



슈퍼컴퓨터를 이용한 천체물리학 유체의 연구

Numerical Astrophysics Using Parallel Supercomputers

류동수1)*

Dongsu Ryu

Astrophysics has been one of the disciplines which utilize actively supercomputers for their researches. In this paper, studies of astrophysical flows by large scale numerical simulations in supercomputers are discussed. The followings are described: 1) characteristics of astrophysical flows, 2) numerical codes to study astrophysical flows, 3) performance of the codes in parallel supercomputers. A couple of examples of such studies are briefly presented: 1) three-dimensional evolution of the nonlinear Kelvin-Helmholtz instability in a magnetized medium, 2) three-dimensional simulations of astrophysical jets in a magnetized medium.

1. 천체물리학 유체의 특성

천문학의 연구 대상이 되는 천체 (행성, 항성, 은하, 우주 등)에서는 유체가 중요한 부분을 차지하고 있으며, 천체의 관측은 이러한 유체의 동역학적 결과로 다양한 파장 영역에서 방출되는 복사에 의해 이루어진다. 따라서 관측되는 자료를 이용하여 천체의 물리적인 성질을 연구하려는 천체물리학에서는 유체의 동역학적인 이해가 필수적이다. 천체물리학에서 연구 대상이 되는 유체는 지상에서 접하게 되는 유체와는 다른 특성을 가지고 있는데, 그 특성을 간략하게 나열해보면 다음과 같다:

- (1) 많은 경우 천체의 유체는 고 초음속 (highly supersonic), 고 압축 (highly compressible)의 특성을 보임. 따라서 충격파의 역할이 중요함.
- (2) 많은 경우 중력 (자체 중력과 외부 중력)이 중요하며, 이 중력이 유체의 동역학을 결정함.
- (3) 종종 냉각/가열 (cooling/heating), 복사 전달, 복사 압력 등 복사가 유체의 동역학에 영향을 미침.
- (4) 대부분의 천체는 자기장을 포함하고 있으며, 이 자기장이 동역학적으로도 중요한 경우가 많음.
- (5) 많은 경우 우주선 (cosmic rays) 또한 천체물리학 유체의 중요 성분이며, 따라서 우주선의 동역학적 역할을 무시할 수 없는 경우가 종종 있음.
- (6) 대부분의 경우 점성 (viscosity) 과 저항 (resistivity)은 무시할 수 있음.

천체물리학에서 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 유체를 연구하는 과정은 기본적으로 다음의 두 단계로 이루어져 있다:

- (1) 점성 또는 저항을 무시한 (ideal) 압축성 유체 방정식 또는 자기유체 방정식을 시뮬레이션 할 수 있는 코드의 개발.
- (2) 중력 · 복사 과정 · 우주선 등의 효과는 원천항 (source terms)으로 취급할 수 있는 알고리즘의 개발.

천체물리학에서 유체의 시뮬레이션 연구도 유체 방정식을 위한 코드의 개발에서 시작되며, 이는 유체를 연구하는 다른 학문 분야 (물리학, 공학 등)와 유사하다고 할 수 있다. 그렇지만 차이점도 있으며, 이를 나열해보면 다음과 같다:

- (1) 천체물리학 연구를 위한 코드는 고 압축성, 고 초음속 유체를 다룰 수 있어야 한다.
- (2) 또한, 천체물리학 코드는 자기장을 포함하고 있어야 한다.

아래의 2장과 3장에서는 위의 두 요구를 충족하는 자기유체역학 코드를 기술하고 있다. 이 코드는

1) 충남대학교 천문우주과학과 (305-764 대전시 유성구 궁동 220 Tel: 042-821-5466)



병렬화 (parallelization)되어 있다. 4장에서는 코드의 성능을 기술하고 있다. 마지막으로 5장에서는 이 코드를 천체물리학 문제에 응용한 예를 두 가지 보여주고 있다.

