



Research Article

Quality characteristics of *makgeolli* added with *Humulus lupulus* (hops) 홉(*Humulus lupulus*)을 첨가한 막걸리의 품질 특성

Ji-Youn Kim, Ji-Ho Choi*

김지윤 · 최지호*

Fermented & Processed Food Research Division, National Institute of Crop and Food Science, RDA,
Wnaju 55365, Korea

국립식량과학원 식품자원개발부 발효가공식품과

Abstract In this study, *makgeolli* was prepared by adding hops under various processing conditions to investigate its quality characteristics. Recently, studies on *makgeolli* incorporating various ingredients have been actively conducted. Two types of hops were used, and experiments were conducted under various treatments and concentrations. *Makgeolli* was produced using water, rice, glucoamylase, and *Saccharomyces cerevisiae* Safale WB06 and two hop varieties (*Saaz hop* and *Hongchen hop*). Fermentation involved a primary stage at 25°C for 6 days, a secondary stage at 35°C for 3 days and aging at 10°C for 24 h. Treatments A and C showed the highest levels of soluble solids (up to 18.90 °Brix) and reducing sugars (up to 20.65%). Alcohol content showed no consistent trend. No significant differences were found in pH, total acidity, or amino acid content among treatments. Various free sugars and organic acids were detected, reflecting complex fermentation dynamics. Differences in sugar composition and aroma-related characteristics were observed depending on hop variety, with *Saaz hop* contributing to a more balanced fermentation profile, while *Hongchen hop* tended to increase reducing sugar content and impart distinctive aromatic properties. These results suggest that hop addition can enhance sugar content and sensory qualities in *makgeolli*. Through this study, it is expected that *makgeolli* with distinctive flavor and aroma can be produced using hops.

Keywords high-temperature, *Humulus lupulus*, *makgeolli*, low-alcohol, yeast



OPEN ACCESS

Citation: Kim JY, Choi JH.
Quality characteristics of
makgeolli added with *Humulus
lupulus* (hops). Food Sci. Preserv.,
33(4), 715-728 (2026)

Received: October 30, 2025
Revised: December 24, 2025
Accepted: December 26, 2025

***Corresponding author**
Ji-Ho Choi
Tel: +82-63-238-3622
E-mail: jhchoi74@korea.kr

Copyright © 2026 The Korean
Society of Food Preservation.
This is an Open Access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution
Non-Commercial License
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits
unrestricted non-commercial use,
distribution, and reproduction in
any medium, provided the
original work is properly cited.

1. 서론

최근 5년간 막걸리 수출 금액은 2020년 12,469천 달러, 2021년 15,804천 달러, 2022년 15,677천 달러, 2023년 14,688천 달러, 2024년 14,734천 달러 수출을 하여 세계적으로 인기가 있는 추세이다 (KATI, 2026). 막걸리는 발효 과정 동안 원료로부터 유래된 당분, 아미노산, 유기산 등의 맛 성분과 생성된 휘발성 풍미성분이 색과 함께 품질의 조화를 이루게 되고(Song 등, 2015), 다른 주류와 달리 생 효모나 비타민 B군, 필수아미노산인 glutamic acid, lysine, leucine 등을 함유해 영양가가 풍부하며 산미에 관여하는 유기산은 갈증 해소 및 신진대사를 원활히 한다고 보고되고 있다(Kim 등, 2013b). 이에 따라 키위(Kim 등, 2013b), 아로니아(Park 등, 2016), 크랜베리(Lee 등, 2013a), 비파 열매(Choi 등, 2013), 새싹마늘 분말(Kim 등, 2024) 등 다양한 재료를 활용한 막걸리의 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다.

홉은 6-12 m까지 자라나며 삼과(*Cannabaceae*)에 속하는 다년생 숙근성 초본 식물이자 냉쿨식물 이고 암수가 각각 다른 자웅이주 형태로 33-35°C에서 잘 자란다고 보고되어 있다(Ha 등, 2023;

Jung, 2015). 홉은 주로 맥주의 원료로 사용되고 암꽃이며 연두색의 작은 술방울 모양으로 8월 경에 수확해 사용하며 홉은 자연적 수지로 끈적끈적하고 톡 쏘는 냄새가 나는 것으로 보고되어 있다(Jung, 2015). 홉은 부패균을 저해하고 고미와 아로마를 부여하며 홉 수지에 포함되어 있는 α -acid, β -acid의 이성질화 반응을 통한 물질들이 구조적으로 변화해 맥주의 향과 쓴맛을 만들고 아로마는 에센셜 오일에서 유도되는 것으로 알려져 있지만 맥주의 알코올 생성에는 반응하지 않는 것으로 알려져 있다(Jung과 Chung, 2017; Kwon, 2023). 이 중 강한 쓴맛을 내는 α -acid에는 휴물론(humulone), 코휴물론(cohumulone), 애드휴물론(adhumulone)이며 α -acid는 맥주의 쓴맛과 거품이 남아있게 하는 포지에 필수적인 요소이며 쓴맛 조절의 지표 값으로 사용된다고 알려져 있다(Jung과 Chung, 2017). α -Acid는 맥주 자비 시에 iso- α -acid으로 이성화 되는 분자 구조를 보여주며 iso- α -acid는 맥주 단백질과 표면 활성 복합체를 형성하여 맥주 거품 생성과 유지에 영향을 미친다고 알려져 있고 리터당 10 mg 이상 함유되면 거품 생성에 좋은 영향을 준다고 알려져 있을 뿐만 아니라 iso- α -acid는 그람 양성 세균에 대한 항균 활성을 가지고 있다고 보고되어 있다(Choi, 2024; Jung, 2015). 홉의 oil 성분은 monoterpene, sesquiterpene계 성분이 알려져 있으며 암세포의 증식 억제 효과와 상관성이 있는 xanthohumol도 큰 주목을 받고 있다(Kwon, 2023). 뿐만 아니라 아로마는 essential oil에서 유도된다고 보고되어 있으며, floral, citrus의 아로마는 geraniol과 linalool에 기인하고 herbal, spicy의 아로마는 홉의 산화물인 humulene과 caryophyllene에 기인한다고 보고되어 있다(Kovacevic and Kac, 2001; Moon, 2016; Sakamoto and Konings, 2003).

따라서 본 연구에서는 맥주의 주 원료 중인 하나인 홉을 막

걸리에 첨가하여 다양한 공정 조건의 막걸리를 제조하고 향미를 가지는 막걸리를 제조한 뒤 품질 특성을 파악하고 기호적으로 긍정적인 향미의 특성을 가진 막걸리 개발의 가능성을 비교 및 탐색하고 다양한 막걸리 제조 방법을 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 원료 및 홉 첨가 막걸리의 제조

홉을 첨가한 막걸리 제조 방법은 Fig. 1과 같다. 홉을 첨가한 막걸리 제조를 위해 사용한 전분질 원료는 쌀(Samkwang, Gyeongju, Korea), 효모는 맥주 제조에 사용되는 *Saccharomyces cerevisiae* SafAle WB06 (Fermentis Co., Rians, France)을 사용하였다(Kim 등, 2025). 효모 생육은 교반식 배양기(SI-600R, JEIO Tech Co. Ltd., Daejeon, Korea)를 사용하여 150 rpm에서 28°C를 유지하고 Yeast Peptone Dextrose (YPD) broth (BD Integrated Diagnostic Solutions, Sparks, MD, USA) 배지에서 1.0×10^9 CFU/mL 이상 배양되면 실험에 사용하였다(Kim 등, 2025). 홉은 대중적으로 맥주 제조 시 사용하는 *Saaz hop* (Yakima Chief Hops Inc., Yakima, WA, USA)와 국내 홉인 *홍천홉*(*Hongchen hop*, Hid healing farm, Hongchen, Korea)을 전분질 대비 0.05%, 0.1%, 0.2%로 농도로 각각 진행하였다. 홉 농도는 맥주 종류 중 하나인 고제(gose) 스타일보다 낮은 쓴맛을 가지기 위해 최대 0.2%, 최소로는 4배 적은 0.05%로 진행하였다. 쌀은 흐르는 물에 깨끗하게 여러번 씻은 뒤 2시간 동안 침지 시킨 다음 1시간 동안 물 빼기를 진행하였다(Kim 등, 2025). 고두밥을 제조하기 위해 물 빼기를 끝낸 쌀을 증자기(Electric steam-generator, Pyeonghwa Machinery Co. Ltd., Deagu, Korea)에 50분간 쪄 뒤 10분간 뜸들이기를 진행하고

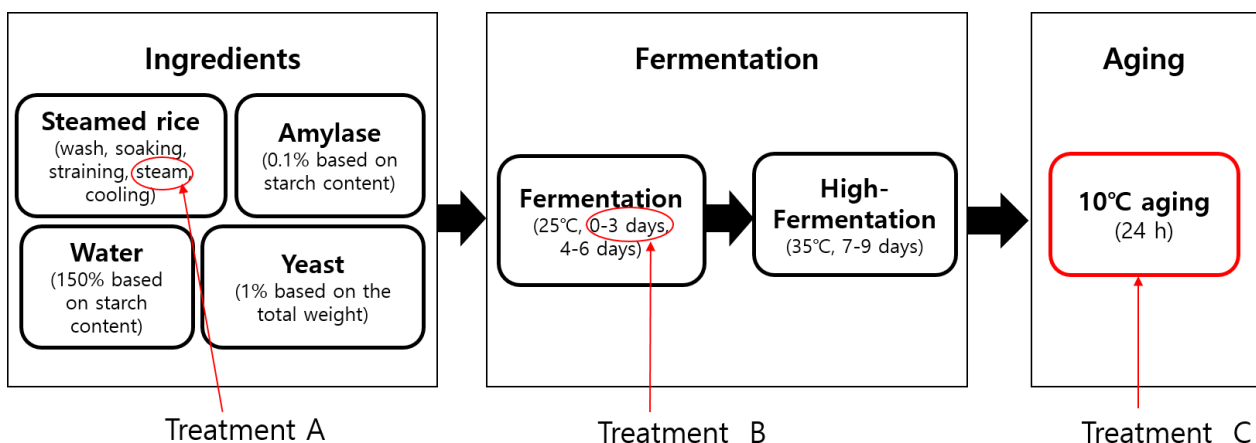


Fig. 1. Schematic diagram of the *makgeolli* production process with different hop addition treatments. Treatment A, removal of hops after steaming with rice; Treatment B, addition of hops on the 0 day of fermentation, followed by removal on the 3 day; Treatment C, addition of hops during maturation at 10°C, with removal after 24 h

