

위성 및 지상자력계에서의 PI 2 파동 동시 관측

이 성 환 · 이 동 훈

경희대학교 우주과학과

김 관 혁

Solar-Terrestrial Environmental Laboratory, Nagoya University

SIMULTANEOUS OBSERVATIONS OF PI 2 PULSATIONS ON THE SATELLITE AND GROUND-BASED MEASUREMENTS

S. H. Lee, D. H. Lee

Department of Astronomy and Space Science, Kyunghee University

K. H. Kim

Solar-Terrestrial Environmental Laboratory, Nagoya University

(Received November 10, 1997; Accepted November 27, 1997)

요 약

1989년 2월에 일본의 우주과학연구소(ISAS: Institute of Space and Astronautical Science)에서 발사한 과학위성 EXOS-D의 전기장 측정기와 지자기 자오선 동경 190/210 선상에 위치하고 있는 17개의 지상자력계들로부터 1994년 11월 09일 18시 50분부터 약 20분에 걸쳐 Pi 2 파동이 검출되었다. 우리가 이용한 지상자력계는 지자기 경도는 동경 185.02에서 동경 269.36사이, 지자기 위도는 -37.09에서 65.67사이에, L값은 1.00에서 5.89사이에 위치하고 있다. 또한 같은 시각에 또 다른 위성 ETS-VI의 자기장 측정기의 자료와 지상의 Kakioka(지자기 동경 208.00, 지자기 위도 26.70), Hermanus(지자기 동경 82.97, 지자기 위도 -33.78)지상자력계의 자료도 함께 사용하여 비교하여 보았다. Pi 2 파동의 주파수를 알아내기 위하여 FFT를 이용하였으며, L값이 2.35인 EXOS-D 위성과 지상자력계들에서는 주파수가 약 25mHz에서 최대값을 보였으나, L값이 6.60인 ETS-VI 위성에서는 같은 주파수가 검출되지 않았다. 또한 지상자력계 중에서 MUT 지상자력계 의 자료를 기준으로 하여 위성들과 나머지 지상자력계들간의 상관관계, 위상차를 조사하여, 발견 된 Pi 2 파동현상이 플라즈마구내에서 형성된 공동(cavity) mode에 의한 현상임을 알 수 있었다.

ABSTRACT

We have investigated Pi 2 pulsations which were observed both on ground magnetometer array and by satellites. On November 9th in 1994, Pi 2 pulsations appeared globally on the 190/210 magnetometer chain and Hermanus station when two satellites(EXOS-D

and ETS-VI) were located near the magnetic meridian of the 210 array. The local time of measurements covers from morning(LT=8.47hr) to afternoon(LT=20.3hr) and the bandwidth of peak frequency is found relatively small. The signals of the electric field measurement on board the EXOS-D, which is located inside the plasmasphere(L=2.35), are highly coherent with the ground-based observations with the out of phase oscillations. However, the magnetic field measurement on the ETS-VI in the outer magnetosphere(L=6.60) shows no signature of Pi 2 pulsations over the same time interval and the correlation with any of ground-based stations is found to be very weak, even though both satellites and magnetometer chain are located close to each other in local time. We suggest that this event may be a direct evidence of Pi 2 pulsations as virtual resonant modes which are localized in the plasmasphere(Lee 1996). The results show that the cavity mode oscillations can occur in the inner magnetosphere with less spectral noise compared to the outer magnetospheric case.

