

구상성단 거성들의 분광 연구 SPECTROSCOPIC STUDY ON RED GIANTS IN GLOBULAR CLUSTERS

이상각

서울대학교 천문학과 지구환경과학부
SANG-GAK LEE

Astronomy Program, SEES, Seoul National University: sanggak@astrosp.snu.ac.kr

Received Jul. 21, 2000; Accepted Aug. 4, 2000

ABSTRACT

A large scatter of the chemical abundances among globular cluster red giants has been observed. Especially the chemical elements C, N, O, Na, Mg, and Al vary from star to star within globular clusters. Except for ω Cen and M22, most globular clusters could be considered to be monometallic of their iron peak elements within error ranges. The variations in light elements among globular cluster giants appear much more pronounced than in field halo giants of comparable Fe-peak metallicity. It has been found that in general the nitrogen abundance is anticorrelated with both carbon and oxygen, while it is correlated with Na and Al. These intracluster abundance inhomogeneities can be interpreted either by mixing of nucleosynthesized material from the deep stellar interior during the red giant branch phase of evolution or by inhomogeneities of primordially processed material, from which the stars were formed. The simple way of distinguishing between two scenarios is to obtain the element abundances of main-sequence stars in globular clusters, which are too faint for high resolution spectroscopic studies until now. Both "evolutionary" and "primordial" origins are accepted for explanations of abundance variations among red giants and CN-CH anticorrelations among main-sequence stars in globular clusters. This paper reviews chemical abundances of light elements among globular cluster giants, with brief reviews of canonical stellar evolution of low mass stars after main-sequence and deep mixing for abundance variations of cluster giants, and a possible connection between deep mixing and second parameter.

Keywords: globular cluster red giants, abundance of light elements

1. 서론

구상성단은 은하에서 가장 나이가 많은 천체이며 항성의 진화 이론을 검증할 수 있는 중요한 천체다. 이는 성단의 구성원들이 커다란 분자운에서 동시에 생성되었으며 균질한 물질에서 생성된 것으로 추정되기 때문이다.

구상성단의 금속 함량 $[Fe/H]$ 은 ~ 0.0 에서 -2.5 까지 다양하다. 원소의 합성 이론에 따르면 빅뱅 이후 각 원소들은 각각의 핵합성에 따라 합성되어 현재의 원소 함량 분포비에 도달하게 된 것이다. 따라서 아주 나이가 오래된 천체로 알려진 구상성단에 있는 항성에 나타나는 원소 함량의 비율은 핵 합성 역사를 이해하는 기본 실마리가 된다. 그러한 예로 헤일로 항성의 산소 함량이 태양과 같은 원반 항성과 비교할 때 철에 대한 산소의 비가 훨씬 큰 것으로 알려졌다. 즉 헤일로 항성은 $[O/Fe] = 0.4 \sim 0.5$ 가 된다. 이는 질량이 큰 항성이 마지막 진화에서 폭발하는 초신성

II형의 폭발이 과거 헤일로 항성이 형성될 시기에 상대적으로 많았음을 시사한다. 산소가 주로 질량이 큰 항성과 초신성 II형에 의해 성간 물질로 환원되는데 반하여, 철은 주로 질량이 중간보다 작은 항성과 초신성 I형에서 공급되기 때문이다. 초신성 I형은 탄소핵 백색왜성의 동반성에 의한 물질 공급으로 폭발이 야기되는 것으로 질량이 작은 항성의 진화 결과다. 이처럼 철과 산소의 원소 함량 비율의 변화에서 시간에 따른 항성들의 생성에 대한 변화를 이해할 수 있는 실마리가 제공된다.

그러나 구상성단 거성에 나타나는 $[el/Fe]$ 의 비는 초기 항성이 생성될 때 갖고 있는 비율 뿐만 아니라 항성의 진화에 따라 변화된 비율이 합성된 것이다. 일반적으로 구상성단의 거리가 상당히 멀기 때문에 밝은 성단 거성일지라도 높은 신호/잡음 비율의 분광 연구를 수행하기에는 성단에 있는 별들은 상당히 어두운 천체들이다. 최근 10m Keck

망원경을 활용하여 15 등급 정도의 어두운 거성에 대한 고분산 분광연구가 수행되고 있다. 따라서 진화를 격지 않은 성단의 주계열 항성에 대한 연구는 몇 안되는 성단에 불과할 뿐만 아니라 분해능도 상당히 제한된 분광 연구다. 따라서 구상성단의 분광 연구는 대부분 밝은 거성에 대한 연구이며 이러한 분광 연구의 결과는 초기 생성시의 [el/Fe] 비에 추가하여 진화를 통해 항성 내부에서 핵합성된 물질이 표면으로 끌어 올려져 변화된 [el/Fe] 비를 보이게 된다.

구상성단 거성의 분광 연구 결과에서 ω Cen, M22를 제외한 대부분의 성단에서는 성단 거성마다 거의 일정한 철족 원소 함량을 갖고 있으나 가벼운 원소인 탄소, 질소, 산소, 나트륨, 알루미늄, 마그네슘의 함량은 성단 거성마다 다르며 그 평균 변화폭은 시야에 산재되어 있는 거성에 비해 상당히 큰 것으로 알려졌다. 또한 이 원소들 변화에는 서로 비례하여 변화하거나 서로 반비례하여 변화하는 양상이 나타난다. CH 분자띠에 의해 결정되는 탄소 함량과 CN 분자띠와 NH 분자띠에서 알려지는 질소의 함량 변화에 있어 탄소의 함량은 시야에 산재되어 있는 같은 금속 함량을 갖는 거성보다 더 많이 감소되는 반면 질소 함량은 상대적으로 더 많아지는 양상이 M3 (Suntzeff 1981; Norris and Smith 1984), M4 (Norris 1981), M5 (Smith and Norris 1983; Langer et al. 1985), M10 (Smith and Fulbright 1997), M13 (Suntzeff 1981), M15 (Trefzger et al. 1983), NGC 3201 (Smith and Norris 1982), NGC 6394 (Smith and Bell 1986), NGC 6752 (Da Costa and Cottrell 1980; Norris et al. 1981)와 47 Tuc (Norris and Cottrell 1979; Norris and Freeman 1982)에서 나타난다. 그러나 이처럼 탄소와 질소 함량이 서로 상반된 관계를 갖지 않는 항성도 최근 M5 (Smith et al. 1997), M10 (Smith and Fulbright 1997), M3 (Lee 1999)에서 발견되기도 했다. 반면에 이러한 상반된 변화 관계는 주계열을 막 떠난 항성들 사이에도 나타나는 것이 NGC 6752 (Suntzeff 1989), NGC 362 (Smith 1983), M3 (Norris and Smith 1984)와 47 Tuc (Bell et al 1983; Briley et al. 1991)에서 보였다. 뿐만 아니라 일부 성단(M4, Smith and Norris 1982 : NGC 3201, Smith and Norris 1983; NGC 6752, Norris 1988)의 거성과 준거성에서는 CN 분자띠의 세기 분포가 두 점의 세기에서 극대를 보이는 이중의 분포 양상으로 나타났다. 탄소 동위 원소의 비인 C^{12}/C^{13} 은 태양에서 90인데 반하여, 정상외 거성열 진화를 통해 감소되면 20 ~ 30 (Iben 1974; VandenBergh and Smith 1988)으로 예측된다. 그러나 M4 (Sneden et al. 1986), M22 (Bell et al 1990), 47 Tuc (Suntzeff and Smith 1991)과 M71 (Briley et al. 1997)에서는 4 ~ 10의 값이 관측되고 있다. 성단 거성들에 대한 산소 함량의 고분해능 분광 연구에서 M92 (Pilachowski 1989), M15 (Sneden et al 1991), M13 (Pilachowski 1989; Brown and Wallerstein 1992; Kraft et al. 1993, 1995), 47 Tuc (Brown and Waller-

stein 1992)와 M71 (Sneden et al. 1994) 성단에는 성단마다 다양한 산소 함량의 분포를 보이며 성단에 따라서는 상당량 산소의 결핍을 보이는 거성에서부터 정상적인 헤일로 항성의 산소 함량을 보이는 거성까지 나타났다. 성단 내 거성의 산소 결핍 정도는 성단의 금속 함량이 많아질수록 정도가 약해지며 산소 함량이 적은 거성은 질소 함량이 커지는 상반된 관계를 보이는 것이 M92 (Sneden et al 1991), M15 (Sneden et al 1991), M13 (Cohen 1978; Pilachowski 1989; Brown et al. 1991; Kraft et al. 1992)과 ω Cen (Paltoglou and Norris 1989)에서 알려졌다. 이러한 산소 함량이 성단 거성의 나트륨 함량과 상반된 관계를 갖는 것이 M92 (Sneden et al 1991; Armosky et al 1994; Shetron 1996), M15 (Sneden et al 1997) 성단에서 나타났으며 질소 함량과 나트륨 함량이 서로 비례하여 변화하는 것이 M13 (Pilachowski et al 1996; Kraft et al 1997; Shetrone 1996)에서 알려졌다. 이 결과 알루미늄 함량과 마그네슘 함량 사이에는 상반된 관계가 M3 (Kraft et al 1992), M13 (Kraft et al 1992, 1995), M10 (Kraft et al 1993), M5 (Sneden et al. 1992), M4 (Drake et al 1992), M30, M55, M68 과 NGC 6397 (Minniti et al 1996), ω Cen (Norris and Da costa 1995)에서 성립되고 반면에 나트륨과 마그네슘의 상반된 관계가 M13 (Pilachowski et al 1996)에서 나타난다.

따라서 이러한 변화를 설명하는 데는 두가지 이론이 존재한다. 하나는 성단 항성들이 생성될 초기부터 다양한 원소 함량의 비를 갖는 물질에서 생성되었기 때문이라는 "원시 물질론"이며 다른 하나는 항성이 진화하는 과정에서 정상적인 진화 외에 추가로 혼합이 발생되어 내부에서 생성된 물질이 표면으로 부상되었다는 "진화론"이다. 물론 두 이론 중에서 어떤 이론이 타당한지를 뚜렷이 구별할 수 있는 방법은 진화가 거의 없는 성단 주계열 항성의 고분해능 분광 연구로 이루어질 수 있다. 그러나 현재로는 성단 거성의 고분해능 연구 결과와 성단 주계열 항성의 저분해능 연구 결과에 의존할 수 밖에 없다. 일부 성단(47 Tuc: Bell et al. 1983; Briley et al. 1991; NGC 6752: suntzeff 1989)의 주계열 항성들에서도 탄소와 질소 함량을 나타내는 CN-CH 분자띠의 세기 사이에 상반된 상관관계가 보이고 이처럼 서로 상반된 관계를 보이는 원소들의 총 함량이 같은 성단에 있는 거성들의 경우 거의 일정한 것으로 밝혀짐에 따라 구상성단의 항성에 나타나는 원소들의 함량 분포는 "원시 물질론"과 "진화론"이 다 작용한 결과라고 추론되고 있다(Smith 1987; Kraft 1994).

"진화론"에 의한 경우, 그 기저의 원인은 진화 과정에 추가로 나타나는 혼합에 의한 결과가 된다. 반면에 "원시 물질론"의 경우, 구상성단이 생성되는 물질에 불균질한 물질이 추가되어 현재 관측되는 함량 분포를 보여야한다. 따라서 양성자 포획으로 증가된 나트륨, 알루미늄과 같은 원소 함량의 분포를 설명하려면 항성 생성 이전에 있었던 양성자

포획 과정은 성단마다 다른 핵융합 환경에서 이루어졌어야 함을 시사한다. 처음 나트륨과 알미늄의 함량 변화가 알려졌을 때, 중성자 포획 과정으로 생성된 물질의 표면 부상으로 설명하려 했었다. 그러나 질량이 작은 적색 거성의 진화 과정에는 중성자를 제공하는 공급원이 없다. 반면 수소 연소 껍질층에서 양성자 포획 (Denissenkov & Denissenkova 1990; Langer et al. 1993; Langer & Hoffman 1995; Cavallo et al. 1996; Cavallo et al. 1997)으로 이러한 물질이 생성될 수 있다는 것이 밝혀졌다. 이 양성자 포획에 의한 원소 함량의 분포를 보면 거성들에 나타나는 $[Mg/Fe]$ 의 차이는 혼합의 깊이를 나타내며, 이것이 구상성단의 수평가지의 모양을 달리하게 하는 원인으로 부각되었다. Kraft et al.(1998)의 NGC 7006의 Keck I 을 활용한 고분해능 분광 연구의 결과에 의하면 NGC 7006의 거성들은 M13의 거성들에 비해 혼합의 정도가 비교적 양호하게 일어난 경우이다. 일부 M13의 거성에서는 혼합이 깊게 일어나 Mg이 Al으로 전환되었을 뿐만 아니라 수소 연소로 발생된 헬륨이 표면으로 부상되어 상당량의 표면 수소가 헬륨으로 전환된다. 따라서 M13의 거성에서는 깊은 혼합으로 표면 $[Mg/Fe]$ 의 비가 감소되었고, $[He/H]$ 의 비가 증가된다. 이 증가된 $[He/H]$ 의 비는 결국 후속 진화단계인 영년수평열의 위치를 변화시킨다. 이것이 M13 구상성단의 수평가지를 푸르게 분포하게 한 원인이며 같은 금속 함량을 갖는 NGC 7006구상성단의 수평가지는 붉은 쪽 분포를 보이게 된 것이다.

