

## Research Article

# Estimation of Genetic Parameters for Production and Reproduction Traits in Korean Landrace and Yorkshire Pigs

Ji-Won Kim<sup>†</sup>, Sang-min Lee<sup>†</sup>, Joon-Ki Hong<sup>†</sup>, Chang-Gwon Dang<sup>†</sup>, Ha-Seung Seong<sup>†</sup>, Jaeboem Cha<sup>†</sup>, Eun-Ho Kim<sup>†</sup>, Woncheoul Park<sup>†</sup>, Jongan Lee<sup>†</sup>, Haesu Ko<sup>†</sup>, Suyeon Maeng<sup>†</sup>, Mahboob Alam<sup>†</sup>, DongKyu Lee<sup>†</sup>, Mina Park<sup>\*</sup>

Animal Breeding & Genetics Division, National Institute of Animal Science, Cheonan-si 31000, Republic of Korea

<sup>†</sup>These authors contributed equally to this work.

<sup>\*</sup>Corresponding author: [mina0412@korea.kr](mailto:mina0412@korea.kr)

## ABSTRACT

This study estimated genetic parameters and genetic trends for production (days to 105 kg, DAYS105; backfat thickness, BFT) and reproductive traits (total number born, TNB; number born alive, NBA) in Korean Landrace and Yorkshire pigs using data collected from 2000 to 2024. Heritabilities for production traits were moderate to high (0.43-0.52), whereas those for reproductive traits were low (0.08-0.12). A negative genetic correlation (-0.15 to -0.18) was observed between DAYS105 and BFT, suggesting a genetic antagonism where selection for faster growth could lead to increased backfat thickness. Analysis of genetic trends over the 25 year period revealed substantial genetic progress, characterized by a continuous reduction in DAYS105 and an increase in litter size traits (TNB and NBA) for both breeds. The Yorkshire population showed higher accuracy in estimated breeding values compared to Landrace, attributed to its larger reference population size. These results highlight the confirmed effectiveness of the national breeding program and suggest the need for a balanced selection index considering unfavorable correlations, as well as the expansion of reference populations for further genetic improvement in maternal pig lines.

**Keywords:** Genetic parameter, Production trait, Reproduction trait, Landrace, Yorkshire

## INTRODUCTION

종돈 산업은 모계품종인 랜드레이스, 요크셔와 부계 품종인 두록을 활용한 3원 교잡종 생산 시스템을 기반으로 하며, 종돈의 유전적 능력은 비육능가의 생산성과 수익성을 결정하는 핵심요인이다(Stalder et al., 2003). 특히 모계 종돈은 일반적으로 총산자수(Total Number Born, TNB), 생존산자수(Number Born Alive, NBA)와 같은 번식 형질의 우수성이 농가의 경제적 이익과 직결되므로, 이를 주요 선발 지표로 활용한 지속적인 개량이 요구된다.

한국의 국가 단위 개량 사업인 돼지개량 네트워크 구축사업에서는 모계품종인 요크셔 및 랜드레이스의 총산자수와 생존산자수를 고려한 선발 지수를 적용하여 우수 종돈을 선발하고 있다. 하지만 모계품종 종돈에서도 산육 형질 유전능력이 중요하므로 105 kg 도달 일령(Days to 105 kg, DAYS105) 및 등지방두께(Backfat thickness, BFT)의 유전능력 평가 체계를 구축하고, 번식 및 산육 형질의 유전모수 추정의 필요성이 제기되고 있다(Alam et al., 2021).

돼지개량 네트워크 구축사업은 지난 2008년 시작된 이후 18개 참여 종돈장의 검정 자료를 통합 및 수집하며 한국형 종돈 선발의 기반을 다져왔다. 따라서 변화하는 산업 환경과 검정 기준을 반영한 최신 집단의 유전모수 추정은 국가 단위 유전 능력 평가의 정확도를 높이는 데 있어 중요하다(NIAS, 2017). 이에 따라, 본 연구는 2000년부터 2024년까지 돼지개량 네트워크 구축사업을 통해 수집된 랜드레이스와 요크셔의 검정 자료를 활용하여, 산육 형질(DAYS105, BFT)과 번식 형질(TNB, NBA)의 유전모수를 추정하고자 하였다. 기존

국내 유전모수 연구가 단 기간, 단일 품종의 단 형질을 대상으로 수행된 것과 달리, 본 연구는 25년에 걸친 국가단위 돼지 개량 사업의 대규모 자료를 이용하여 두 모계 품종의 산육 및 번식 형질의 유전적 추세를 동시에 평가함으로써 국가 종돈 개량 성과를 실증적으로 검증하였다는 점에서 차별성을 갖는다. 또한 산육·번식 형질 간 유전적 상충 관계를 고려한 균형 잡힌 선발 지수 설정에 실용적 근거를 제공한다는 산업적 의의가 있다.

## MATERIALS AND METHODS

### 공시재료

본 연구는 2000년 1월부터 2024년 12월까지 돼지개량 네트워크 구축 사업에 참여한 국내 주요 종돈장(랜드레이스 10개소, 요크셔 11개소)에서 수집된 검정 자료를 이용하였다. 분석 형질은 산육 형질인 DAYS105과 BFT, 번식 형질인 TNB와 NBA 네 가지 형질을 이용하였다.

산육 형질 분석에는 랜드레이스 55,972두와 요크셔 224,485두의 기록이 이용되었으며, 번식 형질 분석에는 랜드레이스 17,695두와 요크셔 82,687두의 기록이 이용되었다.

### 검정자료 보정 및 이상치 제거

모든 산육 형질의 측정치는 가축검정기준(MAFRA, 2024)에 제시된 보정식을 적용하여 종료 체중을 105 kg 기준으로 보정하였다.

