

# 중생종 ‘홍로’와 만생종 ‘후지’사과에서 머리뿔가위벌(*Osmia cornifrons*)의 영소활동 특성과 화분매개효과

이경용\* · 이정애<sup>1</sup> · 윤형주농촌진흥청 국립농업과학원 농업생물부 곤충산업과, <sup>1</sup>영주시농업기술센터 기술지원과

## Pollination Effect and Nesting Behavior of *Osmia cornifrons* on ‘Hongro’, Early and ‘Fuji’, Late-season Apple Cultivars

Kyeong Yong Lee\*, Jung Ae Lee<sup>1</sup> and Hyung Ju Yoon

Industrial Insect Division, Department of Agricultural Biology, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

<sup>1</sup>Yeongju Agricultural Technology Center, Yeongju 36132, Korea

**ABSTRACT:** In order to use *Osmia cornifrons* more effectively in apples, we investigated the pollination effect and nesting activity of *O. cornifrons* on ‘Hongro’, the middle-season cultivar, and ‘Fuji’, the late-season cultivar. There was a significant difference in the nesting activity and pollination effect of *O. cornifrons* depending on the apple cultivar. The nesting activity, rate of trap nesting, and reproduction in ‘Fuji’ were 2.5, 1.5, and 3.8 times greater than in ‘Hongro’, respectively. The pollination effect according to cultivar ‘Fuji’ was 1.6 times greater than that of ‘Hongro’ in the central fruit set. In terms of the quality of fruit, the asymmetry index of ‘Fuji’ was 2.5 times lower than that of ‘Hongro’, and the number of apple seeds of ‘Fuji’ was 1.9 times greater than that of ‘Hongro’. The main reason for this result was the air temperature. The activity of *O. cornifrons* was most affected by air temperature ( $R^2 = 0.578$ ). It is expected that the nesting activity and pollination effect are great in ‘Fuji’ (17.4-24.1°C) when the temperature during the blooming period is higher than that of ‘Hongro’ (12.5-20.2°C). Our study provides important information on stable apple production for apple cultivators, and can be used as an evidence for changes in flora and insect fauna caused by climate change.

**Key words:** *O. cornifrons*, Weather condition, Apple, Cultivar, Pollination

**초 록:** 머리뿔가위벌을 사과에 더욱 효과적으로 사용하기 위하여 중생종 ‘홍로’와 만생종 ‘후지’에서 머리뿔가위벌의 영소활동과 화분매개효과를 조사하였다. 그 결과, ‘후지’에서의 영소활동이 ‘홍로’보다 2.5배 많았다. 영소율과 증식률에서 ‘후지’가 ‘홍로’보다 각각 1.5배, 3.8배 높았다. 품종에 따른 화분매개효과를 조사한 결과, 중심화결실물에서 ‘후지’가 ‘홍로’보다 1.6배 높았다. 과실의 품질에서 사육과율은 ‘후지’가 ‘홍로’보다 2.5배 낮았고, 사과종자의 수는 1.9배 많았다. 이에 대한 원인을 밝히기 위해 개화기 기상환경과 머리뿔가위벌의 활동량에 대한 상관관계를 분석한 결과, 머리뿔가위벌의 활동에 영향을 미치는 주된 요소는 온도로 나타났다( $R^2 = 0.578$ ). ‘후지’(평균 17.4 ~ 최고 24.1°C)의 개화기 기온은 ‘홍로’(평균 12.5 ~ 최고 20.2°C)보다 4 ~ 5°C 높았기 때문에 ‘후지’에서 영소활동과 화분매개효과가 ‘홍로’보다 큰 것으로 생각된다. 따라서 조생종 ‘홍로’에서는 머리뿔가위벌보다 기상환경에 영향을 적게 받는 뒤영벌과 같은 화분매개곤충을 사용하는 것이 권장되며, 만생종 ‘후지’에서는 머리뿔가위벌의 사용이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구는 사과 재배 농가에게 사과의 안정적인 생산을 위한 중요한 정보로 사용될 수 있다. 아울러 기후변화에 인하여 머리뿔가위벌의 화분매개활동이나 증식률이 변할 수 있다는 결론은 식생과 곤충상에 변화에 대한 근거로 활용할 수 있을 것이다.

**검색어:** 머리뿔가위벌, 기상환경, 사과, 후지, 홍로, 화분매개효과

\*Corresponding author: [ultrataro@korea.kr](mailto:ultrataro@korea.kr)

Received February 8 2021; Revised February 24 2021

Accepted February 25 2021

사과(*Malus domestica* Borkh)는 장미과(Rosaceae) 배나무아과(Pomoideae) 사과나무속(*Malus*)의 낙엽교목으로서 재배 환경이 까다롭지 않아 세계적으로 가장 널리 재배되고 있는 작물이다(Janick et al., 1996; Yoo and Kang, 2014). 2019년 우리

나라에서 사과 재배면적은 32,953 ha로서 과수 중 가장 많고, 생산량은 연 53만 톤으로 감귤에 이어 두 번째로 많다(Statistics Korea, 2020). 2017년 기준 국내 사과 주력품종은 만생종 ‘후지’('Fuji'), 중생종 ‘홍로’('Hongro'), 조생종 ‘쓰가루’('Tsugaru')로 알려져 있으며, 이 중 ‘홍로’와 ‘후지’는 국내의 사과재배 면적의 89.6%를 차지한다(RDA, 2019). 사과는 대표적인 자가불화합성 작물(GSI; Gametophytic self-incompatibility)임과 동시에 충매화이다(Alston, 1996). 따라서 결실을 위해서 유전자 형이 다른 사과의 꽃가루를 매개자를 통한 화분매개과정이 필요하다(Goldway et al., 2001; Schneider et al., 2001).

머리빨가위벌(*Osmia cornifrons* L.)은 사과의 결실을 도와주는 중요한 화분매개곤충이다(Maeta 1978; Torchio, 1985; Bosch and Kemp, 2000; Maeta et al., 2005). 국내 머리빨가위벌의 사용은 1992년 청송의 한 농가가 일본 아오모리현에서 머리빨가위벌을 도입으로 시작되었고, 이후 2000년대 초기에 전국 사과재배지역에 보급되었다(Kim, 1999). 그러나 머리빨가위벌의 사용률은 2007년 27.0%, 2011년 9.2%, 2016년 1.8%로 계속 감소하고 있다(Lee et al., 2010; Yoon et al., 2012; 2017). Lee et al. (2010)은 머리빨가위벌의 사용률이 감소하는 주된 이유로 증식문제에 의한 공급부족과 기상조건 불량 시 활동부족으로 보고하였다. 이에 국립농업과학원 중심으로 머리빨가위벌의 증식문제 개선하기 위하여 실내사육과 생활사(Yoon et al., 2015; Lee et al., 2016a), 산란생리(Lee et al., 2015), 인공월동(Korea Patent No. 10-1785097) 연구가 진행되었다. 또한 사과 과수원에서 머리빨가위벌을 효과적으로 사용하기 위하여 국내 서식하는 빨가위벌류 분포연구와 과수원에 방사시 성비와 밀도가 연구되었다(Lee et al., 2002; Lee et al., 2014, 2016b). 그러나 사과 품종에 따른 머리빨가위벌의 활동특성이나 화분매개효과에 대한 연구는 아직 보고된 바가 없다.

일반적으로 4월 중순에 주로 개화하는 ‘홍로’는 국내 주력품종 중 개화기가 가장 빠른 것으로 알려져 있으며 4월 후반에 개화하는 ‘후지’의 개화시기와 7일 정도 차이가 나는 것으로 보고되었다(Kang et al., 2002; Kang, 2004). 우리나라의 10년간 기후 평년값을 분석한 결과, 기온이 상승하는 시기는 2월부터 7월까지로 월초부터 월말까지 평균 4°C의 기온이 높아지지만, 특히 4월은 7°C로 기온의 상승폭이 가장 크다(KMA, 2019). 또한 3-4월은 기온변화가 심하여 늦서리 피해가 자주 발생하는 특성을 보여(RDA, 2019), 4월 중 개화기가 다른 두 종류의 사과품종은 기상환경에 분명한 차이가 있을 것으로 생각된다. 사과의 화분매개에 사용되는 머리빨가위벌의 활동은 기상환경 변화에 매우 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있어(Yoon et al., 2013), 기온변화가 심한 4월에 개화시기에 따라 사과 품종별 머리빨가위

벌의 영소활동이 충분히 영향을 받을 수 있을 것으로 생각된다.

