



시간에 따른 생축 육계 가슴살의 표현형 변이

김지원^{1*} · 한창호^{2*} · 이슬기³ · 이준호⁴ · 장수용⁴ · 엄정욱⁵ · 정강진¹ ·
 장재철⁶ · 김현욱⁷ · 양한술⁶ · 손시환⁷ · 오상현^{6†}

¹경상국립대학교 축산과학부 석사과정생, ²경상국립대학교 축산과학부 학부생, ³경상국립대학교 동물생명융합학부 석사과정생,
⁴경상국립대학교 동물생명융합학부 학부생, ⁵경상국립대학교 축산과학부 박사과정생,
⁶경상국립대학교 축산과학부 교수, ⁷경상국립대학교 동물생명융합학부 교수

Phenotypic Variation in the Breast of Live Broiler Chickens Over Time

Ji-Won Kim^{1*}, Chang-Ho Han^{2*}, Seul-Gy Lee³, Jun-Ho Lee⁴, Su-Yong Jang⁴, Jeong-Uk Eom⁵, Kang-Jin Jeong¹,
 Jae-Cheol Jang⁶, Hyun-Wook Kim⁷, Han-Sul Yang⁶, Sea-Hwan Sohn⁷ and Sang-Hyon Oh^{6†}

¹Master Course Student, Division of Animal Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Republic of Korea

²Undergraduate Student, Division of Animal Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Republic of Korea

³Master Course Student, Division of Animal Bioscience and Integrated Biotechnology, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Republic of Korea

⁴Undergraduate Student, Division of Animal Bioscience and Integrated Biotechnology, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Republic of Korea

⁵Ph.D. Course Student, Division of Animal Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Republic of Korea

⁶Professor, Division of Animal Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Republic of Korea

⁷Professor, Division of Animal Bioscience and Integrated Biotechnology, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Republic of Korea

ABSTRACT This study utilized the non-invasive MyotonPRO[®] device to analyze the stiffness in breast muscles of commercial broilers (Ross 308 and Arbor Acres) and compared these findings with data reported for Ross 708, where Woody Breast (WB) symptoms had been previously documented. The research revealed that Ross 308 and Arbor Acres displayed relatively lower stiffness values compared to Ross 708, suggesting a lack of WB expression. These results indicate differentiation in breast muscle traits across strains and underscore the necessity for further research into factors influencing WB manifestation. The study also measured additional muscle tone characteristics such as Frequency, Decrement, Relaxation, and Creep across various growth stages (2, 4, 6, and 8 weeks), finding significant variations with pronounced severity at weeks 2 and 8. An increase in stiffness was observed as the broilers aged, pointing to potential growth-related or stress-induced changes affecting WB severity. A strong positive correlation was established between increased breast meat weight and WB severity, highlighting that heavier breast meat could exacerbate the condition. This correlation is vital for the poultry industry, suggesting that weight management could help mitigate WB effects. Moreover, the potential for genetic selection and breeding strategies to reduce WB occurrence was emphasized, which could aid in enhancing management practices in commercial poultry production. Collectively, these insights contribute to a deeper understanding of WB in broilers and propose avenues for future research and practical strategies to minimize its impact.

(Key words: woody breast, broiler, MyotonPRO[®], Ross 308, Arbor Acres)

서 론

최근 50년간 닭고기 소비량이 증가하면서 성장이 빠른 육계를 개량하여 생산하고 있다(Jia et al., 2022). 최근 빠른 성장으로 개량된 육계에서 가슴살 육질과 관련된 부작용이 보

고되고 있다(Kuttappan et al., 2016). 대표적인 부작용은 창백한 삼출성(PSE; Pale Soft Exudative) 상태, 심부 가슴 근육(DPM; Deep Pectoral Myopathy) 근육병증, 스파게티 고기(SM; Spaghetti Meat), 흰색 줄무늬(WS; White Striping), Woody Breast(WB) 등이 발생하고 있다(Cai et al., 2018;

* These authors contributed equally to this work.

† To whom correspondence should be addressed : shoh@gnu.ac.kr

Sun et al., 2021; Che et al., 2022). 그 중 대표적인 부작용인 WB가 상업용 육계의 48–73%가 영향을 받는다고 보고되고 있다(Tijare et al., 2016). WB는 주로 육계에서 발생하는 질환으로 가슴살이 딱딱해지고, 질긴 질감을 보인다(Bowker and Zhuang, 2017). 이는 인체에 해롭지는 않지만 시각적으로나 식감이 좋지 않아 선호도가 떨어지며 이로 인해 소비량이 감소한다(Brambila et al., 2017). 현재로서 WB의 정확한 원인은 파악되지 않았으나, 이는 가공산업에 막대한 경제적 피해를 끼치고 육계 생산자에게 경제적 타격을 입힐 수 있는 요소이다(Bowker and Zhuang, 2019).

발생의 원인은 정확히 알려지지 않았으나, 유전적으로 높은 성장률과 많은 가슴살 수율을 가진 개체가 WB의 발생 빈도와 상관관계가 있다고 여겨진다(Aguirre et al., 2018; Zhang et al., 2021; Valenta et al., 2023). 계육 가공장에서 수집된 WB 증상을 보이는 가슴살에서 경도의 표현형 변이가 존재하고, 육질에서도 변이가 존재함을 보고한 연구결과가 있다(Oh et al., 2024). 한편, WB의 유전력은 중등도에 가까워 유전이 될 가능성이 있다(Bailey et al., 2015; Lake et al., 2021). 따라서 세대 간 선발을 통해 유전적 제어를 할 수 있을 것으로 보인다(Liu et al., 2020a). 이전에 시행된 연구에서 2년 동안의 선발 과정을 거쳐 WB 발생률이 18.4% 감소했다는 것을 보여주었다(Bailey et al., 2020). 이는 유전적으로 제어될 수 있으며 동물 육종 선발과 교배를 통해 줄일 수 있다는 것을 시사한다(Marie Hubert et al., 2018).

현재 가슴살 경화도 판별은 가슴살을 채취한 후에 알 수 있다는 것이 큰 문제점이다. 현재 WB는 도계 후 관능검사와 촉진을 통해 주관적으로 평가되고 있다(Pang et al., 2020). 이는 가슴살을 채취하기 전 생육에서 가슴살 경화도를 파악함으로써 해결이 가능하다고 예측된다. 품질의 결함에 대한 수치적 정의와 판별기준이 필요하며, WB의 발생 원인에 대한 연구가 필요한 시점이다.

MyotonPRO[®]는 근기능의 특성을 확인하는 장비로 근육에 수직으로 촉진하여 근 긴장도, 경도, 탄성도를 5가지 형질인 Frequency(공진주파수), Stiffness(경도), Decrement(진동 감쇄율), Relaxation time(근 회복 시간), Creep(근육 변형률)로 나타낸다. MyotonPRO[®]의 유효함은 생리학, 생체역학, 스포츠 과학, 물리 치료 등 다양한 분야에서 입증되고 있으며(Lettner et al., 2024), 질환 진단, 과학적 연구와 임상 응용에서 중요한 역할을 한다(Gilbert et al., 2021; Lee and Cho, 2022). 그러므로 비침습적 디지털 장치를 통해 WB의 심각성을 수치화하여, 표현형질 구축에 관한 연구가 필요할 것이라고 사료된다.

