

인체 소화기관 생체 외 모델을 이용한 한우 부분육의 소화율 평가

조유나¹ · 황효정² · Michelle Yoo³ · 이다연¹ · 정태환² · 한경식^{1,2}

¹삼육대학교 식품생명산업학과

²삼육대학교 바이오소재연구소

³뉴질랜드 AUT 대학 식품공학과

Estimation of Digestibility of Hanwoo Cuts Using *In Vitro* Physicochemical Gastroduodenal System

Yu-Na Jo¹, Hyo-Jeong Hwang², Michelle Yoo³, Da-Eon Lee¹,
Tae-Hwan Jung², and Kyoung-Sik Han^{1,2}

¹Department of Food Science and Biotechnology, Graduate School and

²Biomaterials Research Institute, Sahmyook University

³School of Sciences, Auckland University of Technology, New Zealand

ABSTRACT This study was performed to evaluate the digestibility of different Hanwoo cuts (tenderloin, sirloin, and brisket and flank) using an *in vitro* physicochemical gastroduodenal system (IPGS). The IPGS was composed of three sequential compartments (esophagus, stomach, and duodenum) simulating the conditions of the human gastrointestinal tract (GIT) with respect to anatomy, function, and physiology. Forty grams of boiled Hanwoo cuts was ingested into the IPGS, after which chyme or digesta was collected every 30 min for 4 h of stomach simulation and every 60 min for 4 h of duodenal stimulation, respectively. The pH profile in the IPGS throughout the digestion simulation was similar to that of human GIT. The degree of protein hydrolysis of the digested samples increased with passage of time, and the surface of each sample became smoother when observed by a scanning electron microscope. Total contents of indispensable and dispensable amino acids released during the digestion simulation were the highest for the brisket and flank cut. The IPGS can be used to elucidate digestion of various Hanwoo beef and products in the human GIT.

Key words: *in vitro* physicochemical gastroduodenal system, digestibility, Hanwoo cut, proteolysis, amino acid profile

서 론

국내 식육 산업은 국민 1인당 쇠고기 소비량의 점진적인 증가에도 불구하고 2017년도 한우 도축 두수는 742,312두로 2013년과 비교하여 약 22.8% 감소하였다(1). 이러한 현상은 미국, 캐나다, 호주, 뉴질랜드 등 여러 나라를 통해 수입된 쇠고기 물량의 비중이 증가한 것을 한 원인으로 찾을 수 있다(2). 최근 수입 쇠고기와 비교하여 한우의 우수성을 입증하고 시장 경쟁력을 향상시키고자 다양한 연구가 수행 중이며, 서양의 육우 품종과 비교했을 때 한우는 상강도를 포함한 육질이 우수하고 쇠고기의 풍미와 관련 있는 oleic acid의 함량이 높다고 보고되었다(3-5).

의학기술 발달과 경제 성장으로 인해 평균 수명이 높아지

면서 우리나라 65세 이상 노인 인구는 2018년 14.5%에서 2026년 20.8%로 증가하여 초고령 사회로 빠르게 진행될 전망이다(6). 실버 세대에게 식품은 맛을 넘어 건강과 관련한 식품 니즈(needs)의 욕구가 더 증가하고 있다(7). 한우 고기의 품질 연구와 더불어 노화로 인한 신체기능의 저하와 치아의 부실은 음식물 저작에 영향을 미쳐 소화불량이나 영양불량을 초래하게 되는데, 이로 인해 발생하는 영양소 불균형 섭취를 예방할 수 있는 다양한 연구 결과가 필요한 시점이다(8). 이러한 관점에서 볼 때 양질의 영양소를 공급할 수 있는 한우의 품질에 관한 연구와 수입 쇠고기와 비교를 통한 한우의 우수성을 증명하는 연구는 여러 분야에서 꾸준히 수행되어 왔지만 한우의 소화율과 관련된 연구는 다소 미비하다(9,10).

식품의 영양학적 가치를 분석하기 위한 방법들 중에서 가장 중요한 연구 분야는 영양소 및 소화율을 조사하는 것이며 *in vitro* 소화 모델을 이용하여 다양한 연구들이 수행되었으나 기존에 사용되었던 *in vitro* 소화 모델은 각 소화기관의 크기, 신축성 및 연동운동 등이 고려되지 않아 실제 인체

Received 26 July 2018; Accepted 18 September 2018

Corresponding author: Kyoung-Sik Han, Department of Food Science and Biotechnology, Graduate School, Sahmyook University, Seoul 01795, Korea

E-mail: kshan@syu.ac.kr, Phone: +82-2-3399-1765

내의 소화 과정을 정확하게 구현하지 못하였다(11,12).

본 연구에서 사용된 인체 소화기관 생체 외 모델인 *in vitro* physicochemical gastroduodenal system(IPGS)은 국내외적으로 유례없는 독보적인 기술로 개발된 시스템으로써 인체의 식도(esophagus), 위(stomach), 십이지장(duodenum)과 유사한 크기 및 모양은 물론 신축성을 부여한 *in vitro* 기법이다. IPGS는 인체 소화 과정을 매우 유사하게 구현할 수 있는 모델로서 기존 *in vitro* 소화 모델의 단점들과 사람 및 동물을 대상으로 한 *in vivo* 실험이 초래하는 고비용, 노동력 및 연구 윤리와 관련된 한계점들을 극복할 수 있어 식품 소화율과 관련된 연구의 효율성을 증가시켜 줄 수 있다.

