

후기 플라이스토세 이후 울릉분지 남부 대륙사면의 퇴적환경

천 종화¹⁾, 허 식¹⁾, 한 상준¹⁾, 유 해수¹⁾, 김 원균¹⁾, 정 대교²⁾, 이 영주³⁾

1) 한국해양연구소 해양환경·기후연구본부

2) 강원대학교 지질학과

3) 한국자원연구소 석유·해저자원연구부

서 언

동해 울릉분지는 서측과 동측의 대륙사면에 비하여 남측 대륙사면이 넓고 평탄하게 발달한다 (Fig. 1). 울릉분지의 남측 대륙사면은 저해수면시기에 사면 사태가 빈번히 일어났으며, 사태에 의해서 공급된 두꺼운 저탁류 퇴적층들이 대륙사면과 분지평원에서 보고되었다 (Chough, 1984; Chun et al., 1997). 최근에는 남동측 대륙사면에서의 천부탄성파탐사와 시추퇴적물분석에 의해서 대규모의 천부가스층의 분포가 확인되었으며 (허식 외, 1999), 이들은 심부에서 생성된 열기원 가스가 이동하여 현재의 위치에 집적된 것으로 해석되었다 (이영주 외, 1999).

울릉분지 남측 대륙사면은 지형적으로 남동측과 남서측으로 뚜렷이 구분된다 (Fig. 1). 이러한 지형장벽은 울릉분지의 남측 대륙붕에서도 보고된 해저지형 및 해저지층의 차이와 연관성이 있을 것으로 추정된다. 울릉분지의 남측 대륙붕은 쓰시마 섬을 경계로하여 서측은 침식수로들이 발달하며 해저지층의 변형이 발견되지 않는다 (최동립, 1995; Park, 1998). 이에 반하여 쓰시마 섬의 동측은 뚜렷한 침식수로의 발달이 없으며, 해저지층들이 일련의 스투스트 단층과 습곡구조가 잘 발달되어 있다 (최동립, 1995; Park, 1998). 울릉분지 남측 대륙붕의 단층대에 의한 지구조 운동은 남측 대륙사면의 해저지형 특성에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

이 연구에서는 남동측과 남서측 대륙사면의 해저지형 특성과 시추퇴적물 분석을 통해서 울릉분지 남측 대륙사면의 자세한 퇴적환경을 밝히고자 한다. 시추퇴적물 분석은 울릉분지 남측 대륙사면에서의 가스 함유 퇴적물의 분포 특성과 범위를 밝힘으로써, 앞으로 실시될 대륙사면에 분포하는 천부가스의 정밀 탐사에 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 천부가스가 배태되어 있는 해역에서의 퇴적작용 해석은 인공구조물 및 해양공간활용에서 발생될 문제점 등을 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

연구방법

동해 울릉분지 남측과 서측 대륙사면의 12 정점에서 758~1,106 cm 길이의 시추퇴적물을 채취하였다 (Fig. 1). 이 시추퇴적물들은 한국해양연구소 연구선인 “은누리호”에 장착

