PUBLICATIONS OF THE KOREAN ASTRONOMICAL SOCIETY
25: 1 ~ 13, 2010

천체화학과 성간분자
ASTROCHEMISTRY AND INTERSTELLAR MOLECULES

민영철
한국천문연구원

Y. C. MINH
Korea Astronomy and Space Science Institute
E-mail: minh@kasi.re.kr
(Received February 17, 2010; Accepted March 05, 2010)

ABSTRACT

Astrochemistry provides powerful tools to understand various cosmic phenomena, including those in our solar system to the large-scale structure of the universe. In addition, the chemical property of an astronomical body is a crucial factor which governs the evolution of the system. Recent progress in astrophysical theories, computational modelings, and observational techniques requires a detailed understanding of the interactions between the constituents of an astronomical system, which are atoms and molecules within the system. Especially the far-infrared/sub-millimeter wave range, which is called as the last frontier in astronomical observations, contains numerous molecular lines, which may provide a huge amount of new information. However, we need an astrochemical understanding to use this information fully. Although this review is very limited, I would like to stress the importance of astrochemical approach in this overview for the field, which is getting much more attention than ever before.

Key words: ISM - Interstellar molecules: Astrochemistry

1. 서론

우주를 구성하는 모든 원소들은 서로의 끊임없는 관계를 통하여 현재의 모습을 보여주고 있다. 우주에 존재하는 모든 원자, 분자, 혹은 입자들의 상호 관계는, 우주의 시작인 빅뱅에서부터 현재의 다양한 천체들의 모습에 이르기까지, 모든 것을 결정해 왔다. 한 예로, 성간 가스구름의 진화는 가열과 냉각의 에너지 균형에 달려있으며, 냉각매체(coolant)로서 가장 중요한 것이 원자 분자들로부터의 천이선이기 때문에, 이들의 형성 파괴가 그 시스템의 진화를 결정하는 것이다. 이들의 형성, 파괴 과정이 천체화학이며, 우주에서 일어나는 원자, 분자, 혹은 입자들의 상호 반응과정을 총칭하여 천체화학이라고 부를 수 있다. 우리에게 보이는 우주의 물리적인 현상들과 이들의 배후에 존재하는 화학적 특성의 관계는, 마치 우리에게 보이는 우리의 물리적인 몸이, 우리 몸에서 일어나는 화학반응 및 화학물질들의 조정에 전적으로 의존하는 것과 같이, 천체화학적 반응은 우주의 진화의 중심적 역할을 하고 있다고 할 수 있다.

그러나 천체화학이라는 말이 보다 보편적으로 쓰이게 된 것은, 우주의 공간에 많은 양의 성간분자가 존재한다는 것이 알려지고부터이다. 1960년대 말에 전파영역에서 성간분자선이 관측되기 전까지, 성간물질에 대한 연구는 원자수소(HI)의 21 cm 선과 몇몇 원자들에 의한 흡수선 연구에 국한되어 왔다. 그러나 원자수소의 21 cm 선은 주로 밀도가 낮은 성간 가스를 추적하고, 원자들의 흡수선은 성간 소광의 제한으로 성간물질에 대한 연구에 많은 제한이 있었다. 처음 성간분자선의 관측은 CH^+, CH, CN 등의 기(radical)에 대한 광학 흡수선의 관측이었지만(Adams, 1949), 이때만 해도 그렇게 다양한 성간분자가 우주에 다량으로 존재하리라고는 생각하지 못하였다. 전파영역에서 처음 OH 분자선이 관측되고(Weinreb et al., 1963), OH 메이저선이 관측되고(Weaver et al., 1965; Gundermann, 1965), NH_3, H_2O 등이 계속 발견되면서, 성간의 가스 밀도가 이들이 존재할 정도로 충분히 높다는 것이 알려졌다. 그리고 이들 가스구름에 포함된 성간먼지(dust grain)에 의하여 성간 자외선이 차단될 수 있다는 사실이 인식되면서, 성간분자에 대한 연구는 급격한 발전을 하게 된다. 이후로 성간화학에 대한 중요성이 인식되고, 성간분자들이 천체의 물리적 특성을 연구하는 중요한 추적자로서의 커다란 역할을 한다는 점과 함께, 그들과 연관된 천체화학 반응 자체에 대한 물리화학적 특성과 화학적 실험연구도 매우 흥미로운 주제로서 본격적으로 발전하게 되었다.

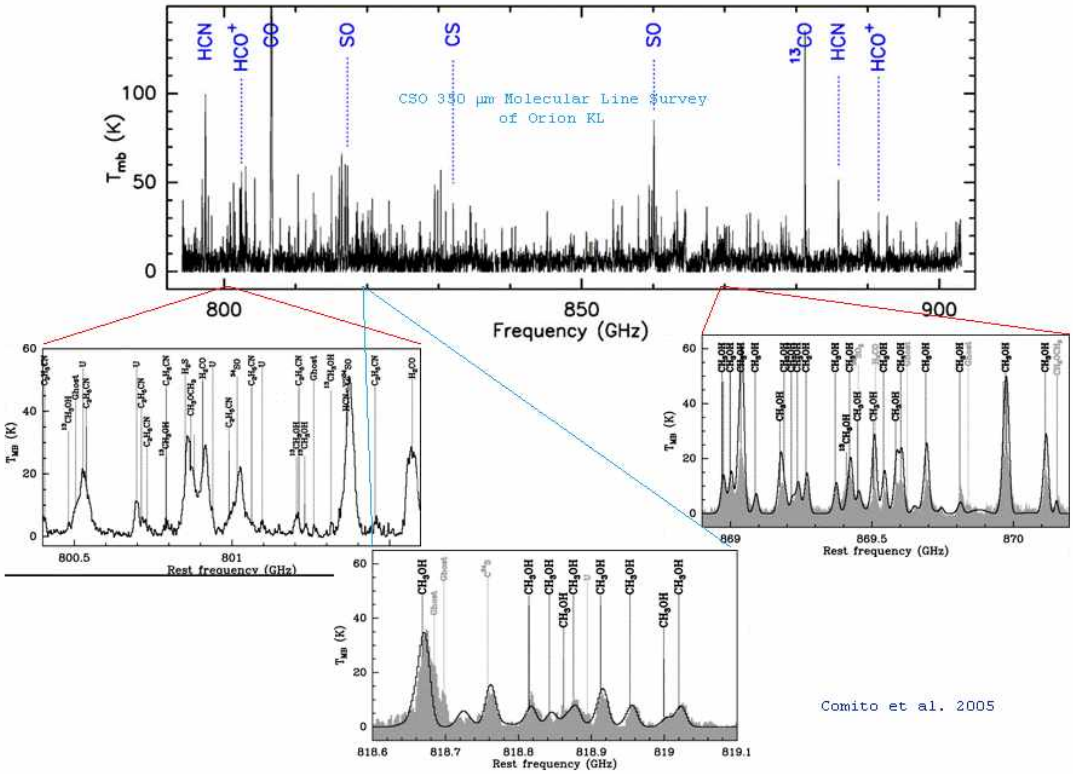

그림 1. 하와이 마우나케아에 위치한 CSO(Caltech Submillimeter Observatory)의 10.4 m 전파망원경으로 관측된 오리온-KL 지역의 스펙트럼 서베이 결과. 관측 주파수는 850 GHz로 여러 관측을 조합하여 하나의 스펙트럼으로 보인 것임. 아래의 세 스펙트럼들은 각각의 지역을 확대한 모습(Comito et al., 2005).

최근 들어 강력한 관측도구들이 지상 및 우주에 설치되거나 건설이 계획되면서, 높은 공간분해능과 아주 민감한 스펙트럼분해능 관측이 가능해 지게 되었다. 이러한 관측수단을 통하여 획득되는 방대한 양의 천체화학적 정보는 우주에 대한 전혀 새로운 이해를 가져올 것으로 예상되고 있다. 특히 원-적외선과 서브-밀리미터파 영역은 천체에 대한 관측대상으로서 마지막 남은 미개척지라고 여겨지고 있는데, 이 영역은 성간분자선이 매우 밀집되어 있는 영역이기도 하다. 그림 1은 별 탄생 지역인 오리온 KL 천체에 대하여, 처음으로 이루어진 원-적외선 350 mm 대역에서의 스펙트럼 서베이 관측 결과이다. 얼마나 많은 분자선들이 밀집되어 있는지를 보여주는 예로 이것은 또한 방대한 양의 새로운 정보가 이들 성간분자선으로부터 얻어질 수 있다는 것을 의미한다.

특히 고성능의 전파어레이를 이용한 밀리미터파 영역에서 높은 공간 분해능의 관측이 이루어지기 시작하였고, 더구나 ALMA(Atacama Large Millimeter Array)와 같은 초대형 국제적 프로젝트가 완성되어가고 있다는 점에서 성간분자에 대한 천체화학적 이해의 중요성은 더욱 커지고 있다. 그림 2는 현재 운용되고 있는 강력한 밀리미터 어레이의 하나인 SMA(Submillimeter Array, Hawaii)로 관측한 별 탄생 지역의 관측 결과로 0.3″ 의 공간분해능 관측과 넓은 주파수 획득 범위가 얼마나 다양한 정보를 제공하여 주는가를 보여주는 예이다.