따라서 본 연구는 우리나라 사람들이 선호하는 한우 부분육 세 부위를 선정하고 인체 소화기관 생체 외 모델을 사용해 단백질 소화 양상을 조사하여 생체 이용률을 조사하고자 하였다.

재료 및 방법

시료 및 인공소화액

한우 부분육은 시중 대형 유통점에서 1+ 육질 등급으로 판정받은 안심(tenderloin), 등심(sirloin), 양지(brisket and flank)를 구입하여 -20°C 에 냉동보관하면서 사용하였다. 소화 실험 직전에 각각의 시료 40 g을 비닐에 담아 15분 동안 끓는 물에 삶은 후 저작 효과를 위해 가정용 핸드 믹서기로 15초 동안 분쇄하였다. 각각의 소화기관에서 분비되는 인공소화액은 Van Loo-Bouwman 등(13)의 방법에 따라 simulated salivary fluid[SSF: pH 7, 1.41 mM KCl, 3.7 mM KH_2PO_4 , 13.6 mM NaHCO_3 , 0.15 mM $\text{MgCl}_2(\text{H}_2\text{O})_6$, 0.06 mM $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$], simulated gastric fluid(SGF: pH 1.5, 2.2 mM KCl, 5 mM NaCl, 0.22 mM CaCl_2 , 0.15 N HCl) 및 simulated intestine fluid[SIF: pH 7.5, 6.8 mM KCl, 0.8 mM KH_2PO_4 , 85 mM NaHCO_3 , 38.4 mM NaCl, 0.33 mM $\text{MgCl}_2(\text{H}_2\text{O})_6$]를 제조하여 사용하였다.

In vitro physicochemical gastroduodenal system

인체의 소화기관과 유사한 IPGS 모델은 Yoo(14)와 Jeon 등(15)의 방법에 따라 인공 위 모델을 제작하고 새롭게 고안된 십이지장 모델을 부착하여 제작하였다(Fig. 1). IPGS 모델은 인체 소화 장기와 유사한 크기, 신축성과 탄력성이 있는 platinum cure silicon rubber를 사용하여 제작하였고 수백 개의 Tygon Microbore tubing을 위와 십이지장 벽에 심은 다음 peristaltic pump를 사용해 인체 분비 시스템을 구현하였다(Fig. 1). 또한, 외부 자동 수축장치를 통해 분당 3회씩 인공 위와 십이지장에 연동 작용을 유도하여 인체 소화 과정 중 발생하는 연동 운동과 유사하도록 재현하였다.

인큐베이터 안에 장착한 IPGS와 각각의 인공소화액들(SSF, SGF, SIF)은 소화 실험 전 37°C 로 예열시켰고 균질화된 한우 부분육(40 g)에 α -amylase(75 kU/L)를 넣은 SSF를 섞어 15분 동안 37°C 로 유지시킨 후 시료로 사용하였다. 시료 투입 전 뇌상 위액 분비를 모방하기 위해 10분 동안 1.5 mL/min 속도로 인공 위 안에 SGF를 분비시킨 다음 예열된 SSF 혼합 시료를 인공 위에 첨가하였다. 그다음 위액 소화효소인 pepsin(500 kU/L)과 lipase(500 kU/L)를 넣은 SGF를 90분 동안 3.5 mL/min 속도로 연동펌프를 이용해 분비시켰으며 이후 150분 동안 2 mL/min 속도로 분비시키며 소화 과정을 수행하였다.

그 과정 동안 2% bile이 첨가된 SIF 용액을 인공 위에 시료 투입 후 30분, 60분, 120분, 180분에 십이지장 모형에 60 mL씩 먼저 주입하였다. 총 4시간 동안 인공 위에서의 소화과정이 완료된 다음 1% bile과 pancreatin(25 U/mg)을 넣은 SIF를 240분 동안 0.9 mL/min 속도로 인공 위의 소화물과 함께 인공 십이지장에 주입하며 십이지장 내 소화 과정을 진행하였다.

위 소화 과정에서는 매 30분 동안 소화액 샘플(10 mL)을 채취하였으며 십이지장 소화 과정에서는 1시간마다 동일량의 소화액 시료를 채취해 -80°C 에 보관한 다음 분석하였다.

pH 및 단백질 가수분해도 측정

한우 부분육을 IPGS에 투입 후 위 소화물의 pH는 30분

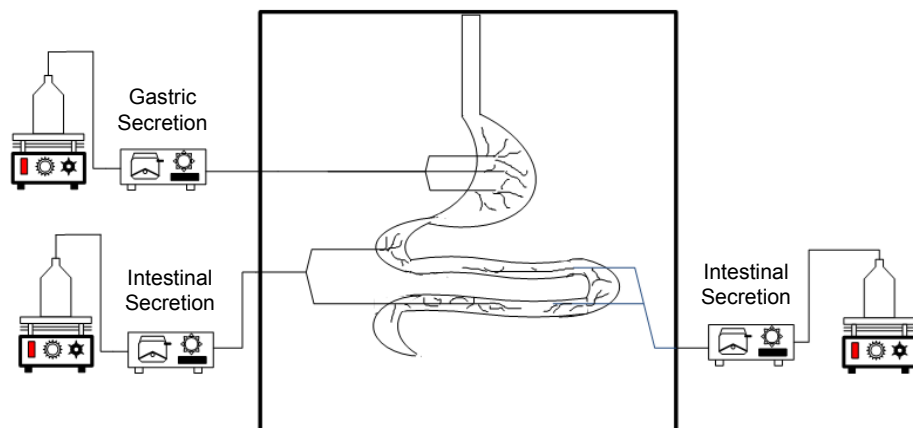


Fig. 1. A schematic diagram of the *in vitro* physicochemical gastroduodenal system.

