

벼의 천개 내부와 외부에서
대기 안정도가 난류 구조에 미치는 영향
Effect of Stability on Turbulence Structure
Above and Within a Rice Canopy

이중용* 안은수** 김은수**
정회원 정회원 정회원
J.Y. Rhee E.S.An E.S.Kim

1. 서론

작물이 심어진 포장에서 대기의 유동은 작물의 성장이나 공기를 통하여 살포되는 농약입자나 분제입제의 살포에 영향을 주게 된다. 미세기상학에서 보면 작물주변의 여러 가지 기상인자 중에 풍속이 가장 중요한데 그 이유는 작물주변에서 물질이나 열 전달에서 대류가 차지하는 비중이 크기 때문으로 생물성장 모델링이나 기상재해를 예방하기 위한 조치를 개발하기 위해서도 미세기상학적인 정보가 필요하다. 특히 농약살포시 농약의 비산을 평가하는데 있어서 풍속과 마찬가지로 안정도는 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문에 ASAE에서도 비산실험시 대기의 안정도와 풍속 등을 함께 고려하고 있다. 농약입자의 비산을 예측하기 위한 모형에서는 대기의 풍속뿐만 아니라 난류특성까지도 필요하다.

지금까지 식물 천개에서의 유속 측정은 주로 음파 풍속계나 열선 유속계를 사용하여 숲이나 콩, 옥수수 밭에서 이뤄졌다. 이에 대한 국내의 연구사례는 거의 없는 실정이며 외국에서는 농작물이나 임야에서 연구한 사례가 많이 있다.

Raupach 와 Thom(1981)은 식물 천개 부근에서의 난류 특성을 분석했고, 실제 포장과 풍동에서의 난류 구조 연구를 비교하였다. 천개 위·아래에서의 속도 프로파일을 개발하였고, 천개 내부에서 국부 발산 이송 모델(local -diffusion models of transport)의 한계를 지적하였으며 이를 대체하기 위한 모멘트와 물질 이동에 관한 2차 닫힘 모델(second-order closure models)을 제안했다. 또한, 천개 난류 연구를 통해 난류 경계층에 관한 기초 지식을 제공했으며, 소나무 숲과 옥수수 천개 부근에서의 평균 유속 프로파일을 비교하였다. 숲에서의 유속 프로파일은 지표면 가까이에서 두 번째 극값을 가지는 것으로 나타났다. 그러나, 무차원 변수를 이용한 척도 개념은 지나치게 단순화되었기 때문에, 척도에 관한 미기상학적 연구는 매우 간단한 경우를 제외하고는 정확한 결과를 이끌 수 없다고 보았으며 이 분야에 관한 연구는 당분간 경험에 의존할 것이라고 보고했다.

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

** 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과

Perrier et al.(1970)과 Rhee(1990) 등은 콩의 천개 위·아래에서의 속도 분포와 난류 구조를 분석하였으며 Rhee(1991)는 측정된 난류특성을 이용하여 분무입자의 이동 모델에 적용하였다. 하지만, 개발된 분무입자 이동 모델의 신뢰성을 높이기 위해서는 불균일한 난류 흐름을 좀더 정확하게 기술할 수 있는 더 높은 차수의 Markov velocity chain의 개발과 개발된 이동 모델의 시뮬레이션을 위해 다양한 성장 단계에서 다양한 작물에 대한 미기상학적 자료와 식물 구조에 대한 데이터 베이스가 필요함을 제시했다. Wilson(1982) 등은 옥수수 천개 위·아래에서 2개의 3차원 split-film anemometer를 이용하여 대기 난류에 대한 평균 유속 프로파일과 난류 강도 등을 측정하였다. Baldocchi(1988)와 Amiro(1989)는 숲에서의 난류 특성을 분석하였는데 대부분의 측정은 천개 위의 대기가 중립이거나 불안정한 상태인 낮에 이루어졌다.

