TSPE16090-032-5

북극 전리권에서의 이온 운동을 기술하는 수송식 및 클로저 개발

2017. 1.

Utah State University

제 출 문

한국해양연구원 부설 극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 전리권에서의 이온 운동을 기술하는 수송식 및 클로저 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 1. 29

총괄연구책임자 : 지 건 화

위탁연구기관명 : Utah State University

위탁연구책임자 : 지 정 영

참 여 연 구 원 : 지 정 영

요 약 문

Ⅰ. 제 목

북극 전리권에서의 이온 운동을 기술하는 수송식 및 클로저 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

최근에 원칙적으로 무한개의 모멘트를 사용할 수 있는 일반화된 모멘트 방법이 개발되었다. 일반화된 모멘트의 방법의 가장 큰 장점은 쿨롱 충돌연산자를 정확하게 계산할 수 있다는 것이다. 북극 고층대기 및 기후변화의 예측은 밀도, 온도, 유체속도 식들을 포함하는 유체모델을 통해서 이루어지는데 이들 유체식들은 더 높은 차수의 모멘트를 포함하여 미지수가 식의 수보다 많은 클로저 문제를 포함한다. 지금까지의 클로저는 충돌이 아주 높은 경우에만 구해져 있는데 전년도 연구에서 전자의 경우 일반적인 충돌도 및 이온전하수에 대하여 클로저가 개발되었다. 본 연구에서는 일반적인 충돌도, 온도, 질량, 전하수에 대하여 이온의 클로저를 개발한다. 또한 전년도에 계산했던 쿨롱-밀른 (Coulomb-Milne) 문제를 재검토한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

1. 쿨롱 충돌연산자, 전하교환연산자, 이온화 및 재결합 연산자를 계산한다.
2. 위의 연산자들을 포함하는 일반화된 모멘트식을 개발한다.
3. 일반화된 모멘트 방법을 이용하여 수송식을 개발한다.
4. 이온의 클로저 개발

a. 일반화된 모멘트식을 선형근사를 통하여 해석적으로 푼다.

b. 적분형태로 나타나는 클로저에서 커널(kernel, Green function)들을 구하고 충돌이 없는 근사에 맞추어 커널의 피팅함수들을 구한다.

5.이온 수송 (쿨롱-밀른 문제): 모멘트 방법으로 계산한 고도에 따른 온도가 기존의 이론과 다른 결과를 보여서 계산 결과를 재검토한다. 전체속도와 랜덤속도 모멘트의 두가지 방법을 써서 계산하여 두 결과를 비교한다.

Ⅳ. 연구개발결과

1. 이온의 클로저 개발

a. 일반화된 모멘트식을 선형근사를 통하여 해석적으로 풀었다..

b. 적분형태로 나타나는 클로저에서 커널(kernel, Green function)들을 고유값과 고유벡터로 표현하였다. 또한 충돌이 없는 근사에 맞추어 커널의 피팅함수들을 단순한 식으로 표현하고 일반적인 충돌도, 이온 전하수, 질량 및 온도에 대하여 매개변수들을 모두 구하였다.

2. 이온 수송 (쿨롱-밀른 문제)

a. 작은 수의 이온이 전리권을 빠져 나갈 때 충돌연산자를 계산하였고, 일반화된 모멘트식을 전체속도 및 랜덤속도 모멘트를 가지고 만들었다. 이 경우 전체속도 모멘트의 경우에 모멘트 식은 선형이어서 행렬식으로 쓸 수 있었다.

b. 위의 두 모멘트 방법에서 모멘트를 고도의 파워급수로 전개하고 모멘트식에 대입하여 계수들을 구하였다. 두 방법이 같은 결과를 주는 것을 확인하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