이에 머리빨가위벌을 사과 화분매개에 더욱 효과적으로 사용하기 위하여 사과 품종(‘홍로’, ‘후지’)별로 머리빨가위벌의 영소활동과 화분매개효과를 조사하였다. 또한 10년간 ‘홍로’와 ‘후지’의 개화시기와 평균기온을 확인하고, 기상환경에 따른 머리빨가위벌의 영소활동량 조사를 통해 사과 품종별 개화시기에 따른 머리빨가위벌의 사용 가능성을 검토하였다.

## 재료 및 방법

### 실험 작물 및 곤충

실험 작물은 8년생 중생종 사과 ‘홍로’('Hongro')와 7년생 만생종 사과 ‘후지’('Fuji')가 선정되었다. 실험 곤충은 2014년 경북 청송의 사과재배농가에서 야외 증식한 머리빨가위벌(*O. cornifrons*)을 고치상태로 2014년 11월부터 6개월간 5°C에서 월동 시켜 사용하였다.

‘홍로’에서 머리빨가위벌의 화분매개효과 시험은 2015년 4월 17일부터 4월 25일까지 ‘홍로’의 주산지인 전라북도 장수군 장수읍 개정리 소재(35° 72' 14" N, 127° 30' 32" E) 농업기술센터의 7,000 m<sup>2</sup> 시험포장에서 수행되었다. 포장 내 사과나무의 수는 240주가 재식되었고 5주마다 꽃사과가 수분수로 재식되었다. ‘후지’의 화분매개효과 시험은 2015년 4월 25일부터 5월 3일까지 ‘후지’를 주로 생산하는 충청북도 단양군 영춘면 사이곡리 소재(37° 07' 37" N, 128° 23' 01" E) 12,000 m<sup>2</sup> 면적의 사과 과수원에서 수행되었다. 과수원내 사과나무의 수는 430주가 재식 되었으며 ‘후지’ 4개 줄 당 ‘홍로’가 1줄 씩 배치되었다.

### 시험구

사과 품종별 머리빨가위벌의 영소활동과 화분매개효과 조사를 위하여 ‘홍로’와 ‘후지’ 개화기에 각각 시험곤충 방사구와 인공수분구와 자연수분구를 설정하였다. 시험곤충 방사구는 3개의 반복 시험구를 마련하였다. 각 반복실험구에는 방사 5일전 플라스틱 사과박스로 제작된 방사집을 1개씩 배치하고 그 내부에 영소용 대나무 소통(길이 15 cm, 지름 6-8 mm, 단면)을 50개로 묶어 1개의 다발로 만든 후 각 방사집에 10다발을 놓아두었다(Lee et al., 2016b). 각 반복실험구는 머리빨가위벌 간 화분매개효과 영향을 피하기 위하여 50 m 간격으로 설치하였다(Maeta and Kitamura, 1981). 방사전 머리빨가위벌의 준비는 월동 보관 중이던 머리빨가위벌을 방사 3일 전에 종이상자(경판지, 15 cm × 10.5 cm × 10 cm)에 각각 암컷 고치 200마리와 수컷 고치 400

마리를 옮겨담아 인큐베이터에  $27 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $60 \pm 5\%$  R.H. 압조건에 72시간 보관하였다. 방사를 위하여 각 종이상자들은 각 반복 실험구의 방사집에 투입되었다. 투입된 종이상자 벽면에 벽면에 직경 1 cm의 구멍을 6개 뚫어 머리빨가위벌을 방사하였다. 방사날자는 각 사과품종의 꽃눈이 ‘풍선기’ (만개 기준 5일 전)가 되었을 때 ‘홍로’는 4월 17일에, ‘후지’는 4월 24일이었다. 방사 15일 후 종이상자 안에 머리빨가위벌이 우화 되지 않은 암컷 고치 수를 세어 최종 방사된 곤충의 수를 계산하였다. 인공수분구와 자연수분구는 시험곤충 방사구로부터 각 100 m 떨어진 장소에 깃발을 꽂아 표시하였다. 각 표시된 깃발로부터 10 m 반경내 사과나무 6주가 모여있는 범위를 각각 인공수분구와 자연수분구로 설정하였다. 인공수분을 위하여 2014년에 ‘홍로’로부터 채취하여  $-25^\circ\text{C}$ 에 보관되었던 꽃가루를 증량제(석송사)와 1:2로 섞어 준비하고, 개화 직전의 중심화를 중심으로 꽃잎을 제거한 후 붓으로 수분시켰다(RDA, 2019). 수분이 완료된 화총(Flower cluster)은 망(mash: 1 mm  $\times$  1 mm)으로 씌워 화분매개 곤충의 추가 방문을 방지하였다.

## 영소활동과 증식률 조사

머리빨가위벌은 방사 후 7~10일 이후에 영소활동을 하는 것으로 알려져있다(Batra, 1982; Bosch and Kemp, 2000, 2001). 이에 따라 머리빨가위벌의 영소활동 조사는 방사 후 7 일 이후로 ‘홍로’는 4월 24일부터 25일까지 2일 동안, ‘후지’는 5월 1일부터 3일까지 수행되었다. 영소활동은 11시와 15시 각 두차례 5분간 대나무 영소를 출입하는 머리빨가위벌의 암벌 수를 조사하고 방사된 암벌의 수에 대한 백분율로 나타내었다. 또한 기상환경에 따른 활동량 변화 양상을 조사하기 위하여 영소활동조사 당시의 기온, 조도 및 풍속 등을 2시간 간격으로 조사하였다. 온도는 Temperature data logger (176T4, Testo, Titisee-Neustadt, Germany)로 조도는 Lux/Fc Lighter meter (TM-204, Tenmars, Taiaei, Taiwan), 풍속은 Pocket weather meter (Kestrel 2000, Nielsen-Kellerman, PA, USA)을 사용하여 측정하였다. 머리빨가위벌의 증식률을 조사하기 위하여, 6월말 각 곤충 방사구에서 영소용 대나무 소통을 수거하여 영소 여부를 조사하였다. 대나무통의 입구가 완전히 막힌 것과 중간까지 막힌 것을 영소가 된 것으로, 막히지 않은 것을 미영소로 구분하여, 50개 다발 당 영소된 비율을 백분율로 나타내었다(Lee et al., 2014). 영소된 대나무 소통은 따로 모아서 실내  $27 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $60 \pm 5\%$  R.H. 압조건에서 보관하였다. 10월에 영소된 소통을 절개하여 머리빨가위벌의 고치를 확보한 후, 방사마리수 대비 확보된 고치의 비율로 증식률을 계산하였다.

## 화분매개효과 조사

화분매개효과를 확인하기 위하여 중심화결실율과 수확된 과실의 품질을 조사하였다. 중심화결실율은 낙화 종료 시점으로부터 8일이 지난 후에 조사하였다. 각 방사구의 반복실험구로부터 10 m, 30 m, 50 m에서 ‘홍로’는 각 2그루씩 총 6그루의 나무를, ‘후지’는 각 3그루씩 총 9그루의 나무를 선정하고, 각 그루당 무작위로 20개의 가지를 선정하였다. 각 가지의 전체 과총(Fruit cluster)수에서 중심화가 착과된 과총수의 비율로 중심화착과율을 계산하였다. 인공수분과 자연수분은 각 시험구의 총 6개의 나무 중에서 3개의 나무를 선정하고 각 나무에서 각 20개의 가지를 선정하여 중심화착과율을 계산하였다.

수확물 품질조사는 ‘홍로’는 9월 초순에, ‘후지’는 10월 초순에 수확하여 조사하였다. 수확방법은 앞서 시험구별로 선정된 나무를 대상으로 1.2 m 높이의 과실을 무작위로 나무당 10개씩을 수거하였다. 수거된 과실은 각 머리빨가위벌 방사구 80과, 인공수분구 20과, 자연수분구 40과를 각각 무작위로 선별하였다. 선별된 과실의 형태를 평가하기 위하여 Length/Diameter (L/D) 값, 정형과율, 편형과율, 사측과율을 조사하였다. L/D 값은 수확물의 종경과 횡경을 Vernier calipers로 측정하여 구하였다. 정형과율은 시험구당 총 수확과실 중 L/D 값이 0.87 이상인 과실에 대한 비율을 백분율로 나타내었다(Masoudi et al., 2005). 편형과율은 L/D 값이 0.84 미만인 과실에 대한 비율을 백분율로 나타내었고, 사측과율은 과실을 세워놓았을 때 좌우 종경차가 7 mm 이상인 과실의 비율을 백분율로 나타내었다(Park et al., 1998). 과중은 전자저울(CB-3000, A&D, Tokyo, JAPAN)로 측정하였다.

