

The Food and Life has published all type articles such as research articles, review articles, survey articles, research note, short communication or editorial since 2020. It covers the all scientific and technological aspects of food and life science.

<https://www.foodnlife.org>



초분광 분석을 통한 돼지 안심 전단력 및 가열 감량 분류

정슬기찬, 김소은, 한석희, 전하연, 우민경, 정사무엘*

충남대학교 동물자원생명과학과

Classification of shear force and cooking loss of pork tenderloin using the hyperspectral imaging analysis

Seul-Ki-Chan Jeong, Soeun Kim, Seokhee Han, Hayeon Jeon, Minkyung Woo, Samooel Jung*

Department of Animal Science and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Abstract

This study was conducted to investigate whether the shear force (SF) and cooking loss (CL) of pork tenderloin can be non-destructively predicted using hyperspectral image (HSI) analysis. A total of 100 tenderloins from different pork carcasses were obtained at 24 h postmortem. Each tenderloin was sliced into 3 slices of 6 cm thickness, resulting in 300 slices in total. HSI analysis was performed in reflectance mode within the spectral range of 402–1,002 nm (151 bands). The SF and CL of each slice were subsequently measured. The tenderloin samples were categorized into three SF and CL classes (low, middle, and high SF or CL). The 70% and 30% of the HSI data were randomly assigned to the calibration set and the prediction set, respectively. Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) was employed to classify the sample into the three SF and CL categories. The highest accuracy of the calibration models of SF and CL was 74.29% and 70.48%, respectively. In contrast, the highest accuracy of prediction models of SF and CL was 53.33% and 55.56%, respectively. Therefore, it is considered that there are limitations in predicting SF and CL of tenderloin using HSI in the Vis/NIR range employed in this study.

Keywords: pork, tenderloin, shear force, cooking loss, hyperspectral imaging

서론

도체로부터 정형된 돈육은 각 대분할 및 소분할 부위에 따라 유전적 요인과 환경적 요인에 영향을 받아, 근육의 형태학적 특성과 구성 성분에 차이가 발생할 수 있으며, 이에 따라 식육의 품질 특성도 달라질 수 있다(Kim et al., 2023). 이러한 품질 차이로 인해 돈육의 부위별로 소비자의 선호도가 다르게 나타나며, 동아시아에서는 목심과 삼겹 부위가 높은 지방 함량에 따른 우수한 관능적 품질로 인해 특히 선호도가 높은 경향이 있다(Jeong et al., 2024; Kim et al., 2024). 한편, 상대적으로 비선호 부위인 안심은 낮은 지방함량에도 불구하고 부드러운 조직감을 지니고 있다. 그럼에도 불구하고, 선호 부위에 비해 안심의 품질 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다.

식품 품질에 대한 소비자들의 관심이 증가함에 따라, 식육의 품질 관련 정보 제공에 대한 요구도 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라, 소비자가 식육을 구입할 때 품질을 예측할 수 있는 신뢰성 있는 품질 지표의 제공이 필요한 실정이다(Cha et al., 2025; Cho and Kim, 2023; Jeon et al., 2024). 특히 관능적 품질은 소비자가 식육을 구매할 때 주요하게 고려하는 요소로, 풍미, 다즙성, 조직감 등의 특성이 이에 포함된다. 이 중 풍미는 수많은 전구물질에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에, 관련 정보를 제공하는 데 어려움이 존재한다(Jo et al., 2022). 이에 따라, 관능적 품질 특성 중 다즙성과 조직감은 비교적 객관적인 평가가 가능하며, 주요한 질적 품질 지표로 활용되고 있다(Jeong et al., 2024).

다즙성 및 조직감과 같은 관능적 품질 특성에 대한 정보를

*Corresponding author : Samooel Jung. Department of Animal Science and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea. Tel: +82-42-821-5774, Fax: +82-42-825-9754, E-mail: samooel@cnu.ac.kr

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

제공하기 위해서는 정량적인 품질 분석이 필요하다. 이를 위해, 다즙성 및 조직감과 관련된 지표인 가열 감량과 전단력 분석이 활용될 수 있다(Jeon et al., 2024; Jeong et al., 2024). 그러나 가열 감량 및 전단력 분석은 시료의 채취, 정형, 가열 등 일련의 파괴적 공정을 수반하기 때문에, 식육의 손실과 분석 소요 시간이 발생한다. 이에 따라, 식육의 손실을 최소화하고 품질 특성을 보다 빠르고 정확하게 확인하기 위한 비파괴적 측정 기법 개발에 대한 연구가 지속되고 있다(Cha et al., 2025; Jeong et al., 2025; Jo et al., 2022; Jo et al., 2025).

