

Beam 전자와 중성 Plasma 사이의 상호작용에 관한 2차원적 수치계산

선종호·민경욱
한국과학기술원 과학기술대학 물리학과
(1990년 11월 1일 접수; 1990년 11월 30일 수리)

TWO DIMENSIONAL SIMULATION OF BEAM INJECTION INTO NEUTRAL PLASMA

Jong Ho Seon and Kyoung Wook Min

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon
(Received November 1, 1990; Accepted November 30, 1990)

요 약

전자 beam이 중성 plasma계에 들어왔을 때의 상호작용을 이차원 정전 model을 사용하여 수치계산을 한 결과 beam의 밀도변화에 따라 상호작용이 큰 변화를 보이는 것으로 나타났다. beam 전자의 밀도가 주변 전자의 밀도보다 낮을 때는 많은 양의 beam들이 주변 plasma와의 상호작용을 통해 위상공간에서 vortex 구조를 보이며 입사지역으로부터 멀리 진행할 수 있었던 반면 beam 전자들의 밀도가 높을 때는 대부분의 beam 전자들이 입사지역으로 되돌아오는 회귀전류를 형성하였다. 이 때 자기장의 세기에 따라 전자보다 훨씬 질량이 큰 ion들이 가속될 수도 있으며 전자들의 전파와 상호작용의 양상이 크게 바뀔 수 있는 것으로 나타났다.

Abstract

Two dimensional electrostatic model was used to investigate the interactions between beam electron and neutral plasma. It was found that results heavily depend on the beam density. When the beam electron density is lower than the ambient plasma beam density, many beam electrons exhibit vortex structure through beam-plasma interactions and can propagate into the ambient plasma easily from the injection area. On the other hand,

when the beam density larger than that of the neutral ambient plasma, it was found that most of the beam electrons constitute return current and ion with much larger mass than that of the electron can be accelerated according to the magnetic field strength. Furthermore, as external field strength varies, it was found that propagation and interaction of the beam can show large dependence on it.

I. 서론

전자 beam이 진공 또는 중성 plasma계에 들어왔을 때 beam이 어떻게 전파되며 어떻게 상호 작용하는가를 이해하려는 노력이 최근에 와서 더욱 활발해지고 있는데, 그것은 이 현상이 실험실 및 천체 plasma에 이르기까지 다양하게 일어나는 현상 중의 하나이기 때문이다. 한 예로, 실험실에서는 intensive relativistic beam의 전파특성을 알아보기 위해 이 현상을 연구하고 있으며,¹⁾ 이온층이나 자기권에 관련된 연구로 여기에 존재하는 plasma의 성질을 알아보기 위해 발사되는 인위적인 beam 때문에 이 현상이 관심의 대상이 되고 있다.²⁾ 또, solar flare 발생시 자기력선을 따라 채층으로 진행되는 전자 beam들과 주변 plasma(ambient plasma)간의 상호작용에 관한 이해가 필요하게 됨에 따라 천체물리학의 한 과제가 되었다.³⁾

이렇게 제반 물리제에 다양하게 일어나는 위의 현상을 이론적으로 설명하기 위해 종래에는 주로 해석적 방법이 이용되어 왔다. 한편, 해석적 방법은 깊은 물리적 이해를 주고 있지만 plasma계의 다체적 성질 때문에 이 방법이 적용될 수 있는 데에는 한계가 있다. 또한, 해석적 접근방법은 주로 정상상태의 해를 구하는 데에 치중되어 왔으므로 plasma와 같은 다체문제의 시간적 진화를 이해하려는 시도로는 computer 수치계산이 더욱 적합하다. 본 논문에서 다루는 plasma와 전자 beam의 상호작용은 그 근본이 wave-particle 상호작용이므로 여러 가지의 수치계산방법 중 particle simulation이 적합한 방법이 되겠다.

전자 beam과 plasma의 상호작용에 관한 particle simulation은 주로 우주선에서의 beam 발사와 solar flare를 이해하려는 목적으로 이루어졌다. Okuda와 Berchem⁴⁾은 우주에서의 beam 발사 실험과 관련된 Simulation 연구를 통해 전자 beam들이 중성 plasma계에 있는 전류의 양은 대략 $n_e v_e T_e$ (n_e : 주변 전자(ambient plasma electron)의 밀도, v_e : 주변 전자의 열 속도, T_e : 주변 전자의 온도)로 제한되어 있다는 것을 밝혀냈다. 한편, solar flare가 일어나는 동안 전자들의 energy가 어떻게 주변 plasma에 전달되는가를 알아보기 위해서 Winglee 등⁵⁾은 2차원 모델을 사용하여 연구한 결과 전자 beam의 전파와 회귀전류의 형성에는 자기장에 수직인 방향으로의 ion의 운동이 중요한 역할을 한다는 것을 밝혀냈다.

이 논문에서는 2차원적인 모델을 통해 종래의 수치계산에서 부족했던 beam의 밀도변화에 다른 beam 에너지의 열평형화(thermalization)와 주변 plasma의 가속에 관한 고찰을 하고자 한다. II에서는 수치계산 모델을, III에서는 수치계산 결과를, IV에서는 수치계산 결과에 대한

TWO DIMENSIONAL SIMULATION

간단한 논의를 하고자 한다.

