

수도 재배 논에서 공기유동 프로파일

Wind Profile in Rice Paddy Field

이중용	안은수
정회원	정회원
J. Y. Rhee	E. S. An

SUMMARY

Chemical application, one of the most important crop management processes happened to cause spray drift, that would threaten farmers in field as well as dwellers in rural region. Spray drift was affected by micro-meteorological parameters. A study to evaluate short distance drift characteristics of a boom sprayer in paddy fields has been undergoing. This study is the first step of the research. Main purpose of the was conducted to develop a mean wind profile and to get information on turbulence intensities above and within rice canopy.

Wind in rice paddy field were measured at every 10cm from 10 to 180cm above the ground using a 2-dimensional probe and a hot wire anemometer system. Main results were summarized as follows.

1. Mean wind profile was modeled as;

$$u(z) = \begin{cases} \frac{u_*}{0.4} \ln\left(\frac{z-0.7H_c}{0.04H_c}\right) & \text{for } z > H_c \\ \frac{u_*}{0.4} \ln\left(\frac{H_c-0.7H_c}{0.04H_c}\right) e^{2.95\left(\frac{z}{H_c}-1\right)} & \text{for } z \leq H_c \end{cases}$$

2. Roughness length and zero-displacement in rice canopy were analyzed to be respectively 0.04 and 0.7~0.72 times of the canopy height. The values are smaller comparing to those of other crops because rice canopy is flexible and uniform comparing to other crops.
3. Turbulence intensities(TI) was greater as close to the ground and became constant at heights greater than 1.5Hc, where TI's were 0.4 and 0.15 in horizontal and vertical direction respectively.

Keywords : Turbulence, Micro-Meteorology, Paddy, Spray drift, Anemometer.

1. 서 론

농약살포시 작업자나 인접 작물에 대한 약해를 방지하기 위해서는 살포방법의 비산특성을 충분히

고려해야 하며, 그 특성에 따라 보호장구나 농약 살포 위치 등을 조절해야 한다. 우리 나라에서는 아직까지 농약살포방법이 동력분무기 중심으로 되어 있어 작업자 보호장비에 대한 관심이 적고 비

The paper was submitted for the publication in February 2001, reviewed and approved by the editorial board of KSAM in April 2001. The authors are J. Y. Rhee, assistant professor, Seoul National University and E. S. An, MS graduate. The corresponding author is J. Y. Rhee, professor, Agricultural Machinery Engineering Major, School of Bioresources and Maetials Engineering, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea. E-mail: <jyr@plaza.snu.ac.kr>.

산에 대한 안전대책이 미흡하지만 최근 붐방제기가 개발되면서 작업자 안전이나 비산에 대한 관심이 더 높아질 것으로 기대된다.

작업자 안전이 보장되는 경우에 붐방제기의 살포높이는 노즐간격과 살포량의 균등도에 의해서 결정되지만, 작업자가 노출되는 경우라면 붐방제기의 살포높이는 지면근처에서의 공기유동과 분무입자의 비산을 고려해야 한다.

본 연구는 논에서 붐방제기 작업시 살포높이에 따른 비산을 추정하고 적정 살포 높이를 결정하는데 필요한 기초연구로 수행되었다. 천개 부근에서의 공기 속도 분포 및 난류 특성은 농약살포기술 뿐만 아니라 식물체의 광합성이나 증·발산 추정 등의 기초 자료로도 활용될 수 있는 기본 자료이다.

본 연구의 구체적인 목적은 벼를 재배하고 있는 논에서 벼의 높이 즉 벼 천개(canopy)의 내부와 외부에서 공기 유동을 기술하는 풍속의 프로파일을 제시하고 난류 강도의 크기를 구하는 것이다.

2. 연구사

지금까지 식물 천개에서의 유속 측정은 주로 음파 풍속계나 열선 유속계를 사용하였고 숲이나 콩, 옥수수 천개에서 실험되었으며 국내의 연구사례는 거의 없는 실정이다.

