

다중 이온 플라즈마 파동모델 개발

송성희 · 이동훈
경희대학교 우주과학과

표유선
전파 연구소

WAVE MODEL DEVELOPMENT IN MULTI-ION PLASMAS

Sung-Hee Song, Dong-Hun Lee

Department of Astronomy and Space Science, Kyung-Hee University, Korea
e-mail: shsong@space.kyunghee.ac.kr, dhlee@nms.kyunghee.ac.kr

Yoo Sun Pyo

Radio Research Laboratory
e-mail: yspyo@space.kyunghee.ac.kr

(Received March 31, 1999; Accepted May 14, 1999)

요 약

지구 주변에는 플라즈마로 가득 차 있고 그것을 매질로 하는 다양한 플라즈마 파동이 존재한다. 우주공간 플라즈마는 여러 종류의 이온과 전자로 구성되어 있고 특히 이온들은 파동의 전파에 많은 영향을 미친다. 다중 이온 플라즈마에서 파동분산 방정식의 해를 구하는 것은 상당히 복잡하다. 따라서, 임의의 자기장, 밀도를 고려하여 우주공간에서 다중 이온 플라즈마에서 파동의 분산관계를 쉽게 알 수 있는 계산모델을 개발하였다. 이 모델로부터 IGRF(International Geomagnetic Reference Field)에서 임의의 지점을 지나는 자력선과 관측된 밀도 함수로부터 각 위도별로 가능한 파동들의 성질을 조사하여 위성의 초기 관측 자료 분석에 응용하였다. 예를 들어 POLAR 위성의 관측값 중에서 자기 적도 근처에서 발생되어 자력선을 따라 전파하는 특정한 범위의 주파수 경우 파동의 편극 상태가 변한 위치, 전파경로 등을 본 모델을 이용하여 예측할 수 있었다.

ABSTRACT

Near-earth space is composed of plasmas which embed a number of plasma waves. Space plasmas consist of electrons and multi-ion that determine local wave propagation characteristics. In multi-ion plasmas, it is difficult to find out analytic solutions from the dispersion relation in general. In this work, we have developed a model with an arbitrary magnetic field and density as well as multi-ion plasmas. This model

allows us to investigate how plasma waves behave when they propagate along realistic magnetic field lines, which are assumed by IGRF(International Geomagnetic Reference Field). The results are found to be useful for the analysis of the in situ observational data in space. For instance, if waves are assumed to propagate into the polar region, from the equatorial region, our model quantitatively shows how polarization is altered along earth travel path.

1. 서 론

지금까지 위성 및 지상실험들을 통하여 우주공간에는 매우 다양한 파동들이 존재하는 것으로 알려져 있다. 특히 파동이 전파하는 매질이 플라즈마이므로 플라즈마 파동들로 부른다. 플라즈마는 전자와 여러 종류의 이온들로 구성되어 있고 이 입자들은 파동의 전파에 많은 영향을 준다. 이온의 효과는 주로 낮은 주파수에서 나타나며 굴절률, 주파수와 파동 벡터의 관계로 알 수 있다. 굴절률이 0이 될 때는 파동이 반사되는 끊어짐 현상이 일어나고 그 주파수를 끊어짐 주파수라고 한다. 굴절률이 무한대가 되면 진동은 존재하지만 파동이 더 이상 진행을 못하고 매질과 상호작용을 하는 공명 현상이 일어나는데 그 주파수를 공명 주파수라고 한다. 파동은 성질에 따라 여러 가지로 분류될 수 있다. 특히, 그것의 편극상태에 따라 좌편극파와 우편극파로 나누며 배경자기장의 영향 유무에 따라 정상파(ordinary wave)와 이상파(extraordinary wave)로 분류한다. 본 논문에서는 맥스웰 방정식, 옴의 법칙, 유전률 텐서와 전도도 텐서를 이용하여 유도된 임의 매질에서의 파동 분산 방정식을 사용하여, 여러 종류의 이온들과 임의의 자기장을 고려하여 각종 플라즈마 파동들의 분산관계에 관한 모델을 개발하였다. 이 모델은 임의의 주변 자기장이 주어질 때 주파수 영역에 따라 존재할 수 있는 파동의 종류, 편극상태 등을 상세히 조사할 수 있다. 또, 매질을 구성하는 플라즈마에 포함된 이온의 종류가 많더라도 파동의 공명 현상이나 끊어짐 현상이 발생하는 주파수를 쉽게 알 수 있는 이점이 있다. 개발된 모델은 IGRF(International Geomagnetic Reference Field)에 의해 배경 자기장을 가정하여 각 위도별로 존재할 수 있는 파동들의 성질을 이해하는데 응용하였다. 예를 들어 자기 적도 근처에서 발생되어 극 방향으로 전파하는 특정한 범위($\omega > \omega_{cr}$, ω_{cr} : 건너가기 주파수, crossover frequency)의 주파수를 가진 좌편극 파동의 경우 그것의 편극 상태가 좌측에서 우측으로 바뀔을 모델에서 알 수 있다. 초기 위성관측 자료로 알 수 있는 파동의 성질은 주파수이다. 주파수와 위성의 위치를 이용하여 파동의 편극 상태나 전파경로 등을 예측하기 위하여 본 모델을 이용할 수 있다.

