

단일 도플러 레이더를 이용한 풍속데이터 산출기법에 관한 연구

임희창 · 이동인* · 장상민*

부경대학교 기계공학부, *부경대학교 환경대기학과
(2008년 12월 9일 접수; 2009년 3월 3일 수정; 2009년 3월 23일 채택)

Evaluation Study on Wind Retrieval Methods from Single-Doppler Radar

Hee-Chang Lim, Dong-In Lee* and Sang-Min Jang*

School of Mechanical Engineering, PuKyong National University, Busan 608-739, Korea

**Department of Environmental Atmospheric Sciences, PuKyong National University, Busan 608-737, Korea*

(Manuscript received 9 December, 2008; revised 3 March, 2009; accepted 23 March, 2009)

Abstract

This study presents the analysis of an atmospheric flow around a single-doppler radar located in a pseudo-site. The use of a doppler radar in meteorological field of wind engineering has become widespread over the last several decades, but it has generally been recognized that the single-Doppler radar yields only one single velocity component - the radial velocity(V_r) so that some additional hypotheses or simplifications must be necessary to get proper wind forecast. Therefore, in order to get an accurate radial velocity(V_r) in this study, the existing methods such as VAD(Velocity Azimuth Display) and VARD(Velocity Area Display) are reformulated and applied to match the previous study(Waldteufel and Corbin¹⁾), which have been an important indicator for retrieving a radar velocity. The results presented in this study include the results from different assessment methods in a pseudo-site of different wind fields. Unless the existing method can consider the proper decomposition of radial velocity in the real site, then authors suggest an appropriate curve-fitting to decrease the uncertainty errors by changing a grid adaptation rate or applying a weighting function with respect to the wind angle. It is concluded that provided properly formulated fitting function are used, the wind retrieval from the Doppler radar using VAD and VARD methods can be a viable tool for use in wind engineering problems searching for the wind resources.

Key Words : Doppler radar, VAD method, Wind velocity assessment

1. 서론

지난 수 년 간 일어났던 급격한 기후변화의 증상은 대한민국 한반도의 풍환경에 커다란 변화로도

다가왔다. 예를 들어 지난 2002년도에 태풍 평센(Funfen)과 루사(Rusa)같은 몇 차례의 치명적인 태풍이 한반도 해안을 강타한 바가 있으며, 2006년도에는 금세기 들어 세 번째로 강력한 태풍인 에위니아(Ewiniar)가 단 시일 내에 가공할 파괴력으로 인명과 재산피해를 유발한 것은 이를 증명한다고 할 수 있다. 그러므로 이러한 풍속에 대한 특성을 예측하고 이에 대한 적절한 대비와 준비를 하는 것은 아주

Corresponding Author : Dong-In Lee, Department of Environmental Atmospheric Sciences PuKyong National University, Busan 608-737, Korea
Phone: +82-51-629-6639
E-mail: leedi@pknu.ac.kr

중요하다. 이와 함께, 속도와 방향 혹은 유동의 수렴(convergence)과 발산(divergence) 같은 풍환경 인자들을 적절히 예측하는 것은 기상예보와 그 관측에 있어서 아직 도전적인 과제로 남아있다.

대기의 원격탐사기법에 있어 최근 가장 획기적인 장비 중의 하나는 도플러 기법을 응용해 유속측정을 하는 완전히 새로운 측정장비인 도플러 레이더이다. 도플러 레이더는 목적물로부터의 에너지를 포착하고 측정할 뿐만 아니라 목적물의 속도성분을 레이더빔이 가리키는 방향의 성분으로 측정하기도 한다. 목적물이 레이더방향으로 접근하거나 멀어질 경우, 목적물과 관련된 완전한 정보가 얻어질 수 있다. 이러한 방향의 속도성분을 일컬어 시선속도, V_r , 라 부른다. 도플러 레이더는 대기 내에 유동과 함께 움직이는 어떠한 종류의 자연적 혹은 인공적인 산란을 감지할 수 있기 때문에 풍속의 수직분포라든지 3차원의 풍속분포를 측정할 경우 도플러 레이더 기법을 적용할 수 있다. 또한 이 기법은 순간적 돌풍(microburst), 뇌우(thunderstorms) 그리고 토네이도 등과 같은 위험부담이 큰 기상학적인 현상을 단기간에 예보할 수 있다.

이러한 레이더를 이용한 수 없이 많은 연구가 여름, 특히 장마기간 동안 태풍과 폭우와 같은 극한 풍환경의 3차원 분포를 얻을 수 있도록 수행되어져 왔다. 또한 많은 선진국에서는 레이더로부터 얻을 수 있는 풍속분포를 보다 정확히 얻을 수 있도록 많은 시간을 들여왔다. 이에 반해 한국에서는 이러한 해석기법에 대한 연구가 주위 선진국에 비해 상대적으로 주 관심사에서 등한시 되어왔다. 그 외에도 한국에서는 고성능 레이더, 속달된 연구인력 그리고 적절한 자금력의 부족 등으로 인해 이러한 종류의 연구가 그리 많이 진행되지 못한 것은 사실이다.

레이더의 안테나는 대개 수직축을 기준으로 회전하고 모든 방향에 수평방향으로 주사하여 탐지하게 된다. Fig. 1은 목표물(구름이나 빗방울)이 움직이는 방향과 안테나가 가리키는 방향사이의 기하학적 상관관계를 나타내는 그림이다. 여기서 도전할만한 것은 최종 목적물의 속도와 관련해서 다른 방향들(즉, 3차원 유속성분)의 정보를 얻는 것이다.

Lhermitte과 Atlas²⁾은 시선속도로부터 평균 수평면의 풍속의 크기와 방향의 중요성을 처음 강조했

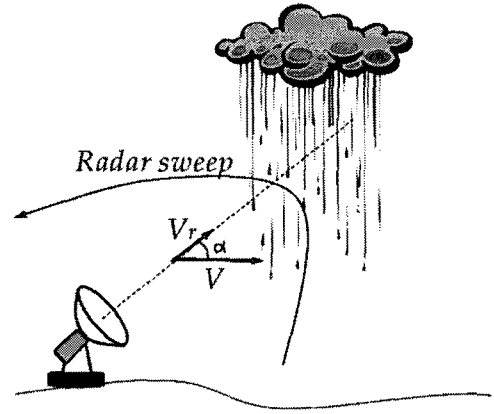


Fig. 1. A sketch showing the relationship between the radial velocity of the moving target, V_r , and real target velocity, V . Only the radial target velocity may be retrieved by a single Doppler radar without any additional assumptions. The angle α is formed between the direction in which the radar beam is pointed and direction in which target moves.