1. 서론

우주로부터 관측되어지는 전자기파에는 극초단파로부터 지구 반경의 몇 배에 해당하는 길이를 가지는 극초저주파까지 다양한 파동들이 존재하고 있다. 이 중에서 주파수가 1mHz에서 1Hz까지의 매우 낮은 주파수의 파동들을 극초저주파수(ULF: Ultra Low Frequency) 파동이라고 부른다. 극초저주파수 파동들은 특성과 주기에 따라 Pc(Continuous pulsations)와 Pi(Irregular pulsations)로 나누어진다(Jacob *et al.* 1964). Pc 파동은 주파수대가 좁으며 발생한 파형이 오래 유지되는 파동들을 나타내며, Pi 파동은 주파수대가 넓으며 파형의 존재가 짧은 특성을 가지고 있다. 이 분류는 표 1과 같이 다시 각각의 주파수대에 의해 세밀히 분류되어 Pc 파동은 1-5와 Pi 파동은 1, 2로 나누어진다. 지구주위의 자기권은 태양과 지구의 위치에 따라서 그 모습과 현상들이 다양하게 나타나고 있다. 지구가 태양을 바라보고 있는 지역을 명부(dayside)라고 하며, 그 반대의 면을 암부(nightside)라고 한다. nightside에서 주로 발생하는 Pi 2 파동은 파동의 존재시간이 비교적 짧으며 주파수대는 넓은 특징을 가지고 있다. 또한, 고위도보다는 저위도 지역에서 Pi 2 파동이 깨끗하게 관측이 되어지고 있는데, 적도지역의 경계주파수에 의한 경계가 비교적 얇아 Pi 2 파동이 뚫고 들어오기 쉽기 때문인 것으로 알려져 있다(Lee 1996). 주기는 40초에서 150초 사이의 값을 가지고 있다. 이러한 Pi 2 파동의 생성원인은 소폭풍(substorm)과 같은 급격한 충격에 의하여 생성된 압축성파라고 여겨지고 있다(Baumjohann & Glassmeier 1984). 이러한 Pi 2 파동의 발생원인은 아직 완전히 규명된 것은 아니다. Pi 2 파동의 생성원리를 이해 하기 위하여 여러 가지 모델들이 주장되어졌다. Lanzerotti & Fukunishi(1974), Orr(1975), Saito *et al.* (1976)는 Pi 2 파동현상은 플라즈마 권계면(plasmapause)에서의 자기력선 진동(field line oscillation)에 의한 것이라고 했으며, 또 다른 모델로는 Southwood & Stuart(1980)의 플라즈마 권계면(plasmapause)에서의 파동현상에 의한 것이 있다. 그러나 최근에는 많은 학자들이 저위도 Pi 2 파동현상은 global cavity mode oscillation(Sutcliffe & Yumoto 1989, 1991, Yumoto *et al.* 1990, Lin *et al.* 1991)과 보다 유사한 현상이라는 증거들을 제시하고 있다. Lee(1996)는 쌍극자 좌표계에서의 수치적 계산을 통하여 바깥쪽 경계가 존재하지 않는 플라즈마구 내에서도 공동(cavity)

표 1. ULF의 주기별 분류.

Type	Continuous pulsations (Period range(sec))	Type	Irregular pulsations (Period range(sec))
Pc 1	0.2 - 5	Pi 1	1 - 40
Pc 2	5 - 10	Pi 2	40 - 150
Pc 3	10 - 45		
Pc 4	45 - 100		
Pc 5	150 - 600		

mode 가 존재할 수 있음을 보였으며 이러한 결과는 특히 암명부에서 발생하는 Pi 2 파동의 생성에 매우 중요한 역할을 하고 있음을 증명하였다. 본 논문에서는 두 개의 위성과 18개의 지상자력계의 자료를 이용하여 Pi 2 파동의 상관관계와 위상차를 조사하여 공동 mode와 비교하여 보았다.

2. 사용자료 및 파동현상

2.1 EXOS-D (Akebono)

일본의 4번째 과학위성인 EXOS-D는 1989년 2월 21일에 발사되었으며 근지점은 약 274km, 원지점은 10666km이며 궤도 경사각은 75, 궤도주기는 213분이다. EXOS-D에는 전기장 측정장치와 자기장 측정장치를 장착하고 있다. 본 논문에서는 EXOS-D 위성의 전기장 자료를 사용하였다. 표 2에서 주어진 자료의 분해능은 0.3mV/m이며 sampling time은 8초이다(Oya & Tsuruda 1990, Hayakawa *et al.* 1990). 전기장 자료의 성분은 GSM좌표계(Geocentric Solar Magnetospheric Coordinate)의 값이다(Russell 1971). 1994년 11월 9일 18시 50분부터 19시 10분(UT)의 20분간의 파동현상을 사용하였다. 그림 1(a)는 EXOS-D 위성의 같은 시각의 전기장 그림이다. 함께 사용한 ETS-VI 위성의 좌표계인 VDH 좌표로 변환하여 나타내었다. 모든 성분에서 파동의 모습을 볼 수가 있다. 이 때의 위성의 위치는 MLT(Magnetic Local Time)는 4h, L값은 2.3에서 2.6에 위치하고 있으며(그림 5 참조), 따라서 저위도의 nightside의 플라즈마구 내에 위치하고 있음을 알 수 있다.

2.2 ETS-VI (Engineering Test Satellite-VI)

1994년 8월 28일에 발사되어 1996년 7월 5일까지 작동한 위성으로 근지점은 2.3Re(Re: 지구 반경), 원지점은 7.1Re이며, 궤도경사각은 13.4, 궤도주기는 14.4시간이다. 이 위성의 목적은 배나 자동 차등에서의 통신용이나, MAM이라고 불리는 자기장 측정장치도 함께 탑재되어있다. 이 자기장 측정장치는 삼축방식으로 되어 있으며 신호를 3초 간격으로 받아들이게 되어있다. 또한 궤도에 따라 두 가지의 분해능으로 작동하게 되어있다. 궤도가 5.0Re보다 작을 때에는 분해능이 32nT 로, 5.0-7.1Re일 때에는 0.125nT로 작동하게 되어있다(표 2).