본 연구에서는 가슴살 표현형을 통한 유전적 선발이 가능

한지 여부를 파악하기 위하여, 육계 생육에서 가슴 경도의 변이를 측정하고 그 변이가 다른 형질과 어떤 상관관계를 갖는지 조사하는 데 목적을 둔다.

재료 및 방법

1. 공시동물 및 실험설계

본 실험에 공시한 육계는 Ross 308, Abor Acres를 이용하였다. Ross 308 50수는 충남 소재의 종계장에서 도입하였고, Abor Acres 45수는 충북 청주시 소재의 종계장에서 도입하였다. Ross 308은 50수, Abor Acres 45수로 총 95수를 사용하였다.

2. 사양관리 및 방법

모든 연구에서 닭 관리 및 취급은 본 대학의 동물실험윤리위원회(IACUC, No. 2020-5)의 승인을 얻은 후 규정에 따라 시행하였다.

1) 실험 1

Ross 308 품종을 경상국립대학교 종합농장 내 무창계사로 설계된 육추사에서 2023년 8월 17일부터 2023년 9월 20일까지 발생 후 35일 간, 2023년 9월 21일부터 2023년 10월 11일까지 평사에서 21일 간 사육하여, 총 56일 간의 사양을 실시하였다. 4주간 강제환기 및 자동 온도조절 시스템을 갖춘 육추사에서 3단 2열 배터리형 케이지(74 × 60 × 35 cm/cage)로 케이지 당 10수씩 사육을 진행하였고, 평사(300 × 410 × 267 cm/cage)에서 50수를 사육하였다. 사육단계별로 농협 초이 사료(ME 3,050 kcal/kg, CP 23%), 농협 육계 전기 사료(ME 3,100 kcal/kg, CP 21%), 농협 육계 후기 사료(ME 3,150 kcal/kg, CP 19%)를 급여하였다. 점등 관리는 육계 표준 점등프로그램에 따라 실시하였다.

2) 실험 2

공시계의 사양관리는 Abor Acres는 실험 1과 같은 공간에서 2024년 2월 15일부터 2024년 4월 12일까지 8주간 사육하였다. 강제환기 및 자동 온도조절 시스템을 갖춘 육추사에서 3단 2열 배터리형 케이지(76 × 61 × 42 cm/cage)로 35일령까지 7수씩 사육을 진행하였다. 36일령부터 도계 전까지 케이지 당 4수씩 사육하였다. 온도 및 습도 관리와 점등 관리는 Aviagen, INC.이 제공하는 사육 관리 설명서에 따라 실시하였다(Aviagen, 2018). 사육단계별로 농협 육계 전기 사료(ME 3,100 kcal/kg, CP 21%), 농협 육계 후기 사료(ME 3,150 kcal/kg, CP 19%)를 급여하였다.

생체중이 약 3.1 kg인 Ross 308 50수와 생체중 약 4.4 kg의 Abor Acres 28수를 도계 전 24시간 절식을 실시하였다. 도계 틀에 현수하여 메스로 경동맥을 절단하고, 10분간 방혈을 진행하였다. 방혈이 완료된 도체는 50℃의 저온탕침을 통해 150 초간 탕침을 실시하여 털의 제거를 용이하게 하였다. 이후, 탈우기를 사용하여 대부분의 털을 제거한 뒤 잔털은 수작업으로 제거하였다. 머리와 닭발과 같은 비가식 부위를 제거한 후 내장을 제거하였다. 모든 내장이 제거된 도체는 품질 보존과 미생물 성장 억제를 위해 얼음물에 냉침한 뒤 모든 도체는 4℃에서 24시간 냉각을 실시 후 후속분석을 위해 준비되었다.

3. 조사 및 분석 항목

1) 체중 측정

본 연구에서는 체중 증가 추이를 분석하기 위하여 매주 체중을 측정하였다. 체중 데이터는 모든 개체에 대해 기록되었고, 데이터의 정확성을 확보하기 위해 각 측정값은 두 명의 실험자에 의해 독립적으로 기록되었다. 수집된 데이터는 MyotonPRO®의 측정치와 체중 간의 상관관계를 나타내는 데 사용되었다.

2) 가슴살 경화도 측정

비침습적 디지털 장치인 MyotonPRO® 장비를 사용하였다(MyotonPRO®, Myoton, Tallinn, Estonia). MyotonPRO®는 Muscle Tone(근 긴장도), Stiffness(동적 경도), Elasticity(탄성도)를 5가지 형질인 Frequency(공진주파수), Stiffness(경도), Decrement(진동 감쇄율), Relaxation time(근 회복 시간), Creep(근육 변형률)로 나누어 근 기능의 특성을 확인할 수 있는 장비이다(Mooney et al., 2013). 측정 부위는 좌·우측 가슴살 상단에 측정하였다. MyotonPRO® 1회 평가 시 3번의 타진을 통해 평균값을 기록하도록 설정하였고 측정부위에 MyotonPRO®를 수직으로 하여 평가를 실시하였다. MyotonPRO®를 사용하여 측정된 변인은 근육의 긴장도를 의미하는 공진 주파수[Hz]는 자발적 근 수축이 없는 상태(EMG의 Zero 수준)에서도 존재하는 근 고유의 진동을 나타낸다. 근육의 긴장도는 다음과 같이 계산된다.

$$F = F_{\max}$$

Stiffness은 초기 근육의 상태에서 외부 힘에 대한 근조직의 저항력을 의미한다. 즉, 근 수축에 의하여 근 섬유 조직이 전위(Displacement)를 일으키는 데 필요한 힘의 강도(Magnitude)를 말한다. Stiffness는 다음과 같이 계산된다.

$$S = \frac{a_{\max} \cdot m_{probe}}{\Delta l}$$

Decrement은 근육 탄성을 나타낸다. 탄성은 외력의 감소 또는 제거 후 초기 근육 형태로 회복할 수 있는 능력에 대한 근육의 생체 역학적 특성을 말한다. Decrement은 다음과 같이 계산된다.

$$D = \ln\left(\frac{a_1}{a_3}\right)$$

Relaxation time은 근육의 근수축 또는 외부 응력이 제거된 후, 정상으로 복원되는 시간을 나타낸다. Relaxation time은 다음과 같이 계산된다.

$$R = t_r - t_1$$

Creep은 이완 상태에서 변형되기까지의 시간의 비율이며, 회복 시간과 처음 상태에서 시작하여 변형이 끝나는 시점까지 시간의 비율을 말한다. Creep은 다음과 같이 계산된다.

$$C = \frac{R}{t_1 - t_T}$$

실험 1, 2에서 가슴살 경화도 측정은 MyotonPRO®를 사용하여 발생 후 2주령, 4주령, 6주령, 8주령 생체의 가슴살, 정육된 가슴살, 열처리한 가슴살을 측정하여 좌우 가슴살 측정값의 평균을 분석에 사용하였다.

