

SAR Polarimetry 기술

김 덕 진

서울대학교 지구환경과학부

초 록

이 논문은 polarimetric SAR 시스템의 최근 발전 동향을 알아보고 POLSAR 자료의 획득원리 및 표현 방법에 관한 기본적인 행렬을 소개한다. 또한 POLSAR 자료의 활용을 위해 자주 사용되는 기초이론인 target decomposition을 유도하고, 산란 메커니즘을 해석할 수 있도록 서술한다.

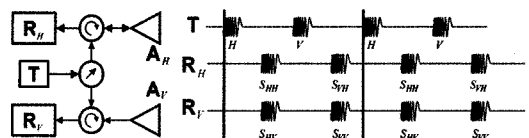
I. 서 론

지난 수십 년 동안 Synthetic Aperture Radar(SAR)는 지구 자원 탐사, 행성 탐사 및 군사적인 활용을 위한 주요한 원격 탐사 기술로 자리매김하였다. SAR는 구름을 투과할 수 있는 마이크로 전자기파를 생성하여 지구 표면을 영상화 할 수 있는 능동 센서이고 주야간 관측이 가능하기 때문에 전천후 센서로서 잘 알려져 있다. 지금까지 이러한 SAR 센서를 탑재한 인공위성들이 많이 발사되었는데, 대표적으로 SEASAT, ERS- 1/2, JERS-1, RADARSAT-1, 그리고 SAR 간섭기법을 갖춘 Shuttle Radar Topographic Mission(SRTM) 등이 있었다. 하지만 이 모든 SAR 시스템들은 단일 편파(single polarization)를 사용하여 지구를 영상화 해왔다. 근래에 ENVISAT ASAR가 이중 편파(dual polarization) 모드가 가능한 최초의 SAR 시스템으로서 지구 원격 탐사에 많은 공헌을 한 이래, 최근에는 ALOS PALSAR, TerraSAR-X, RADARSAT-2 등 완전 편파(full or quad polarization) 모드가 가능한 SAR 시스템들이 발사되었다. 앞으로 발사될 대부분의 SAR 인공위성들은 이러한 완전 편파가 가능한 SAR시스템

을 탑재할 계획으로 있다.

완전 편파 자료의 획득이 가능한 Polarimetric Synthetic Aperture Radar(POLSAR)는 수평 편파(H)로 보내고 수평 편파(H)로 받는 HH-편파, 수평 편파(H)로 보내고, 수직 편파(V)로 받는 HV-편파, 수직 편파(V)로 보내고, 수평 편파(H)로 받는 VH-편파, 그리고 수직 편파(V)로 보내고, 수직 편파(V)로 받는 VV-편파 등에 해당하는 지표면의 반사 또는 산란 정도를 동시에 측정하는 시스템이다. 이러한 POLSAR 자료는 H와 V편파를 번갈아 보내고 H편파와 V편파로 동시에 받음으로서 가능하다([그림 1]). 단일 편파 또는 이중 편파 SAR 시스템과는 달리 완전 편파 자료는 임의의 편파를 보내고 받았을 때의 지표면 산란 반응으로 합성하는 것이 가능하다. 이것은 산림, 해양, 도심지, 농작물 등 다양한 지표 피복에 대한 산란 메커니즘 정보를 제공해 줄 수 있다. 결과적으로 POLSAR는 단일 또는 이중 편파에서는 불가능했던 물체를 구분할 수 있는 능력이 더 탁월하며, SIR-C 및 항공기 SAR (NASA/JPL AIRSAR, DLR E-SAR, EMISAR, PI-SAR, RAMSES 등)로부터 다양한 POLSAR 자료들이 제공되면서 이러한 자료들로부터 다중 주파수, 다중 편파를 활용하는 과학적인 연구들이 많이 진행되게 되었다.

이 논문은 POLSAR 자료를 표현하는 방식 및 기초 분석 방법 등에 대해서만 간략히 소개하고자 한



[그림 1] Polarimetric SAR 자료 획득 방법

다. 지난 20년 동안 POLSAR에 대한 이론, 알고리즘 및 활용에 대한 많은 연구 및 발전이 있어 왔다. 보다 자세한 POLSAR에 대한 이론은 참고문헌 [8], [9], [13] 등을 참고하기 바라며, POLSAR 자료를 이용한 대표적인 활용 사례로는 지표면 방위 방향 기울기 추출^{[6],[7]}, 해양파랑의 기울기 및 스펙트럼 분석^[2], 토지피복분류^{[5],[9],[10]}, 해빙의 편파 특징 분석^[3], 표면 거칠기 및 수분 함량과 같은 지표면 파라미터 추출^{[4],[14]} 등이 있다. 또한 POLSAR와 간섭 기법(interferometry)을 결합한 POLINSAR^[11]에 대한 부분도 흥미로운 주제일 것이다.

