



Research Article

Quality characteristics of commercial *makgeolli* classified by starter type: Physicochemical indices, instrumental taste, and volatile profiles

누룩 원료에 따른 시판 막걸리의 품질과 향미 특성 비교 연구

Seung-A Woo¹, SeongEui Yoo¹, Chan-Woo Kim¹, Hee-Min Gwan¹, Mina K. Kim², So-Young Kim^{1*}

우승아¹ · 유성의¹ · 김찬우¹ · 권희민¹ · 김미나² · 김소영^{1*}

¹Fermented and Processed Food Science Division, Department of Food Resources, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

²Department of Food Science and Human Nutrition, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

¹농촌진흥청 국립식량과학원 발효가공식품과, ²전북대학교 식품영양학과

Abstract This study compared the quality of fifteen commercial *makgeolli* collected from five Korean regions and classified them by starter: rice *nuruk* (RN, n=3), wheat *nuruk* (WN, n=6), and wheat *nuruk* with exogenous yeast (WNY, n=6). We measured alcohol, pH, titratable acidity, soluble solids, and reducing sugars under national standards, profiled taste with an electronic tongue and volatiles with an electronic nose, and analyzed the data by PCA and PLS-DA. Alcohol ranged from 5.43 to 12.82% (v/v), pH from 3.39 to 4.74, titratable acidity from 0.21 to 0.71% (v/v, citric acid equivalents), indicating an overall mildly acidic profile. RN showed lower residual sugars and higher alcohol than WN and WNY, consistent with faster saccharification and more complete fermentation. All three electronic-tongue scores (sourness, saltiness, and umami) were highest in the RN group, with sourness and umami tracking titratable acidity, whereas WN and WNY showed a more moderate overall taste profile. In *makgeolli*, sixty-four volatiles were detected and ten high-discrimination markers (discrimination power >0.900) separated products according to starter type, with RN characterized by ethyl 2-methylbutyrate and 2-butanone, WN by butanol/propanol and ethyl acetate, and WNY by isoamyl acetate. PLS-DA and heatmaps corroborated these modules (acid-taste for RN; alcohol/carbonyl for WN; ester-acetate for WNY). Collectively, these indicators, such as pH-acidity, residual sugar-alcohol balance, and ester/alcohol ratios, offer actionable targets for selecting *nuruk* or yeast and standardizing *makgeolli* quality.

Keywords *makgeolli*, *nuruk*, quality, volatile, correlation analysis



OPEN ACCESS

Citation: Woo SA, Yoo SE, Kim CW, Gwan HM, Kim MK, Kim SY. Quality characteristics of commercial *makgeolli* classified by starter type: Physicochemical indices, instrumental taste, and volatile profiles. Food Sci. Preserv., 33(3), 494-504 (2026)

Received: December 10, 2025

Revised: March 13, 2026

Accepted: March 16, 2026

*Corresponding author

So-Young Kim

Tel: +82-63-238-3610

E-mail: foodksy@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

막걸리는 우리나라 대표적인 전통주로 쌀과 밀 등과 함께 누룩을 주원료로 하여 빚어진다. 우리나라 주세법 제5조 2항에 명시된 탁주는 ‘전분질 재료와 국(麴) 및 물을 원료로 하여 발효시킨 술덧을 여과하지 않고 혼탁하게 제성한 것’으로 정의된다(Ministry of Government Legislation, 2021). 막걸리는 발효과정에서 효모와 곰팡이 등 발효미생물이 관여하여 전분의 효소적 가수분해와 효모에 의한 알코올 발효가 동시에 일어나는 당화·알코올발효를 통해 제조된다. 또한 복합적인 향과 산미, 당미, 감칠맛 등의 맛의 섬세한 균형을 특징으로 하여 최근에는 품질의 일관성 향상을 목표로 한 과학적

연구 대상으로도 주목받고 있다(Kim 등, 2016; Noh 등, 2012).

최근 주류 분야 연구는 원료(Seong 등, 2021), 누룩(Nam과 Kim, 2024), 효모 균주(Bang 등, 2016) 등과 같이 막걸리 품질을 좌우하는 다양한 요인을 탐색해 왔다. 곰팡이·효모·세균의 공생체로 이루어진 전통 스타터인 누룩은 당화와 알코올 발효를 모두 촉진하여 당 전환과 휘발성 향기 성분 생성을 매개한다. 이러한 다양한 미생물 군집으로 인해 에탄올 생성뿐 아니라 소비자 기호도를 좌우하는 관능 특성에도 결정적 영향을 미친다(Kim 등, 2016; Bang 등, 2016). 누룩의 형태(전통누룩과 개량누룩의 차이, 누룩의 투입 시기, 부원료 첨가 여부 등)가 막걸리의 발효 특성과 최종 품질에 영향을 미치는지에 대한 연구는 다수 보고되어 있다. 누룩 투입 시기와 초기 투입량이 많을수록 유산균의 활성 차이에 기인해 발효 초기 pH가 더 빠르게 감소하고 총산 함량이 높아지는 경향을 보였으며(Cheon and Cho, 2018; Lee 등, 2012), 시판 누룩의 종류에 따라 알코올 생성량, 미생물 군집 구조, biogenic amine 생성량 및 색도에서 유의적인 차이가 나타나 누룩의 위생성 및 미생물 조성이 막걸리의 안전성과 품질 안정성에 중요한 요인이라고 보고하였다(Jeong 등, 2013). 전통누룩과 개량누룩을 비교한 연구에서는 전통누룩 사용 시 총유기산 함량이 높고 색상이 더 짙은 경향을 보인 반면, 개량누룩은 유리당 함량이 높고 관능적 기호도가 우수한 것으로 나타나 누룩형태에 따라 발효 균일성과 풍미 특성 차이를 언급하였다(Lee 등, 2012). 더 나아가 자색고구마를 첨가한 쌀누룩을 이용한 경우 안토시아닌 및 페놀 화합물 함량이 증가하고 항산화 활성이 향상되어 누룩의 원료 조성이 막걸리의 기능성 품질까지 확장될 수 있음을 시사하였다(Cho 등, 2012).

한편 최근 식품의 품질 평가에서 전기화학적 센서를 기반으로 인간의 미각을 모방하여 맛을 감지하고 분석하는 전자혀(electronic tongue)와 전자코(electronic nose) 기술의 활용이 활발히 이루어지고 있다(Jo 등, 2016). 이는 복잡한 시료의 matrix를 특성화시키는데 사용되는 센서를 배열(sensor array)하여 향미 패턴분석을 가능하게 했다. 이러한 분석법은 기존의 감각 특성 평가에 비해 재현성이 있으며 객관적인 데이터를 제공한다는 장점이 있다. 전자혀는 주로 특정 맛 성분에 민감하게 반응하는 센서를 기반으로 개발되는데, 센서가 특정 맛 물질에 결합할 때 발생하는 화학적 신호를 전기 신호로 변환하는 형태가 일반적이다. 단맛 수용체를 도입한 나노 소나를 탄소섬유 기반 트랜지스터에 도입하여 단맛 센서로 활용하거나(Ahn 등, 2016), 다양한 맛을 병렬적으로 센싱하거나 5가지 기본 맛인 단맛(sweet), 짭짤(salty), 쓴맛(bitter), 신맛(sour), 감칠맛(umami) 이외의 떼은맛(astringency) 등에 대해서도 보고되었다(Yeom 등, 2020). 전자코는 기존의 식품의 향기 성분 분석에 널리 사용되어 온 gas chromatography 기법과 비슷한 원리를 응용하여 간단한 전처리만으로 신속하게 향기물질을 알 수 있다는 장점이 있다.

