

만개기 단근처리를 통한 수분스트레스가 ‘후지’/M.9 사과나무의 수체반응 및 과실특성에 미치는 영향

사공동훈^{1,2} · 윤태명^{3*}

¹대구대학교 원예학과, ²대구대학교 생명환경연구소, ³경북대학교 원예과학과
(2016년 10월 27일 접수; 2016년 12월 8일 수정; 2016년 12월 13일 수락)

Influence of Water Stress through Root Pruning on Tree Growth and Fruit Quality in ‘Fuji’/M.9 Apple Tree at Full Bloom

Dong-Hoon Sagong^{1,2} and Tae-Myung Yoon^{3*}

¹Department of Horticulture, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

²Institute of Life and Environment, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

³Department of Horticultural Science, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

(Received October 27, 2016; Revised December 8, 2016; Accepted December 13, 2016)

ABSTRACT

This study was conducted to find out the influence of water stress from May to June on photosynthesis, shoot growth and fruit quality of apple trees. Fuji’/M.9 apple trees were root pruned at full bloom (30th April), parallel to the row of 30 cm or 60 cm from the trunk, to one side or both sides of trunk. The average value of afternoon leaf water potential from May to June of the no root pruning was maintained over -1.80 MPa, but that of root-pruning treatments was maintained under -1.80 MPa. In the comparison of average value of leaf water potential from May to June by root-pruning degree, the root pruning both sides at 30 cm from trunk was lowest (-2.06 MPa), followed by the root pruning both sides at 60 cm (-2.02 MPa) and the root pruning one side at 30 cm (-1.91 MPa). Root pruning one side at 30 cm or both sides at 60 cm reduced photosynthetic rate from May to June by 80% or 65%, respectively, compared with no root pruning. So, the degree of decreasing total shoot length or average fruit weight compare to the no root pruning of the root pruning one side at 30 cm was 25% or 11%, respectively, and those of the root pruning both sides at 30 cm was 45% or 15%, respectively. However, the soluble solid content and fruit color of the root pruning was higher than those of the no root pruning, and those of the root pruning both sides was higher than root pruning one side. These results indicate that the fruit enlargement was decreased when the average value of average leaf water potential from May to June was under -1.80 MPa, and the shoot growth was decreased when that was under -2.00 MPa.

Key words: *Malus domestica* Borkh., Fruit weight, Leaf water potential, Photosynthesis

I. 서 론

현재 우리나라의 연강수량은 약 1,300mm 정도로 비

교적 많은 편이지만 대부분이 7~8월에 집중되어 있기 때문에, 식물의 생장 초기인 3~6월에는 오히려 낮은 강수량에 의해 식물체가 심각한 수분스트레스를 받을 수



* Corresponding Author : Tae-Myung Yoon
(tmyoon@knu.ac.kr)

있다(Lee and Lee, 2003). 국내 과수재배에서 한발기는 크게 생육이 왕성한 1차 한발기(5월 중하순부터 6월 중순)와 과실 성숙기인 2차 한발기(9~10월)로 나눌 수 있는데(Kim *et al.*, 2006), 사과나무의 경우, 과실의 세포 분열은 수정 후 3~6주(만개 후 31-56일), 신초생장은 발아 후 6월말까지 가장 왕성하므로(Tromp and Wertheim, 2005; Yim, 2015), 이 시기에 사과나무가 수분스트레스를 받으면 신초생장 및 과실비대가 크게 저하된다(Lakso, 2003).

Park *et al.*(1999)은 토양의 수분함량이 사과나무의 생육에 미치는 영향은 질소 시비보다 컸다(Park *et al.*, 1999)고 하였다. 식물체 내의 수분상태는 뿌리에서의 수분흡수능과 잎의 증산에 의해 결정되며, 식물체의 수분흡수, 이동 및 상태는 수분포텐셜로 설명할 수 있다(Byun *et al.*, 2006). 일반적으로 관수 직후 토양수분이 충분할 때는 식물의 수분포텐셜이 크지만 점차 시간이 경과할수록 낮아져 결국은 위조점에 이르게 되는데, 낮에는 토양(-0.05MPa), 뿌리(-0.20MPa), 잎(-1.5MPa) 사이에 수분포텐셜의 구배가 형성되어 식물이 토양수분을 흡수하며, 밤에는 증산작용이 거의 없어 토양과 작물체 간에 수분포텐셜이 같아진다(Park *et al.*, 2002).

일반적으로 식물체내 수분포텐셜이 낮아지면 팽압이 떨어지면서 세포생장의 중지, 기공폐쇄, 광합성 및 기타 효소관련 대사속도 감소 등이 발생되어 식물의 생장이 억제된다고 알려져 있다(Lee and Lee, 2003). 특히, 사과나무는 토양으로부터 수분 흡수가 여의치 않거나 혹은 증산량이 너무 많을 경우 잎의 수분포텐셜을 일정수준으로 유지하기 위하여 기공을 일시적으로 닫아 수분스트레스를 회피하려는 특성이 있는데(Yoon and Richter, 1991), 이러한 수분유지를 위해 하루 중 사과나무 잎의 기공이 닫혀 있는 기간이 길어지면 잎의 동화물질 생산이 감소되면서 신초생장 및 과실비대가 억제된다고 알려져 있다(Lakso, 2003; Yoon *et al.*, 2005).

사과나무 잎의 광포화점은 $800 \sim 1,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 정도이며(Tromp, 2005b), 사과나무 광합성속도는 대기 중 수증기압차(VPD, vapor pressure deficit)에 의해 영향을 받으나(Sagong *et al.*, 2013; Yoon and Richter, 1991), 일반적으로 기온이 29°C가 넘으면 기공이 폐쇄하기 시작하므로 광합성속도가 감소한다(Kweon *et al.*, 2013; Massonnet *et al.*, 2007; Palmer *et al.*, 2003).