DAYS105 수식의 아랫첨자  $m$ 은 검정 시점에서의 실측값(measured value)을 의미하며,  $AGE_m$ 은 측정 시 실제 일령(일),  $BWT_m$ 은 측정 시 실제 체중(kg)을 나타내었다. 이때 보정 계수는 성별에 따라 수컷 63.3, 암컷 47.3으로 적용하였다.

$$DAYS105 = AGE_m + \frac{(105 \text{ kg} - BWT_m) \times (AGE_m - 63.3(\text{sire}) \text{ or } 47.3(\text{dam}))}{BWT_m}$$

$BFT$ 는 105 kg 도달 시점으로 보정된 등지방두께로,  $BFT_m$ 은 측정 시 등지방두께(mm)로 나타내었다. 등지방두께 보정 계수는 성별에 따라 수컷 2.6, 암컷 3.7을 적용하였다.

$$BFT = BFT_m + \frac{(105 \text{ kg} - BWT_m) \times (BFT_m - 2.6(\text{sire}) \text{ or } 3.7(\text{dam}))}{BWT_m}$$

TNB는 다음과 같이 계산된다.

$$TNB = \text{정상} + \text{기형} + \text{체중미달} + \text{사산} + \text{미이라}$$

NBA는 다음과 같이 계산된다.

$$NBA = \text{정상} + \text{기형} + \text{체중미달}$$

데이터의 통계적 신뢰도를 확보하기 위해 각 형질별 평균으로부터  $\pm 3$  표준편차(Mean  $\pm$  3SD)를 벗어나는 기록은 이상치로 간주하여 분석에서 제외하였다. 최종 분석에 이용된 산육 형질 데이터는 랜드레이스 55,575두, 요크셔 223,198두였으며, 번식 형질 데이터는 랜드레이스 17,572두, 요크셔 81,258두였다.

## 혈통 자료

혈통 자료는 RENUMF90 프로그램(Misztal et al., 2002)을 이용하여 표현형이 존재하는 개체와 연결된 모든 조상을 추적하였으며, 혈통 최적화(Pruning) 과정을 거쳐 최종 혈통 파일을 구축하였다. 산육 형질 관련 혈통 정보는 랜드레이스 63,198두, 요크셔 241,448두로 구성되었다. 또한, 번식 형질 관련 혈통 정보는 랜드레이스 14,193두, 요크셔 45,738두로 구성되었다.

## 통계 분석 모형

산육 형질과 번식 형질의 유전모수 추정 및 육종가 산출을 위해 BLUPF90 family programs(Misztal et al., 2002)를 이용하였으며, 각 형질의 특성에 따라 서로 다른 모형을 설정하였다.

먼저, 산육 형질인 DAYS105와 BFT의 유전모수 추정을 위해 다형질 개체모형(Multiple-traits Animal Model)을 적용하였으며, 선형 모형식은 다음과 같다.

$$y = Xb + Za + e$$

여기서  $y$ 는 각 개체의 관측치(DAYS105, BFT)에 대한 벡터이고,  $b$ 는 고정 효과(동기군: 농장-검정종료연도-검정종료주, 성별) 벡터,  $a$ 는 임의 효과인 상가적 유전 효과(Additive genetic effect) 벡터,  $e$ 는 임의 잔차(Random residual error) 벡터이다.  $X$ 와  $Z$ 는 각각 고정 효과와 상가적 유전 효과를 관측치에 연결하는 계수 행렬(Incidence matrix)이다. 이때, 상가적 유전 효과의 분산 구조는  $\text{Var}(a) = A\sigma_a^2$ 로 가정하였으며, 여기서  $A$ 는 혈통 정보를 이용하여 유도된 개체 간의 혈연계수 행렬(Numerator Relationship Matrix)이다(Henderson, 1975). 또한, 잔차 효과의 분산은  $\text{Var}(e) = I\sigma_e^2$ 로 가정하였는데, 여기서  $I$ 는 관측치 수에 상응하는 차원을 갖는 단위 행렬(Identity Matrix)이다.

반면, 번식 형질인 TNB와 NBA는 모든 반복적인 분만 기록을 반영하기 위해 단형질 반복력 개체모형(Single-trait Repeatability Animal Model)을 적용하였으며, 모형식은 다음과 같다.

$$y = Xb + Za + Wpe + e$$

여기서  $y$ 는 번식 형질의 관측치 벡터이며,  $b$ 는 고정 효과(동기군: 농장-번식연도-번식계절, 산차) 벡터이다.  $a$ 는 상가적 유전 효과,  $pe$ 는 반복 관측에 따른 영구 환경 효과(Permanent environmental effect) 벡터,  $e$ 는 잔차 벡터를 나타낸다.  $X, Z, W$ 는 각 효과에 대한 계수 행렬이다. 번식 형질 모델에서도 상가적 유전 효과의 분산 구조는 앞서 기술한  $A$  행렬(혈연계수 행렬)을 따르며, 영구 환경 효과( $pe$ )와 잔차( $e$ )는 서로 독립적인 단위 행렬( $I$ ) 구조를 가정하였다.

임의효과에 대한 분산-공분산 구조는 다음과 같다.

$$\text{Var} \begin{bmatrix} a \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \otimes A & 0 \\ 0 & R \otimes I \end{bmatrix}$$

$G$ 는 유전 분산-공분산 행렬,  $R$ 은 잔차 분산-공분산 행렬,  $A$ 는 혈통 기반의 혈연 계수 행렬(Numerator Relationship Matrix),  $I$ 는 항등 행렬(Identity Matrix),  $\otimes$ 는 크로네커 곱(Kronecker product)을 의미한다.

각 형질의 유전력과 유전상관은 다음과 같이 추정되었다.

$$h^2 = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_a^2 + \sigma_e^2}, \quad r^2 = \frac{\sigma_{a12}}{\sqrt{\sigma_{a1}^2 \cdot \sigma_{a2}^2}}$$

$\sigma_a^2$ 는 유전분산,  $\sigma_e^2$ 는 잔차분산,  $\sigma_{a12}$ 는 두 형질 간의 유전공분산을 나타낸다.

