

토종 '우리맛닭' 부계 및 실용계에서 *MC1R* 유전자 변이 및 모색과의 연관성 분석

박미나¹ · 김태현¹ · 이현정¹ · 최진애¹ · 허강녕² · 김종대² · 추효준² · 한재용³ · 이태현³ · 이준현⁴ · 이경태^{1,*}

¹농촌진흥청 국립축산과학원 동물유전체과, ²농촌진흥청 국립축산과학원 가금과,
³서울대학교 농생명공학부, ⁴충남대학교 농업생명과학대학 동물자원생명과학과

Genetic Variations of Chicken *MC1R* Gene and Associations with Feather Color of Korean Native Chicken (KNC) 'Woorimatdag'

Mi Na Park¹, Tae-Hun Kim¹, Hyun-Jeong Lee¹, Jin Ae Choi¹, Kang-Nyeong Heo², Chong-Dae Kim², Hyo-Jun Choo², Jae-Yong Han³, Taeheon Lee³, Jun-Heon Lee⁴ and Kyung-Tai Lee^{1,*}

¹Animal Genomics and Bioinformatics Division, National Institute of Animal Science, RDA, Suwon 441-706, Korea

²Poultry Science Division, National Institute of Animal Science, RDA, Cheonan 331-801, Korea

³Department of Agricultural Biotechnology, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

⁴Department of Animal Science and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT There are several loci controlling the feather color of birds, of which one of the most studied is Extended black (E) encoding the *melanocortin 1-receptor (MC1R)*. Mutations in this gene affect the relative distribution of eumelanin, pheomelanin. The association of feather color and sequence polymorphism in the *melanocortin 1-receptor (MC1R)* gene was investigated using Korean native chicken H breed (H_PL) and 'Woorimatdag' commercial chickens (Woorimatdag_CC). In order to correlate gene mutation to Korean native chicken feather color, single nucleotide polymorphism (SNP) from *MC1R* gene sequence were investigated. A total of 307 birds from H_PL and Woorimatdag_CC were used. H_PL have black, black-brown feather color and Woorimatdag_CC have black with brown spots or brown with black spots. There are 6 SNPs in *MC1R* gene, locus T69C, C212T, A274G, G376A, G636A, T637C. 3 SNPs are nonsynonymous that change amino acid. But it is difficult to find correlation of feather color and polymorphisms. It will be needed to increase the population of Korean native chicken H breed and correlation analysis of genetic variation with feather colors.

(Key words : Korean Native Chickens, feather color, *MC1R*, SNP)

서 론

한국 토종닭은 우리나라 기후 풍토에 적응하여 토착화되었으며, 고유의 육질 특성과 풍미를 가지고 있다(Jeon et al., 2010). 일반 육계에 비하여 사육기간이 길고, 성장속도가 느려 생산성은 떨어지나 그 자체의 특성과 브랜드화로 틈새시장을 점차 넓혀 나가고 있다(Sang et al., 2006). 최근 국민소득이 향상되고 축산물의 양적 공급이 가능해지면서 소비자들은 고품질의 축산물을 요구하게 되었으며, 고유의 풍미를 가진 토종닭에 대한 선호도가 점차 높아지고 있다(Kim, 2010; Choe et al., 2010). 국립축산과학원에서는 1992년부터 2007년까지 15년간 순수 재래닭 복원 연구를 진행하여 오골

계를 포함한 재래닭 2품종 6계통을 발굴하였으며, 1967년부터 외국 도입종의 국내 토착화 연구를 수행하여 3품종 6계통의 토착화가 완료되었다(허강녕 등, 2011). 이들 5품종 12계통은 사육 유래가 명확하고, 계대 번식 및 세대별 검정기록이 있으며, 최소 7세대 이상 순수혈통을 유지한 것으로 토종닭이라 정의하였다(국립축산과학원, 2008). 하지만 순수 재래닭은 전용 육용계에 비하여 성장 및 산란능력이 낮은 관계로 산업화가 어려운 실정이다. 따라서 산란능력이 높은 검용형 토착종과 맛이 좋은 재래닭을 교배한 잡종 1대에 증체능력이 우수한 육용형 토착종을 교배하여 성장능력 및 산란능력 등의 생산성을 높인 실용계 '우리맛닭'을 개발하였다(허강녕 등, 2011). '우리맛닭'은 단백질과 콜라겐 함량이

* To whom correspondence should be addressed : leekt@korea.kr

높고, 지방함량이 낮아 일반 육계와 차별화되는 육질을 가지고 있다(박미나 등, 2010).

