

## 회전식 방향성 복사측정기 자료해석 Software 개발

박 경 윤

한국과학기술원 시스템공학센터

(1987년 10월 1일 받음; 1988년 2월 15일 수리)

### 개 요

본 연구에서는 지면의 표적물 및 하늘과 구름에서 산란되어 나오는 방향성 복사량을 효율적으로 측정하고, 이들 산란광에 의한 Remote Sensing(원격탐사) 자료해석상의 영향을 조사 연구하기 위해 만들어진 나선형식으로 회전하며 거의 전반구를 11초 이내에 주사하는 Sphere-Scanning Radiometer의 자료를 분석하는 데 필요한 software(S/W)들을 개발하였다. 개발된 S/W에는 개개의 측정자료가 기록될 순간에 측정기의 Field of View(FOV)에 의해 실제로 산란광이 집적된 지표면상의 부분을 시작적으로 나타내 주고 복사강도를 Grey Level로 나타낼 수 있는 도면표시 Algorithm과 FOV 각의 크기에 따라 overlap 부분의 면적을 계산하는 Algorithm 등이 포함되어 있다. 또한, 실험농장에서 본 radiometer로 측정한 자료를 이 S/W를 사용하여 분석해 본 결과 밝혀진 몇 가지 방향성 복사량의 특성들을 간단히 소개하였다.

### 1. 서 론

최근 기상 및 자원탐사위성에서 얻어지는 Remote Sensing(원격탐사) 자료를 해석함으로써 지구대기와 자원에 대하여 탐사하려는 연구가 광범위하게 진행되고 있다. Remote Sensing 자료는 대기 중의 매체와 지상의 표적물로부터 복사되거나 산란되어 나오는 빛 또는 전자파들을 측정 장치에 의해 기록한 자료이므로, 이들 자료의 해석에는 탐색하고자 하는 물체의 복사 및 산란특성의 파악이 필수적이다. 특히 지표면상의 대부분의 사물은 광원의 위치와 산란방향에 따라 달라지는 강한 방향성 산란특성을 갖고 있다.<sup>1)</sup>

지금까지 많이 활용되고 있는 지구자원 탐사위성인 Landsat 자료는 항시 지면에서 수직 방향으로 반사되는 산란광만을 수집하는 Scanner에 의해 측정 기록되었으므로, 방향성 산란에 대한 연구는 별달리 큰 관심을 기울이지 않고 있었으나, 이 방면의 연구가 깊이 추진됨에 따라 방향성 산란특성이 중요성이 인식되고 있고,<sup>2)</sup> 더욱이 경사각을 갖고 활영되는 프랑스의 SPOT 위성영상

\* 이 논문은 1986년 7월 7일 국내외 한국과학기술자 종합 Symposium에서 발표한 내용임.

자료의 해석을 위해서 지상표적물의 방향성 산란특성을 정확하게 파악하지 않으면 안 되게 되었다. 이와 더불어 위성자료와 비교할 지표 사실(Ground Truth) 자료의 수집에 있어서 주변환경에서 산란되어 들어오는 광원이 산란특성에 미치는 영향 등의 조사연구가 절실히 해야 했다. 그러나 기존의 일반 복사측정기(Radiometer)로는 방향성 산란광을 여러 방향에 걸쳐 단시간에 측정하는 데는 어려움이 많아, 방향성 산란특성 해석에 측정자료의 동시성이 늘 문제가 되어 왔다. 각 방향 동시측정문제 해결책의 일환으로 미국의 NASA(National Aeronautics and Space Administration) 과학자와 기술자들은 방향성 산란광을 11초 내에 효율적으로 전반구에 대해 주사할 수 있는 나선회전식 복사측정기인 Sphere - Scanning Radiometer를 개발하여 각종 지상 실험에 사용하고 있다.<sup>3)</sup>

본 연구에서는 이 Sphere - Scanning Radiometer 자료해석에 필요한 software(S/W)를 개발하였으며, 이 S/W를 사용하여 실험농장에서 본 Radiometer로 측정된 자료 일부를 분석하였다.

