

보리고래(*Balaenoptera borealis*) 수염판의 안정동위원소 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 값 분석을 통한 성장단계 규명

이다솜 · 신동훈¹ · 김명준¹ · 이경리*

국립수산과학원 고래연구소, ¹국립수산과학원 수산자원연구센터

Identification of Growth Stages of the Sei Whale *Balaenoptera borealis* through Stable Isotope Analysis of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ Values in Baleen Plates

Dasom Lee, Donghoon Shin¹, Myung-joon Kim¹ and Kyunglee Lee*

Cetacean Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Ulsan 44780, Republic of Korea

¹ Fisheries Resources Research Center, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong 53064, Republic of Korea

The baleen plates of mysticetes provide valuable insights into their recent foraging activities through stable isotope analyses, with variations in carbon and nitrogen isotopic compositions allowing for the reconstruction of seasonal migration patterns. In March 2023, a sei whale *Balaenoptera borealis* carcass was stranded off the coast of Buan, Jeonbuk, in the Yellow Sea, Korea. The whale was a young male, measuring 9.39 m in length. The total length of its baleen plate was approximately 34 cm, with $\delta^{13}\text{C}$ values ranging from -20.9 to -18.8‰, and $\delta^{15}\text{N}$ values ranging from 8.5 to 12.0‰. The variations in carbon and nitrogen isotopes were as much as 1.26‰ and 1.94‰, respectively. No significant periodicity was observed in the stable isotope fluctuations, which may be attributable to the age of the whale. However, when compared with previous studies on stable isotope analyses of sei whale baleen plates, this study showed similar patterns, as the $\delta^{13}\text{C}$ values gradually increased and $\delta^{15}\text{N}$ values decreased. The period during which these two isotope values crossed probably reflects the weaning phase of the whale.

Keywords: Sei whale, *Balaenoptera borealis*, Stable isotope analysis, Baleen plate

서론

안정동위원소는 물질의 유래와 이력을 알 수 있어 그 과정에서 어떤 생화학적 변화가 일어나는 지를 분석하는 데에 유용한 도구로 이용될 수 있기 때문에 동물 생태 연구에 화학적 추적자로 다양하게 이용되며(Peterson and Fry, 1987), 안정동위원소 비율로 회유 패턴과 먹이 생태(Schell et al., 1989; Lee et al., 2005; Mitami et al., 2006) 또는 개체의 행동학적 특징 등 생물학적 특성 정보를 알 수 있다(Rita et al., 2017). 수염, 손톱, 머리카락 등 비활성 순환 조직의 경우 한 번 구성되면 그 구성이 고정되고 몸에서 변화하지 않기 때문에 긴 시간의 생물학적 정보를 얻을 수 있다(Rita et al., 2019; Rubenstein and Hobson, 2004). 수염고래의 수염판은 고래의 위턱에서 자라며 케라틴으로 구성되어 있고, 전 생애에 걸쳐서 지속적으로 자라기 때

문에 개체의 정보가 보존되어 이러한 안정동위원소 분석 연구에 적당한 시료이며(Teixeira et al., 2022), 장거리를 회유하는 수염고래는 먹이 변화로 인한 안정동위원소 값에 연간 주기가 나타나기 때문에 회유 경로와 주기도 추측할 수 있다(Lee et al., 2005).

보리고래(sei whale *Balaenoptera borealis*)는 참고래과로 전체적으로 짙은 회색이나 배면은 밝은 회색 및 흰색에 가까우며, 등과 옆면에 쿠키커터상어 등에 의한 상처가 있다. 분기공 앞 주둥이 중앙에 용기선이 1개 있는 것이 특징으로 브라이드고래와도 구분된다. 수명은 약 50년 이상이며 출생 시 체장은 약 4.5 m, 성체의 체장은 최대 18 m이다. 10-12개월의 임신 기간 후 출산하며 6-9개월의 수유기간을 거친 후 이유기에 돌입한다(Jefferson et al., 2015). 서식 지역에 따라 차이가 있으나, 수컷은 12.1-13.6 m, 암컷은 12.0-14.0 m일 때 성성숙을 하는

