.

$$PV(\text{meq/kg}) = ((S - B) \times N \times 1000) / W$$

S: 시료 적정에 사용된 $\text{Na}_2 \text{S}_2 \text{O}_3$ 의 부피(mL)

B: 공시험에 사용된 $\text{Na}_2 \text{S}_2 \text{O}_3$ 의 부피(mL)

N: $\text{Na}_2 \text{S}_2 \text{O}_3$ 의 노르말농도(N)

W: 시료의 무게(g)

7. 두유의 구성아미노산 분석

구성 아미노산 분석은 식품공전에 제시된 방법을 기반으로 분석하였다(MFDS, 2024). 균질화된 시료 10 mg을 6N HCl 10 mL에 넣은 후, 110°C에서 24시간 가수분해하였다. 가수분해된 용액은 40°C에서 감압건조시킨 후, sodium citrate buffer (pH 2.2)를 이용하여 최종 부피를 50 mL로 정용하였으며, 0.20 μm membrane filter로 여과하여 아미노산 분석용 시료로 사용하였다(White et al., 1986). 구성 아미노산은 이온교환 크로마토그래피 방식의 아미노산 자동 분석기(L-8900, Hitachi, Tokyo, Japan)와 이온교환 컬럼(#2622SC-PH, Hitachi, Tokyo, Japan)을 이용하여 분석하였다.

8. 두유의 지방산 조성 분석

시료의 지방산 조성 분석은 식품공전에 제시된 지방산 메틸에스테르화

후 gas chromatography with flame ionization detector (GC-FID) 분석법에 따라 분석하였다(MFDS, 2024). 약 50~100 mg의 지방이 포함된 균질화한 땅콩 시료에 내부표준용액(undecanoic acid methyl ester) 1 mL와 pyrogallol 50 mg을 첨가하였다. 시료에 ethanol 1mL와 8.3M HCl 5 mL를 첨가한 후, 70~80°C의 수조에서 40분간 산분해를 수행하였다. 분해가 완료된 시료에 ethanol 2 mL를 추가하고, diethyl ether 12.5 mL와 anhydrous petroleum ether 12.5 mL를 이용하여 추출하였다. 추출된 지방산은 7% BF₃-methanol 용액을 이용하여 메틸에스터화한 후, GC-FID 방식으로 분석하였다. 분석에는 SP-2560 capillary column (100 m × 0.25 mm × 0.2 μm)이 장착된 Shimadzu GC-2010 (Shimadzu Corp., Kyoto, Japan) 장비를 사용하였다. 주입량은 1.0 μL, 주입 온도는 225°C였으며, 분할비는 200:1로 설정하였다. 오븐 온도 프로그램은 100°C에서 4분 유지 후, 240°C까지 3°C/min의 속도로 승온하고 최종 온도에서 15분 이상 유지하였다. 운반기체로는 He를 사용하였으며, 유속은 0.75 mL/min로 설정하였다. 각 지방산의 함량은 탄소수 4에서 24까지의 지방산 메틸에스터(FAME) 표준물질 37종을 이용하여 GC-FID 시스템의 변환 계수를 구한 뒤, 지방산 메틸에스터의 함량을 지방산 함량으로 환산하여 산출하였다.

9. 두유, 유산균 음료의 pH 측정

pH는 전극식 pH meter (PB-10, Sartorius, Bohemia, NY, USA)를 이용하여 측정하였다. 모든 시료는 3회 반복 측정하여 평균값으로 결과를 제시하였다. pH meter는 측정 전 pH 4.00 및 pH 7.00의 표준 완충용액을 이용하여 2점 교정을 수행하였다.

10. 두유, 유산균 음료의 총 폴리페놀 및 총 플라보노이드 함량 측정

총 폴리페놀 함량은 Folin-Ciocalteu 방법(Singleton & Rossi, 1965)을 약간 변형하여 측정하였다. 시료 추출액 0.2 mL에 Folin-Ciocalteu 시약 1.0 mL을 첨가한 뒤, 3분간 반응시켰다. 이후 7.5% NaCO₃ 용액 0.8 mL를 가하여 혼합한 후, 암소 조건에서 실온에서 30분간 반응시켰다. 반응 완료 후 혼합물의 흡광도를 765 nm에서 분광광도계(Spectrophotometer, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA)를 이용하여 측정하였다. 총 폴리페놀 함량은 gallic acid를 표준물질로 사용하여 작성한 표준곡선으로부터 산출하였으며, 결과는 mg/L으로 환산하여 나타내었다.

총 플라보노이드 함량은 Moreno et al. (2000)의 방법을 약간 변형하여 분석하였다. 시료 추출액 0.5 mL에 증류수 1.5 mL와 5% NaNO₂ 용액 0.1 mL를 가하여 혼합하고, 5분간 반응시킨 후 10% AlCl₃ 용액 0.1 mL를 첨가하였다. 다시 6분간 반응시킨 뒤 1 M NaOH 용액 1.0 mL와 증류수를 첨가하여 최종 부피를 5 mL로 맞추고 잘 혼합하였다. 혼합 용액의 흡광도는 510 nm에서 측정하였으며, 총 플라보노이드 함량은 quercetin을 표준물질로 한 표준곡선을 기준으로 산출하였다. 결과는 mg/L로 나타내었다.

11. 두유, 유산균 음료의 항산화 활성 측정

1. 1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) 라디칼 소거 활성은 Sharma와 Bhat (2009)의 방법을 일부 수정하여 측정하였다. DPPH (0.078 g)를

1 L 메탄올에 용해하였다. 시료(100 μ L)와 DPPH 용액 100 μ L를 96-well plate의 각 well에 첨가한 후 35°C의 암실에서 30분 동안 방치하였다. 흡광도는 micro plate reader를 사용하여 517 nm에서 측정하였다. 음성 대조군으로는 시료와 동일한 양의 메탄올을 사용하였고, 양성 대조군으로는 메탄올에 용해된 아스코르브산(100 ppm)을 사용하였다. 시료는 1/100로 희석되었으며, DPPH 라디칼 소거 활성(%)은 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{Radical scavenging activity (\%)} = \frac{\text{Absorbance}(\text{blank}) - \text{Absorbance}(\text{test})}{\text{Absorbance}(\text{blank})} \times 100$$

ABTS 라디칼 소거능은 Re et al. (1999)의 방법을 일부 변형하여 측정하였다. 먼저 7.4 mM ABTS 용액과 2.6 mM potassium persulfate를 혼합하여 암소에서 12~16시간 반응시켜 ABTS 라디칼을 형성하였다. 생성된 ABTS 라디칼 용액은 에탄올로 희석하여 흡광도 0.700 ± 0.020 (734 nm)으로 조정하였다. 이후 시료 추출액 200 μ L와 조정된 ABTS 용액 2 mL를 혼합하여 실온에서 암소 반응시킨 후, 6분 이내에 흡광도를 734 nm에서 측정하였다. 시료의 ABTS 라디칼 소거능은 대조구 대비 흡광도 감소율(%)로 계산하였으며, 실험은 3회 반복하였다.

12. 유산균 음료의 산도 측정

산도는 식품공전(MFDS, 2024)의 분석법에 따라 중화적정을 통해 측정하였다. 각 시료 10 mL에 증류수를 가하여 총 부피를 50 mL로 조정한 후, 0.1 N NaOH 용액을 사용하여 적정하였다. 이때 지시약으로 1% 페놀프탈레인 용액을 첨가하였으며, 연한 분홍색이 30초 이상 지속되는 시점

을 종말점으로 판단하였다. 산도는 젖산으로 환산하여 아래 식을 통해 산출하였으며, 모든 시료는 3회 반복 측정하여 평균값을 사용하였다.

$$\text{산도}(\%) = (V \times N \times f \times 100) \div W$$

V: 적정에 사용된 NaOH의 부피 (mL)

N: NaOH의 농도 (N)

f: 환산계수 (젖산의 경우 0.09)

W: 시료의 시료량 또는 시료의 총 부피 (mL 또는 g)

13. 유산균 음료의 유산균 수 측정

유산균 수는 평판배양을 이용하여 측정하였다. 시료 1 mL을 무균적으로 채취한 후, 0.85% 생리식염수를 사용하여 10배 계열 희석을 수행하였다. 각 희석액 1 mL을 MRS 배지(de Man, Rogosa, and Sharpe agar; BD Difco™, Sparks, MD, USA)가 담긴 펠트리디시에 도말하였으며, 항온배양기(BF-150IN)를 이용하여 37℃에서 48시간 동안 배양하였다. 배양 후 형성된 유산균 집락(colony)을 계수하여, 유산균 수는 colony forming units per milliliter (CFU/mL)로 산출하였다. 모든 시료는 3회 반복 측정하였으며, 결과는 평균값을 구한 뒤 결과값을 표기하였다.

14. 유산균 음료의 관능평가

관능평가는 식품 관능검사 경험이 있는 훈련된 패널 21명(남성 10명, 여

성 11명)을 대상으로 수행하였다. 패널은 모두 20세에서 60세 사이의 성인
으로 구성되었으며, 실험 참여에 대한 동의를 받은 후 실험에 참여하였다.
시료는 제조된 유산균 음료 중 발효 조건별 대표 제품을 선정하여 사용하
였으며, 각 시료는 무작위 번호(random code)를 부여한 뒤 동일한 무색
투명 용기에 담아 10℃로 냉장시킨 후 제공하였다. 관능평가는 개별 평가
부스에서 독립적으로 실시되었으며, 시료 제공 간에는 미온수로 구강을 세
척하여 이전 시료의 영향이 최소화되도록 하였다. 평가 항목은 외관, 향,
맛, 점도, 전반적인 기호도(total acceptability)의 총 5개 항목으로 구성되
었으며, Table 1에 나타내었다. 각 항목은 9점 척도법(1점: 매우 나쁨 ~
9점: 매우 좋음)을 사용하여 평가하였다. 모든 결과는 평균값을 기준으로
분석하였다.

15. 통계 처리 통계분석

SPSS 프로그램(version 27, SPSS Inc. Chicago, IL, USA)을 이용하여
분산분석(ANOVA)을 실시하였다. 모든 결과의 평균값 간의 유의성은 $p <$
0.05 수준으로 Tukey의 다중범위 검정을 하였다.

Table 1. Sensory Evaluation Form

Sample	Appearance	Color	Flavor	Taste	Texture	Overall Preference	Comments

Date: _____ Evaluator: _____ Panel No.:

Instructions:

Please evaluate each sample based on the given attributes and mark the corresponding score.

Use the 4-point scale to indicate your preference (4 = Like very much, 1 = Dislike very much).

*The score reflects only your personal preference and there are no correct or incorrect answers.

*Please fill out the form honestly based on your individual judgment.

