

## 혼합 플라스마 내의 이온-이온 교잡파의 불안정성 연구

김 수 용

(한국과학기술대학)

(1987년 11월 20일 받음; 1987년 12월 1일 수리)

### A Study of Ion - Ion Hybrid Instability in the Mixed Plasma

Soo-Yong Kim

Korea Institute of Technology

(Received November, 20, 1987; Accepted December 1, 1987)

### 요 약

오로라존 내에는 수소이온 이외에 산소이온이 많이 분포되어 있다. 오로라존 내의 전자에 의한 수소 및 산소이온들의 가열현상에 대하여 해석적 이론 및 수치모사법(numerical simulation)을 통하여 고찰한다. 오로라전자의 속력이 낮을 경우에 lower hybrid 불안정성 대신에 이온-이온교잡파(ion-ion hybrid wave)가 발생하여 산소이온이 수소이온보다 훨씬 더 많이 가열된다.

### Abstract

There are more oxygen ions than hydrogen ions in the auroral field zone. We consider both analytic and numerical simulation study of the heating of hydrogen and oxygen ions by auroral electrons. With the low drift speed of electron beams, the ion-ion hybrid wave becomes unstable instead of the lower hybrid wave so that a preferential heating of oxygen ions occurs.

### 1. 서 론

최근에 지구 자기권 내의 여러 장소에서 전리층에서 발생된 이온들이 맹렬하게 가속되는 현상들이 발견되었다. 수소보다 무거운 이온들이 자기권 내의 여러 곳에서 발견되었다. 바로 이 사실은 이들 이온들이 태양이나 다른 천체로부터 오는 것이 아니라 지구 자체로부터 발생된다는 것을 말해 준다. 한편, 지구 근처의 오로라존과 전리층 내에는 이와 같은 무거운 이온의 농도가 수소이온 보다 크다. 따라서 수소이온만의 플라스마보다 산소와 수소가 포함되어 있는 혼합플라스마(mixed plasma)에서 발생되는 저주파수 교잡파(lower hybrid wave)가 저온의 수소이온을 더 많이 가열하는 현상이 관찰된다.

\* 이 연구는 한국과학기술대학 기본연구비 및 과학재단 기초연구비의 지원을 받았음.

xed plasma) 내에서의 입자-파동 상호작용(particle-wave interaction) 연구가 필요하다. 수소 이외의 산소이온의 영향 때문에 플라스마 분산식(plasma dispersion relation)이 변화되어야 하고 새로운 종류의 불안정성이 발생한다(Stix 1962).

오로라지역 내의 이온들의 가속현상에 대한 이론연구가 활발히 이루어졌다. 이 현상을 설명하는 대부분의 이론은 정전기적 이온사이클로트론파(electrostatic cyclotron wave)(Kindel and Kennel 1971, Palmadesso, Coffey, Ossakow and Papadopoulos 1974, Lysak, Hudson, and Temerin 1980, Dusenberry and Lyons 1981, Okuda and Ashour-Abdalla 1983)와 lower hybrid파(Papadopoulos and Polmadesso 1976, Chang and Coppi 1981, Kim and Okude 1986)의 불안정성에 기인한다. Lower hybrid파에 의한 산소이온의 가속은 비교적 어려우며, 그 이유는 그 파동의 진동수가 매우 높아 무거운 이온들의 운동과 coupling하기가 어려워서 파동-입자 상호작용이 일어나기가 쉽지 않기 때문이다. Ashour-Abdalla 와 Okuda (1984)는 정전기적 이온사이클로트론파를 이용하여 수소와 산소이온으로 구성된 플라스마에 적용하였다. 정전기적 수소이온파(electrostatic hydrogen ion cyclotron wave)와 정전기적 산소이온파(electrostatic oxygen ion cyclotron wave)의 불안정성이 활발하게 진행되어 수소와 산소이온을 끌고루 지구자기장의 수직인 방향으로 가속시킨다는 사실을 발견했다.