3) 신선육 육색 및 가열 육색 측정

신선육 육색은 상온에서 10분동안 공기에 노출시킨 후 분석을 진행했다. 가열 육색은 샘플을 80℃에서 40분간 가열 후 충분히 식혀준 뒤 표면의 물기를 제거하였다. 샘플의 중앙에서 3번 반복하여 분석을 진행했다. 육색 측정은 색도계(CR-300, Minolta Co., Japan)를 이용하여 CIE 명도(L*), 적색도(a*), 황색도(b*), 채도(C* = a*² + b*²) 그리고 색조 각(h = tan⁻¹[b*/a*])을 측정하였다. 표준 백색판의 색도 값은 Y=81.20, x=0.3214, y=0.3391이다.

4) pH 측정

pH 측정은 pH 미터(MP230, Mettler Toledo, Greifensee, Switzerland)를 사용하여 수행하였다. 시료 3 g을 27 mL 증류수와 혼합한 후 Polytron 균질기(T25 basic, IKA, Selangor, Malaysia)를 사용하여 30초 동안 균질화하였다. pH 측정기

는 20℃에서 pH 4.0, 7.0 및 9.0의 세 가지 표준 버퍼를 사용하여 보정하였다.

5) 가열감량

시료 무게를 측정 후 밀봉된 용기에 넣어 항온수조에 넣어 80℃에서 40분간 가열한다. 가열 후 충분히 식혀준 후 무게를 측정하여 백분율(%)을 산출하였다. 이때 가열 감량은 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$\frac{(\text{가열 전 무게 (g)} - \text{가열 후 무게 (g)})}{\text{가열 전 무게 (g)}} \times 100$$

6) 육즙손실

닭가슴살의 육즙손실은 시료를 정육면체 형태로 정형하여 플라스틱망에 감싸 밀폐된 용기에 매달아 4℃에서 48시간 동안 손실된 무게를 백분율(%)로 산출하였다. 육즙손실은 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$\frac{(\text{초기 시료 무게 (g)} - \text{최종 시료 무게 (g)})}{\text{초기 시료 무게 (g)}} \times 100$$

7) 전단력(shear force)

가열한 닭가슴살 시료의 전단력은 근질 방향과 평행한 직육면체(가로 × 세로 × 높이, 3 × 1 × 1 cm³)가 되도록 절단하여 V-blade가 장착된 texture analyzer(CT3 50K, AMETEK

Brookfield, MA, USA)를 이용하여 측정하였다. 이때의 분석 조건은 maximum load 50 kg, test speed 2 mm/sec로 설정하였으며, 시료의 절단에 가해진 최고값을 kg으로 나타내었다.

4. 통계 분석

수집된 자료는 SAS 9.4 통계 프로그램을 이용하여 분석하였다. PROC CORR을 통한 상관분석, ANOVA를 활용한 분산분석, 그리고 GLM을 사용한 일반선형모델을 사용하였다. 상관분석 결과는 R의 Heatmap으로 시각화하여 보다 직관적인 결과 해석을 가능하게 하였다. JMP 17(SAS Institute INC., USA)을 사용하여 이상치를 산출한 후 SAS 9.4 통계 프로그램의 1.5 × IQR을 기준으로 이상치를 제거하였다.

결 과

1. 전체 통계분석 결과

Ross 308와 Arbor Acres의 가슴살 경화도를 나타내는 다섯 가지 측정 형질별(Frequency, Stiffness, Decrement, Relaxation, Creep) 수치를 조사하고, 주령별 품종 간 유의성을 나타내었으며, 이 결과를 Table 1에 제시하였다. 분석 결과, 모든 형질에서 Ross 308과 Arbor Acres 사이에 유의한 차이를 보였다. 또한, 주령별로 유의한 차이를 나타내었다. 그러나, 품종 간 상관관계를 나타내지 않았기에 각 품종 내 상관관계에 대하여 기술하였다. 각 품종 내 상관관계는 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Least squares means and standard errors of frequency, stiffness, decrement, relaxation and creep in Ross 308 and Arbor Acres by week

Characteristic	Breed	Week 2	Week 4	Week 6	Week 8
Frequency	Ross 308	15.78±0.16 ^{Aa}	13.70±0.16 ^{Ab}	12.97±0.16 ^{Ac}	15.51±0.16 ^{Aa}
	Arbor Acres	17.88±0.27 ^{Ba}	15.20±0.27 ^{Bb}	14.31±0.27 ^{Bc}	14.17±0.27 ^{Bd}
Stiffness	Ross 308	314.77±5.47 ^{Aa}	210.34±5.47 ^{Ab}	192.12±5.47 ^{Ac}	270.99±5.47 ^{Ad}
	Arbor Acres	381.43±8.15 ^{Ba}	263.35±8.15 ^{Bb}	236.69±8.15 ^{Bc}	237.49±8.15 ^{Bc}
Decrement	Ross 308	1.27±0.03 ^{Aa}	1.19±0.03 ^{Ab}	1.05±0.03 ^{Ac}	0.90±0.03 ^{Ad}
	Arbor Acres	1.79±0.04 ^{Ba}	0.89±0.04 ^{Bb}	1.15±0.04 ^{Bc}	1.26±0.04 ^{Bd}
Relaxation	Ross 308	15.42±0.31 ^{Aa}	20.10±0.31 ^{Ab}	22.87±0.31 ^{Ac}	17.67±0.31 ^{Ad}
	Arbor Acres	13.12±0.46 ^{Ba}	17.13±0.46 ^{Bb}	21.09±0.46 ^{Bc}	21.17±0.46 ^{Bc}
Creep	Ross 308	0.90±0.02 ^{Aa}	1.16±0.02 ^{Ab}	1.37±0.02 ^{Ac}	1.05±0.02 ^{Ad}
	Arbor Acres	0.80±0.03 ^{Ba}	0.98±0.03 ^{Bb}	1.28±0.03 ^{Bc}	1.30±0.03 ^{Bc}

Values are least squares means±standard errors.

^{a-d} Comparison of significance by week in the same breed ($P<0.05$).

^{A,B} Comparison of significance between two breeds in the same week ($P<0.05$).

* The different letters of superscript within the column significantly differ.

Table 2. Correlations between traits analyzed within each cultivar Abor Acres and Ross 308