다. 그들이 제안한 기법은 레이더를 중심으로 수평면의 동심원을 그려 계산된 데이터를 사용하여 예측하였는데 이를 Velocity Azimuth Display(VAD)라고 부른다. 그리고 Brown과 Wexler³⁾은 이와 유사한 개념을 이용하여 평균 수렴, 확장 그리고 전단변형과 같은 다른 중요한 인자들을 예측할 수 있도록 그 개념을 확장하였다. 이들은 속도벡터장이 수평면 내에서는 선형적으로 변한다는 것으로 가정하였다. 실제 VAD 기법을 사용할 경우, 총 수직속도에서 순수한 수직속도성분 분포와 유속계(hydrometer)의 낙하속도를 분리시키기란 쉽지가 않다. 게다가 수평면의 풍속분포의 발산(divergence)이라는 부가적인 문제들도 존재한다. 이러한 VAD기법의 보다 개선된 기법으로 1980년 후반부터 1990년대 초반에 extended-VAD(EVAD) 기법(Srivastava 등⁴⁾)과 concurrent extended-VAD(CEVAD)기법(Matejka⁵⁾)이 제안되기도 하였다. 그러나 일반적으로 사람들은 단일 VAD 혹은 일련의 VAD들을 이용해 풍속장을 처리하기보다는 더 높이 관심을 두고 있는 영역이 낮은 고도 영역(즉, $\phi \approx 0$, $z_0 \approx 0$)의 데이터를 처리하고자 한다. 이 기법을 일컬어 Velocity ARea Display (VARD)라고 부르며 Easterbrook⁶⁾에 의해 처음 소개되었다.

그의 연구는 수평면의 동심원을 따른 데이터를 처리하기 보다는 원뿔형태의 영역을 고려하였다. 그는 풍속장의 다섯가지 인자들이 그러한 풍속데이터를 얻는데 기여한다는 것을 보여주었다. 그러나, 이 추가적인 정보가 없다면 평균 수평면 유속자체가 와도(vorticity)에 의해 오차성분이 많아지고 완전히 풍속장이 결정되어질 수 없다. 요즘들어 이 두 VAD와 VARD기법과 추가적으로 EVAD기법이 도플러 레이더 관측에 의해 풍속장을 얻는데 널리 사용되고 있다.

최근까지도 많이 활용되고있는 VAD와 VARD 데이터 획득기법은 속도장을 얻는데에 있어서 지금까지 그리 많은 검증이나 경우의 수에 따른 연구가 되어있지 않은 상태이다. 게다가 VAD와 VARD 속도장 획득기법사이에 검증 및 비교연구도 최근까지 거의 이루어지지 않았다. 이와 관련한 최근의 한 예를 들면, Anderson⁷⁾은 VAD 풍속데이터와 라디오존데(radiosonde)나 고정밀 제한면적모델(High Resolution Limited Area Model, HIRLAM)이 적용된 수치적인 기후예측을 통해 얻어진 결과들과 비교하는 검증연구를 간행한 적이 있다. 지구상의 대기내에서 실제 풍속은 아주 복잡하고 3차원 형상을 가지면서 매우 빠르게 변한다. 게다가 풍속의 크기도 시간과 공간에 대해 동시다발적으로 변한다. 이러한 속도분포를 정확하게 묘사하기위한 최적의 접근기법은 3개의 도플러 레이더에 의해 동시측정을 하는 것이 최적이다. 그러나 그러한 측정시스템은 너무 고가이면서 거의 수행되어진 바가 없다. 지금까지의 대부분의 연구는 두 개나 한 개의 도플러레이더를 적용한 측정시스템을 이용하는 것이다. 본 연구는 이러한 연구선 상에서 보다 발전된 연구를 수행하고자 한다. 즉, 속도분포가 선형이라는 가정하에 공간내 단일의 도플러 레이더로부터 얻어진 풍속데이터를 처리하여 풍속장을 구하고 이를 일반화하는 연구를 수행하고자 한다. 특히, 본 연구는 국내의 풍속장과 관련된 기법을 구축하는 것을 목적으로 함으로써 국내 실정에 맞는 레이더 데이터 처리시스템을 구축하고자한다. 이에 대한 한 방안으로 VAD와 VARD 데이터 처리기법과 두 개의 서로 다른 참고 속도장 - 균일(uniform)과 포물선(parabolic) -을 이용하여 그 비교를 수행함으로써 그 데이터를 검증하

고자한다.

2. 평균 풍속장의 분석

2.1. 풍속장의 처리

앞서 언급한대로, VAD와 VARD기법이 성공적으로 3차원의 풍속장을 예측할 수 있는 것은 바람이 불어오는 방향과 레이더 안테나가 향하는 방향에 크게 영향을 받는다. 그러므로 이러한 기법들에 적용된 모든 인자들의 역할을 분석하기위해서 우리는 이 기법들에 해당하는 수식들을 재구성화하였다¹⁾.

우선 가상공간(pseudo-site)의 원점에 레이더가 위치해있는 직교좌표계 (x, y, z) (Fig. 2 참조) 를 고려해보자. 여기서 수직축은 윗방향을 향하며 z 로 정의되고 축 x 와 y 는 각각 동쪽과 북쪽을 가리키고있다. 이 직교좌표계를 변환하여 구좌표계로 나타낸다면 각각의 축과 관련하여 R 은 원점에서의 거리를, ϕ 는 고도에 따른 각도(즉, 고도각) 그리고 θ 는 북쪽을 기준으로한 방위각을 각각 나타낸다. 속도의 변동성분 $V=(u, v, w)$ 을 가지는 운동에 대한 속도벡터는 한 점 (x_0, y_0, z_0) 에서의 속도값 (u_0, v_0, w_0) 주위에서 선형적으로 변한다고 가정하고 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 u &= u_0 + \frac{du}{dx}(x-x_0) + \frac{du}{dy}(y-y_0) + \frac{du}{dz}(z-z_0) \\
 v &= v_0 + \frac{dv}{dx}(x-x_0) + \frac{dv}{dy}(y-y_0) + \frac{dv}{dz}(z-z_0) \\
 w &= w_0 + \frac{dw}{dx}(x-x_0) + \frac{dw}{dy}(y-y_0) + \frac{dw}{dz}(z-z_0)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

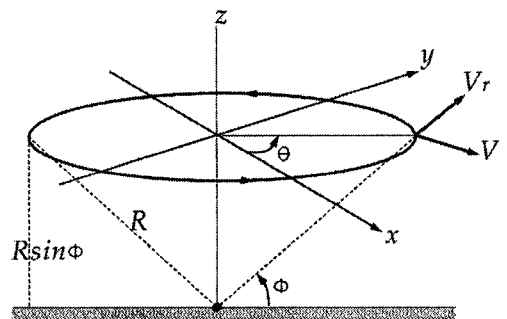


Fig. 2. Geometry of radar scan from Browning and Wexler³⁾.