Perrier(1970) 등은 콩의 천개 위·아래에서의 속도 분포와 표준 편차를 구하여 난류 구조를 분석하였는데 천개 위에서의 바람 속도 분포는 로그 프로파일 형식을 나타냈지만 천개 아래에서는 어떤 모델의 일반화도 이루어지지 않았다.

Raupach와 Thom(1981)은 식물 천개 부근에서의 난류 특성을 실제 포장과 풍동에서의 비교하여 천개 위·아래에서의 속도 프로파일을 개발하였다.

Wilson(1982) 등은 옥수수 천개 위·아래에서 2개의 3차원 split-film anemometer를 이용하여 대기 난류에 대한 평균 유속 프로파일과 난류 강도 등을 측정하였으며 측정하는 동안 풍향의 변화가 통계적 분석에 미치는 영향은 무시할 수 있다고 주장하였다.

Baldocchi(1988) 등은 높이에 따른 난류의 통계

적 변화와 낙엽수림 내부에서 난류의 간헐성에 대해 연구하였으며 높이에 따른 난류 특성치는 식물 엽면적의 수직 분포에 큰 영향을 받는다고 보고했다.

Amiro(1989)는 3차원 음파 풍속계를 이용하여 3종류의 침엽수림에 대해 난류 특성을 분석하였다. 각각의 침엽수림 천개 구조는 서로 달랐으며 평균 유속 프로파일도 각 천개 모양에 따라 약간의 차이를 나타냈다. 그러나, 천개 구조의 큰 차이에도 불구하고 많은 난류 특성치들의 프로파일이 서로 유사했고, 엽면적 분포보다 지면으로부터의 높이에 대해 일반화하는 것이 더 낫다고 하였다.

Rhee(1991)는 콩의 천개 위·아래에서 분무입자의 이동과 부착에 관한 난류 영향의 연구를 통해 천개 부근에서의 평균 유속 프로파일을 개발하였고, 난류 강도 및 왜곡도, 시간 척도 등을 해석하여 분무입자의 이동 모델에 적용하였다.

Raupach(1996) 등은 식물 천개 부근에서의 난류와 점착성 와류(coherent eddy)의 움직임이 혼합층 평면(mixing-layer plane)에서의 흐름과 유사한 유형을 가진다고 보고했으며 다양한 식물 천개에 대한 여러 난류 특성치들을 정리하여 서로 비교하였다.

천개 부근에서의 난류에 대한 지금까지의 연구 결과를 종합하여 보면, 논에서 연구사례가 거의 없으며, 연구 내용에 있어서 평균 유속 프로파일은 대개의 경우 천개 위에서 높이에 따라 대수적으로 증가하고, 천개 아래에서는 지수적으로 감소하는 경향을 보였다. 난류 강도는 농작물 천개 내부에서는 값이 거의 일정하거나 높이에 따라 감소했지만(Wilson et al., 1982; Rhee, 1991), 숲의 경우에는 천개 바로 아래부근에서 난류 강도가 최대값을 가지다가 높이가 낮아지면서 다시 감소하는 경향을 보였다(Baldocchi et al., 1987; Amiro, 1989). 난류 강도와 왜곡도, 침도 등은 식물의 종류와 천개의 형태에 따라 조금씩 다르게 나타났으며, 시간과 길이 척도는 천개 부근에서 와류의 크기와 형태, 그리고 난류 이송에서 분석되고 있다. 그러나 천개 내부에서의 정확한 난류, 거동에 대한 기술이나 대기의 안정도에 따른 난류 특성에 대해서는 보다 많은 연구가 필요한 것으로 보인다.

3. 재료 및 실험방법

가. 열선유속 측정 시스템

공기 속도와 난류 특성은 열선 유속계(IFA-300, TSI)를 이용하여 측정하였다. IFA-300의 전체 시스템은 센서를 항온으로 유지하도록 하는 히트스톤 브릿지 회로와 이 브릿지 회로로부터 나온 브릿지 전압을 출력전압으로 전달하는 신호 조절 회로로 이루어진다. 유체가 브릿지 회로 저항중의 하나인 열선 센서를 통과하여 열선의 온도가 내려가 저항이 바뀌면 브릿지 전압이 변하므로 조정된 전압과 속도의 관계식을 유도하여 캘리브레이션을 한다.