II. 수치계산 모델

이 논문은 2차원 정전(2-dimensional electrostatic) model에 기초한 것이다. beam 전자들은 자기장을 따라 일정한 시간간격으로 입사된다. 이 때 주변 plasma들은 완전히 ion화돼 있는 것으로 가정하였다. 주변 plasma들은 초기에 균일하고 Maxwellian 속도분포를 하며 ion들과 전자들의 열 energy는 같다. 또, ion의 질량은 전자의 질량보다 100배 크다고 가정하였는데 이것은 주어진 시간동안 ion의 운동을 볼 수 있게 하기 위한 것으로 결과를 크게 바꾸어 놓지는 않는다. 또, 수치 계산하는 시간은 초기에 발사된 beam 전자들이 반대편 경계를 도달할 때까지이다.

이 논문에서 사용된 X축과 Y축은 각각 beam의 진행방향과 그 직각방향을 나타내며, 수치 계산계의 크기는 X축으로 512Δ , Y축으로 128Δ 이다. 여기서 Δ 는 Debye 거리이다. 여기서 사용된 계는 $Y=64\Delta$ 를 중심으로 완전히 대칭이며 beam은 $X=0$ 에서 폭 16Δ 를 가지고 X축 방향으로 진행된다. 주변 plasma 입자들에 대해서 오른쪽 경계($X=512\Delta$)는 반사 경계조건을 가정하였는데, 그것은 여기서의 계가 고립되어 있지 않고 이웃과 입자들을 서로 교환할 수 있다고 가정했기 때문이다. 반면에 beam이 발사되는 왼쪽 경계를 통과하는 beam이나 plasma들은 계에서 제외시켰다. 각 시간대에서의 전기장을 계산하기 위해서는 전하밀도를 구한 후 Poisson 방정식을 풀어야 하는데, 오른쪽 경계에서의 전기장 $E_x=0$ 로 하고 Y축 방향으로 는 주기적 경계조건을 사용하였다.

III. 수치계산 결과

1차원적 모델과 비교하여 볼 때 2차원적 모델의 중요성은 전자나 ion들이 외부에서 걸어준 자기장의 방향에 수직으로 움직이는 운동을 관찰할 수 있다는 점이다. 특히 beam쪽이 ion의 gyro 반지름 정도되는 경우에 자기장에 수직인 방향으로 움직이는 ion은 전하 중성조건을 만족시키는 데 중요한 역할을 미치는 것으로 보고되었다. 본 논문에서는 beam의 밀도변화에 따른 beam-plasma 상호작용을 살펴보기로 하고, 특히 전하중성조건을 만족시키기 위한 전자나 ion의 운동을 관찰하고자 한다.

1) 저밀도 beam의 경우($n_b=1/4n_e$)

Winglee 등⁵⁾에 의하면 beam의 밀도가 주변 plasma의 1/4 정도되는 경우에 beam-plasma 상호작용이 가장 활발하여 beam의 열적 평형화와 주변 plasma의 가속이 최대로 된다고 하였다. 본 논문에서는 이 1차원적 수치계산의 결과에 따라 $n_b=1/4n_e$ 인 경우부터 검토하겠다.

그림 1.a)는 X-Y 공간에서의 beam 전자들의 분포이다. 수치계산에 사용된 외부 자기장의 세기는 beam의 진행방향과 나란한 방향과 $\omega_{ce}=\omega_{pe}$ 를 만족하는 세기를 가지고 있다(ω_{ce} : beam전자의 cyclotron 반지름, ω_{pe} : 주변 전자의 초기 plasma 진동수). 그림에서 볼 수 있듯이 beam의 폭을 그대로 유지하면서 진행함을 알 수 있다. 그것은 전자의 gyro 반지름이 beam의 폭에 비해서 아주 작아 자기장에 수직인 방향, 즉 beam 진행방향에 직각인 방향으로의 운동이 거의 없기 때문이다. 또한, X축 방향으로의 밀도의 주기적 변화를 보이는데, 이것은 beam의 위상공간에서의 vortex 구조(그림 1.b))와 일치하는 것으로 밀한점이 stagnation point이다. Stagnation point는 진행하는 beam 전자들이 진행속도가 0이 되는 점으로, 이 점 부근에서의 밀도는 높아지게 된다. 그림 1.b)는 위상공간에서의 beam 전자들의 분포를 나타내는 것으로 beam의 앞부분은 입사속도 $V_b=10$ 을 유지하면서 전파하나 beam의 뒷부분은 주변 plasma와 작용하여 vortex 구조를 형성한다. 이 때 beam의 일부는 가속되어 $V_b=17$ 까지 이르며 입사구역에서는 되돌아가는 beam 전자들도 보인다. 이 beam 전자들은 밀도가 낮아서 수치계산구역에 들어왔음에도 불구하고 X-Y 공간에서의 주변 전자들의 밀도변화는 뚜렷하게 나타나지 않는데, 이 결과는 beam 입사지역의 주변 plasma가 대부분 회귀전류로 나가버린 1차원적 수치계산의 결과와는 현격한 대조를 이룬다. 그림 1.c) 그림 1.d)는 주변 전자들의 위상공간에서의 분포로 beam-plasma 상호작용에 의해 일어나는 plasma 진동과 일부전자들의 가속도 볼 수 있다. 특히 이 가속된 전자들은 beam의 입사속도보다 더 큰 $V_e=17$ 까지도 가속되며 beam 전자들은 위상공간에서와 같이 vortex 구조를 보여준다. 반면에 beam 전자들의 밀도가 낮아서 주변 전자들의 회귀전류는 뚜렷하게 나타나지는 않는다. 그림 1.e)와 1.f)는 주변 ion들의 X-Y 공간 및 위상공간에서의 분포로 beam이 들어오기 전의 상태와 비교하여 별다른 변화가 없다.