1. 쿨롱 충돌연산자, 전하교환연산자, 이온화 및 재결합 연산자를 핵석적으로 계산하고 일반화된 모멘트식을 개발하였다.
2. 이온 수송 연구를 위하여 쿨롱 멀른 (Coulomb-Milne) 문제를 풀었다. 이온 사이의 충돌인 쿨롱 충돌 연산자만 고려하고 맥스웰 배경분포에서 소수 이온의 수송이론을 계산하였다. 모멘트들을 거리의 파워급수로 전개한 후 모멘트에 대입하여 전개 계수를 구하였다. 모멘트 수를 1501개까지 증가시키면서 급수의 전개 계수들이 수렴하는지 확인하였다.
3. 1차연도에서 개발한 전자의 클로저와 2차연도에서 개발한 이온의 클로저를 이용하면 밀도, 온도, 유체속도 식들의 유체계를 닫을 수 있다. 이전의 클로저는 충돌도가 매우 큰 경우에만 적용할 수 있었는데 본 연구에서 개발한 클로저는 임의의 충돌도를 가진 플라즈마에 적용될 수 있으며 또한 매우 일반적인 이온과 전자의 온도 및 여러 종류의 원자에 적용될 수 있어서 응용범위가 매우 광범위하다.
4. 쿨롱-밀른 방법에 적용된 모멘트 방법은 몬테카를로 방법과 결합하여 전에 계산이 어려웠거나 비효율적이었던 수송문제에 적용하여 더 쉽고 효율적으로 이온수송을 계산할 수 있다.

SUMMARY

I. Title

Ion transport and closures in the north polar ionosphere

II. Objectives and necessity of the research

Recently an infinite hierarchy of moment equations have been developed. One advantage of the moment method is exact calculation of the Coulomb collision operators. Predicting the weather change of the upper atmosphere in the northern polar atmosphere can be achieved by studying fluid models of density, temperature, and flow velocity. These fluid equations are coupled to higher order moments and consequently unknowns are more than equations, which is called the closure problem. In general, closures are developed only for high collisionality. In the first year of this project, electron closures have been developed for arbitrary collisionality and ion charge numbers. In the proposed research, ion closures will be developed for arbitrary collisionality, ion charge number, ion mass, and electron-ion temperature ratios. In addition, the Coulomb-Milne problem solved in the first year will be reexamined.

III. Contents and Scopes in research development

1. Compute the Coulomb collision operator, charge exchange operator, ionization, and recombination operators.
2. Develop the general moment equations that include the operators
3. Develop transport equations using the general moment equations
4. Develop ion closures

   a. Solve a system of linearized general moment equations analytically.kernel functions for the integral form of closures and find simple fitted functions combining the moment and collisionless kernels.
5. Ion transport (Coulomb-Milne problem): Since the results

computed from the general moment method show different behavior in temperature, a more careful analysis is required. We adopt the total and random velocity moment equations and compare two results.

IV. Research and development outcomes

1. The general moment equations have been developed with the Coulomb collision operator, charge exchange operator, ionization, and recombination operators included.
2. The Coulomb-Milne problem has been solved using the general moment equations.
3. Ion closures have been developed

   a. Systems of linearized general moment equations have been solved analytically.functions have been obtained for the integral form of closures and simple fitted kernel functions have been obtained combining the moment and collisionless kernels.

4. Ion transport (Coulomb-Milne problem)

   a. For minor species ions escaping the Maxwellian background, we have written the general moment equations in terms of total- and random- velocity moments. The total velocity moment equations are linear and hence can be written in matrix form.

   b. We obtained the power series solutions in the both moment systems and confirmed that the both moment methods yield the same results.

V. Plan to use outcomes (Future work)

1. The general closures and transport will be computed using the moment equations developed in the first year of the Project.
2. The transport theory of plasmas with neutrals will be computed.
3. The closures will be developed for high- to low-collisionality

plasmas.

4. The electron closures developed in the first year and the ion closures in the second year can be used to close plasma fluid equations for the density, temperature, and flow velocity. While the existing closures are valid only for high-collisionality plasmas, new closures are valid for arbitrary collisionality and can be applied to wide range of plasmas.

5. Combining the general moment method with the Monte-Carlo method, we can compute the ion transport more conveniently and efficiently than existing numerical methods.

목 차

제 1 장 서론

북극 전리권에서의 플라즈마의 물리적인 상태는 플라즈마 유체역학이나 운동학으로 기술될 수 있다. 원리적으로 운동학적인 기술방법은 플라즈마 상태를 이해하는데 필요한 모든 정보를 포함하지만 수학적으로 매우 복잡하여 실질적인 경우에 다루는 것이 거의 불가능하다. 한편 유체역학적인 방법은 운동학적인 방법과 비교하여 매우 단순하고 또 측정되는 물리량을 직접 다루는 장점이 있는 반면에 클로저 문제를 해결해야 하는 단점을 가지고 있다. 자기장에서 플라즈마의 유체역학을 기술하는 클로저는 충돌이 많은 경우에만 브래진스키(Braginskii)[1]에 의해서 개발되어 있으며 미분식에 의해 표현되는 확산물리현상으로 기술된다[2].

