도심지역 고온현상이 사과나무 생육과정에 미치는 영향: 대구광역시 ‘후지’/M.9을 사례로

사공동훈^{1*} · 권현중¹ · 박무용¹ · 송양익¹ · 류수현¹ · 김목종¹ · 최경희¹ · 윤태명²

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 사과시험장, ²경북대학교 원예과학과

(2013년 4월 1일 접수; 2013년 7월 17일 수정; 2013년 7월 31일 수락)

Impacts of Urban High Temperature Events on Physiology of Apple Trees: A Case Study of ‘Fuji’/M.9 Apple Trees in Daegu, Korea

Dong-Hoon Sagong^{1*}, Hun-Joong Kweon¹, Moo-Yong Park¹, Yang-Yik Song¹,
Su-Hyun Ryu¹, Mok-Jong Kim¹, Kyung-Hee Choi¹ and Tae-Myung Yoon²

¹Apple Research Station, National Institute of Horticultural & Herbal Science, R.D.A., Gunwi 716-812, Korea

²Department of Horticultural Science, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

(Received April 1, 2013; Revised July 17, 2013; Accepted July 31, 2013)

ABSTRACT

In this study, we examined the effect of high temperature of urban area on the physiological response of apple tree including the photosynthesis, shoot growth, and fruit quality of ‘Fuji’/M.9 apple trees planted at Daegu urban area (DUA) and Gunwi rural area (GRA) for 2 years (2009-2010). During the apple growing season (April-October), the average air temperature of DUA was about 3.0°C higher than that of GRA and the total rainfall of DUA was 130 mm more than that of GRA. During fruit enlargement stage (June-August), the number of days that recorded daily mean temperature of over 30°C were ten on DUA in 2010, but there was no day when such temperature was experienced in 2009. Average air temperature of DUA during the maturation stage (September-October) was 19.8°C, which was 4.0°C higher than that of GRA. The higher temperature of over 30°C during fruit enlargement stage decreased the photosynthetic rate, shoot growth, fruit weight, and soluble solid content of ‘Fuji’/M.9 apple tree. The moderate temperature of about 20°C during maturation stage increased the photosynthetic rate and soluble solid content of ‘Fuji’/M.9 apple tree, but decreased fruit red color. In regional comparison with GRA, photosynthetic rate of DUA was changed from lower before rainy season to higher after rainy season. Fruit weight was higher in DUA than that of GRA. However, fruit weight between DUA and GRA did not show the difference when accumulated days that recorded daily maximum temperature over 35°C of DUA was increased. Compared to the GRA, soluble solid content of DUA was higher, but fruit red color of DUA was less. These results indicate that the poor red coloring is the most problematic in ‘Fuji’/M.9 apple tree by global warming and urbanization.

Key words: *Malus domestica* Borkh, fruit red color, fruit weight, photosynthetic rate, shoot growth

I. 서 론

사과는 4월부터 10월까지의 평균기온이 15-22°C인

비교적 한랭한 기후에 적합하며, 세계적으로 유명한 사과 주산지의 연평균기온은 13.5-18.5°C 범위에 있다 (Oh *et al.*, 2004). 사과나무는 같은 품종이라도 적산

* Corresponding Author : Dong Hoon Sagong
(sa0316@hanmail.net)

온도가 높을수록 과실의 비대 및 신초생장이 증가한다 (Johnson and Lakso, 1985; Ortega-Farias *et al.*, 2002).

일반적으로 광량은 11-13시에 최대로 되고(Cho *et al.*, 2008; Sagong *et al.*, 2011a), 기온의 최저는 일출 1시간 전인 6시, 최고는 14-15시(Chae *et al.*, 2006)에 되지만, 대기 중의 CO₂ 농도와 상대습도는 기온과 반대로 일출 1시간 전이 가장 높고, 15시에 가장 낮다 (Chung *et al.*, 2007; Yu and Jeong, 2005). 한편 사과 나무의 광합성속도와 기공전도도는 오전인 8-12시 사이에 정점에 올랐다가 시간이 지날수록 서서히 감소하고, 증산속도와 VPD는 오후인 14-16시 사이에 최고점에 도달한 뒤 내려가는데(Corelli Grappadelli, 2003; Yoon *et al.*, 2005), 사과 잎의 광포화점은 400-500W/M(800-1,000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 정도이고(Tromp, 2005), 광합성속도는 약 30°C를 정점으로 하여 포물선 모양을 보인다 (Lakso, 1994; Palmer *et al.*, 2003).

사과나무의 신초생장은 발아 후 보통 6월 하순까지의 기온이 높을수록 왕성해지다가 7월 하순이 되면 생장이 거의 정지되고(Johnson and Lakso, 1985; Kim *et al.*, 2006; Yoon and Sagong, 2005; Yoon *et al.*, 2005), 과실의 크기는 개화부터 유과기까지(개화 후 6-8주)의 기온이 높을수록 세포분열이 왕성하게 되어 커진다(Calderón-Zavala *et al.*, 2004; Palmer *et al.*, 2003; Warrington *et al.*, 1999). 과실의 성숙은 대체로 20-25°C를 중심으로 하여 이보다 낮으면 늦어지고, 약간 높아 27°C 전후가 되면 빨라지는데(Kim *et al.*, 2006), 과중, 가용성 고형물 함량 및 착색은 광합성활동에 의한 과실 내 전분 축적이 많아질수록 높아진다(Sagong *et al.*, 2011b; Song *et al.*, 2003). 그러나 잎으로부터 전류 되는 광합성 산물에 의해 생성되는 과피의 안토시아닌은 만개 후 146일부터 190일(4월 20일을 만개기로 정할 경우 9월 중순에서 10월말)까지의 평균기온이 14-15°C일 때 가장 많이 생성된다(Lee, 1999).

산업혁명 이전(1790년대)의 대기 중 CO₂ 농도는 세계적으로 약 280 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 이었으나 1999년에는 376 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 로 높아졌고(Park *et al.*, 2005), 현재 기상청에서 2011년에 측정한 안면도의 연 평균 CO₂ 농도는 396 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 이다. 이러한 추세라면 2100년에는 CO₂ 농도가 약 2배(540-970 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)로 높아지고, 기온은 지금보다 1.4-6.0°C 정도 상승될 것으로 예측되고 있다(Chung *et al.*, 2007; IPCC, 2007; Kim and Lee, 2001; Kim *et al.*, 2009). Oh *et al.*(1994)은

CO₂ 농도와 기온이 상승하게 되면 우리나라의 연강수량은 약 15-30% 정도(약 300-400mm) 증가할 것으로 예측하였다.

Yun(2002)은 지난 반세기 동안 우리나라 여름철 기온, 특히 야간 기온이 상승한 것은 지구온난화에 의한 것이 아니라 도시화에 의한 것으로, 연중 고르게 평균기온이 높아진 것은 최저기온이 높아졌기 때문이라고 하였다. 도시화는 기후변화 정부간 위원회(Inter-governmental Panel on Climate Change, IPCC)의 기후변화 시나리오(Special Report on Emissions Scenarios, SRES)에 상응하는, 즉 기온상승 및 CO₂ 농도증가를 유발하는 것으로 관찰되어 현재의 도시기후는 미래에 닥쳐올 기후변화의 전조라 할 수 있다(Chung *et al.*, 2007). 따라서 대도시에 위치한 사과원에서 국지 기상환경 변화에 따른 생리반응을 연구한다면 생장실에서 CO₂ 농도나 온도와 같은 특정 요인을 설정하고 식물반응을 살펴보는 기존연구에 비해 훨씬 적은 비용으로 현실에 더욱 가까운 결과를 얻을 수 있을 것이다.