그림 2는 beam 전자, 주변 전자 및 ion들의 분포곡선을 나타낸 것이다. 그림 2.a)는 beam 전자들의 X방향의 속도 분포곡선으로 위상 공간에서 나타난 vortex들 중 beam 입사속도보다 가속된 부분과 함께 $V_b=1$ 정도를 중심으로 감속된 전자들이 함께 있음을 보여준다. 그림 2.b)는 beam 전자들의 Y축 방향의 속도 분포곡선으로 $V_b=1$ 정도의 maxwellian 분포를 이룬다. 그림 2.c) 및 2.d)는 각각 주변 전자들의 X방향과 Y방향으로의 속도 분포곡선으로 Y방향의 속도변화는 약간의 열 평형화를 제외하고는 별 변화가 없으나, X방향의 속도 분포는 peak가 $V_e=-0.8$ 정도로 이동하였고 열속도(thermal velocity) $V_{the}=1.3$ 정도로 분산되었음을 알 수

TWO DIMENSIONAL SIMULATION

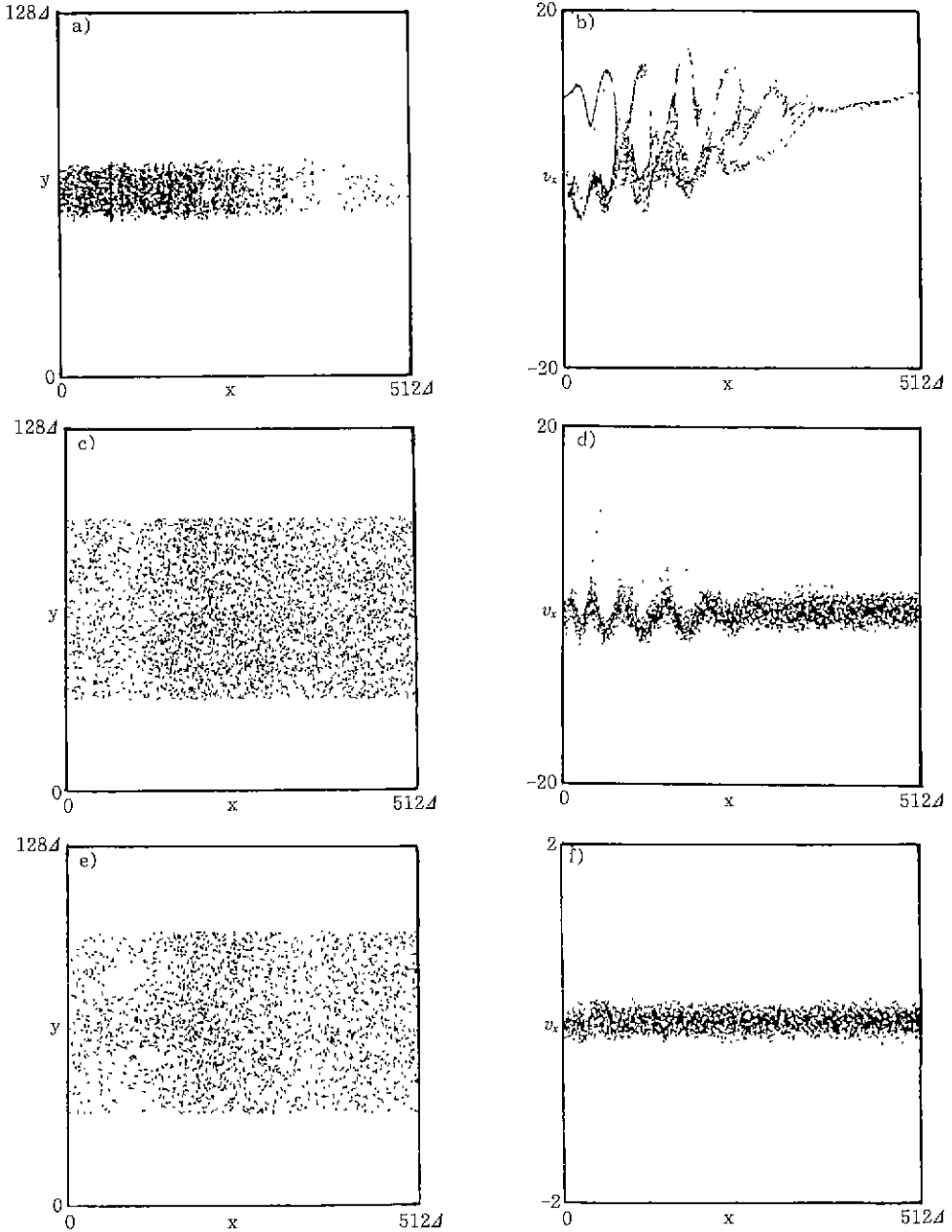


그림 1. 저밀도 beam의 결과.