냉각하여 막걸리 제조에 사용하였다(Kim 등, 2025). 발효통에 고두밥을 넣고 고두밥 대비 150% 가수를 한 뒤 효소제로 Nulookzyme R400 (Glucoamylase, Bision Corporation, Seongnam, Korea)를 고두밥 대비 0.1% 첨가하였다(Kim 등, 2025). 마지막으로 효모는 총량 대비 1%를 투입하고 교반하였다(Kim 등, 2025). 홉을 첨가한 막걸리는 25°C에서 6일 동안 진행 후 35°C에서 3일 동안 발효하고 10°C에서 1일간 숙성하였다. Kim 등(2022)의 연구에 따르면 양조용 효모의 최적 발효 온도는 28-33°C로 알려져 있어 34-43°C로 고온 발효한 결과 알코올 생성량이 감소하고 환원당은 증가하여 고온 발효 공정을 진행하였다. 홉 첨가 시기는 3가지 방법으로 진행하였다. α -Acid은 맥즙이나 맥주에 용해가 잘 되지 않지만 끓이는 공정에서 홉의 성분이 나오는 것으로 보고되어 있어(Choi, 2024), 홉과 쌀을 같이 증자하여 맥주 제조 시의 자비 과정과 비슷한 환경을 제조한 뒤 막걸리 제조 전에 홉을 제거하여 처리 A를 진행하였다. 처리 B와 C는 자비 과정을 생략하여 α -acid가 이성화되는 것을 억제하였다. 고두밥과 홉을 같이 발효하여 홉에 있는 향을 얻기 위해 발효 0일 차에 홉을 투입하고 발효 3일 차에 홉을 제거한 처리 B와 발효가 끝난 후 홉에 있는 향을 얻기 위해 10°C 숙성 때 홉을 투입하고 24시간 후에 홉을 제거한 처리 C를 진행하여 홉 처리 시기를 달리하여 홉을 첨가한 막걸리 제조에 적합한 처리 조건을 설정하였다.

2.2. 홉의 고미성분 및 xanthohumol 측정

홉의 고미성분은 Kwon (2023)의 방법으로 측정하였다. 홉의 고미성분은 분쇄된 시료 0.5 g과 509 mL methanol (Fisher Scientific Korea Ltd., Seoul, Korea), 91 mL water, 0.17 mL 88% formic acid (Sigma-Aldrich, Missouri, St. Louis, USA) 혼합용액 20 mL로 1시간 동안 교반하여 추출한 후 0.2 μ m nylon filter (Whatman, Maidstone, UK)로 여과 후 사용하였다. 표준물질은 표준원액 ICE-4 (International Calibration Extract 4, Labor Veritas, Zurich, Switzerland) 1,000 mg을 저울로 달아 1,000 mL 정량 플라스크에 넣고, methanol을 사용하여 1,000 mg/L이 되도록 표준용액을 제조하였다. 표준용액은 -20°C 냉동실에 보관하면서 실험 직전에 희석하여 사용하였다. 분석 조건은 HPLC (Waters e2695, Milford, Massachusetts, USA)를 이용하였으며 분석용 컬럼은 Lachrom C18-AQ (4.6 mm $\times$ 250 mm, HITACHI, Kyoto, Japan)를 사용하였다. 이동상은 25 mM sodium perchlorate (Sigma-Aldrich), 2.5 mM perchloric acid (Sigma-Aldrich), 50-90% acetonitrile (Mallinckrodt Baker Inc., Phillipsburg, USA), 90% methanol (Sigma-Aldrich)을 이용하여 기울기 용리 방식으로 분석하였다. Flow rate는 0.65 mL/min, column oven의 온도는 35°C, injection volume 10 μ L, UV 328 nm에서 검출하였다.

홉의 xanthohumol은 Kwon (2023)의 방법으로 측정하였다.

Xanthohumol 분석은 분쇄된 홉 시료 1 g에 10 mL ethanol (Fisher Scientific Ltd.)을 넣고 1시간 동안 추출한 후 0.2 μ m nylon filter (Whatman)로 여과 후 사용하였다. 표준물질은 xanthohumol from hop (Sigma-Aldrich) 5 mg을 ethanol로 녹여 500 mg/L가 되도록 표준용액을 제조하였다. Xanthohumol 분석 조건은 UPLC (Nexera X2, Shimadzu, Kyoto, Japan)를 이용하였고, 분석용 column으로 Kinetex XB.C-18 100 Å (150 $\times$ 2.1 mm, 1.7 μ m, Phenomenex Inc., California, USA)을 사용하였다. 이동상은 0.1% acetic acid in water, 0.1% acetic acid in acetonitrile (Fisher Scientific Ltd.)를 이용하여 기울기 용리 방식으로 분리하였다. 유속은 0.3 mL/min, 컬럼 오븐의 온도는 28°C, injection volume 3 μ L, UV 370 nm에서 검출하였다.

2.3. pH와 총산 및 아미노산 함량 측정

pH와 총산의 경우 Kim 등(2022)과 Kim 등(2025)의 방법으로 측정하였다. pH meter (Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, Massachusetts, USA)를 이용하여 pH를 측정하였으며 총산은 시료 10,000 μ L를 0.1 N NaOH (Sigma-Aldrich) 용액을 사용하여 pH 7.0까지 중화시키는 데 사용되는 0.1 N NaOH의 소비된 양을 초산(acetic acid)으로 환산하여 total acid (% w/v)로 표시하였다. 아미노산 함량의 경우 Kwon (2023)의 방법으로 측정하였다. 아미노산 함량은 시료 10,000 μ L에 0.1 N NaOH 용액을 넣어 pH 8.2까지 적정한 후 중성 formalin (Sigma-Aldrich) 용액 5,000 μ L를 넣은 뒤 유리된 산을 중화하는데 사용되는 0.1 N NaOH의 양을 glycine으로 환산하여 표시하였다(Kwon, 2023).

2.4. 당도와 환원당 함량

당도와 환원당 측정의 경우 Kwon (2023)과 Kim 등(2025)의 방법으로 측정하였다. 당도($^{\circ}$ Brix)의 경우 굴절용 당도계인 Digital refractometer (PR101, ATAGO[®], Tokyo, Japan)를 사용하여 측정하였다. 환원당은 DNS (Dinitrosalicylic acid)법을 이용하여 분석하였다. 시료를 증류수로 희석한 뒤, 희석한 시료 용액 200 μ L에 DNS 시약 600 μ L를 넣어 끓는 물에서 5분 동안 끓인 다음, 실온에서 냉각한 후 증류수 4,200 μ L를 넣고 혼합하였다. 이후 분광광도계(Cary 3500 UV-Vis spectrophotometer, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)를 사용하여 550 nm에서 흡광도를 측정해 환원당을 측정하였다. 환원당 함량은 glucose (Sigma-Aldrich) 표준 검량선을 작성하여 환원당 함량(%)을 계산하였다.

2.5. 알코올과 휘발산 함량 측정

알코올과 휘발산 함량 측정의 경우 Kim 등(2022)과 Kim 등

(2025)의 방법으로 측정하였다. 알코올 함량은 증류 플라스크에 시료 100 mL와 증류수 50 mL를 혼합 후 증류하였다. 100 mL 메스실린더에 90 mL까지 증류액을 받은 뒤 증류수로 100 mL로 정용하고 혼합하여 알코올 분석기(Digital Alcohol Meter DA-155, Kyoto Electronics Manufacturing Co., Ltd., Japan)를 이용해 측정하였다. 휘발산 함량은 알코올 함량 측정에 사용한 증류액 30 mL를 사용하여 측정하였다. 증류액에 phenolphthalein (Sigma-Aldrich Co.) 용액을 2-3 방울 첨가한 후 0.01 N NaOH를 이용하여 자홍빛으로 변할 때까지 적정하는 데 소모된 양을 환산하여 mg/L (ppm) 단위로 나타내었다.

2.6. 유리당 분석

유리당 분석의 경우 Kwon (2023)의 방법으로 측정하였다. 유리당 분석 방법은 post column 방법을 이용하여 HPLC로 분석하였다. 시료는 여과(0.2 μ m, Millipore Co., Burlington, Massachusetts, USA) 후 사용하였다. Column의 경우 Supelco sil LC-NH₂ (25 cm $\times$ 4.6 mm, Bellefonte, Pennsylvania, USA)를 사용하였다. 이동상으로는 75% acetonitrile (Mallinckrodt Baker Inc.)를 사용하였다. 분석 조건은 유속 1 mL/min, 컬럼 오븐 온도 35°C, 주입량은 10 μ L로 설정하였다. Detector는 RI detector (2414, Waters Co.)로 검출하였다.

2.7. 유기산 분석

유기산 분석의 경우 Kwon (2023)과 Kim 등(2025)의 방법으로 측정하였다. 유기산 분석은 post column 방법을 이용하여 HPLC (LC-20A, Shimadzu Co.)로 분석하였다. 시료는 여과(0.2 μ m, Millipore) 후 사용하였다. 컬럼의 경우 TSKgel ODS-100V (5 μ m, 4.6 mm ID $\times$ 250 mm, Tosoh Co., Tokyo, Japan)를 사용하였다(Kim 등, 2025) 이동상으로는 8 mM perchloric acid (Sigma Chemical Co., St. Louis, Missouri, USA)를 사용하였고, 반응용액으로는 0.2 mM bromothymol blue (Sigma Chemical Co.), 15 mM Na₂HPO₄ (Sigma Chemical Co.), 7 mM NaOH (Samchun Pure Chemical., Pyeongtaek, Korea)를 혼합한 혼합 용매에서 반응시킨 후 UV 440 nm에서 검출하였다. 유속은 이동상과 반응용액 모두 1 mL/min, 컬럼 오븐 온도는 40°C, 반응 용액 온도 25°C, 주입량은 10 μ L로 분석을 진행하였다.

2.8. 전자코 분석

전자코 분석의 경우 Kang 등(2020)의 방법을 변형하여 진행하였다. 다중 향기 성분 분석을 위해 시료 원액 5 mL를 20 mL 바이알(Ls-Phs-Psck GmbH, Langerwehe, Germany)에 넣은 뒤 40°C에서 20분간 500 rpm으로 교반하였다. 이후 전자코(Neracles Neo electronic nose, Alpha Mos, Toulouse, France)

를 이용하여 측정하였다. 시료 분석에는 두 개의 column이 부착된 Heracles E-nose (MTX-5 and MTX-1701)를 사용하였으며, FID를 이용하여 검출하였다. Injection의 경우 syringe type으로 컬럼 온도를 25°C로 유지된 상태에서 컬럼 head pressure 1.0 psi로 주입하였으며, 분석 시 injector pressure는 1.0 psi, detector pressure는 39.0 psi로 하였다. 탄소 수에 기반을 둔 관련성 지수는 Kovat's index library (Alpha MOS)를 이용하여 분리된 peak의 성분을 동정하였다. 전자코 시스템에 포함된 AroChemBase (Alpha MOS) 라이브러리를 이용해 각 시료의 향기에 함유된 주요 성분들을 정성적으로 분석하였다. 통계 처리는 Alpha MOS software를 사용하여 판별분석법(discriminant function analysis)으로 나타내었다.

