

## EXOS-D 위성자료를 이용한 자기유체 파동 연구

황 정 선 · 이 동 훈  
경희대학교 우주과학과

### CASE STUDIES ON MHD WAVE PROPAGATION BY THE EXOS-D ELECTRIC FIELD MEASUREMENTS

Jeong-Seon Hwang and Dong-Hun Lee

Department of Astronomy and Space Science, Kyunghye University

(Received November 10, 1997; Accepted December 1, 1997)

#### 요 약

EXOS-D(Akebono) 위성의 전기장 자료를 이용하여 자기유체 파동에 대해 조사하였다. EXOS-D 위성은 다른 위성들에 비해 비교적 이심률이 큰 궤도를 돌고 있는데(근지점 고도: 275km, 원지점 고도: 10,500km), 이 조사에서는 위성이 1989년 10월 원지점 부근을 지나면서 측정된 자료(Magnetic Local Time이 9시에서 12시 사이, Magnetic Latitude는  $-30^\circ$ 에서  $0^\circ$  사이에 해당)를 이용하였으며, 그 중에서도 특히 L값이 약 2에서 3 사이에 있는 자료를 이용하여 지자기 적도 부근에서의 자기유체 파동 현상에 대해 조사하였다. 여기에서 사용된 EXOS-D 위성의 전기장 자료는 8초마다 평균한 값이며, 주파수 특성을 알아보기 위해 FFT를 수행하였다. 그 결과 플라즈마 구 내부에서의 자기력선 공명현상과 지구자기구의 cavity mode를 확인 할 수 있었다.

#### ABSTRACT

Magnetohydrodynamic wave phenomena have been investigated in the deep plasmasphere by the electric field measurements in the EXOS-D(Akebono) satellite. EXOS-D has highly eccentric orbits(the perigee: 274km, the apogee: 10,500km), which allows relatively long observational time interval near the apogee region compared to other satellites which pass by the same region with less eccentric orbits. Case studies are performed on one month data of October in 1989 where the apogee is located near the equator and the magnetic local time is about 9:00~12:00 a.m. in the dayside plasmasphere. The observational region ranges from L=2 to L=3 and the magnetic latitude is restricted to less than 30 degrees. The power spectrum is examined for each 128 point series of 8-sec averaged data through a FFT, which covers  $f=0\sim 62.3$  mHz frequency bands. The results are well consistent with field line resonances(FLRs) and cavity modes in the plasmasphere.

## 1. 서 론

지구자기구(magnetosphere)에는 태양풍 등과의 작용으로 발생하는 다양한 전류와 플라즈마파들이 존재한다. 관측되어지는 플라즈마파 중에서 주파수가 가장 낮은 영역의 파를 극초저주파수파(Ultra Low Frequency Wave, ULF Wave)라 하며, 주파수 영역은 대략 1mHz~1Hz 정도이다. 극초저주파수 파는 주기와 파장이 매우 크기 때문에 대부분 자기유체(MHD)파로 볼 수 있다.

지구자기구에서의 자기유체파는 횡파(transverse wave)와 압축성파(compressional wave)의 두 가지로 구별된다. 횡파는 자기장에 수직한 방향으로 일차원적 진동을 하면서 자기력선을 따라 전파하는 파이며 Alfvén 파라 부르기도 한다. 횡파의 주파수는 지구자기장의 세기와 플라즈마 밀도에 의해 결정되며 지구중심에서 멀어질수록 이들 값이 감소하므로 주파수도 연속적으로 감소하게 된다. 또한 횡파는 전도도가 매우 높은 이온층에서 반사되어 정상파(standing wave) 또는 harmonic 구조를 갖는다. 압축성파는 자기장의 압력변화에 의해 자기권 전체에 전달되는 파로서 Alfvén 압축성파(Alfvén compressional wave), 등방파(isotropic mode), 자기음파(magnetoacoustic wave) 등으로도 불린다. 압축성파는 태양풍 압력이 낮고 지자기 활동이 작을 경우에 이온층과 지구 중심 방향으로의 단혀진 경계에 의해 만들어지는 공동 모드(cavity mode)를 가질 수 있다.

자기유체파는 매질을 구성하는 플라즈마 입자들의 공간분포 등에 따라 그 성질이 달라진다. 매질이 균일(homogeneous)한 경우에는 이들 파가 각각 독립적으로 존재하나, 매질이 불균일(inhomogeneous)한 경우에는 항상 서로 혼합(coupling)되어지고 에너지를 교환하는 자기력선 공명현상(field line resonance)이 발생한다.