이때 레이더에 의해 측정되는 시선속도, V_r , 은 적절한 좌표축 변환으로 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$V_r = -u \cos\theta \cos\phi - v \sin\theta \cos\phi - w \sin\phi \quad (2)$$

여기서, θ 와 ϕ 는 방위각과 고도각을 각각 나타낸다. 직교좌표계에서 극좌표계로 변환할 경우 반경 거리 R 과 항들을 재결합시켜서 다음과 같은 식이 얻어지게 된다.

$$\begin{aligned} V_r \approx & \cos\theta \cos\phi u_0 + \sin\theta \cos\phi v_0 + \sin\phi w_0 \\ & + R \cos^2\theta \cos^2\phi (du/dx) + R \sin^2\theta \cos^2\phi (dv/dy) \\ & + R \sin\theta \cos\phi \cos^2\phi (du/dy + dv/dx) \\ & + \sin\phi (R \sin\phi - z_0) dw/dz \\ & + \cos\theta \cos\phi (R \sin\phi - z_0) du/dz \\ & + \sin\theta \cos\phi (R \sin\phi - z_0) dv/dz \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 다른 방위각에 의존하는 유일한 항은 구별되어 있다. 여기서 R 과 ϕ 는 상수이기 때문에 식(3)에 있는 항들을 재결합시켜서 VAD기법에 사용되는 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} V_r \approx & \cos\theta \cos\phi u_0 + \sin\theta \cos\phi v_0 \\ & + \cos^2\theta [R \cos^2\phi (du/dx) + \sin\phi w_0] \\ & + \sin^2\theta [R \cos^2\phi (dv/dy) + \sin\phi w_0] \\ & + \sin\theta \cos\phi R \cos^2\phi (du/dy + dv/dx) \end{aligned} \quad (4)$$

이에 반해 VARD 기법 또한 원뿔영역(즉, $x_0 \neq 0$, $y_0 \neq 0$)에 대해 적용된다⁶⁾. 그러므로, 낮은 고도각

이 고려될 경우 (즉, $\sin\phi \sim 0$, $\cos\phi \sim 1$) 식 (3)은 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{aligned} V_r \approx & \cos\theta (u_0 - x_0 du/dx - y_0 dv/dy) \\ & + R \sin\theta (v_0 - x_0 dv/dx - y_0 dw/dy) \\ & + R \cos^2\theta du/dx + R \sin^2\theta dv/dy \\ & + R \cos\theta \sin\theta (du/dy + dv/dx) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서는 단지 수평면을 고려한 항들만이 있기 때문에 2차원의 선형방정식인 것처럼 보인다. 만약 참고로 기준되는 풍속장이 주어지기만 하면, 모든 삼각함수 뿐만 아니라 미분 값들은 쉽게 구해질 수 있다. 여기서 알아둘 것은 VARD 기법을 살펴보면 첫 번째 두 개의 항에서 와도(vorticity)와 수평면의 평균유속성분들은 낮은 고도각(약 5°이내)으로 제한되는 것으로 알려져 있다. 따라서 현재의 계산 기법은 식이 낮은 고도각에 국한된다 하더라도 고도에 따라 변하는 수직과 수평속도성분을 확인할 수 있다는 것이다.

2.2. 가상 공간 내에서의 기준유속분포

본 연구에서는 가상의 공간 내에 종단 낙하속도 (terminal falling velocity)를 모델링하는 균일한 풍속분포(uniform wind velocity)와 대기내의 전형적인 대기 경계층 속도분포(atmospheric boundary layer)를 모델링하는 포물선 풍속분포를 기준유속분포로 사용하였다. 레이더를 기준으로 하는 일정한 고도각의 동심원을 따라 속도를 측정하여 속도와 방향의 항으로 수직 속도분포를 구해내는 것이 가능하다는 것을 밝혔다²⁾. Fig. 3은 직교좌표계와 구좌표계에서 얻어진 가상공

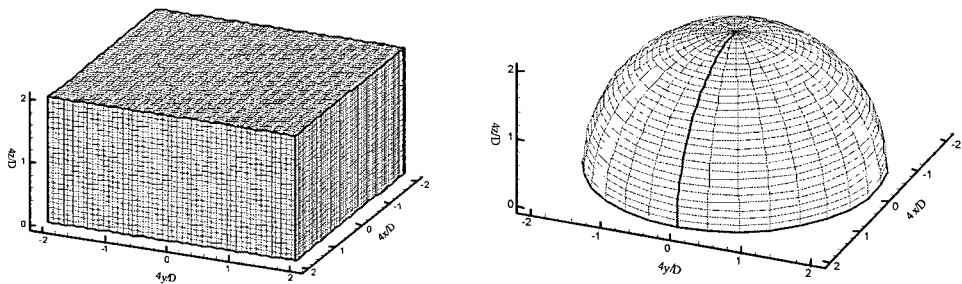


Fig. 3. Virtual domain for generating the wind profiles (a) in the rectangular coordinate (left) (b) in the spherical coordinate (right).

간영역의 크기와 형상을 비교하고 있다. 직교좌표계의 크기는 무차원 단위(즉, 각 방향별로 $4x/D$, $4y/D$ 그리고 $4z/D$)로 $2^{width} \times 2^{length} \times 1^{height}$ 이고 격자의 개수는 $50^x \times 50^y \times 25^z$ 이다. Fig. 3에서 오른쪽 그림은 구좌표계를 나타내며 그 크기는 무차원 단위 2를 사용하였고, 격자의 수는 $30^{radial} \times 30^{azimuth} \times 30^{elevation}$ 을 사용하였다. 앞서 언급했듯이 구좌표계에서도 각 축은 모두 $D/4$ 로 무차원화 되어있다.