## 기상환경 및 머리빨가위벌 활동량 상관관계 조사

품종에 따른 머리빨가위벌의 활동 변화를 설명하기 위해 ‘농업기상관측시스템’(http://weather.go.kr)을 이용하여 연구지점과 가까운 장소 중심으로 장수군 장수읍의 ‘홍로’ 개화기간과 단양군 영춘면의 ‘후지’의 개화기간의 기상환경 데이터를 각각 확보하였고, 이 데이터를 통해 평균기온, 최고기온, 최저기온 등을 계산하였다. 또한 기상환경에 따른 머리빨가위벌의 활동량 변화를 분석하기 위하여, 충청남도 당진시에서 2008년과 2009년에 조사된 기상조건(기온, 조도, 풍속)과 머리빨가위벌의 영소활동 자료와 이번 자료를 종합하여, 연도별로 머리빨가위벌의 영소활동과 온도, 조도, 풍속에 대한 상관분석을 수행하였다. 특히 각 기상조건 간 다중공선성(Multicollinearity)의 문제가 있으므로 편상관분석(Partial correlation)을 통하여 영

소활동과 상관성이 있는 기상조건을 선발하였다. 선발된 기상요소가 영소활동에 영향을 끼치는지를 확인하기 위해 선형회귀분석을 통하여 회귀식을 도출하였다.

### 10년간 기상환경과 사과 개화기 변화 조사

앞으로의 사과품종별 머리빨가위벌 사용 가능성을 전망하기 위해 2005년부터 사과품종별 개화일자와 기상환경을 조사하고 있는 경상북도 영주시 농업기술센터 과수시험장(36° 51' 25" N, 128° 33' 15" E)의 협조를 얻어 10년간 '홍로'와 '후지'의 개화시작 날짜와 기상환경 자료(2011년 ~ 2020년)를 분석하였다. 사과의 개화시기는 개화기 이전 자발휴면 타파 기간의 기온변화와 밀접한 관련이 있으므로(Kweon et al., 2017), 자발휴면이 타파되는 시기인 3월 13일부터 개화가 완료되는 4월 30일까지 10년간 일평균 기온변화 양상을 분석하였다. 사과 개화기간중 일기변화의 심한정도를 확인하기 위하여 4월 1일부터 5월 10일까지 10일 단위로 나누어 각 분기별 기온의 변동계수(Coefficient of variation)를 비교하였다. 변동계수는 '(기온 표준편차/기온 평균) × 100'으로 계산되었다.

### 통계분석

두 품종에서 머리빨가위벌의 영소활동, 영소율, 중심화결실률, 수확물 품질 중 무게, L/D 값, 종자수 및 기상환경 비교는 *t*-test를 통하여 유의성을 검정하였다. 또한 수확물 품질 중 정형과율, 사축과율, 편형과율은 Chi-square test로 유의성을 확인하였다. one-way ANOVA test는 '홍로'와 '후지'에서 머리빨가위벌, 인공수분, 자연수분 간 중심화결실률과 품질의 차이 검정에 사용되었다. 또한 10년간 연도별 개화기 기온의 변동계수 비교에도 사용되었다. 분산분석 자료는 Turkey's HSD로 사후검정하였다. 이번 연구에서 사용된 상관분석은 Pearson correlation을 기본으로 수행하였으며, 관측값이 10이하이거나 정규분포가 아닐 경우 Spearman's Rho correlation로 대체하였다. 평균비교분석에서 등분산검정이 통과되지 않을 경우 welch's test를 사용하였다. 이번 연구의 통계분석 소프트웨어는 SPSS PASW 22.0 for windows (IBM, Chicago, USA)를 사용하였다.

### 결 과

#### 사과품종에 따른 머리빨가위벌의 영소활동, 영소율 및 증식률

'홍로'와 '후지'에서 머리빨가위벌의 영소활동을 조사한 결

과(Table 1), '후지'에서 입소, 출소, 총영소활동량이 '홍로'보다 각각 2.6배, 2.3배, 2.5배 유의미하게 많았다(*t*-test: 입소  $t_{13} = -2.904$ ,  $p = 0.013$ ; 출소 welch's  $t_{7.255} = -3.189$ ,  $p = 0.015$ ; 총영소활동 welch's  $t_{7.553} = -3.561$ ,  $p = 0.008$ ). 사과 품종별 영소율과 증식률을 조사한 결과, '후지'에서 머리빨가위벌의 영소율이 '홍로'보다 1.5배 높았고( $t_{22} = 0.445$ ,  $p = 0.0001$ ), 증식률 역시 3.8배 높은 결과를 나타내었다(Table 2).

#### 사과품종에 따른 머리빨가위벌의 화분매개효과

'홍로'와 '후지'에서 머리빨가위벌, 인공수분, 자연수분 간의 중심화결실률 비교 결과를 Fig. 1에 나타내었다. '홍로'의 경우, 인공수분이  $81.2 \pm 8.4\%$ 로 머리빨가위벌과 자연수분보다 각각 1.4배, 1.7배 유의미하게 높았다(one-way ANOVA test:  $F_{2,17} = 5.258$ ,  $p = 0.017$ ). '후지' 역시, 인공수분이  $90.6 \pm 5.6\%$ 로 가장 높고 머리빨가위벌, 자연수분보다 각각 1.1배, 1.2배 유의미하게 높았다( $F_{2,17} = 6.896$ ,  $p = 0.005$ ). 품종간 비교에서 머리빨가위벌과 자연수분의 중심화결실률은 '후지'가 '홍로'보다 각각 1.5배, 1.6배 유의미하게 높은 반면(*t*-test: 머리빨가위

**Table 1.** Percentage nesting activity of *Osmia cornifrons* females among different blooming seasons of apple cultivars in an apple orchard

Cultivars	n	Average rate of nesting activities (%)		
		Incoming	Outgoing	Total <sup>1)</sup>
'Hongro'	6	7.7 ± 2.2 <sup>2)</sup>	4.9 ± 0.6	12.6 ± 2.5
'Fuji'	9	19.8 ± 9.9*	11.2 ± 5.5*	30.9 ± 14.3*

<sup>1)</sup>Total activity is the sum of entrance and exit to the nest.

<sup>2)</sup>mean ± standard deviation (SD)

"n" is the number of observations

\* indicates that the data between cultivars were significantly different according to a *t*-test ( $P < 0.05$ )

**Table 2.** Rate of trap-nesting and reproduction of *Osmia cornifrons* among different blooming seasons of apple cultivars in an apple orchard

Cultivar	n	Rate of trap-nesting (%)	Rate of reproduction (fold)
'Hongro'	12	11.0 ± 1.3 <sup>2)</sup>	0.4
'Fuji'	12	16.2 ± 6.8*	1.5

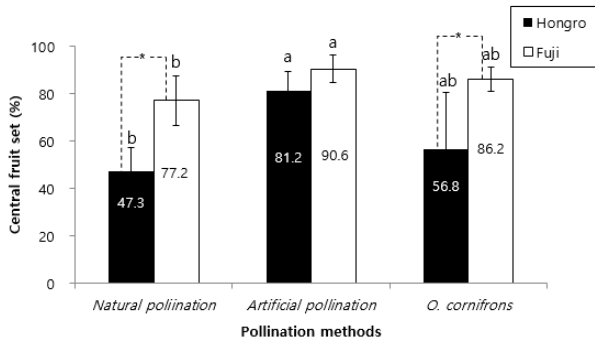
<sup>2)</sup>mean ± standard deviation (SD)

"n" is number of observations

\* and \*\* indicates that the rate of trap-nesting and reproduction between cultivars were significantly different according to a *t*-test and Chi-square test, respectively ( $P < 0.05$ )

별  $t_{13} = -5.427, p = 0.0001$ ; 자연수분  $t_{16} = -3.620, p = 0.002$ , 인공수분은 ‘후지’가 ‘홍로’보다 1.1배 높으나 통계적으로 같은 수준이었다( $t_{11} = -2.222, p = 0.066$ ).