그림 1(b)는 같은 시각의 ETS-VI 자기장 측정장치에 의해서 관측된 그림이다. EXOS-D 위성에서 보였던 것과는 달리 파동현상이 나타나지 않았다. 이 때의 위성의 위치는 L값이 6.6에서 6.9사이로 플라즈마구 바깥쪽에 위치하고 있다.

표 2. EXOS-D 위성과 ETS-VI 위성의 성능.

	EXOS-D(electric field)	ETS-VI(magnetic field)
근지점	270 km	2.3 Re
원지점	10000 km	7.1 Re
궤도주기	210 min	14.4 hour
Sample time	8 sec	3 sec
분해능	0.3 mV/m	5.0 Re 보다 작을 때 32 nT 5.0 -7.0 Re 일 때 0.125 nT
사용 좌표	GSM coordinate	VDH coordinate

2.3 지상자력계

본 논문에서 사용한 지상자력계들은 크게 3개로 나눌 수 있다. 210 MM(Magnetic Meridian) 지자기 연속관측망, Kakioka 자력계, Hermanus 자력계로 나눌 수가 있다. 210 MM선상에 위도별로 지상자력계들을 설치하여 ULF 파동들의 전파과정과 특성의 연구가 주목적인(Yumoto et al. 1992) 210 지자기 연속관측망의 출력 성분은 H(North-South), D(East-West), Z(Upward-Downward)의 성분으로 구성되어 있으며, 자료의 분해능은 0.01nT, sampling time은 1.0초이다. 본 논문에서는 17개의 지상자력계의 자료를 사용하였다. 지상자력계의 위치는 지자기 위도 -37.09에서 65.67, 지자기 경도 동경 185.02에서 동경 269.36, L값은 1에서 5.89사이에 분포되어 있다(그림 2와 표 3 참조).

Kakioka 자력계는 210 지자기 연속관측망에 가입이 되어있지는 않으나 일본의 지상 자력계 중에서 가장 오래된 자력계로서 본 논문에서 함께 다루었다. 이 자료의 성능은 210 지자기 연속관측망의 성능과 동일하다.

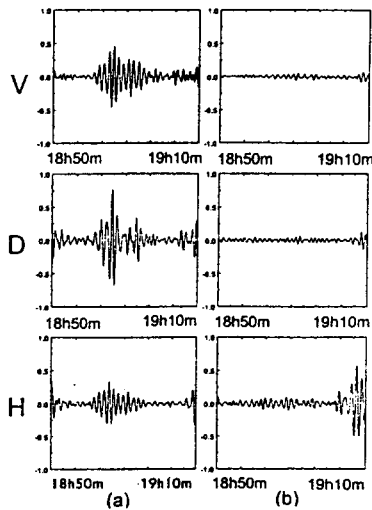


그림 1. EXOS-D 위성과 ETS-VI 위성의 자료.

표 3. 지상자력계들의 위치.

Station name	Abbrev.	Geographic Lat.	Geographic coord. Long.	Geomagnetic Lat.	Geomagnetic coord. Long.	L 값
Tixie	TIX	71.59	128.78	65.67	196.88	5.89
Muntinlupa	MUT	14.37	121.02	3.58	191.57	1.00
Learmonth	LEM	-22.22	114.10	-34.15	185.02	1.46
Chokurdakh	CHD	70.62	147.89	64.67	212.12	5.46
Zyryanka	ZYK	65.75	150.78	59.62	216.72	3.91
Maganda	MGD	59.97	150.86	53.56	218.66	2.83
Moshiri	MSR	44.37	142.27	37.61	213.23	1.59
Onagawa	ONW	38.43	141.47	31.65	212.51	1.38
Kagoshima	KAG	31.48	130.72	25.13	202.24	1.22
Chichijima	CBI	27.15	142.30	20.59	213.00	1.14
Guam	GAM	13.58	144.87	4.57	214.76	1.01
Biak	BIK	-1.08	136.05	-12.18	207.30	1.05
Darwin	DRW	-12.40	130.90	-23.13	202.68	1.18
Weipa	WEP	-12.68	141.88	-22.99	214.34	1.18
Birdsville	BRV	-25.54	139.21	-36.58	212.96	1.55
Dalby	DLB	-27.18	151.20	-37.09	226.80	1.57
Ewa Beach	EWA	21.32	202.00	22.67	269.36	1.17
Kakioka	KAK	36.13	140.11	26.70	208.00	1.25
Hermanus	HER	-34.42	19.23	-33.78	82.97	1.45

