

## <Review>

# 중기 오르도비스기 중기 다리윌리안(Darriwilian) 탄소 동위원소 변동에 대한 논평

방선화 · 이용일<sup>‡</sup>

서울대학교 지구환경과학부

### 요 약

중기 오르도비스기는 전 지구적으로 특징적인 고해양 변화 신호와 다양한 기후 시스템 가설이 존재하는 시기이다. 최근 정립된 중기 다리윌리안(Darriwilian)조의 탄소 동위원소 이상값(MDICE)의 출현은 이 시기의 탄소 순환을 연구하는데 중요하지만, 아직 그 변화 값과 연구지역들의 지역적 고해양 배경은 함께 고찰되지 않았다. 본 연구는 전 지구적으로 보고된 MDICE 연구 논문들의 탄소 동위원소 이상값 수치와 고대륙별 차이점에 대해 논평하여 MDICE의 층서위치적 이해를 돕고자 하였으며, 오르도비스기 탄소 동위원소 기록 상에서 MDICE를 효과적으로 대비할 수 있는 기준과 이용 가능한 생층서적 출현 시기를 제시하고자 하였다. 탄소 동위원소 기록 특징은 MDICE가 중기 Darriwilian조의 코노돈트 생층서대 *Eoplacognathus suecicus*와 *Pygodus serra*대의 경계부에 대비되는 층서적 위치에서 나타나며, 고대륙적 환경 특성에 의한 차이는 있으나 대부분의 탄소 동위원소 기록에서 특징적인 음의 이상값과 뒤따르는 양의 이상값이 MDICE 출현 위치에서 나타나고 있음을 확인하였다. 이 논평의 결과는 전기, 중기, 후기 오르도비스기에서 연속적인 화학층서 연구에 응용 가능하며, 지역적 대비에도 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

**주요어:** 중기 오르도비스기, MDICE, 탄소 동위원소, 화학층서, 고해양

**Sunhwa Bang and Yong Il Lee, 2016, A review of the middle Darriwilian carbon isotope excursion, Middle Ordovician. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 6, p. 917-935**

**ABSTRACT:** The Middle Ordovician is characterized by a global change of paleoceanographic conditions with various hypotheses on its paleoclimate system. The occurrence of middle Darriwilian carbon isotope excursion (MDICE) has been recently recognized and is important for understanding the contemporary carbon cycle. Nonetheless, changes in regional carbon isotope ratio values during the MDICE and its paleoceanographic background have not yet been evaluated. This study reviews the regional differences in carbon isotope excursion during the MDICE and provides a usable reference to correlate the MDICE among Ordovician carbon isotope records as well as biostratigraphic information. The carbon isotope record of the MDICE appears at the boundary between the *Eoplacognathus suecicus* and *Pygodus serra* Conodont Biozones. Although there exist some differences in paleoenvironmental characteristics among paleocontinents, the beginning of the MDICE is characterized by the distinct negative excursion, which is followed by the positive excursion. The results of this review can be applicable to Ordovician chemostratigraphic studies and are also expected to provide useful information for regional correlations.

**Key words:** Middle Ordovician, MDICE, carbon isotope, chemostratigraphy, paleoceanography

(Sunhwa Bang and Yong Il Lee, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea)

## 1. 서 론

기후 변동 및 환경 변화 시스템에 대한 관심이 늘

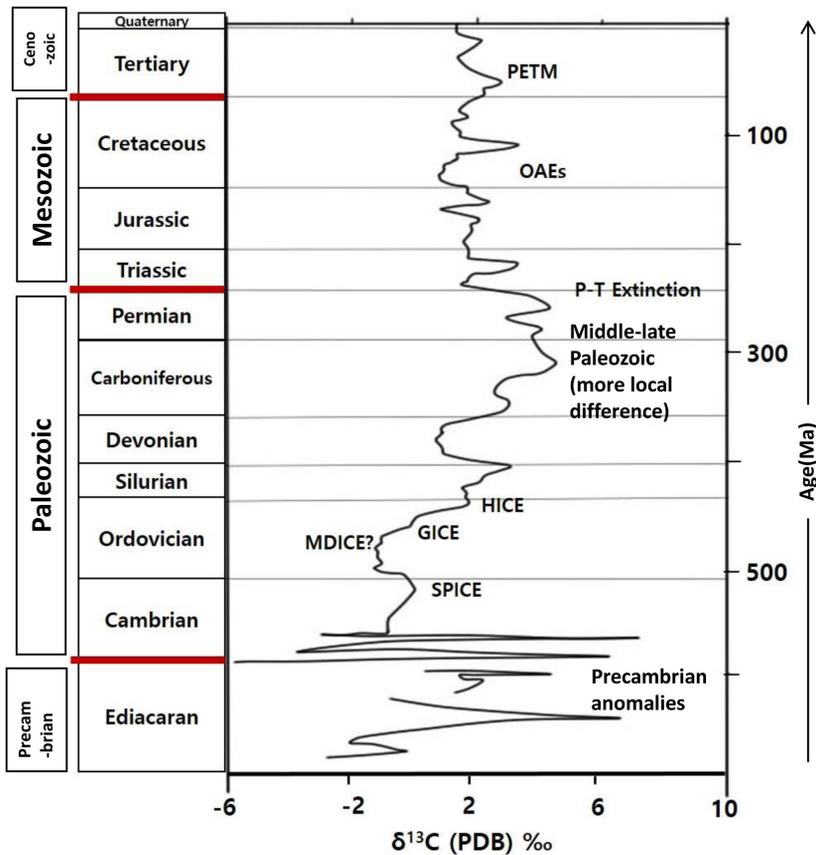
어지면서 지구의 탄소 순환 역사에 대한 연구의 중요성은 꾸준히 강조되고 있다(Scholle and Arthur, 1980; Lambert *et al.*, 1987; Patterson and Walter,

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-2-880-6736, E-mail: lee2602@plaza.snu.ac.kr

1994; Weissert *et al.*, 1998; Sundquist and Visser, 2003; Tsikos *et al.*, 2004; Saltzman and Thomas, 2012). 생물계가 발달하기 시작한 현생이언의 해양에서는 은생이언 후기의 탄소 동위원소 기록과는 전혀 다른 양상이 있어왔다는 점이 그 단적인 예라 할 수 있다(그림 1). 해양은 중요한 탄소의 저장소이자 대기와의 상호작용을 통해 대기 중 이산화탄소 기체의 농도, 해수 중 탄산 이온의 용존 형태를 조절하는 역할을 하며, 이에 따라 산소포화도 및 산성도와 같은 해양 환경의 조성을 바꿔가며 지구 시스템에 나타나는 변화를 이끌거나 그러한 변화에 민감하게 반응하여 왔다(Berner, 1990; Kump and Arthur, 1999; Sundquist and Visser, 2003; Maslin and Swann, 2006). 또한 생명이 출현한 후에는 표층 및 심해에 사

는 생물들이 해양 환경의 조성을 유기물, 생물 잔해 등의 생산량에 즉각 반영하게 되면서, 해양의 탄소 순환은 생물계와도 밀접한 연관을 가지게 되었다(Saltzman, 2005; Sarmiento and Gruber, 2006; Trotter *et al.*, 2008). 종합된 현생이언의 탄소 동위원소 기록에서 보이는 바와 같이, 특정 지질 시기에 한정된 역사적인 대멸종 및 빙하기에는 전지구적 탄소 동위원소 값이 뚜렷한 양의 값, 혹은 음의 값으로 매우 특징적인 형태를 보이며 전지구적 탄소 순환과 급격한 지구 환경 변화 사이의 관계에 대한 강한 암시를 나타내고 있다(그림 1).

해수의 용존 무기탄소(DIC)를 조절하는 가장 큰 반응은 대기와 해양 간의 교환이며(Berner, 1990; Kump and Arthur, 1999; Sundquist and Visser, 2003; Maslin



**Fig. 1.** Large-scale  $\delta^{13}\text{C}$  curve of the latest Precambrian and the Phanerozoic period. Red lines mark period boundary. SPICE: Steptoean positive isotopic carbon excursion; MDICE: Middle Darriwilian isotopic carbon excursion; GICE: Guttenberg isotopic carbon excursion; HICE: Hirnantian isotopic carbon excursion; P-T Extinction: Permian-Triassic extinction; OAEs: Oceanic anoxic events; PETM: Paleocene-Eocene Thermal Maximum (modified from Veizer *et al.*, 1999 and Halverson *et al.*, 2005).

and Swann, 2006), 여기에 해양 생물의 유기탄소(DOC) 합성 과정에서 상대적으로 질량이 가벼운  $^{12}\text{C}$ 가 선택적으로 많이 소모될 때 남아 있는 해수에는  $^{13}\text{C}$ 가 더 많아지므로 해수의 DIC가 가지는 탄소 동위원소 조성이 양(+)의 방향으로 높아진다. 해수 중 유기 탄소와 무기 탄소의 상대적인 양은 어떤 지구 환경이 조성되느냐에 따라 민감하게 달라진다. 즉, 지구 환경의 변화는 해양의 탄산염 퇴적물 기록으로 남은 탄소 동위원소 비( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  값)를 변동시키게 되어, 이 변동의 기록을 해석함으로써 당시의 지구 환경이 어떻게 탄소 순환 상태를 변화시켰는지 추리할 수 있다. 해양의 DIC는 특정 환경이 가지는 표층이나 심층 해수의 순환, 공간적 위치, 유입되는 풍화물의 조성과도 밀접한 관련을 가지고 있다(Kroopnick, 1985; Patterson and Walter, 1994; Gruber *et al.*, 1999; Thomas *et al.*, 2000; Immenhauser *et al.*, 2002; Kump *et al.*, 2005; Lynch-Stieglitz, 2006; Sarmiento and Gruber, 2006; Diz *et al.*, 2009). 특히 내륙해(epeiric sea), 혹은 해안에서 가까운 해수에서 침전된 탄산염이 나타내는 해수의 DIC 값들은 전 지구적 규모의 열린 해양보다 탄소 저장소의 크기가 훨씬 작기 때문에 열린 해양에서 퇴적되는 원양 퇴적물보다 더 높은 폭의 탄소 동위원소비 변화 기록이 나타날 수 있다(Patterson and Walter, 1994; Holmden *et al.*, 1998; Immenhauser *et al.*, 2002). 그런데 지역적 영향에 의한 차이에도 불구하고 탄소 동위원소 층서를 더 유용하게 만드는 것은, 내륙해와 탄산염 대지 퇴적물의 탄소 동위원소 변동 곡선도 큰 스케일에서 보았을 때 같은 시기의 원양 퇴적물에서 분석한 변동 곡선과 매우 높은 유사성을 보인다는 점이다(Ferreri *et al.*, 1997; Mutti *et al.*, 2006; Amodio *et al.*, 2008). 특히 내륙해가 넓게 분포하였으며 지역적 해수의 동위원소 비의 차이가 뚜렷한 오르도비스기에서도 특징적인 변동 경향성과 큰 동위원소 이상값들은 여전히 구분 가능하고 전 지구적으로 대비 가능한 공통성을 보인다(Patzkowsky *et al.*, 1997). 그러므로 탄소 동위원소 곡선 기록에서 작은 변동 신호들이 고립된 내륙해 환경에서 더 자주 나타날 수는 있으나, 1~2% 이상의 뚜렷하게 식별 가능한 형태의 동위원소 이상값이 특정 시기 화학층서에서 공통적으로 발견된다면 이는 전 지구적으로 지층을 대비하는데 유용하게 활용될 수 있다.

이러한 개념적 배경에서 1990년대 이후 많은 연구자들이 이를 실제 층서에서 분석하여 종합적인 지구 역사를 해석하고자 하였으며 이런 노력은 모호하게 추론되었던 중생대, 신생대, 상부 고생대 등의 시점에서 급격한 환경 변화 메커니즘을 설명하는데 크게 기여하였다. 그러나 하부 고생대의 대표적인 탄소 동위원소 이상값(anomaly)들에 대한 환경 가설들은 아직 논란의 여지가 있으며, 특히 오르도비스기 말의 거대한 빙하기 및 대멸종과 관련되어 있는 Hirnantian isotopic carbon excursion (HICE)의 경우 아직도 온난한 기후에서 점차 빙하 기후로 변화한 구체적 메커니즘과의 관계가 불분명하다. 이에 대해 다각적 해석이 시도되던 중, 최근 들어 이 기록들과 함께 해석되어야 할 기록으로 중기 오르도비스기의 중기 Darriwilian에 출현하는 양의 이상값인 middle Darriwilian isotopic carbon excursion (MDICE)이 소개되면서 오르도비스기 탄소 동위원소 층서에 새로운 정보가 추가되었다.