2.9. 통계처리

본 연구에서 얻은 결과의 통계적 유의성 경우 Kim 등(2025)의 방법을 이용하였다. 프로그램은 SPSS (Version 26.0, SPSS, Chicago, IL, USA) 프로그램을 사용하였다. 모든 결과는 3회 측정된 값의 평균 $\pm$ 표준편차(Mean $\pm$ SD)로 나타내었다. 각 시료 간의 유의성 검정은 분산분석(ANOVA)을 진행하였으며 유의차가 있는 항목에 대해서는 다중범위검정(Duncan's multiple range test)을 $p < 0.05$ 수준에서 시료 간의 유의적인 차이를 검정하여 판단하였다. 홉의 고미성분 및 xanthohumol의 경우 독립표본 t-test를 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 홉의 고미성분 및 xanthohumol 함량

홉의 고미성분 결과를 Table 1에 나타내었다. 홉을 첨가한 막걸리에서는 고미성분이 검출되지 않는 것으로 확인되었다. α -Acid은 맥즙과 맥주에 용해가 잘 안되나 맥즙 자비 시 humulone이 isohumulone으로 이성화 되면서 극성을 띄게 되어 액상인 맥즙과 맥주에 용해가 잘 되며 맥주에 고미를 부여한다고 알려져 있다(Choi, 2024).

맥주의 쓴맛은 α -acid에 의해 부여되며 대표적으로 adhumulone, cohumulone, humulone 등이 보고되어 있다(Kwon, 2023). Adhumulone은 다른 iso- α -acid에 비해 더 낮은 쓴맛 기여도를 보일 가능성이 있다고 보고되어있으며(Jaskula 등, 2008), cohumulone은 낮은 pH와 강한 극성으로 인해 이성화가 잘 이루어져 고미가를 높이는 데 중요한 성분으로 보고되어 있다(Choi, 2024). Humulone은 맥즙을 끓이는 과정에서 열에 의해 isohumulone으로 이성화되면서 맥주의 쓴맛을 내는 것으로 알려져 있다(Schindler 등, 2019). Cohumulone의 경우 홍천 홉에서는 3.51%를 나타내었으며 Saaz hop에서는 0.98%로 홍천 홉이 약 3배 이상 높은 것으로 확인되었다. Humulone과 adhumulone

Table 1. α -Acid and β -acid compositions and xanthohumol contents of hops used in *makgeolli* production

Type	Cohumulone (%)	Humulone + adhumulone (%)	Total α -acid (%)	Colupulone (%)	Lupulone + adlupulone (%)	Total β -acid (%)	β -acid/ α -acid	Xanthohumol (ppm)
<i>Saaz hop</i>	0.98 $\pm$ 0.01 ¹⁾	6.36 $\pm$ 0.03	7.34 $\pm$ 0.03	1.88 $\pm$ 0.01	2.51 $\pm$ 0.01	4.39 $\pm$ 0.02	0.60 $\pm$ 0.00	227.22 $\pm$ 16.07
<i>Hongchen hop</i>	3.51 $\pm$ 0.05	8.57 $\pm$ 0.10	12.08 $\pm$ 0.14	3.91 $\pm$ 0.05	1.55 $\pm$ 0.02	5.46 $\pm$ 0.07	0.45 $\pm$ 0.00	447.75 $\pm$ 75.63
<i>t(p)</i> ²⁾	-95.000 (0.000) ^{***3)}	-37.968 (0.000) ^{***}	-56.564 (0.000) ^{***}	-75.537 (0.000) ^{***}	79.599 (0.000) ^{***}	-27.611 (0.000) ^{***}	88.605 (0.000) ^{***}	-3.820 (0.019)

¹⁾All values are mean $\pm$ SD (n = 3).

²⁾Values in the *t(p)* row represent Student's t-test statistics, with p-values shown in parentheses.

³⁾* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001.

두 물질을 합친 값은 홍천 홉은 8.57%를 나타내었으며 *Saaz hop*의 경우 6.36%를 나타내어 홍천홉이 약 1.3배 높은 것으로 확인되었다. 총 α -acid의 경우 홍천 홉은 12.08%, *Saaz hop*은 7.34%를 나타내어 홍천 홉에서 더 높은 알파산을 함유하고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 홍천 홉을 사용하면 쓴맛을 *Saaz hop*보다 강하게 낼 수 있을 것으로 생각된다.

β -Acid은 α -acid에 비해 비극성이고 맥주 자비 시에 극성으로 치환되지 못해 이성화가 어렵다고 보고되어 있다(Choi, 2024). 이러한 특성 때문에 맥주에서 용해가 안되어 고미에 영향을 거의 주지 못한다. β -Acid은 α -acid 보다는 그람양성균에 대해 항균효과가 있다고 알려져 있다(Choi, 2024). β -Acid은 주로 adlupulone, colupulone, lupulone 등과 같은 화합물로 구성되어 있다. Adlupulone은 매우 낮은 최소저해농도(MIC)를 가질 정도로 항균 효과가 강하다고 보고되고 있다(Li 등, 2023). Colupulone과 lupulone은 β -하이드록시 α,β -불포화 카보닐기가 있어 킬레이트 작용이 쉬워 생리활성 물질로 작용할 수 있는 것으로 보고된다(Li 등, 2023). Colupulone의 경우 홍천 홉에서는 3.91%를 나타내었으며 *Saaz hop*의 경우 1.88%를 나타내어 홍천 홉이 약 2배 정도 높은 것으로 확인되었다. Lupulone과 adlupulone 두 물질을 합한 값은 홍천 홉에서 1.55%, *Saaz hop*에서 2.51%로 나타나 *Saaz hop*에서 약 1.6배 높은 것으로 나타났다. 총 β -acid은 홍천 홉 5.46%, *Saaz hop* 4.39%로 홍천 홉이 약 1.2배 높은 것으로 확인되었다. Nesvadba 등(2022)의 보고에 의하면 아로마 홉들은 총 α -acid가 2.87-9.68%로 나타났다며 Cibaka 등(2015)의 경우 듀얼 퍼포즈 홉들은 아로마 홉보다 특정 향에 대해서 높게 나타났다고 보고하였으므로 아로마 홉처럼 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 홍천 홉은 *Saaz hop*보다 항균효과가 높을 것이라 생각된다.

홉의 xanthohumol 함량 결과를 Table 1에 나타내었다. Xanthohumol은 pernylation된 chalcone 구조를 공통으로 하며 hop의 총 건조중량 중 0.1-1%를 차지할 정도로 많은 양이 존재하며 특히 에스트로젠 유사효과, 항균작용 및 암예방 작용 등이 관심을 끌고 있다고 알려져 있다(Lee 등, 2010). 홍천홉과 *Saaz*

*hop*의 xanthohumol 함량의 경우 홍천 홉에서 447.75 mg/L, *Saaz hop*에서 227.22 mg/L로 확인되어 홍천 홉에서 더 높은 xanthohumol을 가지고 있는 것으로 확인되었다. Kwon (2023)의 연구에 따르면 cascade 홉의 경우 검출되지 않거나 0.02%로 검출되었으며 *Saaz hop*의 경우 0.46-0.61%, Centennial 홉의 경우 0.65-0.71%를 나타낸다고 보고하였다. 홍천 홉을 사용하게 되면 *Saaz hop*에 비해 xanthohumol의 함유량이 높을 것으로 생각된다.

3.2. pH, 총산 및 아미노산 함량

홉을 첨가한 막걸리의 pH, 총산, 아미노산 함량 결과를 Table 2에 나타내었다. 막걸리의 pH는 발효과정 중 품질 정도를 알 수 있는 중요한 자료뿐만 아니라 생성되는 여러 가지 유기산의 종류 및 농도에 크게 영향을 받는다고 보고되어 있다(Choi 등, 2013; Kim 등, 2013a). 홉을 첨가한 막걸리 pH의 경우 3.48-4.20 사이의 값을 나타내었다. 홉 종류나 처리 조건에 따라서 pH는 대조구와 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 확인하였다. 대부분의 홉을 첨가한 막걸리에서 대조구보다 약간 높은 pH를 나타내는 것으로 확인되었다. 그 중 SB0.1이 가장 높은 pH를 나타내었으며 SB0.2가 가장 낮은 pH를 나타내는 것으로 확인되었다. Choi 등(2013)의 보고에 따르면 비파 열매를 첨가한 막걸리의 경우 pH는 3.91-4.05를 나타낸다고 보고하였고 Park 등(2016)의 경우 아로니아를 첨가한 막걸리의 pH는 3.49-3.74를 나타내어 홉을 첨가한 막걸리는 다른 막걸리와 비슷한 pH를 나타내는 것으로 확인되었다.

막걸리의 총산 함량은 발효 또는 저장 중에 막걸리의 산패 현상을 조기 진단 가능하게 하는 기초 요소이며 이에 따라 발효과정의 변질 정도를 알 수 있는 중요한 요소이다(Kim 등, 2013b). 홉을 첨가한 막걸리의 경우 홉 종류나 처리 조건에 따라서 총산은 대조구와 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 확인되었다. 홉을 첨가한 막걸리의 총산은 0.25-0.38%의 값을 나타내었다. HC0.05에서 가장 낮은 총산을 나타내었으며 HA0.2에서 가장 높은 총산을 나타내는 것을 확인하였다. Kim 등(2013b)