2. 자기유체 방정식 및 성질

자기장이 중요한 환경하 유체의 운동을 연구하는 자기유체 역학 (magnetohydrodynamics)에서는, 전리된 (ionized) 유체가 자기장 하에서 어떻게 운동하는가 하는 것과 운동하는 유체에 의해 자기장이 어떤 영향을 받는가를 복합적으로 기술한다. 먼저 전리된 유체가 자기장에 의해 받는 영향은 기존의 유체 역학 방정식에 자기장이 유체에 가하는 힘인 Lorentz 힘을 더해 줌으로써 기술된다. 자기장이 전리된 유체에 의해 받는 영향은 Maxwell 방정식에 의해 기술된다. 특히 자기 유체 역학에서는 양전하를 가지는 이온과 음전하를 가지는 전자들 사이의 전하 분리에 의한 효과와 변위 전류 (displacement current)가 무시되는 경우만을 고려한다. 그리고 점성 (viscosity)·열전도 (thermal conduction)·저항 (eresistivity) 무시되는 경우를 특별히 이상 자기 유체 역학 (ideal magnetohydrodynamics)이라 하는데, 천문학에서 관심을 가지고 있는 대부분의 천체는 이 이상 자기유체 역학에 의해 기술될 수 있다.

이상 자기유체 역학은 다음의 8개의 방정식으로 기술된다:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} v + \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P - \frac{1}{\rho} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \times \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} P + \gamma P \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) = 0 \quad (4)$$

위 식들과 더불어 $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ 의 구속 조건이 주어지는데, 이것은 자기장에는 단극자 (monopole)가 없다는 사실로부터 나온 것이다. 위의 방정식은 자기장에 $1/\sqrt{4\pi}$ 가 붙지 않는 단위계를 사용하고 있다.

자기유체에는 3개의 파 (waves)가 존재한다. 즉 Alfvén 파, 빠른파 (fast wave), 그리고 느린파 (slow wave)가 그것이다. 각 파의 전파 속도는 다음과 같이 주어진다:

$$C_a = \sqrt{\frac{B_{0x}^2}{\rho_0}} \quad (5)$$

$$C_f = \left[\frac{1}{2} \left(\left(a^2 + \frac{B_0^2}{\rho_0} \right) + \sqrt{\left(a^2 + \frac{B_0^2}{\rho_0} \right)^2 - 4a^2 \frac{B_{0x}^2}{\rho_0}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$C_s = \left[\frac{1}{2} \left(\left(a^2 + \frac{B_0^2}{\rho_0} \right) - \sqrt{\left(a^2 + \frac{B_0^2}{\rho_0} \right)^2 - 4a^2 \frac{B_{0x}^2}{\rho_0}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

전파속도의 크기는 항상 $C_f \geq C_a \geq C_s$ 관계를 만족한다.

충격파 (shock waves)는 보는 관점에 따라 여러 가지 방법으로 해석할 수 있지만, 유체 역학에서는

충격파의 앞쪽 (preshock region) 에서 초음속 (supersonic, 즉 $v_x > a$) 으로 움직이던 유체가 충격파를 지난 후 (postshock region) 아음속 (subsonic, 즉 $v_x < a$) 으로 바뀌는 현상으로 기술하기도 한다. 즉 충격파를 지남으로써 파의 전파 속도보다도 빨리 움직이던 유체가 전파 속도보다도 느리게 움직이게 된다는 것이다. 자기유체에서는 앞 절에서 본 것과 같이 3가지 파가 존재함으로, 이런 관점에서 보면, 충격파도 3가지로 크게 분류할 수 있다. 즉 빠른파보다도 빨리 움직이던 유체가 빠른파보다도 느리게 움직이게 될 때 이를 빠른 충격파 (fast shock), Alfven 파보다도 빨리 움직이던 유체가 Alfven 파보다도 느리게 움직이게 될 때 이를 Alfven 충격파 (또는 intermediate 충격파라고도 함), 그리고 느린파보다도 빨리 움직이던 유체가 느린파보다도 느리게 움직이게 될 때 이를 느린 충격파 (slow shock)라 한다. 그러나 이중 빠른 충격파와 느린 충격파가 물리적인 의미를 가지는 것으로 알려져 있다. 대신 Alfven 파와 관련된 현상은 회전불연속면 (rotational discontinuity) 나타난다.

3. 자기유체역학 코드

자기유체 역학 코드는 위에서 기술한 바와 같이 3가지의 파와 이와 관련된 충격파 및 불연속면을 계산할 수 있어야 함으로 유체 역학 코드보다는 상당히 복잡해질 수밖에 없다. 1970년대까지는 자기유체 역학 연구에는 Lax-Wendroff 방법을 바탕으로 하여 Richtmyer-von Neumann 형태의 수치 점성 (artificial viscosity)을 첨가한 코드가 주로 사용되었다. 1980년대 부터 유체 역학 코드를 위한 upwind 방법이 개발되면서, 이 방법들을 자기유체 역학 코드에도 응용하려는 시도가 되어지고 있다. 그러나 자기유체의 복잡함 때문에 upwind 방법에 바탕을 둔 자기유체 역학 코드는 1990년대에 본격적으로 개발되기 시작하였다. 논문 [1]에서 기술된, 본 저자가 개발한 1차원 자기유체 역학 코드는, 최초의 이런 upwind 자기유체 역학 코드 중의 하나이다. 이 코드는 Roe의 upwind 방법을 2차의 정확도를 가지도록 향상시킨 TVD방법을 자기유체역학에 응용함으로써 만들어진 코드로서 Roe 분류의

