

Campbell Drift 망간단괴의 성장단계와 생성연대

장세원, 최현수, 이성록

한국지질자원연구원 석유해저자원연구부(swchang@kigam.re.kr)

1. 서론

본 연구는 남서태평양의 뉴질랜드 남동쪽에 위치한 Campbell Plateau 동쪽의 Campbell Drift 지역에 분포하는 철망간단괴에 대하여 해저지형에 따른 산출상태 및 생성연대, 성장단계에 따른 광물·지화학적 변화 및 단괴성장률을 규명하기 위한, 한국지질자원연구원(KIGAM), 뉴질랜드 지질핵과학연구소(Institute of Geological & Nuclear Sciences Ltd.: GNS), 뉴질랜드 국립 해양대기 연구소(National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd.: NIWA)의 3개년 국제공동연구(과학기술부 과제번호 I-04-024) 결과와 한국지질자원연구원 기관고유사업(01-3116) 중의 Leg 181 지역 망간단괴 연구결과의 일부이다.

NIWA에서는 SAA3 (Sub-Antarctic 3: No.3059, TAN9909) 탐사에서 Campbell Plateau의 하부 경계와 Bollons Seamount에 수직인 DWBC(Deep Western Boundary Current)의 흐름을 가로지르는 방향으로 Campbell Drift 지역에서 일련의 드렛지에 의한 망간단괴 시료 채취와 심해저카메라에 의한 해저면의 망간단괴 분포사진을 획득하였다 (Wright et al., 2001).

2. 연구 및 실험방법

광물·지화학적 특성을 규명하기 위하여 총 13개 시료가 선별되었으며, 대표적인 9개 시료를 선별하여 연마편을 제작하여 광학현미경 및 주사전자현미경 하에서 미세조직을 관찰 기재하고, 4개 시료에 대하여는 각각의 조직대에 대한 광물 및 지화학적 특성연구 및 전자현미분석을 수행하였다 (Chang et al., 2001). 한편 시료의 절단된 다른 단면은 GNS에 보내 각 층리별로 ^{10}Be 과 ^9Be 함량을 측정하였으며 (Graham et al., 2001), 이들 결과를 내부조직의 변화와 함께 고찰하여 망간단괴의 성장률과 생성연대를 규명하였다.

3. 결과

가. 산출상태

조사지역에 분포하는 망간단괴의 산상(Facies)을 요약하면 크게 6개로 구분된다. Facies RH는 부존밀도가 높고 해저면에서 비교적 큰 원형의 단괴가 밀집된 분포를 보이는 산상이며, Facies DH는 높은 부존밀도를 보이는 초기 속성기원의 단괴 산상이며, Facies IB는 암괴와 함께 불규칙한 형태의 단괴들이 분포하는 산상이다. Facies HH는 비교적 작은 크기의 수성기원의 단괴가 밀집되어 높은 부존밀도를 보이는 산상이며, Facies DL은 비교적 낮은 부존밀도를 보이는 초기 속성기원 단괴의 산상이다. Facies HB는 암괴나 망간각과 함께 분포하는 수성기원 단괴의 산상이다.

Be 동위원소 분석을 위하여 선별된 망간단괴 시료가 채취된 지점의 단괴 산상과 주 단괴유형은 아래와 같다 (Table 1).

Table 1. General descriptions of sampling locations.

Dredge No.	Camera No.	Water depth (m)	Dredging time (min)	Numbers of Nodules recovered	Max size (cm)	Main facies	Main morphologies
U1365B	U1366	4,600	98	33	30	IB, HB	B _s , I _{t-b} ^b , I _{t-b} ^s , S _b ^s
U1373	U1372	4,900	24	631	15	RH	E _{bt} ^{bs} , D _{bt} ^{bs}
U1398	U1397	4,500	86	825	12	DH-DL	S _b , E _b > P _b , P _t
U1402	U1404	4,500	53	1,372	20	HH	S _b , E _b , D _b , P _{b-r} , T _{b-r} , I _{r-b} , I _t , U _{r-b} ^t
U1406B	U1405	4,400	53	432	30	RH	S _s , E _s , P _s , I _s > U _s ^s
U1413	U1414	4,600	43	33	12	RH	S _{t-b} , U _{bt} , I _b

나. 성장단계

U1365B-1은 절단된 단면에서 버섯모양의 형태를 보여주는 커다란 I_{t-b}^b 형 단괴로 커다란 피상의 망간각 표면을 철망간산화물이 얇게 피복한 것으로 생각된다. Be 동위원소 분석과 광물 및 화학조성 분석을 위하여, 절단면을 따라 표면에서 중심으로 가면서 11개의 조직대로 구분하여 부시료를 채취하였으나 현미경하에서의 성장단계는 크게 4단계로 구분된다.