Kakioka 자력계의 위치는 지자기 위도 26.70, 지자기 경도 동경 208.00, L값은 1.25이다(표 3). 또한 남아프리카공화국에 위치한 Hermanus 자력계(지자기 위도 33.78, 지자기 경도 동경 82.97, L값은 1.45)로서 지구의 전역에 걸쳐서 Pi 2 파동이 나타나고 있다는 것을 보기 위하여 함께 사용하였다(표 3). 같은 시각(18시50분 - 19시10분(UT))의 지자기 경도 210에 위치하고 있는 17개의 자력계들과 Kakioka 자력계, Hermanus 자력계와 비교해본 결과, 역시 파동현상이 나타나고 있었다.

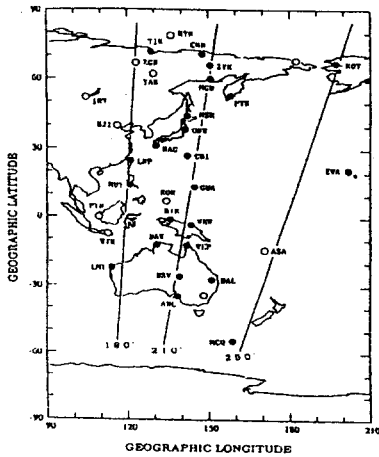


그림 2. 210 지자기 연속관측망의 위치.

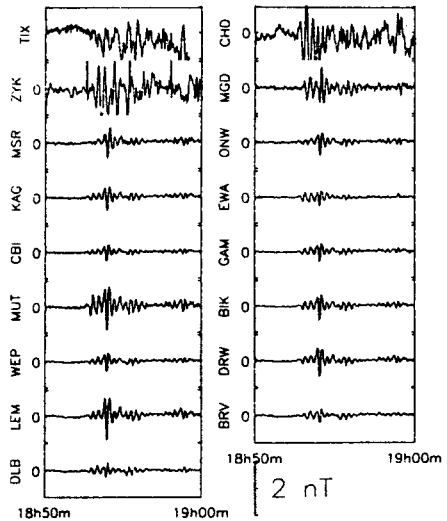


그림 3. 지상자력계들에서의 자료.

210 지자기 연속관측망의 모든 자력계들의 자료에서도 위도별로 반응한 크기는 다르지만, 파동현상이 존재함을 알 수 있으며, 210 지자기 연속관측망에서 경도 방향으로 멀리 떨어져 있는 Hermanus 자력계에서도 역시 관측이 되었다(그림3, 4). 그림 4는 Kakioka, Hermanus 자력계들의 자료 중에서 H성분의 미분한 값(dH/dt)을 그래프로 나타낸 것이다. 그림 3은 총 18개의 자력계들의 H성분의 변화하는 정도만을 명확히 보기 위해 미분한 값으로 나타내어 보았다. 모든 자력계들에서 파동현상이 존재하고 있음을 알 수 있다.

3. 자료 분석

3.1 위성 자료

이 때의 주파수대를 알아보기 위하여 모든 자료들에 대하여 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행하였다. 그림 6은 위성의 자료에 대하여 FFT를 수행한 결과를 나타낸 그림이다. 모든 성분에 대하여 미분한 값을 이용하였다. EXOS-D 위성의 V와 H성분은 25mHz에서 최대값을 보이고 있으나 D성분에서는 다른 성분과는 달리 비교적 넓은 주파수대에서 최대값을 보이고 있으므로 D성분이 압축성파 성분이라고 할 수 있다. ETS-VI 위성은 EXOS-D 위성과 지상자력계들의 자료와는 달리 특별한 파동 현상이 보이지 않았는데, FFT 수행한 결과에서도 25mHz에서 최대값이 나타나지 않았다.

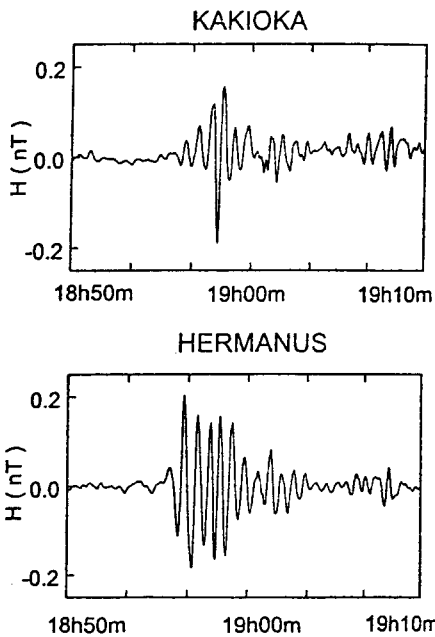


그림 4. Kakioka와 Hermanus 지상자력계의 자료.