비파괴 품질 측정 기법 중 하나인 초분광 이미지 분석(hyperspectral imaging)은 1차원 분광 정보에 기반하여 2차원 공간 정보를 연속적으로 결합한 3차원 구조의 Hypercube 데이터를 제공한다(Jeong et al., 2025; Jo et al., 2025). 이를 통해, 식육의 이미지 및 식육의 구조 및 성분에 특이적으로 반응하는 분광 정보를 기반으로 이화학적 품질 특성을 동시에 분석할 수 있다는 장점이 있다(Barbin et al., 2013; Jeong et al., 2025; Jo et al., 2024). 다양한 연구에서 식육의 품질 측정 및 예측을 위해 초분광 이미지 분석을 이용하고 있다. 기존 연구에서 냉동 및 해동된 돈육 등심을 냉동 조건(온도 및 저장기간) 및 해동 감량에 따라 분류한 결과, 분류 정확도가 90% 이상으로 보고되었다(Jeong et al., 2025). 또한 Jo 등(2025)은 돈육 목심의 머리 반가시근을 대상으로 한 초분광 이미지 분석을 통해 가열 감량 수준(상, 중, 하)을 예측한 결과, 분류 정확도가 80% 이상임을 보고하였다. 따라서 초분광 이미지 분석을 통해 돈육 안심의 품질 특성 또한 분석이 가능할 것으로 판단되나, 현재까지 이에 대한 연구가 수행되지 않은 실정이다.

따라서 본 연구는 돈육 안심의 조직감 및 다즙성과 관련된 전단력, 가열 감량 및 pH 분석하고, 초분광 이미지 분석을 통해 전단력과 가열 감량의 예측 가능성을 평가하고자 수행되었다.

재료 및 방법

시료 준비

본 연구를 위해 서로 다른 도체에서 도축 후 24 h 시점에 정형된 돈육 안심을 각 20개씩 5회에 걸쳐, 총 100개의 안심을 지역 소재 정육점에서 구매하였다. 구매한 안심 시료는 ice box를 이용해 실험실로 운반하였으며, 도착 즉시 2℃의 냉장고에 저장하였다. 이후 안심 시료는 실온이 10℃ 이하로 유지되는 cold room에서 각 안심을 6 cm 두께로 3개씩 절단하여 총 300개의 안심 슬라이스를 확보하였다. 이 중 각 슬라이스는 다시 5 cm 및 1 cm 두께로 절단하였으며, 5 cm 부위는 초분광 이미지 분석, 가열 감량 및 전단력 측정에 사용하였고, 1 cm 부위는 pH 분석에 사용하였다.

pH 분석

돈육 안심 시료 1 g에 증류수 9 mL을 혼합한 후, 균질기(T25 basic, IKA, Staufen, Germany)를 사용하여 11,000 rpm으로 30초간 균질하였다. 균질액은 2,000×g에서 10분간 원심분리(1580R, LaboGene, Lillerød, Denmark)하였으며, 이후 상등액을 Whatman No.4 여과지(Whatman, Maidstone, UK)로 여과하였다. 최종 여과액의 pH는 pH측정기(SevenEasy, Mettler-Toledo, Schwerzenbach, Switzerland)를 이용하여 측정하였다. 분석에 앞서, 측정기는 pH 4 및 pH 7 완충용액으로 교정한 후 분석을 진행하였다.

가열 감량 분석

가열 감량 분석을 위해 시료 가열 전 무게를 측정한 뒤 안심 시료를 진공포장 하였다. 진공 포장된 시료는 90℃ 항온 수조에서 심부 온도가 75℃에 도달할 때까지 가열하였으며, 이때 수조 내 물의 양은 시료 무게의 10배로 조정하였다. 가열 후 시료는 실온(25℃)에서 30분간 냉각하였고, 포장지와 시료 표면의 수분을 제거하였다. 이후 가열 후 시료의 무게를 측정하고, 가열 전·후 무게 차이를 백분율로 계산하여 가열 감량으로 나타내었다.

전단력 분석

가열 감량 측정 이후 전단력 측정을 위해, 안심 시료를 근섬유 방향과 동일하게 전동 코어를 이용하여 직경 1.7 cm의 원통형으로 정형하였다. 정형된 시료는 전단력 분석을 위해 Warner-Bratzler shear force probe(HDP/BS)를 장착한 TA-XT2 Texture analyzer(Stable Micro Systems, Surrey, UK)를 사용하였으며, 프로브는 2.0 mm/s의 속도로 이동시켜 전단력을 측정하였다.

