

사과 생육기의 기온이 사과원의 NEE에 미치는 영향

김건엽* · 이슬비 · 이종식 · 최은정 · 유종희

농촌진흥청 국립농업과학원

The Impact of Air Temperature During the Growing Season on NEE of the Apple Orchard

Gun-Yeob Kim*, Seul-Bi Lee, Jong-Sik Lee, Eun-Jung Choi, and Jong-Hee Ryu

National Academy of Agricultural Science (NAAS), RDA, Suin-ro 150, Gwonseon-gu, Suwon-si 441-707, Korea

Terrestrial ecosystem are a strong sink of carbon. Forest ecosystem, one of them, has been expected to play an important role in climate changing process by absorbing atmospheric carbon dioxide. On the other hand, agricultural ecosystem that consists mainly of annual crops is regarded as poor contributor to carbon accumulation, because its production (carbon hydrate) is decomposed into carbon at a short period, which is emitted to the atmosphere. However, it is thought that fruit tree plays a great role in decreasing atmospheric carbon dioxide concentration, same as forest. Net ecosystem exchange of CO₂ (NEE) was measured to estimate carbon fixation capacity using an eddy covariance (EC) system method in 2 years from 2005 to 2006 at an apple orchard in Uiseong, Gyeongbuk. Average air temperature values were higher in 2006 than in 2005 during the dormant season, and lower by about 5°C over the growing season causing visible cold injuries. Accordingly, we investigated long-term exchange of carbon to determine how much difference of carbon fixation capacity was shown between 2006 and 2005 in terms of environmental and plant variables such as NEE, leaf area index (LAI), and Albedo. NEE was 4.8 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ in 2005 and 4.7 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹ in 2006, respectively. Low temperature after July in 2006 decreased LAI values faster than those in 2005. Meanwhile, Albedo values were higher after July in 2006 than in 2005. These results show that the low temperature after July in 2006 apparently affected apple growth.

Key words: Net Ecosystem CO₂ Exchange (NEE), Apple orchard, Carbon dioxide budget, Albedo

서 언

지구온난화 문제와 맞물려 최근 전 세계적으로 이산화탄소에 대한 관심이 많아지고 있으며, 이와 관련된 분야에 관계하는 연구자 또한 꾸준히 증가하고 있다.

특히 1997년 교토의정서가 체결되고 난 뒤 해당 국가들은 이산화탄소를 줄이기 위한 준비와 자국에 유리한 방법들을 찾기 위해 막대한 연구비를 투자하고 있는 실정이다. 이러한 상황은 우리나라도 예외는 아니며, 2005년 발효된 의무감축국에 우리나라가 포함되지는 않았지만 제2차 온실가스 의무 감축 대상국으로 선정될 경우 급격한 산업위축을 우려하고 있다. 또한 유럽위원회 (EC), 2011 세계 탄소 배출 보고서에 따르면 (<http://www.ecoseed.org/>), 우리나라의 온실가스 배출량은 2008년 9위에서 2009년 8위, 2011년에는 온실가스 배출량이 6억 1,000만 톤으로 세계 7위로 계속

해서 증가하고 있다.

온실가스 감축과 흡수와 관련된 다양한 연구가 진행되고 있는 가운데 산림은 이산화탄소 흡수원으로서 인정이 되고 있고, 장기적이고 다양한 연구가 수반되고 있다. 농작물 중 과수는 산림성 작물로서 임목과 마찬가지로 제자리에서 장기간 생존하면서 이산화탄소를 흡수하여 저장하기 때문에 탄소 흡수원으로서의 인정 가능성이 높은 작물 중 하나이지만, 과수의 탄소 흡수원과 관련된 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 탄소 흡수원으로 역할을 구명하기 위해서는 장기적인 관측이 우선되어야 하며, 또한 이와 더불어 연차 간 기후조건에 따른 변화의 관찰로 세밀하게 이루어야 할 것으로 생각된다.

