

X-선 중심 가광 초신성 잔해 : 성간운 증발과 열전도 모델¹
1 CENTRALLY PEAKED X-RAY SNRS : CLOUD EVAPORATION AND
THERMAL CONDUCTION

최승언, 정현철, 박병건

서울대학교 사범대학 지구과학 교육과

SEUNG-URN CHOE, HYUN-CHUL JUNG, AND BYEONG-GEON PARK

Department of Earth Science, College of Education, Seoul National University

Received Nov. 19, 1999; Accepted Dec. 6, 1999

ABSTRACT

We present the results of one-dimensional numerical simulations of SNR evolution in the inhomogeneous medium considering the effects of the evaporation of the cloud and the thermal conduction. We have included the effects of changing evaporation rate as a function of cloud size and the ambient temperature so that the clouds could be evaporated completely before they reach the center of the SNR. The heat conduction markedly changes the density distribution in the remnant interior. To explain the observed morphologies of the centrally peaked X-ray SNRs (for example W44), the maximal thermal conduction is required. However, this is unlikely due to the magnetic field and the turbulent motion. The effects of the evaporation of the cloud and the thermal conduction described here may explain the class of remnants observed to have centrally peaked X-ray emission.

Key words: conduction - shock waves - SNR

1. 서론

항성 진화의 마지막 단계에 발생하는 초신성 폭발은 커다란 운동에너지 ($\sim 10^{51} \text{erg}$) 를 갖는 분출물을 주변공간으로 방출시킨다. 분출물의 운동은 주변공간으로 진행되는 강한 충격파를 발생시켜 초신성 잔해의 형태로 관측된다. 이와 같은 초신성 잔해의 연구는 항성 진화의 마지막 단계를 규명하고, 항성 주변의 물리적 상태에 대한 정보뿐만 아니라 은하내의 가스의 분포를 결정하며 은하의 진화에 막대한 영향을 미칠 수 있으므로 매우 중요한 분야로 생각되어져 왔다 (Lozinskaya 1990).

초신성 잔해의 형태는 관측특성에 따라 크게 세 개의 범주로 나누어진다. 첫째, 구각형으로 전파와 X-선에서 구각의 형태를 나타내는 경우이다. 이는 초신성 폭발 시 발생한 성간 물질 속으로 진행되는 충격파와 높은 압력에 의해 분출물 속으로 진행되는 역 충격파에 의해 고온으로 가열된 물질에 의한 열적 X-선 방출과 충격파에 의해 가속된 우주선 입자에 의한 전파 방출로서 이해될 수 있다. 이 경우 X-선은 열적 복사이고 전파는 비열적 복사이다. 둘째, 계성운형으로 X-선과 전파의 형태가 중앙부분이 밝게 나타난다. 이 경우는 전파와 X-선이 모두 비열적 복사이며 중앙 필사에 의한 입자의 가속이 주요한 원인으로 인식된

다. 마지막으로 전파영역에서는 구각의 모습을 나타내지만 X-선의 형태는 중앙이 밝게 나타나는 혼합형이다. 특히 전파는 비열적 복사에 반하여 X-선은 열적 복사에 의한 것으로 알려져 왔다 (Long et al. 1991).

W44(G34.7-0.4)는 이와 같은 혼합형 초신성 잔해의 전형으로 생각되어지며 많은 관측과 이론적 연구가 진행되어져 왔다. 특히 W44는 전파 필사 PSR 1853+01과의 연계성으로 인하여 초신성 잔해의 가장 중요한 요소인 나이가 정확히 알려져 있다 (Wolszczan et al. 1991). 표 1은 W44의 관측적 특성을 요약하고 있다.

White & Long (1991)(이하 WL)은 고온, 저밀도의 가스와 저온, 고밀도의 성간운으로 이루어진 물질 속으로 초신성 충격파가 진행되는 경우 성간운의 열적 증발 모델을 고려한 자기닮음 해를 이용하여 X-선의 중앙이 밝은 초신성 잔해를 설명할 수 있음을 보였다. 그러나 Rho et al. (1994) (이하 RPSH)에서 제시된 바와 같이 초신성 잔해의 나이가 중앙의 필사의 추정된 나이와 일치하지 않음을 나타낸다. 그들은 이를 해결하기 위해 매우 적은 (10^{50}erg) 폭발 에너지를 가정하였다. Harrus et al. (1997)은 스펙트럼 선 연구를 통하여 W44내부의 화학조성이 우주 조성과 크게 다르지 않음을 밝히고 분출물에 의한 X-선 세기의 증가를 배제할 수 있음을 보였다. 그들은 특히 은하면 가까이 있는 W44의 경우 주변 밀도가 크므로 외부충격파 부분의

¹이 연구는 1998년 교육부 기초과학 육성 연구비의 지원에 의한 것임 (BSRI-98-5408)

냉각으로 인한 X-선의 감소에 의해 중앙부분이 밝은 형태를 보일 수 있음을 보였다. 그러나 그들의 모델 역시 상대적으로 적은 에너지를 요구하며 관측과는 달리 초신성 잔해 내부의 온도경사가 매우 큰 결과를 나타내고 있다.

세도브 단계의 초신성 잔해의 내부온도의 구배가 매우 크다는 사실은 일찍부터 열전도의 효과를 고려하게 하였다(Chevalier 1975, Solinger et al. 1975, Cowie & Mckee 1977, Cui & Cox 1992). 특히 Cui & Cox(1992)는 균질한 물질속으로 초신성 충격파가 진행할 경우 전자와 이온 온도의 불일치를 고려하였으며 전자 뿐만 아니라 이온에 의한 열전도 효과를 고려하여 초신성 내부의 밀도의 변화가 크게 증가되며 등온의 형태를 나타낼 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 불균질한 주변 매질에서 열전도 효과와 성간운의 증발이 초신성 잔해의 동역학과 전파형태에 미치는 영향을 1 차원 수치계산을 이용하여 나타내었다. 주변 성간운의 분포와 크기는 일정하다고 가정하였으며 성간운의 크기에 따른 증발량의 변화가 고려되었다. 성간운의 증발과 충격파 후면의 열전도 현상에 의해 계산된 X-선의 형태는 관측에서 나타나는 중앙이 밝은 X-선의 형태를 보일 수 있었다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. § 2에서는 계산에 이용된 물리적 가정을 나타내며 § 3에서는 계산된 결과와 모형에 대한 토의를 나타내며 마지막으로 § 4에서는 결론을 나타내었다.

2. 모형 및 수치해석 방법

2.1. 기본 가정

본 연구의 대상인 W44는 전파관측 결과 전체적인 모습이 비대칭적인 모습을 보이므로 주변 성간물질의 비대칭성을 고려해야 한다. 그러나 본 연구에서는 중심부분의 X-선 증가원인을 규명하고자 하므로 주변매질은 등방적이고 균일한 성간운의 분포를 가정하였다. W44는 충격파에 휩쓸린 질량이 $350 M_{\odot}$ (Koo & Heiles 1995) 이므로 분출물이 동역학에 미치는 영향은 배제할 수 있다. 또한 충격파의 운동 에너지 밀도는 주변 자기장의 에너지 밀도보다 크므로 주변의 자기장 및 우주선에 의한 동역학적인 영향을 무시하였다(Choe & Jung 1998). 본 연구에서는 $8M_{\odot}$ 의 분출물을 균질한 밀도와 거리에 따라 증가하는 속도로 주었다.