일반적으로 사과나무의 잎 수분포텐셜은 품종 및 재배환경에 따라 다르지만 화창한 여름철 사과나무의 잎 수분포텐셜은 새벽 2시부터 6시까지 -0.10MPa 이상을

유지하다가 일출 후 광합성 및 증산작용이 본격적으로 활동되는 9시부터 17시 사이에 -2.50MPa까지 내려가는 것으로 알려져 있는데(Tromp, 2005a; Yoon *et al.*, 2005; Yoon and Richter, 1991), Lakso(2003)는 사과나무 잎의 수분포텐셜이 -1.50MPa 이하가 되면 신초생장이 멈추기 시작한다고 하였고, Oh *et al.*(2004)은 덥고 건조한 날 사과나무 잎의 한계 수분포텐셜은 -1.80~-2.20MPa 정도이지만, -3.00MPa까지 내려가는 경우도 있다고 하였다. 즉, 앞서 언급한 바와 같이 사과나무의 광합성속도, 신초생장 및 과실비대는 잎의 수분포텐셜 수준에 따라 달라질 수 있는데(Lakso, 2003; Tromp, 2005a and 2005b), 국내에서는 한발기인 5~6월에 ‘후지’/M.9 사과나무 잎의 수분포텐셜이 어느 정도까지 감소되는지 혹은 어느 정도의 잎 수분포텐셜에서 ‘후지’/M.9 사과나무가 수분스트레스를 받는지에 대해 알려진 바가 거의 없다.

한편, 뿌리전정(root pruning, 단근)은 근권을 감소시켜 토양으로부터의 양분 및 수분 흡수를 제한하여 지상부 영양생장을 억제하는 수세안정화 기술이다(Wetheim, 2005). 과수의 뿌리 분포는 작물, 품종, 대목 및 수세에 따라 다르지만, 대략적으로 수평으로 2~100m, 수직으로는 0~50cm 사이인 작토층에 가장 많이 분포하고 있으므로(Kim *et al.*, 2006), 단근의 깊이에 따른 신초생장 억제효과는 뚜렷한 차이가 없으나(Schupp and Ferree, 1988), 원줄기에 가깝게 처리를 할수록 잘리는 뿌리의 양이 많아져 수분스트레스가 심해지기 때문에(Ferree and Schupp, 2003), 사과나무는 주간으로부터 30~60cm 떨어진 곳에서 깊이 30cm 정도로 단근 처리하고 있다(Baughner *et al.*, 1995; Miller, 1995; Schupp *et al.*, 1992).

일반적으로 과수의 뿌리생장이 왕성한 시기에는 지상부 생장이 일시적으로 중단되거나 미약하고, 반대로 지상부 생장이 왕성한 시기에는 뿌리생장이 미미해진다(Yim, 2015). 이와 같이 과수의 뿌리생장은 시기적으로 5~6월에 첫 번째 정점과 8~10월에 두 번째 정점을 나타내므로(Oh *et al.*, 2004), 만개기 단근 처리 후 관수 등 관리를 충실히 하면 생육 후기에 뿌리의 재생장(regrowth)이 왕성해져 생육 후기의 수분상태 및 기공의 열림 정도가 생육초기보다 양호해진다(Wang *et al.*, 2014). 따라서 단근 처리한 사과나무가 수분스트레스를 받을 때 나타나는 광합성속도 및 신초생장 감소 현상은 단근 처리 4주 후에 사라진다고 한다(Ferree, 1989; Schupp and Ferree, 1990).

우리나라 기후와 토양조건에서 과수 생육 중 1일 평균 증발산량을 시기별로 살펴보면, 4~5월은 3mm 내외, 5~6월은 4~5mm 내외, 7~8월은 5~6mm 내외로, 1일 평균 증발산량이 4~5mm 정도라 가정하고 7~10일 간 비가 내리지 않으면 25~35mm 내외의 관수를 해주어야 한다(Yim, 2015). 최근 10년(2005~2015년) 동안 기상청의 대구지역 시기별 총강우량의 자료를 살펴보면, 5월과 6월 월별 총 강우량이 36mm를 넘지 못하였던 연도는 4회(2005년 5월, 2010년 6월, 2014년 5월과 6월, 2015년 5월)이었고, 100mm 이상이었던 연도는 5회(2005년 6월, 2006년 5월, 2008년 6월, 2009년 5월과 6월, 2011년 5월과 6월)로 5~6월 강우량이 일정하지 않았다. 즉, 국내 기상여건 상 5~6월 강우가 적을 경우 사과나무를 만개기(4~5월)에 단근 처리하면 단근에 의한 광합성속도 및 신초생장 억제 기간이 앞선 보고들(Ferree, 1989; Schupp and Ferree, 1990)보다 더 길어질 수 있고, 반대로 5~6월 강우가 많을 경우에는 단근 처리에 의한 근권부 감소에 의해 5~6월에 목표로 하는 수분 스트레스 수준을 어느 정도 유지할 수 있을 것이라고 생각되었다.

따라서, 본 시험은 국내 5~6월 한발기 수분스트레스가 사과나무에 미치는 영향을 구명하고자 '후지'/M.9 사과나무를 대상으로 만개기(4월말)에 다양하게 단근 처리를 한 뒤, 잎의 수분포텐셜, 광합성속도, 신초생장 및 과실품질을 조사해보았다.

II. 재료 및 방법

2. 1. 시험재료 및 처리방법

본 시험은 대구광역시에 위치한 경북대학교 부속 과수원에 3.5 x 1.5m로 재식된 8년생 세장방추형 '후지'/M.9 사과나무들을 대상으로 하여 2년 동안 수행하였다. 과수원 토양은 점질토에 지력이 좋아 사과나무들은 매년 왕성한 생장을 보였다. 과수용 복합비료(N:P:K=15:6:10)는 3월말에 주당 100g씩 사용하였고, 점적호스를 이용하여 4~6월경에는 2~3일 간격으로 일몰 후 3~4시간 관수하였으며[나무별(1주의 재식면적: 5.25m²) 1일 총관수량: 15.2~20.3L], 7월 이후에는 강우 상황에 맞추어 관수하였다. 한편, 주당 착과수는 단근 처리한 시험주들이 5~6월 한발기 수분스트레스에 의해 고사될 것을 우려하여 관행보다 적은 60개로 조절하였다. 이듬해에는 단근 처리를 하지 않았으므로 관행대로 80개를 목표로 적과하였다.