이와 같은 "이차 계수" 문제는 구상성단의 색-등급도에서 동일한 철족 원소 함량을 갖고 있는 성단들 사이에 수평열 형태가 다양하게 나타나는 것이 알려지면서 발생한 것이다 (Sandage & Wildey 1967; Van den Bergh 1967). 가장 전형적인 예가 M13 과 M3 쌍과 NGC 288 과 NGC 362 쌍이다.

따라서 성단 거성의 알미늄, 마그네슘 함량에 대한 연구에서 깊은 혼합, 또는 깊은 혼합에서 예측하는 $[He/H]$ 비가 이차 계수가 될 수 있는지를 확인해 줄 것이다.

본 논문의 단원 2에서는 관측에서 알려진 구상성단내의 항성들에 나타나는 탄소, 질소, 산소, 나트륨, 마그네슘과 알미늄의 함량 변화에 대하여 요약하고, 단원 3에서는 질량이 작은 항성의 기본적인 진화 과정과 진화에서 예측되는 표면 함량의 변화를 요약한다. 단원 4에서 깊은 혼합 과정에 대해 논의 하고, 단원 5에서 깊은 혼합 과정에서 제시하는 구상성단의 수평열 가지 형태에 대한 이차 계수 문제를 조사하고, 결론과 요약을 단원 6에 기술한다.

2. 구상성단 항성들의 원소 함량 차이

구상성단내에 있는 항성들의 금속 함량이 일정한 것은 분광 연구와 측광 연구에서 하나의 $[Fe/H]$ 값으로 얻어지기 때문이다. 고분산 분광 연구에서는 철족의 금속함량이 오차 한계내에서 일정하다는 것이 밝혀졌고, 최근에 측광의

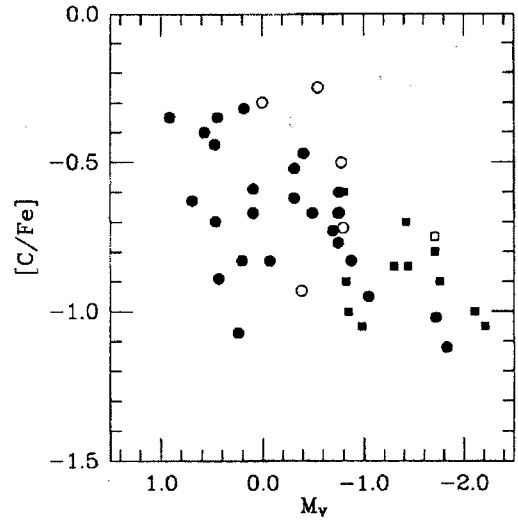


그림 1.—(Suntzeff 1993에서 발췌) 절대 등급에 따른 탄소 함량의 변화. 구상성단 M4(검은 점)와 NGC 6752(빈 원)의 거성들에 대한 M_v 와 $[C/Fe]$ 의 관계. 원은 RGB, 사각형은 AGB 항성이다.

정밀도가 높은 CCD 측광 연구에서도 구상성단의 거성열과 주계열의 폭은 상당히 좁게 관측되며, 그 폭은 많아야 금속함량 차이가 < 0.1 dex 임을 암시하고 있다. 물론 측광 연구에서 가장 큰 문제는 차등 성간 소광이다. 그러나 현재까지 ω Cen과 M22를 제외하고 거의 대부분의 구상성단이 하나의 $[Fe/H]$ 으로 기술될 수 있다고 받아들여지고 있다. M92 거성에서도 금속 함량 차이가 0.1 dex 정도로 관측되지만 (Langer et al. 1993) 이는 측광에 나타나는 폭의 한계와 비슷한 값으로 차등 금속 함량의 존재로 보기에는 미흡한 결과다. 구상성단 항성의 무거운 원소, $[\alpha/Fe]$ 의 비는 성단내 항성마다 거의 일정하다. 실제 주어진 $[Fe/H]$ 에 대해 α 입자 원소인 Si, Ca, Ti은 거의 일정한 값을 가지며, 금속 함량이 적은 구상성단 ($[Fe/H] \leq -1.0$)에서 약간 (~ 0.3 dex) 큰 것으로 (Edvardsson et al. 1993; McWilliam & Rich 1994; Sneden et al. 1994) 알려졌다.

실제 문제는 이처럼 일정한 금속 함량을 갖는 구상성단의 거성들에 나타나는 가벼운 원소들의 함량 분포다. 탄소와 질소 함량에 따라 달라지는 CH, CN과 NH 분자띠의 세기가 성단 내에 있는 별에 따라 다르다는 것이 70년대 초부터 알려져 왔다. 또한 고분산 분광 연구에서 얻어진 산소의 함량은 성단내의 항성마다 크게 다르며 나트륨과 마그네슘 및 알미늄의 함량 차도 크게 다르게 나타난다. 구상성단 항성들의 C^{12}/C^{13} 의 비는 상당히 적은 값을 갖는다. 이 결과들의 일부는 명백히 진화와 관련된 것으로 보이나 구상성단 거성의 표면 함량은 유사한 나이와 금속함량을 갖는 시야에 산재되어 있는 헤일로 거성들의 표면 함량 분포와 크게 다르다 (Pilachowski et al. 1996; Langer,

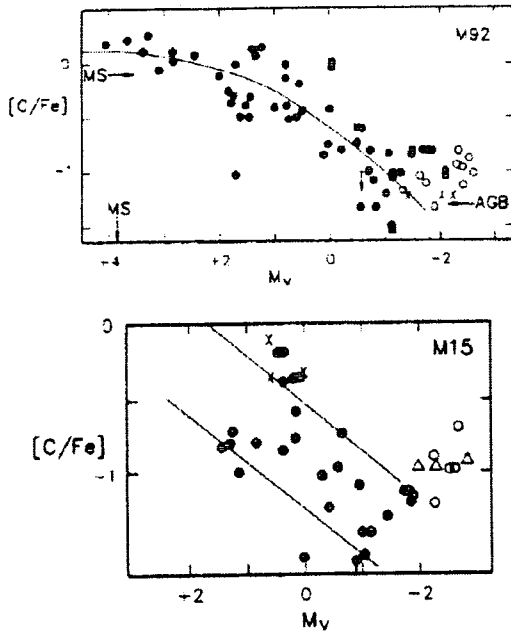


그림 2.—(Suntzeff 1989에서 발췌) M92와 M15에서의 절대 등급에 따른 탄소 함량의 변화. 위 그림의 x는 NGC 6397의 항성이고, 빈 원은 Bell(1984)와 Stetson (1984)의 자료다. 화살표는 AGB의 평균치다. 밑 그림의 빈원은 산소 함량 $[O/Fe] \sim 0.6$ 을 가정한 경우며, 실선은 M92의 분포를 나타낸다. x는 Pal 13의 자료다.

Suntzeff, & Kraft 1992).

탄소, 질소와 산소 함량에 대한 연구들은 오래 전부터 구상성단에 있는 항성들에 나타나는 CH 분자와 CN 분자 띠가 특이한 항성들이 알려지면서 (Osborn 1971) 수행되어 왔다. 이들은 CH 분자인 G 밴드가 강한 "CH-항성", CN 분자띠가 유별나게 강하게 나타나는 "CN-고양된 거성", G 밴드가 유난히 약한 "약한-G 항성"들로 구별되어 왔다.

CN, CH, CO와 NH 분자띠들에 대한 연구가 성단에 있는 접근 거성 (AGB)과 적색 거성(RGB)부터 주계열 전향점 (TO) 근처의 항성들에 이르기까지 다양하게 수행되어 왔다. 구상성단 M92 (Carbon et al. 1982), M15 (Trefzger et al. 1983)와 NGC 6397 (Briley et al. 1990), M4와 NGC 6752 (Suntzeff & Smith 1991)에서는 주계열을 떠나 적색 거성 끝(RGB Tip)으로 진화되는 동안 표면의 탄소 함량이 1/10 이상으로 감소된다. 그림 1은 M4와 NGC 6752에서, 그림 2는 M92와 M15에서 절대 등급에 따라 $[C/Fe]$ 이 감소하는 것을 보여준다.

접근 거성열에 주로 CH-약한(CH-weak) 항성들이 산재되어 있으며 일부 거성을 제외한 CH-약한 거성은 주로 접근 거성이다. AGB에서 CH-약한 항성들이 나타나는 것은

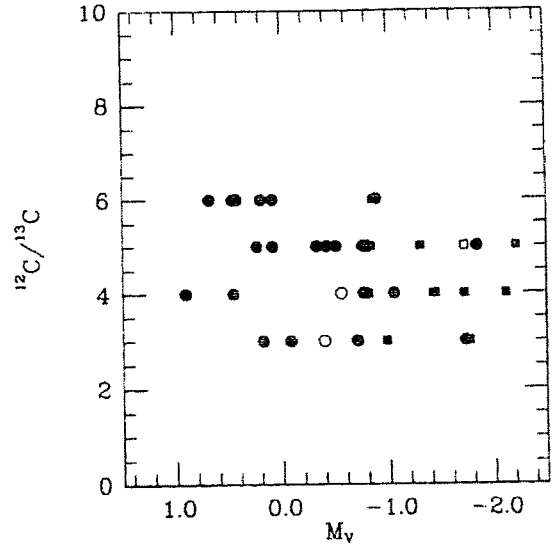


그림 3.—(Suntzeff 1993에서 발췌) 절대 등급에 따른 C^{12}/C^{13} 의 비. M4(검은 점)와 NGC 6752(빈 원)에 RGB(원)와 AGB(네모) 거성들의 탄소 동위원소의 비.

적색 거성열을 따라 진화하면서 CH 세기가 약해지는 현상과 부합된다. 접근 거성열은 적색 거성열 끝(RGB Tip)의 진화를 거친 단계이기 때문이다.

구상성단에 항성의 C^{12}/C^{13} 의 비는 진화에 따라 변화한다. 그림 3은 구상성단 M4와 NGC 6752에서 C^{12}/C^{13} 의 비가 진화에 따라 다소 변화하는 양상을 보이며 ~ 4 값에 이르는 것을 보여 준다. 이는 수소 연소 껍질에서 일어나는 CN 연소 과정으로 발생하는 물질이 표면 물질과 혼합됨에 따라 표면의 $[C/H]$ 가 감소하는 반면 C^{12}/C^{13} 비가 결국 CN 과정의 평형 값인 4에 이르는 것으로 해석된다.

그림 3에서 절대 등급 +0.5와 -2.0사이에서 C^{12}/C^{13} 의 비가 약간 감소하는 것과 그림 1과 2에서 항성이 밝아짐에 따라 $[C/H]$ 가 감소되는 것은 기본 진화 모형에서 예측되는 양들과 상당한 차이를 보인다. 기본 진화 모형(Iben 1974; Vandenberg & Smith 1988; Vandenberg 1992)은 진화에 따라 $[C/H]$ 은 대략 30% 감소하며, C^{12}/C^{13} 의 비는 20~30 정도로 감소된다.

성단에 따라 C^{12}/C^{13} 의 비가 달라지는 것을 그림 4에서 볼 수 있다. 비교적 금속 함량이 큰 M71과 47 Tuc 성단의 C^{12}/C^{13} 비가 M4와 NGC 6752보다 커지는 경향을 볼 수 있다. 이는 C^{12}/C^{13} 의 비가 금속 함량에 따라 달라지는 것을 의미하며, 이 경향은 원반항성을 포함한 금속 함량에 따른 C^{12}/C^{13} 의 비를 보여 주는 그림 5에서 더욱 뚜렷이 볼 수 있다.

구상성단내에 항성들의 CN 분자띠 세기는 반대로 진화를 따라 증가하는 양상으로 나타난다. $[N/H]$ 가 측정된 성단에서 N의 함량도 진화에 따라 증가되는 것을 보여준다.