이에 본 연구는 시중 유통되는 막걸리를 쌀, 밀 등 곡물을 사용한 누룩과 효모의 사용 여부에 따른 이화학적 및 관능적 특성을 조사, 비교하여 상관성을 도출하고자 하였다. 따라서 사용 원료에 따른 막걸리의 품질 특성을 파악하여 제품화 및 품질개선 등을 위해 과학적 근거를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 국내 시판 막걸리 시료 선정 및 수집

본 연구에서는 국내에서 시판되고 있는 막걸리 15종(찾아가는 양조장 선정 업체 제조 6종, 우리술 품평회 입상 2종, 대한민국 주류대상 수상 2종, 우리술 품질인증 3종, 식품명인 제조 2종)을 국내 5개의 권역(수도권, 경상권, 전라권, 충청권, 강원)별 균등성을 고려하여 구입해 분석시료로 사용하였다. 제품 라벨에 기재된 원재료 표시를 기준으로 쌀누룩(rice *nuruk*, RN), 밀누룩(wheat *nuruk*, WN), 그리고 밀효모누룩(wheat *nuruk* with yeast, WNY) 등 3그룹으로 분류하였다. 모든 시료는 구입 후 4°C 냉장고에 보관하여 20일 이내 분석을 진행하였으며, 각 시료의 원재료 정보는 Table 1과 같다.

2.2. 막걸리 시료의 품질 특성 분석

2.2.1. 알코올 함량

수집된 막걸리 시료들의 알코올, 총산, 가용성 고형분, 환원당 등 품질분석은 국세청 훈령 제2597호 주류분석규정에 따라 측정하였다(NTSLLSC, 2014).

알코올 함량 측정을 위해 먼저 시료 100 mL를 증류 및 냉각 장치에 연결한 뒤 가열하였다. 증류 후, 80 mL 이상 수집된 증류액을 메스실린더에 옮겨 증류수로 100 mL까지 정용하였다. 충분히 증류액과 증류수를 혼합한 뒤 주정계(Dongmyeong, Seoul, Korea)를 사용하여 눈금을 읽고 주정분 온도 환산표로 15°C로 보정하여 알코올 함량(% v/v)으로 나타내었다.

2.2.2. pH 및 총산

막걸리 시료의 pH와 산도 역시 동일한 지침에 준하여 수행하였다(National Tax Service Liquors License Support Center, 2014). pH는 pH meter (Orion 3 Star Benchtop pH meter, Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA)로 측정하였다. 총산은 막걸리 시료 10 mL를 취하여 100 mL용 삼각플라스크에 넣고 0.1 N NaOH (Yakuri Pure Chemical Co., Ltd., Kyoto, Japan) 용액으로 pH 8.2가 될 때까지 적정할 때 소비된 NaOH 부피를 구연산(환산계수 0.006)으로 환산하여 % (w/v) 단위로 나타내었다.

2.2.3. 가용성 고형분 및 환원당

가용성 고형분(°Brix)은 휴대용 디지털 굴절계(PR101, ATAGO,

Table 1. Commercial *makgeolli* samples used in this study

Groups	Samples	Alc.% ¹⁾	Major ingredients	Province ²⁾
Rice <i>nuruk</i>	RN1	13.0	rice, glutinous rice, rice <i>nuruk</i>	Chungcheong-do
	RN2	8.5	rice, rice <i>nuruk</i>	Gyeonggi-do
	RN3	8.0	rice, rice <i>nuruk</i>	Gangwon-do
Wheat <i>nuruk</i>	WN1	12.0	rice, wheat <i>nuruk</i>	Chungcheong-do
	WN2	8.0	rice, wheat <i>nuruk</i>	Gyeongsang-do
	WN3	6.5	glutinous rice, wheat <i>nuruk</i>	Gyeongsang-do
	WN4	13.0	rice, wheat <i>nuruk</i>	Gyeongsang-do
	WN5	6.0	rice, wheat <i>nuruk</i>	Jeolla-do
	WN6	11.0	rice, wheat <i>nuruk</i>	Gangwon-do
Wheat <i>nuruk</i> and yeast	WNY1	6.0	rice, wheat <i>nuruk</i> , yeast	Seoul
	WNY2	10.0	rice, wheat <i>nuruk</i> , yeast	Gyeonggi-do
	WNY3	7.8	rice, wheat <i>nuruk</i> , yeast	Gangwon-do
	WNY4	6.0	rice, glutinous rice, wheat <i>nuruk</i> , yeast, <i>jongguk</i> ³⁾	Chungcheong-do
	WNY5	9.0	rice, glutinous rice, wheat <i>nuruk</i> , yeast, <i>ipguk</i>	Jeolla-do
	WNY6	5.8	rice, glutinous rice, wheat <i>nuruk</i> , yeast, <i>jongguk</i>	Jeolla-do

¹⁾Alc.%, labeled alcohol content as declared on packaging.

²⁾Regions were assigned to five major areas: Seoul-Gyeonggi, Gangwon, Chungcheong, Jeolla, and Gyeongsang.

³⁾*ipguk* and *jongguk* are Korean label terms for koji-type starters; original spellings are retained.

Tokyo, Japan)를 이용하여 3회 반복 측정하였다. 환원당 함량은 DNS 법으로 측정하였다(Miller, 1959). 희석한 시료 용액 1 mL에 3,5-dinitrosalicylic acid (Sigma-Aldrich Co., Ltd., USA) 3 mL를 넣고 100°C Water Bath에 5분 동안 끓인 후 실온에서 냉각하였다. 이후 25 mL가 되게 증류수로 채운다. Blank는 시료 대신 증류수 1 mL를 같은 방법으로 처리하였다. 분광광도계(UV spectrophotometer, Shimadzu Co., Kyoto, Japan) 이용해 550 nm에서 흡광도를 측정하였다. 0, 31.25, 125, 500 및 2,000 mg/L 농도별 glucose 표준용액(0, 31.25, 125, 500 및 2,000 ppm)을 제조하여 검량선으로 환산하여 환원당 함량(%)을 계산하였다.