유전모수 추정은 BLUPF90+ 프로그램을 이용하였으며, AI-REML(Average Information Restricted Maximum Likelihood) 알고리즘을 구현하는 method VCE 옵션을 적용하여 분석하였다. 수렴 기준은 해당 소프트웨어 공식 매뉴얼에서 권장하는 기본값인  $10^{-12}$ 을 적용하였다. 유전모수 추정치의 근사 표준오차(Approximate SE)는 Houle와 Meyer (2015)가 제안한 REML-MVN 방식을 적용하여 계산하였으며, 이는 BLUPF90+ 소프트웨어의 `se_covar_function` 옵션을 이용하여 분석하였다. 또한, 형질의 유전 표준 편차( $\sigma_a^2$ )와 그 평균의 비율을 상가적 유전 변동 계수( $CV_g$ )로 나타내었다. 추정된 분산 및 공분산 성분을 바탕으로 Henderson (1975)이 제안한 혼합모형 방정식(Mixed Model Equations, MME)을 이용하여 각 개체의 육종가를 산출하였다. 육종가의 정확도는 National Swine Improvement Federation (NSIF, 2002)의 가이드라인에 따라 참 육종가와 추정 육종가 간의 상관계수( $r_{11}$ )로 정의하였으며, 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$Accuracy = \sqrt{1 - \frac{PEV}{\sigma_a^2}}$$

여기서  $\sigma_a^2$  는 해당 형질의 상가적 유전분산이며, PEV (prediction Error Variance)는 예측 오차 분산으로 혼합모형방정식 계수 행렬의 역행렬 대각원소로부터 산출되었다.

## RESULTS AND DISCUSSION

### 1. 기초통계량 분석

Table 1은 랜드레이스, 요크셔의 DAYS105, BFT에 대한 기초통계량을 나타내었다. 랜드레이스(N=55,575)의 DAYS105 평균은  $158.77 \pm 12.46$  일이었으며, 요크셔(N=223,198)는  $158.04 \pm 13.46$ 로 나타나 두 품종에서 유사한 값을 보였다. 랜드레이스 및 요크셔의 BFT 평균은  $14.91 \pm 2.85$ ,  $14.87 \pm 2.64$ 로 나타났다. BFT의 경우도 마찬가지로 두 품종에서 유사한 값을 보였다. 형질의 변이 정도를 나타내는 변동계수(Coefficient of Variation, CV)를 산출한 결과, DAYS105은 두 품종 모두 약 7.5%~8.5% 수준으로 비교적 균일하게 나타났다. 반면, BFT의 변동계수는 랜드레이스 19.11%, 요크셔 18.23%로 DAYS105에 비해 약 2배 이상 높게 나타났다. 이는 산육 형질에 비해 등지방 축적 형질에서 개체 간의 표현형적 변이가 더 큼을 시사한다(Johnson et al., 1999).

**Table 1.** Descriptive statistics for production traits in Korean Landrace and Yorkshire pigs

Breed	Traits	N	Mean	SD	Min	Max	CV (%)
Landrace	DAYS105 (day)	55,575	158.77	12.46	122.00	190.00	7.85
	BFT (mm)	55,575	14.91	2.85	8.00	23.60	19.11
Yorkshire	DAYS105 (day)	223,198	158.04	13.46	120.00	190.00	8.52
	BFT (mm)	223,198	14.87	2.64	8.00	23.06	18.23

DAYS105, Days to 105 kg body weight; BFT, Backfat thickness; N, Total sample size; SD, Standard deviation; CV, Coefficient of variation.

번식 형질에 대한 기초 통계량은 Table 2에 제시되었다. 랜드레이스(N=17,572) TNB 평균은  $12.57 \pm 3.33$ 두, 요크셔(N=81,258)는  $12.22 \pm 3.19$ 두로 나타났다. NBA의 경우 랜드레이스(N=17,572)는  $11.60 \pm 3.02$ 두, 요크셔(N=81,258)는  $12.17 \pm 3.36$ 두로 조사되었다. TNB에서는 랜드레이스가 다소 높게 나타났으나, 실질적인 경제 형질인 NBA는 요크셔가 더 높았다. CV를 비교해 볼 때, 번식 형질은 26.03%~27.61%의 범위로 나타나 산육 형질(7~19%)에 비해 월등히 높은 변이를 보였다. 이는 번식 성적이 유전적 능력뿐만 아니라 사양 환경, 산차, 질병 등 외부 요인에 의해 크게 영향을 받음을 시사한다(Yang et al., 2024).

**Table 2.** Descriptive statistics for reproduction traits in Korean Landrace and Yorkshire pigs

Breed	Traits	N	Mean	SD	Min	Max	CV (%)
Landrace	TNB	17,572	12.57	3.33	3.00	22.00	26.49
	NBA	17,572	11.60	3.02	3.00	20.00	26.03
Yorkshire	TNB	81,258	12.22	3.19	4.00	20.00	26.10
	NBA	81,258	12.17	3.36	2.00	22.00	27.61

TNB, Total Number Born; NBA, Number Born Alive; N, Total sample size; SD, Standard deviation; CV, Coefficient of variation.

## 2. 유전모수 추정

Table 3은 DAYS105, BFT 형질의 분산 성분(유전 및 잔차), 유전력( $h^2$ ), 유전 상관( $r_g$ ) 추정치를 나타낸다. DAYS105 형질의 유전력은 랜드레이스 품종에서  $0.46 \pm 0.01$ , 요크셔에서는  $0.43 \pm 0.01$ 로 추정되었다. DAYS105의 변동계수는 두 품종 모두 4%로 나타났다. BFT의 유전력은 랜드레이스  $0.52 \pm 0.01$ , 요크셔에서는  $0.45 \pm 0.01$ 로 나타났으며, 변동계수는 11~12%의 수치를 보였다. 일반적으로 유전력이 0.4 이상인 경우 고도의 유전력을 가진 형질로 분류하는데, 본 연구 결과 두 품종 및 두 형질 모두 높은 유전력을 보였다 (Clutter, 2011; Hermesch et al., 2000). 그 중에서도 랜드레이스의 BFT 유전력이 0.52로 가장 높게 나타났다. 이는 산육 형질이 환경적 요인보다 유전적 요인의 영향을 강하게 받음을 의미하며, 따라서 표현형 성적에 근거한 개체 선발(Mass Selection)도 유의미한 유전적 개량을 기대할 수 있음을 시사한다(Johnson et al., 1999). 품종 간 비교에서는 랜드레이스가 요크셔에 비해 두 형질 모두에서 다소 높은 유전력을 보였는데, 이는 랜드레이스의 유전적 분산이 요크셔에 비해 상대적으로 크게 유지되고 있거나, 환경적 변이가 더 효과적으로 통제되었을 가능성을 시사한다(Zhang and Zhang, 2016; Lopez et al., 2018; Ogawa et al., 2023).