II. Polarimetric 행렬 및 POLSAR 자료 표현 방법

2-1 Sinclair 산란 행렬(Scattering Matrix) - [S]

[그림 1]에서처럼 동일한 한 지점에 대하여 4가지 편파에 대한 산란 또는 반사도가 측정이 된다. 이를 행렬로 표현하면,

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

과 같이 된다. 이 2×2 coherent sinclair 산란 행렬은 사용되는 전자기파의 주파수, 그 지점의 지표면 특징, 그리고 상대적인 입사각에 따라 다른 값들을 가질 수 있다. 더 나아가 상호 전환이 가능한 매질(reciprocal media)에서는 $S_{HV}=S_{VH}$ 를 만족하여 [S]는 보다 간단한 형태의 대칭 행렬이 될 수 있다. H와 V 편파를 기저로 하는 sinclair 산란 행렬은 또 다른 편파를 기저(예를 들어, 45°와 -45°로 진동하는 선형 기저 편파, 시계 방향(RC)과 반시계 방향(LC)으로 회전하는 기저 편파 등 임의의 (A, B)기저 편파, 여기서 $B=A^\perp$)로 하는 sinclair 산란 행렬로의 변환이 가능하다. 즉,

$$[S]_{(A,B)} = U^T [S] U \quad (2)$$

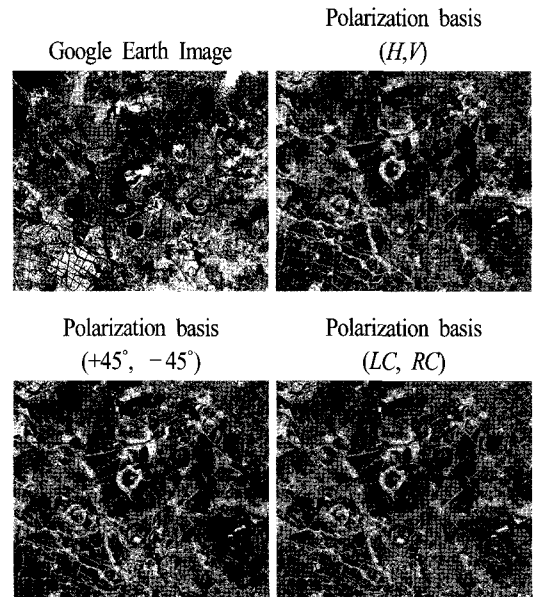
여기서, U는 크기가 1이고 기저를 변화시키는 행렬이며, 이러한 변환을 con-similarity transformation이라고 한다. 이 변환은 대칭성 및 총 파워와 고유치를 보존한다. 즉,

$$Span([S]) = (|S_{HH}|^2 + 2|S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2) = span(U^T [S] U) \quad (3)$$

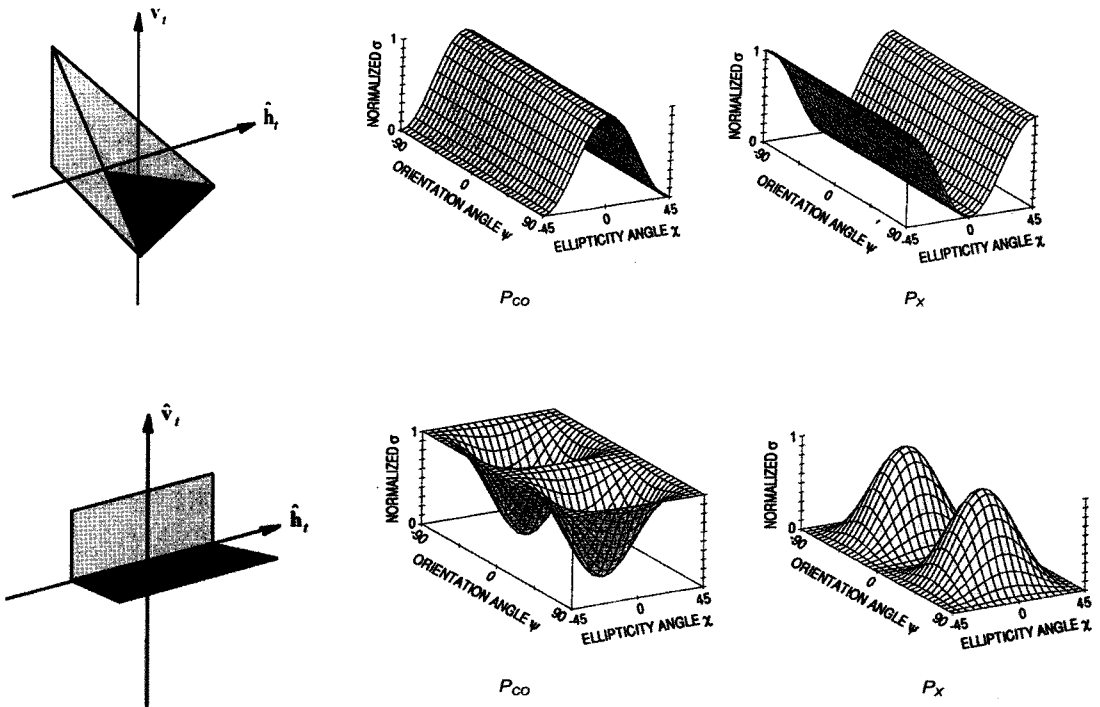
$$|\det [S]| = |S_{HH}S_{VV} - (S_{HV})^2| = |\det(U^T [S] U)| \quad (4)$$

[그림 2]는 제주도 성읍리 일대의 (H, V)기저 편파로 획득된 NASA/JPL AIRSAR의 POLSAR 자료를 (+45°, -45°) 기저 편파와 (LC, RC) 기저 편파로 각각 획득되었다고 했을 때 나타낼 수 있는 POLSAR 영상들을 표현하고 있다.