*Corresponding author: Tel: +82. 52. 270. 0970 Fax: +82. 52. 270. 0913

E-mail address: moby19@korea.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0598>

Korean J Fish Aquat Sci 57(5), 598-601, October 2024

Received 11 September 2024; Revised 25 September 2024; Accepted 8 October 2024

저자 직위: 이다솜(연구원), 신동훈(연구사), 김명준(연구원), 이경리(연구사)

것으로 알려져 있다(Nishiwaki et al., 1954; Lockyer, 1974). 평균 350개의 수염판이 있으며 80 cm까지 자란다(Horwood, 2009). 주로 전 세계의 온대, 아열대, 아극지 해역에서 서식하며 19세기와 20세기에 상업적 포경으로 인해 개체수가 크게 감소하였다(Cooke, 2018; IWC, 2024). 국제포경위원회(International Whaling Commission, IWC)에서는 1975년 북태평양에서, 1979년 남극에서 보리고래의 포획을 금지하기로 하였다. 우리나라에서는 2004년에 혼획, 좌초 기록만 남은 이래, 아직까지 보고된 바 없다.

본 연구에서는 보리고래의 수염판 구성 안정동위원소를 분석하여 성장 단계를 규명하였다.

재료 및 방법

보리고래는 2023년 3월 23일 전북 부안군에서 좌초된 사체로 발견되었으며 체장 약 9.39 m, 무게 약 6톤의 수컷이었다. 해당 사체의 종 동정은 확보한 외형자료를 Jefferson et al. (2015)의 자료와 비교하여 판정하고, 부검 후 생체 조직의 유전분석을 통해 National Center for Biotechnology Information (NCBI) 자료와 비교를 통해 확정하였다. 수염판에서 안정동위원소 분석을 위한 시료 추출 방법은 Reiss et al. (2020)의 자료를 참고하였다. 수염판 중 가장 긴 부분을 잘라 잇몸 부분을 칼을 이용하여 제거하였으며, 수염판 표면의 이물질은 70% 에탄올을 이용하여 세척하였다. 수염판 1개의 넓이에 대한(혀에서 입술 쪽으로 자라는 방향) 안정동위원소 값은 약 0.2‰의 차이로 거의 차이가 없으므로(Schell et al., 1989) 수염판은 길이(등쪽에서 배쪽으로 자라는 방향)만을 분석에 이용하였다. 핸드 그라인더(Dremel 300series; Robert bosch, Stuttgart, Germany)를 이용하여 0.5 cm 간격으로 수염판을 갈아내어(Fig. 1) 튜브에 채집 후 틴 캡슐(Tin capsule, 8×5 mm)에 0.5 mg씩 담아 분석에 이용하였다. 각 구간의 수염을 갈아내는 데 사용한 장비는 세척하여 이용하였으며 그라인더에 의해 수염판이 찢리지 않도록 하였다. 틴 캡슐에 넣은 시료는 원소분석기(CNSOH elemental analyzer; EA Isolink, Bremen, Germany)에 주입하여

고온(1,020°C)에서 연소시키고, 안정동위원소 분석을 위한 유도기체로는 헬륨(He)을 사용하였다. 연소로 발생하는 CO₂와 N₂ 가스에 대하여 안정동위원소 질량분석기(continuous-flow isotope ratio mass spectrometer, CF-IRMS; DELTA V PLUS, Bremen, Germany)를 이용하여 탄소 및 질소 안정동위원소 분석하였으며 안정동위원소 비 값은 다음과 같은 식에 의해 국제표준물질(international standard material)에 대한 시료의 비 값 변위를 천분율(‰)로 나타내어 delta (δ)기호로 표현하였다.

$$\delta X(\text{‰}) = \left[\left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} \right) - 1 \right] \times 10^3$$

여기서 X는 ¹³C 또는 ¹⁵N, R은 ¹³C/¹²C 또는 ¹⁵N/¹⁴N 비를 나타낸다.