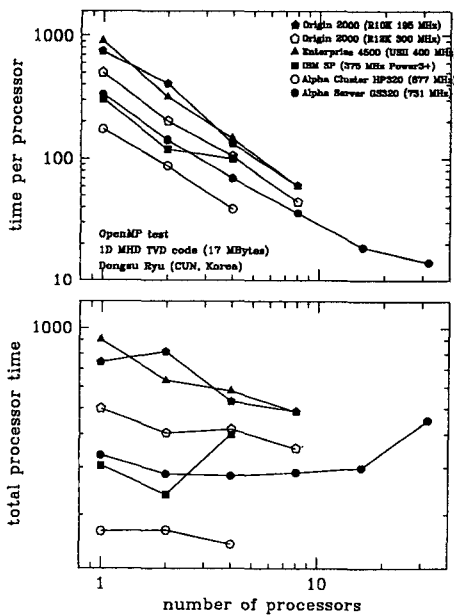


그림 1

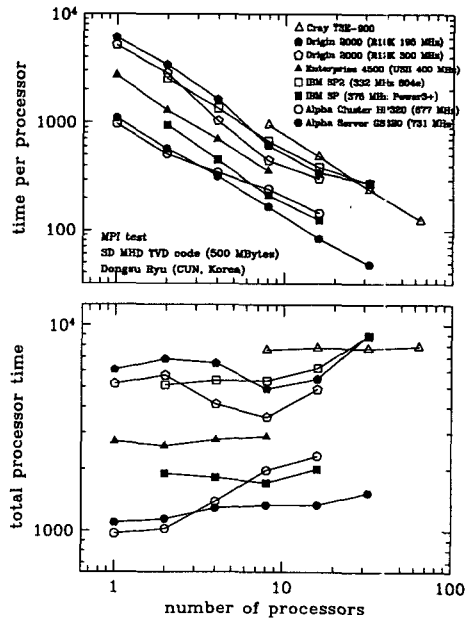


그림 2



선형 Riemann 해를 사용하고 있다. 또한 Harten의 flux limiting 방법을 사용하고 있다. 보다 자세한 내용과 표준 테스트를 통한 성능은 논문 [1] 참조.

다차원 코드는 1차원 코드를 이용하여 operating splitting 기술을 이용하여 만들어졌다. 다차원 코드에 대한 자세한 내용과 표준 테스트를 통한 성능은 논문 [2]에서 볼 수 있다.

자기유체 역학을 위한 코드에서는 자기장 단극자 (monopole)가 없다는 조건 ($\nabla \cdot \vec{B} = 0$) 을 만족시켜주는 것이 중요하다. 이 조건이 만족되지 않으면 이 조건과 관련되어있는 수치오차는 지수 함수적으로 자라나서 시뮬레이션의 결과에 중대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이 문제는 constrained transport (CT) 접근 방법을 채택함으로써 해결될 수 있다. 이에 관한 자세한 내용은 논문 [3]에서 볼 수 있다.

4. 코드의 계산 성능 (performance)

위에서 기술된 코드는 다양한 병렬 슈퍼컴퓨터 (parallel supercomputer)와 벡터 슈퍼컴퓨터 (vector supercomputer)에서 최적화 (optimization)되었다. 3차원 코드에서 한 격자 (cell) 한 시간 간격 (time step)을 계산하는데 약 10 kflops이 요구된다. 현재 여러 슈퍼컴퓨터에서 한 개의 processor를 이용하여 시뮬레이션 하였을 때 이 코드의 계산 성능은 다음과 같다.