Table 2. Quality characteristics of *makgeolli* added with hops

Type	Treatment	Hop content (%)	Name	Sugar (°Brix)	Reducing sugar (%)	Alcohol content (%)	Volatile acid (mg/L)	pH	Total acid (Acetic acid, %)	Amino acid (Glycine, g/100 mL)
<i>Saaz hop</i> (S)	A ¹⁾	0.05	SA0.05	18.90 ± 0.00 ^{2)a3)}	20.31 ± 0.22 ^{ab}	5.00 ± 0.00 ^k	290.27 ± 3.26 ^a	3.67 ± 0.02 ^{cde}	0.29 ± 0.07 ^{ab}	0.02 ± 0.01 ^b
		0.1	SA0.1	18.17 ± 0.06 ^c	19.08 ± 0.65 ^{cd}	5.33 ± 0.06 ⁱ	252.67 ± 12.22 ^b	3.53 ± 0.08 ^{de}	0.33 ± 0.08 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^{ab}
		0.2	SA0.2	17.20 ± 0.00 ^f	18.31 ± 0.64 ^{defgh}	6.60 ± 0.00 ^c	299.33 ± 5.03 ^a	4.06 ± 0.23 ^{ab}	0.29 ± 0.05 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^{ab}
	B	0.05	SB0.05	17.20 ± 0.00 ^f	18.51 ± 0.91 ^{cdefg}	5.70 ± 0.00 ^g	171.33 ± 12.70 ^g	3.64 ± 0.23 ^{cde}	0.30 ± 0.06 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^{ab}
		0.1	SB0.1	17.00 ± 0.00 ^g	18.16 ± 0.30 ^{defgh}	6.00 ± 0.00 ^f	211.33 ± 7.02 ^{def}	4.20 ± 0.22 ^a	0.33 ± 0.10 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^{ab}
		0.2	SB0.2	16.00 ± 0.00 ⁱ	17.42 ± 0.60 ^{ghij}	6.10 ± 0.00 ^e	226.27 ± 3.72 ^{cde}	3.48 ± 0.02 ^e	0.30 ± 0.06 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^{ab}
	C	0.05	SC0.05	16.13 ± 0.06 ^j	17.89 ± 0.30 ^{efghi}	5.40 ± 0.00 ⁱ	225.33 ± 3.06 ^{cde}	3.90 ± 0.29 ^{abc}	0.29 ± 0.05 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^{ab}
		0.1	SC0.1	16.20 ± 0.00 ⁱ	17.66 ± 0.27 ^{fghij}	5.60 ± 0.06 ^h	227.33 ± 20.82 ^{cde}	3.63 ± 0.06 ^{cde}	0.30 ± 0.05 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^{ab}
		0.2	SC0.2	17.40 ± 0.00 ^e	19.49 ± 0.71 ^{bc}	4.63 ± 0.00 ^m	167.33 ± 4.16 ^g	3.67 ± 0.02 ^{cde}	0.30 ± 0.11 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^{ab}
<i>Hongchen hop</i> (H)	A	0.05	HA0.05	16.60 ± 0.00 ^h	17.58 ± 0.30 ^{fghij}	6.80 ± 0.00 ^b	243.33 ± 7.57 ^{bc}	3.57 ± 0.11 ^{cde}	0.32 ± 0.07 ^{ab}	0.03 ± 0.01 ^a
		0.1	HA0.1	15.27 ± 0.06 ^a	16.74 ± 0.09 ^j	4.80 ± 0.00 ^l	202.00 ± 6.93 ^f	3.62 ± 0.11 ^{cde}	0.28 ± 0.01 ^{ab}	0.02 ± 0.01 ^{ab}
		0.2	HA0.2	15.70 ± 0.00 ^m	17.00 ± 0.50 ^{ij}	4.93 ± 0.06 ^k	201.93 ± 9.19 ^f	3.61 ± 0.06 ^{cde}	0.38 ± 0.02 ^a	0.02 ± 0.00 ^{ab}
	B	0.05	HB0.05	16.60 ± 0.00 ^h	18.63 ± 0.20 ^{cdef}	4.80 ± 0.00 ^l	120.67 ± 9.45 ^h	3.87 ± 0.23 ^{bcd}	0.26 ± 0.01 ^{ab}	0.03 ± 0.01 ^a
		0.1	HB0.1	17.90 ± 0.00 ^d	18.85 ± 0.39 ^{cde}	4.40 ± 0.17 ⁿ	131.00 ± 1.00 ^h	3.54 ± 0.04 ^{de}	0.29 ± 0.04 ^{ab}	0.03 ± 0.01 ^a
		0.2	HB0.2	16.10 ± 0.00 ^{jk}	17.30 ± 0.32 ^{hij}	6.97 ± 0.03 ^a	249.33 ± 22.74 ^b	3.85 ± 0.50 ^{bcd}	0.33 ± 0.06 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^{ab}
	C	0.05	HC0.05	15.60 ± 0.00 ⁿ	18.25 ± 0.25 ^{defgh}	5.70 ± 0.00 ^g	181.33 ± 1.15 ^g	3.73 ± 0.16 ^{cde}	0.25 ± 0.04 ^b	0.02 ± 0.00 ^{ab}
		0.1	HC0.1	17.90 ± 0.00 ^d	20.25 ± 0.32 ^{ab}	6.60 ± 0.00 ^c	230.00 ± 13.86 ^{cd}	3.54 ± 0.01 ^{de}	0.32 ± 0.06 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^{ab}
		0.2	HC0.2	18.70 ± 0.00 ^b	20.65 ± 1.69 ^a	6.40 ± 0.00 ^d	204.00 ± 5.29 ^f	3.54 ± 0.04 ^{de}	0.31 ± 0.05 ^{ab}	0.03 ± 0.01 ^a
-	Control	0.0	CON	16.07 ± 0.06 ^k	18.00 ± 0.54 ^{defghi}	5.10 ± 0.00 ^j	208.13 ± 19.06 ^{ef}	3.59 ± 0.05 ^{cde}	0.26 ± 0.06 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^{ab}

¹⁾A, removal of hops after steaming with rice; B, addition of hops on the 0 day of fermentation, followed by removal on the 3 day; C, addition of hops during maturation at 10°C, with removal after 24 h.

²⁾All values are mean ± SD (n = 3).

³⁾Means with different superscript letters (^{a-n}) in the same column are significantly different at p < 0.05 by Duncan's multiple range test.

의 경우 키위를 첨가한 막걸리에서 0.27-0.34%로 총산이 확인되었으며 Ying 등(2013)의 경우 팔을 첨가한 막걸리의 총산은

0.41-0.46%로 나타내었다. 본 연구는 Kim 등(2013b)과 비슷한 경향을 나타내는 것으로 확인되었다.

대부분의 막걸리 제조 시 원료로 사용되는 쌀과 밀은 누룩에 있는 탄수화물 분해 효소, 단백질 분해 효소, 지방 분해 효소 등에 분해되며 아미노산이 생성되고 아미노산은 미생물의 영양원으로 이용 및 ester와 fusel oil 등의 향기 성분의 전구물질로 사용될 수 있는 중요한 성분이라고 보고되어 있다. 또한 술에 감칠맛을 부여하고 과생성이 되었을 경우에는 술덧이 노후화된 느낌을 낸다고 알려져 있지만 누룩에서 산성 단백질분해 효소 활성이 활발한 경우에는 아미노산이 높게 확인된다고 보고하였다(Kim과 Yi, 2010; Jung 등, 2018; Lee 등, 2021; Im 등, 2025). 홉을 첨가한 막걸리의 경우 홉 종류나 처리 조건에 따라서 아미노산 함량은 대조구와 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 확인되었다. 또한 처리 조건이나 홉의 함량에 따라서도 유의적인 차이가 적은 것으로 나타났다. 홉을 첨가한 막걸리의 아미노산 함량은 0.02-0.03 g/100 mL를 나타내는 것으로 확인되었다. Lee 등(2013b)의 으름 첨가 막걸리 아미노산의 경우 0.15-0.31%를 나타내는 것을 확인하였고 Kim과 Yi(2010)의 경우 팽화차초 첨가에 따른 조 막걸리의 아미노산은 0.52-0.62%로 나타나 홉을 첨가한 막걸리의 아미노산도는 다른 막걸리에 비해 매우 낮은 아미노산도를 나타내는 것을 확인하였다. 본 실험에서 아미노산을 적게 생성한 것은 누룩을 첨가하지 않고 전분 분해 효소만 첨가하여 단백질 분해가 원활히 이루어지지 않고 단백질 분해 효소가 적어 아미노산도가 낮은 것으로 생각된다.

3.3. 당도 및 환원당 함량

홉을 첨가한 막걸리의 당도와 환원당 결과를 Table 2에 나타내었다. 홉을 첨가한 막걸리의 경우 홉 종류에서는 큰 차이를 나타내지 않았지만 처리 조건에 따라서 당도는 대조구와 큰 차이를 나타내는 것을 확인하였다. 대조구(16.07 °Brix)보다 낮은 당도를 나타내는 처리 조건은 A 처리 방법이었다. 특히 처리 방법 A는 15.27-18.90 °Brix, 처리 B의 경우 당도는 16.10-17.90 °Brix, 처리 C의 경우 당도는 15.60-18.70 °Brix로 확인되었다. 홉 종류와 처리 조건에 따라 큰 차이를 나타내는 것으로 확인되었다. 하지만 홉 함량에 비례하여 당도는 변화하지 않는 것으로 확인되었다. Jeon과 Lee(2011)의 경우 블루베리 첨가 막걸리의 당도는 6.8-7.5 °Brix를 나타내었으며 Lee 등(2013a)의 경우 크린베리를 첨가한 막걸리의 당도는 11.33-11.73 °Brix를 나타내어 홉을 첨가한 막걸리는 다른 막걸리에 비해 높은 당도를 가지고 있는 것으로 확인되었다. 당도의 경우 연구마다 비슷한 경향을 나타내지 않아 재료 및 제조 방법 등의 다양한 조건에 의해 당도의 차이가 나타나는 것으로 사료된다. Kim 등(2025)의 연구에 따르면 발효 9일 차에서 15 °Brix가 넘는 막걸리를 제조하였으며 이에 균주의 영향보다 효소 작용에 의해 전분이 분해되어 생성된 당에 의한 것으로 판단하였

고 높은 당도는 소비자 기호도에 긍정적인 영향을 나타낸다고 보고되어있다.

홉을 첨가한 막걸리의 경우, 홉의 종류에 따른 차이는 크지 않았으나, 처리 조건에 따라 환원당 함량이 대조구와 큰 차이를 보였고, 이는 당도 변화와 유사한 경향을 나타내었다. 가장 낮은 환원당을 나타내는 것은 홍천홉과 처리 A 조건을 사용하였을 때 16.74-17.58%로 대조구(18.00%)보다 낮은 환원당을 나타내었다, 하지만 Saaz hop과 처리 A 조건을 사용하였을 때는 18.31-20.31%를 나타내어 처리 A 조건의 경우 홉 종류에 따라 차이를 나타내었다. 처리 B의 경우 17.30-18.85% 사이의 환원당을 나타내었으며 처리 C의 경우 17.66-20.65%를 나타내는 것으로 확인되었다. 처리 C 방법을 이용하면 다른 조건을 사용했을 때보다 높은 환원당을 가진 막걸리를 제조할 수 있을 것으로 생각된다. Jeon과 Lee (2011)의 경우 블루베리 첨가 막걸리의 환원당은 3% 이하의 값을 나타내었으며 Ying 등(2013)의 경우 팔을 첨가한 막걸리의 환원당은 3% 이하의 값을 나타내어 홉을 첨가한 막걸리는 매우 높은 환원당을 가지고 있는 것으로 확인되었다. 환원당은 막걸리 제조 시 당화 과정을 거치는데 전분은 당화 amylase 효소 작용을 거쳐 포도당으로 분해된다. 분해된 유리당은 효모에 의해 알코올과 이산화탄소를 생성하는 메커니즘을 가져 유리당과 알코올은 높은 연관성을 가지고 있다고 보고되어 있다(Kim과 Yi, 2010; Shin 등, 2016). 효모는 영양원이 풍부하고 20-30°C의 발효 온도에서 성장이 원활하나 본 실험에서는 누룩을 첨가하지 않고 전분 분해 효소만 사용하여 영양원을 제어하고 고온 처리로 인하여 효모가 에너지 대사를 정상적으로 진행하지 않아 환원당이 많이 함유된 것으로 생각된다(Bang 등, 2012; Kim 등, 2022; Lee 등, 1990). 또한, 효소제인 glucoamylase의 작용 최적 온도는 50-55°C이기 때문에 고온 발효를 진행하게 되면 전분의 분해가 활발하게 진행되어 환원당 함량이 높게 나타난 것으로 생각된다(Bai 등, 1991).