이 con-similarity transformation을 통해서 어떤 표적의 편파 특성(polarimetric signature) 분석이 가능하다. 예를 들어, 삼중 코너 반사경(trihedral corner reflector)과 이중 코너 반사경(dihedral corner reflector)의



[그림 2] 기저 편파의 변화에 따른 POLSAR 영상



[그림 3] 삼중 코너 반사경(trihedral corner reflector)(위)와 이중 코너 반사경(dihedral corner reflector)에 대한 편파 특성(polarimetric signature) 분석

HH-편파, VV-편파, HV-편파 등의 강도(intensity)는 같지만, 편파 특성 분석을 해보면 두 표적은 [그림 3] 과 같이 완전히 다른 특징을 보여준다.

2-2 편파산란의 이차표현식 - Covariance 행렬([C]) 과 Coherency 행렬([T])

일반적으로 single-look 복소수 SAR 자료의 경우 coherent sinclair 산란 행렬([S])을 이용하여 편파 분석이 가능하지만, 자연에 존재하는 대부분의 산란체 들은 시간 및 공간에 따라 변화는 부분편파를 생성하게 되어 multi-look 또는 공간 평균된 POLSAR 자료를 사용해야 한다. 이러한 POLSAR 자료는 Kennaugh 행렬 또는 이와 유사한 양인 Covariance 행렬([C])과 Coherency 행렬([T])로서 분석이 가능하다.

(H,V)편파를 기저로 하는 lexicographic target vec-

tor (Ω)는

$$\Omega = \begin{bmatrix} S_{HH} \\ \sqrt{2} S_{HV} \\ S_{VV} \end{bmatrix} \tag{5}$$

로 표현된다. 여기서 S_{HV} 에 $\sqrt{2}$ 는 총 파워의 크기를 유지하기 위해 사용되었다. 따라서 (H,V)편파를 기저로 하는 Covariance 행렬([C])는 다음과 같이 계산 된다.

$$[C] = \langle \Omega \cdot \Omega^* \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{HH}|^2 \rangle & \langle \sqrt{2} S_{HH} S_{HV}^* \rangle & \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle \\ \langle \sqrt{2} S_{HV} S_{HH}^* \rangle & \langle 2 |S_{HV}|^2 \rangle & \langle \sqrt{2} S_{HV} S_{VV}^* \rangle \\ \langle S_{VV} S_{HH}^* \rangle & \langle \sqrt{2} S_{VV} S_{HV}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \tag{6}$$

한편, (H, V) 편파를 기저로 하는 pauli target vector (k)는

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{bmatrix} \quad (7)$$

로 정의되며, Coherency 행렬($[T]$)는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$[T] = \langle k \cdot k^* \rangle = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle \\ \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 2\langle S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle \\ \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & 2\langle (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ 2\langle S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 4\langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (8)$$

POLSAR 영상은 보통 $|S_{HH}|$ 를 빨강색, $|S_{HV}|$ 를 초록색, $|S_{VV}|$ 를 파랑색으로 나타내게 되는데, pauli target vector는 $|S_{HH} - S_{VV}|$ 를 빨강색, $|S_{HV}|$ 를 초록색, 그리고 $|S_{HH} + S_{VV}|$ 를 파랑색으로 나타냄으로서 사람이 그 지역 특징을 보다 쉽게 인식할 수 있도록 한다. 일반적으로 $|S_{HH} - S_{VV}|$ 는 도심지 건물과 같이 이중반사를 일으키는 곳에서 강한 신호를, $|S_{HH} + S_{VV}|$ 는 평평한 지표면에서 지표 산란이 일어날 때, $|S_{HV}|$ 는 식생과 같이 체적 산란을 일으키는 곳에서 각각 우세한 특징을 보이기 때문이다. 동일한 지역을 다른 색상지정을 통해 [그림 4]에 나타내었다.

III. Polarimetric Target Decomposition 이론

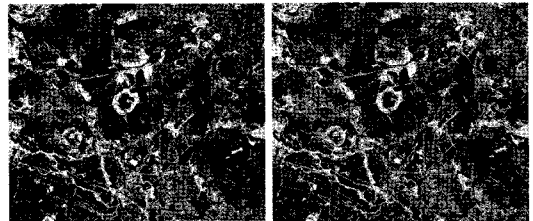
산란 행렬($[S]$)은 coherent 또는 순수 산란체(pure scatter)에 대해서만 특성화 될 수 있다. 자연에 존재하는 대부분의 산란체(distributed target)에 대해서는 이 산란 행렬로서 기술되어지기 어렵다. 자연계의 대부분 산란체들은 스펙클의 존재와 더불어 통계적으로 기