그리고 인공위성을 이용한 높은 민감도의 적외선 관측은, 성간먼지와 이와 연관된 현상들에 대한 새로운 이해를 가져왔다. 특히, 성간먼지들의 얼음맨틀에 존재하는 고체상태의 분자결정들이 매우 많은 양으로 다양한 천체에 존재한다는 사실을 밝혀졌다. 그림 3은 스피처(Spitzer) 적외선 인공위성으로 관측된 별 탄생 지역의 적외선 흡수선 스펙트럼들로 다양한 얼음 결정체의 성간분자들이 존재하고 있음을 보여준다. 최근에 발사된

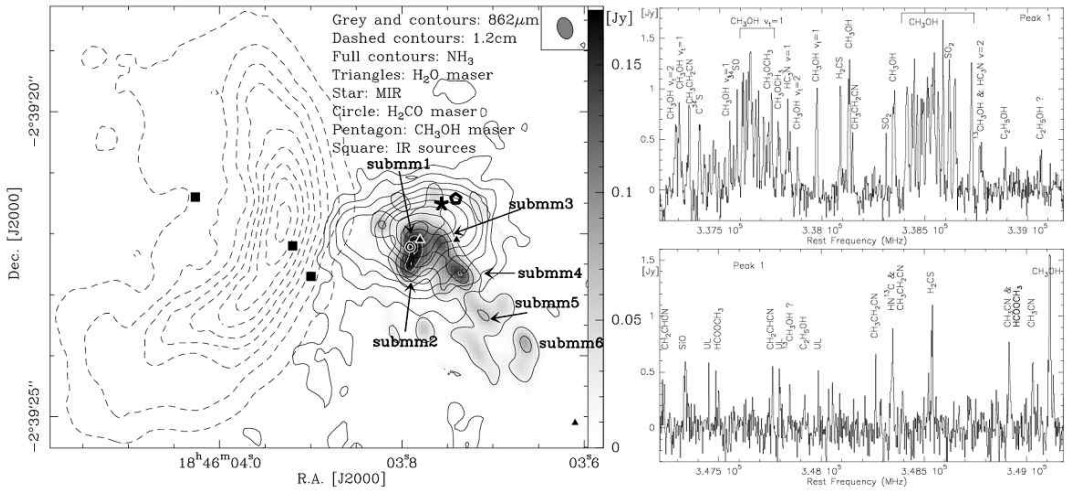

그림 2. 별이 탄생하는 천체 G29.96에 대한 전파 어레이(SMA) 340 GHz 관측결과로 오른쪽 위와 아래는 각각 2 GHz 대역의 관측 밴드(LSB, USB)에서의 스펙트럼으로 공간분해능이 약 0.3″인 관측 결과이다(Beuther et al., 2007).

(2009년) 강력한 새로운 적외선 인공위성인 허셸(Herschel)은 이제 과학적 관측을 시작하고 있다. 이 허셸에서 수행될 것으로 계획된 연구과제들을 보면 천체화학에 대한 연구가 매우 중요한 부분을 차지하며 이들의 연구주제들로는 산소(O), H_2O, 별 탄생 등과 관련된 성간분자의 특성을 연구하는 프로젝트들이다. 이와 같이 적외선 분야에서도 새로운 위성 등을 이용한 보다 높은 민감도의 천체화학적 연구가 매우 중요한 주제로 추진되고 있다.

천체화학적 이해가 중요한 대형 천체관측 프로젝트들에는, 우리나라가 주도하는, 혹은 국제협력으로 추진중인 프로젝트들도 포함되어있다. 이제 막 건설이 끝난 국내의 대형 전파관측 장비인 KVN(Korean VLBI Network)은 주로 H_2O, SiO, CH_3OH 등의 메이저가 주요 연구대상으로 별 탄생지역 혹은 만기형별과 밀접하게 연관된 연구가 수행될 예정이다. 이러한 연구는 관련된 밀리미터 어레이 관측연구 혹은 적외선 관측 연구와 밀접하게 연관되어 있으며, 메이저 관측의 해석에는 천체화학적 이해가 매우 중요하다. 그리고 이제 우리나라의 참여가 결정되어 대형 투자가 진행되기 시작한 GMT (Giant Magellan Telescope)의 경우도 적외선 영역이 주요 관측대상으로 방대한 집광능력과 고분해능 관측연구에는 천체화학적 연구가 매우 중요한 연구 주제가 될 것이다.

적외선이나 밀리미터파 영역에서 뿐만 아니라 엑스선에서 전파에 이르기까지 전 파장영역에서 관측되는 성간분자선은, 우주론에서부터 별 탄생 및 진화의 전 과정에서 매우 중요한 물리/화학적 특성의 연구 도구로 이용되어 왔다. 특히 화학적 특성들은 물리적 특성과 밀접하게 연관되어 있는 것으로 물리/화학적 현상을 함께 이해하여야만 그 천체를 보다 잘 이해할 수 있다. 그리고 최근에 이르러, 높은 분해능, 높은 민감도, 그리고 관측이 어려웠던 주파수 영역에서의 새로운 관측 결과들은 우주에 대한 전혀 새로운 이해를 가져오고 있다. 그러나 이들이 전하여 주는 많은 정보들이 원자, 분자들의 천이선들로, 이들의 형성, 여기, 이온화, 그리고 파괴에 대한, 기본적인 천체화학적 이해 없이는, 이 정보들을 충분히 활용할 수 없다.

천체화학과 관련하여서는 많은 리뷰논문들이 있고 또한 여러 학술대회에서 발간한 프로시딩들이 많으며 쉽게 찾을 수 있으므로 관련된 관심분야에 대하여는 이들을 참조하길 권한다. 그러나 많은 경우에 기술적으로 너무 상세하거나 분야에 따른 편향된 부분들이 있기도 하다. 여기서의 리뷰는 분야나 내용면에서 매우 제한적이지만, 천체화학이라는 분야에 대하여 비교적 익숙하지 않거나 이제 천문학 연구를 시작하는 연구자들이 전체적으로 이 분야를 조망해 볼 수 있도록 간단히 요약해 본다. 그리고 현재 세계적으로 추진 중에 있는 프로젝트들과 관련한 천체화학의 주요 연구분야들도 간단히 소개한다.

2. 우주에서 확인된 성간분자들

현재까지 알려진 성간분자들은 모두 140종 이상으로, 최저 분자단위인 2-원자 분자부터 최대 13개의 원자로 이루어진 분자에 이르기까지 다양하며, 종류도 중성분자, 이온, 기 등 여러 분자가 확인되고 있다. 이들의 특

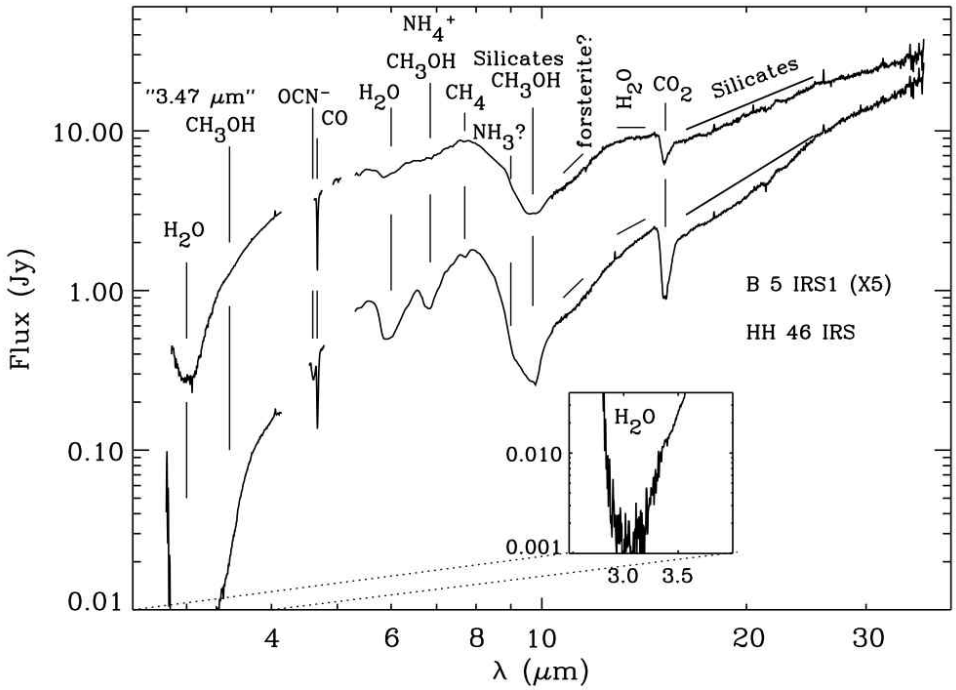

그림 3. 스피쳐(Spitzer) 적외선 인공위성관측과 지상에서의 L- 그리고 M-밴드 관측 결과를 합성한 스펙트럼. 위의 그림은 B 5 IRS1 천체를 관측한 스펙트럼으로 5배로 확대한 그림이며, 아래쪽은 HH 46 IRS 천체에서 관측된 얼음먼지 흡수선의 모습 (Boogert et al., 2004).