간격으로, 십이지장 소화물의 pH는 60분 간격으로 pH 미터(OHAUS, Seoul, Korea)를 이용하여 4반복 측정하였다. 시료의 단백질 가수분해율은 dithiothreitol(DTT)에 의해 생성되는 아미노기와 *o*-phthalaldehyde(OPA) 간의 발색 반응을 이용하여 조사하였다(16). OPA 160 mg을 에탄올에 녹여 176 mg의 DTT를 추가한 후 disodium tetraborate 7.62 g과 sodium dodecyl sulfate 200 mg이 용해된 증류수와 혼합하여 OPA reagent를 제조하였다. OPA reagent 3 mL와 스탠다드 및 시료 용액 300 μ L를 각각 5초간 혼합하고, 2분 동안 상온에서 정치시킨 후 340 nm에서 흡광도를 측정하였다. 스탠다드 용액은 serine 50 mg을 500 mL의 증류수에 용해시켜 사용하였고 가수분해도는 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{Serine-NH}_2 = (\text{OD}_{\text{sample}} - \text{OD}_{\text{blank}}) / (\text{OD}_{\text{standard}} - \text{OD}_{\text{blank}}) \times 0.9516 \text{ meqv/L} \times 0.1 \times 100 / X \times P$$

X: sample (g)

P: protein concentration (%)

$$\text{가수분해도}(\%) = [(\text{serine-NH}_2 - \beta) / (\alpha \text{ meqv/g protein})] / 7.6 \times 100\%$$

$\beta = 0.4$

$\alpha \text{ meqv} = 1$

아미노산 조성 분석

아미노산 조성 분석을 위해 소화 실험 전 삶은 고기 시료 1 mg과 소화 시작 후 4시간 및 8시간에 채취한 시료의 상등액을 0.45 μ m filter로 10K amino con tube에 여과시킨 후 100 mL를 취한 다음 PICO-Tag 방법을 이용하여 가수분해 및 PITC labeling을 실시하였다. PITC labeling 된 시료를 200 mL의 buffer에 녹인 후 10 μ L을 취하여 Waters 510 HPLC(Waters Co., Milford, MA, USA)에 주입하였다. Column은 Waters Pico-tag column(3.9 \times 300 mm, 4.0 μ m, Waters Co.)을 사용하였고, 유속은 1 mL/h로 조정하였으며, Waters 2487 UV detector(Waters Co.)를 이용하여 254 nm에서 흡광도를 측정하였다. 이동상 용매 A와 B의 조성은 각각 140 mM sodium acetate(in 6% acetonitrile), 60% acetonitrile(in HPLC-grade water)이며 이동상 용매의 농도는 시료 주입 후 9분간 용매 B의 농도를 14%로 유지한 후 용매 B의 농도를 12초 동안 0.5%/s, 8.3분 동안 3.13%/min, 12초 동안 4.5%/s씩 증가시켰다.

Scanning electron microscope(SEM)

한우 부분육 세 부위(안심, 등심, 양지)의 소화시간별 분해 양상을 조사하고자 SEM을 이용하여 표면분석 하였다. 인공 위 모형 안에서 pepsin과 lipase가 함유된 SGF에 의해 240분 동안 소화시킨 시료 일부를 채취하였고 인공 십이지장 모형 안에서 bile과 pancreatin이 함유된 SIF에 의해 240분 동안 더 소화시킨 시료를 채취하였다. 채취한 시료를 50

°C 배양기에서 1차 건조한 다음 dry oven에서 120°C로 overnight 시킨 후 시료를 carbon stub에 고정하여 도금하고 SEM(SU-70, Hitachi, Tokyo, Japan)을 이용하여 가속전압 0.8 kV, 750배율로 시료의 표면을 관찰하였다.

통계처리

실험에서 얻은 데이터는 SAS software ver. 9.4(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 분산분석과 Duncan 다중비교법으로 분석하였다.