2.3. 전자혀를 이용한 맛성분 패턴분석

막걸리 시료들에 대한 맛성분 패턴을 알아보기 위하여 전자혀(Astree2, Alpha MOS, Toulouse, France)를 이용하여 분석을 진행하였다. 시료 분석 전 표준물질 standard kit (ASTREE II, Alpha Mos)를 사용하여 conditioning, calibration 및 diagnostics procedure 순으로 sensor 상태를 확인한 후 수행하였다. 막걸리 시료의 알코올 농도를 8-10% 수준으로 희석하고 여과지(Advantec No. 2)로 여과한 뒤, 1차 증류된 정제수로 일정 수준으로 희석하여 정확히 100 mL로 정용한 후 전용 비이커에 담아 5회

반복 측정하였다. 7가지 센서(Sourness, AHS; Saltiness, CTS; Umami, NMS; Supplementary Sensors, PKS, ANS, CPS, SCS)의 감응도를 0-10의 랭킹 값으로 맛 강도를 변환하여 나타내었다. 각 시료의 맛 성분 패턴분석은 Alpha MOS사에서 제공된 AlphaSoft (version 17) 프로그램을 사용하여 시각화하였다.

2.4. 전자코를 이용한 향기성분 패턴분석

막걸리 시료의 다중 향기성분의 패턴은 전자코(Heracles NEO electronic nose, Alpha Mos, Toulouse, France)를 이용해 분석하였다. 시료 분석 전 Kovats (Custom Alkanes Blend Standard)를 이용하여 각 시료의 피크(pick) 값을 얻어 standard로 이용하였다. 시료 5 mL를 20 mL vial (Ls-Phs-Psck GmbH, Langerwehe, Germany)에 넣고, 40°C에서 30분간 500 rpm으로 교반한 뒤 두 개의 column (MTX-5 and MTX-1701)이 부착된 Flame ionization detector (FID)로 휘발성 향기 성분을 검출하였다. Injection은 syringe type으로 column 온도가 25°C로 유지된 상태에서 column head pressure 1.0 psi로 주입하였다. 분석 시 injector의 온도는 200°C, detector 260°C로 하고 injector pressure는 1.0 psi, detector pressure는 39.0 psi로 하였다. 시료별 5회 반복 측정하였으며, 각 시료의 향기성분 패턴분석은

Alpha MOS사에서 제공된 AlphaSoft (version 17) 프로그램을 사용하여 수행하였다.

2.5. 통계처리

모든 데이터는 3회 반복 측정하였으며, 평균±표준편차로 표시하였다. 실험값에 대한 통계적 분석은 SPSS (Statistical Package for the Social Science, Ver 20.0 SPSS INC., Chicago, USA) 프로그램을 사용하였고, 일원배치분산분석(analysis of variance, ANOVA)과 Duncan's multiple range test를 적용하여 $p<0.05$ 수준에서 사후 검증하였다. 누룩 유형별 시료들의 특징을 탐색하기 위해 PCA, PLS-DA와 이화학 지표와 향미 변수 간 정합성을 시각화하기 위한 heatmap 분석을 통한 상관성은 XLSTAT 소프트웨어(version 2018, (version 2018, Lumivero Co., Denvers, USA)를 사용하여 수행하였다. 또한 시료별 3회 측정값을 반복 측정값으로 처리하여 그룹(RN, WN, WNY)에 따른 품질 특성 차이를 시료 간 변이를 고려하기 위해 혼합효과모형을 이용하여 평가하였으며, 제조 특성(누룩 종류, 찹쌀, 효모, 종국 등 첨가) 요인이 결괏값에 미치는 영향도 포함하여 분석하였다. 통계적 유의성 $p<0.05$ 로 설정하고 신뢰구간은 95% 수준에서 산출하였다. 통계분석은 Microsoft Excel 기반의 XLSTAT software (Lumivero Co., Denvers, USA)를 이용한 혼합효과모형(mixed-effects model, Type III tests of fixed effects) 분석을 수행하였고, 통계적 유의성은 $p<0.05$ 수준에서 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 막걸리 시료의 알코올 함량 분석결과

본 연구는 시판 막걸리를 대상으로 한 품질, 향미 등에 관한 비교 연구로서, 누룩에 제조에 사용된 주원료(멥쌀, 찹쌀, 소맥 등)와 효모, 국 등의 종균의 종류에 차이를 두고 중점적으로 비교 분석하고자 하였다. 다만, 제조 지역, 원료 배합비, 제조 조건, 살균 처리 여부 등 변수들이 품질 특성에 영향을 미쳤을 가능성도 있기에 통계 처리 시 배제하였지만, 결과 해석 시 이러한 제한점을 고려해야 한다. 또한 시료 수는 RN (n=3), WN (n=6), WNY (n=6)로 집단 간 표본 수가 불균형하게 구성되었다. 이러한 표본 수의 차이는 분산 추정 및 통계적 검정력에 영향을 미칠 수 있으므로, 집단 간 유의성 해석에는 주의가 필요하다.

본 연구에서는 누룩, 효모 등의 주원료에 따라 국내 시판 막걸리 시료 15종의 품질 특성을 나타내는 알코올 함량(%), pH 및 총산도(% v/v), 가용성 고형분(°Brix) 및 환원당(% v/v), 향기 성분과 맛의 패턴에 대해 분석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 2와 Fig. 1과 2에 나타내었다.

Table 2에 제시된 바와 같이 시판 막걸리의 알코올 함량을 분석한 결과 쌀누룩 막걸리(RN)가 $9.75\pm 2.05\%$, 효모 첨가 밀누룩 막걸리(WNY)가 $7.59\pm 1.74\%$ 로 통계적인 유의차를 보였다($p<0.05$). 효모와 함께 밀누룩으로 제조한 WNY6 시료가 $5.43\pm 0.03\%$ 의 가장 낮은 알코올 함량을 나타내었지만, 밀누룩만으로 제조한 WN4 시료가 $12.82\pm 0.02\%$ 로 가장 높은 값을 보였다. 사용한 누룩의 종류에 따라 세 그룹 간 통계적으로 일원분산분석 결과 유의미한 그룹별 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았으나, 평균값의 경향만 살펴보면 쌀 누룩으로 제조한 막걸리 제품(RN)이 상대적으로 높은 에탄올 함량을 나타내었는데, Kang 등(2014) 보고에서 제시한 시판 막걸리 알코올 함량(5-9%)보다 높았는데 이는 비살균 막걸리의 유통 중 후발효 현상으로 사료 된다. 일반적으로 알코올 수율을 높이고자 효모를 첨가하여 제조한 WNY 그룹의 낮은 알코올 함량은 일부 제품에서 발효 종료에 상대적으로 이른 시점에 이루어졌거나, 매트릭스 조건 또는 미생물 상호작용으로 효모 활성이 제한되었을 가능성이 있으나, 본 연구 결과만으로 기전적 해석을 단정할 수는 없다. 본 연구에 사용한 전체 막걸리에 대한 알코올 함량은 $8.71\pm 2.37\%$ 로 기존 상업용 막걸리가 약 6-13% 범위라는 선행 연구 결과와 부합하였다(Choi 등, 2020; Kang 등, 2014).