본 연구에 사용한 센서는 Boundary Layer Cross Flow "X" Probe(Model 1243, TSI)로서 그림 1과 같이 주방향(u성분)과 이에 수직한 방향(v성분)의 속도를 높은 주파수에서 측정할 수 있으나 야외에서 사용하기에는 취급에 주의할 요하는 단점이 있다. 실험에 사용된 열선유속계와 센서의 제원은 표 1과 2와 같다.

나. 캘리브레이션

열선유속계는 온도보정 기능이 있으나 본 연구에서는 온도의 변화 범위가 넓기 때문에 캘리브레이션이 필요하였다. 그림 2와 같은 캘리브레이터를 별도로 제작하였다.

Table 1 Specification of the hot-wire anemometry system(IFA-300)

Item	Values
Amplifier drift	0.3 $\mu V/^\circ C$
Operating resistance	2 to 80ohms
No. of channels	Up to 8 per cabinet
Frequency response	300kHz(without tuning)
Bridge voltage	11.5V
Thermocouple	Type-T

Table 2 Specification of the tested hot wire probe (Model 1243, TSI)

Item	Description
Max. exposure temp. of probe body	150 $^\circ C$
Fluid	Gas
Sensor type	Tungsten film
Sensor orientation	45 $^\circ$
Sensor position	Upstream

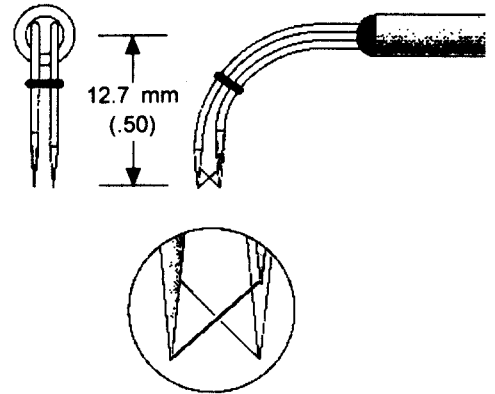


Fig. 1 Tested Boundary Layer Cross Flow X Probe(Model 1243).

캘리브레이션은 20 $^\circ C$ 와 25 $^\circ C$, 30 $^\circ C$ 에서 속도범위 0.0~10.0m/s에 대하여 수행하였다. 캘리브레이션 커브는 전압(E)과 유효속도(V_{eff}) 관계를 4차 다항식으로 표시되었다.

다. 측정 실험

실제 포장 내에서 프로브를 일정한 높이에 위치시킬 수 있는 위치 조절 장치를 제작하였으며, 지면에서부터 높이 180cm까지 10cm 간격으로 프로브를 이동시킬 수 있었다.

옥수수나 숲에서의 유속 측정은 대부분(Wilson et. al., 1982, Amiro, 1989, etc.)이 음파 풍속계를 사용하여 100Hz이하의 sampling rate에서 측정되었으나 본 실험에서는 200Hz로 40.96초 동안 측정하

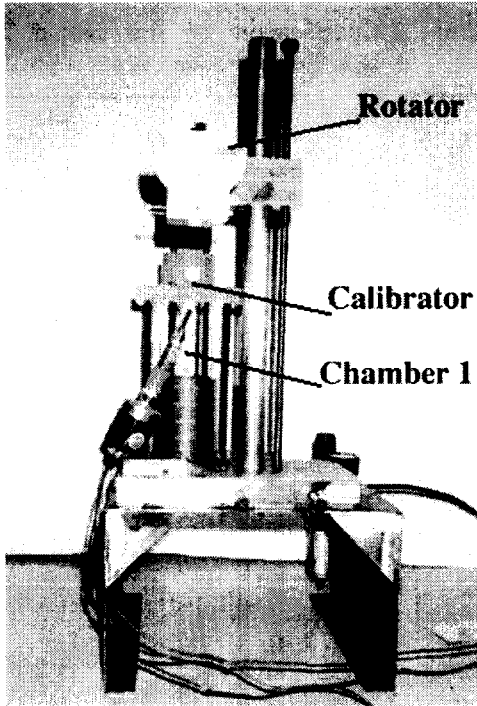


Fig. 2 Probe calibrator.

