

## 색지수 이미지를 이용한 후기 제 4기 동해 퇴적물 코어의 고해상 층서 복원

박옥분<sup>1,2</sup> · 남승일<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 석유해저연구본부

<sup>2</sup>한국가스공사 자원개발본부

<sup>3</sup>극지연구소 극지기후연구부

### 요 약

Avaatech XRF 코어 스캐너에 장착된 3-CCD (charge-coupled device) 라인 스캔 카메라를 이용하여 동해 서부 해역에서 획득한 3점의 퇴적물 코어(05GCRP-13, 14, 15)의 고해상도 이미지와 색지수(color parameter)를 얻었다. 각 퇴적물 코어에서 촬영한 고해상도 이미지와 색지수(CIE- $L^*a^*b^*$ ) 값을 이용하여 정밀한 층서를 정립하였다. 특히 3점의 시추 퇴적물에 대한 보다 정확한 층서를 정립하기 위하여 코어 05GCRP-15의 밝기와 AMS  $^{14}\text{C}$  연대측정자료 그리고 협재된 5개 화산재 층을 이용하여 동해 남동해역의 오키(Oki) 해령에서 획득한 코어 MD01-2407과 정밀하게 대비하였다. 층서자료에 의하면 3점의 시추 퇴적물 코어는 MIS (marine isotope stage) 5.2인 약 94 ka 전 이후 퇴적되었다. 색지수  $L^*a^*b^*$  값은 동해에서 획득한 퇴적물의 대비뿐만 아니라 퇴적물의 유기탄소함량이나 칼슘(Ca) 등 일부 원소의 함량과 밀접한 연관성을 보였다. 특히 후기 제 4기 동해의 퇴적층에 기록된 밝고 어두운 색이 교호하는 층은 빙하기-간빙기 중 밀레니엄 주기로 일어난 고해양 환경 변화를 잘 반영하고 있다. 더욱이 이러한 단주기성의 퇴적물 색변화는 NGRIP (North Greenland Ice Sheet Project)에 기록된 산소동위원소( $\delta^{18}\text{O}$ )의 D-O (Dansgaard-Oeschger) 단주기 기후변동 기록과 매우 잘 대비되었다. 따라서 동해 시추 코어 퇴적물에 기록된 고해상의 색지수는 향후 퇴적물 코어의 정확한 층서확립과 고해양 환경변화의 정밀복원을 위한 연구에 유용한 프록시로 활용될 수 있다.

**주요어:** 퇴적물의 색, 고해양/고기후, 후기 제 4기, NGRIP  $\delta^{18}\text{O}$ , D-O 주기

**Park, O.B. and Nam, S.-I., 2010, Late Quaternary high-resolution stratigraphic reconstruction of the East Sea sediment cores based on high resolution images and color parameters. Journal of the Geological Society of Korea. v. 46, no. 5, p. 439-452**

**ABSTRACT:** Using the 3-CCD (charge-coupled device) line scan camera equipped within the Avaatech XRF-Core Scanner, high resolution images and color parameters were estimated from the 3 sediment cores (05GCRP-13, 14, 15), which were taken from the western margin of the East Sea. Based on the high resolution images and color parameters, a precise stratigraphy can be established for the 3 sediment cores. For the establishment of a precise stratigraphy, lightness values ( $L^*$ ), AMS  $^{14}\text{C}$  dating and 5 tephra layers deposited in the sediment core 05GCRP-15 are used to correlate with those data recorded in the core MD01-2407 which was retrieved from the Oki Ridge of the southeastern East Sea. According to the precise age model, the 3 investigated sediment cores are likely to represent the paleoceanographic record during the last about 94 ka BP (since the MIS 5.2). In particular, color parameters such  $L^*$ ,  $a^*$  and  $b^*$  can be used for the correlation between sediment cores recovered from the East Sea. Moreover, these color parameters are closely related with any chemical composition such as organic carbon and/or carbonate contents. Furthermore, the East Sea sediments that are characterized by alternations of dark and light layers seemed to well reflect the paleoceanographic changes during the late Quaternary glacial-interglacial cycles. These dark and light cycles on millennial scales are well matched the D-O (Dansgaard-Oeschger) cycles recorded in the NGRIP (North Greenland Ice Sheet Project) ice core  $\delta^{18}\text{O}$  data. As a result, the high resolution images together with color parameters can be used as a reliable proxy for establishing a precise stratigraphy as well as the paleoceanographic reconstruction in the East Sea during the late Quaternary.

\* Corresponding author: +82-32-260-6227, E-mail: sinam@kopri.re.kr

**Key words:** sediment color, paleoceanography/paleoclimate, late Quaternary, NGRIP  $\delta^{18}\text{O}$ , D-O cycles

(Park, O.B. and Nam, S.-I., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea; Park, O.B., Korea Gas Corporation, Seongnam 463-754, Korea; Nam, S.-I., Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea)

## 1. 서 론

일반적으로 퇴적물의 색은 육안으로 퇴적물의 표면을 관찰하여 Munsell Soil Color Charts (1954)와 비교한 값을 숫자로 나타내는 정성적인 방법을 이용하였다. 그러나 이러한 방법은 개인마다 색을 인식하는 차이와 색을 관찰할 때 사용하는 빛이나 광원의 차이로 인하여 퇴적물 색상에 대한 객관적이고 정확한 자료를 얻는데 어려움이 있다(e.g., Balsam et al., 1999). 최근 분석기술이 발달하여 최대 마이크로미터 간격의 분석이 가능한 비파괴적인 코어 로깅과 이미지 스캔 시스템을 통한 퇴적물 코어에서 연속적이며 매우 정밀한 초고해상의 이미지와 색지수(color parameter) 자료를 획득할 수 있다(e.g., Nederbragt et al., 2000; Nederbragt and Thurow, 2004; Rothwell and Rack, 2006; St-Onge et al., 2007). 또한 디지털 스캔용 카메라를 이용하면 절개된 시추코어 퇴적물 표면을 빠르고 쉽게 연속적인 자동측정이 가능하다. 퇴적물의 색은 퇴적물을 구성하고 있는 성분과 퇴적 환경변화에 대한 정밀한 해석이 가능하기 때문에 고해상의 자료 획득에 활용되고 있다(e.g., Mix et al., 1995; Chapman and Shackleton, 1998; Balsam et al., 1999; Pálíke et al., 2001; Giosan et al., 2002; Helmke et al., 2002; Kido et al., 2007). 분광 광도계(spectrophotometer)나 라인 스캔 시스템을 이용하여 선상이나 실험실에서 직접 퇴적물 표면을 측정할 색지수와 퇴적물 밝기(lightness)는 퇴적환경이나 기후환경 변화 연구에 필요한 기본적인 층서대비에 활용되고 있다(e.g., Mix et al., 1992; Schaaf and Thurow, 1994; Merrill and Beck, 1995; Mix et al., 1995; Bauch and Helmke, 1999; Ortiz et al., 1999; Giosan et al., 2002; Helmke et al., 2002; Francus et al., 2004; Nederbragt et al., 2006; Rogerson et al., 2006; Thomson et al., 2006; St-Onge et al., 2007; Watanabe et al., 2007; Kinoshita et al., 2008; Khim et al., 2009).