조류의 깃털색은 Extended black(E) 대립인자에 의해서 주요하게 조절되고, 이 대립인자 영역은 *melanocortin 1 receptor(MC1R)* 유전자로 암호화되어 있다. *MC1R* 유전자 변이에 의하여 eumelanin(brown/black)과 pheomelanin(yellow/red)의 착색에 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다(Takeuchi et al., 1996b; Robbins et al., 1993; Jakson et al., 1994, Gunnarsson et al., 2007). 따라서 닭의 품종별 모색의 다양성은 *MC1R* 유전자의 염기서열 E 대립인자와 높은 연관성이 있다(Kerje et al., 2003). 닭의 *MC1R* 유전자는 11번 염색체에 위치하고, 314개의 아미노산으로 구성된 단백질에 암호화하는 단일 엑손으로 이루어져 있다(Takeuchi et al., 1996a). 현재까지 닭에서 8개의 E 대립인자가 발견되었고, Red Jungle Fowl × White Leghorn의 이종교배에 의하여 E 대립인자와 *MC1R* 유전자 변이와의 연관성을 확인하였다(Ling et al., 2003). 우성의 *MC1R* 변이는 검정색을 나타내고, 반면에 열성의 변이는 착색 기능을 감소시켜 결과적으로 빨간색 혹은 노란색의 착색을 나타낸다(Lu et al., 1998; Ling et al., 2003; Doucet et al., 2004). 닭 *MC1R*은 tyrosinase 효소에 의해 영향을 받는데, tyrosinase의 활성이 낮으면 pheomelanin 합성이 증가하고, tyrosinase 활성이 높으면 eumelanin 합성이 증가하게 되어(Ling et al., 2003) 모색에 영향을 미친다.

토종닭은 일반 육계가 백색 모색을 가지는 것과 다르게 유색계통이 많으며, 모색의 특징으로 토종닭을 구별하기도 한다. ‘우리맛닭’은 고정화된 갈색 모색을 가지고 있는 재래 닭과 검용형 토착종의 2원 교배를 통한 암탉과 다양한 모색 표현형을 가지고 있는 수탉 H계통의 3원 교배로 생산된다(허강녕 등, 2011). ‘우리맛닭’ 생산 시 부계로 이용되는 토종 닭 H계통은 육용형 토착종으로 사료효율이 높고, 성장이 빠르면서 우수한 육질 특성을 가져 부계 계통으로 많이 이용되는 품종이다. H계통은 검정색 모색을 기본으로 하여 갈색 모색이 섞인 표현형을 가지고 있다. 본 연구는 다양한 모색 표현형을 가지고 있는 H계통과 실용계 ‘우리맛닭’의 모색 표현형과 모색 관련 유전자의 연관성 분석을 통하여 토착화된 H계통의 유전적 특성을 살펴보고, 향후 이를 이용하여

‘우리맛닭’의 불법 유통을 막고 고품질 브랜드화를 위한 분자마커 개발의 기초 연구로 수행되었다.

재료 및 방법

1. 공시계 및 외모 표현형 조사

본 시험에 사용된 공시계는 국립축산과학원 축산자원개발부에서 보유하고 있는 육용형 토종닭 H계통 순계 암탉 207수, 수탉 40수와 ‘우리맛닭’ 실용계 60수를 이용하였다. 순계의 모색은 머리, 목, 가슴, 배, 날개, 꼬리의 여섯 부위로 나누어서 흑색, 흑색+갈색의 모색으로 구분하였고, 실용계는 흑색, 갈색의 두 그룹으로 구분하여 조사하였다(Fig. 1, Table 1). 본 연구의 동물 실험은 국립축산과학원 동물실험윤리위원회의 운영 규정을 준수하고 승인을 받았다.(No, 2010-000)