‘홍로’와 ‘후지’에서 화분매개 방법별 과실품질을 조사하였다(Tables 3 and 4). ‘홍로’에서 과실의 형태를 평가하기 위한 L/D 값은 인공수분과 머리뿔가위벌이 각각 87.9%, 89.1%로 같은 수준으로 자연수분보다 높았다(one-way ANOVA test:  $F_{2,137} = 10.579, p = 0.0001$ ). 정형과율 역시 머리뿔가위벌과 인공수분



**Fig. 1.** Central fruit set among different pollination methods in blooming seasons of ‘Fuji’ and ‘Hongro’ in apple orchards. Different letters indicate significant differences among pollination methods based on the results of one-way ANOVA and Tukey’s HSD test ( $P < 0.05$ ). \* indicates a significant difference ( $P < 0.05$ ) between treatments by  $t$ -test

이 자연수분보다 2배 높았으며(Chi-square test:  $\chi^2_2 = 15.018, p = 0.001$ ), 비대칭과를 평가하는 사측과율은 머리뿔가위벌이 가장 낮았으며( $\chi^2_2 = 15.799, p = 0.001$ ), 편형과율은 머리뿔가위벌과 인공수분구가 자연수분구보다 3배 이상 낮았다( $\chi^2_2 = 17.034, p = 0.0001$ ) (Table 3). ‘후지’에서 L/D값은 머리뿔가위벌과 인공수분이 자연수분보다 6%이상 높은 결과를 나타내었다(one-way ANOVA test:  $F_{2,122} = 16.531, p = 0.0001$ ). 정형과율은 머리뿔가위벌과 인공수분구가 자연수분구보다 2배 이상 높았고(one-way ANOVA test:  $\chi^2_2 = 12.439, p = 0.002$ ), 사측과율( $\chi^2_2 = 26.792, p = 0.0001$ )과 편형과율( $\chi^2_2 = 19.032, p = 0.0001$ )은 3배 이상 낮았다(Table 3). ‘홍로’ 무게는 인공수분, 머리뿔가위벌, 자연수분 순으로 무거웠고(one-way ANOVA test:  $F_{2,137} = 13.786, p = 0.0001$ ), 정형과를 판단하는 요소중 하나인 종자수는 통계적 유의성은 없었으나 머리뿔가위벌과 인공수분이 자연수분보다 높은 경향을 보였다(Table 4). ‘후지’ 무게와 종자수는 화분매개방법 별로 유의미한 차이는 없었다(Table 4).

품종간 비교에서 L/D 값, 정형과율과 편형과율은 품종별로 유의미한 차이는 없었던 반면, 사측과율은 통계적인 차이를 나타내었다(Chi-square test: 머리뿔가위벌  $\chi^2_1 = 18.442, p = 0.0001$ ; 인공수분  $\chi^2_1 = 17.298, p = 0.0001$ ; 자연수분  $\chi^2_1 = 5.165, p = 0.024$ ) (Table 3). 머리뿔가위벌( $t$ -test:  $t_{138} = 4.041, p = 0.0001$ )과 인공수분( $t_{43} = 6.367, p = 0.0001$ )에 의한 과실 무게는 ‘홍로’가 ‘후지’보다 1.1-1.3배 더 무거웠으나, 자연수분에서

**Table 3.** Fruit shape and fruit length/fruit diameter (L/D) values of fruit for different pollination methods of ‘Hongro’ and ‘Fuji’ apple cultivars in the apple orchard

Cultivars	pollination methods	n	L/D value <sup>v</sup>	Fruit shape (%)		
				Shape <sup>w</sup> index	Asymmetric <sup>x</sup> index	Oblate <sup>y</sup> index
‘Hongro’	<i>Osmia cornifrons</i>	80	89.1 ± 5.7 <sup>z</sup> a	66.3**	65.0* **	18.8
	Artificial pollination	20	87.9 ± 4.9 a	65.0**	90.0*	15.0
	Natural pollination	40	83.9 ± 6.6 b	30.0	95.0*	52.5
‘Fuji’	<i>Osmia cornifrons</i>	80	88.2 ± 5.7 a	55.0**	28.3**	20.0
	Artificial pollination	20	87.1 ± 4.8 a	48.0**	28.0**	32.0
	Natural pollination	40	81.3 ± 7.1 b	20.0	77.5	62.5

<sup>v</sup>L/D value = fruit length/fruit diameter

<sup>w</sup>The shape index is the percentage of fruit with an L/D value above 0.87.

<sup>x</sup>The asymmetric index is the percentage of fruit with a difference of more than 7 mm between the minimum fruit length and the maximum fruit length.

<sup>y</sup>The oblate index is the percentage of fruits with an L/D value below 0.84.

<sup>z</sup>mean ± standard deviation

Different letters indicate significant differences among the pollination methods based on the results of one-way ANOVA and Tukey’s HSD test ( $P < 0.05$ ).

\*indicates that the fruit shape between cultivars was significantly different according to a Chi-square test ( $P < 0.05$ ).

\*\*indicates the fruit shape among pollination methods were significantly different according to a Chi-square test ( $P < 0.05$ ).

**Table 4.** Weight and number of seeds for different pollination methods of 'Hongro' and 'Fuji' cultivars in the apple orchard

Cultivars	pollination methods	n <sup>z</sup>	Weight	Number of seeds
'Hongro'	<i>O. cornifrons</i>	80	385.1 ± 80.8 <sup>b</sup>	3.7 ± 3.1 <sup>z</sup>
	Artificial pollination	20	441.9 ± 62.9a	3.5 ± 3.7
	Natural pollination	40	326.9 ± 95.0c	1.7 ± 1.8
'Fuji'	<i>O. cornifrons</i>	80	337.5 ± 48.8	7.0 ± 2.5*
	Artificial pollination	20	335.9 ± 48.8	5.7 ± 1.6
	Natural pollination	40	325.4 ± 40.4	6.6 ± 3.2*

<sup>z</sup> mean ± standard deviation (SD)

Different letters indicate differences among the pollination methods based on the results of one-way ANOVA and Tukey's HSD test (P < 0.05).

\*indicates that the weight and number of seeds between cultivars were different according to a Chi-square test (P < 0.05)

**Table 5.** Daily mean climatic conditions during the apple blooming period in different apple cultivation areas for 10 years (2011–2020)

District (Apple cultivar)	Air temperature (°C)			Humidity (%)	Wind velocity (m/s)	Precipitation volume (mm)
	Mean	Maximum	Minimum			
Jangsu-gun ('Hongro')	12.5 ± 1.7	20.2 ± 3.3	4.8 ± 3.6	65.3 ± 19.2	1.1 ± 0.2	2.6 ± 5.8
Danyang-gun ('Fuji')	17.4 ± 1.9*	24.1 ± 3.6*	10.2 ± 4.1*	62.1 ± 17.1	1.4 ± 0.5	0.4 ± 0.9

<sup>z</sup>mean ± standard deviation (SD)

The blooming period is from March 13 to April 30

\*indicates that the rate of trap-nesting and reproduction between cultivars were different according to the *t*-test (P < 0.05)

는 유의미한 차이는 없었다. 사과 종자수에서는 머리빨가위벌과 자연수분에서 '후지'가 '홍로'보다 각각 1.9배 ( $t_{56} = -4.472$ ,  $p = 0.0001$ ), 3.9배 ( $t_{18} = -4.235$ ,  $p = 0.0001$ ) 유의미하게 많았던 반면, 인공수분은 품종 간에 유의미한 차이는 없었다(Table 4).

### 기상환경 및 머리빨가위벌 활동량 상관관계

본 연구기간 동안의 기상환경을 조사한 결과를 Table 5에 나타내었다. 연구기간 중 일평균기온, 최고기온 그리고 최저기온은 단양군('후지' 시험지역)이 장수군('홍로' 시험지역)보다 각각 4.9°C, 3.9°C, 5.4°C 높았다(*t*-test: 기온  $t_{16} = -5.667$ ,  $p = 0.0001$ ; 최고기온  $t_{16} = -2.381$ ,  $p = 0.030$ ; 최저기온  $t_{16} = -2.926$ ,  $p = 0.010$ ). 그러나 습도, 풍속과 강수량은 유의미한 차이는 없었다.

