

생육중기 벼 군락 내 기온의 연직구조

윤영관¹ · 윤진일¹ · 김규량² · 박은우² · 황 현³ · 조성인⁴

¹경희대학교 생명자원과학연구원/농학과, ²서울대학교 농생물학과

³성균관대학교 생물기전공학과, ⁴서울대학교 농공학과

(2000년 10월 20일 접수)

Air Temperature Profile within a Partially Developed Paddy Rice Canopy

Young-Kwan Yoon¹, Jin-Il Yun¹, Kyu-Rang Kim², Eun-Woo Park²,
Heon Hwang³ and Seong-In Cho⁴

¹Department of Agronomy/Institute of Life Science and Natural Resources Kyung Hee University, Suwon, Korea

²Department of Agricultural Biology, Seoul National University, Suwon, Korea

³Department of Bio-Mechatronics Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon, Korea

⁴Department of Agricultural Engineering, Seoul National University, Suwon, Korea

(Manuscript received 20 October 2000)

ABSTRACT

Little information is available for the temporal variation in air temperature profile within rice canopies under development, while much works have been done for a fully developed canopy. Fine wire thermocouples of 0.003 mm diameter (chromel-constantan) were installed at 10 vertical heights by a 10 cm step in a paddy rice field to monitor the air temperatures over and within the developing rice canopy from one month after transplanting (June 29) to just before heading (August 24). According to a preliminary analysis of the data, we found neither the daytime temperature maximum nor the night time minimum at the active radiation surface (the canopy height with maximum leafages) during this period, which is a typical profile of a fully developed canopy. Air temperature within the canopy never exceeded that above the canopy at 1.5 m height during the daytime. Temporal march of the within-canopy profile seemed to be controlled mainly by the ambient temperature above the canopy and the water temperature beneath the canopy, and to some extent by the solar altitude, resulting in alternating isothermal and inversion structures.

Key words : temperature, microclimate, paddy rice, rice canopy

I. 서 언

담수상태에서 재배되는 벼의 경우 군락 내부의 기온이 외부의 기온에 비해 지속적으로 낮다는 사실은 경험적으로 잘 알려져 있으며, 정밀한 측정실험에 의해서도 확인된 바 있다(I.R.R.I., 1980; Kim et al., 1991; Yun et al., 1997a). 관측노장과 벼 군락 내부의 기온차를 결정짓는 가장 중요한 요인은 지표의 성질이라 할 것이다. 관측노장은 항상 짧게 예취된 잔디

로 덮여있으며, 가뭄이 심한 경우를 제외하고는 관개를 하지 않는다. 반면 벼논은 중간낙수 또는 간단관개를 실시하지만 거의 전 생육기간 동안 일정 수심의 담수상태이다. 관개수에 의해 대기와 차단된 논토양의 비열, 열전도도 등 열적 특성은 관측노장의 잔디로 덮인 토양과 상당한 차이가 있다. 여름철에 해안지방은 같은 위도의 내륙지방보다 평균기온이 낮고, 내륙지방에서도 다목적 댐 건설에 의해 생긴 대규모 인공호 주변에서는 여름철 기온이 호수 생성전보다 낮아지는

것이 보통이다(Yun et al., 1997b). 이는 주로 물 자체의 열적 특성이 일반 토양과는 다른 데서 오는 현상이다.

또한 관측노장의 지표면은 변화하는 날씨 조건에 따라 건조 혹은 습윤 상태가 반복되므로 맑은 날에는 지표면이 수분부족 상태이나 비오는 대기의 증발수요를 항상 충족시킨다. 동일한 기상조건하에서도 관측노장과 비논간에 순복사에너지의 차이가 존재하지만, 편의상 동일한 양으로 가정하고 관측노장과 비논의 지표부근 기온을 결정하는 에너지수지를 예상해 보면, 비논의 경우 잠열성분이 관측노장보다 훨씬 크고 따라서 현열성분은 적어지는 것을 쉽게 짐작할 수 있다.