본 논문에서는 EXOS-D 위성의 전기장 자료를 분석하여 횡파와 압축성파의 혼합에 의한 자기력선 공명현상을 확인하였고, 압축성파의 주파수 스펙트럼으로부터 실제로는 관측되기 어려운 공동 모드를 발견하였다. 여기서는 지구자기구를 직육면체 모양의 공동으로 가정하여 공동 모드에서 나타날 수 있는 압축성파의 주파수 스펙트럼 성질을 조사하였는데, EXOS-D 위성의 관측자료와 비교해 본 결과 그 특성이 일치하였다. 이는 지구자기구의 공동 모드를 실제 관측자료로부터 확인하였다는 데 그 의미가 있다.

## 2. 지구자기구에서의 자기유체파동 이론

태양 표면이나 행성 대기권에서 비교적 멀리 떨어져 있는 우주공간을 고려하면 입자들의 열 운동이 작아지므로 차가운 플라즈마로 볼 수 있다. 이럴 경우 전기적 저항과 점성을 무시한 이상(ideal) 자기유체 방정식과 맥스웰 방정식으로부터 다음과 같은 간단한 파동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$(\vec{\nabla} \times \vec{B})_{\perp} = \frac{1}{V_A^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

여기서  $E$ 와  $B$ 는 각각 전기장과 자기장의 섭동량이고,  $V_A$ 는 Alfvén 속력으로  $B_0/\sqrt{\mu_0 \rho}$  ( $B_0$ 는 주변 자기장의 세기)이며,  $\perp$ 표시는 자기장에 수직한 성분임을 뜻한다.

매질이 균일한 경우에는 Alfvén 속력이 상수가 되며, 식 (1), (2)로부터 횡파(비압축성파)와 압축성파의 두 가지 독립적인 파가 유도된다. 이들 파의 분산방정식은 각각

$$\omega = k_{\parallel} V_A \quad (3)$$

$$\omega = k V_A \quad (4)$$

이다. 여기서  $\omega$ 는 주파수,  $k$ 는 파동수(wave number)이며,  $\parallel$ 는 자기력선과 나란한 방향을 나타낸다. 분산방정식에서도 알 수 있듯이 횡파는 자기력선을 따라서만 전파하고, 압축성파는 자기력선 방향과는 무관하게 지구자기구 전체에 전파될 수 있다. 이 두 가지 파는 매질이 균일하면 각각 독립적으로 존재하고 서로간의 에너지 교환은 발생하지 않는다.

그러나 실제의 지구자기구는 매질이 불균일하며, 이럴 경우에는 Alfvén 속력이 일정하지 않으므로 식 (1), (2)에서 두 개의 파동은 더 이상 독립적으로 존재하지 않는다. 즉 압축성파의 진동수와 횡파의 공명 주파수가 일치하는 자기력선 상에서 두 파가 혼합되어지고 압축성파의 에너지가 횡파에 전달되는 자기력선 공명현상이 발생하게 된다. Chen & Hasegawa(1974)와 Southwood(1974)는 자기력선 공명현상을 이론적으로 설명하였으며, 이에 관한 다양한 수치계산 작업이 지구자기구에서 cylindrical model(Allen *et al.* 1985, 1986), box model(Inhester 1987) 그리고 dipole model(Lee & Lysak 1989)을 이용하여 각각 이루어졌다. 이러한 파의 혼합에 의한 자기력선 공명현상은 지상 자력계 및 위성의 실제 관측자료를 통하여 확인할 수 있으며 (Takahashi & McPherron 1982, Yumoto *et al.* 1985), 공명이 일어났을 때 횡파의 주파수 스펙트럼을 조사해보면 그림 1과 같이 공명주파수에서 압축성파의 에너지를 전달받아 강한 peak를 보이게 된다. 이때  $f_0, f_1, f_2$ 의 각 공명주파수는

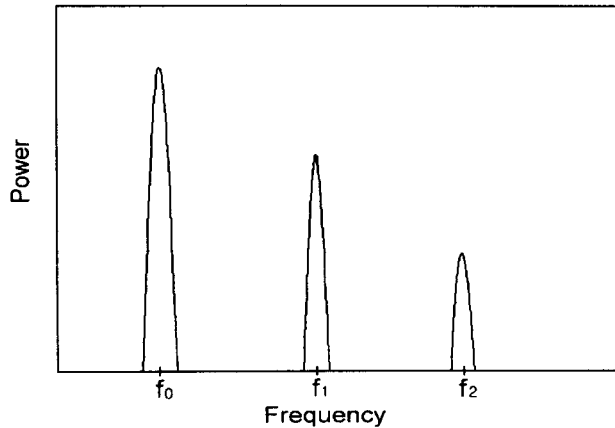


그림 1. 자기력선 공명현상이 일어났을 때의 횡파의 주파수 스펙트럼. 여기서  $f_0, f_1, f_2$ 는 공명주파수.

$$f_n = \frac{2\pi}{T_n} = \frac{2\pi n}{T_0}$$

$$T_0 = 2 \int \frac{dl_n}{V_A}$$

의 관계식을 만족한다.