## 2. 측정기기 특성

본 Sphere - Scanning Radiometer을 만든 목적과 특성을 요약하여 나타내는 뜻으로, 이 측정기기를 일명 PARABOLA(Portable Apparatus for Rapid Acquisition of Bidirectional Observation of Land and Atmosphere)라고 부르기도 하는데, 이 이름은 “지면과 대기의 방향성 측정자료의 신속처리를 위한 휴대용 장치”라는 것이다.<sup>3)</sup>

PARABOLA는 Sensor가 있는 머리(head) 부분과 head를 지지하는 지지축 부분 및 tape에 자료를 기록하는 부분, 즉 3부분으로 되어 있다. head 부분에는 motor를 포함한 구동장치가 포함되어 있는데, 하늘과 땅, 거의 전구(全求)를 주사하는 데 11초가 소요된다. Head는 구동장치에 의해 회전축을 중심으로 360 deg/sec의 속도로 회전하여 동시에 회전축과 head 방향과의 사이각을 15 deg/sec 속도로 “0”에서부터 커지기 시작하면서 매초 24개의 측정자료를 기록하며, 264개까지 기록한 후 정지한다. 따라서 head 방향은 출발점 방향에서 나선형식으로 움직이다가 PARABOLA를 지지하는 지지대 쪽에 와서 멈춘다(그림 1 참조).

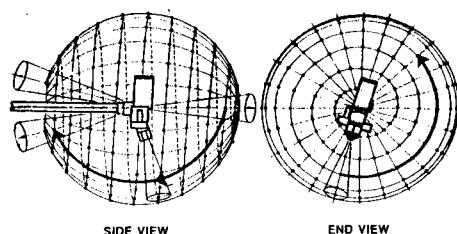


그림 1. PARABOLA의 Scan 형태

PARABOLA 가 하나의 자료를 측정 기록할 때의 IFOV(Instantaneous Field of View)는  $15^\circ$  이고 파장대는 3개로, 각기  $0.65 \sim 0.67 \mu\text{m}$ ,  $0.81 \sim 0.84 \mu\text{m}$ 와  $1.62 \sim 1.69 \mu\text{m}$ 이다.

### 3. 변수를 표시하는 수식

#### 3.1. Sensor 위치

측정기의 특성에서 설명한 바와 같이 sensor의 head는 출발점 방향에서 나선형식으로 움직이며, 회전축을 중심으로  $360 \text{ deg/sec}$ 의 속도로 회전하다가 측정기를 지지하는 지지대 쪽에 와서 멈춘다. 측정기가 회전할 시 회전각( $\phi$ )이  $15^\circ$ 씩 커질 때마다 자료를 수집하게 되는데, 매초 24개의 측정치가 기록이 되고, 회전축과 head 방향과는  $15 \text{ deg/sec}$ 의 속도로 커지며, 총 264 개까지 sample 한 후 정지하게 된다.

이와 같이 head가 향하는 방향이 나선형의 모양으로 변하는 과정을 계속하여 나타내는 것은 구좌표(Spherical Coordinate)가 적절하다.<sup>4)</sup> head가 최초로 향한 방향을 Z 축의 '+' 방향으로 하고, 움직이기 시작하는 점을 X-Z 평면으로 정의하면, head가 움직이는 방향은 다음 Parameter로 표시된다(그림 2).