초분광 이미지 촬영

안심 시료의 표면 수분을 paper towel을 이용해 제거한 후 초분광 이미지 촬영을 진행하였다. 촬영은 초분광 카메라(ULTRIS X20 plus, Cubert Hyperspectral, Ulm, Germany)와 CUVIS 소프트웨어(Cubert Hyperspectral)를 이용하여 수행되었으며, 촬영 전 white 및 black calibrations을 실시하였다. Reflectance 모드에서 근적외선 영역(350-1,002 nm)의 파장 범위에서 총 164개의 밴드(band)가 촬영되었다. 그러나 350-402 nm의 영역대의 경우 심한 노이즈가 관찰되어 분석에서 제외하였고, 최종적으로 402-1,002 nm의 범위의 151개 밴드만을 품질 예측 분석에 활용하였다. 안심 시료의 단면 중앙 부분을 관심영역(region of interest, ROI)으로 설정하여 평균 스펙트럼 값을 추출하였으며, 해당 값은 이후 품질 예측 분석에 이용하였다.

분류 모델 설립

각 시료의 관심영역에서 추출한 151개의 밴드를 독립변수로 설정하고, 각 300개의 전단력 및 가열 감량 값을 오름차순으로 정렬한 후, 각각을 100개씩 세 그룹으로 구분하여 클래스 레이블을 부여하였다. 이후 각 클래스 내 샘플의 70%는 보정 세트 (Calibration set), 나머지 30%는 예측 세트(Prediction set)로 할당하였다. 잠재변수의 최적 수를 결정하기 위하여 5-fold 교차 검증(5-fold cross-validation)을 수행하여 PRESS(predicted residual error sum of squares)값을 산출하였으며, 가장 낮은 PRESS 값을 나타낸 잠재변수의 수를 최적 값으로 설정하였다. 이렇게 설정된 최적 잠재변수 값을 바탕으로 partial least squares discriminant analysis(PLS-DA) 분류 모델을 구축하였다. 분류 모델의 성능 평가는 보정 세트와 예측 세트 각각에 대한 정확도(correct classification rate%, CC%)를 산출하여 수행하였다.

분류 모델의 정확도를 향상시키기 위해 standard normalized variate(SNV) 처리 및 1차 미분(1st derivative) 전처리 방법이 적용되었다. 이후, 초분광 이미지의 각 픽셀에 대해 가장 높은 분류 정확도를 나타낸 PLS-DA 모델을 적용하여, 해당 픽셀이 속하는 클래스를 시각화함으로써 전단력 또는 가열 감량의 클래스를 나타내는 화학 지도(chemical map)를 제작하였다. 분류 모델의 구축과 화학 지도의 제작은 MATLAB R2022a 소프트웨어(The MathWorks, Natick, MA, USA)를 이용하여 수행되었다.

통계 분석

SAS 통계분석 프로그램(SAS 9.4, SAS Institute, Cary, NC, USA)을 사용하여 기초 통계량을 산출하였으며, Shapiro-Wilk 검정을 통해 데이터의 정규성 여부를 검토하였다. 모든 변수에서 정규성이 확인되어, 피어슨(Pearson) 상관관계 분석을 실시하였다. 상관관계의 강도 해석은 Schober 등(2018)의 기준에

따라 수행하였으며, 상관관계의 강도는 다음과 같이 분류하였다; 0.00-0.10은 무시 가능한 수준, 0.10-0.39는 약한 상관, 0.40-0.69는 중간 수준의 상관, 0.70-0.89는 강한 상관, 0.90-1.00는 매우 강한 상관으로 간주하였다.