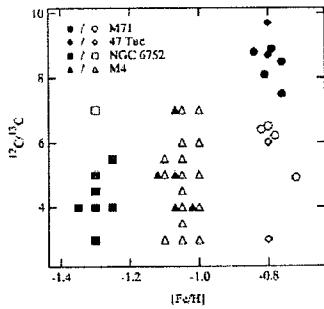


그림 4.—(Briley 1997에서 발췌) 금속 함량 $[Fe/H]$ 에 따른 C^{12}/C^{13} 의 비. CN-약한 별들은 검은점으로, CN-강한 별들은 빈 점으로 표시하였다. 금속함량이 풍부한 것으로 알려진 47Tuc와 M71 성단 내의 거성들에 대해서는 CN-강한/CN-약한 별들 사이의 C^{12}/C^{13} 비에 있어서 뚜렷한 분리가 보이는데, 이는 C/N 불균질성과 CN(O)-cycle 사이에 관련이 있음을 의미한다. 또한 $[Fe/H]$ 증가에 따른 C^{12}/C^{13} 의 증가 경향은 CN(O)로 생성된 물질이 항성표면으로 이동되는 효율이 금속 함량과 연관되어 있음을 의미하고 있다.

이와 같은 양상은 각 성단마다 CN-CH 분자띠의 상반 관계로 나타난다.

그러나 구상성단 항성들의 평균 탄소와 평균 질소의 함은 일정하다. 이는 그림 6에서 볼 수 있다. 같은 금속함량을 갖는 산재되어 있는 거성들과 비교하여 구상성단 항성에서 질소의 증가는 더욱 증가되는 반면 탄소의 감소는 더욱 감소되는 것을 보여준다. 또한 유사한 금속 함량을 갖는 구상성단의 경우(M3, M13과 NGC 7006 또는 M92와 M15)에도 탄소와 질소의 변화는 성단에 따라 달라지는 것을 볼 수 있다.

이외에도 구상성단 항성에 나타나는 CN 분자띠의 특이한 양상은 CN 분자띠의 분포가 두개의 극대를 갖는 이중 분포를 보이는 것이다. 그림 7은 구상성단 NGC 3201, M4와 NGC 6752(Smith & Norris 1982)에 있는 거성들의 CN 밴드 세기의 이중 분포 그림이다.

이중 분포의 원인은 아직도 분명하지 않다. 초기 생성 물질이 원인일 경우, 탄소가 많고 질소가 적은 물질에서 생성된 항성과 그와 반대의 물질에서 생성된 항성이 있음을 의미한다. 또한 적색 거성 단계에서 진화로 인한 깊은 혼합이 원인이라면, 탄소가 질소로 환원되는 과정이 급격히 발생하여 CN-약한 항성에서 CN-강한 항성으로 순식간에 변화됨을 의미한다. 왜냐하면 서서히 변화할 경우 CN의 세기 분포는 연속적인 변화를 보여야 하기 때문이다. 이 CN 분포의 이중성은 구상성단 전체의 특성과 관련된 것으로 보인다. 많은 구상성단의 체계적연구(Norris & Smith

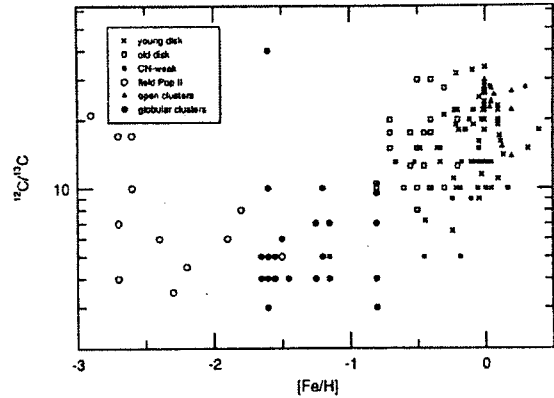


그림 5.—구상성단, 산개 성단, 및 시야 거성들의 금속함량에 따른 탄소 동위원소 비.

1981)에서 성단에 따라 CN-강한 항성 / CN-약한 항성의 비가 달라지는 것이 밝혀졌기 때문이다. 이 특성은 지난 10년 동안에 급격히 연구된 구상성단 내 거성의 $[O/H]$ 함량과 연계된 것으로 보인다.

구상성단에 개개 항성의 CNO 함량 변화는 성단마다의 특성으로 보이며 이들 C, N, O의 특성은 산재되어 있는 헤일로 항성들과도 상당한 차이를 보이고 있다 (Hesser et al. 1976; Friel et al.; 1982; Kraft et al. 1982; Carbon et al. 1987; Langer et al. 1992). 산재되어 있는 거성들은 아주 약한 CN 띠와 강한 G-밴드를 갖는 반면, 같은 금속 함량을 갖는 성단들의 거성에 보이는 분자띠는 상당히 다양한 세기 변화를 보이며 때로는 매우 약한 G-밴드를 갖는다. 구상성단내에 CNO 변화를 주는 성단의 특성이 있어 시야의 헤일로 항성과 다른 특성을 보이는 것으로 생각된다. 구상성단 거성에 나타나는 C, N, O의 변화는 진화 과정에 추가로 발생하는 깊은 혼합(Deep Mixing)으로 잘 설명되지만, 47 Tuc와 NGC 6752 (Bell et al. 1983; Suntzeff 1989; Briley et al. 1991)의 주계열 항성에 분명히 나타나는 C, N의 변화는 깊은 혼합으로 설명할 수 없다. 이는 어떤 이론도 주계열에서 수소 연소 지역의 물질이 혼합되어 표면으로 부상할 수 있는 방법을 제시하지 못하기 때문이다.

47 Tuc 거성(Paltoglou 1990)에서는 성단의 중심에서 멀어짐에 따라 CN 분자띠의 세기가 달라지는 동경 방향의 구배가 관측되었다. 이는 거성 단계의 깊은 혼합으로 설명할 수 없을 뿐만 아니라 역학적인 면에서도 이해하기 어려운 관측 사실이다. 왜냐하면 47 Tuc의 중심 이완 시간(Relaxation Time)이 10^8 년 (Webbink 1985)보다 작은 것으로 알려졌기 때문이다.

시야에 산재되어 있는 헤일로 항성들의 $[Fe/H]$ 에 따른 $[O/Fe]$ 의 변화는 아주 잘 알려져 왔다. 지난 10년간 급격히 증가된 구상성단내의 거성에 $[O/Fe]$ 함량의 연구 결과는 Kraft 와 Sneden 그룹에 의해 성단내의 거성들의 산소 함량이 성단마다 다양하게 변화하는 것을 보여 주고있다. 이

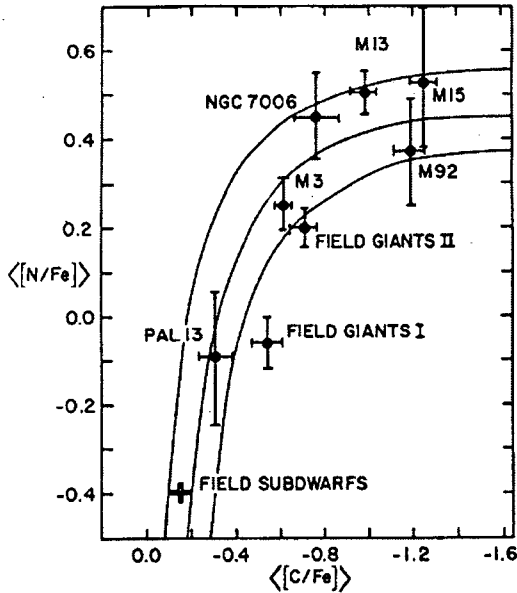


그림 6.—(Langer와 Kraft 1984에서 발췌) 질소와 탄소의 평균 함량의 변화. 구상성단 내의 절대 등급이 -1 근처의 거성들에 대한 평균 함량. 실선은 C+N = 일정한 선이다.

는 그림 8에 잘 나타나고 있다. 그림에 산소 함량의 자료는 Kraft 와 Sneden 그룹의 연구 결과와 여러 연구 (Barbuy 1988; Brown et al. 1990; Brown & Wallerstein 1992; Cohen 1978, 1979, 1980; Dickens et al. 1991; Drake et al. 1992; Gratton 1987; Gratton & Ortoloni 1989; Luck & Bond 1985; McWilliam et al. 1992; Pilachowski et al. 1986)의 결과들이다.

산재되어 있는 헤일로 거성의 경우, $[Fe/H] \leq -1.0$ 까지 거의 일정한 $[O/Fe] \sim 0.4 - 0.5$ 의 함량비를 가지며 금속 함량이 증가됨에 따라 $[O/Fe] \sim 0$ 으로 서서히 근접된다.

구상성단 거성의 경우, $[O/Fe]$ 의 최대 값이 +0.4 - +0.5를 지나 성단에 따라 이 최대치보다 다양하게 고갈된 산소 함량을 갖는 거성을 포함하고 있다. 최대로 고갈된 산소 함량이 성단마다 다르나 M13의 경우 $[O/Fe] = -0.8$ 까지 감소된 거성부터 전혀 시야 헤일로 거성과 차이가 없는 산소 함량을 갖는 거성까지 다양한 산소 함량의 분포를 갖고 있다. 그렇다면 이 구상성단의 산소 함량이 무엇인가? 초기 구상성단 생성시의 산소 함량은 관측되는 산소함량 분포에 아직도 존재하는가? 무엇이 같은 금속 함량을 갖고 있는 성단에서 거성들의 산소 함량의 분포를 다르게 만드는가? 이런 질문들에 대한 해답을 얻기 위하여 확고한 관측 사실들의 퍼즐을 맞추어 나가야 할 것이다.

상기 그림 8에 47 Tuc와 M71 (Sneden et al. 1994)의 자료를 보면 금속 함량이 비교적 풍부한 구상성단에서 산소 함량의 고갈 현상은 약해진다. 또한 같은 금속 함량의 구상성단에서도 CN-강한 항성이 많은 구상성단(예, M13)에

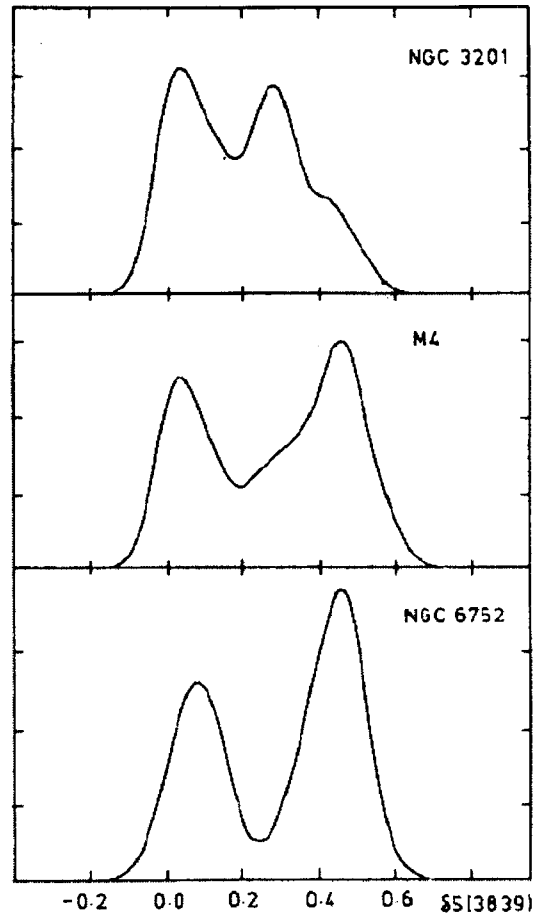


그림 7.—(Smith & Norris 1982에서 발췌) CN 분자띠 세기의 이중 분포. 구상성단 NGC 3201, M4, MGC 6752에 RGB 항성들의 CN 분자띠 분포.

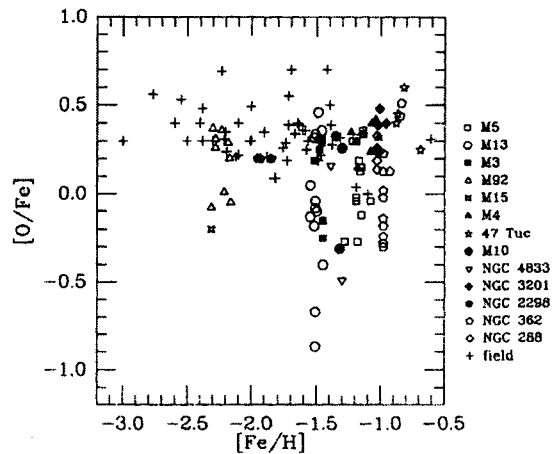


그림 8.—(Suntzeff 1993에서 발췌) 구상성단과 시야 헤일로 거성들의 금속 함량에 따른 산소 함량 분포.

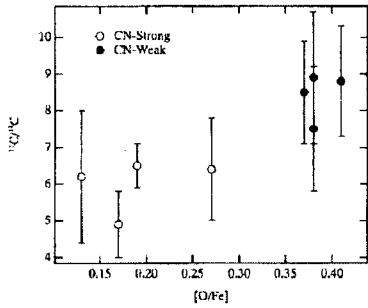


그림 9.—(Briley et al 1997 에서 발췌) M71 구상성단 거성들의 산소 함량과 탄소 동위원소의 비.