3.4. 알코올 및 휘발산 함량

홉을 첨가한 막걸리의 알코올 함량과 휘발산 함량 결과를 Table 2에 나타내었다. 홉을 첨가한 막걸리의 경우 홉 종류에서는 큰 차이를 나타내지 않았지만 처리 조건에 따라서 알코올 함량은 대조구와 차이를 나타내는 것으로 확인되었다. 대부분의 홉을 첨가한 막걸리는 대조구보다 높은 알코올 함량을 나타내었으며 홍천 홉을 사용하고 처리 B로 처리했을 때 6.97%로 가장 높은 알코올 함량으로 확인되었다. 처리 A의 경우 4.80-6.80%, 처리 B의 경우 4.40-6.97%, 처리 C의 경우 4.63-6.40%로 나타났다. Lee 등(2019)의 경우 막걸리 알코올 함량이 16.1-16.4%를 나타내는 것으로 확인되었다. Kwon 등(2024)의 경우 가수량과 효모를 달리한 막걸리의 알코올 함량은 15.11-

19.29%를 나타내었으며 가수량과 감 착즙액 첨가량에 따른 감 막걸리의 알코올 함량은 15.64-18.48%를 나타내었다. 홉을 첨가한 막걸리의 알코올 함량은 4.40-6.97%를 나타내어 다른 막걸리들에 비해 현저히 낮은 알코올 함량을 나타내는 것으로 확인되었다. 효모는 스트레스 환경에 노출되면 생존을 위한 적응 메커니즘을 활성화하는 것으로 보고되어 있으며, 영양원이 부족한 상황에서는 생존에 필요한 단백질과 효소를 우선적으로 합성하는 것으로 보고되어 있다(Hirasawa 등, 2007; Hu 등, 2005; Phanm과 Wright, 2008). Takagi (2008)는 아미노산 함량이 부족하면 스트레스 반응 단백질의 합성이 제한되어 알코올 탈수소효소 같은 발효와 관련된 효소의 생산이 억제되어 에탄올 함량이 감소할 수 있다고 보고하였다. 효모는 고온의 환경에서 생존하기 위해 열 충격 단백질(HSPs) 생산에 에너지를 우선적으로 분배하게 되며 에탄올 생성에 사용될 수 있는 에너지를 감소시키는 결과로 나타낸다고 보고되어 있다(Piper, 1995). 성장 온도 최대치에 가까우면 원형질막이 불안정해지고 세포의 활성이 낮아진다고 확인되었으며 36°C 이상에서는 에탄올에 의한 저해 작용이 높아진다고 보고되어 있다(Park 등, 1989). 하지만 짧은 고온 발효는 효모 사멸에는 직접적으로 영향을 주지 않는다고 보고되어 있으며 복합적인 스트레스 환경에서의 효모 유전자 발현 변화는 생존과 관련된 유전자 발현은 증가하지만 다른 대사 과정과 관련된 유전자 발현은 줄어드는 것으로 보고되어 있다(Gasch, 2002; Kim 등, 2022). 대부분 효모의 발효는 30°C 전후에서 진행되어 고온 발효 과정을 거치면 효모의 에너지 대사가 줄어들고 발효성 당분의 소모 또한 정상적으로 진행되지 않는 것으로 생각된다. 이러한 결과로 알코올 함량은 낮고 환원당은 높은 특징을 나타내었다고 생각된다. 본 연구에서 적용한 영양원 제어와 고온 발효 처리를 통한 복합적인 스트레스 환경은 효모가 생존에 필요한 에너지를 만들게 되어서 결과적으로는 대사산물 생성이 크게 억제되었을 것으로 생각된다.

Im 등(2012)에 따르면 막걸리에서 휘발산은 대부분 초산에서 기인된 것이므로 휘발산이 높은 함량을 나타내는 것은 발효나 숙성 중 초산발효와 같이 이상발효가 진행되는 것을 나타내는 것이라고 보고하였다. 또한 Jeong 등(2013)에 따르면 술의 기호성에 좋지 않은 성분으로 과량 함유되어 있을 때 식초 냄새 같은 불쾌취를 내어 막걸리 발효에서는 생성을 억제할 필요가 있다고 보고하였다. 홉을 첨가한 막걸리의 경우 홉 종류에서는 큰 차이를 나타내지 않았지만 처리 조건에 따라서 휘발산 함량은 대조구와 큰 차이를 나타내는 것을 확인하였다. 홉을 첨가한 막걸리는 대조구(208.13 mg/L)보다 대부분 높은 휘발산 함량을 나타내었다. 처리 A의 경우 201.93-299.33 mg/L, 처리 B의 경우 120.67-249.33 mg/L, 처리 C의 경우 167.33-230.00 mg/L를 나타내어 가장 낮은 휘발산 함량은 처리 B, 가장 높은 휘발산 함량은 처리 A에서 나타나는 것을 확인하였다. Im 등

(2012)의 경우 감의 형태에 따른 감막걸리의 휘발산이 88.3-103.2 ppm을 나타내었으며 Park 등(2017)의 연구에 따르면 휘발산 함량 범위는 58.53-88.20 mg/L로 보고되어 있어 본 실험과는 다른 경향을 나타내는 것을 확인하였다. Kim 등(2025)의 논문에 의하면 35°C에서 발효를 진행한 막걸리에서 높은 휘발산 함량을 나타내었으며 효모에 따라 차이가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

3.5. 유리당 함량

홉을 첨가한 막걸리의 유리당 분석 결과는 Table 3에 나타내었다. 유리당 분석은 glycerol, fructose, glucose, sucrose, maltose로 5종의 유리당을 분석하였으며 그 중 sucrose를 제외한 4종이 검출되었다. 홉의 종류보다 처리 조건에 따라 유리당 함량에 차이가 있는 것을 확인하였다. 모든 처리구에서 glucose 함량이 가장 높게 나타났으며 처리 A의 경우 12.85-17.74 g/100 mL, 처리 B의 경우 13.34-17.29 g/100 mL, 처리 C의 경우 13.33-17.92 g/100 mL로 확인되었다. Glycerol은 처리 A의 경우 0.73-0.84 g/100 mL, 처리 B의 경우 0.59-0.82 g/100 mL, 처리 C의 경우 0.72-0.84 g/100 mL로 확인되었다. Fructose는 처리 A의 경우 0.03-0.04 g/100 mL, 처리 B의 경우 0.02-0.05 g/100 mL, 처리 C의 경우 0.02-0.04 g/100 mL로 확인되었다. Maltose는 처리 A의 경우 0.11-0.14 g/100 mL, 처리 B의 경우 0.11-0.15 g/100 mL, 처리 C의 경우 0.10-0.15 g/100 mL로 확인되었다. Noh 등(2022)에 따르면 glucose는 알코올 생성에 영향을 미치는 것으로 보고되었으나 본 실험에서는 높은 함량을 나타내 알코올 생성이 억제되어 높은 함량을 나타낸 것으로 생각된다. 막걸리 안에서 유리당은 알코올 발효 기질로 사용되며 주류의 향기 생성 및 감미도에 영향을 주는 성분이라고 보고되어 있다(Lee 등, 2012). Kim 등(2013b)의 키위를 첨가한 막걸리 유리당은 glucose가 g/100 mL를 나타내었고 fructose의 경우 검출되지 않았으며 maltose (0.16 g/100 mL)와 sucrose (0.04 g/100 mL)도 낮은 함량을 나타내는 것을 확인하였다. Kim 등(2011)의 오이를 첨가한 막걸리 유리당은 glucose가 2.22 g/100 mL로 가장 높은 유리당 함량을 나타내었다. fructose의 경우 검출이 되지 않았으며 sucrose (0.02 g/100 mL)와 maltose (0.02 g/100 mL)는 낮은 함량을 나타내는 것을 확인하여 본 실험과 유사한 경향을 나타내는 것을 확인하였다. 본 실험의 홉을 첨가한 막걸리의 경우 다양한 당이 함유되어 있어 소비자 기호도에 좋은 영향을 줄 것으로 사료된다.

3.6. 유기산 함량

홉을 첨가한 막걸리의 유기산 함량 분석 결과를 Table 4에 나타내었다. 홉을 첨가한 막걸리에서 총 6종의 유기산이 확인되었다. 홉의 종류나 처리 조건에 따라 큰 차이를 나타내지 않