2. 플라즈마 파동 모델

맥스웰 방정식과 옴의 법칙을 이용하여 임의 매질에서의 파동 분산 방정식을 구한 후, 균일하며 직교 좌표계에서 z 방향의 한성분만을 가지고 있는 자기장이 존재하며 이 자기장과 임의의 파동 벡터로 이루어진 평면을 (x, z) 로 가정하고 그 사이각을 θ 라 하면 임의 입자의 종류, 임의 주파수, 임

표 1. 한 종류 이온 플라즈마에서 파동의 일반해의 성질.

자기장과 파동벡터 사이각(θ)	파동의 종류	끊어짐 개수	공명개수	건너가기 개수
$\theta = 0$	우편극파	1개	1개	1개
	좌편극파	1개	1개	
$\theta = \pi/2$	정상파	1개	없음	1개
	이상파	2개	2개	

의 전파각도와 속도에 관한 일반적인 정보를 담고 있는 파동의 일반해를 구할 수 있다. 그리고 이 해는 여러 물리적 조건에 따라 다양한 파동이 존재할 수 있다는 것을 나타낸다(Stix 1962). 일반해는 식(1)과 같고 S, D, P는 주어진 배경 자기장에서 얻을 수 있는 유전률 텐서의 항들이다.

$$An^4 - Bn^2 + C = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} A &= S\sin^2\theta + P\cos^2\theta \\ B &= (S^2 - D^2)\sin^2\theta + PS(1 + \cos^2\theta) \\ C &= P(S^2 - D^2) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} S &= 1 - \sum_j \frac{X_j}{1 - Y_j^2} \\ D &= \sum_j \frac{X_j Y_j}{1 - Y_j^2} \epsilon_j, (\epsilon_j = \frac{q_j}{|q_j|}) \\ P &= 1 - \sum_j X_j \end{aligned} \tag{3}$$

$$X_j = \frac{\omega_{pj}^2}{\omega^2}, Y_j = \frac{\omega_{cj}}{\omega} \tag{4}$$

여기서 ω_{pj} , ω_{cj} 는 각각 j 입자의 플라즈마 주파수와 회전 주파수이다. 플라즈마에 포함된 이온이 한 종류일 때 파동의 일반해는 비교적 간단히 계산할 수 있다. 표 1은 이온의 종류가 한 개 일 경우 파동의 일반해의 성질을 나타내었다. 특히 이상파에서 두 개의 공명과 끊어짐이 발생하는데 두 개의 공명 중 비교적 주파수가 낮은 것을 하위 혼합 공명(lower-hybrid resonance)이라 하고 높은 주파수의 것을 상위 혼합 공명(upper-hybrid resonance)이라 한다. 건너가기 조건은 파동의 경계가 되며 이 조건에 따라 파동의 편극 상태가 바뀌거나 파동의 성질이 변화한다.

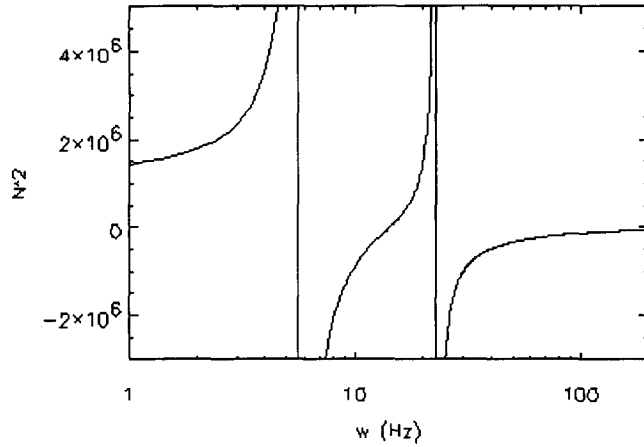


그림1. 두 종류 이온을 포함한 플라즈마에서 좌편극파의 굴절률의 제곱과 주파수와의 관계.