징은, 첫 번째로, 이들 중 많은 수가 탄소를 포함하는 유기분자들이라는 것이며, 이것은 지구에서와도 같다. 그리고 또 지구에서와 같이 암모니아(NH_3)를 제외하고는 3개 이상의 원자로 이루어진 무기분자들은 관측되지 않는다는 것이다(예, Turner & Ziurys, 1988). 우주에서도 탄소결합이 복합분자를 형성하는 가장 중요한 요인이다. 두 번째 특징으로는, 상당한 수의 확인된 성간분자들이, 자유 기(free radical) 혹은 분자 이온과 같이, 매우 불안정한 상태의 전이(transient) 분자들이라는 것이다. 이들 중의 일부는 지구상에도 존재하지만, 실험실에서의 생성이 매우 어려워 아직도 많은 연구가 진행되고 있는 분자들이다.

탄소를 포함하는 복합 유기분자들과 함께 물(H_2O)과 암모니아(NH_3)의 존재는 아미노산과 같은 단백질 초기 단계의 분자들에 대한 존재도 가능할 것으로 생각되고 있다. 운석에서 발견되는 많은 아미노산의 존재는(예, 현재 70여 종 이상의 아미노산이 발견된 머치슨(Murchison) 운석) 이들이 지구에 떨어지기 전에 모체에서 겪은 화학적 변화의 과정(예, "aqueous alteration", Rubin et al., 2007)이 생명탄생을 유발시킬 수 있는 매우 중요한 과정일 수도 있다는 추론이 가능하다. 그러나 일부 글리신(glycin)과 같은 성간분자의 확인이 주장되었지만(Kuan et al., 2003), 성간에서 아직 아미노산이나 바로 그 전단계의 분자가 확실히 확인된 것은 아니다. 아직도 관측된 스펙트럼에서 확인되지 않은 많은 미확인선들(U-lines)이 존재하고 있다. 아마도 대부분의 미확인 선들은 매우 무거운 복합분자들로 부터의 천이선이나 혹은 높은 에너지에서 일어나는 천이선들로 예상되지만, 여전히 아직 밝혀지지 않은 새로운 성간분자의 존재 가능성도 충분히 있다.

성간에서 분자선의 확인은 그 분자에서 방출하는 것으로 여겨지는 여러 천이선들을 확인하여 이루어진다. 성간분자들의 발견이 주로 밀리미터파 전파영역에서 이루어진 것은 많은 분자들이 존재하는 성간의 밀도와 온도가 분자들의 회전 천이선(rotational transition)을 여기시키기에 적절하기 때문이다(E/k ~ 0.1 - 1000 K). 대략적으로 볼 때, 분자들의 진동 천이선들(vibrational transitions)은 주로 적외선 영역에서, 그리고 전자 천이선들(electronic transitions)은 가시광선이나 자외선 영역에 존재한다. 이 천이선들은 물리적 특성의 추적자로서 널리 활용되어 왔다. 에너지 레벨들이 단순한 2-원자분자들이나 선형 분자들은 밀도의 추적자로 사용되어 왔는데(예, CS, HCN, HC_3N 등), 그것은 이 분자들의 전자분포가 이들을 여기시키는 수소분자들과의 충돌에 비

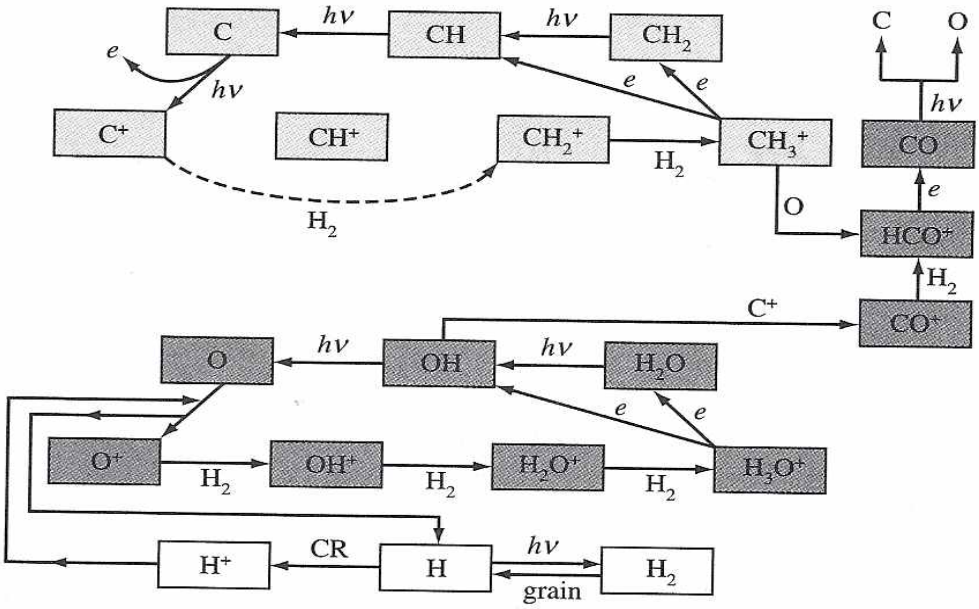

그림 4. 확산 성운(diffuse gas cloud)에서 CO 분자의 생성 루트(Kwok, 2007).

례할 것이라고 예상되기 때문이다. 그리고 대칭형 분자들(symmetric tops: NH_3, CH_3CN, 등)은 그들의 서로 다른 K-레벨(분자의 서로 다른 회전축에 대한 모멘탐의 차이로 인하여)에서 여러 천이선들이 일어나기 때문에 (서로 많은 에너지 차이가 있으나, 관측되는 주파수는 비슷하여 함께 관측됨) 비교적 정확한 여기온도의 측정이 가능하여, 온도의 측정자로서 활용되어 왔다. 상대적으로 많은 양이 존재하여 널리 사용되어 온 CO 분자의 경우는 매우 작은 전기쌍극모멘트(electric dipole moment)를 가짐으로 해서(0.11 Debye), 이 분자로부터의 천이선 대부분이 높은 광학적 깊이를 가지기 때문에 때로는 온도의 추적자로 또 크게는 대규모 밀도의 추적자로 활용되어 왔으나, 한편으로는 매우 불확실성이 높다고 하겠다.

성간에서 분자들의 존재나 이들의 역할은 물리적 특성의 추적자로서의 역할을 넘어, 매우 능동적으로 물리적 특성을 결정하는 역할은 한다. 그것은, 예를 들어, 충격파나 광-지배적 지역이나 높은 온도의 가스 지역 등, 천체의 활동적인 물리적 현상은 그 내부의 화학적 현상과 밀접하게 연관되어 함께 영향을 미치는 것으로 나타나기 때문이다. 그래서 어느 특정 분자를 대상으로 연구한다면 이 분자와 연관된 화학적 반응을 이해하여야만 보다 전체적인 천체 현상을 이해할 수 있다.

3. 기본적인 화학반응식

성간물질의 낮은 온도와 밀도에서의 분자 생성은 지구 대기에서와 같은 방식으로 일어나지 않는다. 분자 이온과 관련되어 2체 충돌(two-body collision)로 연속되어 일어나는 일련의 화학 반응이 중요하다. 그 예로 그림 4는 성간에서 수소분자 다음으로 가장 많이 존재하는 분자인 일산화탄소(CO)가 밀도가 낮은 확산성운(diffuse gas cloud)에서 어떻게 생성되는가의 과정을 도표로 보여주는 그림이며 매우 복잡한 네트워크를 형성하여 형성된다는 것을 알 수 있다. 가스 상태에서의 반응은 대부분 이와 같은 복잡한 반응과정을 거친다. 그 외에도 충격파가 발생하는 지역이나, 아직도 잘 이해되고 있지 않은 성간먼지 표면에서의 화학반응 등도 중요한 성간분자 생성과정으로 생각되고 있다.

어떠한 과정을 거쳐서, 우리에게 관측되는 분자들이 생성되는 지를 추정하는 것은, 성간분자들이 발견되는 지역의 물리적 조건을 이해하는 중요한 단서이다. 우주에서 발견되는 성간분자들을 형성 파괴하는 기본적인 반응은 크게 두 가지의 환경 속에서 일어난다. 그것은 가스 상태의 화학반응과 먼지 표면에서 일어나는 화학반응으로 나누어 생각할 수 있다. 이들에 대하여 각각 어떠한 화학적 반응들이 예상되는지 간단히 알아본다.