*If you have any opinions, please write them in the comments section.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 고형분 변화

고형분 함량은 상압 가열 건조법을 이용하여 측정하였으며, 시료는 파우더 형태와 두유 완제품 형태로 구분하여 분석하여 Table 2에 나타내었다. 파우더와 완제품 형태의 외관은 각각 Fig. 1에 나타내었다. 무처리군(UN)의 파우더 형태 고형분 함량은 91.97%로 나타났으며, 이는 생 대두를 단순 분쇄한 상태로 수분 손실이 거의 없는 특성을 반영한 결과로 판단되었다. 건식 가열 처리된 시료인 STDSP와 HDSP는 각각 97.68%, 97.4%의 고형분 함량을 보여, 열처리에 따라 수분이 거의 제거된 상태임을 확인할 수 있었다. STDSM, HDSM의 고형분 함량은 각각 10.9% 및 9.8%로 나타났으며, 두 시료 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다($p > 0.05$). 한편, 습식 가열 처리군(MHT)의 경우에는 대두를 침지 후 직접 마쇄하는 공정을 거쳐 제조되므로, 파우더 상태의 고형분 측정이 불가능하였다. 이에 따라 MHT는 두유 형태에서만 고형분 함량을 측정하였고, 그 수치는 10.09%로 나타나 STDSM 및 HDSM과 유사한 수준이었다($p > 0.05$). 이러한 결과를 바탕으로, 고형분 함량의 차이에 따른 영향을 최소화하고 열처리 조건 자체의 영향을 명확히 비교하기 위하여, 유의한 차이가 없는 고형분 함량 조건(STDSM, HDSM, MHTSM)을 기준으로 후속 두유 품질 분석을 진행하였다.

Table 2. Solid content measurement of soy milk prepared using soybeans processed under various heat treatment.

Powder	Solid content	Soy milk	Solid content
UN ¹⁾	91.97 ± 0.26 ^{b2)}	-	-
STDSP	97.68 ± 0.03 ^a	STDMSM ³⁾	10.90 ± 0.12 ^a
HDSP	97.40 ± 0.12 ^a	HDSM	9.80 ± 0.06 ^b
-	-	WHSM	10.09 ± 0.19 ^b

¹⁾ UN, untreated; STDSP, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy powder; HDSP, high temperature dry-roasted soy powder.

²⁾ Mean and standard deviation with different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

³⁾ STDMSM, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk; HDSM, high temperature dry-roasted soy milk; WHSM, wet heat-treated soy milk.



Fig. 1. Morphological comparison of soybeans and soymilk products processed under different heat treatment. (i) UN, untreated, (ii) STDSP, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy powder, (iii) HDSP, high temperature dry-roasted soy powder, (iv) WHSM, wet heat-treated soy milk, (v) STDSM, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk, (vi) HDSM, high temperature dry-roasted soy milk

2. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 pH 변화

대두 열처리 조건에 따른 두유의 pH를 측정한 결과는 Table 3에 나타내었다. STDSM이 6.60 ± 0.01 로 가장 높은 값을 보였으며 이어서 HDSM (6.51 ± 0.01), WHSM (6.30 ± 0.00), UN (6.22 ± 0.01) 순으로 확인되었다. 이러한 차이는 열처리 조건에 따라 두유 내 산-염기 균형에 영향을 미치는 유기산의 생성, 분해 또는 손실 정도가 다르게 나타났기 때문으로 해석된다. 특히 STDSM과 HDSM에서 상대적으로 높은 pH가 나타난 것은, 고온의 건식 가열 과정 중 휘발성 유기산이 증발하거나 산성 성분이 열분해 되면서 두유의 완충 능력이 증가 하였기 때문으로 판단된다(Kwon et al., 2016; Yuan et al., 2008; Doblado et al., 2003). 또한, 단백질의 구조적 변성이 일어나면서 산-염기 반응에 대한 저항성이 증가한 것도 영향을 준 것으로 보이며(Park et al., 2020), 특히 HDSM은 고온 연속 가열로 인해 소수성 상호작용이 강화되어 완충 특성이 더욱 증대되었을 가능성이 제기된다(Kwon et al., 2016). 반면, 무처리군인 UN은 가열에 의한 화학적 변화가 일어나지 않아 상대적으로 낮은 pH를 유지하였다. WHSM의 경우는 수분이 포함된 열처리 과정에서 수용성 유기산이나 저분자 성분이 용출되어 손실되었기 때문에 pH가 낮아진 것으로 해석된다. 실제로 습열 처리 중 단당류와 유기산이 쉽게 용매로 확산되어 제거되는 경향은 선행 연구에서도 보고된 바 있다(Xu & Chang, 2008; Liu, 1997).

3. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 지방 산패 변화

대두 열처리 조건에 따른 두유의 지방 산패 변화를 평가하기 위해 산가

Table 3. pH measurement of soy milk prepared using soybeans processed under various heat treatment.

Sample	pH
UN ¹⁾	6.22 ± 0.01 ^{d2)}
STDMSM	6.60 ± 0.01 ^a
HDSM	6.51 ± 0.01 ^b
WHSM	6.30 ± 0.00 ^c

¹⁾ UN, untreated; STDMSM, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk; HDSM, high temperature dry-roasted soy milk; WHSM, wetheat-treated soy milk.

²⁾ Mean and standard deviation with different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

와 과산화물가를 각각 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 산가는 자유지방산의 축적 정도를, 과산화물가는 지질 산화의 초기 산물인 과산화물의 축적 수준을 반영하는 지표로, 두 지표 모두에서 시료 간 유의적인 차이($p < 0.05$)가 확인되었다.

HDSM는 산가(1.30 ± 0.00 mg/g)와 과산화물가(5.20 ± 0.20 meq/kg) 모두에서 가장 높은 값을 기록하였는데, 이는 고온 건식 조건에서 불포화지방산의 산화 반응이 활발히 일어나고, 동시에 공기 노출 및 지질 구조 변성에 의해 산화가 가속화되었기 때문으로 해석된다 (Xu et al., 2020). 반면, STDSM는 산가(0.76 ± 0.02 mg/g)와 과산화물가(3.93 ± 0.11 meq/kg) 모두에서 중간 수준을 나타내었으며, 단계적인 온도 조절을 통해 과도한 산화를 방지하면서도 지질안정성을 일정 부분 유지한 것으로 보인다. WHSM는 산가(0.66 ± 0.01 mg/g)는 비교적 낮았으나 과산화물가(3.86 ± 0.11 meq/kg)는 STDSM과 유사한 수준으로, 이는 수분 환경에서 일부 산화가 억제되었으나, 지질의 부분적인 가수분해가 산가에 영향을 준 것으로 추정된다. 또한, 습식 조건은 수분과 성분 용출에 의해 지질안정성에 긍정적·부정적 영향을 동시에 줄 수 있다.

UN은 산가(0.46 ± 0.00 mg/g) 및 과산화물가(1.86 ± 0.11 meq/kg) 모두 가장 낮은 값을 나타내어, 가열 처리에 의한 지질 산패가 거의 발생하지 않았음을 보여준다. 이러한 결과는 대두의 열처리 방식이 두유 내 지질 산패에 복합적으로 영향을 미치며, 특히 고온 건식 처리 조건이 산화 반응을 가장 크게 유도하는 반면, 단계적 온도 조절 처리나 습식 처리 조건은 산패를 일정 부분 억제할 수 있을 것으로 판단되었다(Xu et al., 2020).

4. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 구성아미노산 변화

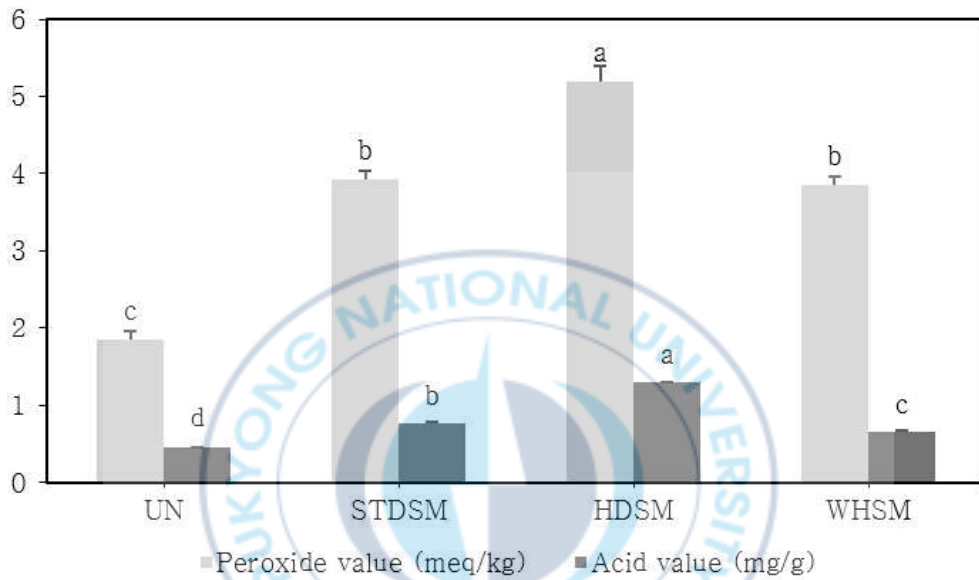


Fig. 2. Acid value and peroxide value measurement of soy milk prepared using soybeans processed under various heat treatment. The different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). UN, untreated; STDSM, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk; HDSM, high temperature dry-roasted soy milk; WHSM, wetheat-treated soy milk.

대두 열처리 조건에 따른 두유의 구성아미노산을 측정하고 Table 4에 나타내었다. 건식 열처리, 습식 열처리를 적용한 두유 시료와 우유 간의 아미노산 조성을 분석한 결과를 비교하였다. 전반적으로, 모든 시료에서 glutamic acid와 aspartic acid 함량이 가장 높게 나타났으며, 이는 대두 및 우유 단백질의 주요 구성 아미노산 특성과 일치한다. 특히 HDSM은 대부분의 아미노산 항목에서 STDSM 및 WHSM 보다 높은 값을 나타냈으며, glutamic acid (2132.4 mg/100 g), lysine (822.0 mg/100 g), valine (656.1 mg/100 g), leucine (858.2 mg/100 g) 등의 필수 아미노산이 우수하게 검출되었다. 이는 건식 볶음 처리에 따른 단백질 변성 및 분해가 아미노산 유리에 긍정적인 영향을 미쳤기 때문으로 해석된다(Sharma et al., 2024). 반면, WHSM은 전반적으로 아미노산 함량이 가장 낮았으며, 이는 수분을 포함한 열처리 중 가용성 아미노산의 유실 또는 분해가 일어났을 것으로 판단되었다. 실제로 cystine (143.7 mg/100 g), tryptophan (153.2 mg/100 g) 등 열에 민감한 아미노산의 함량이 다른 시료에 비해 유의하게 낮게 나타났다. 우유와 비교했을 때, HDSM은 glutamic acid, isoleucine, methionine 등의 항목에서 유사하거나 근접한 수치를 보여, 영양학적 관점에서 식물성 기반 단백질 음료의 대체 가능성을 제시하였다. 예를 들어, glutamic acid는 HDSM (2132.4 mg/100 g)과 을 보여, 우유의 0.08 g/100 g 및 0.01 g/100 g과 비교하여 월등히 높은 수치를 보였다. 이는 대두 열처리가 오메가-3 및 오메가-6 지방산의 유리 및 추출 효율을 증가시킨다는 기존 연구 결과와도 부합한다(Yang, Guo, & Yuan, 2015). MHT에서는 α -linolenic acid가 검출되지 않았다.

5. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 지방산 변화

Table 4. Analysis of amino acid composition in soy milk prepared using soybeans processed under various heat treatment.

