

## 단일 도플러 영상 자료 분석 시스템 개발

엄원근 · 김동호 · 이충기 · 오미림 · 나종천

기상연구소

(1994년 5월 16일 받음 ; 1994년 6월 10일 수리)

## Development of Single Doppler Color Display Interpretation System

Won-Geun Eom · Dong-Ho Kim,

Choong-Ke Lee · Mi-Lim Oh · Jong-Cheon Na

Meteorological Research Institute

### Abstract

SDIAS (Single Doppler Image Analysis System), which can estimate the vertical wind profiles from single Doppler color displays, is developed here. Various single Doppler velocity signatures are simulated using horizontally uniform wind fields that vary with height. This system is very simple and efficient for interpreting the color displays. So, SDIAS can be used to get some useful informations on wind for understanding the present weather situation and forecast.

### I. 서론

도플러 레이더에 의해 관측된 도플러 속도 분포는 중요한 기상 현상에 관한 정보를 내포하고 있다. 따라서 이러한 도플러 속도 분포의 정확한 해석은 예보자에게 현재의 기상 현상에 관한 물리적인 이해와 인식을 높일 수 있는 매우 중요한 자료가 된다.

도플러 레이더로 관측된 층상형 강수에서 바람의 연직 구조에 관한 정보를 실시간적으로

연구 위한 여러가지 방법들이 있다. Lhermitte and Atlas (1961)는 일정한 고도각에서 관측된 도플러 속도를 이용하여 바람의 연직 구조를 계산하는 VAD ( Velocity Azimuth Display) 방법을 설명하였다. 또한 Browning and Wexler (1968), Rabin and Zrnice (1980)은 VAD 방법에 의해 관측된 단일 도플러 속도 자료를 이용하여 풍향, 풍속, 발산, 연직 속도, 변형 등을 계산하였다.

Kraus and Donaldson (1976), Baynton *et al.* (1977), Wilson *et al.* (1980), Wilson (1982)은 대기의 현재 상태에 관한 정보를 나타내는 단일 도플러 영상 자료를 해석하기 위한 많은 연구를 하였다. 그러나 시간에 따른 바람의 연직 분포의 변화가 단일 도플러 영상에서 실시간으로 어떻게 표현되는지 분명히 밝히지 못했다. Wood and Brown(1986)은 수평적으로 균일한 바람장내에 주어진 바람의 연직 분포에 따라 단일 도플러 영상이 어떻게 모의되는가를 제시하였다.

본 연구에서는 Wood and Brown(1986)이 제시한 방법을 이용하여 다양한 바람장을 임의로 주어 이론적인 단일 도플러 영상을 모의하고, 이 모의된 영상을 관측된 단일 도플러 영상과 비교하여 현재의 대기 상태에서의 바람의 연직 분포를 추정할 수 있는 시스템 (Single Doppler Image Analysis System, SDIAS)을 개발하였으며, 이 시스템이 개인용 컴퓨터(PC386급 이상)에서 구동되도록 하였다.

## II. 단일 도플러 영상 모의 및 해석

### 1. 개요

도플러 레이더는 레이더 빔 방향의 바람 성분만을 탐지한다. 실제 바람장이 균일한 경우 도플러 속도는 방향에 따라 연속적으로 변화하고 레이더 빔 방향이 풍상측, 풍하측에 정확히 위치할 때에 도플러 속도가 최대가 되며 이 때의 값이 실제 바람이다. 그러나 그 외의 방향에서 관측된 값은 단지 도플러 속도 최대값의 비로써 표현되며 레이더 빔의 방향이 풍향과 직각일 때 도플러 속도는 0이 된다.

단일 도플러 영상을 모의하기 위하여 다음과 같은 가정이 필요하다. 즉, 레이더 관측 범위 내의 바람장이 수평적으로 균일하며 단지 연직 방향으로만 변화한다는 것이다. 따라서 모의되는 영상들은 풍상측과 풍하측이 대칭적이며, 레이더 관측 범위내에 수평적인 수렴, 발산이나 비대칭적인 패턴은 모의되지 못한다.