이에 이 논평에서는 오르도비스기 환경, 탄소 동위원소 층서와 새롭게 알려지기 시작한 MDICE의 연구 현황 및 탄소 동위원소 변동폭에 대해 정리하여 이 기록을 인지할 수 있는 탄소 동위원소 층서적 정의와 연구 의의에 대해 논하며, 새로운 관점에서의 중기 오르도비스기 지구 환경에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 중기 오르도비스기의 배경 및 탄소 동위원소 기록

### 2.1 오르도비스기 탄소 동위원소 층서와 환경적 배경

국제층서위원회(International Commission on Stratigraphy)에 따르면 중기 오르도비스기는 Dapingian (470-467.3 Ma)과 Darriwilian (467.3-458.4 Ma)의 2개 조로 이루어져 있으며 이들의 기저면이 각 대륙에서 모두 필석류 및 코노돈트로 대비가 가능하며, 특히 코노돈트 생층서대의 활용도가 전체 기간 내에서 매우 높다(그림 2).

오르도비스기는 현생이언의 어느 시기보다도 전기, 중기, 후기에 나타나는 탄소 동위원소 층서의 형태적 특징이 확연한 차이를 보이는 시기이며(그림 2, 그림 3), 이는 오르도비스기의 환경 및 기후적인 특징과도 연결되어 있음을 보인다(그림 3). 그림 3의 종합된 탄소 동위원소 curve에서 보이는 바와 같이,

Darriwilian 중기 이전의 탄소 동위원소 기록은 그 값이 후기에 비해 비교적 음의 값을 보이는 양상을 나타내며, 전 지구적으로도 지역적인 특성만이 반영되어 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 중기 오르도비스기의 중기 Darriwilian부터는 양의 이상값인 MDICE가 전 지구적으로 나타나기 시작하며, 이것은 그림 3의 탄소 동위원소 곡선의 우측에서 보이는 것과 같이 이후 나타나는 GICE (+4% 내외)와 HICE (+7% 내외)와 같은 큰 양의 이상값들이 도래하기 전 처음으로 뚜렷하게 식별 가능한 이상값이기도 하다.

현재까지 이루어진 오르도비스기 환경 변화에 대한 연구를 종합한 결과(그림 3), 오르도비스기는 전기의 매우 더운 기후에서 점차 온난한 기후로 변화하였으며, 특히 중기 오르도비스기의 중기에는 적도에서 온난 기후가 매우 안정적이었던 것으로 산소 동위원소 분석을 통해 보고된 바 있다(Trotter *et al.*, 2008). 이런 기후가 급격히 냉각되던 후기 오르도비스기에서 가장 큰 양의 이상값인 HICE가 출현하며, 일부 대륙에서 확연한 빙하 퇴적물이 발견되기 시작한다(Cherns *et al.*, 2013). 그러나 해수면, 생물다양

성, 스트론튬 동위원소가 급변하기 시작하는 시점은 오히려 MDICE 시기나 MDICE의 이상값이 끝난 이후의 시기에 위치하고 있어, 이는 해수면이 상당히 낮아져 있던 상태, 생물이 여러 종으로 분화되는 사건들, 스트론튬 동위원소 비를 급감하도록 유도하는 변화의 시작 등 여러 요소가 중기 오르도비스기에 존재했었다는 것을 암시하고 있다(그림 3).

2.2 중기 오르도비스기 동위원소 특징

2.2.1 탄소 동위원소

연속적인 탄소 동위원소의 곡선은 전체 오르도비스기를 통틀어 하나의 대륙에서 완성된 적은 없다. 지금 널리 쓰이고 있는 오르도비스기 전 지구적 탄소 동위원소 층서는 Bergström *et al.* (2009)이 여러 지역의 기록들을 통합한 형태이며, 이는 이 논평의 그림 2와 그림 3에 각각 다른 해상도로 제시되어 있다. 이 저자들은 지역적으로 분석한 탄소 동위원소 곡선을 오르도비스기 시기적 검정을 통해 재정립하는 방법을 이용하였고, 전체적인 곡선을 구성하는 자료들은 각 시기별로 다른 곳에서 유래하였다. 오르도

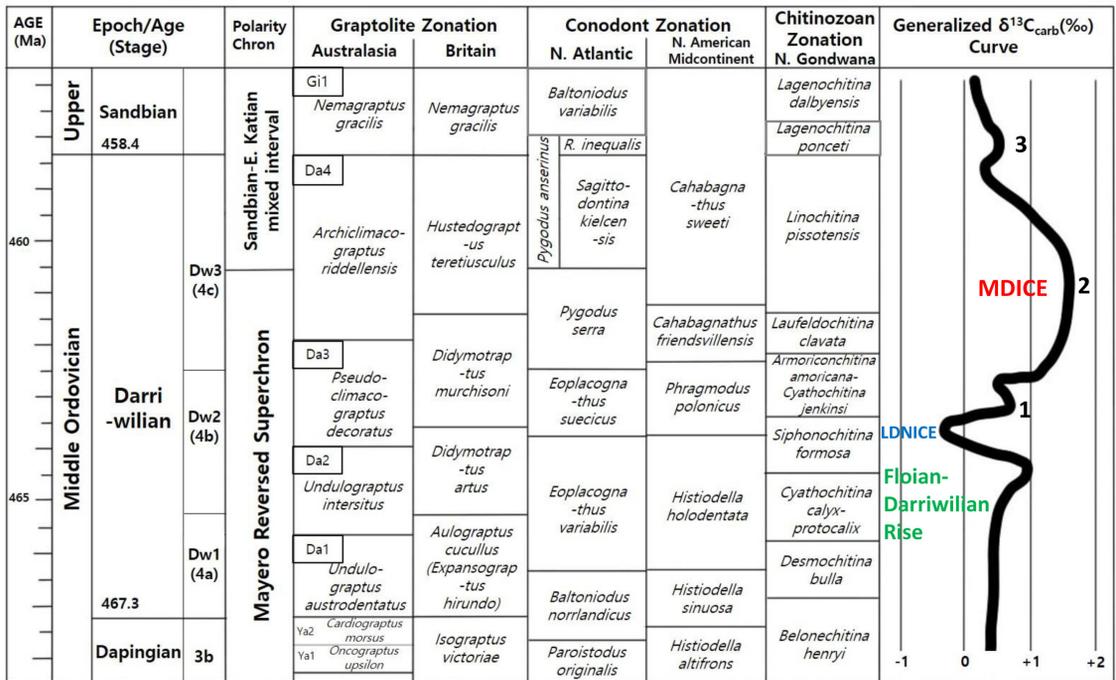


Fig. 2. Globally synthesized Ordovician carbon isotope curve and biostratigraphy. LDNICE: Lower Darriwilian negative isotopic carbon excursion; MDICE: Middle Darriwilian isotopic carbon excursion (modified from Saltzman, 2005; Bergström *et al.*, 2009; Ainsaar *et al.*, 2010; Cooper *et al.*, 2012 and Lehnert *et al.*, 2014).

비스기 전기인 Tremadocian부터 Dapingian까지의 곡선은 아르헨티나의 Buggisch *et al.* (2003)의 연구로부터, 중기 오르도비스기인 Darriwilian과 후기 오르도비스기 Sandbian의 곡선은 에스토니아 Kaljo *et al.* (2007)로부터, 그리고 후기 Katian 시기에 대해서는 북미 대륙 동부의 연구(Bergström *et al.*, 2007)를, Hirnantian 시기에 대해서는 북미 네바다주의 기록(Finney *et al.*, 1999; Berry *et al.*, 2002)을 바탕으로 하고 있다. 이러한 광역적 탄소 동위원소 층서들이 서로의 범위를 보충하며 통합된 이래로, 이 저자들을 포함한 다수의 연구자들이 이를 오르도비스기 탄소 동위원소 변화 기록을 대표하는 곡선으로 인정, 관련 연구에 기초적으로 활용하고 있다.

MDICE의 출현 양상은 통합적 탄소 동위원소 층서(Bergström *et al.*, 2009) 내에서 그림 2와 같이 표현되고, 생층서 및 시간층서적으로 Darriwilian의 중기에 발생하여 후기까지 나타나는 것으로 보인다. 하지만 이 통합적 층서의 중기 오르도비스기 부분을 구성하는 Kaljo *et al.* (2007)의 연구에서도 드러나듯이 지역적인 MDICE의 발생 시기는 생층서적인 시

간 대비에 따라 다르게 보일 수 있다. 그러나 해당 연구 지역이 중기 Darriwilian을 포함하고 있다면 해당 구간 내에서 탄소 동위원소 비( $\delta^{13}C_{carb}$  값) 곡선이 넓고 큰 이상값을 보이는 경우를 MDICE라고 명명하고 있으며, 이때의 변동폭은 작게는 +0.5‰ (Ma *et al.*, 2015)부터 크게는 +5‰ 내외(Ainsaar *et al.*, 2015)까지 나타난 바 있다. 이러한 변동폭의 차이는 그 지역의 고환경 특성과 관련이 있으며(Patterson and Walter, 1994; Holmden *et al.*, 1998; Immenhauser *et al.*, 2002), 다양한 고대륙적 분포에도 불구하고 중기 오르도비스기에서 공통적으로 넓은 형태의 양의 이상값이 나타나는 양상이 선행 연구자들의 주목을 받았다(Ainsaar *et al.*, 2001; Bauert *et al.*, 2014; Calner *et al.*, 2014; Lehnert *et al.*, 2014). 특히 이 탄소 동위원소 이상값은 고생대 말이나 중생대와 같이 변동이 큰 시기들에 비해서는 그리 특정할 만한 변화량이라 하기 어려우나(그림 1), 탄소 동위원소 곡선의 변동이 단순한 형태였던 오르도비스기 중기에서 고해상도 기록을 복원할 경우 양(+)의 방향으로 넓게 나타나는 이상값은 지역 내의 탄소 동위원소 층서에서

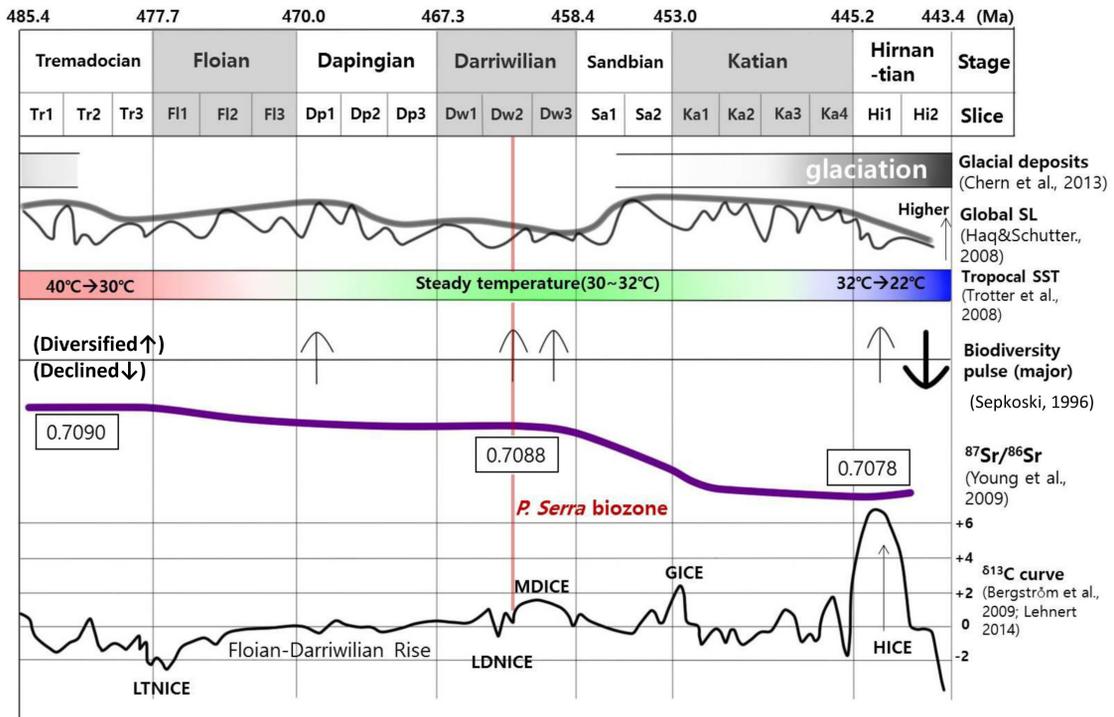


Fig. 3. Ordovician global environment signals (modified from; Sepkoski Jr, 1996; Haq and Schutter, 2008; Trotter *et al.*, 2008; Bergström *et al.*, 2009; Young *et al.*, 2009 and Chern *et al.*, 2013).