이 논문에서는 혼합플라스마내에서만 볼 수 있는 플라스마파동과 그 파동이 무거운 이온들의 운동에 어떤 영향을 끼치는가에 대하여 살펴보기로 한다. 즉, 한 가지 이온들만 들어 있는 순수 플라스마 내에서 생기지 않고 혼합플라스마 내에서만 생기는 플라스마불안정성인 이온-이온 교잡파/ion-ion hybrid wave)가 발생한다. 이 파동의 본성은 hydrodynamic mode이기 때문에 kinetic mode인 산소이온사이클로트론파와 다르며 교잡파의 진동수가 산소파보다 크므로 산소이온의 보다 효과적인 가열현상을 일으킨다. 2장에서는 혼합플라스마 내의 플라스마파의 선형 이론을 고려한다. 1차원모의 실험과 이를 플라스마불안정을 통하여 산소이온이 어떻게 가열되는가를 3장에서 다룰 것이다. 마지막으로 4장에서 이 결과에 대하여 토의할 것이다.

## 2. 선형이론

전리층 내에 있는 산소이온의 존재로 오로라전자와 전리층플라스마의 상호작용으로 이온-이온 교잡파가 발생될 수 있다. 자기장에 수직인 방향으로 진행하는 플라스마 분산식( $k_{\perp}/k_{\parallel} > 1$ )은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$1 - \frac{k_{\parallel}^2}{k_{\perp}^2} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} + \frac{\omega_{pH}^2}{\Omega_H^2 - \omega^2} + \frac{\omega_{po}^2}{\Omega_o^2 - \omega^2} - \frac{k_{\parallel}^2}{k_{\perp}^2} \frac{\omega_{pb}^2}{(\omega - k_{\parallel} v)^2} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

여기에서  $\omega_{pe}$ ,  $\omega_{pH}$ ,  $\omega_{po}$ ,  $\omega_{pb}$ ,  $\Omega_H$ ,  $\Omega_o$ 는 각각 전자, 수소이온, 산소이온, 전자빔의 플라스

마진동수와 수소, 산소이온의 사이클로트론 진동수이다. 한편, 위의 식을 얻기 위하여  $\omega \ll \Omega_e$ ,  $\omega_{pe}^2 \ll \Omega_e^2$ ,  $k_\perp \rho_H \ll 1$  와  $k_\perp \rho_o \ll 1$  의 가정을 사용하였다. 만일  $k_\parallel = 0$  이면 (1)식이,

$$\omega^4 - (\omega_{pH}^2 + \omega_{po}^2 + \Omega_H^2 + \Omega_o^2) \omega^2 + (\omega_{pH}^2 \Omega_o^2 + \omega_{po}^2 \Omega_H^2 + \Omega_H^2 \Omega_o^2) = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

으로 된다.  $\omega_{pe}^2 / \Omega_e^2 \ll 1$ ,  $\omega_{pH}^2 / \Omega_H^2 > 1$ ,  $\omega_{po}^2 / \Omega_o^2 > 1$  일 경우에 해는 둘이며, 그것은 각각

$$\omega_{LH}^2 = \omega_{pH}^2 + \omega_{po}^2 \text{ (lower hybrid파)} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

과

$$\frac{\omega_{IH}^2}{\Omega_H \Omega_o} = \frac{n_H \Omega_o + n_o \Omega_H}{n_H \Omega_H + n_o \Omega_o} \text{ (이온교잡파)} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

이다(Stix 1962).

전리충과 부딪치는 오로라전자빔의 존재로 파동-입자 상호작용에 의하여 이 파동을 쉽게 여기시켜 불안정성을 유도하며 전자빔에너지의 일부가 이온들에게 운반된다. 불안정성은 식 (1)의 마지막 항인 오로라전자빔에 의하여 발생된다. 식 (1)로부터  $\Omega_o < k_\parallel v < \Omega_H$  인 경우 이온교잡파,  $k_\parallel v > \Omega_H$  인 경우 lower hybrid파가 불안정해진다.

불안정한 파동의 진동수와 growth rate를 구하기 위하여 (1)식을 여러 플라스마변수를 변화시켜가며 수치해석방법을 사용한다. 첫번째 경우는 전리충의 낮은 고도에서 존재하는 플라스마 ( $n_o / n_H = 15$ )와 두번째로는 보다 높은 고도에서의 플라스마( $n_o / n_H = 1$ )의 경우를 고려한다.