Traits	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1 ID	-	0.00	0.05	0.03	0.21	-0.19	0.22	0.04	-0.24	0.25	-0.17	0.25	-0.04	0.05	0.03	0.40	0.02	-0.06	0.44	0.08	-0.11	-0.17	0.00	-0.17	-0.41	0.06	0.07	-0.40	0.15	0.09
2 BW_8	-0.16	-	0.87	0.12	0.18	0.09	0.18	-0.35	0.09	0.14	0.06	0.20	0.14	-0.25	0.24	0.22	-0.12	-0.14	0.25	-0.21	-0.17	0.02	-0.14	-0.12	-0.23	0.33	0.09	-0.21	0.21	0.06
3 DW	-0.15	0.99	-	0.11	0.17	0.09	0.05	-0.35	0.25	0.12	0.01	0.19	0.14	-0.23	0.27	0.25	-0.06	-0.17	0.28	-0.18	-0.15	-0.09	-0.19	-0.19	-0.25	0.28	0.07	-0.24	0.18	0.03
4 LBW	-0.13	0.94	0.93	-	0.87	0.10	-0.25	0.00	-0.01	0.01	-0.14	-0.05	-0.12	-0.04	0.07	-0.05	-0.13	0.09	-0.06	0.04	-0.04	0.32	-0.05	-0.65	0.18	0.02	0.12	0.23	0.04	0.05
5 RBW	-0.07	0.92	0.93	0.93	-	0.05	-0.13	0.07	-0.06	0.11	-0.09	0.08	-0.14	-0.01	0.09	-0.05	-0.11	0.00	-0.02	0.02	-0.07	0.31	-0.02	-0.65	0.15	0.03	0.13	0.20	0.06	0.05
6 pH	0.32	0.13	0.13	0.12	0.19	-	-0.27	0.02	0.13	-0.49	-0.25	-0.47	-0.13	0.12	0.04	-0.16	0.15	-0.36	-0.16	0.06	-0.41	0.20	-0.09	0.14	0.24	-0.07	0.40	0.27	0.03	0.34
7 Cooking loss	0.10	-0.33	-0.34	-0.24	-0.18	-0.28	-	-0.14	-0.05	0.19	0.24	0.09	-0.03	0.03	-0.11	0.18	-0.23	0.31	0.23	-0.14	0.11	-0.05	0.00	0.26	-0.28	0.15	-0.21	-0.29	0.01	-0.17
8 Drip loss	-0.02	-0.20	-0.21	-0.23	-0.32	-0.39	-0.04	-	-0.20	-0.32	-0.17	-0.02	-0.43	0.29	0.06	-0.13	0.14	-0.04	-0.14	0.24	-0.23	0.30	-0.22	0.01	0.19	-0.34	0.23	0.20	-0.26	0.26
9 Shear force	0.06	-0.60	-0.59	-0.57	-0.59	0.07	0.25	-0.04	-	-0.03	0.04	-0.09	0.18	-0.07	0.16	0.02	0.09	0.06	0.04	0.11	0.14	-0.07	0.03	0.06	0.01	-0.06	-0.17	0.01	0.03	-0.20
10 BH_L*	-0.15	-0.12	-0.16	-0.01	-0.03	-0.33	0.48	-0.18	0.00	-	0.06	0.60	0.36	-0.17	-0.02	0.10	-0.11	0.01	0.17	-0.11	0.20	-0.17	0.20	-0.13	-0.17	0.14	-0.20	-0.19	0.09	-0.15
11 BH_a*	-0.03	0.38	0.42	0.37	0.47	0.43	-0.09	-0.29	-0.10	-0.05	-	-0.01	0.17	0.10	-0.46	0.18	0.19	-0.15	0.16	0.15	-0.05	-0.16	0.10	0.07	-0.19	-0.18	0.02	-0.20	-0.20	0.01
12 BH_b*	-0.02	0.51	0.48	0.58	0.54	0.04	0.15	-0.25	-0.53	0.38	0.32	-	0.07	-0.04	0.31	0.00	-0.08	-0.03	0.05	-0.10	0.01	-0.07	0.28	-0.02	-0.08	0.05	-0.05	-0.11	-0.02	0.02
13 AH_L*	0.10	-0.36	-0.39	-0.30	-0.38	-0.19	0.04	0.14	0.09	0.15	-0.65	-0.23	-	-0.70	-0.23	0.12	0.27	-0.03	0.14	0.15	0.00	-0.24	0.21	0.05	-0.12	-0.04	-0.01	-0.14	0.14	0.08
14 AH_a*	-0.14	0.36	0.39	0.28	0.30	0.14	-0.18	0.25	-0.05	-0.25	0.64	0.10	-0.79	-	0.13	-0.10	-0.14	-0.07	-0.13	0.05	-0.01	0.11	-0.12	-0.04	0.11	-0.02	-0.02	0.11	-0.04	-0.05
15 AH_b*	-0.05	0.59	0.56	0.64	0.67	0.23	0.13	-0.24	-0.37	0.01	0.32	0.64	-0.49	0.31	-	-0.20	-0.19	0.01	-0.20	-0.25	-0.10	0.22	0.07	-0.15	0.19	0.21	0.04	0.17	0.03	-0.02
16 F_8	0.27	0.23	0.24	0.19	0.27	0.33	0.25	-0.40	-0.09	-0.14	0.15	0.15	-0.02	0.02	0.37	-	0.10	0.15	0.98	0.24	0.15	-0.57	-0.16	-0.04	-0.96	-0.08	-0.16	-0.93	0.05	-0.12
17 F_raw	0.19	-0.69	-0.68	-0.69	-0.69	-0.07	0.34	0.04	0.63	-0.24	-0.25	-0.46	0.05	-0.17	-0.31	-0.06	-	-0.01	0.10	0.63	-0.07	-0.07	-0.23	0.14	-0.03	-0.57	0.05	-0.02	-0.15	0.10
18 F_cooked	0.00	-0.31	-0.31	-0.33	-0.35	-0.30	0.02	0.21	-0.04	-0.05	-0.35	-0.41	0.12	-0.24	-0.33	-0.27	0.32	-	0.13	0.09	0.75	0.01	-0.06	-0.07	-0.15	-0.10	-0.77	-0.15	-0.06	-0.73
19 S_8	0.40	0.11	0.12	0.09	0.17	0.34	0.30	-0.35	-0.01	-0.14	0.07	0.03	-0.06	0.01	0.37	0.92	0.06	-0.16	-	0.25	0.15	-0.54	-0.15	-0.01	-0.96	-0.10	-0.17	-0.93	0.05	-0.12
20 S_raw	0.18	-0.45	-0.44	-0.45	-0.42	-0.02	0.48	-0.06	0.63	-0.15	0.00	-0.22	-0.19	0.06	-0.03	0.15	0.87	0.05	0.23	-	0.08	0.04	-0.24	0.02	-0.16	-0.75	-0.04	-0.13	-0.06	0.02
21 S_cooked	0.08	-0.19	-0.16	-0.23	-0.20	-0.22	0.07	0.18	-0.02	-0.11	-0.22	-0.42	-0.02	-0.13	-0.26	-0.25	0.30	0.90	-0.13	0.09	-	-0.20	0.06	-0.07	-0.19	-0.04	-0.94	-0.21	0.05	-0.87
22 D_8	-0.01	-0.44	-0.47	-0.31	-0.39	-0.28	0.40	0.20	0.20	0.36	-0.31	-0.14	0.28	-0.41	-0.40	-0.51	0.35	0.36	-0.41	0.22	0.31	-	-0.05	-0.16	0.64	-0.11	0.12	0.69	-0.13	0.08
23 D_raw	-0.04	-0.22	-0.21	-0.26	-0.29	-0.40	-0.15	0.47	0.00	-0.16	-0.49	-0.47	0.48	-0.18	-0.53	-0.24	0.04	0.05	-0.22	-0.20	0.11	0.08	-	0.18	0.10	0.06	-0.09	0.07	0.02	-0.02
24 D_cooked	-0.31	0.14	0.17	0.07	0.17	-0.06	-0.09	-0.08	-0.07	0.02	0.33	-0.01	-0.29	0.19	-0.11	-0.03	-0.23	0.03	-0.20	-0.16	0.04	-0.08	-0.08	-	-0.04	-0.09	0.01	-0.07	-0.03	0.14
25 R_8	-0.38	0.03	0.01	0.08	0.00	-0.32	-0.20	0.31	-0.10	0.25	-0.04	0.11	0.06	-0.04	-0.25	-0.85	-0.21	0.10	-0.93	-0.30	0.12	0.50	0.20	0.13	-	0.03	0.21	0.99	-0.06	0.14
26 R_raw	-0.21	0.65	0.64	0.65	0.63	0.05	-0.36	-0.03	-0.61	0.16	0.13	0.33	0.03	0.04	0.23	-0.05	-0.92	-0.19	-0.17	-0.92	-0.18	-0.23	0.06	0.30	0.28	-	0.01	0.01	0.66	-0.06
27 R_cooked	-0.03	0.08	0.06	0.15	0.12	0.28	0.04	-0.16	0.17	0.08	0.22	0.30	0.03	0.08	0.19	0.16	-0.14	-0.90	0.08	0.06	-0.93	-0.09	-0.06	-0.07	-0.04	0.06	-	0.23	-0.06	0.93
28 C_8	-0.37	0.06	0.03	0.11	0.04	-0.31	-0.16	0.28	-0.11	0.26	-0.06	0.12	0.07	-0.08	-0.22	-0.83	-0.20	0.10	-0.91	-0.28	0.13	0.55	0.19	0.13	0.99	0.28	-0.03	-	-0.07	0.15
29 C_raw	-0.21	0.75	0.73	0.72	0.71	0.01	-0.10	-0.13	-0.47	0.06	0.11	0.32	-0.06	0.04	0.32	0.13	-0.66	-0.28	-0.03	-0.55	-0.20	-0.16	0.05	0.33	0.16	0.80	0.17	0.19	-	-0.07
30 C_cooked	-0.04	-0.02	-0.04	0.07	0.02	0.27	0.10	-0.14	0.29	0.06	0.19	0.21	0.08	0.04	0.12	0.13	-0.02	-0.83	0.07	0.14	-0.87	0.02	-0.06	-0.08	-0.04	-0.02	0.98	-0.03	0.12	-