2005년도와 2006년도의 알베도가 같은 활엽수림과 사과 재배지 사이에 이산화탄소 고정능력을 비교한 결과, 활엽수림의 탄소고정능력보다 오히려 사과원의 이산화탄소 고정능력이 훨씬 높은 것으로 나타나고 있다 (RDA, 2008). 그러나 과수의 탄소 흡수원으로서의 상당한 가능성에도 불구하고, 현재 관련 연구가 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연

접수 : 2012. 11. 13 수리 : 2012. 12. 5

*연락처 : Phone: +82312900240

E-mail: gykim@rda.go.kr

구에서는 우리나라의 과수 중 농업적으로 중요한 사과나무를 대상으로 사과 과수원 생태계 탄소의 장기적인 모니터링을 하기 이전에 파악해야 할 기후 특히, 기온 조건에 따른 탄소 흡수량을 평가하기 위해 생육기의 기온 차이가 뚜렷했던 2005년과 2006년의 사과 생육기 기온 조건에 따른 탄소 고정 능력을 평가하고, 궁극적으로 사과 과수원의 순 생태계 교환 (NEE; net ecosystem CO₂ exchange) 값에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보고자 수행하였다.

재료 및 방법

관측 지점과 방법 관측지점은 사과가 주산지인 경북 의성군 옥산면 구성리 (36°23'18.89" N, 128°49'44.60" E)에 위치하고 있으며, 경작지의 거의 대부분에 사과나무가 균일하게 식재되어 있다. 관측지점의 사과나무는 평균 18년생으로 구성되어 있었으며, 사과나무의 수고는 약 4 m이며, 사과원의 주 풍향은 북서풍이었다. 관측요소별 측정 주기는 30분 평균값을 사용하였다. 관측 지점은 강수량이 적은 편이어서 농가는 인위적인 관수로 수분 조절을 하고 있었다. 관측 기간은 2005년부터 2006년까지로 2년 동안 축적된 자료를 이용하였다. 또한 이산화탄소플럭스를 측정하기 위해서 약 7 m 높이에 오픈스 CO₂ 분석계 (LI-7500, LICOR Inc. USA)를 설치하여 측정하였으며, 매년 4월과 9월에 표준가스를 이용하여 보정을 하였다. 일사량은 약 9.5 m 높이에 일사계 (CM21, Kipp & Zonen, Holland)를 설치하였으며, 온습도계 (HMP45C, Vaisala Inc., Finland)를 설치하였다. 지온 측정을 위해서는 열전대 (TCAV, Campbell Inc., USA)를 0, 5, 10, 20, 30 cm의 깊이로 설치하여 측정하였다. 그리고 엽면적지수 (LAI)는 시료의 잎을 절단하여 엽면적계 (LI-3000)로 면적을 측정하고 단위면적당의 지수로 환산하였다. 광환경을 측정하기 위해서는 순복사계 (CNR1)를 지상 25 m, 일사계 (CN21 : ISO Secondary Standard)를 관측탑 10 m 높이에서 설치 관측하였으며, NEE를 측정하기 위해 3차원 3파장 분석계 (Three-dimensional sonic anemometer, CSAT 3, Campbell Scientific Inc., USA)를 이용하였다.

관측 자료 보정 사과재배지에서 얻어지는 플럭스 자료는 앞에서 말한 바와 같이 산림에서 얻어지는 자료에 비해 인위적인 돌발 상황이 많이 발생하기 때문에 WPL 보정 (Webb *et al.* 1980)만 가지고는 정확한 데이터를 얻기가 어렵다. 따라서 최소한의 품질관리를 해줄 필요가 있다. 특히 병충해방제를 위하여 농약을 살포하거나 관수를 위하여 스프링클러를 사용할 경우, 그리고 수확을 위하여 많은 자동차가 이용되었을 때와 같은 인위적인 돌발 상황의 경우 일반 산림에서 얻어지는 데이터의 오차에 비해 상당히 큰 차이를 보이는 이상데이터가 많이 나타나기 때문에 이러한 데

이터는 꼭 제거를 해주지 않으면 상당한 오류를 얻을 가능성이 높으며, 최소한 이러한 데이터는 제거를 해 줄 필요가 있었다.