그림 1 a로부터 전자의 drift 속력  $v_o > 0.5 v_e$  일 때 산소이온의 사이클로트론파와 전자빔 mode의 coupling 때문에 산소파가 불안정성을 가지게 된다.  $v_o \sim 5 v_e$  근처에서는 이온교잡파와 전자빔파 사이의 상호작용이 일어나서 이온교잡파 불안정성이 발생한다. 불안정한 이온교잡파의 진동수는 산소의 gyrofrequency 보다 크며 전자빔의 속도가 커짐에 따라서 그 값이 커진다.

고도가 높아짐에 따라 플라스마 내에는 수소의 밀도가 커진다. 그림 1 b에서 보는 바와 같이 낮은 drift speed의 전자빔은 이온교잡파를 일으키고  $k_\parallel v_o > \Omega_H$ 를 만족하는 drift speed를 가진 전자빔의 경우에 lower hybrid wave 불안정성이 일어난다. 이온교잡파와 lower hybrid 파는 모두 수소와 산소이온의 운동에 큰 영향을 끼치게 된다. 따라서 이를 불안정성은 두 이온의 가열을 유발시키게 된다. 이온의 가속과 ion conics의 생성에 대하여 컴퓨터 모의실험을 통하여 고찰하기로 한다.

Dispersion Relation

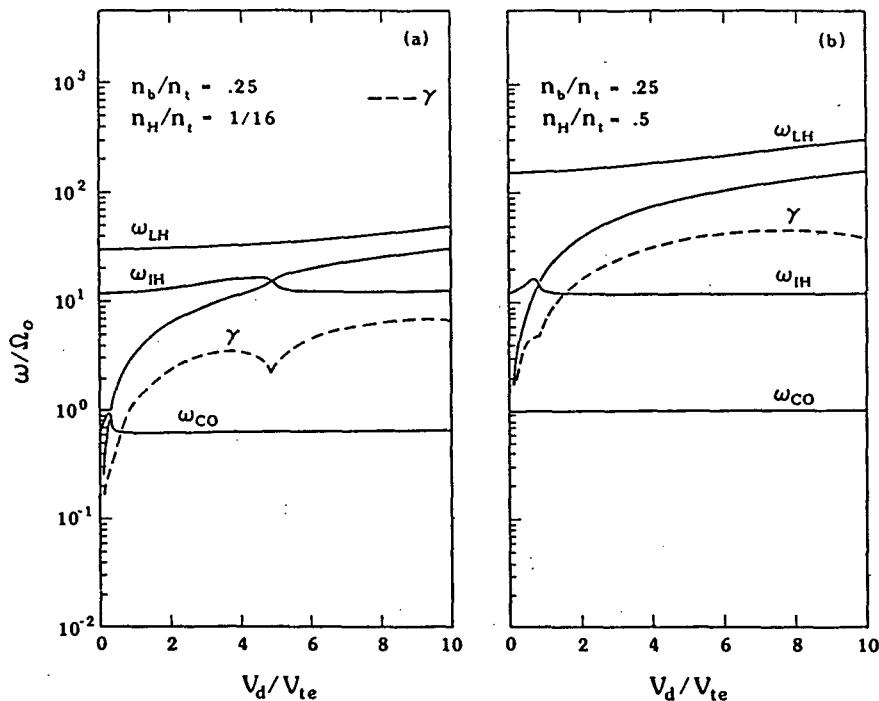


Fig. 1. Numerical solution to the dispersion relation given by Eq. (1) for the case:  
(a)  $n_b/n_e = 0.25$ ,  $k\lambda_e = 0.2$ ,  $n_H/n = 1/15$  and  $k_{||}/k = 0.005$ ; and (b)  $n_b/n_e = 0.25$ ,  $k\lambda_e = 0.2$ ,  $n_H/n_o$ , and  $k_{||}/k = 0.02$ .

