

## 다중변수 순차층서 모델 개발을 통한 울릉분지 남서부 대륙주변부의 층서연구

### Multi-variable Sequence Stratigraphic Model and its Application to Shelf-Slope System of the Southwestern Ulleung Basin Margin

윤석훈 (Seok Hoon Yoon)\*, 박세진 (Se Jin Park)\*\*, 조성권 (Sung Kwun Chough)\*\*\*

#### 요 약

본 연구에서는 기존 Exxon group의 순차층서 모델이 갖고 있는 적용의 한계성을 극복하기 위하여 다중변수 순차층서 모델을 제시하였다. 이 모델에서는 2~3차수의 주기성을 갖고 변화되는 범세계적 해수면 변동, 지구조 운동, 퇴적물 공급 등의 영향요소를 모두 변수로 간주하며, 이들 요소에 의해 순차층의 내부구성과 경계면 타입이 결정된다. 순차층을 구성하는 기본 단위로 해석적 층서단위인 퇴적계 연합체(systems tract) 대신, 내부 지층의 집적형태에 의해 구분되는 기술적 층서단위인 부순차층세트(parasequence set)를 채택하였으며, 부순차층세트의 타입은 상대적 해수면 변동과 퇴적물 공급속도의 변화를 반영한다. 따라서 본 순차층서 모델은, 네 가지 타입의 상대적 해수면 변동과 세 등급의 퇴적물 공급 변화 사이의 조합으로써 예상되는 단일 또는 2~4개의 부순차층세트로 구성된 7가지 타입의 순차층을 보여준다. 다중변수 순차층서 모델을 울릉분지 남서부 대륙주변부에 적용한 결과, 순차층의 타입은 울릉분지의 형성과 단함에 따른 3단계의 분지주변부 지구조 운동의 변화를 잘 반영한다. 즉, 순차층을 구성하는 부순차층세트 조합의 변화와 울릉분지 지구조 운동의 타입과 속도가 시기적으로 일치한다. 해저면의 급격한 침강을 동반한 울릉분지의 후열도 열개 동안에는 분지의 급격한 침강으로 인해 상대적인 해수면은 지속적으로 상승되었고, 많은 양의 퇴적물이 공급되어 1개의 부순차층세트로 구성된 순차층이 형성되었다. 이후, 압축성 변형을 동반한 울릉분지의 단함 동안에는, 분지 침강이 느려지고 국지적으로 융기가 일어나 하강 또는 상승우세의 상대적 해수면 변동이 야기되었고, 또한 지구조적 요인에 의해 통제되는 퇴적물 집적속도의 지역적인 차이로 인하여 변형대와 비변형대에서 상이한 순차층이 형성되었다. 분지 단함단계 이후에는 다시 해저면이 전반적으로 침강되면서, 상승이 우세한 상대적 해수면 변동과 보통 또는 빠른 퇴적물 집적속도가 결합하여 2-3개의 부순차층세트로 구성된 순차층을 형성하였다.

**주요어 :** 순차층서, 층서모델, 층서분석, 울릉분지, 해수면 변동, 지구조운동

**Abstract :** This study presents *multi-variable sequence model* for a broader application of sequence concept proposed by Exxon group. The concept of the multi-variable model is based on the fact that internal organization and boundary type of the sequences are determined by three varying factors including 3rd-order cycles of eustasy, and tectonic movement and sediment influx with 2nd-order changes. Instead of Exxon group's systems tracts, this model adopts parasequence sets as the fundamental building blocks of the sequence, because they are descriptive stratigraphic units simply defined by internal stacking pattern, reflecting interactions of accommodation and sediment influx. Seven sequence types which vary in number and type of internal parasequence sets are formulated as associations of four types of accommodation development and three grades of sediment influx. In the southwestern margin of Ulleung Basin, the multi-variable sequence analysis of shelf-slope sequence shows systematic changes in stratal patterns and the number of constituent parasequence sets (i.e. sequence type). These changes are interpreted to reflect temporal and spatial changes in type and rate of tectonic movement and sediment influx, as a result of back-arc opening and closing. During the back-arc opening, rapid subsidence, continuous rise of relative sea level, and high sediment influx gave rise to sequences dominantly of single progradational parasequence set. In the early stage of back-arc closing accompanied by local contractional deformation, different types of sequences contemporaneously formed depending on the spatial changes in tectonically-controlled accommodation and influx rates. During the subsequent slow back-arc subsidence, rise-dominated relative sea-level cycle was coupled with moderate to high sedimentation rate to have resulted in sequences consisting of 2~3 parasequence sets.