이온의 종류가 두 개만 되어도 S, D, P의 항들이 각각 하나씩 증가하여 일반해를 풀기 상당히 어렵다. 여기서는 θ 가 0과 $\pi/2$ 인 경우만 언급하였으나 임의의 각도가 되면 직접적으로 해를 풀기는 더욱 어려워진다. 이온의 종류가 두 개가 되면 한 종류일 경우 나타나는 파동의 성질은 모두 나타나며 추가된 이온에 의한 효과를 볼 수 있다. 표 2는 두 종류 이온 플라즈마에서 파동의 일반해의 성질을 나타내었다. 우편극파와 정상파의 경우는 추가된 이온에 의해 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 좌편극파와 이상파에서는 공명과 끊어짐이 각각 1개씩 증가하였다. 특히 이상파에서 새로운 공명을 두 이온 혼합 공명(bi-ion hybrid resonance)이라고 한다(Rauch & Roux 1982).

실제 지구 주변 플라즈마는 다중 이온으로 구성되어 있고 파동의 여러 현상을 연구하기 위해서는 이온의 종류를 증가하여 파동의 일반해를 구할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 입자의 종류가 얼마가 되더라도 쉽게 해를 구할 수 있는 정량적인 모델을 개발하였다.

표 2. 두 종류 이온 플라즈마에서 파동의 일반해의 성질.

자기장과 파동벡터 사이각(θ)	파동의 종류	끊어짐 개수	공명개수	진너가기 개수
$\theta = 0$	우편극파	1개	1개	2개
	좌편극파	2개	2개	
$\theta = \pi/2$	정상파	1개	없음	1개
	이상파	3개	3개	

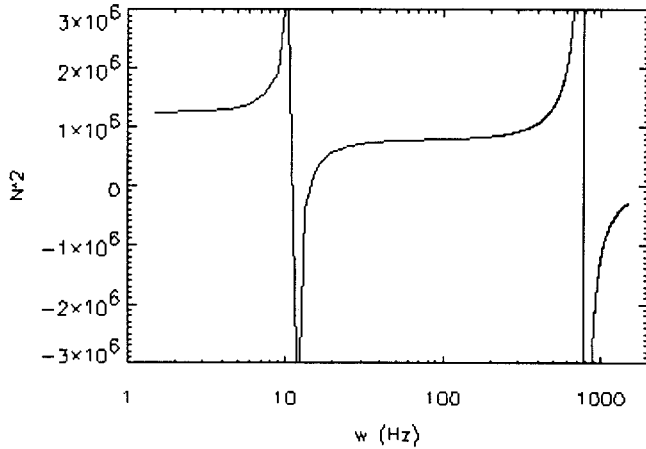


그림 2. 두 종류 이온을 포함한 플라즈마에서 이상파의 굴절률의 제곱과 주파수와의 관계.

2.1 모델의 이용

실제 플라즈마를 가정하면 많은 이온의 종류로 인해 파동의 해를 풀기에 많은 시간이 걸린다. 만일 임의의 각도가 된다면 매우 복잡하여 정성적인 해를 구하기 어렵다. 본 연구에서 만든 모델은 임의의 각도, 다중 이온에서도 공명과 끊어짐 등을 쉽게 볼 수 있게 고안되었다. 표 1과 표 2에서 이온의 종류에 영향을 받는 파동은 좌편극파와 이상파라는 것을 알 수 있다. 추가된 이온에 의해 새로운 공명과 끊어짐이 발생되었고 그 효과는 전자의 효과와 비교해서 매우 낮은 주파수에서 볼 수 있다. 플라즈마에 포함된 이온이 두 종류라고 가정할 때 θ 가 0과 $\pi/2$ 인 경우로 나누어 굴절률의 제곱과 주파수와의 관계를 본 모델을 이용하여 나타내어 보았다. 우주공간의 플라즈마를 구성하고 있는 이온으로는 수소이온이 가장 많고 그 다음으로 헬륨이온, 산소이온이다. 따라서 포함된 이온이 수소와 헬륨이며 배경자기장의 값은 2.4×10^{-7} T, 전자의 밀도는 $150/\text{cm}^3$, 그리고 이온의 효과를 강조하기 위하여 수소와 헬륨의 비율이 각각 50%이고 추가된 이온은 헬륨으로 가정하였다.

