

온도와 CO₂ 농도에 따른 배추의 광합성특성 및 세포조직의 변화

이상규* · 문지혜 · 장윤아 · 이우문 · 조일환 · 김승유 · 고관달
농촌진흥청 국립원예특작과학원 원예작물부 채소과

Photosynthetic Characteristics and Cellular Tissue of Chinese Cabbage are Affected by Temperature and CO₂ Concentration

Sang-Gyu Lee*, Ji-Hye Moon, Yoon-Ah Jang, Woo-Moon Lee, Ill-Hwan Cho,
Seung-Yu Kim, and Kwan-Dal Ko

Vegetable Research Division, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Suwon 440-706, Korea

Abstract. Numerous studies have presented evidence that global atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentration and temperature is increasing every year. Both of the CO₂ and temperature are important components for photosynthesis activity of plants and thus growth and yield. However, little information is available in terms of the reaction of vegetable plants to increased CO₂ concentration and temperature, and also the reaction to a complex condition of both increased CO₂ concentration and temperature. The aim of this research was therefore to investigate changes in growth, photosynthetic activity and ultra-cellular structure of leaf tissue of Chinese cabbage. Plants were grown under either of elevated CO₂ concentration (elevated CO₂, 2-fold higher than atmospheric CO₂) or elevated temperature (elevated temp, 4°C higher than atmospheric temperature), under both of elevated CO₂ concentration and elevated temperature (elevated temp+CO₂), and under atmospheric CO₂ concentration and temperature (control). The treatment of 'elevated temp' negatively affected leaf area, fresh weight, chlorophyll and starch content. However, when the treatment of 'elevated temp' was applied coincidentally with the treatment of 'elevated CO₂', growth and photosynthetic performance of plants were as good as those in the treatment of 'elevated CO₂'. Microscopic study resulted that the highest starch content and density of cells were observed in the leaf tissue grown at the treatment of 'elevated CO₂', whereas the lowest ones were observed in the leaf tissue grown at the treatment of 'elevated temp'. These results suggest that when Chinese cabbage grows under a high-temperature condition, supplement of CO₂ would improve the growth and yield. In our knowledge, it is the first time to determine the effect of a complex relationship between the increased CO₂ concentration and temperature on the growth of Chinese cabbage.

Key words : chlorophyll, mineral content, photosynthetic characteristics

서 론

최근 오존층 파괴 등으로 지구온난화가 예상보다 훨씬 빠르게 진행되고 있으며, 그 징후는 많은 곳에서 계절에 관계없이 발생하고 있다. 2007년도 여름에는 극지방의 얼음이 기상관측 이후 가장 많이 녹아 내려 향후 10년이나 20년 뒤에 발생할 것으로 예상됐던 일이 발생했다고 미국의 국립대기과학연구소(NCAR)가

발표하였다. 이러한 기후변화에 민감하게 영향을 받는 것은 농업부문이며(Kalnay 등, 2008; Lim 등, 2002), 세계 각국에서는 온실가스 배출량을 줄이기 위한 연구를 수행하고 있다. 우리나라에서도 온실가스 배출량을 줄이기 위해 매체순환식 가스연소시스템에 의한 CO₂ 원천분리기술 개발(Ryu, 2008), 청정화력발전 기술과 연계한 온실가스 처리 시스템(Kim, 2008) 등 많은 연구가 진행 중이다.

채소작물은 이산화탄소 흡수원으로 높은 잠재력을 갖고 있으며(Noma 등, 2004), 유기탄소 축적은 논보다는 밭으로 이용하는 것이 높다는 결과(Jung, 2008)

*Corresponding author: sanggyul@rda.go.kr
Received March 26, 2009; Revised May 27, 2009;
Accepted June 1, 2009

가 발표되었다. 또한, 이산화탄소 농도가 증가하면 고추의 경우, 엽수가 증가하고, 잎의 노화가 촉진되는데 이로써 sink 엽수는 증가하고, source 엽수는 감소하게 된다(Lee 등, 2005)고 하였다. Lee 등(2006)은 작물의 이산화탄소 고정능력을 조사한 결과, 배추에 있어서는 가을배추가 봄배추보다 CO₂ 고정능력이 2배정도 높았고, 무의 경우에는 봄무가 가을무보다 높았다고 보고하여 품종에 따라라도 이산화탄소 고정능력이 차이가 있음을 시사하였다.