### 3. 지구자기구의 공동 모드

지구자기구는 태양풍 압력이 낮고 지자기 활동이 작을 경우에 이온층 및 지구중심 방향으로의 경계에 의해 닫혀진 공동 모드를 가질 수 있다(Kivelson & Southwood 1986). 지구자기구에 공동이 형성되면 그 안에서의 압축성파의 주파수 스펙트럼은 공동이 형성되지 않았을 때와는 매우 다른 특성을 보이게 된다.

여기서는 간단하게 매질이 지구중심방향으로만 불균일하다고 보고, 각 경계에 의해 닫혀진 지구자기구를 box model로 가정하였다. 지구중심 방향을  $x$ , 방위각 방향을  $y$ , 자기력선 방향을  $z$ 로 놓고, 각 성분별로의 길이를  $X, Y, Z$ 라 하면, 지구자기구는  $Y$ 의 길이가  $X$ 나  $Z$ 에 비해 상대적으로 길기 때문에  $y$ 축으로 긴 직육면체가 된다. 이와 같은 직육면체 모양의 지구자기구 내에서 압축성파의 주파수를 조사해보자. 압축성파는 지구자기구 전체에 전파될 수 있는 파이므로, 식(4)에서  $k$ 는  $x, y, z$ 의 성분을 모두 가질 수 있다. 즉

$$\omega = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} V_A \tag{5}$$

이다. 모든 면이 닫혀져 있다고 보았으므로 압축성파는 각 성분별로 정상파의 특성을 갖는다.

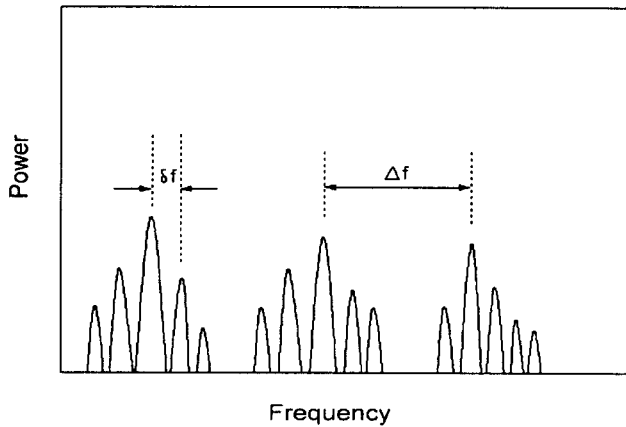


그림 2. 공동 내에 있는 압축성파의 주파수 스펙트럼.

즉  $x, y, z$  성분별 조화수(harmonic number)를 각각  $a, b, c$ 라 하면 이들은 모두 정수 값을 가지게 된다. 파동수를 조화수로 표현하면,

$$k_x = \frac{2\pi}{X}a, \quad k_y = \frac{2\pi}{Y}b, \quad k_z = \frac{2\pi}{Z}c$$

이므로 식(5)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\omega = 2\pi\sqrt{\left(\frac{a}{X}\right)^2 + \left(\frac{b}{Y}\right)^2 + \left(\frac{c}{Z}\right)^2} V_A \tag{6}$$

여기서  $Y$ 는  $X$ 와  $Z$ 에 비해 큰 값이므로 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{a}{X} \simeq \frac{c}{Z} \gg \frac{b}{Y} \tag{7}$$

위의 관계를 고려하면 압축성파는  $a_n/X, c_n/Z$  ( $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ )과 상대적으로 작은 값인  $b_n/Y$ 에 의해 harmonic구조를 갖게되며 주파수 스펙트럼은 그림 2와 같이 나타난다. 이때  $\Delta f$ 는 각각  $a$ 와  $c$ 의 harmonic 모드간의 주파수 차이이며,  $\delta f$ 는  $b$ 에 의한 harmonic 모드간의 주파수 차이를 나타낸다. 식(7)에 의해서

$$\frac{\delta f}{\Delta f} \ll 1 \tag{8}$$

의 관계가 성립한다.

#### 4. EXOS-D 위성과 관측자료

EXOS-D 위성은 1989년 2월 21일 23:30:00(UT)에 일본 우주항공연구소 (Institute of Space and Astronautical Science, ISAS)에 의해 발사된 과학위성이다. 이 위성은 ISAS의 과학위성 중 지구 외 기권(exosphere)의 관측을 위해 발사된 네 번째 위성으로 일본 이름은 Akebono이다(Tsuruda & Oya 1991).