* Above the diagonal are the correlations among the traits of Ross 308. Below the diagonal are the correlations among the traits of Abor Acres. BW_8; Body weight at 8 week of age, LBW; left breast weight, RBW; Right breast weight, AH_L*; Breast color (L*) after heating, AH_a*; Breast color (a*) after heating, AH_b*; Breast color (b*) after heating, BH_L*; Breast color (L*) after heating, BH_a*; Breast color (a*) after heating, BH_b*; Breast color (b*) after heating, F_8; Frequency at 8 week, F_Raw; Frequency of raw breast meat, F_Cooked; Frequency of cooked breast meat, the following traits also have the same format.

Table 3. Least squares means and standard errors of frequency, stiffness, decrement, relaxation and creep in Ross 308

Week	Frequency	Stiffness	Decrement	Relaxation	Creep
2	15.78±0.16 ^a	314.77±5.47 ^a	1.27±0.03 ^a	15.42±0.31 ^a	0.90±0.02 ^a
4	13.70±0.16 ^b	210.34±5.47 ^b	1.19±0.03 ^b	20.10±0.31 ^b	1.16±0.02 ^b
6	12.97±0.16 ^c	192.12±5.47 ^c	1.05±0.03 ^c	22.87±0.31 ^c	1.37±0.02 ^c
8	15.51±0.16 ^a	270.99±5.47 ^d	0.90±0.03 ^d	17.67±0.31 ^d	1.05±0.02 ^d

^{a-d} Comparison of significance by week in the same column ($P<0.05$).

2. Ross 308의 가슴살 경화도 분석

Ross 308의 분석 결과는 Table 3에 나타내었다. Frequency는 2주차와 8주차에서 높은 수치를 나타냈으며, 2주차부터 6주차까지는 유의적으로 감소하였고, 8주차에서 증가하였다. Decrement는 2주차부터 8주차까지 꾸준히 감소하는 경향을 보였다. Relaxation과 Creep은 2주차에서 6주차까지 증가하다 8주차에서 감소하였다. 집중 검토 대상 형질인 Stiffness에서 2주차에서 6주차까지 감소하는 경향을 보였는데, 이는 성장함에 따라 가슴살과 표면 사이의 피하지방이 증가함에 따라 측정 시 정확도가 감소하였다고 판단된다. 8주차에서 Stiffness의 증가는 도계 전 계류 기간 동안의 스트레스 또는 WB의 발현 가능성을 시사한다.

Ross 308의 가슴살 경화도와 무게 및 육질 간 상관 분석 결과를 R을 사용한 Heat map으로 표현하였고, 이를 Fig. 1으로 나타내었다. 열처리 후 가슴살의 Decrement 측정치와 정형된 좌·우측 가슴살의 무게 사이에 높은 양의 상관 관계가 나타났다. 이는 가슴살의 무게가 증가함에 따라 가슴살 경화도가 증가할 수 있음을 시사한다.

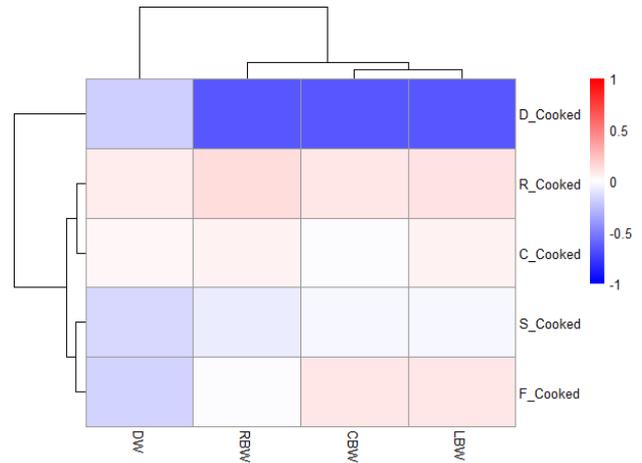


Fig. 1. Correlations between five traits of cooked Ross 308 chicken breast measured by MyotonPRO[®] and parameters including carcass weight, chilled carcass weight, and the weights of the left and right breast fillets. DW; Dressed Weight, CBW; Cold Body Weight, LBW; Left Breast Weight, RBW; Right Breast Weight, D_Cooked; Decrement of cooked chicken breast, R_Cooked; Relaxation time of cooked chicken breast, C_Cooked; Creep of cooked chicken breast, S_Cooked; Stiffness of cooked chicken breast, F_Cooked; Frequency of cooked chicken breast.