결과 및 고찰

안심의 품질 특성 간 상관관계

연도 품질 특성과 밀접한 관련이 있는 전단력은 값이 클수록 식육을 절단하는 데 더 큰 힘이 필요함을 의미하며, 이는 치아가 식육을 관통하기 어려운 질긴 식감을 나타낸다. 본 연구에서 측정된 안심의 전단력은 35.60 N에서 111.82 N의 범위를 보여, 시료 간 연도 차이가 큰 것으로 확인되었다(Table 1). 안심의 전단력은 pH와 -0.19의 상관계수를 보여, 두 변수 간에 약한 음의 상관관계가 존재함을 확인할 수 있었다(Table 2). 돼지는 도축 후 근육 내 adenosine triphosphate(ATP) 항상성을 유지하기 위한 해당작용이 진행되며, 이 과정의 최종 산물로 젖산이 생성되어 근육의 pH가 저하된다(Jo et al., 2022). 또한, ATP가 수분해 과정에서 생성되는 수소 이온 역시 근육 pH 저하에 기여한다(Wang et al., 2022). 식육 pH의 저하는 근원섬유 단백질 간 반발력을 감소시키며, 그 결과 단백질의 밀도가 증가하여 전단력이 높아질 수 있다(Li et al., 2024, Purslow et al., 2008). 이러한 변화에 따라, 전단력과 pH 사이에 약한 음의 상관관계가 존재하는 것으로 판단된다.

식육의 가열 감량은 가열 중 근원섬유 단백질의 변성과 수축으로 인해 식육 내 수분이 외부로 용출되면서 증가하게 되며, 지방 함량이 높은 부위에서는 온도의 증가와 함께 용해된 지방도 수분과 함께 용출된다(Jo et al., 2022). 따라서 가열 감량이 증가할수록 식육의 다즙성은 감소하는 경향을 보인다(Jo et al., 2025). 안심의 가열 감량은 21.64%에서 38.40%의 범위로 나타

Table 1. Descriptive script of meat quality of pork tenderloins

	Mean	SD	Minimum	Maximum
pH	5.92	0.26	5.47	6.66
Shear force (N)	65.31	12.79	35.60	111.82
Cooking loss (%)	28.28	2.31	21.64	38.40

Table 2. Pearson's correlation of meat quality of pork tenderloins

	pH	Shear force (N)	Cooking loss (%)
Shear force (N)	-0.19***	1	
Cooking loss (%)	-0.65***	0.08	1

*** $p < 0.001$.

났다(Table 1). 품질 특성간 상관관계 분석 결과, 가열 감량과 pH간에는 -0.65의 상관 계수가 관찰되어 중간 강도의 음의 상관관계를 나타내었다(Table 2). 식육의 주요 근원섬유 단백질인 myosin과 actin의 등전점은 5.2–5.3이며, 식육의 pH가 등전점에서 멀어질수록 근원섬유 단백질간 반발력이 증가하여 보수력이 증가한다(Huff-Lonergan and Lonergan, 2005). 보수력이 증가할 경우, 가열 중 수분 용출이 줄어들어 가열 감량이 감소하기 때문에, 가열 감량과 pH 사이에 중간 강도의 음의 상관관계가 존재하는 것으로 판단된다(Aaslyng et al., 2003; Jo et al., 2023). 기존 연구에서도 돈육 삼겹살 등심에서 가열 감량과 pH 사이에 각각 중간강도 및 약한 강도의 음의 상관관계가 보고된 바 있다(Jo et al., 2022).

안심의 가열 감량과 전단력 사이에는 유의한 상관관계가 나타나지 않았다(Table 2). 일반적으로 식육의 가열 중 단백질의 과도한 변성은 조직 수축을 발생시켜 가열 감량과 함께 전단력을 증가시킬 수 있다. 그러나 식육의 가열 감량과 전단력 간의 관계는 다양한 연구에서 일관되지 않은 결과가 보고되고 있다. 기존 연구에서 동일 조건(75℃ 항온수조)에서 가열된 우육 등심에서 전단력과 가열 감량 사이에 유의한 상관관계가 없다고 보고하였다(Kim et al., 2013). 반면 닭 가슴육을 130℃, 150℃ 및 180℃에서 오븐 조리한 결과 조리 온도와 시간이 증가할수록 가열 감량과 전단력이 모두 증가하며, 두 변수 사이에 강한 정의 상관관계가 있음이 보고되었다(Barbanti and Pasquini, 2005). 최근 LeMaster 등(2024)은 돈육의 가열 온도가 상승함

에 따라 가열 감량은 지속적으로 증가하지만, 전단력은 55℃–60℃ 구간에서 증가 후, 60℃–70℃ 구간에서는 일정하게 유지되다가 70℃–80℃ 구간에서 다시 증가한다고 보고하였다. 이는 가열 온도 증가와 함께 myosin의 변성, collagen의 용해 및 actin의 변성이 순차적으로 일어나기 때문이며, 돈육 안심의 경우 등심과 비교하여 oxidative muscle fiber의 비율이 높아 열 변성에 대한 저항성이 높음을 보고하였다(LeMaster et al., 2024). 본 연구에서는 안심 시료를 심부 온도 기준 75℃로 가열 하였으며, 이로 인해 가열 감량은 증가하였으나 actin의 변성은 발생하지 않은 것으로 보인다. 이에 따라 단백질의 구조적 변화가 전단력에 영향을 미치지 않아 가열 감량과 전단력 사이에 상관관계가 나타나지 않은 것으로 생각된다.