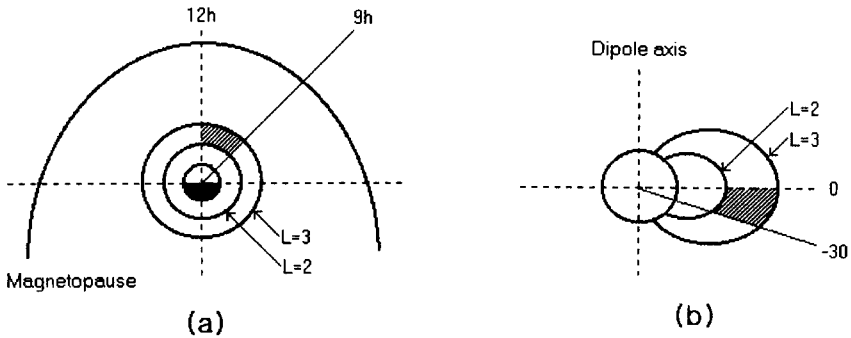


그림 3. L, MLT(a) 및 MLAT(b)별로 나타낸 1989년 10월의 EXOS-D 위성의 위치(빗금친 부분).

EXOS-D 위성의 궤도는 경사각이  $75.1^\circ$ 이며 근지점이 약 272km, 원지점이 약 10,482km로서 지구 근접 우주공간 탐사를 주임무로 한다. 이 위성에는 여러 종류의 입자 측정기 외에 고분해능 자력계와 전기장 측정을 위한 안테나가 탑재되어 있어서 자기유체파동을 측정하는데 매우 적합하다. 여기서는 위성에 탑재된 여러 과학 장비 중 전기장 측정기(EFD-P)의 자료를 이용하였다. 각 전기장 자료는 8초마다 평균한 값이며, 태양-지구 자기장 좌표계(GSM: Geocentric Solar Magnetospheric coordinate)를 사용하였다. GSM 좌표계는  $x$ 축이 지구 중심에서 태양을 향한 방향이고,  $y$ 축은  $x$ 축과 지구 dipole축에 모두 수직인 방향이며,  $z$ 축은  $x$ 와  $y$ 에 수직인 방향이다.

본 연구에서는 지구근접 자기저위도 부근의 자기유체파동을 조사하기 위해 EXOS-D 위성이 1989년 10월 원지점 부근을 지나면서 측정한 전기장 자료를 이용하였다. 이때의 EXOS-D 위성의 위치를 자기 지방시(Magnetic Local Time, MLT)와 L값 및 자기위도(Magnetic Latitude, MLAT)별로 그림 3에 나타내었다.

## 5. 자료분석 및 결과

1989년 10월 EXOS-D 위성의 전기장 자료를 모두 그래프로 그려본 결과 수십 개의 구간에서 일정한 주기를 가진 파동이 나타났다. 이와 같이 파동이 잘 나타난 구간마다 그 주파수 특성을 조사하기 위해 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하였다. 여기서는 편의상 GSM 좌표계를 VDH 좌표계로 변환하였다. VDH 좌표계는 dipole 원통 좌표계로  $H$ 축은 dipole축 방향이고,  $V$ 축은  $H$ 축을 기준으로 위성의 위치에서  $H$ 축에 평행한 축을 회전하여 원통을 그렸을 때 그 원통 면에서 수직하게 밖으로 나가는 방향이며,  $D$ 축은  $H$ 축과  $V$ 축에 수직인 방향이다. VDH 좌표계에서 전기장 자료는  $V$ 와  $H$ 성분이 횡파, 그리고  $D$  성분이 압축성파를 각각 나타내게 된다.

그림 4는 1989년 10월 19일 22:58~23:15(UT)에 나타난 파동과 그 주파수 스펙트럼의 모습이다. 그림 4(a)에서  $x$ 축은 자료점(data point)의 개수(또는 시간 간격)이며,  $y$ 축은 배경 값을 제거한 파동의 진폭이다. EXOS-D 위성의 전기장 자료는 각각 8초마다 평균한 값이므로 128개의 자료는 약 17분 간격이 된다. 이 구간에서 EXOS-D 위성의 평균 MLAT, MLT 및 L값은 각각  $10.20^\circ$ , 9.40시, 2.41이다. 그림 4(b)는 이 파동을 VDH 좌표계의 각 성분별로 FFT를 수행하여 얻은 것이다.  $x$ 축은 주파수,  $y$ 축은 spectral power이다. 여기서는 8초 평균 자료를 128개마다 FFT를 수행하였으므로 그 주파수 범위는 약  $0 \sim 62.3\text{mHz}$ 가 된다. 먼저 횡파를 나타내는  $V$ 와  $H$ 성분의 그래프를 살펴보자. 이 두 성분의 주파수 스펙트럼 모양은 전반적으로 매우 비슷함을 알 수 있다.