- a) X Y 공간에서의 beam 전자들의 분포
- b) 위상공간에서의 beam 전자들의 분포
- c) X Y 공간에서의 주변 전자들의 분포
- d) 위상공간에서의 주변 전자들의 분포
- e) X Y 공간에서의 ion의 분포
- f) 위상공간에서의 ion의 분포

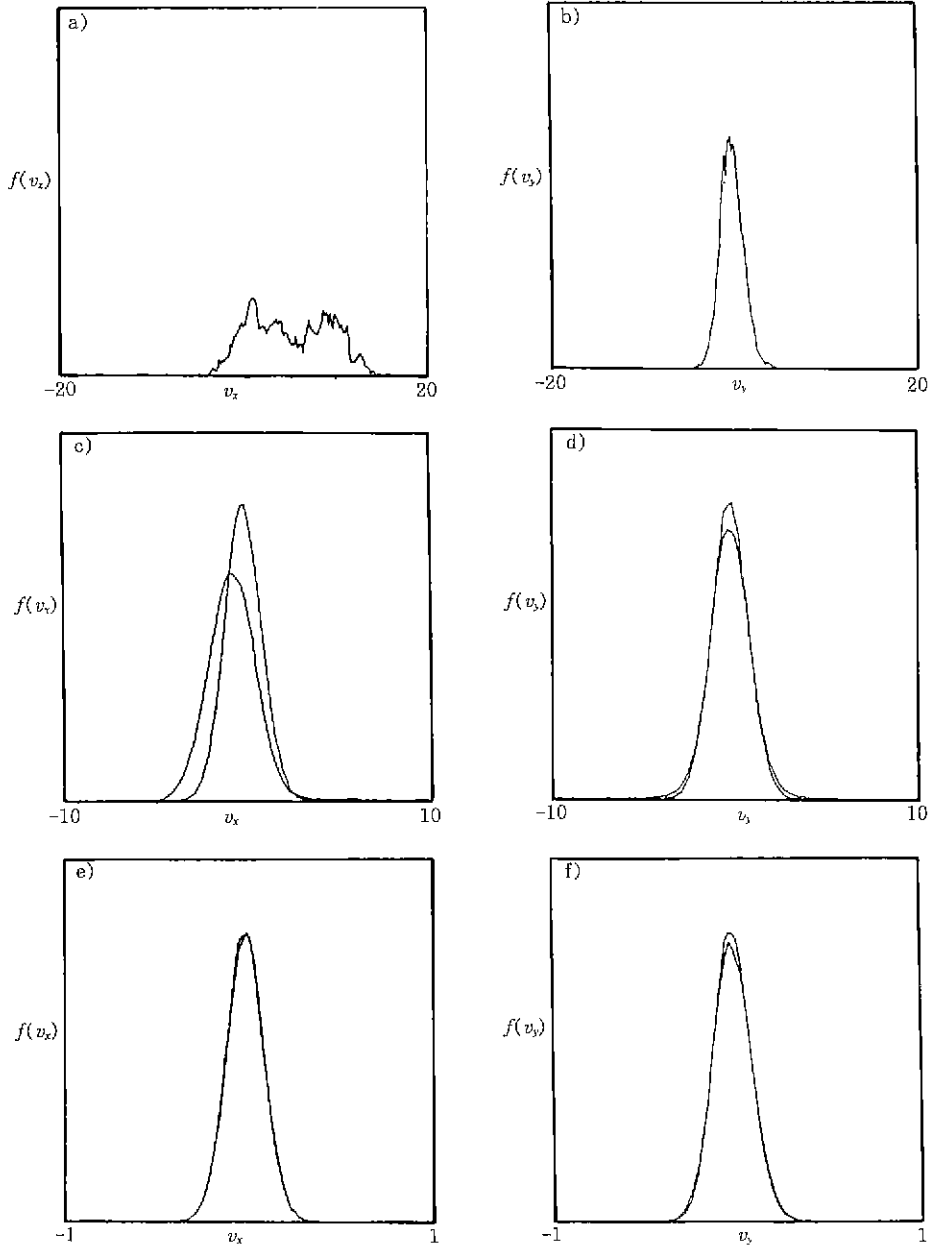


그림 2. 저밀도 beam의 결과.

