

규산염탄소항성의 먼지층 모형

서 경 원
충북대학교 천문우주학과

MODEL DUST ENVELOPES AROUND SILICATE CARBON STARS

Suh, Kyung-Won

Dept. of Astron. & Space Science, Chungbuk National University, Cheongju-City 361-763, Korea
E-mail: kwsuh@chungbuk.ac.kr

(Received February 1, 2006; Accepted February 7, 2006)

요 약

비정질규산염과 비정질탄소 먼지입자들이 혼합된 불투명계수를 사용하여 규산염탄소항성의 구형대칭 먼지층에 대한 복사전달 모형계산을 진행하였다. 계산결과들을 적외선 관측자료와 자세히 비교하여 최적의 모형 계수들을 얻어내었고 규산염탄소항성과 그 먼지층의 물리적, 화학적 구조에 대한 해석에 적용하였다. 이 연구에 사용된 4개의 항성들은 먼지층의 화학성분이 변하는 과도기의 특징들을 다양하게 나타내었다. 단순히 규산염으로 이루어져 있지만 항성 표면으로부터 많이 떨어져 있는 먼지층은 홀별로서의 과도기 규산염탄소항성의 전형적인 모습이다. 그러나 쌍성일 경우 전시대의 규산염과 이후의 탄소 먼지입자들이 공존하는 독특한 특징을 보일 수 있다.

ABSTRACT

We have modeled dust envelopes around silicate carbon stars using optical properties for a mixture of amorphous carbon and silicate dust grains paying close attention to the infrared observations of the stars. The 4 stars show various properties in chemistry and location of the dust shell. We expect that the objects that fit a simple detached silicate dust shell model could be in the transition phase of the stellar chemistry. For binary system objects, we find that a mixed dust chemistry model would be necessary.

Key words: circumstellar matter, stars: AGB and post-AGB, infrared: stars, dust: extinction, radiative transfer

1. 서 론

아주 크지 않은 질량($M_{ZAMS} \leq 10 - 12M_{\odot}$)을 가진 항성의 진화 마지막단계인 점근거성렬항성(AGB stars)은 장주기맥동변광성이며 많은 먼지입자들을 동반하는 강한 항성풍으로 막대한 질량 결손($\dot{M} \approx 10^{-8} - 10^{-4}M_{\odot}/yr$)을 보인다. 은하내의 물질순환에 있어 항성으로부터 성간매질로 물질(기체와 먼지입자)을 주도적으로 공급하는 역할을 한다. 점근거성렬항성은 대기의 화학성분에 따라 산소가 많은 M형, 탄소가 많은 C형, 중간형인 S형으로 분류된다.

표 1. 이 연구를 위하여 선택된 4개의 규산염탄소항성.

| Name | IRAS PSC | IRAS LRS | ISO |
|-----------|------------|----------|----------------|
| W Cas | 00519+5817 | Yes | SWS (1) |
| HD 189605 | 19583-0730 | Yes | - |
| V 778 Cyg | 20350+5954 | Yes | SWS(3), LWS(1) |
| Hen 38 | 08002-3803 | Yes | - |

점근거성렬항성의 대기에서는 상대적으로 함량이 크고 많은 분자결합의 주도적 역할을 하는 산소와 탄소가 먼지입자의 형성에도 중요한 역할을 한다. CO 분자의 강한 결합에너지와 점근거성렬항성 주변의 대기층 온도인 1000-2000K 근처에서 매우 안정된 성질을 갖는다는 특성 때문에 CO 분자 생성 이후에는 산소와 탄소 두 가지 원소가 동시에 독립적으로 존재하는 것을 기대하기 어렵다. 이러한 분자의 결합 에너지 특성 때문에 먼지입자의 화학 성분은 크게 산소가 결합 구조를 주도하는 규산염과 탄소가 결합 구조를 주도하는 탄소 먼지입자(비정질 탄소, 흑연 등)로 나뉠 수 있다. 또한 CO 분자의 강한 결합 에너지 때문에, 먼지입자가 생성될 조건을 갖는 경우 산소 계통 혹은 탄소 계통의 먼지 형성이 명확히 구별되며 두 종류의 먼지입자가 동시에 생성되는 것은 사실상 불가능하다.