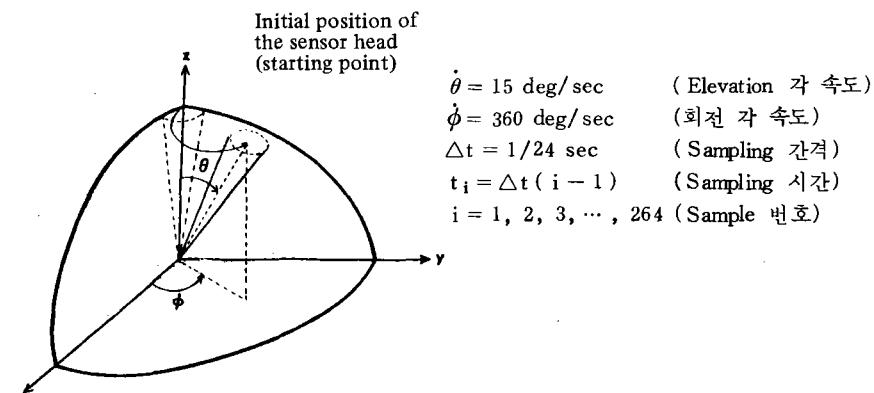


그림 2. 구좌표에 따른 Scan 방향표시

이상의 Parameter를 사용하여 Sensor Head의 방향은  $t_i$  시간에

$$\theta_i = \dot{\theta} t_i$$

$$\phi_i = \dot{\phi} t_i$$

로 주어진다.

### 3.2. 두 sample 간의 각 거리

두 sample 간의 각 거리는 두 IFOV간에 어느 정도 분리되는가, 또는 얼마나 겹치는가를 측정하는 척도가 된다. 두 sample  $i$  와  $j$ 의 head 방향이 각기  $(\theta_i, \phi_i)$ 와  $(\theta_j, \phi_j)$ 라고 하면, 그 각 거리  $\delta_{ij}$ 는 다음 식에 의하여 계산된다.

$$\delta_{ij} = \cos^{-1} (\sin \theta_i \cos \phi_i \sin \theta_j \cos \phi_j + \sin \theta_i \sin \phi_i \sin \theta_j \sin \phi_j + \cos \theta_i \cos \theta_j)$$

### 3.3. sensor 의 경사각과 방위각

회전 중인 PARABOLA Sensor 가 번째 Sample 자료 측정시 head 방향은  $\theta_i$ 와  $\phi_i$ 라고 하면, 이 때 일반적으로 Remote Sensing 연구에서 Sensor의 방향이나 일광의 균원인 태양의 위치를 나타낼 때는 방위각(Azimuth)과 Elevation 각 또는 경사각(Off -Nadir Angle)로 표시한다. 회전 중인 PARABOLA Sensor의 방향도 방위 각과 경사각으로 나타내야 다른 연구결과와 비교할 수 있고, 연구결과의 해석과 이해를 빠르게 할 수 있다. 따라서 Sensor Head 방향을 경사각( $\eta_i$ )과 방위각( $\xi_i$ )으로 표시하면 다음과 같이 주어진다(그림 3).

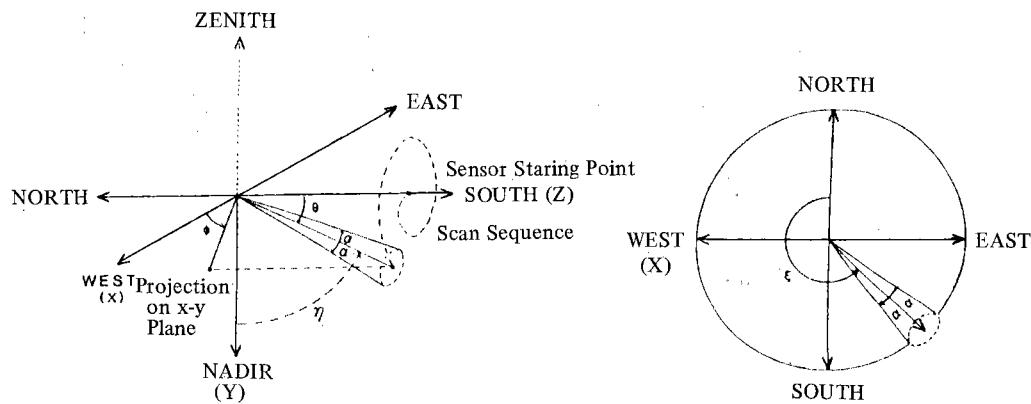


그림 3. Scan 방향의 경사각( $\eta$ )과 방위각( $\xi$ )