품질관리법은 아직까지 명확한 방법이 확립되어있지는 않아, 관측하고 분석하는 담당자에 의해서 결정되는 경우가 대부분이지만, CarboEurope나 AmeriFlux에서는 어느 정도 공통적인 방법으로 플럭스 데이터의 품질관리가 행해지고 있다. 또한 AsiaFlux에서도 이들과 보조를 맞추어 데이터의 품질관리를 행하고 있으며, 본 논문에서 사용한 방법으로는 이동평균값으로부터 편차를 구하는 방법을 이용하였다 (Center for Global Environmental Research, 2003). 이 방법의 특징은 다른 판정법과 마찬가지로 이상 값을 판정할 수 있으면서도 다른 판정법에서는 판정할 수 없는 돌출된 데이터를 검출하는데 매우 유효하기 때문에 과수 재배지와 같은 인위적인 형태의 돌발 데이터 값이 큰 경우에는 이방법이 상당한 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

결손 데이터 보완 장기 플럭스 관측에서는 일반적인 결측 이외에 품질 관리 등에 의하여 품질이 나쁘다고 판정되는 플럭스 데이터가 상당하며, 특히 과수지대와 같이 인위적인 요인이 상당히 존재하는 지역에서는 특히 더 많은 것으로 생각된다. 따라서 NEE 값을 구하기위해서는 결손데이터를 보완하지 않으면 안 된다.

결손데이터 보완은 플럭스 데이터의 시간별 값 (30분, 또는 1시간)에 대하여 행하는 것을 기본으로 하고 있으며, 본 실험에서는 30분 데이터를 기본으로 행하였다. 데이터의 결손율은 여름 병충해 방제나 수확기간에는 많은 차들이 주위에 운행되어, 결손율이 많은 달 (3월)은 80%에서 적은 달 (7월)은 60%정도로 일반적으로 발생하는 결손율과 크게 차이를 보이지는 않았다. 일반적인 보완은 비선형회귀법으로 충분히 해결되며, 오랫동안 가장 많이 사용된 방법이기도하다 (Foken and Wichura, 1996). 그러나 최근에는 다른 방법들이 다양하게 시도되고 있으며, 그 정확성이 인정되고 있다. 본 실험에서는 그중에서 하나인 평균일변화법 (Mean diurnal variation)을 이용하여 결손데이터 보완을 행하였다 (Falge *et al.* 2001). 평균일 변화법은 측정 시간별 플럭스의 평균값을 계산하여, 그 기간의 평균적인 일변화 패턴을 구하여놓고, 결손 데이터는 이 시각의 기간 평균값에서 치환하는 방법으로, 계산이 용이하면서도 플럭스와 환경요인과의 관계를 고려하지 않기 때문에 플럭스데이터와 동시에 기상데이터도 결손된 경우에도 적용이 가능한 것으로 알려져 있다.

결과 및 고찰

대기 온도 휴면기의 대기온도는 2005년에 영하10도에 서 0도 사이값을 나타냈으며, 2006년도에는 12월에는 이보

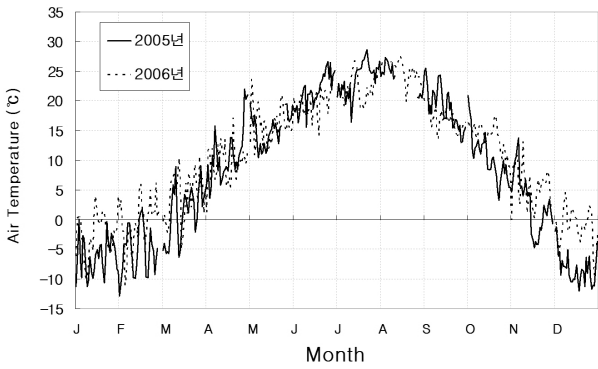


Fig. 1. Changes of daily average air temperature from January to December in 2005 and 2006 at an apple orchard in Uiseong, Gyeongbuk.