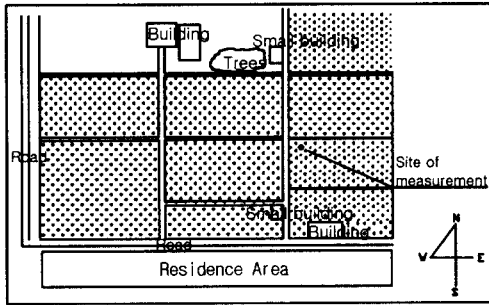


Fig. 3 The site of field measurement.

였다.

본 연구를 위한 실험은 서울대학교 부속농장의 포장에서 이루어졌다. 실험 포장에 심겨진 벼는 추청벼(아끼바리)로 6월 2일 이앙되었으며, 조간거리 및 주간거리는 각각 30cm, 15cm이었다. 그림 3은 풍속 측정장소에 대한 개략도를 나타낸 것이다.

8월초부터 9월말까지 풍속을 측정하였으며 초

Table 3 General information related to the measurements

Date	Time	Canopy height(cm)	Wind direction
12 Aug.	11:20	60	NNW
16 Aug.	12:15	70	E
22 Aug.	11:05	80	WSW
	15:25	80	W
30 Aug.	15:07	95	ESE
7 Sept.	15:05	95	EN
20 Sept.	16:45	96	W
30 Sept.	10:20	95	WNW

반엔 4~5일 간격으로, 후반엔 약 10일 간격으로 측정하였다. 측정시간은 오전과 한낮, 오후를 비슷한 비율로 측정하려 하였다. 바람의 속도를 정확하게 측정하기 위해서 바람의 방향과 센서가 일치 되도록 조정하여 측정해야 했다. 측정한 날짜와 시간, 안정비, 천개높이 그리고 풍향은 표 3과 같다.

4. 결과 및 고찰

가. 샘플링 타임 검증

자기상관(Autocorrelation)을 이용하여 샘플링 타임이 적절성을 판단한 결과 수직방향의 난류특성을 분석하기 위해서는 40.96초의 샘플링 타임이 충분하였다. 그림 4는 각 높이별로 측정시간을 변화시키면서 속도의 평균치를 나누는 것으로 20초 이상 측정하면 평균치는 일정해짐을 알 수 있다.

나. 평균유속 프로파일

본 연구에서의 평균유속 프로파일의 기본 모형으로 Raupach and Thom(1981)의 식을 사용하였다.

마찰속도 u_* 를 구하기 위하여 측정된 자료를 160cm에서의 모멘텀 용력을 기준으로 용력을 표준화하여 비교한 결과 천개 위에서 높이가 높아질

$$u(z)_{H_c=80cm} = \begin{cases} \frac{u_*}{0.4} \ln\left(\frac{z-0.72H_c}{0.04H_c}\right) & \text{for } z > H_c \\ \frac{u_*}{0.4} \ln\left(\frac{H_c-0.72H_c}{0.04H_c}\right) e^{2.4\left(\frac{z}{H_c}-1\right)} & \text{for } z \leq H_c \end{cases} \dots\dots Eq(1)$$

$$u(z)_{H_c=95cm} = \begin{cases} \frac{u_*}{0.4} \ln\left(\frac{z-0.7H_c}{0.04H_c}\right) & \text{for } z > H_c \\ \frac{u_*}{0.4} \ln\left(\frac{H_c-0.7H_c}{0.04H_c}\right) e^{2.95\left(\frac{z}{H_c}-1\right)} & \text{for } z \leq H_c \end{cases} \dots\dots Eq(2)$$