여기서는 단일 도플러 영상의 모의에 관한 원리를 설명하고, 대표적인 몇가지 연직 바람 분포와 모의된 도플러 영상을 제시하였다. 모의된 도플러 영상은 도플러 속도  $0.2S(S: \text{최대 도플러 속도})$  간격의 등도플러선으로 표시하였다.

2. 도플러 영상의 모의 원리

안테나가 일정한 고도각( $\phi$ )으로 회전할 때 목표물의 도플러 속도( $V_d$ )는 방위각( $\theta$ )과 관측 거리( $r_s$ ) 혹은 고도( $h$ )의 함수로 표현된다. 다음은 풍향과 풍속이 수평적으로 균일할 때 바람의 연직 구조를 계산하기 위한 과정을 설명하였다.

Fig. 1.은 단일 도플러 레이더 관측 투영도이다. 도플러 레이더가 레이더 빔의 한 방향을 탐지할 때 관측 고도 ( $h=r_s\sin\phi$ )와 관측 최고 고도 ( $H=R_s\sin\phi$ )는 아래와 같은 관계로 표현된다.

$$\frac{r_s}{R_s} = \frac{h}{H} \tag{1}$$

이때,  $r_s$ 는 레이더 관측 지점으로부터 관측 목표물까지의 거리이고,  $R_s$ 는 레이더 영상 표출시의 최대 거리이다. 또한,  $h$ 는 레이더 수평면으로부터의 고도이며,  $H$ 는 영상 표출시의 최고 고도이다.

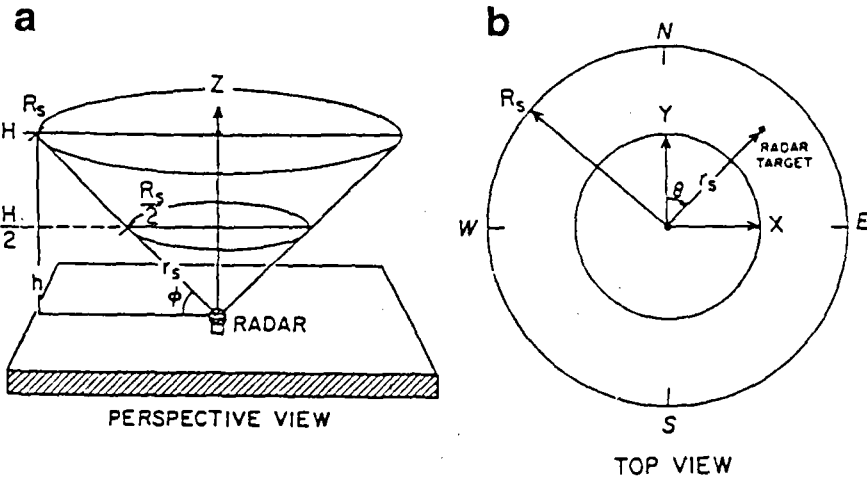


Figure 1. Doppler radar viewing configuration. (a) Radar scanning around vertical axis,  $z$  at a constant elevation angle,  $\phi$ , and (b) from the top, representing a PPI (Plan position indicator) scope.

3차원 공간에서 실제 바람 성분을  $u, v, w$ 라 할 때 도플러 속도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_d = u \cos \phi \sin \theta + v \cos \phi \sin \theta + w \sin \phi \quad (2)$$

수평적으로 균일한 바람장(비발산)의 경우 바람의 연직 성분은 0이다. 따라서 식(2)은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$V_d = u \cos \phi \sin \theta + v \cos \phi \sin \theta \quad (3)$$

식(3)은 낮은 고도각에서 수평 방향의 속도에 비하여 연직 속도  $w$ 가 무시될 정도로 작을 때는 바람장이 균일하지 않은 경우에도 이용 가능하다. 대류권에서의 일반적인 바람 성분은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} u &= W_s(h) \cos [270 - W_d(h)] \\ v &= W_s(h) \sin [270 - W_d(h)] \end{aligned} \quad (4)$$

이때,  $W_s(h)$ 는 풍속,  $W_d(h)$ 는 풍향으로서 고도의 함수로 표현된다. 식(4)와 같이 수평적으로 균일한 바람은 비발산임이 아래의 식(5)에 의해 간단히 증명될 수 있다. 따라서 본 연구의 도플러 영상 모의에서는 아래의 식에서 증명된 바와 같이 비발산의 대기 상태에서 나타나는 영상만을 고려한다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