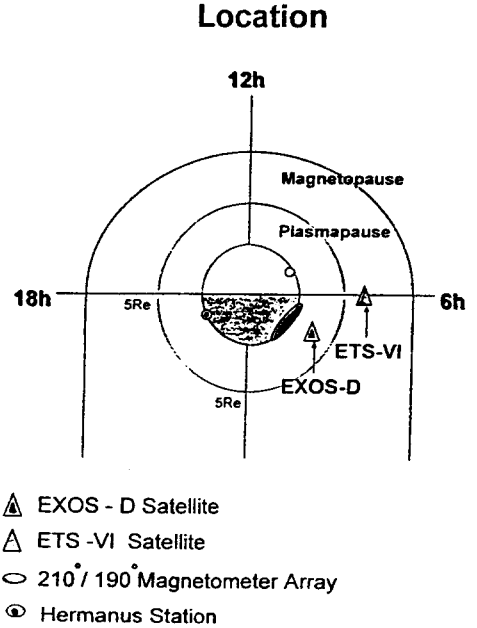


그림 5. 위성들과 지상자력계들의 위치.

3.2 지상자력계

그림 7은 지상자력계 중에서 210 지자기 연속관측망에 속해있는 MUT(Multinlupa), KK(Kakioka), 남아프리카 공화국에 위치한 HER(Hermanus)자료의 dH/dT 성분에 대하여 FFT를 수행한 결과를 보여준다. 3개의 지상자력계 자료들의 FFT 수행결과를 보면 EXOS-D 위성과 마찬가지로 25 mHz에서 최대값이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 210 지자기 연속관측망의 나머지 16개의 자력계 자료에서도 MUT 지상자력계와 마찬가지로 같은 주파수에서 최대값이 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 HER 지상자력계의 자료에서도 25mHz에서 최대값을 볼 수 있는데, 이것은 Pi 2 파동이 지구의 일부 지역에서만 발생한 것이 아니라 지구 전역에 걸쳐서 나타났다는 것을 관측적으로 알려 주고 있다.

3.3 상관관계와 위상차 계산

상관관계 함수(coherence function)란 임의의 자료들간의 상관관계를 나타내는 함수이다(William *et al.* 1992, Bendat & Piersol 1986). 상관관계 함수는 최소 0 값에서 최대 1까지의 값을 가지게 된다. 파동자료 분석시 일반적으로 상관관계 함수의 값이 0.6 이상인 경우에 두 함수간에 상관관계가 있다고 말하며 0.6 이하인 경우에는 상관관계가 작다라고 한다. 우주공간에서 검출된 자료와 지상에서 검출한 자료들에는 지자기구의 섭동 및 교란 등의 여러 가지 원인에 의한 파장들이 섞여 있다. 이런 이유로 두 파장이 같은 신호인지의 구별이 불분명해진다. 본 논문에서 상관관계 함수를 수행하는 목적은 두 위성과 18개의 지상자력계들에서 나타난 파동현상들이 서로 얼마나 상관관계를 가지고 있는지

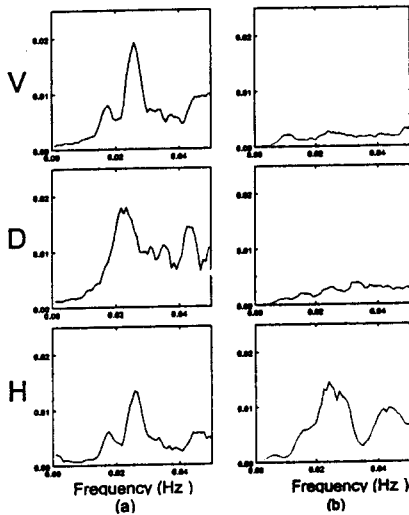


그림 6. EXOS-D 위성과 ETS-VI 위성의 주파수 스펙트럼.

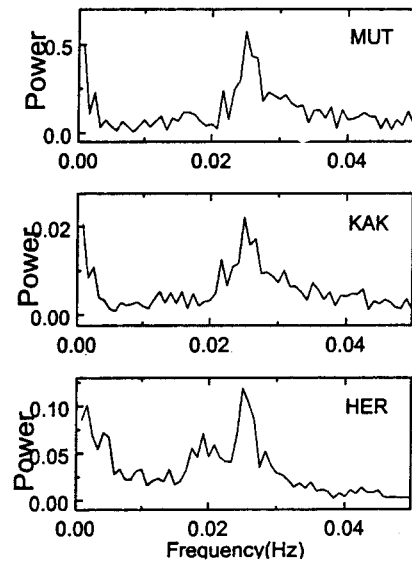


그림 7. 지상자력계들의 주파수 스펙트럼.