**Key words :** sequence stratigraphy, stratigraphic model, stratigraphic analysis, Ulleung Basin, sea-level change, tectonics

\* 제주대학교 해양과학대학 해양학과 (Department of Oceanography, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea)

\*\* 한국석유개발공사 (Korea Petroleum Development Corporation, Anyang, Kyongki-Do, 430-060, Korea)

\*\*\*서울대학교 자연과학대학 해양학과 (Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

## 서 언

울릉분지 남서부 대륙주변부 (그림 1)는 현재 수심 200 m 이하의 대륙붕과 200~1500 m 사이의 급경사 대륙사면으로 이루어져 있으며, 그 하부에는 약 8~10 km 두께의 퇴적물이 집적되어 있는 부채꼴 형태의 퇴적분지가 위치한다 (Park, 1992). 이 퇴적분지는 후기 올리고세에서 중기 마이오세에 동해의 열림과 함께 형성되어, 한반도와 일본 열도로부터 공급되는 퇴적물로 채워지면서 북동쪽으로 전진하는 대륙주변부를 이루었다 (Barg, 1986; Chough *et al.*, 1997). 지난 10여년간, 이 지역에서의 층서연구 (Nester *et al.*, 1989; Park, 1992; Yoon, 1994; 최동립, 1995)는 주로 분지의 형성기원과 진화과정, 그리고 이와 관련된 분지 주변부에서의 퇴적환경의 변화양상을 밝힘으로써, 국내에서 가장 유망한 탄화수소 매장지로서의 자원개발과 인접한 울릉분지 및 일본열도의 지구조적 진화사를 정립하기 위한 목적으로 활발히 수행되어 왔다.

최근 해저 지층의 층서분석에는, 1960년대 이후 정립되어 온 시간층서 개념과 탄성과층서 분석법이 결합된 순차층서 (sequence stratigraphy) 이론 (Vail *et al.*, 1977; Wilgus *et al.*, 1988)과 이를 바탕으로 정립된 층서모델 (Van Wagoner *et al.*, 1988)이 폭넓게 적용되고 있다. 그러나 이러한 순차층서 모델은 주로 지구조적으로 안정되고, 지각변형이 단순한 대서양 연안 대륙주변부의 퇴적분지를 대상으로 하여 정립된 것으로서, 층형성에 영향을 미치는 여러 요인 중 범세계적인 해수면 변동을 주요 변수로 간주한 단일변수 모델이다. 따라서 지구조적 운동이 활발한 서태평양 주변부에 위치한 우리나라 해저층서 분석에 적용하기에는 한계가 있다. 특히, 울릉분지 남서부 대륙주변부는 지난 3천만년 이래 동해의 형성과 단합에 따라 심한 구조적 변형을 받은 지역이기 때문에 (Chough and Barg, 1987; Yoon and Chough, 1995; 최동립, 1995), 층의 형성을 통제하는 변수로는 범세계적인 해수면 변동 외에도 지구조 운동에 의한 해저기반의 침강·용기와 퇴적물공급지에서의 지각 변형으로 인한 퇴적물 공급율의 변화가 포함되어야 한다.