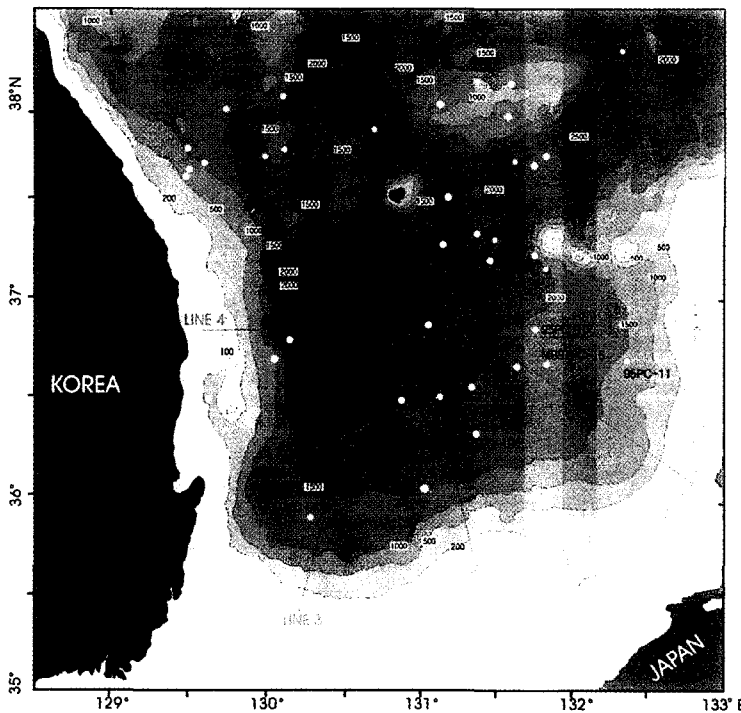


Fig. 1. Location map of piston cores (solid circles) which were taken from the Ulleung Basin. Contours are given in meters. Solid lines indicate the location of detailed bathymetry of the slope.

된 바렐길이 12 m의 피스톤코아러 (Benthos 사)를 사용하여 수심 855~2,156 m에서 채취하였다 (Fig. 1). 울릉분지 남동측 사면에서는 6 정점, 남서측 사면에서는 1 정점, 남측 대륙사면의 지형장벽이 형성된 중부해역에서는 3 정점, 그리고 울릉분지 서측 대륙사면에서 2 정점의 시추퇴적물을 채취하였다. 이 연구는 한국해양연구소의 기관고유사업인 “동해의 기후변동예측과 진화 연구 (PE 00783-01)”와 해양수산부의 “배타적 경제수역 해양자원조사” 사업 결과의 일부이다.

시추퇴적물들은 “온누리호” 선상에서 3 m 간격으로 밀봉한 후에, 실험실로 운반하였다. 시추퇴적물들은 실험실에서 양면으로 절개한 후에 퇴적물의 퇴적학적 특성 (입도, 함수율, hand-vane 전단응력)을 분석하고, 퇴적구조와 구성광물 분석을 위하여 X-선 사진촬영 (Softex M-1005)과 박편제작을 하였다. 가스함유퇴적물은 양면으로 절개되지 않은 상태에서 가스 팽창에 의한 수평 균열이 있는 곳에서 진공포집기를 이용하여 가스를 채취한 후에, 한국자원연구소의 HP 5890 II 기체 크로마토그래프, HP 6890 기체 크로마토그래프, Rock-Eval 6 (Vinci사), WR-112 (Leco사) 및 CHN-900분석기 (Leco사) 등을 사용하여 가스의 함량 및 성분과 유기 지화학 분석을 하였다. 울릉분지의 해저지형은 미국 Scrips 연구소에서 제작된 인공위성 (Geosat, ERS-1) 측정 고도자료로부터 유추한 해저면 수심자료를 활용하였으며, 2' 간격의 자료를 사용하여 2차원 및 3차원 해저지형도를 제작하였다.

해저지형

동해 울릉분지의 남측 대륙사면은 사면사태에 의한 대규모의 함몰대가 형성되어 있다 (Fig. 2). Figure 2는 남측 대륙사면을 분지평원측에서 바라 본 3차원 해저지형으로서, 남측 대륙사면이 중앙부에 상대적으로 함몰이 일어나지 않은 지형적인 장벽이 형성되어 있음이 관찰되었다. 울릉분지 남측 대륙붕은 대륙붕단이 수심 200 m에 형성되어 있지만, 상부 대륙사면인 수심 400 m 까지는 완만한 경사로 연장되어 있다.

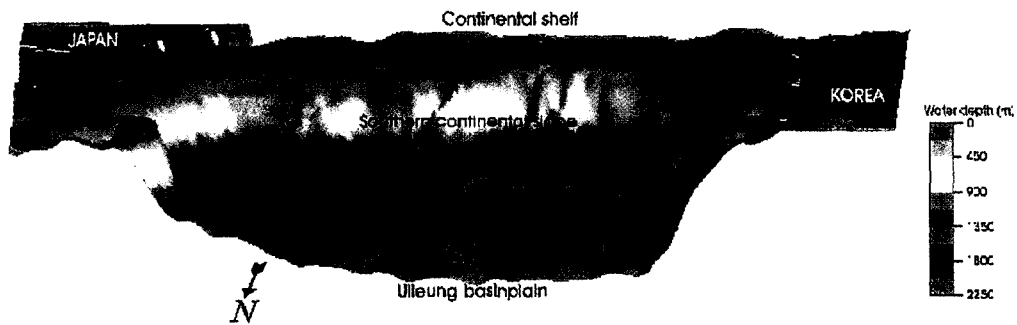


Fig. 2. 3-dimensional subbottom topography in the southern continental slope of the Ulleung Basin. The southern slope divide into southeastern and southwestern parts with central topographic barrier.