Amino Acid (mg/100g)	STDSM ¹⁾	HDSM	WHSM	Milk
Aspartic acid	1132.1	1283.3	1098.9	1333.9
Glutamic acid	2020.5	2132.4	1873.1	2142.8
Serine	578.7	578.5	537.1	598.4
Glycine	432.2	445.3	421.2	474.3
Histidine	267.9	287.9	265.7	296.3
Arginine	893.0	943.5	854.2	987.6
Threonine	542.9	580.8	498.3	611.4
Alanine	639.3	651.3	612.3	673.1
Proline	556.8	585.7	530.1	612.5
Tyrosine	477.8	499.2	456.9	518.3
Valine	628.2	656.1	593.6	678.7
Methionine	206.9	221.0	191.4	228.3
Cystine	157.3	167.1	143.7	172.4
Isoleucine	481.3	509.4	454.8	522.0
Leucine	812.1	858.2	759.6	884.7
Phenylalanine	573.4	603.8	536.7	621.5
Lysine	769.3	822.0	712.3	853.2
Tryptophan	168.6	181.3	153.2	186.9
Total	11,338	12,006	10,693	12,396

¹⁾ UN, untreated; STDSM, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk; HDSM, high temperature dry-roasted soy milk; WHSM, wetheat-treated soy milk.

대두 열처리 조건에 따른 두유의 지방산을 측정하고 Table 5에 나타내었다. 건식 열처리, 습식 열처리를 적용한 두유와 우유 간의 지방산 조성을 분석한 결과를 비교하였다. 지방산은 포화지방산(SFA), 단일불포화지방산(Multiunsaturated fatty acid, MUFA), 다불포화지방산(PUFA)의 세 가지로 분류하여 비교 분석하여 Table 6에 나타내었다.

우유에서는 palmitic acid(1.17 g/100g)와 stearic acid(0.42 g/100g) 등 대표적인 포화지방산이 가장 높은 수준으로 검출되었으며, 이는 일반적인 동물성 식품의 지방산 조성 과 유사한 결과로 판단되었다. 반면, 식물성 기반인 두유에서는 STDSM이 palmitic acid 0.34 g/100 g, HDSM이 0.20 g/100 g, WHSM가 0.18 g/100 g으로 우유보다 현저히 낮은 수치를 보였다. 또한 STDSM과 HDSM 모두 myristic acid 및 arachidic acid와 같은 포화지방산이 극미량(≤ 0.01 g/100 g)으로 검출되었다. 이러한 경향은 식물성 음료가 동물성 제품에 비해 SFA 함량이 낮다는 결과와 일치한다(Zheng, Chen, & Liu, 2020).

단일불포화지방산(MUFA) 중 oleic acid는 모든 시료에서 주요하게 검출되었으며, 특히 STDSM(0.61 g/100 g), HDSM(0.56 g/100 g), 우유(0.80 g/100g) 순으로 높은 함량을 보였다. 이러한 결과는 고온의 열처리 과정에서 세포막 구조가 변형되며, 결합 형태의 지방산이 유리되어 oleic acid의 용출이 증가했기 때문으로 해석된다. 실제로 Zheng et al. (2020)은 식물성 음료의 열처리 시 지질막의 열적 변형에 의해 free fatty acids의 방출됨을 보고한 바 있다. 또한, cis-11-eicosenoic acid는 STDSM에서만 소량(0.01 g/100 g) 검출되었으며, 다른 시료에서는 불검출되어 가열 조건의 차이에 따른 지방산 조성 변화가 일어났다고 판단되었다. PUFA 성분 중 linoleic acid와 α -linolenic acid는 주요 불포화지방산으로, STDSM에서는 각각 1.65 g/100 g 및 0.26 g/100 g의 높은 함량을 보여, 우유의

Table 5. Analysis of fatty acid composition in soy milk prepared using soybeans processed under various heat treatment.

Fatty Acid(g/100g)	STDSM ¹⁾	HDSM	WHSM	Milk
Myristic acid	0.01	0.00	0.00	0.40
Palmitic acid	0.34	0.20	0.18	1.17
Stearic acid	0.08	0.06	0.04	0.42
Arachidic acid	0.01	0.01	0.00	0.01
ΣSFA	0.44	0.27	0.22	2.00
Palmitoleic acid	0.01	0.00	0.00	0.06
Oleic acid	0.61	0.56	0.30	0.80
cis-11-Eicosenoic acid	0.01	0.00	0.00	0.00
ΣMUFA	0.63	0.56	0.30	0.86
Linoleic acid (ω-6)	1.65	1.18	0.96	0.08
α-Linolenic acid (ω-3)	0.26	0.14	0.00	0.01
γ-Linolenic acid	0.00	0.00	0.14	0.00
Eicosapentaenoic acid (EPA)	0.00	0.00	0.00	0.00
Docosahexaenoic acid (DHA)	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣPUFA	1.93	1.32	1.10	0.09
Total UFA (MUFA + PUFA)	2.56	1.88	1.40	0.95

¹⁾ UN, untreated; STDSM, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk; HDSM, high temperature dry-roasted soy milk; WHSM, wetheat-treated soy milk.

0.08 g/100 g 및 0.01 g/100 g과 비교하여 월등히 높은 수치를 보였다. 이는 대두 열처리가 오메가-3 및 오메가-6 지방산의 유리 및 추출 효율을 증가시킨다는 기존 연구 결과와도 부합하였다(Yang, Guo, & Yuan, 2015). MHT에서는 α -linolenic acid가 검출되지 않았다.

6. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 총 폴리페놀 및 플라보노이드 변화

서로 다른 열처리 조건을 통해 제조된 두유의 총 폴리페놀 및 총 플라보노이드 함량을 분석하여 Fig. 3에 나타내었다. 두 성분 모두 열처리 조건에 따라 유의적인 차이($p < 0.05$)를 보였으며, 총 폴리페놀의 경우 STDSM이 두 항목에서 모두 가장 높은 수치를 나타냈다. 총 폴리페놀 함량은 STDSM (179.83 ± 0.25 mg/L)이 가장 높았으며, 다음으로 WHSM (128.33 ± 0.42 mg/L), UN 118.31 ± 0.01 mg/L, HDSM 72.74 ± 0.38 mg/L 순으로 나타났다. 이는 열처리 과정 중 대두의 세포벽이 파괴되어 기존에 결합형으로 존재하던 폴리페놀 성분의 유리율이 증가한 결과로 해석된다(Shibata et al., 2018; Dewanto et al., 2002). 특히, STDSM과 같이 과도한 열분해 없이 세포 구조의 선택적 파괴를 유도하는 중간 온도 조건은 폴리페놀의 보존 및 추출 효율을 극대화 하는데 효과적 이었다고 판단되었다(Jeong et al., 2024; Kim et al., 2015). 반면, HDSM은 고온에서 장시간 처리되어 일부 페놀성 화합물이 열 분해되었을 가능성이 있으며, WHSM은 수침 및 가열 과정에서 수용성 성분의 회석 또는 용출 손실이 일어났을 가능성이 있다. UN은 세포 구조가 유지됨에 따라 폴리페놀의 유리가 제한되어 상대적으로 낮은 값을 보였다. 총 플라보노이드 함량에서도 STDSM (22.84 ± 0.67 mg/L)이 가장 높은 값을 나타냈으며

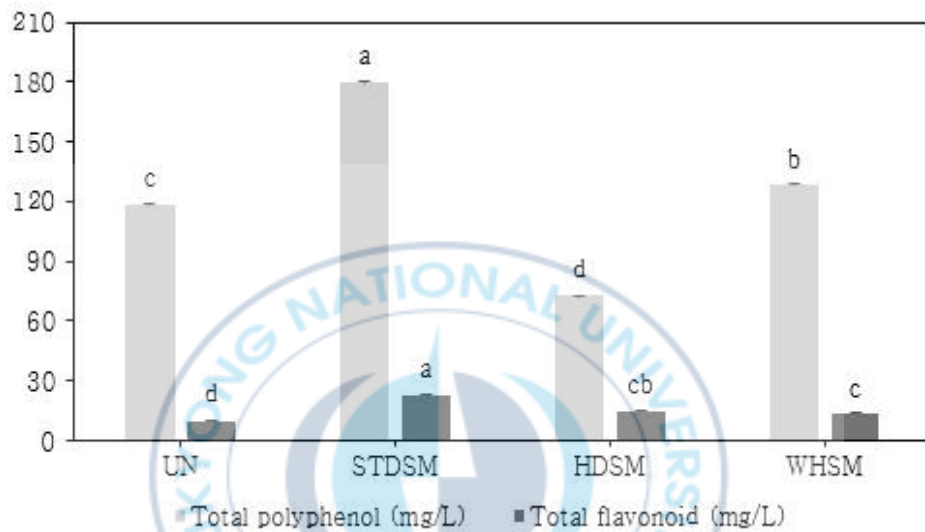


Fig. 3. Total polyphenol and flavonoid contents of soy milk prepared using soybeans processed under various heat treatments. Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$). UN, untreated; STDSM, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk; HDSM, high temperature dry-roasted soy milk; WHSM, wet heat-treated soy milk.

이어서 HDSM (15.15 ± 0.52 mg/L), WHSM (13.50 ± 0.58 mg/L), UN (9.95 ± 0.32 mg/L) 순으로 나타났다. 모든 열처리군이 무처리군에 비해 유의하게 높은 플라보노이드 함량을 보였으며, 이는 결합형 플라보노이드가 열처리를 통해 효율적으로 유리된 것으로 해석된다(Shin et al., 2015). STDSM의 경우, 중간 온도의 건식 가열이 고온 처리나 수분이 존재하는 습식 조건보다 산화적 손실을 줄이며 유리된 플라보노이드를 효과적으로 보존하는 것으로 보여진다(Lim et al., 2017; Moon et al., 2025). WHSM은 총 폴리페놀 함량에서는 두 번째로 높은 값을 보였으나, 총 플라보노이드 함량에서는 HDSM보다 낮게 나타났다. 이는 열처리 방식에 따라 특정 페놀성 화합물군의 안정성과 용출 특성이 상이하게 작용된 것으로 판단되었다. 실제로 Xu et al. (2020)은 가열 조건에 따라 대두 내 항산화 성분의 용출 및 변성이 다르게 나타난다고 보고한 바 있으며, 이는 본 연구 결과와도 일치하였다. 따라서 총 폴리페놀과 플라보노이드의 측정에서는 STDSM가 모두에서 높은 수준을 유지하여, 기능성 성분 보존 측면에서 가장 우수한 열처리 조건으로 판단되었다.

7. 대두 열처리 조건에 따른 두유의 항산화 활성 변화

다양한 열처리 조건을 적용하여 제조한 두유의 항산화능을 평가하기 위하여, DPPH 및 ABTS 라디칼 소거능 분석을 수행한 결과는 Fig. 4에 제시하였다. 두 지표 모두에서 처리군 간 유의적인 차이($p < 0.05$)가 나타났으며, 열처리에 따라 항산화 활성의 방향성과 정도가 다르게 변화하는 양상이 관찰되었다.