Fig. 4는 가상공간에 할당되는 참고유속분포를 보여주고 있다. 일정한 속도(예를 들면 ~1)를 가지는 점선으로 표시된 균일한 유속의 경우는 사실적이지는 못하다. 그러나 그것을 이용해서 어떤 기초적인 결과를 얻기에 충분하다고 판단된다. 이에 반해서 포물선 혹은 멱급수 분포를 나타내는 실선의 경우는 지표면의 효과를 가지는 경계층을 모델화한 것으로 대기에서의 실제 상황에 더욱 가깝다. 이 두 개의 속도분포를 비교함으로써 지표면 가까이에서 흐르는 대기유동에 대한 대기경계층유동의 효과를 분석하는 것이 가능하다. 여기서 우리는 이러한 특정 속도패턴을 Armstrong과 Donaldson⁸⁾와 Wood와 Brown⁹⁾의 선행연구와 관련하여 “유속 특성(wind signatures)”라고 부른다. 이러한 과정들은 중형저기

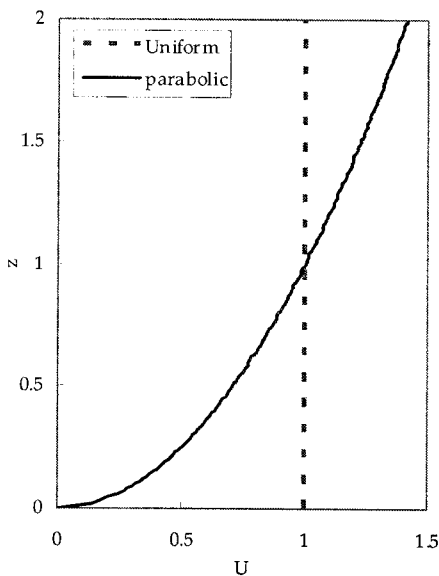


Fig. 4. Reference wind profiles - (a) uniform shape(dashed line), (b) parabolic(solid line).

압(meso-cyclone)이나 태풍과 같은 작은사이즈의 와류의 특성을 밝혀낼 수 있다.

레이더가 도달하는 영역 내의 풍속분포를 얻어내는 전형적인 과정은 다음과 같다. 우선 (i) 가상영역을 생성하고 입력 환경을 위하여 기준속도분포를 할당한다.; (2) VAD/VARD변환을 이용하여 반경속도를 계산한다.; (iii) 실제와 변환된 속도를 비교한다. 보다 자세한 과정에 대한 설명은 이후에 하기로 한다.

3. 결과 및 고찰

우선 앞서 언급한 두 개의 VAD와 VARD기법과 두 개의 기준되는 참고속도분포를 이용하여 3차원의 계산되어 얻어진 풍속성분들을 제시하고자한다. 이때, 자세한 분석은 계산된 결과를 가지고 할 것이다.

3.1. 레이더 주위에서의 전체적인 풍속 분석

사실, 도플러 레이더의 안테나는 특정 고도에서 수 십초에 한번씩 360도 회전하고 그 이후 다른 고도각에서 재주사(rescan)한다. 이 과정은 레이더 주위의 전 체적이 주사되어 데이터를 얻을 때까지 계속된다. 주사된 체적내의 산란된 도플러데이터는 모두 광학처리를 통해 각각의 고도와 각도별로 정보들을 저장하게 된다. 단순화를 위해 빔의 형태는 원뿔이라고 가정한다면 각각의 빔은 동일한 거리 및 각도로 나누어져서 산란된 빛의 정보를 얻고, 그 시선속도를 데이터처리로 만들어낼 수 있다. 실제 대기에서 고도에 따라 속도분포의 형상이 주어진다 면 풍속의 유동방향과 수직방향성분이 구해질 수 있을 것이다. 그러나, 풍속분포의 가정된 형상에 따라서 완전히 다른 결과가 얻어질 것이다.

Fig. 5에서는 서로 다른 가정된 속도분포를 이용하여 VAD기법으로 구한 유동방향 속도성분을 나타내었다. 특히 가정된 속도분포는 왼쪽이 균일한 속도분포($U=(U,0,0)$)이고 오른쪽은 대기유동을 모델링한 포물선 속도분포($U=(az^2,0,0)$)이다. 얻어진 속도값은 무차원 속도장을 얻기위하여 주어진 속도분포의 최대값으로 나누어 그 범위를 0~1 사이의 값으로 만들었다. 그림에서 무차원 속도값들을 각각 0.1의 값들로 동등하게 나누어 등고선으로 표시하였으며, 흑회색의 색깔분포는 낮은 값(흑색)과 높은

값(회색)을 구별하도록 사용되었다. 계산된 체적 내에서 보다 다른 각도의 영역을 명확히 가시화하기 위하여 속도장의 중앙단면도 같이 보여주고 있다. Fig. 5에서 확인할 수 있는 것은 계산되어진 속도분포와 미리 가정된 속도분포의 일치정도가 균일유동과 포물선유동의 두 경우에 대해 전혀 일치가 되지 않는다는 것이다. 균일유동의 경우 가장 잘 일치되는 부분은 지표면부분으로 낮은 고도각에서 레이더가 유동이 접근해 오는 전후방영역(즉, 서쪽과 동쪽)에서 가장 잘 일치하고 있으며, 포물선유동의 경우 균일유동과 동일한 방향이지만 어느정도 고도각에서 그 값의 일치가 얻어지고 있었다. 이러한 결과는 사실 레이더 빔의 방향과 접근유동의 고려했을 때 대개는 예측될 수 있다. 그러나, 고도각이 증가하고 방위각이 이 접근유동방향과 멀어질수록 실제 속도와의 값 차이가 커지면서 오차가 증가하게 된다. 만약 레이더가 수직을 향하거나 유동방향에 수직을 가리킬 경우(즉, 북쪽과 남쪽)에는 풍속데이터

를 얻는 것 자체가 실제적으로 불가능하다. 포물선 풍속분포의 경우 무차원 속도분포는 모든 방위각에 대해 지표면에서 거의 최소값을 가진다. 이것은 무차원만에 의해 생성되는 결과이다. 이렇게 가정된 속도는 지표면에 다가갈수록 값이 떨어지기 때문에 유동의 최대값으로 무차원시킬 경우 지표면의 값이 잘못 계산되어질 수 있다. 결과적으로 무차원속도분포가 지표면 근처 어느정도 떨어진 높이의 접근유동 전후방에서 최대값을 생성하게 된다. 이러한 최대값이 관찰될 수 있는 높이는 앞서 가정된 포물선 유동의 형상에 따라서 크게 달라지게 된다.