결과 및 고찰

pH 및 단백질 가수분해도

소화시간별 한우 부분육의 pH 변화를 분석한 결과는 Fig. 2와 같다. 소화물의 pH 측정은 생체 외 소화 모델의 유효성 검증 차원에서 중요한 요인으로 간주되며 인공 소화액의 효소 작용에 중요한 영향을 미친다. 인공 위액인 SGF의 pH는 1.5이지만 시료가 첨가된 다음 약 30분이 경과한 후 각 소화물의 pH는 3.37~4.15로 급격히 증가하였다. 이는 최초 부분육 시료의 완충 작용에 의한 것으로 이후 위액이 꾸준히 분비되면서 고기 소화물의 pH는 점차 낮아져 위의 소화가 끝나는 4시간 이후에는 약 pH 2.5 이하로 감소하였으며 이러한 경향은 Jeon 등(15)의 보고와 유사하였다. 그다음 소화물이 십이지장을 통과하면서 SIF(pH 7.5)의 영향으로 pH가 점차 상승하였고 8시간이 경과된 이후에는 pH 7.5에 가까운 수치를 보였으며 이러한 pH 변화는 인체 소화기관에서 관찰되는 일반적인 pH 변화와 유사하다.

생체 외 모델을 이용하여 인체 내 단백질 소화과정을 조사한 연구들이 있었으나 기존의 연구들은 유리로 제작된 기구들을 사용하거나(17,18) 항온수조 내에서 자석 교반 등을 이용하여 수행된 연구들로(19,20) 실제 인체 소화 기관과 유사한 조건을 구현하지 못한 한계가 있었다. 반면 본 연구에서 개발된 IPGS 모델은 인체 소화 기관의 크기, 신축성, 탄력성, 소화액 분비 방식 등을 고려해 제작되었고 peristaltic pump를 이용한 소화액 분비를 통해 인체 소화과정

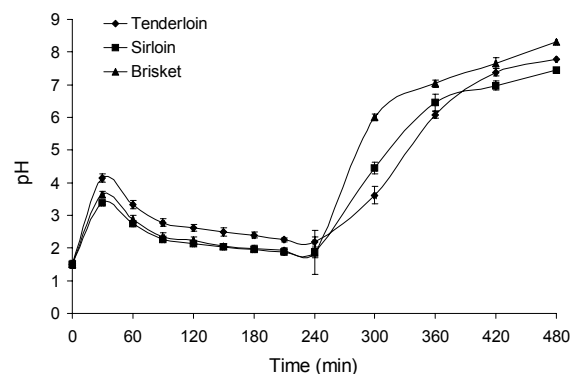


Fig. 2. The pH profile of chymes and digesta of digested Hanwo cuts over the 8 h digestion period.

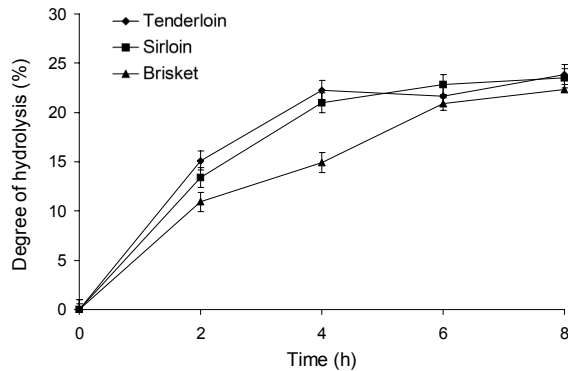


Fig. 3. Degree of protein hydrolysis of digested Hanwoo cuts over the 8 h digestion by OPA method.

시스템을 구축했기 때문에 인체 소화 과정과 매우 유사한 과정을 보여준다고 판단된다.

OPA 방법을 이용하여 단백질 가수분해도를 분석한 결과, 소화 시간이 경과됨에 따라 각 부분육 소화물 내 단백질 가수분해도가 점차 증가하였다(Fig. 3). 등심과 안심의 경우 소화 시간 4시간 이후에는 완전한 가수분해도 양상을 보였으나, 양지의 경우 다른 부분육에 비해 가수분해 양상이 다소 지연되어 8시간까지 분해 양상이 꾸준히 진행되는 경향을 보였다.

아미노산 조성

한우 부분육의 소화 단계별 아미노산 조성 결과는 Table 1, 2, 3과 같다. 소화 전 단계의 한우 세 부위 간의 필수 아미노산과 비필수 아미노산의 함량은 양지 부위가 유의적으로

($P<0.001$) 가장 높게 나타난 반면에 등심 부위에서 가장 낮은 수치를 보였다($P<0.001$). 모든 부위에서 필수 아미노산의 경우 상대적으로 threonine 함량이 높은 수준을 보였고 비필수 아미노산의 경우 glutamate 함량이 대체로 높은 수치를 보였다(Table 1). 소화 전 양지 부위는 다른 부분육과 비교할 때 필수아미노산 중 valine, methionine, isoleucine, tryptophan 등이 유의적으로 높게 함유되어 있었다($P<0.05$). 이 중 valine과 isoleucine은 분지사슬아미노산(BCAA)에 속하며 저알부민혈증과 인슐린 저항성을 개선시킬(21,22) 뿐만 아니라 회복기 환자들의 단백질 합성을 증진시킬 수 있다(23). 또한, methionine은 세포의 성장 및 유지를 돕고(24), tryptophan은 우울증 등에 효과가 있는 세로토닌의 생성과 관련이 있어(25) 양지 부위는 등심 및 안심 부위와 비교하여 양질의 아미노산을 공급할 수 있음을 확인하였다.