천개 부근에서의 난류에 대한 지금까지의 연구 결과를 종합하여 보면, 평균 유속 프로파일이나 난류강도 등은 식물 종류에 따라 다소의 차이는 있지만 같은 경향을 보이고 있으나 (Wilson et al., 1982; Rhee, 1991, Baldocchi et al., 1988; Amiro, 1989), 아직 천개 내부에서의 정확한 난류 거동에 대한 기술이나 대기의 안정도에 따른 난류 특성에 대해서는 더 많은 연구가 필요한 것으로 보인다.

본 연구는 대기의 안정도가 난류특성에 미치는 영향을 실험적으로 구명하기 위한 것으로서 고려된 난류특성에는 난류강도, 표준편차, 왜곡도, 편평도, Reynolds stress, 시간척도, 속도척도 등이 있으나 본 연구에서는 난류강도와 왜곡도, 편평도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 측정기기

공기 속도와 난류 특성은 열선의 열전달 변화량을 감지하여 속도로 환산하는 열선 유속계 (IFA-300, Constant Temperature Anemometer, TSI)를 이용하여 측정하였다. 열선 유속계의 시스템 개략도와 제원은 Fig 1과 Table 1에 나타내었다.

본 연구에 사용한 센서는 Boundary Layer Cross Flow "X" Probe(Model 1243, TSI, exposure temperature 150℃)로서 수평과 수직성분의 유속을 측정할 수 있다. IFA-300자체에서도 온도변화에 대한 보정이 있지만 본 연구에서는 온도의 변화 범위가 넓기 때문에, 캘리브레이터(Model 1125)를 모방하여 제작하여 20℃와 25℃, 30℃에서 캘리브레이션을 수행하였다. 또한, 노지에서의 풍속이 10m/s를 넘지 않을 것으로 생각하여 캘리브레이션의 속도 범위는 0.0~10.0m/s로 하였다. 실제 포장 내에서 probe를 지면에서부터 높이 180cm까지 10cm 간격으로 이동시킬 수 있도록 제작하였다.

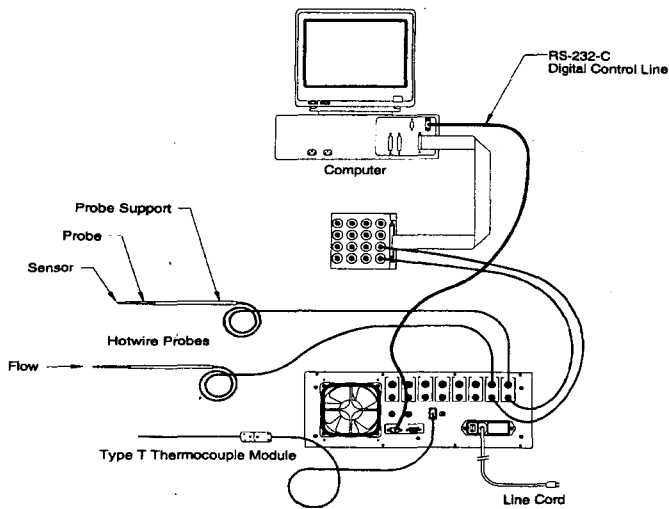


Table 1 Specification of the hot-wire anemometry system

Amplifier drift	0.3 μ V/ $^{\circ}$ C
Operating resistance	2 to 80ohms
No. of channels	Up to 8
Frequency response	300kHz (without tuning)
Output	Bridge voltage to 11.5V
Temperature Sensor	T-Type

Fig. 1 Components of the thermal anemometer system.

온도는 열선유속계에 부착되어 있는 T-type thermocouple을 이용하여 측정하였으며 평형 상태에서 0.011 $^{\circ}$ C의 표준편차를 가진 온도를 지시하였다. Fig. 2는 thermocouple의 반응시간 (response time)을 나타낸 그림으로, 최종값의 63.2%에 도달하는데 걸린 시간, 즉 시간상수 (time constant)는 약 56초였으며 최종값의 90%에 도달하는 시간은 약 140초(2분 20초)임을 알 수 있었다. 본 실험에서는 두 단계의 높이에서 온도를 측정할 때 각 위치별로 최소한 2분 30초가 지난 후에 1분동안 측정하여 평균치를 이용하였다.