Fig. 6은 앞서 가정한 두 가지 풍속분포와 VARD 기법을 사용하여 구해진 유동방향의 속도성분의 계산 결과이다. Figs. 5와 6사이에 VAD기법과 비교해서 레이더가 위치하는 곳의 상부에서 관찰되는 불확실한 영역이 상대적으로 좁아진 것을 제외하고는 그리 큰 차이가 나타나지 않는다.

이제 VAD와 VARD기법을 사용해서 얻어진 수직

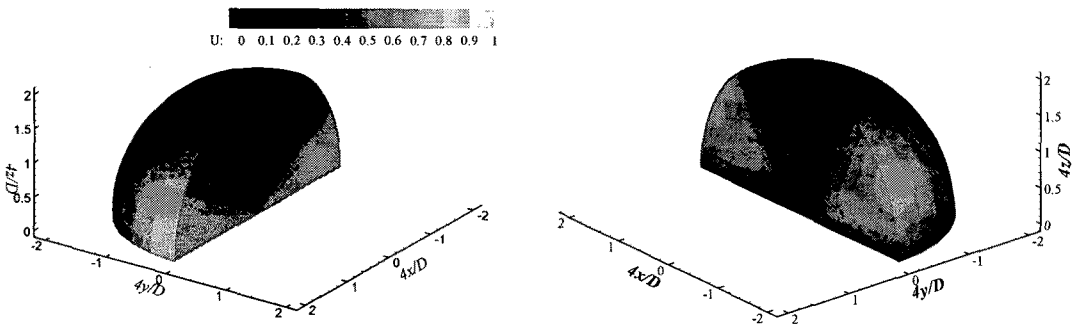


Fig. 5. Distributions of the streamwise wind velocity component, U , retrieved by using VAD method and two shapes of the reference wind velocity distribution: uniform (on the left-hand side) and parabolic (on the right-hand side).

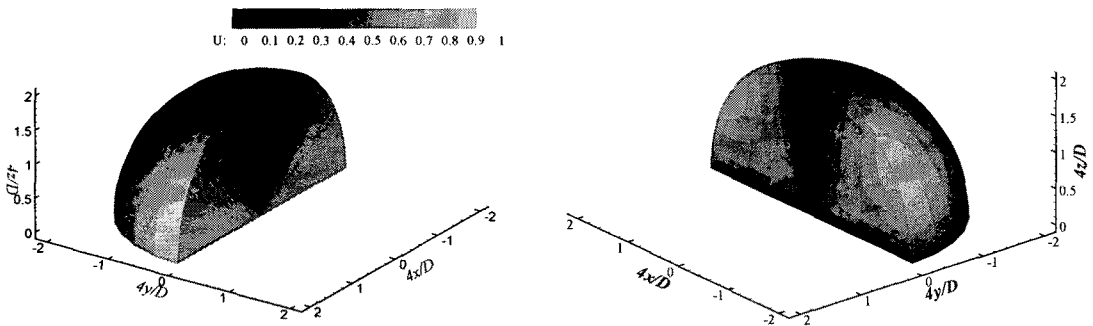


Fig. 6. The same as in Fig. 5, but using VARD method.

속도분포를 고려해보자. Figs. 7과 8은 이러한 경우들을 적용한 결과이다. Fig. 7은 VAD기법을 사용하여 얻어진 결과 중 수직방향 속도분포, W ,를 나타낸 것이고, Fig. 8은 VARD기법을 사용해서 계산되어진 결과이다. 가정된 풍속분포는 마찬가지로 균일유동(왼쪽그림)과 포물선유동(오른쪽그림)의 두가지를 적용하였다.

Figs. 7과 8에서 주요 차이점은 VARD기법의 경우 이상하게도 최대영역이 일치하지 않고 수평면의 법선(즉 레이더의 가상의 중심위치)을 따라서 많은 차이를 가진다는 것이다. 식 (5)를 살펴보면 이러한 차이는 식 자체가 수평면 그리고 낮은 고도각(약 5° 이내)의 제한된 영역에 그 식을 주로 고려하고 있기 때문에 $4x/D=0$ 을 따라서 큰 값의 변화가 있다고 판단된다. 따라서 이러한 차이로 미루어 전체적으로 수직방향의 속도성분을 예측하는 것은 완전하지는 않다.

Fig. 9는 적용된 참고유속과 두가지 처리기법

(VAD와 VARD)을 이용하여 반구의 표면에서 유동 방향의 수평속도성분의 대략적인 표면 등고선을 서로 비교한 그림이다. Fig. 9(a)에 일정한 참고유속에 대해 그 적용기법들에 대한 결과의 차이를 살펴보면 VAD의 경우 $4x/D$ 의 값이 변함에 따라서 표면에서 서로 일정한 등고선으로 나누어져있다. 이에 반해 VARD의 경우 보다 원형으로 넓게 차지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 0 속도가 차지하는 영역만 살펴보면 VAD는 일정하게 고도각의 변화에 따른 차이가 나타나지 않는 반면 VARD의 경우 고도각이 90° 에 가까워짐에 따라 더 좁아지는 비선형 형상을 보이고 있다. 이는 앞서 언급한 식 (5)에서 주어진 항들이 모두 수평면 및 낮은 고도각에 제한된 영역에만 적용되는 것에 의해 생기는 영향으로 판단된다. Fig. 9(b)의 참고유속이 포물선인 경우에 그 형상은 더욱 뚜렷하게 나타나고 있으며 유동속도의 최대값이 놓이는 고도각에서도 높이 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 값들에 대해 보다

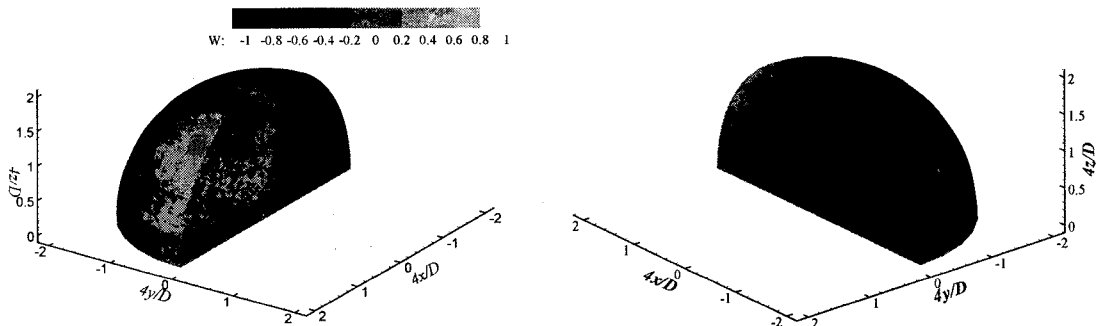


Fig. 7. Distributions of the vertical wind velocity component, W , retrieved by using VAD method and two shapes of the reference wind velocity distributions: uniform (on the left-hand side) and parabolic (on the right-hand side).