3.2. 막걸리 시료의 pH, 총산도

막걸리 시료들에 대한 pH는 3.39 ± 0.32 (WN3)에서 4.74 ± 0.00 (RN2)의 범위를 보여(전체 평균 4.13 ± 0.31), 시판 막걸리 제품들은 약산성을 나타내었다(Table 2). 그룹별로 살펴보면 평균적으로 RN은 4.24 ± 0.35 , WN 3.99 ± 0.32 , 그리고 WNY 4.21 ± 0.20 으로 밀누룩만으로 제조한 막걸리가 상대적으로 pH가 낮았으나, 통계적 유의성은 낮았다($p>0.05$). 각 그룹 내에서 멥쌀, 밀 외 사용된 찹쌀, 효모 등 부원료의 차이로 인한 시료 특징이 포함되어 나타난 것으로 사료되나, 본 연구에서 도출된 막걸리의 평균 pH는 주세법상 막걸리의 적정 pH 3.8-4.7 범위 안에 포함된다(Kang 등 2014).

총산은 구연산 환산값으로 나타내었는데 시판 막걸리 중 최솟값 $0.21\pm 0.00\%$ (WNY1)에서 최댓값 $0.71\pm 0.02\%$ (RN3)의 범위(전체 평균 $0.41\pm 0.15\%$)에 있었지만 그룹 간 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 그룹별 평균값으로 살펴보면 쌀누룩으로 제조한 막걸리(RN)가 다른 그룹에 비해 상대적으로 높은 알코올과 총산을 동시에 보여, 발효 과정에서의 유산균 유래 유기산 생성이 활발했을 가능성이 있지만(Park 등, 2012), pH가 낮다는 선행 연구(Hwang 등, 2020)와는 상이하게 통계적 유의성이 없었다.

3.3. 막걸리 시료의 가용성 고형분, 환원당

가용성 고형분(°Brix)은 2.20 ± 0.08 °Brix (WN5)에서 15.63 ± 0.09 °Brix (RN3) 범위로 넓게 분포되었다(전체 평균 $7.68\pm$

Table 2. Comparison of quality characteristics of commercial *makgeolli* grouped by *nuruk* type and yeast use

Samples ¹⁾	Alcohol (%)	pH	Total acidity (%)	Soluble solids (Brix°)	Reducing sugar (%)
RN1	12.62±0.04 ²⁾	3.96±0.00	0.46±0.01	8.97±0.19	0.02±0.00
RN2	8.63±0.15	4.74±0.00	0.30±0.00	5.00±0.16	0.48±0.00
RN3	8.01±0.02	4.03±0.02	0.71±0.02	15.63±0.09	0.54±0.00
Mean±SD	9.75±2.05 ^{b3)}	4.24±0.35 ^b	0.49±0.17 ^a	9.87±4.39 ^b	0.35±0.23 ^a
WN1	12.22±0.00	4.45±0.00	0.27±0.00	6.77±0.21	0.15±0.00
WN2	8.07±0.02	3.99±0.01	0.42±0.01	3.63±0.12	0.64±0.00
WN3	6.72±0.16	3.39±0.00	0.60±0.00	5.13±0.09	0.24±0.01
WN4	12.82±0.02	4.21±0.00	0.49±0.01	13.30±0.00	0.60±0.00
WN5	5.98±0.05	3.98±0.01	0.29±0.00	2.20±0.08	0.61±0.00
WN6	9.99±0.01	3.95±0.00	0.40±0.01	6.73±0.09	0.17±0.00
Mean±SD	9.30±2.60 ^{ab}	3.99±0.32 ^a	0.41±0.11 ^a	6.29±3.53 ^a	0.40±0.22 ^{ab}
WNY1	6.59±0.04	4.58±0.00	0.21±0.00	7.63±0.17	0.82±0.02
WNY2	10.62±0.04	4.33±0.00	0.36±0.01	11.17±0.09	0.65±0.02
WNY3	7.78±0.01	4.22±0.00	0.48±0.01	8.23±0.05	0.53±0.00
WNY4	6.28±0.01	4.09±0.02	0.22±0.01	2.63±0.09	0.16±0.00
WNY5	8.83±0.02	3.97±0.00	0.68±0.00	11.50±0.00	0.53±0.00
WNY6	5.43±0.03	4.08±0.00	0.28±0.00	6.70±0.22	0.54±0.00
Mean±SD	7.59±1.74 ^a	4.21±0.20 ^{ab}	0.37±0.17 ^a	7.98±2.97 ^{ab}	0.54±0.20 ^b
Total	8.71±2.37	4.13±0.31	0.41±0.15	7.68±3.76	0.45±0.23

¹⁾RN, rice *nuruk*; WN, wheat *nuruk*; WNY, wheat *nuruk* and yeast.

²⁾All values are mean±SD (n=3).

³⁾Values with different superscript letters indicate the significant differences according to Duncan's multiple range test (p<0.05).

3.76 °Brix) (Table 2). 그룹별 평균값을 비교해보면 RN (9.87±4.39 °Brix)이 WN (6.29±3.53 °Brix)보다 유의적으로 높게 나타났다(p<0.05). RN 그룹에서 가용성 고형분이 높은 것은 잔존 당류나 텍스트린 등 부유 고형분의 상대적으로 높은 수준을 시사하며, WN에서 낮은 값을 보인 것은 발효과정에서 당이 광범위하게 소모되었음을 시사한다(Cho 등, 2016).

환원당 함량은 포도당으로 환산하여 제시하였으며 0.02±0.00% (RN1)에서 0.82±0.02% (WNY1)의 범위로서, 특히 쌀 누룩 막걸리가 0.35±0.23%로 상대적으로 낮은 값을 나타내었다(전체 평균 0.45±0.23%). 이는 효모, 밀누룩 등을 주원료로 제조한 밀누룩(WNY) 그룹의 평균값(0.54±0.20%)과 비교하여 통계적으로 유의미한 차이를 보였다(p<0.05). RN 그룹이 낮은 환원당과 상대적으로 높은 알코올을 동시에 보인 반면, 밀누룩으로 제조한 WN 그룹의 일부 제품에서 높은 환원당을 나타낸 것은 발효 중 당 이용이 제한되었거나 발효종료 시점이 이른 양상을 반영할 수 있다고 판단된다(Seong 등, 2021).

3.4. 막걸리 제조원료에 따른 혼합효과 모형 분석

본 연구에서는 각 막걸리 시료(sample)에서 수행한 3회 측정을 기술 반복(technical replicates)으로 간주하고, 막걸리 제조 원료가 이화학적 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 시료를 랜덤효과로 포함한 혼합모형 분석을 수행하였다(Table 3). Table 1과 2에 제시된 정보를 바탕으로 분석한 결과, 막걸리의 pH는 누룩 종류(p<0.001), 효모 첨가(p=0.005), 찹쌀 사용(p<0.0001) 및 중국 첨가(p=0.020)에 의해 유의한 영향을 받는 것으로 나타났다. 반면 알코올 함량, 총산도 및 가용성 고형분(°Brix)은 제조원료에 따른 유의한 차이를 나타내지 않았다(p>0.05). 또한 환원당의 경우 효모 첨가(p=0.005)와 찹쌀 사용(p=0.001)이 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 누룩 종류와 중국 첨가의 영향은 통계적으로 유의하지 않았다(p>0.05). 이러한 결과는 막걸리 발효 과정에서 효모 첨가와 찹쌀 사용이 당 생성 및 이용과 관련된 발효 대사 과정에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다(Bang 등, 2016; Choi 등, 2020). 특히 효모는 발효 과정에서 당 대사와 관련된 주요 미생물로 작용하여 환원