온도가 상승하게 되면 결과가 시작된 배추의 경우, 생육이 저하되고 결과가 나빠지는 등 작물에 부정적인 영향을 미치고(Kang 등, 2002), 무의 경우는 생육과 뿌리 비대가 나빠진다(Lim 등, 2000; Park 등, 2002)고 알려져 있지만 온도와 이산화탄소의 상호작용에 의한 효과분석에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 CO₂ 농도가 2배로 증가하고 온도가 4°C 상승하였을 때 배추의 생육반응과 광합성능력, 세포조직의 변화 등을 알아보고자 실시하였다.

재료 및 방법

고농도의 CO₂와 고온이 배추의 광합성 능력과 세포의 조직변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 '진청배추'(세미니스 코리아)를 '대기온도+대기 CO₂ 농도(Control)', '대기온도+CO₂ 650mg · L⁻¹(Elevated CO₂)', '대기온도보다 4°C 상승+대기 CO₂ 농도(Elevated temp.)', '대기온도보다 4°C 상승+CO₂ 650mg · L⁻¹(Elevated temp.+CO₂)'의 4가지 처리조건을 설정한 phytotron에서 재배하였다. 배추 종자 파종은 4월 7일, 높이 40cm, 폭 30cm의 플라스틱 포트에 육묘용 상토(바르커, 서울농자재)를 채운 후 직파하였다. 처리는 4월 22일부터 실시하였다. 발아 후 본엽이 3매정도 되었을 때부터 3~4일 간격으로 원예원 수경재배 표준액(N:P:K:Ca:Mg=15:3:6:8:4me · L⁻¹, EC 1.5dS · m⁻²)을 관주하였다.

생육조사는 파종 후 97일에 수행하였다. 생육조사 항목은 엽수, 엽장, 엽폭, 엽면적 등을 조사하였고, 생체중을 측정한 후 80°C 건조기에서 48시간 건조한 후 무게를 측정하였다. 엽록소 함량은 잎이 가장 큰 것을 대상으로 chlorophyll meter(model SPAD-502, Minolta, Japan)를 사용하여 측정하였다.

식물체 분석을 위해 건물중을 조사하고 건조된 잎을 분쇄포트를 이용하여 곱게 분쇄하였다. 시료 0.5g에 황산 10ml과 분해 촉진제 0.5g을 가한 후 3시간 동안 분해 후 Kjeldahl 방법(Eastin, 1978)으로 전질소(T-N) 함량을 분석하였다. 또한 양이온 분석을 위해 분쇄된 시료 0.5g에 식물체 분해액(HNO₃:HClO₄=3:1) 10mL를 가한 후 200°C에서 2~3시간 동안 습식분해한 후 여과지(No. 6)로 여과하였다. 여과된 용액을 다시 증류수를 첨가하여 100mL로 정량한 후 200배 희석하여 원자흡광광도계(AA-6701F, Shimadzu, Japan)로 측정하였다.

광합성 측정 조건은 광합성측정기(LI-6400, LI-COR., USA)로 파종 후 50일에 측정하였으며 측정 조건은 인공광 1,000μmol, 온도 20°C, CO₂는 대기농도 처리구의 경우 350mg · L⁻¹, 2배 농도 처리구는 700mg · L⁻¹으로 하였다.