2. DNA 시료 추출 및 *MC1R* 유전자 증폭

유전자형 분석을 위하여 닭 혈액에서 Genomic DNA를 PrimePrep™ genomic DNA isolation kit(GeNetBio, Korea)를 이용하여, 매뉴얼에 따라 추출하였다. *MC1R* 유전자의 증폭을 위하여 NCBI에 등록되어 있는 서열(NC_006098.3)을 이용하여 Table 2와 같이 *MC1R*에 대해서는 한 쌍의 프라이머를 제작하였다. 유전자 증폭은 genomic DNA(25 ng/μL) 2 μL, 10× buffer(Genetbio, Korea) 2.5 μL, dNTP(2.5 mM) 2 μL, forward와 reverse primer(10 pmol) 각각 1 μL, Taq DNA polymerase(GeNet Bio, Korea) 0.1 μL, 3차 증류수 16.4 μL를 첨가하여 전체 25 μL의 반응액으로 제조하여 수행하였다.

Table 1. Breeds and number of blood samples

Breeds	Feather color	Number of samples
H breed_PL	Black	157
	Black with brown spots	90
Woorimatdag_CC	Black with brown spots	30
	Brown with black spots	30

Table 2. Primer sequence for *MC1R* genotyping

Primer name	Primer sequence	Annealing temperature (°C)	Product size (bp)
<i>MC1R_F</i>	GCTTTGTAGGTGCTGCAGTTGTG	61	945
<i>MC1R_R</i>	CGTGTCTGTGCCGCTCCTA		



(A)



(B)



(C)



(D)



(E)



(F)

Fig. 1. Illustration of the Korean native chicken H breed. (A), (B) H pure line female, (C), (D) H pure line male, (E), (F) 'Woorimatdag' commer.

MC1R 유전자의 PCR 반응조건은 95℃에서 5분간 변성시킨 후 94℃에서 45초, annealing 온도에서 45초, 72℃에서 1분

30초를 1 cycle로 하여 35회 반복하였다. 그 후 72℃에서 5분간 변성시킨 후 8℃에서 종료하였다. PCR 산물은 1.5%

agarose gel에서 전기영동하고, EtBr로 염색한 후 UV image analyzer로 관찰하였다.

3. DNA 염기서열 해독 반응

Sequencing 반응에 앞서, PCR 산물은 PCR clean-up set (millipore)을 사용하여 정제하였다. 정제된 PCR 산물 2 µL, Big Dye Terminator v3.1 Cycle sequencing RR-100(Applied Biosystems, USA) 0.5µL, 5× sequencing buffer 1.75 µL, primer(1.6 pmol/µL) 1 µL, 3차 증류수 4.75 µL를 혼합하여 전체 반응부피를 10 µL로 하여 sequencing 반응을 수행하였다. Sequencing 반응 조건은 95°C에서 10초, 50°C에서 5초, 60°C에서 4분을 1cycle로 하여 35회 반복하였다. Sequencing 반응이 완료된 후, 반응 산물은 75% isopropanol 80 µL와 3차 증류수 10 µL를 넣고 15분간 상온에 방치한 후, 4°C와 2,800 rpm(UNION50R, 한일과학) 조건으로 45분간 원심분리를 하였다. 상층액을 제거하고 70% 에탄올 150 µL를 첨가하여 4°C, 2,800 rpm에서 15분간 원심분리 후 상층액을 제거하고, 상온에서 2시간 동안 건조하였다. 정제가 완료된 반응 산물은 ABI-3730 DNA analyzer(Applied biosystems)를 이용하여 분석하였다.

4. 통계분석

염기서열 분석은 DNA star(Lasergene7_SeqMan) program을 이용하여 유전자 변이를 탐색하고 SNP를 발굴하였다. H계통 순계 247수는 검정색 모색에 갈색 이모색을 가지고 있는 표현형으로 구분하여 흑색, 흑색+갈색의 2계통으로 분류하고, '우리맛닭' 실용계 60수는 검정색, 갈색의 2계통으로 분류하여 SNP, haplotype과의 연관성을 로지스틱 회귀분석을 이용하여 분석하였다. 각 SNP와 Haplotype의 연관성 분석은 PLINK v1.07을 이용하여 진행하였다(Purcell, Neale et al. 2007). Haplotype의 분석은 총 6개의 SNP를 대상으로 각 1개부터 6개까지 가능한 window size를 늘려가며 haplotype을 구성하여 테스트를 하였다. 다중비교 문제를 해결하기 위해 Benjamini-Hochberg의 FDR을 이용한 방법을 이용하여 P value를 보정하였다(Benjamini and Hochberg, 1995).