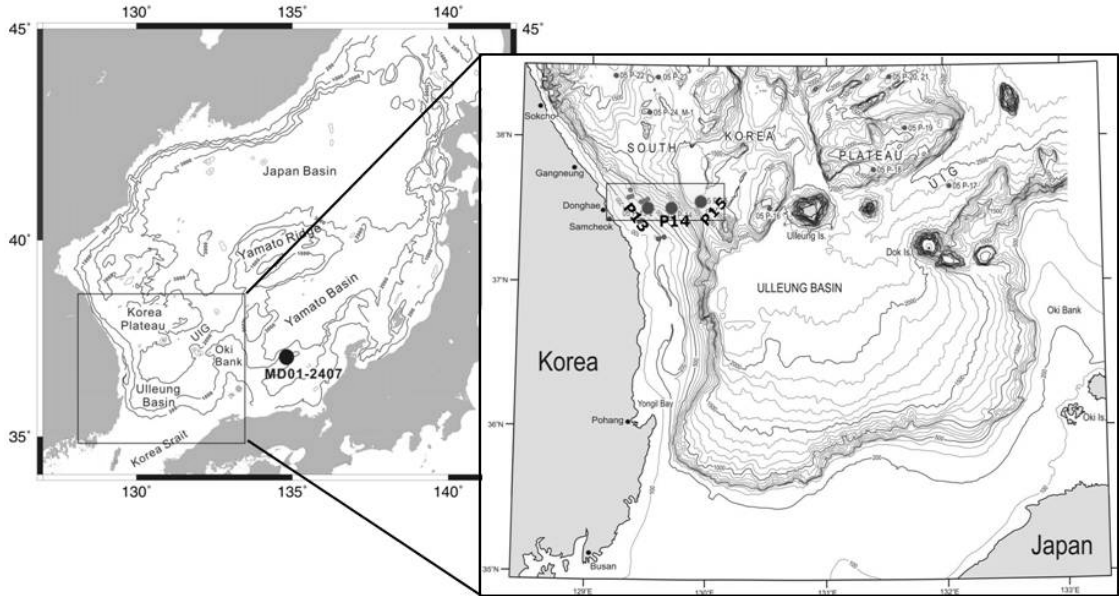
동해의 일본해역에서 수행된 ODP (Ocean Drilling

Program) Legs 127과 128에서 시추된 후기 마이오세와 후기 플라이오세 그리고 플라이스토세에 쌓인 퇴적층은 어둡고 밝은 층이 교호하는 명암(light-dark) 층이 잘 나타난다(Föllmi et al., 1992; Tada et al., 1992). 규조 미화석을 포함한 니질 또는 니질 실트의 괴상 퇴적층이나 생물교란 퇴적층 그리고 편모조류가 다량 함유된 니질 퇴적층은 주로 밝은 색을 띠며 유기물 함량이 비교적 적게 나타난다. 이와 반대로 균질한 층이나 엽리층 또는 생물기원의 미화석이나 유기물을 다량 포함하는 얇은 층리가 발달된 층은 주로 어두운 색을 나타낸다(Föllmi et al., 1992; Tada et al., 1992). 따라서 명암의 차이가 뚜렷하게 나타나는 후기 제 4기 퇴적층에는 동해의 해양환경이 전 지구적인 해수면변동 및 동아시아 몬순시스템과 직접적인 관련성을 밝힐 수 있는 기록이 보존되어 있다(Tada et al., 1992, 1999; Tada, 2004; Ikehara and Itaki, 2007).

반 폐쇄성의 주변해인 동해의 환경은 약 140 m 이하의 비교적 수심이 낮은 해협으로 동중국해와 북서태평양 그리고 오호츠크 해와 연결되어 있기 때문에 제 4기 빙하기-간빙기의 급격한 기후변화에 의한 해수면변동에 매우 민감하게 반응하였다(Oba et al., 1991; Tada et al., 1999). 현재 동해는 겨울철에 시베리아 대륙에서 불어오는 차가운 바람에 의해 북쪽 해역에서 형성되는 해빙과 함께 표층수가 냉각되어 밀도가 높아진 결과 해수의 수직순환이 일어나는 미니대양으로 알려져 있다(Ichiye, 1984). 이 결과 동해의 저층수는 주변해역보다 용존산소량이 매우 높고 차가우며 비교적 염분도가 낮은 수괴의 특징을 보인다(Uda, 1934; Gamo and Horibe, 1983). 반대로 해수면이 40-130 m 정도 하강하였던 후기 제 4기 빙하기에는 동해에 유입된 담수가 증가되면서 표층과 하부의 수괴가 성층화가 형성된 결과 표층의 수직순환이 약해지거나 정지되었다(Oba et al., 1991; Tada et al., 1999). 따라서 현재와 다른 해양순환시스템이 일어났던 빙하기에 형성된 퇴적층은 당시의 퇴적환경

**Table 1.** Locations of core sediments used in this study and informations on water depth (m) and core length (m) recovered from the East Sea western margin.

Core ID	Location		Water depth (m)	Recovery length (m)
	Longitude (°E)	Latitude (°N)		
05GCRP-13	129°32.1127	37°30.1695	487	5.45
05GCRP-14	129°42.8634	37°30.1113	800	4.3
05GCRP-15	129°58.9286	37°33.1562	1546	7.8



**Fig. 1.** Bathymetric map of the Ulleung Basin, the East Sea, showing the locations of core sediments used in this study.

을 기록하고 있으며 해저에 공급된 용존산소량의 변화에 의한 퇴적층의 색도 현재와 많은 차이를 보인다(Tada *et al.*, 1992, 1999; Tada, 2004). 따라서 퇴적물의 명암이나 색도는 퇴적 당시의 해수의 수직순환시스템과 용승에 의한 영양염류 공급과 표층생산성 변화 등 과거에 일어난 해양의 조건을 잘 반영한다(Oba *et al.*, 1991; Tada *et al.*, 1999; Itaki *et al.*, 2004; Tada, 2004; Watanabe *et al.*, 2007).

실제로 Tada *et al.* (1999)과 Tada (2004)의 연구에 의하면 후기 제 4기 동해 퇴적층에 기록된 명암주기는 동아시아의 여름-겨울 몬순시스템과 그린란드 빙상코어에 기록된 Dansgaard-Oeschger (D-O; Dansgaard *et al.*, 1993) 주기와 잘 대비된다. 특히 어두운 색을 띠는 층은 D-O Interstadial 주기와 밝은 색을 띠는 층은 Stadial 주기와 잘 일치하는 것으로 알려졌다(Tada *et al.*, 1999). 그 결과 후기 제 4기 퇴적층에 뚜

렷하게 교호되어 나타나는 명암 층은 동해 전 해역에서 시추된 퇴적층 간의 층서대비를 위한 기본 자료로서 이용 가능하게 되었다(e.g., Watanabe *et al.*, 2007; Khim *et al.*, 2009).

본 연구에서는 동해 서부 해역에서 획득한 3점의 퇴적물 코어로부터 얻은 색지수와 밝기 자료를 이용하여 층서대비를 하였다. 특히 3점의 퇴적물에서 얻은 색지수와 밝기를 이용하여 코어의 보다 정확한 층서를 정립하기 위하여 동해 남동부 일본해역에서 획득한 MD01-2407 코어의 색지수 자료(Kido *et al.*, 2007)와 비교하였다. 또한 동해 서부해역의 퇴적층에 기록된 색지수 주기와 그린란드 빙상코어에 기록된 D-O 주기와 대비하여 동해 고해양환경변동이 동아시아 몬순 시스템의 영향과 전 지구적인 기후변화와의 상관관계를 밝힐 수 있는 보다 정확한 층서 자료를 제시하고자 하였다.

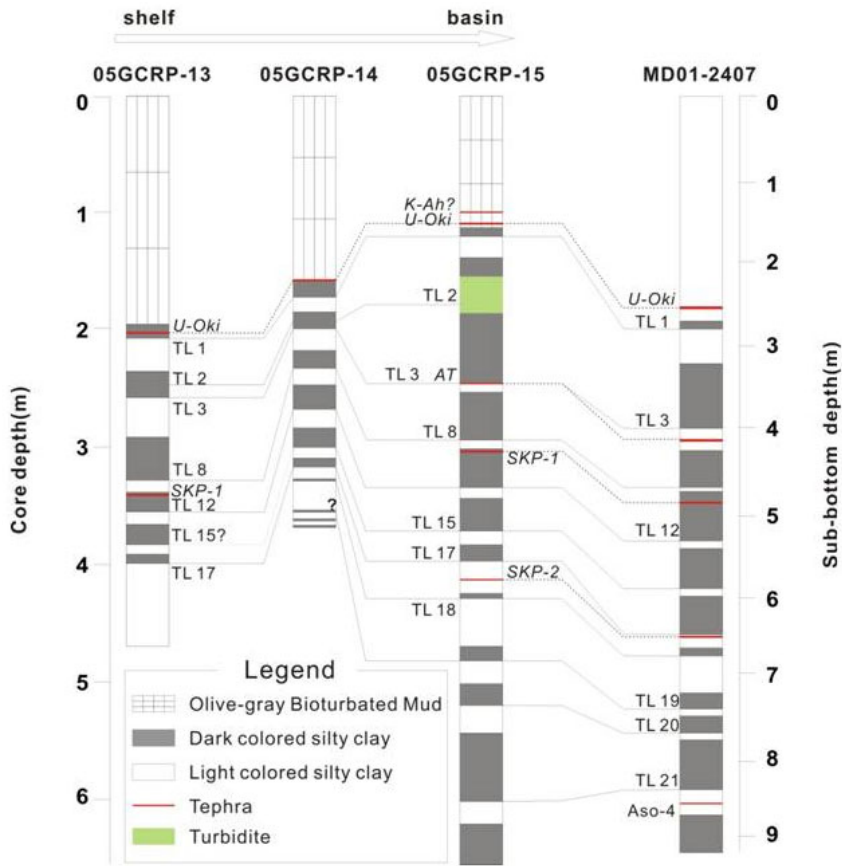


Fig. 2. Columnar sections of the investigated 3 sediment cores correlated with core MD01-2407 indicating olive-gray bioturbated mud, dark laminated mud, light bioturbated mud and tephra layers (K-Ah, Kikai-Akahoya; U-Oki, Ulleung-Oki; AT, Aira-Tanzawa; SKP, Southern Korean Plateau-1; SKP-2, Southern Korean Plateau-2) (Matsumoto *et al.*, 1991; Fukusawa, 1995; Tada *et al.*, 1999; Chun *et al.*, 2007).