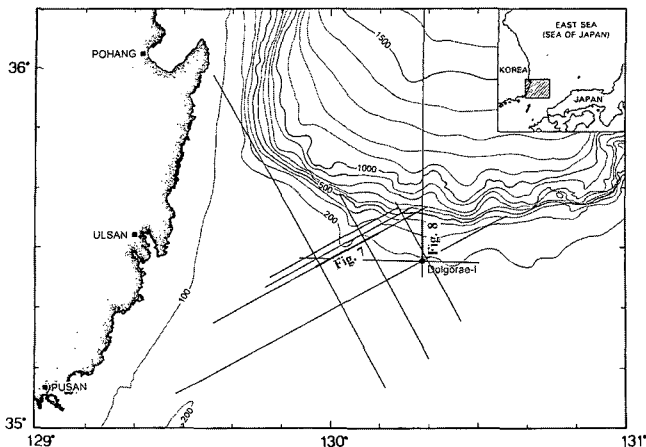


Fig. 1. Location map of the southwestern margin of the Ulleung Basin showing bathymetry and seismic tracklines analyzed in this study. Contours in meters.

결과적으로 울릉분지 남서부에서의 층서분석에 지구조적 지층 운동을 배제한 기존의 순차층서 형성 모델을 적용한다면 상당한 오류가 발생할 것이다. 그러므로 이 지역에서의 정확한 층서분석을 위해서는 순차층서 영향요소 모두를 변수로 간주한 다중변수 순차층서모델 개발과 이 모델을 기초로 한 층서분석이 석유탐사와 인접한 울릉분지의 지구조적 진화사를 밝히는 데 중요한 역할을 할 것이다. 이러한 취지에서 본 연구에서는 순차층서 이론에 입각하여 일반적으로 적용될 수 있는 다중변수 순차층서 모델을 제시하고, 이를 울릉분지 남서부 대륙주변부 퇴적층의 층서분석에 적용하여, 이 지역의 퇴적층 형성과정에 관여된 영향요소의 변화를 밝히고자 한다. 연구지역의 층서분석에는 한국석유개발공사가 1983년부터 1993년 사이에 VI-1 광구에서 취득한 다중채널 탄성과탐사단면을 기본 자료로 이용하였다 (그림 1).

## 순차층서 기본 개념과 기존 모델

지난 20년간 발표된 순차층서학에 대한 정의 (예, Van Wagoner *et al.*, 1988; Emery and Myers, 1996)를 종합해 보면, '분지에 집적된 퇴적층을, 침식면이나 비퇴적면 또는 이에 대비되는 정합면에 의해 구분되는, 반복적이고 기원적으로 연계되어 있는 시간층서적 층단위 (chronostratigraphic unit)로 구분하여 연구하는 층서학의 한 분야로 정의될 수 있다. 순차층서의 기본 개념은 크게 두 가지로 요약할 수 있는데, 첫째, 퇴적분지 주변부에 형성되는 지층은 (1) 범세계적 해수면 변동 (eustasy), (2) 퇴적지 기반의 용기와 침강을 수반한 지구조 운동 (tectonics), 및 (3) 퇴적물의 공급 (sediment supply) 등의 주요 요인에 의해 층형, 층후, 퇴적상, 층서적 불연속면 등이 결정된다는 것이다 (Van Wagoner *et al.*, 1988). 여기서, 범세계적 해수면 변동과 해저의 지구조 운동은 분지 주변부로 공급되는 퇴적물이 집적되는 데 필요한 해수면과 해저면 사이의 수용공간 (accommodation), 2차원적으로는 상대적 해수면 변동을 결정하며, 퇴적물 공급은 이러한 수용공간이 시간적, 공간적으로 어떻게 채워지는 지를 결정한다 (Jervey, 1988; Posamentier *et al.*, 1988). 둘째는 이러한 세 가지 영향요인 중, 특히 일정한 주기성을 갖는 범세계적 해수면 변동 때문에 퇴적분지 주변부에 집적되는 퇴적층도 일정한 간격을 두고 그 특성 (두께, 분포범위, 퇴적상 등)이 반복되는 양상을 띤다는 것이다. 따라서 지층의 집적형태나 층서적 불연속면 형성 등에 있어서의 규칙적인 반복성을 파악하여 기본 층서 모델을 정립할 수 있다.