3. Arbor Acres의 가슴살 경화도 분석

Arbor Acres의 분석 결과는 Table 4에 나타내었다. Frequency 수치는 2주차에서 6주차까지 감소하였으며 6주차와 8주차는 유의적인 차이가 없다. Decrement의 경우, 2주차에서 가장 높은 값을 나타냈으며 2주차에서 4주차까지 감소하다 6주차부터 증가하는 경향을 보였다. Relaxation은 2주차부터 8주차까지 증가하였다. Creep에서도 마찬가지로 2주차에

서 8주차까지 증가하는 추세를 보였다. 가장 중점적으로 분석한 Stiffness는 2주차부터 6주차까지 유의적으로 감소하였으며, 6주차에서 8주차까지는 유의적인 차이가 없다. Stiffness는 Ross 308의 Stiffness 측정치와 비슷한 양상을 보였으며 성장함에 따라 Stiffness가 감소하는 추세를 보였다. Ross 308의 Stiffness에 비해 Arbor Acres의 Stiffness 평균 수치가

Table 4. Least squares means and standard errors of frequency, stiffness, decrement, relaxation and creep in Arbor Acres

Week	Frequency	Stiffness	Decrement	Relaxation	Creep
2	17.88±0.27 ^a	381.43±8.15 ^a	1.79±0.04 ^a	13.12±0.46 ^a	0.80±0.03 ^a
4	15.20±0.27 ^b	263.35±8.15 ^b	0.89±0.04 ^b	17.13±0.46 ^b	0.98±0.03 ^b
6	14.31±0.27 ^c	236.69±8.15 ^c	1.15±0.04 ^c	21.09±0.46 ^c	1.28±0.03 ^c
8	14.17±0.27 ^d	237.49±8.15 ^c	1.26±0.04 ^d	21.17±0.46 ^c	1.30±0.03 ^c

^{a-d} Comparison of significance by week in the same column ($P<0.05$).

높은 값을 나타냈으나, 8주차에서 유의적인 증가를 보이지 않았다.

Arbor Acres의 가슴살 경화도와 무게 및 육질 간 상관 분석 결과를 아래에 나타내었다. Fig. 2는 정형된 가슴살의 Frequency, Relaxation, Creep은 도체중, 냉도체중, 정형된 좌·우측 가슴살과 상관을 보인다. 이는 체중 및 가슴살 무게가 증가함에 따라 가슴살 경화도가 증가한다는 것을 나타낸다. Fig. 3은 정형된 가슴살의 Frequency, Stiffness, Relaxation은 전단력과 상관을 보인다. 이는 전단력이 증가함에 따라 가슴살 경화도가 증가한다는 것을 시사한다. 정형된 가슴살의 Decrement는 열처리 전 황색도(b*), 채도(c*) 및 열처리 후 적색도(a*), 채도(c*)와 음의 관계를 나타내었다(Fig. 4). 가슴살 경화도가 증가함에 따라 열처리 전 채도, 황색도 및 열처리 후 채도, 적색도가 증가한다는 것을 보여준다.

고 찰

사양실험에서 Ross 308 품종은 초기 4주차 동안은 중추 케이지 사양을 진행하였고, 5주차부터는 산란종계 기준의 평사로 이송하였다. 이송 과정에서 급수 시스템의 제한으로 인해 증체율이 저하된 것으로 보여진다(Nawaz et al., 2021). 뿐만 아니라, 2023년 8월 17일부터 2023년 10월 11일까지의

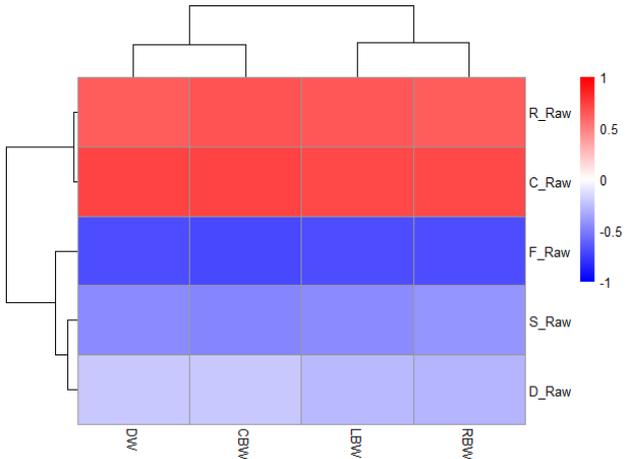


Fig. 2. Correlations between five traits of fresh Arbor Acres chicken breast measured by MyotonPRO® and parameters including carcass weight, chilled carcass weight, and the weights of the left and right breast fillets. DW; Dressed Weight, CBW; Cold Body Weight, LBW; Left Breast Weight, RBW; Right Breast Weight, R_Raw; Relaxation time of raw chicken breast, C_Raw; Creep of raw chicken breast, F_Raw; Frequency of raw chicken breast, S_Raw; Stiffness of raw chicken breast, D_Raw; Decrement of raw chicken breast.

Ross 308 사육기간 동안 예년보다 2.1℃ 높은 폭염으로 인해 증체율이 감소한 것으로 관찰되었다(Osti et al., 2017; Liu et al., 2020b; Sun et al., 2021). Ross 308의 경우 Aviagen, INC. 이 제공하는 사육 관리 설명서의 수준에 맞는 성장율을 보

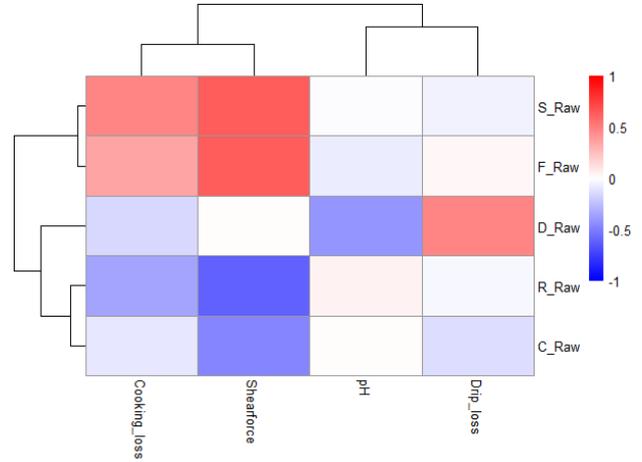


Fig. 3. Correlations between five traits of fresh Arbor Acres chicken breast measured by MyotonPRO® and parameters including pH, drip loss, cooking loss, and shear force. R_Raw; Relaxation time of raw chicken breast, C_Raw; Creep of raw chicken breast, F_Raw; Frequency of raw chicken breast, S_Raw; Stiffness of raw chicken breast, D_Raw; Decrement of raw chicken breast.

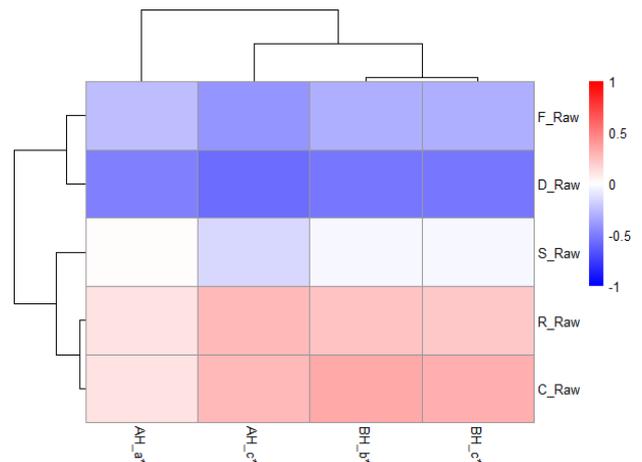


Fig. 4. Correlations between five traits of fresh Arbor Acres chicken breast measured by MyotonPRO® and meat color. BH_b*; Breast color (b*) after heating, BH_c*; Breast color (c*) after heating, AH_a*; Breast color (a*) after heating, AH_c*; Breast color (c*) after heating, R_Raw; Relaxation time of raw chicken breast, C_Raw; Creep of raw chicken breast, F_Raw; Frequency of raw chicken breast, S_Raw; Stiffness of raw chicken breast, D_Raw; Decrement of raw chicken breast.