술이 되어야만 하며, 이를 위해 이차 편파 표현식(second-order polarimetric representation)이 필요하다. 이차 편파 표현식은 앞서 설명한 covariance 행렬($[C]$)이나 coherency 행렬($[T]$)가 될 수 있다. 하지만 이러한 이차편파 표현식도 자연계 산란체의 물리적인 특성을 직접적으로 분석하는 것은 쉽지 않다. 그래서 polarimetric target decomposition의 목적은 covariance 행렬이나 coherency 행렬로부터 특성화된 정규물체(canonical object)와 유사한 또는 물리적인 해석이 보다 용이한 형태의 이차 편파 표현식(second order descriptor)의 조합으로 분해를 하여 해석하고자 하는데 있다. 이러한 decomposition은 다음과 같이 표현된다.

$$\langle [C] \rangle = \sum_{i=1}^k p_i [C]_i \quad (9)$$

$$\langle [T] \rangle = \sum_{i=1}^k q_i [T]_i \quad (10)$$

여기서 특성화된 정규(canonical)반응들을 $[C]_i$ 또는 $[T]_i$ 로 표현하였고, p_i 와 q_i 는 각각 그러한 반응들에 해당하는 비율계수를 나타낸다. 일반적으로 $[C]_i$ 와 $[T]_i$ 가 물리적인 해석을 위해 pure target에 해당하는 행렬이면 좋겠지만, 꼭 그럴 필요는 없고 다만 이



[그림 4] 동일 지역에 대하여 lexicographical 색상 지정 (좌) (red: HH, green: HV, blue: VV)과 pauli 색상 지정(우) (red: HH-VV, green: HV, blue: HH+VV)으로 각각 표현

들 서로가 독립적, 즉 서로 수직이면 된다. 따라서 이러한 조건을 만족하는 decomposition은 단 하나로 결정되는 것은 아니다. 지금까지 POLSAR 자료의 해석을 위해 다음과 같은 몇 가지 대표적인 decomposition 기법들이 주로 사용되고 있다.

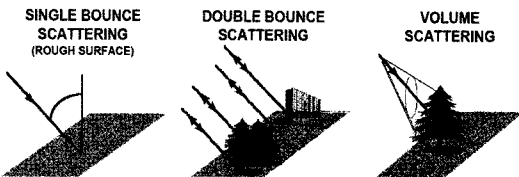
3-1 모델기반 Freeman-Durden Decomposition

Freeman-durden decomposition 모델은 covariance 행렬을 다음과 같은 3가지의 산란 메커니즘으로 분해하는 것이다^[1](그림 5).

- 표면 또는 단일 산란(surface or single-bound scattering): 일차 브래그산란으로 모델화
- 이중 산란(double-bounce scattering): 이중 코너 반사경(dihedral corner reflector)와 같은 물체로 모델화
- 체적 산란(volume scattering): 식생 잎과 같이 dipole 이 임의의 방향으로 랜덤하게 분포하는 것으로 모델화

Freeman-Durden decomposition의 첫 번째 산란 메커니즘인 표면 또는 단일 산란은 일차 브래그 표면 산란으로서 모델화 될 수 있다. 이를 위해 브래그 표면에 대한 산란 행렬([S])을 다음과 같이 간단한 형태로 가정한 후,

$$[S] = \begin{bmatrix} R_H & 0 \\ 0 & R_V \end{bmatrix} \quad (11)$$



[그림 5] 세 가지 산란 메커니즘 - 표면 또는 단일 산란, 이중 산란, 체적 산란^[1]

여기서, R_H 와 R_V 는 수평과 수직 편파에 대한 반사계수(reflection coefficient)로부터 구성되는 lexicographic target vector, $\Omega=(R_H \ 0 \ R_V)^T$ 를 이용하여 Covariance 행렬을 계산하면 다음과 같다.

$$[C]_s = \begin{bmatrix} |R_H|^2 & 0 & R_H R_V^* \\ 0 & 0 & 0 \\ R_V R_H^* & 0 & |R_V|^2 \end{bmatrix} = f_s \begin{bmatrix} |\beta|^2 & 0 & \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta^* & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, $\beta = \frac{R_H}{R_V}$ 이고 $f_s = |R_V|^2$ 로서, 이 표면 또는 단일 산란 성분이 $|S_{VV}|^2$ 에 차지하는 비율을 나타낸다.

Freeman-Durden decomposition의 두 번째 산란 메커니즘인 이중 산란은 이중 코너 반사경(diplane)과 같은 모양으로 쉽게 모델화 될 수 있는데, 꼭 이중 코너 반사경(diplane)이 금속일 필요는 없다. 수직 평면에 해당하는 수평 및 수직 편파에 대한 반사계수를 각각 R_{HH} 와 R_{VV} 로 나타내고, 수평 평면에 해당하는 수평 및 수직 편파에 대한 반사 계수를 각각 R_{gH} 와 R_{gV} 로 나타내면, 이중 산란에 대한 산란 행렬은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[S] = \begin{bmatrix} e^{j2\gamma_H} R_{gH} R_{tH} & 0 \\ 0 & e^{j2\gamma_V} R_{gV} R_{tV} \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, H -편파와 V -편파를 위한 두 개의 위상 성분을 각각 $e^{j2\gamma_H}$ 와 $e^{j2\gamma_V}$ 로 나타내었다.