DPPH 분석 결과, HDSM가 47.04 ± 0.28 mg/L로 가장 높은 활성을 나타냈으며, ABTS 분석에서는 STDSM가 가장 우수한 활성을 보였다. 두

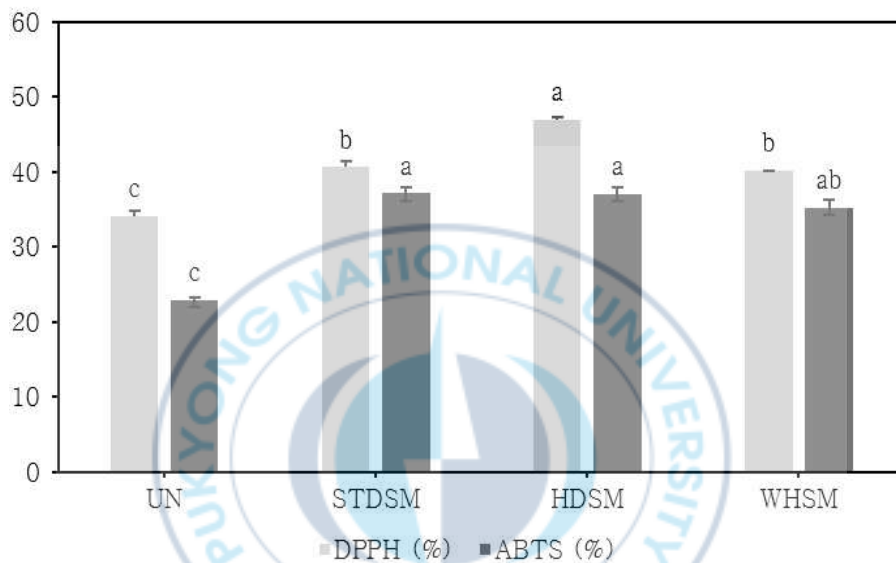


Fig. 4. DPPH and ABTS radical scavenging activities of soy milk prepared using soybeans processed under various heat treatment. The different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). UN, untreated; STDSM, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk; HDSM, high temperature dry-roasted soy milk; WHSM, wetheat-treated soy milk.

분석 지표 간 최고 활성을 보인 처리 조건에는 차이가 있었으나, 전반적으로 건식 가열 처리군이 습식 처리군보다 항산화 활성이 우수한 것으로 판단되었다. 특히 HDSM는 고온 건식 조건에서 대두 세포벽의 구조적 파괴가 극대화되어, 기존에 결합형으로 존재하던 항산화 물질이 효과적으로 유리되었을 가능성이 있으며(Koriyama et al., 2022), 이로 인해 DPPH 소거능이 높게 나타난 것으로 해석된다. 한편, ABTS 분석에서는 STDSM가 가장 높은 활성을 보였는데, 이는 고온 처리 시 일부 열에 민감한 항산화 성분이 분해되어 ABTS 활성에는 오히려 부정적인 영향을 미쳤을 것으로 판단되었다(Jeong et al., 2022). 또한, 두 분석 모두에서 무처리군(UN)은 DPPH(34.14 ± 0.70 mg/L)와 ABTS에서 가장 낮은 활성을 나타내었으며, 이는 세포벽이 유지된 상태에서는 폴리페놀 등 항산화 성분이 결합형으로 존재하여 생리활성이 제한된다는 점을 보여준다(Moon et al., 2020).

이와 같은 결과는 항산화 활성의 증진이 단순히 함량의 증가뿐만 아니라, 구조적 유리화와 열처리 조건에 따른 안정성 확보 여부에 의해 결정된다는 사실을 뒷받침하며, 서로 다른 기전을 가진 두 분석법을 함께 활용함으로써보다 총체적이고 신뢰도 높은 항산화 평가가 가능함을 보여주었다.

8. 발효 시간에 따른 유산균 음료 pH 변화

서로 다른 열처리 조건으로 제조된 두유(STDSY, HDSY, WHSY)는 유산균을 접종하여 0 ~ 24시간 발효를 진행하였다. 발효 시간의 경과에 따른 pH 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 발효 초기(0시간)에는 세 시료 모두 pH 6.6 ~ 6.7 수준으로 유사하였으며 유의한 차이는 관찰되지 않았다. 그러나 발효가 진행됨에 따라 pH 값은 시료 간 차이를 보이며 유의하게 감소하였다. 3시간 시점부터 STDSY와 HDSY는 WHSY보다 더 낮은 pH

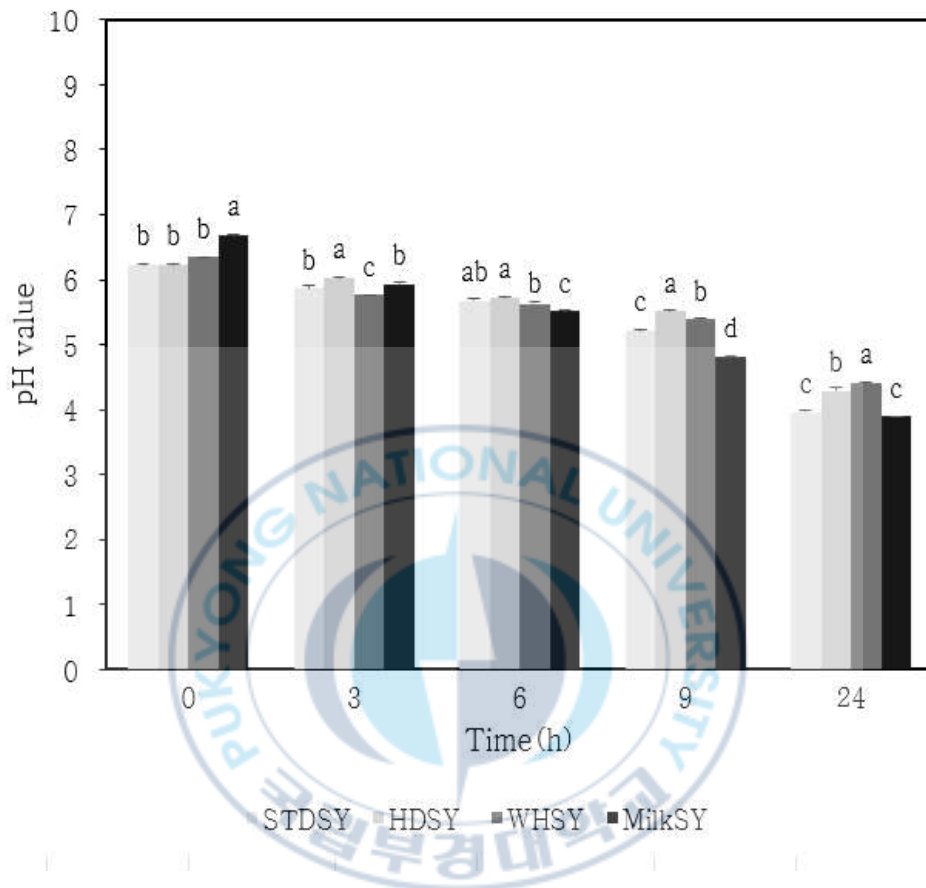


Fig. 5. Changes in pH during fermentation of yogurts made from three differently heat-treated soy milk groups. The different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). UN, untreated; STDSY, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk + SYAB 1; HDSY, high temperature dry-roasted soy milk + SYAB 1; WHSY, wet heat-treated soy milk + SYAB 1; MilkSY, milk + SYAB 1; MilkSY, milk + SYAB 1

값을 나타냈으며, 이후 6시간, 9시간, 24시간에서도 STDSY는 가장 큰 pH 감소 폭을 보였다. 최종적으로 24시간 경과 시점에서 STDSY는 pH 4.23, HDSY는 pH 4.63, WHSY는 pH 4.80으로 나타나, 단계적 온도 조절 건식 처리두유에서 가장 활발한 유산균 산 생성 반응이 일어난 것으로 판단되었다.

건식 열처리는 대두 내 세포벽 구조를 파괴하여 발효 기질의 가용성을 증가시키고, 결과적으로 유산균의 유기산 생성과 산도 저하를 촉진시키는 경향을 나타냈다(Granato et al., 2010). 이러한 기질 변화는 유산균의 성장 환경을 개선하며, 발효 효율을 향상시키는 데 기여하고 특히 단계적 온도 조절 조건은 과도한 구조 손상 없이 기질 유리율을 높일 수 있어, 연속 고온이나 습식 처리보다 더 적합한 발효 조건으로 판단되었다(Wang et al., 2021). 실제로 STDSY는 발효 과정 중 pH의 안정적 감소와 높은 유산균 수를 유지하는 경향을 보였다. 반면, WHSY는 침지와 가열로 인한 기질 희석, 생리활성 성분의 손실 등으로 인해 발효 반응이 상대적으로 저조한 경향을 보였으며, 산 생성능력이 저하되어 pH가 감소 되었다고 판단되었다(Hu et al., 2020).

9. 발효 시간에 따른 유산균 음료 산도 변화

서로 다른 열처리 조건으로 제조된 두유(STDSY, HDSY, WHSY)는 유산균을 접종하여 0 ~ 24시간 발효를 진행하였다. 발효 시간의 경과에 따른 산도 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 전체적으로 발효가 진행됨에 따라 세 시료 모두에서 산도가 유의하게 증가하였다($p < 0.05$). 이는 유산균의 대사활동에 따라 생성된 유기산이 축적된 결과로 해석된다. 0시간 시점에서 세 시료 간 유의한 차이가 나타나지 않았으나, 발효가 진행됨에 따라

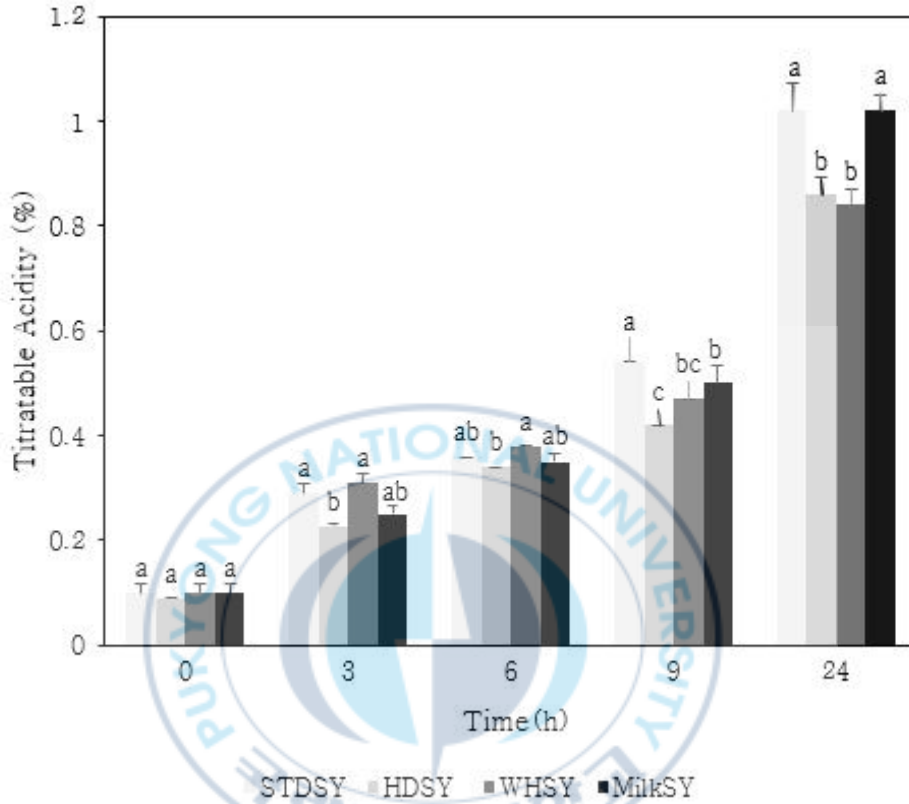


Fig. 6. Changes in titratable acidity during fermentation of yogurts prepared from three soy milk groups subjected to different heat treatments. The different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). UN, untreated; STDSY, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk + SYAB 1; HDSY, high temperature dry-roasted soy milk + SYAB 1; WHSY, wet heat-treated soy milk + SYAB 1; MilkSY, milk + SYAB 1; MilkSY, milk + SYAB 1

각 시료 간 산도의 변화 양상이 점차 분화되었다. 3시간 시점에서는 STDSY와 WHSY가 HDSY보다 유의하게 높은 산도를 보였으며, 6시간과 9시간 시점에서도 STDSY가 타 시료 대비 상대적으로 높은 산도 상승률을 유지하였다. 특히 24시간 발효 후에는 STDSY의 산도가 1.05% 수준에 도달하며, HDSY (0.87%) 및 WHSY (0.85%)와 유의한 차이를 나타냈다($p < 0.05$).