**Table 3.** Estimates of heritability (diagonals) and genetic correlations (upper diagonal) and phenotypic correlation (lower diagonal) of production traits with standard error in Landrace and Yorkshire pigs using a multiple-trait animal model.

Breed	Trait	Genetic Parameter Estimates		Genetic Variance	Residual Variance	CV <sub>g</sub>
		DAYS105	BFT			
Landrace	DAYS105	$0.46 \pm 0.01$	$-0.15 \pm 0.02$	$50.30 \pm 1.62$	$57.64 \pm 0.92$	0.04
	BFT	$-0.10 \pm 0.01$	$0.52 \pm 0.01$	$3.44 \pm 1.01$	$3.18 \pm 0.06$	0.12
Yorkshire	DAYS105	$0.43 \pm 0.01$	$-0.18 \pm 0.01$	$47.90 \pm 0.83$	$61.56 \pm 0.48$	0.04
	BFT	$-0.13 \pm 0.00$	$0.45 \pm 0.01$	$2.73 \pm 0.05$	$3.38 \pm 0.03$	0.11

DAYS105, days to 105 kg body weight; BFT, backfat thickness; CV<sub>g</sub>, genetic coefficient of variation.

DAYS105과 BFT 간의 유전상관은 두 품종 모두에서 약한 음의 상관관계를 보였다(랜드레이스  $-0.15$ , 요크셔  $-0.18$ ). 이는 유전적으로 성장이 빠른 개체(도달일령 단축)일수록 등지방두께가 오히려 두꺼워지는 경향이 있음을 나타낸다(Choy et al., 2015). 이러한 음의 상관관계는 최근 종돈 개량의 방향이 빠른 성장과 얇은 등지방이라는 두 가지 목표를 동시에 추구함에 따라 발생한 유전적 길항 관계(Antagonism)로 해석될 수 있다(Clutter, 2011; Hermesch et al., 2000; Holm et al., 2004). 즉, 성장이 빠른 쪽으로만 선발을 진행할 경우 등지방이 두꺼워질 위험이 있어 향후 육종 계획 수립 시에는 이러한 유전 상관을 고려하여, 두 형질의 경제적 가중치를 적절히 조절한 선발 지수(Selection Index) 구성이 필요하다(Clutter, 2011; Dekkers, 2007).

TNB와 NBA 형질에 대한 분산 성분(유전 및 잔차), 유전력( $h^2$ ), 유전 상관( $r_g$ ) 추정치는 Table 4에 나타내었다. TNB 형질의  $h^2$  값은 랜드레이스에서 0.09, 요크셔에서 0.12로 추정되었다. TNB의 변동계수는 7.1~9.2%로 나타났다. NBA 형질의  $h^2$  값은 랜드레이스 0.08, 요크셔는 0.10으로 나타났다. NBA의 변동계수는 6.5~7.7%로 나타났다. 본 연구에서는 번식 형질의 유전모수 추정을 위해 단 형질 모형(Single-trait model)을 적용하였으므로, TNB와 NBA 간의 유전상관은 추정하지 않았다.

**Table 4.** Estimates of variance components and genetic parameters for reproduction traits in Landrace and Yorkshire pigs using a single-trait animal model.

Breed	Trait	$\sigma_a^2$	$\sigma_{pe}^2$	$\sigma_e^2$	$h^2$	$c^2$	r	$CV_g$
Landrace	TNB	0.80±0.10	0.73±0.10	7.28±0.09	0.09±0.01	0.08±0.01	0.17±0.01	7.10
	NBA	0.58±0.08	0.54±0.09	6.30±0.08	0.08±0.01	0.07±0.01	0.15±0.01	6.55
Yorkshire	TNB	1.26±0.07	1.01±0.06	8.55±0.05	0.12±0.01	0.09±0.01	0.21±0.00	9.20
	NBA	0.89±0.05	0.81±0.05	7.20±0.04	0.10±0.01	0.09±0.01	0.19±0.00	7.74

$\sigma_a^2$ , additive genetic variance;  $\sigma_{pe}^2$ , permanent environmental variance;  $\sigma_e^2$ , residual variance;  $h^2$ , heritability;  $c^2$ , ratio of permanent environmental variance to phenotypic variance; r, repeatability;  $CV_g$ , genetic coefficient of variation.

산육 형질의 유전력이 0.4~0.5 수준인 것과 대조적으로, 번식 형질은 0.1 이하의 매우 낮은 유전력을 보였다. 이러한 결과는 한국형 종돈을 대상으로 수행된 선행 연구(Alam et al., 2021)에서 산육 형질의 유전력이 0.34~0.48, 번식 형질이 0.09~0.11 범위로 보고된 것과 부합하는 수치이다. 이는 번식 형질의 표현형 분산 중 유전적 요인이 설명하는 비율이 10% 정도에 불과하며, 나머지 90%는 환경적 요인 등에 기인함을 시사한다. 따라서 번식 형질의 개량을 위해서는 단순한 표현형 선발보다는 혈통 정보와 친척 기록을 통합한 BLUP 평가법을 적용하여 유전적 능력을 정확히 추정하는 것이 필요하다(Misztal et al., 2002).

본 연구에서 특히 주목해야 할 결과는 영구환경효과와 비중이다. 랜드레이스의 경우 TNB와 NBA의 영구환경효과 분산 비율은 각각 0.08, 0.07로 유전력과 거의 대등한 수준으로 나타났다. 요크셔 또한 영구환경효과 비율이 약 0.09로 유전력(0.12, 0.10)에 근접하였다. 이러한 경향은 최근 Yang et al. (2024)의 연구에서도 NBA의 유전력이 0.076, 영구환경효과 비율이 0.072로 보고되어 두 성분이 매우 유사한 수준으로 추정된 결과와 일치한다.