$$\eta_i = \cos^{-1} (\sin \theta_i \sin \phi_i)$$

$$\xi_i = \pi - \tan^{-1} \left( \frac{1}{\tan \theta_i \cos \phi_i} \right)$$

이 식에서 Sensor의 방위 각은 시계 진행 방향의 반대 방향으로 계산되고, 기준점 방향은 정남이며, 수평 면상에서 정의된다.

### 3.4. Footprint 타원

일정각의 IFOV를 갖는 sensor가 지표면을 주사한 면적, 즉 Footprint 외각 경계선은 경사각의 정도에 따라 타원이 되거나 포물선 또는 쌍곡선이 된다. IFOV를  $2\alpha$ , 즉

$$\alpha = \text{IFOV} / 2$$

라고 하면,  $\eta_i < \frac{\pi}{2} - \alpha$  일 때 Footprint 는 타원이 된다(그림 4).

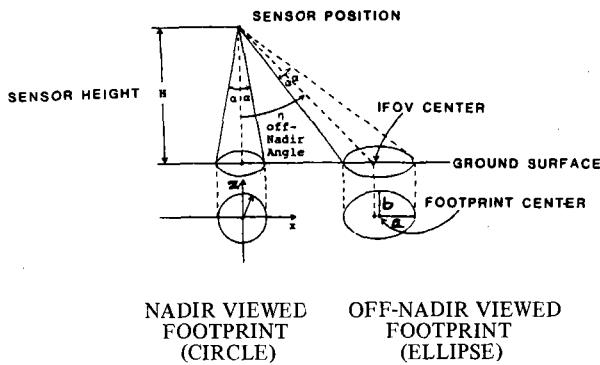


그림 4. Sensor IFOV의 지면상 Footprint

Footprint 의 타원의 장축( $a_i$ )과 단축( $b_i$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_i = \frac{H \tan \alpha (1 + \tan^2 \eta_i)}{1 - (\tan \alpha \tan \eta_i)^2}$$

$$b_i = \frac{H \tan \alpha}{\cos \eta_i [1 - (\tan \alpha \tan \eta_i)^2]^{1/2}}$$

여기서  $H$ 는 sensor의 지면상 높이다. 이 타원의 중심은

$$X_c = [H \tan(\eta_i - \alpha) + a_i] \cos(\xi_i - \frac{3}{2}\pi)$$

$$Z_c = [H \tan(\eta_i - \alpha) + a_i] \sin(\xi_i - \frac{3}{2}\pi)$$

로 주어진다. 따라서 타원의 둘레의 좌표는

$$X = X_c + r_i \left[ \cos \left( \xi_i - \frac{3}{2}\pi \right) \cos \gamma - \sin \left( \xi_i - \frac{3}{2}\pi \right) \sin \gamma \right]$$

$$Z = Z_c + r_i \left[ \sin \left( \xi_i - \frac{3}{2}\pi \right) \cos \gamma + \cos \left( \xi_i - \frac{3}{2}\pi \right) \sin \gamma \right]$$

로 계산되는데, 이 식에서

$$r_i = a_i b_i / (a_i^2 \sin^2 \gamma + b_i^2 \cos^2 \gamma)^{1/2}$$

$\gamma$  = 타원 중심에서 X축 방향과 이루는 각

으로 정의된다. 도면상에 Footprint 타원을 Plotting 할 때는 위의  $\gamma$ 를  $0^\circ$ 에서  $360^\circ$  까지 적당한 간격으로 증가시키면서 구해진 (X, Z) 점을 연결시키면 된다. 주어진 지면 위에서는 Footprint 타원은 지면상에 나타나는 부분만 plotting 하게 됨으로 계산된 (X, Z) 좌표가 도면의 boundary 안에 들었는지 그 때마다 검토하면서  $\gamma$ 를 증가시켜 나가야 한다.