- a) beam 전자들의 X방향 속도분포곡선
- b) beam 전자들의 Y 방향 속도분포곡선
- c) 주변 전자들의 X방향 속도분포곡선
- d) 주변 전자들의 Y방향 속도분포곡선
- e) ion들의 X방향으로의 속도분포곡선
- f) ion들의 Y방향 속도분포곡선

TWO DIMENSIONAL SIMULATION

있다. 그림 2.e) 및 2.f)는 각각 주변 ion들의 X방향과 Y방향으로의 속도분포곡선을 나타내는데 별 변화를 보여주지 않는다.

beam 밀도를 고정시켜 놓고 자기장의 변화에 따른 변화를 보면 자기장의 세기가 약할수록 beam의 gyro 반지름이 커져 넓게 퍼지면서 멀리 진행할 수 있다. 이에 따라 beam의 진행방향으로의 분산도 컸다. 속도 분포곡선을 보면 자기장의 세기가 약한 경우 충분한 beam-plasma 상호작용을 통해 분포곡선의 모양이 Maxwellian에 가까운 반면, 반대의 경우에는 그 모양이 평평한 모양을 이루었으며 회귀전류의 양도 앞의 경우에 비해 많았다. 그러나 주변 전자의 분포곡선은 자기장의 세기에 따른 변화가 별로 보이지 않는데, 이것은 beam의 밀도가 낮은 이유 때문으로 뒤에서 보게 될 고밀도 beam의 경우와는 대조되는 사실이다. 또, 주변전자는 X-Y 공간에서 자기장의 세기가 충분히 강한 경우 beam 입사구역 근처에서 밀도가 낮은 동공구조를 보인다. 이것은 이 지역에서 beam의 밀도가 높기 때문이다. 자기장의 세기가 약한 경우에는 beam이 넓게 퍼질 수 있어 이런 구조는 보이지 않는다. 한편, 앞에서 언급했던 것처럼 beam 전자와 주변전자는 위상공간에서 서로 비슷한 vortex를 가지는데, 대체로 자기장이 약한 경우에 beam이 멀리 진행할 수 있어 vortex 구조의 형성이 beam 입사구역으로부터 먼 곳까지 가능하며 stagnation point의 형성도 beam 입사구역으로부터 가까운 곳에 나타나는 것을 알 수 있다. 주변 전자도 역시 beam이 vortex 구조를 형성하는 곳에서 plasma 진동을 보이며 자기장이 센 경우 beam이 vortex구조를 형성하지 않는 beam 입사구역 근처에서는 대체로 진동보다는 회귀전류를 형성한다. 자기장의 세기에 상관없이 저밀도 beam의 경우에 ion의 속도분포는 큰 변화를 보이지 않는다.

2) 고밀도 beam의 경우($n_b = 2n_e$)

beam의 밀도가 주변 전자의 밀도보다 높으면 앞의 저밀도 beam의 경우와는 상당히 다른 양상을 보인다. 우선 고밀도의 경우 beam전자들은 멀리 진행하여 beam-plasma 상호작용을 한다기보다는 대부분이 입사구역으로 되돌아가게 된다. 따라서 저밀도 beam의 경우에 보였던 vortex 구조나 plasma 진동 등은 잘 보이지 않는다. 이것은 beam 전자들이 왼쪽 경계를 떠나면서 남게 되는 전기장을 주변 전자들이나 ion들이 충분히 상쇄시켜 주지 못함으로 해서 beam 전자들이 멀리 진행하지 못하고 회귀전류를 형성하기 때문이다. 한편, 자기장의 세기가 적당해서 전자의 gyro 반지름이 beam의 폭보다 작고 ion의 gyro 반지름이 beam의 폭보다 큰 경우 ion은 beam의 진행과 수직방향으로 움직일 수 있는 반면 전자들은 그렇지 못하므로 전하중성조건에 미치는 영향이 커진다.

그림 3.a)는 X-Y 공간에서의 beam의 분포이다. X축 방향으로 밀도의 주기적 변화를 보였던 저밀도 beam의 경우와는 달리 beam의 입구에서만 높은 밀도를 보이고 멀리 진행하지 못했다. 또, 그림 3.b)의 위상공간의 그림을 보면 beam 입구 근처에서의 많은 전자들 중 회귀