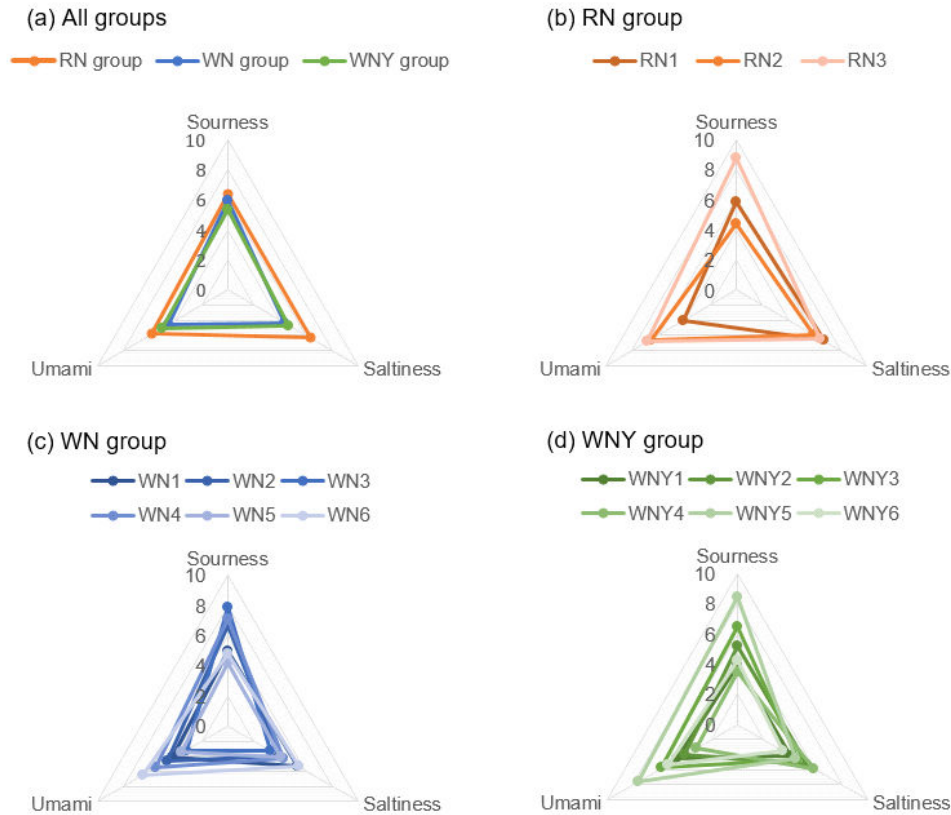


Fig. 1. Electronic-tongue ranking scores (0-10) for sourness, saltiness, and umami in fifteen commercial *makgeolli* products. (a), All groups; (b), RN subgroup; (c), WN subgroup; (d), WNY subgroup. Points show mean scores ($n=5$ per product). Error bars denote SD. Different lowercase letters (if shown) indicate significant differences among groups by Duncan's test at $p<0.05$.

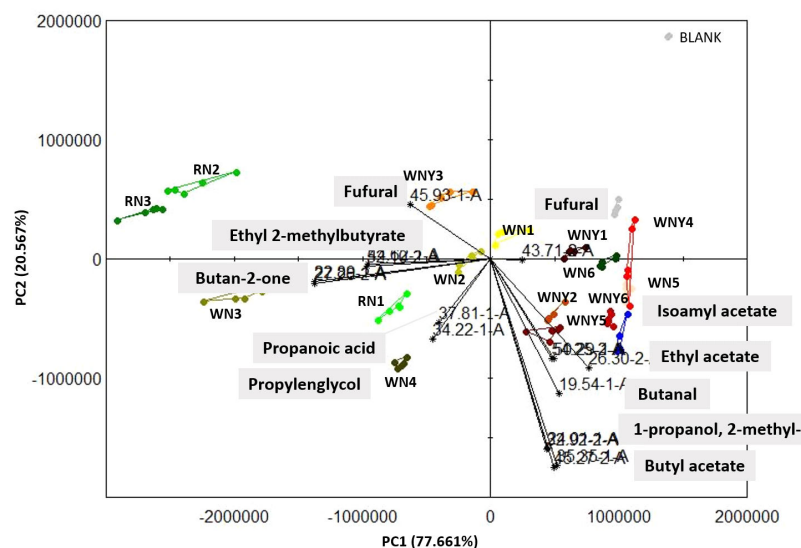


Fig. 2. Principal component analysis (PCA) based on electronic-nose variables retained at discrimination power >0.900 . PC1 and PC2 explain 77.66% and 20.56% of variance, respectively (cumulative 98.22%). Ellipses denote 95% confidence regions for RN, WN, and WNY.

Table 3. Mixed-effects model analysis of fermentation factors affecting physicochemical properties of *makgeolli*

Factor	Alcohol (%)	pH	Total acidity (%)	Soluble solids (°Brix)	Reducing sugar (%)
<i>Nuruk</i> type	0.327	<0.001 ^{*)}	0.263	0.805	0.995
Yeast addition	0.750	0.005 [*]	0.462	0.399	0.005 [*]
Glutinous rice	0.141	<0.0001 [*]	0.712	0.920	0.001 [*]
Starter addition	0.122	0.020 [*]	0.914	0.621	0.629

^{1)*)} Statistical significance was defined as $p < 0.05$ in the mixed-effects model analysis (Type III tests of fixed effects).

당 변화에 영향을 미칠 수 있으며, 이러한 대사 과정은 발효 환경의 pH 변화와도 밀접하게 관련될 가능성이 있다.

종합적으로 누룩형태별 시판 막걸리 시료들의 이화학적 특성을 살펴보면 쌀누룩 막걸리(RN)의 경우 효율적 당 이용(높은 에탄올 · 낮은 잔당)과 균형적인 산도를 보인 반면, 밀누룩 막걸리(WN, WNY)는 쌀누룩 막걸리와는 상대적으로 높은 산도, 낮은 알코올 함량을 나타내었다. 특히 WNY 막걸리의 경우 쌀누룩 막걸리에 비해 효모를 사용했음에도 일부 제품에서 잔당이 높고, 낮은 알코올 수율을 보여 밀 원료의 기질 조건이나 미생물 길항 작용으로 인한 효모의 활성이 제한되었을 가능성이 있어(Seong 등, 2021; Shin 등, 2017), 향후 분석에서는 단순한 그룹 비교에 더해 효모와 같은 종국의 처리여부 등 제조 요인(누룩 당화력, 발효기간별 효모 생육 등)을 구조적으로 반영한 실험 모델링으로 양질의 결과 해석이 수반되어야 할 것으로 사료 된다.