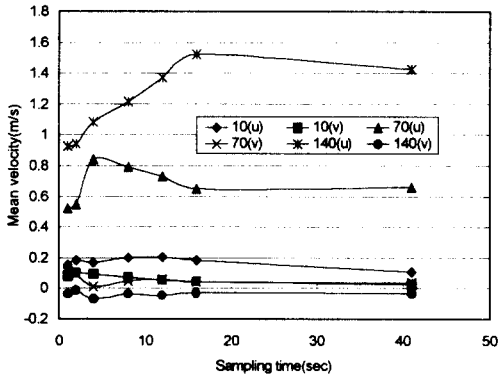


Fig. 4 Mean velocities at various sampling time and position.

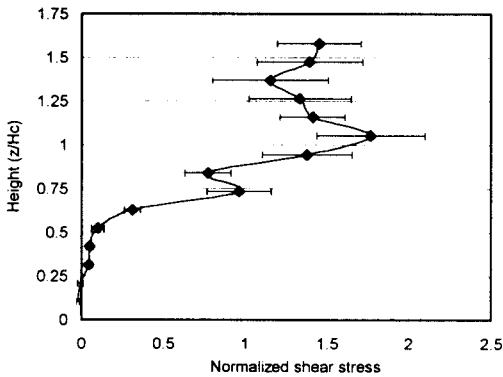


Fig. 5 Normalized shear stress (Hc=95cm).

수목 응력의 변화가 작아지고 어느 정도 일정해지기 때문에 본 연구에서는 140cm에서 측정된 $(-\overline{u'v'})/2$ 를 마찰속도로 이용하였다. 그림 5는 천개높이 95cm일 때 측정된 높이별 표준화된 응력의 변화를 나타낸 것이다.

영면변위 d_0 를 응력의 반이 흡수되는 높이로 볼 때, 천개높이가 80cm 인 경우에는 약 0.72Hc,

천개높이가 95cm 일 때는 약 0.7Hc로서 각각의 경우를 구분하여 최적의 curve-fitting을 나타내도록 나머지 값들을 구한 결과 천개높이가 80cm 인 경우에는 $z_0=0.04H_c$, $d_0=0.72H_c$, $r=2.4$ 였고, 천개높이가 95cm 일 때는 $z_0=0.04H_c$, $d_0=0.7H_c$, $r=2.95$ 가 최적의 curve-fitting을 나타냈으며 식 (1)과 식(2)와 같이 정리할 수 있었다. 이 식들에서 상관계수의 평균과 범위는 각각 0.91(0.89~0.95), 0.86(0.78~0.98)이었다.

Raupach and Thom(1981)은 작물 천개에서 $z_0=0.066H_c$, $d_0=0.75H_c$, $r=3$ 을 제안했고 Rhee(1991)는 옥수수 천개에서의 평균유속 프로파일에 대해 $z_0=0.066H_c$, $d_0=0.73H_c$, $r=1.3$ 을 제안한 것에 비하면 본 연구에서 영면변위와 거칠기 길이가 작으며 그 이유는 벼가 다른 작물에 비해 더 균일하고 유연성이 있기 때문으로 판단된다.

그림 6과 7은 천개높이가 80cm일 때와 95cm 일 때의 평균유속 프로파일을 나타낸 것이다. 개발된 프로파일은 높이가 증가함에 따라 유속이 증가하였으며 천개 위, 아래에서 측정된 유속의 분포를 잘 나타냈다. 그러나 개별적으로 측정된 풍속 데이터는 부드러운 곡선모양보다 굴곡이 심한 모양을 보여주고 있는데, 이는 논에서 부는 바람의 간헐적 특징이나 짧은 측정시간 때문인 것으로 보이며, 이런 영향으로 인해 작은 상관계수를 보이기도 했다.