풍향·풍속의 다양한 연직 분포를 표현하기 위하여 아래와 같은 다항식이 이용된다.

$$\begin{aligned} W_s(h) &= S \left[ \sum_{i=0}^n a_i (h/H)^i \right] \\ W_d(h) &= \Theta_0 \left[ \sum_{i=0}^n b_i (h/H)^i \right] \end{aligned} \quad (0 \leq h \leq H) \quad (6)$$

이때  $a_i, b_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ )는 상수이며  $S, \Theta_0$ 는 미리 지정된 초기 풍속과 풍향이다. 식(6)에서  $a_i, b_i$ 를 조정함으로써 풍향과 풍속의 연직 변화를 고려하여 각 바람의 연직 분포에 따른 도플러 영상을 모의할 수 있다.

### 3. 모의된 도플러 속도 분포 (Wood and Brown, 1986)

도플러 영상의 이해를 위하여 위의 식(6)을 이용한 몇가지 바람의 연직 분포를 예제로 제시하고 이러한 연직 바람 분포가 어떠한 도플러 속도 분포로 나타나는지 설명하였다.

식(7)은 여러가지 풍향, 풍속의 연직 분포를 나타낸다. 또한 식(7)의 5가지 바람의 연직 분포에 따라 나타나는 도플러 속도 분포가 Fig. 2에 제시되어 있다

$$\begin{aligned}
 (a) \quad W_s(h) &= S & W_d(h) &= 270^\circ & (7) \\
 (b) \quad W_s(h) &= S & W_d(h) &= 180^\circ [ 1 + 0.25 (h/H) ] \\
 (c) \quad W_s(h) &= S(h/H) & W_d(h) &= 270^\circ \\
 (d) \quad W_s(h) &= S & W_d(h) &= 180^\circ [ 1 - (h/H)(1 - (h/H)) ] \\
 (e) \quad W_s &= S [ 4(h/H)(1 - h/H) ] & W_d &= 270^\circ
 \end{aligned}$$

Fig. 2에서 실선은 레이더로부터 멀어지는 방향의 도플러 속도 (+ 속도)이며 짧은 점선은 레이더로 다가오는 방향의 도플러 속도 (- 속도)이다. 그리고 굵은 파선은 도플러 속도가 0인 선이며 굵은 점선과 굵은 실선은 도플러 속도의 최대, 최소 지점을 나타낸다. 앞에서 설명한 바와 같이 최대, 최소 속도를 제외한 나머지 속도는 최대, 최소값의 비로 나타난다. 따라서 식(7a)와 같이 풍속이 전고도에서 균일하고 풍향도 270° 로 전고도에서 일정할 때 Fig. 2(a)의 도플러 속도는 풍향과 같은 270° 방향에서 최대, 최소값이 나타나고 그 외의 방향에서는 방향에 따라 최대, 최소값의 비로 나타난다. 또한, 풍향과 직각 방향인 남북 방향에서 도플러 속도가 0인 선이 나타난다.

식(7b)는 풍속은 모든 고도에서 일정하고 풍향이 고도에 따라 일정하게 변화하는 경우로써 풍향이 고도가 증가함에 따라 순전하는 경우를 제시하였다. 식(7b)과 관련된 도플러 속도 분포는 Fig. 2(b)이다. 풍향이 고도에 따라 순전하므로 도플러 속도 0선이 S자 형태로 나타난다. 이와는 반대로 풍향이 고도에 따라 반전하면 도플러 속도의 0선은 역 S자 형태로 나타내게 된다. 도플러 속도 0선이 S자 형태로 순전하는 경우 난기 이류가 있으며, 역 S자로 반전하는 경우에는 한기 이류가 있다. 도플러 속도의 곡률은 고도에 따른 풍향의 변화가 클수록 커진다. 위의 두가지 경우와 같이 고도에 따른 풍속의 쉬어가 없는 경우에는 등도플러선이 모두 중심을 통과함을 알 수 있다.