3.5. 전자혀를 이용한 맛성분 패턴분석

전자혀 및 전자코 분석은 시료 간 화학적 · 감각적 특성의 상대적 패턴을 비교하는 데 유용한 도구이나, 인간의 실제 감각 인지를 완전히 대변하는 방법은 아니다. 따라서 본 연구에서 도출된 기기 분석 결과는 관능 특성을 직접적으로 설명하기 보다는 상대적 경향을 제시하는 참고 지표로 해석되어야 하며, 향후 감각특성 평가와의 정량적 상관성 분석이 보완될 필요가 있다.

막걸리 시료의 맛 성분의 패턴을 알아보고자 7종의 센서 배열(AHS, CTS, NMS, PKS, ANS, CPS, SCS)을 이용한 전자혀(electronic tongue, e-tongue) 분석을 실시하였으며, standard sensor (PKS, ANS, CPS, SCS)를 제외한 신맛(sourness), 짠맛(saltiness), 감칠맛(umami)에 대한 시료별 ranking 값을 Fig. 1에 나타내었다. 신맛의 경우 효모와 밀누룩으로 제조한 시료 WNY4(3.5)가 가장 낮은 강도를 보였으며, RN3(8.8) 시료가 가장 강한 신맛을 띄는 것으로 나타났다. 이 시료의 경우 총산도($0.71 \pm 0.02\%$)에서도 가장 높은 값을 나타내 전자혀를 이용한 측정값과의 상관성을 확인할 수 있었다. 감칠맛의 강도는 막걸리 시료들이 3.1-7.6의 범위로 확인되었으며, 감칠맛의 경우 쌀누룩으로 제조한 막걸리 중 RN2와 RN3 시료가 6.6과 6.8의

높은 값을 나타내었지만, 가장 높은 값은 백미, 찹쌀, 밀누룩, 효모, 그리고 입국을 사용하여 제조한 WNY5 시료가 7.1로 가장 높은 값을 보였다. 짠맛의 강도는 전체적으로 3.3-6.7의 범위로 나타났으며, WN 그룹 중 WN3 시료가 3.3으로 가장 약한 짠맛을, 쌀누룩 중 RN1(6.7) 시료가 가장 높은 짠맛 강도를 나타내었다.

그룹별 평균값으로 보면 RN이 가장 높은 맛 강도를 보였으며(신맛 6.37, 짠맛 6.33, 감칠맛 5.83), 상대적으로 WN과 WNY 그룹은 3가지 센서에 대해 낮은 값을 나타내었는데, 특히 짠맛에 한하여 RN과 WN 그룹 간에 통계적 유의 수준에서 차이를 보였다($p < 0.05$, data not shown). 전자혀 센서(CTS)를 통해 측정된 짠맛이 쌀누룩 막걸리(RN)에서 밀누룩 막걸리(WN)보다 높게 나타난 것은 품질분석 결과에서 높은 알코올 및 총산 함량과 낮은 잔당을 보여 발효 진행율과 관련이 있다고 사료된다. 이와 같은 결과가 발효에 의해 생성된 양이온(K^+ , Na^+ 등)과 유기산의 결합에 의한 염의 형성과 낮은 잔당 함량으로 인한 단맛의 약화로 짠맛에 대한 강도가 증폭된 것으로 예상된다.

결론적으로 밀누룩 막걸리(WN, WNY)가 쌀누룩 막걸리(RN) 시료들에 비해 산미가 약하고 짠맛과 감칠맛에 있어 균형적으로 조화로운 풍미를 형성한 것으로 판단된다. 이는 밀누룩이 쌀누룩에 비해 막걸리 발효 중 느린 미생물 대사로 맛 품질에 유리함을 시사한다.

3.6. 전자코를 이용한 향미 성분 패턴분석

전자코 분석을 통해 총 64종의 휘발성 성분이 검출되었고, 판별력 > 0.900 기준으로 총측한 10종을 핵심 향기성분 변수로 선별하였다(Fig. 2, Table 4). MXT-5 컬럼을 통해 butanal, 2-methyl-1-propanol, propanoic acid, butyl acetate, propylene glycol, isoamyl acetate 등의 성분들이 검출되었고, MXT-1701 컬럼에서는 ethyl acetate, butan-2-one(이명 2-butanone), furfural, ethyl 2-methylbutyrate 등이 동정되었다. 이들 향기성분들에 대한 막걸리 그룹 간 PCA 분석결과는 PC1 77.66%, PC2 20.56%로 누적 기여율 98.22%로 전체 결과를 설명하였고, 이들 향미 성분과 양의 방향으로 매칭된 시료들은 밀누룩,

Table 4. Key volatile compounds retained from electronic-nose profiling (discrimination power > 0.900) with column assignment (MXT-5 or MXT-1701) and qualitative contribution to group separation in PCA

Column	RT (min)	Discrimination power	Compound	Odor description ¹⁾
MXT-5	19.54	0.986	butanal	chocolate, cocoa, green, musty, pungent
	24.01	0.990	2-methyl-1-propanol	alcoholic, bitter, chemical, fusel, glue, leek, licorice
	34.22	0.997	propanoic acid	acidic, soy, vinegar
	35.35	0.987	butyl acetate	banana, bitter, fruity, green, pear, pineapple
	37.81	0.987	propylenglycol	alcoholic, caramelized, odorless
	50.29	0.997	isoamyl acetate	apple, banana, ester, fresh, fruity, pear
MXT-1701	26.30	0.992	ethyl acetate	acidic, butter, caramelized, fruity, green, orange, pineapple
	27.26	0.994	butan-2-one	acetone, butter, cheese, chemical, chocolate, fruity
	43.71	0.986	furfural	almond, baked, benzaldehyde, bread, fragrant, sweet, sweet, woody
	52.10	0.995	ethyl 2-methylbutyrate	apple, blackberry, cognac, fruity, green, phenolic

¹⁾Odor descriptors were adopted from the built-in reference library of the electronic nose system (Astree II, Alpha MOS, Toulouse, France).

효모 등을 사용한 막걸리로 특징을 갖고 구별되었다.

RN 군은 PC1 음의 방향에 위치하며 2-butanone, ethyl 2-methylbutyrate, propanoic acid, propylene glycol과 연관되어 에스터/산/케톤 등이 풍부한 특징을 보였다. RN2-RN3는 서로 근접하여 유사한 향기 패턴을 나타냈다. WN은 좌표 공간에서 상대적으로 분산이 컸으며, WN1, WN2, WN5는 butanol/propanol과 ethyl acetate 기여가 커 고급알코올·아세트이트 성분이 상대적으로 강조되었다. WNY, 특히 WNY1-WNY5는 isoamyl acetate가 검출되어 과일(바나나형) 향 특성이 다른 그룹에 비해 두드러진 특징을 보였는데, 이는 효모에서 기인한 ester 형성 경로 및 공정 조건의 영향으로 보인다(Kim 등, 2016; Kim 등, 2019; Lee 등, 2007). 한편 furfural은 WN 그룹의 주 성분으로 나타나, toasty/nutty 향을 부여하나 과량에서는 off-flavor를 유발할 수 있어(Choi 등, 2018) 제조공정 표준화 시 고려해야 할 것이다.