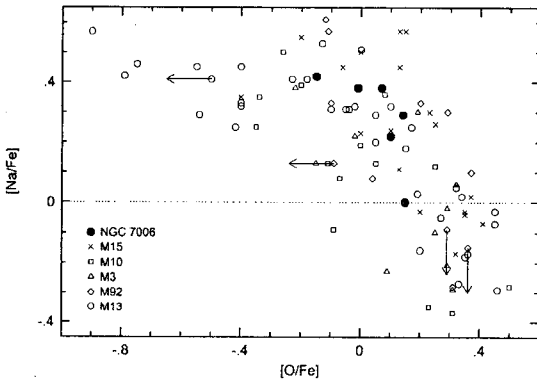


그림 10.—(Kraft et al 1998 에서 발췌) 구상성단 거성들의 나트륨과 산소 함량의 상반 관계.

서 산소 고갈이 심한 항성이 나타나며, CN-강한 항성이 적은 구상성단 (예, M3)에서 산소 고갈이 약하게 나타나는 것으로 밝혀졌다. 이는 산소와 질소의 함량이 서로 상반된 관계를 갖는 것을 나타내며 수소 껍질 연소 영역의 상위 부분에서 $O \rightarrow N$ 으로 연소된 물질이 깊은 순환 과정을 통해 부상된 결과로 이해된다.

따라서 CNO 함량은 $O \rightarrow N$ 연소 지역보다 위에서 발생하는 $C \rightarrow N$ 연소에 의한 C-N 상반관계와 더불어 순수한 깊은 순환에 의한 경우 총 C+N+O의 함량은 표면 함량 변화와 무관하게 모든 거성에서 일정해야 한다.

그림 9는 M71에서 산소의 표면 함량 변화가 탄소 동위원소비의 변화와 같은 양상으로 변화하는 것을 보여준다. CN-강한 항성에서 C^{12}/C^{13} 비와 산소 함량비가 더욱 작아지는 것은 두 함량의 변화가 같은 기원임을 시사하며 이는 CNO 연소층의 깊은 혼합과 관련되어 있음을 의미한다.

깊은 혼합만이 C, N, O의 표면함량 변화의 순수한 원인이라면, 성단내의 거성마다 같은 총 C+N+O 함량을 가져야 한다. CN 분자는 두개의 금속으로 이루어 졌으므로 성

단의 금속 함량이 적어지면 이 분자띠를 보기가 어렵다. 뿐만 아니라 정확한 탄소 함량이 결정되어야 정확한 질소 함량을 결정할 수 있는 불확실한 분석과정을 내포하고 있다. 반면 CH와 NH 분자띠는 비교적 금속 함량이 적은 경우도 보이지만 NH 분자띠는 실제 자외선 (λ 3660) 영역에 있어 질소 함량을 정확히 얻기가 어렵다. 따라서 일반적으로 C와 N의 함량은 상당한 오차를 갖고 있다. 그러므로 탄소와 질소의 함량이 서로 상반된 관계를 갖고 질소와 산소의 함량이 서로 상반된 관계를 갖는다는 사실에는 의심의 여지가 없으나 성단의 모든 항성이 다 같은 총 C+N+O의 함량을 갖는다고 하기는 아직 어렵다. 그러나 M13(Brown et al. 1991; Smith et al. 1996)에 일부 거성들은 일정량의 C+N+O의 함량을 갖는 것으로 확인되었다.

Drake et al. (1992)는 M4 구상성단에서 CN-강한 거성은 나트륨과 알루미늄이 강한 반면 산소가 약하며, CN-약한 거성은 나트륨과 알루미늄이 약한 반면 산소가 강한 것을 알아냈다. M13에서도 산소와 나트륨이 서로 상반된 관계(Kraft et al. 1992)를 보였으며 질소와 나트륨이 같은 양상으로 변화하는 것이 밝혀졌다. 뿐만 아니라 Na의 함량이 진화에 따라 증가하며(Pilachowski et al. 1996; Kraft et al. 1997), Mg+Al이 일정한 것을(Shetrone 1996a) 밝혔다. 산소와 나트륨의 상반 관계는 그림 10에 구상성단 NGC 7006, M92, M15, M3, M13과 M5에 있는 적색 거성 끝보다 1등급 어두운 거성들의 Na와 O함량 분포에 잘 나타나 있다.

M13(Pilachowski 1996; Shetrone 1996a, 1996b; Kraft et al. 1997)과 ω Cen (Paltoglou & Norris 1989; Norris & Da Costa 1995a, 1995b)와 M15(Snedden et al. 1997)의 거성들은 나트륨과 산소, 알루미늄과 마그네슘 사이에 상반 관계를 보여준다. 그림 11은 M15 구상성단 거성들의 산소와 나트륨의 상반관계, 산소와 알루미늄의 상반관계, 산소와 마그네슘의 상호관계를 보임으로써 마그네슘과 알루미늄, 마그네슘과 나트륨의 상반관계가 있음을 시사하고 있다.

산소 함량과 나트륨 함량의 상반된 관계의 원인이 무엇이며, 질소와 나트륨의 상호 관계는 무엇에서 기인되는가? 알루미늄과 마그네슘의 상반관계의 원인은 무엇인가? 일반적으로 Na^{23} 은 Ne^{22} 에 중성자가 포획되어, Al^{27} 은 Mg^{26} 에 중성자가 포획되어 생길 수 있다. 이러한 경우 중성자의 공급원이 필요하다.

중성자의 공급원으로 $C^{13}(\alpha, n)O^{16}$ 과 $Ne^{22}(\alpha, n)Mg^{25}$ 가 있지만, 두 경우 다 일차 상승 거성열의 진화 단계에서는 발생되지 않는다. 중성자 공급원인 $C^{13}(\alpha, n)O^{16}$ 의 경우, 헬륨 껍질 플래쉬에서 발생하는 것으로 진화의 AGB 단계에서 발생된다. $Ne^{22}(\alpha, n)Mg^{25}$ 의 경우는 온도가 3×10^8 도에서 가능한 것으로 질량이 적은 항성의 RGB 단계의 내부 수소 연소 껍질층에서는 발생되지 않는다. 이러한 온도는 적어도 $5M_{\odot}$ 항성의 진화에서 기대된다.

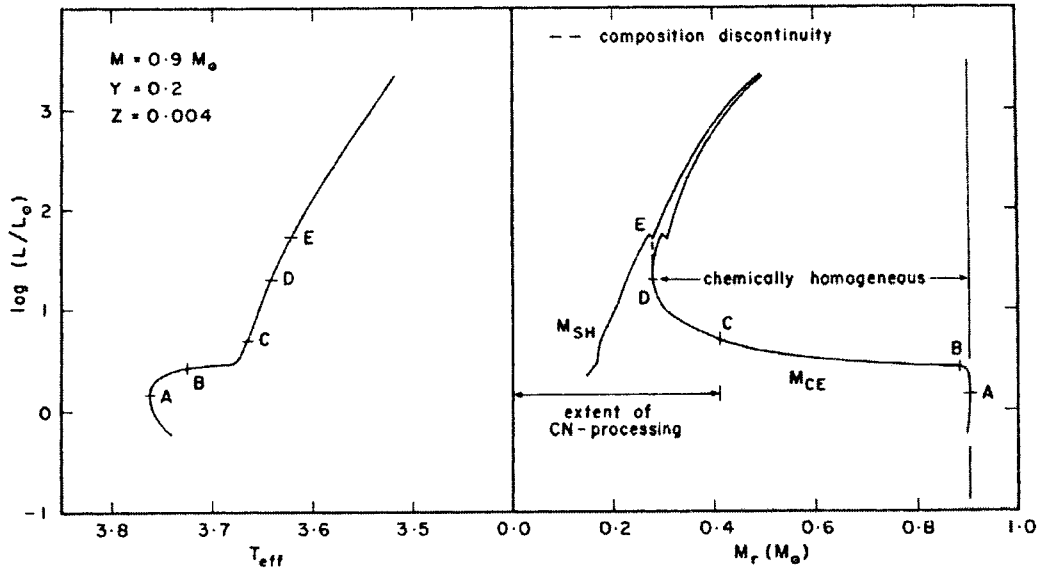


그림 12.—금속 함량이 $[A/Fe] = -0.7$, 질량 $0.9 M_{\odot}$ 인 항성의 진화경로다. 우측 그림은 진화 경로에 따른 수소 연소 껍질 (M_{sh})과 대류층(M_{CE})의 위치를 항성의 질량 단위로 표시하였다. 진화 경로 A점에서 내부에 변환된 CNO의 분포 위치가 "extent of CN-processing"으로 표기되었다.

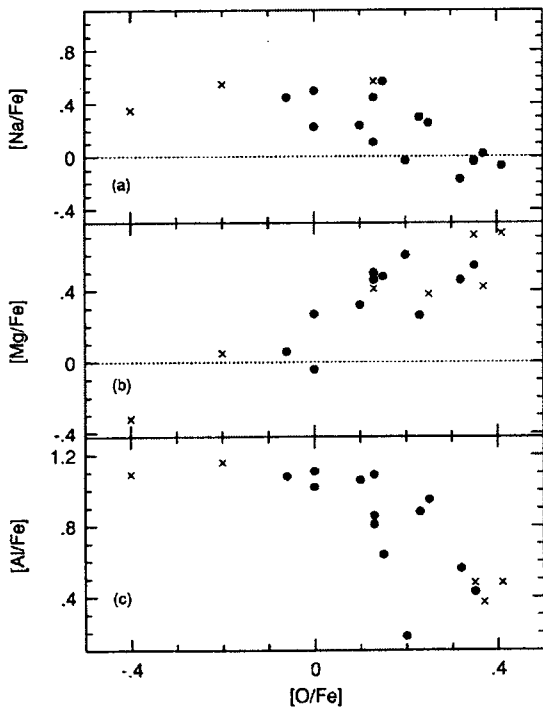


그림 11.—(Snedden et al 1997에서 발췌) 구상성단 M15 거성들의 양성자 포획 합성 반응에 의한 원소 함량들과 산소 함량의 관계.

그러나 이러한 과정이 발생된다면 산소와 나트륨의 상반관계와 알루미늄과 마그네슘의 상반관계 및 질소와 나트륨의 상호관계를 설명할 수 있다. 이는 질소가 증가된 환경에서는 $N^{14}(\alpha, \gamma)F^{18}(\beta, \mu)O^{18}(\alpha, \gamma)Ne^{22}$ 의 과정을 통해 Ne^{22} 가 많이 발생되므로 나트륨의 함량이 증가되고, Mg^{26} 뿐만 아니라 Mg^{25} 에 중성자 포획으로 마그네슘이 감소되고 알루미늄이 증가되기 때문이다.

그러나 양성자 포획으로 산소가 질소로 연소되는 수소 연소 껍질에서 Ne^{22} 가 Na^{23} 으로 합성되고 Mg^{26} 이 Al^{27} 로 합성될 수 있음(Denisson & Denissenkova 1990)이 밝혀졌다. 이것에 대한 내용은 단원 4에서 다시 언급된다.

3. 질량이 작은 항성의 기본 진화

구상성단에서 주계열을 떠나는 전형적인 항성의 질량은 대략 $0.85 M_{\odot}$ 로 추정되며 수소 껍질 연소 층에 CNO 껍질 연소의 에너지를 갖는다. 이러한 항성이 일차 상승 거성열로 진화함에 따라 항성 내부의 표피에 대류층이 발달하게 되어 준거성 단계의 한 위치에서 이 대류층의 바닥이 가장 깊이 내부로 들어가게 된다. 그러나 이 바깥 대류층은 수소 껍질 연소 층의 CNO 연소가 일어나는 껍질 영역 밖에 존재한다. 그러나 진화가 RGB로 진행됨에 따라 이 대류층의 바닥은 CNO 연소 껍질 영역에서 더욱 멀어져 실제 연소 껍질과 대류층의 연결은 발생하지 않는다.

그림 12는 $0.9 M_{\odot}$, $[A/H] = -0.7$ 인 항성의 $\log(L/L_{\odot})$ 와 T_{eff} 도표에서의 진화경로다. 이것은 Sweigart & Gross (1978)와 Mengel et al. (1979)의 모형이다. 우

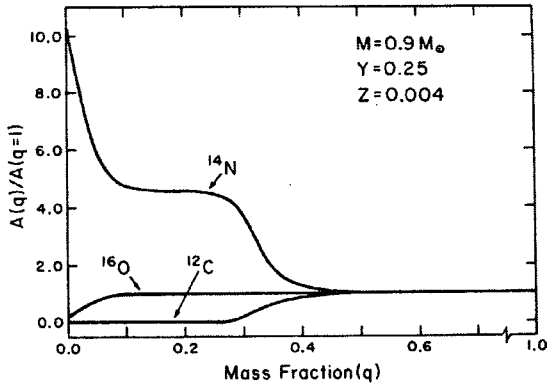


그림 13.—(Da Costa & Demarque 1982 에서 발췌) 금속 함량 $[A/Fe] = -0.7$, 질량 $M_{\odot} = 0.9$ 인 항성이 주계열을 떠난 진화 상태에서 내부 C, N, O 함량 분포. 함량 분포는 표면 함량을 기준으로 한 변화량과 항성 질량 단위로($q = 1$) 한 위치로 나타냈다.