이지 못해 WB에 대한 유의한 결과를 얻지 못한 것으로 사료된다(Puolanne et al., 2021).

Arbor Acres의 경우, 2024년 2월의 저온 환경으로 인해 실험 초기 온·습도 조절에 문제를 겪었다. 또한, 육추사 내부공간의 온도변이를 줄이기 위해 환기를 사양 표준보다 줄였다는 점이 발생 이후부터 2주차까지의 성장률에 영향을 미친 것으로 사료된다(Zhang et al., 2016; Wei et al., 2018). 본 연구에서 MyotonPRO[®]를 이용해 가슴살 경화도를 측정하고자 하였으나 육계의 성장에 따라 측정부위인 좌·우측 가슴살 상단에 피하지방층이 두꺼워지는 현상이 관찰되었고, MyotonPRO[®]를 이용한 심각도 측정을 방해하는 요인으로 작용했을 것으로 사료된다(Tůmová et al., 2010). 피하지방층의 두께가 증가함으로써 장치의 센서가 정밀한 압력을 가하고 데이터 수집에 어려움을 겪었으며 측정된 데이터의 신뢰도가 저하하고 가슴살 경화도를 평가함에 오차를 주었을 것으로 사료된다. 향후 연구에서는 다양한 체질량의 육계에서 MyotonPRO[®]의 적용 가능성과 한계를 더 깊이 분석해, 장치의 활용도를 평가하고 적절한 대안을 제시하는 것이 필요할 것이다.

본 연구에서 Ross 308과 Arbor Acres 품종의 가슴살 Stiffness를 측정하고, 이를 선행 연구에서 보고된 WB 현상이 나타난 Ross 708 품종의 데이터와 비교했다. 연구 결과, Ross 308의 가슴살 Stiffness는 480 ± 5.51 , Arbor Acres는 527 ± 6.43 으로 측정되었다. 반면, WB 현상이 보고된 Ross 708의 경우, 세 번의 테스트에서 각각의 Stiffness 수치는 575 ± 6.92 , 602 ± 6.92 , 612 ± 6.92 로 나타났다(Oh et al., 2024). 이 데이터는 Ross 708에서 나타난 높은 Stiffness 수치와 비교할 때, Ross 308과 Arbor Acres에서는 상대적으로 낮은 Stiffness 수치가 관찰되었음을 나타낸다. 이는 본 연구에 사용된 Ross 308과 Arbor Acres 품종에서는 WB 현상이 발생되지 않았음을 시사한다. 이러한 결과는 품종에 따른 가슴살의 특성이 다르게 나타날 수 있음을 보여주며, WB 현상의 발현에 영향을 미치는 요인들에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

빠른 성장률과 높은 생체중이 WB 발생 빈도와 비례한다는 기존의 연구 결과에 따라(Bedford et al., 2017), Ross 708 품종으로의 실험을 통해 가슴살 경화도를 측정하려 했으나, 본 연구에서 해당 품종을 확보하지 못함으로써 WB에 대한 데이터를 제공하지 못한 점이 한계로 작용한다. Ross 708 품종을 포함한 연구가 WB 현상의 더 정확한 평가 및 관리 방안 개발에 기여할 수 있음을 시사한다.

적 요

본 연구는 육계(Ross 308, Arbor Acres)에서 나타나는 가슴살 경화도를 비침습적 디지털 측정 장치인 MyotonPRO[®]를 사용하여 분석하였다. 이 논문의 목적은 육계의 생축에서 가슴 경직성의 변이를 측정할 수 있는가와 그 변이가 다른 형질과 어떤 상관관계를 갖는지 알아보는 것이다. 연구 결과, Ross 308과 Arbor Acres 모두에서 주령에 따라 가슴살 경화도의 변화가 관찰되었으며, 특히 2주차와 8주차에 높은 심각도를 보였다. 연구된 다양한 측정 형질들은 모두 WB의 발현과 관련이 있음을 보여준다. 또한, 가슴살의 무게와 가슴살 경화도 간에는 높은 양의 상관관계가 관찰되어, 증가하는 가슴살 무게가 가슴살 경화도 증가와 연관될 수 있음을 시사한다.

본 연구에서는 Ross 308과 Arbor Acres 품종의 가슴살 Stiffness를 측정하고 이를 WB 현상이 보고된 Ross 708의 데이터와 비교했으며, Ross 308과 Arbor Acres에서는 Ross 708에 비해 상대적으로 낮은 Stiffness 수치가 관찰되어 WB 현상이 발생되지 않았음을 시사한다. 이 결과는 품종에 따른 가슴살의 특성 차이를 나타내며, WB 발현에 영향을 미치는 요인에 대한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

사양 실험에서 나타난 결과는 Ross 308과 Arbor Acres 품종에서 WB 발생률과 관리 전략에 대한 이해를 높이는 데 기여하며, 더 나아가 가금산업에서 WB를 줄이기 위한 유전적 선발 및 사육 관리 기법 개발에 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다. 또한 본 연구에서는 MyotonPRO[®] 장비의 효율성과 한계에 대한 평가도 포함되어 있으므로 향후 연구에서는 이 장비의 활용성을 더욱 개선할 수 있는 방안을 모색하는 데 기여하고자 한다.

(색인어 : 가슴살 경화, 육계, 비침습적 측정 장치, Ross 308, Arbor Acres)

사 사

이 연구는 2023년도 경상국립대학교 신진교수 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

ORCID

Ji-Won Kim <https://orcid.org/0000-0002-8417-1477>
 Chang-Ho Han <https://orcid.org/0009-0003-3247-1341>
 Seul-Gy Lee <https://orcid.org/0000-0002-2548-8554>

Su-Yong Jang <https://orcid.org/0009-0001-6704-4951>
 Jun-Ho Lee <https://orcid.org/0009-0007-5295-0170>
 Jeong-Uk Eom <https://orcid.org/0000-0003-1856-7745>
 Kang-Jin Jeong <https://orcid.org/0009-0003-5917-665X>
 Jae-Cheol Jang <https://orcid.org/0000-0001-9843-3186>
 Hyun-Wook Kim <https://orcid.org/0000-0003-0003-0368>
 Han-Sul Yang <https://orcid.org/0000-0001-6658-6364>
 Sea-Hwan Sohn <https://orcid.org/0000-0001-6735-9761>
 Sang-Hyon Oh <https://orcid.org/0000-0002-9696-9638>