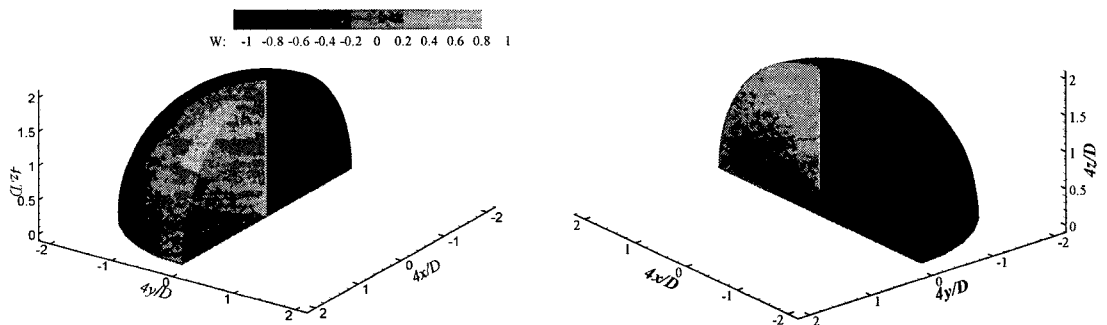


Fig. 8. The same as in Figure 7, but using VARD method.

구체적으로 비교해 보기위하여 이후에 각 부분별로 확인해보자.

3.2. 풍속장의 상세분석

Fig. 10은 방위각을 변화시킴에 따라 VAD기법을 통하여 일정한 참고유속을 각 유속성분에 따라서 그 추이를 서로 비교하였다. 이 그림의 직접적인 의미는 참고유속이 일정할 경우이므로 U의 값이 모두 1이고 그 외의 V, W 값은 0이 되어야한다. 또한 V_r 값은 최대 1이 되어야한다. 그림에서 유속의 최대값을 기준으로 살펴보면 U와 V의 값의 경우 그 값이 방위각이 유동방향을 향하고 있는 경우를 제외하고는 값들이 주기적으로 감소하고 있으며 그 최대값도 고도각이 커짐에 따라 떨어지고 있는 것을 확인할 수 있다. 게다가 고도각이 0일 경우에는 0을 잘 유지하던 수직속도 W 값의 경우는 고도각이 커짐에 따라서 그 값이 점점 커지고 있는 것을 확인할 수 있다. V_r 의 경우 그 값이 방위각을 따라서 코사인형태의 주기함수를 가지지만 고도각이 커짐에 따라 점점 차이를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10 그림에서 최대값들을 기준으로 참고유속과 비교해서 나타내어보면 Fig. 11과 같은 그래프로 나타낼 수 있다. 그림에서 x축은 고도각(ϕ)을 y축

은 각 유속의 최대값을 나타내고 있다. 그림에서 값이 일정한 점선은 참고유속($U=1$)을 나타내고 있다. 일단 고도각이 0일 경우를 고려해보면 각 유동성분이 서로 다른 위치($U=1, V=0.5, W=0$)에 분포해 있는 것을 알 수 있다. 흥미롭게도 V 속도의 경우 0.5의 값에 우선 위치함으로써 전혀 다른 값을 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 고도각을 높임에 따라 그 최대값의 변화는 예측하지 못한 방향으로 나아가고 있는데 그 기울기가 다른 방향성분에 비해 수직방향성분 W가 크게 변하고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히, 고도각이 0° 에서 30° 까지 그 최대값들의 변화를 살펴보면 U의 경우 약 30% 변한 반면, V는 10%, W는 50% V_r 은 20% 변함으로써 대체적으로 많은 변화가 발생했음을 나타낸다. 이러한 최대값의 변화를 회귀분석을 통해서 표현한다면 U의 경우 2차 다항식으로 V와 W의 경우 멱급수(power series)를 통해 그 값의 변화를 따라낼 수 있다.

Fig. 12는 방위각을 변화시킴에 따라 VAD기법을 통하여 포물선형상의 속도분포를 가지는 참고유속을 각 유속성분별로 그 추이를 서로 비교하였다. 이 그림은 참고유속이 일정할 경우와 서로 비교함으로써 그 속도형상에 따른 분석이 얼마나 차이가 날 수 있는지 확인할 수 있다. 여기서 유속 U는 지면에서

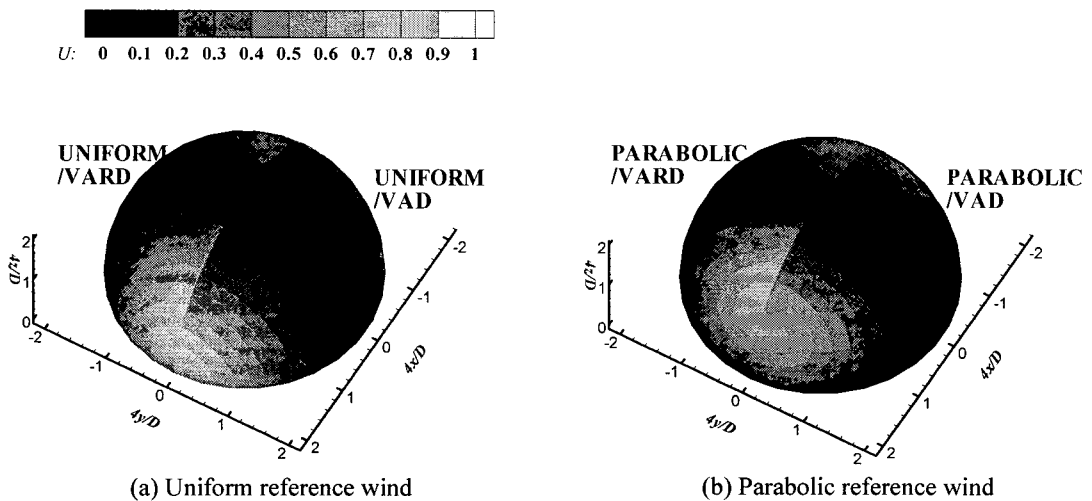


Fig. 9. Combined contour plots of the streamwise wind velocity component, U, on the surface of calculated domain varying as functions of elevation and azimuth for two reference wind velocity distributions: (a) uniform; (b) parabolic. The calculated domain in both cases is divided into two halves showing the results obtained by applying VARD and VAD techniques, on the left-hand half and on the right-hand half, respectively.