이러한 결과는 열처리 조건이 발효 중 유산균의 활성 및 유기산 생성 능력에 영향을 준 것으로 판단하였다. 특히 STDSY는 열처리 과정에서 대두 내 세포 구조가 파괴되며 단당류, 펩타이드 등 발효 기질의 가용성이 증가하였고, 이는 유산균의 활성을 촉진하여 산도 상승으로 이어진 것으로 판단되었다. 반면 HDSY는 고온 처리로 인해 단백질의 열변성과 Maillard 반응 생성물이 증가하면서 유산균 생육에 불리한 환경을 조성하였을 가능성이 있는 것으로 해석되었다. WHSY는 대두를 침지 한 후 가열하는 공정을 거치면서 수분 접촉에 의한 성분 희석 및 기능성 성분의 손실 가능성이 비교적 커, 발효 기질로서의 기능이 상대적으로 저하되었을 것으로 판단되었다(Jeong et al., 2024; Park et al., 2018).

10. 발효 시간에 따른 유산균 음료 유산균 수 변화

서로 다른 열처리 조건으로 제조된 두유(STDSY, HDSY, WHSY)는 유산균을 접종하여 0 ~ 24시간 동안 발효를 진행하였다. 발효 시간 경과에 따른 유산균 수 변화는 Fig. 7에 제시하였다.

발효 초기(0시간)에는 모든 처리군에서 유산균 수가 약 7.00 log CFU/mL 수준으로 유사하였으며($p > 0.05$), 발효가 진행됨에 따라 유산균 수는 유의적으로 증가하였다. 특히 발효 6시간 시점에서는 STDSY

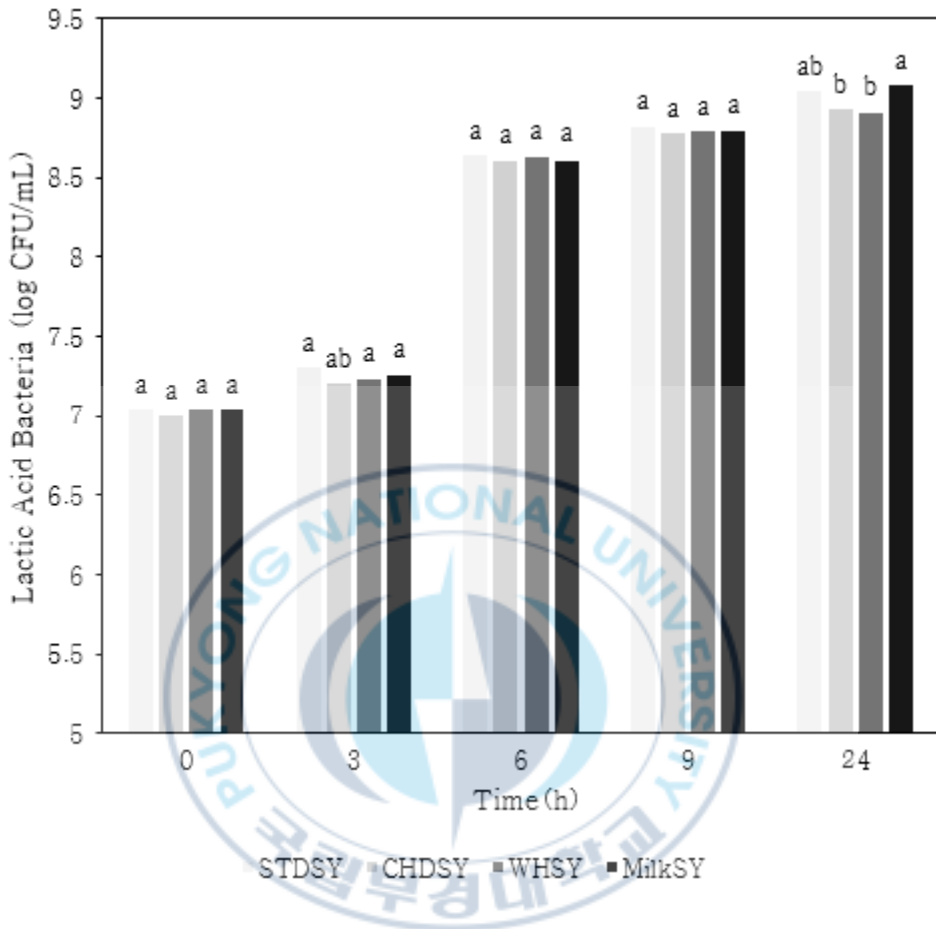


Fig. 7. Changes in lactic acid bacteria count during fermentation of soy yogurt prepared from soy milk using soybeans pretreated under dry and moist heat treatments. The different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). UN, untreated; STDSY, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk + SYAB 1; HDSY, high temperature dry-roasted soy milk + SYAB 1; WHSY, wet heat-treated soy milk + SYAB 1; MilkSY, milk + SYAB 1; MilkSY, milk + SYAB 1

(8.64 log CFU/mL)가 가장 높은 유산균 수를 나타냈으며, HDSY (8.61 log CFU/mL), WHSY (8.63log CFU/mL), MilkSY (8.61log CFU/mL)와는 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 9시간 이후부터는 전반적으로 유산균 수 증가 속도가 다소 둔화되었으며, 24시간 시점에서는 MilkSY (9.08 log CFU/mL)가 가장 높은 유산균 수를 보였다. 이어서 STDSY (9.04 log CFU/mL), HDSY (8.93 log CFU/mL), WHSY (8.91 log CFU/mL) 순으로 확인되었다.

이와 같은 경향은 발효 시간 경과에 따른 유산균의 증식 활성화와 더불어, 열처리 조건에 따라 기질의 가용화 및 이용성의 차이가 유산균 수 변화에 영향을 미친 것으로 판단하였다. 특히 STDSY는 발효 중기인 6시간 시점에서 빠른 증가세를 보였는데, 이는 비교적 완만한 열처리 조건이 대두 내 단백질 및 탄수화물의 가용화를 촉진시켜 유산균의 기질 접근성을 높였기 때문으로 판단되었다. 이러한 결과는 가열 조건이 대두 단백질의 구조 변성 및 용해도에 영향을 미치며, 이로 인해 발효 기질의 이용률이 달라질 수 있음을 보여준다(Kwon et al., 2016). 이는 적절한 조건 하에서 식물성 기질에서도 유산균의 활발한 증식이 가능하다고 보고한 선행연구와도 일치한다(Vinderola et al., 2000).

11. 발효 시간에 따른 유산균 음료 총 폴리페놀 및 플라보노이드 변화

서로 다른 열처리 조건으로 제조된 두유(STDSY, HDSY, WHSY)는 유산균을 접종하여 0 ~ 24시간 발효를 진행하였다. 발효 시간의 경과에 따른 총 폴리페놀 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 발효 조건에 따라 뚜렷한 감

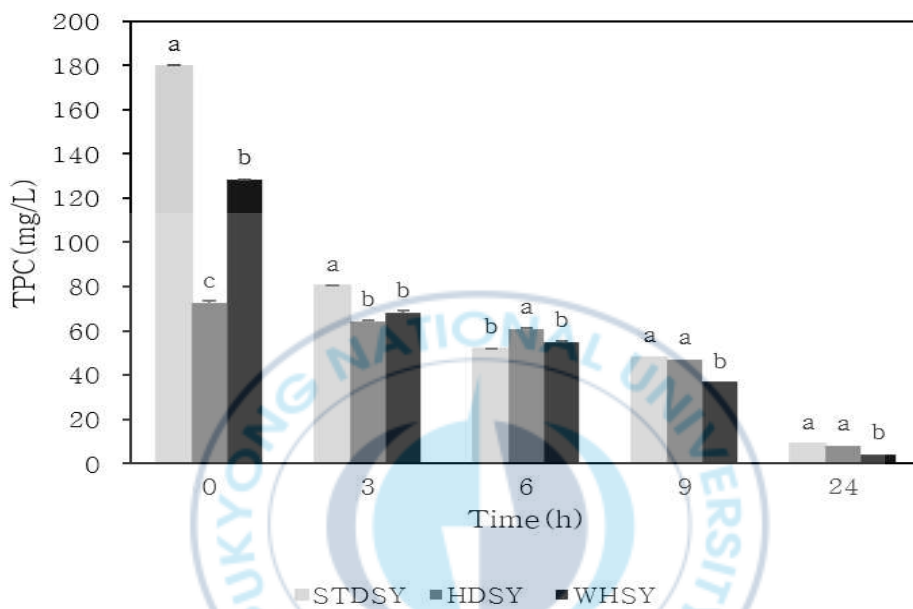


Fig. 8. Changes in total polyphenol content during fermentation of yogurts prepared from three soy milk groups subjected to different heat treatments. The different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). UN, untreated; STDSY, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk + SYAB 1; HDSY, high temperature dry-roasted soy milk + SYAB 1; WHSY, wet heat-treated soy milk + SYAB 1

소 경향을 나타냈으며, 그 감소 양상은 열처리 방법에 따라 유의한 차이를 보였다(Zhang et al., 2022). 총 폴리페놀 함량은 초기(0시간)에는 STDSY 가 179.83 mg/L로 가장 높게 나타났고, 이어 HDSY (72.74 mg/L), WHSY (128.33 mg/L) 순으로 나타났다(Hu et al., 2020). 모든 시료에서 발효가 진행되면서 시간에 따라 급격히 감소하였으며, 6시간 이후부터는 완만한 감소세로 전환되었다. 하지만 발효 종료 시점인 24시간 이후에도 건식 열처리군(STDSY, HDSY)은 습식 처리군(WHSY)에 비해 유의하게 높은 값을 유지하였다. 구체적으로 24시간 경과 후 STDSY는 8.74 mg/L, HDSY는 7.91 mg/L, WHSY는 4.16 mg/L로 나타났으며, 이는 건식 처리 방식이 폴리페놀 성분의 열적 안정성과 가용성 유지에 보다 효과적임을 보여준다(Wang et al., 2019). 이러한 결과는 건식 열처리가 세포벽 구조 파괴를 통해 결합형 폴리페놀의 유리를 촉진하고, 동시에 열 손상에 대한 보호 효과도 제공했을 것으로 판단되었다. 반면, 습식 가열 처리 시 대두의 수분 포화 상태와 가열 조건이 폴리페놀 성분의 유실, 회석 또는 분해를 유발했을 수 있다(Granato et al., 2010). 특히 WHSY의 경우, 발효 전에도 낮은 수치를 나타냈으며 발효 후에는 가장 낮은 잔류량을 보였다. 서로 다른 가열 조건으로 처리된 대두를 이용하여 제조한 두유 유산균 음료의 발효 중 총 플라보노이드 함량 변화는 Fig. 9에 나타내었다. 발효 초기(0시간)에는 STDSY 가 약 25 mg/L로 가장 높은 플라보노이드 함량을 보였으며, 이후 발효가 진행됨에 따라 모든 시료에서 플라보노이드 함량은 전반적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 24시간 시점에서 이러한 감소는 발효 중 플라보노이드 화합물이 유산균에 의해 분해되거나, 발효 환경의 산성화에 따라 안정성이 저하되었기 때문일 수 있다(Liu et al., 2022). 실제로, 발효 과정에서 유산균이 플라보노이드 구조를 분해하여 단순 페놀 구조로 전환시키는 현상이 보고된 바 있으며, 이로 인해 총 플라보노이드