한편 물의 열적인 특성만 고려한다면 낮 동안에 물 자체에 저장되었던 열량(즉 수온 상승에 쓰인 열량)이 야간에는 온도경사에 따라 군락내부 공기 중으로 전달될 것이기 때문에 관측노장보다 높은 기온을 예상할 수도 있다. 그러나 실측결과는 주간보다 오히려 야간에 기온하강 정도가 심한 것으로 나타났다(Yun et al., 1997a). 지표특성이 동일하다면 구름이 없는 야간에는 지표로부터의 장파 지구복사 방출에 의해 지표부근 대기의 온도가 장파복사가 차단된 백엽상내의 기온보다 낮아지는 것이 당연하다. 따라서 야간 복사 냉각량과 논물의 저장열 방출량간 상대적 크기에 따라 관측노장-비논 사이 기온차가 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다.

흐린 날의 경우 비 군락 내부 기온이 주야구분 없이 백엽상 기온에 비해 지속적으로 낮은 것으로 보고되었다(Yun et al., 1997a). 즉 낮 시간대의 군락 내 기온과 백엽상 기온간 차이는 맑은 경우와 유사하나 야간의 기온차는 상당히 줄어든다. 이는 흐린 날의 야간 복사냉각량이 맑은 날보다 훨씬 적기 때문으로 흐린 날의 기온차이는 복사의 영향이 제거된 순수한 비군락 자체의 열적 특성에 따라 나타난다고 볼 수 있다. 비 군락은 관측노장과 비교하면 상시담수에 따른 물의 영향, 잔디보다 훨씬 큰 공기역학적 거칠기길이(roughness length), 식물체와 다습한 공기로 이루어진 영성한 질량구조 때문에 열적인 완충능력(buffering capacity)이 클 것이다. 특히 식물체 및 담수면 증발산으로 인한 순복사에너지의 잠열 소모효과가 현열의 감소, 즉 기온의 하강으로 나타났다고 볼 수 있다.

이러한 관측결과 및 추론에 따르면 군락 내부에서

도 층위에 따라 기온의 차이가 존재할 것임을 쉽게 알 수 있다. 군락 내부의 층위별 기온분포 및 이들의 시간에 따른 변화는 농업 미기상학의 주요 연구주제로서 교과서적 이론으로 정착되어있는 수준이지만, 지금까지 알려진 지식은 출수기 이후 엽면적이 최대값에 도달하였거나 군락이 완전히 형성된 등숙기간 중에 관측된 결과에 바탕을 두고 있다. 군락 내 기온과 밀접한 관계가 있는 병해충의 발생은 일반적으로 이앙 후 출수 이전에 빈번하므로, 만약 군락 내 층위에 따른 기온분포에 근거한 정밀한 병해충 예찰모형의 구동을 목적으로 한다면 최대 엽면적 시기 이전의 기온구조에 대한 정보가 필요할 것이다. 또한 과거에 수행된 군락 내 기온관측실험들 가운데는 부적절한 센서의 선택이나 차광 및 환기장치에 의한 왜곡을 완전히 보정하지 못한 경우도 있을 것으로 판단된다. 한편 주로 일본에서 비논의 미기상에 관한 연구가 활발하였던 60년대 품종들은 현재 널리 재배되는 품종들에 비해 초형구조가 상당히 달라 이 또한 군락 기온구조에 영향을 미칠 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이와 같은 여러 가지 조건을 감안하여 현재 재배되는 벼 품종군락을 대상으로, 이앙 후 출수 이전까지의 시기에, 적절한 측정기법을 사용하여 비논의 기온 연직구조에 대한 정보를 수집, 분석하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1999년 5월 25일 경기도농업기술원 답작포장에 표준 재배법으로 이앙, 재배종인 '추청'벼 군락을 대상으로 6월말부터 8월말까지 기온의 연직분포를 조사하였다. 기온측정센서는 직경 0.003 mm인 E형(chromel-constantan) 미세선 열전대(fine wire thermocouple)를 사용하였으며, 설치 전 Growth Chamber에서 기차보정을 실시한 후 관개수면 위 10 cm부터 100 cm까지 10 cm 간격으로 10개를 설치하였고, 군락 외부의 기온값을 얻기 위해 150 cm 위치에 1개를 추가설치하였다(Fig. 1). 사용된 미세선 열전대는 그 크기가 작아서 자연상태에서 별도의 차광장치를 하지 않아도 복사에 의한 기온측정오차를 무시할 수 있으며, 특히 반응속도가 빨라서 미기상학적 실험에 적합한 온도센서이다. 별도의 차광장치나 환기장치를 부가해야 하는