Footprint 타원은 sensor 가 반사광을 측정할 때 cover 된 지역을 나타내므로, 이들의 plot 는 측정된 자료가 지표면 표적물의 어떠한 부분의 것인지 확인하고, 방향에 따른 반사율의 변화를 시작적으로 검토할 수 있다. PARABOLA에 의해 주사된 일련의 Footprint 들을 plot 한 예는 그림 5에서 볼 수 있다. 이 때의  $\alpha$ 는  $7.5^\circ$ , 즉 IFOV가  $15^\circ$ 이다.

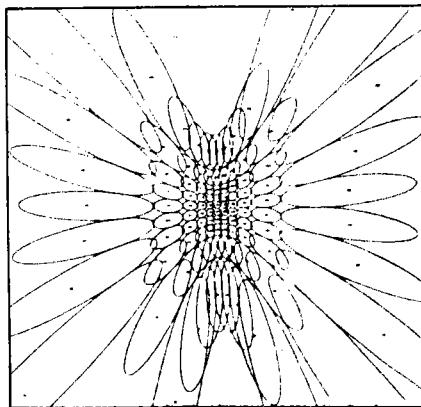


그림 5. Sensor IFOV의 Footprint 모양

이들 그림에서 보는 Footprint 타원의 면적이 sensor 가 수직으로 지면을 주사했을 때의 면적에 대한 비율( $R_i$ )은 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$R_i = \frac{1 + (\tan \eta_i)^2}{\cos \eta_i [1 - (\tan \alpha / \tan \eta_i)^2]^{3/2}}$$

### 3.5. 하늘을 주사할 때 (Sky Scanning Pattern)의 IFOV 도면 Parameter

PARABOLA sensor가 하늘 쪽을 향하여 주사할 때 천구(天球) 위에서 일정한 원(Circle) 형안의 부분을 보게 되고, 그 부분에서 오는 산란광을 측정하게 된다. 각 방향의 원을 평평한 지면 위에 정확하게 표시하는 것은 불가함으로 각 원을 하나의 Pixel(Picture Element의 준말)로 하여 head의 중심점의 위치를 등심원 안에 표시하였다. 이 때의 중심방향의 극좌표는

$$X_c = f(\pi - \eta_i) \cos(\xi_i - \frac{3}{2}\pi)$$

$$Z_c = f(\pi - \eta_i) \sin(\xi_i - \frac{3}{2}\pi)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $f$ 는 도면의 크기를 정하는 상수인데,  $(X_c, Z_c)$ 를 중심으로 반경

$$R = f \alpha$$

의 원을 그리면 동 지점에서 보는 하늘의 면적과 유사한 IFOV가 된다. 그러나 천구에 있는 원을 지면상에 투영하면 원으로 나타나지 않으므로 반경의 원을 지면상에 그리는 것은 그리 도움이 되지 않는다.

PARABOLA가 천구를 주사할 때의 전 Pixel을 지면에 투영하는 방법으로 방위 각 등거리 투영법(Azimuth Equidistant Projection)을 사용하면, 각 Pixel cover 지역의 외곽은 타원으로 나타나는데, 타원의 장반경( $a_i$ ) 및 단반경( $b_i$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_i = R \frac{\pi - \eta_i}{\sin \eta_i}$$

$$b_i = R$$

이 타원을 plotting하기 위한 좌표( $X, Z$ ) 계산은 앞 절의 계산식에서 할 수 있다. plot된 각 Pixel의 위치와 투영도는 그림 6에 표시되었다.