남측 대륙붕과 상부 대륙사면의 퇴적물은 대부분 모래 퇴적물로 구성되어 있으며, 대륙사면의 니질경계선 (mud line; Stanley et al., 1983)은 수심 약 400~600 m에 형성되어 있다 (천종화 외, 1999). 이 니질경계선 하부의 대륙사면은 경사가 급격히 증가하며, 다수의 미끄럼 또는 무너짐 흔적들이 관찰된다 (Chough et al., 1997; 천종화 외, 1999).

남측 대륙사면의 자세한 해저지형을 파악키 위해 남동측, 중앙부, 남서측 대륙사면에 축선을 설정하고 지형단면을 살펴보았다 (Figs. 1, 3). 그리고 울릉분지의 서측 대륙사면의 해저지형과 남측 대륙사면의 해저지형을 상호 대비하기 위해 서측 대륙사면에서도 축선을 설정하여 지형단면을 관찰하였다 (Figs. 1, 3). 남측 대륙사면은 서측 대륙사면에 비하여 다수의 미끄럼 또는 무너짐 흔적들이 발달된다 (Fig. 3). 남동측 사면은 남서측 사면에 비하여 급한 경사를 보이며, 남측 대륙사면의 중앙부는 남동측과 남서측 사면에 비하여 사태의 흔적이 적게 관찰된다. 따라서 남측 대륙사면 사태는 남서측 사면에서 가장 활발히 일어났으며, 사면 사태가 가장 적게 일어난 중앙부 사면은 지형적인 장벽으로 작용하고 있다.

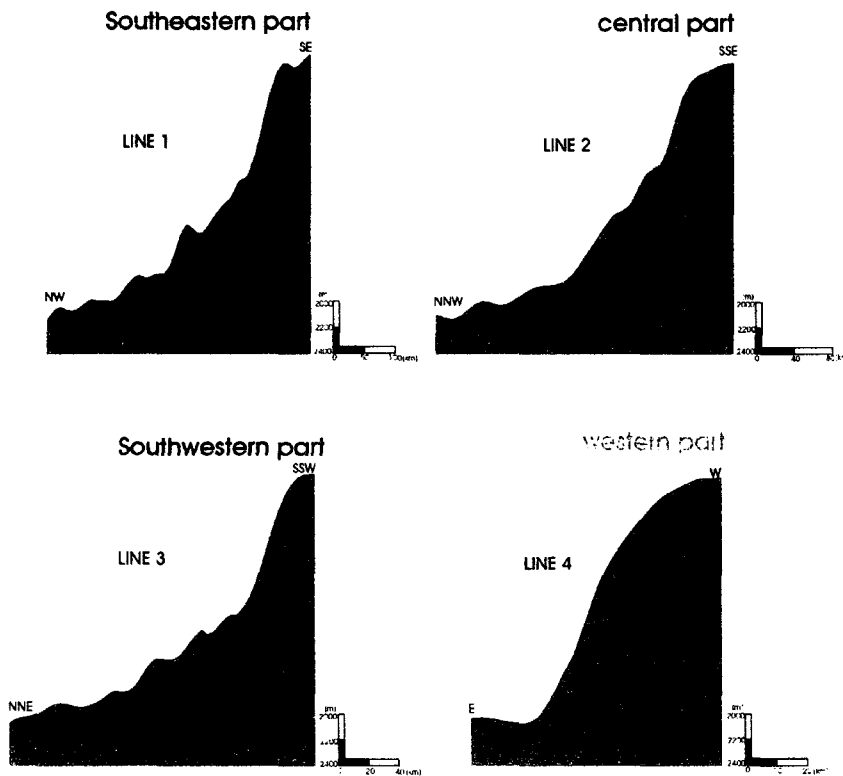


Fig. 3. Subbottom profiles in the southern and western continental slopes. The southern slope is characterized by slump scars and gullied scars.