### 3. 모의실험의 결과

오로라전자빔의 영향으로 이온들이 어떻게 가속되는지를 연구하기 위하여 자기장 속에서의 1차원모의실험을 시도한다. 전자의 운동은 guiding center approximation을 이용하고, 이온의 운동에는 full dynamics를 사용하였다(Lee and Okuda 1978). 이런 근사법을 이용하여 이온과 전자의 질량비의 실지값( $M/m = 1836$ )을 쓸 수 있다. 플라스마 변수로  $\Omega_e/\omega_{pe} = 10$ ,  $v_o/v_e = 5$ ,  $L = 256\lambda_e$ ,  $n_H/n_o = 1/15$ , 그리고  $k_{||}/k_{\perp} = 0.005$ 를 사용하였다. 여기에서  $L$ 과  $\lambda_e$ 는 각각 모의실험에서 사용한 system length와 Debye length이다. 한편, Debye length와 grid size는 같다. 또한, 전자의 population은 두 가지로 나누어지며 오로라전자와 backscattered electron이다.

모의실험에서 backscattered electron은 밀도  $n_t$ 를 가진 Maxwellian으로 모형화하고, 오

로 라전자를 대표하는 전자빔은 밀도  $n_b$ 를 가지고 속력  $v_o$ 로 drifting하는 Maxwellian으로 모형화한다.  $\Omega_{Ht} = 55$  일 때 모의 실험의 결과가 그림 2에 나타나 있다 ( $n_b/n_o = 1/4$ ,  $n_o$ 는 전자의 밀도이다). 전기장, 수소이온밀도의 perturbation, 산소이온밀도의 perturbation이 각각 주어져 있다. 전기장의 그래프를 보면 비교적 진폭이 큰 파동이 존재한다는 사실을 알 수 있다.

$\Omega_{Ht} = 55$  일 때 입자분포함수의 모습이 그림 3에 주어져 있다. 즉, 전자의 parallel velocity, 수소이온의 perpendicular velocity, 산소이온의 perpendicular velocity 분포함수의 모습이 나타나 있다. 전자빔의 속도공간에서의 확산이 진행되어 wave growth를 눈화시킨다. 수소이온은 현저하게 bulk heating이 된다. 산소이온의 가열은 주로 high energy tail에 국한되어, bulk oxygen 분포에는 크게 영향을 미치지 않으며, 따라서 그림 2에 나타나 있는 것처럼 산소밀도의 perturbation이 작아진다.