안심의 품질 특성 분류 분석

안심의 전단력 및 가열 감량 값을 기준으로 범주화한 클래스에 대한 PLS-DA 분류 모델의 정확도 결과를 Table 3에 제시하였다. PLS-DA는 다변량 분류 기법으로, 차원 축소를 통해 독립 변수 간의 상관 관계에서 비롯되는 다중 공선성 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 분석 방법이다(Lee et al., 2018; Jeong et al., 2025). 전단력 값을 기준으로 클래스를 구분한 결과, 전단력이 낮은 그룹은 35.60–58.41 N, 중간 그룹은 58.59–70.59 N, 높은 그룹은 70.61–111.82 N의 범위로 분류되었다. 해당 클래스를 기반으로 구축한 PLS-DA 모델에서, 전처리를 적용하지 않은 경우 보정 세트와 예측 세트의 분류 정확도는 각

Table 3. Classification rate results of cooking loss (%) and shear force (N) of pork tenderloin using PLSR

		Shear force (N)	
		Calibration set	Prediction set
Pre-process	LV	CC%	CC%
–	18	76.19	47.78
SNV	13	65.71	54.44
SNV–1 st derivative	14	74.29	53.33
1 st derivative	13	73.81	47.78
		Cooking loss (%)	
		Calibration set	Prediction set
Pre-process	LV	CC%	CC%
–	19	70.00	51.11
SNV	16	67.62	52.22
SNV–1 st derivative	9	70.48	55.56
1 st derivative	15	70.48	55.56

PLSR, partial least square regression; LV, latent variables; CC%, correct classification rate (%); SNV, standard normal variate.

각 76.19%와 47.78%로 나타났다. 한편, SNV전처리를 적용한 모델에서는 보정 세트의 분류 정확도는 65.71%로 감소하였으나, 예측 세트에서는 54.44%로 상대적으로 예측력이 증가함이 나타났다. 또한, 1차 미분을 전처리에 적용한 모델에서는 보정 세트에서의 분류 정확도가 73.81%로 전처리를 하지 않은 모델 (76.19%)보다 낮은 결과를 보였으며, 예측 세트에서는 동일하게 47.78%의 정확도가 나타났다. 한편, SNV와 1차 미분을 조합한 전처리를 적용한 모델은 보정 세트에서의 정확도가 74.29%로 전처리 미적용 모델 대비 소폭 감소하였으나, 예측 세트에서는 53.33%로 향상된 정확도를 나타냈다. 이러한 결과는 복합 전처리 기법의 적용이 모델의 일반화 성능을 향상시킬 수 있음을 의미한다.

안심의 가열 감량값을 기준으로 클래스를 3그룹으로 분류하였다. 낮은 가열 감량 그룹은 21.64%-27.56%, 중간 그룹은 27.58%-29.25%, 높은 그룹은 29.31%-38.40%의 범위로 분류되었다. PLS-DA 모델을 통해 각 그룹의 분류 정확도를 평가한 결과, 전처리를 적용하지 않은 경우 보정 세트와 예측 세트에서 각각 70.00%와 51.11%의 정확도가 나타났다. SNV전처리를 적용한 모델에서는 보정 세트에서 67.62%, 예측 세트에서 52.22%로, 예측 성능이 소폭 향상되었으나 보정 성능은 다소 감소하였다. 반면 1차 미분만 적용한 모델에서는 보정 세트와 예측 세트에서 각각 70.48%와 55.56%의 정확도가 나타났으며, SNV와 1차 미분을 병행 적용한 모델 또한 동일한 결과를 보여 전처리를 하지 않은 모델보다 전반적으로 높은 분류 성능을 나타냈다.