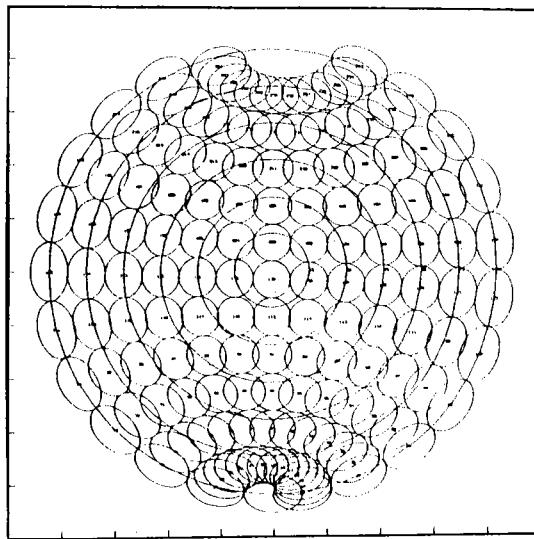


그림 6. 하늘 방향 각 Pixel IFOV의 등방위 각 투영도

#### 4. Software 설명

PARABOLA의 측정자료를 분석하기 위하여 앞에서 설명한 변수와 수식들을 FORTRAN 언어를 사용하여 program하여 이들을 도면지에 plot하거나 RGB Monitor에 표시하도록 하였다. PARABOLA의 자료는 처음에 Digital Cassette Tape에 수록되는데, 이 자료의 숫자는 측정 sensor에 의해 기록된 voltage 자료이므로, 이를 computer에 입력시켜 Calibration Program에 의해 복사량으로 환산하고, 또한 분석 program에 의해 필요한 방향각 등을 계산하며, 또는 Footprint 타원 안에 Grey Level 등으로 나타내는 S/W로 개발하였다. 이 S/W Package에는 기타 여러 가지 program이 포함되어 있으나, 이 논문 발표에 주어진 제한 때문에 여기서 이상의 설명은 생략한다. 이 S/W는 현재 IBM 3081 Computer에서 사용되고 있다.

#### 5. 실험자료 예시

개발된 S/W가 어떻게 쓰여졌는지 몇 가지 예를 들어 설명하고, 겸하여 산란광의 방향성 특성의 중요성을 밝히겠다.

여기에 소개하는 야외 실험 자료는 Maryland 소재 미 농무성 Beltsville 농업연구센터의 실험 농장에서 1983년 8월 10~19일에 측정한 것으로, PARABOLA sensor의 높이는 지면상 10

m이었다. 이 때의 날씨는 청명하였다.

당시 이 농장에는 여러 가지 곡물과 목초가 NASA와 본 농장의 연구팀에 의해 실험용으로 재배되어 작물의 여러 단계의 성장과정에서 조사되고 있었다. 이 때 측정된 자료 중의 일부는 이번 개발된 S/W로 도면화하여 여기에 소개하였다<sup>3)</sup>(그림 7~11 참조).