2. 연구 재료와 방법

본 연구에는 2005년 한국지질자원연구원의 탐해 2호를 이용하여 동해의 서부 해역에서 시추된 3점의 퇴적물 코어(05GCRP-13, 14, 15)를 이용하였다(그림 1, 2; 표 1). 퇴적물 코어의 이미지와 색지수는 반으로 절개한 길이 1.2 m의 보관용 시료의 표층을 촬영하여 획득하였다. 이미지 촬영에 이용된 JAI 3-CCD (charge-coupled device) 라인 스캔 카메라(CV-L107)는 네덜란드 Avaatech사의 XRF 코어 스캐너 내부에 장착되어 있으며 3개의 CCD 센서와 광선 분리기 (beam-splitter)로 구성되어 있다. 카메라 광원은 고주파 선형 광원 시스템(linear lighting system)을 이용하였다(박옥분과 남승일, 2009). 3-CCD 라인 스캔

카메라를 이용하여 70 μm 간격으로 퇴적물 코어를 촬영하여 3×2,048 픽셀의 고해상도 이미지를 획득하였다. 이미지 촬영은 절개된 면에 수분이 어느 정도 건조되고 퇴적물 표면이 산화되기 전에 촬영할 때 가장 정확하고 좋은 이미지를 획득할 수 있다 (Merrill and Beck, 1995; St-Onge *et al.*, 2007). 3-CCD 라인 스캔 카메라의 작동과 이미지의 촬영, 확대축소 및 색상 보정 등의 기능은 카메라 프로세싱 프로그램을 통해 조절하였다(박옥분과 남승일, 2009).

3-CCD 라인 스캔 카메라를 이용한 퇴적물 이미지 촬영뿐만 아니라 촬영된 각 지점의 평균값을 반영하는 색지수인 RGB (Red · Green · Blue)와 CIE (Commission International de l'Éclairage)-Lab를 함께 얻었다. RGB는 적색(red), 녹색(green), 청색(blue)

의 삼원색을 혼합하여 색을 표현하는 방식이다(Rogerson *et al.*, 2006). 이러한 3가지 색은 섞을수록 밝아지기 때문에 '가산혼합'이라고 하며 각각의 색은 0에서 255의 숫자로 나타낸다(Xiang and Joy, 1994). CIE- $L^*a^*b^*$ 는 국제조명위원회에서 규정한 색상 값으로, 색을 우리 눈이 감지할 수 있는 색의 차이와 색 공간에서 수치로 표현한 것이다. 색 좌표는  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ 로 표시하며,  $L^*$  (lightness)은 밝기로 0(흑)에서 100(백)의 숫자로 나타낸다.  $a^*$ 는 녹색(-값)에서 적색(+값)의 범위를 갖는 반면,  $b^*$ 는 청색(-값)에서 황색(+값)의 범위를 갖는다(Nederbragt *et al.*, 2004, 2006). 본 연구에는 주로 CIE- $L^*a^*b^*$  값을 사용하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 시추퇴적물 코어의 색지수(CIE- $L^*a^*b^*$ ) 변화

##### 3.1.1 코어 05GCRP-15

코어 05GCRP-15 퇴적물 밝기인  $L^*$  값은 다른 두 코어에 비하여 80정도의 비교적 큰 값을 보이기 때문에 밝은 색이 우세하게 나타난다(그림 4). MIS 5.2-5.1과 MIS 4 동안  $L^*$  값이 가장 높은 값을 보이며 가장 밝은 색을 띠는 동시에 명암의 변화가 가장 뚜렷하다. MIS 5.2부터 MIS 2까지 크고 작은 명암주기가 뚜렷하게 반복되는 특징을 보인다. 다른 코어에서와 같이 홀로세 전기에 가장 낮은 값을 보이는 암층은 TL1 층에 해당되며, 이후  $L^*$  값은 점차 어두워진다. 퇴적물 색도( $a^*$  값)는 적색(+ $a^*$ )과 약한 황색을 띠는 밝은 층과 녹색과 강한 황색이 띠는 어두운 층이 반복적으로 나타나며, 이는 밝기의 변화주기와 동일하다. 퇴적물의 색은 일반적으로  $L^*$  값이 증가하면  $a^*$  값이 감소하여 적색이 약해진 반면, 녹색이 강하게 나타나며  $b^*$  값은 증가하여 강한 황색을 띤다.

##### 3.1.2 코어 05GCRP-14

코어 05GCRP-14의  $L^*$  값은 코어 05GCRP-13과 매우 유사한 변화를 보인다(그림 4). MIS 4 후기부터 MIS 3 사이에서  $L^*$  값의 변화폭이 더욱 뚜렷하고 큰 반면, MIS 2와 홀로세에는 코어 05GCRP-13과 매우 유사한 패턴을 보인다.  $L^*$  값이 홀로세 전기에 가장 어두운 색이 나타나는 곳은 TL1층으로 가장 낮은 값을 보인다. 특히  $a^*$  값은  $L^*$  값과 정반대의 경향을 나타낸다.  $a^*$  값은 퇴적물이 어두워짐에 따라 값이 증가

한다. 그러나  $b^*$  값과  $L^*$  값은 서로 다른 두 가지 경향을 보인다.  $b^*$  값이 감소하는 구간에서  $L^*$  값도 대부분의 구간에서 감소한다. 즉 밝은 구간에서 황색이 우세하게 나타난다. 이와 반대로 MIS 2의 일부 구간에서는 반대 경향을 보인다.  $L^*$  값이 증가하는 밝은 층에서  $b^*$  값이 감소하는 황색이 약하게 나타난다. 최하부 구간인 MIS 4에서  $L^*$  값이 작은 암층의  $a^*$ 와  $b^*$  값은 각각 적색이 강하고 황색이 상대적으로 약하여 다른 구간의 암층과 동일한 변화양상을 보인다.

##### 3.1.3 코어 05GCRP-13

코어 05GCRP-13의  $L^*$  값은 MIS 4의 후기에서 비교적 어두운 값을 보인 후 서서히 증가하여 MIS 4/3 경계에서 가장 높은 값을 갖는 밝은 색을 보인다. 이후 서서히 값이 감소하며 MIS 3 동안  $L^*$  값은 급격하고 짧은 주기의 명암의 변화가 뚜렷한 특징이 나타난다(그림 4). MIS 3 후기부터  $L^*$  값은 서서히 증가하여 MIS 3 후기에서 가장 높은 값인 비교적 밝은 색을 띤다. 이후  $L^*$  값은 서서히 감소하여 홀로세로 향하면서 점차 낮은 값을 보이는 어두운 색으로 변화한다. 홀로세가 시작된 이후 가장 어두운 값(약 55)이 나타나는 구간은 TL 1 층과 일치하며, 일부 구간(150-140 cm)을 제외하면 홀로세의 퇴적물 밝기는 거의 60 내외의 일정한 값을 보인다.

퇴적물의 색도( $a^*$  값)는 MIS 3의 상부부터 홀로세 일부구간에서 -값(녹색)을 보이는 것을 제외하면 대부분 0 이상의 일정한 +값인 적색을 띠며 큰 변화가 없다.  $a^*$  값은 표층에서 가장 높은 약 +2 정도인 반면,  $b^*$  값은 변화의 폭이 비교적 크다.  $b^*$  값은 MIS 4의 상부에서 황색을 띠는 가장 큰 +값(약 +13)을 보인 후, MIS 3/2 경계까지 서서히 감소한다. MIS 2에는 비교적 낮은 값(+7)을 보이며 점차 홀로세로 향하면서 증가한다. 특히 이 구간에서  $b^*$  값이 증가하는 패턴은  $a^*$  값이 증가하는 패턴과 유사하다. 이후 급격히  $b^*$  값이 감소한 후 홀로세의 표층까지 거의 일정한 경향을 보인다. 표층의  $b^*$  값은 MIS 4의 하부에서와 같이 가장 높다.

## 4. 토 의

### 4.1 시추 퇴적물 코어의 층서대비

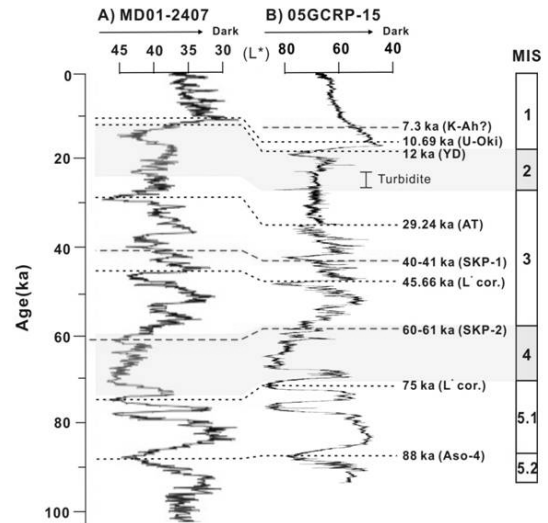
동해에서 시추된 제 4기 퇴적층에는 명암이 교호

**Table 2.** Age control points for the investigated core 05GCRP-15.

Depth (cm)	Stratigraphic marker	Calendar age (ka)	References
99-101	K-Ah tephra	7.3	Fukasawa (1995)
116-118	U-Oki tephra	10.69	Tada <i>et al.</i> (1999)
123-125	MIS boundary	MIS 2/1	Martinson <i>et al.</i> (1987)
126-128	L* correlation	12	In this study
209-211	MIS boundary	MIS 3/2	Martinson <i>et al.</i> (1987)
246-248	AT tephra	29.24	Tada <i>et al.</i> (1999)
306-308	SKP-1 tephra	40-41	Chun <i>et al.</i> (2007)
336-338	L* correlation	45.66	Yokoyama <i>et al.</i> (2007)
402-404	MIS boundary	MIS 4/3	Martinson <i>et al.</i> (1987)
413-415	SKP-2 tephra	60-61	Chun <i>et al.</i> (2007)
489-491	MIS boundary	MIS 5/4	Martinson <i>et al.</i> (1987)
523-525	L* correlation	75	Kido <i>et al.</i> (2007)
622-624	Aso-4 tephra	88	Matsumoto <i>et al.</i> (1991)