사용한 탄소 안정동위원소 표준물질은 VPDB (vienna pee dee belemnite)이며, 질소 안정동위원소 표준물질은 air N₂로 국제표준 기준을 적용하였다. 안정동위원소비 값을 알고 있는 국제표준물질인 sucrose (C₁₂H₂₂O₁₁; NIST, Gaithersburg, MD, USA)와 ammonium sulfate ([NH₄]₂SO₄; NIST)를 이용하여 20회 이상의 반복실험에서 얻어진 값들에 대한 표준편차는 δ¹³C는 0.14‰, δ¹⁵N는 0.19‰ 이하를 나타내었다.

결과 및 고찰

수염판의 크기는 길이 34 cm, 폭 10.3 cm이었으며, Omura and Fujino (1954)의 연구에 따라 수염판의 길이가 폭의 1/2 이상이며 배 주름이 배꼽 직전에서 끝나는 형태를 가져 northern type의 보리고래임을 알 수 있다. 수컷 성체의 체장이 보통 12–17 m이나(Jefferson et al., 2015) 좌초된 개체는 9.39 m로 미성숙한 어린 개체임을 알 수 있었고, 혀 끝에 수유를 위한 구조물(lingual fringe)이 남아 있는 것으로 보아 이제 막 젖을 떼었을 것으로 추정하였다.

수염판의 δ¹³C 값은 -20.9 – -18.8‰ 값이 나왔으며 δ¹⁵N 값은 8.5–12.0‰이었다(Fig. 2). 탄소 값의 변동은 최대 1.26‰, 질소

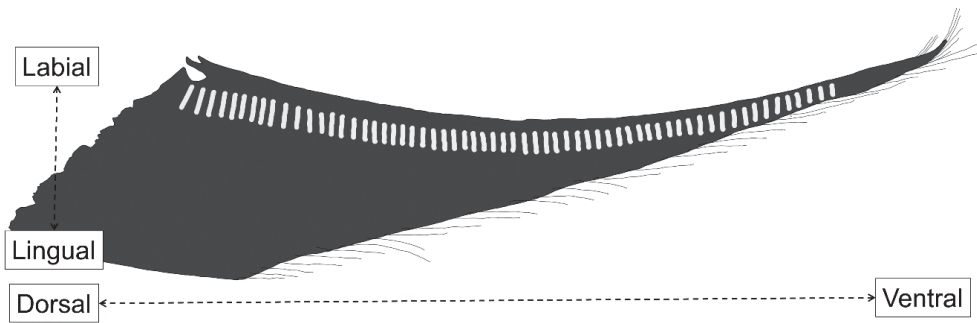


Fig. 1. A diagram of the baleen plate used for stable isotope analysis of a stranded sei whale *Balaenoptera borealis* (body length 9.36 m). The baleen plate was sampled at 0.5 cm intervals.