3.7. PLS-DA and heatmap analysis

동일 변수 집합으로 구축한 세 그룹 간 PLS-DA의 설명력은 Fig. 3에 나타내었다. 두 컴포넌트 기준 $R^2X_{cum}=0.306$, $R^2Y_{cum}=0.628$ 로 학습공간에서 그룹 간 구조의 상당 부분을 설명하였으나, 교차검증 예측력은 $Q^2_{cum}=0.192$ (Comp1), 0.012 (Comp2)로 0에 가깝거나 음수여서 예측 성능은 낮게 나타나, 점수도(t_2 vs t_1)에서 관찰되는 분리(RN의 t_1 양의 방향, WN의 t_2 음의 방향, WNY의 t_2 양의 방향)는 예측 분류라기보다 상관 구조에 기반한 해석이 가능하다(Jung 등, 2014; Kim 등, 2016). 따라서 본 연구에서는 PLS-DA 분석을 통해 누룩

종류별 특징을 탐색하는 수준으로 살펴보고, 히트맵 모듈과의 정합성에 근거하여 유의미한 값을 도출하고자 하였다. 예측력의 한계에도 불구하고, RN 그룹은 총산-AHS(신맛)-NMS(감칠맛)가 서로 양(+)의 상관을 보였고 pH와는 음(-)의 상관을 나타냈다. 알코올 함량도 같은 방향으로 묶였으며, propanoic acid 등 단쇄산/케톤 일부가 동반되었다. 이는 다른 시료들에 비해 RN 막걸리 시료가 발효가 더 진행된 상태(높은 에탄올·높은 적정산도·강한 산미/감칠맛·낮은 pH)임을 시사한다. WNY 그룹은 첨가한 효모 지표와 propyl acetate, methyl butanoate, ethyl propanoate 등 에스터류가 양의 방향으로 함께 묶였으며, 이는 효모 대사에 따른 에스터 생성과 과일향 특성과 관련이 있다고 여겨진다(Lee 등, 2007; Wong 등, 2023).

전반적으로 쌀 누룩(RN) 막걸리는 총산과 전자혀 산미/감칠맛이 함께 증가하고 pH·잔당이 감소하는 산-맛 모듈과 정합적이고, 당화·발효가 더 진행되어 알코올(%)이 높은 상태를 시사한다(Bang 등, 2016; Choi 등, 2020). 밀 누룩(WN) 막걸리는 고급알코올/카보닐 모듈(예: 2-/3-methyl-1-butanol, 알데하이드류)에 연계되어 산 생성은 상대적으로 약하고 fusel alcohol 기여가 큰 특징을 보였다. 효모 첨가 밀 누룩 막걸리(WNY)는 아세트산-에스터 모듈(propyl acetate, methyl butanoate, ethyl propanoate)과 연관되었고, 군 내에서는 isoamyl acetate(특히 WNY5)가 두드러져 과일향 특성을 가질 것으로 예상된다.

종합적인 의견으로 막걸리 제조에서 pH-적정산도, 잔당-알코올 함량(%) 균형, ester/고급알코올 비율을 고려하여 누룩 및 효모 등 사용 원료를 선정할 수 있는 막걸리의 품질 표준화에 실효성 있는 기준으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

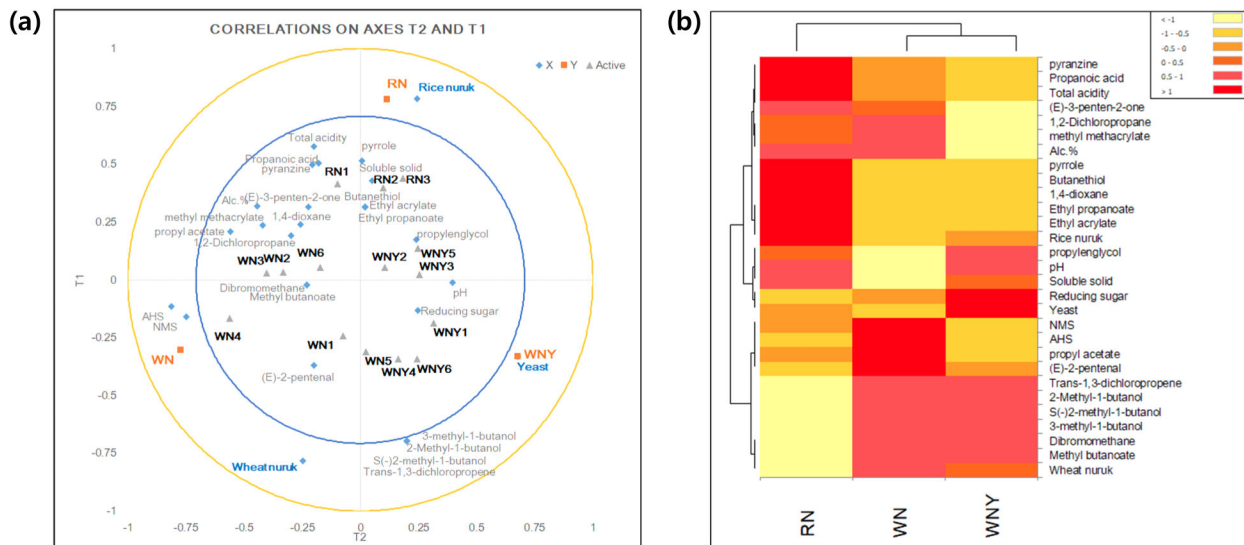


Fig. 3. PLS-DA score plot (axes t2 vs t1) for *makgeolli* group (orange), *nuruk* type (blue), and items (gray) and correlation heatmap among physicochemical indices, instrumental taste sensors, and volatile compounds. (a), Ellipses denote 95% confidence regions. RN separates toward positive t1; WN and WNY separate along t2 (negative vs positive); (b), Colored cells denote Pearson correlations (scaled).

4. 요약

본 연구는 국내 5개 권역에서 수집한 시판 막걸리 15종을 대상으로 누룩, 효모 등 원료에 따라 쌀 누룩(RN), 밀 누룩(WN), 효모 첨가 밀 누룩(WNY)으로 분류하여 품질 및 향미 관련 지표를 분석하여 PCA 및 PLS-DA로 다변량 구조로 결과를 해석하였다. 알코올 함량은 5.43-12.82% (v/v), pH는 3.39-4.74, 총산은 0.21-0.71% (v/v)로 전반적으로 약산성 범위를 보였으며, 특히 쌀 누룩 막걸리(RN)는 잔당이 낮고 알코올 함량이 높아 다른 시료들에 비해 당 전환이 빠른 특징을 보였다. 전자혀 분석을 통한 평균 맛 지표는 RN에서 가장 높은 경향을 보였고, 신맛과 감칠맛 역시 모두 높아 총산 함량과 상관성을 나타내었다. 반면 WN과 WNY 막걸리는 그룹 내에서 분산이 컸지만, 평균적으로는 RN에 비해 맛의 균형을 보였다. 전자코 분석을 통해 64종의 휘발성 성분을 검출(판별력 >0.900)하였고, 판별력이 높은 10개 향미물질로 사용원료별 막걸리를 분류해보면 RN은 ethyl 2-methyl butyrate, 2-butanone 등이 WN은 butanol/propanol, ethyl acetate가, WNY는 isoamyl acetate(과일·바나나향)가 두드러졌다. PLS-DA와 히트맵 분석을 통한 해석 결과 RN이 산-맛 모듈과 정합되어 발효 완성도가 높았고, WN은 고급알코올 및 카보닐 향기성분에 기여가 크며, WNY는 isoamyl acetate 중심의 과일향을 보인다는 특징을 알 수 있었다. 따라서 막걸리 제조 시 pH-산도, 잔당-알코올, ester, 고급알코올 등 향기성분 비율 등을 지표로 하여 누룩, 효모 등 사용원료를 선택함으로써 막걸리 품질을 표준화할 수 있음을 시사한다.