그림 1은 θ 가 0인 좌편극파의 경우이다. 가로축은 주파수, 세로축은 굴절률의 제곱이다. 그림에서 굴절률의 제곱이 음이 되는 구간은 파동이 존재할 수 없는 구간이나 굴절률과 주파수의 관계에 대한 이해를 돕기 위하여 나타내었다. 그림 1에서 두 개의 끊어짐(가로축의 절편)과 두 개의 공명(즉 세로축과 평행하게 뻗어나가는 곳)을 볼 수 있다. 비교적 높은 주파수의 공명은 수소의 회전 주파수와 같고, 낮은 주파수의 공명은 헬륨의 회전 주파수와 동일하다. 만일 산소를 포함하여 3개의 이온인 경우를 가정한다면 헬륨의 회전 주파수보다 낮은 주파수에서 공명이 추가로 발생될 것이다.

그림 2는 θ 가 $\pi/2$ 일 때며 이상파를 나타낸다. 이상파의 경우 이온의 종류가 한 개 일 경우와 비

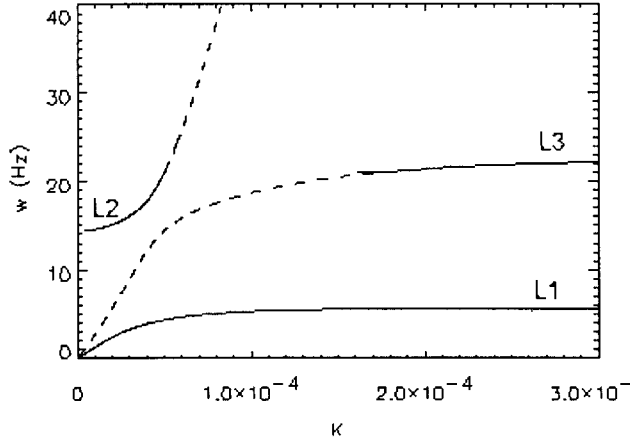


그림 3. 배경자기장과 전파 벡터가 이루는 각이 $\pi/3$ 일 때 주파수와 파동벡터와의 관계. 실선은 좌편극파이고 점선은 우편극파이다.

교해서 끊어짐과 공명의 개수가 각각 1개씩 증가한다. 추가된 이온의 효과를 나타내기 위하여 비교적 낮은 주파수 부분만을 도식화하였다. 그림 2에서 우측에 있는 공명은 하위 혼합 공명이며 좌측에 있는 공명이 추가된 이온에 의해 새롭게 나타난 공명이다. 이 공명은 특히 두 이온의 회전 주파수 사이의 주파수를 가지고 있어 두 이온 혼합 공명(bi-ion hybrid resonance)이라고 한다. 만일 이온의 종류가 m개라면 두 이온 혼합 공명은 m-1개가 발생될 것이다(Stix 1962). 상위 혼합 공명은 그림 2의 주파수 범위보다 매우 높은 주파수에서 발생한다.

θ 가 $\pi/3$ 인 경우 주파수와 파동벡터의 관계를 나타내어 보았다. 배경자기장과 이온의 밀도, 이온의 종류는 앞에서 언급한 것과 같고 이온의 효과를 보기 위하여 수소의 회전 주파수 정도의 낮은 주파수대만을 나타내었다. 그림 3은 θ 가 $\pi/3$ 일 때이며 실선은 좌편극파, 점선은 우편극파를 나타낸다. 가로축은 파동벡터 k이며 세로축은 주파수이다. k가 0이 되는 세로축의 절편은 끊어짐 주파수이며 k가 무한대가 되는 주파수가 공명 주파수이다. 그림 3에서 임의의 각도가 될 때 나타나는 건너가기 현상을 볼 수 있다. 그림에서 점선이 실선으로 실선이 점선으로 됨을 볼 수 있는데 이것은 파동의 편극 상태가 바뀌는 것을 나타낸다. θ 가 $\pi/2$ 이면 수소의 회전 주파수 아래의 주파수 범위에서는 우편극파만 존재한다(Young et al. 1981, Rauch & Roux 1982).