모형 계산에 사용된 냉각 함수는 $10^4 < T \leq 10^6$ K 인 경우에는 Kafatos(1973)의 냉각함수를, $10^6 < T \leq 10^8$ K 인 경우에는 Raymond et al.(1976)이 제시한 냉각 함수를 사용하였으며, $T \geq 10^8$ K인 경우에는 제동 복사에 의한 냉각만을 고려하였으며, $T < 10^4$ K에서는 냉각이 없는 것으로 간주하였다(Jung, 1998). 주변물질이 비충돌 충격파에 의해 가열된다면 충격파 후면에서 이온과 전자의 온도는 매우 큰 차이를 나타낼 수 있다(Spitzer 1962). 그러나 Mckee(1974)는 강한 충격파의 경우 충격파에서 발생된 플

라즈마 불안정에 의해 전자와 이온의 온도가 같아질 수 있음을 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 열전도 현상을 고려할 때 전자와 이온의 에너지 등분배를 가정하였다. 실제 충격파에 휩쓸린 고온의 물질속에서 성간운의 증발은 활형충격파의 형성, 성간운 내부로 진행되는 충격파에 의한 성간운의 온도상승, 그리고 주변물질의 요란운동으로 인해 매우 복잡한 현상으로 나타나게 된다(Klein, Mckee, & Colella 1994). 그러나 본 연구에서 가정한 성간운의 크기는 격자보다 매우 작은 크기를 가지므로 열전도에 의한 성간운의 증발만을 고려하였다.

2.2. 모형 설정

본 연구에서 계산된 각 모형의 특징은 다음과 같다.

1) 냉각을 고려한 초신성 잔해의 동역학적 진화 : 모형 A

균질한 매질에서 냉각을 고려한 초신성 잔해의 동역학적 진화를 수치적으로 계산하였으며, 이는 초신성 잔해의 표준 모형으로서 다른 모형과 비교하기 위하여 사용되었다. 따라서 이 모형에 사용되는 구대칭의 1차원적 유체역학 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v) = -\frac{2\rho v}{r} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v^2 + P) = -\frac{2\rho v^2}{r} \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}[(E + P)v] = -\frac{2}{r}(E + P)v - n^2 L(T) \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{2}\rho v^2 + \frac{P}{(\gamma - 1)} \quad (4)$$

$$P = \frac{\rho k T}{\mu m_H} \quad (5)$$

여기에서 r 은 반경, ρ 는 밀도, v 는 속도, P 는 압력을 나타내며, E 는 기체의 운동 에너지와 내부 에너지를 합한 총 에너지를 의미하고 $n^2 L(T)$ 는 단위 부피당 냉각률을 나타낸다. μ 는 기체의 입자당 평균 질량으로서 성간 기체의 전형적인 화학 조성인 H : He = 10 : 1을 가정한 값이다. 초기조건으로서 주변매질의 개수 밀도는 3 cm^{-3} 으로 가정하였다.

2) 성간운 증발 모형 : 모형 B

Cowie & Mckee (1977)은 고온의 성간 기체 내부에 존재하는 저온의 구형 성간운의 열전도에 의한 질량 증발을 계산하였으며, 이 때 사용되는 유체 역학 방정식은 다음과 같이 질량 보존 방정식인 (1)식에 고온의 초신성 잔해 내부에서만 성간운에 의한 단위 시간, 단위 부피당 질량방출 j 를 더해줌으로써 풀이할 수 있으며, 운동량과 총에너지는 보존되어야 하므로, (2), (3)식은 그대로 사용한다.

표 1.— SNR W44의 물리량

연구자	radius	velocity	age	distance	Temp	ne
Rho et al. (1994)	12 × 16pc		6,400~7,500 yr	3 kpc		
Koo & Heles (1995)	HI shell : 9 pc SN shell : 15 pc	HI shell : 150 km/s SN shell : 300 km/s	20,000 yr			
Cox et al. (1999)	11 ~ 13 pc	150±15 km/s	20,000 yr	2.5 ~ 2.6kpc	4~ 8 × 10 ⁶ K	0.4~0.75

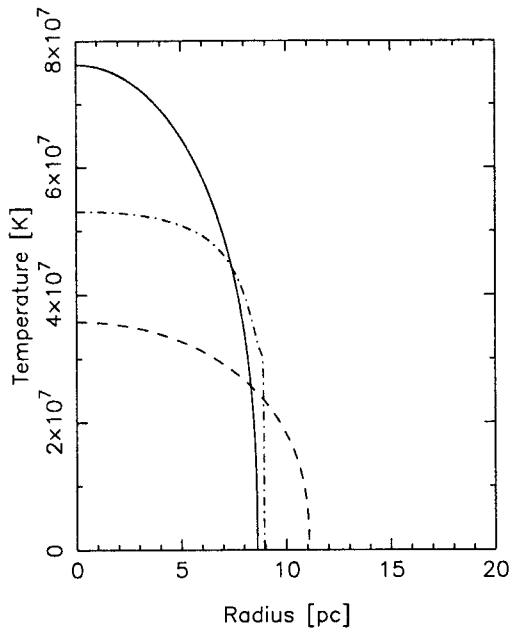


그림 1.— 해석학적 자기압축해(실선)와 계산된 고전적 열전도(파선) 그리고 포화 열전도(점-파선)에 의한 열전도 시작후 1,100년후 온도의 변화. 초기 열에너지는 8×10^{50} ergs이며 주변밀도는 $n = 1 \text{ cm}^{-3}$ 으로 일정한 것으로 가정되었다. 1,100년 후 고전적 열전도에 의한 온도의 분포는 해석학적해와 완전히 일치함을 보이고 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v) = -\frac{2\rho v}{r} + j. \quad (6)$$

여기에서 성간운에 의한 단위시간당, 단위부피당 질량 방출을 j 는 성간운 1개의 질량 방출을 \dot{m}_c 와 성간운의 개수밀도 N_c 를 이용하여 $j = \dot{m}_c N_c$ 로 나타내어지며, \dot{m}_c 은

$$\dot{m}_c = \begin{cases} 3.75 \times 10^4 T^{\frac{5}{2}} R_{pc} \phi \sigma_0^{-\frac{5}{2}} \text{ g/sec} & \sigma_0 > 1 \\ 2.75 \times 10^4 T^{\frac{5}{2}} R_{pc} \phi \text{ g/sec} & 0.3 \leq \sigma_0 < 1 \end{cases} \quad (7)$$

으로 주어졌으며, σ_0 는

$$\sigma_0 = \left(\frac{T}{1.54 \times 10^7 \text{ K}} \right)^2 \frac{1}{n R_{pc} \phi} \quad (8)$$