측 그림은 진화에 따른 항성 내부에 수소 연소 껍질의 위치와 대류층의 위치를 항성 내부 질량의 크기로 표시한 것이다. 가장 푸른 전향점 A에서 주계열을 떠나 수평한 경로를 진화하여 B에 도달하면, 이때부터 바깥 대류층은 갑작스럽게 안쪽으로 확대되어 준거성 단계인 D에서 최대로 안쪽 깊숙히 도달하게 된다. 이때 D에서의 광도는 $\log L/L_{\odot} = 1.3$ 정도가 된다. 이 진화 과정 동안 수소 연소 껍질층도 외부로 퍼져 나온다.

주계열 전향점 A에서 내부 C, N, O 함량 분포는 Da Costa & Demarque (1982)에서 발췌된 그림 13과 같다. 일부 탄소가 질소로 연소된 물질이 $0.4M_{\odot}$ 영역까지 진출되는데 그림 12의 C점보다 더 진화하게 되면 이 CN 연소 물질은 표면으로 부상하게 된다. 표면의 대류층이 가장 깊어지는 D점에서 대류층은 $0.277 M_{\odot}$ 까지 도달하여 항성의 총질량의 1/3 되는 지역까지 닿게 된다. 이 질량점보다 외부에 있는 CN 연소 물질은 대류를 통한 혼합으로 표면의 원소 함량을 변화시킨다.

이 모형에서는 질소의 표면 함량이 초기 함량의 1.36배 증가되어 $\Delta [N/Fe] = \log (N/N_i) = 0.13$ dex 로 증가된다. 그러나 이 양은 구상성단에 CN-강한 거성에서 관측되는 질소의 증가량 ~ 0.7 dex에 훨씬 못미치는 값이다. 즉 기본 진화 모형으로는 성단에서 관측되는 질소의 증가를 설명할 수 없다.

질량이 작은 항성이 RGB에서 수소 껍질 연소가 계속 진행된다면 내부의 온도가 증가되어 축퇴 헬륨 중심핵도 서서히 가열되어 적색 거성열 끝(RGB Tip)에서 축퇴가 깨지면서 갑작스런 중심핵 연소가 발생하면서 헬륨 중심핵 플래쉬를 일으킨다. 이러한 적색 거성열 끝으로 가는 과정에서는 상당량의 질량 손실이 ($10^{-8} \sim 10^{-9} M_{\odot} / \text{년}$) 발생된다 (Rood 1973; Cohen 1976; Dupree et al. 1994).

수평열 가지의 광도와 온도의 분포를 이론적으로 설명하려면 그 전의 진화 단계인 RGB에서 평균 $0.2 M_{\odot}$ 의 질량 손실(Rood & Crocker 1985)이 요구된다.

적색 거성열 끝의 헬륨핵 플래쉬 이후에는 삼중 α 헬륨 연소핵이 항성의 에너지원이 되며 이 때 영년 수평열에 위치한다. 영년 수평열에서는 중심 헬륨핵 연소와 수소 껍질 연소가 일어난다. 진화가 계속됨에 따라 중심부에 탄소와 산소의 축퇴핵이 발생되고 그 주변에 헬륨 껍질 연소가 일어나 영년 수평열보다 밝아진다. 이 때에도 바깥 껍질에서 CNO 껍질 연소가 계속 일어난다.

금속 함량이 많은 항성일수록 수평열 가지에서의 위치가 적색으로 이동 (Faulker 1966; Sandage & Smith 1966)하므로 금속 함량을 수평열 가지 형태의 일차 계수라 한다. 같은 금속 함량을 갖는 구상성단들의 수평열 형태가 다르게 나타나는 2 단계의 분류가 관측되면서 그 원인을 총괄하여 수평열 가지 형태의 이차 계수라 한다. 이차 계수 문제를 보여주는 대표적인 구상성단 쌍은 M3과 M13, NGC 288과 NGC 362이다.

수평열 이후 상당수 HB 항성은 거의 CM도 상에서 RGB와 유사한 위치에 있는 점근 거성가지(AGB)로 진화한다. 수평열에서 헬륨 플래쉬에 해당되는 밝기에 도달하는 시간은 RGB에서 적색 거성열 끝에 이르는 시간의 20%에 불과하다. AGB 과정에서 발생하는 헬륨 껍질 연소는 열적으로 불안정하여 진화하는 동안 껍질 플래쉬를 일으킨다. 이 과정에서 추가적인 질량 손실이 발생된다. AGB 진화에서는 질량 손실과 함께 CNO 껍질 연소의 소멸에 따라 조용히 진화가 종말되거나 마지막 헬륨 껍질 플래쉬로 남은 껍질을 날리어 진화의 종말을 맞게 된다. 구상성단에서는 AGB의 최종 밝기가 RGB 끝과 유사하나, 젊은 종족이나 SMC의 헤일로에 보이는 종족과 왜소구형은하에서는 AGB의 광도가 RGB 끝의 광도보다 훨씬 밝은 영역까지 확대된다 (Suntzeff et al. 1986; Buonanno et al. 1985).

이러한 진화 과정을 보면 표면의 함량 변화는 일차 상승 RGB에서 발생된다. 이 경우 C/N/O 의 비를 3/1/8로 가정할 경우 C^{12}/C^{13} 비가 대략 20 ~ 30으로 감소되고, 탄소의 함량은 대략 30% 감소, 질소의 함량은 대략 80% 증가되는 것으로 추정(Iben 1974; Vandenberg & Smith 1988) 된다.

4. 깊은 혼합 과정

앞 단원에서 본 것처럼 진화의 기본 과정으로는 구상성단 거성에서 관측되는 질소 함량의 증가, 탄소 함량의 감소 및 극히 적은 C^{12}/C^{13} 의 비를 설명할 수 없기 때문에 Sweigart와 Mengel (1979)은 내부 회전 (Eddington 1925; Vogt 1925)에 의해 유발되는 자오면 순환 흐름(meridional circulation currents)에 의한 혼합 과정을 제안했다. 이것이 추가적인 혼합(Additional Mixing) 또는 깊은 혼합

(Deep Mixing)이며, 구상성단 항성들에서 나타나는 표면 함량의 변화를 설명하는 "원시 물질론"과 "진화론"에서 "진화론"의 기본 과정에 해당된다. 구상성단 거성에서는 기존의 수소 연소 껍질 영역의 가장자리 영역에 탄소가 질소로 연소되는 영역과 이보다 조금 안쪽으로 산소가 질소로 연소되는 영역이 발생되어 이 영역을 통과하는 순환에 의해 질소가 증가되고, 탄소와 산소가 감소되는 표면 함량의 변화가 생겨 관측되는 C, N, O를 설명하게 된다.

Sweigart와 Mengel의 이론에는 두가지 조건이 요구된다. 첫번째로는 이러한 자오선 흐름이 지나가는 영역에서는 평균 분자량의 구배가 존재하지 않아야 한다. 즉 순환 흐름과 CNO 연소 영역 사이에 평균 분자량의 구배가 있는 경우 순환 흐름이 지속될 수 없다. 실제 그림 12의 D점에서는 수소 연소 껍질층과 대류층 사이에 상당량의 평균 분자량의 구배가 존재하므로 순환은 수소 연소 껍질층이 밖으로 더 확장된 E점에 도달해야만 발생된다. 이 때 항성의 밝기는 $\log(L/L_{\odot}) = 1.7$ 이 된다. 두번째 조건은 순환 흐름이 도달하는 가장 깊은 지역의 온도가 충분히 높아야 RGB 진화 경로 시간에 비해 짧은 기간동안 탄소 \rightarrow 질소 연소, 산소 \rightarrow 질소 연소가 발생되어 표면 함량의 변화를 주게 된다. 따라서 이러한 표면 함량의 변화는 E점 이후의 진화 단계에 있는 항성에서만 기대할 수 있다. 이처럼 순환 기작은 CNO 연소 껍질과 대류층 사이에 있는 복사 영역에 순환을 도입하여 핵융합 반응이 발생하고 있는 지역과 표면을 연결한 것이다. 이러한 순환은 항성 회전의 결과라고 생각되며 전형적인 자오선 흐름 속도는 10^{-3}cms^{-1} 정도다. Smith & Tout (1992)는 이보다 빠른 여전히 상당히 느린 회전 흐름 속도를 적용하여 RGB 진화 단계에서 순환이 유지되는 것을 보였고, M92, M15와 NGC 6397에서 [C/Fe]이 감소되는 것을 순환에 의한 혼합으로 잘 설명하였다. 이 때 CNO 함량의 표면 변화가 보이는 시간 척도는 일차 상승 RGB의 진화 시간 척도 10^8 년에 비하여 훨씬 짧은 3×10^5 년으로 밝혀졌다.

Sweigart와 Mengel의 혼합 이론에서는 다음과 같은 관측 사실들을 예측하고 있다. 앞서 설명한 것처럼 CNO 함량의 표면 변화는 상당히 밝은 RGB 항성에 국한된다. 금속 함량이 증가할수록 수소 연소 껍질층에 평균 분자량의 구배가 없는 영역인, 탄소 또는 산소가 연소된 지역의 질량이 감소되므로 성단의 금속 함량이 증가할수록 CNO 표면 함량의 변화는 적어질 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 금속 함량이 감소될수록 탄소 연소 영역과 산소 연소 영역에 순환 흐름이 순조로와 지므로 연소된 물질이 더 많이 부상될 것으로 예측된다. 이러한 예측은 금속 함량이 적은 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -1$ 인 구상성단, M92, M15, NGC 6397, NGC 6752, M3, M13과 M5의 일부 관측 사실들과 잘 부합되므로 구상성단 거성들에 나타나는 표면 함량 변화가 "진화"에 의한 결과라는 주장을 뒷받침한다. 특히 금속 함량이 적은 M92와 M15 (Pilachowski 1989; Sneden et al.

1991)와 중간 정도 금속 함량을 갖는 M13 (Pilachowski 1989; Brown & Wallerstein 1992; Kraft et al. 1993)에 밝은 거성들의 산소 고갈과 질소의 증가는 이론과 잘 부합된다. 더욱이 성단의 금속 함량이 증가할 수록 깊은 순환이 감소되는 것은 47 Tuc (Brown & Wallerstein 1992)와 M71 (Sneden et al. 1994)의 거성에서 탄소 감소가 적고 산소 고갈도 적은 사실들과 일치한다. 그러나 이 이론은 M92와 같은 성단에서 막 주계열을 떠나는 항성에 나타나는 탄소의 감소를 설명할 수는 없다. 또한 구상성단의 거성에서 어느 정도의 각운동량이 요구된다. 이는 거성 전 단계인 주계열 상에서의 각속도가 $6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 정도가 되어야 하며 강제 회전체를 가정하면 주계열에서의 표면 회전 속도가 60km s^{-1} 를 필요로 하게 된다. 초기 주계열에 도달하는 항성에서는 이 정도의 회전 속도를 갖을 수 있지만, 이 속도는 구상성단의 나이에 비해 아주 짧은 10^7 년 내로 감소된다.

이 이론에서는 비교적 얇은 혼합으로 C^{12} 에 양성자가 포획된 C^{13} 이 표면으로 부상되어 그 비가 평형값 4 ~ 10을 갖게 된다.

이미 앞에서 언급한 것처럼 질량이 작은 항성에는 나트륨이 내온에 중성자 포획으로 발생하거나, 알미늄이 마그네슘에 중성자 포획으로 생기기 위한 중성자의 공급원이 없다는 것이 밝혀졌다. 따라서 일부 학자들(Cottrell & Da Costa 1981)은 성단 거성의 나트륨과 알미늄 함량을 설명하기 위하여 "원시 물질론"을 주장했었다. 그러나 질량이 작은 거성에서 양성자 포획으로 산소가 질소로 바뀌는 수소 연소 껍질층에서 Ne^{22} 가 Na^{23} 으로 되어 표면으로 부상될 수 있음(Denissenkov & Denissenkova 1990)이 밝혀지고 ω Cen의 관측 결과 (Paltoglou & Norris 1989)에 적용하여 [Na/Fe]와 [N/Fe]의 상관 관계가 설명되었다.