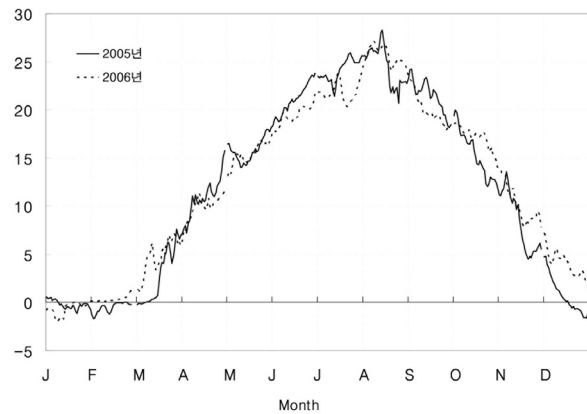


Fig. 2. Changes of daily average soil temperature in 2005 and 2006 at an apple orchard in Uiseong, Gyeongbuk.

다 더 낮은 -5도에서 -10도사이의 값을 나타내었다 2006년도 12월과 이듬해 1월은 2005년과 같은 온도분포를 보였다. 휴면기의 온도변화를 보면 2005년도에 영상기온은 나타내는 시기가 3월부터인데 반해 2006년은 1월부터 조금씩 영상의 기온을 보이다가 2월 중순부터는 영하로 떨어지질 않았다. 생육기간동안의 대기온도의 분포를 보면 한여름에 해당하는 7월과 8월의 온도분포가 25도 이상으로 높게 나타나는 것을 볼 수가 있었다. 온도의 변화는 2005년도에 비하여 2006년도에 가장 심하게 나타났다 (Fig. 1).

지온 이러한 현상은 지온의 경우 더욱더 확실하게 나타나는데 휴면기의 경우 2005년도에는 영하를 나타내던 것이 2006년도에는 영상으로 나타나는 것을 볼 수가 있었다. 또한 봄의 기온도 보름정도 빨리 나타나는 것을 볼 수가 있었다. 생육기의 경우 지온의 변화는 2006년도에 2005년도에 비하여 전체적으로 낮은 분포를 나타내는 것을 확연히 볼 수가 있었다 (Fig. 2). 따라서 이러한 차이가 NEE 값의 변화에 어떻게 영향을 미치는지도 살펴보았다.

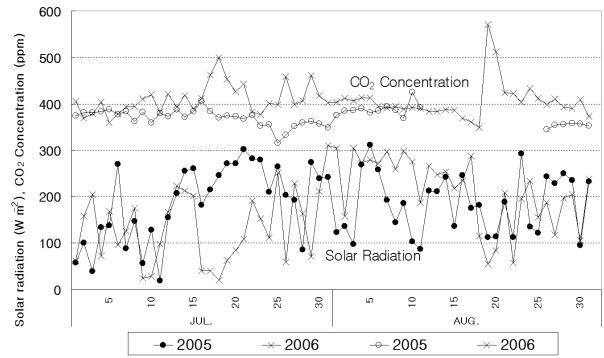


Fig. 3. Changes of daily total solar radiation and air CO₂ concentration between July and August in 2005 and 2006 at an apple orchard in Uiseong, Gyeongbuk.

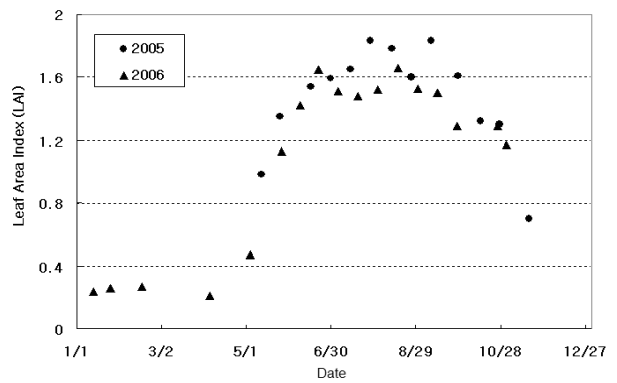


Fig. 4. Leaf area index (LAI) of apple from 13 January to 27 December in 2005 and 2006 at an apple orchard in Uiseong, Gyeongbuk.