풍속이 고도에 따라 선형적으로 변하고 풍향이 일정한 식(7c)의 경우에는 지상에서 풍속이 0이고 고도에 따라 선형적으로 증가하는 경우로써 등도플러선이 식(7a,b)와는 달리 도플러 속도 0선에 평행하고 최외각선 두 곳에 최고 도플러 속도가 나타난다 (Fig. 2(c)). 이 예로부터 상하층간의 풍속의 쉬어가 클수록 등도플러선이 도플러 속도 0선에 평행하게 나타남을 알 수 있다.

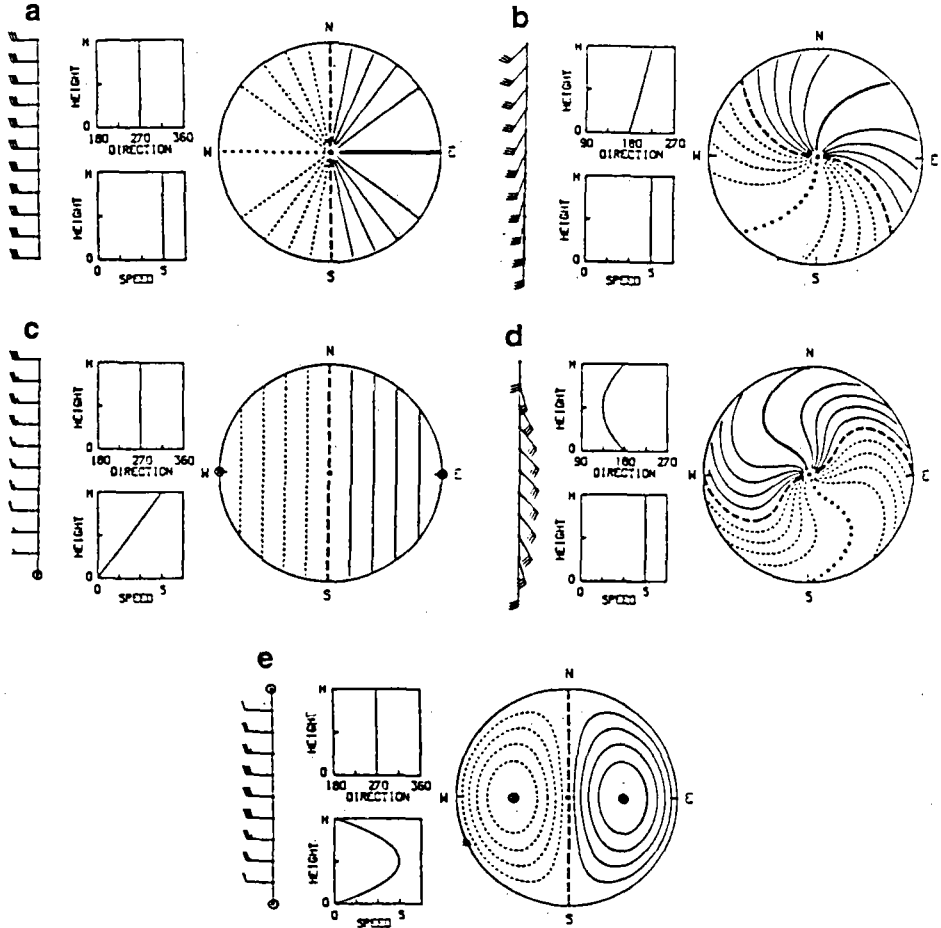


Figure 2. Doppler velocity patterns corresponding vertical profiles of (a) uniform horizontal wind fields, (b) uniform directional shear with constant wind speed, (c) uniform wind speed shear with constant wind direction, (d) nonuniform directional shear with constant wind speed, and (e) nonuniform wind speed shear with constant wind direction. Solid lines represent flow away from the radar, short dashes represent flow toward the radar, heavy long dashes represent zero Doppler velocity. Heavier solid and dotted lines represent locations of maximum and minimum Doppler velocity values within the display. The thick long dashed contour represents zero Doppler velocity where the radar beam is oriented perpendicular to the wind direction. Contour interval is 0.2S.