4시간 동안 위 소화 단계를 거친 시료의 유리아미노산 분석 결과는 Table 2와 같다. 총 필수아미노산의 함량은 등심과 양지 부위가 안심보다 유의적으로($P<0.001$) 높았으며 비필수 아미노산 함량의 경우 안심과 양지 부위가 등심보다 높았다($P<0.001$). 모든 부위에서 유리되는 필수아미노산 중 phenylalanine 함량이 가장 높은 수준을 보인 반면에 비필수 아미노산의 경우 arginine의 함량이 높았다. 또한 8시간 후 십이지장 단계까지 소화된 시료의 유리 필수아미노산 함량은 양지 부위에서 유의적으로($P<0.001$) 가장 높았고, 안심 부위가 가장 낮았으며 이러한 경향은 비필수 아미노산 함량에서도 동일하게 나타났다(Table 3). 모든 부위에 필수 아미노산 중 lysine 함량이 가장 높은 수준으로 유리되었으

Table 1. Indispensable and dispensable general amino acid content (mg/100 mg) of Hanwoo cuts before digestion

Amino acid		Tenderloin	Sirloin	Brisket and flank	P-value
Indispensable	His	1.95±0.53 ^{ab1)2)}	1.33±0.02 ^b	2.62±0.37 ^a	0.0159
	Thr	3.40±1.06 ^{ab}	2.28±0.02 ^b	4.17±0.95 ^a	0.0767
	Val	2.02±0.24 ^b	1.11±0.06 ^c	3.06±0.48 ^a	0.0008
	Met	1.28±0.17 ^b	0.73±0.04 ^c	1.90±0.22 ^a	0.0003
	Ile	1.53±0.38 ^b	0.81±0.09 ^b	2.56±0.70 ^a	0.0102
	Leu	2.45±0.77 ^{ab}	1.15±0.13 ^b	4.24±1.40 ^a	0.0182
	Phe	1.79±0.58 ^{ab}	1.31±0.19 ^b	2.25±0.21 ^a	0.0589
	Lys	1.24±0.76 ^{ab}	0.42±0.08 ^b	2.75±1.75 ^a	0.0998
	Trp	0.16±0.02 ^b	0.18±0.07 ^b	0.36±0.10 ^a	0.0281
Total		15.82±2.40 ^b	9.31±0.37 ^c	23.91±3.37 ^a	0.0009
Dispensable	Asp	3.80±0.36 ^b	1.72±0.16 ^c	6.47±1.52 ^a	0.0020
	Glu	5.77±0.55 ^b	2.49±0.32 ^c	9.93±2.37 ^a	0.0020
	Ser	2.29±0.35 ^b	1.26±0.07 ^c	3.04±0.21 ^a	0.0003
	Gly	3.33±1.25 ^a	2.16±0.15 ^a	3.61±1.20 ^a	0.2519
	Arg	3.04±0.41 ^b	1.54±0.06 ^c	4.01±0.29 ^a	0.0001
	Ala	2.34±0.18 ^b	1.08±0.08 ^c	3.75±0.82 ^a	0.0016
	Pro	3.16±2.06 ^a	2.69±0.84 ^a	3.20±1.05 ^a	0.8893
	Tyr	2.08±0.75 ^{ab}	1.58±0.16 ^b	2.63±0.34 ^a	0.0957
	Cys2	0.73±0.12 ^a	0.70±0.10 ^a	0.31±0.05 ^b	0.0027
Total		26.54±4.09 ^b	15.22±0.49 ^c	36.94±2.53 ^a	0.0002

¹⁾ All values are means±SD (n=3).

²⁾ Means in a row with superscripts without a common letter differ.

Table 2. Indispensable and dispensable free amino acid content (mg/100 mL) of digested Hanwoo cuts over 4 h digestion

Amino acid		Tenderloin	Sirloin	Brisket and flank	P-value
Indispensable	His	1.20±0.03 ⁽¹⁾²⁾	1.38±0.11 ^b	1.61±0.03 ^a	0.0011
	Thr	2.32±0.03 ^b	1.97±0.28 ^b	2.83±0.15 ^a	0.0034
	Val	1.88±0.05 ^b	2.28±0.02 ^{ab}	2.62±0.38 ^a	0.0180
	Met	3.28±0.13 ^c	5.04±0.06 ^a	4.57±0.28 ^b	<0.0001
	Ile	1.37±0.11 ^b	1.75±0.00 ^a	1.63±0.10 ^a	0.0055
	Leu	4.31±0.00 ^c	5.70±0.01 ^a	5.25±0.36 ^b	0.0005
	Phe	5.90±0.09 ^c	7.87±0.07 ^a	6.70±0.49 ^b	0.0005
	Lys	2.73±0.09 ^a	2.68±0.03 ^a	2.81±0.23 ^a	0.5206
	Trp	1.37±0.05 ^c	2.17±0.03 ^a	1.62±0.11 ^b	<0.0001
Total		24.35±0.17 ^b	30.82±0.31 ^a	29.64±1.70 ^a	0.0005
Dispensable	Asp	2.27±0.04 ^{ab}	2.17±0.06 ^b	2.41±0.11 ^a	0.0219
	Glu	3.97±0.06 ^b	4.05±0.08 ^b	4.47±0.23 ^a	0.0103
	Ser	1.37±0.06 ^b	1.89±0.10 ^a	1.81±0.06 ^a	0.0004
	Gly	1.40±0.02 ^c	1.52±0.07 ^b	1.70±0.05 ^a	0.0011
	Arg	9.02±0.33 ^a	5.30±0.27 ^b	8.74±0.17 ^a	<0.0001
	Ala	2.54±0.04 ^a	2.24±0.31 ^a	2.62±0.16 ^a	0.1318
	Pro	0.35±0.10 ^a	0.40±0.05 ^a	0.41±0.03 ^a	0.5353
	Tyr	3.58±0.02 ^c	5.01±0.03 ^a	3.98±0.21 ^b	<0.0001
	Cys2	0.91±0.25 ^a	1.17±0.08 ^a	1.21±0.14 ^a	0.1443
Total		25.40±0.08 ^a	23.75±0.61 ^c	27.36±0.77 ^a	0.0007