반복력은 유전력과 영구환경효과와의 합으로, 랜드레이스 0.15~0.17, 요크셔 0.19~0.21 수준으로 추정되었다. 반복력은 초기 산차의 기록이 이후 산차의 기록을 얼마나 잘 예측할 수 있는지를 나타내는 지표이다. 본 연구의 결과인 0.2 수준의 반복력은 한 산차의 성적 이 다음 산차로 이어질 확률이 높지 않음을 시사한다(Hanenberg et al., 2001). 단일 산차의 기록만으로 우수 모돈을 선발하거나 도태시키는 것은 정확도가 낮을 수 있으므로, 가급적 다산차의 누적 기록을 활용하여 모돈의 능력을 평가하는 것이 바람직하다.

한편, 본 연구에서는 분석 모형 및 집단 구조의 차이로 인해 산육 형질과 번식 형질 간의 유전 상관관을 직접 추정하지 않았으나, 다수의 선행 연구들은 두 형질군 사이에 유전적 길항 관계가 존재할 가능성을 시사하고 있다. Holm et al. (2004)과 Lopez et al. (2018)은 돼지의 성장 속도가 빠르고 등지방이 얇은 방향으로 개량이 진행될수록 산자수와 같은 번식 성적은 다소 저하되는 경향이 있음을 보고하였다. 특히 최근 Yang et al. (2024)의 연구에서도 DAYS105와 NBA 간에 약 0.37의 양의 유전상관이 확인되었는데, 이는 성장이 빠를수록 NBA가 감소할 수 있음을 시사한다. 따라서 향후 국가 단위 유전능력 평가 및 선발 지수 설정 시, 이러한 산육 형질과 번식 형질 간의 상충 관계를 충분히 고려하여 한쪽 형질의 과도한 개량이 다른 형질의 능력을 저하시키지 않도록 가중치를 조절하는 균형 잡힌 육종 전략이 요구된다.

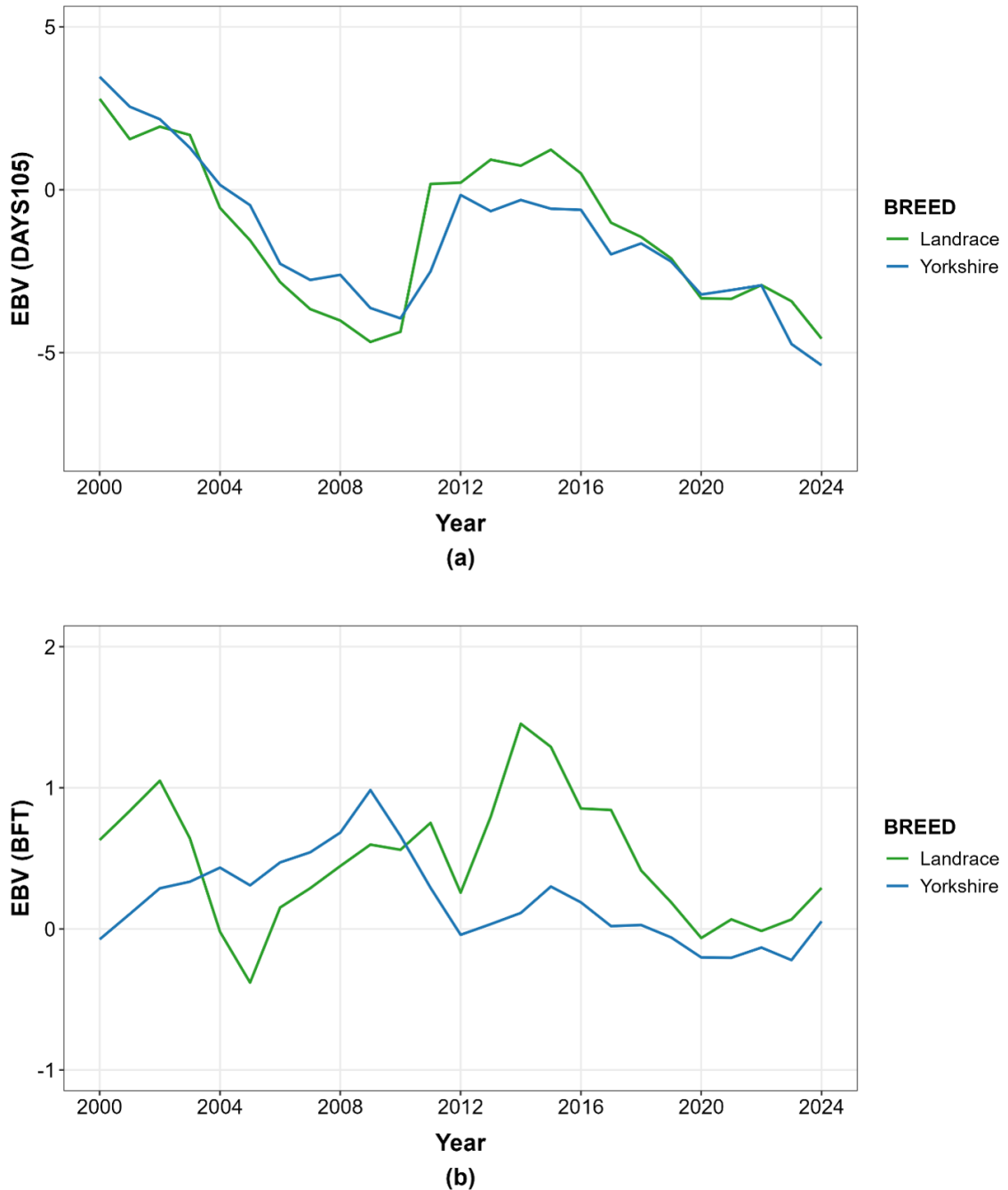
### 3. 유전적 추세 및 정확도

#### 3.1. 산육 형질의 유전적 추세

유전적 추세는 산육 형질의 경우 검정종료연도를, 번식 형질의 경우 번식연도를 기준으로 연도별로 구분한 후, 각 연도에 속한 개체의 평균 육종가(EBV)를 산출하여 나타내었다.

Fig. 1은 2000년부터 2024년까지 랜드레이스와 요크셔의 산육 형질에 대한 연도별 평균 육종가 변화를 보여준다. 두 품종 모두 지난 24년 DAYS105를 단축시키는 방향으로 뚜렷한 유전적 개량이 이루어졌다. 2000년 기준 랜드레이스와 요크셔의 평균 EBV는 각각 2.79 일, 3.47 일이었으나, 2024년에는 각각 -4.57 일, -5.39 일로 감소하였다. 전체 기간 동안의 총 유전적 개량량은 요크셔가 -8.86 일로 랜드레이스의 -7.36 일보다 더 큰 개량 성과를 보였다.