규산염탄소항성(silicate carbon stars)은 M형 Mira항성 내부에서 새로 만들어진 탄소가 표면으로 나오며(dredge-up 과정) 항성 대기의 탄소성분이 산소보다 많아지고 항성 표면은 탄소항성의 특징을 가지면서 규산염먼지 껍질을 가지고 있는 화학성분 변화의 단계에 있는 항성이다. 즉, 산소 먼지입자의 형성이 멈추고 탄소 먼지입자의 형성이 시작되는, M형으로부터 C형으로 바뀌는 과도기의 항성이라 볼 수 있다. 규산염탄소항성은 탄소항성의 특성과 규산염 먼지입자에 의한 파장 $10\mu\text{m}$, $18\mu\text{m}$ 에서의 방출선을 함께 나타낸다. 이후 규산염이 없고 얇은 탄소 먼지층만 갖는 탄소항성(carbon stars), 두꺼운 탄소먼지층을 갖는 적외선탄소항성으로 진화한다(Iben 1981, Chan & Kwok 1990, Suh 2000). 그러나 쌍성일 경우에는 전시대의 규산염과 이후의 탄소 먼지입자들이 공존하는 독특한 특징을 보일 수 있다. 규산염먼지들이 쌍성주변의 원반층에 머물러 있다가 나중에 탄소먼지와 함께 밖으로 분출될 수 있기 때문이다.

이 논문의 목적은 비정질 규산염과 비정질 탄소 먼지입자들이 혼합된 불투명계수를 사용하여 규산염탄소항성의 먼지층에 대한 구형대칭 복사전달 모형계산을 진행하여 계산결과들을 적외선 관측자료와 자세히 비교, 분석하여 최적의 모형계수들을 얻어내고 규산염탄소항성과 그 먼지층의 물리적, 화학적 구조에 대한 해석을 시도하는 것이다. 적외선 관측자료는 IRAS, ISO 적외선관측위성의 측광, 분광 자료와 지상 관측자료 들을 사용한다.

2. 규산염탄소항성의 관측자료

탄소항성의 특성을 가지면서 규산염 먼지입자의 특성을 함께 보이는 규산염탄소항성은 현재까지 약 25개가 알려져있다(Lloyd Evans 1990, Chen, Wang, & Wang 1999, Kwok, Volk, & Bidelman 1997, Jiang, Szczerba, & Deguchi 2000, Suh, Lee, & Kim 2001). 모형계산 결과와 비교, 분석하기 위하여 그중 비교적 관측자료가 많은 항성 4개를 선정하였다. 표 1은 이 연구에 사용된 4개의 규산염탄소항성의 이름, IRAS 점광원목록(PSC) 번호, IRAS 저분해능 분광자료(LRS)의 유무, ISO 단파장

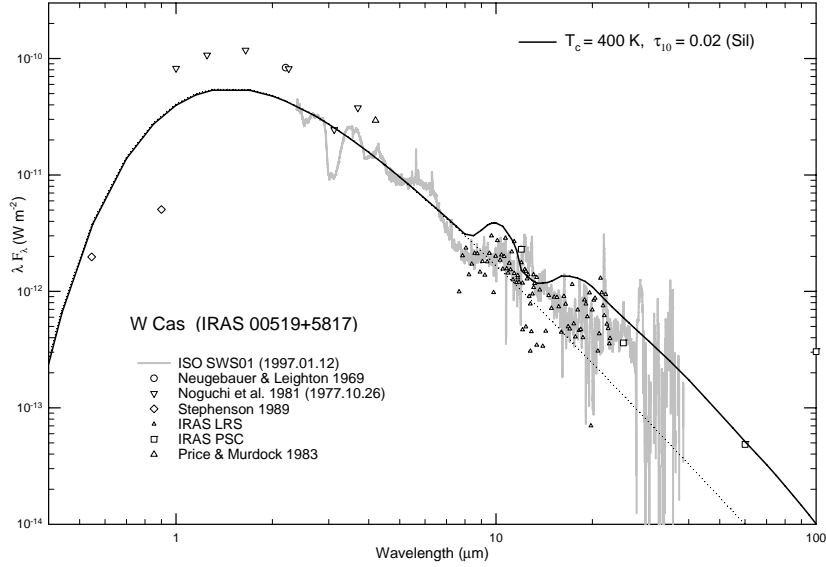


그림 1. W Cas의 에너지분포도 - 모형계산과 관측과의 비교.