결과 및 고찰

1. 토종닭 H계통 순계 모색 표현형

H계통은 전반적으로 검정색 모색을 가지고 있으나, 검정색 모색에 갈색 모색이 섞여있는 개체가 다양하게 분포하였다. 모색은 머리, 목, 등, 가슴, 날개, 꼬리의 여섯 부위로 나

누어서 흑색, 흑색+갈색의 모색으로 구분하여 조사하였다 (Table 3). 암탉 207수 중 157수는 흑색 모색, 50수는 흑색+갈색 모색으로 조사되었다. 41수는 목 부위에 흑색+갈색 모색을 갖고 있었고, 9수는 머리와 목 부위에 흑색+갈색 모색을 가지고 있었다. 수탉의 경우, 40수 중 흑색 모색만 있는 개체는 없고, 흑색+갈색의 모색이 다양한 부위에 섞여 있었다. 머리, 목, 등, 가슴, 날개, 꼬리의 여섯 부위 중 1부위에는 갈색 모색이 섞여 있는 경우 3수, 2부위 2수, 3부위 12수, 4부위 18수, 5부위 5수로 조사되었고, 꼬리 부위에만 갈색 모색이 관찰되지 않았다. 이와 같이 암탉과 수탉에서 모색의 차이는 암탉은 ZW, 수탉은 ZZ의 성염색체를 가지고 있고, Sex-linked Silver locus는 silver와 wild type/gold의 모색을 조절하며, 붉은색 착색을 방해한다(Gunnarsson et al., 2007)는 연구 결과와 관련이 있을 것으로 생각된다. 또한 수탉의 모색 특성은 강력한 prezygotic 분리에 의한 성염색체와 연관되어 있고(Saetre et al., 2003), 화려하고 다양한 색을 가진 수탉은 암탉과의 교배에 유리하다(William et al., 2000)는 사실과도 관련이 있을 것으로 추정된다. 이와 같은 토종닭 H계통의 다양한 모색 표현형은 실용계 생산의 부계로 이용할 시 외모 균일도를 저하시키는 원인으로 작용할 수 있다. 따라서 모색 표현형 및 유전형의 특성에 따라 계통을 분리하여 고정된 모색을 갖도록 육종 방향을 수립하는 것이

Table 3. Feather and shank color of Korean native chicken H breed

Feather color (male)						Number of chickens
Head	Neck	Back	Breast	Wing	Tail	
0*	1*	0	0	0	0	3
0	1	1	0	0	0	2
1	1	0	0	1	0	9
1	1	1	0	0	0	3
1	1	1	0	1	0	17
1	1	1	1	0	0	1
1	1	1	1	1	0	5
Feather Color (female)						Number of chickens
Head	Neck	Back	Breast	Wing	Tail	
0	0	0	0	0	0	157
0	1	0	0	0	0	41
1	1	0	0	0	0	9

* Feather color 0: black, 1: black + brown

실용계 생산 시 균일도를 향상시킬 수 있는 하나의 방법이 될 것이다.

2. *MC1R* 유전자의 SNP 조사 및 표현형과의 연관성 분석

Sequencing 결과 분석을 통해 *MC1R* 유전자 상에 존재하는 6개의 SNP를 발굴하고, haplotype을 살펴보았다. CDS(coding sequence) 기준으로 Locus T69C, C212T, A274G, G376A, G636A, T637C에서 SNP를 발견하였으며, 이 중 3개 SNP(C212T, A274G, G376A)는 nonsynonymous로 아미노산의 변화를 일으켰다. 코돈에 따른 아미노산 변화는 표로 나타내었다(Table 4). 그 중 특히 A274G 변이는 92번째 아미노산을 글루타민에서 라이신으로 변화시키면서 흰눈썹꿀새의 경우 노란색과 검정모색을 나타내는 표현형과 변이와의 연관성이 보고된바 있다(Theron et al., 2001). 닭에서도 화이트 레그혼과 적색야계의 교배를 통한 모색 분리 연구에서 이 부분의 변이에 의해서 wild type의 모색 표현형이 발현되었다(Kerje et al., 2003). 하지만 H계통에서는 유전자 변이에 따른 모색이 뚜렷하게 구분되지 않았다. 이는 H계통의 모색 구분이 검정색과 갈색이 섞인 표현형으로 백색, 노란색, 흑색과 같이 뚜렷한 차이가 나지 않는 것이 한 요인일 것으로 생각되어진다. *MC1R* 유전자 6개 SNP의 haplotype을 분석