상당히 특징적이며(그림 5), 이 이상값이 나타난 이후 오르도비스기 말 GICE와 HICE의 더 큰 이상값에 해당하는 급격한 변동들이 나타난다는 점에서 이 시점의 양의 이상값 변화에 대한 해석의 필요가 있는 기록이다(그림 1과 3). 또한 위의 오르도비스기 환경에서 언급한 것과 같이, 안정적이던 오르도비스기 환경 요소들이 공통적인 변동을 나타내기 시작하는 변동점들이 이 시기 주변에 위치해 있다는 것 또한 이 기록에 대한 종합적인 해석의 중요성을 보여 준다(그림 3).

이 중에서도 Lehnert *et al.* (2014)는 발티카(Baltica)에 해당하는 에스토니아 및 스웨덴 등지의 탄소 동위원소 기록들에서 나타나는 특징들에 더 세분화된 명칭을 부여하고자 하였는데, 이때 MDICE 하부의 음의 이상값을 LDNICE (lower Darriwilian negative carbon isotope excursion)으로 명명하고 발티카 분지의 MDICE 특징을 3개의 양의 방향 피크가 나타나는 이상값으로 정의한 바 있다. 그러나 이러한 뚜렷한 특징은 다른 고대륙 분지에서는 흔하지 않은 편이며, 넓은 범위에 걸쳐있거나 연속되지 않고 기록이 잘려 있는 양의 이상값으로 나타나기도 한다.

이러한 배경 내에서도 중기 오르도비스기 탄소 동위원소 곡선의 정립에 대해서는 최근까지도 논란이 있었다. Darriwilian의 첫 번째 양의 이상값으로서의 MDICE에 대한 논의가 특히 그러하였는데, 이 기록은 일찍이 발토스칸디아(Kaljo *et al.*, 1999, 2004, 2007; Ainsaar *et al.*, 2001, 2004, 2010)에서 폭넓게 그 존재가 알려졌지만 북미에서는 확인되지 않아 전 지구적 기록으로의 적용이 가능한지에 대한 의의가 제기된 바 있었다(Saltzman and Young, 2005). 그러나 점차 다른 로렌시아 대륙 지역들과 중국 대륙에서도 MDICE의 전체 혹은 일부가 발견되면서, MDICE라는 기록은 탄소 동위원소의 변동이 상대적으로 거의 없었던 전기와 중기 오르도비스기에서 처음으로 전 지구적인 특징이 가능한 정도로 기록된 탄소 동위원소 변동을 반영하는 것이 아닌가 하는 의견이 제기되고 있다(Young *et al.*, 2009, 2015; Schmitz *et al.*, 2010; Thompson and Kah, 2012; Ainsaar *et al.*, 2015; Ma *et al.*, 2015; Zhang and Munnecke, 2015; Kah *et al.*, 2016). MDICE의 정립이 확실해 진다면 이를 빙하 작용이 동반되는 후기 오르도비스기의 이상값들 이전에 이미 탄소 순환의 변동이 기록되기

시작했으며, 다른 기법과 종합하여 그 원인과 결과를 추적할 수 있는 첫 단추로 활용할 수 있다. 이러한 의미에서 MDICE 구간을 포함하는 퇴적층에서 탄소 동위원소 기록과 함께 지질학적 환경 변화를 추적하려는 노력이 최근의 연구에서 빈번하게 시도되고 있다(Algeo *et al.*, 2016; Kah *et al.*, 2016; Rasmussen *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2016).

### 2.2.2 황 동위원소 및 스트론튬 동위원소

현재까지 중기 오르도비스기에 대하여 탄소 동위원소 변동과 함께 황 동위원소가 보고된 곳은 주로 북미, 남미 대륙에 제한되어 있다. 캐나다 동부 뉴펀들랜드 주 서쪽과 아르헨티나 소산맥 기록을 종합한 경우(Thompson and Kah, 2012; Albanesi *et al.*, 2013; Kah *et al.*, 2016)와 미국의 메릴랜드 주, 그리고 오클라호마 주 아버클 산(Arbuckle Mountain)에서의 기록이 대표적이다(Young *et al.*, 2009). Darriwilian 시기에서 황 동위원소의 변동은 탄소 동위원소와 대체로 반비례하는 양상을 보인다(Thompson and Kah, 2012; Kah *et al.*, 2016; Young *et al.*, 2015). 탄소 동위원소가 Darriwilian 전기에 낮게 유지되다가 중기에 들어서 양의 값으로 변동(MDICE 지점)한 이후 다시 감소하는 모습을 보이는 것과 달리, 이들 지역에서 분석된 황 동위원소 값은 공통적으로 Darriwilian 전기에 높은 값으로 존재하다가 중기에 들어서면서 급격히 낮아지는 경향을 보이며 산소가 풍부한 상태와 그렇지 않은 상태의 황 저장소 사이에서의 교차를 보이지만, 대체로 euxinia 신호가 강한 것으로 보였다(Kah *et al.*, 2016). Darriwilian 후기의 황 동위원소 기록은 양상은 비슷하지만 지역마다 변동 정도가 다양하게 나타난다. Kah *et al.* (2015)는 이를 지역적인 euxinia가 우세한 시기 황 저장소의 역할이 기존의 단일 모델이 아니라 복합적 모델로 해석되어야 하는 예시로서 새롭게 제시하였다.

오르도비스기의 특징 중 하나인 스트론튬 동위원소 비( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )의 급감 역시 북미 서쪽의 네바다 주에서 보고되었다(Young *et al.*, 2009). 여기에서 보고된 변동이 주목받는 이유는 0.7090의 비교적 높은 값에서 0.7076의 낮은 값으로 급감하는, 현생 이언에서 가장 큰 스트론튬 동위원소 비의 감소이기 때문이다. 스트론튬 동위원소의 비는 규산염 광물의 풍화로 인한 유입률을 반영하는 것으로 흔히 해석되는

데(Berner, 2006), 이는 대륙 풍화물은 비교적 높은 값(0.711)이며, 중앙 해령 지대의 마그마에서 유래된 현무암질 암석의 풍화물은 이보다 낮은 값(0.702)을 보인다는 점에서 이 비율의 증감에 어떤 기원지 암석이 더 기여했는지 비교할 수 있는 도구이다. 중기 오르도비스기에서 보고된 것처럼 스트론튬 비가 급감한 경우는 당시의 현무암질 암석의 풍화량이 증가한 상태를 지시하며 이 과정에서 많은 양의 대기 중 이산화탄소가 2차 광물 생성에 소모되었을 것이다. 그렇기에 Young *et al.* (2009)은 스트론튬 비가 급감하는 구간이 후기 오르도비스기의 빙하작용을 일으킬만한 큰 기후 변동의 계기가 되지 않았는지 의심하였으나, 앞서 산소 동위원소를 이용하여 복원된 과거의 해수 표면 온도는 이 시기에도 온도가 크게 변하지 않고 안정적인 기후가 유지되었음을 나타낸다(Trotter *et al.*, 2008; 그림 3의 Tropical SST). 최근 Rasmussen *et al.* (2016) 등이 지역적 냉각을 보고하기 시작하였으나, 이 연구자들은 냉각의 요인을 심해저 순환 해류의 활성화로 지목한 바 있다. 여기에서 오르도비스기 기후 시스템에 대한 의문이 한가

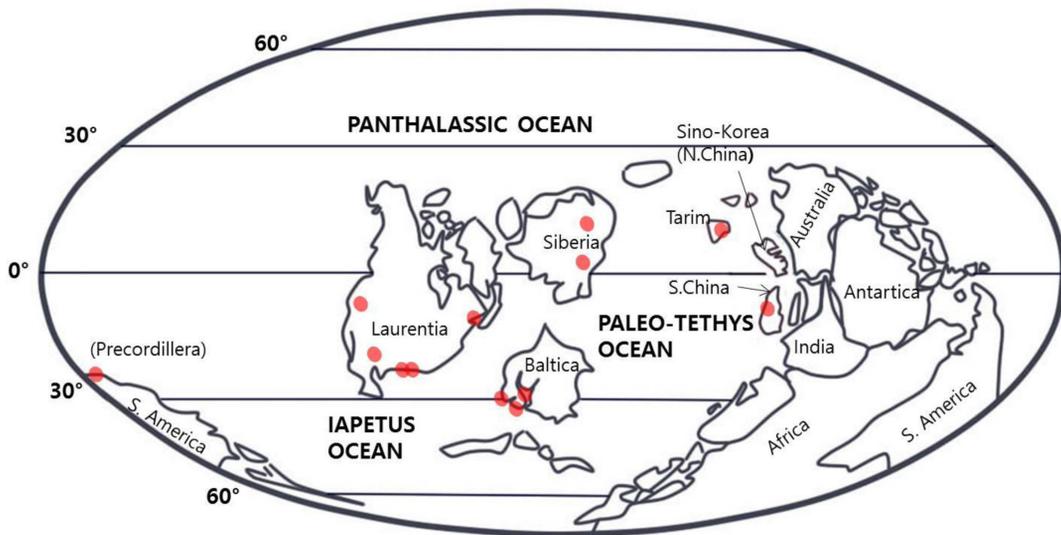
지 더 제기되는 셈이다.

이러한 황 동위원소 기록과 스트론튬 동위원소 기록이 연계되어 해석된 Young *et al.* (2016)의 새로운 연구에서는 황 동위원소를 이용한 실제 황 포함 광물의 풍화 모델링 결과가 제시되었으며, 이는 Darriwilian 중기에 들어서면서 황산염의 풍화가 특히 증가했음을 지시하고 있다. 이러한 결과는 현무암질 암석의 풍화율 증가를 암시하는 스트론튬 동위원소 비 결과와 시기적으로 들어맞는 것으로, MDICE가 발생하는 Darriwilian 중기에 전지구적으로 풍화가 활발하여 해양으로 유입되던 황 및 스트론튬의 양이 더욱 증가했음을 보여주는 결과이다.

### 3. 오르도비스기 중기 MDICE의 연구 현황

그림 4는 MDICE에 대하여 현재까지 연구된 연구 지역들의 고지리적 위치를 나타낸 것이며, 그림 5는 각 고대륙의 기록 분포에 대한 종합이다. 이 장에서는 각 고대륙의 연구 결과 및 고환경 배경에 대해 소개한다.

### Middle Ordovician (460 Ma) Paleomap



**Fig. 4.** Recent version of middle Ordovician Paleogeographic map dotted with MDICE studied areas (red points). Studied section data are modified from Kaljo *et al.* (2007), Ainsaar *et al.* (2010), Munnecke *et al.* (2011), Thompson and Kah (2012), Albanesi *et al.* (2013), Sial *et al.* (2013), Lehnert *et al.* (2014), Ainsaar *et al.* (2015) and Zhang and Munnecke (2015). Paleomap data modified from Scotese and Golonka (1997); Torsvik and Cocks (2013), Yao *et al.* (2015) and Lee *et al.* (2016).

### 3.1 발티카(Baltica) 고대륙

중기 오르도비스기 당시 발티카(Baltica) 대륙은 이 아페투스(Iapetus) 대양과 고테티스(Paleo-Tethys) 대양 사이의 남위 30°부터 남위 35° 부근에 위치하고 있었던 것으로 논의되고 있다(그림 4). 연구 지역은 주로 스웨덴 중앙부 및 라트비아, 에스토니아에 집중되어 있으며 오르도비스기 동안 이 지역들에 조성되어 있었던 얇은 발토스칸디아 내륙해(Baltoscandian epeiric sea) 분지에서 퇴적된 지층들이 연구 대상이 되었다(그림 4). 보존 상태가 양호하고 연속성이 좋은 층서가 특징적이며, 대부분 노두에서 채취한 코어 형태의 시료로 연구되었다(Kaljo *et al.*, 2007; Ainsaar *et al.*, 2010; Bauert *et al.*, 2014; Lehnert *et al.*, 2014; Rasmussen *et al.*, 2016).