일사량 및 대기 CO₂ 농도 생육기간 중에서 과실의 비대에 가장 중요한 7, 8월의 일사량과 대기 CO₂ 농도를 보면 2005년도에 비하여 현저히 낮은 기온을 유지했던 2006년도 7, 8월의 일사량이 상대적으로 낮게 나타났으며, 이시기에 대기의 CO₂ 농도 또한 상당히 높은 수치를 나타내고 있었다 (Fig. 3). NEE의 변동은 주로 일사량의 변화에 의해 발생한다고 하였는데 (Ohtani, 2001), 일사량이 적었던 7월에 대기의 CO₂가 과수의 생육에 상당부분이 사용되지 못하였음을 알 수가 있으며, 이러한 스트레스는 과실의 비대나 품질에도 직접적인 영향을 미친 것으로 보여 진다.

엽면적 지수 (LAI)와 알베도 생육기에 엽면적 지수를 보면 2005년도 7, 8월에는 1.5에서 2.0 사이를 나타내었는데 2006년도에는 1.6 전후의 값으로 조금 낮게 나타나는 것을 볼 수가 있었다. 이는 대기온도나 지온이 2005년도보다 생육시기에 낮으므로 인해서 광합성에 필요한 잎의 생육저하와 관련이 있는 것으로 생각 된다 (Fig. 4).

알베도는 일사에 대한 반사의 비율로 과수에 잎이 많다면 알베도는 낮게 나타날 것이다. 본 실험에서 과수재배지의 알베도는 15에서 20사이로 나타났으며 이는 산림에서 활

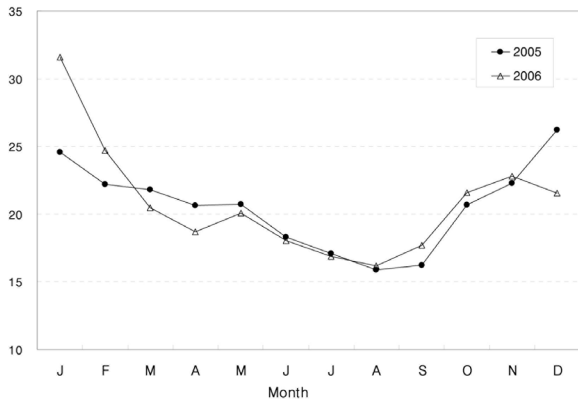


Fig. 5. Changes of Albedo in 2005 and 2006 at an apple orchard in Uiseong, Gyeongbuk.

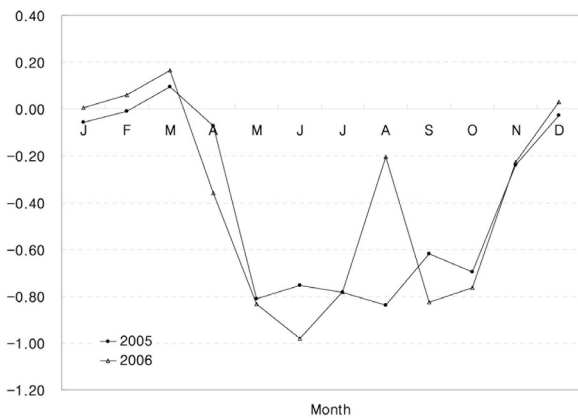


Fig. 6. Changes of net ecosystem exchange (NEE) per month in 2005 and 2006 at an apple orchard in Uiseong, Gyeongbuk.