표 4. Coherence 값과 L값과의 관계.

Station	L 값	Coherence γ	Cross phase Φ (deg)	Corrected cross phase $\Phi_c = \Phi - \Phi_{avg}$
Tixie(TIX)	5.89	0.194		
Chokurdakh(CHD)	5.46	0.476		
Zyryanka(ZYK)	3.91	0.941	-38.74	-13.30
Maganda(MGD)	2.83	0.953	-87.04	-61.60
Moshiri(MSR)	1.59	0.944	3.94	29.38
Dalby(DLB)	1.57	0.977	-68.36	-42.92
Birdsville(BRV)	1.55	0.930	-46.85	-21.41
Learmonth(LEM)	1.46	0.993	9.29	34.73
Onagawa(ONW)	1.38	0.964	-2.80	23.64
Kakioka(KAK)	1.25	0.982	-85.1	16.93
Kagoshima(KAG)	1.22	0.994	0.11	25.55
Darwin(DRW)	1.18	0.994	-5.66	19.78
Weipa(WEP)	1.18	0.978	-24.33	1.11
Ewa Beach(EWA)	1.17	0.970	-21.23	4.21
Chichijima(CBI)	1.14	0.990	-42.42	-16.98
Biak(BIK)	1.05	0.996	-21.57	3.87
Guam(GAM)	1.01	0.989	-27.86	-2.42
Muntinlupa(MUT)	1.00	1.000	0.00	-25.44
EXOS-D	2.35	0.943	104.41	129.85
ETS-VI	6.60	0.085		
avg.		0.861	-25.44	26.457

를 알아보는 것에 있다. 그러나 본 논문에서는 계산 값이 0.8 이상의 값이 나올 경우에만 2개의 자료들은 밀접한 관계가 있다고 제한하였다. 상관관계 함수 계산을 위하여, 지상자력계들 중에서 지자기 적도에 가장 가까이 있는 MUT 지상자력계의 자료를 기준 자료로 정하였다. MUT 지상자력계의 자료를 기준으로 삼은 이유는 MUT 지상자력계의 위치가 지자기 위도 값이 가장 적도면에 가까이 있기 때문이다. MUT 지상자력계를 기준으로 계산한 후 전체 평균과 분산도 함께 구하여 보았다. 계산을 수행한 성분들은 EXOS-D 위성은 D성분, ETS-VI 위성은 Z성분, 지상자력계들은 H성분에 대하여 수행하였다. 표 4는 위의 성분들의 상관관계 함수의 계산결과를 나타낸 표이다. 각각의 계산 성분이 다른 이유는 다음과 같다. 본 논문에서 분석하고자 하는 성분은 압축성과 성분이다. 그림 8을 보면, EXOS-D 위성은 전기장 자료이지만, ETS-VI 위성은 자기장 자료이다. EXOS-D 위성의 자료에서는 D성분이 넓은 주파수대에 존재하고 있으므로 압축성과 성분이며, ETS-VI 위성은 Z성분이 압축성과 성분임을 알 수 있다. 지상자력계들의 H성분에는 압축성과 성분뿐만 아니라 다른 성분도 함께 섞여 있다. 그러나 지상자력계의 성분 중에서 압축성과 성분을 많이 가지고 있는 성분이 H성분이기 때문에 자료 분석에 사용하였다. 표 4에 나타난 결과를 보면, 지상자력계들간의 상관관계는 대부분 매우 높게 나타나고 있다. 이는 같은 신호를 서로 다른 지역에서 검출했다고 할 수 있다. 그러나 2개의 지상자력계들에서는 매우 낮은 상관관계가 나왔는데 이는 지상자력계의 L값이 다른 지상자력계에 비하여 높은 값인 5이상의 값을 가지고 있기 때문이다. L값이 5이상이면 플라즈마구의 바깥쪽에 해당하는 값이다. 한편, 위성간에는 서로 상반된 값을 가지고 있다. 지상자력계 MUT와 EXOS-D 위성의 상관관계는 매우 높게 나왔으나 ETS-VI 위성의 값은 매우 낮게 나왔다. EXOS-D 위성은 L값

이 2.35로 플라즈마구 내에 위치하고 있으며 ETS-VI 위성의 L값은 6.6이상으로 플라즈마구 바깥쪽에 위치해 있기 때문이다. 앞에서 L값이 컸던 2개의 지상자력계와 동일한 결과를 보여주고 있다.