두 성분 모두 약 22mHz와 50mHz에서 power값에 강하고 뚜렷한 peak가 나타났으며 그 외의 주파수에서는 대체로 power값이 매우 낮게 나타났다. 이와 같이 특정 주파수(22mHz, 50mHz)에서만 power가 강하게 나타난 것은, 2장에서 설명했듯이 자기력선 공명현상의 뚜렷한 증거로 볼 수 있다. 즉 각각의 자기력선마다 고유한 진동수로 진동하고 있던 횡파가 다양한 주파수를 갖고 있는 압축성파와 만나게 되면, 압축성파의 진동수와 횡파의 공명주파수가 일치할 때 횡파는 압축성파의 에너지를

흡수하게 되므로, 공명이 일어난 주파수에서 그 주파수 스펙트럼을 조사해 보면 강한 power의 peak가 나타나게 되는 것이다. 이러한 자기력선 공명현상은 공명이 일어난 특정 주파수에 한하며 그 외의 주파수에서는 발생하지 않는다. 또한 자기력선을 따라서 전파하는 횡파는 전도도가 매우높은 이온층에서 반사되어 정상파의 특성을 갖게 되므로, 여기서 power값이 높게 나타난 22mHz 및 50mHz는 횡파의 fundamental mode 및 그 harmonics에 해당하는 주파수로 볼 수 있다.

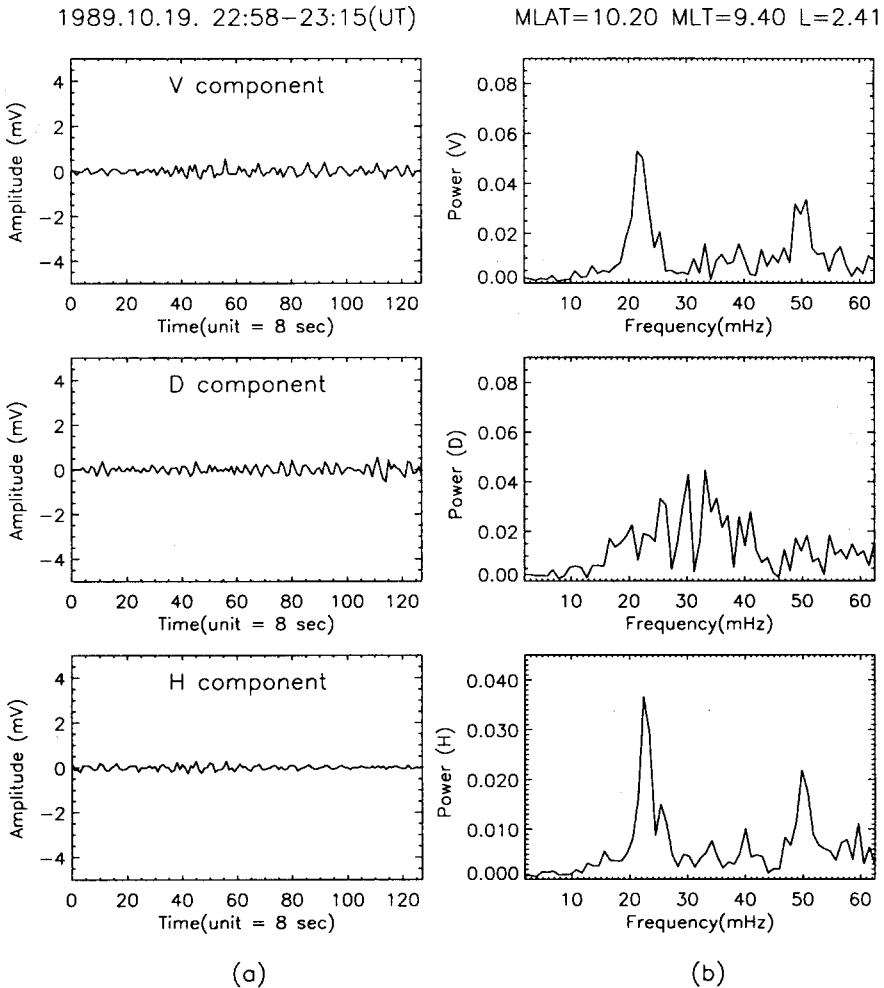


그림 4. 1989년 10월 19일 22:58~23:15(UT)에 나타난 파동(a)과 주파수 스펙트럼(b).