본 모델을 이용하여 파동의 주파수와 굴절률, 주파수와 파동벡터의 관계를 도식화하였다. 그래프들에서 쉽게 파동의 공명, 끊어짐, 건너가기 현상 등을 볼 수 있고 플라즈마에 포함된 이온이 여러 종류가 있더라도 복잡한 계산을 하지 않고 쉽게 파동 현상을 볼 수 있는 장점이 있다. 또, 본 모델은

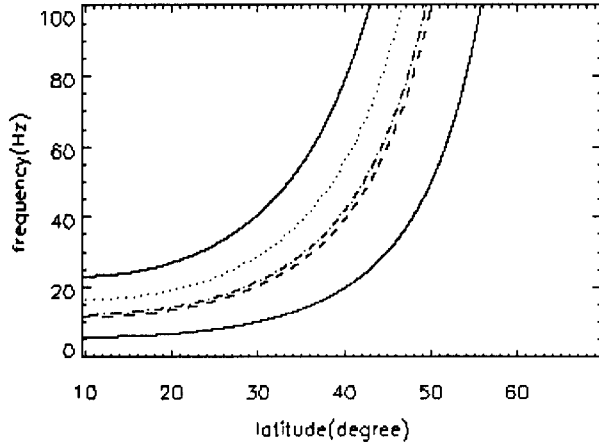


그림 4. 플라즈마 권계면 근처 자력선상의 위도에 따른 특성 주파수들. 위의 곡선으로부터 수소의 회전 주파수, 건너가기 주파수, 끊어짐 주파수, 두 이온 혼합 공명 주파수, 헬륨의 회전주파수이다.

이온들의 비율, 밀도, 자기장 값을 조절하여 입력시킬 수 있어 지구 주변 우주 공간의 어느 곳에 발생한 파동에 대해서도 적용할 수 있다. 다음 장에는 이러한 장점들을 이용하여 본 모델을 위성 관측의 초기 자료에 응용하는 방법에 관하여 언급하였다.

3. 모델의 응용

위성의 초기 관측 자료에서 알 수 있는 파동에 대한 정보는 주파수이다. 따라서 주파수만으로 파동의 성질을 분석할 수 있는 모델이 필요하다. 본 연구에서 개발한 모델을 초기 위성 관측 자료 분석에 응용하는 방법을 기술하였다.

우선 IGRF(International Geomagnetic Reference Field)를 이용하여 자력선을 정의하였다. IGRF는 입력된 한 점에서의 자기장 값을 계산하므로 본 연구에서는 임의 지점을 지나는 자력선을 정의하기 위하여 변형시켰다. 약 $4-6R_E$ 에 있는 플라즈마 권계면(plasmapause) 안쪽의 임의 지점에 대한 밀

표 3. POLAR 위성의 위치.

	지구중심좌표 경도(degree)	지구중심좌표 위도(degree)	고도
저위도	304.33	-15.12	14605.3
중위도	309.51	-45.51	8935.3
고위도	300.43	-77.48	6163.7

도는 다음 식에 의해 주어진다(Lee & Lysak 1989).