Fig. 1(a)에서 시기별 추세를 상세히 살펴보면, 2000년부터 2010년까지는 급격한 감소 추세(개량 가속화)를 보였으나, 2011년부터



**Figure 1.** Genetic trends for production traits in Landrace and Yorkshire populations. (a) Days to 105 kg (DAYS105), (b) Backfat thickness (BFT).

2015년 사이에는 육종가가 일시적으로 상승하며 개량이 정체되는 양상이 관찰되었다. 이는 2010년~2011년 국내에서 발생한 대규모 구제역으로 인한 사육 두수 감소 및 이후 종돈군 재조성 과정에서 선발 강도의 변화와 자료 구조의 불균형이 반영된 결과로 해석된다(Kim and Tejada, 2018). 그러나 2016년 이후 다시 DAYS105가 지속적으로 감소함에 따라, 장기적으로는 산육 형질에 대한 유전적 개량이 안정적으로 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 1(b)에서 BFT의 유전적 추세는 품종 간 상이한 패턴을 보였다. 랜드레이스는 2000년 0.630 mm에서 2014년 1.45 mm까지 증가하는 경향을 보였으나, 이후 감소세로 전환되어 2024년 0.290 mm를 기록, 전체적으로 낮아지는 방향(-0.340 mm)으로 개량되었다. 앞선 유전모수 추정 결과 DAYS105와 BFT 간에는 음의 유전상관이 존재하였음에도 불구하고 두 형질이 동시에 감소한 것은, 해당 기간 랜드레이스 선발 지수 내에서 정육율 향상(등지방 감소)에 높은 가중치가 부여되었음을 시사한다.

반면, 요크셔는 DAYS105가 -8.86 일로 크게 단축되었음에도 불구하고, BFT는 2000년 -0.074 mm에서 2024년 0.053 mm로 소폭 상승(+0.128 mm)하거나 일정 수준을 유지하는 경향을 보였다. 현대 양돈 산업에서 모계 품종의 지나친 저지방화는 번식 성적 저하 및 연산성(Longevity) 감소와 연관될 수 있다(Knap, 2005). 따라서 요크셔의 이러한 개량량 변화 추세는 단순한 정육형 돼지 선발을 지양하고, 강건성(Robustness)과 번식 능력을 유지하기 위한 전략적 육종 목표가 반영된 결과로 해석된다(Merks, 2000).