이 산란 행렬로부터 lexicographic target vector를 구성한 후 covariance 행렬을 계산하면 식 (14)와 같이 표현된다.

여기서, $\alpha = e^{j2(\gamma_H - \gamma_V)} \frac{R_{gH} R_{tH}}{R_{gV} R_{tV}}$ 을, $f_d = |R_{gV} R_{tV}|^2$ 로서 $|S_{VV}|^2$ 성분에서 이 이중 산란이 차지하는 비율을 나타낸다.

$$[C]_d = \begin{bmatrix} |R_{tH}R_{gH}|^2 & 0 \\ 0 & 0 \\ e^{2j(\gamma_V - \gamma_H)} R_{tV}R_{gV}R_{tH}^*R_{gH}^* & 0 \\ e^{2j(\gamma_H - \gamma_V)} R_{tH}R_{gH}R_{tV}^*R_{gV}^* & 0 \\ 0 & 0 \\ |R_{tV}R_{gV}|^2 & 0 \end{bmatrix} = f_d \begin{bmatrix} |\alpha|^2 & 0 & \alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha^* & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

세 번째 산란 메커니즘인 체적 산란(volume scattering)은 나무의 식생 잎과 같이 임의로 배열된 얇은 쌍극자(dipole)의 무리로 가정해 모델화 될 수 있다. 즉, 쌍극자 하나에 해당하는 산란 행렬, $[S] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 를 임의의 방향(θ)으로 회전시킨 산란 행렬로부터 그 방향의 확률을 곱하여 모든 방향의 성분을 더해 구해질 수 있다. 만약 배열된 방향이 모두 같은 정도의 확률을 가질 경우, 즉 $p(\theta) = \frac{1}{2\pi}$ 일 경우 최종적으로 계산된 체적 산란에 대한 covariance 행렬은 다음과 같다(자세한 계산 과정은 참고문헌 [8] 참조).

$$\langle [C] \rangle_v = \frac{f_v}{8} \begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 f_v 는 $|S_{VV}|^2$ 성분에서 체적 산란이 차지하는 비율을 나타낸다.

이러한 세 가지 산란 메커니즘(표면 또는 단일산란, 이중 산란, 체적 산란)이 서로 상관관계가 없다고 가정하면 전체 Covariance 행렬은 각 산란 메커니즘에 해당하는 Covariance 행렬의 합으로 표현될 수 있다. 즉, 식(6) 및 식(16)과 더불어 우세한 산란 메커니즘의 가정을 통해 f_s, f_d, f_v, α 와 β 등을 계산할 수 있고, 이로부터 $\text{Span} = (|S_{HH}|^2 + 2|S_{HV}|^2 + |S_{VV}|^2) = P_s + P_d + P_v$ 을 만족하는 식 (17) 등을 구할 수 있다.

제주도 지역에 대한 Freeman-Durden decomposition을

$$\langle [C] \rangle = [C]_s + [C]_d + \langle [C] \rangle_v = \begin{bmatrix} f_s |\beta|^2 + f_d |\alpha|^2 + \frac{3f_v}{8} & 0 & f_s \beta + f_d \alpha + \frac{f_v}{8} \\ 0 & \frac{2f_v}{8} & 0 \\ f_s \beta^* - f_d \alpha^* + \frac{f_v}{8} & 0 & f_s + f_d + \frac{3f_v}{8} \end{bmatrix} \quad (16)$$

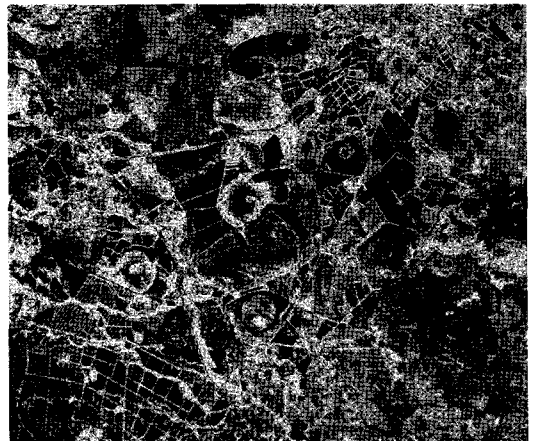
$$\begin{aligned} P_s &= f_s(1 + |\beta|^2) \\ P_d &= f_d(1 + |\alpha|^2) \\ P_v &= f_v \end{aligned} \quad (17)$$

수행한 후 P_d 를 빨간색으로, P_v 를 초록색으로 그리고 P_s 를 파랑색으로 [그림 6]에 나타내었다.

이 Freeman-Durden decomposition은 단순한 수학적 구성이 아닌 물리적인 산란 모델을 바탕으로 하므로 그 지역에 대한 사전 지식이 없다고 하더라도 일차적으로 그 지역에서 우세한 산란 메커니즘이 무엇인지를 파악하는데 유용하다.