Langer et al. (1993)은 금속 함량이 작은 Sweigart-Mengel의 적색 거성 모형에서 산소 연소 껍질 바로 밑으로까지 혼합이 발생될 경우 어떤 결과가 발생하는가를 연구했다. 이 모형에는 연쇄 핵반응을 통해 수소에서 칼슘 사이의 85개 동위원소의 변화를 연구했다. 수소의 감소는 5%로 제한하여 혼합에 의한 수소 껍질 연소층에 새로운 물질의 공급을 적게하여 CM도 상의 위치 변화를 최소화했다. 그 결과 수소는 6만년이 지나면 5%가 감소되며 혼합의 결과로 O^{16} , Ne^{22} , Mg^{25} , Mg^{26} 는 감소되며, N^{14} , Na^{23} , Al^{27} 이 크게 증가되는 것을 밝혔다. 이러한 과정은 진화가 진행됨에 따라 수소 연소 껍질이 깊어지면서 사라지지만 그 기간은 대략 26만년이므로 표면 함량 변화가 충분히 나타날 수 있음을 보여주고 있다. 6만년이란 기간은 또한 수평열과 같은 밝기의 적색 거성에서 적색 거성열 끝까지 진화하는 시간에 비해 매우 짧은 시간이다. 실제 성단에 양성자 포획에 의한 원소들이 보이는 거성들은 산소 함량 변화가 관측되는 거성들과 같은 밝기의 CM도 영역에 있다.

질량이 작고 금속함량이 적은 구상성단의 적색거성에

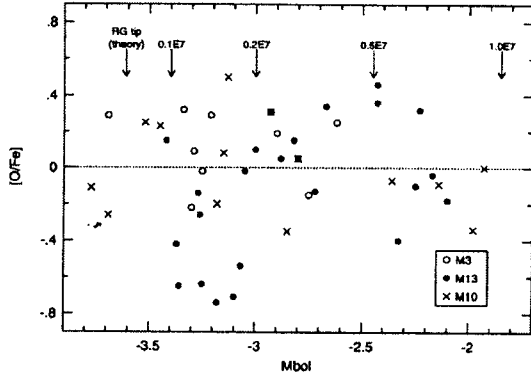


그림 14.—구상성단 M3, M13 과 M10에 거성들의 절대 복사 등급에 따른 산소 함량 분포. $M_{bol} \leq -3$ 에서 M13 거성들은 M3과 M10에 거성들보다 현저하게 감소된 산소 함량을 보인다.

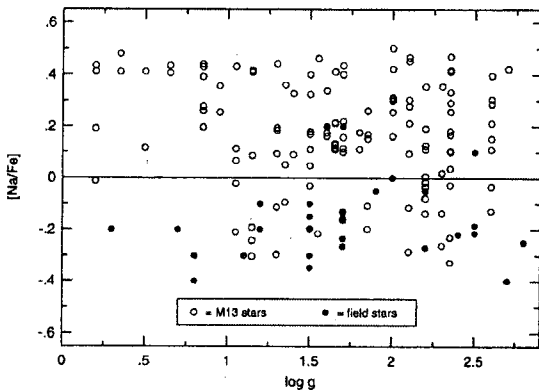


그림 15.—(Pilachowski et al 1996 에서 발췌) M13 거성과 시야 헤일로 거성들의 표면 중력에 따른 나트륨 함량 분포. $\log g \leq 1$ 인 영역에서 M13 거성들이 거의 전부 $[Na/Fe] \geq 0$ 을 보인다.

수소 연소 껍질에서는 산소가 질소로, 네온이 나트륨으로 전환된다. 따라서 수소 연소 껍질과 대류층이 충분한 순환을 일으키면 표면에서 산소의 감소와 질소의 증가, 나트륨의 증가를 기대하게 된다. 그림 14는 M3, M13 과 M10 거성들의 절대 등급에 따른 산소 함량 분포다. M3 과 M10의 거성들에 비하여 M13에 거성들의 산소 함량 감소가 밝은 거성 영역에서 급격히 심한 것을 볼 수 있다. 즉 M3과 M10보다 M13에 있는 밝은 거성에서 깊은 혼합이 일어났음을 의미한다.

이것을 그림 15의 M13 항성들의 표면 중력에 따른 $[Na/Fe]$ 분포와 비교해보자. M13 항성들이 시야 헤일로 항성들보다 전반적으로 나트륨이 증가된 항성이 더 많을 뿐더러 $\log g \leq 1$ 항성들은 거의 전부 나트륨이 증가된 것을 보여준다. 이로서 이 밝은 거성들의 나트륨 증가와 산소 감소는 깊은 혼합의 결과로 추정되며 그림 10과 같이 산

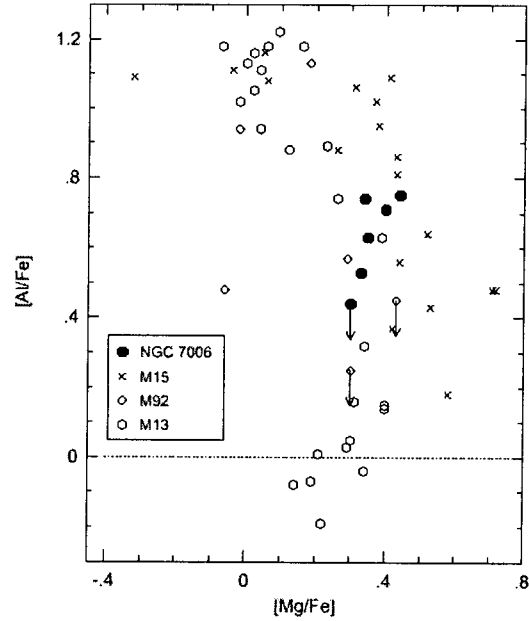


그림 16.—(Kraft et al. 1997에서 발췌) 마그네슘과 알루미늄의 상반관계. 구상성단 M92, M15, NGC 7006과 M13에 거성들의 마그네슘과 알루미늄 함량 분포.

소와 나트륨의 상반 관계를 갖게 된다.

마그네슘이 양성자 포획으로 알루미늄이 되는 것은 네온이 나트륨으로 된 것과 같이 수소 연소 껍질에 산소가 질소로 연소되는 영역에서 발생된다. 혼합이 깊어짐에 따라 탄소는 질소로, 산소가 질소, 네온은 나트륨, 마그네슘이 알루미늄으로 (Langer & Hoffman 1995) 바뀌어진 물질이 표면에 나타난다. 이처럼 양성자 포획에 의한 Ne-Na 반응, Mg-Al 반응 등, 핵융합 반응 네트워크를 포함하는 이론 모형(Cavallo et al. 1996; Langer et al. 1997)에서 혼합이 아주 깊어지면 Mg^{24} 에서 Al^{27} 를 만들기 때문에 그림 16과 같이 관측된 알루미늄과 마그네슘의 상반관계를 갖게 된다. 그림 16은 금속 함량이 적은 구상성단 M92와 M15, 중간 정도의 금속 함량을 갖는 NGC 7006과 M13 거성들의 함량 분포다. 성단 거성들은 초기 생성시에 마그네슘 함량 $[Mg/Fe] = +0.5$ 와 알루미늄 함량 $[Al/Fe] = 0.0$ 을 가지는 것으로 추정된다. 항성들이 상당량의 $[Al/Fe]$ 차이를 보이는 반면 상대적으로 적은 $[Mg/Fe]$ 의 차이를 보이고 있다. 이는 처음부터 마그네슘이 알루미늄보다 많으므로 약간의 마그네슘 변화로도 많은 알루미늄의 변화를 일으키기 때문이며 알루미늄 변화의 기원이 깊은 혼합과 위배되는 것은 아니다.

따라서 "진화론"에 깊은 혼합은 구상성단 거성들의 탄소, 질소, 산소, 나트륨, 마그네슘과 알루미늄의 분포를 비교적 잘 설명한다.

5. 수평열의 이차 계수 문제

구상성단 M13에 있는 일부 거성에서는 혼합이 충분히 깊은 지역까지 도달하여 마그네슘이 알루미늄으로 전환될 뿐만 아니라 수소 연소의 결과 상당량의 수소가 헬륨으로 전환된 지역까지 혼합된다. 따라서 깊은 혼합의 결과 표면의 $[Mg/Fe]$ 이 감소될 뿐만 아니라 $[He/H]$ 이 증가된다. 증가된 $[He/H]$ 은 결국 거성 다음 단계의 진화인 영년 수평열의 위치에 영향을 주게 된다. 따라서 M13의 수평열은 아주 푸른 쪽으로 확대되는 반면 같은 금속함량을 가지면서도 혼합이 깊게 일어나지 않는 구상성단에서는 상대적으로 적색 쪽의 수평열이 보일 것이다.

구상성단의 수평열 모양은 일차 계수인 금속 함량 (Sandage and Wildey 1967; van den Bergh 1967)이 결정하지만 같은 금속 함량을 가지는 구상성단들이 다른 형태의 수평열을 보이는 이차 계수 문제가 있다.

가장 대표적인 이차 계수 구상성단 쌍은 M13과 M3이다. 이들의 철족 금속 함량이 $[Fe/H] \sim -1.6$ 이고 금속 함량의 차이는 최대로 ~ 0.1 dex이하(Kraft et al 1993)로 추정된다. 두 성단은 색-등급도에서 적색 거성열(RGB)이 아주 유사하지만 수평열 형태가 현저히 다르게 나타난다. M3의 수평열은 $B - V = -0.2$ 부터 적색 거성과 만나는 영역까지 거의 균일하게 분포되어 있으며 200 여개의 RR Lyrae 변광성을 포함하고 있다. 반면에 M13의 수평열은 RR Lyrae 변광성 위치보다 적색 쪽으로는 별이 없는 반면 수 개의 RR Lyrae 변광성을 가졌으며 모든 수평열 항성은 RR Lyrae 불안정대보다 온도가 높은 위치에 있다. 이처럼 같은 철족 금속 함량을 가지며 수평열 형태를 다르게 만드는 계수를 통틀어 이차 계수라 한다.

지난 30여년 동안 이차 계수로 나이, He 함량, 진화과정의 일차 상승 적색 거성열 단계에서의 질량 손실등이 제안되어 왔었다. 그 중 성단의 나이가 가장 유력한 이차 계수로 논의되어 왔다 (Sear & Zinn 1978; Preston, Shectman, & Beers 1991; Lee, Demarque, & Zinn 1988, 1994). 헬륨 핵이 연소되는 적색 거성에서 질량이 클수록 다시 말해서 주계열 단계에서 더 젊었던 항성일수록 수평열 가지의 적색 부분에 위치하게 된다. 즉 주계열 전향점의 위치가 높을수록 수평열 가지는 적색으로 치우친다. 이처럼 성단의 나이 차이가 이차 계수가 되면 우리 은하 역사에 대한 새로운 문제가 야기된다. 왜냐하면 금속 함량에 비해 많은 적색 수평열 항성을 포함하는 구상성단이 바깥은하의 헤일로에서 발견되기 때문이다. 이것은 은하의 헤일로는 은하의 중심으로 갈수록 나이가 많아진다는 것을 의미한다. 분명히 아주 바깥 헤일로에 있는 구상성단 Pal 12, Rup 106, Arp 2, Ter 7은 전형적인 구상성단보다 3-4십 억년 젊다 (Gratton & Ortolani 1988; Stetson et al. 1989; Buonanno et al 1990; Da Costa, Armandroff & Norris 1992).

그러나 나이가 유일한 이차 계수나 하는 문제는 아직도

많은 논란이 있다. Richer et al (1996)은 CCD로 색-등급도가 잘 관측된 $[Fe/H] \leq -1$ 인 35개의 구상성단에서 나이 차이가 십억년을 넘을 수 없다는 것을 보였다. 물론 두꺼운 원반에 금속 함량이 풍부한 구상성단의 경우 이보다 다소 젊을 것이다. 또한 바깥 헤일로에 보이는 4개의 구상성단은 마젤란 스트림과 연관된 운동학적 특성을 보여주므로 이들은 우리은하로 끌려오는 성단으로 해석했다. 따라서 원래 헤일로 구상성단 중에는 나이 구배가 존재하지 않으며 나이가 유일한 이차 계수라는 증거가 없다는 결론이다. Stetson, VandenBerg, & Bolte (1996)는 이차계수 현상이 분명히 보이는 구상성단들의 자세한 색-등급도를 비교하여 유사한 결론을 내렸다.