하는 니질이나 실트-니질 층이 잘 기록되어 나타난다(Föllmi *et al.*, 1992; Tada *et al.*, 1992, 1999). Tada *et al.* (1999)은 ODP Site 797 시추코어에 기록되어 있는 Aso-4 (88 ka) 테프라 층 이후에 퇴적된 층에서 수 cm에서 수십 cm 두께를 갖는 약 21개의 TL (Thin dark layers) 층을 구분하였다. 이와 유사한 TL 층은 제 4기 하부 층에도 잘 나타난다(Föllmi *et al.*, 1992; Tada *et al.*, 1992). 이러한 암색 또는 암회색의 TL 층은 동해에서 퇴적층 간의 정밀한 대비가 가능하기 때문에 중요한 층서기준이다(Tada *et al.*, 1999; Bahk *et al.*, 2000; Kido *et al.*, 2007; Lee, 2007; Watanabe *et al.*, 2007). 최근 Kido *et al.* (2007)은 동해 남동해역의 오키 해령에서 시추된 코어 MD01-2407의 퇴적층에서 얻은 색지수를 이용한 암상변화와 연대가 잘 알려진 화산재 층 및 부유성 유공층의 산소동위원소 자료를 이용하여 과거 약 640 ka의 층서를 확립하였다. Khim *et al.* (2009)은 Kido *et al.* (2007)의 색지수 층서자료와 울릉분지 북부에 위치한 한국대지와 동해 북동부 Matsumae 대지에서 시추된 퇴적물 코어를 정밀하게 대비하여 색지수가 동해 전 해역에서 시추된 퇴적층의 층서정립에 유용하게 이용될 수 있음을 밝혔다.

본 연구에 이용된 3점의 시추 퇴적물의 층서는 동해 퇴적층에 기록된 TL 층의 암상과 함께 연대가 알려진 테프라 층과 초고해상의 색지수 변화를 이용하여 정립하였다(그림 2). 특히 코어 05GCRP-15의 퇴적층에 협재하는 화산재 층인 K-Ah (Kikai-Akahoya),



**Fig. 3.** Correlation with each lightness value ( $L^*$ ) of core 05GCRP-15 from the western East Sea and core MD01-2407 (Kido *et al.*, 2007) from the Oki Ridge in the southern East Sea for primary age dating.

U-Oki (Ulleung-Oki), AT (Aira-Tanzawa), SKP (Southern Korean Plateau)-1과 SKP-2 화산재 층은 보다 정밀한 층서 대비를 가능하게 하였다(Matsumoto *et al.*, 1991; Fukasawa, 1995; Tada *et al.*, 1999; Chun *et al.*, 2007). 각 화산재 층에는 부석질 라필리나 유리질 샤드가 산재되어 나타나며 비교적 정확하게 알려진 연대는 그림 2와 표 2에 표시하였다. 특히 시추코어에 협재되어 나타나는 모든 화산재 층은 XRF 코어 스캐너를 이용하여 분석된 Zr 함량이 뚜렷하고

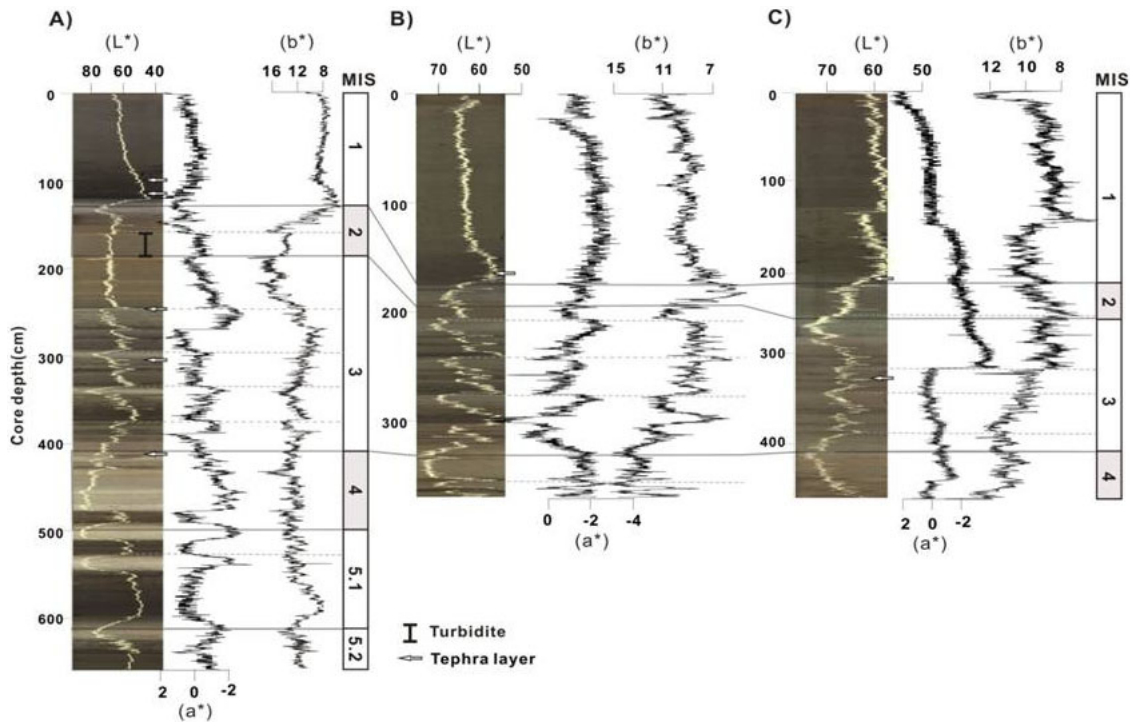


Fig. 4. Correlation between 3 color parameters (CIE-L\*a\*b\*) with core images from the investigated 3 sediment cores 05GCRP-13 (A), 05GCRP-14 (B) and 05GCRP-15 (C) corresponding to Marine Isotope Stage from 5b to 1.

급격하게 증가하는 구간과 잘 일치하는 경향을 보인다(박옥분, 2010). 따라서 향후 동해의 퇴적층에 기록된 화산재 층은 Zr 함량변화를 통해 쉽게 알 수 있어 보다 정밀한 층서정립에 중요한 프록시로 활용이 가능하다.

본 연구에서는 시추퇴적물의 더욱 정확한 층서를 정립하기 위해 코어 05GCRP-15와 코어 MD01-2407에 기록된 TL 층과 화산재 층을 대비하였다(표 2; 그림 3). 특히 3-CCD 라인 스캔 카메라를 이용하여 얻은 초고해상의 색지수 자료와 코어 MD01-2407에서 얻은 색지수 자료를 대비하여 보다 정밀한 층서를 정립한 후 다른 2점의 코어(05GCRP-13, 05GCRP-14)의 정확한 층서를 확립하였다(그림 4). 빙하기-간빙기 경계는 Martinson *et al.* (1987)의 MIS (marine isotope stage) 층서경계를 이용하였다. 밝고 어두운 색의 층이 교호하는 니질 퇴적층으로 이루어진 코어 05GCRP-15는 MD01-2407 코어와 정밀하게 대비한 결과 94 ka 전 이후 퇴적되었고 총 22개의 TL 층과 대비하였다(그림 2). 코어 05GCRP-13은 64 ka 전 이후 퇴적된 반면, 코어 05GCRP-14는 약 68 ka 전

이후 퇴적되었으며 총 17-18개의 TL 층과 대비하였다(그림 2).

#### 4.2 색지수와 퇴적물 성분

3점의 퇴적물 코어의 색지수 변화는 전 구간에서 황색이 강하게 나타나며 퇴적물의 색이 어두울수록 황색이 약하고 적색이 강한 양상을 보인다. 또한 색지수는 퇴적물의 밝기와 뚜렷한 상관관계를 보인다(그림 4). 이와 같은 퇴적물의 색은 퇴적환경변화와 관련되어 총 유기물과 탄산염 및 생규소(biogenic opal) 함량 그리고 철의 산화상태(*e.g.*, goethite, hematite, pyrite) 등 일부 지화학 특성을 잘 반영한다(Nederbragt *et al.*, 2000; Pälike *et al.*, 2001; Giosan *et al.*, 2002; Helmke *et al.*, 2002; Nederbragt and Thurow, 2004; Rogerson *et al.*, 2006).