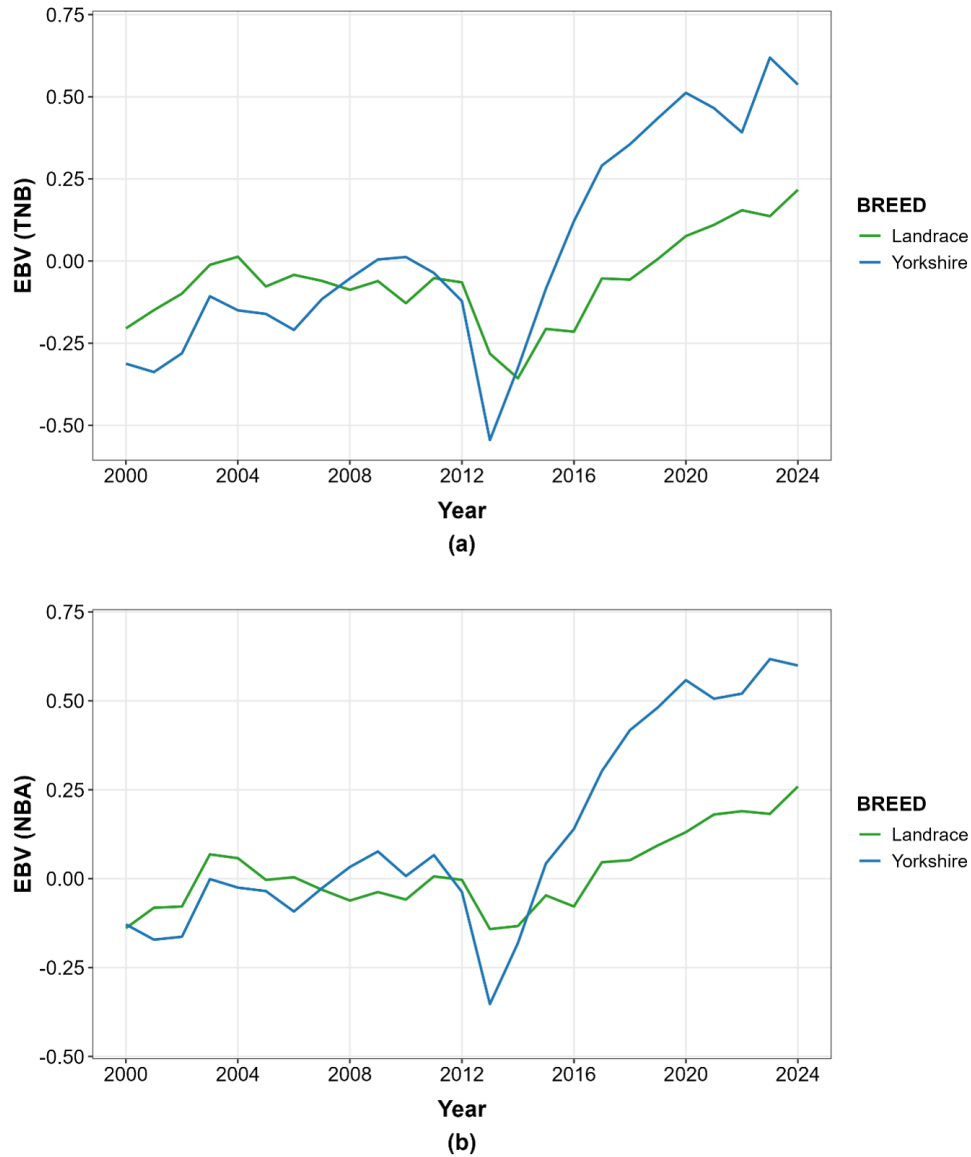
### 3.2. 번식 형질의 유전적 추세

Fig. 2는 TNB와 NBA에 대한 유전적 추세를 보여준다. 분석 결과, 산육 형질에 비해 번식 형질의 개량은 2010년대 중반 이후 본격화된 것으로 나타났다. 분석 초기인 2000년부터 2012년까지 두 형질 모두 0 수준을 중심으로 등락을 반복하며 뚜렷한 개량 추세를 보이지 않았다. 특히 2013년에는 요크셔에서 TNB(-0.545)와 NBA(-0.353) 육종가의 급격한 하락이 관찰되었다. 이는 앞서 산육 형질에서 언급한 2010-2011년 구제역 사태의 영향이 번식 돈군 구성에 시차를 두고 반영된 결과로 해석된다. 대규모 살처분 이후 2011~2012년에 걸쳐 긴급하게 조성된 후보돈군이 2013년 본격적인 번식 성적을 내면서, 초기 유전적 기반이 일시적으로 불안정했던 것으로 판단된다. 본 연구의 번식 형질 EBV는 번식연도(분만연도)를 기준으로 집계되므로, 2010-2011년 구제역으로 인한 사육두수 급감과 후보돈 긴급 보충이 실제 분만 실적에 반영되는 시점인 2013년에 해당 영향이 직접적으로 나타난 것으로 해석된다(Kim and Tejada, 2018).

그러나 2014년을 기점으로 두 품종 모두에서 번식 형질에 대한 강력한 정(+)의 유전적 진전이 확인되었다. 특히 요크셔의 개량 속도가 랜드레이스를 압도하는 양상을 보였다. 요크셔의 NBA 육종가는 2000년 -0.129두에서 2024년 0.599두로 증가하여 총 0.728두의 유전적 개량을 달성하였다. 이는 동 기간 랜드레이스가 0.398두 개량된 것과 비교하여 약 1.8배 높은 수치이다. TNB 역시 요크셔가 총 0.849두 증가하여 랜드레이스의 0.422두 대비 약 2배에 달하는 높은 증가폭을 기록하였다. 이러한 결과는 최근 국내 종돈 시장에서 요크셔가 주 모계 라인으로서 번식 능력 개량에 집중적인 선발 압력을 받았음을 의미하며, 2015년 이후 다산성 종돈의 적극적인 도입 및 선발 지수 내 번식 형질 가중치 상향 조정이 효과적으로 작용한 결과로 판단된다(MAFRA, 2021).

### 3.3. 육종가 추정의 정확도

본 연구에서 추정된 육종가의 평균 정확도(Mean Accuracy)는 산육 형질의 경우 0.35~0.40, 번식 형질은 0.37~0.51 수준으로 나타났다. 품종별로는 요크셔의 정확도(TNB 0.51, DAYS105 0.37)가 랜드레이스(TNB 0.37, DAYS105 0.35)보다 전반적으로 높게 추정되었다. 이러한 차이는 참조 집단의 규모 차이에 기인한다. 본 연구에 사용된 요크셔의 데이터(약 24만 두)는 랜드레이스(약 6만 두)에 비해 월등히 많았으며, 혈통 정보의 축적량 또한 반대하였다. 이는 참조 집단의 크기와 유전적 연결성(Genetic connectedness)이 육종가 추정의 신뢰도를 결정하는 핵심 요인임을 증명한 선행 연구들과 일치하는 결과이다(Pszczola et al., 2012; Mrode, 2014). 또한, Ogawa et al. (2023)과 Zhang et al. (2016)의 연구에서도 모집단 규모가 큰 품종에서 예측 오차 분산이 감소하여 정확도가 향상됨이 보고된 바 있다. 다만, 품종 간 정확도 차이를 참조 집단의 규모만으로 단정하기는 어려우며, 혈통 기록의 깊이, 농장 간 유전적 연결성, 자료 구조의 균형성, 형질별 선발 강도의 차이 등 여러 요인이 복합적으로 육종가 추정의 정확도에 영향을 미칠 수 있으므로 이러한 가능성 또한 배제할 수 없다. 따라서 향후 랜드레이스의 개량 효율을 높이기 위해서는 지속적인 데이터 축적과 참조 집단 확대가 필수적임을 시사한다.



**Figure 2.** Genetic trends for reproductive traits in Landrace and Yorkshire populations. (a) Total number of born (TNB), (b) Number of born alive (NBA).

## CONCLUSION

본 연구는 2000년부터 2024년까지 국내 주요 종돈장에서 수집된 랜드레이스와 요크셔의 대규모 검정 기록을 이용하여 산육 형질 (DAYS105, BFT)과 번식 형질(TNB, NBA)에 대한 유전모수를 추정하였다.

분석 결과, 산육 형질의 유전력은 0.43~0.52의 중·고도 수준으로 추정되어, 개체 선발을 통한 유전적 개량 효율이 높을 것으로 기대된다. 그러나 DAYS105와 BFT 간에 확인된 부(-)의 유전상관(-0.15~0.18)은 성장 속도 단축을 위한 고강도의 선발이 등지방 축적을 초래할 수 있음을 시사한다. 따라서 육종 목표 설정 시 두 형질 간의 경제적 가중치를 조절하여, 성장이 빠르면서도 적정 등지방을 유지할 수 있는 정교한 선발 전략이 요구된다. 번식 형질의 경우, 유전력은 0.08~0.12로 낮게 추정되었으나 영구환경효과

(0.07~0.09)가 유전력과 유사한 수준을 보여, 모든의 반복 기록을 반영한 선발 모형의 적용이 육종가 추정의 정확도 향상에 필수적임을 확인하였다. 특히 요크셔는 랜드레이스에 비해 일부 형질에서 유전적 분산이 크고 육종가 추정의 정확도가 높게 나타났는데, 이는 참조집단 규모 등 여러 요인이 복합적으로 작용한 결과로 보이며, 두 품종 모두 지속적인 데이터 축적이 필요하다. 결론적으로 국가 단위 모계 종돈 개량을 가속화하기 위해서는 다음과 같은 전략적 접근이 필요하다. 첫째, 번식 형질 개량에 있어 단순한 TNB의 증대보다는 실질적인 농가 수익성 향상에 기여하는 NBA위주의 개량 목표 설정이 이루어져야 한다. 둘째, 산육 능력과 번식 성적 간의 상이한 유전적 특성과 상충 관계를 고려한 균형 잡힌 선발 지수의 개발 및 적용이 필요하다. 마지막으로, 요크셔에 비해 참조집단의 규모가 상대적으로 작은 랜드레이스의 개량 효율 제고를 위해, 랜드레이스 집단의 규모를 지속적으로 확대하고 개체의 유전체 정보 활용 등 혈통 연결성을 강화하는 노력이 병행되어야 할 것이다.