단근 처리는 만개기(4월 30일)에 실시하였으며, 트랙터에 부착한 길이 70cm, 너비 20cm, 두께 2cm인 강철 날을 이용하여 깊이 30cm로 원줄기로부터 양쪽 30cm와 양쪽 60cm 및 한쪽 30cm 거리에서 재식 열 방향으로 단근 처리를 하였다.

시험구는 단근 처리 별로 사과나무 1주를 1반복하여 4반복의 완전임의배치법으로 배치하였으며, 단근 처리를 하지 않은 사과나무를 대조구로 포함시켰다. 각종 조사결과에 대한 통계분석은 SAS 9.2 프로그램을 이용하였다.

2. 2. 잎의 수분포텐셜

단근 처리 정도에 따른 사과나무의 상태를 측정하기 위하여 처리당해 6시기(5월 11일, 5월 19일, 5월 31일, 6월 17일, 6월 24일, 8월 4일)에 걸쳐 pressure chamber (Model 3005, Soil moisture Equipment, USA)로 잎의 수분포텐셜을 조사하였다. 측정시간은 토양의 수분포텐셜과 잎의 수분포텐셜이 평형을 이루는 새벽 5~7시와 하루 중 잎의 수분포텐셜이 가장 낮게 유지되는 오후 14~16시에 정단신초 중간 부위 성숙한 잎을 주당 2매씩 채취하여 측정하였다.

2. 3. 광합성속도, 기공전도도 및 증산속도

광합성속도, 기공전도도 및 증산속도는 잎의 수분포텐셜을 조사한 날 14~16시에 휴대용 광합성 측정기(LCpro, ADC BioScientific Ltd., England)로 지면에서 약 1.5 m 높이의 과대지 부위의 잎을 주당 2매씩 조사하였다.

5월초부터 8월말까지 일별 총 강우량 및 광합성속도 등을 측정한 날의 미기상은 경북대학교 부속 과수원에 설치된 자동 기상관측기(AWS, Campbell, USA)를 이용하여 수집하였다. 증기압부족량(VPD)은 수집된 기온 및 상대습도를 이용하여 다음 식 (1)과 (2)를 이용해 구하였다(Murray, 1967).

$$VPD \text{ (kPa)} = SVP \text{ (saturation vapor pressure)} \times (1 - 0.01 \times \text{Relative humidity}) \quad (1)$$

$$SVP \text{ (kPa)} = 0.611 \times 10^{[(7.5 \times \text{air temperature}) / (\text{air temperature} + 237.3)]} \quad (2)$$

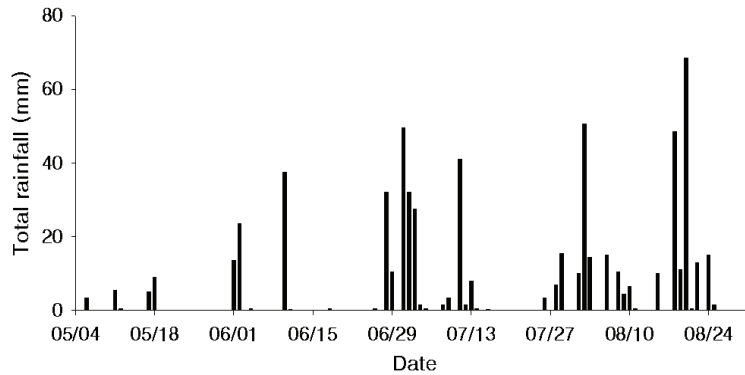


Fig. 1. Daily rainfall in Daegu during the experimental period.

2. 4. 잎의 특성과 신초생장

엽면적은 처리 당해 7월 중순에 정단신초 중간 부위의 성엽을 주당 25매씩 채취하여 휴대용 엽면적 측정기 (LI-3000A, LI-COR, USA)로 조사하였다. 잎의 질소 함량은 엽면적을 조사한 잎을 80°C에서 건조시킨 후 Kjeldahl법으로 분석하였다.

신초생장은 매년 낙엽이 진 후인 1월초에 나무 별로 지면에서 2m 높이까지의 총 신초수와 각 신초 길이를 조사하여 총 신초장과 평균 신초장을 산출하였다.

2. 5. 과실품질 및 이듬해 개화율

과실은 매년 11월초에 나무 별로 전량 수확하여 평균 과중 및 주당 생산량을 조사하였고, 주당 5과씩 무작위로 택하여 품질을 조사하였다. 착색 정도는 과실의 양광면과 음광면을 색도 색차계(NR-3000, Minolta, Japan)로 Hunter a 값을 측정하였고, 가용성 고형물 함량은 경도를 조사한 과실을 전량 분쇄하여 착즙한 후 Filter paper (Advantec, Toyo Roshi Kaisha Ltd., Japan)로 걸러낸 과

즙을 당도계(PR-101, Atago, Japan)로 측정하였다.

이듬해 개화율은 동계전정(2월) 후 4월 중순에 나무 전체의 총 정아수에 대한 개화한 정아수를 조사하여 나타내었다.

III. 결과 및 고찰

3. 1. 잎의 수분포텐셜

토양수분이 충분하면서 통기가 잘되는 토양에 뿌리를 내린 대부분 식물의 잎은 약 $-0.20 \sim -0.80$ MPa의 수분포텐셜을 가진다고 한다(Byun *et al.*, 2006). 본 시험에서는 5월 상순부터 6월 중순까지 비가 거의 내리지 않아 가뭄이 심하였지만(Fig. 1; Table 1), 일몰 후 점적관수로 처리구들의 새벽 잎의 수분포텐셜(5~7시)은 조사기간 내내 -0.15 MPa부터 -0.33 MPa 사이를 유지하여 처리나 시기에 관계없이 새벽에는 토양 수분이 충분히 유지되었음을 확인할 수 있었다(Table 2).