#### 3.1.1 지질 개요 및 고환경

발토스칸디아 내륙해 분지의 전체적인 모습은 에스토니아와 러시아 일부에 걸쳐 얇은 대륙붕이 조성되어 있었으며, 라트비아 및 리투아니아와 스웨덴 방향이 더 깊고 움푹한 분지 지형이었던 것으로 알려져 있다(Nestor and Einasto, 1997; Harris *et al.*, 2004). 이렇듯 지역간 퇴적 환경의 깊이 차이는 존재하지만 전기 오르도비스기에는 대부분 탄산염 퇴적물이 우세하게 퇴적되던 따뜻한 해수 환경이었다가, 점차 차가운 해수 환경으로 변하는 기후 변동을 겪었던 것으로 해석된다(Jaanusson, 1973). 스웨덴 중앙부에서는 이러한 변화가 이미 언급된 바 있었으며, 중기 오르도비스기 층서에서 하부와 중부에는 탄산염암이 우세하나 중상부 및 상부에서는 이회암층이 섞이기 시작한다는 특징이 이를 뒷받침한다. 이보다 더 깊고 안정적인 퇴적 분지였던 라트비아의 경우 대부분의 암상이 점토질 석회암으로 일정하나 상부 일부에 한하여 흑색 셰일이 등장하는 특징을 가지며, 이들은 중기 오르도비스기 동안 탄산염의 퇴적이 우세하며 고립된 얇은 환경에서 점차 이질 퇴적물 유입이 증가하는 공통점을 가진다(Jaanusson, 1973; Dronov and Holmer, 1999; Harris *et al.*, 2004).

#### 3.1.2 탄소 동위원소 조성

가장 많은 MDICE 기록이 보고되었으며 MDICE의 완전한 형태 및 세 개의 특징적 피크에 대한 언급까지도 가능한 연구들이 다수 이루어졌다. 특히 에스

토니아에서 채취한 Mehikoorma 지역의 421번 코어 및 다른 코어들과의 비교를 통해 정립된 형태(Ainsaar *et al.*, 2010)와 스웨덴 중앙부의 Tingskullen-1 코어(Calner *et al.*, 2014), 스웨덴 Tartu-453 코어(Bauert *et al.*, 2014)에서 얻은 기록이 주목할 만하며, 이 외에도 많은 지층에서 MDICE가 성공적으로 보고되었는데, 이때 MDICE로 명명한 양의 이상값은 대부분 Darriwilian 4b의 중상부에 나타나는 것으로 대비되었다. 하지만 Schmitz *et al.* (2010)이 비교한 코어들 중 할레키스 채석장(Hallekis Quarry)의 지층은 탄소 동위원소 분석 결과 MDICE로 해석되는 구간이 6.5-11.5 m에 걸쳐 나타나며 이의 상부가 부정합면에 의해 나타나지 않는 것으로 보고되었다. 이와 같이 MDICE 연구로 잘 알려진 발토스칸디아 내륙해 지역에서도 부정합, 침식, 또는 단기 퇴적 중단으로 인하여 탄소 동위원소 층서의 불연속이 있는 곳이 일부 존재하는 것으로 알려져 있다. 특히 Lehnert *et al.* (2014)은 오르도비스기에 등장하는 양의 이상값과 음의 이상값들에 명칭을 부여하려는 시도를 하였는데, 이때 MDICE의 전에 나타나는 약 -1‰ 이하로 하강하는 음의 이상값을 LDNICE (lower Darriwilian negative carbon isotope excursion)로 명명하고 이것이 MDICE와 동반되는 지표가 될 수 있음을 주장하기도 하였다. 이 기록은 앞서 Ainsaar *et al.* (2010)이 명명한 탄소 동위원소 층서대에서도 반영되어 있으며, 그림 5의 (a)에서 보는 바와 같이 Ainsaar *et al.* (2004)이 Kaljo *et al.* (2007)의 기록에서 구분한 BC1과 BC2 사이의 음의 방향으로 이동한 부분을 LDNICE, BC2부터 BC4까지 양의 이상값이 나타나는 부분을 MDICE로 규정 가능하다. 이는 각 연구들에서 생층서적 정보로 제공한 북대서양 코노돈트 생층서대에서 *Eoplacognathus suecicus*대와 *Pygodus serra*대의 경계보다 이전 구간에 해당한다(Nölvak *et al.*, 2006; Kaljo *et al.*, 2007; Bergström *et al.*, 2009; Ainsaar *et al.*, 2010; Calner *et al.*, 2014; Lehnert *et al.*, 2014).

### 3.2 로렌시아 고대륙

1990년대 후반과 2000년대 초반의 발토스칸디아 MDICE 연구들이 성공적으로 수행된 이후, Saltzman and Young (2005)은 로렌시아 대륙의 남서부에 해당하는 미국 네바다 주의 중기 오르도비스기 지층에서 탄소 동위원소 기록을 보고하였다. 이 보고에서는

중기 오르도비스기에 해당하는 기록에서 약 +3‰로 크게 튀는 이상값이 발견되며, 연구자들은 이를 MDICE 가 아니라 “채필드안 탄소 동위원소 이상값(Chatfieldian  $\delta^{13}C_{carb}$  excursion)”으로 언급하였다. 또한 이를 타코닉(Taconic) 조산운동으로 인한 해당 분지의 급격한 하강과 증가된 암석 풍화로 인하여 해양의 표층 생산성이 증가하였고, 이에 따라 유기 탄소의 매립 양 증가로 인해 나타나게 된 무기 탄소 동위원소의 이상값인 것으로 해석하였는데, 이와 함께 대기 중 이산화탄소가 급격히 감소되는 반응이 일어났을 것이라고 추측하였다. 이러한 관점은 2015년 발표된 Young *et al.* (2015)의 보고에서 미국 메릴랜드 주, 오클라호마 주 지층(그림 4)의 새로운 결과 및 황 동위원소와 함께 다시 거론된다.

또한 북미 대륙의 또 다른 MDICE 연구 지역으로는 캐나다 최동단에 위치한 뉴펀들랜드(Newfoundland) 지방이 있다(그림 4). 이 지역은 Azmy and Lavoie,

(2009)와 Thompson *et al.* (2012)의 연구에서 보고 되었으며, Thompson and Kah (2012)와 Kah *et al.* (2016)의 연구에서는 뉴펀들랜드의 분석 결과가 남미의 서부 산맥 지층 결과와 합성되어 보고되며 황 동위원소가 함께 해석되어 있다.

3.2.1 지질개요 및 고환경

로렌시아 고대륙에서 연구된 지역들 대부분의 퇴적 환경은 얇은 연안 환경, 얇고 고립된 조간대 환경 등이 주를 이루고 있다. 이는 당시 얇은 바다가 대륙 내에 넓게 조성되어 있었던 고지형적 배경과도 맞물려 있다(Brezinski *et al.*, 2012). 암상은 이러한 퇴적 환경의 영향으로 백운암, 석회암 중 생물 골격질이 포함된 팩스톤과 입자암, 석회질 이암, 골격질이 많은 와케스톤, 교호되는 이질과 석회암층이 특징적이며 이 중 오클라호마 주의 아버클산 지층은 기저부에 사암을 포함하고 있지만 다른 지역들은 기저부에

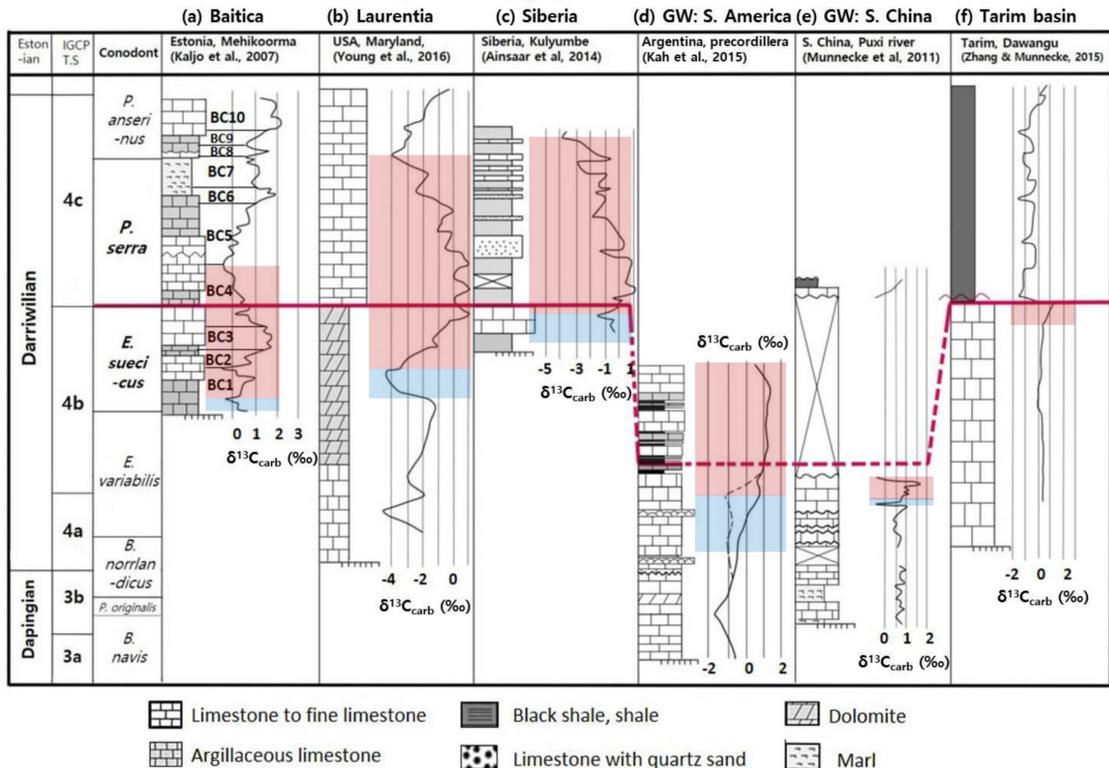


Fig. 5. Results of biozone, carbon isotope curve, and lithostratigraphy of studied paleocontinents. GW: Gondwana. Red areas as MDICE, Blue areas as LDNICE (modified from Ainsaar *et al.*, 2004, 2014; Nölvak *et al.*, 2006; Schmitz *et al.*, 2010; Munnecke *et al.*, 2011; Zhang and Munnecke, 2015 and Kah *et al.*, 2016).

도 균일하게 석회암층이 존재한다(Mitchell, 1985; Pope and Read, 1998; Brezinski *et al.*, 2012). 대부분의 연구 지층은 발토스칸디아처럼 중기 오르도비스기에는 점토질 석회암이나 석회암이 활발하게 퇴적되어 있고 상부로 갈수록 이암층, 이암층과 석회암층의 교호가 늘어나는 양상을 보인다(Saltzman and Young, 2005; Young *et al.*, 2009; Young *et al.*, 2015).

### 3.2.2 탄소 동위원소 조성

위에서 언급한 연구 지역들 중 뉴펀들랜드의 경우 연구마다 기록의 차이가 나타난다. MDICE가 등장하는 시기는 Darriwilian 4b의 하부부터 4c 중반까지이며, 눈에 띄게 양의 값을 가지는 기록들이 넓은 곡선을 그리며 나타나는 특징을 가진다(그림 5b). Azmy and Lavoie (2009)의 연구에서는 약 -1% 이상 하강하는 LDNICE의 모습과 그 뒤를 이어 2% 이상 상승하는 MDICE의 모습이 잘 드러나 있지만, 이때의 연구자들은 이를 MDICE로 뚜렷하게 명시하지는 않았다. 반면 Thompson and Kah (2012)가 완성한 기록에서는 뉴펀들랜드 테이블헤드 층군에서의 LDNICE의 뚜렷한 하강은 드러나 있으나 이후 급상승하는 기록은 완전한 MDICE의 형태를 나타내지 못하고 침식면에 의해 절단되었다. Thompson and Kah (2012)는 이 기록이 비록 절단되어 있기는 하지만 침식면 이전까지 +3%에 가까운 급격한 양의 이상값으로의 변화를 보여주고 있으므로 MDICE로 고려할 수 있는 것으로 논의하였고, 이후 Kah *et al.* (2015)가 이 지역의 상부 부분을 보충하여 좀 더 복원된 MDICE의 형태를 제시하였다(그림 5b).

이는 Young and Saltzman (2005)의 네바다 주 기록에서 발견된 +3%의 이상값과 변화량이 비슷하지만, 이후 Young *et al.* (2015)이 메릴랜드 주와 오클라호마 주에서 보고한 +2~4%의 변화량은 Young and Saltzman (2005)의 보고보다 더 높은 양의 이상값 내부에서 변동이 큰 곡선형 기록을 보여준다(그림 5). 다만 로렌시아 전체의 중기 오르도비스기 평균적인 탄소 동위원소 비( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  값) 변화량인 MDICE는 대체로 +3% 내외로 나타났음을 현재까지의 문헌 종합 결과로 특정할 수 있으며, 양의 이상값이 나타나기 전에는 공통적으로 -1%에서 -2% 내외의 음의 이상값, 즉 Lehnert *et al.* (2014)가 LDNICE로 명명한 기록이 나타나고 있음이 관찰 가능하다.