세포 조직 관찰은 파종 후 90일에 배추 잎의 일부분을 채취한 후 1차 고정액 2.5% glutaraldehyde에 넣은 즉시 모든 과정은 4°C에서 진행되었으며 1차 고정 90분간 처리, 0.1M phosphate buffer(pH 7.2)로 15분 간격 4~5회 세척, 2차 고정 1% osmium tetroxide 분간 처리, 위와 동일한 세척 과정 후 하룻밤을 침지시켰다. 탈수는 상온에서 40, 60, 80, 90, 95% ethanol로 각각 5분씩, 100% ethanol로 5, 15, 15, 30분간 처리로 이루어졌으며 propylene oxide로 치환 후 최종적으로 epon에 포매(embedding)하여 60°C의 오븐에서 4일간 중합시켰다. 중합된 epon block을 초미세절편기(Ultracut R, Leica Co., Austria)를 이용하여 1,500nm의 두께로 시료를 절단하여 P.A.S. 염색법으로 염색한 후 광학현미경(Axioskop 2, Carl Zeiss Co., Germany) 100배로 검경하였다.

결과 및 고찰

Table 1은 처리별로 포트에 심은 후 97일째 생육조사한 결과이다. 배추의 엽수, 엽장, 엽면적은 처리간에 유의성을 보이지 않았지만 엽록소함량은 대기조건에서 높게 나타났고, 온도와 CO₂ 농도를 동시에 올린 처리에서 낮게 나타났다. 생체중은 대기조건에서 좋았고, CO₂ 농도를 높인 처리에서 온도만을 높인 처리에 비해서 높게 나타났다. 이와같은 결과는 배추의 경우

Table 1. Effect of temperatures and CO₂ concentrations on the growth of chinese cabbage.

Treatments	No. of leaves	Leaf length (cm)	Leaf area (cm ² /pl.)	Chlorophyll (SPAD)	Fresh wt. (g/pl.)
Control	38.5 a ²	34.8 a	10,324 a	34.9 a	1,259 a
Elevated CO ₂	42.5 a	36.3 a	6,625 a	31.7 ab	931 ab
Elevated temp.	54.5 a	35.7 a	4,744 a	25.9 ab	440 b
Elevated temp.+Elevated CO ₂	55.5 a	36.8 a	8,740 a	21.3 b	971 ab

²Mean separation within by Ducan's multiple range test at $p=0.05$.

일정한 크기에 이른 다음 결구가 되는 작물이기 때문에 엽수, 엽장 및 엽면적에서는 차이를 보이지 않은 것으로 사료되며, 온도와 CO₂ 농도가 동시에 높아지면 생육이 크게 저하되지 않음을 알 수 있었다. 즉, 기상이변으로 온도만 4°C 이상 상승하면 배추의 생육은 현저하게 떨어지게 되고, 온도가 높은 상태에서 CO₂ 농도가 올라가면 생육이 호전되는 것으로 사료되었다. 이와 같은 결과는 무의 경우 대기중의 온도보다 5°C 상승시키면 생육이 저하되고, CO₂ 농도를 2배 정도 올려주면 생육이 회복되었다(Lee 등, 2006)는 보고와 같은 양상이었다.

배추의 광합성능력을 조사한 결과는 Table 2이다. 광합성속도는 CO₂ 농도를 2배로 한 처리구가 높았는데 CO₂ 농도를 2배로 한 처리구가 22.5 μmolCO₂ · m⁻²·s⁻¹로 가장 높았고, 온도와 CO₂ 농도를 동시에 올려준 처리구가 21.4 μmolCO₂ · m⁻²·s⁻¹이었으며 온도만 상승시킨 처리구에서는 13.6 μmolCO₂ · m⁻²·s⁻¹이었고, 대기조