실제로 코어 05GCRP-15에서 원소분석을 통해 얻은 탄산염 값과 XRF 코어 스캐너를 이용하여 분석된 칼슘 값의 변화양상은 비교적 잘 일치한다(남승일과 박옥분, 2008). 특히 동해의 퇴적층에 기록된 탄산염성분은 대부분 해양기원인 부유성 유공충 등

미화석 성분으로 구성되어 있으며 퇴적물 색지수와 잘 대비된다(박옥분, 2010). 일반적으로 동해에서 보고된 탄산염 함량은 간빙기의 일부 구간을 제외한 전 구간에서 퇴적물의 밝기가 어두운 층에서 값이 증가한다(e.g., Khim *et al.*, 2008). 이러한 특징은 퇴적물 색과 Ca 값의 관계를 밝힌 다른 지역에서 보고된 연구와 상반되는 결과이다(e.g., Mix *et al.*, 1995; Balsam *et al.*, 1999; Nederbragt *et al.*, 2000, 2006). 동해의 퇴적층에서 간빙기인 홀로세와 MIS 5.1 동안 탄산염 함량이 낮은 것은 해수의 수직 순환이 일어나는 간빙기에 용존산소 공급이 해저에 증가되면서 해저에 퇴적된 유기물이 산화되면서 생성된 이산화탄소에 의해 탄산염이 용해된 것으로 해석된다. TOC 함량은 해수면 변동에 의한 동해의 해수순환과 표층 생산력의 변화와 보존조건과 밀접한 관련성이 있다(Khim *et al.*, 2008). 이 결과 빙하기인 MIS 4-2에는 일정한 주기를 보이는 암층에서 TOC 값이 비교적 높게 나타난다. 또한 유기탄소 함량이 높을수록  $L^*$  값의 감소하고 상대적으로 적색과 주황색을 강하게 나타낸다. 실제로 박옥분(2010)과 천중화 외(2010)는 동해 퇴적물의 밝기와 색이 퇴적물 조성관련성을 연구하여 퇴적물의 밝기는 Al, Fe, Ca, Mn, Ba, Cr, Mo, Zr 등 퇴적물의 구성원소와 상관계수가 매우 낮은 반면, 총 유기탄소 함량과 퇴적물 밝기의 상관관계가 매우 높은 사실을 보고하였다.

#### 4.3 후기 제 4기 빙하기-간빙기 고해양 환경의 변화

퇴적물의 표면으로부터 얻은 고해상의 밝기 지수( $L^*$ )와 색도( $a^*$ ,  $b^*$ ) 자료를 바탕으로 정립된 층서모델에 의하면 동해 서부 대륙사면에서 획득한 3점의 코어는 94 ka BP 이후 동해에서 주기적으로 일어난 고해양 환경변화를 잘 기록하고 있다. 본 연구에서는 퇴적물 밝기와 색도의 주기적인 변화 기록을 바탕으로 후기 제 4기 빙하기-간빙기의 해수면 변동에 반응하여 동해에서 일어났던 고해양 환경변화를 해석하였다. 3점의 퇴적물 코어에 기록된 (아)빙하기-(아)간빙기 주기에 따라 퇴적물 밝기와 색도 변화의 차이가 뚜렷하며 다음과 같이 구분된다; 1) 하부부터 최대 22개의 암층이 협재하여 나타나는 교호층(MIS 5.2 - MIS 3), 2) 일정한 밝기를 갖는 두꺼운 암엽리 층(MIS 2), 3) 급격한 명암변화를 보이는 층(MIS 2/1 경계), 4) 색이나 밝기의 변화가 없는 최상

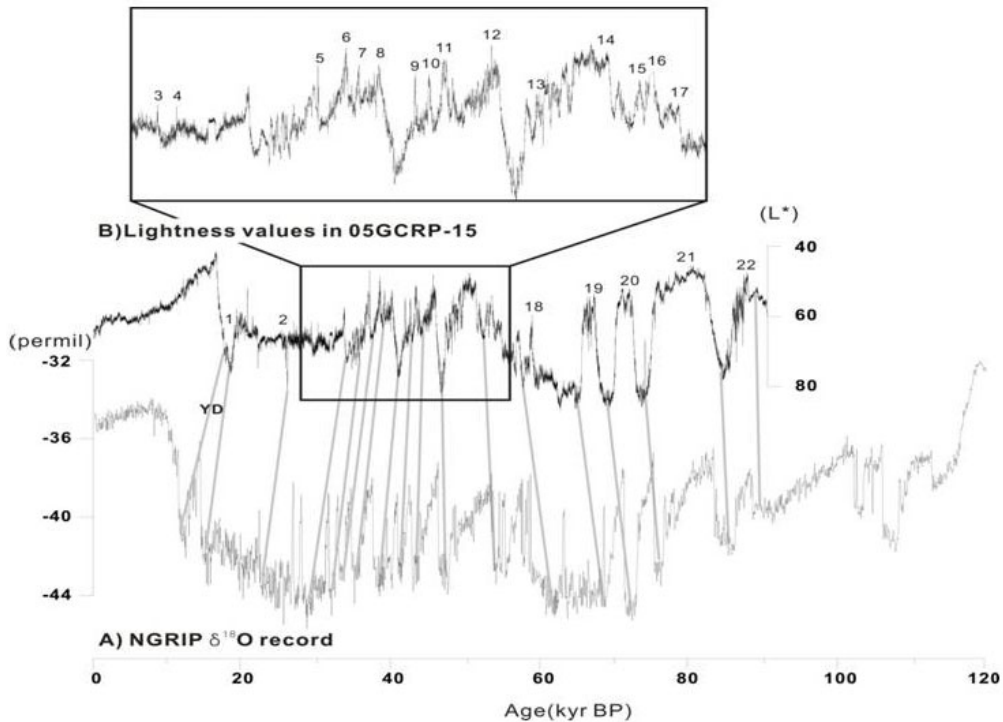
부의 층(MIS 1)으로 구분된다.

##### 4.3.1 MIS 5.2 - MIS 3/2 (94 - 24 ka BP)

마지막 최대 간빙기인 Eemian (125-115 ka) 이후 빙하기가 다시 시작되면서 해수면은 점차 하강하였다. 특히 MIS 5.2부터 마지막 최대빙하기 이전 동안 전 지구적인 해수면 변동이 매우 심하게 일어났으며, 실제로 해수면은 약 100-30 m 정도 사이에서 변동하였다(Chappell *et al.*, 1996). MIS 5.1 때는 약 30 m 낮았으며 MIS 3/2의 경계에서는 약 100 m 정도 까지 해수면이 하강하였다(e.g., Siddall *et al.*, 2003). (아)빙하기-(아)간빙기가 반복되었던 이 시기에 비교적 수심이 낮은 해협으로 북서태평양과 연결된 동해의 해양환경은 해수면 변동에 매우 민감하게 반응하였다(Oba *et al.*, 1991; Tada *et al.*, 1992, 1999). 이 당시 해수면이 하강함에 따라 대한해협을 통하여 유입되는 대마난류 유입이 현재보다 제한되면서 동해는 매우 다른 환경으로 변화하였다. 동아시아 몬순 시스템의 영향으로 아빙하기-아간빙기 주기에 따라 대한해협을 통해 유입되는 담수의 양도 조절되었다. 따라서 아빙하기-아간빙기 동안 해수면 변동에 의한 대마난류와 비교적 염분도가 낮고 영양염류가 풍부한 동중국해 연안수의 유입량의 변화로 동해의 해양환경도 변화하였다(Tada *et al.*, 1999).

코어 05GCRP-15에 뚜렷하게 나타나는 TL 암층들은 MIS 5.2부터 MIS 3/2까지 기록된 전 지구적 해수면 변동과 함께 동아시아 몬순시스템의 변화를 잘 반영한다(Tada *et al.*, 1992, 1999; Tada, 2004; Ikehara and Itaki, 2007; Itaki *et al.*, 2007). Tada *et al.* (1999) 의하면 상대적으로 온난했던 시기(interstadial periods)에 동아시아 여름몬순이 강화되어 중국대륙에서 강수량이 증가한 결과 동중국해에 담수의 유입이 증가하였다. 이 결과 상대적으로 영양염류의 함량이 높은 동중국해 연안수가 동해로 유입되는 양이 증가되면서 표층수의 일차생산력이 증가되어 비교적 많은 유기물이 해저에 퇴적되었다. 또한 담수 유입이 증가되면서 저염의 표층수가 형성되어 상하수층의 밀도차이에 의해 동해 수괴의 성층화가 이루어졌다. 성층화가 지속되면 수괴의 수직순환이 점차 약화되고 해저에 공급되는 용존산소 양이 감소하면서 해저는 환원(euxinic)이나 아산화(suboxic) 환경으로 변화하였다. 따라서 이 시기에 형성된 퇴적층은





**Fig. 5.** Correlation between NGRIP  $\delta^{18}\text{O}$  records and lightness values ( $L^*$ ) from the core 05GCRP-15. The numbers represented on peaks of the  $L^*$  show IS numbers (interstadial episodes) (Johnsen *et al.*, 1992) from 1 to 22 corresponding to D-O events of NGRIP  $\delta^{18}\text{O}$  records. The upper box show IS numbers from 3 to 17 in detail. The gray bars show the correlation with the same light-colored layers and low  $\delta^{18}\text{O}$  values, respectively.