Table 3. Free sugar contents of *makgeolli* added with hops

Type	Treatment	Hop content (%)	Name	Free Sugars (g/100 mL)				
				Glycerol	Fructose	Glucose	Sucrose	Maltose
<i>Saaz hop</i> (S)	A ¹⁾	0.05	SA0.05	0.79 ± 0.03 ^{2)ab3)}	0.03 ± 0.00 ^{bcdef}	17.74 ± 0.05 ^b	ND ⁴⁾	0.14 ± 0.01 ^c
		0.1	SA0.1	0.73 ± 0.10 ^{cd}	0.03 ± 0.00 ^{bcdef}	17.04 ± 0.06 ^d	ND	0.13 ± 0.00 ^{de}
		0.2	SA0.2	0.84 ± 0.01 ^a	0.03 ± 0.00 ^{bcde}	14.87 ± 0.13 ^{hi}	ND	0.11 ± 0.01 ⁱ
	B	0.05	SB0.05	0.73 ± 0.02 ^{cd}	0.03 ± 0.00 ^{bcde}	15.15 ± 0.06 ^g	ND	0.14 ± 0.00 ^c
		0.1	SB0.1	0.78 ± 0.01 ^{bc}	0.04 ± 0.00 ^{bcd}	14.79 ± 0.03 ⁱ	ND	0.13 ± 0.00 ^c
		0.2	SB0.2	0.79 ± 0.00 ^{ab}	0.02 ± 0.00 ^f	13.94 ± 0.02 ^k	ND	0.12 ± 0.00 ^{gh}
	C	0.05	SC0.05	0.72 ± 0.01 ^d	0.03 ± 0.00 ^{bcdef}	14.33 ± 0.13 ^j	ND	0.11 ± 0.00 ^{hi}
		0.1	SC0.1	0.80 ± 0.00 ^{ab}	0.03 ± 0.00 ^{bcdef}	13.69 ± 0.06 ^l	ND	0.12 ± 0.00 ^f
		0.2	SC0.2	0.78 ± 0.01 ^b	0.02 ± 0.00 ^{ef}	16.52 ± 0.07 ^e	ND	0.13 ± 0.00 ^d
<i>Hongchen hop</i> (H)	A	0.05	HA0.05	0.82 ± 0.00 ^{ab}	0.03 ± 0.02 ^{bcdef}	13.97 ± 0.05 ^k	ND	0.13 ± 0.01 ^{de}
		0.1	HA0.1	0.80 ± 0.01 ^{ab}	0.03 ± 0.02 ^{cdef}	12.85 ± 0.06 ⁿ	ND	0.11 ± 0.00 ⁱ
		0.2	HA0.2	0.78 ± 0.02 ^b	0.04 ± 0.00 ^{abc}	13.21 ± 0.06 ^m	ND	0.11 ± 0.01 ^{gh}
	B	0.05	HB0.05	0.65 ± 0.01 ^c	0.03 ± 0.00 ^{bcde}	16.11 ± 0.11 ^f	ND	0.15 ± 0.00 ^b
		0.1	HB0.1	0.59 ± 0.00 ^f	0.03 ± 0.00 ^{bcde}	17.29 ± 0.06 ^c	ND	0.13 ± 0.00 ^c
		0.2	HB0.2	0.82 ± 0.01 ^{ab}	0.05 ± 0.00 ^a	13.34 ± 0.10 ^m	ND	0.11 ± 0.00 ⁱ
	C	0.05	HC0.05	0.82 ± 0.06 ^{ab}	0.04 ± 0.01 ^{ab}	13.33 ± 0.10 ^m	ND	0.10 ± 0.00 ^j
		0.1	HC0.1	0.83 ± 0.00 ^{ab}	0.03 ± 0.00 ^{def}	17.23 ± 0.12 ^c	ND	0.14 ± 0.00 ^{bc}
		0.2	HC0.2	0.84 ± 0.00 ^a	0.03 ± 0.00 ^{def}	17.92 ± 0.05 ^a	ND	0.15 ± 0.00 ^a
-	Control	0.0	CON	0.79 ± 0.00 ^{ab}	0.03 ± 0.00 ^{cdef}	14.96 ± 0.08 ^h	ND	0.12 ± 0.00 ^{fg}

¹⁾A, removal of hops after steaming with rice; B, addition of hops on the 0 day of fermentation, followed by removal on the 3 day; C, addition of hops during maturation at 10°C, with removal after 24 h.

²⁾All values are mean ± SD (n = 3).

³⁾Means with different superscript letters (^{a-n}) in the same column are significantly different at p < 0.05 by Duncan's multiple range test.

⁴⁾Not detected.

는 것으로 확인되었다. Formic acid의 경우 5.91-10.57 mg/100 mL로 확인되었다. 홍천홉보다 *Saaz hop*을 첨가할 경우 높은 함량을 나타내었으며, 처리 A보다는 처리 B나 C를 사용할 경우 높은 함량을 나타내었다. 하지만 홉의 함량에 따른 경향은 없는 것으로 확인되었다. Malic acid는 20.01-60.49 mg/100 mL로 확인되었다. 처리 B를 제외하고는 홍천홉이 *Saaz hop*보다 높은 함량을 나타내었지만 홉의 함량에 따른 경향은 없는 것으로 확인되었다. Lactic acid는 7.83-73.55 mg/100 mL로 확인되었다. 처리 B를 제외하고 홍천홉보다 *Saaz hop*을 첨가할 경우 높은 함량을 나타내었으며 홉의 함량이 높아짐에 따라 lactic acid 함량이 감소하는 경향을 나타내었다. Acetic acid는 17.21-54.34 mg/100 mL로 확인되었다. 홍천홉보다 *Saaz hop*을 첨가할 경우 높은 함량을 나타내었으며 처리 B보다는 처리 A나 C를 사용할 경우 높은 함량을 나타내었지만 홉의 함량에

따른 경향은 없는 것으로 확인되었다. Citric acid는 7.66-18.79 mg/100 mL로 확인되었다. 홍천홉보다 *Saaz hop*을 첨가할 경우 높은 함량을 나타내었으며 처리 A보다는 처리 B나 C를 사용할 경우 높은 함량을 나타내었다. Succinic acid는 60.08-97.55 mg/100 mL로 확인되었다. 막걸리에서 유기산은 신맛을 내는 것으로 알려져 있고 맛에 있어 단맛과 조화를 이루어 중요한 성분이며 발효 중 미생물에 의해 생성된다고 보고되고 있다(Im 등, 2012). Malic acid는 유기산에서 부드러운 신맛을 내는 것으로 보고되어 있고, citric acid는 막걸리 발효 중에 적절한 pH 및 막걸리 향미에 긍정적인 물질로 알려져 있으며 acetic acid의 경우는 막걸리 향미에 좋지 않은 영향을 주는 것으로 보고되어 있다(Bang 등, 2016). Succinic acid의 경우 시트르산 회로를 통해 대부분 효모에 의해 생성되나, lactic acid는 대부분 젖산균에 의해 생성된다고 알려져 있다(Cho와 Joo, 2014;

Table 4. Organic acid contents of *makgeolli* added with hops

Type	Treatment	Hop content (%)	Name	Organic acid (mg/100 mL)					
				Formic acid	Malic acid	Lactic acid	Acetic acid	Citric acid	Succinic acid
<i>Saaz hop</i> (S)	A ¹⁾	0.05	SA0.05	8.36 ± 0.36 ^{2)efgh3)}	38.11 ± 0.42 ^{ef}	67.12 ± 0.58 ^c	41.64 ± 0.42 ^c	10.29 ± 0.84 ^{gh}	60.07 ± 1.71 ^m
		0.1	SA0.1	8.29 ± 1.06 ^{efgh}	54.51 ± 0.76 ^b	37.31 ± 0.60 ^f	37.39 ± 0.09 ^{dc}	12.05 ± 1.48 ^{efg}	72.44 ± 1.41 ^j
		0.2	SA0.2	9.58 ± 0.03 ^{bcde}	56.13 ± 0.18 ^b	15.56 ± 0.59 ⁱ	54.34 ± 1.28 ^a	16.79 ± 0.40 ^{ab}	79.11 ± 0.85 ^{efgh}
	B	0.05	SB0.05	9.73 ± 0.67 ^{bcd}	32.02 ± 2.71 ^h	71.30 ± 0.27 ^b	25.20 ± 0.43 ⁱ	18.63 ± 0.61 ^a	79.05 ± 0.62 ^{efgh}
		0.1	SB0.1	9.30 ± 0.50 ^{bcdef}	37.01 ± 0.78 ^{fg}	53.81 ± 1.10 ^d	32.07 ± 0.08 ^g	17.28 ± 0.36 ^{ab}	80.48 ± 1.60 ^{ef}
		0.2	SB0.2	10.57 ± 0.47 ^{ab}	42.23 ± 1.24 ^d	43.59 ± 0.10 ^c	40.61 ± 1.48 ^c	18.16 ± 2.11 ^a	78.59 ± 1.11 ^{fghi}
	C	0.05	SC0.05	11.08 ± 1.13 ^a	39.34 ± 1.35 ^{ef}	23.79 ± 0.21 ⁱ	44.05 ± 1.64 ^b	17.37 ± 0.18 ^{ab}	79.86 ± 0.44 ^{efg}
		0.1	SC0.1	9.33 ± 0.44 ^{bcdef}	46.42 ± 0.92 ^c	26.80 ± 0.66 ^{gh}	40.98 ± 1.24 ^c	16.39 ± 2.52 ^{abc}	83.00 ± 1.17 ^{cd}
		0.2	SC0.2	10.20 ± 0.87 ^{abc}	35.37 ± 2.13 ^g	25.83 ± 1.46 ^h	33.42 ± 1.10 ^g	18.21 ± 2.46 ^a	84.37 ± 1.73 ^c
<i>Hongchen hop</i> (H)	A	0.05	HA0.05	5.91 ± 0.44 ^j	59.26 ± 0.73 ^a	9.70 ± 0.13 ^{kl}	41.99 ± 0.58 ^c	7.66 ± 0.76 ^b	73.641.01 ^j
		0.1	HA0.1	6.57 ± 0.56 ^{ij}	60.49 ± 0.52 ^a	9.24 ± 0.24 ^l	32.23 ± 0.42 ^g	9.83 ± 0.38 ^{gh}	82.91 ± 1.86 ^{cd}
		0.2	HA0.2	8.42 ± 0.18 ^{efgh}	59.84 ± 1.59 ^a	9.13 ± 0.15 ^l	37.03 ± 0.32 ^c	13.55 ± 2.25 ^{cde}	76.98 ± 0.80 ^{hi}
	B	0.05	HB0.05	7.60 ± 0.85 ^{hi}	21.77 ± 2.23 ⁱ	73.55 ± 0.68 ^a	17.21 ± 0.18 ^k	13.05 ± 0.28 ^{def}	69.54 ± 1.11 ^k
		0.1	HB0.1	7.45 ± 0.97 ^{hi}	20.01 ± 1.18 ⁱ	66.48 ± 0.61 ^c	23.67 ± 0.09 ^j	14.88 ± 2.41 ^{bcde}	67.50 ± 0.78 ^l
		0.2	HB0.2	8.74 ± 0.56 ^{defgh}	40.21 ± 1.97 ^{de}	66.61 ± 0.44 ^c	28.41 ± 0.29 ^b	18.79 ± 1.83 ^a	97.55 ± 0.88 ^a
	C	0.05	HC0.05	8.93 ± 0.39 ^{cdefg}	54.51 ± 0.63 ^b	10.35 ± 0.34 ^k	32.59 ± 0.35 ^g	16.20 ± 0.41 ^{abc}	88.39 ± 0.38 ^b
		0.1	HC0.1	7.92 ± 0.63 ^{gh}	46.85 ± 1.49 ^c	7.83 ± 0.18 ^m	35.45 ± 0.18 ^f	12.63 ± 0.56 ^{ef}	77.99 ± 1.15 ^{ghi}
		0.2	HC0.2	8.03 ± 0.33 ^{fgh}	48.52 ± 0.29 ^c	8.70 ± 0.81 ^{lm}	37.59 ± 0.35 ^{de}	13.59 ± 0.71 ^{cde}	81.04 ± 2.05 ^{de}
-	Control	0.0	CON	9.77 ± 1.20 ^{bcd}	37.00 ± 0.30 ^{fg}	26.99 ± 0.86 ^g	38.53 ± 1.39 ^d	15.88 ± 3.05 ^{abcd}	76.76 ± 0.52 ⁱ

¹⁾A, removal of hops after steaming with rice; B, addition of hops on the 0 day of fermentation, followed by removal on the 3 day; C, addition of hops during maturation at 10°C, with removal after 24 h.