3-2 고유치(Eigenvalue)-고유벡터(Eigenvector) 기반 Decomposition

고유치-고유 벡터 기반 decomposition은 coherency 행



[그림 6] Freeman-Durden decomposition 결과(Red: $P_d = f_d(1 + |\alpha|^2)$, Green: $P_v = f_v$, Blue: $P_s = f_s(1 + |\beta|^2)$)

렬 $\langle [T] \rangle$ 의 고유분해를 통해 이루어진다. 3×3 hermitian행렬인 $\langle [T] \rangle$ 은 다음과 같이 분해가 가능하다^[10].

$$\langle [T] \rangle = [U_3][\Sigma_3][U_3]^{-1} \quad (18)$$

실수로 이루어진 3×3 대각행렬인 $[\Sigma_3]$ 은 $\langle [T] \rangle$ 의 고유치(eigenvalue)들이며,

$$[\Sigma_3] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서, $\infty > \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$ 를 만족하도록 한다. 한편, 크기가 1인 3×3 행렬인 $[U_3]$ 은 각각의 고유치에 해당하는 고유 벡터(eigenvector)들로 이루어진 행렬이다. 즉,

$$[U_3] = [u_1 \ u_2 \ u_3] \quad (20)$$

이고, 각각의 u_i 들은 다음 공식과 같이 표현되도록 할 수 있다.

$$u_i = [\cos \alpha_i \quad \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{j\delta_i} \quad \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{j\gamma_i}]^T \quad (21)$$

식 (19)와 식 (20)을 통해, coherency 행렬 $\langle [T] \rangle$ 의 고유분해는

$$\langle [T] \rangle = \sum_{j=1}^3 \lambda_j u_j u_j^{*T} \quad (22)$$

로 이루어질 수 있다. 여기서 식 (10)과 관련된 각각의 순수 산란메커니즘인 $[T]_i$ 는

$$[T]_i = u_i u_i^{*T} \quad (23)$$

로 표현될 수 있다.

이 고유분해의 물리적인 해석을 보다 쉽게 하기

위해 다음과 같은 3개의 추가적인 파라미터가 주로 사용된다.

- 엔트로피(Entropy)

$$H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_3(p_i) \quad p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^3 \lambda_k} \quad (24)$$

여기서, p_i 는 고유치 λ_i 의 확률로서 전체 산란 파워에 대한 각 산란 메커니즘의 공헌도를 나타낸다.

- 비등방성(Anisotropy)

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (25)$$

- 평균 알파각(Mean alpha angle)

$$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad (26)$$

이러한 파라미터들의 물리적인 해석을 위해 산란 메커니즘에 대한 분석을 수행한 결과, 평균 알파각($\bar{\alpha}$)이 0°의 근처 값을 가질 때는 표면 또는 단일 산란을, 45° 근처의 값을 가질 때는 체적산란을 그리고 90° 근처의 값은 이중 산란을 각각 나타내는 것으로 알려지고 있다. 그리고 엔트로피(H)는 무질서 정도를 나타내는 파라미터로서 0의 값은 $\lambda_1 = \text{Span}$, $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$ 의 경우로서 하나의 순수 산란 메커니즘만 존재하는 경우에, H가 1의 값을 가지는 경우는 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{\text{Span}}{3}$

으로서 편파적인 특징이 없는 랜덤한 노이즈에 가까운 신호가 된다. 대부분의 자연 산란체들은 이 두 극단 사이에 존재하게 되며, 산란 메커니즘의 다양성 및 통계적인 무질서도를 해석하는데 활용된다. 비등방성(A)은 두 번째 고유치와 세 번째 고유치 사이의 상대적인 중요도를 측정하는 파라미터로서 엔트로피(H)의 보완적인 파라미터로서 사용된다. [그림 7]은



[그림 7] 고유치-고유벡터 decomposition 결과

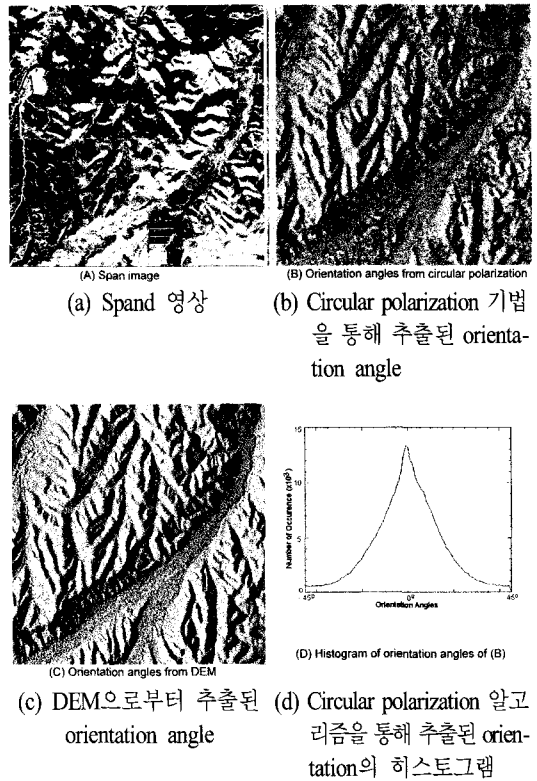
제주도 지역에 대한 고유치-고유벡터 decomposition 을 수행한 결과이다.