건 처리구는 12.9 μmolCO₂ · m⁻²·s⁻¹ 정도를 보였다. 이것은 배추 재배시 CO₂ 농도를 대기보다 2배 정도 높여주면 광합성능력이 좋아지는 것으로 나타났고, 온도를 4°C 높인 처리는 고온의 영향으로 광합성능력이 오히려 떨어진다는 것을 시사하였다. 아울러 온도가 상승되어 광합성속도가 떨어지면 CO₂ 농도를 동시에 높여 주어 낮아진 광합성능력을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 가을배추 재배시 일반 대기조건보다 온도를 5°C 높여주고 CO₂ 농도를 650mg·L⁻¹으로 처리하면 광합성능력이 좋아졌다는 보고(Lee 등, 2006)와도 같은 결과를 보였고, Lee 등 (2007)이 상추에서 CO₂ 농도를 1,000mg·L⁻¹까지 올리면 생산량이 지속적으로 증가하였다는 내용과도 유사하여 배추의 경우 이상기후에 따른 대기중의 CO₂ 농도가 2배 정도까지 상승하는 것은 광합성능력을 오히려 좋게 한다는 결과를 얻었다.

파종후 97일의 배추 잎의 처리별 무기성분을 분석한

Table 2. Effect of temperatures and CO₂ concentrations on the photosynthesis of chinese cabbage.

Treatments	Pn (μmolCO ₂ · m ⁻² · s ⁻¹)	Stomatal cond. (molH ₂ O ₂ · m ⁻² · s ⁻¹)	Transpiratin rate (molH ₂ O ₂ · m ⁻² · s ⁻¹)
Control	12.9 b ²	0.363 a	5.2 ab
Elevated CO ₂	22.5 a	0.656 a	4.2 b
Elevated temp.	13.6 b	0.475 a	6.1 a
Elevated temp.+Elevated CO ₂	21.4 a	0.848 a	4.6 ab

²Mean separation within by Ducan's multiple range test at $p=0.05$.

Table 3. Effect of temperatures and CO₂ concentrations on the mineral contents of chinese cabbage.

Treatments	Content (%)				
	K	Ca	Mg	P	T-N
Control	4.97 a ²	2.86 c	0.50 b	1.67 a	3.34 ab
Elevated CO ₂	4.42 a	2.65 c	0.44 b	1.61 a	2.68 b
Elevated temp.	4.44 a	3.88 a	0.49 b	1.75 a	3.46 a
Elevated temp.+Elevated CO ₂	5.11 a	3.22 b	0.59 a	1.70 a	3.08 ab

²Mean separation within by Ducan's multiple range test at $p=0.05$.

온도와 CO₂ 농도에 따른 배추의 광합성특성 및 세포조직의 변화

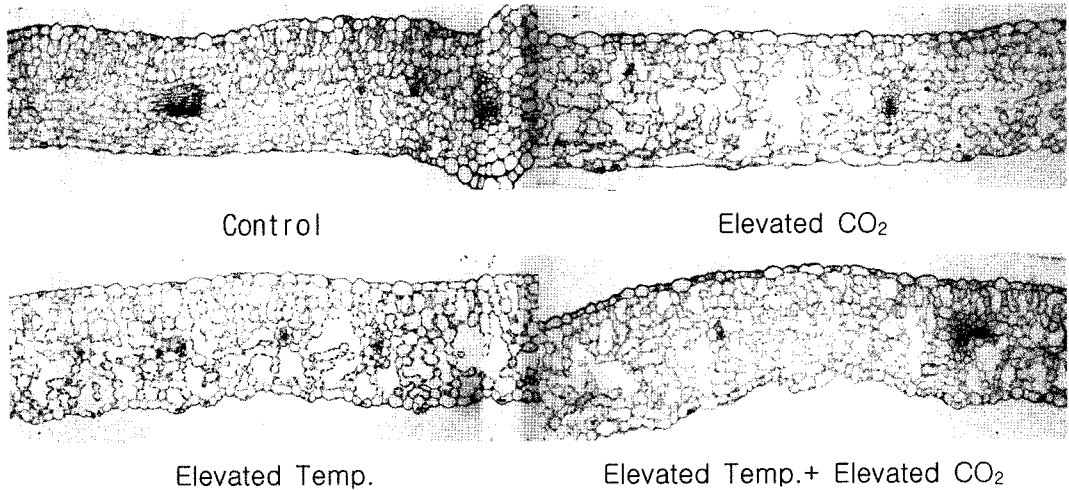


Fig. 1. Effect of temperatures and CO₂ concentrations on the cellular tissue of chinese cabbage.