¹⁾All values are means±SD (n=3).²⁾Means in a row with superscripts without a common letter differ.**Table 3.** Indispensable and dispensable free amino acid content (mg/100 mL) of digested Hanwoo cuts over 8 h digestion

Amino acid		Tenderloin	Sirloin	Brisket and flank	P-value
Indispensable	His	8.72±0.29 ^{a1)2)}	8.17±0.14 ^a	8.06±2.33 ^a	0.8183
	Thr	8.36±0.47 ^c	9.26±0.19 ^b	9.88±0.10 ^a	0.0023
	Val	12.79±0.55 ^c	14.29±0.20 ^b	15.31±0.36 ^a	0.0007
	Met	8.56±0.38 ^c	10.88±0.15 ^b	14.13±0.33 ^a	<0.0001
	Ile	10.90±0.61 ^b	11.29±0.25 ^{ab}	12.19±0.41 ^a	0.0320
	Leu	28.16±0.88 ^c	32.91±0.36 ^b	40.85±0.81 ^a	<0.0001
	Phe	17.06±0.32 ^c	21.68±0.27 ^b	27.38±0.94 ^a	<0.0001
	Lys	30.68±0.61 ^c	39.05±1.33 ^b	55.31±2.48 ^a	<0.0001
	Trp	7.67±0.11 ^c	8.56±0.22 ^b	10.72±0.45 ^a	<0.0001
Total		132.90±3.65 ^c	156.09±1.00 ^b	193.82±5.82 ^a	<0.0001
Dispensable	Asp	5.06±0.21 ^a	4.92±0.03 ^a	5.16±0.19 ^a	0.2668
	Glu	14.96±0.47 ^a	13.90±0.06 ^b	15.49±0.50 ^a	0.0072
	Ser	7.70±0.34 ^a	5.41±0.06 ^b	7.62±0.16 ^a	<0.0001
	Gly	18.36±0.32 ^a	16.57±0.42 ^b	15.71±1.04 ^b	0.0079
	Arg	29.57±0.50 ^c	42.79±1.22 ^b	50.78±2.76 ^a	<0.0001
	Ala	12.94±0.68 ^b	13.54±0.31 ^b	15.56±0.33 ^a	0.0012
	Pro	2.15±0.03 ^a	2.05±0.09 ^a	1.90±0.27 ^a	0.262
	Tyr	18.32±0.35 ^c	20.90±0.63 ^b	25.85±1.04 ^a	<0.0001
	Cys2	1.49±0.09 ^b	1.45±0.04 ^b	1.77±0.06 ^a	0.0024
Total		110.55±2.25 ^c	121.54±1.94 ^b	139.84±5.80 ^a	0.0002

¹⁾All values are means±SD (n=3).²⁾Means in a row with superscripts without a common letter differ.

며 비필수 아미노산의 경우 arginine이 높은 수치를 보였다.

Cho 등(26)은 아미노산 조성을 부위별(등심, 채끝, 목심, 꼬리, 업진, 양지머리 등)로 분석한 결과 glutamate와 alanine 함량이 가장 높았고, 그다음으로 arginine, phenylalanine, leucine 순이었다. 연구자별 시료 내 아미노산 조성의 차이점은 농장별 한우 품종과 사양방법이 다르고 쇠고기

를 냉장 보관할 때 또는 시료의 열처리에 따른 단백질 변성에 기인한다고 판단된다(27).

한우 고기의 단백질은 체내에서 합성할 수 없는 필수 아미노산뿐만 아니라 비필수 아미노산의 함량이 풍부하기 때문에 질적으로 매우 우수한 것으로 평가받고 있다. 본 연구 결과 Table 1, 2, 3과 같이 소화 전 원물 내 총 아미노산

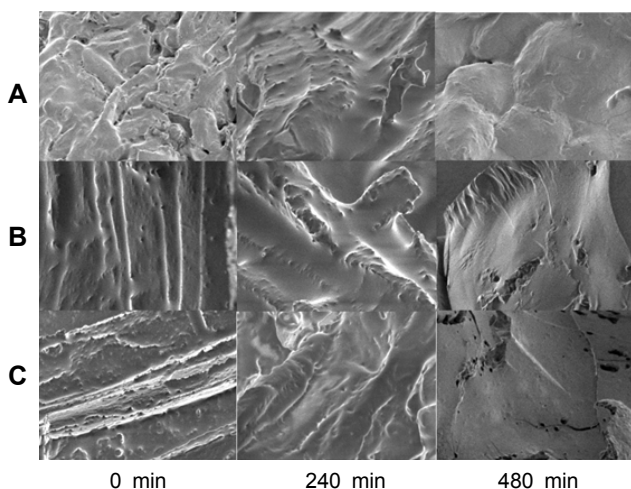


Fig. 4. SEM images of Hanwoo cuts during the 8 h digestion by *in vitro* physicochemical gastroduodenal system ($\times 750$). (A) tenderloin, (B) sirloin, (C) brisket and flank.