머리빨가위벌의 영소활동량과 기상환경(온도, 조도, 풍속)간의 상관관계를 조사한 결과, 온도만이 머리빨가위벌의 영소활동과 높은 상관관계( $R = 0.680$ )가 인정되었다. 연도별로 2008년( $R = 0.388$ )과 2014년( $R = 0.427$ ) 조사에서는 온도만이 상관관계가 인정되었고, 2009년 조사에서는 온도( $R = 0.387$ )와 조도( $R = 0.488$ )가 영소활동과 유의미한 상관이 있었다(Table 6). 유의미한 기상환경 요소와 영소활동 간 선형 회귀분석 결과,

**Table 6.** The correlations between climatic conditions and nesting activity of *Osmia cornifrons*

Nesting activity ×	Air temperature	Illuminance level	Relative humidity
	R <sup>y</sup>	R	R
Total	0.680* <sup>z</sup>	-0.110	-0.101
In 2008	0.388*	0.361	-0.180
In 2009	0.387**	0.488**	-0.358
In 2014	0.427**	0.264	-0.049

<sup>y</sup>Partial correlation coefficient

<sup>z</sup>Partial correlation coefficients were calculated using nesting activity and climatic parameters as control variables. As each set of values was used to calculate two correlations, \*\* and \* indicate correlations at P < 0.01, or P < 0.05, respectively (two-tailed test)

2008년(ANOVA  $F_{1,36} = 26.099$ ,  $p = 0.0001$ ;  $R^2 = 0.420$ ,  $DW = 1.297$ ), 2009년( $F_{1,76} = 76.277$ ,  $p = 0.0001$ ;  $R^2 = 0.501$ ,  $DW = 0.918$ ), 2014년( $F_{1,51} = 97.438$ ,  $p = 0.0001$ ;  $R^2 = 0.656$ ,  $DW = 0.836$ ), 그리고 3개년도를 합산 데이터( $F_{1,167} = 190.042$ ,  $p = 0.0001$ ;  $R^2 = 0.532$ ,  $DW = 1.297$ ) 모두 온도와 영소활동간의 유의미한 회귀식이 도출되었고 각각의 조정된 설명력은 각각 40.4%, 49.4%, 65.0%, 52.9%로 나타났다(Fig. 2).

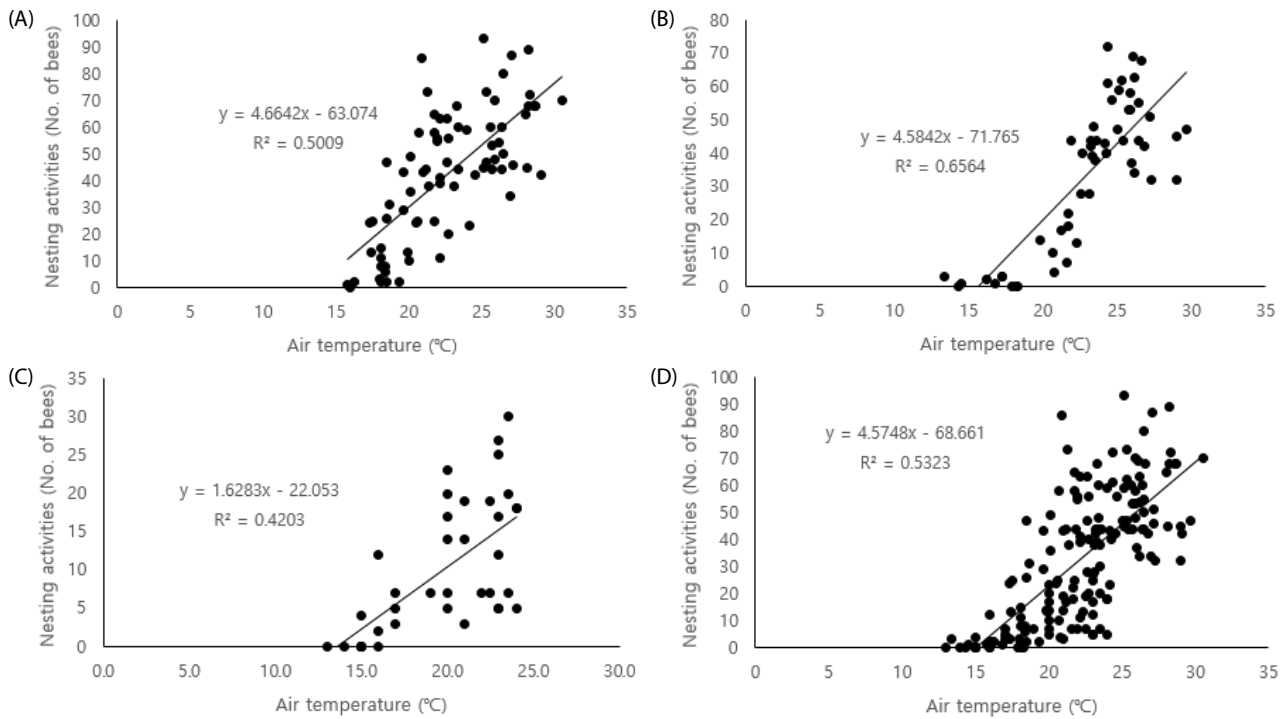


Fig. 2. Correlation between nesting activity and air temperature in 2008 (A), 2009 (B), 2014 (C), and over the total years of study (D).

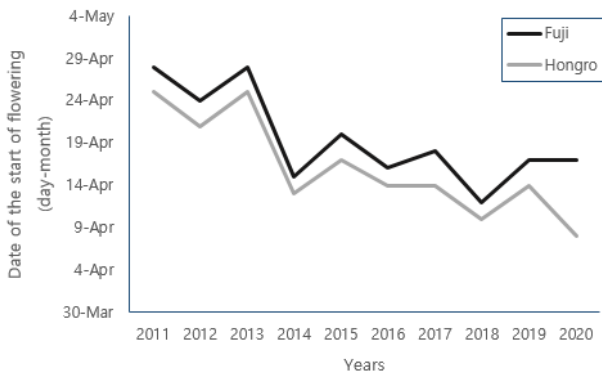


Fig. 3. Apple blooming date of 'Hongro' and 'Fuji' from 2011 to 2020 in Yeongju-si, Korea.

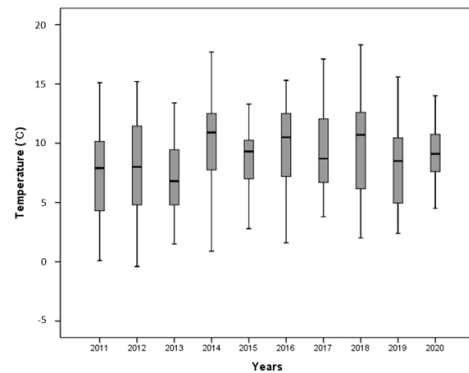
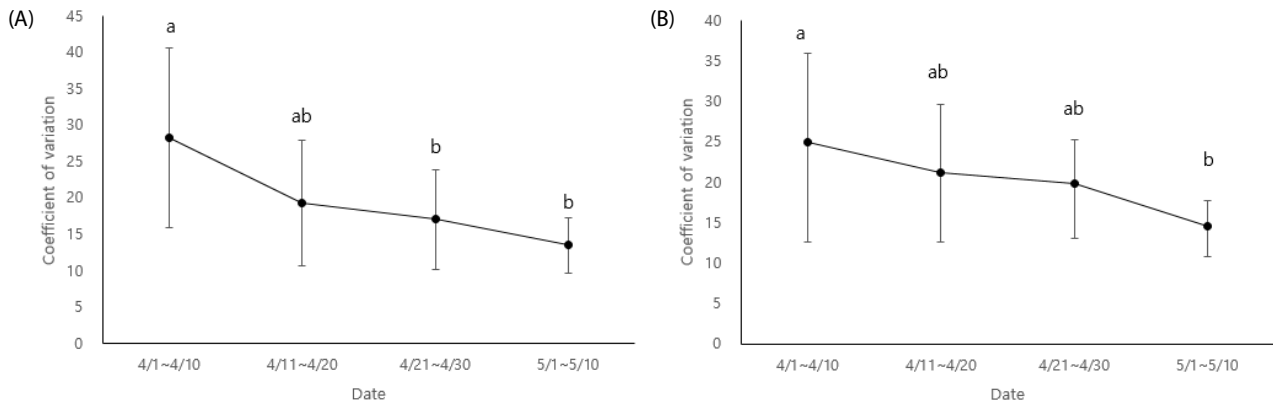


Fig. 4. Average air temperature in the pre-blooming phase and petal fall phase in apples from 2011 to 2020 in Yeongju-si, Korea.