이러한 기본개념 위에 정립된 현재의 순차층서 모델은 미국 Exxon Production Research Company 연구원들에 의해 제안된 것 (Vail *et al.*, 1977; Wilgus *et al.*, 1988)으로서, 지구조적으로 안정되어 있는 비활성 대륙주변부, 특히 미국 대서양 대륙주변부에서 취득된 양질의 심부 탄성과 자료와 시추공 분석에 의한 것이다. 이 지역 해저퇴적층의 특징은 비교적 반복적이고 일관된 층서 및 층형을 보이는 것이며, 이러한 규칙성은 100~300만년 이하의 반복성을 갖고 주기적으로 변화되는 빙하기원의 범세계적 해수면 변동 (glacial eustasy)에 의한 것으로 해석되었다 (Posamentier and Vail, 1988). 이 모델에서 반복적인 층서의 기본

형을 순차층 (sequence)이라 하였고, 이는 '비교적 정합적인 관계를 갖는, 성인적으로 연계되어 있는 지층의 연속체이며, 상부와 하부는 부정합면이나 이와 대비되는 정합면으로 경계지워지는 층'으로 정의된다 (Mitchum *et al.*, 1977). 여기서 부정합은 대기중 침식 및 절단 (truncation)과 대기중 노출의 증거를 갖고 있고, 상당한 결층 (hiatus)을 보이는, 고기의 층과 신기의 층을 구분하는 면을 말한다 (Van Wagoner *et al.*, 1988).

순차층은 다시 순차층 내에서의 위치와 경계면 특성 및 내부 형태에 따라 정의되는 3개의 서로 다른 퇴적계 연합체 (systems tract)로 구성된다 (그림 2). 이들 퇴적계 연합체는 해수면 하강기 → 저해수면기 → 해수면 상승기 → 고해수면기 순서로 반복되는 한 주기의 상대적 해수면 변동 동안에 형성되는 것으로서, 해수면 하강기에는 순차층의 경계면인 부정합면이, 그후의 해수면 변동기에는 각각 저해수면 (lowstand) 또는 대륙붕 주변부 (shelf-margin) 퇴적계 연합체, 해침 (transgressive) 퇴적계 연합체, 고해수면 (highstand) 퇴적계 연합체가 발달된다 (그림 2).

이러한 순차층서 모델이 의미를 갖기 위해서는, 범세계적 해수면 변동에 비해 상대적으로 지구조 운동이나 퇴적물 공급의 변화가 미약하고 일정하게 변화된다는 조건을 가정해야 한다. 즉, 다양하게 변화될 수 있는 지구조 운동이나 퇴적물 공급 등의 영향을 어떤 특정 수준으로 고정해야만 한다. 따라서 모델을 적용할 수 있는 지역에 한계가 있으며, 모델을 적용하기 전에 이러한 조건이 만족되는지를 먼저 검증해야만 한다.

**다중변수 순차층서 모델**

**순차층 구성 단위**

기존의 순차층 모델에서 순차층을 구성하는 요소는 퇴적계 연합체 (systems tract)이다. 이 층서단위는 경계면의 타입 (침식여부, 정합여부 등)과 퇴적계 연합체를 구성하는 부순차층 (parasequence) 및 부순차층세트 (parasequence set)의 집적형태 등에 의해 구획이 정해지고, 다시 이들 특성과 순차층 내에서의 위치에 따라 상대적 해수면 변동과 관련지어, 3개의 퇴적계 연합체 등으로 분류된다 (그림 2). 따라서 퇴적계 연합체는 기술적 층서단위