한 결과, H계통 순계에서 6개, ‘우리맛닭’ 실용계에서 3개의 haplotype이 관찰되었다(Table 5). H계통에서는 haplotype 중 TCAGGT haplotype 빈도가 0.74으로 가장 높았고, CTAAAC haplotype이 0.12로 높은 빈도를 보였으며, 어떠한 haplotype도 이모색과의 연관성 분석 결과는 유의하지 않았다. 하지만, ‘우리맛닭’ 실용계에서는 세 가지 종류의 haplotype이 존재했는데, 2종류의 haplotype(TCAAGT, CTGGAC)이 96% 정도의 높은 빈도로 나타났다. 이 2종류의 haplotype과 이모색과의 연관성 분석 결과 유의적인 결과를 보임으로써, 실용계 60마리 중 *MC1R*의 TCAAGT, CTGGAC haplotype이 갈색 이모색과 관련이 있을 것으로 생각되어진다. 토종닭 순계 H계통에서 흑색과 흑색+갈색 모색의 두 그룹으로 나누어 유전자형 빈도를 분석해 보았다(Table 6). 분석 결과, 흑색 모색과 흑색+갈색 모색 그룹 간의 유전자형 빈

Table 4. SNPs and amino acid substitutions of *MC1R* gene

Codon no.	69	212	274	376	636	637
	T>C	C>T	A>G	G>A	G>A	T>C
Amino acid	-	Thr>Met	Lys>Glu	Val>Ile	-	-

Table 5. Haplotype at the chicken *MC1R* gene

Breed	Haplotype	Freq	P	Adjusted P
H_PL	CTAAAC	0.1154	0.707	0.779
	CTGGAC	0.04325	0.390	0.779
	CTAGAC	0.02737	0.462	0.779
	TCAGAC	0.01532	0.715	0.779
	TCAAGT	0.03664	0.465	0.779
	TCAGGT	0.7378	0.779	0.779
Woorimatdag_CC	Haplotype	Freq	P	Adjusted P
	TCAAGT	0.3583	2.04E-05	6.11E-05
	CTAAAC	0.025	7.43E-02	7.43E-02
	CTGGAC	0.6	2.85E-02	4.27E-04

Table 6. Allele frequency at the chicken *MC1R* gene

SNP ID	Codon no.	Polymorphism	Allele frequency			
			H_PL		Woorimatdag_CC	
			Black	Black with brown spots	Black with brown spots	Brown with black spots
SNP1	69	T/C	0.87/0.13	0.79/0.21	0.53/0.47	0.17/0.83
SNP2	212	C/T	0.79/0.21	0.78/0.22	0.53/0.47	0.17/0.83
SNP3	274	A/G	0.95/0.05	0.94/0.06	0.53/0.47	0.27/0.73
SNP4	376	G/A	0.85/0.15	0.81/0.19	0.47/0.53	0.73/0.27
SNP5	636	G/A	0.8/0.2	0.79/0.19	0.53/0.47	0.2/0.8
SNP6	637	T/C	0.8/0.2	0.79/0.19	0.53/0.47	0.2/0.8