엽수의 알베도에 해당한다. 휴면기의 알베도는 20에서 25 사이를 나타냈으며 이는 목초지의 알베도와 같은 값을 나타냈는데, 휴면기에 과수지의 경우 초본식물들이 자라기 때문에 이러한 현상들이 목초지와 비슷한 값을 가진 것으로 보여 진다 (Fig. 5).

생육기의 알베도에서 8월 이후의 알베도 값을 보면 7월 저온의 영향을 받은뒤 부터 알베도 값이 2005년에 비하여 높게 나타나는 것을 볼 수가 있었다. 따라서 저온현상이 과수의 잎의 감소를 촉진시키는 것으로 보이며, 이러한 현상은 엽면적지수에서도 동일하게 나타나고 있는 것을 볼때, 과실의 비대를 위하여 탄소동화작용을 활발히 해야 하는 생육기에 탄소고정능력이 상대적으로 떨어지게 한다는 것을 알 수가 있었다.

NEE의 월별 값 앞에서 보았듯이 2005년과 2006년도의 미기상학적인 특성은 서로 비교하기에 좋은 조건을 가지고 있었다. 이러한 특징들이 월별 NEE값에는 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았다 (Fig. 6). 대기온도나 지온에서 나타난 것처럼 휴면기에 상대적으로 봄의 기온이 빨라졌던 것

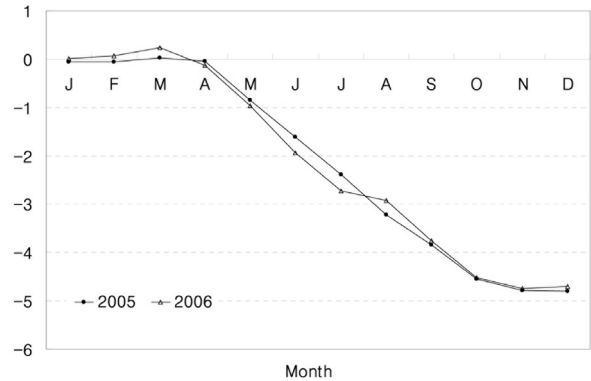


Fig. 7. Changes of integrated NEE in 2005 and 2006 at an apple orchard in Uiseong, Gyeongbuk.

과 마찬가지로 NEE값은 2005년도에 비하여 2006년도에 더 빨리 마이너스 값으로 바뀌는 것을 볼 수가 있었다. 그러나 생육기인 5월에는 거의 같은 값을 나타내었다. 생육기의 2006년도의 저온현상은 (특히 7, 8월) 결국 NEE의 월별 값에서도 낮아지는 결과를 가져왔다.

NEE의 적산 값 이러한 기온의 영향이 년 NEE값에도 영향을 미쳤는지를 알아보기 위하여 년 적산 값을 계산하여 보았다 (Fig. 7). 그림에서 보듯이 결론적으로는 2005년도와 2006년도의 NEE값에는 크게 차이가 나지 않았다. 7, 8월의 저온장해로 인하여 NEE의 값이 변화된 것을 고려하여도 2006년도의 NEE값은 2005년도에 비하여 크게 증가하지 않았다. 연구자에 따라서는 연간 NEE의 정확성을 플릭스 자료의 3% 또는 $0.3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 정도를 오차로 보고 있다 (Moncrieff, 1996). 실질적으로 2005년도에 NEE값은 $4.8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 였고 2006년도에는 $4.7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 $0.1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 정도밖에 차이를 나타내지 않았다. 따라서 생육기에 저온현상이 일어나지 않는다 하더라도 년 NEE값은 2005년도에 비해 크게 증가하지 않을 것으로 보인다. 유럽 15개 산림에서 1996년부터 1998년 사이에 측정된 값을 보면 연간 NEE값이 $6.6 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 흡수하는 곳에서부터 약 $1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 정도 방출하는 곳까지 존재하며, 그 이유는 나무의 수령이 젊은 수종에서부터 높은 수종까지 존재하기 때문이라고 하였다 (Valentini, 2000). 이러한 이유에서 볼 때 과수재배지의 경우는 농가의 소득과 관계되는 부분이 있기 때문에 항상 젊은 나무로 교체된다는 특징을 생각할 때 높은 탄소고정능력을 일정하게 유지하고 있다고 생각할 수 있다.