최근 우리나라는 이상고온과 이상저온 현상이 대도시를 중심으로 자주 발생하는데(Ha *et al.*, 2004), 대구의 경우 1940-1969년에는 연평균 여름철 이상고온 현상이 0.4일이었으나, 1970-1999년에는 약 3배 이상 증가하여 1.4일 정도로 늘어났다(Heo and Lee, 2006). 분지형 도시인 대구지역은 과거에는 주야간 온도 차이가 크고 일조시간이 길어 사과 주산지로 명성을 날렸으나 과수원이 택지 또는 공장부지로 편입되고 급속한 도시화로 일 평균기온이 30°C를 넘는 날이 발생할 정도로 기온이 상승하고 주야간 온도 차이가 줄어들어 생산 사과의 품질이 떨어지면서 재배작목이 사과에서 포도나 복숭아로 바뀌었다. 기상청 자료에 의하면, 대구지역의 최근 1981년부터 2010년까지의 연평균기온은 14.1°C로 30년 전인 1961년부터 1990년까지의 13.2°C보다 1.0°C 정도 상승하였던 반면에 경북 사과 재배지역(영주, 의성, 안동)의 최근 1981년부터 2010년까지의 연평균기온은 11.4°C로 30년 전인 1961년부터 1990년까지의 11.3°C보다 0.1°C 정도 상승하는데 그쳐 여전히 전국 최고의 사과주산지로 명성을 이어가고 있다(Kim *et al.*, 2010).

앞서 사과나무의 광합성속도, 신초생장 및 과실성숙은 사과 생육기(4-10월) 동안의 기온이 높을수록 증가된다고 하였다(Kim *et al.*, 2006; Oh *et al.*, 2004; Palmer *et al.*, 2003). 그러나 과실 비대기(6-8월)의

기온이 30°C를 넘기 시작하면 광합성속도 및 신초와 과실의 성장속도가 감소되기 시작하고, 35°C를 넘으면 호흡소비(respiratory cost)가 많아져 광합성속도가 급격하게 감소한다(Lakso, 1994). 광합성속도가 30°C에서부터 감소되는 것은 광합성속도와 정의 상관관계를 가지는 기공전도도가 29°C를 넘으면 감소되기 때문으로(Massonnet *et al.*, 2007), 기공전도도는 기온 및 상대습도에 영향을 받는 수증기압차(vapor pressure deficit, VPD)가 2.0kPa를 넘으면 감소된다(Lee *et al.*, 2012; Tromp, 2005; Yoon and Richter, 1991). 즉, 지구온난화 및 도시화에 의해 30°C 이상의 고온 건조한 날씨가 장기화되면 사과나무는 체내 수분을 유지하기 위하여 기공이 닫히고, 호흡소비가 많아지면서(Lakso *et al.*, 1999; Oh *et al.*, 2004), 신초와 과실의 생장 및 과실의 성숙이 억제되거나 지연된다(Calderón-Zavala *et al.*, 2004; Lakso, 2003; Kim *et al.*, 2006; Shü *et al.*, 2001; Tomana, 1983).

Yun(1998)은 우리나라의 CO₂ 농도가 현재의 배로 높아져 기온이 2°C 상승하면 여름작물기간은 10-29일이 길어지게 될 것이라고 예측하였다. 만생종인 ‘후지’의 이론적 수확 적기는 만개 후 약 180일이지만(Hwang *et al.*, 1998; Song *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2011), 겨울철 저온이 다소 늦게 오는 경남 밀양 및 전남 장성지역에서는 착색을 증진시키기 위하여 만개기와 상관없이 가을철 기상상태(서리, 강설 등)에 따라 과실 수확을 10월말부터 시작해서 12월초까지 하고 있다. 따라서 지구온난화 및 도시화에 의해 과실 성숙기(9-10월)의 평균기온이 15°C 이상으로 상승하게 되면 ‘후지’의 착색은 불량해질 것이며(Lee, 1999; Tomana and Yamada, 1988; Warrington *et al.*, 1999; Yamada *et al.*, 1988; 1994), 수확시기는 착색 증진을 위해 지금보다 2-4주 정도 지연될 수 있다.

한편 지구온난화에 의해 기온이 상승하게 되면 겨울이 따뜻해지면서 월동해충 증가와 토착화 가능성이 확대되어 돌발 병해충 발생이 크게 증가할 수 있다(Shim *et al.*, 2008). 특히, 사과 주요 병해인 갈색무늬병은 여름철에 강수량이 많은 해일수록 발생이 심해지는 병으로 발병이 심할 경우 8월부터 낙엽이 시작되는데(Kim *et al.*, 1998), 9월말 수관 전체 잎 중 낙엽이 30% 이상이 되면 과실에 축적되는 전분이 부족해져 과중과 가용성 고형물 함량이 감소된다(Sagong *et al.*, 2011b). 그러나 갈색무늬병의 발병 최성기는 평

균기온이 20°C 전후이고, 기온의 일교차가 심한 9월로, 강수량이 많았던 해라도 7-8월 평균기온이 30°C에 근접하면 갈색무늬병 발생은 낮아진다(Kim *et al.*, 1998). 또한, Lee *et al.*(2007)은 사과의 주요 병해충 발생은 재배관리 및 주변 식생의 변화에 큰 영향을 받는다고 하였는데, 도시화가 진행되면 병해충이 월동할 수 있는 산과 들이 줄어들어 병해충 발생이 적어질 수 있다.

이와 같이 식물의 광합성활동에 큰 영향을 주는 기상요소는 서로 독립적이라기보다는 밀접하게 관련되어 나타나고(Byun *et al.*, 2006), 시공간적으로 매우 다양한 변화를 보이므로(Yu and Jeong, 2005), 동일 장소와 품종의 사과나무를 공시하여 같은 조건으로 관리하면서 기상환경을 비교하고, 그에 따른 광합성과 생장의 차이를 조사하면 도시화 및 온난화에 사과나무가 어떻게 반응하는지를 예측할 수 있다고 생각된다. 또한, 이상고온은 전원 지역보다는 도시화 지역에서, 겨울철보다는 여름철에 자주 발생하는데, 이상고온에 따른 식물들의 생태학적 스트레스는 여름철에 뚜렷하게 나타난다(Ha *et al.*, 2004; Heo and Lee, 2006). 따라서 본 시험은 도시화에 의해 여름철 일 평균기온이 30°C를 넘는 날이 발생하는 대구 도심지의 ‘후지’/M.9 사과나무의 광합성능력, 신초생장 및 과실비대를 시기별로 교외지역과 비교하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 관측수목 및 기상환경

본 시험은 대구 도심에 위치한 경북대학교 부속 실습 사과원(위도: 35° 53', 경도: 128° 27', 해발고도: 57m)과 대조구로 대구에서 60km 거리에 있는 전원지역인 경북 군위군 사과시험장(위도: 36° 16', 경도: 128° 37', 해발고도: 68m)에서 2년(2009년, 2010년) 동안 실시하였다.