$$\begin{aligned} N_{eq}(L) &= N_{pp} \left(\frac{r_{pp}}{r} \right)^3 \\ N(r) &= N_{eq} \left(\frac{R_E L}{r} \right)^6 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 pp는 플라즈마 권계면을, eq는 적도를 나타낸다. N은 밀도를 의미하며 r은 지구중심에서의 거리, L은 r/R_E 이다. 동경 130도, 약 $5R_E$ 에 있는 자력선상의 밀도를 식(5)에 의해 계산할 수 있고 IGRF로 자기장 값을 알 수 있으므로 플라즈마에 포함된 이온이 수소와 헬륨의 두 종류라고 할 때 자력선상의 수소이온의 회전주파수, 헬륨이온의 회전 주파수, 두 이온 혼합 공명 주파수, 끊어짐 주파수, 건너가기 주파수를 계산할 수 있다. 그림 4의 가로축은 위도이며 세로축은 주파수이고 위도는 자기적도에서부터 고위도로 계산하였다. 곡선들은 위에서부터 수소의 회전 주파수, 건너가기 주파수, 끊어짐 주파수, 두 이온 혼합 공명 주파수, 헬륨의 회전주파수이다(이하 이 주파수 모두를 합쳐 특성 주파수들이라고 정의하였다). 위도가 증가함에 따라 각 주파수들이 증가하는 것은 고위도로 갈 때 밀도와 자기장이 증가하기 때문이다. 그림 4에서 끊어짐 주파수는 그림 3의 좌편극파의 것이다. 그림 3에서 가장 작은 주파수의 좌편극파를 L1, 왼쪽 위에 있는 것을 L2, 오른쪽에 있는 것을 L3라고 정의하였다. 만일 L1 주파수 대를 가진 좌편극 파동이 적도에서 발생되어 자력선을 따라 고위도로 전파할 경우를 고려해 보면, 이 주파수 대는 그림 4에서 헬륨의 회전 주파수 아래에 있는 것으로 끊어짐이나 공명에 영향을 받지 않고 지상까지 전파함을 알 수 있다. 끊어짐 주파수와 건너가기 주파수 사이에 있는 L2주파수대의 경우 자력선을 따라 고위도로 전파한다면 끊어짐 주파수와 만나게 되고 이 끊어짐 주파수는 좌편극파에 영향을 주기 때문에 반사가 일어난다(Fraser 1985). 따라서 L2 주파수대는 이 경우 위도 25도 이상에서는 존재할 수 없다. 건너가기 주파수와 수소의 회전 주파수 사이에 있는 L3의 경우는 고위도로 전파함에 따라 우선 건너가기 주파수와 일치되고 그것의 편극 상태가 우편극으로 바뀌게 되며 다음으로 끊어짐 주파수와 일치하게 된다. 이 끊어짐 주파수는 좌편극 파에 영향을 주는 것이므로 이미 우편극으로 바뀌어 버린 파동은 영향을 받지 않고 계속 전파하여 두 이온 혼합 공명 주파수와 일치되는데 이것은 우편극파에 영향을 주는 것이므로 여기서 공명을 발생시키고 반사도 발생한다(Fraser 1985). 끊어짐이 발생할 경우 반사가 일어나고 공명은 매질과 반응하여 파장이 0에 가까워지는 것이다. 그러나 임의의 각도로 전파할 경우 굴절률을 자기장에 대해 수직 성분과 수평 성분으로 나누어 생각해볼 수 있다. Rauch & Roux(1982)는 L3 주파수대 파동에 대해 헬륨의 밀도를 20%로 가정하여 굴절률의 수직 성분과 수평 성분의 관계를 계산하였다. Rauch & Roux(1982)의 계산에서 두 이온 혼합 공명 주파수에서 각 θ 가 커짐에 따라 상대적으로 굴절률의 수평 성분이 급격히 작아지는 것을 볼 수 있다. 공명은 굴절률의 수평 성분을 매우 작아지게 하고 수직 성분을 증가시킨다. 따라서 파동의 수평 성분은 수평 굴절률이 작아짐에 의해 끊어짐이 발생하고 수직 성분은 공명이 발생한다. 따라서 임의 각도로 파동이 전파할 경우 공명 발생에서 반사도 발생하고 반사되는 것은 파동의 수평성분이다.

표 4. POLAR 위성을 이용한 모델의 응용 예.

초기 측정치			편극 상태와 전파경로 예측	
POLAR 위성의 위치	측정한 주파수 (Hz)	초기파동 편극상태	편극상태	전파경로
저위도	40	측정안함	우편극	위도 -18도에서 공명
	60	좌편극	위도 -20도에서 우편극으로 변화	위도 -32도에서 공명
중위도	125	측정안함	우편극	지상까지 전파
	190	좌편극	좌편극	위도 -48도에서 끊어짐
고위도	500	측정안함	우편극	지상까지 전파

1998년 8월 4일의 POLAR 위성의 데이터를 이용하여 위도에 따라 관측할 수 있는 파동을 알아 보았다. 이 위성은 1996년에 올려진 극궤도 위성으로 주기는 22.6시간이다. 위성이 저위도, 중위도, 고위도에 있을 경우를 고려하였다. 세 지점의 위도, 경도, 고도는 표 3과 같다. 각 지점을 지나는 자력선을 변형된 IGRF에 의해 정의하고 자력선상의 밀도를 식(5)에 의하여 정의하였다. 그림 4와 같이 세 지점을 지나는 자력선에 대해 자기적도에서부터 극 방향으로 앞에서 언급한 여러 특성 주파수를 계산하였다.