3.1. 가스 상태의 화학반응

가스 상태에서의 화학반응은 그 환경의 차이에 따라 크게 네 종류로 나누어 생각할 수 있다: 비교적 온도가 낮고 밀도가 높은 성간분자운의 경우, 밀도가 낮고 광자가 지배적인 역할을 하는 퍼져있는 가스 지역 혹은

광분해지역에서의 화학반응, 충격파의 영향을 받은 지역에서의 반응, 그리고 만기형 별들(late-type giants)에서 일어나는 질량손실에 의하여 형성된 지역의 고온/고밀도 가스-쉘(gas shell, envelope)의 화학적 평형상태에서의 화학적 반응들이 있다.

3.1.1. 조용한 분자성운에서의 화학반응

온도가 낮고(10 - 100 K), 평균 밀도가 대략 10^2 - 10^3 cm^{-3}인 성간분자운의 경우에 가장 대표적인 가스 상태의 화학 반응식은 이온-분자 간의 반응이다. 비교적 조용한 분자운의 경우 포함된 분자들의 함량은 거의 이 반응들에 의하여 설명될 수 있다고 생각되고 있다. 이 반응이 중요한 것은 이온과 분자 간의 반응은 이온이라는 특성 때문에 반응 시에 에너지 장벽이 없어, 추가의 에너지 입력 없이도 그 반응이 쉽게 진행되며(전형적인 반응률은 $1-3\times10^{-9}\,\mathrm{cm^3\,s^{-1}}$: Langevin rate) 거의 모든 충돌은 새로운 분자형성으로 이어진다. 다양한 반응식이 존재하는데, 대표적인 이온-분자 반응식은 다음과 같다 (Prasad et al., 1987).

$$CO + H_3^+ \rightarrow HCO^+ + H_2, \text{ 혹은}$$
$$N_2 + H_3^+ \rightarrow N_2H^+ + H_2, \text{ 등.}$$

이온-분자 반응 과정에는, 양자 혹은 전자를 교환하는 반응이나, 수소원자의 첨가 혹은 제거 등의 여러 복잡한 네트워크가 구성되는데, 이러한 과정을 통하여 대부분의 성간분자가 생성되는 것으로 생각된다. 이렇게 생성된 이온이나 분자들의 파괴는 전자와의 결합(dissociative recombination), 원자 이온과의 반응, 혹은 다른 분자와 반응에 의하여 파괴된다. 이러한 이온-분자 반응에는 H_3^+, O^+, C^+ 등의 이온이 중요한 역할을 하는데(그 후에는 복잡해진 분자이온들), 그 중에서도 특히 H_3^+는 매우 반응이 잘 일어나는(reactive) 이온으로 이온-분자 반응에서 가장 중요한 분자로 생각되고 있다. 이 분자는 수소분자(H_2)가 우주선(cosmic ray)에 의하여 이온화되고(H_2^+) 다시 다른 수소분자와 결합하여 ($H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H$) 생성된다. 우주선은 다른 원자들의 이온화에도 중요한 역할을 한다(Duley & Williams, 1984). 우주선의 밀도는 관측되는 이온의 양으로부터 그 정도를 측정하기도 하지만, 우주선에 의한 분자의 이온화율은 우리 은하계 전체 지역에서 대략 일정하게 약 $10^{-17}\,\mathrm{s^{-1}}$(per molecule)으로 추정한다(Kulkarni & Heiles, 1987). 우주선은 성간에서 광학적 깊이가 매우 작기 때문에 매우 높은 밀도의 별 탄생 코어에서도 우주선에 의한 이온화율이 대략 일정하다. 그래서 성간의 거의 모든 지역에서 우주선은 화학반응에 중요한 역할을 하고 있다고 여겨진다.

가스 상태에서 일어나는 화학반응에는, 이온-분자 반응 외에도, 여러 형태의 반응들이 있다. 예를 들면 분자나 원자가 서로 결합하면서 광자를 방출하는 반응(radiative association reaction), 위에서 언급한, 전자와 결합하면서 분해되는 반응(dissociative recombination reaction)들이 있으며, 이러한 반응을 통해서, 예를 들면, 암흑성운에서 발견되는 수많은 성간분자들이 생성되는 것으로 생각된다.

3.1.2. 광분해지역에서의 화학반응

희박하게 퍼져있는 가스성운(즉, 확산성운) 지역에서는, 다음 장에서 요약할 충격파의 영향도 많이 받지만, 낮은 밀도($n \leq 10^2\,\mathrm{cm^{-3}}$)로 인하여, 성간에 존재하는 높은 에너지의 광자 영향을 많이 받게 된다. 이러한 광자의 역할이 중요한 곳은 광분해지역(photodestruction region)이다. 광분해지역의 약자는 PDR인데 이 약자는 "photon-dominated region(광-지배 지역)"으로 쓰이기도 한다. PDR들은 HII 영역 근처나 반사성운, 혹은 행성상성운 등 UV 광자가 많은 지역이다.

광분해는 성간분자가 광자를 흡수하여 분해되는 반응이다. 원자와는 달리 분자인 경우 전자를 바로 이온화 시키는 광-흡수 충돌(photo-absorption cross section)은 매우 작아서 이러한 과정으로 분자가 분해되는 율은 매우 낮다. 그러나 광-흡수에 의하여 전자가 여기되었다 기저상태로 돌아오거나 혹은 다른 에너지 상태(repulsive state)로 전이되면서 분해되는 것이 일반적이다. 대부분의 성간분자들이 성간의 광자들을 만나면 분해되어 존재하지 못하리라고 생각된다. 그렇지만 성간에서 그렇게 많은 분자들이 발견되는 것은 성간먼지에 의하여 자외선 광자들이 흡수 혹은 산란되어 차단되기 때문이다. 분자들을 광분해 시키는 파장 영역은 대략 1000 - 2000 Å 으로, 이 영역의 자외선 소광정도는, 가시광선 영역의 소광이 1등급이 증가하면, 거의 90%의 자외선 광자가 차단된다(Turner & Ziurys, 1988; Kwok, 2007).

광분해지역의 대표적인 화학반응은 외부에서 많은 에너지가 입력되어야 진행되는 다음과 같은 반응들(endothermic reactions)로 기와 같은 비교적 단순한 분자들이 중요한 역할을 한다.

$$O + H_2 \rightarrow H_2O + H,$$
$$C^+ + H_2 \rightarrow CH^+ + H, \text{ 등}$$

그 외에도 다양한 화학반응들이 진행되는데, 많은 연구가 진행되어온 대표적인 PDR 지역은 오리온 바

(Orion bar), M17SW, S140, NGC7023 등이 있다. 특히 최근 들어 높은 민감도와 고분해능 관측은 광자들과 주변 성간물질과의 상호 작용 및 역학적 구조에 이르기까지 다양한 연구가 이루어지리라고 예상하게 한다. 그러나 이러한 지역의 이해에 필수적인 화학적 특성의 이해는 아직도 매우 부족한 상태로 앞으로의 발전이 기대되는 연구분야이다.

3.1.3. 충격파의 영향을 받은 지역의 화학반응

일반적인 성간의 음속은 약 1 km s^{-1} 정도이므로, 이 속도를 훨씬 넘는 천체들의 활동이 흔한 우주에서는 충격파는 매우 쉽게 일어난다. 이러한 충격파가 중요한 역할을 하는 지역은, 확산성운 지역에서는 물론, 다음과 같은 활동, 가스 분출, 질량 손실, HII 영역의 팽창, 초신성 폭발, 성운-성운 충돌, 등이 일어나는 지역들, 크게 말하면 거의 모든 천체의 현상이 일어나는 지역이다.

충격파가 발생하면 압축현상에 의하여 밀도 온도 등이 급격히 증가한다. 주로 충격파의 속도나 자장 등의 영향에 의한 충격파의 물리적 특성은 많이 연구되어 왔다. 이러한 지역에서는 조용한 가스성운에서는 예상할 수 없었던 화학반응들이 일어난다. 이들은 충격파의 영향아래 있는 지역의 진화를 결정지으며, 이들 화학반응의 결과는 이 지역을 이해하는데 매우 중요한 단서를 제공한다. 충격파가 충분히 크다면 가스의 구성원들이 이온화도 될 수 있지만, 이온화까지는 되지 않더라도, 분자들이 파괴되는가 아닌가가 화학적 진화에 중요한 변수이다. 대략 충격파의 속도가 30 km s^{-1} 이상이면 분자들이 분해되는 충격파(dissociative shock)라고 생각된다. 그러나 어떠한 경우든 충격파에 의하여 증가된 밀도와 온도에서는, 그 반응에 필요한 활성에너지나 흡열(endothermic) 에너지의 필요로 인하여 진행이 되지 않던 반응들이 진행된다는 것이다. 이러한 대표적인 반응은 성간에서 중요한 역할을 하는 다음과 같은, OH, H_2O 분자의 생성 반응이다(Turner & Ziurys, 1988; Duley & Williams, 1984).

$$O + H_2 \rightarrow OH + H,\ OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$$

이들은 온도가 1,000 K 이상이 되어야 진행되는 반응이다. 이러한 반응에 의하여 충격파 직후에 이들의 함량이 급격히 증가하게 되며, 그것이 별 탄생 지역의 분자가스흐름이 발생하는 곳에서 많은 OH, 혹은 H_2O 메이저들이 관측되는 이유이다.