분광자료(SWS; $\lambda = 2.4 - 45.2\mu\text{m}$)와 장파장 분광자료(LWS; $\lambda = 43 - 197\mu\text{m}$)의 유무(관측수) 등을 보여준다. 이 항성들은 다양한 날짜에 수행된 지상 관측자료와 IRAS 측광, 분광자료를 포함한다. 이 중 2개의 항성은 ISO 분광관측 자료도 포함한다. ISO 분광관측 자료는 온라인 ISO 데이터 센터에서 가져온 기본과학자료(basic science data product)를 그대로 사용하였다. 모든 관측자료는 통일된 에너지 단위(W/m^2)로 변환하였다. 그림 1, 2, 3, 4는 관측된 에너지분포도들을 보여준다. 이후에 설명할 이론적 모형계산 결과들과 비교되어 있다. 지상 관측자료의 출처는 그림 안의 범례에 나타내었고 실제 관측일자는 괄호안에 표시되어 있다.

3. 모형 계산

이 연구에서는 구형대칭의 먼지층에 대한 복사전달모형으로 DUSTY(Ivezić, Nenkova & Elitzur 1999)를 사용하였다. 파장 $10\mu\text{m}$ 에서의 광학적깊이(τ_{10}) 값을 변화시키며 다양한 두께의 먼지층에 대한 복사전달 모형계산을 진행하였다. 이후에 설명되는 다양한 모형 계수들을 사용하여 각 모형에 대한 파장 $0.1\mu\text{m}$ 에서 $1000\mu\text{m}$ 까지의 모형 에너지분포를 계산하였다.

3.1 중심별

점근거성렬항성의 에너지 분포는 주로 먼지층에 의해 형성되므로 먼지층 복사전달모형에서 중심별의 복사는 흑체로 가정한다. 이때 중심별의 밝기는 방출되는 에너지분포의 모양과는 무관하며 단지 전체적인 크기에만 영향을 준다. 중심별의 온도는 방출에너지 분포의 모양에 영향을 주는데 이 효과는 얇은 먼지층인 경우 더 강하다. 이 연구에서는 중심별의 밝기는 $10^4 L_{\odot}$ 으로 가정하였고, 흑체 온도는 2000-2800K 중 관측과 가장 잘 맞는 값을 구하였다.

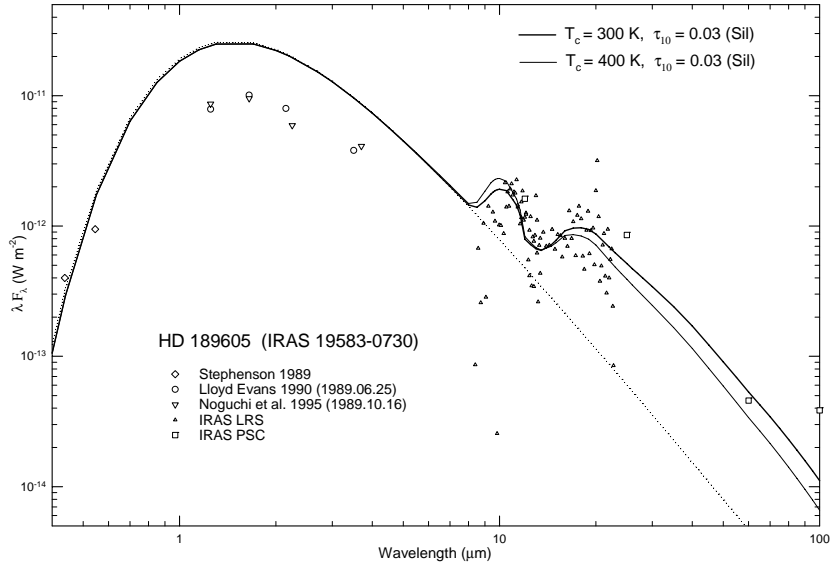


그림 2. HD 189605의 에너지분포도- 모형계산과 관측과의 비교.