U1365B-2는 S_b^s 형의 단괴로 6개의 부시료를 채취하였으나 성장단계의 경계가 명확하지 않다. U1365B-3은 비교적 커다란 S_b^s 형 단괴로 8개의 조직대로 분류하였으며 성장단계는 5단계로 구분된다. U1365B-M은 제일 큰 S_b^s 형 단괴로 18개의 조직대로 분류하였고 성장단계는 5단계로 구분된다. 내부의 6개의 조직대로 분류한 부분은 고기 단괴로 외곽의 12개의 조직대와 뚜렷한 경계를 보여준다.

U1373-2는 상부에 overgrowth된 층리를 가진 3개 시료 중의 하나로서 위로 다소 신장된 형태의 E_{bt}^{bs} 형 단괴이며 11개의 조직대로 분류하였고 성장단계는 4단계로 구분된다. 비록 단괴하부의 층리들이 부분적으로 용해되었는지 떨어져나갔는지는 확실치 않지만 최상부의 철망간산화물 층리는 확실히 하부의 층리를 부정합적으로 덮고 있으며, 이는 퇴적물 내에 매몰된 단괴의 하부는 성장을 중단한 반면, 노출된 부분은 최상부의 층리가 피복하며 성장하였다는 사실을 뒷받침한다.

U1398-1은 S_b 형의 단괴로서 침상의 내부조직으로 보아 초기속성기원 단괴로 생각되며 6개의 조직대로 분류하였으나 현미경하에서 내부와 외부가 그 성인이 서로 다른 것으로 생각되는 두 가지의 성장조직을 보여주나 성장단계의 경계는 명확하지 않다.

U1402-1은 옆이 신장된 다소 원반형의 U_{r-b}^t 형의 단괴로 U1373-2와 마찬가지로 상부에 overgrowth 층리를 갖는다. 전체를 10개의 조직대로 분류하였으나, 내부를 구성하는 구형 단괴는 3단계의 성장단계를 보여주며 이를 피복한 overgrowth 층리는 2단계의 성장단계를 갖는 것으로 보이나 그 경계는 명확하지 않다. 내부 조직대의 두께는 방향에 따라 다르다.

U1406B-2는 커다란 S_b^s 형 단괴로 U1365B-2, U1365B-3 및 U1365B-M과 유사하다. 12개의 조직대로 분류하였으나 성장단계는 5단계로 생각된다.

U1413-1도 U1402-1과 유사한, 옆이 신장된 다소 원반형의 U_{r-b}^t 형의 단괴로 상부에 overgrowth 층리를 갖는다. 상부표면에서 하부표면까지의 단면 전체를 14개의 조직대로 구분

하였으나, 상부는 5단계의 성장단계를 하부는 3단계의 성장단계를 보여주며, 방향에 따라 다소 다른 두께를 보인다.

다. 연대측정 결과

U1365B-1 단괴는 약 11.6Ma에서 성장을 시작하여 약 5.2-5.5Ma까지는 13.43mm/My의 성장률을 가지며 5.2Ma 이후에는 8.06mm/My의 낮은 성장률을 가진다. 내부조직에 의하면 약 8.4Ma, 6.2Ma, 5-2-5.5Ma, 0.3-0.4Ma에서 성장환경의 변화를 보여준다. 내부의 망간각 및 외각의 철망간산화물성장 모두 수성기원의 범위에 도시되는 REE 유형을 갖는다.

U1365B-2 단괴는 약 8.8Ma에서 성장을 시작하여 약 5.1-5.2Ma까지는 11.47mm/My의 성장률을 가지며 5.1Ma 이후에는 2.72mm/My의 낮은 성장률을 가진다. 내부조직에 의하면 뚜렷한 성장환경의 변화는 나타나지 않으며 최외각을 제외하고는 모두 수성기원의 범위에 도시되는 REE 유형을 갖는다. 최외각은 수성기원과 초기 속성기원의 중간범위의 REE 유형을 갖는다.

U1365B-3 단괴는 약 13.7Ma에서 성장을 시작하여 약 8.5Ma까지는 8.94mm/My의 성장률을 가지며 8.5Ma 이후에는 3.56mm/My의 낮은 성장률을 가진다. 내부조직에 의하면 약 8.5Ma, 3.6Ma, 0.8Ma에서 성장환경의 변화를 보여준다. 최외각과 가장 내부의 층은 수성기원과 초기 속성기원의 중간범위의 REE 유형을 갖는 반면, 중간 층은 표면에서 두 번째의 층리를 제외하고는 모두 수성기원의 범위에 도시되는 REE 유형을 갖는다. 두 번째의 층리는 초기 속성기원에 속하는 범위의 REE 유형을 갖는다. 즉 13.7Ma 에서 약 10.4Ma까지는 복합적인 기원, 약 10.4Ma 에서 1.6Ma까지는 수성기원, 1.6Ma 에서 0.8Ma까지는 초기 속성기원, 0.8Ma 이후는 복합적인 기원의 성장환경을 보여준다.