Supercomputer	Performance (Mflops)
GS320 (731 MHz Alpha)	550
IBM SP (375 MHz Power3+)	450
Cray C90	400
Sun Enterprise (400 MHz Ultrasparc II)	200
Origin2000 (195 MHz MIPS)	150

이 코드는 다음의 두 접근 방법을 이용하여 병렬화 (parallelization)되어 있다:

- (1) OpenMP
- (2) MPI (Message Passing Interface)

그림 1에서는 OpenMP를 이용하여 병렬화된 1차원 자기유체역학 코드의 병렬화 성능을 여러 슈퍼컴퓨터에서 테스트한 결과를 보여주고 있다. 그림 2에서는 MPI를 이용하여 병렬화된 3차원 자기유체역학 코드의 병렬화 성능을 여러 슈퍼컴퓨터에서 테스트한 결과를 보여주고 있다.

5. 천체물리학 문제에 응용

- (1) 자기유체에서 Kelvin-Helmholtz 불안정성의 3차원 진화

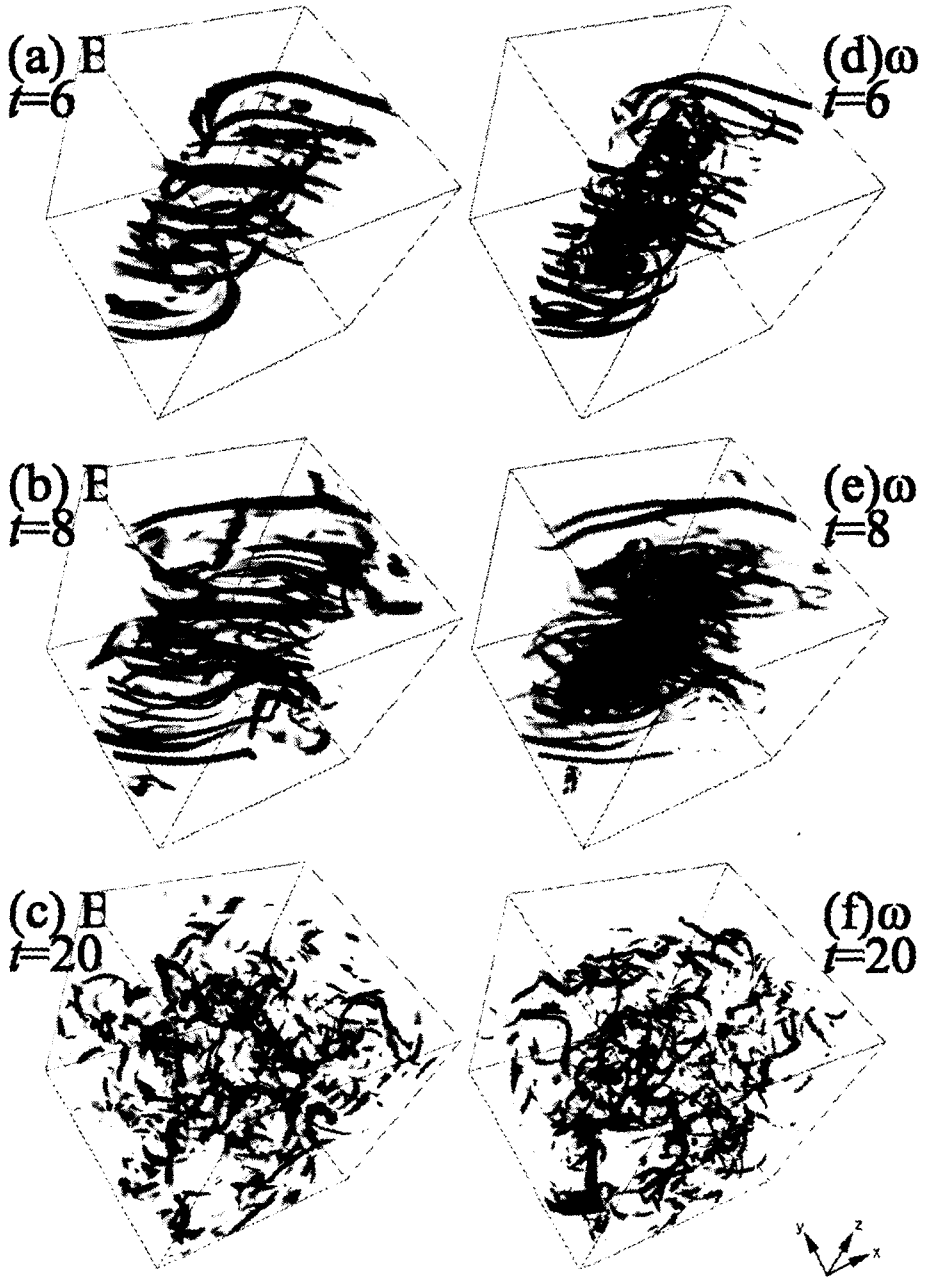
이 연구는 위에서 기술한 이상 자기유체를 위한 시뮬레이션 코드를 따로 변형하지 않고 적용함으로써 연구할 수 있는 문제이다. 자기장이 강한 경우 (Alfvén Mach number \leq a few), 자기장은 불안정성이 발전되는 것을 방해한다. 그러나 자기장이 약한 경우에는 자기장이 없는 경우와 마찬가지로 Kelvin-Helmholtz 불안정성은 난류 (turbulence)로 발전한다. 그렇지만 이때의 난류는 자기유체의 난류이다. 그림 3에서는 자기장이 약한 경우 Kelvin-Helmholtz 불안정성의 진화를 보여주고 있다. 이 연구의 자세한 내용은 논문 [4]에서 볼 수 있다.