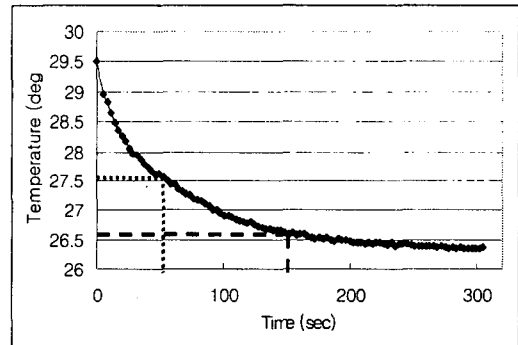


Fig. 2 Response time of T-type thermocouple.

2.2 측정위치 및 방법

본 연구를 위한 실험은 서울대학교 농업생명과학대학 부속농장의 포장에서 이루어졌다. 실험 포장에 심겨진 벼는 추청벼(아끼바리)로 6월 2일 이앙되었으며, 조간거리 및 주간거리는 각각 30cm, 15cm이었다.

벼의 생육시기에 따른 바람의 특성을 보기 위해 8월초부터 9월말까지 풍속을 측정하였는데, 초반엔 4~5일 간격으로, 후반엔 약 10일 간격으로 측정하였다. 측정된 날짜와 시간, 안정비, 천개높이 그리고 풍향은 Table 2와 같다.

Table 2 General information related to the measurements

Date	Time	SR value	Canopy height(cm)	Wind direction	$T_{10}-T_{2.5}$ (m/s)
16 Aug.	12:15 ~ 13:10	424152.15	70	E	0.65
22 Aug.	15:25 ~ 16:40	71431.67	80	W	0.3
30 Aug.	15:07 ~ 16:40	-39632.39	95	ESE	-0.4
7 Sept.	15:05 ~ 15:58	723208.41	94.67	EN	1.1
20 Sept.	16:45 ~ 17:35	-348143	95.95	W	-0.2
30 Sept.	10:20 ~ 11:25	-554188	95	WNW	-0.5

측정 중에 바람 방향이 불규칙하게 바뀌는 경우가 많아 센서와 바람 방향을 정확히 일치시키지는 못하였으나 난류 특성의 통계적 분석의 변화에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다(Wilson, 1982).

대기의 안정도는 ASAE에서 규정한 안정비(ASAE Standard, S387.2 DEC95)계산공식을 이용하여 구하였다. 안정비(SR, $^{\circ}\text{C s}^2/\text{m}^2$)는 지면으로부터 2.5m와 10m에서의 온도차($t_{10} - t_{2.5}$)와 고도 5m에서의 풍속(U_5 , m/s)을 이용하여 계산되며, 안정비가 양수일 때 대기 안정상태, 음수일 때 불안정 상태로 해석되며 숫자의 크기는 안정/불안정 정도의 대소를 의미한다.

$$SR = \frac{10^5 (t_{10} - t_{2.5})}{U_5^2} \quad \text{-----} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

대기안정도에 따른 바람의 수직방향성분의 난류 강도와 표준편차, 왜곡도, 편평도 변화를 3개의 높이 수준에서 살펴보았다. 각각의 데이터는 약 0.35Hc(0.25~0.45Hc), 1.0Hc(0.85~1.15Hc), 1.57Hc(1.47~1.67Hc)높이 근처에서의 값을 평균한 것이다. 또한, 하나의 안정비에 대해 동일한 높이에서의 측정은 두 번 반복된 것이다.

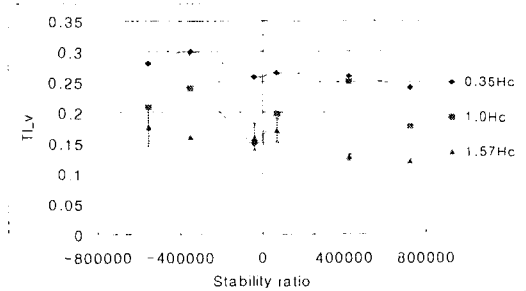


Fig. 3 Turbulence intensity of vertical velocity according to stability ratio.