그러나 이러한 반응들에 의하여 생성된 분자들은 방출선을 형성하기 때문에 가스를 빠르게 냉각시킨다. 대부분의 천체에서 원자 혹은 분자들이 방출하는 선들은 중요한 냉각제로서 에너지 균형에 중요한 역할을 한다. 따라서 분자들의 형성 효율이 그 천체의 진화에 중요한 역할을 하는 것이다. 이러한 충격파 이후의 냉각과정은 매우 빠르게 진행되어 그 시간(relaxation timescale)은 수백 년 정도의 크기를 갖는 것으로 생각된다. 이것이 직접 충격파의 영향아래 있는 지역을 연구하는 것이 어려운 이유의 하나이다. 그러나 이렇게 생성된 분자들은 충격파 이후에도 상당기간 살아남아 충격파-후(post-shock) 가스를 연구하는 중요한 도구가 된다.

또 다른 중요한 충격파 추적자의 하나는 다음과 같은 반응으로 생성되는 SiO이다. 충격파 지역의 추적자로 널리 사용되는 SiO의 경우는, 충격파에 의한 성간먼지의 파괴가 규소(Si)의 생성을 만들고 OH와의 결합에 의하여 생성된다(Turner & Ziurys, 1988).

$$Si + OH \rightarrow SiO + H$$

이들의 반응식은 대부분 에너지가 입력되어야 반응이 진행되므로 충격파의 영향 아래에 있는 지역에서만 그 생성이 이루어진다. 그러나 이러한 분자들의 생성과 파괴는 충격파의 물리적 특성에도 영향을 받는다. 파괴적인 충격파(dissociative shock: $v_{shock} \geq 30$ km s^{-1}, Jump-shock)의 경우는 분자들이 충격파에 의해 파괴된 후에 다시 재결합하는 과정을 거치며, 연속적인 충격파의 경우는 주요 분자들의 파괴 없이 화학적 반응이 진행된다. 이러한 충격파에서 일어나는 화학반응들의 가장 큰 특징은, 많은 경우가 흡열(endothermic) 반응인 중성-중성 반응이 쉽게 일어난다는 것이다.

맨 처음 발견된 성간분자의 하나인 CH^+의 경우, 그 생성과정에 대하여 많은 논란이 있어왔는데, 확산성운에서 이 분자나, 그 외에 CH, OH 등의 생성은 충격파 화학으로 이해되고 있다(Duley & Williams, 1984). 아직도 충격파 화학에 대하여 많은 화학적 반응에 대한 이해가 요구되고 있지만, 우주에서 충격파에 대한 이해가 필수적이라는 점에서 충격파 천체화학에 대한 연구가 앞으로 더 많이 발전될 것으로 예측된다.

3.1.4. 만기형성 별 대기에서의 화학반응

오래 전부터, 만기형 별의 질량손실에 의하여 형성되는 외곽 가스구름(circumstellar envelope)은 화학적으로 평형 상태에 있을 것으로 예측되어 왔다(McCabe et al., 1979; Scalo & Slavsky, 1980). 이들 별 주위의 가스구름은, 별 가까운 쪽으로부터 먼 지역사이에 물리적 조건의 차이가 크다(가까운 쪽: T ~ 1,000 K, $n(H_2) \sim 10^8$ - 10^{11} cm^{-3}; 먼 쪽: T ~ 10 K, $n(H_2) \sim 10^3$ cm^{-3}). 별 가까운 쪽의 고온/고밀도 지역에서는, 특히, 별의 광구에서는 밀도가 10^{15} cm^{-3}에 이르는 지역에서는, 활성에너지

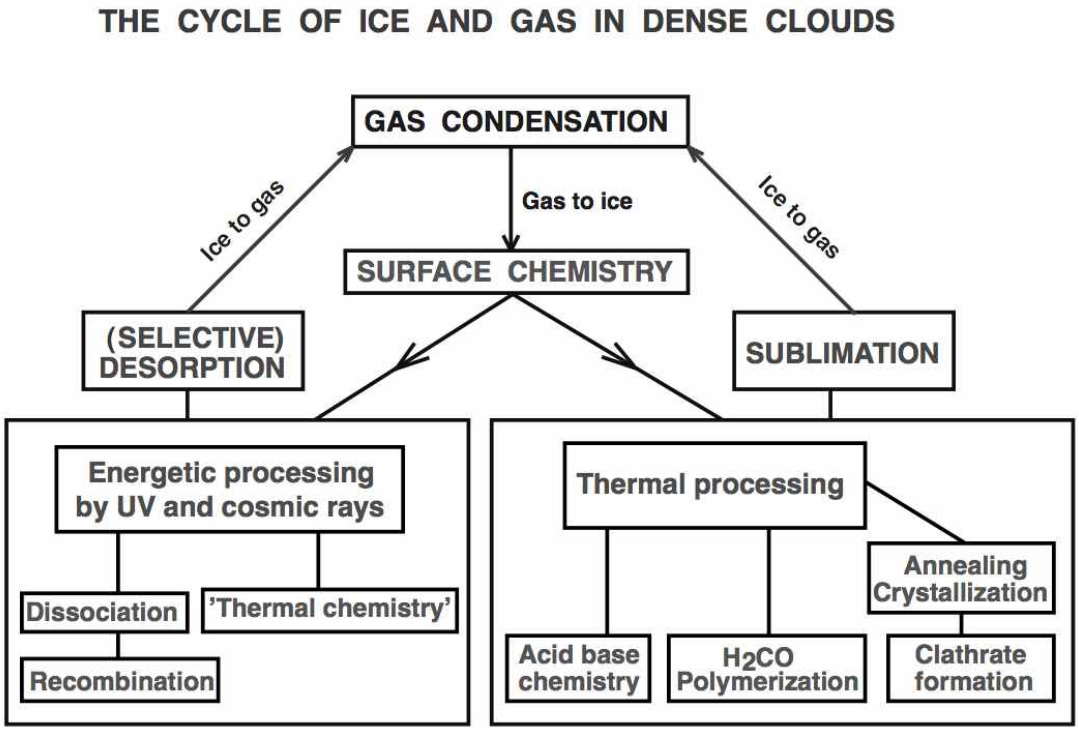

그림 5. 성간가스구름에서 먼지의 얼음맨틀과 가스 상태의 상호 순환 및 진화과정(Eherenfreund & Charnley, 2000).

가 필요한 반응이나 흡열반응이 쉽게 일어남은 물론, 일반 성간과는 달리 3체 반응도 일어난다. 이러한 상황은 화학적으로 평형상태를 이루게 되는데, 빠른 팽창으로 인하여 이러한 상태에서 형성된 화학적 특성들이, 적어도 10^{10} cm^{-3} 정도의 밀도에 이르는 지역까지는 유지된다(freeze-out). 이러한 화학적 평형상태에서는 이온이나 기 보다는 안정적인 분자들이 형성되며, 여러 무거운 철(metal)을 포함하는 분자들도 형성된다. 이러한 지역에서 방출되는 스펙트럼선들은 주로 회전-진동 천이선들로 적외선에 위치한다. 그러나 일반 성간과 비슷한 성질을 지닌, 별에서 멀리 떨어진 곳에서는 성간의 UV 광자가 광분해의 중요한 역할을 하며 위에서 설명한 광분해 지역의 화학적 특징을 보인다(Turner & Ziurys, 1988).

보다 자세한 화학적 특성의 차이는 크게 탄소/산소 함량비에 따르며, 이 외곽 가스구름이 산소가 풍부한지(O-rich; C/O < 1) 아니면 탄소가 풍부한지(C-rich; C/O > 1)로 나누어 진다. 탄소가 풍부한 경우에 가장 많은 연구가 진행된 천체는 IRC + 10216(CW Leo)로, 예, Cerncharo et al. (2000), 이 가스구름에 있는 산소(O)의 대부분은 CO에 결합되게 되며, 이러한 별 외곽 가스구름의 특징적인 분자들은 CO, C_2H_2, HCN, CH_4 등이며, 탄소를 포함하는 먼지 결정체(SiC, TiC, graphite grains)가 주로 생성된다. 반면에 산소가 풍부한 경우의 대표적인 천체는 OH231.8 + 4.2(Rotten Egg, 예, Bujarrabal et al., 2002)로 여기서는 풍부한 산소로 인하여 탄소는 대부분 CO로 결합되고, 남는 산소들이 OH, H_2O, SiO 등을 형성하며, 먼지의 결정은 주로 규소 결정체(dusty silicate)가 생성된다. SiO 메이저선들이 많이 관측되는 만기형 별들도 이 산소가 풍부한 경우의 별들이다. 이 천체들은 별 진화의 마지막 단계에 대한 이해와 함께 성간먼지가 형성되는 곳이기 때문에, 앞으로 높은 민감도와 높은 분해능의 이미징 관측으로부터 많은 새로운 결과들이 예상되고 있다.