북미 대륙 코노돈트 생층서대의 경우 Young *et al.* (2015)의 네바다 주 및 알버클 산 지역의 층서는 전기 Darriwilian의 *Histiodellella holodontata*대부터 전기 Katian의 *Amorphognathus tvaerensis*대까지 범위(Boger, 1976; Bauer, 1987, 1990, 2010; Brezinski *et al.*, 1999; Leslie *et al.*, 2013; Saltzman *et al.*, 2014)를 가지며 이는 북대서양 코노돈트 생층서대의 *E. variabilis*대와 중기 Sandbian의 생층서대까지를 포함하는 범위이며 탄소 동위원소 이상값은 Darriwilian 중부에서 상부까지의 범위에서 발생한다(그림 2와 5; Cooper *et al.* 2012; Young *et al.*, 2015). Kah *et al.* (2016)의 연구에서는 뉴펀들랜드의 연구층서(Table Head Group)가 북대서양 생층서대의 *P. anserinus*대에 포함되는 것으로 연구되어 있으며(Williams *et al.*, 1987), 연구자들은 이 층서에서 탄소 동위원소비의 증가 양상이 나타나는 것으로 보고하였다.

### 3.3 시베리아 고대륙

현재 문헌적으로 중기 오르도비스기 당시 시베리아 고대륙의 동위원소 화학적 관점에 대한 기록은 Ainsaar *et al.* (2015)이 발표한 기록이 유일하다고 할 수 있다.

#### 3.3.1 지질개요 및 고환경

시베리아는 전 오르도비스기를 통틀어 독립적인 하나의 대륙으로 존재했던 것으로 알려지고 있으며, 당시 로렌시아 북동쪽, 남반구 저위도에서 서서히 북반구 쪽으로 움직여가고 있었던 것으로 생각되며(Cocks and Torsvik, 2007), 발티카 및 로렌시아 고대륙의 경우와 같이 넓은 내륙해를 발달시키고 있었던 것으로 보인다(Kanygin *et al.*, 2010). 중기 오르도비스기인 Darriwilian에 들어서는 초기에도 시베리아는 여전히 저위도에 머물러 있었던 것으로 추측되는데(Dronov, 2013), 전기 오르도비스기에는 따뜻한 해수 환경에서의 탄산염이 퇴적되다가 중기 오르도비스기인 Darriwilian에 들어서는 동안 차가운 해수 환경에서의 탄산염(주로 골격질 생물의 잔해 형태)으로 대체되었던 상태였음이 보고 되었다. 연구 지역은 텅거스 분지(Tungus Basin) 내에 있는 여러 지층들로 점토질 석회암(와 케스톤), 팩스톤, 생쇄설성 석회암, 이회암, 석회질 사암 등의 암상이 분포해 있다. 이 분지에서는 다른 대륙의 탄산염암 퇴적 분지들에 비해 점토질 석회암, 이암이 하부와 중부에도 빈번하게 교호되어 있는 것

이 가장 큰 특징으로, 이미 쇄설성 퇴적물의 유입이 활발했던 분지였다는 점에서 다른 지역과 차이를 보인다(Dronov, 2013; Ainsaar *et al.*, 2015).

### 3.3.2 탄소 동위원소 조성

유일한 보고인 Ainsaar *et al.* (2015)의 결과에 따르면 전지구적 오르도비스기 중기 탄소 동위원소 기록 중에서도 상당히 변화폭이 큰 편인 약 +3%에서 +4% 사이의  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  값 변화가 보고되어 있다(그림 5c). 층서는 Darriwilian의 4b 상부에서 Sandbian에 해당하는 기간까지의 기록을 가지고 있는 것으로 보이나, 본 논평에서는 이 중 저자들이 MDICE인 것으로 생각한 4b 상부에서 4c 중상부까지의 기록을 발췌하였으며, 이는 날카로운 음의 값에서 급격히 양의 값을 보이는 3개의 커브, 그리고 작은 커브와 함께 음의 방향으로 떨어지는 동위원소 값을 반영하고 있다.

이 연구는 연구 지역에 대한 자체적인 생층서대 연구를 포함하고 있는데, 동물군의 차이에도 불구하고 Tolmacheva and Dronov (2008)가 보고한 *Phragmodus cf. flexosus* (*Phragmodus inflexus*) 코노돈트 생층서대가 시베리아 층서 단위에서 Kirensko-Kudrinian stage에 부합하며 필석류 생층서대로는 *Nemagraptus gracilis*대에 속하는 발견이 있었음(Kanygin *et al.*, 2010)을 이용하여 연구지역 중 Kulyumbe 유역의 중부 층서를 중-후기 Darriwilian, 전기 Sandbian에 대비하였다. 이에 따라 이 지역의 후기 Darriwilian 생층서대 이전 부분에 해당하는 Volginian stage에서 넓고 높게 나타나는 이상값을 MDICE에 대비하여 발티카의 Mehikoorma-421 코어에서의 MDICE 기록과 유사성을 찾았다(Kaljo *et al.*, 2007; Ainsaar *et al.*, 2015).

### 3.4 곤드와나 고대륙

과거의 위도에 의거하여 볼 때, 연구 지역들은 대부분 적도 부근과 남위 30°에 위치하여 있으며 현재는 중국 북서부에 위치한 타림분지, 남중국 양쯔 대지, 남미 서부 소산맥으로 넓게 흩어져 있으나 당시에는 남미 지괴가 곤드와나 대륙의 동쪽 해안, 타림 지괴 및 남중국 지괴가 곤드와나의 서쪽 해안에 위치하던 소대륙으로 위치하여 있었다(그림 4). 곤드와나 고대륙에 속해있던 이 연구 지역들에서는 유독 MDICE 등장 시기에서의 퇴적 중단 및 지층 침식이

뚜렷한 편이다.

#### 3.4.1 지질개요 및 고환경

중기 오르도비스기 Darriwilian 시기에 남미 지괴가 곤드와나에 완전히 합류되는 사건이 있었는데, 이때 일어난 조산운동으로 인해 현재의 아르헨티나 내에는 마그마 작용이 일어났던 흔적이 존재한다. 이때 분출한 화산재가 세로 라 실라(Cerro La Silla) 지역의 산 후안(San Juan) 지층에 뚜렷한 벤토나이트 층을 형성하였고, 이를 이용하여 연대를 측정된 결과 전기에서 중기 오르도비스기 층으로 확정된 바 있다(Thompson *et al.*, 2012). 또한 이때의 용기로 인해 남미 대륙 대부분이 노출되었고, 현재의 아르헨티나 소산맥 중앙부에만 얇은 하부 고생대 분지가 보존된 상태로 두꺼운 탄산염암이 퇴적되었는데 이 탄산염 대지 형태의 분지에서 나타난 층서 기록은 조건대부터 대륙붕 경계, 깊은 외해 쪽 램프 환경으로 변해가는, 해수면 변화에 따른 다양한 환경 분포를 보여준다. Thompson *et al.* (2012)과 Thompson and Kah (2012)가 연구한 세로 라 실라 지역의 산 후안층, 산 후안 지역의 팔카마요(Gualcamayo) 층은 중기 Darriwilian에 이르기 전 침식면을 포함한다. 그러므로 연구자들의 연구 시대 범위는 중기 Darriwilian의 코노돈트 생층서대인 *E. suecicus*대와 *P. serra*대의 경계를 포함하지 못하고 *E. suecicus*대의 하부 일부만 포함하는 특징을 가지고 있다. 이 지역들에서의 암상은 주로 두터운 석회암과 이 사이에 나타나는 풍화된 형태의 석회암이며, 필석류가 풍부한 흑색 셰일이 상부 일부에 나타난다.

중국 북서부 타림 분지에서 보고된 기록 역시 연구 시대 범위가 아르헨티나 소산맥과 비슷하다. 타림 분지는 남쪽에 케간 단층(Kegan Fault)과 퀘모-싱싱 단층(Qiemo-Xingxing Fault)을 가지며 북쪽으로는 한텐그리-쿠묵스 단층(Hantengri-kumux Fault)과 아이비 호수-싱싱협곡 단층(Aibi Lake-Xingxing Gorge Fault)을 가지고 있어 주변 지괴와 고립되어 있는 당겨-열림 분지로, 원생대부터 퇴적이 연속적으로 이루어진 안정적이고 깊은 분지이다(Li *et al.*, 1996). Zhang and Munnecke (2015)가 보고한 결과에 따르면 타림분지 내에서 중기 오르도비스기를 나타내는 다완구(Dawangu) 지역, 칼핀 사면(Kalpin slope) 지역 모두 Darriwilian 중기에 들어서면서 침식면이

나타난다(Chen *et al.*, 1992). 이 지역들의 암상은 생쇄설물을 포함하는 석회암과 처어트(chert)가 교호되어 있으며 오르도비스기 당시 사면에서 해안가에 위치했던 환경이었던 것으로 여겨지고, 상당히 얇은 해수 환경이 조성되어 있었던 것으로 해석되고 있는데, 지각변동적인 영향을 받고 있었던 것으로도 보인다(Jia and Wei, 2002).

남중국 지괴에서는 Munnecke *et al.* (2011)이 양쯔(Yangtze) 지역, 지양난(Jiangnan) 지역의 지층을 연구하여 보고하였고, 이후 Ma *et al.* (2015)이 쨌진(Zhenjin)지역과 지엘링(Jieling) 지역에서 중기 오르도비스기 기록을 다시 보고 하였다. 이 중 쨌진 지역과 양쯔 지역의 지층들은 모두 얇은 해수 환경에서 퇴적된 두꺼운 석회암층이 특징적이며(Chen and Qiu, 1986), 지양난 지역과 지엘링 지역의 경우 더 깊은 연안 사면에서 퇴적된 것으로 보이는 점토질 석회암과 흑색 셰일층으로 다른 지역과 구분된다(Chen and Qiu, 1986; Wang *et al.*, 1996).

### 3.4.2 탄소 동위원소비 조성

위에 언급한 연구 지역들 중 많은 부분이 지층의 침식 및 매우 낮은 퇴적률로 인한 얇은 층서가 중기 Darriwilian에 들어서면서 나타난다는 공통점이 있다. 이러한 특징으로 인해 보고된 탄소 동위원소 층서 역시 완전한 형태가 드물고, 중기 Darriwilian에 들어서면서 나타나는 초반 양의 이상값 피크만이 나타나고 그 후는 잘려있는 형태로 나타난다. 이들의 탄소 동위원소는 모두 Ainsaar *et al.* (2010)이 Dw2, Dw3 (BC2)로 명명한 시기까지만 나타나고 있으며(그림 5d, 5e, 5f), 양의 이상값보다 그 이전에 나타나는 음의 이상값, LDNICE의 모양이 더 뚜렷하게 나타나 있다.

아르헨티나의 경우 이전 연구가 지층의 상부로 갈수록 -1.5‰ 가량의 음의 이상값이 나타나다가 약 0‰ 내외의 값인 양의 방향으로의 약 +1.5‰의 변화가 일어나자마자 층서가 침식되어 잘려 있는 한계가 있었으나(Thompson and Kah, 2012), 최근 후속 연구로 이 상부 층서인 Las Chacritas층과 Las Aguaditas층을 연구하여 탄소 동위원소 층서 기록을 보충하였고 이를 그림 5d와 같은 형태로 복원할 수 있게 되었다(Kah *et al.*, 2016). 이 새로운 결과에 따르면 +1.5‰의 변화가 일어난 후 이 양의 이상값이 넓게 유지되는

형태가 관찰된다. 다만 이 지역에서의 퇴적 시기 대비는 생층서 정보가 빈약하고 하부층준의 벤토나이트층 저어콘 U-Pb 연대 측정이 Dapingian 중-후기에 해당한다는 대안적 정보와 Darriwilian으로 추정되는 부분에서의 탄소 동위원소 층서적 형태에 의존하고 있다(Thompson *et al.*, 2012; Kah *et al.*, 2016).

이밖에 타림분지에서의 보고는 양의 방향으로 +0.9‰ (-0.5‰에서 +1.4‰로의 변화량), 남중국 지역에서의 보고는 오히려 중기 Darriwilian에 들어서기 이전 음의 방향으로 약 -1.8‰ 하강하는 변화가 더 뚜렷한 경우가 있는 반면(0.84‰에서 -2.68‰로의 변화; Munnecke *et al.*, 2011), 2.7‰의 큰 양의 상승값(-1‰에서 1.7‰로의 변화; Schmitz *et al.*, 2010)을 보이고 잘리는 경우도 있었으며 0.5‰의 특징적인 상승이 시작되는 구간에서 잘려 있는 경우(1‰에서 1.5‰로의 변화; Ma *et al.*, 2015)도 존재한다. 타림 분지 및 남중국 연구지역에서의 특징은 대부분 북대서양 코노돈트 생층서대에서의 *P. serra*대의 하부 일부에 해당하는 *Yangtzeplacognathus foliaceus*를 포함한다는 점이며(Chen *et al.*, 2010), 이 생층서대의 근처에서 양의 이상값과 함께 부정합 면이 나타난다는 점이다(Schmitz *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2015).