(descriptive stratigraphic unit)라기 보다는 전형적 해수면 변동에 기초한 해석적 층서단위 (interpretative stratigraphic unit)로 볼 수 있으며, 이러한 점에서 분석자의 주관이 개입될 여지가 있다. 예를 들어, 고해수면 퇴적계 연합체와 저해수면 연합체의 상반부 (lowstand wedge)에 동일하게 전진형 (progradational)의 부순차층세트가 형성될 수 있는데 (그림 2), 탄성과 단면의 획득 범위가 한정되어 있고, 시추자료가 충분치 못하여 층계면의 특성을 제대로 파악하지 못할 경우, 순차층의 경계면을 어디로 잡느냐에 따라, 두 퇴적계 연합체의 명칭이 서로 바뀔 수도 있는데, 실제 탄성과 단면에서 반사파의 특성이나 형태만으로 순차층의 경계면을 인지하기란 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 순차층의 구성단위를 기술적 구분요소가 강한 부순차층세트로 하여 층서모델을 제시하고자 한다. 부순차층세트는 '기원적으로 연계된 부순차층 (parasequence)의 연속체'로 정의되며, 단순히 부순차층의 집적형태 (progradational, aggradational 또는 retrogradational)에 따라 구분된다 (Van Wagoner *et al.*, 1988). 한편, 부순차층은 야외 노두나 시추자료에서 상향 천해화 (upward-shallowing)의 퇴적상변화를 보이는 구간으로서, 단주기의 급격한 해침면을 경계로 구분된다 (Van Wagoner *et al.*, 1990). 또한 저주파 탄성과 자료에서는 부순차층은 구분 가능한 최소의 반사면으로 구획되는 퇴적층과 개략적으로 규모가 일치한다 (Emery and Myers, 1996). 따라서 부순차층세트는 탄성과 단면에서 퇴적계 연합체에 비해 용이하고 객관적으로 구분될 수 있는 층서단위이다. 아울러 부순차층의 층형은 순차층을 결정하는 범세계적 해수면 변동, 지구조 운동 및 퇴적물 공급 등 세가지 영향요소에 의해 결정되기 때문에 순차층서 모델의 기본 층서요소로서 적합하다.

대륙붕-대륙사면 퇴적계로 이루어진 대륙주변부에서, 부순차층세트의 층형, 즉 부순차층의 집적형태는 대륙붕의 퇴적물 수용공간의 변화를 결정하는 상대적 해수면 (R)의 시간 (t)에 따른 변화 (R')와 퇴적물 공급 (S)의 시간에 따른 변화 (S') 사이의 비 (SP)에 의해 결정되며, 수용공간의 변화속도는 다시 범세계적 해수면 변동 (E) 속도와 지구조운동 (T) 변화속도 사이의 차로써 결정된다 (Jervey, 1988; Posamentier *et al.*, 1988). 즉, 다음과 같은 식으로 요약할 수 있다.