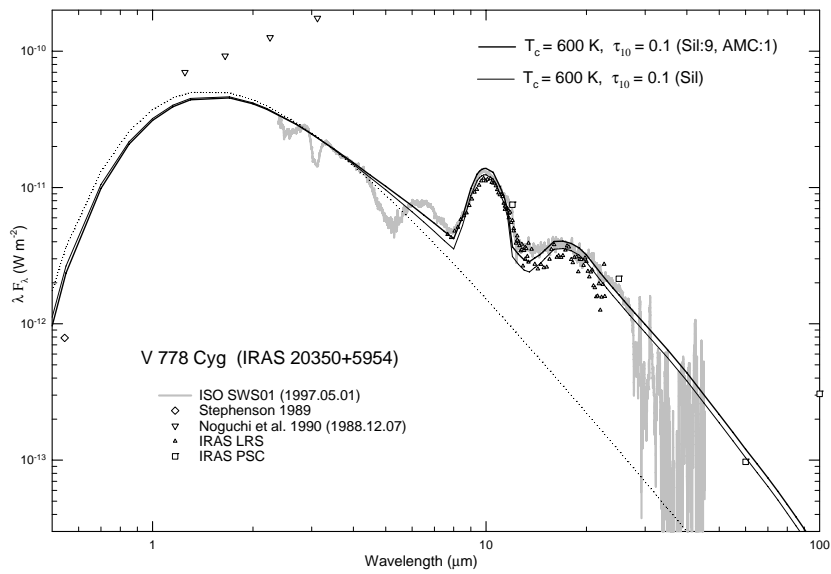


그림 3. V778 Cyg의 에너지분포도- 모형계산과 관측과의 비교.

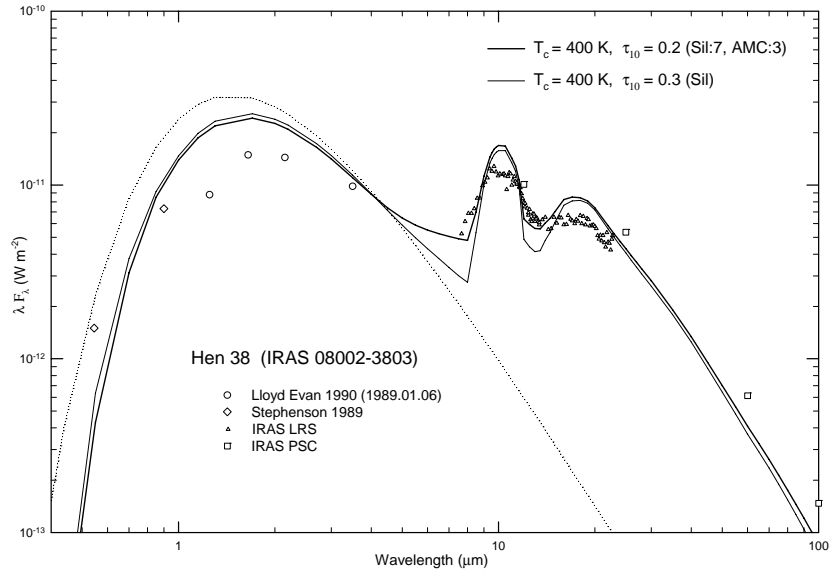


그림 4. Hen 38의 에너지분포도 - 모형계산과 관측과의 비교.

3.2 먼지입자의 불투명계수

먼지층의 불투명계수로는 규산염과 비정질탄소의 혼합물을 사용하였다. 사용된 복사전달 모형에서는 혼합물의 각 조성물들이 잘 섞여 있다고 가정하여 각 기여도를 고려한 평균값을 하나의 불투명계수 함수로 사용한다. 규산염의 불투명계수는 Suh(1999)의 따뜻한 온도의 규산염(warm silicate; Sil)을 사용하였고 탄소먼지의 불투명계수는 Suh(2000)의 비정질탄소(amorphous carbon; AMC)를 사용하였다. 먼지입자의 모양은 구형이며, 그 크기는 반경 $0.1\mu\text{m}$ 라고 가정하였다. 혼합비율은 갯수를 기준으로 하여 규산염 3, 탄소 7인 경우 Sil:3, AMC:7이라고 표시하며 규산염만 사용할 경우 Sil이라고 표시한다.