생층서대 및 지층의 연령에 따라 그림 5의 (d)와 (e) 같은 형태로 배열했을 때, 아르헨티나와 남중국에서 분석한 지층은 다른 지역보다 더 이른 시기부터의 기록을 가지고 있으며, 일부는 부정합을 포함한다. 타림 분지 역시 현재까지 보고된 2개 연구(Zhang and Munnecke, 2015; Liu *et al.*, 2016)를 볼 때 공통적으로 음의 이상값이 나타나지 않고 상대적으로 완만한 상승 곡선으로 나타나는 부분을 MDICE로 규정한 바 있으며, 이는 다른 지역들의 특징과 상당히 차이를 보인다.

이러한 면에서 과거 곤드와나 인근 지괴들의 탄소 동위원소 기록들을 취급할 때는 더 주의하여야 하며, 생층서대로 MDICE 구간을 특정하는데 한계가 있는 지역들의 경우 다른 층서적 정보가 조합되어야 한다. 특히 곤드와나와 같이 침식면에 의해 소실된 기록이 많은 대륙에서 실제로 MDICE로 규정할 때의 기준을 좀 더 명확히 할 필요가 있어 보인다.

### 3.5 한반도에서의 MDICE 구간 환경 변화의 인지

중기 오르도비스기 당시 한반도의 위치는 곤드와나

서해안에 위치한 적도대의 소대륙으로 추정되며(그림 4의 Sino-Korean), 시간적으로 조선누층군의 상부가 이에 해당한다(Cheong, 1969; Lee, 1988). 중기 Darriwilian 구간을 생층서적, 퇴적연층 층서적으로 포함하는 구간은 태백형 조선누층군에서 직운산층, 두위봉층인 것으로 알려져 있고(Lee and Lee, 1986), 영월형 조선누층군에서는 영흥층 중부 및 상부가 이에 대비된다(Lee, 1989; Yoo and Lee, 1997). 이 층서들의 탄소 동위원소 조성 및 기타 환경 요소에 대한 예비적 연구가 최근 학회에서 보고되어 있으며(Bang and Lee, 2015a, 2015b, 2016) 이는 한반도에서 나타나는 퇴적층에서도 MDICE의 기록과 전지구적인 환경 변화의 영향을 연구 및 이해할 수 있다는 가능성을 제시한다. 이에 대하여는 별도의 논문에서 자세히 다루고자 한다.

#### 4. 고대륙에 따른 전 지구적 MDICE 기록과 층서의 대비

오르도비스기 암층서 및 화합층서 간의 대비는 주로 필석류와 코노돈트, 삼엽충 등의 생층서대를 통해 그 정확성을 확보할 수 있으며, 그렇지 않은 지역의 경우 벤토나이트 층 분석을 통한 대략적인 연대가 기존 시기와 대비 되어 있다(그림 5d의 경우). 이 논평에서는 MDICE를 보고한 논문들을 종합하면서 코노돈트 생층서대인 *P. serra*대와 그 하부의 *E. suecicus*대의 경계를 기준으로 이들을 나열하여 대비시켜 보았는데, 탄소 동위원소 변화 시기가 이 생층서대의 경계보다 미세하게 빠르고 늦는 정도는 있으나 기존 연구자들이 합의한 MDICE로 보이는 양의 이상값이 모두 이 경계 근처에서 나타나고 있기 때문이다. 또한 위에서 소개한 연구자 대다수가 층서의 연대 정립에 코노돈트 생층서대를 활용하였으며, 지역별로 다르게 정립된 북대서양, 북미 및 중국 생층서대도 기존의 표를 이용하여 연대를 비교하기 용이하였기 때문에(그림 2) 이 논평에서는 북대서양 코노돈트 생층서대 및 그에 부합하는 연대 수치를 기준으로 결과를 수합하여 그림 5과 같은 형태로 비교하였고, 각 연구 지역 별로 확실히 보고된 연대를 중심으로 배치하였기에 아르헨티나 지역에서는 다소의 시간적 차이가 두드러져 나타난다(그림 5d). 생층서대와 탄소 동위원소 층서에서의 MDICE 출현 시기를

대비한 결과 발티카에서는 *E. suecicus*대의 초반부터 MDICE가 출현하여 *P. serra*대의 초반에 하강하는 특징을 보이지만 로렌시아, 시베리아, 타림 분지에서는 MDICE로 추정되는 탄소 동위원소 양의 값이 *E. suecicus*대의 중상부, 혹은 *E. suecicus*대와 *P. serra*대의 경계 직전에 발생하며 특히 로렌시아와 시베리아에서는 이 기록이 Darriwilian 후기까지 이어지고 있다. 곤드와나 및 곤드와나 인근 지역은 퇴적률 차이 및 부정합의 존재로 불규칙하게 보이나 역시 MDICE의 발생인 양의 동위원소 값 출현 시기는 *E. suecicus*대와 *P. serra*대의 경계 직전인 것으로 해석할 수 있다.

고대륙별 퇴적 환경의 유형은 발티카와 로렌시아에서 규산염 쇄설성 부유물의 유입이 제한되어 있고 점차 한랭 환경으로 변해가던 얇은 탄산염 대륙붕(Carbonate shelf) 환경이 대부분을 차지했으나(Mitchell, 1985; Nestor and Einasto, 1997; Pope and Read, 1998; Harris *et al.*, 2004; Brezinski *et al.*, 2012), 곤드와나의 경우 이 규모가 훨씬 크고 평탄한 탄산염 대지(Carbonate platform)로 대부분 해석되며(Mitchell, 1985; Pope and Read, 1998; Brezinski *et al.*, 2012), 시베리아의 경우 온난 환경에서 한랭 환경으로 변해가는 양상이 뚜렷한 대륙붕 환경이었을 것으로 생각되나 다른 지역들과 달리 규산염 쇄설성(siliciclastic) 퇴적물이 더 우세하게 유입되던 환경이었다(Dronov *et al.*, 2013). 이러한 퇴적 환경의 영향은 각 연구 지역에서 보고된 탄소 동위원소 비( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  값)의 변동 폭이 시베리아에서 가장 크고 그 후 로렌시아, 발티카, 곤드와나 순으로 크게 나타나는 양상과 관련이 있어 보이며(그림 5), 이는 특히 지역적으로 탄소 동위원소 값의 변동폭이 그 환경의 순환 상태 및 유입물에 대한 반응과 관련을 가진다는 기존 연구들에 대해 전지구적인 오르도비스기 내륙해 사이에서의 다양성을 암시한다(Patterson and Walter, 1994; Holmden *et al.*, 1998; Immenhauser *et al.*, 2002).

암상으로 MDICE가 위치하는 지층 구간은 석회암층이 연속적으로 퇴적된 경우도 있지만, 높은 비율로 석회암층의 위에 셰일층이 퇴적되는 암층서가 특징적이다. 이러한 구간은 발티카, 시베리아, 남중국과 타림 지괴에서 보고된 지층들에서 공통적으로 나타나며, 남미 서부 소산맥에서와 같이 석회암과 교호되어 나타나기도 한다. 하지만 석회암에서 셰일로의 변화와 침식면은 이 시기에 해침(transgression)

이 있었으나 일부 지역에서는 용기가 활발했다는 1차적인 정보를 우선적으로 제공한다. 이러한 해수면 변화가 MDICE의 발생 요인과 연관이 있는지에 대해서는 향후 추가적인 연구가 더 진행되어야 하겠으나, 적어도 중기 Darriwilian 구간을 포함하고 있으면서 생층서대 활용이 어려운 일부 곤드와나 지역들의 경우 퇴적연층 층서적으로 이를 다른 고대륙 지역과 대비하는데 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

탄소 동위원소 화학 층서에 대한 종합 비교(그림 5) 결과, 지역별로 탄소 동위원소 비( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  값) 변동폭과 세부적인 형태의 차이는 있지만, MDICE는 공통적으로 코노돈트 생층서인 *E. suecicus*대의 중부 이전에는 완만하게 양의 방향으로 움직이는 기록이, *E. suecicus*대의 중부 또는 상부에서는 -1‰에서 -3‰ 사이의 음의 이상값이 나타나고, 그 후 +1.5‰에서 +4‰ 이상의 양의 값이 나타나 *P. serra*대의 하부 및 중부 구간까지 지속되는 양상으로 특징 지을 수 있었다. 화학층서적 대비를 이용한 연구를 하고자 할 때, 중기 Darriwilian에서 곤드와나 내륙해 지역들과 같이 중기 오르도비스기의 층서가 일부 소실된 경우 공통적으로 알려진 양의 값인 MDICE 기록이 뚜렷하지 않은 경우에도 그 하부에 나타나는 공통적 음의 값인 LDNICE를 추적하여 MDICE에 인접한 기록들을 대비할 수 있을 것이다.

이 논평에서는 고대륙별 MDICE의 발생 시기와 형태를 정립하고자 하였으나, 최근 들어 시도된 MDICE의 발생 원인 자체를 지목한 문헌들의 경우 공통적으로 전 지구적인 해양의 상태 변화가 있었을 것으로 생각하며 그 환경 변화의 원동력에 대해서는 다양한 가설이 제시되고 있다(Young *et al.*, 2015; Rasmussen *et al.*, 2016). Young *et al.* (2015)의 경우 황 동위원소를 기초로 한 모델링을 통하여 전 지구적 해양의 순환 증가를 추론하였고, 이에 반해 Rasmussen *et al.* (2016)은 중기 오르도비스기 산소 동위원소 비( $\delta^{18}\text{O}$  값)의 재해석을 통해 중기 오르도비스기 발티카 고대륙에서의 냉각을 일으켰을 수 있는 심층 해류의 활성화와 그에 대한 생물 종 다양화의 패턴을 함께 해석하였다. Rasmussen *et al.* (2016)의 가설은 이 하부 고생대 구간에서의 해양 대순환(Great Ocean Conveyor Belt)이 활성화된 용승(upwelling) 작용으로 오르도비스기 생물 다양화 사건(Great Ordovician Biodiversification Event)을 이끌었으리라는 주장을 포함하고 있으며,

최근 Kah *et al.* (2016)의 연구는 이 두 연구와 같이 순환이 활성화된 해양의 존재를 보고하고 있다. 현재 MDICE가 전지구적으로 출현한다는 점으로 미루어 보아, 다른 고대륙에서의 고환경 해석을 추가할 필요성이 있으며, 이때 위의 연구들을 참고하여 전지구적 해양 환경의 순환 변화가 동반된 시기임을 감안하며 해석할 필요가 있을 것이다.

## 5. 결론 및 요약

중기 오르도비스기는 특징적인 고해양 변화들과 오르도비스기 첫 번째 탄소 동위원소비의 양의 이상값인 MDICE의 출현을 나타내고 있으며, 이전에는 주목되지 않았으나 최근 들어 그 특성을 규명하고 이해하려는 노력이 이어지고 있는 시기이다.

MDICE는 중기 오르도비스기의 중기 Darriwilian 시기의 *E. suecicus*대와 *P. serra*대의 경계부에서 나타나는 +1.5‰에서 +4‰ 내외의 양의 이상값이 나타나는 기록을 지칭하는 용어로 점차 규정되고 있으며, 이러한 기록을 입증하는 보고가 당시의 고대륙인 발티카, 로렌시아, 시베리아, 곤드와나의 분지들에서 이어지고 있다. 이때 탄소 동위원소가 변동하게 된 원인에 대해서는 아직 여러 관점에서 가설이 제시되는 중이다.

암층서적으로 나타나는 전 지구적 해침 사건의 존재 및 황 함유 광물의 풍화 증가, 얕은 해양 환경에서의 표층 생산성 증가 등이 추론되고 있지만 중기 오르도비스기에서 이러한 지구 환경의 변화를 일으킨 근본적인 원인에 대해서는 연구자들 간에 의견의 차이가 있으며, 추가적인 고환경 연구에서 전지구적 해양 환경의 변화가 동반된 시기임을 감안하여 해석할 필요가 있다.

이 논평에서는 중기 오르도비스기에 대해 보고된 환경 변화의 지표들과 지역별 탄소 동위원소 층서의 비교를 통해 최근 들어 부각되기 시작한 MDICE의 대비 기준을 종합하여 보았으며, MDICE의 출현 시기를 특정하고자 현재까지의 연구 데이터들을 종합하였다.