시험재료는 3.5×1.5m로 재식 되어있는 10년생 이상의 ‘후지’/M.9 사과나무들로, 2009년은 10주, 2010년에는 20주를 지정하여 조사하였다. 토성은 미사질 양토였고, 나무당 착과량은 80개를 목표로 조절하였다. 관수는 토양수분이 부족하지 않게 필요한 경우 수시로 점적관수를 실시하였는데, 광합성 측정 시에는 측정 전날 저녁(18시 이후)부터 측정 직전(5-7시)까지 충분히 관수하였다. 시비는 시험주의 수세가 강한 것으로 판단되어 시험기간 2년 모두 하지 않았다. 대구지역의

기온과 강수량은 사과원에서 1.3km 거리에 위치하는 대구기상대의 관측 자료를 이용하였고, 군위지역은 기상청에서 시험장 내에 설치한 자동 기상관측기(경상북도 군위군 소보면 위성리 소재)에서 수집된 자료들을 이용하였다. 대구와 군위지역의 2009년 ‘후지’ 만개기는 각각 4월 11일, 4월 25일이었고, 2010년은 각각 4월 25일, 5월 5일이었다.

앞서 갈색무늬병이 발생하면 광합성속도가 감소되어 과중과 가용성 고형물 함량이 감소된다(Sagong *et al.*, 2011b)고 하였다. 본 시험에서 대구지역은 2009년과 2010년 모두 갈색무늬병이 발생하지 않았으나, 군위지역에서는 2010년에 심하게 발생하여 9월말에 수관 전체 잎 중 60%가 낙엽한 시험주가 절반 이상 달하였다. 따라서 2010년 군위지역 일부 조사는 불가피하게 낙엽이 발생하기 전인 7월까지만 하였다.

2.2. 광합성능력

사과 생육기 동안의 지역별 광합성능력을 비교하고자, 기상청의 일기예보를 참고하여 일사량이 충분한 날을 택하였다. 2009년 광합성능력 측정날짜는 대구의 경우 6월 19일, 8월 29일, 9월 26일, 10월 28일이고, 군위는 6월 16일, 8월 25일, 9월 24일, 10월 27일이었는데, 9월 24일에는 오전에 구름이 많았다. 측정방법은 나무 별로 지면에서 약 1.3m 높이의 과대지 1개를 미리 선정하고, 인공광 챔버가 부착된 광합성 측정기(LI-6400, LI-COR, USA)로 중간 부위 2개의 잎을 대상으로 광합성속도, 기공전도도, 증산속도 및 잎의 온도를 기준으로 한 수증기압차(leaf-to-air water vapor pressure deficit on leaf temperature, VpdL)를 7시부터 18시까지 1시간 간격으로 조사하였다. 광합성 측정 시 광량 조절은 매시간 휴대용 광량 측정기(Field scout, Spectrum, USA)로 측정한 노지의 광량을 LI-6400의 인공광 챔버에 매시간 대입하였고, 광합성 측정 시 CO₂ 농도 조절은 매시간 LI-6400의 CO₂ 농도 조절 밸브를 완전히 열어 측정한 노지 대기의 CO₂ 농도를 매시간 LI-6400에 대입하였다. 기온과 상대습도는 인위적으로 조절하지 않았다.

2010년의 광합성능력 측정날짜는 대구의 경우 5월 21일, 6월 25일, 7월 23일로 6월 25일은 하루 종일 구름이 많았고, 7월 23일에는 15시부터 구름이 끼기 시작하여 18시부터 비가 왔다. 군위는 5월 27일, 6월 22일, 7월 21일에 조사하였다. 측정방법은 나무 별로

지면에서 약 1.3m 높이의 과대지 1개를 미리 선정하고, 중간 부위 1개의 잎을 대상으로 광합성속도, 기공전도도, 증산속도 및 VpdL을 일출 때(광량 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이상)부터 일몰 직전(광량 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이하)까지 1시간 간격으로 조사하였다. 광합성 측정 시 측정방법은 2009년과 동일하였다.

2.3. 신초생장과 과실비대

시기별 신초생장과 과실비대는 대구지역만 조사하였다. 신초는 매년 나무당 정단신초 10개를 무작위로 선정하여, 2009년은 만개 후 8주(6월 5일)부터 28주(10월 23일)까지 2주 간격으로 조사하였고, 2010년은 만개 후 8주(6월 3일)부터 27주(10월 28일)까지 1주 간격으로 조사하였다.

과실은 광합성을 조사한 과대지에 착과된 과실을 나무당 10개씩 선정하여 종경과 횡경을 조사하였다. 조사시기와 방법은 신초생장과 동일하였다.

2.4. 과신품질

2009년에 대구는 만개 후 201일(10월 29일)에, 군위는 만개 후 196일(11월 2일)에 나무 당 10과(지역별 100과)씩 수확하였다. 과중은 개별로 전수 조사하였고, 착색 정도는 색차계(Chroma meter CR-400, Konica minolta, Japan)를 사용하여 각각의 과실을 3부분(양광면, 음광면, 중간부분)의 평균값을 Hunter a value로 표시하였다. 가용성 고형물 함량은 주당 3-4과씩 과실을 분쇄하여 착즙한 후 110mm 거름종이(Filter paper, Advantec, Japan)로 걸러 디지털당도계(PR-100, Atago, Japan)로 측정하였고, 산 함량은 과즙 5mL를 증류수 20mL로 희석한 후 0.1N NaOH로 적정하여 pH 8.1이 되는 점의 적정치를 사과산으로 환산하였다.

2010년에는 군위의 경우 시험구에 갈색무늬병이 심하게 발생한 관계로 피해가 경미한 ‘후지’/M.9 사과나무 10주를 선정한 후 나무 당 10개씩 과실을 11월 3일(만개 후 180일)에 무작위로 수확하여 품질을 조사하였다. 대구는 11월 12일(만개 후 201일)에 같은 방법으로 수확하여 품질조사를 하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 지역별 기상환경

2009년과 2010년 사과 생육기(4월부터 10월까지)

Fig. 1. Change of average air temperature of Daegu urban area (DUA) and Gunwi rural area (GRA) in 2009 (a) and 2010 (b).

Fig. 2. Change of total rainfall of Daegu urban area (DUA) and Gunwi rural area (GRA) in 2009 (a) and 2010 (b).

동안 대구의 평균기온은 각각 21.5°C, 21.6°C이었고, 군위는 각각 18.5°C, 18.9°C로 대구가 군위보다 2.7-3.0°C 정도 높았다. 세포 분얼기인 생육 초기(4-5월)의 평균기온은 대구가 각각 18.2°C, 15.5°C이었고, 군위는 각각 14.6°C, 12.8°C로 대구가 군위보다 2.7-3.6°C 정도 높았다. 과실 비대기(6-8월)의 평균기온은 대구가 각각 24.8°C, 26.8°C이었고, 군위는 각각 22.8°C, 24.7°C로 대구가 군위보다 2.0-2.1°C 정도 더 높았다. 과실 성숙기(9-10월)의 평균기온은 대구가 각각 19.8°C로 연도별로 차이가 없었고, 군위는 각각 15.8°C, 16.4°C로 대구가 군위보다 3.4-4.0°C 정도 더 높았다(Fig. 1).

2009년과 2010년 사과 생육기 동안 대구의 총 강수량은 각각 749mm, 1,045mm이었고, 군위는 각각 609mm, 930mm로 대구가 군위보다 115-140mm 정도 더 많았다. 특히 장마기인 7-8월 대구의 총 강수량은 2010년이 650mm로 2009년의 392mm보다 260mm 정도 많았고, 군위는 2010년이 603mm로

2009년의 338mm보다 265mm 정도 많았다. 대구지역 7-8월의 총 강수량은 사과 생육기 동안 총 강수량의 54-62%를 차지하였고, 군위는 55-65%를 차지 하였다(Fig. 2).