SNV 전처리는 스펙트럼의 표준화와 중심화를 통해 빛의 산란 영향을 보정하는 방법이다(Jo et al., 2024). 전단력 및 가열 감량을 기준으로 한 분류 결과에서, SNV 전처리를 적용한 모델은 보정 세트에서 전처리 미적용 모델보다 낮은 분류 정확도를 보였다. 이는 SNV 처리 과정에서 종속 변수와 관련된 정보가 일부 감소하면서 예측 정확도가 저하될 수 있기 때문으로 생각된다(Cozzolino et al., 2023). 한편, 1차 미분은 각 샘플 간 스펙트럼 차이를 강조함으로써 모델의 분류 성능 향상에 기여할 수 있으나, 동시에 노이즈가 증폭되어 정확도 저하를 유발할 가능성도 있다(Jo et al., 2025). 본 연구 결과, 1차 미분을 적용한 전단력 분류 모델의 보정 세트에서 정확도가 감소하는 경향이 관찰되었다. 반면, SNV와 1차 미분을 병행하여 전처리한 경우, 가열 감량 및 전단력 클래스 분류에서 예측 세트의 정확도가 향상되었다. 이는 두 전처리 기법의 병합을 통해 스펙트럼 데이터의 노이즈를 효과적으로 제거하고, 클래스 분류에 유의한 정보를 강화한 결과로 사료된다. 이러한 결과는 Jeong 등(2025)의 연구와도 일치하며, 해당 연구에서도 SNV와 1차 미분 전처리를 병행한 모델이 해동 손실 함량에 따라 높은 분류 정확도를 보인 것으로 보고되었다.

한편, 본 연구에서 구축된 안심의 전단력 및 가열 감량 분류 모델의 정확도는 전반적으로 낮은 수준을 보였다. 이는 전단력과 가열 감량이 다양한 이화학적 요인의 복합적인 영향을 받는 특성에 기인한 것으로 보인다. 전단력은 주로 결체조직 함량, 사후강직 정도, 지방 함량등에 주로 영향을 받으며, 가열 감량은 식육의 보수력, 근원섬유 단백질 변성, 산화 정도 등과 밀접한 관련이 있다. 초분광 이미지 분석에서는 파장 영역대에 따라 탐지 가능한 물질 및 화학 정보가 달라진다. 본 연구에서는 402-1,002 nm의 가시광선 및 근적외선 영역대를 이용하였다. 가시광선 및 근적외선 영역대는 단파적외선(shortwave Infrared, 900-2,500 nm) 영역대와 비교하여 측정 시 주위 환경의 영향을 적게 받는 장점이 있으며, 이 영역은 주로 780 nm부근의 O-H band대역 및 육색소와 관련된 정보를 제공하는 것으로 알려져 있다(Kamruzzaman et al., 2016; Monroy et al., 2010). 그러나 전단력과 가열 감량에 영향을 미치는 성분인 지방 및 수분 함량은 본 연구에서 사용된 파장 범위에서는 충분히 반영되지 않으며, 이들은 단파적외선 영역에서 강한 흡수 특성을 나타낸다(Jo et al., 2024). 따라서 식육의 전단력 및 가열 감량 분류 정확도를 높이기 위해서는, 단파적외선 영역을 포함하는 초분광 이미지 분석 기술의 적용이 필요할 것으로 사료된다.

안심의 품질 특성 시각화

초분광 이미지 분석의 주요 장점은 이화학적 분석 결과를 식육 이미지와 대응시켜 이화학적 특성을 시각적으로 확인할 수 있다는 점이다. Fig. 1.에서 전단력 및 가열 감량을 대상으로 PLS-DA를 통해 가장 높은 분류 정확도를 보인 모델의 결과를 이미지의 각 픽셀에 대응시켜 시각화하였다. 각 클래스

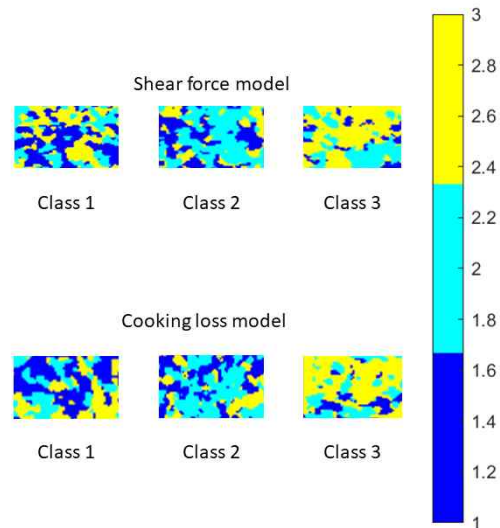


Fig. 1. The distribution maps for the classes of shear force (N) and cooking loss (%).

를 파란색(클래스 1), 하늘색(클래스 2), 노란색(클래스 3)으로 구분하여, 각 샘플 이미지 내에서 어느 클래스의 분포가 지배적인지를 시각적으로 확인할 수 있도록 하였다.