## 사 사

이 연구는 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: NRF-2014R1A2A2A01005404)에 의하여 지원되었다. 이 논문을 읽고 많은 조언을 하여주신 심사위원 정공수 교수님과 이정현 교수님께 감사드린다.

## REFERENCES

- Ainsaar, L., Kaljo, D., Martma, T., Meidla, T., Männik, P., Nõlvak, J. and Tinn, O., 2010, Middle and Upper Ordovician carbon isotope chemostratigraphy in Baltoscandia: a correlation standard and clues to environmental history. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 294, 189-201.
- Ainsaar, L., Männik, P., Dronov, A.V., Izokh, O.P., Meidla, T. and Tinn, O., 2015, Carbon isotope chemostratigraphy and conodonts of the Middle-Upper Ordovician succession in the Tungus Basin, Siberian Craton. *Palaeoworld*, 24, 123-135.
- Ainsaar, L., Meidla, T., Martma, T. and Tinn, O., 2001, Upper Ordovician stable isotope correlation across the facies belts in the East Baltic. *WOGOGO-2001 Abstracts*, 5-6.
- Ainsaar, L., Meidla, T. and Tinn, O., 2004, Middle and Upper Ordovician stable isotope stratigraphy across the facies belts in the East Baltic. *Proceedings WOGOGO-2004 Conference Materials*. Tartu University Press, Tartu, 11-12.
- Albanesi, G.L., Bergström, S.M., Schmitz, B., Serra, F., Feltes, N.A., Voldman, G.G. and Ortega, G., 2013, Darriwilian (Middle Ordovician)  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  chemostratigraphy in the Precordillera of Argentina: Documentation of the middle Darriwilian Isotope Carbon Excursion (MDICE) and its use for intercontinental correlation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 389, 48-63.
- Algeo, T.J., Marengo, P.J. and Saltzman, M.R., 2016, Co-evolution of oceans, climate, and the biosphere during the 'Ordovician Revolution': A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 458, 1-11.
- Amodio, S., Ferreri, V., D'Argenio, B., Weissert, H. and Sprovieri, M., 2008, Carbon-isotope stratigraphy and cyclostratigraphy of shallow-marine carbonates: the case of San Lorenzello, Lower Cretaceous of southern Italy. *Cretaceous Research*, 29, 803-813.
- Azmy, K. and Lavoie, D., 2009, High-resolution isotope stratigraphy of the Lower Ordovician St. George Group of western Newfoundland, Canada: implications for global correlation. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 46, 403-423.
- Bang, S. and Lee, Y.I., 2015a, Carbon, nitrogen, and sulfur isotope changes recorded in Middle Ordovician strata, Taebaeksan Basin: Implications for paleoceanographic conditions. 2015 Fall Joint Conference of Geological Sciences Societies of Korea, Abstracts, p. 95.
- Bang, S. and Lee, Y.I., 2015b, The occurrence of the middle Darriwilian carbon isotope excursion in Korean lower paleozoic succession and its paleoceanographic implications. *Geological Society of America Annual Meeting Abstracts with Programs* 2015, 47, p. 666.
- Bang, S. and Lee, Y.I., 2016, Equatorial paleoceanographic conditions during the middle Darriwilian carbon isotope event (MDICE): an example from the Korean Middle Ordovician successions. 2016 Fall Joint Conference of Geological Sciences Societies of Korea, Abstracts, p. 94.
- Bauer, J.A., 1987, Conodonts and conodont biostratigraphy of the McLish and Tulip Creek Formations (Middle Ordovician) of South-Central Oklahoma. *Oklahoma Geological Survey Bulletin*, 141, 58.
- Bauer, J.A., 1990, Stratigraphy and conodont biostratigraphy of the Upper Simpson Group, Arbuckle Mountains, Oklahoma. *Oklahoma Geological Survey Guidebook* 27, 39-53.
- Bauer, J.A., 2010, Conodonts and conodont biostratigraphy of the Joins and Oil Creek Formations, Arbuckle Mountains, south-central Oklahoma. *Oklahoma Geological Survey Bulletin*, 150, 1-44.
- Bauert, H., Ainsaar, L., Pöldsar, K. and Sepp, S., 2014,  $\delta^{13}\text{C}$  chemostratigraphy of the Middle and Upper Ordovician succession in the Tartu-453 drillcore, southern Estonia, and the significance of the HICE. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 63, 195.
- Bergström, S.M., Chen, X., Gutiérrez-Marco, J.C. and Dronov, A., 2009, The new chronostratigraphic classification of the Ordovician System and its relations to major regional series and stages and to  $\delta^{13}\text{C}$  chemostratigraphy. *Lethaia*, 42, 97-107.
- Bergström, S.M., Kleffner, M. and Schmitz, B., 2007,  $\delta^{13}\text{C}$  chemostratigraphy of the Manitoulin Formation (Ordovician-Silurian) and underlying strata in Ontario: a new interpretation of age and depositional relationships. *Geological Society of America Annual Meeting Abstracts with Programs* 2007, 39, p. 69.
- Berner, R.A., 1990, Atmospheric carbon dioxide levels over Phanerozoic time. *Science*, 249, 1382-1386.
- Berner, R.A., 2006, Inclusion of the weathering of volcanic rocks in the GEOCARBSULF model. *American Journal of Science*, 306, 295-302.
- Berry, W.B., Ripperdan, R.L. and Finney, S.C., 2002, Late Ordovician extinction: a Laurentian view. In: Koeberl, C. and MacLeod, K.G. (Eds.), *Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond*. Geological Society

- of America Special Paper 356, p. 463-472.
- Boger, J.B., 1976, Conodont Biostratigraphy of the Upper Beekmantown Group and St. Paul Group (Middle Ordovician) of Maryland and West Virginia. M.S. Thesis, The Ohio State University, 360 p.
- Brezinski, D.K., Repetski, J.E. and Taylor, J.F., 1999, Stratigraphic and paleontologic record of the Sauk III regression in the central Appalachians. National Park Service Paleontological Research Technical Report, 4, 32-41.
- Brezinski, D.K., Taylor, J.F. and Repetski, J.E., 2012, Sequential development of platform to off-platform facies of the great American carbonate bank in the central Appalachians. In: Derby, J.R., Fritz, R.D., Fritz, S.A., Longacre, S.A., Morgan, W.A. and Sternbach, C.A. (Eds.), The Great America Carbonate Bank: The Geology and Economic Resources of the Cambrian-Ordovician Sauk Megasequence of Laurentia. Association of American Petroleum Geologists Memoir, 98, 383-420.
- Buggisch, W., Keller, M. and Lehnert, O., 2003, Carbon isotope record of Late Cambrian to Early Ordovician carbonates of the Argentine Precordillera. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 195, 357-373.
- Calner, M., Lehnert, O., Wu, R., Dahlqvist, P. and Joachimski, M.M., 2014,  $\delta^{13}\text{C}$  chemostratigraphy in the Lower-Middle Ordovician succession of Öland (Sweden) and the global significance of the MDICE. *GFF*, 136, 48-54.
- Chen, X., Bergström, S.M., Zhang, Y.D., Goldman, D. and Chen, Q., 2010, Upper Ordovician (Sandbian-Katian) graptolite and conodont zonation in the Yangtze region, China. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 101, 111-134.
- Chen, X. and Qiu, J., 1986, Ordovician palaeoenvironmental reconstruction of Yichang area, W. Hubei. *Journal of Stratigraphy*, 10, 1-15.
- Chen, Y., Cogné, J.-P. and Courtillot, V., 1992, New Cretaceous paleomagnetic poles from the Tarim Basin, northwestern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 114, 17-38.
- Cheong, C.H., 1969, Stratigraphy and paleontology of the Samcheog coalfield, Gangweondo, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, 5, 13-56
- Cherns, L., Wheeley, J.R., Popov, L., Pour, M.G., Owens, R. and Hemsley, A.R., 2013, Long-period orbital climate forcing in the early Palaeozoic? *Journal of Geological Society of London*, 170, 707-710.
- Cocks, L.R.M. and Torsvik, T.H., 2007, Siberia, the wandering northern terrane, and its changing geography through the Palaeozoic. *Earth-Science Reviews*, 82, 29-74.
- Cooper, R.A. and Sadler, P.M., 2012, The Ordovician Period. In: Gradstein, F., Ogg, J., Schmitz, M. and Ogg, G. (Eds.), *The Geologic Time Scale 2012*, Oxford, Elsevier, 489-524.
- Diz, P., Jorissen, F.J., Reichart, G.J., Poulain, C., Dehairs, F., Leorri, E. and Paulet, Y.M., 2009, Interpretation of benthic foraminiferal stable isotopes in subtidal estuarine environments. *Biogeosciences*, 6, 2549-2560.
- Dronov, A., 2013, Late Ordovician cooling event: evidence from the Siberian Craton. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 389, 87-95.
- Dronov, A. and Holmer, L., 1999, Depositional sequences in the Ordovician of Baltoscandia. *Acta-Universitatis Carolinae Geologica*, 1/2, 133-136.
- Ferreri, V., Weissert, H., d'Argenio, B. and Buonocunto, F., 1997, Carbon isotope stratigraphy: A tool for basin to carbonate platform correlation. *Terra Nova*, 9, 57-61.
- Finney, S.C., Berry, W.B., Cooper, J.D., Ripperdan, R.L., Sweet, W.C., Jacobson, S.R., Soufiane, A., Achab, A. and Noble, P.J., 1999, Late Ordovician mass extinction: a new perspective from stratigraphic sections in central Nevada. *Geology*, 27, 215-218.
- Gruber, N., Keeling, C.D., Bacastow, R.B., Guenther, P.R., Lueker, T.J., Wahlen, M. and Stocker, T.F., 1999, Spatiotemporal patterns of carbon-13 in the global surface oceans and the oceanic Suess effect. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 307-335.
- Halverson, G.P., Hoffman, P.F., Schrag, D.P., Maloof, A.C. and Rice, A.H.N., 2005, Toward a Neoproterozoic composite carbon-isotope record. *Geological Society of America Bulletin*, 117, 1181-1207.
- Harris, M.T., Sheehan, P.M., Ainsaar, L., Hints, L., Männik, P., Nõlvak, J. and Rubel, M., 2004, Upper Ordovician sequences of western Estonia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 210, 135-148.
- Haq, B.U. and Schutter, S.R., 2008, A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science*, 322, 64-68.
- Holmden, C., Creaser, R., Muehlenbachs, K., Leslie, S. and Bergström, S., 1998, Isotopic evidence for geochemical decoupling between ancient epeiric seas and bordering oceans: implications for secular curves. *Geology*, 26, 567-570.
- Immenhauser, A., Kenter, J.A., Ganssen, G., Bahamonde, J.R., Van Vliet, A. and Saher, M.H., 2002, Origin and significance of isotope shifts in Pennsylvanian carbonates (Asturias, NW Spain). *Journal of Sedimentary Research*, 72, 82-94.
- Jaanusson, V., 1973, Aspects of carbonate sedimentation in the Ordovician of Baltoscandia. *Lethaia*, 6, 11-34.
- Jia, C. and Wei, G., 2002, Structural characteristics and petroliferous features of Tarim Basin. *Chinese Science Bulletin*, 47, 1-11.
- Kah, L.C., Thompson, C.K., Henderson, M.A. and Zhan,