첫째, 위성이 저위도(약 -15도)에 있을 경우(그림 5) 40Hz의 주파수를 측정을 하였다면 그것의 편극 상태는 우편극임에 분명하다. 그 이유는 그림 3을 참조하면 40Hz의 경우 끊어짐 주파수와 헬륨의 회전 주파수 사이에 있는 양으로 이 주파수 사이에서는 우편극파만 존재하기 때문이다. 또, 이 파동이 자력선을 따라 고위도로 전파한다면 위도 약 -18도에서 공명이 일어날 것을 예측할 수 있다. 만일 위성에서 편극 상태 측정이 가능하다면, 쉽게 파동의 전파경로를 예측할 수 있다. 자력선을 따라 전파하는 파동을 가정할 경우 저위도에서 60Hz의 좌편극파를 측정하였다면 그림 3에서 L3으로 정의한 것이며 약 -20도에서 우편극파로 편극 상태가 바뀌며 끊어짐 주파수에는 우편극파이므로 영향을 받지 않고 위도 약 -32도에서 두 이온 혼합 공명 주파수와 일치하여 공명이 일어날 것을 예측할 수 있다.

둘째, 중위도(약 -45도)에 위성이 있을 경우 저위도에 있을 경우와 같이 고려해 보았다(그림 6). 끊어짐 주파수와 헬륨의 회전 주파수 사이에 있는 125Hz를 측정하였다면 그것은 우편극파이며 끊어짐 주파수와 건너가기 주파수 사이의 양을 가진 190Hz의 좌편극파를 측정하였다면 그림 3에서 L2에 해당하며 그 파동은 위도 약 -48도에서 반사가 일어날 것이다.

셋째, 위성이 고위도(약 -77도)에 있을 경우, 위도에 따른 특성 주파수들의 그래프는 그림 7이다. 헬륨의 회전주파수와 끊어짐 주파수 사이의 주파수범위가 약 300Hz로 위성이 다른 위치에 있을 때 보다 넓다. 이 위치에서 헬륨의 회전주파수와 끊어짐 주파수 사이의 크기인 500Hz를 측정하였다면 그 파동의 편극 상태가 우편극이라는 것을 알 수 있다. 표 4에서 POLAR 위성의 각 위치에서의 모델을 이용하여 파동의 성질을 예측하는 방법을 기술한 앞의 내용을 정리하였다.

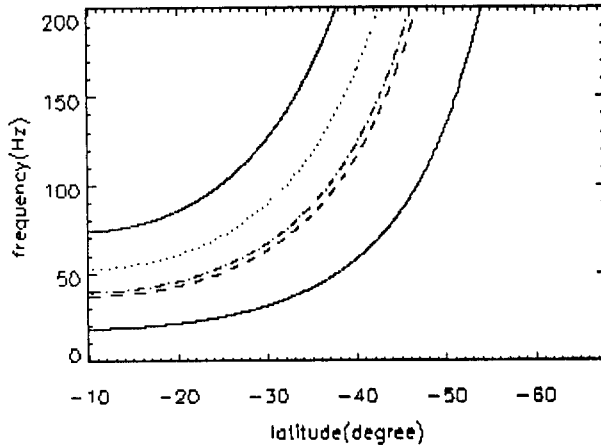


그림 5. POLAR 위성을 지나는 자력선상의 위도에 따른 특성 주파수들(위성 위치 저위도, 약 -15도). 위의 곡선으로부터 수소의 회전 주파수, 건너가기 주파수, 끊어짐 주파수, 두 이온 혼합 공명 주파수, 헬륨의 회전주파수이다.

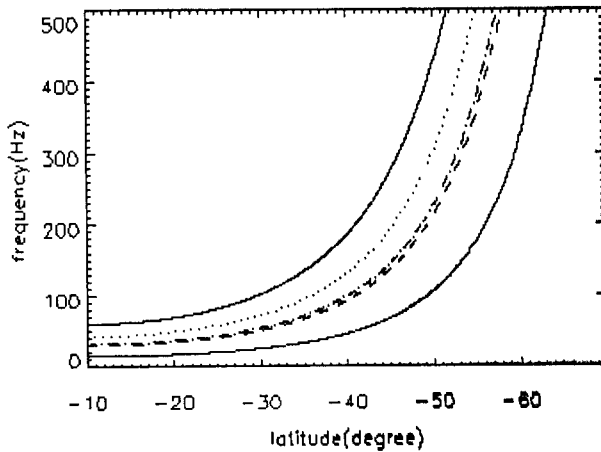


그림 6. POLAR 위성을 지나는 자력선상의 위도에 따른 특성 주파수들(위성 위치 중위도, 약 -45도). 위의 곡선으로부터 수소의 회전 주파수, 건너가기 주파수, 끊어짐 주파수, 두 이온 혼합 공명 주파수, 헬륨의 회전주파수이다.