문제는 충돌이 적거나 거의 없는 경우인데 대부분의 높은 온도 또는 낮은 밀도의 플라즈마가 이 상태에 해당한다. 이 경우 운동식을 풀어서 클로저를 구해야 하는데 대부분의 경우 방정식을 풀 수 없어서 임시방편적인 방법으로 브래진스키의 식들을 가지고 매개변수만 바꾸어서 사용하고 있다. 그러나 충돌이 낮은 경우의 클로저는 충돌이 높은 경우와 근본적으로 다른 물리법칙으로 기술되어서 클로저가 미분식이 아닌 적분식으로 표현되므로 임시방편적인 방법을 적용하는 것은 올바른 물리현상을 기술하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 운동식을 푸는 대신에 그와 동등한 일반화된 모멘트식을 풀어서 이온의 수송이론과 클로저를 계산한다. 모멘트 방법을 이용하면 운동식에서 가장 다루기 어려운 충돌연산자를 직접 계산할 수 있는데 이 계산은 이미 해석적인 방법으로 공식들이 만들어져 있다[3,4,5]. 1차 연도에서는 지금까지의 연구된 결과를 이용하여 소수의 이론이 맥스웰 분포를 가지는 다수의 이온을 통과할 때 소수 이온의 수송이론을 계산하였다. 또한 일반적인 충돌빈도의 경우에 전자의 클로저를 개발하였다. 2차년도에서는 이온의 클로저를 개발한다. 또한 1차 연도에서 계산한 소수 이온의 수송이론의 결과가 기존에 있던 이론과 차이를 보임에 따라 다른 방법으로 소수 이론의 수송이론을 계산하고 면밀히 검토한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

낮은 충돌도에서 클로저를 기술하는 노력은 충돌이 없는 경우 Hammet-Perkins[6], Hazeltine[7], 그리고 일반적인 충돌에서Chang-Callen [8], Held et al. [9,10]에 의해서 개발되었다. 충돌이 없는 경우 완전한 클로저는 Ji et al [11]에 의해서 완성되었으나 일반적인 충돌의 경우 정확한 충돌연산자를 사용하여 계산된 클로저는 없었다. 정확한 충돌연산자를 사용하여 얻어진 계산은 역시 Ji et al에 의해서 전자의 열전도[12]와 이온의 viscosity[13]가 먼저 구해졌고 최근에 완전한 전자의 클로저가 Z=1인 플라즈마에서 구해졌고 [14] 1차 연도에서 Z=2,3, …,10일 때에 대하여 구해졌다. 따라서 이온의 클로저를 구하면 단순한 플라즈마의 경우에 임의의 충돌빈도에 적용할 수 있는 클로저가 완성되는데 이 이온 클로저가 수년동안 유타주립대학에서 개발되고 있는 중이다.

또한 소수 이온이 북극 전리권을 빠져 나갈 때 수송이론이 여러가지 방법으로 개발되고 있었는데 본 연구에서 모멘트식에 파워급수 전개를 이용하여 임의의 차수까지 해석적인 해를 구하는 방법을 개발하였다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 모멘트식과 충돌연산자의 자동화코드

쿨롱-멀른 문제를 모멘트 방법으로 다루기 위해서 충동연산자와 모멘트식을 자동으로 만드는 Mathematica코드를 완성하였다.

제 2 절 전하교환연산자의 계산

전하 교환연산자는 산란단면적에 상대속력을 곱한 것이 일정하다는 근사를 하면 해석적인 계산이 가능하다. 모멘트 전개를 통하여 쿨롱 충돌연산자를 계산하는 중간 단계의 Rosenbluth 퍼텐셜에서 직접 계산할 수 있으며 해석적인 계산을 완료하였다. Mathematica 코드는 현재 개발 중이다.

제 3 절 이온화 및 재결합 연산자

이온화 및 재결합 연산자는 분포함수에 비례하므로 모멘트 식에서 모멘트에 비례하는 식이 얻어지므로 단순하게 구할 수 있다.

제 4 절 쿨롱 멀른 문제

소수이온의 분포함수를 모멘트로 전개한 후 모멘트들을 거리의 파워급수로 전개하여 파워급수의 계수를 구하였다. 13모멘트 식을 구체적으로 쓰고 파워급수로 전개하였으며 계수비교법을 통하여 일반적인 공식을 유도하였다. Mathematica를 이용하여 임의의 모멘트에 대한 급수의 전개 계수를 구할 수 있도록 하였으며 모멘트 수를 5, 13, 45, 105, 201, 341, 533, 785, 1105, 1501까지 늘려가며 계수들이 수렴하는지를 확인하였다. 거리의 차수는 5차까지 계산하였는데 예를 들어서 밀도분포를 표 1에 제시하였다.