REFERENCES

- Aguirre M, Owens C, Miller R, Alvarado C 2018 Descriptive sensory and instrumental texture profile analysis of woody breast in marinated chicken. *Poult sci* 97(4):1456-1461.
- Arbor Acres Broiler Management Handbook 2018 Aviagen.
- Bailey RA, Souza E, Avendano S 2020 Characterising the influence of genetics on breast muscle myopathies in broiler chickens. *Front Physiol* 11:1041.
- Bailey RA, Watson KA, Bilgili S, Avendano S 2015 The genetic basis of pectoralis major myopathies in modern broiler chicken lines. *Poult Sci* 94(12):2870-2879.
- Bedford A, Yu H, Hernandez M, Squires EJ, Leeson S, Hou Y, Gong J 2017 Response of Ross 308 and 708 broiler strains in growth performance and lipid metabolism to diets containing tributyrates glycerides. *Can J Anim Sci* 98(1):98-108.
- Bowker B, Zhuang H 2017 Woody breast condition in broiler breast meat. In: *Proc. 2017 Midwest Poultry Federation Convention*, St. Paul, Minnesota.
- Bowker B, Zhuang H 2019 Detection of razor shear force differences in broiler breast meat due to the woody breast condition depends on measurement technique and meat state. *Poult Sci* 98(11):6170-6176.
- Brambila GS, Chatterjee D, Bowker B, Zhuang H 2017 Descriptive texture analyses of cooked patties made of chicken breast with the woody breast condition. *Poult Sci* 96(9):3489-3494.
- Cai K, Desai M, Shao W, Chen X, Campbell Y, Nair M, Suman S, Schilling M 2018 Quality characteristics of normal and woody breast meat. *Meat Muscle Biol* 1(2):77.
- Che S, Wang C, Iverson M, Varga C, Barbut S, Bienzle D, Susta L 2022 Characteristics of broiler chicken breast myopathies (spaghetti meat, woody breast, white striping) in Ontario, Canada. *Poult sci* 101(4):101747.
- Che S, Weber L, Novy A, Barbut S, Susta L 2023 Characterization of dorsal recumbency syndrome associated with woody breast in broiler flocks from Ontario, Canada. *Poult Sci* 102(2):102307.
- Gilbert I, Gaudreault N, Gaboury I 2021 Intra- and inter-evaluator reliability of the MyotonPRO for the assessment of the viscoelastic properties of caesarean section scar and unscarred skin. *Skin Res Technol* 27(3):370-375.
- Jia L, Zhang X, Li X, Schilling MW, Peebles ED, Kiess AS, Zhang L 2022 Internal organ and skeletal muscle development in commercial broilers with woody breast myopathy. *Poult Sci* 101(9):102012.
- Kuttappan V, Hargis B, Owens C 2016 White striping and woody breast myopathies in the modern poultry industry: a review. *Poult Sci* 95(11):2724-2733.
- Kuttappan V, Owens C, Coon C, Hargis B, Vazquez-Anon M 2017 Incidence of broiler breast myopathies at 2 different ages and its impact on selected raw meat quality parameters. *Poult Sci* 96(8):3005-3009.
- Lake JA, Dekkers JC, Abasht B 2021 Genetic basis and identification of candidate genes for wooden breast and white striping in commercial broiler chickens. *Sci Rep* 11(1):6785.
- Lee JH, Cho JW 2022 A comparative study on the immediate effect of performing gastrocnemius stretching with and without myofascial release of the sole on ankle dorsiflexion angles and gastrocnemius muscle tone in subjects with limited ankle dorsiflexion. *J Korean Soc Phys Med* 17(1):109-116.
- Lettner J, Graventein L, Hakam HT, Ramadanov N, Becker R, Prill R 2024 Assessment of muscle stiffness using the myotonpro: effects of fatigue on vastus lateralis and medialis muscles. *J Pers Med* 14(3):301.
- Liu J, Puolanne E, Schwartzkopf M, Arner A 2020a Altered sarcomeric structure and function in woody breast myopathy of avian pectoralis major muscle. *Front Physiol* 11:287.
- Liu L, Ren M, Ren K, Jin Y, Yan M 2020b Heat stress impacts on broiler performance: a systematic review and

- meta-analysis. *Poult Sci* 99(11):6205-6211.
- Marie Hubert S, Williams TJ, Athrey G 2018 Insights into the molecular basis of wooden breast based on comparative analysis of fast-and slow-growth broilers. *bioRxiv* 356683.
- Mooney K, Warner M, Stokes M 2013 Symmetry and within-session reliability of mechanical properties of biceps brachii muscles in healthy young adult males using the MyotonPRO device. *Work Pap Health Sci* 1(3):1-11.
- MyotonPro Digital Palpation Device User Manual 2023 Myoton AS. Tallinn, Estonia.
- Nawaz AH, Amoah K, Leng QY, Zheng JH, Zhang WL, Zhang L 2021 Poultry response to heat stress: its physiological, metabolic, and genetic implications on meat production and quality including strategies to improve broiler production in a warming world. *Front Vet Sci* 8:699081.
- OH SH, Noh E, Min B 2024 Applicability of non-invasive, digital palpation device to detection of woody breast conditions in chicken breast muscle. *J Anim Sci Technol* (Unpublished data).
- Osti R, Bhattarai D, Zhou D 2017 Climatic variation: effects on stress levels, feed intake, and bodyweight of broilers. *Braz J Poult Sci* 19:489-496.
- Pang B, Bowker B, Yang Y, Zhang J, Zhuang H 2020 Relationships between instrumental texture measurements and subjective woody breast condition scores in raw broiler breast fillets. *Poult Sci* 99(6):3292-3298.
- Puolanne TEJ, Costandache CG, Ertbjerg P 2021 Influence of woody breast myopathy on sarcomere length and tensile strength in commercial broiler pectoralis major muscle. *Meat Muscle Biol* 5(1):1-11.
- Sun X, Giampietro-Ganeco A, Mueller A, Maynard CJ, Caldas-Cueva JP, Owens CM 2021 Meat quality traits and Blunt Meullenet-Owens Razor Shear characteristics of broiler breast fillets affected by woody breast condition and post-cooking meat temperature. *Poult Sci* 100(8):101212.
- Tijare VV, Yang F, Kuttappan V, Alvarado C, Coon C, Owens C 2016 Meat quality of broiler breast fillets with white striping and woody breast muscle myopathies. *Poult Sci* 95(9):2167-2173.
- Tůmová E, Teimouri A 2010 Fat deposition in the broiler chicken: a review. *Sci Agric Bohem* 41(2):121-128.
- Valenta J, Siddique A, Tůmová E, Slavíček O, Morey A 2023 White striping, woody breast and spaghetti meat: co-occurrence and relationship with breast fillet weight in big broiler chicken flocks. *Czech J Anim Sci* 68(3):129-140.
- Wei H, Zhang R, Su Y, Bi Y, Li X, Zhang X, Li J, Bao J 2018 Effects of acute cold stress after long-term cold stimulation on antioxidant status, heat shock proteins, inflammation and immune cytokines in broiler heart. *Front Physiol* 9:1589.
- Zhang S, SU H, Ying Z, LI X, FENG J, Zhang M 2016 Effects of sustained cold and heat stress on energy intake, growth and mitochondrial function of broiler chickens. *J Integr Agric* 15(10):2336-2342.
- Zhang X, To KV, Jarvis TR, Campbell YL, Hendrix JD, Suman SP, Li S, Antonelo DS, Zhai W, Chen J 2021 Broiler genetics influences proteome profiles of normal and woody breast muscle. *Poult Sci* 100(4):100994.

Received May. 21, 2024, Revised Jun. 1, 2024, Accepted Jun. 6, 2024