시추퇴적물 특성

울릉분지 남측과 서측 대륙사면의 수심 855~2,156 m에서 채취한 시추퇴적물들은 길이 758~1,106 cm의 해저퇴적물이 획득되었다 (Fig. 4). 이 시추퇴적물들은 각 화산들로부터 공급된 울릉-II 테프라 (약 9,300 년전), AT 테프라 (약 24,300 년전) 등에 의해서 테프라층서가 뚜렷이 구별된다 (Chun *et al.*, 1997). 홀로세 퇴적물은 전체적으로 생물교란된 두꺼운 빨 퇴적물로 구성되어 있으며, 반원양성 퇴적물의 공급과 저서생물의 교란작용에 의해서 형성된 것이다 (Fig. 4).

이에 반해서 해수면이 하강한 빙하기 동안에는 사면 사태에 의해서 공급된 세립질 저탁류층이 두껍게 형성되어 있다 (Fig. 4). 남측 대륙사면에서 가장 우세한 퇴적상은 저해수면시기에 퇴적된 저탁류층으로, 분지 평원으로 향하여 점차 저탁류층의 층후가 감소한다 (Chun *et al.*, 1997).

울릉분지 남동측 대륙사면의 수심 1,585~1970 m에서 채취한 시추퇴적물 (95PC-11, 98EEZ-2, 98EEZ-3, MB97PC-19들은 가스팽창에 의한 수평균열이 관찰되었다 (Fig. 4). 시추퇴적물내에 포함된 가스는 메탄의 가장 우세하고 에탄, 프로판, 부탄, 핵산이 소량 분석되었다 (Fig. 5; 이영주 외, 1999). 총 유기탄소와 총질소의 비율은 대부분 10 이상으로 육상 기원 유기물의 유입을 지시하며, 탄소 안정 동위원소 비는 열기원 가스를 지시

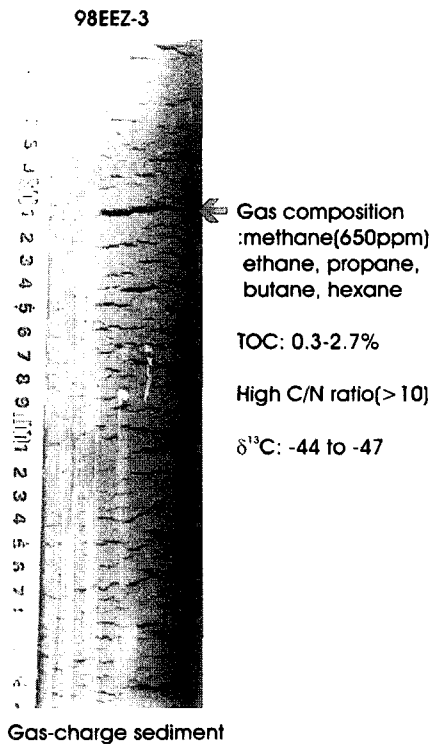


Fig. 5. Gas composition, TOC, C/N ratio $\delta^{13}\text{C}$ contents of core 98EEZ-3.

또한 해저수로가 형성된 남동측 대륙사면에서 채취된 시추퇴적물 (95PC-10)과 남서측 대륙사면 (MB97PC-20)과 서측 대륙사면 (MB98PC-6, MB98PC-7)에서 획득한 시추퇴적물에서도 가스함유 퇴적물은 관찰되지 않았다. 가스함유 퇴적물은 퇴적물의 특성과 전혀 무관하게 분포하는데 (Fig. 4), 이것은 심부에서 생성된 열기원 가스가 천부로 이동하여 집적된 것을 지시한다.

각 대륙사면별로 가스함유 퇴적물에 대한 정밀한 탐사가 요구되지만, 현재의 결과에 의하면 남동측 대륙사면에 가스함유 퇴적물이 집중되어 있는 것으로 밝혀졌다.

울릉분지 남동측 대륙사면의 퇴적환경

울릉분지 남측 대륙사면은 앞서 밝힌 해저지형과 퇴적물 특성 등에 의해서 남동측과 남서측이 뚜렷이 구분된다. 남동측 대륙사면에서는 심부 천부가스층이 확인 되었으며 (허식 외, 1999), 시추퇴적물에서도 열 기원의 가스함유 퇴적물이 넓게 분포한다. 울릉분지의 대륙사면은 저해수면 시기동안에 사면 사태에 의한 저탁류의 빈번한 활동이 보고되었다 (Chough, 1984; Chun *et al.*, 1997).