표1. 밀도의 파워급수 전개 계수

$\mu=1$	3 (45)	5 (105)	7 (201)	9 (341)	11 (533)	13 (785)	15 (1105)
n_{-1}	-1.69492	-1.68076	-1.68073	-1.68072	-1.68072	-1.68072	-1.68072
n_1	-0.2584	-0.298065	-0.297475	-0.297497	-0.297494	-0.297492	-0.297492
n_3	0.516363	0.52315	0.0146935	0.0342541	0.0382415	0.0380369	0.0380305
n_5	2.15014	49.9125	-11.2653	-9.0453	6.25158	-1.36017	0.0733499

표1에서 보는 거처럼 -1차식의 계수는 341모멘트에서, 1차 계수는 785모멘트에서 이미 6개의 유효숫자까지 수렴하였으며 3차 계수는 785모멘트에서 4개의 유효숫자까지 수렴하였고 5차식은 아직 수렴하지 않았음을 알 수 있다. 실제의 응용에서는 거리가 작은 경우에서 3차식까지면 충분하므로 이미 정확한 해를 얻었다고 볼 수 있으며 온도나 유체속도도 비슷한 행동을 보여준다.

제 5 절 전하수가 1보다 이온의 플라즈마에서 전자의 클로저

Z=1에 대하여 완성된 기존의 이론[14]을 확장하여 Z=2,3,⋯,10의 경우 전자의 클로저를 완성하였다. 이 연구는 앞으로 이온의 클로저를 구하는데 필요한 선행 연구이다. 전자의 유체역학은 표준적인 방법으로 밀도, 온도, 유체속도의 식으로 기술되는데 이 식들에 필요한 클로저는 열전도 (h), 마찰력 (R), 점성텐서(π)이다. 이 클로저들은 열역학적인 힘들에 대하여 커널(kernel) 적분식으로 표현된다. 열역학적인 힘들은 온도의gradient, 속도의 gradient, 그리고 전자와 이온의 상대속도인데 그림 1에서 아래 첨자는 각각 h, π, 그리고 R로 표시되었다. 본 연구에서는 이온의 전하수가 1에서 10까지 모든 커널을 구체적으로 구했다.

구해진 커널을 가지고 사인함수 형태의 열역학적인 힘에 대하여 클로저를 계산한 결과는 Z=1,2,5,10일 때 그림 1에 제시하였다. 그림 1에서 k는 Knudsen number이고 k가 1보다 아주 작을 때는 높은 충돌을1보다 아주 클 때는 낮은 충돌을 나타낸다. 그림 1에서 보듯이 일반적으로 적분 클로저는 충돌이 아주 낮을 때와 높을 때 기존의 이론을 포함하고 있음을 알 수 있다.