3.3 먼지층의 구조

이전의 점근거성렬항성 주변 먼지층 모형에서는 보통 먼지층 내부 껍질의 먼지입자 온도(T_c)를 하나의 온도(1000-1500K)로 고정하여 사용하였으나, 이 연구에서는 관측과 비교하여 잘 맞는 값을 다양하게 사용한다. 맥동변광성의 경우, 먼지형성의 온도와 파괴되는 온도가 다를 수 있기 때문에 T_c 는 먼지가 형성되는 온도와 다를 수 있다(예, Suh 2004). 모형계산에 따른 에너지분포는 T_c 의 값에 따라서 민감하게 변화한다.

구형대칭의 먼지층은 연속적인 밀도 분포($\rho \propto r^{-2}$)로 내부껍질 반경(R_c)로부터 $1000R_c$ 까지 분포한다고 가정한다. 이 가정에 대한 설명은 Suh(1999)에 자세히 기술되어 있다.

4. 모형계산 결과와 관측자료의 비교, 분석

그림 1, 2, 3, 4는 모형계산과 관측된 에너지분포들을 함께 비교한다. 그림의 에너지분포 비교에서 규산염탄소항성은 Mira형 장주기 맥동변광성이므로 관측 날짜에 따라 전체적인 밝기가 달라진다

표 2. 관측과의 비교에서 얻어진 먼지층모형 계수.

| Name | IRAS PSC | T_* (K) | 먼지성분 | T_c (K) | $R_c (R_*)$ | τ_{10} | 비고 |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-------------|-------------|-----|
| W Cas | 00519+5817 | 2500 | Sil | 400 | 32.9 | 0.02 | |
| HD 189605 | 19583 - 0730 | 2500 | Sil | 300 | 57.9 | 0.03 | |
| V 778 Cyg | 20350+5954 | 2500 | Sil:9, AMC:1 | 600 | 16.9 | 0.1 | 쌍성? |
| Hen 38 | 08002 - 3803 | 2500 | Sil:7, AMC:3 | 400 | 42.3 | 0.2 | 쌍성? |

는 사실에 유의해야 한다. 이 연구의 먼지층 모형계산은 분자의 흡수, 방출은 고려하지 않으므로 ISO 관측에 나타나는 $10\mu\text{m}$ 미만 파장대에서의 C_3 등 분자 흡수선들을 재현할 수 없다. 표 2는 규산염탄소항성의 모형계산과 관측과의 비교를 통해 얻어진 먼지층모형 계수를 보여준다. 4개 항성들에 대하여 관측과 가장 잘 맞는 중심별 온도는 공통적으로 2500K이었으며, 중심별의 에너지분포는 그림 안의 점선으로 표시하였다. 모형 계수의 변화에 따라 관측과 맞는 정도가 민감한 차이를 보인다. 그림 2, 3, 4에서는 관측과 가장 잘 맞는 모형(굵은 선)과 다른 모형(가는 선)도 함께 비교하여 보여준다. 그림 2에서는 먼지층 내부접질 먼지온도(T_c)의 차이에 따라 파장 $7\mu\text{m}$ 이상에서의 에너지분포가 달라짐을 확인할 수 있고, 그림 3, 4에서는 먼지입자의 성분이 순수 규산염인가 탄소 혼합물인가에 따라서 전체적인 에너지 분포가 많이 달라짐을 알 수 있다. Suh(1999, 2004)는 이외의 모형계수 변화에 따른 에너지분포 차이에 대하여 자세히 논하였다.

처음 2개의 항성은 매우 얇은 규산염 먼지접질을 가지고 있으며, 나중 2개는 좀더 두꺼운 혼합 먼지층(규산염, 탄소)을 가지고 있다. 4개의 항성 모두 먼지층 내부접질 먼지온도(T_c)가 600K 이하인데 이는 보통의 M형, C형 점근거성렬항성의 경우(대부분 1000K 정도)보다 훨씬 낮은 온도이다. Suh(2004)는 얇은 먼지층을 갖는 M형 점근거성렬항성의 경우, T_c 값이 420-654K 정도로 낮을 수도 있다고 주장하였는데 W Cas와 HD 189605의 경우 그 보다도 낮은 400, 300K이다.