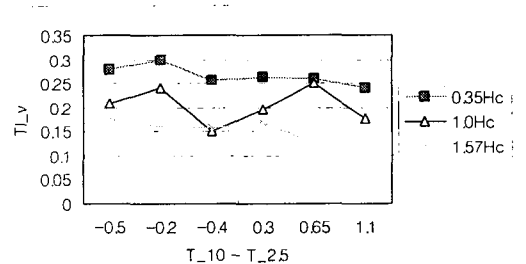


Fig. 4 Turbulence intensity of vertical velocity according to temperature difference.

안정비에 대한 수직방향의 난류 강도는 대기가 불안정에서 안정한 상태로 가면서, 즉 안정비가 음수에서 양수로 되면서 대체로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 천개높이부근에서

의 값은 변동이 심하였고 불안정한 상태에서 오차범위도 크게 나왔다. 그림 4는 그림3의 자료를 안정비가 아닌 두 지점간의 온도차로 표시한 것으로 두 그래프의 모습이 동일하여 안정도를 표시함에 있어 안정비나 두 지점간의 온도차나 모두 사용 가능함을 보여주고 있다.

왜곡도는 안정비가 증가함에 따라 대체로 왜곡도의 절대값이 작아지는 경향을 보였다. 안정된 대기 상태에서 천개높이부근에서는 여전히 큰 왜곡도를 나타내고 있지만 천개 위나 지표부근에서는 거의 0의 값을 나타내고 있어, 대기가 극히 안정상태가 되면 지표부근이나 천개 위에서는 유속의 분포가 거의 정규분포를 나타낼 것이라고 생각할 수 있다. 그러나 천개높이 부근에서는 변화가 미미하였다. 안정비 대신 두 지점간의 온도차로 표시한 경우(Fig. 6)에도 역시 마찬가지로 경향을 보이고 있었다.

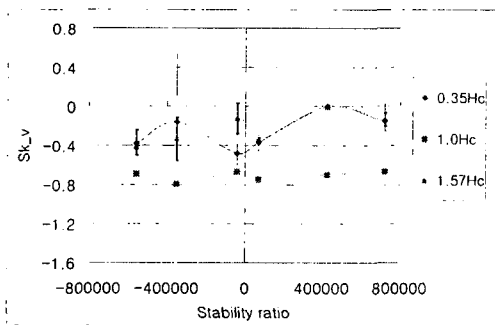


Fig. 5 Skewness of vertical velocity according to stability ratio.

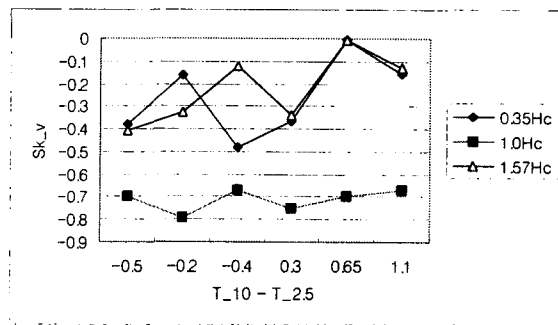


Fig. 6 Skewness of vertical velocity according to temperature difference.

지표부근에서의 편평도는 대기가 안정될수록 3의 값으로 접근했는데 이것은 위의 왜곡도 분석과 마찬가지로 안정된 대기 상태에서 지표부근에서의 속도분포는 거의 정규분포를 나타낼 것임을 암시한다. 천개높이부근에서의 편평도는 안정된 상태에서도 3이상의 값을 나타냈고 천개 위에서와 마찬가지로 대기가 거의 중립 상태일 때 가장 큰 편평도를 기록했다.