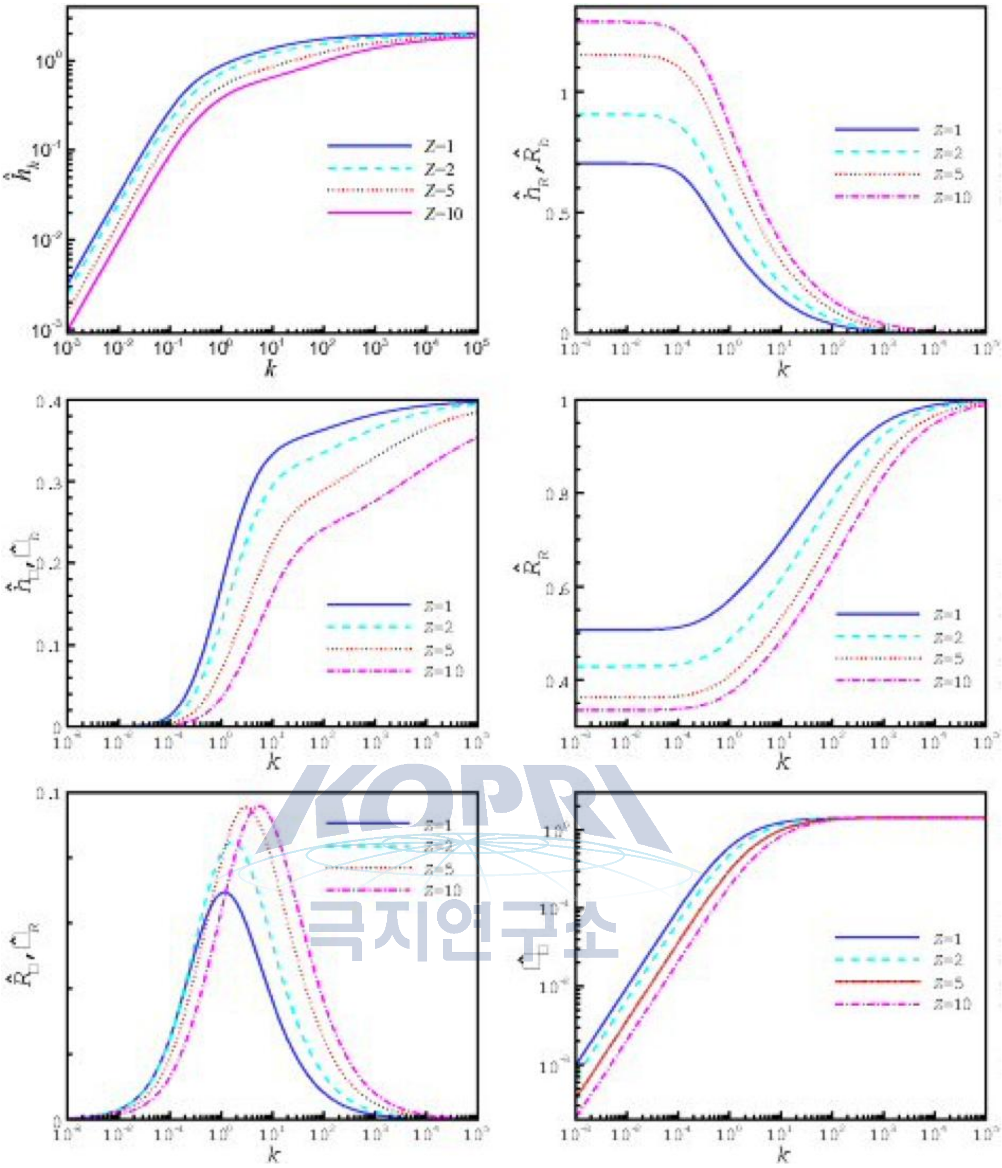

그림 2 사인함수 형태의 열역학적인 힘에 대한 전자 유체식의 클로저

제 6 절 전리권에서 이온 수송 (쿨롱-밀른 문제)

작은 수의 이온이 전리권을 빠져 나가는 경우에 충돌연산자를 계산하였고, 일반화된 모멘트식을 전체속도 및 랜덤속도 모멘트를 가지고 만들었다. 이 때 다수 이온의 전리권은 맥스웰 분포임을 가정하였는데 더 복잡한 경우에 맥스웰분포에서 약간 벗어난 경우에도 같은 방법을 적용할 수 있는 충돌연산자를 계산하였다. 2차 연도에서는 1차 연도에 나온 결과의 검증에 중점을 두었는데 이를 위해서 전체속도 모멘트 식을 세웠으며 이를

랜덤속도 모멘트와 비교하였다. 전체속도 모멘트로 만든 식은 선형이어서 행렬식으로 쓸 수 있으므로 체계적으로 높은 차수의 모멘트와 높은 차수의 파워급수를 계산하는데 유리하다.

위의 두 모멘트 방법에서 모멘트를 고도의 파워급수로 전개하고 모멘트식에 대입하여 계수들을 구하였다. 두 가지 방법으로 모멘트를 계산하여 각각에 해당하는 항들을 비교하여 일치함을 확인하였고 또한 최종 분포함수와 수송이론의 결과가 같음을 확인하였다.

제 7 절 중성원자와 이온의 전하교환연산자 계산

중성원자와 이온의 전하교환연산자를 계산할 때 산란단면적과 상대속도를 곱한 양이 상수라고 가정하는 근사법을 사용하였었는데 이 근사법이 대부분의 경우에 적용되지 않음을 발견하였다. 이 문제를 해결하는 방법은 실험에서 얻은 산란단면적 데이터를 이용하여 수치해석적으로 모멘트를 계산하는 것이다. 2차 연도에서는 계획을 수정하여 일단 완전히 이온화된 플라즈마에서 이온의 클로저를 개발하고 다음 기회에 중성원자를 포함한 클로저를 계산하고자 한다.