그러나 오후(14~16시) 잎의 수분포텐셜은 무처리구

Table 1. Light intensity, air temperature, relative humidity and vapor pressure deficit (VPD) between 14:00 and 16:00 in the apple orchard during the experimental period

Dates	Light intensity ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Air temperature (°C)	Relative humidity (%)	VPD (kPa)
11 May	1,023 ± 28.0 ^z	23.7 ± 0.15	44.5 ± 0.50	1.62 ± 0.029
19 May	1,273 ± 74.0	27.6 ± 0.20	42.5 ± 0.80	2.12 ± 0.054
31 May	907 ± 48.5	29.8 ± 0.65	38.1 ± 1.10	2.59 ± 0.143
17 June	938 ± 8.0	28.7 ± 0.65	59.1 ± 1.75	1.60 ± 0.129
24 June	1,340 ± 32.5	35.5 ± 0.50	47.8 ± 1.90	3.02 ± 0.193
4 August	1,548 ± 18.0	33.2 ± 0.85	67.0 ± 2.10	1.68 ± 0.186

^z Mean ± standard error

Table 2. Seasonal changes in leaf water potential of ‘Fuji’/M.9 apple trees of different root pruning treatments

Root pruning ^y	Dates					
	11 May	19 May	31 May	17 June	24 June	4 August
Leaf water potential from 05:00 to 07:00 (MPa)						
No root pruning	-0.28 a ^z	-0.21 a	-0.15 a	-0.31 a	-0.21 a	-0.25 a
30cm from trunk - both sides	-0.25 a	-0.20 a	-0.15 a	-0.33 a	-0.23 a	-0.24 a
60cm from trunk - both sides	-0.28 a	-0.22 a	-0.16 a	-0.32 a	-0.23 a	-0.26 a
30cm from trunk - one side	-0.29 a	-0.20 a	-0.17 a	-0.33 a	-0.21 a	-0.27 a
Leaf water potential from 14:00 to 16:00 (MPa)						
No root pruning	-1.46 a ^z	-1.63 a	-1.94 a	-1.79 a	-1.99 a	-1.34 a
30cm from trunk - both sides	-1.81 b	-1.92 c	-2.33 c	-2.28 c	-1.96 a	-1.78 b
60cm from trunk - both sides	-1.80 b	-1.84 bc	-2.19 b	-2.24 c	-2.06 a	-1.83 b
30cm from trunk - one side	-1.76 b	-1.80 b	-2.05 a	-2.01 b	-1.91 a	-1.68 b

^z Means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ using Duncan's multiple range test.

에 비해 단근구에서 현저하게 낮았고, 처리 간에는 원줄기로부터 30cm 거리의 양쪽 단근, 원줄기로부터 60cm 양쪽 단근, 원줄기로부터 30cm 한쪽 단근 순으로 낮아졌다(Table 2). 시기별로는 측정 당시 강우량 및 미기상에 따라 차이를 보이기는 하였으나 6월 24일을 제외하고는 단근 처리구들의 오후 잎 수분포텐셜이 무처리구보다 낮은 편이었고, 5월 19일부터 6월 17일 사이 양쪽 단근 처리구들의 오후 잎 수분포텐셜은 한쪽 단근 처리구보다 낮은 편이었다(Fig. 1; Table 1 and 2). 본 시험에서 단근 정도가 심할수록 오후 잎의 수분포텐셜이 감소되었던 것(Table 2)은 일출이 되면서 광합성을 위해 기공이 열리고, 증산속도가 빠르게 증가한데 반해, 단근으로 근권이 제한되어 수분 흡수가 원활하지 않았기 때문으로 판단되었다(Byun *et al.*, 2006; Ferree and Schupp, 2003).

본 시험에서 잎의 수분포텐셜을 측정하기 전 1주일 동안의 총 강우량과 오후 잎 수분포텐셜을 비교해보면(Fig. 1; Table 2), 측정 전 1주일 동안의 총 강우량이 15~20mm 정도였던 5월 11일과 5월 19일에 무처리구는 -1.80MPa를 넘지 않았지만 단근 처리구들은 -1.80MPa를 넘었다. 또한, 측정 전 1주일 동안의 총 강우량이 1mm를 넘지 못했던 5월 31일, 6월 17일, 6월 24일에는 무처리구의 경우 -2.00MPa를 넘지 않았지만, 단근 처리구들은 -2.20MPa를 넘는 경우가 발생하였다. 반면, 측정 전 1주일 동안의 총 강우량이 91mm 정도였던 8월 4일에는 무처리구의 오후 잎 수분포텐셜이 -1.34MPa로 조사 시기 중 가장 높았고, 단근 처리구들 역

시 조사 시기 중 가장 높은 편이었다. 즉, 본 시험에서 사과나무의 수분포텐셜은 강우량에 의해 영향을 받으며, 단근 처리구는 무처리구보다 수분포텐셜이 더욱 감소하여 수분스트레스를 받았다.

한편, 본 시험에서 한쪽 30cm 단근 처리구의 오후 잎 수분포텐셜이 양쪽으로 30cm 및 60cm로 단근한 처리구들보다 높았던 것(Table 2)은 한쪽 30cm 단근구가 더 많은 근권을 형성하고 있어 수분흡수가 원활하였기 때문으로 생각되었다. 이는 수목에서 한쪽의 뿌리에서 흡수된 수분은 줄기의 같은 쪽에 있는 잎과 그 반대쪽에 있는 잎에 동일하게 공급되며, 또 뿌리가 절단된 쪽의 잎이 특히 시들거나 하는 현상이 나타나지 않았다는 보고(Byun *et al.*, 2006)와 일치하였다.

이상의 잎 수분포텐셜 결과를 종합해보면, 5~6월 한 발기(5월 11월부터 6월 24일까지) 동안 무처리구의 오후 평균 수분포텐셜은 -1.76MPa로, 사과나무 잎의 한계 수분포텐셜인 -1.80~-2.20MPa(Oh *et al.*, 2004)을 넘지 않았지만, 한쪽 30cm 단근구는 -1.91MPa, 양쪽 60cm 단근구는 -2.02MPa, 양쪽 30cm 단근구는 -2.06MPa로 사과나무 잎의 한계 수분포텐셜을 넘었다. 즉, 본 시험에서 국내 ‘후지’/M.9 사과나무는 5~6월 한 발기에 수분스트레스를 쉽게 받을 수 있는 상황이었으며, 강하게 단근할수록 수분스트레스를 받을 가능성이 높아졌다(Table 2).