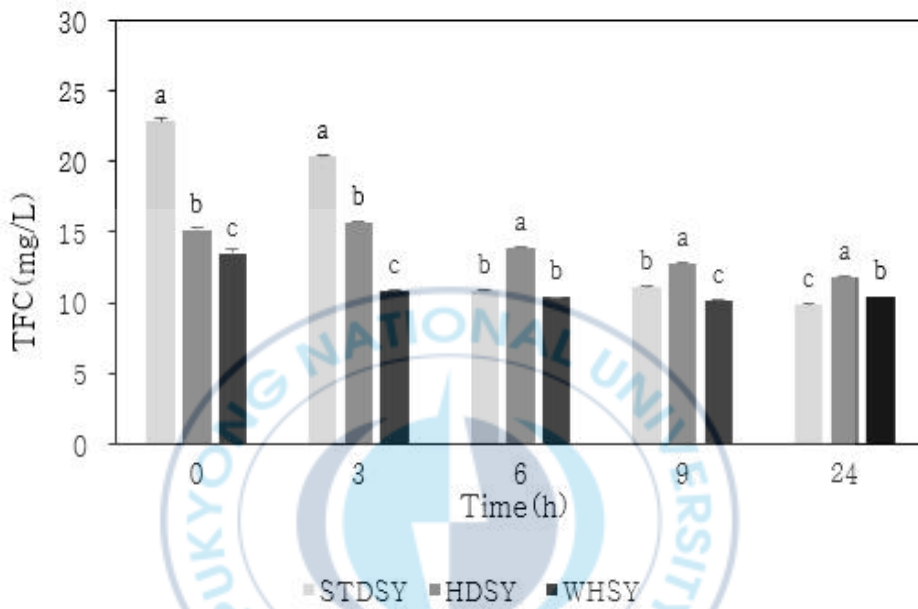


Fig. 9. Changes in total flavonoid content during fermentation of yogurts prepared from three soy milk groups subjected to different heat treatments. The different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). UN, untreated; STDSY, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk + SYAB 1; HDSY, high temperature dry-roasted soy milk + SYAB 1; WHSY, wet heat-treated soy milk + SYAB 1

함량이 감소할 수 있다(Liu et al., 2022). 또한, 발효된 콩 유래 음료에서 플라보노이드의 감소가 항산화능 감소와 반드시 일치하지 않으며, 구조 변화 이후에도 생리활성이 유지될 수 있다는 보고도 존재한다(Kwon et al., 2020). 특히 STDSY가 발효 전후에도 높은 플라보노이드 수준을 유지한 점은, 단계적 온도 조절 열처리가 플라보노이드 성분의 보존 혹은 유리화를 유도했을 것으로 판단되었다. 이러한 경향은 적절한 수준의 열처리 가공물성 원료의 플라보노이드 생체이용률을 증가시킬 수 있다는 기존 연구 결과와도 일치한다(Hu et al., 2019).

12. 발효 시간에 따른 유산균 음료 항산화 활성 변화

서로 다른 열처리 조건으로 제조된 두유(STDSY, HDSY, WHSY)는 유산균을 접종하여 0 ~ 24시간 발효를 진행하였다. 발효 시간의 경과에 따른 DPPH 및 ABTS 라디칼 소거능 변화를 각각 측정하고 Fig. 10와 Fig. 11에 나타내었다. DPPH 분석 결과에서는 STDSY가 발효 6시간부터 24시간까지의 전 구간에서 가장 높은 항산화 활성을 유지하였으며, 이는 단계적 온도 조절 건식 가열 처리 조건이 대두의 항산화 성분을 효과적으로 활성화 시키고, 발효 과정 중에도 이들의 안정성을 유지하는 데 기여했기 때문으로 해석되었다. 반면 WHSY는 전반적으로 가장 낮은 항산화 활성을 나타냈으며, 동일 시간대 내 각 유의적인 차이가 관찰되었다($p < 0.05$). 이러한 경향은 *Aspergillus awamori*로 발효한 검은콩 추출물을 100°C에서 30분간 열처리하였을 때 항산화 활성이 저하되었다는 Lin and Chou(2009)의 연구와 유사하였으며, 과도한 열처리가 페놀성 화합물의 분해를 초래한 것으로 판단되었다. 반면, 본 연구의 STDSY 조건은 상대적으로 완만한 열처리를 적용하여 항산화 성분의 손실을 최소화하고, 유리된

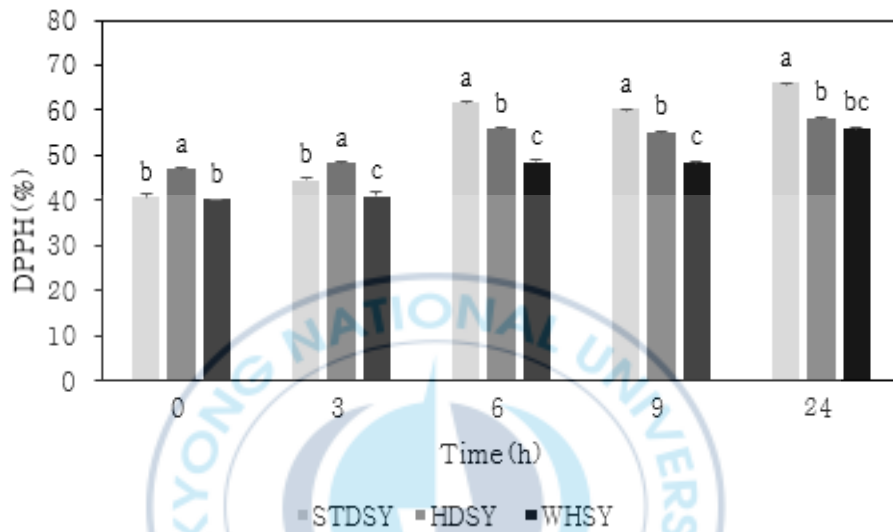


Fig. 10. Changes in DPPH radical scavenging activity during fermentation of yogurts prepared from three soy milk groups subjected to different heat treatments. The different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). UN, untreated; STDSY, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk + SYAB 1; HDSY, high temperature dry-roasted soy milk + SYAB 1; WHSY, wet heat-treated soy milk + SYAB 1

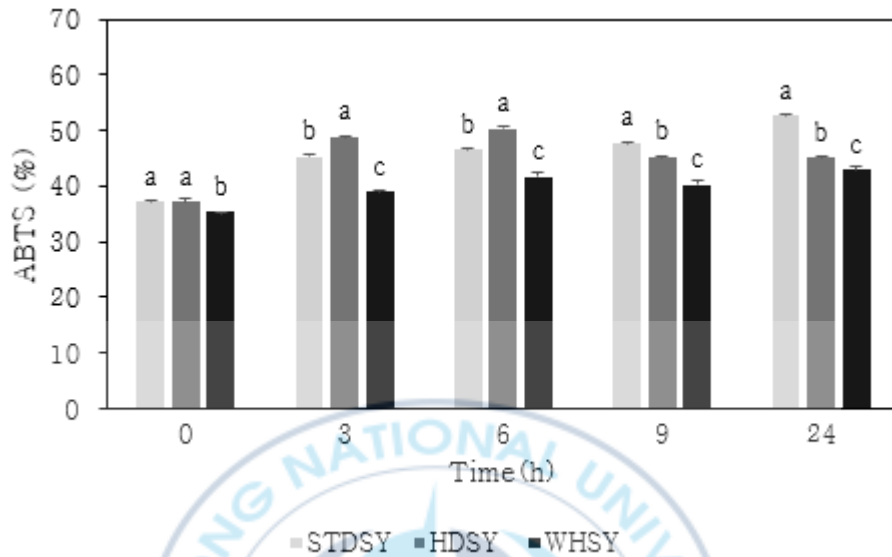


Fig. 11. Changes in ABTS radical scavenging activity during fermentation of yogurts prepared from three soy milk groups subjected to different heat treatments. The different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). UN, untreated; STDSY, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk + SYAB 1; HDSY, high temperature dry-roasted soy milk + SYAB 1; WHSY, wet heat-treated soy milk + SYAB 1

페놀성 화합물이 발효 중에도 안정적으로 유지될 수 있도록 기여 한 것으로 판단되었다. ABTS 분석 결과 역시 유사한 경향을 보였으며, 모든 처리군에서 발효 초기 대비 3시간 및 6시간 시점에서 항산화 활성이 유의적으로 증가하였고($p < 0.05$), 이후 9시간과 24시간 시점에서는 비교적 안정되거나 소폭 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 STDSY는 발효 중 ABTS 활성에서도 가장 높은 수치를 유지하였으며, 6시간 시점에서 최대치를 기록하였다. HDSY 역시 유의적인 항산화 활성 향상을 보였으나 STDSY에 비해서는 낮은 수준이었고, WHSY는 전체적으로 가장 낮은 ABTS 활성을 나타내었다. 이러한 결과는 건식 열처리, 특히 단계적 온도 조절 방식이 발효 중 항산화 활성 유지에 효과적임을 보여준다. 이러한 결과는 열처리 조건이 식물성 소재의 항산화 특성에 영향을 미친다는 기존의 연구들과도 일치하였다. Zhang et al. (2015)은 건식 열처리된 대두가 생 대두나 습식 처리 대두보다 DPPH 및 ABTS 소거 활성이 우수하다고 보고하였으며, 이는 Maillard 반응을 통한 항산화 물질 생성과 관련이 있음을 보고하였다. STDSY이 가장 우수한 DPPH 및 ABTS 소거 활성이 관찰되었으며, 이는 가열 및 발효의 복합적 처리가 식물성 항산화 성분의 생체이용률을 증가시킬 수 있다는 Landete et al. (2015)의 보고와도 일치하였다.