순수한 규산염먼지로 구성된 그림 1, 2의 W Cas와 HD 189605의 경우 그 온도가 각각 400K, 300K로 매우 낮으며 항성중심으로부터 내부접질까지의 거리(R_c)도 각각 32.9, 57.9 항성반경(R_*)으로 매우 떨어져 있는 먼지층이다. $T_c = 1000\text{K}$ 인 경우, 그 거리는 각각 5.44, $5.47R_*$ 이다. 이들 항성 주변 먼지층의 팽창속도가 약 10km/sec 임을 감안할 때 먼지층이 $1R_*$ 를 통과하는데 1년 정도 걸린다. 먼지가 약 1000K에서 형성된다고 가정한다면, 약 25년에서 50년간 먼지입자의 형성이 전혀 없었다고 말할 수 있다. 즉, 단순히 규산염으로 이루어져 있지만 항성표면으로부터 많이 떨어져 있는 먼지층을 갖는 W Cas와 HD 189605은 홀별로서의 과도기 규산염탄소항성의 전형적인 모습이라고 할 수 있다. 이들이 관측된지 약 10년 이상 더 지나 다시 관측된다면 이 값들이 달라질 수도 있을 것이다.

여기서 우리는 홀별로서의 규산염탄소항성의 수명을 계산해 볼 수 있다. 계산을 해보니 T_c 가 200K보다 낮아질 경우, 규산염 먼지입자에 의한 파장 $10\mu\text{m}$ 에서의 방출선이 급격히 약해지며 150K에서는 완전히 사라진다. 150K일때 R_c 값은 약 $160 R_*$ 이 된다. 즉, 홀별로서의 규산염탄소항성의 수명은 약 150년 임을 알 수 있다.

반면에 그림 3, 4의 V778 Cyg와 Hen 38의 경우 규산염과 탄소먼지입자가 혼합된 먼지층 모형이 관측과 비교적 더 일치함을 알 수 있다. 쌍성일 경우 전시대의 규산염과 이후의 탄소 먼지입자들이

공존하는 독특한 특징을 보일 수 있다. 쌍성주변의 원반 밀도 분포에서 규산염 먼지입자들이 비교적 안정적으로 머물러 있을 공간을 제공할 가능성이 있다고 예상된다. 탄소항성으로 진화하면서 좀더 강한 항성풍으로 인해 전 시대에 머물고 있던 규산염 먼지입자들과 함께 밖으로 분출될 수 있을 것이다. 이 경우 먼지층은 구형대칭 형태가 아닐 가능성이 많기 때문에 비구형대칭의(예, 원반형, 쌍극 분출형 등) 먼지층 모형이 더 합당할 수 있을 것이다. Yamamura et al.(2000)은 V778 Cyg의 관측을 분석하면서, 쌍성주변의 저장공간의 역할에 대하여 상세히 설명하였다. Ohnaka et al.(2006)은 Hen 38의 고해상도 적외선 화상 관측자료의 분석을 통하여 이 항성 주변의 먼지원반의 증거를 찾을 수 있었으며 작은 질량의 동반성의 존재가능성을 언급하였다. 그러나 이 항성들이 쌍성이라는 관측적 확증은 아직 없으며 더 자세한 연구가 필요하다.

5. 결론 및 토의

이 연구에서는 비정질규산염과 비정질탄소 먼지입자들이 혼합된 불투명계수를 사용하여 규산염 탄소항성의 먼지층에 대한 구형대칭 복사전달모형 계산을 진행하였다. 계산결과들을 적외선 관측자료와 자세히 비교하여 최적의 모형계수들을 얻어내었고 규산염탄소항성과 그 먼지층의 물리적, 화학적 구조에 대한 해석에 적용하였다. 이 연구에 사용된 4개의 항성들은 먼지층의 화학성분이 변하는 과도기의 특징들을 다양하게 나타내었다. 단순히 규산염으로 이루어져 있지만 항성 표면으로부터 많이 떨어져 있는 먼지층은 홀별로서의 과도기 규산염탄소항성의 전형적인 모습이다. 쌍성일 경우 전시대의 규산염과 이후의 탄소 먼지입자들이 공존하는 독특한 특징을 보일 수 있다. 그러나 이 방법만으로 홀별, 쌍성임을 확실히 구분하기는 어렵고 다른 관측 사실들과도 비교해 보아야 한다.