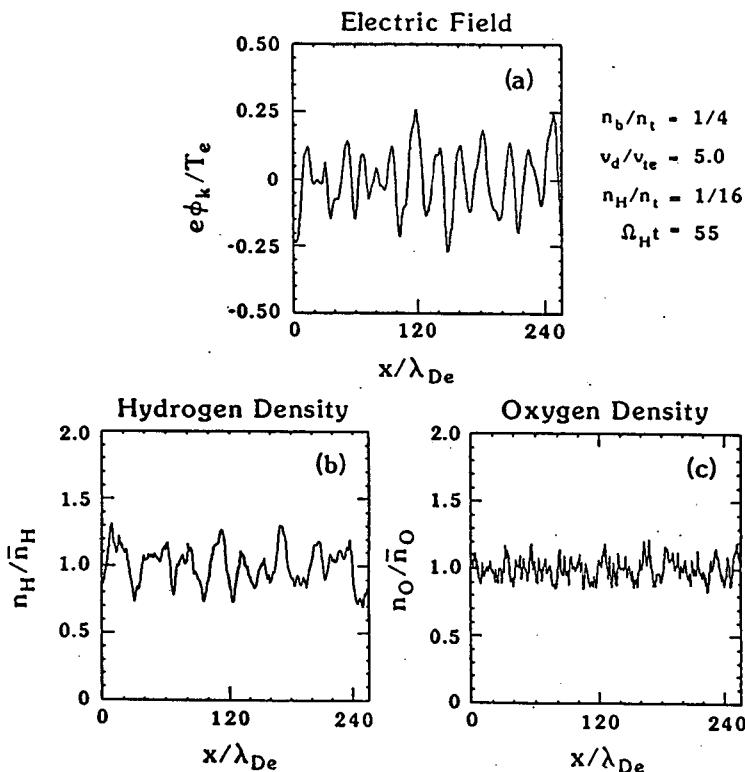
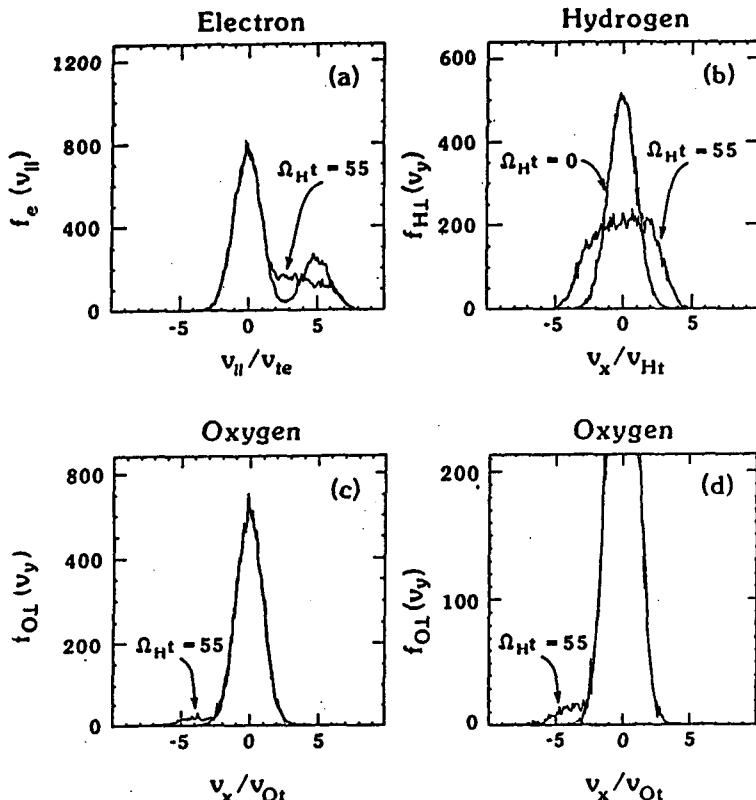


Fig. 2. Results of the simulation at  $\Omega_{Ht} = 55$  for (a) the potential profiles, (b) hydrogen density, and (c) oxygen density.

## Particle Distributions



**Fig. 3.** Results of the simulation at  $\Omega_{Ht} = 55$  for (a) the electron parallel velocity distribution, (b) hydrogen perpendicular velocity distribution, (c), and (d) oxygen perpendicular velocity distribution.

현존하는 불안정성의 정체를 구명하기 위하여 그림 4에 서로 다른 mode들의 time history와 power spectrum이 주어져 있다. mode 2는  $k_{\perp}\rho_H = 0.2$ ,  $k_{\perp}\rho_o = 0.8$ 이고 mode 8은  $k_{\perp}\rho_H = 0.8$ ,  $k_{\perp}\rho_o = 3.2$ 이다. Mode 2의 power spectrum에 의하면 두 가지 peak가 보이며, 하나는  $\omega = \pm 0.008\omega_{pe}$ 이고 또 하나는  $\omega = \pm 0.004\omega_{pe}$ 이다. 높은 진동수는 lower hybrid wave로  $\omega_{LH} = \pm(\omega_{po}^2 + \omega_{pH}^2)^{1/2}$ 이고 낮은 것은 이온교잡파  $\omega_{IH} = \pm(\Omega_o\Omega_H)^{1/2}$ 에 해당된다. 그림 1a에 의하면 lower hybrid파는 stable하고 이온교잡파는 unstable하게 된다. Mode 2와 8의 진폭을 비교하여 보면 mode 8은 훨씬 더 unstable하다. 사실 mode 8의 파동은 크게 증가하여 이온교잡파 또는 Buschbaum 진동수를 가진 파동이 존재한다는 사실을 여실히 증명해 준다.