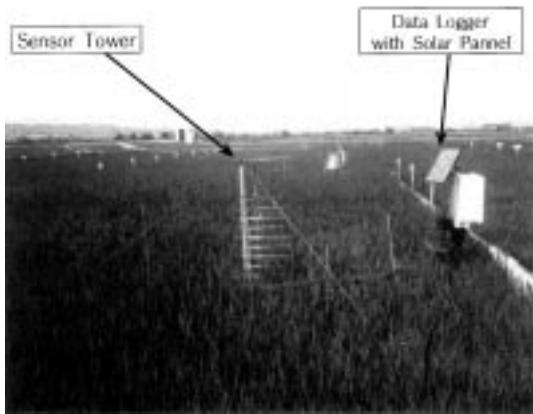


Fig. 1. The sensor array and data logging system for measuring air temperature within the rice canopy at Kyonggi Province Agricultural Research and Extension Service in May 1999.

다른 종류의 센서를 사용할 경우 군락 내부의 미기상 환경이 파괴될 수 있으므로 적합하지 않다.

자료 집록은 태양전지에 의해 구동되는 데이터로거 (CR10X, Campbell Scientific, USA)에 의해 10초 간격으로 온도를 연속측정하고 그 10분 평균값을 취하였다. 자료 분석을 위해 이들 값을 다시 한 시간 값으로 평균하였으며, 비교를 위한 기준자료로는 1966년 10월 6일 일본 오카야마대학 구내의 답작포장에서 층위별로 관측한 결과 (高須와 木村, 1972)를 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

일반적으로 알려진 벼논의 군락 내부 기온구조는 Fig. 2와 같다. 일출 무렵 군락 외부부 및 내부의 상하간에 기온차가 거의 없는 중립구조에서 시작하여 외기온이 상승하고 태양고도가 높아짐에 따라 점차 잎이 많이 모여있는 초관부 쪽으로 고온대가 형성되는 반면, 군락 하부로 갈수록 기온 상승폭이 적어 낮 시간에는 초관부를 중심으로 상부 ‘lapse’, 하부 ‘inversion’ 형태의 대기 안정도 구조를 갖게된다. 이 최고기온 발생 시점을 지나면 다시 중립구조를 거쳐 심야 시간대에는 궁극적으로 초관부의 기온이 가장 낮고 그 아래쪽으로 약한 ‘lapse’ 구조를 보이게 된다. 이 그림은 1966년 10월 6일 일본의 오카야마대학 답작포장에서 얻은 결과로서 등숙기에 도달한 ‘Asahi’ 품종군락을 대상으로 한 것이며, ‘군락 내 최대엽면적 부위가 단파복사 흡