²⁾All values are mean ± SD (n=3).

³⁾Means with different superscript letters (^{a-m}) in the same column are significantly different at $p < 0.05$ by Duncan's multiple range test.

Hong과 Ko, 1991; Kim 등, 2025). Kim 등(2013b)의 경우 succinic acid가 2,630.00 mg/100 mL로 가장 높게 확인되었으

며 acetic acid는 152.00 mg/100 mL, malic acid는 32.00 mg/100 mL, citric acid는 56.00 mg/100 mL로 낮은 함량을 나

타내었다. Kim 등(2013a)의 경우 succinic acid는 2,001.00 mg/100 mL로 가장 높은 함량을 나타내었고 acetic acid는 131.00 mg/100 mL, malic acid는 26.00 mg/100 mL, citric acid는 20.00 mg/100 mL로 낮은 함량을 나타내었다. 본 실험은 다른 연구와 같이 succinic acid가 가장 높은 함량을 나타내는 경향을 확인하였으며 다양한 유기산이 함유되어 있어 높은 당과 함께 맛의 조화에서 긍정적인 영향이 있을 것으로 사료된다.

3.7. 전자코 패턴

홉을 첨가한 과일향 막걸리의 전자코 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 제 1사분면에는 향기 성분이 나타나지 않았으며 제 2사분면에는 myrcene, limonene, butanoic acid가 검출되었다. 제 3사분면에는 ethyl acetate, 2-methylpropanoic acid, benzeneacetaldehyde가 검출되었으며 제 4사분면에는 propanoic acid, 2-methylpropanal이 검출되었다. 홉을 첨가한 막걸리는 주성분 분석(principal components analysis, PCA)을 통해 향기 성분 패턴을 비교 분석하였다. 위에서 말한 8가지의 휘발성 성분은 discrimination power (DP) 값이 0.95 이상으로 주성분 분석을 통하여 변별력이 큰 휘발성 향기성분인 것을 확인하였다. PC 1(제 1주성분)과 PC 2(제 2주성분)의 점유율은 각 65.954%, 18.958%를 나타내어 총 84.912%의 높은 점유율을 나타내었

다. 전자코를 이용하여 주성분 분석을 진행한 결과 시료간의 패턴은 서로 근접할수록 전반적인 휘발성 향기성분이 유사하다고 판단되며 거리가 멀어질수록 시료 간의 차별성이 높다고 해석된다. 제 4사분면에 있는 시료들과 대조구(control)는 가까운 거리에 위치에 있으면서 propanoic acid, 2-methylpropanal의 향이 강할 것으로 생각되며 propanoic acid의 향은 acidic, pungent, rancid 등, 2-methylpropanal의 향은 banana, apple 등의 향이 난다고 알려져 있다. 제 3사분면에 있으면서 2-methylpropanoic acid와 benzeneacetaldehyde와 가깝게 위치한 HB0.2, SA0.2, SC0.1은 acidic, butter, cheese 등과 cocoa, floral, grassy 등의 향이 강할 것으로 생각된다. HA0.05는 ethyl acetate와 근접해 제 3사분면에 있는 것과 다른 시료와 다르게 acidic, fruity, orange 등의 향이 강할 것이라 생각된다. 제 2사분면에 있는 시료 중 HC0.1은 butanoic acid와 근접해 있어 butter, cheese, sweaty 등의 향이 강할 것이라 생각된다. 마지막으로 제 2사분면에 있는 HC0.2의 경우 myrcene 및 limonene와 밀접하게 붙어있어 balsamic, ethereal, fruity 등과 citrus, fruity, orange 등의 향이 강하게 날 것이라 생각된다. 위와 같은 결과로 보면 홍천 홉을 이용하여 처리 조건과 홉 함량을 다르게 넣어 막걸리를 제조하면 다양한 향미를 가진 막걸리를 제조할 수 있을 것으로 생각된다.

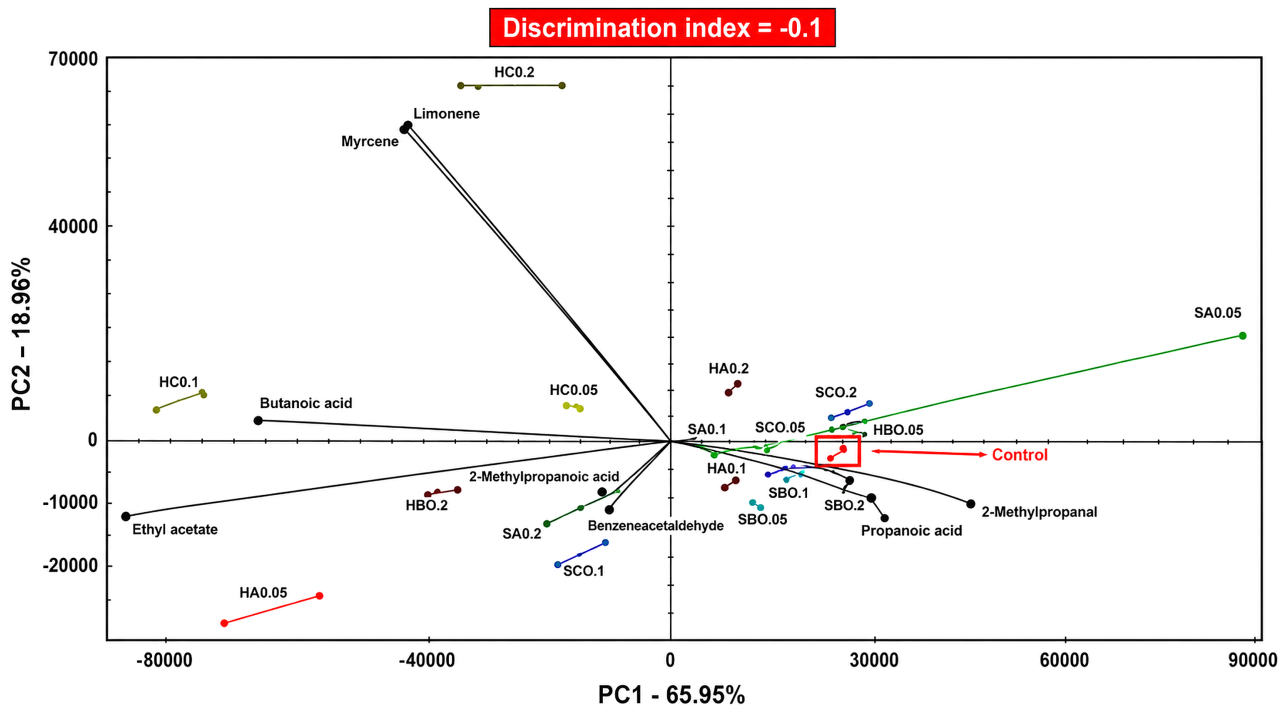


Fig. 2. PCA biplot of volatile aroma compounds in *makgeolli* added with hops. H, *Hongchen hop*; S, *Saaz hop*. A, removal of hops after steaming with rice; B, addition of hops on the 0 day of fermentation, followed by removal on the 3 day; C, addition of hops during maturation at 10°C, with removal after 24 h. 0.05, Hop content 0.05%; 0.1, Hop content 0.1%; 0.2, Hop content 0.2%. All Values are mean $\pm$ SD (n = 3).

4. 요약

막걸리는 우리나라에서 가장 역사가 오래된 술 중 하나이며 예로부터 자가로 생산하여 널리 이용해 온 일종의 양조주이다. 홉은 맥주를 제조할 때 쓰이는 주원료 중 하나로 부패균을 억제하고 고미와 아로마를 부여한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 처리 조건과 홉 함량을 다르게 설정하여 향미를 가지는 막걸리를 제조하고자 하였다. 홉은 홍천 홉과 *Saaz hop*을 사용하였으며 홉에 함유되어 있는 α -acid, β -acid 및 xanthohumol을 측정할 결과 홍천 홉이 *Saaz hop*보다 총 α -acid이 약 1.6배 높았으며 총 β -acid의 경우 비슷한 함량을 나타내는 것을 확인하였다. Xanthohumol 함량의 경우 홍천 홉이 *Saaz hop*보다 약 2배정도 높은 것을 확인하였다. 품질 특성의 경우 당도는 홉의 종류에 상관없이 15.27 °Brix 이상을 나타내었으며 환원당의 경우 홉 종류와 상관없이 16.74% 이상을 나타내었다. 알코올의 함량이 낮아 환원당이 높은 함량을 나타내는 것으로 확인되었다. 휘발산의 경우 모든 처리구에서 300 mg/L 이하의 값을 나타내었으며 pH의 경우 3.48-4.20 사이로 나타나는 것으로 확인되었으며 총산과 아미노산도의 경우 유의적으로 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 확인되었다. 유리당의 경우 glucose가 가장 높은 함량을 나타내었으며 유기산의 경우 succinic acid가 가장 높은 함량을 나타내는 것으로 확인되었다. 전자코 분석을 통해 홉 함량과 처리 조건에 따라 다양한 향미를 가진 막걸리를 제조할 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구를 통해 *Saaz hop*보다 높은 고미성분과 xanthohumol을 가진 홍천 홉을 사용한다면 적은 양으로도 고미를 첨가하거나 향미를 가지는 막걸리를 제조할 수 있을 것으로 생각된다.

Funding

This work was carried out with the support of “Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. PJ01725602)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

Acknowledgements

This study was supported by 2025 the RDA Fellowship Program of National Institute of Crop and Food Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

Conflict of interests

The authors declare no potential conflicts of interest.

Author contributions

Conceptualization: Choi JH. Methodology: Kim JY, Choi JH. Formal analysis: Kim JY. Validation: Kim JY, Choi JH.

Writing - original draft: Kim JY. Writing - review & editing: Kim JY, Choi JH.

Ethics approval

This article does not require IRB/IACUC approval because there are no human and animal participants.