이러한 시각화 기법을 통해 관능적 품질 특성을 직관적이고 신속하게 파악할 수 있는 장점이 있다. 그러나 전단력 및 가열 감량의 분류 모델의 예측 세트 정확도는 각각 53.33% 및 55.56%로 낮게 나타났다. 그 결과, 클래스 1, 2, 3중 하나의 클래스가 이미지에서 우세하게 나타남에도 불구하고, 다른 클래스의 색상 분포 역시 광범위하게 존재함을 확인할 수 있었다.

향후 분류 모델의 예측 정확도가 향상된다면, 시각화 이미지 내에서 각 클래스의 대표성이 보다 명확하게 나타날 것으로 기대된다. 특히, 전단력 및 가열 감량에 영향을 미치는 주요 성분들이 주로 흡수되는 단파적외선 영역의 파장을 포함한 모델을 적용할 경우, 분류 정확도와 함께 시각화 정확도 또한 향상될 가능성이 높다.

결론

본 연구는 돈육 안심의 관능적 품질 특성과 밀접한 관련이 있는 전단력과 가열 감량을 초분광 이미지 분석 기법을 통해 비파괴적으로 예측할 수 있는 가능성을 평가하고자 수행되었다. 이를 위해 전단력 및 가열 감량 수치를 기준으로 각각 3개의 클래스로 분류하고, 해당 클래스 분류 정확도를 초분광 이미지 기반 PLS-DA 모델을 통해 분석하였다. 분석 결과, SNV와 1차 미분 전처리 병용 처리에도 불구하고 예측 세트에서의 분류 정확도는 약 50% 수준이었으며, 현재 사용된 가시광선-근적외선(402–1,002 nm) 영역의 초분광 이미지 분석만으로 전단력 및 가열 감량을 정밀하게 예측하는 데 한계가 있는 것으로 나타났다. 따라서 추후 전단력 및 가열 감량과 관련된 지방 및 수분 함량 등 식육 내 주요 성분을 명확하게 반영할 수 있는 단파적외선(900–2,500 nm) 영역의 초분광 이미지 분석 기법을 활용한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Conflicts of Interest

The authors declare no potential conflict of interest.

Acknowledgments

This study was supported by the Cooperative Research Program for Agriculture, Science, and Technology Development (Project No. RS-2021-RD010001) of the Rural Development Administration of the Korea.

Ethics Approval

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

Author Contributions

Conceptualization: Jung S.

Data curation: Jeong SKC.

Formal analysis: Jeong SKC, Kim S, Han S, Jeon H, Woo M.

Writing - original draft: Jeong SKC.

Writing - review & editing: Jeong SKC, Kim S, Han S, Jeon H, Woo M, Jung S.

Author Information

Seul-Ki-Chan Jeong

(Doctor's Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0000-0002-2163-8340>

Soeun Kim (Master's Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0008-5794-0198>

Seokhee Han (Master's Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0006-0816-3471>

Hayeon Jeon (Doctor's Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0006-3741-7696>

Minkyung Woo (Master's Student, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0009-0007-5885-8340>

Samooel Jung (Professor, Chungnam National University)

<https://orcid.org/0000-0002-8116-188X>

References

- Aaslyng MD, Bejerholm C, Ertbjerg P, Bertram HC, Andersen HJ. 2003. Cooking loss and juiciness of pork in relation to raw meat quality and cooking procedure. *Food Qual Prefer* 14: 277–288.
- Barbanti D, Pasquini M. 2005. Influence of cooking conditions on cooking loss and tenderness of raw and marinated chicken breast meat. *LWT-Food Sci Technol* 38:895–901.
- Barbin DF, ElMasry G, Sun DW, Allen P, Morsy N. 2013. Non-destructive assessment of microbial contamination in porcine meat using NIR hyperspectral imaging. *Innov Food Sci Emerg Technol* 17:180–191.
- Cha JY, Kim YJ, Kim JH, Park MK, Jung S, Choi YS. 2005. Study on structural analysis and physicochemical properties of meat using hyperspectral image analysis. *Food Life* 2025:15–22.
- Cho H, Kim HY. 2023. Changes in physicochemical characteristics of pork loin, beef loin and chicken breast with various wet aging periods. *Food Life* 2023:19–27.
- Cozzolino D, Williams PJ, Hoffman LC. 2023. An overview of pre-processing methods available for hyperspectral imag-