본 연구에서 보여진 프로파일은 다른 작물에서 연구되었던 결과와 동일한 모양을 보여주었으나 숲에서 개발된 유속프로파일에 존재하는 지표부근에서의 두 번째 극값은 명확히 나타나지 않았다. 그러나 천개높이가 95cm로 다 자란 상태에서 측정된 데이터 <그림 7>에서는 약 0.3Hc에서 미약한 극값이 존재하였으나 극값으로 판정할 만큼 뚜렷

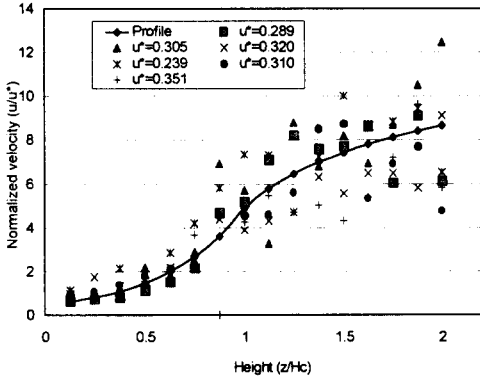


Fig. 6 Mean velocity profile ($H_c=80\text{cm}$).

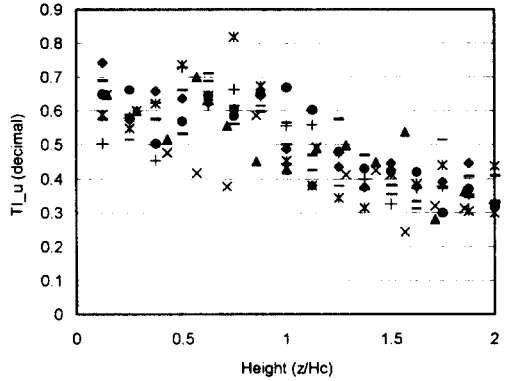


Fig. 8 Turbulence intensities of horizontal velocities.

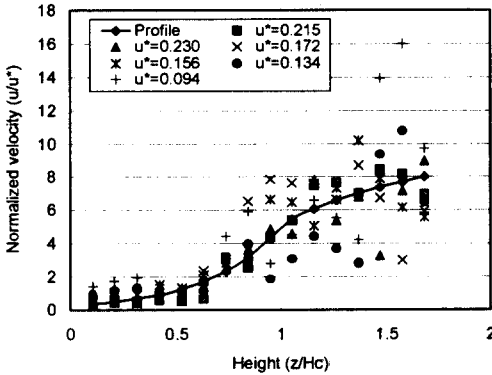


Fig. 7 Mean velocity profile ($H_c=95\text{cm}$).

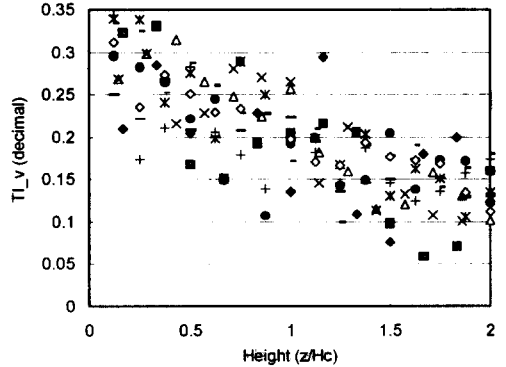


Fig. 9 Turbulence intensities of vertical velocities.

하지 못하였다.

다. 난류 강도

수평방향 속도의 난류강도는 그림 8에서 보듯이 천개높이 이하에서는 평균적으로 0.6정도의 크기를 갖고 마찰속도를 나타내는 $1.4H_c$ 이상에서는 0.4 정도로 일정했다.

수직방향 속도의 난류강도는 그림 9와 같이 천개높이 아래부분에서는 0.25정도, $1.4H_c$ 이상에서는 0.15정도로 일정했으며 수직방향의 난류강도는 수평방향에 비해 크기가 작았다. 출수 전후의 난류 강도 분포는 다소 차이가 있지만 뚜렷하지는 않았다(Rhee, 2000).

Legg and Raupach(1992)와 Walklate(1987) 등은

낮은 천개 구역에서의 난류 강도를 일정하다고 가정하였으나 본 연구에 의하면 난류 강도는 높이가 증가함에 따라 계속 감소하다가 약 $1.4H_c$ 이상에서는 다시 거의 일정한 값을 보였다.