로 주어지는 양으로 $\sigma_0 < 1$ 인 경우에는 고전적 열전도 방정식이 적용되며, $\sigma_0 \geq 1$ 인 경우에는 포화 열전도(saturated heat conduction) 방정식이 적용된다. 여기에서 T 는 성간기체의 온도, R_{pc} 는 성간운의 반지름을 pc단위로 나타낸 값으로, 본 연구에서는 초기 조건으로 $R_{pc} = 1 \times 10^{-3}$, 성간운의 개수밀도 N_c 는 $2.37 \times 10^6 \text{ pc}^{-3}$, 성간운의 충전지수(filling factor)는 2.37×10^{-3} 으로 충분히 작은 값이므로 성간운의 존재가 초신성 잔해의 동역학적 진화에 아무런 영향이 없는 것으로 가정하였다. n 은 초신성 잔해 내부의 성간기체의 개수 밀도이며, $\phi = 1.1$ 일을 제시하였으며, 이는 최대한의 열전도를 나타내게 된다. 한편 성간운은 열적증발에 따라 반경이 감소하며 시간에 따른 반경의 감소율은 성간운 내부기체의 밀도 ρ_{cl} 을 사용하여 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dt} &= -\frac{\dot{m}_{cl}}{4\pi\rho_{cl}R^2} \\ &= 9.48 \times 10^{-44} \phi^{13/8} T^{5/4} n^{5/8} \rho_{cl}^{-1} R_{pc}^{-3/8} \text{ pc sec}^{-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\rho_{cl} = 1.169 \times 10^{-21} \text{ g/cm}^3$ 으로 주어 초신성 잔해에 의하여 충격되지 않은 주변 매질 ρ_{ISM} 과 비교하면 $\rho_{cl}/\rho_{ISM} = 500$ 의 값을 가정하였다. 또한 성간운은 증발에 따른 반경의 감소로 질량 방출률이 감소하며, 모든 질량이 증발하여 소멸할 때까지 증발시간 t_{evap} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} t_{evap} &= 2.8 \times 10^6 \frac{n_{cl}}{n} R_{pc} \frac{1}{T^{1/2} \phi F(\sigma_0)} \text{ yr} \\ F(\sigma_0) &= 2.73 \sigma_0^{\frac{3}{2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

$T = 1 \times 10^7 \text{ K}$, $R_{pc} = 1 \times 10^{-3}$ 일때 $t_{evap} \approx 4.6$ 년으로서 매우 작은 값이다. 따라서 질량감소율과 질량의 고갈에 의한 소멸을 고려하여야 한다.

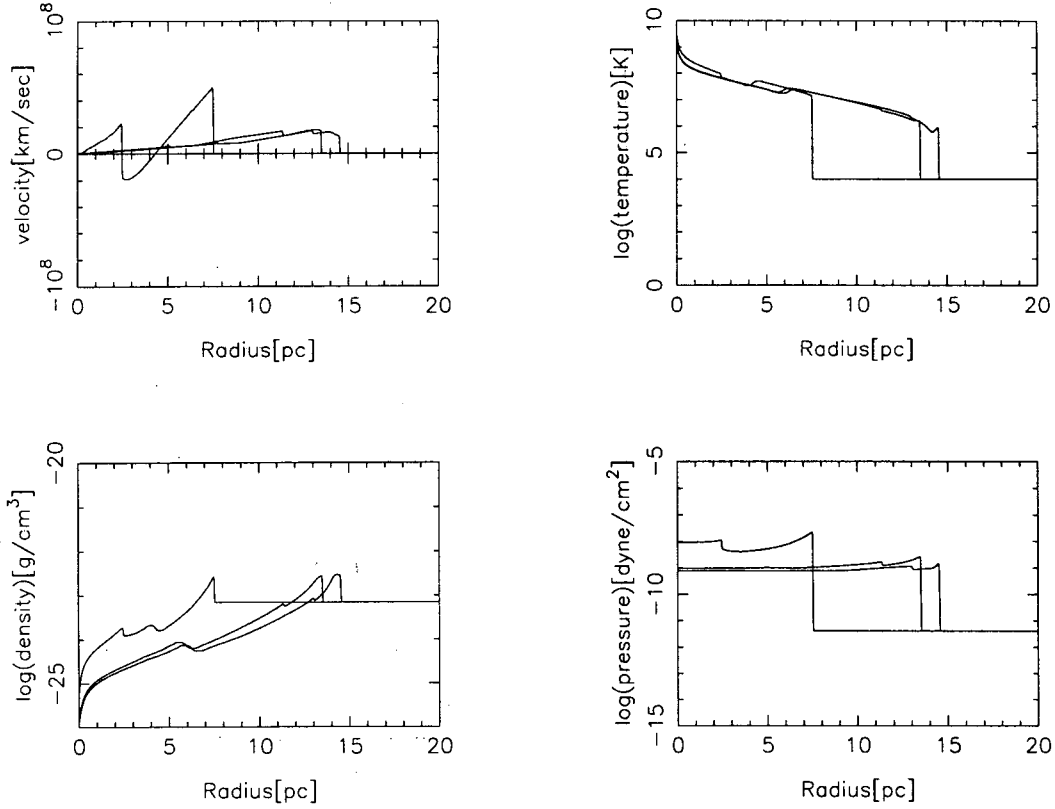


그림 2.— 초신성 폭발 후 4,250년, 20,000년, 그리고 25,000년 후 밀도, 압력, 온도, 속도의 변화. (모형 A)

3) 열전도 모형 : 모형 C

Spitzer (1962)는 성간 기체의 자유전자에 의한 열전도 속 \vec{q}_c

$$\vec{q}_c = \kappa \nabla T \quad (11)$$

로 나타내었으며, 전도 계수 κ 는

$$\kappa = \frac{1.84 \times 10^{-5}}{\ln \Lambda} T_e^{5/2} \text{ erg sec}^{-1} \text{ deg}^{-1} \text{ cm}^{-1} \quad (12)$$

로 나타내었고, 성간 기체에서 $\ln \Lambda$ 는 약 30의 값을 가진다. 한편 Cowie & McKee (1977)는 성간 기체의 온도 변화 척도 높이 ($T/|\nabla T|$)가 입자의 평균 자유 행정보다 작은 경우에는 고전적 열전도 방정식이 적용될 수 없고, 포화 열전도 방정식이 적용되어야 함을 주장하였다. 이 때 열전도 속 \vec{q}_s 는

$$\vec{q}_s = 0.4 \left(\frac{2kT_e}{m_e} \right)^{1/2} n_e k T_e = 5\phi \rho c_s^3 \quad (13)$$

으로 주어짐을 보였다. 여기에서 k 는 볼츠만 상수이며, T_e , m_e , n_e 는 각각 전자의 온도, 질량, 개수 밀도이며, ϕ

는 자유 변수로서 약 1.1의 값을 가진다. ρ 는 성간 기체의 밀도이며, c_s 는 $\frac{kT}{\mu}$ 로서 성간 기체의 등온 음속이다. 고전적 및 포화 열전도 속을 유체역학 방정식에 적용하기 위하여 Giuliani(1984)는

$$q = \frac{\kappa}{1 + \sigma} \frac{dT}{dr}, \quad (14)$$

$$\sigma = \frac{q_c}{q_s} = \frac{\kappa |dT/dr|}{5\phi \rho (kT/\mu)^{3/2}}$$

으로 주어 고전적 열전도 속과 포화 열전도 속의 비인 σ 의 값에 따라 열전도 속의 값이 변화하도록 하였다.