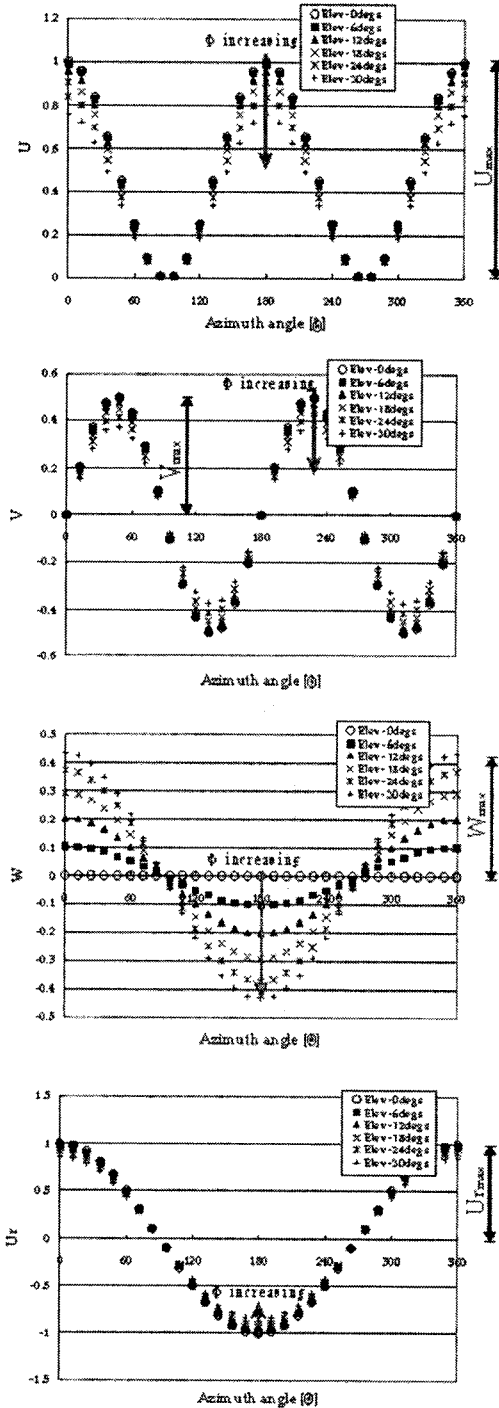


Fig. 10. Variations of the transformed velocity components U (a), V (b) and W (c) and radial velocity component Vr (d) obtained by using uniform reference wind.

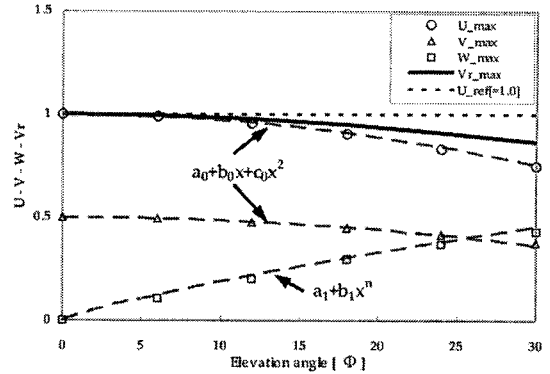


Fig. 11. Variations of maximum of the transformed velocity components U (circles), V (triangles) and W (squares) and maximum of radial velocity component Vr (solid line) as functions of the elevation angle, ϕ . The uniform wind velocity profile is taken as a reference wind velocity field, which is presented by short- dashed line. Long-dashed lines present polynomial and power-series fittings of the transformed velocity components.

값이 0이고 상부 $4z/D=2$ 에서 2의 값을 가지게 되며 그 외 V, W의 속도성분 값은 0이 되어야한다. 또한 Vr 값은 방위각과 포물선형태의 참고유속에 따라서 값이 분포되어야한다. 그림은 앞서 기술했던 Fig. 10의 결과와 그 경향이 비슷하게 나타나고 있지만, 그 변화량의 차이가 균일한 참고유속에 비해 크게 나고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 12를 Fig. 11에 나타낸 것과 마찬가지로 최대 값을 기준으로 나타내어보면 Fig. 13과 같다. 그림에서 각 축은 Fig. 11에 나타낸 것과 동일한 축이고, 점선의 경우 포물선의 참고유속을 나타내고 있다. 일단 고도각이 0일 경우를 고려해보면 각 유속성분이 서로 거의 0에 가깝게 위치함으로써 실제 예측되는 0의 값과 잘 일치되고 있는 것을 확인할 수 있다. 점차 고도각을 증가시키에 따라서 실제 값의 차이가 점점 벌어지면서 각이 30°의 경우 최대 20%의 크기로 벌어지고 있음을 확인할 수 있다. 흥미롭게도 V, W 속도의 경우 거의 선형적으로 증가하면서 30에서 최대 40%까지의 최대값의 차이를 보여주고 있다. 앞서와 마찬가지로 이러한 최대값의 변화를 다항식을 통해 회귀분석을 통해서 표현한다면 U, V와 W 모든 최대값의 변화가 멱급수를 통해 그 변화를 추적해 낼 수 있다.