식물 천개 부근에서의 난류 강도는 수평·수직 성분 모두 일반적으로 높이가 증가함에 따라 감소하였으며 천개 안에서의 난류 강도가 천개 위에서 보다 더 컸다. 이는 지금까지 발표되었던 다른 연구 결과(Shaw et al., 1974)와 일치하는 것으로 천개 내부에서의 난류가 더 강함을 말한다. 또한 수평성분에 대한 난류 강도가 수직성분에 대한 값보다 더 크게 나왔는데(Shaw et al., 1974) 이것은 지표면이 수직 와류의 크기를 제한하기 때문이라고 할 수 있다.

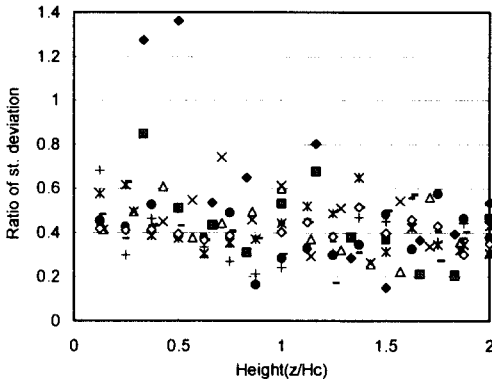


Fig. 10 Ratio of σ_v to σ_u at various height.

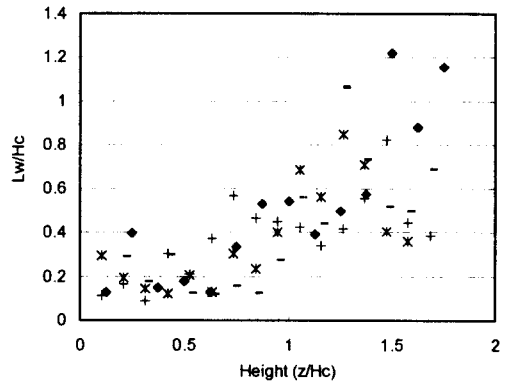


Fig. 12 Length scale of vertical components.

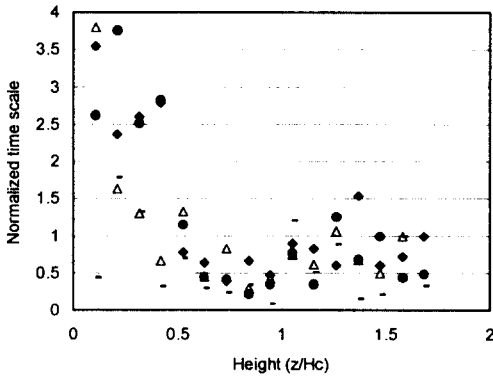


Fig. 11 Time scale of vertical components normalized at 140cm.

라. 표준편차 비

속도 성분 에 대한 표준편차의 비(σ_v/σ_u)는 그림 10에 나타낸 바와 같이 전체적으로 높이에 대한 값의 변화가 뚜렷하지는 않지만 0.5Hc 이하에서는 값의 변동이 컸으며 0.5Hc 이상에서는 표준편차 비가 약 0.4로서 σ_u 가 σ_v 보다 컸다(Shaw et al. 1974).

마. 시간척도 및 길이척도

그림 11은 천개 위(140cm)에서 측정된 시간척도로 일반화된 결과로서 지표면에서부터 0.2Hc까지에서 시간척도는 최대값을 가지는 것으로 나타

났다. Baldocchi and Meyers(1988b)와 Amiro(1989)는 각각 0.3Hc와 0.4Hc에서 최대값을 가진다고 발표한 것에 비하여 본 연구의 결과는 높이가 낮은 부분에서 시간척도의 값이 크게 나타났으며, 천개 바로 아래 부분에서 값이 작았고 약 1.4Hc까지는 증가하다가 이후엔 일정해졌다. 이러한 차이는 좀더 깊이 연구할 필요가 있을 것으로 판단된다.