따라서 유체 역학 방정식은 (1), (2)식은 그대로 사용하며, 에너지 방정식인 (3)식은

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} [(E + P)v] = \quad (15)$$

$$-\frac{2}{r}(E + P)v - n^2 L(T) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 q),$$

$$q = \frac{\kappa}{1 + \sigma} \frac{dT}{dr}. \quad (16)$$

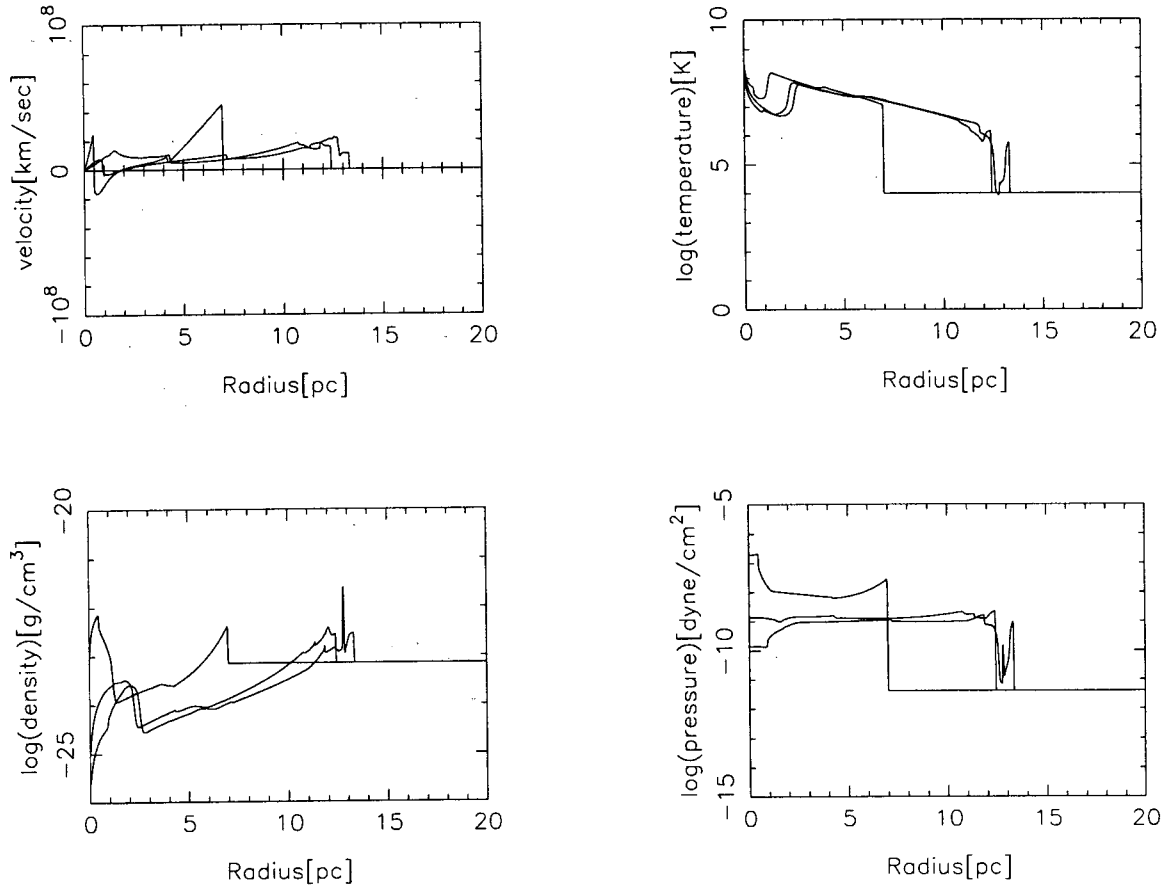


그림 3.— 그림 2와 동일. 모형 B의 경우를 나타내며 성간운의 크기는 10^{-3} pc, 성간운의 밀도는 $n = 500 \text{ cm}^{-3}$ 으로 균질한 것으로 가정되었다.

으로 주어야 한다.

4)혼합 모형 : 모형 D

열전도에 의한 에너지 이동을 고려한 성간운 증발모형(모형B)의 경우 질량 보존 방정식은 (6)식, 운동량 보존 방정식은 (2)식, 에너지 보존 방정식은 (15)식을 사용한다.

2.3. 수치해석 방법

(1)~(3), (6), (15)식은 좌변의 보존 방정식과 우변의 원천항으로 이루어져 있다. 보존 방정식과 원천항을 Strang방법으로 분해하고(LeVeque, 1992), 보존 방정식은 TVD(Ryu et al. 1995)방법으로, 원천항은 Runge-Kutta방법으로 풀었으며, (5)식의 열전도 방정식은 Crank-Nicolson 방법으로 풀었다.(Richtmeyer & Morton 1967). 열전도 방정식 풀이의 정확도를 확인하기 위하여 8×10^{50} erg의 열 에너지가 중심에 델타 함수로 주어졌을 때 1100년 이후의 열전도에 의한 온도 변화를 Zel'dovich(1967)의 고

전적 열전도 방정식의 자기담음해와 비교하였다(그림 1). 그림 1에서 $\sigma = 0$ 인 경우는 고전적 열전도 방정식으로 Zel'dovich (1967)의 자기담음해와 정확히 일치하며, 포화 열전도 효과가 고려된 $\sigma \neq 0$ 경우에는 열전도 효과가 온도 구배보다 온도의 지수에 관계됨을 보이고 있다. TVD 방법을 통한 수치적 계산을 위하여 반경 15 pc의 범위를 2000격자의 구형으로 나누어 1격자당 7.5×10^{-3} pc 거리를 가지며, 시간 간격 dt는 CFL조건을 만족하도록 하였다,

3. 결과 및 토의

3.1. 결과

그림 2-5는 각 모형들의 시간에 따른 밀도, 압력, 속도, 온도의 변화를 나타내고 있다. 각 시간은 역충격파가 중심에 충돌후 반사된 충격파를 나타내는 4,250 년, 필사관측에 의해 추정된 20,000년 그리고 본 계산의 끝인 최대허용 나이인 25,000년일 때 해당된다. 각 모형들은 충격파가 주변 매질 속으로 진행되는 양상에도 큰 차이를 보이지만, 중심부근에서 더 큰 차이점을 보이고 있다.