함량 대비 유리되는 아미노산의 양은 4시간 후 위를 통과한 시료와 8시간 후 십이지장까지 통과한 시료 모두 등심 부위가 가장 높았고 그다음으로 안심과 양지가 뒤를 따른다. 그러나 원물 및 소화단계별 유리되는 아미노산의 전체 함량은 양지 부위가 가장 높은 수치를 보여 등심과 안심보다 낮은 가격에 책정된 양지 부위가 아미노산 공급 면에서는 더 우수하리라 생각된다. 따라서 현재 시판되는 한우 고기 부위별 가격은 영양적인 면뿐만 아니라 연도, 맛과 소비자의 기호도에 의해 결정되는 경향이 있음을 알 수 있다.

SEM

소화 시간별 소화물 내 부분육의 표면을 관찰한 결과는 Fig. 4와 같다. 소화 전 시료, 4시간 후 위를 통과한 시료와 8시간 후 십이지장까지 모두 통과한 시료의 표면 간 매끄러움(smoothness)은 상당한 차이를 나타냈다. 모든 시료에서 소화 전 시료의 거친 표면에 비해 소화시간이 경과되면서 표면이 매끄럽게 변화되었음을 확연히 알 수 있었으며 이는 SGF와 SIF 내 포함되어 있는 다양한 단백질 분해효소(pepsin, pancreatin)의 작용에 의해 나타나는 현상이라 판단되며 시간이 경과함에 따라 그 양상이 더욱 뚜렷하였다. 그러나 부분육의 표면 간 매끄러움 정도는 3종의 시료 간에 큰 차이가 없었으며 모든 시료의 표면이 소화 시간이 경과함에 따라 매끄러워지는 양상을 볼 때 본 연구에서 사용된 IPGS 모델이 실제 인체의 소화 과정을 매우 유사하게 구현하였음을 확인하였다.

요 약

본 연구는 1+ 육질등급의 한우 부분육 세 부위(안심, 등심, 양지)를 대상으로 인체 소화기관 생체 외 모델(IPGS)을 이용하여 소화 시간에 따른 소화물의 pH 변화, 단백질 가수분

해도, 아미노산 조성 및 SEM 표면 관찰을 비교 실시하였다. 소화 시작 직후 30분에 소화물의 pH는 3.37~4.15 수치를 나타냈고 꾸준히 SGF가 분비되면서 pH는 점차 낮아져 소화 4시간 경과 후에는 시료의 pH가 2.5 이하로 낮아졌다. 그다음 십이지장 소화 과정 중 SIF 주입에 따라 pH는 꾸준히 상승하여 8시간이 경과된 이후에는 세 부위 시료 모두가 pH 7.5 부근에 도달하였다. 단백질 가수분해 양상은 소화시간에 따라 점차 증가하였으나 양지의 경우 안심, 등심과 비교하여 분해 속도가 다소 느린 경향을 나타내었다. 아미노산 조성의 경우 원물 함량 대비 유리되는 양은 등심이 가장 높았으나 필수 아미노산과 비필수 아미노산을 포함한 총 아미노산 함량은 양지 부위가 등심 및 안심에 비해 가장 높은 수치를 보였다. SEM 관찰 결과 소화물 내 고기 시료의 표면은 시간이 경과되면서 점차 매끄럽게 변화되어 원물과 확연한 차이를 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단 국제협력사업에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다(2014K2A1A2048490).

REFERENCES

1. Status of Slaughter. 2018. Animal and plant quarantine agency. Gimcheon, Korea.
2. The Meat Trade Journal. 2015. Korea meat trade association. Gunpo, Korea. p 7-27.
3. Hwangbo S, Rhim TJ, Chung KY. 2001. Identification of species-specific components between Hanwoo and Aberdeen Angus meat. *J Anim Sci Technol* 46: 941-948.
4. Yang SY, Lim SD, Jeon KH, Nam KB, Kwon SA, Park JE. 2007. Comparison of vitamin A, E, and cholesterol contents and the sensory properties of chilled Hanwoo and Australian beef. *Korean J Food Sci Ani Resour* 27: 262-266.
5. Lee JM, Kim TW, Kim JH, Cho SH, Seong PN, Jung MO, Cho YM, Park BY, Kim DH. 2009. Comparison of chemical, physical and sensory traits of *Longissimus lumborum* Hanwoo beef and Australian Wagyu beef. *Korean J Food Sci Ani Sour* 29: 91-98.
6. An JW. 2016. Predictors of successful aging in community-dwelling elders and mediation effect of transcendence. *J Korea Contents Association* 16: 582-593.
7. Choi MS, Kim DH, Park HN, Kim SS. 2015. A study on the eating behaviors and characteristics of consumption propensities on dining out as perceived by silver generation in Seoul. *Korean J Culinary Res* 21(1): 250-266.
8. Shin BM, Bae SM, Ryu DY, Choi YK. 2012. The relationship between the numbers of natural teeth and nutritional status of elderly in Korea - based on 2007~2009 national health and nutrition survey data-. *J Korean Soc Dent Hyg* 12: 521-531.
9. Chun HH, Choi EJ, Han AR, Chung YB, Kim JE, Park SH. 2016. Changes in quality of Hanwoo bottom round under different freezing and thawing conditions. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 45: 230-238.
10. Paradhitya HVD, Jeon CH, Choi IH, Lee HJ, Joo YH, Lee SS, Kim D, Kim SC. 2017. Effects of probiotic supplement-