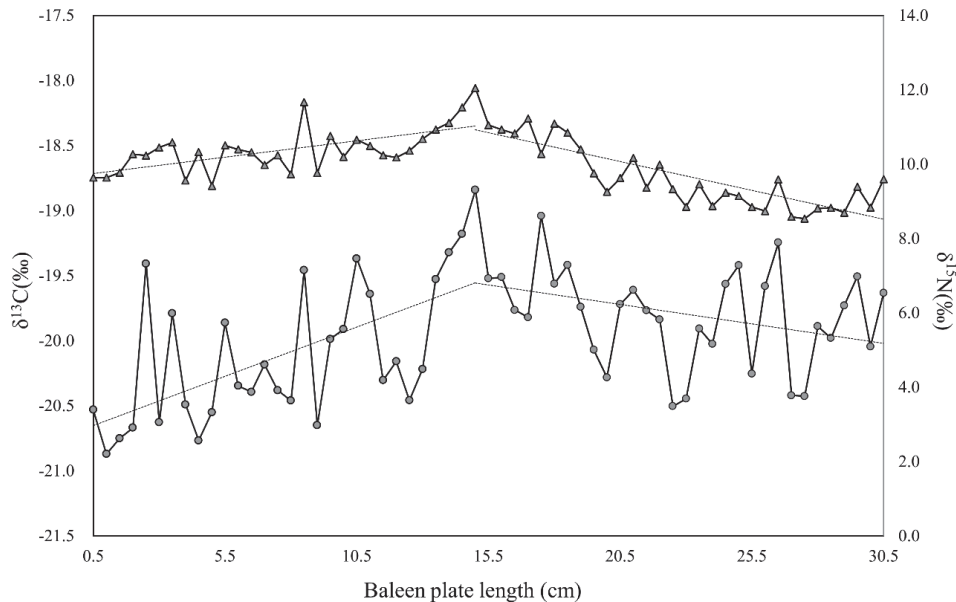


Fig. 2. Nitrogen stable isotope ratio $\delta^{15}\text{N}$ (triangles) and carbon stable isotope ratio $\delta^{13}\text{C}$ (circle) along baleen plate of sei whale *Balaenoptera borealis* in the Yellow Sea of Korea.

는 최대 1.94% 폭으로 변동하였다. 좌초된 보리고래는 약 9.4 m로 어린 개체이므로 ^{13}C 와 ^{15}N 값에서 주기성을 찾아보기 어려웠으나 수염판 약 15 cm 지점에서 $\delta^{13}\text{C}$ 값 -18.8‰, $\delta^{15}\text{N}$ 값 12.0‰으로 최고점을 찍으며 변화가 생기기 시작하는 것으로 보아 식이의 큰 변화가 있었음을 알 수 있고 혀의 구조물과 같이 판단할 때, 이유기 인 것으로 판단된다. 특히 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 어린 개체들 사이에서 변동 진폭이 개체마다 다를 수 있으며(Schell et al., 1989), 연구에 분석된 보리고래의 경우 탄소 값에 특이 점이 크게 발현되지 않은 것으로 보아 1-1.5세로 추정된다.

칠레의 파타고니아 보리고래를 이용한 Reiss et al. (2020)의 연구에서 본 샘플과 비슷한 크기의 수염판의 경우 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 의 평균 값은 각각 -17.1‰, 13.4‰이었으며 본 연구보다 높은 값을 보였다. 이러한 절대값의 차이는 샘플에 이용된 보리고래의 서식 해역이 다르기 때문이며, 본 연구의 탄소 값과 질소 값 변화 추세선의 결과도 칠레의 경우와 같이 탄소 값은 증가하고 질소 값은 감소하는 경향을 보였다.

안정동위원소를 이용하여 탄소 값의 고갈 주기의 시점이 뚜렷하게 나타날 경우 회유 패턴을 알 수 있기 때문에, 성체였을 경우 우리나라 서해를 어떤 경로를 통해 오게 되었는지 알 수 있었을 것이다. 그러나 이번 조사 대상은 아직 일 년 이상의 회유 주기를 보이지 않는 어린 개체로 특별한 주기성은 확인할 수 없었다. Lockyer (1974)의 연구에서는 이구전(ear plug)의 연륜륜(growth layer) 판정을 통해 보리고래의 성장곡선을 규명하고 있으나, 성성숙이 되기 이전의 어린 개체들에서는 이구전을 통한 성장곡선 분석 확인이 어렵다고 알려져 있어 수염판 안정동위원소에 의한 성장 분석이 대체방법으로 가능할 것으로 여

겨진다.