결과(Table 3), 칼륨 함량은 4.42~5.11%, 인산함량은 1.61~1.75%로 처리가 유의성이 없었다. 칼슘 함량은 온도만 높은 처리에서 가장 높았으며 대기조건과 CO₂ 농도만 높은 처리구가 2.86과 2.65로 낮았다. 마그네슘은 온도와 CO₂ 농도를 동시에 높인 처리구가 높았고, 총 질소함량은 온도만을 높인 처리구가 CO₂ 농도만을 높인 처리구에 비해 높았다. 배추의 경우 CO₂ 농도만을 높인 처리에서 낮았고, 온도를 높인 처리에서 높게 나타났다. 이와 같은 결과로 보아 온도와 CO₂ 농도가 높아지면 특정 성분의 함량에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

배추 파종후 90일에 잎의 세포조직을 관찰한 결과(Fig. 1)를 보면 CO₂ 농도를 높인 처리에서 검은색 점(전분, starch)들이 많이 있었다. 또한 CO₂ 농도와 온도를 동시에 높인 처리에서도 CO₂ 농도만을 높인 처리보다는 적게 나타났지만 온도만을 높인 처리보다 전분이 많이 남아 있었다. 이것은 온도만 높인 처리에서는 호흡작용이 활발하여 양분의 소모가 많았기 때문에 전분의 양이 적은 것으로 사료된다. 이와 같은 결과는 상추에서 CO₂ 농도를 높여 주면 전분함량이 증가하였다는 보고(McKeehen 등, 1996)와 밀 재배시 온도가 높은 처리에서 전분함량이 적었다는 보고(Tester 등, 1995)와 같은 결과를 보였다. 세포 조직의 치밀함에 있어서는 대기조건 상태의 배추를 제외하고는 차이가 없는 것으로 나타났는데, 이와같은 결과는 무의 가식부인 뿌리부위의 경우 온도와 CO₂ 농도를

동시에 높인 'Elevated temp.+CO₂' 처리에서 세포가 크고, 울타리 조직의 두께가 두꺼웠다는 보고(Lee 등, 2008)와 상이하였다. 이것은 무 뿌리와 배추 잎의 생장 환경이 다르기 때문으로 사료되었고, 이에 대해서는 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

따라서 이상기상 현상으로 온도와 CO₂ 농도가 높아지면 배추의 과중이 저하되므로 재배 기간동안 온도가 높지 않은 시기로 재배작기를 조절하거나 고랭지 지역으로 이동할 필요성이 있으며, 온도가 높은 시기에 재배할 경우에는 CO₂ 농도를 2배 정도 높여주면 생육 및 수량감소를 줄일 수 있을 것으로 사료되었다.

적 요

본 연구는 배추 재배시 기후변화에 대비하여 고온과 고농도의 이산화탄소 조건에서 생육반응과 세포조직의 변화를 알아보고자 수행하였다. 처리는 '대기중 온도+대기중 CO₂ 농도(Control)', '대기중 온도+대기보다 CO₂ 2배 상승(Elevated CO₂)', '대기온도보다 4°C 상승+대기중 CO₂ 농도(Elevated temp.)', '대기온도보다 4°C 상승+대기보다 CO₂ 2배 상승(Elevated temp.+CO₂)'의 4가지 조건으로 처리하였다. 그 결과, 대기조건보다 온도만 높아지게 되면 배추의 생체중이 현저하게 저하되어 수량이 떨어지는 것으로 나타났고, 온도가 높아지고 CO₂ 농도가 동시에 올라가게 되면 생육이 어느정도 회복되는 것으로 나타났다. 또한 칼륨과 인산

함량은 처리별로 차이가 없었지만 칼슘과 총질소함량은 온도만 높인 처리에서 높았고, 마그네슘 함량은 온도와 CO₂ 농도를 동시에 높인 처리에서 높게 나타났다. 배추 잎의 세포 관찰결과 CO₂ 농도를 2배 정도 높인 처리에서 잎내의 전분함량이 증가하는 것으로 나타났고, 온도만 높인 처리에서 전분 함량이 가장 낮았다.