13. 대두기반 유산균 음료와 우유 유산균 음료의 관능 특성 비교

건식가열처리 대두를 사용한 유산균 음료 STDSY와 우유를 원료로 제조한 유산균 음료에 대한 관능평가 결과는 Fig. 12에 나타내었다. 관능 평가 항목은 외관, 냄새, 맛, 조직감, 종합기호도로 구성되었으며, 9점 척도(1

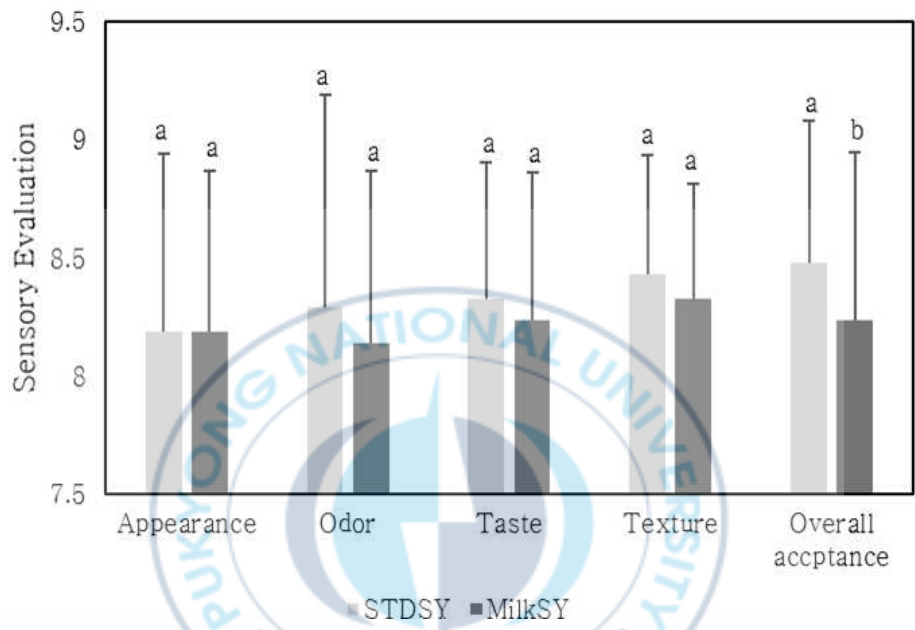
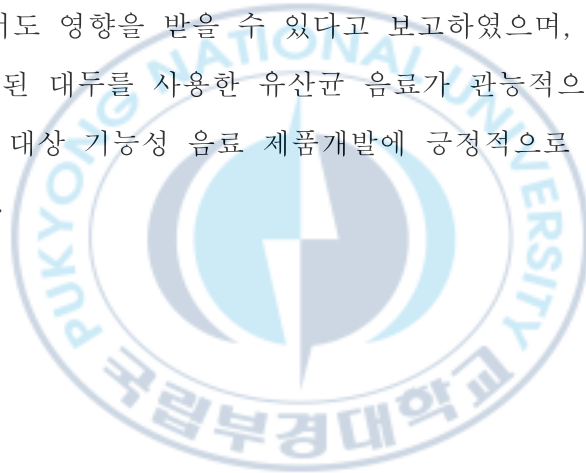


Fig. 12. Comparison of sensory attributes between STDSY and MILKSY, including appearance, flavor, taste, texture, and overall acceptability. The different letters indicate significant difference ($p < 0.05$). STDSY, stepwise temperature-controlled and dry-roasted soy milk + SYAB 1; MilkSY, milk + SYAB 1

점 = 매우 나쁨, 9점 = 매우 좋음)를 기준으로 평가되었다. 대부분의 항목에서 두 시료 간 유의적인 차이는 없었으나, 종합 기호도에서는 STDSY가 MilkSY보다 유의적으로 높은 점수를 나타냈다($p < 0.05$). 이는 건식 가열처리로 인해 대두 특유의 비린 맛이 감소되고 구수한 향미가 형성되어 기호도를 향상 시킨 것으로 판단되었다. 유사한 결과가 Choi et al. (2018)의 연구에서도 보고되었으며, 해당 연구에서는 대두를 고온에서 건식 로스팅 처리 할 경우 향기 성분 조성이 변화하여 소비자 선호도가 높아지는 경향이 있음을 제시하였다. 또한, Song et al. (2021)은 대두 기반 발효 음료의 관능 특성은 원료 처리 방법 뿐만 아니라 발효조건, 스타터 종류에 의해서도 영향을 받을 수 있다고 보고하였으며, 이러한 결과는 건식 가열 처리된 대두를 사용한 유산균 음료가 관능적으로도 경쟁력이 있으며, 소비자 대상 기능성 음료 제품개발에 긍정적으로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.



IV. 요약

무처리군(UN), 건식(STDR, HDR) 및 습식(MHT) 열처리 조건으로 전처리한 대두를 이용하여 제조한 두유 및 그 발효음료의 이화학적, 항산화적, 영양적 특성을 다각도로 분석하고, 식물성 유산균 음료로서의 기능성과 산업적 활용 가능성을 평가하였다.

열처리를 적용한 모든 시료는 무처리군에 비해 항산화 활성(DPPH, ABTS), 총 폴리페놀 및 플라보노이드 함량, 아미노산 조성 및 지방산 조성 등에서 유의미한 향상을 보였다($p < 0.05$). 특히 건식 가열 처리군이 습식 가열 처리군보다 전반적인 항산화 활성이 우수하게 유지되었으며, 그 중에서도 STDR가 HDR보다 더 높은 DPPH 및 ABTS 소거능, 총 폴리페놀 및 플라보노이드 함량을 나타냈다. 이는 항산화 성분들이 연속 고온 처리보다 단계적 온도 조절 방식의 건식 볶음 처리 시 더 효과적으로 유리 및 보존될 수 있다고 판단되었다. 이러한 경향은 열처리 조건이 대두 내 항산화 성분의 유리 및 변성 정도에 중요한 영향을 미치는 것으로 해석되며, STDR가 발효 전후에도 가장 높은 항산화 성분 수준을 유지한 결과와도 일치하였다. 한편, 습식 처리(MHT)의 경우 발효 후 항산화 성분의 감소 폭이 더 컸으며, 이는 수분 침지와 가열이 세포벽 팽윤 및 성분 확산에는 기여할 수 있으나, 항산화 물질의 열 안정성 측면에서는 건식 조건보다 불리함을 나타내었다. 아미노산 조성 분석 결과에서도 열처리군, 특히 STDR 는 glutamic acid, lysine, leucine 등 주요 아미노산 함량이 상대적으로 높았으며, 이는 열처리에 따른 단백질 변성과 분해 효율 향상으로 해석된다.

관능평가에서는 STDSY가 MilkSY와 비슷하게 높은 종합기호도를 나타

내었으며, 이는 적절한 건식 열처리가 대두 특유의 비린 맛을 감소시키고 고소한 향미 성분을 형성하는 데 기여했기 때문으로 보인다. 대두에 열처리를 적용하는 것이 무처리보다 유리하며, 열처리 유형 중에서는 습식 처리보다 건식 처리, 그리고 건식 처리 중에서는 연속 고온 처리보다 단계적 온도 조절 처리를 한 시료가 두유 및 그 발효 음료의 향산화 활성, 아미노산 함량, 관능적 기호도 등에서 가장 효과적임을 실험적으로 입증하였다. 향후 식물성 기능성 유산균 음료 개발 시 단계적 온도 조절 건식 가열 기반 전처리 기술이 유효한 전략이 될 수 있음을 확인하였다.



V. 참고문헌

AOAC International. (2019). Official methods of analysis of AOAC International (21st ed., Method 925.23). AOAC International.

Choe, E., & Min, D. B. (2006). *Mechanisms and factors for edible oil oxidation, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 5(4), 169–186..

Choi, E. J., Lee, H. A., & Kim, D. H. (2018). Effect of dry roasting temperature on the volatile composition and sensory attributes of soy milk. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 50(5), 567–573.

Cichońska, P., & Ziarno, M. (2021). *Legumes and legume-based beverages fermented with lactic acid bacteria as a potential carrier of probiotics and prebiotics, Microorganisms*, 9(1), 91..

Dewanto, V., Wu, X., Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 3010–3014.

Doblado, R., Frías, J., & Vidal-Valverde, C. (2003). Changes in bioactive compounds (isoflavones, α -galactosides and phytic acid) and antioxidant activity during soaking and cooking of soybeans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(20), 5888–5895.

FAO. (2013). Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). Pathways towards lower emissions: A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems.

Food Production, Processing and Nutrition. (2020). Antioxidant properties of soy-based beverages compared with other plant-based and dairy drinks. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2(1), 10.

Good Food Institute. (2021). Environmental impacts of alternative proteins.

Granato, D., Branco, G. F., Cruz, A. G., Faria, J. A. F., & Shah, N. P. (2010). *Probiotic dairy products as functional foods*, *Journal of Functional Foods*, 2(1), 1-12..

Hong, J. Y., Shin, S. R., Kong, H. J., & Choi, E. M. (2014). Antioxidant activity of soybean and black soybean extracts. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 21(3), 404-410.

Hu, S., Wang, J., Wang, J., & Chen, Z. (2019). Effects of thermal processing on flavonoid compounds and antioxidant activity in peanut hull. *Food Chemistry*, 280, 1-7.

Hu, Y., Zhang, L., Chen, J., & Fan, Y. (2019). Effects of thermal processing on phenolic compounds and antioxidant activity in legumes. *LWT - Food Science and Technology*, 100, 147–153.

Hu, Y., Zhang, L., Wen, R., & Zhao, G. (2020). *Effects of soymilk pretreatment on pH and organic acid production by Lactobacillus strains*, *LWT - Food Science and Technology*, 133, 109973..

Huang, L., et al. (2019). *Effect of soaking and thermal treatment on soy protein extractability and functional properties*, *Journal of Food Science and Technology*, 56(5), 2610–2618..

Jeong, M. J., Park, S. H., & Lee, J. H. (2024). *Influence of wet heat treatment on antioxidant components in soybean-based beverages*, *Korean Journal of Food Science and Technology*, 56(2), 201–210..

Jeong, S. H., Song, J. H., Jeon, G. J., & Shin, K. O. (2024). Total flavonoid content and quality characteristics of black soybean soy milk added with agave inulin powder. *Journal of the East Asian Society of Dietary Life*, 34(1), 10–18.

Kim, K. S., Park, S. H., & Lee, J. Y. (2015). Changes in antioxidant components according to thermal processing conditions of domestic and imported soybeans. *Journal of the Korean Society of Food and Nutrition*, 28(6), 680–688. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2015.28.6.680>

Kim, M. J., Lee, H. Y., & Park, H. J. (2019). Effect of heat treatment on solubility and structural changes of soybean proteins. *Journal of Food Biochemistry*, 43(9), e12956.

<https://doi.org/10.1111/jfbc.12956>

Koriyama, T., Tanaka, M., & Nakamura, S. (2022). Effects of roasting conditions on phenolic content and antioxidant capacity of soybean-based products. *Journal of Functional Foods*, 90, 104980.

Kwon, E. Y., Kim, H. J., & Kim, M. J. (2016). *Effect of roasting conditions on the physicochemical properties of soybean powder*, *Korean Journal of Food Science and Technology*, 48(3), 289–295..

Kwon, J. H., Lee, H. S., & Park, S. Y. (2020). Fermentation-induced structural modifications and antioxidant activities of flavonoids in soy-based products. *Journal of Functional Foods*, 72, 104061.

Kwon, T. H., et al. (2016). Structural modification of soybean protein during dry-heat treatment and its effect on solubility. ·Li, S., Shah, N. P., & Tao, X. (2018). Effect of heat treatment on fermentation characteristics and bioactivities of soymilk fermented by *Lactobacillus plantarum*. *Journal of Food Science and Technology*, 55(4), 1293–1301.