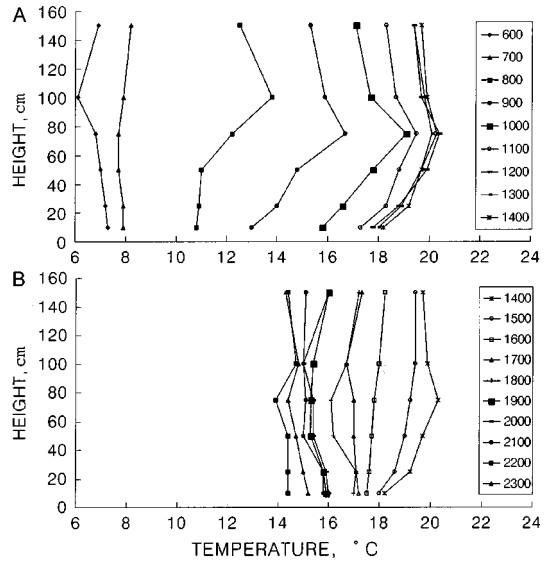


Fig. 2. Typical air temperature profiles (A: warming phase, B: cooling phase) found in a fully developed paddy rice canopy. Redrawn from the data by Takatsu and Kimura (1972).

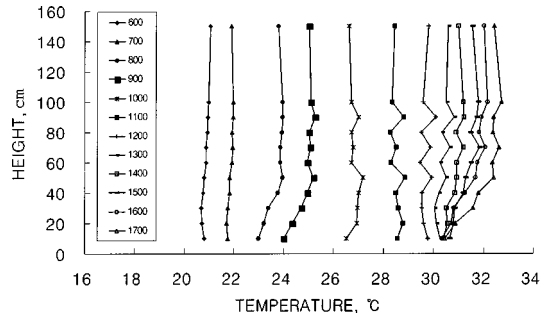


Fig. 3. Hourly profiles of air temperature over and within the paddy rice canopy during the warming phase of 20 July 1999 (canopy height = 60 cm).

수/장파복사 방출의 활성표면’이라는 이론적으로 이미 검증된 관계를 충실히 따른다고 할 수 있다.

아직 완전한 군락이 형성되기 전인 7월 20일 하루 동안 관측된 군락 내부 기온의 연직구조가 Fig. 3이다. 이 날은 날씨가 전반적으로 맑았으며 최저기온 23°C, 최고기온 33.5°C (인근 수원기상대 관측값)였고, 실험 포장 벼 군락의 평균 높이는 약 60 cm이었다. 역시 일출 무렵에는 군락 외부와 내부, 군락 내부 상하간에 기온차가 거의 없는 중립구조를 보인다. 일출 이후 초관부의 기온은 외기온과 거의 같은 비율로 상승하며

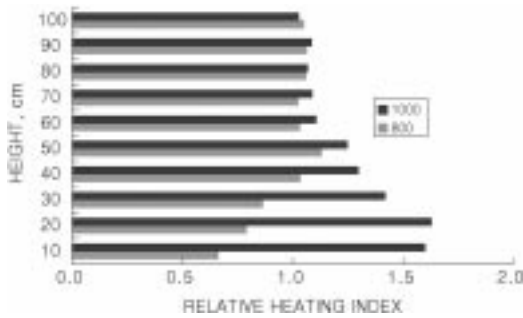


Fig. 4. The heating strength profile for 08:00 and 10:00, which is the temperature increase rate of each height within the rice canopy for the past 1 hour period relative to that of 150 cm.

일 최고기온 발생시점까지 외기온과의 최대편차가 0.5°C를 넘지 않아, 완전히 형성된 군락에서 보이는 ‘최대 엽면적 부위에서 최고기온’ 형태의 프로파일은 나타나지 않는다. 다만 군락 하부의 기온은 시간에 따른 변화양상이 외기나 초관부와 크게 다르다.