비교적 유기물 함량이 높고 대부분 어두운 색을 나타낸다(Tada *et al.*, 1999; Kido *et al.*, 2007; Khim *et al.*, 2009). 이와 반대로 상대적으로 한랭했던 시기(stadial periods)에는 시베리아 대륙으로부터 불어오는 북서 계절풍에 의해 동해 북부 해역에서 표층수가 냉각되고 해빙이 형성되면서 표층수의 밀도가 증가하게 된다. 이 결과 표층수가 침강하면서 심층 순환이 발달함에 따라 해저에 공급되는 용존산소는 증가되어 아산화환경이 비교적 우세하였거나 산화(oxic) 환경이 형성되었다. 상대적으로 해수면이 낮았던 이 시기에는 겨울 몬순시스템이 우세하게 발달하여 동아시아 대륙에서 유입되었던 담수의 양이 감소하였다(Tada *et al.*, 1999). 따라서 동해로 유입되는 동중국해 연안수가 제한되어 담수를 통해 유입되는 영양염도 감소하였다. 이러한 환경조건에서 동해 표층수의 일차생산력이 감소되었고 해저에 퇴적되는 유기물의 양도 상대적으로 낮아졌다. 이 결과 유기탄소 함량이 적은 밝은 색을 띠는 퇴적층이 우세하게 나

타난다(Oba *et al.*, 1991; Tada *et al.*, 1992, 1999; Khim *et al.*, 2009).

특히 MIS 5.1 동안에는 MIS 4-3 시기에 비해 상대적으로 해수면이 약 20-50 m 높았다. 따라서 해수면이 현재보다 약 30 m 낮았던 MIS 5.1 시기에는 대안해협을 통해 유입되는 대마난류와 동중국해 연안수의 유입이 증가하였다. 이 결과 비교적 많은 양의 영양염류가 동해에 공급되었고 표층생산력도 증가하였기 때문에 비교적 많은 양의 유기물이 해저퇴적물에 공급되었다. 또한 담수와 혼합된 저염분 해수의 유입이 증가하여 수괴 수직순환이 약화되면서 해저에 공급되는 용존산소량이 제한된 결과 아산화환경으로 변하여 유기물의 보존이 유리한 환경이 형성되었다. 이와 매우 유사한 환경조건은 마지막 최대빙하기 이후 홀로세로 전이(MIS 2/1)되는 Termination 1 (T1)에도 잘 나타난다. 따라서 MIS 5.1과 T1에 쌓인 어두운 퇴적층은 MIS 4-3 시기에 퇴적된 암층보다 더욱 두꺼우며 유기탄소 함량이 보다 높은 값을

나타낸다(Oba *et al.*, 1991; Tada *et al.*, 1999).

#### 4.3.2 MIS 2 (24 - 12 ka BP)

퇴적물의 밝기가 일정한 암엽리 퇴적층은 주로 마지막 빙하기인 MIS 2에 형성되었다(Oba *et al.*, 1991; Tada *et al.*, 1999; Bahk *et al.*, 2000). MIS 4-3 동안 전 지구적으로 해수면은 현재보다 약 50-90 m 낮았으며 그 변동 폭이 매우 심하였다. 특히 해수면이 약 75 m 정도 낮았던 MIS 3.1 이후 북반구 대륙빙하의 확장이 가속화되고 해수면은 지속적으로 하강하였다. 이 결과 대한해협을 통하여 북서태평양으로부터 유입되는 해수는 점차 감소하여 동해는 서서히 고립되기 시작하였다(Oba *et al.*, 1991; Tada *et al.*, 1999; Kido *et al.*, 2007). 북반구의 대륙빙하가 최대로 확장되었던 LGM에는 해수면이 약 130 m까지 하강하였고 대한해협의 수심은 10 m 내외였을 것으로 추측되고 있다(Oba *et al.*, 1991; Lee and Nam, 2004). 그러나 주변 대륙의 대규모 강과 강수에 의해 동해에 유입되는 담수의 양은 점차 증가하면서 동해 표층수의 염분도는 급격히 감소하였다. 이 결과 수괴의 밀도차이에 의한 수층의 성층화가 강화되면서 해수의 수직 순환은 점점 약해지기 시작하여 해저는 점차 환원환경으로 변화하였다(Oba *et al.*, 1991; Tada *et al.*, 1992; Watanabe *et al.*, 2007; Yokoyama *et al.*, 2007).

특히 MIS 2 전기와 다르게 비교적 퇴적물이 밝게 나타나는 깊이 145-155 cm 구간은 마지막 최대빙하기에 해당한다. 마지막 최대빙하기 동안 동해는 수괴의 강한 성층화가 발달하여 저층에서 공급되는 영양염이 제한되어 표층 생산력이 매우 낮았다(Tada *et al.*, 1999; Lee, 2007). 이 결과 유기탄소 함량도 매우 낮게 나타나며 퇴적층도 비교적 밝은 색의 특징을 보인다.

#### 4.3.3. MIS 1 (12 ka BP - present)

전 지구적인 해수면은 약 15 ka BP 이후 북반구 고위도의 대륙빙하가 빠르게 녹으면서 급격히 상승하였고 약 10 ka BP 경에는 해수면이 현재보다 약 60 m 아래에 위치하였다(Fairbanks, 1989). 이 시기에 전 지구적인 해수면의 상승과 함께 동해의 해수면도 빠르게 상승하였다. 이는 MIS 2 이후 퇴적물의 밝기가 급격히 감소하는 구간과 잘 일치한다(Oba *et*

*al.*, 1991; Tada *et al.*, 1992, 1999). 해수면 상승이 일어나면서 마지막 최대 빙하기동안 차단되었던 동해로 유입되는 대마난류가 증가하면서 다량의 영양염류가 동해에 다시 공급되어 표층생산력은 급격하게 증가하였다. 알케논(alkenone)을 이용한 고수온 복원자료에 의하면 이 시기의 동해 표층수 온도도 상승하였다(Oba *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 2008). 뿐만 아니라 겨울몬순 동안 일본해역을 따라 북상하는 대마난류가 시베리아 차가운 기단의 영향으로 동해 북부해역에서 냉각되면서 해수 수괴의 수직순환이 발달하였다. 이 결과 표층의 용존산소가 해저에 공급되면서 해저의 퇴적환경은 환원에서 아산화 환경으로 변화하였다(Itaki *et al.*, 2007). 이와 같이 마지막 최대빙하기에서 홀로세로 전환되는 시기(T1)에 해수면이 급격히 상승하면서 동해는 점차 기수환경에서 해양환경으로 변화하였으며 수괴의 수직순환이 일어나기 시작하였다. 이 당시 동해는 아간빙기인 MIS 5.1 때와 매우 유사한 퇴적환경이 형성되었다.

홀로세 전기에 퇴적된 TL 1층은 동해 해수의 환경과 수괴순환 시스템이 점차 현재의 해양환경으로 바뀌면서 형성되었으며, 일차 생산력이 증가하여 많은 유기물이 해저에 퇴적되었다(Oba *et al.*, 1991; Itaki *et al.*, 2007). 당시 수괴의 수직순환으로 인해 해저에 용존산소가 공급되었지만 해저 퇴적물에 퇴적된 유기물이 산화되면서 아산화 환경이 우세하였다(Itaki *et al.*, 2007). 특히 MIS 2/1에 퇴적물의 L\* 값이 급격한 변화를 보이는 시기는 D-O 주기의 IS (interstadial episodes) 1 시기에 해당하며 YD (Younger Dryas) 한랭사건이 일어난 단 주기의 돌발 기후변화 기록으로 잘 알려져 있다(그림 4). 동해는 대마난류의 유입이 증가하면서 약 7 ka BP 이후에서는 현재와 같은 해양환경으로 변화하였다. 따라서 T1 이후 퇴적물 코어의 표층에 이르는 최상부의 두터운 암층은 홀로세 이후 현재와 같은 해양환경 조건에서 형성되었다.

#### 4.4 동해 명암 교호층과 전 지구적 기후 시스템과의 관계

동해의 해수 순환시스템은 동아시아의 여름과 겨울의 계절적인 영향으로부터 크게 영향을 받는다(Wang and Oba, 1998; Itaki *et al.*, 2004; Ikehara and Itaki, 2007). 여름몬순은 태평양으로부터 온난 다습한 남

동풍이 부는 것이 특징이며, 계절풍의 영향으로 인해 강수량이 많기 때문에 해수 표층으로의 염분도와 영양염류의 함량에 영향을 미친다. 한편 겨울몬순 동안에는 한랭 건조한 북서풍이 시베리아로부터 불어오는 것이 특징이다. 겨울철에 불어오는 북서 계절풍은 해수의 표층수온을 하강시켜 동해 북부해역에서 해빙(sea ice)의 형성을 촉진시켜 표층수의 밀도가 증가시켜 수괴의 수직순환이 일어나도록 영향을 미친다(Tada, 2004; Ikehara and Itaki, 2007; Lee *et al.*, 2008). 또한 동아시아 몬순은 전 지구적인 기후 시스템과도 밀접한 연관성을 가진다(Wang and Oba, 1998; Gong *et al.*, 2001; Tada, 2004; Lee *et al.*, 2008). 이를 바탕으로 동해 해수시스템과 전 지구적 기후시스템의 관계를 알아보기 위해 05GCRP-15 코어의  $L^*$  값과 북부 그린란드 빙상코어(NGRIP)에 기록된  $\delta^{18}O$  자료를 대비하였다(그림 5). YD 한랭 사건을 포함한 MIS 5.2부터 MIS 2 동안 퇴적된 22개의 암층들은 천 년 주기의 고기후 기록인 D-O 주기와 잘 일치하는 것으로 이미 알려져 있다(*e.g.*, Tada *et al.*, 1992; Ikehara and Itaki, 2007; Itaki *et al.*, 2007). 그린란드빙상코어에 기록된 D-O 주기는 북반구 고위도 해역에서 일어나는 심층수생성 정도에 의해 조절되는 전 지구적인 대양대순환 시스템이 작동과 밀접한 관련이 있다.