다음으로 압축성파를 나타내는  $D$ 성분의 주파수 스펙트럼을 살펴보자.  $D$ 성분은 횡파를 나타내는  $V$ 나  $H$  성분과는 매우 다른 주파수 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 즉  $V$ 나  $H$  성분에서 power가 강하게 나타났던 22mHz나 50mHz에서는 별다른 power의 peak가 보이지 않고, 약 20~40mHz에 걸친 넓은 주파수대에서 3~5mHz 간격의 상대적으로 약한 power의 peak가 여러개 나타났다. 이러한 압축성파의 주파수 스펙트럼은 3장에서 설명했듯이 공동 모드에서 나타날 수 있는 압축성파의 주파수 스펙트럼과 그 특성이 일치한다. 3장에서 지구자기구를 경도방향( $y$ )으로 긴 직육면체의 닫혀진 공동으로 보았을 때 나타나는 압축성파의 주파수와 그 주파수 스펙트럼을 그림 2에 제시하였으며, 이를 실제의 관측자료로부터 얻은 결과인 그림 4(b)와 비교해 보면, 그림 4(b)의  $D$ 성분 그래프에서 20~40mHz 구간에 약 3~6mHz 간격으로 여러 개의 주변 peak들이 나타난 것은 경도방향 파동수  $b$ 에 의해 harmonic 구조로 나타난 것임을 알 수 있다.

1989년 10월 23일 10:37부터 약 17분 동안 나타난 또 다른 파동의 경우를 살펴보자. 이 때 위성의 평균 MLAT, MLT 및 L값은 각각  $-13.4^\circ$ , 10.0시 그리고 2.78이었다. 그림 5(b)에서  $V$ 성분은 약 28mHz에, 그리고  $H$ 성분은 약 26~30mHz에서 peak가 나타났고, 주파수 스펙트럼의 모양이 같은 특징을 보인다. 이 또한 앞의 파동의 경우와 마찬가지로 그 주파수에서 자기력선 공명현상이 발생하였다고 볼 수 있다.  $D$ 성분도 역시 앞에서와 같이  $V$ 나  $H$  성분과는 전혀 다른 결과를 보이고 있으며, 10mHz와 30mHz를 중심으로 넓은 주파수대에 걸쳐 2~3mHz 간격으로 비교적 작은 peak들이 나타났다. 이를 3장에서 설명한 이론과 비교해 보면, 10mHz와 30mHz대를 중심으로 power의 peak가 나타난 것은 지구중심 방향 파동수  $a$ 나 자기력선 방향 파동수  $c$ 에 의해 나타난 harmonic 구조이며, 여기에 다시 2~3mHz 간격으로 나타난 여러 개의 주변 peak들은 경도방향 파동수  $b$ 에 의한 harmonics로 볼 수 있다.

마지막으로 그림 6의 1989년 10월 27일 20:41~20:58(UT)에 관측된 파동의 경우를 알아보자. 이 때 위성의 평균 MLAT, MLT 및 L값은 각각  $19.10^\circ$ , 8.40시 그리고 2.56이었다. 그림 6(b)에서  $V$ 와  $H$ 성분의 주파수 스펙트럼을 보면 약 40mHz에서 뚜렷하고 강한 peak가 나타났고,  $D$ 성분에서는 22~32mHz구간에 걸쳐 여러 peak들이 분포되어 있으며 이들간의 주파수 간격은 약 5~6mHz 정도로 나타났다.

위에서 살펴본 세 가지 파동의 주파수 스펙트럼 결과를 종합해보자. 먼저 횡파의  $V$ 와  $H$  성분에서는 한 두 개 정도의 특정 주파수에서만 강하고 뚜렷한 power의 peak가 나타났다. 이 특정 주파수는 횡파와 압축성파간의 혼합에 의해 자기력선 공명현상이 발생한 공명주파수(또는 그 harmonics)로 볼 수 있다. 이러한 현상은 압축성파의 진동수와 횡파의 공명주파수가 일치될 때 발생하며 횡파는 압축성파의 에너지를 흡수하게 되므로, 이때 횡파의 주파수 스펙트럼을 보면 공명주파수(또는 그 harmonics)에서만 큰 peak를 이루게 된다. 압축성파를 나타내는  $D$ 성분의 주파수 스펙트럼 결과를 종합해보면, 그 모양이 횡파의 경우와는 매우 다르며, power의 peak도 비교적 약하며 약 10, 20, 30mHz를 중심으로 각각 10mHz정도의 넓은 주파수대에 걸쳐 2~6mHz 간격의 주변 peak들이 여러 개씩 존재하고 있다.