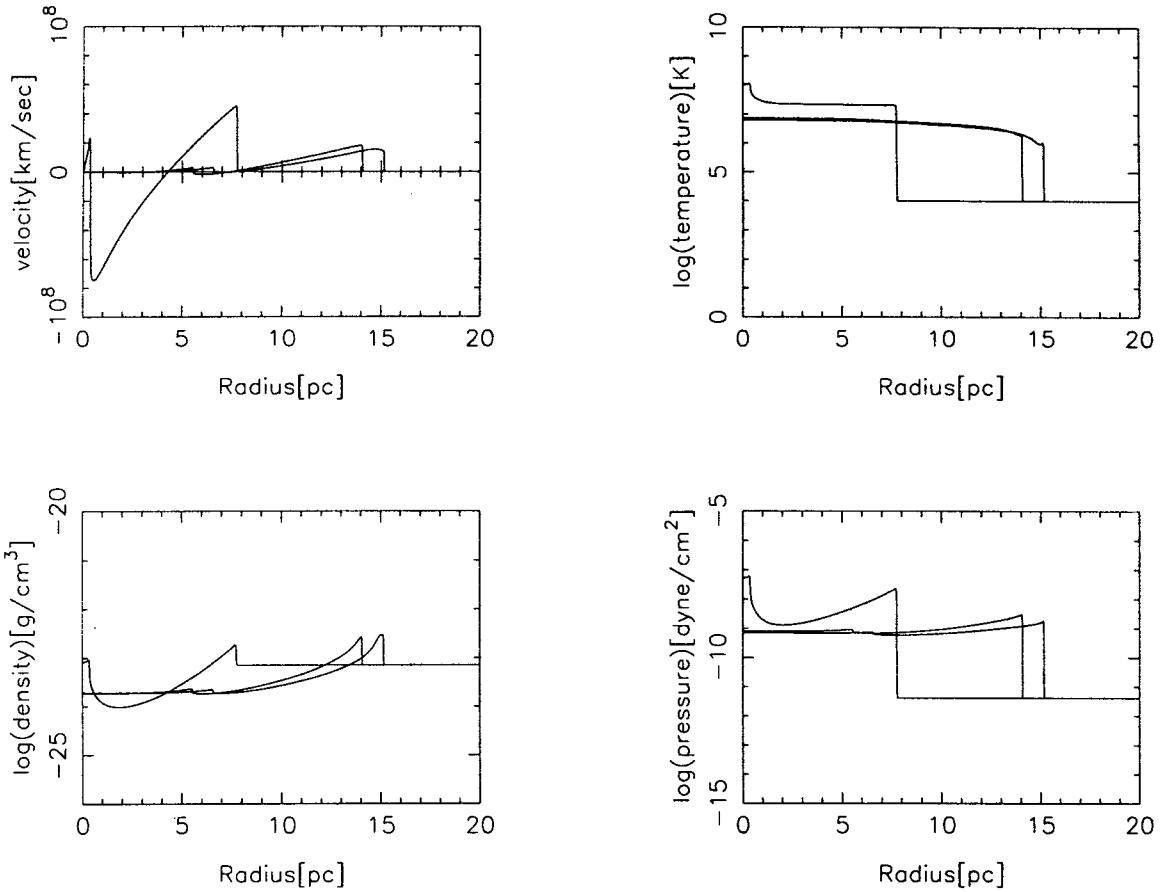


그림 4.— 그림 2와 동일. 모형 C의 경우를 나타내며 열전도 계수 $\phi = 1.1$ 로 주어졌다. 이는 자기장의 요란운동에 의해 방해 받지 않은 최대 열전도에 해당하는 값이다.

초신성 잔해의 표준 모형인 모형 A(그림 2)인 경우 중심부근의 밀도가 10^{-26}g/cm^3 으로 가장 낮고 온도가 10^{10}K 으로 가장 높으며 중심부와 충격파 후면까지 커다란 온도의 구배를 나타내고 있다. 전체적인 모습은 세도브 단계의 형태로 잘 근사되어짐을 볼 수 있다. 성간운 증발 모형인 모형 B(그림 3)인 경우 성간운의 증발에 따른 초신성 잔해 내부의 질량 증가로 내부 물질의 이동 속도가 모형 A에 비하여 감소하였으며, 증발된 질량을 가열시키는데 내부에너지가 소모되므로 초신성 잔해 내부의 온도가 모형 A보다 낮으며, 충격파의 전파속도 역시 모형 A보다 낮아짐을 볼 수 있다. 중심에서 반사된 역충격파와 성간운의 증발에 의해 증가된 밀도충과의 상호작용 결과 내부에서 상당히 복잡한 변화모습을 보인다. 성간운의 증발은 온도에 상당한 영향을 받고 ($m_{cl} \sim T^{\frac{3}{2}}$) 증발 시간이 매우 짧으므로, 성간운의 증발은 고온의 충격파 지역에서 매우 짧은 시간동안 발생하고 성간운은 곧 소멸한다. 따라서 초기에는 충격파가 중심에서 떨어져 있으므로 중심부에서 성간운의 증발은 발생하지 않으나, 역충격파가 중심부로 접근함에 따라 중심부의 온도가 상승하므로, 역충격파가 중심에 부딪히는

$t = 4,250$ 년 경에 중심부의 성간운의 증발이 발생하고, 따라서 중심부의 밀도가 급격히 증가함을 보인다. 그러나 중심에서 반사된 충격파가 다시 증가된 질량을 휩쓸고 지나가므로 중심에서는 밀도가 다시 감소하며, 중심에서 다소 떨어진 영역에 밀도가 증가하였음을 볼 수 있다. 열전도를 고려한 모형 C의 경우 역충격파가 중심에 부딪힌 이후 중심부의 높은 내부에너지가 전자에 의한 열전도를 통하여 충격파 지역으로 전달되므로, 모형 A에 비하여 중심부의 온도가 낮고, 충격파 지역의 온도가 다소 높아져 초신성 잔해 내부가 준등온 상태가 되었음을 볼 수 있다. 따라서 중심부로부터 이동된 내부에너지의 증가로 충격파 지역의 압력이 증가하고, 따라서 충격파의 전파 속도가 가장 빨라졌음을 볼 수 있다.

한편, 내부에너지는 중심에서 충격파쪽으로 전달되는 반면 충격파에 휘쓸린 물질의 열적 증발로 인하여 물질은 상대적으로 중심부로 이동하므로, 역충격파가 중심에서 반사된 이후에도 중심부의 질량의 감소율이 다소 떨어진다. 따라서 모형 A에 비하여 중심부의 밀도가 상당히 높으며, 전