나이가 모든 경우에 이차 계수 문제를 해결하지 못한다면 또다른 이차 계수는 무엇인가? Kraft et al. (1998)은 고분산 분광 연구에서 나타나는 M3 (Kraft et al. 1993, 1995)과 M13 (Kraft et al. 1997)의 특성에서 또다른 이차 계수의 실마리를 발견하여 이들과 유사한 NGC 7006의 고분산 연구를 통하여 검증을 시도하였다. M3과 M13 성단에 일차 상승 적색 거성 단계에 있는 항성들의 스펙트럼에서 Ne이 소모되어 Na이 새롭게 합성되고, 탄소와 산소가 질소로 된 물질들 (Denissenkov & Denissenkova 1990; Langer, Hoffman, & Sneden 1993; Langer & Hoffman 1995; Denisenkov, Weiss & Wagenhuber 1997)이 바깥 표피에 나타나는 것을 알았다. 그러나 이러한 합성 과정이 M3의 거성보다는 M13 거성에서 훨씬 많이 일어난 것을 볼 수 있다. 앞의 그림 14에서 보듯이 M3의 경우 가장 밝은 10개의 거성 중에서 3개를 제외하고 모두 $[O/Fe] \geq 0.0$ 으로 산소 고갈이 매우 적은 반면, M13의 경우 가장 밝은 10개의 거성 중 3개를 제외하고 모두 $[O/Fe] \leq -0.2$ 로 상당히 산소가 고갈되었다. 뿐만 아니라 4개의 항성은 $[O/Fe] \leq -0.6$ (Kraft et al. 1993, 1995, 1997)의 극심한 고갈 현상을 보이고 있다. M13의 거성은 질소와 나트륨의 상호 관계, 나트륨과 산소의 상반관계, 알루미늄과 마그네슘의 상반관계를 보일 뿐만 아니라 그림 16에서 보듯이 특히 마그네슘이 알루미늄으로 전환되는 상당량의 양성자 포획의 합성이 이루어졌음을 (Langer & Hoffman 1995; Cavallo, Sweigart, & Bell 1996, 1998; Langer, Hoffman, & Zaidins 1997; Shetrone 1996; Kraft et al. 1997) 시사한다. 비록 M3 거성들의 경우 마그네슘 함량은 3개의 거성, 알루미늄 함량은 1개의 거성에서만 연구되었으나 이 함량들은 M13의 거성들과 달리 Mg가 Al로 되는 양성자 포획이 상당히 적었음을 시사하며 이는 M3 거성의 다른 원소들 O, N, Ne,과 Na의 특성과 잘 부합된다. 물론 M3 거성들에 대한 Mg 과 Al 함량 연구가 더 요구되지만 M3 거성은 M13 거성에 비해 양성자 포획 과정에 의한 Al 형성 물질이 적은 것에는 틀림이 없다.

M3 거성들의 함량 분포와 M13 거성들의 함량분포 특성의 차이는 "원시 물질론" 과 "진화론" 에 의한 원인으로

해석될 수 있다. "원시 물질론"인 경우 M3과 M13의 생성 물질은 뚜렷이 다른 양성자 포획 과정의 핵합성 환경을 겪은 물질에서 생성된 것이다. "진화론"에 의한 경우 질량이 작은 모든 적색 거성의 내부에 존재하는 수소 연소 껍질에서 양성자 포획 과정이 이루어졌으며, 표면 함량 차이를 유발하는 것은 M13 거성들이 M3의 거성들보다 더 효율적으로 안쪽에 물질을 표면으로 부상시킨 경우이다.

M13에서는 "진화론"을 지지하는 직접적인 관측 증거가 있다. 이는 항성이 적색 거성 끝으로 진화함에 따라 그림 14에서 보듯이 산소가 고갈되고, 그림 15에서는 나트륨이 상당히 증가된 현상이, 일차 상승 거성단계의 $\log g \sim 1$ 이상에서 갑자기 보이는 점이다. 결국 이러한 특이한 분포는 수소 연소 껍질에서 생성되는 물질이 혼합 과정을 통하여 표면으로 부상된 결과로 M3의 거성보다 M13의 거성에서 더 효율적으로 깊은 혼합이 발생했던 것이 원인으로 추론된다. 혼합의 정도 차이를 주는 원인은 항성들의 각운동량(Sweigart 1997)으로 생각되며, M13에 수평열 항성의 회전 속도가 $v \text{ sini} \sim 40 \text{ km s}^{-1}$ 까지 (Peterson 1983; Peterson, Rood, & Crocker 1995) 관측되고 있는데 비해 M3의 수평열 항성의 회전 속도는 모두 20 km s^{-1} 보다 적은 것으로 관측된 점은 "진화론"을 뒷받침한다.

따라서 Sweigart-Mengel의 적색 거성 모형을 따르면, 수소 연소 껍질층에서는 상층에 탄소가 질소로 연소하는 층과 그 아래 산소가 질소로 연소하고, 양성자 포획에 의해 네온이 나트륨, 마그네슘이 알루미늄으로 연소하는 층이 있다. 그러나 이러한 층은 기본 진화로는 바깥 대류층과는 연결되지 않으며 추가적인 혼합이 발생될 경우 이러한 층에서 생긴 물질이 표면으로 부상된다. 혼합이 얇은 경우, 수소 연소 껍질의 상층에서 생기는 양성자 포획에 의한 C^{12} 가 C^{13} 으로 합성되어 표면의 C^{12}/C^{13} 의 비를 갖게 되며, 혼합이 깊어짐에 따라 $C \rightarrow N$, $O \rightarrow N$, $Ne \rightarrow Na$, $Mg \rightarrow Al$ 으로 표면 물질이 바뀌게 된다. 최근 개선된 모형에서 $Mg \rightarrow Al$ 으로 바뀌는 깊은 혼합이 발생된 경우 O가 극도로 소진되며, 이 같은 깊은 혼합은 수소가 연소되어 생성된 헬륨을 표면으로 부상시키는 것으로 밝혀졌다. 그 결과 표면의 $[He/H]$ 의 비가 상당히 증가되고 이는 HB의 유효온도를 증가시키는 이차계수의 효과를 발생(Sweigart 1997)시킨다. 이 적색 거성 모형에서는 적색 거성 단계에서의 질량 손실을 어떻게 가정하더라도 $[He/H]$ 의 표면 함량 증가는 HB 항성의 유효온도를 증가시키는 것으로 밝혀졌다. 이는 일차 상승 적색 거성 끝의 단계에서 He의 질량비가 커지게 되면 청색의 HB가 발생됨을 의미한다.

이러한 경우는 산소가 극도로 감소되고 마그네슘이 거의 모두 알루미늄으로 바뀐 경우를 의미한다. 청색의 HB를 갖고 산소가 상당히 고갈되고, 알루미늄이 예외적으로 많으며 마그네슘이 적은 특성을 보이는 성단은 NGC 6752 (Shetrone 1990), ω Cen (Norris & Da Costa 1995, 1995; Zuck-

er, Wallerstein & Brown 1996)과 M15 (Snedden et al. 1997)이다. 이중 NGC 6752가 M13과 M3 구상성단과 유사한 금속함량을 가진 성단이다. ω Cen은 금속함량이 차등 금속함량의 특성(-1.8 ~ -0.8)을 보이고, M15는 이들보다 훨씬 더 작은 금속함량을 갖는다. 특히 ω Cen은 최근 연구 결과들 (Hughes & Wallerstein 2000; Dinescu et al. 1999; Lee et al. 1999)에 의하면 우리 은하로 합병되는 왜소은하의 일부라는 결과가 있다. 따라서 NGC 6752의 거성에는 M13의 거성과 유사한 깊은 혼합을 기대할 수 있다.

Kraft et al. (1998)은 M13, M3과 유사한 금속 함량을 갖고 주로 적색 HB를 갖고 있는 NGC 7006 거성들의 분광 연구를 하였다. 이 성단의 거성들은 그림 10의 산소 함량 분포에서 보듯이 M13에 비해 혼합이 비교적 깊지 않으므로 $[Mg/Fe]$ 과 $[He/H]$ 을 변화시킬 정도는 아니지만 표면의 $[Al/Fe]$ 의 비는 변화되었다. 따라서 이 성단이 M13과 비교하여 주로 적색의 HB를 갖는 것은 혼합의 정도가 다르기 때문으로 해석될 수 있으므로 깊은 혼합이 이차계수가 될 수 있음을 시사한다.

한편 또다른 이차계수 쌍인 구상성단 NGC 288과 NGC 362의 분광 연구 (Shetrone & Keane 2000)에서 두 성단 거성들이 갖고 있는 원소 함량 분포는 두 성단에서의 혼합 정도가 유사하다는 것을 시사했다. 따라서 이 경우는 깊은 혼합으로 두 성단의 HB 형태를 특징지을 수 없다는 것을 시사한다.

따라서 깊은 혼합이 모든 성단의 이차계수는 될 수 없지만, 이차계수 중 하나가 될 수 있다는 증거들이 제시되기 시작했다.

6. 결론과 요약

구상성단 거성들의 표면 원소 함량 C, N, O, Na, Mg, Al의 함량은 항성마다 다르다는 것이 오래 전부터 알려져왔다. 그 원인으로 성단이 생성될 때부터 불균질한 물질에서 생성되었다는 "원시 물질론"과 항성의 진화과정에서 추가로 혼합이 발생되어 내부에서 생성된 물질의 일부가 표면으로 부상되어 발생되었다는 "진화론"이 있다. 거성에서 관측되는 함량의 변화들과 주계열을 막 떠난 항성들의 함량 특성을 고려하면 이러한 변화는 "원시 물질론"과 "진화론"이 모두 요구된다. 금속 함량이 큰 성단일수록 "진화론"에 의한 영향이 금속함량이 적은 성단 항성에 비하여 적은 것으로 추정된다.

관측되는 상기 원소함량들은 서로 특이한 관계를 보이고 있다. 탄소와 질소, 산소와 질소, 산소와 나트륨, 알루미늄과 마그네슘은 서로 상반된 관계를 보이고, 질소와 나트륨은 서로 같은 경향으로 변화한다. 각 성단에 평균적인 탄소와 질소의 함량은 그 변화된 정도가 금속 함량이 적어질수록 심해지는 경향을 보이는 반면, 같은 금속 함량의 시야

헤일로 항성과 비교하여 현저하게 큰 변화를 보이고 있다. 성단에서 각 원소 함량의 변화 정도는 성단마다 크게 다르다. 특히 M 13 구상성단의 거성들은 산소 함량의 변화가 $[O/Fe] = +0.5$ 에서 -0.8 까지 크게 변화하는 것이 밝혀졌다.

작은 질량의 항성이 거성단계로 진화하는 과정에서 내부 수소 연소 껍질 영역에 탄소가 질소로 연소되는 층과 산소가 질소로 연소되는 층이 존재하며 이 층과 바깥의 대류층은 기본 진화 과정으로는 연결이 이루어지지 않는다. 따라서 회전으로 인해 발생할 것으로 추정되는 자오면 흐름에 의한 혼합이 발생되면 이러한 층에서 생성된 물질이 표면에 부상하게 된다. 산소가 질소로 연소되는 층 바닥에서는 양성자 포획으로 네온이 나트륨으로, 마그네슘이 알루미늄으로 합성된다. 따라서 혼합이 깊어질수록 이러한 함량의 변화를 보게되며, 특히 마그네슘의 변화가 큰 경우 상당히 깊은 혼합이 발생되고 있음을 시사한다. 이 경우 일부 수소가 헬륨으로 연소된 물질이 표면에 부상되어 표면의 $[He/H]$ 의 비를 증가시킬 수 있다.

표면의 $[He/H]$ 비의 증가는 적색 거성열 다음 단계인 수평열에서의 위치에 영향을 주게 된다. 즉 또다른 이차 계수인 셈이다. 실제 M13과 NGC 7006을 비교하면 M13에서 나타나는 깊은 혼합에 비해 NGC 7006 은 비교적 얕은 혼합이 발생된 것(Kraft et al 1998) 으로 밝혀졌다. 이는 두 성단에서 HB 형태가 다르게 나타나는 것을 혼합의 정도가 다르기 때문으로 해석할 수 있음을 시사한다. 반면에 NGC 288과 NGC 362의 분광 연구에서는 두 성단의 혼합 정도가 유사하다는 결과를 얻었다. 이 이차계수 쌍의 경우는 혼합이 이차 계수가 될 수 없음을 시사한다.

따라서 모든 성단의 이차 계수를 혼합으로 다 설명할 수는 없으나, 또 하나의 이차 계수로 혼합 또는 이로 인한 $[He/H]$ 의 표면 변화가 제시되었다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 2000년도 천체 분광학 (2000년 7월 6 - 7일) 워크숍의 초청 논문이다. 본 논문의 그림 준비를 해 준 황세현군에게 감사의 마음을 표하고 싶다.