그림 8은 상관관계 함수 계산 결과를 도표로 나타낸 것이다. X축을 L값으로 Y축을 상관관계 값으로 나타내었다. L값에 따라 상관관계 값의 변화를 알 수가 있다. 상관관계의 높고 낮음의 경계가 되는 곳은 L값이 5인 지역이다. L 값이 5보다 작은 지역에서는 상관관계의 값들이 높게 나왔으며, L값이 5보다 큰 지역에서는 값이 작게 나오고 있다. 이러한 결과는 L값이 5인 지역에 플라즈마 권계면이 존재하는 것을 고려해 본다면 Pi 2 파동은 플라즈마구 내에서 발생했다라고 생각할 수 있다. 이러한 상관관계 계산에 의해서 높게 나온 15 개의 지상자력계들의 위상차(cross phase)를 계산하였다(표 4). 그리고 계산된 위상차들끼리 평균을 내어 전체 평균 위상차(Φ_{avg})와 EXOS-D 위성의 위상값과 지상자력계들의 위상값을 비교하였다. 지상자력계들간의 평균 위상차는 -25.44 이며 표준편차($\sigma(\Phi_c)$)는 26.46 이다. 평균 위상차를 고려한 EXOS-D 위성과 지상자력계들의 위상차(Φ_c)를 L값의 분포에 따라 나타낸 것이 그림 9이다. 대부분의 지상자력계들의 위상차들이 0부근에 위치하고 있으며, 이러한 결과는 지상자력계에서 검출된 파동현상이 위상차가 거의 없다는 것을 의미한다. 이는 Pi 2 파동이 공동 mode에 의해 발생되었다는 의미이다. EXOS-D 위성의 성분은 D성분이며 계산결과 위상차는 129 이다. ETS-VI 위성에 대한 위상차계산은 상관관계 값이 낮아 의미가 없으므로 계산하지 않았다. 지상자력계의 자료는 자기장을, EXOS-D 위성의 자료는 전기장을 사용하였으므로 서로 90의 관계가 있다. 전기장과 자기장의 관계를 고려하였을 때 EXOS-D의 자기장의 위상은 219 라는 계산이 나온다. 이론적으로 공동 mode에서는 위상은 0또는 180 만이 존재한다. 이론적인 위상과 실제관측 위상과의 차이가 39의 차이를 보이고 있다.

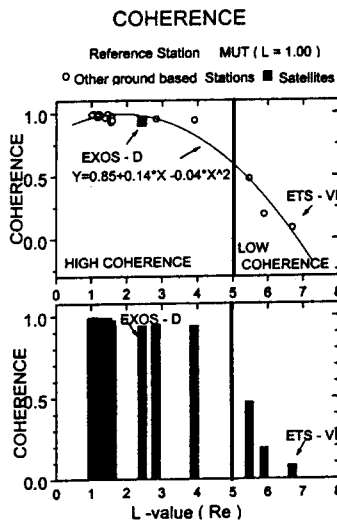


그림 8. Coherence 값과 L값과의 관계.

4. 결론

1989년 11월 9일에 Pi 2 파동 현상을 2개의 위성과 19개의 지상자력계를 이용하여 관측하였다. Pi 2 파동 현상은 위성과 지상자력계들의 위치와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 상관관계 함수를 이용하여 위성 및 지상자력계들의 L값과의 관계를 알아본 결과, 플라즈마구 내에 위치하고 있던 EXOS-D 위성과 16개의 지상자력계들의 자료는 높은 상관관계를 나타냈으나, 플라즈마구의 바깥쪽에 위치하고 있던 ETS-VI 위성과 2개의 지상자력계들은 낮은 상관관계를 나타내었다. 이러한 계산 결과는 관측된 Pi 2 파동현상이 플라즈마구 내에서 발생되어졌다고 할 수 있다. 또한, 상관관계가 높은 지상자력계들의 자료간의 위상차를 조사한 결과, 위상차는 30미만에 집중되어 있어, 공동 mode의 현상을 나타내고 있다고 할 수 있으나, 상관관계가 높았던 EXOS-D 위성과의 위상차는 219로 이론적인 값과는 39의 차이를 보여 완전한 공동 mode로 설명되어지기가 어렵다. 이러한 특징들에 대한 이해는 앞으로 다수의 Pi 2 파동들에 대한 통계적 연구가 수행 될 때 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글: 본 연구의 자료분석에 도움을 주신 일본 ISAS의 K. Tsuruda 교수와 Khushu 대학의 K.Yumoto 교수께 감사드립니다. 이 논문은 과학재단 특정기초 연구비(96-0702-0301-3)와 교육부 기초과학연구소 학술연구 조성비(BSRI 96-5408) 지원으로 수행되었습니다.