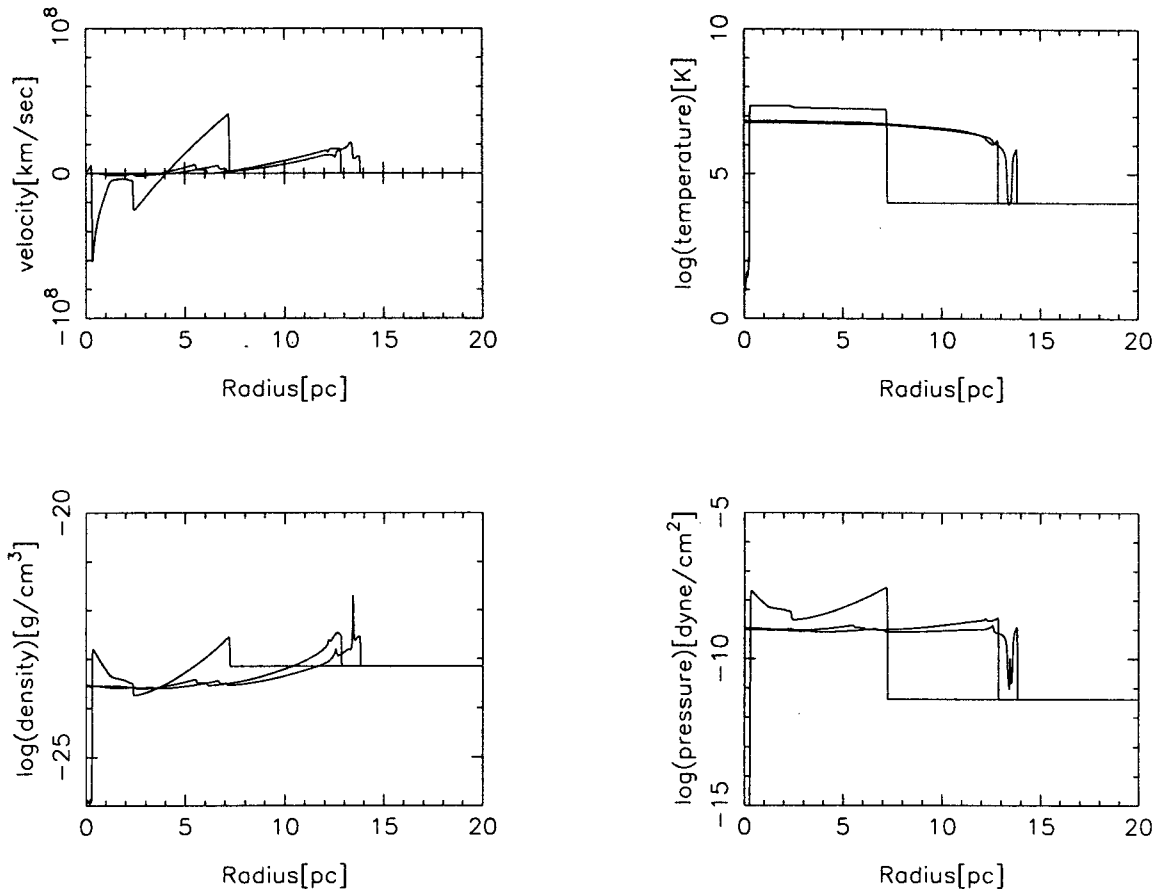


그림 5.— 그림 2와 동일. 모형 D의 경우를 나타내며 열전도 계수 $\phi = 0.3$ 로 주어졌다. 주변 성간운의 크기와 밀도분포는 모형 B와 동일하다.

체적으로 초신성 잔해 내부에서 밀도가 균일해졌음을 보인다. 성간운의 증발과 열전도를 함께 고려한 모형 D의 경우, 모형 B와 모형 C를 복합한 것으로 모형 B와 같이 초기에는 중심에서 떨어진 충격파 지역에서 성간운의 증발이 발생하나, 역충격파가 중심에 부딪히면서 중심부에서 성간운의 증발이 발생한다. 그러나 모형 B와는 달리 초신성 잔해의 내부영역이 열전도에 의하여 준등온 상태가 되어 압력이 밀도에 비례하게 되므로 중심부근에서 증가한 밀도는 압력의 증가를 유발하여 밀도가 균일한 상태를 만든다. 따라서, 모형 B에서 역충격파가 중심에서 반사되어 다시 바깥쪽으로 진행하는 충격파에 의해 휩쓸린 물질이 모형 D에서는 열전도에 의하여 분산되면서 중심부의 밀도를 다시 증가시키므로 위의 모형 중 가장 중심부의 밀도가 높다.

그림 6은 각 모형의 시간에 따른 성간충격파와 역충격파의 반경의 변화를 나타낸다. 모형 C의 경우 내부 구조에서 볼 수 있듯이 중심부의 내부에너지가 외부로 전달되어 가장 빠른 변화를 나타내었으며 모형 B의 경우 성간운 증발에 의한 질량의 증가로 인해 가장 느린 변화의 모습을

나타낸다. 그림 7은 역시 각 모형의 시간에 따른 에너지의 분배를 보이며 모형 A의 경우 세도브의 예상 값인 내부에너지 70%, 운동에너지 30%의 변화를 나타내지만 모형 B의 경우 성간운의 증발에 내부에너지의 사용으로 운동에너지가 상대적으로 증가됨을 볼 수 있다. 또한 충격파 후면의 질량의 증가로 가장 빨리 복사구각을 형성함을 볼 수 있다. 모형 C의 경우 중심부의 내부에너지가 열전도에 의해 바깥부분으로 전달되므로 내부를 통해서도 상당히 일정한 압력의 분포를 유지하며 상대적으로 열에너지가 증가함을 볼 수 있다. 한편 초신성 잔해에서 관측되는 0.1 ~ 10 keV 영역의 X-선의 스펙트럼은 연속스펙트럼과 선스펙트럼의 복잡한 모습을 나타내며 이는 각 물리량에 밀접히 관계된다. 그러나 Harrus et al. (1997)에 의해서 계산된 바와 같이 초신성 내부의 비평형이온화를 고려하였을때 조차 X-선 밝기의 변화는 10%보다 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 X-선 밝기를 구하기 위해 방출측정(emission measure)의 온도에 대한 변화를 무시하고 오직 밀도에만 의존하는 WL의 방법을 사용했다. 그림 8은 20,000년일때 계산된 각 모형의 X-선 방

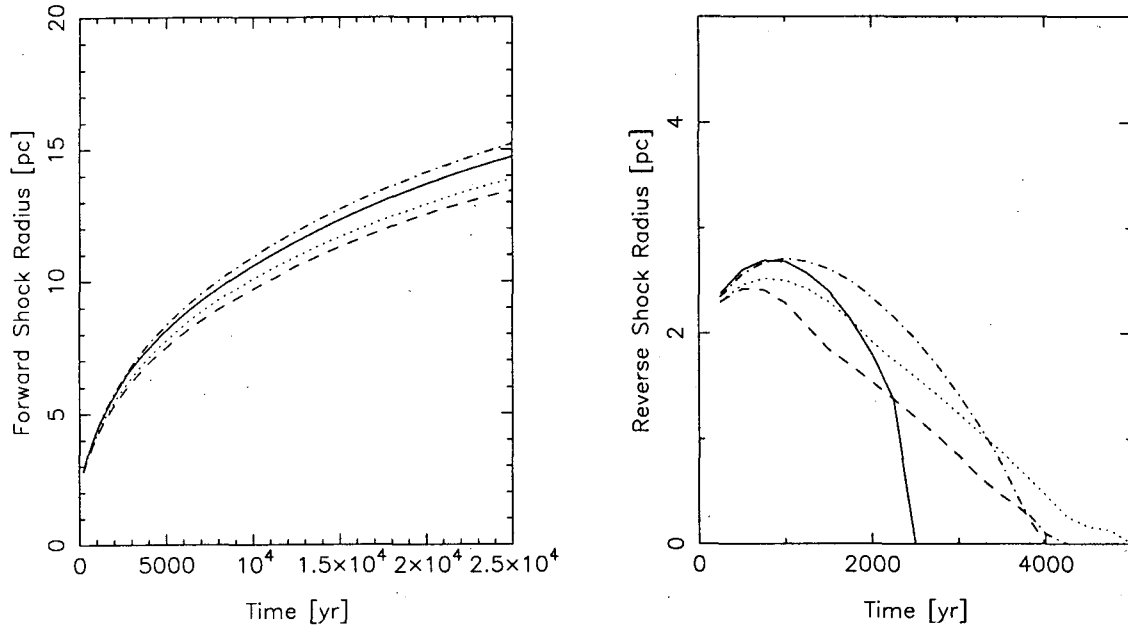


그림 6.— 각 모형의 시간에 따른 성간 충격파와 역 충격파의 거리의 변화. 실선은 모형 A, 파선은 모형 B, 점-파선은 모형 C, 점선은 모형 D를 나타낸다. (a)는 성간 충격파를 (b)는 역충격파를 나타낸다.