U1365B-M 단괴는 약 14.2Ma에서 약 8.4Ma 까지 성장된 단괴를 핵으로 하여 성장이 계속된 양상을 보여주는데, 약 14.2Ma에서 12.7Ma까지는 19.57mm/My의 빠른 성장률을 가지며, 12.7Ma 부터 약 8.4Ma까지는 7.10mm/My의 낮은 성장률을 가진다. 이러한 고기 단괴는 복합적인 기원에 속하는 REE 유형을 보여주는 반면 약 8.4Ma 부터 이 고기 단괴를 핵으로 하여 성장한 외각은 모두 수성기원의 범위에 속하는 REE 유형을 보여준다. 약 8.4Ma 부터 6.5Ma까지는 6.05mm/My의 성장률을, 그 이후에는 4.08mm/My의 성장률을 보인다. 내부조직에 의하면 약 2.7Ma 와 최외각의 성장이 시작된 0.4Ma에서도 미세한 성장환경의 변화가 인지된다.

U1373-2 단괴는 약 8.8Ma에서 성장을 시작하여 약 6.5Ma까지는 9.75mm/My의 성장률을 가지며 6.5Ma 부터 약 2.4Ma까지는 4.94mm/My의 낮은 성장률을, 그 이후는 7.73mm/My의 성장률을 가진다. 최외각의 철망간산화물 층리는 그 이전의 단괴를 부정합적으로 피복하고 있는데, 그 시기는 약 0.4Ma 정도이다. REE 유형에 의하면 초기에는 복합적인 기원의 성장환경을, 그 이후는 수성기원, 다시 복합적인 기원, 그 이후는 다시 수성기원의 성장환경을 보여준다.

U1398-1 단괴는 내부의 조직과 외부의 조직이 다소 차이를 보이는데 6개 조직대중에서 외각의 4개 지점에서만 분석이 되었다. 분석된 최고기는 약 6.5Ma이며 3.51mm/My의 성장률을 보인다. REE 유형은 약 5.0Ma까지는 복합적인 기원의 성장을 그 이후는 초기속성기원의 성장환경을 지시한다.

U1402-1 단괴는 약 9.2Ma에서 성장을 시작하여 약 5.9Ma까지는 9.70mm/My의 성장률을 가지며 약 5.9Ma 이후에는 5.98mm/My의 낮은 성장률을 가진다. 내부조직에 의하면 4.5Ma, 2.8Ma, 1.8Ma 및 0.5Ma에서 미세한 성장환경의 변화를 나타내며, REE 유형에 의하

면 9.2Ma 부터 1.8Ma 까지는 복합적인 기원의 성장을 하다가 1.8Ma 이후에 수성기원의 성장을 한 것으로 나타난다.

U1406B-2 단괴는 약 12.6Ma 부터 성장하기 시작하여 약 11.0Ma 까지는 12.0mm/My의 성장률을, 11.0Ma 부터 약 5.2Ma 까지는 5.69mm/My의 성장률을, 그 이후는 3.50mm/My의 성장률을 보여준다. 내부조직에 의하면 11.0Ma, 8.4Ma, 6.7Ma에서 성장환경의 변화를 보여준다. 분석된 모든 조직대는 수성기원의 범위에 속하는 REE 유형을 보여준다.

U1413-1 단괴는 제일 중심의 성장시기가 약 11.4Ma 정도이며 상부에서는 6.1-5.3Ma 까지는 5.45mm/My의 성장률을, 하부에서는 약 6.0Ma까지 6.24mm/My의 성장률을 보인다. 그 후에는 상부는 5.43mm/My, 하부는 3.46mm/My의 성장률을 보인다. REE 유형에 의하면 제일 중심은 초기 속성기원의 성장을 하다가 복합적인 기원으로 환경이 바뀌었고 하부는 다시 수성기원의 성장환경으로 바뀐 반면 약 8.8Ma 에는 미약한 환경의 변화가, 그 외에도 1.8Ma 및 0.6Ma에서 미약한 환경의 변화가 인지된다.

4. 결론 및 토의

본 지역에서의 탄성과 기록에 의하면, 적어도 마이오세 또는 올리고세 중기(32Ma) 이후에는 DWBC가 뉴질랜드 동쪽 경계를 따라 흐른 것으로 생각된다. 약 24Ma 이후에는 호주 판과 태평양 판의 경계를 따라 용기한 산맥들로부터 육상기원의 물질이 다량으로 공급되어 South Island 대륙붕을 통해 Solander, Bounty, Hikurangi 수로에 유입되었다.