일 최저기온이 25°C를 넘은 날은 2009년의 경우 대구가 2일 정도 있었지만 군위는 하루도 없었고, 2010년에는 대구가 23일, 군위는 2일 정도 있었다. 일 평균기온이 30°C를 넘었던 날은 2009년에는 두 지역 모두 하루도 없었지만, 2010년에는 대구가 10일 정도 있었고, 군위는 하루도 없었다. 일 최고기온이 35°C를 넘은 날은 2009년의 경우 대구가 2일 정도 있었지만 군위는 하루도 없었고, 2010년에는 대구가 11일, 군위는 2일 정도 있었다(Table 1). 즉, 지역별로는 군위보다는 대구가, 연도별로는 2009년보다는 2010년이 훨씬 무덥고 열대야(일 최저기온이 25°C를 넘은 날)가 자주 발생하였다.

본 시험에서 강수량이 많았던 2010년에 군위에서만 갈색무늬병이 심하게 발생한 것은 대구지역 시험포장

Table 1. Accumulated days of specific air temperature from 1 April to 31 October in Daegu urban area (DUA) and Gunwi rural area (GRA) for 2 years

Region	Accumulated days of specified Temperature		
	Over 25°C at Min. Temp.	Over 30°C at Avg. Temp.	Over 35°C at Max. Temp.
From April to October in 2009			
Daegu urban area	2	0	2
Gunwi rural area	0	0	0
From April to October in 2010			
Daegu urban area	23	10	11
Gunwi rural area	2	0	2

은 주위가 주거지역으로 갈색무늬병이 월동할 수 있는 산이나 풀밭이 없지만 군위지역 시험포장은 주위가 산과 밭으로 둘러싸여 있는데다가, 2010년에 일 평균기온이 30°C를 넘었던 날이 대구는 10일 정도 있었으나 군위는 하루도 없었기 때문(Table 1)으로 추정되었

다(Lee *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 1998).

광합성 측정 시의 평균 광량은 흐린 날(대구: 2010년 6월 25일, 군위: 2009년 9월 24일)이 있었던 2009년 9월과 2010년 6월에만 지역별로 차이가 나타났을 뿐 다른 시기에는 차이가 없었다. 광합성 측정 시의 평균 기온은 대구가 군위보다 3.0°C 정도 높은 경향이 있었는데, 2009년 6월의 경우 대구가 군위보다 5.0°C 정도 더 높았고, 2010년 5월에는 대구가 군위보다 10.0°C 정도 더 높았다. 대기 중 평균 CO₂ 농도는 대구가 군위보다 10 μmol·mol⁻¹ 정도 더 높았다. 평균 상대습도는 대구가 군위보다 10% 정도 낮았는데, 장마 전인 2009년 6월과 2010년 5월에 지역별 차이가 가장 컸다(Table 2).

이상의 지역별 기상환경을 종합해보면, 사과 생육기 동안 도심지역인 대구의 평균기온은 전원지역인 군위보다 2.7-3.0°C 높았고(Fig. 1), 총 강수량은 대구가 군위보다 130mm 정도 많았으며(Fig. 2), 지역별 기온 및 상대습도의 차이가 가장 컸던 시기는 5-6월이었다

Table 2. Average of light intensity, air temperature, CO₂ concentration, and relative humidity per day in Daegu urban area (DUA) and Gunwi rural area (GRA) for 2 years

Region	Light intensity (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	Air temperature (°C)	CO ₂ concentration (μmol·mol ⁻¹)	Relative humidity (%)
End of June in 2009 (from 07:00 to 18:00)				
Daegu urban area	983±151.8 ^z	29.4±1.36	401±7.2	38.3±3.87
Gunwi rural area	847±128.8	24.3±1.25	385±5.3	55.6±6.62
End of August in 2009 (from 07:00 to 18:00)				
Daegu urban area	1,073±145.9 ^z	25.6±0.73	377±5.7	54.0±2.33
Gunwi rural area	856±138.1	24.6±1.00	374±8.9	58.7±4.87
End of September in 2009 (from 07:00 to 18:00)				
Daegu urban area	810±149.6 ^z	24.7±0.97	392±7.5	58.9±4.66
Gunwi rural area	592±143.1	22.1±1.05	385±6.7	64.3±7.69
End of October in 2009 (from 07:00 to 18:00)				
Daegu urban area	526±112.2 ^z	18.1±1.60	435±10.0	48.5±6.22
Gunwi rural area	501±101.2	16.0±1.70	404±10.0	57.4±8.08
End of May in 2010 (from 05:00 to 20:00)				
Daegu urban area	889±168.2 ^z	26.8±1.30	415±8.8	31.7±4.57
Gunwi rural area	1,056±188.1	16.8±1.52	394±6.2	50.6±5.64
End of June in 2010 (from 05:00 to 20:00)				
Daegu urban area	383± 80.1 ^z	25.2±0.62	402±7.4	43.8±4.28
Gunwi rural area	1,009±181.7	26.0±1.44	388±7.1	47.7±6.31
End of July in 2010 (from 05:00 to 18:00)				
Daegu urban area	858±207.4 ^z	31.0±0.86	385±5.7	56.1±4.01
Gunwi rural area	995±215.6	28.6±1.12	394±12.4	63.1±4.25

^zMean ± standard errors; one replicate was from one-hour average.

(Table 2). 대기 중 CO_2 농도는 평균적으로 대구가 군위보다 $10\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 정도 높았고, 지역 간 차이는 10월에 가장 컸다(Table 2). 이는 2100년에 우리나라의 CO_2 농도가 지금의 약 2배로 높아지면 기온은 $2.0\text{--}4.0^\circ\text{C}$ 정도 상승되고(Chung *et al.*, 2007; IPCC, 2007), 연강수량은 약 15-30% 증가할 것이라는 예측(Oh *et al.*, 1994) 및 도시지역인 서울, 수원의 2006-2007년 연평균 CO_2 농도가 전원지역인 이천보다 $10\text{--}20\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 정도 높았고, 여름보다는 겨울에 차이가 컸다는 보고(Chung *et al.*, 2007)와 비슷하였다.

3.2. 광합성능력

장마 전 광합성 측정 시 평균 기온 및 상대습도가 각각 $5\text{--}10^\circ\text{C}$, 16-20% 정도 차이가 났던 2009년 6월과 2010년 5월 대구의 평균 광합성속도는 군위보다 낮은 경향이 있었다. 그러나 장마기 및 장마 후 광합성 측정 시 평균 기온 및 상대습도가 각각 $2\text{--}3^\circ\text{C}$,

$5\text{--}9\%$ 정도 밖에 차이가 나지 않았던 7월 이후 대구의 평균 광합성속도는 반대로 군위보다 높은 경향이 있었다. 평균 기공전도도는 광합성속도와 비슷하게 5월과 6월에는 군위가 대구보다 높은 경향이 있었으나 장마 후에는 지역별로 차이가 없었고, 평균 증산속도는 광량이 2배 정도 차이가 났던 2010년 6월만 군위가 대구보다 높았을 뿐 지역별 유의 차는 없었다. VpdL은 기온이 높았던 대구가 군위보다 높은 경향이 있었다(Tables 2 and 3).