3. 2. 광합성속도, 기공전도도 및 증산속도

본 시험에서 광합성속도, 기공전도도 및 증산속도는

Table 3. Seasonal changes in photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate of 'Fuji'/M.9 apple trees of different root pruning treatments

Root pruning	Dates					
	11 May	19 May	31 May	17 June	24 June	4 August
Photosynthetic rate from 14:00 to 16:00 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)						
No root pruning	8.6 a ^z	10.3 a	12.0 a	16.4 a	8.5 a	7.1 a
30cm from trunk - both sides	6.8 b	6.7 c	9.6 a	11.2 b	7.1 b	5.2 b
60cm from trunk - both sides	7.3 ab	6.9 bc	10.6 a	11.4 b	7.1 b	4.6 b
30cm from trunk - one side	7.5 ab	8.3 b	11.3 a	13.2 b	8.2 ab	4.9 b
Stomatal conductance from 14:00 to 16:00 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)						
No root pruning	0.13 a ^z	0.12 a	0.16 a	0.35 a	0.14 a	0.29 a
30cm from trunk - both sides	0.05 b	0.05 c	0.10 b	0.16 c	0.08 b	0.25 a
60cm from trunk - both sides	0.06 b	0.06 bc	0.11 b	0.22 b	0.08 b	0.29 a
30cm from trunk - one side	0.07 b	0.07 b	0.13 b	0.22 b	0.10 b	0.28 a
Transpiration rate from 14:00 to 16:00 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)						
No root pruning	4.28 a ^z	5.25 a	5.90 a	8.81 a	6.58 a	4.82 a
30cm from trunk - both sides	2.12 c	2.57 c	4.11 b	5.72 c	4.60 c	4.44 a
60cm from trunk - both sides	2.59 bc	3.08 bc	4.63 b	5.47 bc	4.63 c	4.44 a
30cm from trunk - one side	2.90 b	3.69 b	5.63 a	6.48 b	5.52 b	4.66 a

^z Means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ using Duncan's multiple range test.

조사당일의 미기상 및 오후 잎의 수분포텐셜에 따라 차이가 있었는데, 고온 건조하여 VPD가 2.0kPa을 넘으면서 양쪽 단근구의 오후 잎 수분포텐셜이 한쪽 단근구보다 낮은 편이었던 5월 19일과 5월 31일에 양쪽 단근구의 광합성속도, 기공전도도 및 증산속도는 무처리구 대비 각각 12~35%, 34~58%, 22~51% 정도 감소되었고, 한쪽 단근구는 무처리구 대비 각각 5~19%, 21~40%, 5~30% 정도 감소되었다. 이러한 현상은 VPD가 2.0kPa을 넘지 않았으나 단근 처리구의 오후 잎 수분포텐셜이 대조구보다 낮았던 5월 11일과 6월 17일에도 발생하였는데, 양쪽 단근구의 광합성속도, 기공전도도 및 증산속도는 무처리구 대비 각각 15~32%, 37~62%, 35~50% 정도 감소되었고, 한쪽 단근구는 무처리구 대비 각각 12~20%, 37~47%, 26~32% 정도 감소되었다(Tables 1, 2 and 3).

처리구간 오후 잎의 수분포텐셜의 차이가 없었던 6월 24일에는 단근 처리구의 광합성속도, 기공전도도 및 증산속도는 무처리구보다 낮았는데(Tables 2 and 3), 이는 5~6월 강우량이 적어 단근 처리구들이 수분스트레스를 받는 상태에서 6월 24일 오후 기온이 35°C 정도로 높아 수분스트레스의 방어기제로 기공이 폐쇄되었기 때

문에 무처리구와 단근 처리구간 잎의 수분포텐셜 차이가 없었던 것으로 추정되었다(Fig. 1; Tables 1 and 2).

또한, VPD가 2.0kPa을 넘지 않았던 5월 11일에는 무처리구의 기공전도도와 증산속도가 단근 처리구들보다 높았던 반면에 VPD가 5월 11일과 거의 동일하였던 8월 4일에는 처리 간에 차이가 없었다(Tables 1 and 3). 이는 5월 11일의 경우 광합성 측정 전 1주일 동안의 총 강우량이 15mm 정도였던 반면에 8월 4일에는 91mm 정도나 되었던 결과(Fig. 1) 및 단근 처리구들의 오후 잎의 수분포텐셜이 5월 31일 이후부터 점점 높아지는 경향을 나타내었던 결과(Table 2)를 미루어 보아, 7~8월 장마기의 강우에 의해 토양 수분이 충분하였기 때문이거나 혹은 단근 처리구의 뿌리가 6월 이후로 재생성되어 수분흡수가 원활해졌기 때문으로 추정되었다(Ferre and Schupp, 2003; Wang *et al.*, 2014).

이상의 광합성 결과를 종합해보면, 오후 잎의 수분포텐셜이 낮을수록 광합성속도, 기공전도도 및 증산속도가 낮아지는 경향이 있었지만, 5월 31일과 6월 17일의 경우 오후 잎의 수분포텐셜이 조사 시기 중 가장 낮았음에도 불구하고 광합성속도, 기공전도도 및 증산속도는 다른 조사 시기들 보다 높았다(Tables 2 and 3). 이는 사

Table 4. Leaf area, leaf total nitrogen, and shoot growth of 'Fuji'/M.9 apple tree of different root pruning treatments

Root pruning	Average leaf area (cm ²)	Leaf total nitrogen (g · kg ⁻¹)	Shoot no. per tree	Total shoot length (cm)	Average shoot length (cm)
Treating year					
No root pruning	31.3 a ^z	21.5 a	246 a	4,731 a	19.2 a
30 cm from trunk - both sides	27.2 b	20.3 a	170 b	2,590 b	15.2 a
60 cm from trunk - both sides	28.5 ab	21.1 a	190 b	2,859 b	15.0 a
30 cm from trunk - one side	29.8 ab	21.5 a	190 b	3,546 ab	18.7 a
Following year					
No root pruning	-	-	160 a	3,668 a	23.0 a
30 cm from trunk - both sides	-	-	156 a	3,496 a	22.4 a
60 cm from trunk - both sides	-	-	166 a	3,449 a	20.7 a
30 cm from trunk - one side	-	-	159 a	3,406 a	21.5 a

^z Means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ using Duncan's multiple range test.