사 사

본 연구는 국립수산물과학원 2024년도 수산시험연구사업 중 고래류 평가 및 관리 연구(R2024004)의 지원을 받아 수행되었습니다. 조사에 참여한 모든 연구원께 감사합니다.

References

- Cooke JG. 2018. *Balaenoptera borealis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T2475A130482064. Retrieved from <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T2475A130482064.en> on Aug 30, 2024.
- Horwood J. 2009. Sei whale: *Balaenoptera borealis*. In: Encyclopedia of Marine Mammals, 2nd edition. Perrin WF, Würsig B and Thewissen JGM, eds. Academic Press, Cambridge, MA, U.S.A., 1001-1003. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373553-9.00231-5>.
- IWC (International Whaling Commission). 2024. International Whaling Commission. Retrieved from <https://iwc.int/about-whales/whale-species/sei-whale> on Sep 28, 2024.
- Jefferson TA, Webber MA and Pitman RL. 2015. 4-Cetaceans. Marine Mammals of the World, 2nd edition. Jefferson TA, Webber MA and Pitman RL, eds. Academic Press, Cambridge, MA, U.S.A., 24-357. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409542-7.50004-4>.
- Lee SH, Schell DM, McDonald TL and Richardson WJ. 2005. Regional and seasonal feeding by bowhead whales

- Balaena mysticetus* as indicated by stable isotope ratios. Mar Ecol Prog Ser 285, 271-287. <https://doi.org/10.3354/meps285271>.
- Lockyer C. 1974. Investigation of the ear plug of the southern sei whale, *Balaenoptera borealis*, as a valid means of determining age. ICES J Mar Sci 36, 71-81. <https://doi.org/10.1093/icesjms/36.1.71>.
- Mitani Y, Bando T, Takai N and Sakamoto W. 2006. Patterns of stable carbon and nitrogen isotopes in the baleen of common minke whale *Balaenoptera acutorostrata* from the western North Pacific. Fish Sci 72, 69-76. <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2006.01118.x>.
- Nishiwaki M, Hibiya T and Kimura S. 1954. On the sexual maturity of the sei whale of the Bonin waters. Sci Rep Whales Res Inst 9, 165-178.
- Omura Hand Fujino K. 1954. Sei whales in the adjacent waters of Japan. II. Further studies on the external characters. Sci Rep Whales Res Inst 9, 89-103.
- Peterson BJ and Fry B. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. Annu Rev Ecol Syst 18, 293-320. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.18.110187.001453>.
- Reiss L, Häussermann V and Mayr C. 2020. Stable isotope records of sei whale baleens from Chilean Patagonia as archives for feeding and migration behavior. Ecol Evol 10, 808-818. <https://doi.org/10.1002/ece3.5939>.
- Rita D, Borrell A, V'ikingsson G and Aguilar A. 2019. Histological structure of baleen plates and its relevance to sampling for stable isotope studies. Mamm Biol 99, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.mambio.2019.10.004>.
- Rita D, Drago M, Galimberti F and Cardona L. 2017. Temporal consistency of individual trophic specialization in southern elephant seals *Mirounga leonina*. Mar Ecol Prog Ser 585, 229-242. <https://doi.org/10.3354/meps12411>.
- Rubenstein DR and Hobson KA. 2004. From birds to butterflies: Animal movement patterns and stable isotopes. Trends Ecol Evol 19, 256-263. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2004.03.017>.
- Schell DM, Saupé SM and Haubenstock N. 1989. Bowhead whale (*Balaena mysticetus*) growth and feeding as estimated by $\delta^{13}\text{C}$ techniques. Mar Biol 103, 433-443. <https://doi.org/10.1007/BF00399575>.
- Teixeira CR, Troina GC, Daura-Jorge FG, Simões-Lopes PC and Botta S. 2022. A practical guide on stable isotope analysis for cetacean research. Mar Mamm Sci 38, 1200-1228. <https://doi.org/10.1111/mms.12911>.