IV. SAR Polarimetry 활용사례

이 절에서는 앞서 소개된 POLSAR자료의 표현 방법 및 decomposition 기법들을 바탕으로 지구시스템 연구를 위해 활용된 대표적인 사례 몇 가지를 소개 하고자 한다.

4-1 Orientation angle을 이용한 지표면 기울기 측정

전자기파의 편파상태는 orientation angle과 ellipticity angle로도 정의될 수 있다. 이 중 orientation angle은 지형의 경사 정도와 레이더의 관측각의 함수로서, azimuth방향으로의 경사가 있을 경우 돌아오는 편파의 orientation angle에 변화(shift)가 야기하기 때문에 편파특성(polarimetric signature)을 분석하거나, 시계 방향(RC)과 반시계 방향(LC)으로 회전하는 기저 편파로 변환하여 covariance 행렬의 (1,3)성분의 위상을 이용하여 분석하는 것이 가능하다^{[6],[7]}. [그림 8]은 미국 Camp Roberts지역에 대한 NASA/JPL L-band polarimetric SAR자료를 이용한 지표면 경사를 추출한 예



[그림 8] L-band polarimetric SAR 자료로부터 추출된 orientation angle^[7]

를 보여주고 있다.

4-2 POLSAR 자료를 이용한 토지피복 분류

자연계의 대부분 산란체들은 스펙클의 존재와 더불어 통계적으로 기술이 되어야 하기 때문에 이차 편파 표현식인 covariance 행렬([C])이나 coherency 행렬([T])이 주로 사용된다. 이러한 행렬로 표현되는 동일 class의 자연 산란체들은 가우시안 분포가 아닌 wishart 분포를 따르게 된다. 따라서 wishart 분포를 가정하고 전통적으로 분류에 주로 사용되는 maximum likelihood 기법을 적용하여 감독 분류(supervised classification)을 수행할 수 있다. 하지만 POLSAR자료의 경우 target decomposition을 통해(예를 들어 H/

$\bar{\alpha}$ 평면에서 정의된 8개 영역) 그 지역 산란체에 대한 해석이 가능하기 때문에 이 분류된 산란 특징을 초기 class로 지정하여 wishart 분포로 정의된 거리(distance)를 통해 k-mean 분류기법과 같은 반복적 처리를 통해 무감독분류(unsupervised classification)를 수행할 수 있다^[9]. 하지만 이 기법은 반복적인 연산이 수행되는 동안 산란체의 특징이 보존되지 않아 수렴성이나 색상 표현이 자연스럽지 못한 부분이 있어, target decomposition을 통해 분류된 산란특징을 보존하면서 분류가 이루어질 수 있는 기법도 개발되었다([그림 9]).

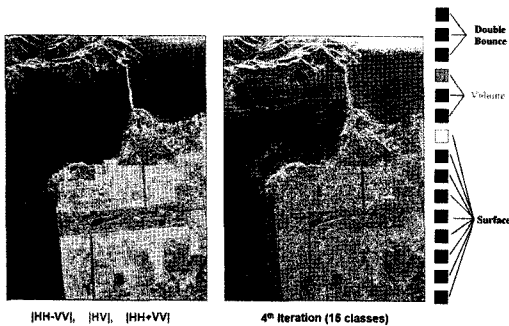
4.3 POLSAR자료로부터 지표 파라미터 (수분함유량, 표면 거칠기) 추출

SAR 자료의 후방산란계수(backscattering coefficient)는 지표면의 거칠기와 수분 함유량에 영향을 받는다. 하지만 두 가지 효과가 서로 결합되어 있으므로 하나의 편파 SAR 자료만으로는 이러한 두 성분을 추출하는데 어려움이 있다. POLSAR 자료의 경우 HH 편파와 VV편파는 물론 HV편파에 대한 정보를 동시에 획득할 수 있으므로 지표면 파라미터와의 경험적인 관계식을 통하거나^[14] 또는 이론적인 물리모델의 확장^[4]을 통해 역산을 수행하는 것이 가능하다. 3.2절

절에 소개된 고유치(Eigenvalue)-고유벡터(Eigenvector) 기반 decomposition을 통해 계산되는 비등방성(Anisotropy)은 지표면 수분함유량의 영향을 덜 받고 표면 거칠기에 의한 영향이 강조되어 $ks=1-A$ 를 통해 표면 거칠기를, 그리고 H와 $\bar{\alpha}$ 값을 통해 수분함유량을 각각 추출할 수 있다([그림 10]).