도 차이가 있을 것으로 기대하였으나, 모색 구분에 따른 유의적인 연관성은 찾을 수 없었다. 또한 ‘우리맛닭’ 실용계에서 검정색 모색과 갈색 모색 그룹으로 나누어 유전자형 빈도를 분석해 본 결과, 모색에 따른 유전자형 빈도에 차이가 있었다. 이는 모계로 이용되는 재래닭과 검용형 토종닭의 갈색 모색 표현형의 영향일 것으로 생각된다. *MC1R* 유전자 변이는 eumelanin(brown/black)과 pheomelanin(yellow/red) 착색에 영향을 끼치고(Robbins et al., 1993; Jakson et al., 1994), 우성 *MC1R* 변이는 흑색의 착색과 연관되어 있다고 보고되었으나(Lu et al., 1998; Theron et al., 2001), H계통에서 흑색 개체와 흑색+갈색 개체의 *MC1R* 유전자 변이를 살펴본 결과, 모색과 유의적인 관계를 찾을 수 없었다. 이는 기 보고된 결과들이 서로 다른 품종 혹은 화이트 레그혼과의 교잡 실험을 통한 유전변이를 살펴본 것과 달리, 흑색의 같은 품종 내에서 갈색 이모색을 가진 개체와의 유전적 변이를 탐색한 결과, 그 차이가 분명하게 구별되지 않은 것으로 생각되어진다. ‘우리맛닭’ 실용계에서 모색 표현형과 모색 관련 유전자의 연관성 분석을 통하여 모색 균일도를 높이기 위해서는 부계로 이용되는 토종닭 H계통뿐 아니라, 모계로 이용되는 재래닭과 검용형 토착종에 대한 모색 표현형 및 모색 관련 유전자의 연관성 분석이 더 필요할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 ‘우리맛닭’ 실용계의 외모 균일화 및 판별 마커 개발을 위하여 수탉으로 이용되는 토종닭 순계 H계통 암탉 207수, 수탉 40수와 ‘우리맛닭’ 실용계 60수의 혈액을 채취하고 DNA를 분리하였다. 모색 관련 후보 유전자 *MC1R* primer를 제작하여 PCR을 수행한 후, direct sequencing을 실시하였다. 개체별 모색 표현형을 조사한 결과, H계통 순계 암탉 207수 중 157수는 흑색 모색, 50수는 흑색+갈색 모색으로 조사되었다. 수탉의 경우, 40수 중 흑색 모색만 있는 개체는 없고, 흑색+갈색의 모색이 다양한 부위에 섞여 있었다. ‘우리맛닭’ 실용계의 경우 흑색 모색 30수와 갈색 모색 30수를 암수 관계없이 샘플링하여 조사하였다. 모색 표현형과 유전형과의 연관성을 알아보기 위하여 모색 관련 후보 유전자 *MC1R*의 sequencing 결과를 분석하여 유전자 변이를 살펴보았지만, 모색 표현형과 유전형과의 유의적인 연관성을 찾을 수 없었다. 이는 토종닭 순계 H계통의 경우, 검정색의 같은 품종 내에서 갈색 이모색을 가진 개체와의 유전적 변이를 탐색한 결과, 그 차이가 분명하게 구별되지 않은 것

으로 생각되어진다. ‘우리맛닭’ 실용계에서 haplotype 및 유전자빈도 분석을 통하여 이모색과의 연관성을 보다 명확하게 결정하기 위해서는 부계와 모계의 모색 표현형과 유전특성을 함께 고려해야 할 것으로 판단된다. ‘우리맛닭’의 모색 균일도 향상을 위한 모색 표현형과 관련 유전자의 연관성 분석 및 유전적 특성에 대한 연구는, 향후 이를 이용하여 ‘우리맛닭’의 불법 유통을 막고 고품질 브랜드화를 위한 분자마커 개발의 기초 자료로 활용될 것으로 생각된다.

(색인어 : 토종닭, 우리맛닭, 모색, 유전특성)

사 사

본 연구는 2013년 농촌진흥청 국립축산과학원의 연구비(과제 번호: PJ907057) 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