식(7d)와 관련된 도플러 속도 분포는 Fig. 2(d)이며 이 경우는 풍속이 모든 고도에서 일정하므로 도플러 속도선은 모두 중심을 통과하며 반면에 풍향은 고도에 따른 변화가 일정하지 않는 경우이므로 S자와 역 S자 모양의 속도 0선이 한 영상에 동시에 나타난다. Fig. 2(d)의 경우 지상에서 중간층까지는 도플러 속도 0선이 역 S자로 나타나며 중간층 이상에서는 S자 형태로 나타나므로 하층에서는 풍향이 반전하며 상층에서는 순전하는 것을 알 수 있다.

풍향은  $270^\circ$ 로 일정하고 풍속이 고도에 따라 포물선 형태로 변하는 연직 바람 구조를 갖는 식(7e)는 Fig. 2(e)와 같은 도플러 속도 분포를 나타낸다. Fig. 2(e)를 보면 연직 바람 구조에서 최고 풍속을 나타내는 중간 고도에서 도플러 속도선이 계란형의 폐곡선을 이루며 풍상측과 풍하측에서 대칭적으로 나타난다. 이러한 계란형의 모양은 지상과 최고 고도에서의 풍속이 0이고 중간층에서 풍속이 최대인 경우에 나타나며, 지상과 중간층 그리고 중간층과 최고층 사이의 풍속의 쉬어가 강하므로 등도플러선이 중심에 수렴하지 않고 도플러 속도 0선에 평행하게 나타남을 알 수 있다.

지금까지 설명한 도플러 속도 분포는 앞에서 언급한 바와 같이 풍향과 풍속이 수평적으로는 균일하며 단지 연직 방향으로만 변화하는 경우로써 이는 수평적으로 비발산이고 도플러 속도 분포가 풍상측과 풍하측에서 대칭적으로 나타남을 의미한다.

다음은 위와 같은 도플러 속도 분포를 일정한 식에 의해 개인용 컴퓨터에서 모의하고 이를 관측된 영상 자료와 비교, 분석하므로써 역으로 관측된 단일 도플러 영상 자료로부터 연직 바람 구조를 추정할 수 있는 단일 도플러 영상 분석 시스템 (SDIAS)을 설명하고자 한다.

### III. 단일 도플러 영상 분석 시스템 (SDIAS) 개발

#### 1. SDIAS의 개요

SDIAS는 앞에서 언급한 풍향과 풍속에 관한 가정하에 모의된 도플러 속도 분포를 관측된 단일 도플러 영상을 비교하여 연직 바람 구조를 추정하기 위한 시스템으로 초보자도 쉽게 도플러 영상을 분석할 수 있도록 설계되었다. 이 시스템은 바람 분포가 수평적으로 균일하고 연직 방향으로만 변화하는 경우만을 모의하므로 수평적으로 비발산이며, 도플러 속도 0선을 중심으로 풍상측과 풍하측의 패턴이 대칭적인 도플러 영상의 바람 구조만을 추정할 수 있다.

#### 2. SDIAS 내의 도플러 영상 모의

단일 도플러 영상의 모의 원리는 2.2절에서 자세히 설명하였으며, 이 절에서는 SDIAS에 이용된 연직 바람 구조를 지배하는 수식과 각 파라미터들의 특성들을 설명하였다. SDIAS에

서 도플러 속도 분포 모의를 위하여 식(8)이 이용되었다.

$$\begin{aligned} W_s &= S [ a_0 + a_1(h/H) + a_2(h/H)^2 + a_3(h/H)^3 ] \\ W_d &= \theta_0 [ b_0 + b_1(h/H) + b_2(h/H)^2 + b_3(h/H)^3 ] \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 사용된 각 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

$W_s(h)$  : 임의의 고도  $h$  에서의 풍속 ( $ms^{-1}$ )

$W_d(h)$  : 임의의 고도  $h$  에서의 풍향

$S$  : 유효 최대 풍속

$\theta_0$  : 초기 풍향

$h$  : 임의의 고도 ( $0 \leq h \leq H$ )

$H$  : 영상표출시의 최고 고도

$a_0, a_1, a_2, a_3$  : 풍속의 연직 구조를 지배하는 파라미터

$b_0, b_1, b_2, b_3$  : 풍향의 연직 구조를 지배하는 파라미터

바람의 연직 구조를 나타내기 위하여 3차원 다항식을 이용하였으며 표출상의 유효 최대 풍속은  $51 ms^{-1}$ , 초기 풍향은  $90^\circ$  로 하였다.