### 10년간 기상환경과 사과 개화기의 변화

영주시농업기술센터 과수시험장에서 10년간 조사된 사과 품종별 개화기를 분석한 결과(Fig. 3), '홍로'와 '후지' 모두 해가 지날수록 개화기는 빨라지는 경향을 보였으며, 특히 '후지'의 경우 연도와 개화기간의 유의미한 부의상관관계가 확인되었다(Spearman's Rho:  $R = -0.555$ ,  $p = 0.032$ ). 이와는 대조적으로 사과의 개화에 영향을 주는 자발휴면타파가 끝나는 시기로부터 개화시작 시기까지의 10년간 기록을 분석한 결과(Fig. 4), 해가 지날수록 평균기온은 높아지는 경향을 보였으며, 연도

와 기온은 약한 정의상관관계가 확인되었다( $R = 0.131$ ,  $p = 0.009$ ). 10년 동안 4월의 일간 평균기온과 최고기온의 변동을 조사한 결과(Fig. 5), 개화전 시기인 4.1. ~ 4.10.의 변동계수는  $28.3 \pm 12.4$ 와  $24.9 \pm 10.9$ 로 가장 높았고, '홍로' 개화시기인 4.11. ~ 4.20.은  $19.3 \pm 8.6$ 와  $21.2 \pm 8.4$ , '후지' 개화시기인 4.21 ~ 4.30.은  $17.1 \pm 6.8$ 와  $19.9 \pm 5.3$  순이었고 '후지'의 개화가 끝나는 시기인 5.1. ~ 5.10.은  $13.5 \pm 3.8$ 와  $14.7 \pm 3.1$ 로 가장 낮았다(one-way ANOVA test: 일간 평균기온  $F_{3,36} = 5.482$ ,  $p = 0.003$ ; 일간 최고기온  $F_{3,36} = 3.185$ ,  $p = 0.035$ ). 상관분석결과, 날짜와 기온의 변동계수는 유의미한 부의 상관관계를 나타내



**Fig. 5.** Coefficient of variation of average air temperature (A) and maximum air temperature (B) between the pre-blooming phase and petal fall phase in apples from 2011 to 2020 in Yeongju-si, Korea. Different letters indicate significant differences among periods based on the results of one-way ANOVA and Tukey's HSD test ( $P < 0.05$ ). The length of the error bars is the standard deviation at each coefficient of variation of air temperature.

었다(일간 평균기온:  $R = -0.534$ ,  $p = 0.0001$ ; 일간 최고기온:  $R = -0.447$ ,  $p = 0.004$ ).

## 고찰

국내 사과 품종 중에서 증생종의 대표 품종인 ‘홍로’와 만생종의 대표 품종인 ‘후지’에서 화분매개곤충 머리뿔가위벌의 활동 특성과 화분매개효과를 조사하였다. 머리뿔가위벌을 통한 화분매개는 자연수분보다 사과의 형태가 2배이상 향상되어 화분매개효과가 인정되었다(Table 3). 아울러 품종별로 화분매개의 효과의 정도는 차이를 보였다. 사과의 품종별로 머리뿔가위벌의 영소활동은 ‘홍로’의 개화기보다 ‘후지’의 개화기일 때 2배이상 많았다. 머리뿔가위벌의 영소활동은 등지에서 산란을 하고 집을 짓는 행동이기에 영소울과 증식률 역시 각각 50% 이상, 3배 이상 증가한 결과를 보였다. 따라서, ‘후지’의 개화시기가 머리뿔가위벌의 활동과 증식이 더욱 효과적임을 알 수 있었다. 머리뿔가위벌 암벌의 영소활동은 과실의 착과율과 생산량과 높은 상관성이 있다고 보고하였다(Bosch and Kemp, 1999; Bosch et al., 2006; Sheffield et al., 2008). 이에 머리뿔가위벌의 화분매개효과를 확인한 결과, 사과의 상품과에 가장 큰 영향을 미치는 중심부 결실률에서도 ‘후지’가 ‘홍로’보다 유의하게 더 높은 것으로 나타났다. 홍미롭게도 대조군인 인공수분과 자연수분 역시 ‘후지’가 ‘홍로’보다 높은 결실률을 나타내었다. 그럼에도 인공수분의 경우 두 품종 간 결실률의 차이는 9.4%에 불과한 반면 자연수분과 머리뿔가위벌의 경우 각각 29.5%, 30.0%로 차이를 보였다. 이는 인력이 아닌 화분매개자에 의존하는 머리뿔가위벌 방사구나 자연수분구의 경우는 품종별로 화분매개

의 효과가 다르다는 것을 의미한다. 달리 생각하면 곤충이나 다른 화분매개자들이 ‘홍로’보다 ‘후지’에 이끌리는 선호성의 차이이거나 그 품종이 개화한 시기에 곤충이 화분매개 활동하기 어려운 특정한 환경적인 요인 차이가 있음을 예상할 수 있다. 더욱이 각 품종의 개화시기에 화분매개 방법별 결실률의 차이에서도 ‘홍로’에서 인공수분에 비해 머리뿔가위벌과 자연수분이 1.4 ~ 1.7배나 결실률이 낮은 반면 ‘후지’에서 단지 1.1 ~ 1.2배 차이 만을 나타내었다는 사실은 ‘홍로’의 개화시기보다 ‘후지’의 개화시기에 곤충과 같은 화분매개자들의 화분매개 활동이 더욱 효과적이라는 결과를 뒷받침해준다. 뿐만 아니라 사과의 종자수에서도 인공수분은 품종간 유의미한 차이가 없었지만 머리뿔가위벌과 자연수분의 경우, ‘후지’의 종자수가 ‘홍로’에 비해 1.9배 이상 많은 결과를 나타내었다. 우리는 ‘홍로’와 ‘후지’에서 머리뿔가위벌의 영소활동과 화분매개활동의 차이를 일으키는 원인 중 하나로 기상환경에 주목하였다. 왜냐하면 꿀벌과 같은 벌목 화분매개곤충의 행동은 기상환경에 영향을 받기 때문이다(Bosch et al., 2000; Radmacher and Strohm, 2011). 특히 머리뿔가위벌의 행동은 온도, 조도, 풍속과 같은 기상환경에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Vicens and Bosch, 2000; Yoon et al., 2013). 이에 2008년, 2009년, 2015년에 조사된 기상환경에 따른 머리뿔가위벌의 영소행동의 데이터를 종합하여 기온과 머리뿔가위벌의 영소활동량간의 회귀식을 도출하였다. 이 식을 통하여 머리뿔가위벌의 활동시기인 낮 최고기온을 대입하여 영소활동을 추정한 결과, ‘홍로’ 개화시기는 23.7마리, ‘후지’ 개화시기는 41.6마리로 ‘후지’ 개화시기의 영소활동이 ‘홍로’보다 1.8배로 많은 것으로 계산되었다. 이번 조사에서 ‘후지’ 개화기간 중 영소활동량이 ‘홍로’보다 2.3 ~ 2.5배 많은 것과 유사한 결



과를 나타내었다. 이러한 결과를 종합하면 품종별로 머리뿔가위벌의 영소활동과 화분매개효과가 차이가 나는 주된 원인은 기상환경 특히, 온도임을 알 수 있었다. 실제로 이번 조사장소인 장수의 '홍로' 개화기와 단양의 '후지' 개화기에 평균기온과 낮 최고기온을 조사한 결과 각각 4.9°C, 3.9°C '후지'의 개화기 기온이 더 높은 것으로 확인되었다.

이 온도라는 기상요인은 머리뿔가위벌과 같은 화분매개곤충의 활동뿐만 아니라 사과와 개화시기에도 큰 영향을 준다 (Kweon et al., 2017). 최근 기상변화로 인하여 배나 사과와 같은 낙엽과수의 개화시기는 점차 빨라지고 있다(Jang et al., 2002; Seo and Park, 2003). 이번에 조사된 영주시의 2011년부터 2020년간 사과의 품종별 개화시기를 분석한 결과 '후지'는 2011년 대비 6일 '홍로'는 11일이나 빨라졌으며, 상관분석을 통해 시간이 지남에 따라 개화기는 빨라지는 경향을 확인하였다(Fig. 3). 이와 함께 사과의 자발휴면타파가 끝나는 3월부터 개화기인 4월까지의 기온은 적게나마 10년 동안 증가하는 경향도 확인하였다(Fig. 4). Kweon et al. (2017)은 사과의 개화시기에 가장 큰 영향을 미치는 것은 휴면중 저온처리기간과 자발휴면 타파 후 고온 노출기간이며, 특히 꽃눈 발생 후는 고온에 의해 개화시기가 앞당겨지는 것을 보고하였다. 그러나 개화기가 빨라지는 것은 머리뿔가위벌의 활동에 문제가 생길 가능성이 매우 크다. 그 이유는 개화기간이 빨라질수록 일기의 변화가 심하기 때문이다. 일반적으로 국내 4월 초순 날씨는 꽃샘추위 등으로 일기변화가 매우 심하다(Kwon et al., 2005). 우리의 결과에서도 10년동안 4월 초(1일 ~ 10일)의 낮 최고기온과 평균기온의 변동계수가 5월초(1일 ~ 10일)보다 2배이상 큰 것으로 나타나 일기가 불안정함을 알 수 있었다(Fig. 5). 머리뿔가위벌은 꿀벌과 뒤영벌 같은 사회성 곤충과는 달리 휴면이 끝난 후 바로 화분매개 활동을 하는 것이 아니라, 교미기간, 난소발달기간이 지난 후 산란처를 찾고 나서야 비로소 효과적으로 화분매개를 할 수 있는 영소활동이 시작된다(Zurbuchen et al., 2010). 머리뿔가위벌의 영소활동은 유충의 먹이로 꽃가루를 저장한 후 산란하는 행동이므로 산란생리와 중요한 상관성이 있다(Cane, 2016). Maeta and Kitamura (1981)와 Lee et al. (2015)은 머리뿔가위벌의 난소는 월동종료 후 26°C의 항온 조건에서 6일까지 발달 후 감소한다는 것을, Cane et al. (2017)은 머리뿔가위벌이 교미후 난소발달을 위하여 화밀과 꽃가루를 섭취한 이후, 산란이 준비되면 영소활동을 시작한다고 보고하였다. 만약 4월 초까지 사과꽃의 개화기간이 앞당겨지더라도 영소활동과 중심화 결실시기를 맞추기 위하여 만개일로부터 최소 6일 전에 머리뿔가위벌이 방사되어야 하기 때문에(Bosch and Kemp, 2001), 일기변화가 심한 환경에서 암벌이 노출되는 기회는 더