참고문헌

- Armosky, B. J., Sneden, C., Langer, G. E., & Kraft, R. P. 1994, *AJ*, 108, 1364
 Barbuy, B. 1988, *A&A*, 191, 121
 Bell, R. A. 1984, *PASP*, 96, 518
 Bell, R. A., Briley, M. M., & Smith, G. H. 1990, *AJ*, 100, 187
 Bell, R. A., Hesser, J. E., & Cannon, R. D. 1983, *ApJ*, 269, 580
 Briley, M., Bell, R. A., Hoban, S., & Dickens, R. J. 1990, *ApJ*, 359, 307
 Briley, M. M., Hesser, J. E., & Bell, R. A. 1991, *ApJ*, 373, 482
 Briley, M. M., Smith, V. V., King, J., & Lambert, D. L. 1997, *AJ*, 113, 306
 Brown, J. A., & Wallerstein, G. 1992, *AJ*, 104, 1818
 Brown, J. A., Wallerstein, G., & Oke, J. B. 1990, *AJ*, 100, 1561
 Brown, J. A., Wallerstein, G., & Oke, J. B. 1991, *AJ*, 101, 1693
 Buonanno, R., Buscema, G., FusiPecci, F., Richer, H. B., & Fahlman, G. G. 1990, *AJ*, 100, 1811
 Buonanno, R., Corsi, C. E., Fusi Pecci, F., Hardy, E., & Zinn, R. 1985, *A&A*, 152, 65
 Carbon, D. F., Barbuy, B., Kraft, R. P., Friel, E. D., & Suntzeff, N. B. 1987, *PASP*, 99, 335
 Carbon, D. F., Langer, G. E., Butler, D., Kraft, R. P., Trefzger, C. F., Suntzeff, N. B., Kemper, E., & Romanishin, W. 1982, *ApJS*, 49, 207
 Cavallo, R. M., Pilachowski, C. A., & Rebolo, R. 1997, *PASP*, 109, 226
 Cavallo, R. M., Sweigart, A. V., & Bell, R. A. 1996, *ApJ*, 464, 79
 Cavallo, R. M., Sweigart, A. V., & Bell, R. A. 1998, *ApJ*, 492, 575
 Cohen, J. G. 1976, *ApJ*, 203, L127
 Cohen, J. G. 1978, *ApJ*, 223, 487
 Cohen, J. G. 1979, *ApJ*, 231, 751
 Cohen, J. G. 1980, *ApJ*, 241, 981
 Cottrell, P., & DaCosta, G. 1981. *ApJ*, 245, L79
 Da Costa, G. S., & Armandroff, T. E., & Norris, J. E. 1992, *AJ*, 104, 154
 Da Costa, G. S., & Cottrell, P. L. 1980, *ApJ*, 236, 83
 Da Costa, G. S., & Demarque, P. 1982, *ApJ*, 259, 193
 Denissenkov, P. A., & Denissenkova, S. N. 1990, *Soviet Astron. Lett.*, 16, 275
 Denissenkov, P. A., Weiss, A., & Wagenhuber, J. 1997, *A&A*, 320, 115
 Dickens, R. J., Croke, B., Cannon, R., & Bell, R. A. 1991, *Nature*, 351, 212
 Dinescu, D. I., Girard, T. M., & Van Altena, W. F. 1999, *AJ*, 117, 1792
 Dinescu, D. I., Van Altena, W. F., Girard, T. M., & Lopez, C. E. 1999, *AJ*, 117, 277
 Drake, J. J., Smith, V. V., & Suntzeff, N. B. 1992, *ApJ*, 395, L795
 Dupree, A. K., Hartmann, L., Smith, G. H., Rodgers, A. W., Roberts, W. H., & Zucker, D. B. 1994, *ApJ*, 421, 542
 Eddington, A. S. 1925, *Observatory*, 48, 73
 Edvardsson, B., Andersen, J., Gustafsson, B., Lambert, D. L., Nissen, P. E., & Tomkin, J. 1993, *A&A*, 275, 101
 Faulkner, J. 1966, *ApJ*, 144, 978

- Friel, E., Kraft, R. P., Suntzeff, N. B., & Carbon, D. F. 1982, *PASP*, 94, 873
- Gratton, R. G. 1987, *A&A*, 177, 177
- Gratton, R. G., & Ortolani, S. 1988, *A&AS*, 73, 137
- Gratton, R. G., & Ortolani, S. 1989, *A&A*, 211, 41
- Hesser, J. E., Hartwick, F. D. A., & McClure, R. D. 1976, *ApJ*, 207, 113
- Hughes, J., & Wallerstein, G. 2000, *AJ*, 119, 1225
- Iben, I. 1974, *ARA&A*, 12, 215
- Kraft, R. P. 1994, *PASP*, 106, 553
- Kraft, R. P., Sneden, C., Langer, G. E., & Prosser, C. F. 1992, *AJ*, 104, 645
- Kraft, R. P., Sneden, C., Langer, G. E., & Shetrone, M. D. 1993, *AJ*, 106, 1490
- Kraft, R. P., Sneden, C., Langer, G. E., Shetrone, M. D., & Bolte, M. 1995, *AJ*, 109, 2586
- Kraft, R. P., Sneden, C., Smith, G. H., Shetrone, M. D., & Fulbright, J. 1998, *AJ*, 115, 1500
- Kraft, R. P., Sneden, C., Smith, G. H., Shetrone, M. D., Langer, G. E., & Pilachowski, C. A. 1997, *AJ*, 113, 279
- Kraft, R. P., Suntzeff, N. B., Langer, G. E., Trefzger, C. F., Friel, E., Stone, R. P. S., & Carbon, D. F. 1982, *PASP*, 94, 55
- Langer, G. E., Bolte, M., Prosser, C. F., & Sneden, C. 1993, *ASP Conf. Ser.*, 48, 206
- Langer, G. E., & Hoffman, R. 1995, *PASP*, 107, 1177
- Langer, G. E., Hoffman, R., & Sneden, C. 1993, *PASP*, 105, 301
- Langer, G. E., Hoffman, R., & Zaidins, C. S. 1997, *PASP*, 109, 244
- Langer, G. E., & Kraft, R. P. 1984, *PASP*, 96, 339
- Langer, G. E., Kraft, R. P., & Friel, E. D. 1985, *PASP*, 97, 373
- Langer, G. E., Suntzeff, N. B., & Kraft, R. P. 1992, *PASP*, 104, 523
- Lee, S.-G. 1999, *AJ*, 118, 920
- Lee, Y. W., Demarque, P., & Zinn, R. 1988, *IAUS*, 126, 505
- Lee, Y. W., Joo, J. M., Sohn, Y. J., Rey, S. C., Lee, H. C., & Walker, A. R. 1999, *Nature*, 402, 55
- Luck, R. E., & Bond, H. E. 1985, *ApJ*, 242, 559
- McWilliam, A., Geisler, D., & Rich, R. M. 1992, *PASP*, 104, 1193
- McWilliam, A., & Rich, R. M. 1994, *ApJS*, 91, 749
- Mengel, J. G., Demarque, P., Sweigart, A. V., & Gross, P. G. 1979, *ApJS*, 40, 733
- Minniti, D., Peterson, R., Geisler, D., & Clarra, J. J. 1996, *ApJ*, 470, 953
- Norris, J. 1981, *ApJ*, 248, 177
- Norris, J. 1988, in *IAU Symposium*, No. 126, ed. J. E. Grindlay & A. G. Davis Philip (Dordrecht, Kluwer), p. 93
- Norris, J., & Da Costa, G. S. 1995a, *ApJ*, 441, 81
- Norris, J., & Da Costa, G. S. 1995b, *ApJ*, 447, 680
- Norris, J., & Smith, G. H. 1981, *apgc. conf.*, 109
- Norris, J., & Smith, G. H. 1984, *ApJ*, 287, 255
- Norris, J., & Cottrell, P. L. 1979, *ApJ*, 229, 69
- Norris, J., & Freeman, K. C. 1982, *ApJ*, 254, 143
- Norris, J., Cottrell, P. L., Freeman, K. C., & DaCosta, G. S. 1981, *ApJ*, 244, 205
- Osborn, W. 1971, *Obs*, 91, 223
- Paltoglou, G. 1990, *BAAS*, 22, 1289
- Paltoglou, G., & Norris, J. 1989, *ApJ*, 336, 185
- Peterson, R. 1983, *ApJ*, 275, 737
- Peterson, R., Rood, R. T., & Crocker, D. A. 1995, *ApJ*, 453, 214
- Pilachowski, C. 1986, *ApJ*, 300, 289
- Pilachowski, C. 1989, in *The Abundances Spread within Globular Clusters*, ed. G. Cayrel de Strobel, M. Spite, & T. L. Evans (Paris, Obs. de Paris), p. 1
- Pilachowski, C., Sneden, C., Kraft, R. P., & Langer, G. E. 1996, *AJ*, 112, 545
- Pilachowski, C., Willmarth, D. W., Halbedel, E. M., Mathieu, R. D., Hobbs, L. M., Milkey, R. W., & Saha, A. 1986, *PASP*, 98, 1321
- Preston, G. W., Shectman, S. A., & Beers, T. C. 1991, *ApJS*, 76, 1001
- Richer, H. B., Harris, W. E., Fahlman, G. G., Bell, R. A., Bond, H. E., Hesser, J. E., Holland, S., Pryor, C., Stetson, P. B., Van den berg, D. A., & Van den berg, S. 1996, *ApJ*, 463, 602
- Rood, R. T. 1973, *ApJ*, 184, 815
- Rood, R. T., & Crocker, D. A. 1985, in *ESO Workshop on Production and Distribution of CNO Elements*, ed. I. J. Danziger, F. Matteucci, & K. Kjar (Garching, ESO), p. 61
- Sandage, A. R., & Smith, L. L. 1966, *ApJ*, 144, 886
- Sandage, A. R., & Wildey, R. 1967, *ApJ*, 150, 469
- Searle, L., & Zinn, R. 1978, *ApJ*, 225, 357
- Shetrone, M. D. 1996a, *AJ*, 112, 1517
- Shetrone, M. D. 1996b, *AJ*, 112, 2639
- Shetrone, M. D., & Keane, M. J. 2000, *AJ*, 119, 840
- Smith, G. H. 1983, *AJ*, 88, 410
- Smith, G. H. 1987, *PASP*, 99, 67
- Smith, G. H., & Norris, J. 1982, *ApJ*, 254, 149
- Smith, G. H., & Norris, J. 1983, *ApJ*, 264, 215
- Smith, G. H., & Bell, R. A. 1986, *AJ*, 91, 1121
- Smith, G. H., & Fulbright, J. 1997, *PASP*, 109, 1246
- Smith, G. H., & Tout, C. A. 1992, *MNRAS*, 256, 449
- Smith, G. H., Shetrone, M. D., Bell, R. A., Churchill, C. W., & Briley, M. M. 1996, *AJ*, 112, 1511
- Smith, G. H., Shetrone, M. D., Briley, M. M., Churchill, C. W., & Bell, R. A. 1997, *PASP*, 109, 236
- Sneden, C., Kraft, R. P., Langer, G. E., Prosser, C. F., & Shetrone, M. D. 1994, *AJ*, 107, 1773
- Sneden, C., Kraft, R. P., Prosser, C. F., & Langer, G. E. 1991, *AJ*, 102, 2001

- Sneden, C., Kraft, R. P., Prosser, C. F., & Langer, G. E. 1992, *AJ*, 104, 2121
- Sneden, C., Kraft, R. P., Shetrone, M. D., Smith, G. H., Langer, G. E., & Prosser, C. F. 1997, *AJ*, 114, 1964
- Sneden, C., Pilachowski, C. A., & Vandenberg, 1986, *ApJ*, 311, 826
- Sneden, C., Preston, G. W., McWilliam, A., & Searle, L. 1994, *ApJ*, 431, 27
- Stetson, P. B. 1984, *PASP*, 96, 128
- Stetson, P. B., Hesser, J. E., Smith, G. H., Vandenberg, D. A., & Bolte, M. 1989, *AJ*, 97, 1360
- Suntzeff, N. B. 1981, *ApJS*, 47, 1
- Suntzeff, N. B. 1989, in *The Abundances Spread within Globular Clusters*, ed. G. Cayrel de Strobel, M. Spite, & T. Lloyd Evans (Paris, Obs. de Paris), p. 71
- Suntzeff, N. B. 1993, in *ASP Conf. Ser.*, 48, 167
- Suntzeff, N. B., Friel, E., Klemola, A., Kraft, R. P., & Graham, J. A. 1986, *AJ*, 91, 275
- Suntzeff, N. B., & Smith, V. V. 1991, *ApJ*, 381, 160
- Sweigart, A. 1997, *ApJ*, 474, 23
- Sweigart, A., & Gross, P. G. 1978, *ApJS*, 36, 405
- Sweigart, A., & Mengel, J. 1979, *ApJ*, 229, 624
- Trefzger, C. F., Carbon, D., Langer, G. E., Suntzeff, N. B. & Kraft, R. P. 1983, *ApJ*, 266, 144
- Vandenberg, D. A. 1992, *ApJ*, 391, 685
- Vandenberg, D. A. & Smith, G. H. 1988, *PASP*, 100, 314
- Vandenberg, D. A., Stetson, P. B., & Bolte, M. 1996, *ARA&A*, 34, 461
- Van den Bergh, S. 1967, *AJ*, 72, 70
- Vogt, H. 1925, *Astr. Nach.*, 223, 229
- Webbink, R. F. 1985, *IAUS*, 113, 541
- Zucker, D., Wallerstein, G., & Brown, J. A. 1996, *PASP*, 108, 911