과나무 잎의 광합성속도는 약 30°C를 정점으로 하여 포물선 모양을 보인다는 보고(Palmer *et al.*, 2003)를 미루어 보아, 조사 시기 중 5월 31일과 6월 17일의 광합성 측정 시 기온이 30°C에 가장 근접하였기 때문에 판단되었다(Table 1).

3. 3. 잎의 특성과 신초 성장

처리 당년의 평균 엽면적, 신초수 및 총 신초장은 5~6월 한발기에 수분스트레스를 받은 단근 처리구들이 무처리구보다 감소되는 경향을 나타내었는데, 평균 엽면적의 경우 오후 수분포텐셜이 시험구 중 가장 낮았던 양쪽 30cm 단근구가 27.2cm²로 무처리구 대비 13% 정도 감소되었다. 나무 당 신초수는 수분스트레스가 발생하였던 단근 처리구들이 170~190개로 무처리구 대비 22~31% 적었으며, 총 신초장은 5~6월 오후 평균 잎 수분포텐셜이 -2.00MPa를 넘었던 양쪽 단근구들이 2,590~3,546cm로 무처리구 대비 40~45% 정도 감소되었으나, 5~6월 오후 평균 잎 수분포텐셜이 -2.00MPa를 넘지 않았던 한쪽 단근구는 무처리와 차이가 없었다. 잎의 질소함량은 처리구 간에 차이가 없었고, 평균 신초장은 양쪽 단근구들에서 15.0~15.2cm, 한쪽 단근구에서 18.7cm 정도로 무처리구에 비해 짧았으나 통계적 유의차는 없었다. 처리 이듬해 총 신초수, 총 신초장 및 평균 신초장은 처리구 간에 차이가 없었다(Tables 2 and 4).

식물체가 수분스트레스를 받으면 잎의 크기가 작아져 잎의 총면적이 줄어들면서 수체 내 총 동화산물 생산량이 적어져 신초생장이 감소된다는 사실은 잘 알려져

있다(Ferree and Schupp, 2003; Lakso, 2003).

본 시험에서는 5~6월 오후 평균 잎 수분포텐셜이 -2.00MPa 이하로 낮아진 양쪽 단근 처리구들의 평균 엽면적, 광합성속도 및 총 신초장이 무처리구보다 유의하게 감소되었다(Tables 2, 3 and 4). 즉, 국내에서는 신초의 발생 및 생장이 왕성한 5~6월 사이에 '후지'/M.9 사과나무의 오후 평균 잎 수분포텐셜이 -1.80MPa 이하로 감소되면 신초수가 적어지고, -2.00MPa 이하로 감소되면 잎과 신초의 생장이 감소된다고 할 수 있었다(Tables 2 and 4).

한편, 단근 처리에 따른 잎의 질소함량 및 이듬해 신초 성장에 대한 연구결과는 연구자에 따라 많은 차이를 보였다. 그 결과를 살펴보면, Retamales *et al.*(2004)은 단근 처리를 하면 잎의 질소 함량이 무처리구보다 감소되었다고 한 반면에, Schupp and Ferree(1990)는 오히려 무처리구보다 증가되었다고 하였고, Baugher *et al.*(1995)은 차이가 없다고 하였다. 또한, 사과나무 주간으로부터 양쪽 20~30cm 떨어진 부위에 단근 처리를 하면 이듬해 신초생장이 감소된다는 보고(Khan *et al.*, 1998)가 있는 반면에, 단근에 의한 신초성장 억제 효과가 처리 당년에만 있어 사과나무의 수세안정을 위해서 매년 주간으로부터 양쪽 30~60cm 부위에 단근 처리를 해주었다는 보고(Baugher *et al.*, 1995; Miller, 1995; Schupp *et al.*, 1992)도 있다.

본 시험에서는 단근 처리구의 7월 중순 잎의 질소 함량 및 이듬해 신초생장은 무처리구와 차이가 없었다(Table 4).

Table 5. Return bloom and fruit quality characteristics of ‘Fuji’/M.9 apple tree of different root pruning treatments

Root pruning	Return bloom (%)	Fruit weight (g)	Yield (kg · tree ⁻¹)	Fruit color (Hunter a value)	Soluble solid content (°Brix)
Treating year					
No root pruning	31.3 c ^z	390 a	22.1 a	15.2 b	13.1 b
30 cm from trunk - both sides	52.3 b	330 b	18.0 b	21.8 a	14.8 a
60 cm from trunk - both sides	59.1 ab	327 b	18.2 b	21.1 a	14.4 a
30 cm from trunk - one side	68.8 a	348 b	20.5 ab	17.3 b	13.7 ab
Following year					
No root pruning	-	325 a	25.8 a	16.9 a	14.5 a
30 cm from trunk - both sides	-	312 a	24.7 a	16.9 a	14.6 a
60 cm from trunk - both sides	-	325 a	25.3 a	17.2 a	14.5 a
30 cm from trunk - one side	-	322 a	25.5 a	17.2 a	14.4 a

^z Means followed by the same letter are not significantly different at $P \leq 0.05$ using Duncan's multiple range test.

3. 4. 과실품질

우리나라에서는 대과를 선호하기 때문에 과중에 따라 엄격하게 과실을 분류하여 판매가격을 책정하는데 (Sagong *et al.*, 2011), 본 시험에서 처리 당년의 무처리구는 평균과중이 390g에 달할 정도로 비대가 양호하였으나 단근 처리구들은 327~348g으로 무처리구 대비 10~16% 감소되었다. 주당 생산량은 양쪽 단근구들이 18.0~18.2kg으로 무처리구 대비 18~19% 정도 감소하였고, 한쪽 단근구는 무처리구 대비 7% 감소되었다. 붉은 색을 나타내는 Hunter a value는 한쪽 30cm 단근구와 무처리구 사이에는 차이가 없었으나 양쪽 30cm 단근구와 양쪽 60cm 단근구는 무처리구에 비해 유의하게 높았다. 가용성 고형물 함량은 무처리에 비해 양쪽 단근 처리구에서 높게 측정되었으나 단근 처리들 간에는 차이가 없었다(Table 5).