이는 지구자기구를 경도방향으로 긴 box model의 공동으로 보았을 때 나타날 수 있는 압축성파



의 주파수 스펙트럼과 그 특성이 일치한다. 따라서 이들 D성분의 주파수 스펙트럼은 모두 공동 모드에서의 스펙트럼임을 알 수 있다.

### 6. 결 론

지구자기구에서 발생하는 극초저주파수 파는 대부분 자기유체파이며 횡파와 압축성파의 두 가지로 구별된다. 횡파는 자기력선을 따라서만 전파하는 파이고, 압축성파는 자기력선 방향과는 상관

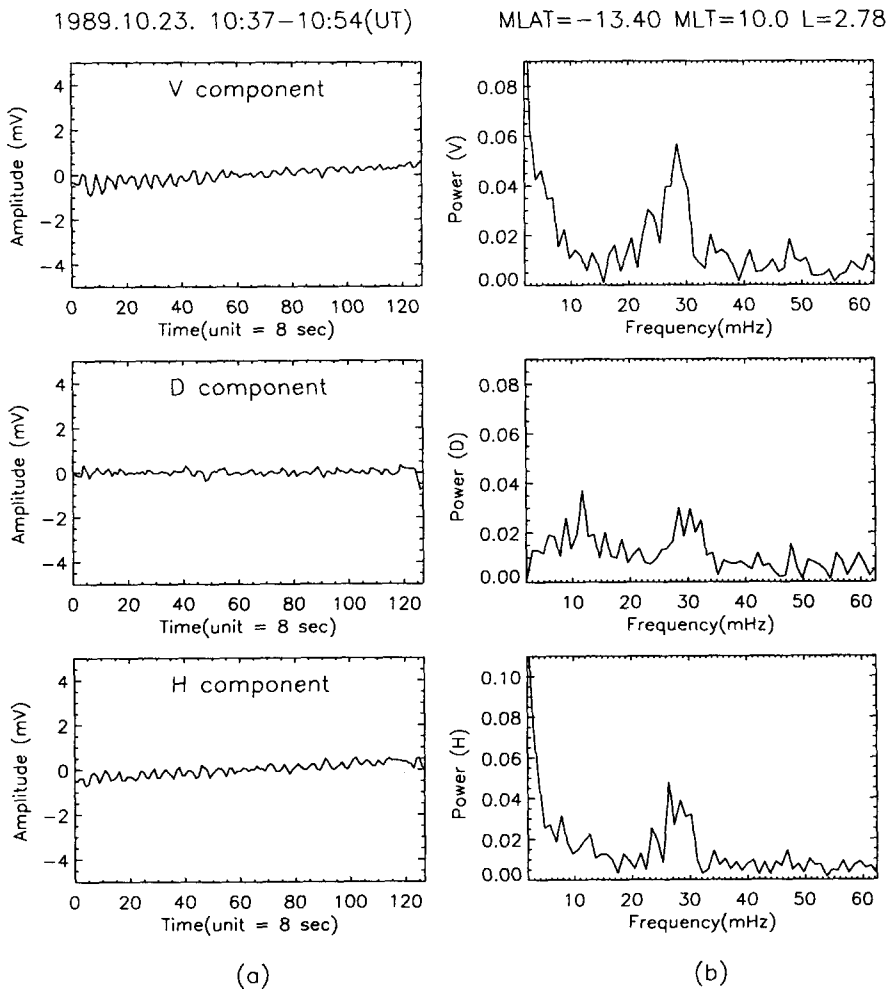


그림 5. 1989년 10월 23일 10:37~10:54(UT)에 나타난 파동(a)과 주파수 스펙트럼(b).

없이 지구자기구 전체에 전달되는 파이다. 이 두 파는 매질이 균일한 경우에는 각각 독립적으로 존재하나, 실제의 지구자기구에서와 같이 매질이 불균일한 경우에는 항상 서로 혼합되고 에너지를 교환하게되는 자기력선 공명현상이 발생한다. 이러한 현상은 압축성파의 진동수와 횡파의 공명주파수가 일치하는 자기력선 상에서 발생하며, 위성 및 지상자력계 자료를 통해 확인할 수 있다. 또한 지구자기구는 이온층 및 지구중심 방향으로의 닫혀진 경계에 의해 공동 모드를 가질 수 있는데, 이러한 지구자기구의 공동 모드는 실제의 관측자료를 통해 확인하기가 매우 힘들다. 이는 지구자기구에 공동