Funding

This study was carried out with the support of “Project no. RS-2022-RD010036” from the Rural Development Administration and the 2025 collaborative research program between the university and the Rural Development Administration, Republic of Korea.

Acknowledgements

None.

Conflict of interests

Chan Woo Kim has served as an editor (editorial board) of Food Science and Preservation since 2025 but was not involved in the review process or decision-making for this manuscript. Otherwise, no relevant conflicts of interest have been reported.

Author contributions

Conceptualization: Kim MK, Kim SY. Methodology: Woo SA, Yoo SE, Kim CW. Formal analysis: Woo SA. Validation: Yoo SE, Gwan HM. Writing - original draft: Woo SA, Kim SY. Writing - review & editing: Kim MK, Kim SY.

Ethics approval

This article does not require IRB/IACUC approval because

there are no human and animal participants.

ORCID

Seung-A Woo (First author)

<https://orcid.org/0009-0004-1302-4156>

SeongEui Yoo

<https://orcid.org/0000-0002-0106-1070>

Chan-Woo Kim

<https://orcid.org/0000-0002-7858-9885>

Hee-Min Gwan

<https://orcid.org/0000-0002-8808-5875>

Mina K. Kim

<https://orcid.org/0000-0002-7832-9880>

So-Young Kim (Corresponding author)

<https://orcid.org/0000-0002-9729-6869>

References

- Ahn SR, An JH, Song HY, Park JW, Lee SH, Kim JH, Jang JS, Park TH. Duplex bioelectronic tongue for sensing umami and sweet tastes based on human taste receptor nanovesicles. *ACS Nano*, 10, 7287-7296 (2016)
- 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)
- Cheon JW, Cho CB. The quality characteristics of *makgeolli* based on input timing of *nuruk*. *J Venture Innov*, 1, 123-139 (2018)
- Cho HK, Lee JY, Seo WT, Kim MK, Cho KM. Quality characteristics and antioxidant effects during *Makgeolli* fermentation by purple sweet potato-rice *nuruk*. *Korean J Food Sci Technol*, 44, 728-735 (2012)
- Cho KM, Hwang CE, Lee HY, Ahn MJ, Joo OS. Quality characteristics and antioxidant activities of *makgeolli* prepared using rice *nuruk* containing bitter melon (*Momordica charantia*). *Korean J Food Preserv*, 23, 259-268 (2016)
- Choi JH, Lim BR, Kang JE, Kim CW, Kim YS, Jeong ST. Changes in microbial community and physicochemical characterization of *makgeolli* during fermentation by yeast as a fermentation starter. *Korean J Food Sci Tech*, 52, 529-537 (2020)
- Choi JS, Park YD, Kim HS, Jeong ST. The flavor characteristics of rice *makgeolli* and wheat flour *makgeolli* by heat treatment. *J East Asian Soc Diet Life*, 28, 15-23 (2018)
- Hwang CE, Cho KM, Joo OS. Quality characteristics of wheat-rice *makgeolli* prepared using rice *nuruk* and the potential probiotic *Kazachstania exigua* CCSY27. *Food Sci Preserv*, 27, 58-65 (2020)
- 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)
- Jo Y, Gu SY, Chung N, Gao Y, Kim HJ, Jeong MH, Jeong YJ, Kwon JH. Comparative analysis of sensory profiles of commercial cider vinegars from Korea, China, Japan, and US by SPME/GC-MS, E-nose, and E-tongue. *Korean J Food Sci Tech*, 48, 430-436 (2016)
- Jung H, Lee SJ, Lim JH, Kim BK, Park KJ. Chemical and sensory profiles of *makgeolli*, Korean commercial rice wine, from descriptive, chemical, and volatile compound analyses. *Food Chem*, 152, 624-632 (2014)
- Kang JE, Choi HS, Choi JH, Yeo SH, Jeong ST. Physicochemical properties of Korean non-sterilized commercial *makgeolli*. *Korean J Community Living Sci*, 25, 363-372 (2014)
- Kim JS, Jung HY, Park EY, Noh BS. Flavor analysis of commercial Korean distilled spirits using an electronic nose and electronic tongue. *Korean J Food Sci Tech*, 48, 117-121 (2016)
- Kim SH, Mun JY, Kim JY, Kim SY, Yeo SH. Quality characteristics of barley-*makgeolli* fermented from yeast Y204 with different fermented agents. *Korean J Food Preserv*, 26, 631-641 (2019)
- Lee HS, Lee TS, Noh BS. Volatile flavor components in the mashes of *takju* prepared using different yeasts. *Korean J Food Sci Tech*, 39, 593-599 (2007)
- Lee YJ, Yi H, 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)
- Miller GL. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *J Anal Chem*, 31, 426-428 (1959)
- Ministry of Government Legislation. Liquor Tax Act (Act No. 17762). Korean Law Information Center (2021)
- Nam MJ, Kim MH. Quality characteristics of *takju* prepared from different ingredients and fermentation temperature. *J Foodserv Saf*, 5, 30-39 (2024)
- National Tax Service. Liquor Analysis Regulation (Directive No. 2659). NTS Liquor License Support Center (2025)
- Park SH, Lee S, Jin HS. Isolation and identification of acid-forming bacteria from a fresh wheat *makgeolli* in *Jeonju*. *Korean J Food Nutr*, 25, 951-956 (2012)
- Seong GU, Kang JW, Cho SM, Lee SB, Cho JH, Park DS, Lee JY. Comparison of quality characteristics of *makgeolli* made using brown and white rice of 'Mirchal'. *Food Sci Preserv*, 28, 790-798 (2021)
- Shin DS, Jeong ST, Sim EY, Lee SK, Kim HJ, Woo KS, Oh SK, Kim S, Park HY. Quality characteristics of mixed *makgeolli* with barley and wheat by fermentation temperature. *Korean J Food Nutr*, 30, 305-311 (2017)

Wong B, Owens A, Phillips M, Kam R. Identifying sensory attributes of Korean rice wine (*makgeolli*) using sensory evaluation and chemical analysis. J Food Sci, 88, 4247-4261 (2023)

Yeom JH, Choe AY, Lim SD, Lee YS, Na SY, Ko HH. Soft and ion-conducting hydrogel artificial tongue for astringency perception. Sci Adv, 6, eaba5785 (2020)