- R., 2016, Behavior of marine sulfur in the Ordovician. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 458, 133-153.
- Kaljo, D., Hints, L., Hints, O., Martma, T. and Nölvak, J., 1999, Carbon isotope excursions and coeval biotic-environmental changes in the late Caradoc and Ashgill of Estonia. *Acta-Universitatis Carolinae Geologica*, no.1/2, 507-510.
- Kaljo, D., Hints, L., Martma, T., Nölvak, J. and Oraspöld, A., 2004, Late Ordovician carbon isotope trend in Estonia, its significance in stratigraphy and environmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 10, 165-185.
- Kaljo, D., Martma, T. and Saadre, T., 2007, Post-Hunnebergian Ordovician carbon isotope trend in Baltoscandia, its environmental implications and some similarities with that of Nevada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 245, 138-155.
- Kanygin, A.V., Koren, T.N., Yadrenkina, A.G., Timokhin, A.V., Sychev, O.V. and Tolmacheva, T.Y., 2010, Ordovician of the Siberian Platform. In: Finney, S.C. and Berry, W.B.N. (Eds.), *The Ordovician Earth System*. Geological Society of America Special Paper, 466, 105-117.
- Kump, L.R. and Arthur, M.A., 1999, Interpreting carbon-isotope excursions: carbonates and organic matter. *Chemical Geology*, 161, 181-198.
- Kump, L.R., Pavlov, A. and Arthur, M.A., 2005, Massive release of hydrogen sulfide to the surface ocean and atmosphere during intervals of oceanic anoxia. *Geology*, 33, 397-400.
- Kroopnick, P.M., 1985, The distribution of  $^{13}\text{C}$  of  $\Sigma\text{CO}_2$  in the world oceans. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 32, 57-84.
- Lambert, I., Walter, M., Wenlong, Z., Songnian, L. and Guogan, M., 1987, Palaeoenvironment and carbon isotope stratigraphy of Upper Proterozoic carbonates of the Yangtze Platform. *Nature*, 325, 140-142.
- Lee, H.Y., 1988, Paleozoic Eratherm. In: Lee, D.S. (Ed.), *Geology of Korea*, Kyohak-sa, Seoul, 49-156.
- Lee, S.J., 1989, Conodonts biostratigraphy and paleontology of the lower Paleozoic Yeongheung Formation in the Yeongweol area, Kangweondo, Korea, unpublished Ph.D thesis, Yeonsei University, Seoul), 107 p.
- Lee, Y.I., Choi, T., Lim, H.S. and Orihashi, Y., 2016, Detrital zircon geochronology and Nd isotope geochemistry of the basal succession of the Taebaeksan Basin, South Korea: Implications for the Gondwana linkage of the Sino-Korean (North China) block during the Neoproterozoic-early Cambrian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 441, 770-786.
- Lee, Y.N. and Lee, H.Y., 1986, Conodont biostratigraphy of the Jigunsan Shale and Duwibong Limestone in the Nokjeon-Sangdong area, Yeongweol-gun, Kangweondo, Korea. *Journal of Paleontological Society of Korea*, 2, 114-136.
- Lehnert, O., Meinhold, G., Wu, R., Calner, M. and Joachimski, M.M., 2014,  $\delta^{13}\text{C}$  chemostratigraphy in the upper Tremadocian through lower Katian (Ordovician) carbonate succession of the Siljan district, central Sweden. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 63, 277.
- Leslie, S.A., Repetski, J.E., Saltzman, M.R., Kaznosky, C.M. and Lizer, A.M., 2013, Conodont biostratigraphy of the Rockdale Run Formation, Pinesburg Station Dolomite, St. Paul Group, and Chambersburg Formation (Middle to Lower Upper Ordovician) near Clear Spring, Maryland. *Denber, Colorado, Geological Society of America Abstracts with Programs*, 45, 836.
- Li, Z., Zhang, L. and Powell, C.M., 1996, Positions of the East Asian cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43, 593-604.
- Liu, C., Li, G., Wang, D., Liu, Y., Luo, M. and Shao, X., 2016, Middle-Upper Ordovician (Darriwilian-Early Katian) positive carbon isotope excursions in the northern Tarim Basin, northwest China: Implications for stratigraphic correlation and paleoclimate. *Journal of Earth Science*, 27, 317-328.
- Lynch-Stieglitz, J., 2006, Tracers of past ocean circulation. In: Elderfield, H. (Ed.), *The Oceans and Marine Geochemistry, Treatise on Geochemistry 6*, Elsevier, 433-451.
- Ma, X., Wang, Z.-H., Zhang, Y.-D., Song, Y.-Y. and Fang, X., 2015, Carbon isotope records of the Middle-Upper Ordovician transition in Yichang area, South China. *Palaeoworld*, 24, 136-148.
- Maslin, M.A. and Swann, G.E., 2006, Isotopes in marine sediments. In: Leng, M.J. (Ed.), *Isotopes in Palaeoenvironmental Research*, Springer, 227-290.
- Mitchell, R.W., 1985, Comparative sedimentology of shelf carbonates of the Middle Ordovician St. Paul Group, central Appalachians. *Sedimentary Geology*, 43, 1-41.
- Munnecke, A., Zhang, Y., Liu, X. and Cheng, J., 2011, Stable carbon isotope stratigraphy in the Ordovician of South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 307, 17-43.
- Mutti, M., John, C.M. and Knoerich, A.C., 2006, Chemostratigraphy in Miocene heterozoan carbonate settings: Applications, limitations and perspectives. *Geological Society of London Special Publication 255*, 307-322.
- Nestor, V. and Einasto, R., 1997, Correlation of some Wenlock outcrop sections of Gotland with the Ohesaare section of Saaremaa, Estonia. In: *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology 1997*, 46, Estonian Academy Publishers, 155-168.

- Nölvak, J., Hints, O. and Männik, P., 2006, Ordovician timescale in Estonia: recent developments. In: Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, *Geology* 55, 95-108.
- Patterson, W.P. and Walter, L.M., 1994, Depletion of  $^{13}\text{C}$  in seawater  $\Sigma\text{CO}_2$  on modern carbonate platforms: Significance for the carbon isotopic record of carbonates. *Geology*, 22, 885-888.
- Patzkowsky, M.E., Slupik, L.M., Arthur, M.A., Pancost, R.D. and Freeman, K.H., 1997, Late Middle Ordovician environmental change and extinction: Harbinger of the Late Ordovician or continuation of Cambrian patterns? *Geology*, 25, 911-914.
- Pope, M. and Read, J.F., 1998, Ordovician metre-scale cycles: implications for climate and eustatic fluctuations in the central Appalachians during a global greenhouse, non-glacial to glacial transition. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 138, 27-42.
- Rasmussen, C.M., Ullmann, C.V., Jakobsen, K.G., Lindskog, A., Hansen, J., Hansen, T., Eriksson, M.E., Dronov, A., Frei, R. and Korte, C., 2016, Onset of main Phanerozoic marine radiation sparked by emerging Mid Ordovician icehouse. *Scientific Reports*, 6, doi: 10.1038/srep18884.
- Saltzman, M.R., 2005, Evolution of the marine carbon cycle during the Paleozoic. *Geological Society of America Annual Meeting Abstracts with Programs* 2005, 36.
- Saltzman, M.R., Edwards, C.T., Leslie, S.A., Dwywer, G.S., Bauer, J.A., Repetski, J.E., Harris, A.G. and Bergstrom, S.M., 2014, Calibration of a conodont apatite-based Ordovician Sr-87/Sr-86 curve to biostratigraphy and geochronology: implications for stratigraphic resolution. *Geological Society of America Bulletin*, 126, 1551-1568.
- Saltzman, M. and Thomas, E., 2012, Carbon isotope stratigraphy. In: Gradstein, F., Ogg, J., Schmitz, M. and Ogg, G. (Eds.), *The Geologic Time Scale 2012*, Oxford, Elsevier, 207-232.
- Saltzman, M.R. and Young, S.A., 2005, Long-lived glaciation in the Late Ordovician? Isotopic and sequence-stratigraphic evidence from western Laurentia. *Geology*, v. 33, no. 2, p. 109-112.
- Sarmiento, J. and Gruber, N., 2006, Saturation concentration of gases in seawater: *Ocean Biogeochemical Dynamics*, Princeton University Press, Princeton, p. 81.
- Schmitz, B., Bergström, S.M. and Xiaofeng, W., 2010, The middle Darrwilian (Ordovician)  $\delta^{13}\text{C}$  excursion (MDICE) discovered in the Yangtze Platform succession in China: implications of its first recorded occurrences outside Baltoscandia. *Journal of Geological Society of London*, 167, 249-259.
- Scholle, P.A. and Arthur, M.A., 1980, Carbon isotope fluctuations in Cretaceous pelagic limestones: potential stratigraphic and petroleum exploration tool. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 64, 67-87.
- Scotese, C.R. and Golonka, J., 1997, Paleogeographic atlas. University of Texas at Arlington Paleomap Project 1, p. 31.
- Sepkoski Jr, J.J., 1996, Patterns of Phanerozoic extinction: a perspective from global data bases. In: Walliser, O.H. (Ed.), *Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic*, Berlin, Springer, 35-51.
- Sial, A.N., Peralta, S., Gaucher, C., Toselli, A.J., Ferreira, V.P., Frei, R., Parada, M.A., Pimentel, M.M. and Pereira, N.S., 2013, High-resolution stable isotope stratigraphy of the upper Cambrian and Ordovician in the Argentine Preordillera: carbon isotope excursions and correlations. *Gondwana Research*, 24, 330-348.
- Sundquist, E. and Visser, K., 2003, The geologic history of the carbon cycle. In: Schlesinger, W.H. (Ed.), *Treatise on Geochemistry* 8, Elsevier, 425-472.
- Thomas, E., Zachos, J.C. and Bralower, T.J., 2000, Deep-sea environments on a warm earth: latest Paleocene-early Eocene. In: Huber, B., MacLeod, K. and Wing, S. (Eds.), *Warm Climates in Earth History*, Wesleyan University Division III Faculty Publications, Cambridge University Press, 132-160.
- Thompson, C.K. and Kah, L.C., 2012, Sulfur isotope evidence for widespread euxinia and a fluctuating oxycline in Early to Middle Ordovician greenhouse oceans. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 313, 189-214.
- Thompson, C.K., Kah, L.C., Astini, R., Bowring, S.A. and Buchwaldt, R., 2012, Bentonite geochronology, marine geochemistry, and the Great Ordovician Biodiversification Event (GOBE). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 321, 88-101.
- Tolmacheva, T.Y. and Dronov, A.V., 2008, Lower boundary of the Upper Ordovician on the East European and Siberian platform. *Geobiosphere Events and History of the Organic World, Materials of LIV Session of Paleontological Society*, April 7-11, St. Petersburg, 174-175.
- Torsvik, T.H. and Cocks, L.R.M. 2013, Gondwana from top to base in space and time. *Gondwana Research*, 24, 999-1030.
- Trotter, J.A., Williams, I.S., Barnes, C.R., Lécuyer, C. and Nicoll, R.S., 2008, Did cooling oceans trigger Ordovician biodiversification? Evidence from conodont thermometry. *Science*, 321, 550-554.
- Tsikos, H., Jenkyns, H., Walsworth-Bell, B., Petrizzo, M., Forster, A., Kolonic, S., Erba, E., Silva, I.P., Baas, M. and Wagner, T., 2004, Carbon-isotope stratigraphy recorded by the Cenomanian-Turonian Oceanic Anoxic Event: correlation and implications based on three key localities. *Journal of Geological Society of London*, 161, 711-719.
- Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., Bruckschen, P., Buhl, D.,

- Bruhn, F., Carden, G., Diener, A., Ebner, S., Godderis, Y., Jasper, T., Korte, C., Pawellek, F. and Strauss, H., 1999,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical geology*, 161, 59-88.
- Wang, X., Li, Z., Chen, J., Chen, X. and Shu, W., 1996, Early Ordovician sea-level changes in South China and their worldwide correlation. *Journal of China University of Geosciences*, 7, 54-62.
- Weissert, H., Lini, A., Föllmi, K.B. and Kuhn, O., 1998, Correlation of Early Cretaceous carbon isotope stratigraphy and platform drowning events: a possible link? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137, 189-203.
- Williams, H., Boyce, W.D. and James, N.P., 1987, Graptolites from the Lower-Middle Ordovician St. George and Table Head groups, western Newfoundland, and their correlation with trilobite, brachiopod, and conodont zones. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 24, 456-470.
- Wu, R., Calner, M. and Lehnert, O., 2016, Integrated conodont biostratigraphy and carbon isotope chemostratigraphy in the Lower-Middle Ordovician of southern Sweden reveals a complete record of the MDICE. *Geological Magazine*, <https://doi.org/10.1017/S0016756816000017>.
- Yao, W.H., Li, Z.X. and Li, W.X., 2015, Was there a Cambrian ocean in South China?-Insight from detrital provenance analyses. *Geological Magazine*, 152, 184-191.
- Yoo, C.M. and Lee, Y.I., 1997, Depositional cyclicality of the Middle Ordovician Yeongheung Formation, Korea. *Carbonates and Evaporites*, 12, 192-203.
- Young, S.A., Gill, B.C., Edwards, C.T., Saltzman, M.R. and Leslie, S.A., 2015, Middle-Late Ordovician (Darriwilian-Sandbian) decoupling of global sulfur and carbon cycles: Isotopic evidence from eastern and southern Laurentia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 458, 118-132.
- Young, S.A., Saltzman, M.R., Foland, K.A., Linder, J.S. and Kump, L.R., 2009, A major drop in seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  during the Middle Ordovician (Darriwilian): Links to volcanism and climate? *Geology*, 37, 951-954.
- Zhang, Y. and Munnecke, A., 2015, Ordovician stable carbon isotope stratigraphy in the Tarim Basin, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 458, 154-175.

---

Received : July 27, 2016

Revised : November 11, 2016

Accepted : November 17, 2016