출측정을 최대 세기의 값으로 규격화시켜 나타낸 것이다. 모형 A와 모형 B의 경우 관측과는 달리 중심가광현상이 나타나지 않았다. 특히 모형 B의 경우 보다 고밀도의 성운($n=10^6 \text{ cm}^{-3}$)을 가정하였을 때 조차 구각형태의 모습을 나타내었다. 모형 C와 모형 D의 경우 중심가광현상을 뚜렷이 볼 수 있으며 성간운의 증발을 고려한 모형 D의 경우 중심으로의 집중화가 더욱 심하게 나타남을 볼 수 있다.

3.2. 토의

W44의 중심 가광 현상을 설명하기 위하여, 다양한 이론들이 제시되었다. WL은 초신성 잔해 내부에서 성간운이 지속적으로 증발함에 따라 초신성 잔해의 팽창에도 불구하고 초신성 잔해 중심부의 밀도가 크게 감소하지 않을 것이라고 추측하였다. 그러나 WL은 세도브 근사를 통한 자기닻음해를 풀었으므로 역충격파의 존재와 이에 따른 초신성 내부의 물리량 변화를 예측하지 못하였다. 또한 초신성 내부의 성간운의 증발시간이 매우 짧음에도 불구하고, WL의 모형에서는 매우 긴 시간동안 증발이 지속되어야 하므로 성간운의 질량이 비정상적으로 높아야 한다. WL은 성간운의 증발량을 증가시키기 위해 성간운의 밀도를 증가시켰으나 식 (7)에서 알 수 있듯이 성간운의 증발량은 성간운의 크기에 관계된다. 따라서 증발량의 증가는 성간운의 크기를 증가시키고 이는 그들이 가정한 성간운의 총만지수가 작다는 가정과 위배된다. 이 경우 성간운에 의한 동역학적 현상이 중요하게 나타날 것이다.

한편 WL은 세도브 근사를 통한 자기닻음해를 풀었으

므로 역충격파의 존재와 이에 따른 초신성 내부의 물리량 변화를 예측하지 못하였다. 본 계산에 의하면 역충격파에 의한 성간운의 증발이 성간 충격파 후면에서 보다 상당히 지연되어 나타나므로 밀도의 증가효과는 중심지역에만 한정되어 나타나게 된다. RPSH가 WL의 모형에 기초하여 W44의 중심 가광 현상을 설명하기 위하여서는 W44의 나이가 6,000~7,500년 이어야함을 주장하였다. 이는 W44의 연령과 차이가 크므로 바람직한 모형이 아니다.

RPSH의 W44의 X-선 관측에 의하면 X-선을 방출하는 지역의 온도가 균일함을 밝혔으며, 이는 초신성잔해의 내부에 열전도 현상이 발생하고 있음을 나타낸다. 본 연구에서도 열전도만을 고려한 모형 C의 경우 초신성 잔해 내부는 준등온 상태가 되면서(그림 4) 초신성 분출물에 의해 휩쓸린 주변 매질이 초신성 잔해의 중심쪽으로 이동하여 중심부의 밀도가 모형 A에 비하여 상당히 증가하였으며, 초신성 잔해의 밀도 분포 역시 비교적 균일하게 분포되어 있음을 보인다. 따라서 X-선 방출 측정이 중심부에서 비교적 큰 값을 나타내어 X-선 중심 가광 현상을 보인다. 본 연구와는 별도로 최근에 Cox et al. (1999)과 Shelton et al. (1999)은 초신성 잔해에 열전도 현상을 도입하여 W44의 중심 가광 현상을 설명하기도 하였다. 따라서 모형 C는 Cox et al. (1999)과 Shelton et al. (1999)과 유사한 모형이다. 그러나 Shelton et al. (1999)의 경우 포화 열전도 방정식에 사용되는 자유 변수 ϕ 의 값을 최대값인 1.1을 사용했을 때 관측에서 보이는 중심밀도분포를 설

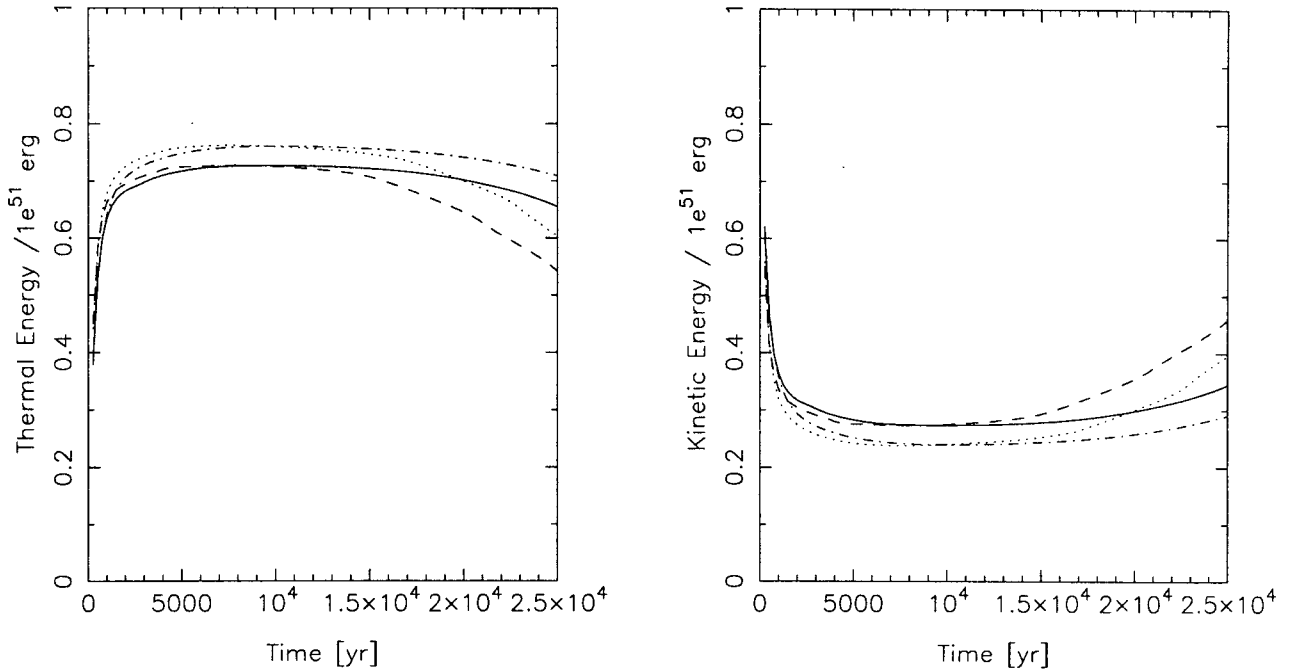


그림 7.- 각 모형의 시간에 따른 내부에너지와 운동에너지의 변화. 실선은 모형 A, 파선은 모형 B, 점-파선은 모형 C, 점선은 모형 D를 나타낸다. (a)는 내부에너지를 (b)는 운동에너지를 나타낸다.