군락 내 임의 위치에서 한 시간 동안의 기온 상승폭을 그 시간대의 150 cm 외기온의 상승폭으로 나누어 상대승온지수를 구해보았다(Fig. 4). 이 날 한 시간 동안의 기온 상승폭이 가장 컸던 아침 7시부터 8시 사이에 각 층위별 상대승온지수를 보면 군락하부, 특히 수면 가까이로 갈수록 승온지수가 작아지는 반면, 9시부터 10시 사이의 승온지수는 군락하부로 갈수록 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 시간대별 태양 고도의 변화에 따른 것으로서 아침 9시 이전에는 직달일사의 군락 내부 침투가 불충분하여 수면이나 초관하부의 직접 가열에 의한 승온보다는 상대적으로 고온인 초관부로부터의 열전도 혹은 확산에 의한 간접효과에만 의존하므로 온도 상승이 상대적으로 지연된다. 그 이후에는 초관 하부로 일사 침투가 용이해지고 따라서 복사열에 의한 직접 승온효과까지 가세하여 승온지수가 커지는 것으로 해석할 수 있다. 만약 군락이 완전히 형성된 상태라면 태양고도와 무관하게 군락 하부에서는 일사흡수가 거의 일어나지 않을 것이므로 Fig. 3과 같은 기온 프로파일이 형성되지 않을 것이다. 본 실험조건에서는 일중 태양고도가 가장 높은 시간대에도 Fig. 2와 같은 초관부를 중심으로 한 ‘상부 lapse-하부 inversion’ 형태의 구조는 거의 나타나지 않았다.

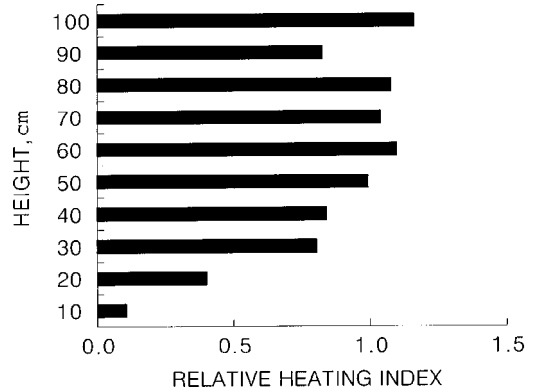


Fig. 5. The heating strength profile for 17:00, which is the temperature increase rate of each height within the rice canopy for the past 4 hour period relative to that of 150 cm.

정오를 넘겨 다시 태양고도가 낮아지기 시작해도 군락 외부와 초관부의 기온은 오후 5시(관측노장의 일 최고기온 발생시각)까지 상승을 지속하였다. 반면 군락 하부와 수면부근에서는 이 기간동안 거의 기온상승이 관측되지 않았다. 즉 수면 부근의 기온은 오후 시간대에는 군락외부 기온의 영향으로부터 거의 독립적이다. 이와 같은 사실은 오후 1시부터 5시까지 4시간 동안 각 층위별 승온지수를 비교해보면 보다 확실해진다(Fig. 5). 이 시간대에 수면 위 10 cm 높이에서의 상승폭은 외기온 상승폭의 10%에 불과했고 20 cm에서는 40%, 30~40 cm에서는 80%, 그 이상에서는 외기온의 상승폭과 거의 같은 정도로 기온 상승이 지속되었다. 수면 부근의 기온이 외기온과 무관하게 지속적으로 낮은 상태를 유지하는 것은 수온의 영향인 것으로 추정된다. 상대적으로 큰 물의 비열 때문에 이 날 수온의 일중 변동폭은 23.3°C에서 25.8°C에 머물렀다.

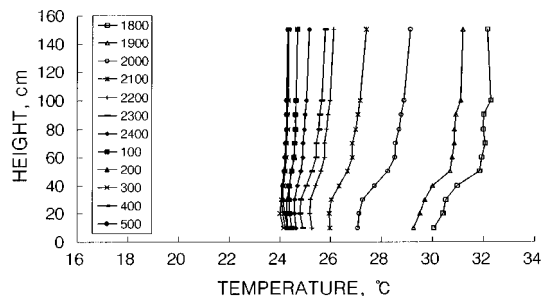


Fig. 6. Hourly profiles of air temperature over and within the paddy rice canopy during the cooling phase of 20 July 1999 (canopy height = 60 cm).

외기온의 하강이 시작되면 위치에 관계없이 초관부로부터 수면 부근의 기온까지 비슷한 비율로 기온이 떨어지는데, 일몰 후에는 초관 하부의 기온하강이 다시 지연되면서 자정 무렵에는 거의 중립인 프로파일을 보인다(Fig. 6). 초관부위 혹은 그 약간 아래쪽에서 최저기온이 나타나는 것을 인정할 수는 있지만, 상하간 기온편차는 최대 0.2°C 이내로서 실용적인 의미는 없다고 할 것이다.