남동측 대륙사면에서는 채취된 MB97PC-16 시추퇴적물에서는 약 9,300 년전에 울릉도 나리칼데라에서 분출된 울릉-II 테프라가 시추퇴적물 깊이 783 cm에 위치한다 (Fig. 6). 이것은 울릉-II 테프라층을 기준으로 84 cm/kyr의 아주 높은 퇴적률을 지시하는 것이다. 시추퇴적물 깊이 100 cm 에서 782 cm 구간의 퇴적물들은 변형된 구조를 가지는 별

퇴적물로 구성되어 있다 (Figs. 4, 6). 그리고 일부 구간에서는 소규모의 단층이 관찰된다 (Fig. 6). 이러한 퇴적구조와 높은 퇴적률을 갖는 퇴적물 공급은 seismite 에 의한 결과에 의한 것으로 Shiki 등 (1998)에 의해서 보고되었다. 이 seismite 퇴적물은 체계적으로 퇴적상이 교호하는 저탁류 퇴적물 (95PC-2)과 뚜렷이 구별된다 (Fig. 6).

울릉분지 남동측 대륙사면에서는 홀로세 동안에도 천부가스의 해저면으로 분출에 의한 결과로 사면 사태가 일어나, seismite 퇴적물이 공급된 것으로 해석된다.

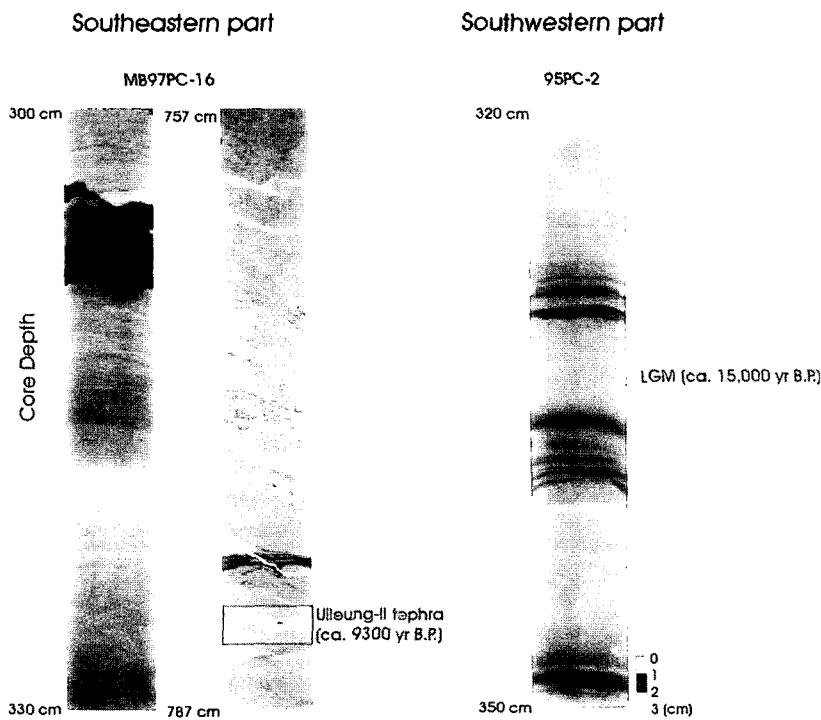


Fig. 6. X-radiographs showing seismite (MB97PC-16) and turbidite (95PC-2) sequences in the southern continental slope of the Ulleung Basin.