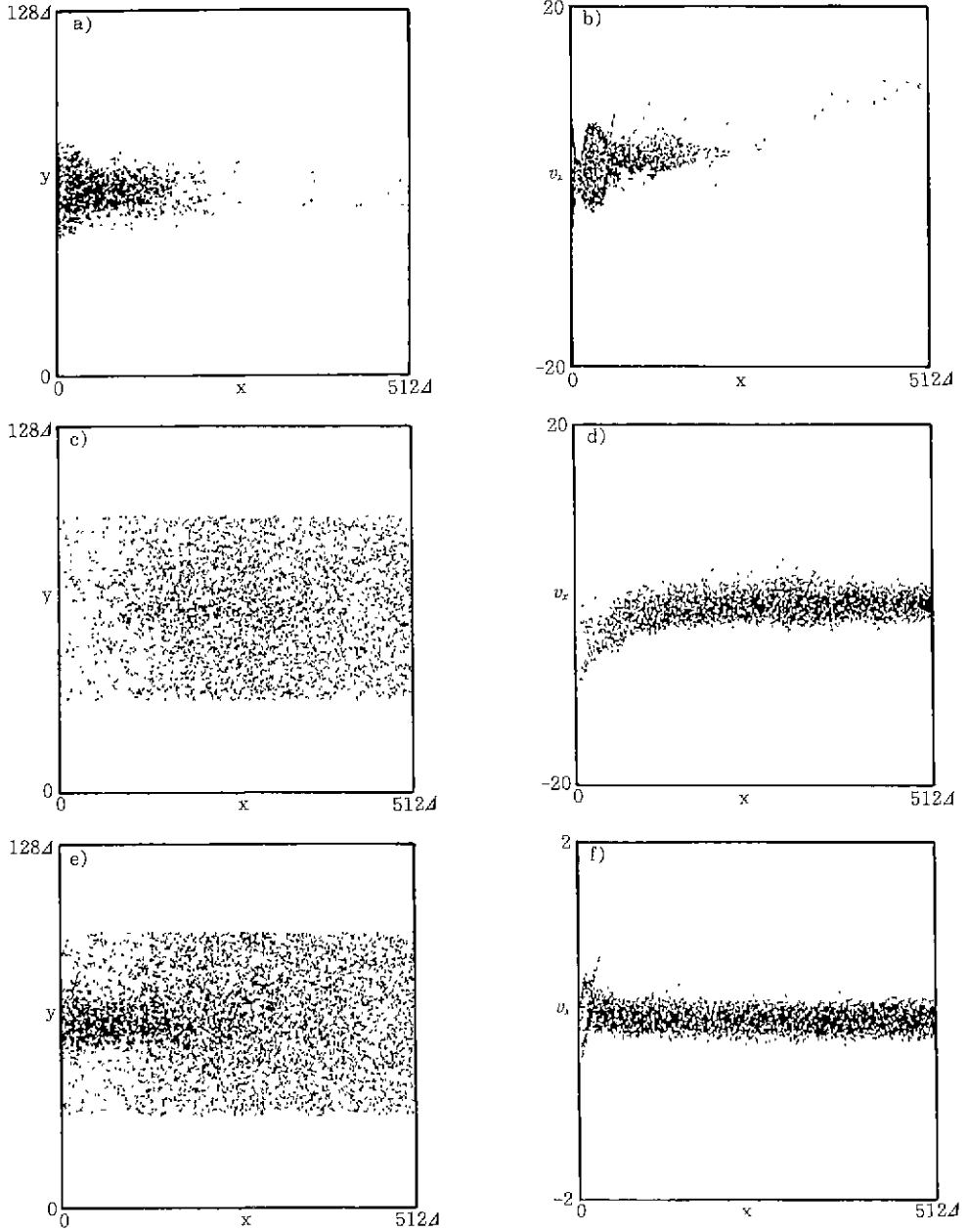


그림 3. 고밀도 beam의 결과.

- a) X Y 공간에서의 beam 전자들의 분포
- b) 위상공간에서의 beam 전자들의 분포
- c) X Y 공간에서의 주변 전자들의 분포
- d) 위상공간에서의 주변 전자들의 분포
- e) X Y 공간에서의 ion의 분포
- f) 위상공간에서의 ion의 분포

TWO DIMENSIONAL SIMULATION

전류의 형성에 참가하는 전자들이 저밀도 beam의 경우보다 많다는 사실도 알 수 있다. 저밀도 beam의 경우 $V_b=17$ 에 이르는 높은 energy를 얻은 가속된 beam들이 있는 것과 달리 고밀도 beam의 경우에는 거의 모든 beam전자들이 감속되었다. 그림 3.c)는 주변 전자의 X Y 공간 분포로 가장 눈에 띄는 사실은 beam의 밀도가 높은 beam의 입사구역에서 주변 전자의 밀도가 낮다는 것이다. 그림 3.d)는 주변 전자들이 plasma 진동을 하지 않고 회귀전류를 형성하는 사실을 보여준다. 많은 변화를 보이는 ion의 X Y 공간에서의 분포와 위상공간에서의 분포를 보면(그림 3.e), 3.f)) ion들이 X Y 공간에서 beam 폭 내에 높은 밀도를 이룬 것과 ion이 beam 입구에서 크게 가속된 사실을 볼 수 있다. ion이 beam 내부로 모이는 것은 beam 전자들에 의해 생성된 전기장을 beam 폭 내의 전자만으로 충분히 상쇄시켜 줄 수 없는 고밀도 beam의 경우에 주변 전자들의 gyro 반지름이 beam 폭보다 작고 ion의 gyro 반지름이 beam의 폭보다 클 때 일어난다. 이 경우에는 beam 전자들이 자기장선에 묶여 있어 자기장 수직방향으로 움직일 수 없으므로 ion들이 가속된 것이다. 물론 전자의 반지름이 beam의 폭보다 크면 질량이 작은 주변 전자들이 움직이게 된다.