결 론

본 실험에서 2006년도는 2005년도에 비하여 생육시기에 저온현상과 휴면기의 고온현상으로 각 년도의 NEE를 비교

하는데 좋은 조건을 제공하였다. 또한 이상기온으로 저온에 의한 피해를 입었을 때 과연 NEE에 얼마나 많은 영향을 주는가를 연구하는데 있어서 좋은 자료를 제공하고 있다고 생각된다.

우리는 위의 결과를 통해서 저온현상이 연간 NEE (농경지의 탄소고정능력)에 어떤 영향을 미치는가를 봤을 때 많은 차이를 보이지는 않는 것으로 나타났다. 그러므로 저온현상은 과수에 어떤 영향을 미치는지 생각해 볼 필요가 있다. 엽면적지수는 저온이후 감소하기 시작하였으며, 알베도의 경우도 저온현상이후 증가하기 시작하여, 11월 전후로 하여 예년과 비슷해지는 것을 볼 수가 있었다. 이는 결정적으로 과실의 비대에 필요한 광합성작용에 결정적인 영향을 미칠 것으로 생각된다. 이러한 광합성작용의 피해는 과실의 비대에 영향을 미치기 때문에 결국 저온현상은 NEE의 값을 변화시킨 다기 보다는 과실의 품질에 영향을 미쳐 결국 농가의 소득에 영향을 주는 것으로 생각된다.

마지막으로 이러한 저온현상에 의한 NEE 값을 한두 해만을 가지고 경향을 결정하는 것은 위험한 일 일수 있기 때문에 좀 더 장기간의 관측을 통해 좀 더 많은 자료를 축적할 필요가 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (세부과제번호: PJ007874022012)의 지원에 의해 이루어진 것임

인 용 문 헌

Center for Global Environmental Research, 2003: National Institute for Environmental Studies, Japan, Practice of CO₂

flux observations in terrestrial ecosystems, 91pp.

Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grunwald, T., Hollinger, D., Jensen, N. O., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A., Lai, C. T., Law, B. E., Meyers, T., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J. W., Pilegaard, K., Rannik, O., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S. 2001: Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agr. Forest Meteorol.* 107: 43-69.

Foken, Th. and B. Wichura, 1996: Tools for quality assessment of surface-based flux measurement, *Agr. Forest Meteorol.* 78: 83-105.

Moncrieff, J. B., Malhi, Y. & Leuning, R. 1996: The propagation of errors in long-term measurements of land atmosphere fluxes of carbon and water. *Glob. Change Biol.* 2: 231-240.

Ohtani, Y., Mizoguchi, Y., Watanabe, T., Yasuda, Y. and Toda, M. 2001: Carbon dioxide flux above an evergreen needle leaf forest in a temperate region of Japan. *Extended Abstract 6th International Carbon Dioxide Conference* 469-472.

RDA. 2008. Study on Carbon Sink Agricultural Sector Regarding to UNFCCC. pp. 53-94. (In Korean)

Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A. J. Schulze, E.-D. Rebmann, C. Moors, E. J. Granier, A. Gross, P. Jnesen, N. O. Pilegarrrd, K. Lindroth, A. Grelle, A. Bernhofer, C. Grunwald, T. Aubinet, M. Ceulemans, R. Kowalski, A. S. Vesala, T. Rannik, U. Berbigier, P. Loustau, D. Gudmundsson, J. Thorgeirsson, H. Ibrom, A. Morgenstern, K. Clement, R. Moncrieff, J. Montagnani, L. Minerbi, S. & Jarvis, P. G. 2000: Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404, 861-865.

Webb, E. K., Pearman, G. I. and Leuning, R. 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 106: 85-100.