일반적으로 기공전도도가 높을수록 광합성속도와 증산속도는 증가되는 것으로 알려져 있는데(Tromp, 2005), 본 시험에서는 시기별로 일정한 경향이 없었고, 지역별 광합성속도 역시 장마 전에는 대구가 군위보다 낮았지만 장마기 이후로는 반대로 대구가 군위보다 높은 경향이 있었다(Table 3). 따라서 본 시험에서는 30°C 이상의 고온에서 광합성능력의 변화 양상 및 지역별 광합성능력의 차이가 장마 전후로 변하는 이유를 구명

Table 3. Average of photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, and leaf-to-air water vapor pressure deficit on leaf temperature (VpdL) per day of 'Fuji'/M.9 apple tree in Daegu urban area (DUA) and Gunwi rural area (GRA) for 2 years

Region	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	VpdL (kPa)
End of June in 2009 (from 07:00 to 18:00)				
Daegu urban area	9.2 b ^z	0.11 b	4.06 a	4.0 a
Gunwi rural area	11.1 a	0.21 a	4.28 a	2.4 b
End of August in 2009 (from 07:00 to 18:00)				
Daegu urban area	11.9 a ^z	0.20 a	4.38 a	2.2 a
Gunwi rural area	8.8 b	0.23 a	4.61 a	2.2 a
End of September in 2009 (from 07:00 to 18:00)				
Daegu urban area	13.1 a ^z	0.24 a	3.61 a	1.6 a
Gunwi rural area	8.8 b	0.21 a	2.31 b	1.3 b
End of October in 2009 (from 07:00 to 18:00)				
Daegu urban area	7.7 a ^z	0.16 a	1.67 a	1.3 a
Gunwi rural area	4.9 b	0.22 a	1.97 a	1.1 b
End of May in 2010 (from 05:00 to 20:00)				
Daegu urban area	10.0 a ^z	0.20 b	3.12 a	2.4 a
Gunwi rural area	11.1 a	0.24 a	2.98 a	1.7 b
End of June in 2010 (from 05:00 to 20:00)				
Daegu urban area	7.2 b ^z	0.11 a	2.08 b	2.0 b
Gunwi rural area	8.8 a	0.20 a	3.43 a	2.8 a
End of July in 2010 (from 05:00 to 18:00)				
Daegu urban area	11.6 a ^z	0.23 a	5.26 a	2.3 a
Gunwi rural area	10.6 a	0.21 a	2.78 b	1.6 b

^zMeans followed by the same letter are not significantly different using T-test, $P=0.05$.

Fig. 3. Diurnal change of light intensity (a), leaf-to-air water vapor pressure deficit on leaf temperature (b), photosynthetic rate (c), and stomatal conductance (d) of Daegu urban area (DUA) and Gunwi rural area (GRA) on May in 2010. Vertical bars of B, C, and D indicate standard errors using twenty-leaf replications.

Fig. 4. Diurnal change of light intensity (a), leaf-to-air water vapor pressure deficit on leaf temperature (b), photosynthetic rate (c), and stomatal conductance (d) of Daegu urban area (DUA) and Gunwi rural area (GRA) on June in 2009. Vertical bars of b, c, and d indicate standard errors using twenty-leaf replications.

하고자, 지역별 평균 광량의 차이가 심하지 않았던 2009년의 6월과 8월, 2010년의 5월과 7월 광합성능력 일변화를 지역별로 비교해보았다.

장마 전인 2010년 5월과 2009년 6월 대구의 평균 광합성속도가 군위보다 낮았던 것(Table 3)은 사과나무는 일정수준의 엽 수분 유지가 어려워지면 feedforward 기작으로 기공을 닫아 수분의 손실을 최소화하는 특성이 있다는 보고(Lakso, 2003; Yoon and Richter, 1991)를 미루어 보아, 당시 대구지역은 12시 이후로 VpdL이 5.8kPa까지 상승하여 14-17시 사이의 기공전도도가 0.07mol·m⁻²·s⁻¹까지 내려갈 정도로 수분스트레스를 심하게 받았던 반면에 군위지역은 12시 이후로 VpdL이 3.1kPa까지 밖에 상승하지 않아 14-17시 사이의 기공전도도가 0.13mol·m⁻²·s⁻¹ 이상을 유지하였기 때문에 사료되었다(Fig. 3 and 4).

이와 반대로 장마기인 2010년 7월과 2009년 8월 대구의 평균 광합성속도가 군위보다 높았던 것(Table 3)은 광합성속도가 최대로 되는 9-12시 사이 대구의 7, 8월 평균 기공전도도가 0.25-0.29mol·m⁻²·s⁻¹ 범위로 군위의 0.20-0.25mol·m⁻²·s⁻¹ 범위보다 높았기 때

문으로 추정되었는데, 9-12시 사이 대구의 평균 VpdL은 2.3-2.4kPa 범위로 군위의 1.4-2.3kPa 범위보다 높았다(Fig. 5 and 6). 2010년 7월에 대구의 오후 기온이 30°C를 넘었음에도 불구하고 대구의 광합성속도 및 기공전도도가 군위보다 감소되지 않은 것(Table 2; Fig. 5)은 7-8월의 집중된 강우(Fig. 2B)에 의해 오후에도 잎의 수분이 일정수준 이상으로 유지할 수 있을 정도로 토양수분이 충분했기 때문으로 사료되었다(Lakso, 2003).

본 시험에서 새벽의 기공전도도가 정오 때보다 높았던 것(Fig. 3(d), 4(d), 5(d), and 6(d))은 새벽의 낮은 기온과 높은 상대습도에 의해 일액현상이 발생하였기 때문으로 추정되었다. 일액현상은 뿌리에서 물의 흡수가 왕성하게 이루어지는 상태에서 증산작용이 억제되면 발생하는데, 밤에 토양온도가 높고 토양함수량이 많으며, 공기의 온도가 낮고 습기가 포화상태에 가까울 때 일어난다고 한다(Byun *et al.*, 2006).

따라서 본 시험에서 광합성속도가 지역별로 차이가 없음에도 불구하고 지역별 기공전도도 및 증산속도의 차이가 없었던 것(Table 1)은 앞서 언급한 새벽의 일

Fig. 5. Diurnal change of light intensity (a), leaf-to-air water vapor pressure deficit on leaf temperature (b), photosynthetic rate (c), and stomatal conductance (d) of Daegu urban area (DUA) and Gunwi rural area (GRA) on July in 2010. Vertical bars of b, c, and d indicate standard errors using twenty-leaf replications.

Fig. 6. Diurnal change of light intensity (a), leaf-to-air water vapor pressure deficit on leaf temperature (b), photosynthetic rate (c), and stomatal conductance (d) of Daegu urban area (DUA) and Gunwi rural area (GRA) on August in 2009. Vertical bars of b, c, and d indicate standard errors using twenty-leaf replications.

액현상(Byun *et al.*, 2006)과 오후 30°C 이상의 고온에 의한 feedforward 기작(Lakso, 2003; Yoon and Richter, 1991)에 의한 것으로 사료되었다(Fig. 3-5, and 6).

3.3. 신초생장과 과실비대

일 평균기온이 30°C를 넘은 적이 하루도 없었던 2009년 대구지역의 만개 8주 후의 정단신초 길이는 40cm 정도였고, 만개 28주 후에 50cm까지 성장되었던 반면에 일 평균기온이 30°C를 넘은 날이 10일 정도 있었던 2010년에는 만개 8주 후 길이가 30cm, 만개 27주 후가 41cm로 2009년에 비해 10cm 정도 짧았다(Table 1; Fig. 7). 이는 여름철에 30°C 이상의 고온이 장기화되면 신초생장은 오히려 억제된다는 보고(Calderón-Zavala *et al.*, 2004)와 동일하였다.