본 지역에서 망간단괴가 생성되기 시작한 약 14.2Ma의 시기는 남극의 빙하가 시작되는 시기와 일치하고 (Mangini et al., 1987), 단괴 성장률의 변화를 수반하는 6.7-6.5Ma 시기도 판경계(plate boundary)에서의 충돌이 증가함으로써 퇴적물의 공급이 촉진된 후기 신생대 (약 6.5Ma)와도 잘 일치하며, 2.8-2.4Ma도 심해로의 퇴적물의 공급이 아마도 다시 증가한 시기인 2.6Ma와 잘 일치한다.

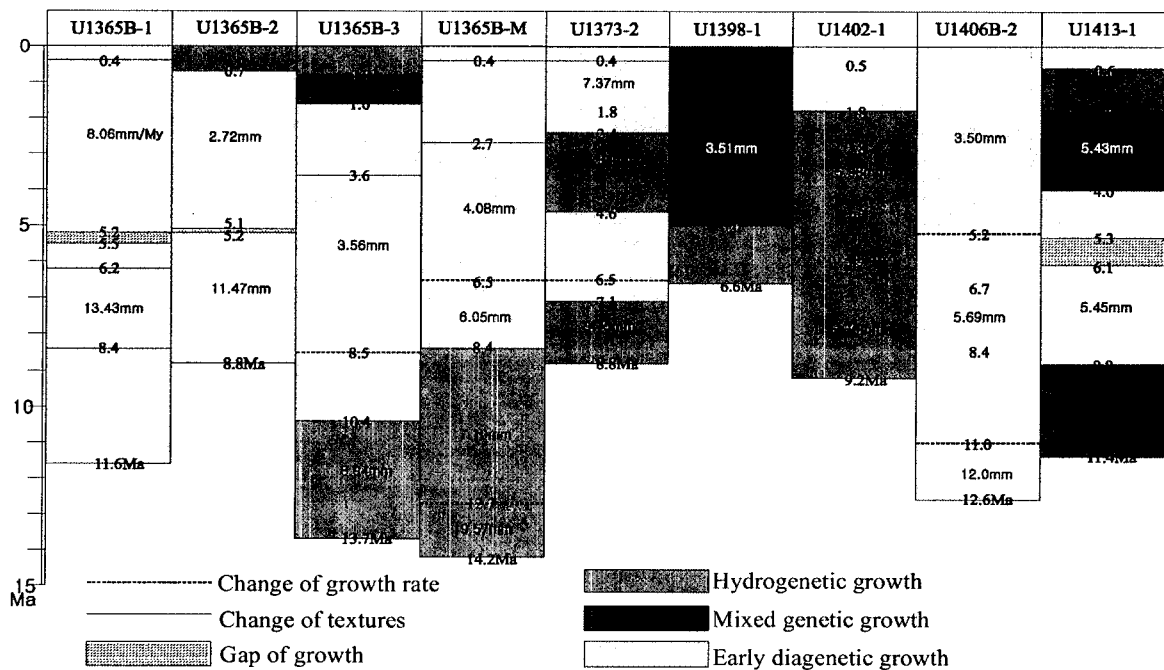


Fig. 1. Growth stages and ages of the manganese nodules from the Campbell Drift.

5. 참고문헌

- Chang, S.W., Choi, H., Lee, S.R., Graham, I.J. & Wright, I.C. (2001) Mineralogy and chemical compositions of ferromanganese nodule samples from SAA3 cruise. KR-01-(T)-05, KIGAM report.
- Graham I.J., Ditchburn, R.G., Zondervan, A., Chang, S.W., Choi, H., Lee, S.R., Wright, I.C. (2001) $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ dating of ferromanganese nodules from the Bollons Seamount region, South Pacific Ocean. (Unpublished)
- Mangini, A., Halbach, P., Puteanus, D., & Segl, M. (1987) Chemistry and growth history of Central Pacific Mn-Crusts and their economic importance. In: Teleki, P.G., Dobson, M.R., Moore, J.R. & von Stackelberg, U. (eds) Marine Minerals Advances in Research and Resource Assessment. Reidel, dordrecht, 205-220.
- Wright, I.C., Chang, S.W., Choi, H., Graham, I.J., Massoth, G., & Lee, S.R. (2001) Occurrence and physical setting of manganese nodules beneath the Deep Western Boundary Current - eastern Campbell Plateau sector, SW Pacific. (Submitted for Marine Geology)