그림 4.a), 4.b)는 beam의 속도 분포곡선이다. 앞에서 언급했듯이 많은 beam 전자들이 되돌아옴에 따라 비교적 분산폭이 크다. 특히 초기에 $V_b=10$ 이었던 X축 방향으로의 분포곡선이 $V_b>8$ 의 높은 에너지 꼬리와 $V_b<-4$ 의 회귀전류부분을 제외한 나머지는 열적으로 평형화되어 비교적 Maxwellian에 잘 접근해 있다. beam의 수직방향의 분산도 커서 초기에 $V_{thb}=1$ 이었던 것이 $V_{thb}=2.1$ 정도로 커졌다. 주변 전자의 분포곡선의 모양은 그림 4.c)와 4.d)에서 찾아 볼 수 있다. beam 전자들과 달리 Y방향으로의 주변 전자들의 운동에는 변화가 비교적 적은 것을 그림 4.d)에서 알 수 있고, 그림 4.e) 및 4.f)는 ion의 X, Y 방향의 속도 분포곡선으로 X방향으로 가속된 ion들이 존재함을 보여주며 Y 방향으로는 $V_{thi}=0.1$ 로부터 $V_{thi}=0.22$ 정도로 가속되었음을 보여준다.

자기장의 세기에 따른 변화를 보면 자기장의 세기가 아주 강한 경우에는 앞에서 관찰되었던 ion의 수직방향으로의 가속은 보이지 않는다. 그 이유는 물론 ion의 gyro 반지름이 beam의 폭보다 작아지기 때문이다. 그 대신 중성조건을 만족시키기 위해 beam 폭 내에서 beam 전자나 주변 전자들이 여러 갈래로 나뉘어 서로 엇갈려 진행되는 filamentation의 형성이 이루어진다. 이 때 대체로 beam 전자들은 beam의 중심과 경계 부분에서 높은 밀도를 이루지만 그 사이에는 beam 전자들이 거의 없는 지역도 있다. 반면 자기장의 세기가 약해지면 beam 전자들이 입구에서 퍼져 더 멀리 진행할 수 있어 위상공간에서 약간의 vortex 구조를 보인다. 주변 전자의 분포곡선은 강한 자기장의 경우 속도분포곡선이 전체적으로 음의 방향으로 이동된 반면 반대의 경우에는 peak가 $V_e=0$ 에 그대로 있는 채 높은 energy 꼬리가 형성되었다. 이것은 beam 전자들이 자기장선에 묶여있을 경우 중성조건을 만족시키기 위해 beam 폭 내의 전자들은 물론 바깥쪽의 전자들까지 이동해야 하는 반면 그 반대의 경우에는 beam이 넓게 퍼져 beam의 밀도가 낮아지는 효과를 얻기 때문이다.