시간척도에 평균유속을 곱하여 길이척도를 계산하였다. 길이척도 또한 각 측정 시의 천개높이로 일반화하여 나타내었다. 그림 12에 의하면 길이척도는 약 0.6Hc까지는 어느 정도 일정하다가 그 이후엔 높이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다.

천개 내부에서의 길이척도는 대개 0.5Hc보다 작았으며 천개 내부에서의 수직 와류 크기는 천개 높이의 절반이하였고, 천개 위에서도 연구에서 측정된 높이 범위에서는 천개높이보다 작은 와류를 나타내었다.

바. 벼 천개부근에서 공기흐름의 도해

지금까지 분석된 결과로 벼 천개 부근에서의 공기흐름을 도해적 표현하면 그림 13에서 보듯이 와류의 크기는 천개 안쪽으로 갈수록 작아졌고 수직방향의 난류크기는 수평성분보다 작아서 난류성분의 크기를 그려보면 그림처럼 타원으로 표시될 수 있다. 즉 바람의 속도는 각 높이에서 평균속도에 난류성분을 더하는 것으로 표시될 수 있음

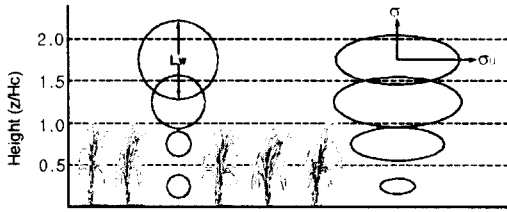


Fig. 13 Vertical length scales and standard deviation ratio for height.

알 수 있다.

5. 결 론

방제 효율을 향상시키기 위해서는 입자의 이동이나 비산을 평가하는 것이 기본이 된다. 본 연구는 논에서 볏방제기의 살포높이를 결정하기 위한 기초연구로서 비산을 분석하는데 필요한 풍속프로파일과 난류강도를 구하기 위하여 열선유속계와 2-D probe를 이용하여 8월부터 9월까지 벼 천개 위·아래에서 공기의 속도를 측정하여 해석하였다. 구체적인 결과는 다음과 같다.

1) 열선유속계를 이용하여 벼를 재배중인 논에서 지상 10cm~160cm까지의 유속을 측정하였으며, Raupach and Thom(1981)에 의해 제안된 식을 기본으로 천개높이가 다른 벼의 평균유속 프로파일을 개발하였다.

2) 논에서의 영면면위와 거칠기 길이는 각각 천개높이의 0.70~0.72배, 0.04배로서 다른 작물에 비하여 작았다.

3) 난류 강도는 일반적으로 높이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며 특정 높이(1.5Hc) 이상에서는 일정해졌다. 1.5Hc 이상에서 수평방향 난류 강도는 약 0.4, 수직방향 난류 강도는 약 0.15를 나타냈으며 지표면부근에서 최대값을 가졌다.

4) 시간척도에 평균유속을 곱한 길이척도는 0.6Hc까지는 거의 일정하다가 그 이후부터는 높이가 증가함에 따라 증가하였다. 천개 내부에서의 길이척도는 대부분이 0.5Hc 이하였고 천개 외부에서의 길이척도도 천개높이보다 작았다.

참 고 문 헌

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. 1988. Turbulence structure in a deciduous forest. *Boundary-Layer Meteorology*. 43:31-58.
3. Perrier, E. R., R. J. Millington, 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. Raupach, M. R., J. J. Finnigan and Y. brunet. 1996. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies : The mixing-layer analogy. *Boundary-Layer Meteorology*. 78(3/4):351-382.
6. Rhee, J. Y. 1991. Transport and deposition of spray droplets above and within a soybean canopy. University of Illinois, Urbana-Champaign.
7. Shaw, R. H., Y. Brunet, J. J. Finnigan and M. R. Raupach. 1995. A wind tunnel study of air flow in waving wheat: two-point velocity statistics. *Boundary-Layer Meteorology*. 76:349-376.
8. 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.