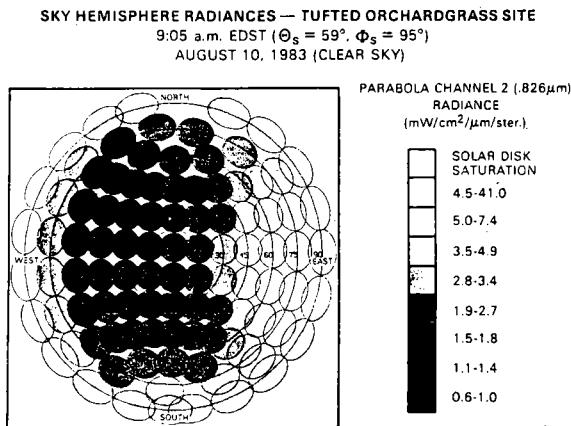


그림 7. 하늘 방향 산란광의 복사량분포 Grey-tone 표시<sup>3)</sup>

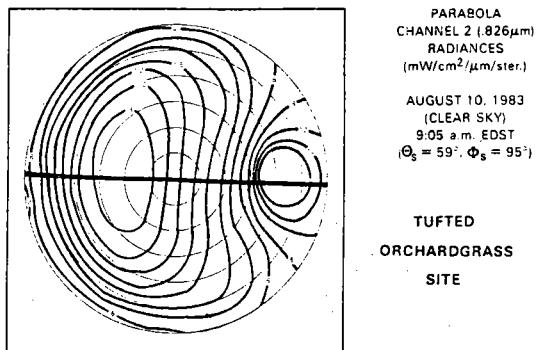


그림 8. 하늘 방향 산란광의 복사량분포 등고선(I)<sup>3)</sup>

하늘에서 산란되어 나오는 산란광도 방향에 따른 분포를 하고 있으며(그림 7, 8) 맑은 날도 약간의 구름이 있으면 복사량 분포가 복잡한 방향성 분포를 나타나게 됨을 볼 수 있다(그림 9).

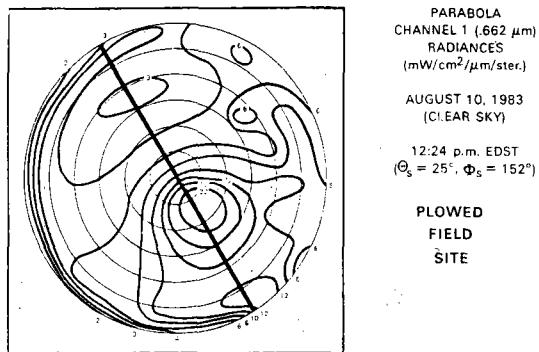


그림 9. 하늘 방향 산란광의 복사량분포 등고선(II)<sup>3)</sup>

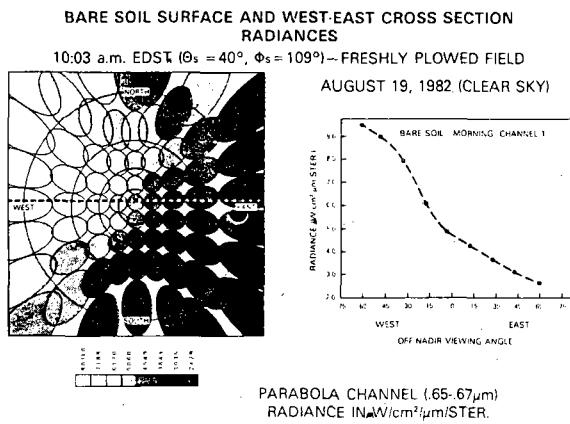


그림 10. 지면 Footprint 쪽 산란광의 복사량분포 Grey-tone 표시 및 단면 방향 내삽치(I)<sup>3)</sup>

지면으로부터 반사되어 나오는 산란광도 뚜렷한 방향성 분포를 보이고 있는데, 그림 10에 표시된 자료에는  $120^\circ$  각도의 변화에 복사광의 세기가 3배로 달라짐이 나타나 있다. 산란광의 방향성 특성은 지면의 성질과 그 위에 자라는 식물의 종류 및 성장상태에 따라 크게 달라짐을 알 수 있다(그림 10~12).