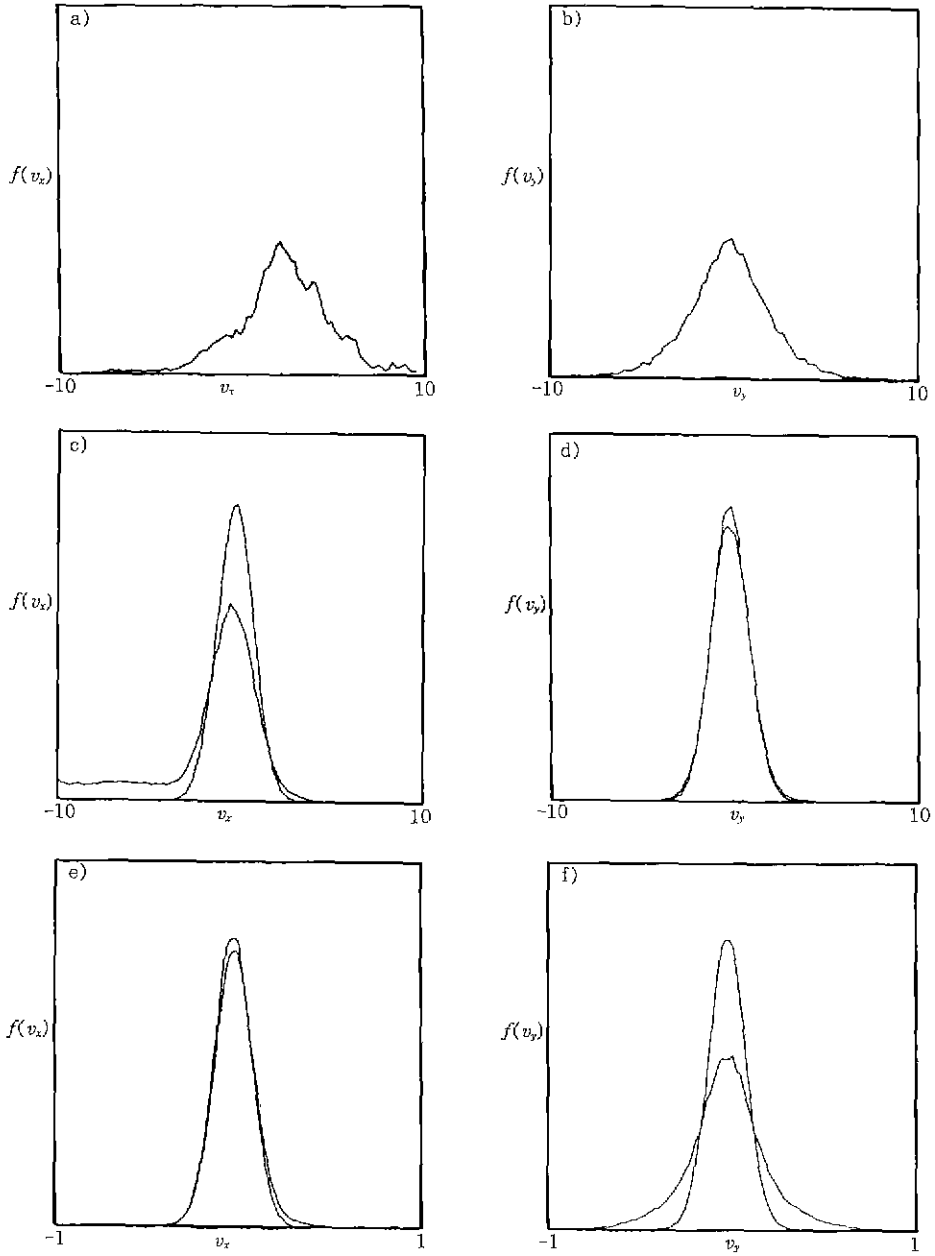


그림 4. 고밀도 beam의 결과.

- a) beam 전자들의 X방향 속도분포곡선
- b) beam 전자들의 Y방향 속도분포곡선
- c) 주변 전자들의 X방향 속도분포곡선
- d) 주변 전자들의 Y방향 속도분포곡선
- e) ion들의 X방향 속도분포곡선
- f) ion들의 Y방향 속도분포곡선

IV. 결 론

이 논문에서 사용된 2차원 정전모델은 종래에 사용되어 왔던 1차원 model에 비해 몇 가지 다른 점을 보여준다. 우선 1차원 model이 beam의 폭이 크게 넓다는 조건하에 beam의 진행 방향과 수직방향으로는 변화가 없다고 가정함으로써 beam이나 주변 plasma가 자기장에 직각인 방향으로 어떻게 가속되는가를 알 수 없었는데 반해 전자들보다 질량이 훨씬 큰 ion들이 자기장의 세기에 따라 가속될 수 있다는 것은 2차원모델의 주목할 만한 결과이다. 이 ion의 수직방향으로의 가속은 stagnation point 근처에서만 일어나는 수평방향의 가속과는 달리 beam이 전파되는 계 전반에 걸쳐 일어났다. 또, 회귀전류의 양도 더 클 수 있어 본 논문의 자기장의 세기를 가지는 경우 1차원의 것보다 약 1.5배 가량 클 수 있는 것으로 나타났는데, 이것은 beam이 퍼질 수 있기 때문이다.

beam의 밀도변화에 관한 결과를 보면 고밀도 beam의 경우 많은 전자들이 대부분 $X=64\Delta$ 안에 갇혀 있는 것을 알 수 있었다. 반면에 저밀도 beam의 경우에는 상당한 양의 beam 전자들이 전파될 수 있어 주변 plasma와 상호작용하는 것으로 나타났다. 이 경우 beam 전자들과 주변 전자들은 위상공간에서 vortex 구조를 보였다. 고밀도 beam의 경우에 beam이 멀리 전파할 수 없게 됨에 따라 가속되거나 감속되는 주변 plasma들은 beam 입구 근처에 제한되어 있는 반면 저밀도 beam의 경우에는 많은 주변 전자들이 계 전반에 걸쳐 가속될 수 있었고, 이 중 일부는 초기 beam의 속도보다 더 높게 가속될 수도 있었다.

한편, 자기장의 세기에 따른 결과는 자기장이 약할 때 gyro 반지름이 커져 beam이 멀리 진행 가능하며, 특히 고밀도 beam의 경우에는 높은 energy 꼬리를 형성하는 것으로 나타났다. ion이 beam 진행방향에 수직으로 가속되는 경우는 beam의 밀도가 클 때로 beam의 폭이 ion의 gyro 반지름보다 작고 주변 전자들의 gyro 반지름보다 클 때이다.

이 연구는 한국과학재단과 한국과학기술원의 지원으로 실행된 것임을 밝히둔다.

참고문헌

- 1) 최은하, 최덕인 1987, 세물리, 27, 134.
- 2) Obayashi 1985, *Appl. Space Technol.*, 5, 37.
- 3) E. Antonucci, A. H. Gabriel, and B. R. Dennis 1984, *Ap. J.*, 287, 917.
- 4) H. Okuda and J. R. Kan 1987, *Phys. Fluids*, 30, 209.
- 5) R. M. Winglee, P. L. Prichett, and G. A. Dulk 1988, *Ap. J.*, 327, 968.
- 6) R. M. Winglee and P. L. Prichett 1987, *J. Geophys. Res.*, 92, 6114.