05GCRP-15 퇴적물 코어는 총 24개인 IS 번호 중에서 1-22번까지 기록하고 있다. 각 IS 시기에 해당하는 퇴적물의 암층은 NGRIP  $\delta^{18}O$  비가 상대적으로 높은 값과 잘 일치한다. 특히 최하부의 비교적 두꺼운 암층은 IS 22 시기의 퇴적층으로 NGRIP  $\delta^{18}O$  자료와 대비하여 MIS 5.2 시기와 대비된다. 결과적으로 05GCRP-15 코어는 약 94 ka BP 이후 동해에서 일어난 고해양 환경변화의 역사를 매우 잘 기록하고 있는 것으로 밝혀졌다. 이는 동해에서 일어나는 해양환경변화가 동아시아 몬순뿐 아니라 전 지구적 기후 시스템과 밀접한 연관성이 있음을 지시한다. 따라서 동해에서 시추된 퇴적물 코어에 나타나는 색의 밝기를 이용하면 전 지구적인 기후변화 기록과도 정확한 대비가 가능하여 과거의 빙하기-간빙기에 동해에서 일어났던 고기후/고해양환경변화를 보다 정확하게 복원할 수 있을 것으로 보인다.

## 5. 결론

동해 서부 해역에서 시추된 3점의 퇴적물 코어에서 측정한 색지수(CIE- $L^*a^*b^*$ )를 이용하여 고해상의 층서를 정립하였다. 대륙붕 해역에서 시추된 2점(05GCRP-13, 05GCRP-14)의 퇴적코어의 연대는 MIS 4.0/4.2 (약 59/62 ka BP) 이후 퇴적된 반면, 해저분지에서 시추된 코어 05GCRP-15는 MIS 5.2(약 94 ka BP) 이후 퇴적되었다. 특히 동해 서부해역 퇴적물에 기록된 뚜렷한 명암 주기는 제 4기 후기 빙하기-간빙기에 일어난 해수면변동과 함께 동아시아 몬순시스템에 의한 동해의 고해양 환경변화를 뚜렷하게 반영한다. 또한 코어 05GCRP-15에 기록된 퇴적물 색의 밝기( $L^*$ )는 북부그린란드빙상코어(NGRIP)의  $\delta^{18}O$  값에 기록된 D-O 주기와 잘 대비되었다. MIS 5.2부터 MIS 2동안 비교적 온난하였던 interstadial 시기에 기록된 NGRIP의 무거운  $\delta^{18}O$  값은 동해 퇴적물에 주기적으로 나타나는 암층과 잘 대비되었다. 따라서 동해 퇴적물에 기록된 색상밝기의 뚜렷한 변화는 전 지구적인 기후변화 시스템과 동해의 해양환경이 밀접한 관련이 있음을 지시한다. 본 연구를 통하여 퇴적환경과 퇴적물의 성분변화를 반영하는 퇴적물의 밝기와 색은 동해에서 시추된 코어의 고해상의 층서를 정립하는데 매우 유용한 프록시로 밝혀졌다. 특히 퇴적물의 밝기와 색상은 전 지구적인 해수면변동에 매우 민감한 동해의 해양환경진화의 역사를 규명하는 동시에 전 지구적 기후변동시스템과의 연관성을 파악할 수 있는 중요한 기후변동 지시자로 활용이 가능하다.

## 사 사

본 연구는 국토해양부의 지원으로 한국지질자원 연구원에서 수행된 “국제공동해양시추사업(K-IODP)”의 지원으로 수행된 제 1저자의 석사논문 일부임을 밝힌다. 또한 본 논문은 극지연구소 과제 “K-Polar 사업(PP10090)”의 기후변화 프록시 개발연구 지원으로 재정리하여 게재하였다. XRF 코어 스캐너를 이용하여 동해의 시추시료를 이용하게 지원해주신 한국지질자원연구원의 진재화 박사와 K-IODP를 통해 지원해주신 장세원 박사께 감사드린다. 본 논문을 심사해 주시고 좋은 지적을 해주신 제주대학교 윤석훈 교수님과 한국지질자원연구원의 이윤수 박사님께

깊은 사의를 표한다.

### 참고문헌

- 남승일, 박옥분, 2008, Late Quaternary paleoceanographic changes on centennial scales: A case study from the East Sea sediment core using XRF-core scanner. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회초록, 251-252.
- 박옥분, 남승일, 2009, XRF 코어 스캐너를 이용한 시추 코어의 초고해상 화학성분 분석방법, 지질학회지, 45, 77-83.
- 박옥분, 2010, 후기 제 4기 동해 서부해역에서의 고해상 고해양환경복원. 충남대학교 석사학위논문, 101 p.
- 천중화, 손병국, 김지훈, 류병재, 김학주, 이영주, 박장준, 2010, 동해 울릉분지 시추코어 퇴적물 밝기 변화 요인 분석. 지질학회지, 46, 331-344.
- Bahk, J.J., Chough, S.K. and Han, S.J., 2000, Origins and paleoceanographic significance of laminated muds from the Ulleung Basin, East Sea(Sea of Japan). *Marine Geology*, 162, 459-477.
- Balsam, W.L., Deaton, B.C., Damuth, J.E., 1999, Evaluating optical lightness as a proxy for carbonate content in marine sediment cores. *Marine Geology*, 161, 141-153.
- Bauch, H.A. and Helmke, J.P., 1999, Glacial-interglacial records of the reflectance of sediments from the Norwegian-Greenland-Iceland Sea (Nordic seas). *Int Journ Earth Sciences*, 88, 325-336.
- Chapman, M.R. and Shackleton, N.J., 1998, What level of resolution is attainable in a deep-sea core? Results of a spectrophotometer study. *Paleoceanography*, 13, 311-315.
- Chappell, J. and Shackleton, N.J., 1996, Oxygen isotopes and sea level. *Nature*, 324, 137-140.
- Chun, J-H., Cheong, D-K., Ikehara, K. and Han, S-J, 2007, Age of the SKP-I and SKP-II tephra from the southern East Sea/Japan Sea: Implications for interstadial events recorded in sediment from marine isotope stages 3 and 4. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247, 100-114.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdottir, A.E., Jouzel, J. and Bond, G., 1993, Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364, 218-220.
- Fairbanks, R.G.A., 1989, A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: Influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342, 637-642.
- Francus, P., Bradley, R.S. and Thurow, J., 2004, An introduction to image analysis, sediments and paleoenvironments. In: Francus, P.(Ed.) *Image analysis, Sediments and Paleoenvironments*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Föllmi, K.B., Cramp, A., Föllmi, K.E., Alexandrovich, J.M., Brunner, C., Burckle, L.H., Casey, M., deMenocal, P., Dunbar, R.B., Grimm, K.A., Holler, P., Ingle, J.C.Jr., Kheradvar, T., McEvoy, J., Nobes, D.C., Stein, R., Tada R., von Breyman, M.T. and White, L.C., 1992, Dark-light rhythms in the sediment of the Japan Sea: preliminary results from site 798, with some additional results from sites 797 and 799. In: Pisciotta K.A., Ingle, J.C.Jr., von Breyman, M.T., Barron, J. *et al.*, (Eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, 127/128, Ocean Drilling Program.
- Fukusawa, H., 1995, Non-glacial varved lake sediment as a natural timekeeper and detector of environmental changes. *the Quaternary Research(japan)*, 34, 145-149.
- Gamo, T. and Horibe, Y., 1983, Abyssal circulation in the Japan sea. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 39, 220-230.
- Giosan, L., Flood, R.D. and Aller, R.C., 2002, Paleoclimatological significance of sediments color on western North Atlantic drifts: I. Origin of Color. *Marine Geology*, 189, 25-41.
- Gong, D.-Y., Wang, S.-W. and Zhu, J.-H., 2001, East Asian monsoon and Arctic oscillation. *Geophysical Research Letters*, 28, 2073-2076.
- Helmke, J.P., Schulz, M. and Bauch, H.A., 2002, Sediment-color records from the Northeast Atlantic reveals patterns of millennial-scale climate variability during the past 500,000 years. *Quaternary Research*, 57, 49-57.
- Ichiye, T., 1984, Some problems of circulations and hydrography of the Japan Sea and the Tsushima current. *Ocean hydrodynamics of the Japan and East China Seas*, Elsevier Oceanography Series, 15-54.
- Ikeda, M., Suzuki, F. and Oba, T., 1999, A box model of glacial-interglacial variability in the Japan Sea. *Journal of Oceanography*, 55, 483-492.
- Ikehara, K. and Itaki, T., 2007, Millennial-scale fluctuations in seasonal sea-ice and deep-water formation in the Japan Sea during the last Quaternary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247, 131-143.
- Itaki, T., Ikehara, K., Motoyama, I. and Hasegawa, S., 2004, Abrupt ventilation changes in the Japan Sea over the last 30 ky: evidence from deep-dwelling radiolarians. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 208, 263-278.
- Itaki, T., Komatsu, N. and Motoyama, I., 2007, Orbital- and millennial-scale changes of radiolarian assemblages during the last 220 kyrs in the Japan sea. *Palaeogeography,*