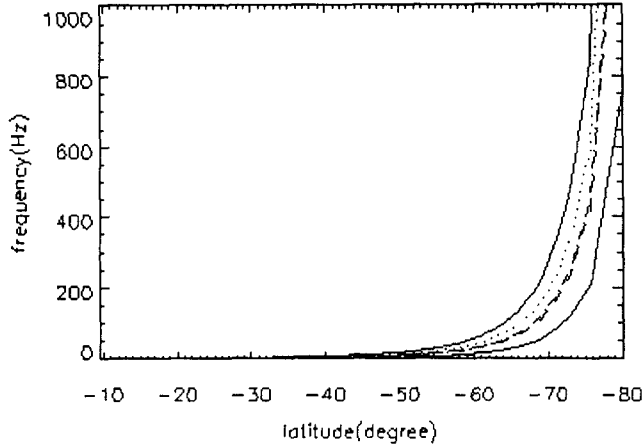


그림 7. POLAR 위성을 지나는 자력선상의 위도에 따른 특성 주파수들(위성 위치 고위도, 약 -77도). 위의 곡선으로부터 수소의 회전 주파수, 건너가기 주파수, 끊어짐 주파수, 두 이온 혼합 공명 주파수, 헬륨의 회전주파수이다.

앞에서 언급한 방법으로 위성이 임의 지점에서 특성 주파수를 계산하였다면 개발한 모델로부터 편극 상태나 전파경로를 예측할 수 있어 위성의 초기 관측 자료분석에 이용될 수 있다.

4. 요약 및 결론

지구 근접 우주공간은 플라즈마로 가득 차 있고 그것을 매질로 하는 다양한 플라즈마 파동들이 존재한다. 주어진 매질이 전하를 띤 플라즈마이므로 맥스웰 방정식을 적용시킬 수 있고 옴의 법칙을 도입하여 정리하면 임의 매질에서의 파동 분산 방정식을 구할 수 있다. 또, 배경 자기장이 z 방향의 한 성분만 가지고 있고 파동의 전파 벡터와 이루는 각을 θ 라고 하며 파동벡터, k 가 x와 z평면에 있다고 가정한 경우 파동의 일반해를 구하였다. 실제 플라즈마를 구성하고 있는 이온의 종류는 많으나 각각의 효과를 모두 고려하여 일반해를 직접 푸는 것은 많은 시간이 걸린다. 본 연구에서 개발한 모델은 이온의 종류가 많더라도 쉽게 파동의 일반해를 구할 수 있는 장점이 있다. 파동의 끊어짐과 공명을 도식화하여 쉽게 그러한 주파수를 알 수 있다. 초기 위성 관측 자료로 알 수 있는 파동의 성질은 주파수이다. 이 모델을 이용하면 주파수만으로 파동의 편극 상태, 전파 경로 등을 정량적으로 측정할 수 있어 위성의 초기 관측 자료 분석에 이용할 수 있다. 향후 위성 관측 자료에 대하여 본격적인 모델 사용이 이루어지면 He 값을 비롯하여 실제 값으로써 자료분석에 직접적으로 사용될 것이다. 또한, 그래프 상에서 각 지점의 좌표 값을 바로 확인할 수 있도록 하는 등 위성 초기 자료 분석 위주

로 프로그램의 개선을 병행해야 할 것이다.

감사의 글: 이 논문은 과학재단 특정기초연구비(96-0702-0301-3)와 교육부 기초과학연구소 학술연구조성비(BSRI 98-5408)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Fraser, B. J. 1985, *Space Sci. Rev.*, 42, 357
Lee, D. H. & Lysak, R. L. 1989, *JGR*, 94, 17097
Rauch, J. L. & Roux, A. 1982, *JGR*, 87, 8191
Stix, T. H. 1962, *The theory of plasma waves*(New York : McGraw Hill), pp5-44
Young, D. T., Perraut, S., Roux, A., De Villedary, C., Gendrin, R., Korth, A., Kremser, G., & Jones, D. 1981, *JGR*, 86, 6755