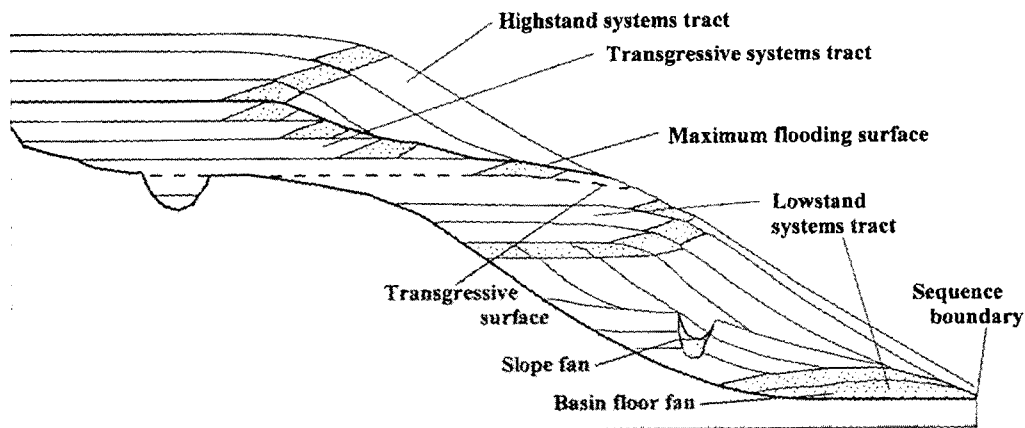


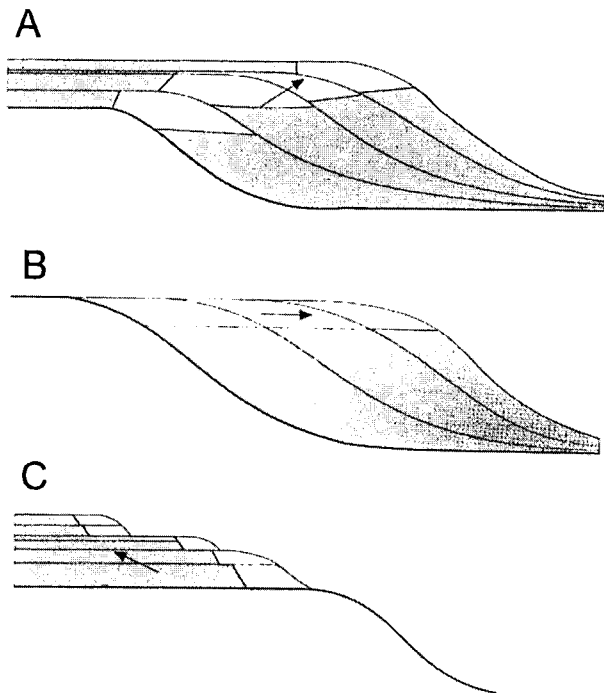
Fig. 2. Sequence stratigraphic model (type-1 sequence) of Exxon group. Modified from Emery and Myers (1996).

$$SP = R'/S' = \frac{dR/dt}{dS/dt} = \frac{d(E-T)}{dt} / \frac{dS}{dt}$$

SP값에 의해 결정되는 부순차층세트의 층형은 그림 3과 같이 3가지 타입으로 대표될 수 있다. 먼저,  $dR/dt > 0$ 이고  $SP < 1$ 일 경우, 즉 대륙붕 수용공간이 증가되지만, 그 속도가 퇴적물이 공급되는 속도 보다 느릴 경우, 해수면 아래의 대륙붕은 점진적으로 완전히 퇴적물로 충전되고, 나머지 퇴적물은 다시 경사층으로 이동되어 퇴적된다. 따라서 대륙붕층과 대륙사면층 모두가 두꺼워지면서 S-자 전진 (sigmoid progradational : sPG)형의 부순차층세트가 형성된다 (그림 3A). 그리고,  $dR/dt < 0$ ,  $SP < 1$ 일 경우, 즉 강제퇴적 (forced regression)와 같이 상대적 해수면이 하강하면서 퇴적물 수용공간이 감소하는 경우에는, 육상으로부터 공급되는 퇴적물은 대부분 대륙붕을 통과하여 대륙사면에 집적되거나, 대륙붕 지역에 집적되더라도 해수면 하강에 따라 대륙사면으로 재동될 것이다. 따라서 대륙붕에서 퇴적층은 형성되지 않고 대륙사면 퇴적층만이 두꺼워지면서, 경사 전진 (oblique progradational : oPG)형 부순차층세트가 나타난다 (그림 3B). 한편,  $SP > 1$ 일 경우, 즉 대륙붕 수용공간 생성이 퇴적물 공급 및 퇴적보다 빠르게 진행될 때에는 공급되는 퇴적물이 새로이 생성되는 대륙붕 수용공간을 완전히 충전하지 못하고 주로 연안근처나 내대륙붕 지역에 집적되기 때문에 후퇴형 (retrogradational : RG)의 부순차층세트가 형성된다 (그림 3C).

**순차층서 결정 요소**

기존 순차층 모델이 지니고 있는 적용의 한계성을 극복하기 위해서는 범세계적 해수면, 지구조 운동, 퇴적물 공급 등의 세 가지



**Fig. 3.** Stratigraphic patterns of parasequence set. (A) Sigmoid progradational, (B) Oblique progradational, (C) Retrogradational.