Li, Y., Wang, C., Zhang, M., & Wang, Y. (2018). Effects of thermal treatment on fermentation characteristics and quality of soymilk fermented by lactic acid bacteria. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1), e13429.

Lim, H. S., Kim, M. J., & Choi, J. Y. (2017). *Effect of roasting temperature on flavonoid retention in soybeans*, *Journal of the Korean Society for Food Science and Nutrition*, 46(4), 555–562..

Lim, Y. H., Chun, J. H., Lee, K. T., & Hong, S. T. (2017). *Changes in flavonoid content of Korean soybean cultivars by dry heat processing*, *Korean Journal of Food Science*, 33(4), 451–459..

Liu, Z., Wang, L., & Liu, L. (2022). Biotransformation of flavonoids during fermentation by lactic acid bacteria: Mechanism and effects on bioactivity. *Food Chemistry*, 373, 131397.

Lynch, J., Azevedo, I. L., & Hill, J. D. (2020). Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2 °C climate change targets. *Science*, 370(6517), 705–708.

Ministry of Food and Drug Safety. (2019). Korea food code: Lipid quality analysis methods. Cheongju, South Korea: Ministry of Food and Drug Safety. Retrieved from

Mintel. (2021). Ethical food consumption trends.

Mintel. (2025, February 20). Emerging trends in the plant-based industry.

Moon, T. H., Kim, S. B., & Han, J. A. (2025). Changes in physiological activity and quality characteristics of Seoritae according to roasting conditions. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 15–24.

Moon, Y. J., Han, G. H., & Woo, K. S. (2025). *Optimization of flavonoid preservation through thermal processing in soy-based functional drinks*, *Food Chemistry*, 430, 137127..

Narang, A., & Pilyugin, S. S. (2007). Bistability of the lac operon during growth of *Escherichia coli* on lactose and lactose + glucose. arXiv preprint arXiv:0707.1307.

Our World in Data. (2020). If the world adopted a plant-based diet, we would reduce global agricultural land use by 75%. Our World in Data.

Park, H. J., Lee, M. R., & Kim, M. J. (2020). Effect of heat pretreatment on fermentation characteristics of lactic acid bacteria in soy milk. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 52(3), 203–210.

Park, S. Y., et al. (2020). *Influence of heat processing on physicochemical characteristics of soy milk*, *Korean Journal of Food Science and Technology*, 52(3), 243–250..

Peirotén, Á., Curiel, J. A., & others. (2022). *Effect of storage and heat treatment on the levels of bioactive flavonoids produced in fermented soy beverages*, *LWT*, 165, 113681..

Peydayesh, M., Bagnani, M., & Mezzenga, R. (2021). Sustainable bioplastics from amyloid fibril-biodegradable polymer blends. arXiv preprint arXiv:2105.14287.

Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992.

Qiao, X., Wang, C., & Zhang, B. (2016). Thermal processing enhances antioxidant properties in soy products: A study on flavonoid composition and free radical scavenging activity. *Food Chemistry*, 194, 135–143.

Rasika, D. M. D., Vidanarachchi, J. K., Luiz, S. F., Azeredo, D. R. P., & others. (2021). *Probiotic delivery through non-dairy plant-based food matrices*, *Agriculture*, 11(7), 599..

Rekha, C. R., & Vijayalakshmi, G. (2011). *Bioconversion of isoflavone glycosides to aglycones enhances the bioavailability of soymilk isoflavones*, *LWT - Food Science and Technology*, 44(6), 1443–1448..

Sánchez-Vioque, R., Rodríguez-Conde, M. F., Reina-Ureña, J. V., Escolano-Tercero, M. A., & Herraiz-Peñalver, D. (2015). Comparison of antioxidant activity in commercial soy beverages and cow's milk. *Antioxidants*, 4(3), 523–536.

Sharma, N., Yeasmen, N., Dube, L., & Orsat, V. (2024). A review on current scenario and key challenges of plant-based functional beverages. *Food Bioscience*.

Shibata, Y., Ohashi, Y., Fujimura, N., & Hashimoto, N. (2018). Effect of different heating treatments on the microstructure and kokumi substance of soybeans. *Food Science and Technology Research*, 24(6), 1111–1120.

Shin, J. H., Kim, H. W., Lee, M. K., Jang, G. H., & Lee, S. H.

(2015). *Effect of thermal treatments on flavonoid contents in domestic soybeans*, *Korean Journal of Food Preservation*, 34(2), 105–112..

Shin, M. S., Park, H. J., & Lee, J. S. (2015). *Release of bound flavonoids in soybeans by heat processing*, *Journal of Functional Foods*, 12, 98–105..

Song, Y. R., Park, Y. S., & Kim, J. M. (2021). Influence of soybean pretreatment on sensory and physicochemical properties of fermented soymilk beverages. *Food Science and Biotechnology*, 30(2), 295–302.

Springmann, M., Clark, M., Poore, J., & Scarborough, P. (2023). The global and regional air quality impacts of dietary change: Health and environmental benefits of plant-based diets. *Nature Communications*, 14(6227).

Springmann, M., Godfray, H. C. J., Rayner, M., & Scarborough, P. (2016). Analysis and valuation of the health and climate change co-benefits of dietary change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(15), 4146–4151.

Statista. (2024). Plant-based food market value worldwide from 2019 to 2030.

Tamime, A. Y., & Robinson, R. K. (2007). *Yoghurt: Science and technology* (3rd ed.). Woodhead Publishing.

Tong, S. C., Siow, L. F., & Lee, Y. Y. (2024). Plant-based milk: unravel the changes of the antioxidant index during processing and storage –A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*.

Tubiello, F. N., et al. (2021). Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nature Food*, 2(9), 724–732.

Udayakumar, S., Rasika, D. M. D., Priyashantha, H., & others. (2022). Probiotics and beneficial microorganisms in biopreservation of plant-based foods and beverages. *Applied Sciences*, 12(22), 11737.

Vinderola, C. G., Bailo, N., & Reinheimer, J. A. (2000). *Survival of probiotic microflora in Argentinian yoghurts during refrigerated storage, Food Research International*, 33(2), 97–102..

Wang, X., Li, X., & Zhao, Y. (2021). *Effect of different roasting temperatures on soymilk fermentation properties, Food Bioscience*, 41, 100923..

Wang, Y., Wu, Y., & Zheng, J. (2018). Comparison of amino acid profiles and digestibility of plant and animal proteins. *Food Chemistry*, 265, 112–120.

Xie, A., Dong, Y., Liu, Z., Li, Z., Shao, J., Li, M., & Yue, X. (2023). *A review of plant-based drinks addressing nutrients, flavor, and processing technologies, Foods*, 12(21), 3952..

Xu, B., & Chang, S. K. C. (2020). Effect of soaking, boiling, and steaming on total phenolic content and antioxidant activities of cool-season food legumes. *Food Chemistry*, 110(1), 1–13.

Xu, B., & Chang, S. K. C. (2020). Total phenolic content and antioxidant properties of eclipse black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as affected by thermal processing. *Journal of Food Composition and Analysis*, 92, 103559.

Xu, B., Chang, S. K. C., & Wang, L. (2020). Effect of roasting on phenolic composition and antioxidant activity of soybeans. *Food Chemistry*, 318, 126400.

Xu, B., et al. (2020). Effect of thermal processing on phenolic compounds and antioxidant activity in soybean. *Food Chemistry*, 333, 127514.

Xu, D. P., et al. (2020). Impact of fermentation on polyphenol content and antioxidant activity in soy-based products. *Food Research International*, 128, 108778.

Xu, Y., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Sun, J. (2020). Effect of thermal processing on lipid oxidation and protein degradation in soybeans. *Food Chemistry*, 330, 127223.

Yang, J., et al. (2015). *Impact of soaking and thermal treatment on phenolic profiles and antioxidant activity of legumes*, *Food Research International*, 76, 757–763..

Yang, J., Guo, J., & Yuan, J. (2015). Impact of soaking and thermal treatment on phenolic profiles and antioxidant activity of legumes. *Food Research International*, 76, 757–763.

Yuan, S. H., Chang, S. K. C., & Liu, Z. S. (2008). Elimination of trypsin inhibitors and changes of isoflavones during soaking and heating of soybeans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(22), 10449–10454.

Zhang, Q., et al. (2012). *Effect of thermal treatment on the yield and properties of soy milk*, *Food Research International*, 48(2), 529–534..

Zhang, Y., Liu, X., Wang, L., & Deng, Y. (2012). Influence of roasting on physicochemical properties and oxidative stability of soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, 89(6), 1029–1036.

Zheng, H., Chen, L., & Liu, F. (2020). *Comparative lipidomics of plant-based and dairy-based beverages*, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(15), 4380–4387.

감사의 글

본 논문을 완성하기까지 많은 분들의 아낌없는 지도와 따뜻한 격려가 있었습니다. 이 감사의 글으로 그 분들께 진심 어린 감사를 전하고자 합니다. 무엇보다도 본 연구의 시작부터 끝까지 깊은 학문적 통찰과 세심한 지도로 이끌어 주신 지도교수님 양지영 교수님께 가장 큰 감사의 말씀을 드립니다. 연구 방향을 설정하는 데 있어 항상 명확한 지침을 주시고, 부족한 부분을 끊임없이 보완할 수 있도록 격려해 주신 교수님의 가르침은 앞으로의 연구 활동과 사회 생활에 있어 큰 자양분이 될 것입니다. 또한, 논문 심사를 맡아 귀중한 조언과 격려를 보내주신 조승목 교수님, 김영목 교수님께도 깊이 감사드립니다. 교수님들의 날카로운 통찰과 따뜻한 격려는 본 연구의 완성도를 높이는 데 큰 도움이 되었습니다. 아울러 연구 수행과 대학원 생활 전반에 걸쳐 물심양면으로 큰 도움을 주신 휴밀의 김경환 대표님께 진심으로 감사드립니다. 끝까지 응원해 주신 대표님의 지지와 격려 덕분에 이 연구를 끝까지 진행할 수 있었습니다. 또한 연구의 실질적인 조언과 방향 설정에 있어 많은 도움을 주신 유태근 이사님과 남현규 연구소장님께도 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 긴 시간 동안 늘 곁에서 지치지 않고 응원을 아끼지 않았던 이여진 연구원님께도 진심 어린 감사를 전합니다. 바쁜 일정 속에서도 항상 따뜻한 조언과 격려를 보내주신 덕분에 지치지 않고 이 길을 걸어올 수 있었습니다.

돌이켜보면 지난 2년간의 대학원 생활은 제 인생에서 매우 값진 시간이었습니다. 이 기간 동안 학문적으로 한층 더 깊이 있는 지식을 쌓을 수 있었고, 다양한 경험과 도전을 통해 스스로도 한 단계 성장할 수 있었습니다. 논문과 졸업은 끝이 아닌 새로운 출발점이라 생각하며, 이제는 그동안의 배움을 바탕으로 식품산업 현장에서 실질적인 보탬이 되는 사람이 되기 위해 더욱 노력하겠습니다. 그리고 마지막으로, 언제나 한결같은 마음으로 뒤에서 묵묵히 응원해 준 사랑하는 저의 남편과 부모님께 깊은 감사를 전하며, 이 글을 마칩니다.