제 8 절 이온 클로저의 개발

이온 클로저는 충돌도가 아주 높을 때 잘 계산되어 있다 [1]. 이온클로저는 이온-이온 충돌과 이온-전자 충돌에 의하여 영향을 받는데 기존의 이론에서는 전자의 질량이 아주 작으므로 이온-전자의 충돌은 무시되어 왔다. 그러나 충돌연산자의 해석적인 계산에 의하면 전자의 온도가 이온의 온도보다 아주 높지 않을 경우에 이온-전자의 충돌이 이온-이온의 충돌에 비해서 무시할 수 없음을 알 수 있다. 본 연구에선 일반적인 충돌도에 대해서 이온의 클로저를 구하는데 있어서 이온-전자의 충돌 효과도 고려하였다. 이온-전자의 충돌연산자는 이온과 전자의 온도비와 질량비에 의존하게 되는데 가능한 모든 온도비와 질량비에 대하여 클로저를 계산할 수 있는 식을 성공적으로 만들었다.

본 이론을 개발하는데 있어서 중요한 변수는 3가지이다. 첫째는 Knudsen 수(k)인데 이는 평균충돌거리를 시스템의 특성거리로 나눈 양으로 이 수가 크면 충돌빈도가 낮은 경우이고 작으면 충돌빈도가 높은 경우이다. 둘째는 AZ_2인데 여기서 A는 이온의 질량수이고 Z는 이온의 전하수이다. 셋째는 온도비로 Ti/Te인데 Ti는 이온의 온도 Te는 전자의 온도이다.

본 연구에선 임의의 k, AZ_2, Ti/Te에 적용할 수 있는 이온 클로저를 만든다. 이온 클로저는 적분식으로 나타나는데 열학적인 힘에 커널을 곱하여 적분하게 되므로 커널을 구하면 클로저를 구한 것이 된다.

그림 2는 AZ_2=1, Ti/Te=4인 경우에 거리에 따른 커널 값들의 변화를 보여준다. 그림 3은 같은 변수의 경우에 사인함수에 반응하는 클로저를 보여준다. 이 커널들과 클로저의 그래프는 다른 값들의 AZ_2와Ti/Te의 경우에도 비슷한 모양을 보여준다. 우선 모멘트 수가 증가함에 따라서 커널들이 더 작은 거리에서 수렴하고 이에 따라서 클로저는 더 큰 k값에서 수렴함을 알 수 있다. 모멘트 수를 아무리 증가시켜도 거리가 0에 가까울 때의 커널값과 k가 무한대에 가까울 때의 클로저 값을 얻는 것은 불가능하므로 충돌이 없을 때의 이론을 이용하여 피팅함수를 만들었다. 그림에서 보여지듯이 커널의 피팅함수는 거리가 아주 작을 때 충돌이 없을 때 계산한 커널값에 접근하며 이 피팅 커널을 이용하여 계산한 클로저는 k가 아주 클 때 이론에서 얻은 값으로 점근함을 알 수 있다. 또한 k가 아주 작을 때는 충돌이 아주 높은 경우의 Braginskii 이론과 일치하게 되어 있는데 실제로는 이온-전자의 충돌효과를 고려한 만큼의 차이가 보인다.