관측된 영상의 고도각에 따른 관측 거리 (slant range)별 고도  $h$ 는 아래의 식(9)에 의해 계산된다.

$$h = R_r \sin \theta + \frac{(0.37R_r^2 \cos^2 \theta)}{R_e} \quad (9)$$

$R_r$ 은 레이더로부터의 관측 거리이며,  $\theta$ 는 관측 고도각,  $R_e$ 는 유효 지구 반경으로 6371.23 km이다. 영상 표출시의 최고 고도  $H$ 는 선택된 고도각에서 최대 관측 거리 (120 km)에서의 고도를 의미한다. 예를 들어 설명하면 관측 고도각이  $2^\circ$  인 경우 관측 거리 60 km 에서의 고도는 2.31 km 이며, 최대 관측 거리 120 km에서의 고도는 5.04 km가 되어 이 고도각에서 영상 표출시의 최고 고도는 5.04 km가 되는 것이다. 고도각이 높아질수록 최고 관측 고도는 급격히 증가하므로 관측 범위내의 적정한 고도각 설정이 매우 중요함을 알 수 있다.

### 3. SDIAS의 구성

파라미터를 선택하여 식(8)에 따라 도플러 영상을 모의하고 이를 관측된 영상과 비교, 분석하여 최종 결과를 얻는 SDIAS의 전체 구성이 Fig. 3에 제시되었다. SDIAS내의 모든 프로그



Development of single doppler color display interpretation system - Eom et al.

램은 Borland C++ (Version 3.0) 컴파일러를 이용하여 작성되었으며 주프로그램하에 25개의 함수를 기능별로 작성하여 프로그램의 이해와 수정을 용이하게 하였다.