ORCID

Ji-Youn Kim (First author)

<https://orcid.org/0009-0002-8371-4457>

Ji-Ho Choi (Corresponding author)

<https://orcid.org/0000-0001-7305-004X>

References

- Bai S, Park JC, Kim DH, Kim KH, Chun SB. Purification and properties of glucoamylase from *Schwanniomyces castellii*. Korean J Microbiol, 29, 104-110 (1991)
- Bang BH, Rhee MS, Kim KP, Lee KW, Lee DH. *Hongkuk* production and the characteristics of *hongkuk* made from *Monascus anka*. Korean J Food Nutr, 25, 1055-1060 (2012)
- Bang CM, Moon JK, Kong HS. Characteristics of organic acid of *makgeolli* by yeast strains type. Korean J Food Cook Sci, 32, 44-49 (2016)
- Cho KM, Joo OS. Quality and antioxidant characteristics of *Elaeagnus multiflora* wine through the thermal processing of juice. Korean J Food Preserv, 21, 206-214 (2014)
- Choi BJ. Studies on alpha acid isomerization characteristics to improve the quality of dry hopping beer using domestic hops. MS Thesis, Jeonbuk National University, Korea (2024)
- Choi KW, Lee JK, Jo HJ, Lee KJ, Yoon JA, An JH, Chung KH. Fermentation characteristics of *makgeolli* made with loquat fruits (*Eriobotrya japonica* Lindley). J Korean Soc Food Sci Nutr, 42, 975-982 (2013)
- Cibaka MLK, Gros J, Nizet S, Collin S. Quantitation of selected terpenoids and mercaptans in the dual-purpose hop varieties amarillo, citra, hallertau blanc, mosaic, and sorachi Ace. J Agric Food Chem, 63, 3022-3030 (2015)
- Gasch AP. The environmental stress response: A common yeast response to diverse environmental stresses. In: Yeast Stress Responses, Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, p 11-70 (2002)
- Ha TH, Lyu JI, Lee JH, Ryu JH, Park SH, Kang SY. Studies on growth characteristics and propagation method of introduced hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars. Korean J Plant Res, 36, 181-190 (2023)
- Hirasawa T, Yoshikawa K, Nakamura Y, Nagahisa K, Furusawa

- C, Katakura Y, Shimizu H, Shioya S. Identification of target genes conferring ethanol stress tolerance to *Saccharomyces cerevisiae* based on DNA microarray data analysis. *J Biotechnol*, 131, 34-44 (2007)
- Hong OS, Ko YT. Study on perparation of yogurt from milk and rice. *Korean J Food Sci Technol*, 23, 587-592 (1991)
- Hu CK, Bai FW, An LJ. Protein amino acid composition of plasma membranes affects membrane fluidity and thereby ethanol tolerance in a self-flocculating fusant of *Schizosaccharomyces pombe* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnol Lett*, 25, 1191-1194 (2005)
- Im Br, Kim DH, Shin YJ, Hwang IS, Choi JY, Kim CW, Choi JH. Prediction of compounds affecting *makgeolli* aroma through multivariate analysis. *Food Sci Preserv*, 32, 301-312 (2025)
- Im CY, Jeong ST, Choi HS, Choi JH, Yeo SH, Kang WW. Characteristics of *gammakgeolli* added with processed forms of persimmon. *Korean J Food Preserv*, 19, 159-166 (2012)
- Jaskula B, Kafarski P, Aerts G, De Cooman L. A kinetic study on the isomerization of hop α -acids. *J Agric Food Chem*, 56, 6408-6415 (2008)
- Jeon MH, Lee WJ. Characteristics of blueberry added *makgeolli*. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 40, 444-449 (2011)
- Jeong ST, Kwak HJ, Kim SM. Quality characteristics and biogenic amine production of *makgeolli* brewed with commercial *nuruks*. *Korean J Food Sci Technol*, 45, 727-734 (2013)
- Jung EH, Kim YS, Jeon JA, Yeo SW, Jung ST. Properties of *yakju* and pellet nuruk inoculated with *Aspergillus oryzae*. *Korean J Food Preserv*, 25, 722-729 (2018)
- Jung SJ. Beer production and properties using *nuruk*, a Korean fermentation starter. MS Thesis, Sejong University, Korea (2015)
- Jung SJ, Chung CH. Production and properties of ale beer with *nuruk*, a Korean fermentation starter. *Korean J Food Sci Techol*, 49, 132-140 (2017)
- Kang JE, Kim HE, Lim BR, Choi HS, Jeong ST. Analysis of physicochemical characteristics in *yakju* with variety *nuruk*. *Korean J Community Living Sci*, 31, 15-24 (2020)
- KATI. Makgeolli export information. Available from: <https://www.kati.net>. Accessed Nov. Aug. 26, 2026.
- Kim CW, Jeong ST, Park YD, Kim JB, Lim BR, Kang HY. High temperature treatments to control sugar consumption by yeasts during *makgeolli* fermentation. *Korean J Food Preserv*, 29, 466-471 (2022)
- Kim EK, Chang YH, Ko JY, Jeong YH. Physicochemical and microbial properties of korean traditional rice wine, *makgeolli*, supplemented with mulberry during fermentation. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 42, 1682-1689 (2013a)
- Kim EK, Chang YH, Ko JY, Jeong YH. Quality characteristics of *makgeolli* added with Kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 42, 1821-1828 (2013b)
- Kim JY, Choi JH, Kim CW, Lim BR. Quality characteristics of *makgeolli* under nutrient deficiency and high-temperature fermentation. *Food Sci Preserv*, 32, 289-300 (2025)
- Kim JY, Yi YH. pH, acidity, color, amino acids, reducing sugars, total sugars, and alcohol in puffed millet powder containing millet *takju* during fermentation. *Korean J Food Sci Technol*, 42, 727-732 (2010)
- Kim MS, Kim YS, Lee SJ, Kwon TE. Quailty of *makgeolli* added with sprouted garlic powder. *Cull Sci Hos Res*, 30, 30-42 (2024)
- Kim SY, Kim EK, Yoon SJ, Jo NJ, Jung SK, Kwon SH, Chang YH, Jeong YH. Physicochemical and microbial properties of korean traditional rice wine, makgeolli, supplemented with cucumber during fermentation. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 40, 223-228 (2011)
- Kovacevic M, Kac M. Solid-phase microextreacion of hop volatiles potential use for determination and verification of hop varieties. *J Chromatogr A*, 918, 159-167 (2001)
- Kwon YS. Characteristics of domestic grown hops and brewing characteristics of beer by hops variet. MS Thesis, Dankook University, Korea, p 1-72 (2023)
- Kwon YS, Kang JY, Seo YJ, Choi HJ, Choi HS. Characteristics of persimmon makgeolli based on the amount of water and persimmon juice added. *J Pract Agric Fish Res*. 25, 158-164 (2024)
- Lee CG, Na JH, Park SJ, Jeong JH, Kim CM, Kim BS, Han HB, Huh CK. Quality analysis of *makgeolli* made with non-steamed rice flour nuruk by various fungal strains. *Korean J Food Preserv*, 26, 496-504 (2019)
- Lee HN, Lee JM, Chang YH. Quality characteristics of *makgeolli* supplemented with cranberries. *J East Asian Soc Dietary Life*, 23, 85-91 (2013a)
- Lee HR, Lee YR, Kwak MK. Induction of the proteasome subunits by xanthohumol compounds from hops. *J Pharm Soc Korea*, 54, 481-487 (2010)
- Lee JE, Kim GW, Kang KO, Shim JY, Son JY. A study on the brewing characteristics and functionality of *makgeolli* using germinated rice. *Food Serv Ind J*, 17, 39-54 (2021)
- Lee JK, Jo HJ, Kim KI, Yoon JA, Chung KH, Song BC, An JH. Physicochemical characteristics and biological activities of *makgeolli* supplemented with the fruit of *Akebia quinata* during fermentation. *Korean J Food Sci Technol*, 45, 619-627 (2013b)
- Lee JS, Ahn YP, Hong SI. Study of the optimum pH and temperature in extractive fermentation using Ca-alginate entrapped *S. cerevisiae*. *Korean J Chem Eng*, 28, 676-683 (1990)
- Lee YJ, Yi HC, Hwang KT, Kim DH, Kim HJ, Jung CM,

- Choi YH. The qualities of *makgeolli* (Korean rice wine) made with different rice cultivars, milling degrees of rice, and *nuruks*. *J Korean Soc Food Sci Nutr*, 41, 1785-1791 (2012)
- Li Y, Dalabasmaz S, Gensberger-Reigl S, Heymich ML, Krofta K, Pischetsrieder M. Identification of colupulone and lupulone as the main contributors to the antibacterial activity of hop extracts using activity-guided fractionation and metabolome analysis. *Food Res Int*, 169, 112832 (2023)
- Moon JS. Quality characteristics of ale-type craft beer using domestic malt. MS Thesis, Seoul Venture University, Korea, p 1-77 (2016)
- Nesvadba V, Olsovska J, Strakova L, Charvatova J, Fritschova G. Evaluation of yield and alpha acid content in selected hop varieties. *Kvasny Prumysl*, 68, 267-276 (2022)
- Noh DH, Jeong ST, Park BR, Kim YS, Lim BR. Changes in isomaltooligosaccharides during fermentation of *makgeolli*. *Korean J Food Sci Technol*, 54, 351-361 (2022)
- Park JK, Peck SY, Yoo YJ. Temperature effects and optimization for ethanol fermentation. *Kor J Appl Microbiol Bioeng*, 17, 619-623 (1989)
- Park MJ, Kim HK, Choi KK, Koo BY, Lee SK. Fermentation characteristics of *makgeolli* containing aronia (*Aronia melanocarpa*, black chokeberry). *Korean J Food Sci Technol*, 48, 27-35 (2016)
- Park YD, Bae EJ, Choi JS, Kim HS, Kim CW, Jeng ST, Choi HS. Quality characteristics of sterilized *makgeolli* brewed with different materials. *J East Asian Soc Dit Life*, 27, 685-667 (2017)
- Pham TK, Wright PC. The proteomic response of *Saccharomyces cerevisiae* in very high glucose conditons with amino acid supplementation. *J Proteome Res*, 7, 4766-4774 (2008)
- Piper PW. The heat shock and ethanol stress responses of yeast exhibit extensive similarity and functional overlap. *FEMS Microbiology Lett*, 134, 121-127 (1995)
- Sakamoto K, Konings WN. Beer spoilage bacteria and hop resistance. *Int J Food Microbiol*, 89, 105-124, (2003)
- Schindler R, Sharrett Z, Perri M, Lares M. Quantification of α -acid in fresh hops by reverse-phase high-performance liquid chromatography. *ACS Omega*, 4, 3565-3570 (2019)
- Shin DS, Choi YJ, Jeong ST, Sim EY, Lee SK, Kim HJ, Woo KS, Kim SJ, Oh SK, Park HY. Quality characteristics of mixed *makgeolli* with barley and wheat. *Korean J Food Nutr*, 29, 565-572 (2016)
- Song YR, Lim BU, Song GS, Baik SH. Quality characteristics and antioxidant activity of makgeolli supplemented with omija berries (*Schizandra chinensis* baillon). *Korean J Food Sci Technol.*, 47, 328-335 (2015)
- Takagi H. Proline as a stress protectant in yeast: physiological functions, metabolic regulations, and biotechnological applications. *Appl Microbiol Biotechnol*, 81, 211-223 (2008)
- Ying C, Hwang JA, Chang YH. Quality characteristics of *makgeolli* added with red bean. *Korean J Food Cookery Sci*, 29, 777-784 (2013)