- (2) 천체물리학 제트의 시뮬레이션

천문학에서 관측되는 많은 천체들은 제트를 보여주고 있다. 제트는 강착 원반 (accretion disk)과 연



관이 있는 것으로 추정되고 있으며, 무겁고 밀도가 높은 천체(중성자별, 블랙홀 등) 부근에서 흔히 생성되는 것으로 알려져 있다. 논문 [5]에서는 외부 은하의 중심에 위치한 활동성 은하 핵(active galactic nuclei)에서 방출되는 제트를 연구하고 있다. 이 제트에서는 자기장뿐만 아니라 우주선(cosmic rays)이 동역학적으로 중요하다. 또 관측되는 복사는 이 우주선이 포함된 과정을 통해 방출된다. 따라서 이 연구를 위한 시뮬레이션에는 자기유체 역학 방정식과 함께 우주선의 진화를 계산하는 코드가 필요하다. 그림 4에서는 3차원 제트의 시뮬레이션에서 계산된 싱크로트론 복사를 보여주고 있다. 싱크로트론



1h

그림 3

복사는 우주선 입자가 자기장 주변을 회전운동하면서 방출하는 복사이다.

이 논문은 2000년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2000-015-DS0046).

참고문헌

- [1] Ryu, D. and Jones, T. W., "Numerical Magnetohydrodynamics in Astrophysics: Algorithm and Tests for One-Dimensional Flow", The Astrophysical Journal, 442, pp228-258 (1995)
- [2] Ryu, D., Jones, T. W. and Frank, A., "Numerical Magnetohydrodynamics in Astrophysics: Algorithm and Tests for Multi-Dimensional Flow", The Astrophysical Journal, 452, pp785-796 (1995)
- [3] Ryu, D., Miniati, F., Jones, T. W. and Frank, A., "A Divergence-Free Upwind Code for Multidimensional Magnetohydrodynamic Flows", The Astrophysical Journal, 509, pp 244-255 (1998)
- [4] Ryu, D., Jones, T. W. and Frank, A., "The Magnetohydrodynamic Kelvin-Helmholtz Instability: A Three-Dimensional Study of Nonlinear Evolution", The Astrophysical Journal, 545, pp475-493 (2000)
- [5] Tregillis, I. L., Jones, T. W., and Ryu, D., "Simulating Electron Transport and Synchrotron Emission in Radio Galaxies: Shock Acceleration and Synchrotron Aging in Three-Dimensional Flows", The Astrophysical Journal, 557, in press (2001)

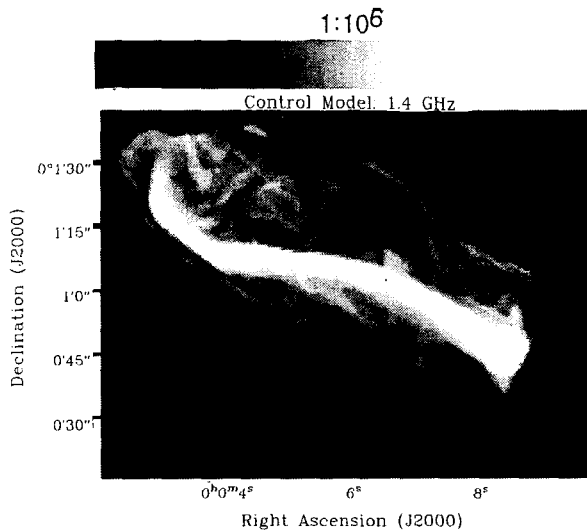


그림 4