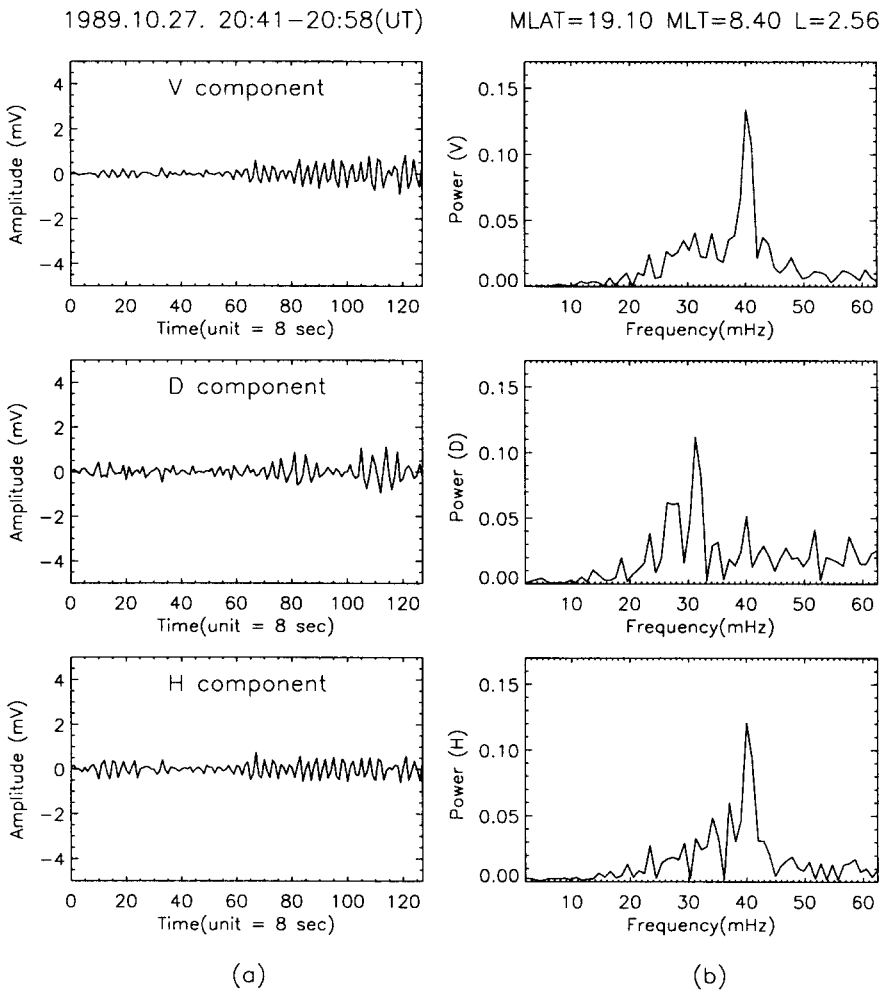


그림 6. 1989년 10월 27일 20:41~20:58(UT)에 나타난 파동(a)과 주파수 스펙트럼(b).

이 형성되려면 파동주기에 비해서 비교적 오랜 시간동안 태양풍 압력과 자자기 활동 등이 안정된 환경이 형성되어야하기 때문이다.

본 논문에서는 EXOS-D 위성의 전기장 자료로부터 횡파와 압축성파의 혼합에 의한 자기력선 공명현상을 확인하였으며, 압축성파의 주파수 스펙트럼으로부터 실제의 관측 자료를 통해서 발견되기 어려운 지구자기구의 공동 모드를 확인 할 수 있었다. 본 논문에서는 EXOS-D 위성의 전기장 자료만을 이용하였는데, 향후 지상 자력계 및 다른 위성들의 자료와도 비교 분석해볼 계획이다.

**감사의 글:** 이 논문은 과학재단 특정기초연구비(96-0702-0301-3)와 교육부 기초과학연구소 학술연구 조성비(BSRI 96-5408) 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Allan, W., White, S. P. & Poulter, E. M. 1985, *Geophys. Res. Lett.*, 12, 287  
 Allan, W., White, S. P. & Poulter, E. M. 1986, *Planet. Space Sci.*, 34, 371  
 Chen, L. & Hasegawa, A. 1974, *J. Geophys. Res.*, 79, 1024  
 Inhester, B. 1987, *J. Geophys. Res.*, 92, 4751  
 Kivelson, M. G. & Southwood, D. J. 1986, *J. Geophys. Res.*, 91, 4345  
 Lee, D. H. & Lysak, R. L. 1989, *J. Geophys. Res.*, 94, 17097  
 Southwood, D. J. 1974, *Planet. Space Sci.*, 22, 483  
 Takahashi, K. & McPherron, R. L. 1982, *J. Geophys. Res.*, 87, 1504  
 Tsuruda, K. & Oya, H. 1991, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 293  
 Yumoto, K., Saito, T., Akasofu Syun-Ichi, Tsurutani, B. T. & Smith, E. J. 1985, *J. Geophys. Res.*, 90, 6439