- tation on growth performance, blood metabolites, and meat quality of Hanwoo steer. *J Environ Sci Int* 26: 967-976.
11. Li L, Liu Y, Zou X, He J, Xu X, Zhou G, Li C. 2017. *In vitro* protein digestibility of pork products is affected by the method of processing. *Food Res Int* 92: 88-94.
 12. Farouk MM, Wu G, Frost DA, Clerens S, Knowles SO. 2014. The *in vitro* digestibility of beef varies with its inherent ultimate pH. *Food Funct* 5: 2759-2767.
 13. Van Loo-Bouwman CA, Naber TH, Minekus M, van Breenen RB, Hulshof PJ, Schaafsma G. 2014. Food matrix effects on bioaccessibility of β -carotene can be measured in an *in vitro* gastrointestinal model. *J Agric Food Chem* 62: 950-955.
 14. Yoo JY. 2008. Development and application of an *in vitro* physicochemical upper gastrointestinal system (IPUGS) simulating the human digestive processes. *PhD Dissertation*. Monash University, Melbourne, Australia.
 15. Jeon JH, Yoo M, Jung TH, Jeon WM, Han KS. 2017. Evaluation of the digestibility of Korean Hanwoo beef cuts using the *in vitro* physicochemical upper gastrointestinal system. *Korean J Food Sci Anim Resour* 37: 682-689.
 16. Nielsen OB, de Paoli F, Overgaard K. 2001. Protective effects of lactic acid on force production in rat skeletal muscle. *J Physiol* 536: 161-166.
 17. Castela-Papin N, Cai S, Vatie J, Keller F, Souleau CH, Farinotti R. 1999. Drug interactions with diosmectite: a study using the artificial stomach-duodenum model. *Int J Pharm* 182: 111-119.
 18. Sugawara M, Kadamura S, He X, Takekuma Y, Kohri N, Miyazaki K. 2005. The use of an *in vitro* dissolution and absorption system to evaluate oral absorption of two weak bases in pH-independent controlled-release formulations. *Eur J Pharm Sci* 26: 1-8.
 19. Kapsokefalou M, Alexandropoulou I, Komaitis M, Politis I. 2005. *In vitro* evaluation of iron solubility and dialyzability of various iron fortificants and of iron-fortified milk products targeted for infants and toddlers. *Int J Food Sci Nutr* 56: 293-302.
 20. Molly K, Vande Woestyne M, Verstraete W. 1993. Development of a 5-step multi-chamber reactor as a simulation of the human intestinal microbial ecosystem. *Appl Microbiol Biotechnol* 39: 254-258.
 21. Kawaguchi T, Yamagishi S, Sata M. 2009. Branched-chain amino acids and pigment epithelium-derived factor: novel therapeutic agents for hepatitis c virus-associated insulin resistance. *Curr Med Chem* 16: 4843-4857.
 22. Muto Y, Sato S, Watanabe A, Moriwaki H, Suzuki K, Kato A, Kato M, Nakamura T, Higuchi K, Nishiguchi S, Kumada H. 2005. Effects of oral branched-chain amino acid granules on event-free survival in patients with liver cirrhosis. *Clin Gastroenterol Hepatol* 3: 705-713.
 23. Wang XY, Li N, Gu J, Li WQ, Li JS. 2003. The effects of the formula of amino acids enriched BCAA on nutritional support in traumatic patients. *World J Gastroenterol* 9: 599-602.
 24. Cho SY, Lee MK, Park EM, Jang JY, Kim MJ. 1997. Effect of methionine levels on brain lipid peroxidation in ethanol-treated rats of selenium deficiency. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 26: 109-115.
 25. Choi YH, Woo JM, Park HK, Yoon KS, Cho DY, Lee MS. 2004. No association between genetic polymorphism of tryptophan hydroxylase A218C and serotonin transporter linked polymorphic region and panic disorder. *Korean J Biol Psychiatry* 11: 136-145.
 26. Cho SH, Seong PN, Kim JH, Park BY, Baek BH, Lee YJ, In TS, Lee JM, Kim DH, Ahn CN. 2008. Calorie, cholesterol, collagen, free amino acids, nucleotide-related compounds and fatty acid composition of Hanwoo steer beef with 1⁺⁺ quality grade. *Korean J Food Sci Ani Resour* 28: 333-344.
 27. Cho S, Seong P, Kang G, Park BY, Jung S, Kang S, Kim Y, Kim J, Kim D. 2011. Meat quality and nutritional properties of Hanwoo and imported Australian beef. *Korean J Food Sci Ani Resour* 31: 772-781.