IV. 결 론

아직 군락이 완전히 형성되지 않은 벼논의 경우 수면으로부터 높이에 따른 기온은 군락 상부의 기온변화와 관계수온, 그리고 태양고도와 밀접한 관련이 있으며, 그 양상은 완전히 형성된 군락의 기온 프로파일과 상당히 다르다는 사실이 드러났다. 병해충의 발생부위는 그 종류뿐 아니라 벼의 생육시기에 따라 달라지므로, 군락 내 기온 프로파일의 경시변화는 중요한 의미를 갖는다. 만약 벼의 생육시기별로 임의 시간대의 기온 프로파일을 모형화 할 수 있다면 병해충 관련 연구나 예찰사업에 효과적으로 이용할 수 있을 것이다. 본 실험의 결과는 이러한 군락 기온 모형화를 위한 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다.

V. 적 요

벼 군락의 기온 연직구조에 관한 연구는 일반적으로 출수 이후 등숙기에 완전히 형성된 군락을 대상으로 한 것이므로 병해충 예찰모형의 구동 등 실용적으로 많이 요구되는 생육중기의 미형성 군락에 관한 정보를 보완하기 위해 이앙 후 한 달째부터 출수 직전까지 기온을 연속 측정하였다. 별도의 차광 혹은 환기장치가 불필요한 직경 0.003 mm E형 미세선 열전대를 관개수면 위 10 cm부터 100 cm까지 10 cm 간격으로 10개를 설치하였으며, 비교를 위해 150 cm 위치에 1개를 추가설치 하였다. 자료는 10초 간격으로 측정하

고 그 10분 평균값을 취하였으며 분석은 한 시간 단위로 수행하였다. 맑은 날 자료에 의하면 일출 이후 초관부(최대엽면적 부위)의 기온은 외기온과 거의 같은 비율로 상승하나, 그 아래쪽으로 갈수록 태양고도가 높아지기 전까지는 온도 상승이 상대적으로 지연된다. 오후에 태양고도가 낮아지기 시작해도 군락 외부와 초관부의 기온은 관측노장의 일 최고기온 발생시각까지 상승을 지속하나, 그 아래쪽 기온은 상승폭이 둔화되며 수면 부근에서는 외기온 상승폭의 10%에 그쳐 오후 내내 거의 일정한 온도를 유지한다. 외기온의 하강이 시작되면 위치와 무관하게 같은 비율로 냉각되나, 일몰 후에는 초관 하부의 냉각이 지연되면서 자정 무렵에는 상하 중립인 구조를 갖는다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(농업과학: A-95-6)에 의해 수행되었음.

인용문헌

- 高須謙一, 木村和義, 1972: 圃場の微細氣象[3] 稻田の氣温, 濕度, 炭酸ガス濃度の日變化. 農學研究 **54**, 107-120.
- I.R.R.I., 1980: *Agrometeorology of the Rice Crop*. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines. 254p.
- Kim, L. Y., K. T. Um, I. S. Jo, and H. B. Kim, 1991: Distribution of air, water and soil temperatures of paddy fields in Korea. *Research Reports of Rural Development Administration* **33(3)**, 99-117.
- Yun, J. I., J. C. Shin, Y. D. Yun, E. W. Park, S. I. Cho, and H. Hwang, 1997a: Canopy microclimate of water-seeding rice during internode elongation period. *Korean J. Crop Science* **42(4)**, 473-482.
- Yun, J. I., K. H. Hwang, H. H. Chung, M. Y. Shin, J. T. Lim, and J. C. Shin, 1997b: Effects of an artificial lake on the local climate and the crop production in Suncheon area. *J. of Korean Meteorological Society* **33(3)**, 409-427.