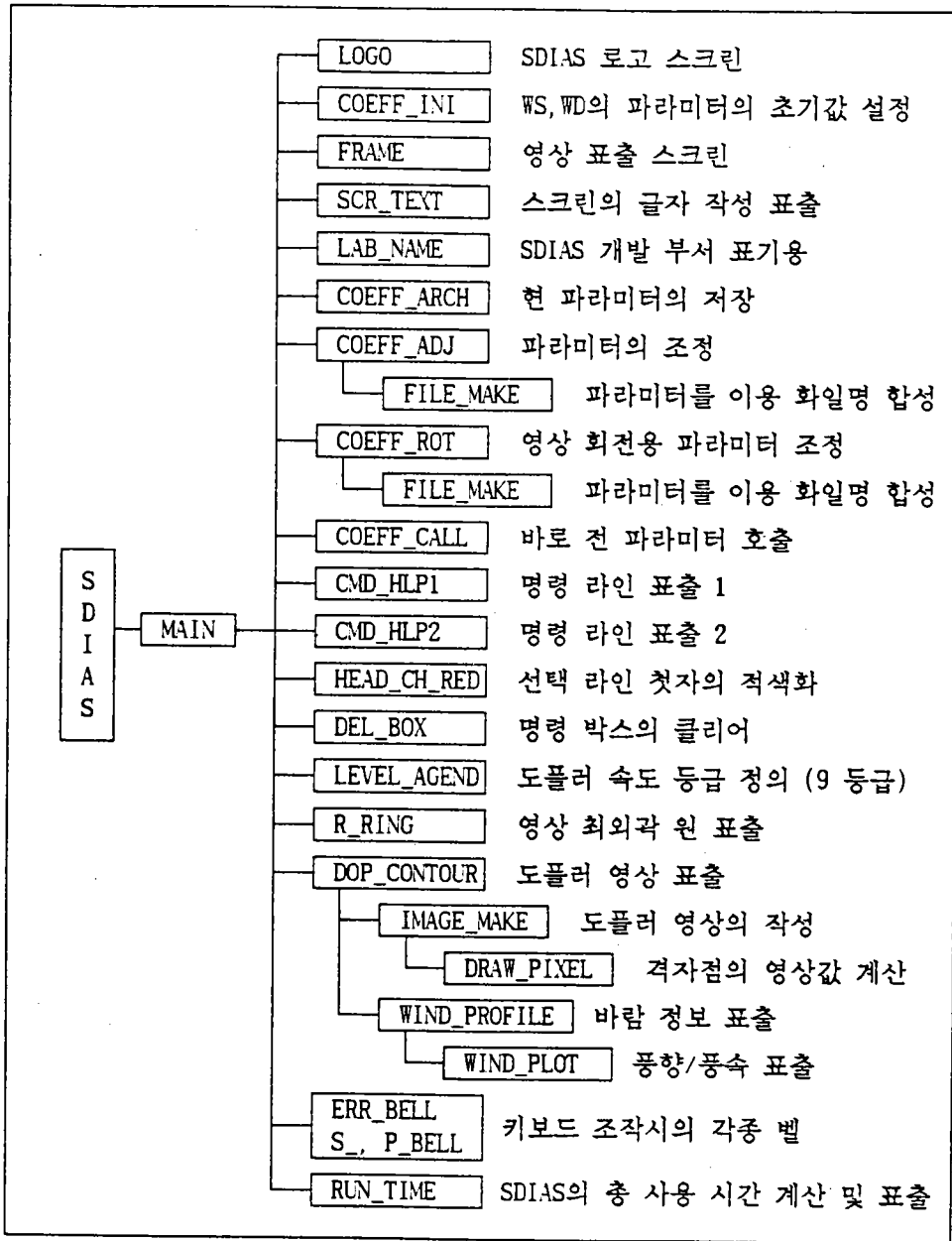


Figure 3. Structure of SDIAS.

## IV. SDIAS의 사용법

### 1. 사용 환경

SDIAS의 원활한 구동과 효과적인 사용을 위해서는 다음과 같은 컴퓨터 사용 환경이 마련 되어야 한다.

① 컴퓨터	: PC386DX 이상
② 사용가능 디스크 용량	: 10 MB 이상
③ 그래픽 방식	: VGA/SVGA, 또는 이와 호환 방식
④ 모니터	: 칼라 모니터
⑤ 운영 체제	: MS-DOS 3.0 이상

사용 컴퓨터가 PC386DX 급 이상이 아닐 경우 SDIAS의 동작 과정이 너무 느려 효율적으로 사용하기 어려우며, 일단 만들어진 도플러 영상은 일정한 규칙에 따라 디렉토리에 저장되므로 SDIAS를 사용하기 위하여 최소한 10 MB 이상의 디스크 용량이 필요하다. 그리고 모의된 도플러 영상은 각 단계별 칼라로 표출되므로 모니터는 VGA나 SVGA 비디오 카드로 구현되는 칼라 모니터가 필요하다.

### 2. SDIAS의 설치

SDIAS를 사용하기 위하여 MS-DOS상의 루트 디렉토리에 'C:\SDIAS'라는 디렉토리가 필요하며, 영상 저장을 위한 'C:\SDIAS\IMG' 디렉토리와 파라미터 저장을 위한 'C:\SDIAS\COF' 디렉토리가 필요하다. SDIAS 장치를 위한 모든 과정은 사용자의 편의를 위해 SDIAS 디스켓을 'A' 드라이브에 넣고 "A:INSTALL"을 치면 필요한 디렉토리를 하드 디스크에 자동으로 만들어 주게 되며, SDIAS의 모든 화일이 해당 디렉토리에 자동으로 복사된다. SDIAS 프로그램의 설치를 위해 소요되는 시간은 컴퓨터의 성능에 따라 차이가 있으나 486DX(50MHz)의 경우 약 1분 30초 정도이다. SDIAS는 1.2 MB 디스켓 1장으로 구성되어 있다.

### 3. SDIAS의 이용

SDIAS는 LOGO 화면이 표출된 이후부터 모두 메뉴 방식으로 이루어져 있으므로 어려움 없이 사용할 수 있으며 필요한 과정을 모두 거친 후 선택된 최종 영상은 앞에서 주어진 수식

에 따라 계산된 이론적인 도플러 속도 분포이므로 실제로 관측된 분포와는 많은 차이를 나타낼 수 있다. 그러나 이러한 이론적인 분포를 익힘으로써 도플러 영상에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 생각된다.