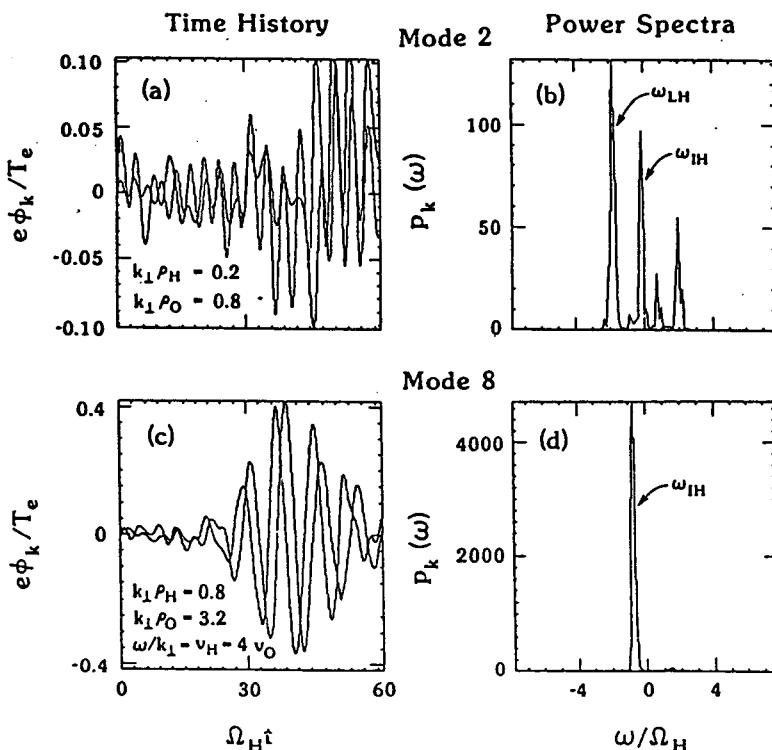


Fig. 4. Time history and power spectrum of the second mode (a), (b), and of the eighth mode (c), (d).

#### 4. 토의

오로라존 내에서 전류에 의하여 무거운 이온들이 가속되는 새로운 물리적 열개를 제안하였다. 전리층 내의 수소와 산소가 들어 있는 혼합플라스마 속에서 이온교잡파가 발생한다. 순수 플라스마 속에서는 이런 파동이 생기지 않는다. 비록 lower hybrid wave instability를 일으키기 어려운 낮은 전자빔의 속력일지라도 이온교잡파를 쉽게 여기시킬 수가 있다. 한편, 이 파동의 진동수는 lower hybrid wave의 진동수보다 더 작아서 쉽게 무거운 이온들과 coupling을 일으킨다. 따라서 무거운 이온들의 가열을 유발한다. 그 반면에 진동수가 큰 lower hybrid wave는 수소이온을 가열시킨다. 수치모의실험에 의하여 이온교잡파의 존재를 확인하였으며, 무거운 이온의 high energy tail 형성을 보았다.

## 참 고 문 헌

- Ashour-Abdalla M. and Okuda H., *J. Geophys. Res.*, 89, 2235 (1984).  
Chang, T. and Coppi, B., *Geophys. Res. Lett.*, 8, 1253(1981).  
Dusenbery, P. B. and Lyons L., *J. Geophys. Res.*, 86, 7627(1981).  
Kim S. Y. and Okuda H., *Phys Fluids* Submitted(1986).  
Kindel J. M. and Kennel C. F., *J. Geophys. Res.*, 76, 3055(1971).  
Lee W. W. and Okuda H., *J. Comput. Phys.*, 26, 139(1978).  
Lysak, R. L., Hudson M. and Temerin M., *J. Geophys. Res.*, 85, 678(1980).  
Okuda H. and Ashour-Abdalla M., *J. Geophys. Res.*, 88, 899(1983).  
Palmadesso, P. J., Coffey T. P., Ossakow S. L. and Papadopoulos K., *Geophys. Res. Lett.*, 1, 105  
(1974).  
Papadopoulos, K. and Palmadesso P., *Phys. Fluids*, 19, 605(1976).  
Stix T. H., *The Theory of Plasma Waves*, McGraw-Hill Co.(1962).