본 시험에서 2009년 만개 8주 후(6월초)의 정단신초 길이가 2010년보다 길었던 것(Fig. 7)은 2009년 생육 초기(4-5월)의 기온이 2010년보다 높았기 때문(Fig. 1)으로 추정되었다(Johnson and Lakso, 1985).

Fig. 7. Seasonal change of terminal shoot length of 'Fuji'/M.9 apple tree in Daegu urban area (DUA) for 2 years. Full bloom of 2009 and 2010 were 11 April and 25 April, respectively. Vertical bars of 2009 indicate standard errors using ten-tree replications, and that of 2010 indicate standard errors using twenty-tree replications.

또한, 본 시험에서 2년 모두 신초의 생장이 만개 후 22주(9월초)까지 지속되었던 것(Fig. 7)은 7-8월에 강우가 집중되어(Fig. 2) 2차 생장이 발생하였기 때문으

Fig. 8. Seasonal changes of fruit length (a) and fruit diameter (b) of 'Fuji'/M.9 apple tree in Daegu urban area (DUA) for 2 years. Vertical bars of 2009 indicate standard errors using ten-tree replications, and that of 2010 indicate standard errors using twenty-tree replications.

로 사료되었다(Kim *et al.*, 2006).

2009년 만개 8주 후의 종경과 횡경은 40mm를 넘었고, 만개 28주 후에 각각 85mm, 95mm까지 커졌던 반면에 2010년에는 만개 8주 후의 종경과 횡경이 30mm 내외였고, 만개 27주 후에는 각각 74mm, 85mm로 2009년 대비 각각 10mm 정도 작았다. 만개 후 8주부터 28주까지의 종경과 횡경 비대량은 2009년이 각각 44mm, 50mm로, 2010년의 38mm, 47mm보다 10mm 정도 더 컸다(Fig. 8).

본 시험에서 2009년 만개 8주 후 과실의 종경과 횡경이 2010년보다 컸던 것(Fig. 8)은 2009년 생육 초기(4-5월)의 기온이 2010년보다 높아(Fig. 1a), 과실의 세포 분열이 왕성했기 때문으로 사료되었다(Palmer *et al.*, 2003; Calderón-Zavala *et al.*, 2004; Warrington *et al.*, 1999). 또한, 2010년 만개 후 8주부터 28주까지의 종경과 횡경 비대량이 2009년보다 적었던 것(Fig. 8)은 2009년에는 일 평균기온이 30°C를 넘는 날이 하루도 없었지만, 2010년에는 일 평균기온이 30°C를 넘는 날이 10일 정도 있을 정도로 무더위(Table 1), 여름철 30°C 이상의 잦은 고온에 의해 광합성속도가 감소되었기 때문(Table 1 and 3)이거나 혹은 2010년의 열대야(Table 1)에 의해 과실 호흡이 높아졌기 때문으로 추정되었다(Oh *et al.*, 2004). 즉, 대구지역 2010년의 과실 크기가 2009년보다 적었던 것(Fig. 8)은 2010년 생육 초기(세포 분열기)의 평균기온이 2009년보다 낮아(Fig. 1), 2010년 여름철에 일 평균기온이 30°C를 넘는 날 및 열대야가 2009년보다 자주 발생했기 때문으로 사료되었다(Table 1).

3.4. 과실품질

2009년 평균 과중은 대구가 380g으로 군위의 303g보다 80g 정도 더 무거웠다. 가용성 고형물 함량은 대구가 14.9°Brix로 군위의 14.1°Brix보다 0.8°Brix 정도 더 높았고, 산 함량은 0.36-0.38% 범위로 차이가 없었다. 과실의 착색은 군위가 17.9 hunter a value로 대구의 14.2 hunter a value보다 유의하게 높았다(Table 4).

2010년 지역별 평균 과중은 300g 내외로 차이가 없었고, 가용성 고형물 함량은 대구가 14.1°Brix로 군위의 12.6°Brix보다 1.5°Brix 정도 더 높았다. 산 함량은 0.35%로 차이가 없었고, 과실의 착색은 군위가 21.0 hunter a value로 대구의 17.0 hunter a value보다 유의하게 높았다(Table 2).

본 시험에서 대구지역 사과 생육초기(4-5월)의 기온은 군위보다 2.7-3.6°C 정도 높았고, 연도별로는 2009년 사과 생육초기의 기온이 2010년보다 1.8-2.7°C 정도 높아(Fig. 1), 지역별 만개기는 대구가 군위보다 2주 정도 빨랐고, 연도별로도 2009년 만개기가 2주 정도 빨랐다. 즉, 이러한 지역 및 연도별 만개기의 차이에 의해 수확시기를 지역 및 연도별로 동일하게 맞출 수 없었지만 전반적으로 대구의 가용성 고형물 함량은 군위보다 높았고, 착색은 반대로 군위가 대구보다 더 높았다(Table 4).

본 시험에서 2년 동안 대구지역의 가용성 고형물 함량이 군위보다 높았던 것(Table 4)은 대구의 과실 생육기(9-10월) 광합성속도가 군위보다 높아(Table 3), 대구의 과실 내 전분 축적이 군위보다 많았기 때문으

Table 4. Fruit quality of 'Fuji'/M.9 apple trees in Daegu urban area (DUA) and Gunwi rural area (GRA) for 2 years

Region	Harvest time		Fruit weight (g)	Soluble solid content (°Brix)	Titratable acidity (%)	Fruit red color (Hunter a)
	Days after full bloom	Date				
			2009			
Daegu urban area	201	29 October	380 a ^z	14.9 a	0.38 a	14.2 b
Gunwi rural area	196	2 November	303 b	14.1 b	0.36 a	17.9 a
			2010			
Daegu urban area	201	12 November	308 a ^z	14.1 a	0.35 a	17.0 b
Gunwi rural area	180	3 November	295 a	12.6 b	0.35 a	21.0 a

^zMeans followed by the same letter are not significantly different using T-test, $P=0.05$.

로 사료되었다. 대구의 착색 정도가 군위보다 낮았던 것(Table 4)은 대구의 과실 성숙기 동안 평균기온이 약 19.8°C로 군위의 15.8-16.4°C보다 3-4°C 정도 높아(Fig. 1), 대구 과실의 안토시아닌 함량이 군위보다 적었기 때문으로 사료되었다(Lee, 1999).

한편 연도별로는 일 평균기온이 30°C를 넘는 날이 10일 정도 있었던 2010년 대구의 과중 및 가용성 고형물 함량은 30°C를 넘는 날이 없었던 2009년 대구의 과실품질보다 낮은 경향을 보였는데(Table 1 and 4), 이는 기온이 30°C를 넘으면 과실비대 및 과실의 성숙이 억제되거나 지연된다는 보고(Kim *et al.*, 2006; Tomana, 1983)와 동일하였다.

IV. 결 론

사과 생육기(4-10월) 동안 도심지역인 대구의 평균 기온은 전원지역인 군위보다 2.7-3.0°C 높았고(Fig. 1), 총 강수량은 대구가 군위보다 100mm 정도 많았으며(Fig. 2), 대기 중 CO₂ 농도는 대구가 군위보다 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 정도 높았다(Table 2). 연도별로는 여름철 일 평균기온이 30°C를 넘었던 날이 군위지역은 2009년, 2010년 모두 하루도 없었지만, 대구는 2010년에 10일이나 발생할 정도로 2010년이 2009년보다 무더웠다(Table 1).