면 열전도계는 $0.3 \leq \phi \leq 1$ 이 예상되며, 자기장이나 기체의 난류 운동, 점성 등이 존재할 경우 ϕ 의 값이 작아짐을 보였다. 만약 $\phi = 0.3$ 이면 그들의 계산에서와 같이 열전도에 의한 중심부의 밀도가 약 2배 정도 작아지며 X-선의 방출스펙트럼은 보다 높은 에너지 쪽으로 이동되기 쉽다. Shelton et al. (1999)의 Fig. 13에서 볼 수 있듯이 열전도만을 고려했을 때 중심부에서 예상된 X-선 세기는 관측된 값보다 매우 작다. 이 현상은 본 연구의 모형 C의 X-선 방출추정의 계산에서도 일치된 경향을 볼 수 있었다. 따라서 W44의 중심가광현상을 설명하기 위하여 중심부의 밀도를 더욱 높여야 한다. 따라서 모형 B와 모형 C를 혼합한 모형 D가 필요하다. 역충격파가 중심에 부딪혀 중심부의 온도가 상승한 이후에 성간운의 증발이 일어나서 중심부의 밀도를 증가시키는 모형 B와 열전도에 의하여 질량이 중심부로 이동하면서 내부의 온도와 밀도를 비교적 균일하게 변화시키는 모형 C의 효과가 복합적으로 나타나야 한다. X-선 방출추정도 모형 D가 중심가광현상을 가장 잘 나타내고 있음을 보인다.

4. 결론

초신성 잔해인 W44에서 나타나는 X-선 중심가광 현상은 균질한 물질속으로 진행되는 세드브 초신성 진화 모형으로서 설명할 수 없다. W44의 X-선 중심가광 현상을 설명하기 위하여 항성풍 구각과 초신성 분출물과의 상호작용에 의한 이중 각구조 모형, 초신성 잔해 내부에서의 성간

운의 열적 증발에 의한 중심의 밀도 증가 모형, 초신성 내부에서의 열전도에 의한 중심부의 밀도 증가 모형 등이 제시되었다. 본 연구에서는 기존에 제시된 위의 모형들과 초신성 내부에서의 성간운의 열적 증발 모형과 열전도 모형을 혼합한 새로운 모형을 TVD 방법을 이용한 수치 해석적인 방법으로 초신성의 동역학적 진화를 계산하였다. 한편 본 연구의 과정으로 계산 결과 항성풍 구각과 초신성 분출물과의 상호작용 모형은 열전도 현상이 있을 경우 이중 각구조가 형성될 수 없었다. 초신성 잔해 내부에서의 성간운의 열적 증발 모형은 중심부에서 다소 떨어진 곳의 밀도를 증가시키는 경향이 있으며, 초신성 잔해 내부에서의 열적 전도 모형은 열전도에 필요한 자유변수의 최대값을 필요로 한다. 본 연구에서 적용한 새로운 모형인 초신성 내부에서의 성간운의 열적 증발과 열전도를 동시에 고려한 모형에서는 초신성 잔해 내부의 온도와 밀도 분포를 비교적 균질하게 하면서 중심부의 밀도를 가장 크게 증가시켜 X-선 중심 가광 현상을 보이고 있음을 확인하였다. 따라서 W44와 같은 중심가광 현상을 보이는 초신성 잔해의 동역학적 진화는 초신성 잔해 내부에서 성간운의 열적 증발과 열전도 현상을 동시에 고려하여야 이해할 수 있다.

참고문헌

Chevalier, R. A., 1975, ApJ, 198, 355
 Choe, S-U, & Jung, H.C., 1998, PKAS, 13, 135
 Cowie, L. L., & Mckee, C. F., 1977, ApJ, 211, 135

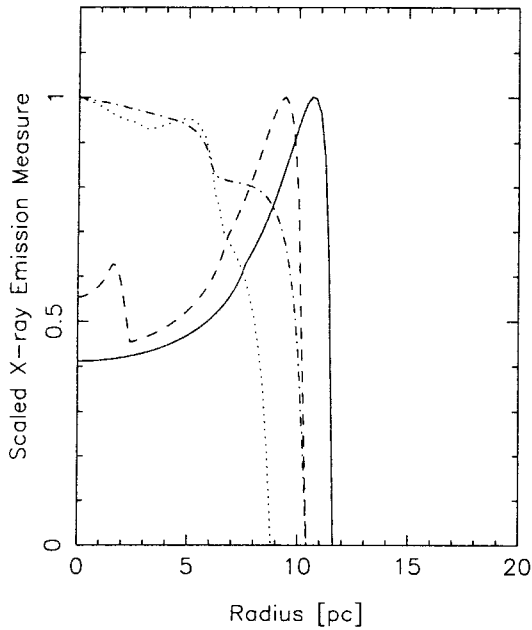


그림 8.— W44의 나이로 추정되는 20,000년일때 각 모형의 계산된 X-선 방출측정의 반경에 따른 변화. 실선은 모형 A, 파선은 모형 B, 점-파선은 모형 C, 점선은 모형 D를 나타낸다. 모형 A와 모형 B는 구각구조를 모형 C와 모형 D는 중심가광현상을 나타냄을 볼 수 있다.

Cowie, L. L., Mckee, C. F., & Ostriker, J. P., 1981, *ApJ*, 247, 908
 Cox, D. P., Shelton, R. L., Maciejewski, W., Smith, R. K., Plewa, T., Pawl, A., & Rozyczka, M. 1999, *ApJ*, 524, 179
 Cui, W., & Cox, D., 1992, *ApJ*, 401, 206
 Draine, B. T., & Giuliani, J. L., Jr., 1984, *ApJ*, 281, 690
 Giuliani, J. L. Jr. 1984, *ApJ*, 277, 605

Harrus, I. M., Hughes, J. P., Singh, K. P., Koyama, K., & Asaoka, I., 1997, *ApJ*, 488, 781
 Jung, H. C., 1988, 서울대학교 박사학위 논문
 Kafatos, M., 1973, *ApJ*, 182, 433
 Klein, R. I., McKee, C. F., & Collela, P., 1994, *ApJ*, 420, 213
 Koo, B-C, & Heiles, C., 1995, *ApJ*, 442., 679
 LeVeque, R. J., 1992, "Numerical methods for conservation laws", Springer Verlag
 Long, K. S., Blair, W., White, R.L., & Matsui, Y., 1991, *ApJ*, 373, 567
 Lozinskaya, T. A., 1990, "Supernovae and Stellar Wind in the Interstellar Medium", American Institute of Physics, New York
 Mckee, C. F., 1974, *ApJ*, 188, 335
 Raymond, J. C., Cox, D. P., & Smith, B. W., 1976, *ApJ*, 204, 290
 Rho, J., Petre, R., Schlegel, E. M., & Hester, J. J., 1994, *ApJ*, 430, 757(RPSH)
 Richtmeyer, R. D., & Morton, K. W., 1967, "Difference Methods for Initial Value Problem", N.Y., Inter Science
 Ryu, D. S., Yun, H. S., & Choe, S.-U., 1995, *JKAS*, 28, 223
 Shelton, R. L., Cox, D. P., Maciejewski, W., Smith, R. K., Plewa, T., Pawl, A., & Rozyczka, M., 1999, *ApJ*, 524, 192
 Solinger, A., Rappaport, S., & Buff, J., 1975, *ApJ*, 201, 381
 Spitzer, L., 1962, "Physics of Fully Ionized Gas", N.Y., Inter Science
 White, R. L., & Long, K. S., 1991, *ApJ*, 373, 543(WL)
 Wolszczan, A., Cordes, J.M., & Dewy, R. L., 1991, *ApJ*, 372, L99
 Zel'dovich, Ya, B., & Raizer, Yu, P., 1967, "Physics of shocked wave and High Temperature Hydrodynamic Phenomena", N.Y., Academic Press