인용문헌

- Benjamini Y, Hochberg Y 1995 Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *J R Statist Soc B* 57(1):289-300.
- Choe JH, Nam KC, Jung S, Kim B, Yun HJ, Jo C 2010 Differences in the quality characteristics between commercial Korean native chickens and broilers. *Korean J Food Sci Ani Resour* 30:13-19.
- Doucet SM, Goto RM, Auffray C, Miller MM 1993 A polymorphic system related to but genetically independent of the chicken major histocompatibility complex. *Immunogenetics* 37:408-414.
- Gunnarsson U, Hellstrom AR, Tixier-Boichard M, Ninvielle F, Bed'hom B, Ito S, Jensen P, Rattink A, Vereijken A, Andersson L 2007 Mutations in *SLC45A2* cause plumage color variation in chicken and Japanese quail. *Genetics* 175:867-877
- Jeon HJ, Choe JH, Jung Y, Kruk ZA, Lim DG, Jo C 2010 Comparison of the chemical composition, textural characteristics, and sensory properties of North and South Korean native chickens and commercial broilers. *Korean J Food Sci Ani Resour* 30:171-178.
- Kerje S, Lind J, Schutz K, Jensen P, Andersson L 2003 Melanocortin 1-receptor(MC1R) mutations are associated with plumage colour in chicken. *Anim Genet* 34:241-248.
- Kim HK 2010 Breeding control of Woorimatdak (1). *Korean*

- Poultry Journal 487:153-155.
- Ling MK, Lagerstrom MC, Fredriksson R, Okimoto R, Mundy NI, Takeuchi S, Schioth HB 2003 Association of feather colour with constitutively active melanocortin 1 receptor in chicken. *Eur J Biochem* 270:1441-1449.
- Lu D, Vage DI, Cone RD 1998 A ligandmimetic model for constitutive activation of the melanocortin 1-receptor. *Mol Endocrinol* 12:592-604.
- Purcell S, Neale B, Todd-Brown K, Thomas L, Ferreira M, Bender D, Maller J, Sklar P, Bakker P, Daly MJ, Sham PC 2007 PLINK: A tool set for whole-genome association and population-based linkage analyses. *Am J Hum Genet* 81(3):559-575.
- Robbins LS, Nadeau JH, Johnson KR, Kelly MA, Roselli-Rehffuss L, Baack E, Mountjoy KG, Cone RD 1993 Pigmentation phenotypes of variant extension locus alleles result from point mutation that alter MSH receptor function. *Cell* 72:827-834.
- Saetre GP, Borge T, Lindroos K, Haavie J, Sheldon BC, Primmer C, Syvanen AC 2003 Sex chromosome evolution and speciation in *Ficedula flycatchers*. *Proc Biol Sci* 270:53-59.
- Sang BD, Kong HS, Kim HK, Choi CH, Kim SD, Cho YM, Sang BC, Lee JH, Jeon GJ, Lee HK 2006 Estimation of genetic parameters for economic traits in Korean. *Asian-Aust J Anim Sci* 19:319-323.
- Takeuchi S, Suzuki S, Hirose S, Yabuuchi M, Sato C, Yamamoto H, Takahashi S 1996a Molecular cloning and sequence analysis of the chick melanocortin 1-receptor gene. *Biochim Biophys Acta* 1306:122-126.
- Takeuchi S, Suzuki S, Yabuuchi M, Takahashi S 1996b A possible involvement of melanocortin 1-receptor in regulating feather colour pigmentation in the chicken. *Biochim Biophys Acta* 1308:164-168.
- Theron E, Hawkins K, Bermingham E, Ricklefs RE, Mundy NI 2001 The molecular basis of an avian plumage polymorphism in the wild; A melanocortin-1-receptor point mutation in perfectly associated with the melanic plumage morph of the bananaquit, *Coereba flaveola*. *Curr Biol* 11:550-557.
- William RBIII, Geoffrey EH, Christine AS 2000 Effects of coccidial and mycoplasmal infections on carotenoid-based plumage pigmentation in male house finches. *The Auk* 117(4):952-963.
- 국립축산과학원 2008 토종닭 사육 및 인증기준 설정 연구. 가금수급안정위원회.
- 박미나 홍의철 강보석 김학규 김재홍 나승환 채현석 서옥석 한재용 정재홍 황보 중 2010 교배 조합 토종닭의 이화학적 성상 및 육질 특성. *한국가금학회지* 37(4):415-421.
- 허강녕 추효준 서보영 박미나 정기철 황보 중 김학규 홍의철 서옥석 강보석 2011 토종닭과 실용계에서 TYR 및 MC1R 유전자의 변이 분석. *농업과학연구* 38(3):465-471. (접수: 2013. 6. 7, 수정: 2013. 6. 17, 채택: 2013. 6. 17)