## CONFLICT OF INTERESTS

No potential conflict of interest relevant to this article is reported.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 2026년도 농촌진흥청 국립축산과학원 전문연구원 과정 지원사업(과제번호: PJ01670305)에 의해 이루어진 것임.

## REFERENCES

- Alam M, Chang HK, Lee SS, Choi TJ. 2021. Genetic analysis of major production and reproduction traits of Korean Duroc, Landrace and Yorkshire pigs. *Animals* 11(5):1321.
- Choy YH, Mahboob A, Cho CI, Choi JG, Choi IS, Choi TJ, Kim SD, Park BH. 2015. Genetic parameters of pre-adjusted body weight growth and ultrasound measures of body tissue development in three seedstock pig breed populations in Korea. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 28(12):1696.
- Clutter AC. 2011. Genetics of performance traits. In *The genetics of the pig* (pp. 325–354). Wallingford UK: CABI.
- Dekkers JC. 2007. Marker-assisted selection for commercial crossbred performance. *Journal of Animal Science* 85(9):2104–2114. DOI:10.2527/jas.2006-683
- Hanenberg EHAT, Knol EF, Merks JWM. 2001. Estimates of genetic parameters for reproduction traits at different parities in Dutch Landrace pigs. *Livestock Production Science* 69(2):179–186.
- Hermesch S, Luxford BG, Graser HU. 2000. Genetic parameters for lean meat yield, meat quality, reproduction and feed efficiency traits for Australian pigs: 1. Description of traits and heritability estimates. *Livestock Production Science* 65(3):239–248.
- Holm B, Bakken M, Klemetsdal G, Vangen O. 2004. Genetic correlations between reproduction and production traits in swine. *Journal of Animal Science* 82(12):3458–3464.
- Houle D, Meyer K. 2015. Estimating sampling error of evolutionary statistics based on genetic covariance matrices using maximum likelihood. *Journal of Evolutionary Biology* 28(8):1542–1549.
- Kim MK, Tejada H. 2018. Implicit cost of the 2010 foot-and-mouth disease in Korea. *Studies in Agricultural Economics* 120(3):166–173. [in Korean]
- Knap PW. 2005. Breeding robust pigs. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 45(8):763–773.
- Lopez BIM, Song C, Seo K. 2018. Genetic parameters and trends for production traits and their relationship with litter traits in Landrace and Yorkshire pigs. *Animal Science Journal* 89(10):1381–1388.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2021. Korean-type GSP swine breeding stock improves litter size in Landrace and Yorkshire pigs over five years (Press release, April 26, 2021). MAFRA, Sejong, Korea.

- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2024. Standards for livestock performance testing (Notification No. 2024–82). MAFRA, Sejong, Korea.
- Merks JW. 2000. One century of genetic changes in pigs and the future needs. BSAP Occasional Publication 27:8–19.
- Misztal I, Tsuruta S, Strabel T, Auvray B, Druet T, Lee DH. 2002. BLUPF90 and related programs (BGF90). Proceedings of the 7th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Montpellier, France.
- Mrode R. 2014. Linear models for the prediction of animal breeding values. CABI.
- NIAS (National Institute of Animal Science). 2017. Current status and future prospects of the pig improvement network project. NIAS, Wanju, Korea.
- NSIF (National Swine Improvement Federation). 2002. Guidelines for Uniform Swine Improvement Programs. NSIF, Raleigh, USA.
- Ogawa S, Takahashi H, Satoh M. 2023. Genetic parameter estimation for pork production and litter performance traits of Landrace, Large White, and Duroc pigs in Japan. *Journal of Animal Breeding and Genetics* 140(6):607–623. DOI:10.1111/jbg.12814
- Pszczola M, Strabel T, Mulder HA, Calus MPL. 2012. Reliability of direct genomic values for animals with different relationships within and to the reference population. *Journal of Dairy Science* 95(1):389–400.
- Stalder KJ, Lacy RC, Cross TL, Conatser GE. 2003. Financial impact of average parity of culled females in a breed-to-wean swine operation using replacement gilt net present value analysis. *Journal of Swine Health and Production* 11(2):69–74.
- Yang H, Yang L, Qian J, Xu L, Lin L, Su G. 2024. Information of Growth Traits Is Helpful for Genetic Evaluation of Litter Size in Pigs. *Animals* 14(18):2669.
- Zhang Z, Zhang H. 2016. Genetic parameters and trends for production and reproduction traits of a Landrace herd in China. *Journal of Integrative Agriculture* 15(5):1069–1075.

## AUTHORS INFORMATION

Ji-Won Kim: <https://orcid.org/0000-0002-8417-1477>

Sang-min Lee: <https://orcid.org/0000-0001-8549-879X>

Joon-Ki Hong: <https://orcid.org/0000-0001-8272-1263>

Chang-Gwon Dang: <https://orcid.org/0000-0003-1026-0167>

Ha-Seung Seong: <https://orcid.org/0000-0001-9595-2642>

Jaeboem Cha: <https://orcid.org/0000-0002-6261-9111>

Eun-Ho Kim: <https://orcid.org/0000-0002-0882-8377>

Woncheoul Park: <https://orcid.org/0000-0003-3140-5628>

Jongan Lee: <https://orcid.org/0000-0002-4761-1808>

Haesu Ko: <https://orcid.org/0000-0001-7115-0784>

Suyeon Maeng: <https://orcid.org/0000-0001-9903-3803>

Mahboob Alam: <https://orcid.org/0000-0003-0664-7633>

DongKyu Lee: <https://orcid.org/0009-0002-0240-0908>

Mina Park: <https://orcid.org/0000-0001-7078-9463>