욱 많아질 것이다. 머리뿔가위벌은 저온에서 활동성이 급격히 감소하기 때문에 (Fig. 2), 산란을 비롯하여 영소활동과 화분매개 활동에도 지장을 받을 수도 있을 것이다(Sedivy and Dorn, 2014). 이는 사과의 개화기가 빨라지는 상황에서 꽃이 일찍 피는 조생품종에서 안정적인 과실 착과를 위한 머리뿔가위벌의 사용은 효과적이지 않다는 것을 의미한다. 오히려 기상환경에 영향을 적게 받으며, 벌통을 가져다 놓으면 바로 사용할 수 있는 화분매개곤충, 뒤영벌(Bumblebee)을 사용하는 것이 사과의 안정적인 결실에 더욱 효과적일 것으로 판단된다. Yoon et al. (2013) 도 일기가 불순한 환경에서 개화된 '홍로'에서 뒤영벌이 뿔가위벌류보다 높은 활동량과 결실효과를 보인다고 보고하였다. 반면에 고위도에서 재배되는 '후지'와 같은 만생종의 경우 '홍로'에 비해 비교적 기온이 높고, 일기가 안정된 시기에 개화가 되기 때문에 머리뿔가위벌을 충분히 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

## 결론

이번 연구결과를 종합하면, '홍로'와 '후지'에서 모두 머리뿔가위벌은 사과의 정형과을 향상에 도움을 주었다. 다만 사과의 품종별 개화시기에 따라 머리뿔가위벌의 영소활동과 화분매개효과는 분명한 차이가 있었고, '홍로'보다 '후지'에서 머리뿔가위벌이 더욱 효과적이다. 이러한 이유로 품종의 특성이 아닌 개화기의 기상환경-기온이 주된 원인 중 하나임을 확인하였다. 또한 10년간 사과꽃의 개화기가 빨라지는 상황에서 '홍로'와 같은 조생종 사과의 안정적인 결실을 위해서 머리뿔가위벌보다 기상환경에 영향이 적은 뒤영벌이 추천되며, 고위도 지역에서 재배되는 '후지'와 같은 만생종에서는 머리뿔가위벌이 충분히 효과적일 것으로 판단되었다. 본 연구는 사과 재배 농가에 사과와 안정적인 생산을 위한 중요한 정보로 사용될 수 있다. 또한 기후변화에 인하여 머리뿔가위벌의 화분매개활동이나 증식률이 변할 수 있다는 결과는 기후변화에 의한 식생과 곤충상에 변화에 대한 근거로 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 그럼에도 본 연구의 결과로 사과품종에 따른 머리뿔가위벌의 화분매개효과의 차이를 완전히 설명하기에 한계가 있다. 왜냐하면, 본 연구는 각 품종의 주산지에서 실험된 결과를 비교한 것으로 각 실험장소의 사과 재배환경 차이가 있기 때문이다. 특히 '홍로' 경우 단일 품종만 식재된 시험포장에서 조사가 진행되었기 때문에 개화기가 끝난 이후 머리뿔가위벌의 산란을 위한 화분원(pollen source)이 수급이 어려워 증식률이 떨어질 수 있는 반면 '후지'의 경우 과수원에서 진행되어 '후지' 개화 이후에 피는 보조화분원(natural pollen source)이 머리뿔가위벌의 증식

를 향상에 영향을 줄 수 있다(Moroń et al., 2009; Fliszkiewicz et al., 2015). 또한 수분수의 품종에 따라, 수분수의 밀도에 따라서도 착과율이 달라질 수도 있다(Kang et al., 2002; Kang, 2004). 따라서 차후 연구에서는 같은 재배환경에서 사과 품종별 머리빨가위벌의 화분매개효과를 조사할 필요가 있다고 생각된다. 추가로 품종에 따른 화밀이나 화분의 특성과 머리빨가위벌의 선호성을 조사하여 화분매개효과의 차이가 환경 또는 선호성 중 어떠한 요소에 의해 더 크게 작용하는지 확인할 필요가 있다. 또한 기후변화로 사과의 개화기가 빨라짐에 따라 월동 이후 온도에 따른 난소발달과 영소율 및 증식률의 조사를 통해 기상변화에 의한 머리빨가위벌의 개체군에 변화에 미치는 영향뿐만 아니라 더 나아가 기후변화에 의한 작물과 화분매개곤충 상호작용 모델화에 대한 연구로 확장할 수 있을 것이다. 화분매개효과에 있어서도 착과율과 과실형태에 머무를 것이 아니라 과실의 식미, 저장성의 변화 등 조사를 통해 머리빨가위벌의 화분매개에 의한 과실의 품질 변화를 종합적으로 검토할 필요성이 있다고 생각된다(Samnegård, 2019).

## 사 사

이 논문은 농촌진흥청 국립농업과학원 기관고유 농업기초 기반연구사업 (과제번호: PJ015878) 과제의 지원을 통해 작성되었습니다.

## 저자 직책 & 역할

이경용: 농업연구사(박사); 연구비, 연구설계, 연구수행, 자료분석, 통계, 원고작성, 원고수정

이정애: 농업연구사(석사); 연구수행(10년간 사과 품종별 개화기, 개화기간 온도), 연구자료 제공

윤형주: 농업연구관(박사); 연구비, 연구계획, 연구설계, 원고수정

모든 저자는 원고 작성에 참여하고 투고에 동의하였음.

## Literature Cited

- Alston, F.H., 1996. Incompatibility alleles and apple pollination. *Acta Hort.* 423, 119-124.
- Batra, S.W.T., 1982. The hornfaced bee for efficient pollination of small farm orchards. in Kerr, W.H., Knutson, L.V. (Eds.), *Research for small farms*, USDA Miscellaneous Publication, Washington, D.C., pp. 116-120.
- Bosch, J., Kemp, W.P., 1999. Exceptional cherry production in an orchard pollinated with blue orchard bees. *Bee World* 80, 163-173.
- Bosch, J., Kemp, W.P., 2000. Development and emergence of the orchard pollinator, *Osmia lignaria* (Hymenoptera: Megachilidae). *Environ. Entomol.* 29, 8-13.
- Bosch, J., Kemp, W.P., 2001. How to manage the blue orchard bee, *Osmia lignaria*, as an orchard pollinator. *Sustainable Agriculture Network*, Washington D.C.
- Bosch, J., Kemp, W.P., Peterson, S.S., 2000. Management of *Osmia lignaria* (Hymenoptera: Megachilidae) populations for almond pollination: methods to advance bee emergence *Environ. Entomol.* 29, 874-883.
- Bosch, J., Kemp, W.P., Trostle, G.E., 2006. Bee population returns and cherry yields in an orchard pollinated with *Osmia lignaria* (Hymenoptera: Megachilidae). *J. Econ. Entomol.* 99, 408-413.
- Cane, J.H., 2016. Adult pollen diet essential for egg maturation by a solitary *Osmia* bee. *J. Insect. Physiol.* 95, 105-109.
- Cane, J.H., Dobson, H.E., Boyer, B., 2017. Timing and size of daily pollen meals eaten by adult females of a solitary bee (*Nomia melanderi*)(Apiformes: Halictidae). *Apidologie* 48, 17-30.
- Fliszkiewicz, M., Kuśnierczak, A., Szymaś, B., 2015. Reproduction of the red mason solitary bee *Osmia rufa* (syn. *Osmia bicornis*)(Hymenoptera: Megachilidae) in various habitats. *Eur. J. Entomol.* 112, 100-105.
- Goldway, M., Schneider, D., Yehuda, H., Matityahu, A., Eisikowitch, D., Stern, R.A. 2001. The effect of apple *Sallele* compatibility on fruit set levels in non-optimal fertilization conditions. *Acta Hort.* 561, 231-234.
- Jang, H.I., Seo, H.H., Park, S.J., 2002. Strategy for fruit cultivation research under the changing climate. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 20, 270-275.
- Janick, J., Cummins, J.H., Brown, S.K., Hemmat, M., 1996. Apples, in: Janick, J., Moore, J.N. (Eds.), *Fruit breeding*. Wiley, New York, pp. 1-77.
- Kang, I.K., 2004. Selection of crabapples as pollinizers for 'Hongro' apple cultivar. *Hortic. Sci. Technol.* 22, 212-215.
- Kang, I.K., Lee, G.J., Kim, M.J., Kwon, S.I., Peak, P.Y., Choi, D.G., 2002. Selection of crabapple as pollinizers for major apple cultivars in apple orchard. *Hortic. Sci. Technol.* 20, 330-334.
- Kim, I.S., 1999. Studies on the ecological characteristics and utilization of *Osmia* spp. as pollinators. Master thesis, Kongju National University, pp. 1-44.
- Korea Meteorological Administration (KMA). 2019. Annual climatological report. KMA press, Seoul.
- Kweon, H.J., Park, M.Y., Song, Y.Y., Sagong, D.H., 2017. Influence of accumulated hours of low temperature in dormant and changing temperature after bud breaking on flowering of main apple cultivars in Korea, *Korean J. Agric. For. Meteorol.* 19, 252-269.