3.2. 먼지 표면의 화학반응

가스 상태에서의 반응만으로는 성간에서 관측되는 분자들을 충분히 설명할 수 없고, 성간먼지와 관련된 화학반응도 중요한 역할을 하고 있다는 것이 알려져 왔다. 특히 성간에 가장 많고 제일 중요한 분자인 수소분자(H_2)는, 가스 상태에서 두 개의 수소원자가 만나서는 생성되기가 매우 어려워, 그 매개체로 성간먼지 표면이 필요하다는 것이 연구되어 왔다. 그리고 별 탄생 지역에서 관측되는 매우 무거운 분자들이나 포화된 분자들의 경우, 가스 상태에서의 생성과정으로는 설명할 수가

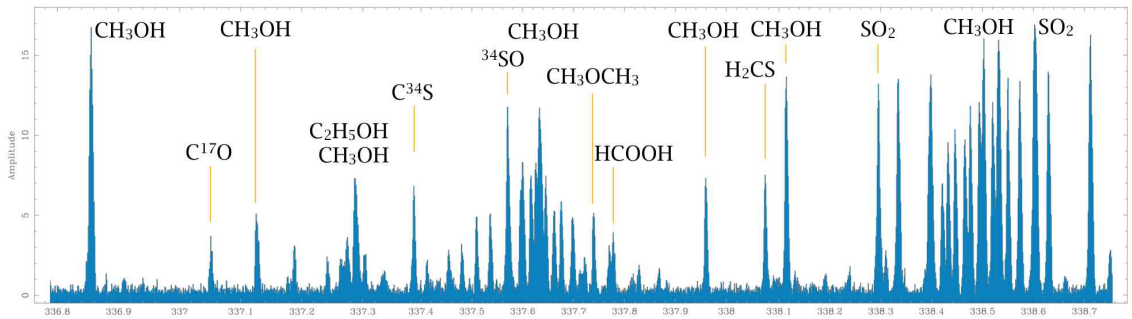

그림 6. SMA(Submillimeter Array, Hawaii)로 관측된 W75N 별 탄생지역의 관측결과. 관측된 주파수 영역은 337.8 GHz를 중심으로 약 2 GHz 밴드(LSB)이다(Minh et al., in preparation).

없다. 그 외에도 성간에서 매우 고갈된(depleted) 원자/분자들이 새로 탄생된 별 근처에서 그 양이 증가되는 것이 관측되는데 이것은 먼지에 붙어 있다가 가스 상태로 다시 증발한 것이라는 것을 이해하게 되었다. 이러한 이해는 직접적인 먼지 얼음 맨틀에 대한 적외선 흡수선의 관측(예, 그림 3)으로 더욱 명확하게 되었으며, 성간 먼지표면에서 반응이 천체화학의 중요한 부분으로 이해되고 있다.

3.2.1. 수소분자(H_2)의 생성

수소분자는 두 개의 동일한 원자의 결합으로 전기 쌍극모멘트를 갖지 않기 때문에, 가스 상태에서는 일시적으로 수소원자가 결합한다해도 그 결합에너지를 방출하지 못하기 때문에 결국 분자를 형성하지 못한다. 따라서 수소분자의 형성을 위하여는 그 매개체로 성간먼지 표면이 제시되었다(Kwok, 2007).

만일 수소원자가 성간 먼지 표면과 충돌한다면(온도가 100 K 이하인 경우) 거의 모두 달라붙는다고 생각되며, 먼지 표면에 붙어있는 시간이 매우 짧더라도(예, 0.01초 이하), 표면 반응이 진행되기에는 충분하다고 생각되고 있다(Wagenblast & Williams, 1993). 먼지 표면에 수소원자가 붙게 되면, 표면에서 위치에너지의 분포에 따라 움직이기도 하고, 다른 수소원자와 결합을 하며, 이때 방출되는 생성에너지로 인하여 먼지표면에서 형성된 수소분자는 가스 상태로 떨어져 나온다. 수소원자들이 성간먼지에 달라붙어 수소분자를 형성하는 확률을 계산해 보면, 현재 관측되는 수소분자의 양을 설명하기에 충분하다고 여겨진다. 물론 구체적으로 어떠한 반응이 일어나는지에 대하여는 아직도 많은 논란이 있지만, 수소분자의 형성이 주로 성간먼지표면에서 일어난다는 사실은 모두에게 인정되고 있다.

3.2.2. 얼음 먼지 맨틀에서의 화학반응

그림 3에서 보듯이 직접적인 적외선 흡수선의 관측은 고밀도 분자운의 성간먼지들이 얼음맨틀을 가지고 있고, 그곳에서 여러 복합 분자들이 존재하고 있음을 분명히 보여준다. 주변에서 새로 생성되는 별들에 의한 가열이 이들 얼음 맨틀을 증발하게 만들고(그림 5), 직접적인 증발이나 증발 직후의 반응에 의하여 관측되는 여러 복합분자/포화분자들이 관측되고 있다. 새로 탄생된 별 주변에서 얼음맨틀이 증발하고 있는 지역을 일반적으로 핫-코어라고 부르는데, 이것은 오리온 성운 KL 주변에 위치한 핫-코어에서 비롯되었다.

그러나 무거운 별이 탄생하는 지역의 특징적인 모습인 핫-코어에 대한 연구는 제약을 받아왔다. 그것은 무거운 별 탄생 지역이, 비교적 작은 질량의 별 탄생 지역에 비하여, 멀리 위치하고 있으며(최소한 1 - 2 kpc 밖에), 또한 무거운 별 탄생 지역 자체가 너무 복잡하여, 높은 공간분해능 관측이 아니면 내부를 식별하기 어렵기 때문이었다. 그러나 이러한 핫-코어 분자들은, 다른 추적자로서는(예, 먼지 연속파 방출) 알 수 없었던 다양한 별 탄생 현상을 알려주는 거의 유일한 도구의 역할을 한다. 그리고 이들로 부터의 천이선이 주로 원-적외선/서브-밀리미터파에 집중되어있어, 최근의 고감도, 고-분해능, 적외선/서브-밀리미터 관측이 가능하여지면서, 아주 흥미로운 연구대상으로 집중적인 연구가 시작되었다고 할 수 있다.

일단 성간먼지 표면에 달라붙은 원자나 분자들은 여러 형태의 화학반응이 가능할 것으로 예측된다. 관측된 결과를 보면, 얼음 맨틀을 형성하는 주요 성분이 H_2O, CH_3OH(1 - 30%), NH_3(수 - 30%), CO, CO_2, OCS, 등으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이들이 핫-코어 화학의 주요한 역할을 할 것이며 아마도 관측되는 여러 복합분자들(CH_3CN, $HCOOCH_3$, CH_3HC_2OH, 등)은 이들로

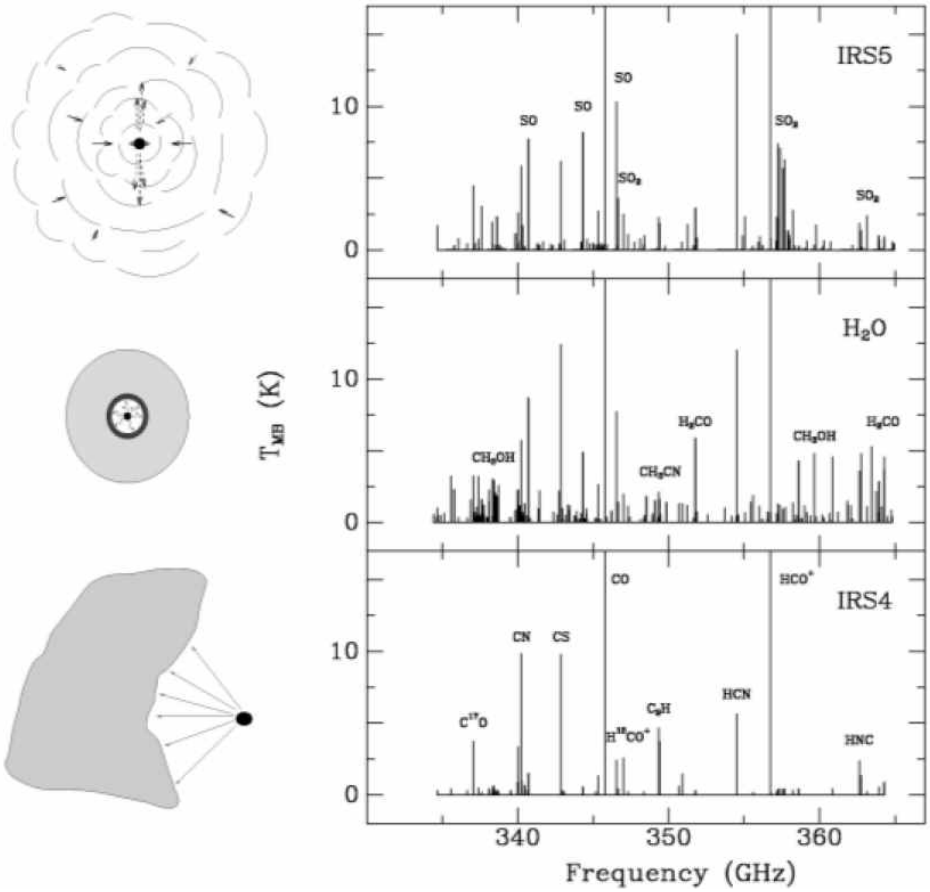

그림 7. W3에 위치한 IRS5, H_2O, IRS4에 대한 화학적 특성의 차이(Helmich & van Dishoeck, 1997).