대기가 안정됨에 따라 난류 강도와 왜곡도의 크기는 감소하였으나 천개 높이부근에서는 안정비가 영향을 미치지 못하였으며 그 이유는 이 부근에서는 공기의 유동이 작물의 운동과 상호작용을 일으켜 안정비에 대한 효과를 감소시키기 때문으로 추정된다. 본 연구에서는 하나의 안정비에 대한 특정높이에서의 측정데이터가 4~6개 정도밖에 없었고 오차 범위도 넓었기 때문에 몇몇 위치에서 안정비와 특성치간의 관계가 뚜렷하지 못했으며 모든 경우에 대해서도 일관적인 경향이라고 해석하기에는 곤란했다.

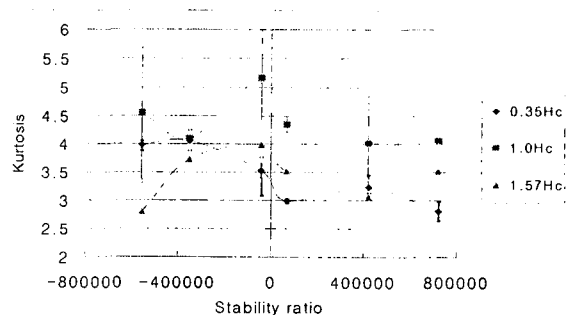


Fig. 7 Kurtosis of vertical velocity according to stability ratio.

4. 요약 및 결론

방제 효율을 향상시키기 위해서는 입자의 이동이나 비산을 평가하는 것이 기본이 된다. 이와 같은 분석은 식물체 주변에서의 공기유속을 측정하여 기상학적 성질을 규명함으로써 얻어질 수 있으며 이 중에서 대기의 안정도는 난류의 구조에 영향을 미친다고 알려져 있으나 그 영향에 관한 구체적인 연구는 국내외적으로 미미한 실정이다..

본 연구는 열선유속계(IFA-300)와 2-dimensional probe를 이용하여 8월부터 9월까지 벼 천개 위·아래에서 공기의 속도를 측정하여 논에서의 대기의 안정도가 난류 구조에 미치는 영향을 분석하고자 수행되었으며 구체적인 결과는 다음과 같다.

1. 대기가 불안정에서 안정상태로 되면서 바람의 수직성분의 난류 강도는 작아졌고 왜곡도도 점차 0으로 접근해갔으나 천개 높이 부근에서는 그 경향이 분명하지 않았다.
2. 대기가 불안정에서 안정상태로 되면서 지표면에서 편평도는 감소하여 3에 가까워지는 경향을 보였으나 천개높이와 그 이상에서는 경향을 논하기에 곤란했다.
3. 본 연구에서 측정량이 충분하지 못하여 통계적 유의성을 논하지는 못하였으나 대기의 안정도가 천개 외부 만이 아니라 내부에 영향을 미치고 있음을 보였고, 천개 높이 부근에서는 안정도의 영향이 미미함을 보였다.
4. 대기 안정도를 표현함에 있어서 안정비를 사용하는 것과 두 지점간의 온도차를 이용하는 것은 차이가 없으며 두 방법 모두 가능함을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

1. Amiro, B. D. 1989. Comparison of Turbulence Statistics within Three Boreal Forest Canopies. *Boundary-Layer Meteorology*. 51, 99-121
2. Baldocchi, D. D. and T. P. Meyers, 1988a, Turbulence Structure in an Deciduous Forest. *Boudary-layer Meteorology*. 43, 31-58
3. Perrier, E. R., R. J. Milligton, D. B. Peters and R. J. Luxmoore. 1970. Wind Structure Above and Within a Soybean Canopy. *Agronomy Journal*. vol. 62:615-618
4. Raupach, M. R. and A. S. Thom. 1981. Turbulence in and Above Plant Canopies, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 13, 97-129
5. Rhee, J. Y. 1991. Transport and Deposition of Spray Droplets Above and Within a Soybean Canopy. University of Illinois, Urbana-Champaign.
6. Wilson, J. D., D. P. Ward G. W. Thurtell and G. E. Kidd. 1982. Statistics of Atmospheric Turbulence Within and Above a Corn Canopy. *Boundary-Layer Meteorology*. 24:495-519