단근 처리 이듬해 개화율은 무처리에 비해 단근 처리에서 유의하게 높았고, 단근 처리구들 중에는 수분스트레스가 상대적으로 약했던 한쪽 30cm 단근구에서 가장 높았다. 그러나 단근 처리는 이듬해 과실품질에 전혀 영향을 주지 않았다(Table 5).

사과나무 과실의 세포 분열은 수정 후 3~6주(만개 후 31~56일)에 가장 왕성한데(Tromp and Wertheim, 2005), 이 시기에 수분스트레스를 받으면 세포분열이 억제되고(Lakso, 2003), 과실 세포의 팽압이 충분히 유지되지 못하여 과실의 크기가 감소될 수 있다(Byun *et al.*, 2006). 본 시험 역시 5~6월 오후 잎의 수분포텐셜이 -1.80MPa 이하였던 단근 처리구들의 평균 과중이

-1.80MPa 이상이었던 무처리에 비해 낮았다(Tables 2 and 5).

일반적으로 광합성속도가 낮을수록 가용성 고형물 함량, 착색 정도 및 이듬해 개화율은 감소되는 것으로 알려져 있으나(Sagong *et al.* 2011), 본 시험에서는 반대로 광합성속도가 낮았던 단근 처리구에서 가용성 고형물 함량, 착색 정도 및 이듬해 개화율은 무처리구보다 높았다(Tables 3 and 5). 이는 단근 처리구들은 과실세포 분열기와 초기 비대기의 수분스트레스에 의해 광합성속도가 무처리구에 비해 감소(Tables 2 and 3)되었으나 단근에 의해 신초생장이 조기에 멈추면서(Table 4), 과실 성숙기(9~10월)의 수관 내 광 환경이 개선되었기 때문(Yoon *et al.*, 2005)이거나 혹은 단근에 의한 수분스트레스에 의해 체내 에틸렌 발생량이 증가하였기 때문으로 생각되었는데, Byun *et al.*(2006) 및 Lakso(2003)는 약간의 수분스트레스는 식물체 내 에틸렌 발생을 유발하여 과중을 감소시키지만 식물의 개화 및 과실의 가용성 고형물 함량 증진에 긍정적으로 작용할 수 있다고 하였다.

IV. 요약 및 결론

이상의 결과를 종합해보면, 본 시험에서 단근 처리구들의 잎 내 질소 함량은 무처리구와 차이가 없었기 때문에 단근 처리구들의 신초생장 및 과실 생산량의 감소는 5~6월 한발기의 수분스트레스 때문이라고 할 수 있었다(Tables 2, 3, 4 and 5). 또한, 본 시험에서 5~6월경 오후 평균 잎 수분포텐셜이 -1.80MPa 이하로 내려갔던 단

근 처리구들의 평균 과중이 -1.80MPa 이하로 내려가지 않았던 무처리구보다 유의하게 감소되었고(Tables 2 and 5), 5~6월 오후 평균 수분포텐셜이 -2.00MPa 이하로 내려가지 않았던 한쪽 단근구의 평균 잎면적 및 총 신초장은 무처리구와 차이가 없었던 반면에 -2.00MPa 이하로 내려간 양쪽 단근구들은 무처리구보다 감소되었던 결과(Tables 2 and 4)를 미루어 보아, 5~6월경 오후 평균 잎 수분포텐셜이 -1.80MPa 이하로 내려가면 과실 비대가 불량해지고, -2.00MPa 이하로 내려가면 잎과 신초의 생장이 불량해진다고 할 수 있었다. 즉, 농산물품질관리원에서 특대과로 구분한 3L(375g 이상)의 과실을 생산하고자 하는 국내 '후지'/M.9 사과나무 재배자들은 5~6월경 오후 평균 잎의 수분포텐셜이 -1.80MPa 이하로 내려가지 않도록 토양 및 식물체의 수분 관리를 철저히 해야 할 것으로 생각되었다.

한편, 본 시험에서 5~6월경에 1주일 동안의 총 강우량이 15~20mm 정도 있을 경우 2~3일 간격으로 일몰 후 3~4시간 정도 관수하면 무처리구의 오후 수분포텐셜은 사과나무 잎 한계 수분포텐셜인 -1.80MPa 를 넘지 않았지만, 5~6월경에 1주일 동안 강우가 거의 없을 경우에 동일하게 관수하면 무처리구의 오후 수분포텐셜이 -2.00MPa 까지 감소되었던 결과(Fig.1 and Table 2)를 미루어 보아, 향후 5~6월 한발기에 '후지'/M.9 사과나무가 수분스트레스를 받지 않을 수 있는 관수방법(관수시점, 관수시간, 관수량 등)이 연구되어야 한다고 생각되었다.

적 요

본 시험은 5~6월 수분스트레스가 사과나무의 광합성, 신초생장 및 과실품질에 미치는 영향을 구명하고자 실시하였다. 단근은 만개기(4월 30일)에 원줄기에서 30cm와 60cm 떨어진 곳에서 열 방향에 따라 양쪽 혹은 한쪽으로 처리 하였다. 무처리구의 5~6월 오후 평균 잎 수분포텐셜은 -1.80MPa 이상을 유지하였지만, 단근 처리구들은 -1.80MPa 이하였다. 단근 처리 정도에 따른 5~6월경 오후 평균 잎 수분포텐셜은 양쪽 30cm 단근구(-2.06MPa), 양쪽 60cm 단근구(-2.02MPa), 한쪽 30cm 단근구(-1.91MPa) 순으로 낮았다. 한쪽 30cm 단근 처리와 양쪽 30cm 단근 처리는 5~6월 광합성속도를 각각 무처리구의 80% 및 65% 수준으로 감소시켰다. 또한, 한쪽 30cm 단근구의 무처리구 대비 총 신초장과 평균 과중의 감소 정도는 각각 25% 및 11% 정도였던 반면에 양쪽 30cm 단근구는 각각 45% 및 15% 정도였다. 그러나

가용성 고형물 함량 및 착색 정도는 단근 처리구들이 무처리구보다 높았으며, 양쪽 단근구들이 한쪽 단근구보다 더 높았다. 결론적으로, 5~6월 오후 평균 잎 수분포텐셜이 -1.80MPa 이하이면 과실비대가 감소되었고, -2.00MPa 이하이면 신초생장이 감소되었다.