결론

울릉분지의 남측 대륙사면은 서부 대륙사면보다 상대적으로 완만한 경사의 지형이 발달한다. 남측 대륙사면의 대륙붕단은 수심 약 200 m 에 위치하지만, 수심 약 200~400 m 까지 완만한 경사의 해저지형이 연장되어 있다. 수심 약 400 m~1200 m 구간에서는 사면의 경사가 급격히 가파르게 변하며, 곳곳에 미끄럼 또는 무너짐 흔적이 형성되어 있다. 남측 대륙사면에서 표층퇴적물의 mud line은 수심 약 400 m 이하부터 시작된다. 울릉분지 남측 대륙사면은 지형적으로 대한해협을 축으로하는 남동측과 오끼제도를 축으로하는 남서측으로 뚜렷이 구분된다. 울릉분지 남측 대륙사면에서 채취된 12점의 시추 퇴적물들은 대부분 홀로세 반원양성 퇴적물과 저해수면시기에 공급된 질량류 또는 암설류 퇴적물들로 구성되어 있다. 울릉분지 남동부 사면의 수심 1,585~1,970 m에서 채취

된 시추퇴적물내에서는 시추퇴적물 깊이 약 200 cm 하부 구간부터 가스 팽창에 의한 퇴적물의 수평균열들이 흔히 관찰되는데, 이들은 대부분 열기원 가스로 분석되었다. 이 퇴적물의 수평균열들은 특정 퇴적상에서 국한 되지 않고 수 m 이상 시추퇴적물의 최하부까지 연장되어 있다. 또한 울릉분지 남동측 사면에서 채취된 MB97PC-16 시추퇴적물에서는 아주 두꺼운 교란된 빨 퇴적물 (782 cm)이 발달된다. 이 퇴적상은 저해수면시기에 퇴적된 저탁류층과는 울릉-II 테프라층 (약 9300년전)에 의해서 뚜렷이 구분되어서, 홀로세 동안에 공급된 seismite 퇴적물로 해석된다.

각 대륙사면별로 가스함유 퇴적물에 대한 정밀한 탐사가 요구되지만, 현재의 결과에 의하면 남동측 대륙사면에 열기원 가스함유 퇴적물이 집중되어 있으며, 홀로세 동안에도 천부가스의 해저면 분출에 의한 결과로 사면 사태가 일어난 것으로 해석된다.

참고문헌

- Chough, S. K., 1984, Fine-grained turbidites and associated mass flow deposits in the Ulleung(Tsushima) Basin, East Sea(Sea of Japan). In: Stow, D.A.V. and Piper, D.J.W.(eds.), Fine-Grained Sediments, Deep-Water Processes and Facies. Geological Society(London), Special Publication, 14, 185-196.
- Chough, S. K., Lee, S.H., Kim, J.W., Park, S.C., Yoo, D.G., Han, H.S., Yoon, S.H., Oh, S.B., Kim, Y.B., Back, G.G., 1997, Chirp(2-7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin, Geoscience Journal 1, 143-153.
- Chun, J.H., Han, S.J., Cheong, D.K., 1997, Tephrostratigraphy in the Ulleung Basin, East Sea: Late Pleistocene to Holocene. Geoscience Journal 1, 154-166.
- Park, S.J., 1998, Stratal patterns in the southwestern margin of Ulleung Back-arc Basin: A sequence stratigraphic analysis. Seoul Nat. Univ. Ph. D. thesis, 176pp.
- Shiki, T., Ciat, M.B., Jones, B.G., 1998, Sedimentary features of seismites, seismo-turbidite and Tsunamites, 15th International Sedimentological Congress, Spain, 721.
- Stanley, D.J., Addy, S.K., Behrens, E.W., 1983, The mudline: variability of its position relative to shelfbreak. SEPM special publication, 33, 279-298.
- 이영주, 허식, 광영훈, 김학주, 천종화, 한상준, 유해수, 1999, 울릉분지 남동부 시추퇴적물내에 함유되어 있는 천부가스의 특성. 한국석유지질학회지, 7, 35-40.
- 천종화, 허식, 한상준, 신동혁, 정대교, 홍기훈, 김석현, 1999, 동해 울릉분지 남서해역 해양투기장의 퇴적물 특성. 한국해양학회지 바다, 4, 312-322.
- 최동립, 1995, 동해 울릉분지 남쪽 연변부의 신생대 탄성파 퇴적층서, 지질구조 및 지구조 진화. 인하대학교 박사학위논문, 127pp.
- 허식, 천종화, 한상준, 유해수, 김성렬, 김한준, 최동립, 이용국, 1999, 울릉분지 남동부 천부가스층의 분포, 특성 및 퇴적환경. 지질학회지, 35, 201-212.