한편 본 시험에서 광합성속도가 최대가 된 시간의 광량은 900-2,000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 기온은 24-31°C 정도였고, 연도 및 월별로 다소 달랐지만 VpdL이 2.4kPa를 넘으면 광합성속도와 기공전도도는 감소되기 시작하였다(Fig. 3-5, and 6). 지역별 광합성속도는 장마 이전에는 대구의 광합성속도가 군위보다 낮은 경향을 보였지만 장마 이후로는 반대로 대구가 더 높은 경향

을 보였다(Table 3).

이상의 결과를 종합해보면, 온난화가 진행된 대구 도심지역에서는 일 평균기온이 30°C를 넘는 등 열대야(일 최저기온이 25°C 이상)가 자주 발생하였다(Table 1). 이러한 30°C 이상의 고온은 장마기인 7-8월보다는 건조한 5-6월에 발생할 때 광합성속도를 심하게 감소시켰다(Table 3; Fig. 3-5, and 6). 신초 및 과실생장은 열대야가 자주 발생한 2010년이 열대야가 발생하지 않은 2009년보다 억제되었다(Table 1; Fig. 7 and 8). 또한, 대구의 가용성 고형물 함량은 군위보다 높았지만 착색은 반대로 군위가 높았는데(Table 4), 대구의 과실 착색이 군위보다 낮았던 것(Table 4)은 대구의 과실 성숙기 기온이 20°C로 군위보다 3-4°C 정도 높았기 때문으로 사료되었다(Fig. 1). 연도별로는 무더웠던 2010년의 과중과 가용성 고형물 함량이 2009년보다 감소되었다(Table 1 and 2).

따라서, 지구온난화 및 도시화에 의해 미래 경북 사과주산지의 기온이 현재의 대구만큼 상승하게 되면, 과실 비대기의 30°C 이상 고온과 과실 성숙기의 20°C 정도의 온난한 기온에 의해 과실비대와 착색이 불량해질 수 있기 때문에 지금부터라도 고온에서 과실비대 및 착색이 잘될 수 있는 품종을 선발하고, 불량 환경 환경조건에서도 과실비대 및 착색을 향상시킬 수 있는 재배기술(시비, 착과 및 관수방법 등)을 개발되어야 할 것으로 판단되었다.

적 요

본 시험은 도심지역의 고온이 사과나무의 생리적 반응에 미치는 영향을 구명하고자, 도심지역인 대구와 전원지역인 군위에 재식된 '후지'/M.9 사과나무의 광

합성, 신초생장, 과실품질을 2년(2009-2010년) 동안 조사하였다. 사과 생육기(4-10월) 동안 대구의 평균기온은 군위보다 3.0°C 정도 높았고, 사과 생육기 동안의 총 강수량은 대구가 군위보다 100mm 정도 많았다. 과실 비대기(6-8월) 동안 대구는 일 평균기온이 30°C를 넘은 날이 2010년은 10일 정도 있었으나 2009년에는 하루도 없었다. 대구의 과실 성숙기(9-10월) 동안 평균기온은 19.8°C로 군위보다 4.0°C 정도 더 높았다. 과실 비대기의 30°C 이상의 고온은 '후지'/'M.9 사과나무의 광합성속도, 신초생장, 과중 및 가용성 고형물 함량을 감소시켰다. 과실 성숙기의 20°C 정도의 온난한 기온은 광합성속도 및 가용성 고형물 함량을 증가시켰으나 착색을 감소시켰다. 지역별 비교에 있어서, 장마 전에는 대구의 광합성속도가 군위보다 낮았으나, 장마 이후로는 대구가 군위보다 높았다. 대구의 과중은 군위보다 컸으나, 대구의 일 최고기온이 35°C를 넘은 날이 많아질수록 대구와 군위의 과중차이는 없어졌다. 대구의 가용성 고형물 함량은 군위보다 높았으나 착색은 반대로 군위가 높았다. 결론적으로 지구온난화 및 도시화에 의해 '후지'/'M.9 사과나무에서 가장 문제가 되는 부분은 착색불량이었다.

감사의 글

본 논문은 2010년도 농촌진흥청(국립원예특작과학원) 박사 후 연수과정지원사업(과제번호: PJ0067692010)에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Byun, J. Y., S. S. Lee, K. S. Choi, and S. M. Kang, 2006: *Plant Physiology* (2nd Ed.). Byun, J. Y. (Eds.) Hyangmoonsha Press, Seoul, 52-64. (In Korean)
- Calderón-Zavala, G., N. Lakso, and R. M. Piccioni, 2004: Temperature effects on fruit and shoot growth in the apple (*Malus domestica*) early in the season. *Acta Horticulturae* **636**, 447-453.
- Chae, J. C., S. J. Park, B. H. Kang, and S. H. Kim, 2006: *Principles of Crop Cultivation* (3rd ed.). Chae, J. C. (Ed.). Hyangmoonsha Press, Seoul, 205-207. (In Korean)
- Cho, M. S., K. W. Kwon, G. N. Kim, and S. Y. Woo, 2008: Chlorophyll contents and growth performances of the five deciduous hardwood species growth under different shade treatments. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **10**(4), 149-157. (In Korean with English abstract)
- Chung, U., K. J. Lee, and B. W. Lee, 2007: Preliminary report of observed urban-rural gradient of carbon dioxide concentration across Seoul, Suwon, and Icheon in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **9**(4), 268-276. (In Korean with English abstract)
- Corelli Grappadelli, L., 2003: Light relations. *Apples; Botany, Production and Uses*, D. C. Ferree and I. J. Warrington (Eds.), CABI Publishing, Cambridge, MA, 195-216.
- Ha, K. J., E. H. Ha, C. S. Yoo, and E. H. Jeon, 2004: Temperature trends and extreme climate since 1909 at big four cities of Korea. *Journal of the Korean Meteorological Society* **40**(1), 1-16. (In Korean with English abstract)
- Hwang, Y. S., I. Kim, and J. C. Lee, 1998: Influence of harvest date and postharvest treatments on fruit quality during storage and simulated marketing in 'Fuji' apples. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* **39**(5), 574-578. (In Korean with English abstract)
- Heo, I. H., and S. H. Lee, 2006: Changes of unusual temperature events and their controlling factors in Korea. *Journal of the Korea Geographical Society*. **41**(1), 94-105. (In Korean with English abstract)
- IPCC, 2007: Special report of the intergovernmental panel on climate change, CD-Rom.
- Johnson, R. S., and A. N. Lakso, 1985: Relationships between stem length, leaf area, stem weight, and accumulated growing degree-days in apple shoot. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **110**(4), 586-590.
- Kim, D. A., S. W. Lee, and J. T. Lee, 1998: Ecology of marssonina blotch caused by *Diplocarpon mali* on apple tree in Kyungpook, Korea. *Agricultural Research Bulletin of Kyungpook National University* **16**, 84-95. (In Korean with English abstract)
- Kim, P. G., and E. J. Lee, 2001: Ecophysiology of photosynthesis 3: photosynthetic responses to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**(4), 238-243. (In Korean)
- Kim, J. H., J. C. Kim, K. C. Ko, K. R. Kim, and J. C. Lee, 2006: *General Pomology* (4th ed.). Kim J. H. (Ed.) Hyangmoonsha Press, Seoul, 34-35 and 185-188. (In Korean)
- Kim, S. O., U. Chung, S. H. Kim, I. M. Choi, and J. I. Yun, 2009: The suitable region and site for 'Fuji' apple under the projected climate in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(4), 162-173. (In Korean with English abstract)
- Kim, S. Y., I. H. Heo, and S. H. Lee, 2010: Impacts of temperature rising on changing of cultivation area of apple in Korea. *Journal of the Korean Association of Regional Geographers* **16**(3), 201-215. (In Korean with English abstract)
- Lakso, A. N., 1994: Apple. *Handbook of Environmental*