- Kwon, Y.A., Kim, J., Lee, S., 2005. Distribution and changing trend on the occurrence of spring colds. *J. Korea. Geogr. Soc.* 40, 285-295.
- Lee, K.Y., Lee, K.S., Yoon, H.J., Jin, B.R., 2015. Ovarian development and secretion of vitellogenin protein during the wintering period and after emergence in the hornfaced bee, *Osmia cornifrons*. *J. Asia Pac. Entomol.* 18, 515-523.
- Lee, K.Y., Yoon, H.J., Lee, K.S., Jin, B.R. 2016a. Development and mating behavior of *Osmia cornifrons* (Hymenoptera: Megachilidae) in the constant temperature. *J. Asia Pac. Entomol.*, 19, 281-287.
- Lee, K.Y., Lee, J.A., Han, H.H., Na, S.Y., Kim, S.Y., Yoon, H.J., 2016b. The appropriate sex ratio and density of the mason Bee (*Osmia cornifrons*) for apple pollination. *Korea. J. Apic.* 31, 337-349.
- Lee, K.Y., Lee, S.B., Park, I.G., Kang, P.D., Yoon, H.J., 2014. Distribution status of mason bees, *Osmia* spp. (Hymenoptera: Megachilidae) in apple orchard of Korea. *J. Apic.* 29, 223-234.
- Lee, K.Y., Yoon, H.J., Park, I.G., Kwon, C.R., Lee, S.C., 2010. Survey on the current status of mason bees in apple orchard of Korea. *J. Apic.* 25, 53-61.
- Lee, S.W., Choi, K.H., Lee, D.H., Kim, D.A., Ryu, H.K., Lee, Y.I., 2002. Distribution and collection of *Osmia* bees in the mountain areas of Korea. *Korean J. Appl. Entomol.* 41, 263-267.
- Maeta, Y., 1978. Comparative studies on the biology of bee of the genus *Osmia* of Japan. with special reference to their managements for pollination of crops (Hymenoptera: Megachilidae). *Bull. Tohoku. Natl. Agric. Exp. Stn.* 57, 1-221.
- Maeta, Y., Kitamura, T., 1981. Pollinating efficiency by *Osmia cornifrons* (Radoszkowski) in relation to required number of nesting bees for economic fruit production. *Honeybee Sci.* 2, 65-72.
- Maeta, Y., Nadano, K., Kitamura, T., 2005. Relationship between seed yield of chinese milk vetch and density of female bees, *Osmia cornifrons* (RADOSZKOWSKI)(Hymenoptera, Megachilidae). *Chugoku. Kontyu.* 19:45-61.
- Masoudi, H., Tabatabaei Fard, S.A., Borghei, A.M., Shahbeik, M., 2005. Determination and comparison of physical and mechanical properties of three export varieties of three export varieties of apples. *Iran J. Agric. Sci.* 11, 215-231.
- Moroń, D., Lenda, M., Skórka, P., Szentgyörgyi, H., Settele, J., Woyciechowski, M., 2009. Wild pollinator communities are negatively affected by invasion of alien goldenrods in grassland landscapes. *Biol. Conserv.* 142, 1322-1332.
- Park, J.G., Hong, J.S., Choi, I.M., Kim, J.B., Kim, S.H., Park, H.S., 1998. Applications of artificial pollination, spraying gibberellin A4+7 plus benzyladenine for production of uniform fruits in 'Fuji' apples. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 16, 27-29.
- Radmacher, S., Strohm, E., 2011. Effects of constant and fluctuating temperatures on the the development of the solitary bee *Osmia bicornis* (Hymenoptera: Megachilidae). *Apidologie* 42, 711-720.
- Rural Development Administration (RDA), 2019. Apple cultivation, RDA press, Jeonju.
- Samnegård, U., Hambäck, P.A., Smith, H.G., 2019. Pollination treatment affects fruit set and modifies marketable and storable fruit quality of commercial apples. *R. Soc. Open Sci.* 6(12), 190326.
- Schneider, D., Stern, R.A., Eisikowitch, D., Goldway, M. 2001. Analysis of S-alleles by PCR for determination of compatibility in the 'Red Delicious' apple orchard. *J. Hort. Sci. Biotech.* 76, 596-600.
- Sedivy, C., Dorn, S., 2014. Towards a sustainable management of bees of the subgenus *Osmia* (Megachilidae; *Osmia*) as fruit tree pollinators. *Apidologie* 45, 88-105.
- Seo, H.H., Park, H.S., 2003. Fruit quality of 'Tsugaru' apples influenced by meteorological elements. *Korean J. Agric. For. Meteor.* 5, 218-225.
- Sheffield, C.S., Westby, S.M., Smith, R.F., Kevan, P.G., 2008. Potential of bigleaf lupine for building and sustaining *Osmia lignaria* populations for pollination of apple. *Can. Entomol.* 140, 589-599.
- Statistics Korea, 2020. Crops production statistics, <http://kosis.kr/> (accessed 15 January, 2021)
- Torchio, P.F., 1985. Field experiments with the pollinator species, *Osmia lignaria propinqua* Cresson in apple orchards: V, 1979-1980, methods of introducing bees, nesting success, seed counts, fruit yields (Hymenoptera: Megachilidae). *Kansas Entomol. Soc.* 58, 448-464.
- Vicens, N., Bosch, J., 2000. Weather-dependent pollinator activity in an apple orchard, with special reference to *Osmia cornuta* and *Apis mellifera* (Hymenoptera: Megachilidae and Apidae). *Environ. Entomol.* 29, 413-420.
- Yoo, J., Kang, I.K., 2014. Effects of artificial pollination using pollen suspension on fruit set and quality attributes of 'Fuji' apples. *Curr. Res. Agric. Life sci.* 32, 211-214.
- Yoon, H.J., Lee, K.Y., Park, I.G., Kim, M.I., Kim, Y.M., Kang, P.D., 2012. Current status of insect pollinators use in apple orchards. *J. Apic.* 27, 105-116.
- Yoon, H.J., Lee, K.Y., Kim, M.A., Park, I.G., Kang, P.D., 2013. Characteristics on pollinating activity of *Bombus terrestris* and *Osmia cornifrons* under different weather conditions at apple orchard. *J. Apic.* 28, 163-171.
- Yoon, H.J., Lee, K.Y., Kim, S.Y., Lee, Y.B., Kim, N., Jin, B.R., 2015. Effects of location, direction, altitude, and placement of trap nests on the rate of trap-nesting of *Osmia* solitary bees. *J. Asia Pac. Entomol.* 18, 695-700.
- Yoon, H.J., Lee, K.Y., Lee, H.S., Lee, M.Y., Choi, Y.S., Lee, M.L., Kim, G.H., 2017. Survey of insect pollinators use for horticultural crops in Korea, 2016. *J. Apic.* 32, 223-235.
- Zurbuchen, A., Landert, L., Klaiber, J., Müller, A., Hein, S., Dorn, S., 2010. Maximum foraging ranges in solitary bees: only few individuals have the capability to cover long foraging distances. *Biol. Conserv.* 143, 669-676.