## V. 결론

수평적으로 비발산인 대기 상태에서 단일 도플러 레이더에 관측 가능한 도플러 속도 분포를 모의하였다. 풍향과 풍속이 고도에 따라 변화되도록 하고 이에 따른 도플러 속도 분포의 변화를 파악하며 최종적으로는 관측된 도플러 영상을 이에 적용하여 역으로 실제 도플러 영상과 관련된 바람의 연직 구조를 추정할 수 있는 시스템을 만들었으며 이를 SDIAS라 한다.

이 시스템은 풍속의 연직 구조는 등도플러선 사이의 간격을 포함하는 도플러 영상의 전체적인 패턴에 영향을 주며, 풍향의 연직 구조는 등도플러선의 곡률에 영향을 준다는 사실을 근거로 하였다. 그러나 실제로 대기는 비발산이 아니고 도플러 속도 분포에 영향을 주는 많은 요인들이 있으므로 관측되는 도플러 영상은 SDIAS에서 모의된 영상들과 같이 대칭적인 패턴으로 나타나지 않는다. 따라서 모의된 영상을 직접적으로 관측된 영상과 비교, 분석할 수는 없다. 다만 SDIAS에서 만들어진 바람의 연직 분포의 변화에 따라 도플러 속도 분포가 어떻게 달라지는가를 익힘으로써 관측된 도플러 영상을 보다 빨리, 정확하게 해석할 수 있을 것으로 생각한다.

이와 같이 도플러 영상 자료 이용하여 연직 바람 구조를 추정하는 방법은 지금까지 많이 이용되었던 단일 도플러 레이더 자료를 이용한 바람의 연직 구조 분석 방법에 비하여 비교적 간단하고, 분석 시간을 절약할 수 있으며 도플러 관측 자료를 쉽게 이해할 수 있다는 장점이 있다.

## 참고문헌

- Baynton, H.W., R.J. Serafin, C.L. Frush and G.R. Gray, 1977: Real-Time Wind Measurement in Extratropical Cyclones by Means of Doppler Radar. *J. Atmos. Sci.*, 16, 1022~1028.
- Browning, K.A. and R. Wexler, 1968: The Determination of Kinematic Properties of a Wind Field Using Doppler Radar. *J. Appl. Meteor.*, 7, 105~113.

- Gray, G.R., R.J. Serafin, D. Atlas, R.E. Rinehart and J.J. Boyajian, 1975: Real-Time Color Doppler Radar Display. *Bull. Atmos. Meteor. Soc.*, 56, 580~588.
- Kraus, Michel J. and Ralph J. Donaldson, Jr., 1976: Interpretation of PPI Displays in Widespread Storms. *Preprints, 17th Conf. of Radar Meteorology*, 239~244.
- Lhermitte, R.H. and D. Atlas, 1961: Precipitation Motion by Pulse Doppler Radar. *Preprints, 9th Conference on Radar Meteorology*, Boston, AMS, 218~223.
- Rabin, R. and D. Zrnic, 1980: Subsynoptic-Scale Vertical Wind Revealed by Dual Doppler-Radar and VAD Analysis. *J. Atmos. Sci.*, 37, 644~654.
- Wilson, J.W., 1982: Single Doppler Observations for Forecasting and Warning. *Proc. of the NEXRAD Doppler Radar Symposium Workshop*. P.S. Ray and K. Colbert, Eds., Cooperative Institute for Mesoscale Meteorological Studies, University of Oklahoma, Norman, 6~30.
- \_\_\_\_\_, R. Carbone, H. Baynton and R. Serafin, 1980: Operational Application of Meteorological Doppler Radar. *Bull. Atmos. Meteor. Soc.*, 61, 1154~1168.
- Wood, Vincent T. and Rodger A. Brown, 1986: Single Doppler Velocity Signature Interpretation of Nondivergent Environmental Winds. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 3, 114~128.
- Wood, Vincent T. and Rodger A. Brown, 1992: Effects of Radar Proximity on Single-Doppler Velocity Signatures of Axisymmetric Rotation and Divergence. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 2798~2807.