- Palaeoclimatology, Palaeoecology, 247, 115-130.
- Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dansgaard, W., Fuhrer, K., Gundestrup, N., Hammer, C.U., Iversen, P., Jouzel, J., Stauffer, B. and Steffensen, J.P., 1992, Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature*, 359, 311-313.
- Khim, B.K., Park, Y.H., Bahk, J.J., Jin, J.H., Lee, G.H., 2008, Spatial and temporal variation of geochemical properties and paleoceanographic implications in the South Korea Plateau (East Sea) during the late Quaternary. *Quaternary International*, 176-177, 46-61.
- Khim, B.K., Tada R., Park, Y.H., Kido, Y., Itaki, T. and Ikehara, K., 2009, Correlation of TL layers for the synchronous paleoceanographic events in the East Sea (Sea of Japan) during the Late Quaternary. *Geosciences Journal*, 13, 113-120.
- Kido, Y., Minami, I., Tada, R., Fujine, K., Irino, T., Ikehara, K. and Chun, J.-H., 2007, Orbital-scale stratigraphy and high-resolution analysis of biogenic components and deep-water oxygenation conditions in the Japan Sea during the last 640 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247, 32-49.
- Kinoshita, M., Tobin, H., Moe, K.T., and the Expedition 314 Scientists, 2008, NanTroSEIZE Stage 1A: NanTroSEIZE LWD transect. IOCP Preliminary Report, 314, doi: 10.2204/iodp.pr.314.2008.
- Lee, K.E., 2007, Surface water changes recorded in Late Quaternary marine sediments of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247, 18-31.
- Lee, K.E., Bahk, J.J. and Choi, J., 2008, Alkenone temperature estimates for the East Sea during the last 190,000 years. *Organic Geochemistry*, 39, 741-753.
- Lee, E. and Nam, S.-I., 2004, Low sea surface salinity in the East Sea during the last glacial maximum: review on freshwater supply. *Geosciences Journal*, 8, 43-49.
- Martinson, D.G., Pisias, N.G., Hays, J.D., Imbrie, J., Moore Jr., T.C. and Shackleton, N.J., 1987, Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27, 1-29.
- Matsumoto, M., Uto, K., Ono, K. and Watanabe, K., 1991, K-Ar age determinations for Aso volcanic rocks-concordance with volcanostratigraphy and application to pyroclastic flows. *Volcanology Society of Japan*, 2, 73.
- Merrill, R.B. and Beck, J.W., 1995, The ODP color digital imaging system: Color logs of quaternary sediments from the Santa Barbara basin, site 893. In: Kennett, J.P., Baldauf, J.G. and Lyle, M. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 146, Ocean Drilling Program.
- Mix, A.C., Rugh, W., Pisias, N.G., Veirs, G. and Party, L.S., 1992, Color reflectance spectroscopy: A tool for rapid characterization of deep-sea sediments. In: Mayer, L., Pisias, N., Janecek, T. *et al.* (Eds) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 138, Ocean Drilling Program.
- Munsell Soil Color Charts, 1954, Munsell Colour Co., Inc., Baltimore, 23 p.
- Mix, A.C., Harris, S. and Janecek, T.R., 1995, Estimating lithology from noninvasive reflectance spectra: Leg 138. In: Pisias, N.G., Mayer, L.A., Janecek, T.R., Palmer-Julson, A. and Van Andel, T.H. (Eds.) *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 138, Ocean Drilling Program.
- Nederbragt, A.J., Thurow, J.W. and Merrill, R.B., 2000, Color records from the California margin: Proxy indicators for sediment composition and climatic change. In: Koizumi, L.M., Richter, C. and Moore, T.C., Jr. (Eds), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 167, Ocean Drilling Program.
- Nederbragt, A.J. and Thurow, J.W., 2004, Digital sediment colour analysis as a method to obtain high resolution climate proxy records. In: Francus, P. (Ed.) *Image analysis, Sediments and Paleoenvironments*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 105-124.
- Nederbragt, A.J., Francus, P., Bollmann, J. and Soreghan, M.J., 2004, Image calibration, filtering, and processing. In: Francus, P. (Ed.) *Image analysis, Sediments and Paleoenvironments*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 35-58.
- Nederbragt, A.J., Dunbar, R.B., Osborn, A.T., Palmer, A., Thurow, J.W. and Wagner T., 2006, Sediment colour analysis from digital images and correlation with sediment composition. *New Techniques in Sediment Core Analysis*, Geological Society, London, Special Publications, 267, 113-128.
- North Greenland Ice Core Project members, 2004, High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 431, 147-151.
- Oba, T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, M. I., Omura, A., Sakai, T. and Takayama, T., 1991, Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. *Paleoceanography*, 6, 499-518.
- Ortiz, J., Mix, A., Harris, S. and O'Connell, S., 1999, Diffuse spectral reflectance as a proxy for percent carbonate content in North Atlantic sediments. *Paleoceanography*, 14, 171-186.
- Pälike, H., Shackleton, N.J. and Röhl, U., 2001, Astronomical forcing in Late Eocene marine sediments. *Earth and*

- Planetary Science Letters, 193, 589-602.
- Rogerson, M., Weaver, P.P.E., Rohling, E.J., Lourens, L.J., Murray, J.W. and Hayes, A., 2006, Colour logging as a tool in high-resolution palaeoceanography. *New Techniques in Sediment Core Analysis*, Geological Society, London, Special Publications, 267, 99-112.
- Rothwell, R.G. and Rack, F.R., 2006, New techniques in sediment core analysis: an introduction. *New techniques in sediment core analysis*, Geological Society, London, Special Publications, 267, 1-29.
- Schaaf, M. and Thurow, J., 1994, A fast and easy method to derive highest-resolution time-series datasets from drillcores and rock samples. *Sedimentary Geology*, 94, 1-10.
- Siddall, M., Rohling, E.J., Almogi-Labin, A., Chmleben, Ch. Meischner, D., Schmelzer, I. and Smeed, D.A., 2003, Sea-level fluctuations during the last glacial cycle. *Nature*, 423, 853-858.
- St-Onge, G., Mulder, T., Francus, P. and Long B., 2007, Continuous physical properties of cored marine sediments. *Developments in marine geology*, Elsevier, 1, 63-98.
- Tada, R., 2004, Onset and evolution of millennial-scale variability in Asian monsoon and its impact on paleoceanography of the Japan Sea. *In: Clift, P. et al.* (Eds.) *Continent-ocean interactions within east Asian marginal seas*. AGU Monography Series, 149, 283-298.
- Tada, R., Irino, T. and Koizumi, I., 1999, Land-ocean linkages over orbital and millennial timescales recorded in late quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography*, 14, 236-247.
- Tada R., Koizumi, I., Cramp, A. and Rahman, A., 1992, Correlation of dark and light layers, and the origin of their cyclicity in the Quaternary sediments from the Japan Sea. *In: Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., McWilliams, M. et al.*, (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128, 577-601.
- Thomson, J., Croudace, I.W. and Rothwell, R.G., 2006, A geochemical application of the ITRAX scanner to a sediment core containing eastern Mediterranean sapropel units. *New techniques in sediment core analysis*, Geological Society, London, Special Publications, 267, 65-77.
- Uda, M., 1934, The results of simultaneous oceanographical investigations in the Japan Sea and Its adjacent waters in May and Jun, 1932. *Japan Imperial Fishery Experimental Stations*, 5, 57-190.
- Wang, L. and Oba, T., 1998, Tele-connections between East Asian monsoon and the high-latitude climate: a comparison between the GISP2 ice core record and the high resolution marine records from the Japan and the South China Seas. *The Quaternary Research (Daiyonkikenkyu)*, 37, 211-219.
- Watanabe, S., Tada, R., Ikehara, K., Fujine, K. and Kido, Y., 2007, Sediment fabrics, oxygenation history, and circulation modes of Japan Sea during the Late Quaternary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247, 50-64.
- Xiang, Z. and Joy, G., 1994, Color image quantization by agglomerative clustering. *Computer Graphics and Applications, IEEE Computer Graphics and Applications*, 14, 44-48.
- Yokoyama, Y., Kido, Y., Tada, R., Minamai, I., Finkel, R. and Matsuzaki, H., 2007, Japan Sea oxygen isotope stratigraphy and global sea-level changes for the last 50,000 years recorded in sediment cores from Oki Ridge. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247, 5-17.

---

투 고 일 : 2010년 7월 17일

심 사 일 : 2010년 7월 19일

심사완료일 : 2010년 10월 4일