- Physiology of Fruit Crops. Vol. 1: Temperate Crops.* B. Schaffer and P. C. Anderson (Eds.). CRC Press. Inc. Fla. 3-42.
- Lakso, A. N., 2003: Water relations of apples. *Apples; Botany, Production and Uses*, D. C. Ferree and I. J. Warrington (Eds.), CABI Publishing, Cambridge, MA, 167-194.
- Lakso, A. N., J. N. Wünsche, J. W. Palmer, and L. Corelli Grappadelli, 1999: Measurement and modeling of carbon balance of the apple tree. *HortScience* **34**(6), 1040-1047.
- Lee, H. C., 1999: Physiological and ecological factors affecting fruit coloration and color enhancement in *Malus Domestica* Borkh. cv. Fuji. Doctoral dissertation, Seoul National University, 48-51pp. (In Korean with English abstract)
- Lee, S. W., D. H. Lee, K. H. Choi, and D. A. Kim, 2007: A report on current management of major apple pests based on census data from farmers. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* **25**(3), 196-203. (In Korean with English abstract)
- Lee, K. C., H. S. Kim, H. S. Noh, J. W. Kim, and S. S. Han, 2012: Comparison of photosynthetic responses in *Allium microdictyon* Prokh and *Allium ochotense* Prokh from atmosphere-leaf vapor pressure deficit (VPD). *Korean Journal of Medicinal Crop Science* **20**(3), 171-176. (In Korean with English abstract)
- Massonnet, C., E. Costes, S. Rambal, E. Dreyer, and J. L. Regnard, 2007: Stomatal regulation of photosynthesis in apple leaves: evidence for different water-use strategies between two cultivars. *Annals of Botany* **100**, 1327-1356.
- Oh, J. H., C. E. Park, J. W. Kim, and H. J. Seang, 1994: Impacts of climatic change in Korea due to CO₂ doubling (scenarios for the precipitation change). *Journal of the Korean Meteorological Society* **30**(3), 335-362. (In Korean with English abstract)
- Oh, S. D., J. M. Park, and D. G. Choi, 2004: Tree growth. *Fruit tree physiology in relation to temperature*. S. D. Oh (Eds.), Gilmogm Press, Seoul, Korea, 192-255. (In Korean)
- Ortega-Farias, S., L. Flores, and L. León, 2002: Elaboration of a predictive table of apple diameter cv. Granny smith using growing degree days. *Agricultura Tecnica* **62**(4), 624-632. (In Spanish with English abstract)
- Palmer, J. W., J. P. Privé, and D. S. Tustin, 2003: Temperature. *Apples; Botany, Production and Uses*, D. C. Ferree and I. J. Warrington (Eds.), CABI Publishing, Cambridge, MA, 217-236.
- Park, K. J., J. C. Choi, B. C. Choi, and H. S. Chung, 2005: Variation of background-atmospheric concentration of carbon dioxide (CO₂) in Korea peninsula. *Journal of the Korean Meteorological Society* **41**(6), 955-965. (In Korean with English abstract)
- Park, Y. M., H. G. Park, and B. S. Lim, 2011: Analysis of postharvest 1-MCP treatment and CA storage effects on quality changes of 'Fuji' apples during export simulation. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* **29**(3), 224-231. (In Korean with English abstract)
- Sagong, D. H., S. J. Lee, S. G. Han, and T. M. Yoon, 2011a: The influence of materials for surface mulching on soil temperature and vegetative growth of apple nursery trees. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **13**(1), 1-9. (In Korean with English abstract) doi: 10.5532/KJAFM.2011.13.1.001
- Sagong, D. H., H. J. Kweon, Y. Y. Song, M. Y. Park, J. C. Nam, S. B. Kang, and S. G. Lee, 2011b: Influence of defoliation of marssonina blotch on vegetative growth and fruit quality in 'Fuji'/M.9 apple tree. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* **29**(6), 531-538. (In Korean with English abstract)
- Shim, K. M., G. Y. Kim, H. C. Jeong, and J. T. Lee, 2008: Adaptation and assessment of the impacts of global warming on agricultural environment in Korea. *Proceedings of Korean Society for Bio-Environment Control Conference* **17**(1), 78-81. (In Korean)
- Shū, Z. H., C. C. Chu, L. J. Hwang, and C. S. Shieh, 2001: Light, temperature, and sucrose affect color, diameter, and soluble solids of disks of wax apple fruit skin. *HortScience* **36**(2), 279-281.
- Song, K. J., J. H. Hwang, and H. K. Yun, 2003: Changes of soluble sugar and starch concentrations in fruits of apple cultivars differing in maturity. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* **44**(2), 207-210. (In Korean with English abstract)
- Tomana, T., 1983: The effect of environmental temperature on fruit maturing. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* **24**(4), 276-283. (In Korean with English abstract)
- Tomana, T., and H. Yamada, 1988: Relationship between temperature and fruit quality of apple cultivars grown at different locations. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* **56**(4), 391-397. (In Japanese with English abstract)
- Tromp, J., 2005: Metabolic processes. *Fundamentals of Temperate Zone Tree Fruit Production*. J. Tromp, J. T. Webster, and S. J. Wertheim (Eds.). Backhuys Publishers, Leiden, 39-54.
- Warrington, I. J., T. A. Fulton, E. A. Halligan, and H. N. de Silva, 1999: Apple fruit growth and maturity are affected by early season temperatures. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **124**(5), 468-477.
- Yamada, H., K. Hamamoto, A. Sugiura, and T. Tomana, 1988: Effect of controlled fruit temperature on maturation of apple fruits. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* **57**(2), 173-177. (In Japanese with English abstract)
- Yamada, H., H. Ohmura, C. Arai, and M. Terui, 1994: Effect of preharvest fruit temperature on ripening, sugar, and watercore occurrence in apples. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **119**(6), 1208-1214.
- Yoon, T. M., and D. H. Sagong, 2005: Growth control of 'Fuji' apple trees by use of prohexadione-calcium. *Korean*

- Journal of Horticultural Science and Technology* **23**(3), 269-274. (In Korean with English abstract)
- Yoon, T. M., and H. Richter, 1991: Stomatal conductance and leaf water parameters of apple, pear, sweet cherry and plum in an orchard. *Gartenbauwissenschaft* **56**(2), 75-81.
- Yoon T. M., H. Y. Park, and D. H. Sagong, 2005: Effect of root pruning on tree growth and fruit quality of 'Fuji'/M.9 apple trees. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* **23**(3), 275-281. (In Korean with English abstract)
- Yu, M. S., and Y. K. Jeong, 2005: Analysis of meteorological elements observed on AWS, Chonnam national university. *Journal of Science Education Chonnam National University* **29**(1), 143-151. (In Korean with English abstract)
- Yun, S. H., 1998: Climate change and its impact on agricultural ecosystem, world grain demand-supply and measures for the 21st century, *Proceeding of Korean Society of Crop Science and Korean Breeding Society Symposium for 50th Anniversary of Gyeongsang National University*, Institute of Agriculture and Life Science, 313-315. (In Korean with English abstract)
- Yun, J. I., 2002: Urbanization effect on the observed warming in Korea during the recent half century. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**(1), 58-63. (In Korean with English abstract)