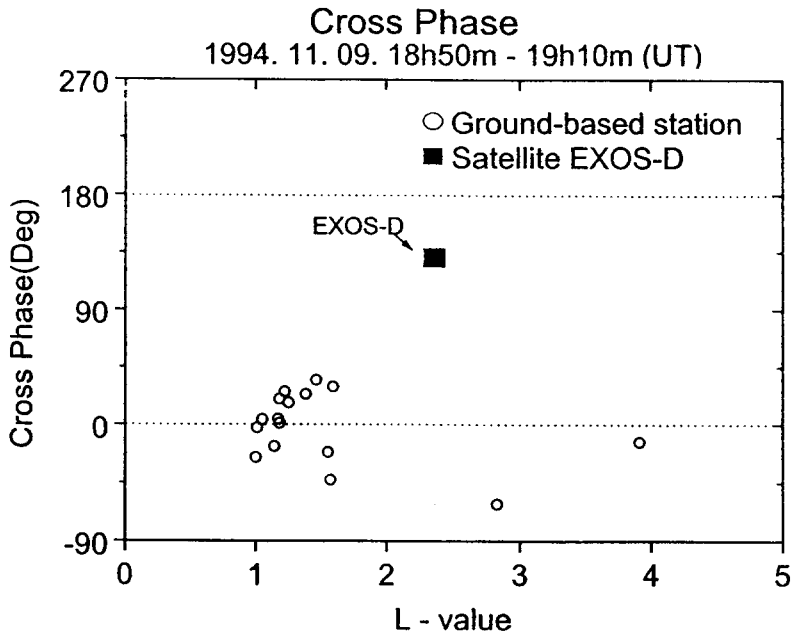


그림 9. Cross phase 와 L값과의 관계.

참고 문헌

- Baumjohann, W. & Glassmeier, K. H. 1984, *Planet. Space Sci.*, 32, 1361
- Bendat, J. S. & Piersol A. G. 1986, *Random data analysis and measurement procedures*(A Wiley-Interscience Pub.: New York), p.109
- Hayakawa, H., Okada, T., Ejiri, M., Kadokura, A., I-Kohno, Y., Maezawa, K., Machida, S., Matsuoka, A., Mukai, T., Nakamura, M., Nishida, A., Obara, T., Tanaka, Y., Mozer, F. S., Haerendel, G. & Tsuruda, K. 1990, *J. Geomag. Geoelectr.*, 42, 371
- Jacob, J. A., Kato, Y., Matsushita, S. & Troitskaya, V. A. 1964, *J. Geophys. Res.*, 69, 180
- Lanzerotti, L. J. & Fukunishi, H. 1974, *Rev. Geophys.*, 12, 724
- Lee, D. H. 1996, *J. Geophys. Res.*, 101, 15371
- Lin, C. A., Lee, L. C. & Sun, Y. J. 1991, *J. Geophys. Res.*, 96, 21105
- Orr, D. 1975, *Ann. Geophys.*, 31, 77
- Oya, H. & Tsuruda, K. 1990, *J. Geomag. Geoelectr.*, 42, 367
- Russell, C. T. 1971, *Cosmic Electrodynamics* 2, 184
- Saito, T., Sakurai, T. & Koyama, Y. 1976, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 38, 1265
- Southwood, D. J. & Stuart, W. F. 1980, Pulsations at the substorm onset, in *Dynamics of the Magnetosphere*(Reidel: Dordrecht), 341
- Sutcliffe, P. R. & Yumoto, K. 1989, *Geophys. Res. Lett.*, 16, 887
- Sutcliffe, P. R. & Yumoto, K. 1991, *J. Geophys. Res.*, 96, 1543
- William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery. 1992, *Numerical Recipes in C*(Cambridge Univ. Press: New York), 496
- Yumoto, K., Takahashi, K., Sakurai, T., Sutcliffe, P. R., Kokubun, S., Luhr, H., Saito, T., Kuwashima, M. & Sato, N. 1990, *J. Geophys. Res.* 95, 15175
- Yumoto, K., Tanaka, Y., Oguti, T., Shiokawa, K., Yoshimura, Y., Isono, A., Fraser, B. J., Menk, F. W., Lynn, J. W., Seto, M. & 210MM Magnetic Observation Group 1992, *J. Geomag. Geoelectr.*, 44, 261