부터 생성될 것으로 예상된다(Eherenfreund & Charnley, 2000; van Dishoeck, 2004). 증발한 뒤에 핫-코어의 화학을 주도하는 것은 크게는 메탄올(CH_3OH)과 암모니아(NH_3)가 각각 산소와 질소 관련 화학을 주도할 것으로 예상된다.

성간먼지와 관련된 화학적 반응은 끊임없이 성간가스와의 상호 관계를 이루면서 진화과정을 겪는다. 가스상태의 원자/분자들의 먼지표면에 달라붙음/화학반응/증발의 순환과정은 다음 그림과 같이 요약될 수 있다. 이들에 대한 화학적 모델도 시도되고 있으나(예, Rodgers & Charnley, 2002), 아직 물리적/화학적 진화가 함께 연구되는 모델은 매우 단순한 초기 시도가 이루어지는 정도이다.

4. 천체들에서의 성간분자 연구에 대한 몇 가지 예

4.1. 별 탄생 지역의 핫-코어에 대한 연구

고밀도의 분자구름인 핫-코어는 무거운 별 탄생 지역의 특징적인 천체로 여겨왔으나, 관측 장비의 발달과 함께 온도가 보다 낮은 작은 질량(대략 태양 정도)의 별 탄생지역에서도 관측되고 있다. 핫-코어는 증발하는 성간먼지의 얼음맨틀과 연관된 다양한 복합분자의 존재가 뚜렷한 특징으로, 이들은 별 탄생을 연구할 수 있는 거의 유일한 수단을 제공하고 있다. 다음 그림 6은 무거운 별이 탄생하고 있는 백조자리의 W75N 천체에 대한 SMA 관측 결과이다. 관측 시 한쪽 밴드(sideband)의 2 GHz 영역에서 관측된 스펙트럼으로 얼마나 다양한 스펙트럼선들이 관측되는지 알 수 있다. 특히 메탄올 분자선들이 대량으로 관측되었는데, 얼음 맨틀에 이들이 다량으로 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 메탄올의 형성은 아마도 얼음표면에서 UV-광자들에 의한 광합성이 중요한 역할을 하는 것으로 추정된다. 이러한 다양한 분자들은 그 분자의 화학적 특성에 따라 서로 다른 물리적 환경을 추적하므로 아주 중요한 이해의 수단을 제공하고 있다. 특히 높은 공간분해능 관측은 여지껏

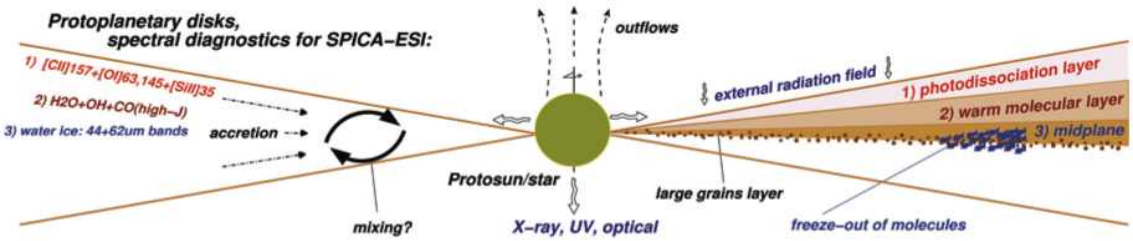

그림 8. 적외선 인공위성 SPICA의 과학적 목표 중에서 행성 형성과 관련된 원반에 대한 연구 중에서(Spica Mission Proposal, 2007).

이해하기 어려웠던, 별 탄생지역의 세부 구조의 이해를 가능하게 하여 준다. 다음 그림 7은 W3 별 탄생 지역의 세 천체, IRS5, H_2O, IRS4에 대한 화학적 특성을 비교하여 표시한 것이다. 별 탄생 지역의 복잡성으로 인하여 이러한 구별을 뚜렷이 하기가 쉽지 않지만 화학적 특성에 따른 물리적 환경의 차이를 잘 보여준다. 예를 들어, 황(S)을 포함하는 분자들의 경우 높은 온도 혹은 이온화된 지역과 연관된 가스구름에서 특징적으로 나타나며, 메탄올이나 복합분자들은 이제 막 별이 탄생한 지역의 핫-코어에서, 그리고 기나 보다 단순한 분자들은 PDR같은 지역에 특징적으로 나타나며, 이러한 차이를 W3에 위치한 세 천체의 진화의 차이에 따른 화학적 차이를 보여주는 그림이다.

이러한 연구는 우선 그 방출선들의 강한 세기와 다양함으로 인하여 어레이 등 높은 분해능 관측에 매우 적합하다. 특히 최근에 뛰어난 관측장비가 적외선/서브-밀리미터파 영역에서 활용되기 시작하면서 더욱 많은 연구가 이루어지고 있다. 이제 곧 가동될 것으로 생각되는 ALMA는 전세계가 주목하는 대형 글로벌 프로젝트이다. 그뿐 아니라, 현재 발사된 고감도의 적외선 위성(예, Hershel)이나 사용 중인 전파어레이들을 활용한 별 탄생 지역의 핫-코어들에 대한 연구는 별 탄생에 대한 아주 새로운 이해를 가져올 것으로 기대된다.

4.2. 행성 형성과 연관된 천체화학적 연구

무거운 별 탄생에 비하여 작은 질량(태양 정도의 질량)의 별 탄생은 이론이나 관측적으로 매우 잘 이해하고 있다고 생각되고 있다. 그러나 별 탄생 주변에서 형성되는 가스 원반에서 만들어지는 행성계에 대한 관측 및 모델 연구는 이제 시작 단계에 있으며, 이에대한 이해를 위하여는 천체화학적 관측 및 연구가 매우 중요한 역할을 할 것으로 생각되고 있다. 새로운 행성을 찾는 것은 이미 국제적인 프로젝트로 많이 진행 중에 있으며, 보다 높은 공간 분해능 관측과 민감도 등 관측적 제약을 넘어서기 위한 노력도 계속되고 있다. 다음 그림 8은 일본에서 계획 중인 적외선 인공위성 SPICA의 과학적 목표의 하나이다. 별 주위에 형성된 원반에서 어떻게 행성들이 형성되는 가에 대한 이해를 위하여 천체화학적 접근을 시도하고 있다.

행성이 형성되는 위치에서는 분자들이 얼음 결정으로 응집하면서 그 고체-밴드가 적외선 영역에서 관측될 수 있으며, 원반의 바깥쪽에서는 물리적 차이에 따른 여러 성간 분자들이 추적자로서의 정보를 제공하리라고 생각된다. 이러한 주제와 연관하여 현재 핫-토픽이라고 할 수 있는 것은, 외계행성의 확인, 원반 중심 면에서의 고체 덩어리들의 발견, 전이(transient) 원반의 존재 확인, 원반과 연관된 특정 가스(예, 표면의 PDR 가스) 발견 등이 있다고 생각된다.

4.3. AGB 별들의 외곽 가스 구름에 대한 연구

다음 그림 9는 탄소가 풍부한 별 외곽 가스구름인 IRC + 10216에 대한 파장 2 mm에서의 스펙트럼 서베이 결과이다. 약 30종류의 분자에서 300개 이상의 천이선이 관측되었으며(Cernicharo et al., 2000), 다양한 성간분자들이 관측되고 있다는 사실을 보여주기 위한 그림이다. 이러한 성간분자들은 그들의 고유한 화학적 특징으로 인하여 별에서의 거리에 따른 물리/화학적 변화를 보여주는 아주 좋은 추적자이다.