탄소항성은 맥동의 특성(주기, 진폭), 질량결손율, 먼지층의 두께 등을 고려해 볼 때 점근거성렬 항성 전체로 볼 때 약 중간 정도의 질량에 해당되는 항성이라고 여겨진다(예, Chen & Kwok 1993). M형 항성에서 탄소항성으로 변하는 과정에 대해서는 항성구조, 핵반응을 연구하는 사람들 사이에서 논란이 많다. 규산염탄소항성의 기원, 구조, 및 진화에 대하여 연구가 시도되었지만 아직 정확한 결론을 내리기는 어렵다. 또한 잘 관측된 규산염탄소항성의 숫자는 그 항성들이 은하에서 차지하는 비중과 역할을 고려할 때 아직 극소수라고 볼 수 있다.

최근의 규산염탄소항성에 대한 연구는 부진하였으나 새로운 적외선 관측위성 Spitzer와 Astro-F의 관측은 새로운 규산염탄소항성을 많이 발견할 수 있는 토대가 될 수 있으리라고 기대한다. 새로운 적외선 관측자료는 기존의 알려진 항성은 물론 새롭게 발견되는 규산염탄소항성의 자세한 에너지분포도를 제공할 수 있을 것이다. 이는 규산염탄소항성의 기원, 구조, 및 진화에 대한 연구를 활성화할 수 있을 것이다. 이론적으로는, 구형대칭 먼지층의 복사전달 모형에서 벗어나 다양한 구조(예, 먼지 원반, 쌍극 분출형)를 갖는 먼지층에 대한 복사전달 모형의 사용이 가능하다면 좀더 자세하고 합리적인 이론적 모형이 제시될 수 있을 것이다.

감사의 글: 이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Chan, S. J. & Kwok, S. J. 1990, A&A, 237, 354
 Chen, P.-S. & Kwok, S. 1993, ApJ, 416, 769

- Chen, P.-S., Wang, X.-H., & Wang, F. 1999, *Acta Astron. Sinica*, 40, 32
- Iben I. 1981, *ApJ*, 246, 278
- Ivezić, A., Nenkova, M., & Elitzur, M. 1999, User Manual for DUSTY, University of Kentucky Internal Report, accessible at <http://www.pa.uky.edu/~moshe/dusty>
- Jiang, B. W., Szczerba, R., & Deguchi, S. 2000, *A&A*, 362, 273
- Kwok, S., Volk, K., & Bidelman, W. P. 1997, *ApJS*, 112, 557
- Lloyd Evans, T. 1990, *MNRAS*, 243, 336
- Neugebauer, G. & Leighton, R. B. 1969, Two-Micron Sky Survey-A Preliminary Catalog, NASA SP-3047
- Noguchi, K., Kawara, K., Kobayashi, Y., Okuda, H., Sato, S., & Oishi, M. 1981, *PASJ*, 33, 373
- Noguchi, K., Murakami, H., Matsuo, H., Noda, M., Hamada, H., & Watabe, T. 1990, *PASJ*, 42, 441
- Noguchi, K., Qian, Z., Sun, J., & Wang, G. 1995, *PASJ*, 47, 41
- Ohnaka, K., Driebe, T., Hofmann, K.-H., Leinert, Ch., Morel, S., Paresce, F., Preibisch, Th., Richichi, A., Schert, D., Scholler, M., Waters, L. B. F. M., Weigelt, G., & Wittkowski, M. 2006, *A&A*, 445, 1015
- Price, S. D. & Murdock, T. L. 1983, The Revised AFGL Infrared Sky Survey Catalog. Air Force Geophysical Laboratory, NASA AFGL-TR-83-0161
- Stephenson, C. B. 1989, *Publ. Warner & Swasey Obs.*, 3, No.2
- Suh, K.-W. 1999, *MNRAS*, 304, 389
- Suh, K.-W. 2000, *MNRAS*, 315, 740
- Suh, K.-W. 2004, *ApJ*, 615, 485
- Suh, K.-W., Lee, J.-W., & Kim, H.-Y. 2001, *JA&SS*, 18, 15
- Yamamura, I., Dominik, C., de Jong, T., Waters, L. B. F. M., & Molster, F. J. 2000, *A&A*, 363, 629