주제어 : 광합성특성, 미량요소, 엽록소

인 용 문 헌

- Eastin, E.F. 1978. Total nitrogen determination for plant material containing nitrate. *Anal. Biochem.* 85:591-594.
- Jung, W.K. 2008. The accumulation of soil carbon contents for decrease of greenhouse gas. Joint Workshop of Ministries and Offices on Climate Change R&D Projects 948-955.
- Kalnay, E., M. Cai, M. Nunez, and Y.K. Lim. 2008: Impacts of urbanization and land surface changes on climate trends. *International Association for Urban Climate* 27:5-9.
- Kang, H.J., J.S. Lee, K.R. Ryu, and J.T. Lee. 2002. Chinese cabbage cultivation. R.D.A. Suwon. Korea.
- Kim, S.C. 2008. Development of greenhouse gas reduction system related with clean thermal power generation technology. Joint Workshop of Ministries and Offices on Climate Change R&D Projects 619-627.
- Lee, I.B., J.H. Lim, H.L. Kim, and S.B. Kang. 2005. Survey of growth response of pepper under global warming. NHRI Annual Research Report. Suwon (CD version) pp.37-46.
- Lee, I.B., K.C. Ryu, J.M. Lee, H.Y. Park, W. Moon, Y.B. Lee, K.Y. Kim, K.W. Park, and Y.J. Yang. 2007. Vegetable. Hyangmoonsha Press. Seoul. pp.122-123.
- Lee, J.W., S.Y. Kim, Y.A. Jang, J.H. Moon, and W.M. Lee. 2006. Growth response and CO₂ biomass of chinese cabbage and radish under high temperature and CO₂ concentration. *J. Bio-Environment Control* 15:364-368.
- Lee, S.G., J.H. Moon, Y.A. Jang, S.Y. Kim, and K.D. Ko. 2008. Change of photosynthesis and cellular tissue under high CO₂ concentration and high temperature in Radish. *The first Asian Horticultural Congress.* p.8.
- Lim, M.S., K.Y. Shin, J.G. Woo, Y.S. Kwon, S.W. Jang, W.B. Kim, J.N. Lee, J.T. Lee, H.J. Kwon, J.T. Seo, J.H. Ahn, Y.G. Kang, Y.I. Ham, M. Kwon, and K.R. Ryu. 2000. Vegetable cultivation technique in highland area. Kwahakwonyae press. Seoul. pp.52-56.
- Lim, Y.K., K.Y. Kim, and H.S. Lee, 2002: Temporal and spatial evolution of the Asian summer monsoon in the seasonal cycle of synoptic fields. *J. Climate* 15:3630-3644.
- McKeehen, J.D., D.J. Smart, C.L. Mackowiak, R.M. Wheeler, and S.S. Nielsen. 1996. Effect of CO₂ levels on nutrient content of lettuce and radish. *Adv. Space Res.* 18:85-92.
- Noma, Y., S. Tukagoshi, and K. Noda. 2004. Amount of CO₂ biomass of economic potential in vegetables. 14th International Symposium in Horticultural Economics and Management in Berlin. Internet ed.
- Park, S.H., J.S. Lee, M.H. Seo, and J.S. Lee. 2002. Radish cultivation. RDA, Suwon. Korea. pp.39-40.
- Ryu, H.J. 2008. CO₂ separation by the chemical-loopin combustion technology. Joint Workshop of Ministries and Offices on Climate Change R&D Projects:611-618.
- Tester, R.F., W.R. Morrison, R.H. Ellis, J.R. Piggott, G.R. Batts, T.R. Wheeler, J.I.L. Morison, P. Hadley, and D.A. Ledward. 1995. Effects of elevated growth temperature and carbon dioxide level on some physicochemical properties of wheat starch. *J. of Cereal Sci.* 22:63-71.