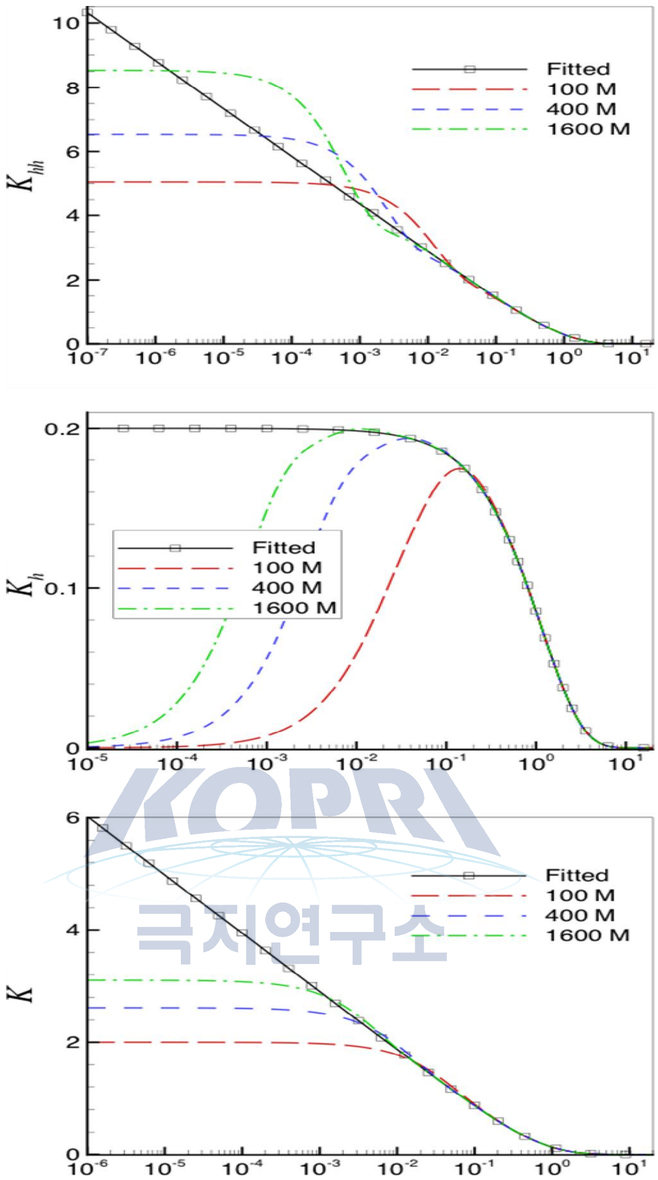

그림 2 모멘트 증가에 따른 전자 유체식 클로저를 위한 커널 함수. 모멘트 수를 100, 400, 1600으로 늘려가며 커널 함수를 계산하였다.

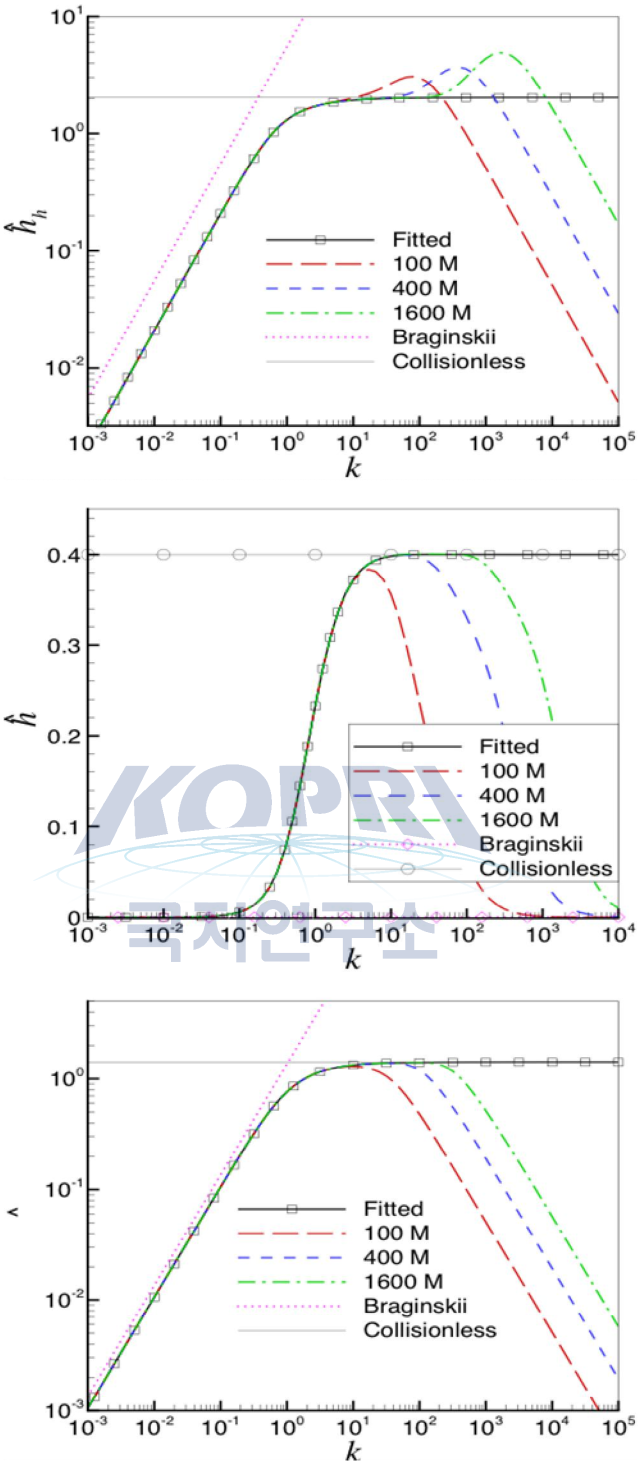

그림 3 사인함수 형태의 열역학적인 힘에 대한 이온 유체식의 클로저. 모멘트 수를 100, 400, 1600으로 늘려가면서 클로저를 계산하였다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