- ing applications. *Microchem J* 193:109129.
- Huff-Loneragan E, Lonergan SM. 2005. Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes. *Meat Sci* 71:194-204.
- Jeon H, Jeong SKC, Lee S, Kim D, Kim HB, Bae IS, Kim Y, Seong PN, Jung S, Jo K. 2024. Correlation of electrical conductivity and color with water loss and shear force of pork loin. *Korean J Agric Sci* 51:307-314.
- Jeong SKC, Jo K, Lee S, Jeon H, Choi YS, Jung S. 2025. Classification of frozen-thawed pork loins based on the freezing conditions and thawing losses using the hyperspectral imaging system. *Meat Sci* 221:109716.
- Jeong SKC, Jo K, Lee S, Jeon H, Kim S, Han S, Woo M, Kim HB, Seong PN, Jung S. 2024. Relationship between the pH of semispinalis capitis muscle and the quality properties of pork shoulder butt and belly slices. *Food Chem X* 23:101704.
- Jo K, Lee S, Jeong HG, Lee DH, Kim HB, Seol KH, Kang S, Jung S. 2022. Prediction of cooking loss of pork belly using quality properties of pork loin. *Meat Sci* 194:108957.
- Jo K, Lee S, Jeong HG, Lee DH, Yoon S, Chung Y, Jung S. 2023. Utilization of electrical conductivity to improve prediction accuracy of cooking loss of pork loin. *Food Sci Anim Resour* 43:113-123.
- Jo K, Lee S, Jeong SKC, Kim HB, Seong PN, Jung S, Lee DH. 2025. Cooking loss estimation of *Semispinalis capitis* muscle of pork butt using a deep neural network on hyperspectral data. *Meat Sci* 222:109754.
- Jo K, Lee S, Lee, DH, Jeon H, Jung S. 2024. Hyperspectral imaging-based assessment of fresh meat quality: Progress and applications. *Microchem J* 197:109785.
- Kamruzzaman, M, Makino Y, Oshita S. 2016. Online monitoring of red meat color using hyperspectral imaging. *Meat Sci* 116:110-117.
- Kim BK, Park CE, Lee EJ, Kim YS, Kim BS, Kim JC. 2013. Effect of quality grade on the physicochemical and sensory properties of Hanwoo. *Korean J Food Sci Anim Resour* 33:287-293.
- Kim S, Choi J, Kim ES, Keum GB, Doo H, Kwak J, Ryu S, Choi Y, Kang J, Kim H, Chae Y, Lee Y, Kim D, Seol KH, Kang SM, Kim Y, Seong PN, Bae IS, Cho S, Kwon HJ, Jung S, Lee Y, Kim HB. 2024. Assessing the relationship between muscle-to-fat ratio in pork belly and boston butt using magnetic resonance imaging. *Korean J Agric Sci* 51:187-192.
- Kim S, Choi J, Kim ES, Keum GB, Doo H, Kwak J, Ryu S, Choi Y, Pandey S, Lee NR, Jang J, Lee Y, Kim D, Seol KH, Kang SM, Bae IS, Cho SH, Kwon HJ, Jung S, Lee Y, Kim HB. 2023. Evaluation of the correlation between the muscle fat ratio of pork belly and pork shoulder butt using computed tomography scan. *Korean J Agric Sci* 50:809-815.
- Lee LC, Liong CY, Jemain AA. 2018. Partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) for classification of high-dimensional (HD) data: A review of contemporary practice strategies and knowledge gaps. *Analyst* 143:3526-3539.
- LeMaster MN, Ha M, Dunshea FR, Chaunhan S, D'Souza D, Warner RD. 2024. Impact of cooking temperature on pork longissimus, and muscle fibre type, on quality traits and protein denaturation of four pork muscles. *Meat Sci* 209:109395.
- Li Y, Wang H, Yang Z, Wang X, Wang W, Hui T. 2024. Rapid non-destructive detection technology in the field of meat tenderness: A review. *Foods* 13:1512.
- Monroy M, Prasher S, Ngadi MO, Wang N, Karimi Y. 2010. Pork meat quality classification using Visible/Near-Infrared spectroscopic data. *Biosyst Eng* 107:271-276.
- Purslow PP, Mandell IB, Widowski TM, Brown J, deLange CFM, Robinson JAB, Squires EJ, Cha MC, VanderVoort, G. 2008. Modelling quality variations in commercial Ontario pork production. *Meat Sci* 80:123-131.
- Schober P, Boer C, Schwarte LA. 2018. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesth Analg* 126:1763-1768.
- Wang C, Matarneh SK, Gerrard D, Tan J. 2022. Contributions of energy pathways to ATP production and pH variations in postmortem muscles. *Meat Sci* 189:108828.