REFERENCES

- Baughner, T. A., K. C. Elliott, and D. M. Glenn, 1995: Effect of sod competition and root pruning on 'Stayman' apple tree grow and fruit cracking. *HortScience* **30**(2), 222-226.
- Byun, J. Y., S. S. Lee, K. S. Choi, and S. M., Kang, 2006: *Plant Physiology* (2nd Ed.). Byun, J. Y. (Ed.) Hyangmoonsha Press. Seoul, 32-76. (In Korean)
- Ferree, D. C., 1989: Growth and carbohydrate distribution of young apple trees in response to root pruning and tree density. *HortScience* **24**(1), 62-65.
- Ferree, D. C., and J. R. Schupp, 2003: Pruning and training physiology. *Apples; Botany, Production and Uses*, D. C. Ferree and I. J. Warrington (Eds.), CABI Publishing, Cambridge, MA, 319-344.
- Khan, Z. U., D. L. McNeil, and A. Samad, 1998: Root pruning reduces the vegetative and reproductive growth of apple trees growing under and ultra high density planting system. *Scientia Horticulturae* **77**(3-4), 165-176.
- 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, 136-137, 173, and 183-184. (In Korean)
- Kweon, H. J., D. H. Sagong, M. Y. Park, Y. Y. Song, K. H. Chung, J. C. Nam, J. H. Han, and G. R. Do, 2013: Influence of CO₂ and air temperature on photosynthesis, shoot growth, and fruit quality of 'Fuji'/M.9 apple tree. *Korea Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(4), 245-263. (In Korean with English abstract)
- 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, 175-179.
- Lee, C. S. and A. N. Lee, 2003: Ecological importance of water budget and synergistic effects of water stress of plants due to air pollution and soil acidification in Korea. *Journal of Ecology and Environment* **26**(3), 143-150. (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.
- Miller, S. S., 1995: Root pruning and trunk scoring have limited effect on young bearing apple trees. *HortScience* **30**(5), 981-984.
- Murray, F. W., 1967: On the computation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology* **6**, 203-204. (<http://cronklab.wikidot.com/calculation-of-vapour-pressure-deficit>)
- Oh, S. D., J. M. Park, and D. G. Choi, 2004: Tree growth. *Fruit tree physiology in relation to temperature*, S. D. Oh (Ed.), Gilmomg Press, Seoul, 217-224 and 234-239. (In Korean)
- 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, H. G., W. Moon, and S. K. Lee, 2002: *Horticultural science* (1st Ed.). Park, H. G. (Eds.) Kor. Natl. Open Univ. Press. Seoul, 89-92. (In Korea)
- Park, J. M., D. S. Kim, H. M. Ro, M. S. Yiem, and S. H. Yoo, 1999: Effect of nitrogen rates and drip-irrigation level on leaf mineral contents and growth of lysimeter-frown 'Fuji'/M.26 apples. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* **40**(6), 711-714. (In Korean with English abstract)
- Retamals, J. B., N. A. Hipps, and C. J. Atkinson, 2004: Effect of timing of root pruning and root IBA application on leaf mineral concentration and canopy light interception of 'Cox Orange Pippin' apple trees. *Acta Horticulturae* **636**, 51-57.
- Sagong, D. H., H. J. Kweon, Y. Y. Song, M. Y. Park, J. C. Nam, S. B. Kang, and S. G. Lee, 2011: 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)
- Sagong, D. H., H. J. Kweon, M. Y. Park, Y. Y. Song, S. H. Ryu, M. J. Kim, K. H. Choi, and T. M. Yoon, 2013: Impacts of urban high temperature events on physiology of apple trees: a case study of 'Fuji'/M.9 apple trees in Daegu, Korea. *Korea Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(3), 130-144. (In Korean with English abstract)
- Schupp, J. R., and D. C. Ferree, 1988: Effect of root pruning at four levels of severity on growth and yield of 'Melose'/M.26 apple trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **113**(2), 194-198.
- Schupp, J. R., and D. C. Ferree, 1990: Influence of time of root pruning on growth, mineral nutrition, net photosynthesis and transpiration of young apple trees. *Scientia Horticulturae* **42**(4), 299-306.
- Schupp, J. R., D. C. Ferree, and I. J. Warrington, 1992: Interactions of root pruning and deblossoming on growth, development and yield of 'Golden Delicious' apple. *Journal of Horticultural Science* **67**(4), 465-480.
- Tromp, J., 2005a: Water relations. *Fundamentals of Temperate Zone Tree Fruit Production*, J. Tromp, A. D. Webster, and S. J. Wertheim (Eds.). Backhuys Publishers, Leiden, 27-28.
- Tromp, J., 2005b: Metabolic processes. *Fundamentals of Temperate Zone Tree Fruit Production*, J. Tromp, A. D. Webster, and S. J. Wertheim (Eds.). Backhuys Publishers, Leiden, 39-54.
- Tromp, J., and S. J. Wertheim, 2005: Fruit growth and development. *Fundamentals of Temperate Zone Tree Fruit Production*, J. Tromp, J. T. Webster, and S. J. Wertheim (Eds.). Backhuys Publishers, Leiden, 244-245.
- Wang, Y., M. G. Bertelsen, K. K. Petersen, M. N. Andersen, and F. Liu, 2014: Effect of root pruning and irrigation regimes on leaf water relations and xylem ABA and ionic concentrations in pear trees. *Agricultural Water Management* **135**, 84-89.
- Wertheim S. J., 2005: Pruning. *Fundamentals of Temperate Zone Tree Fruit Production*, J. Tromp, J. T. Webster, and S. J. Wertheim (Eds.). Backhuys Publishers, Leiden, 176-185.
- Yim, Y. J. (Ed.), 2015: *Fruit science general* (1st ed.). Hyangmoonsha Press, Seoul, 157-158, 162-164 and 270. (In Korean)
- Yoon, T. M., and H. Richter, 1991: Stomatal conductance and leaf-water parameters of apple, pear, sweet cherry and plum in an orchard. *Die Gartenbauwissenschaft* **56**(2), 75-81.
- Yoon, T. M., H. S. 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)