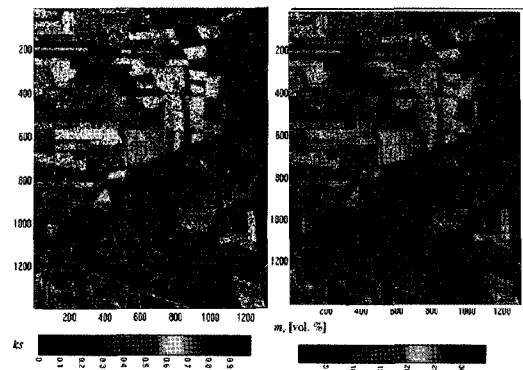
V. 결 론

이 논문에서는 최근 polarimetric SAR 시스템의 발전과 더불어 많이 연구되고 개발되어진 POLSAR 자료의 표현 방법 및 활용을 위한 기초 알고리즘 등을 살펴보고 대표적인 활용사례를 몇 가지만을 살펴보았다. 이 논문에서는 POLSAR와 관련되는 수많은 토픽들(예를 들어, 다양한 피복 분류 기법들, 스펙클 제거 방법, Pol-InSAR 자료를 이용한 식생 매핑 및 분류 등)을 모두 기술하지 못했다. 하지만 본 논문에 소개된 기본적인 행렬의 의미 및 변환 방법, decomposition 기법 등은 앞으로 POLSAR 자료를 이용하여 각 분야의 연구를 수행하는데 큰 도움이 될 수 있을 것으로 믿는다. 현재는 polarimetric SAR의 황금시대를 맞고 있으며, 앞으로 발사될 대부분의 인공위성



(a) Freeman-Durden decomposition 결과 (b) 산란특성이 보존되도록 수행된 무감독분류 결과

[그림 9] 샌프란시스코 POLSAR 자료를 이용한 분류 결과[Courtesy of J.S. Lee].



(a) 표면 거칠기 (b) 수분함유량

[그림 10] Elbe-Auen지역 POLSAR 자료로부터 추출된 지표면 파라미터 (좌) (우)

SAR 시스템들은 POLSAR 자료의 획득이 가능한 시스템으로 설계될 예정이다. 따라서 다중 주파수의 POLSAR 자료와 연속적 시계열 POLSAR 자료의 확보가 가능해서 무한한 활용이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] A. Freeman, S. L. Durden, "A three-component scattering model for polarimetric SAR data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 3, pp. 963-973, 1998.
- [2] D. L. Schuler, J. S. Lee, D. Kasilingam, and E. Pottier, "Measurement of ocean surface slopes and wave spectra using polarimetric SAR image data", *Remote Sensing of Environment*, vol. 91, pp. 198-211, 2004.
- [3] H. Wakabayashi, T. Matsuoka, K. Nakamura, and F. Nishio, "Polarimetric characteristics of sea ice in the sea of okhotsk observed by airborne L-band SAR", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 11, pp. 2412-2425, 2004.
- [4] I. Hajnsek, E. Pottier, and S. R. Cloude, "Inversion of surface parameters from polarimetric SAR", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 4, pp. 727-744, 2003.
- [5] J. J. van Zyl, "Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 27, no. 1, pp. 36-45, 1989.
- [6] J. S. Lee, D. L. Schuler, and T. L. Ainsworth, "Polarimetric SAR data compensation for terrain azimuth slope variation", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 5, pp. 2153-2163, 2000.
- [7] J. S. Lee, D. L. Schuler, T. L. Ainsworth, E. Krogager, D. Kasilingam, and W. M. Boerner, "On the estimation of radar polarization orientation shifts induced by terrain slope", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 1, pp. 30-41, 2002.
- [8] J. S. Lee, E. Pottier, *Polarimetric Radar Imaging: from Basics to Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2009.
- [9] J. S. Lee, M. R. Grunes, T. L. Ainsworth, L.-J. Du, D. L. Schuler, and S. R. Cloude, "Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex wishart classifier", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2249-2258, 1999.
- [10] S. R. Cloude, E. Pottier, "An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no. 1, pp. 68-78, 1997.
- [11] S. R. Cloude, K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR Interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, no. 5, pp. 1551-1565, 1998.
- [12] S. R. Cloude, *Polarisation: Applications in Remote Sensing*, Oxford University Press, 2010.
- [13] W. M. Boerner, M. B. El-Arini, C.-Y. Chan, and P. M. Mastoris, "Polarization dependence in electromagnetic inverse problems", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 29, no. 2, pp. 262-271, 1981.
- [14] Y. Oh, K. Sarabandi, and F. T. Ulaby, "An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 370-381, 1992.

≡ 필자소개 ≡

김 덕 진



1999년 2월: 서울대학교 지구시스템과학
과 (이학사)

2001년 2월: 서울대학교 지구환경과학부
(이학석사)

2005년 2월: 서울대학교 지구환경과학부
(이학박사)

2001년 9월~2002년 3월: 미국 NASA/
JPL(제트추진연구소) & 캐나다 University of Manitoba 방
문연구원

2005년 3월~2005년 10월: 서울대학교 기초과학연구원 박사
후연구원

2005년 10월~2006년 1월: 캐나다 University of Manitoba 박
사후 연구원

2006년 2월~2007년 6월: 미국 University of Michigan 박사
후 연구원

2007년 7월~2008년 8월: 한국항공우주연구원 선임연구원

2008년 9월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 조교수