개발목표	달성 주요내용 및 대외기여도	달성도(%)
이온 클로저 개발	- 이온-전자 충돌효과를 포함하여 클로저 계산 - 임의의 충돌거리, 원자번호, 온도비에 적용 가능 - 일반적으로 우주물리학, 천체물리학 및 핵융합 플라즈마에 적용할 수 있음	100%
이온 수송 연구 - 쿨롱 멀른 문제	- 1차 연도에 계산한 랜덤속도 모멘트로 한 계산을 전체속도 모멘트를 이용하여 다시 계산 - 모멘트들을 거리의 파워급수로 전개한 후 모멘트에 대입하여 계수를 구함 - 랜덤속도 모멘트와 전체속도 모멘트가 같은 결과를 주는 것을 확인 - 같은 방법을 더 복잡한 문제에 적용할 수 있음	100%

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제1절 추가연구의 필요성

완전히 이온화된 경우 전자와 이온의 클로저가 완성되어 있으므로 다음 단계에선 자연스럽게 중성입자까지 포함하는 플라즈마의 클로저를 구하는 것이 중요한 목표가 된다. 1차연도에서 계산한 전하교환연산자가 쓸모가 없으므로 실험데이터를 이용하여 전한교환연산자를 다시 계산하여야 하고 여기에 이온화연산자, 재결합연산자를 더하여 모멘트 식을 풀어야 한다. 1차 목표로 충돌이 많은 경우 브래진스키 형태의 해를 구해서 클로저 및 수송이론을 계산한다. 2차 목표로 일반적인 충돌도에 적용할 수 있는 클로저를 구한다.

제 2절 타연구에의 응용

본 연구에서는 완전히 이온화된 플라즈마의 유체모델을 연구하는데 꼭 필요한 전자와 이온의 클로저를 완성하였다. 또한 중성입자까지 포함하는 앞으로 개발될 클로저는 부분적으로 이온화된 플라즈마 뿐만 아니라 먼지 플라즈마의 연구에 필수적이다. 서론에서 설명한 것처럼 특히 낮은 충돌도에서 클로저를 해석적인 방법으로 계산할 수 있으며 충돌도가 낮은 경우에는 적분형태의 클로저가 얻어질 것으로 기대된다.

제 6 장 참고문헌

[1] S. I. Braginskii, in Reviews of Plasma Physics, edited by M. A. Leontovich (Consultants Bureau, New York, 1965), Vol. 1, p. 205.

[2] J.-Y. Ji and E. D. Held, Phys. Plasmas 20, 042114 (2013).

[3] J.-Y. Ji and E. D. Held, Phys. Plasmas 13, 102103 (2006).

[4] J.-Y. Ji and E. D. Held, Phys. Plasmas 15, 102101 (2008).

[5] J.-Y. Ji and E. D. Held, Phys. Plasmas 16, 102108 (2009).

[6] W. Hammett and F. W. Perkins, Phys. Rev. Lett. 64, 3019 (1990).

[7] D. Hazeltine, Phys. Plasmas 5, 3282 (1998).

[8] Z. Chang and J. D. Callen, Phys. Fluids B: Plasma Phys. 4, 1167 (1992).

[9] E. D. Held, J. D. Callen, C. C. Hegna, and C. R. Sovinec, Phys. Plasmas 8, 1171 (2001).

[10] E. D. Held, Phys. Plasmas 10, 4708 (2003).

[11] J.-Y. Ji, E. D. Held, and H. Jhang, Phys. Plasmas 20, 082121 (2013).

[12] J.-Y. Ji, E. D. Held, and C. R. Sovinec, Phys. Plasmas 16, 022312 (2009).

[13] J.-Y. Ji and E. D. Held, J. Fusion Energy 28, 170 (2009).

[14] J.-Y. Ji and E. D. Held, Phys. Plasmas 21, 122116 (2014); 22, 129901 (2015).

[15] J.-Y. Ji, S.-K. Kim, E. D. Held, and Y.-S. Na, Phys. Plasmas 23, 032124 (2016).

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서 시행한 연구 결과보고서 입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서 시행한 위탁연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.