AGB(Asymtotic Giant Branch) 별들에서 관측되는 회전-진동 천이선들은 주로 적외선 영역에서 관측된다. 이들에 대한 높은 민감도와 높은 분해능의 적외선/서브-밀리미터파 관측은 별 진화의 마지막 단계에 해당되는 이들의 질량 손실과 행성상 성운으로 이어지는 진화 과정에 대한 새로운 이해를 높여 줄 것으로 기대된다. 특히 거의 새로운 연구가 기대되는 원-적외선/서브-밀리미터파 영역의 천이선 관측과 함께 이들에 대한 높은 정밀도의 이미징 관측은 이들의 화학적 특성뿐만 아니라 별 근처의 역학적 구조의 연구와, 질량 손실에 의한 충

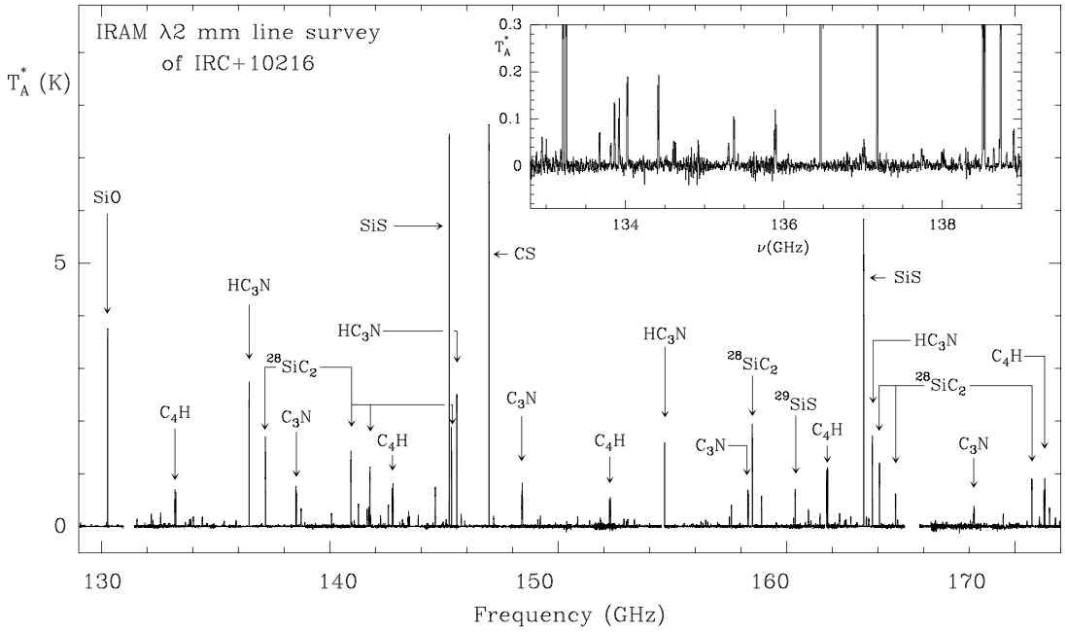

그림 9. AGB 별인 IRC+10216 천체에 대한 2 mm에서의 스펙트럼 서베이 결과(Cernicharo et al., 2000).

격파와 이들의 진화, 성간먼지 형성에 대한 연구 등 흥미로운 연구가 예상된다.

5. 결론

천체화학적 이해는 우주론에서부터 행성계 형성 연구에 이르기까지, 그리고 우리 은하계뿐만 아니라 외부 은하계 등 전 천체 연구에 걸쳐, 그 이해의 범위를 넓힐 수 있는 중요한 수단을 제공하며, 많은 경우에 이들이 유일한 연구 수단이기도 하다. 이 뿐만 아니라, 이들의 화학적 특성은 천체의 진화에 결정적인 역할을 하는 중요한 변수이다. 최근의 물리적 이론이나 컴퓨터의 모델 능력의 향상, 관측수단의 발전 등은 천체 시스템의 구성원인 원자와 분자들의 상호 작용에 대한 보다 정교한 이해를 필요로 하고 있다. 특히 이제 관측적으로 마지막 남은 미개척지라고 할 수 있는 원-적외선/서브-밀리미터파 영역에는 첨단의 국제적 대형 관측시설들이 가동되거나 계획되고 있으며, 이 영역에 집중되어 있는 수많은 성간 분자선들은, 때로는 유일한, 이해의 수단을 제공하고 있으나 이들이 전달하는 정보를 이해하기 위하여는 천체화학적 이해가 필수적이다. 막대한 인적 물적 투자가 이루어지는 최근의 글로벌 프로제트들을 충분히 활용하기 위하여는 지금껏 예상했던 것 보다는 훨씬 더 많은 천체화학적 노력이 필요할 것으로 추측된다. 이러한 노력은 우주에 대한 전혀 새로운 이해를 가져올 것으로 생각된다.

비록 이 리뷰는 여러 제한적인 요소로 충분하지 못한 점이 많지만, 그래도 이와 관련된 분야에서 조금이라도 천체화학의 전반적인 이해를 높이는 계기가 되기를 바란다. 특히 우리나라가 직접 주도하거나 협력하는 KVN이나 GMT 등의 대형 프로젝트와 연관된 연구에서도 중요한 주제인 천체화학적 관련연구에 많은 국내 젊은 연구자들의 이해를 높이는 계기가 되었으면 한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0083999, KRF-2008-313C00376).

참고 문헌

Adams, W. S., 1949, Observations of Interstellar H and K, Molecular Lines, and Radial Velocities in the Spectra of 300 O and B Stars, ApJ, 109, 354

Beuther, H., Zhang, Q., Bergin, E. A., et al., 2007, Dust and Gas Emission in the Prototypical Hot Core G29.96 − 0.02 at Sub-Arcsecond Resolution, A&A, 468, 1045

Boogert, A. C. A., Pontoppidan, K. M., Lahuis, F., et al., 2004, Spitzer Space Telescope Spectroscopy of Ices toward Low-Mass Embedded Protostars, ApJS, 154, 359

Bujarrabal, V., Alcolea, J., Sanchez Contreras, C., & Sahai, R., 2002, HST Observations of the

Protoplanetary Nebula OH 231.8 + 4.2: The Structure of the Jets and Shocks, A&A, 389, 271

Cernicharo, J., Guelin, M., & Kahane, C., 2000, A Lambda 2 mm Molecular Line Survey of the C-Star Envelope IRC + 10216, A&A, 142, 182

Comito, C., Schilke, P., Phillips, T. G., Lis, D. C., Motte, F., & Mehringer, D., 2005, A Molecular Line Survey of Orion KL in the 350 Micron Band, ApJS, 156, 127

Duley, W. W. & Williams, D. A., 1984, Interstellar Chemistry (Academic Press)

Eherenfreund, P. & Charnley, S. B., 2000, Organic Molecules in the Interstellar Medium, Comets, and Meteorites: A Voyage from Dark Clouds to the Early Earth, ARA&A, 38, 427

Gundermann, E., 1965, Observations of the Interstellar Hydroxyl Radical (Ph. D. Dissertation), Havard University

Helmich, F. P. & van Dishoeck, E. F., 1997, Physical and Chemical Variations within the W3 Star-Forming Region. II. The 345 GHz Spectral Line Survey, A&AS, 124, 205

Kuan, Y. -J., Charnley, S. B., Huang, H. -C., Tseng, W. -L., & Kisiel, Z., 2003, Interstellar Glycine, ApJ, 593, 848

Kulkarni, S. R. & Heiles, C., 1987, in Interstellar Processes (eds. D. J. Hollenbach & H. A. Thronson, Jr., D. Reidel), p. 87

Kwok, S., 2007, Interstellar Medium (Univ. Science Books), p. 398

McCabe, E. M., Connon-Smith, R., & Clegg, R. E. S., 1979, Molecular Abundances in IRC + 10216, Nature, 281, 263

Prasad, S., Tarafdar, S. P., Villere, K. R., & Huntress, W. T., 1987, in Interstellar Processes (eds. D. J. Hollenbach & H. A. Thronson, Jr., D. Reidel), p. 631

Rodgers, S. D. & Charnley, S. B., 2003, Chemical Evolution in Protostellar Envelopes: Cocoon Chemistry, ApJ, 585, 355

Rubin, A. E., Trigo-Rodriguez, J. M., Herber, H., & Wasson, T., 2007, Progressive Aqueous Alteration of CM Carbonaceous Chondrites, Geochim. Cosmochim. Acta, 71, 2361

Scalo, J. M. & Slavsky, D. B., 1980, Chemical Structure of Circumstellar Shells, ApJ, 239, L73

Turner, B. A. & Ziurys, L. M., 1988, in Galactic and Extragalactic Radio Astronomy (eds. G. L. Verschuur & K. I. Kellermann, Springer-Verlag), p. 200

van Dishoeck, E. F., 2004, ISO Spectroscopy of Gas and Dust: From Molecular Clouds to Protoplanetary Disks, ARA&A, 42, 119

Wagenblast, R. & Williams, D. A., 1993, in Dust and Chemistry in Astronomy (eds. T. J. Millar & D. A. Williams, IOP), p. 171.

Weaver, H., Williams, D. R. W., Dieter, & N. H., Lum, W. T., 1965, Observations of a Strong Unidentified Microwave Line and of Emission from the OH Molecule, Nature, 208, 29

Weinreb, S., Barrett, A. H., Meeks, M. L., & Henry, J. C., 1963, Radio Observations of OH in the Interstellar Medium, Nature, 200, 829