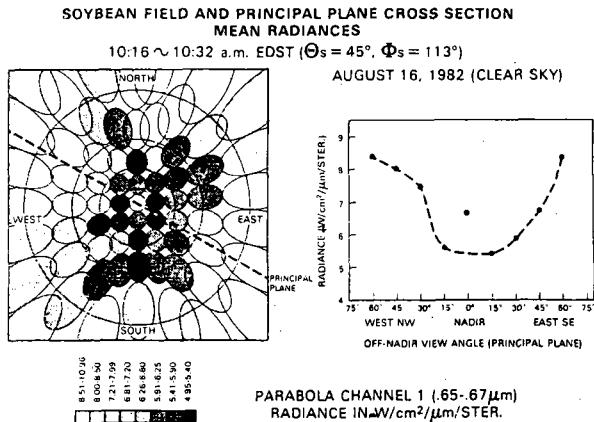


그림 11. 지면 Footprint 쪽 산란광의 복사량분포 Grey-tone 표시 및 단면 방향 내삽치(II)<sup>3)</sup>

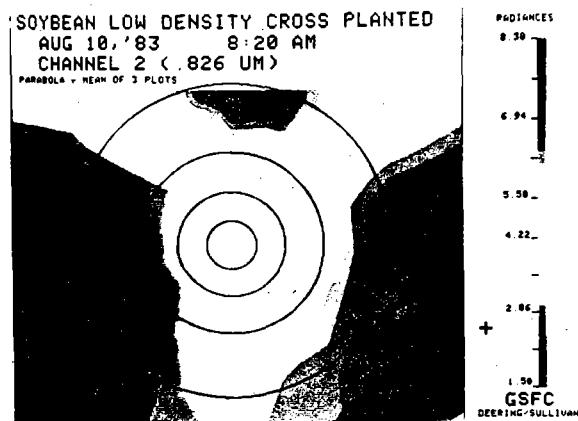


그림 12. 콩밭에서의 방향성 복사량분포 Grey-tone 표시<sup>3)</sup>

## 6. 결 론

지금까지 Sphere - Scanning Radiometer의 특성을 고려하여 측정자료를 분석하기 위한 Graphic Software의 Algorithm들을 설명하였고, 개발된 software(S/W)를 사용하여 측정자료를 도면에 나타내어 산란광의 방향성 분포를 검토한 몇 가지 예를 제시하였다.

Radiometer에 의해 11초라는 단시간 내에 264개의 방향에서 3개 파장대로 측정기록된 792개의 복사량과 방향 등의 기타 관련자료를 분석하는 데는 자료를 도면에 표시하는 S/W가 매우 유용함을 알 수 있다. 각 방향에서의 산란광을 도면에 표시함으로서 하늘과 지면에서의 산란광의 방향성 특성을 일목요연하게 나타내어 분석할 수 있게 되었다. 여기 소개한 S/W는 Radiometer 자료분석 S/W개발 1단계 작업결과에 불과하나, 독특한 Algorithm을 고안하여 FORTRAN Program을 만들었다. 본 Algorithm의 기본원리는 다른 Radiometer 자료분석에도 응용되어 쓰일 것이다. 특히 지표면의 각종 표적물에 대한 방향성 산란특성의 연구가 활발해지고 있으므로 Sphere - Scanning Radiometer에 의한 분석자료는 앞으로 이 방면의 연구에 많은 기여가 될 것이다.

## 사 사

본 연구는 NASA/Goddard 우주비행 Center의 지원으로 수행되었다. 무난히 이 연구가 추진되도록 배려해 준 PARABOLA Project 책임자 Donald Deering 박사와, Programmer로 수고한 Tammy Ostroff 양에게 감사드린다.

## 참고문헌

- 1) Kimes, D.S., 1983. Dynamics of Directional Reflectance Factor Distributions for Vegetation Canopies. *Appl. Optics*, 22, 1364.
- 2) King, M.D. and Curran, R.J., 1980. The Effect of a Non-uniform Planetary Albedo on the Interpretation of Earth Radiation Budget Observations. *J. Atmos. Sci.*, 37, 1262-1278.
- 3) Deering, D.W. and Leone, P., 1984. A Sphere-Scanning Radiometer for Rapid Directional Measurements of Sky and Ground Radiance: The PARABOLA Field Instrument. *NASA TM 86176, NASA/GSFC*. 88p.(unpublished).
- 4) Park, J.K. and Ostroff, T., 1983. PARABOLA Instrument Geometric Characteristics Software

User's Guide. *Systems and Applied Sciences Corporation Report to NASA/GSFC.* 28p.(unpublished).