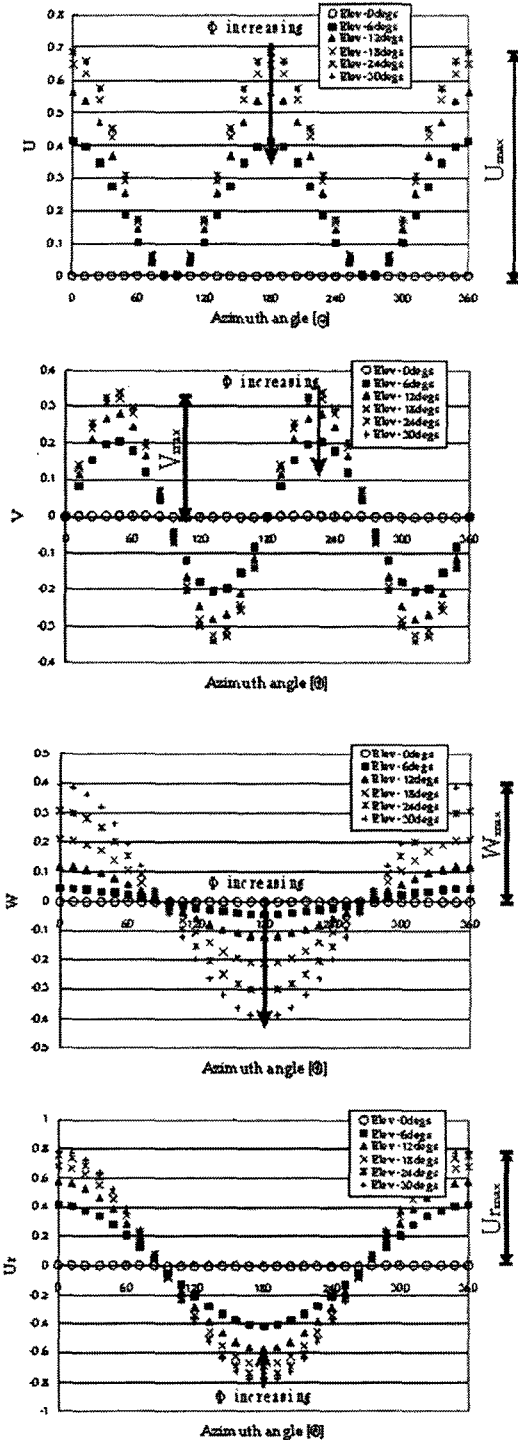


Fig. 12. Same as in Fig. 10 but for the parabolic wind velocity profile.

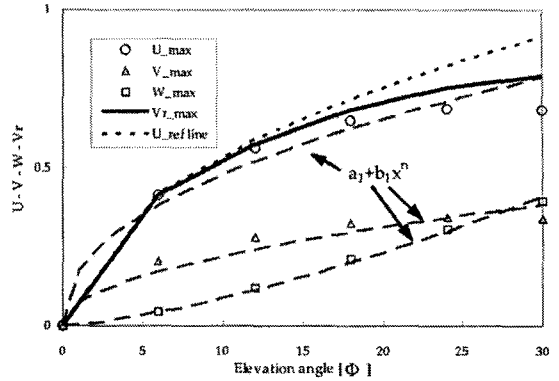


Fig. 13. Same as in Fig.11 but for the parabolic wind velocity profile.

4. 결론

가상 영역에서 속도장의 정확한 예측을 할 수 있도록 이론적인 접근을 통하여 수행되었다. 본 연구에서는 주어진 레이더영역에서 이러한 풍속장을 VAD/VARD기법을 이용하여 재생성하는 것이 가능하다는 것을 보였으며, 단일 레이더 주위의 전반적인 풍환경을 가시화하였으며 이의 분석을 수행하였다. 시선속도를 직교좌표계성분으로 분할하여 높이에 따른 풍속분포를 확인하였다. 두 개의 기준되는 참고풍속분포는 실제 자연계에서 관찰되는 풍속분포를 모델링하였으며, 우선 이 기준풍속을 VAD/VARD기법을 이용하여 적절히 변환시키고 방향에 따른 풍속성분으로 공간에서의 값들을 구하였다. 서로 다른 가정된 속도분포를 이용하여 VAD기법으로 구한 유동방향 속도성분 비교결과, 균일유동의 경우 지표면부분으로 낮은 고도각에서 레이더가 유동이 접근해 오는 전후방영역(즉, 서쪽과 동쪽)에서 가장 잘 일치하고 있으며, 포물선유동의 경우 균일유동과 동일한 방향이지만 어느정도 고도각에서 그 값의 일치가 얻어지고 있었다. 그러나, 고도각이 증가하고 방위각이 이 접근유동방향과 멀어질수록 실제 속도와의 값 차이가 커지면서 오차가 증가하였다. 경계층 풍속을 기준 참고유속으로 사용했을 경우, 고도각의 변화에 따라 최대풍속값들의 변화를 살펴보면 U, V 그리고 W의 각 방향으로 대체적으로 많은 변화가 발생하였다. 이러한 최대값의 변화를 회귀분석을 통해서 표현한다면 일반적으로 먹급

수(power series)를 통해 나타낼 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. K2 0607010001-08A050100110). 이 논문은 2단계 BK21 지구환경시스템 사업단에 의하여 지원되었습니다.

참고 문헌

- 1) Waldteufel P., Corbin H., 1978, On the analysis of single-Doppler radar data, *J. Applied Meteorology*, 18, 532-542.
- 2) Lhermitte R. M., Atlas D., 1961, Precipitation motion by pulse Doppler radar, *Preprints 9th Conf. on Radar Meteorology*, Kansas City, KS, Amer. Meteor. Soc., 218-223.
- 3) Browning K. A., Wexler R., 1968, The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar, *J. Applied Meteorology*, 7, 105-113.
- 4) Srivastava R. C., Matejka T. J., Lorello T. J., 1986, Doppler radar study of the trailing anvil region associated with a squall line, *J. Atmospheric Science*, 43, 356-377.
- 5) Matejka T. J., 1993, Concurrent extended vertical velocity azimuth display (CEVAD), *Preprints 26th Conf. on Radar Meteorology*, Kansas City, KS, Amer. Meteor. Soc., 463-465.
- 6) Easterbrook C. C., 1975, Estimating horizontal wind fields by two dimensional curve fitting of single doppler radar measurements, *Preprints 16th Radar Meteorology Conference*, Houston, Amer. Meteor. Soc, 225-230.
- 7) Anderson T., 1998, VAD winds from C band Erisson Doppler Weather Radars, *Meteor. Z.*, 7, 309-319.
- 8) Armstrong G. M., Donaldson R. J. Jr., 1969, Plan shear indicator for realtime Doppler radar identification of hazardous storms, *J. Applied Meteorology*, 8, 376-383.
- 9) Wood V. T., Brown R. A., 1986, Single-Doppler velocity signature interpretation of non-divergent environmental winds, *J. Atmos. Ocean. Technology*, 3, 114-128.