순차층서 영향요소를 모두 변수로 간주하고, 이에 의해 형성되는 지층의 층서적 규칙성을 파악하여 층서모델을 만들어야만 한다. 그러나 이들 영향요소의 변화는 실제 자연환경에서 연속적인 범위에서 변화되기 때문에 상이한 층서모델이 무한하게 나타날 수 있으며, 따라서 층서 모델로서의 가치를 상실하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 지구조 운동과 퇴적물 공급의 변화를 정성적 등급 (qualitative grade)으로 나누고, 각 등급의 변화와 연속적인 범세계적 해수면 변화와의 조합을 갖고 모델을 제시하고자 한다.

**상대적 해수면 (퇴적물 수용공간) :** 본 모델에서 범세계적 해수면 변동은 그림 4A와 같이 상승과 하강 국면이 동일하게 반복되는 것으로 가정하였다. 아울러, 해저면의 지구조적 운동 양상은 해저면의 융기 또는 침강 속도와 범세계적 해수면 변동 속도를 비교하여 4등급 (T1, T2, T3, T4)으로 나누었으며, 각 등급에서의 운동양상은 적어도 한 주기의 범세계적 해수면 변동 동안에 일정한 속도로 진행된다고 가정하였다 (그림 4A). 이는 침강/융기의 지구조적 주기와 범세계적 해수면의 하강/상승 주기의 지속기간이 서로 다르다는 데에 기초한 것이다. Emery and Myers (1996)에 따르면, 분지의 지구조적 침강속도의 변화나 퇴적물 공급지에서의 융기속도의 변화는 일반적으로 300~5000만년의 1~2차수 (1st~2nd order) 주기를 갖고 일어나며, 이에 비해 빙하의 생성과 소멸에 의한 해수면 변동은 50~300만년의 3차수 (3rd order) 주기성을 나타낸다고 한다. 따라서 적어도 1주기의 범세계적인 해수면 변동 동안에 지구조 운동이 일정하게 일어난다는 가정은 광역적으로 볼 때 상당히 타당하다고 볼 수 있다.

이러한 가정 하에서, 해수면과 해저면 사이의 상대적인 수심을 나타내는 상대적 해수면 (즉, E-T)의 시간에 따른 변동양상은 상승지속형 (continuous rise; R1), 하강지속형 (continuous fall; R2), 상승우세 교호형 (rise-dominated fluctuation; R3) 및 하강우세 교호형 (fall-dominated fluctuation; R4) 등 4개의 타입으로 단순화될 수 있다 (그림 4B). 먼저, 해저면의 하강속도가 범세계적 해수면의 최대 침강속도 ( $t_1$ ,  $t_2$ 에서)보다 빠른 경우 (T1), 상대적 해수면 (R1)은 상승국면만이 지속된다 (상승지속형). 즉, 범세계적 해수면의 하강기에도 해저면이 이보다 더 빠른 속도로 침강하므로, 실제로는 수심이 증가하게 된다. 이와 반대의 경우 (T2), 상대적 해수면 (R2)은 범세계적 해수면의 상승시기에도 해저면이 이보다 더 빠르게 융기하므로 지속적으로 하강되고, 수심은 감소하게 된다 (하강지속형).

한편, 해저면이 범세계적 해수면의 최대 하강속도보다는 느리게 침강하는 경우 (T3), 상대적 해수면 (R3)은 점진적으로는 상승하지만, 범세계적 해수면 하강이 최대일 때 ( $t_1$ ,  $t_2$ )를 전후해서는 상대적 해수면이 하강하는 구간이 나타난다 (상승우세 교호형). 그리고 해저면이 범세계적 해수면의 최대 상승속도보다는 느리게 융기하는 경우 (T4)에는, 상대적 해수면 (R4)의 특성은 하강과 상승 국면이 교호하지만, 하강국면에서의 속도가 상승국면의 상승 속도보다 더 빠르기 때문에 전반적으로는 하강하게 된다 (하강우세 교호형).

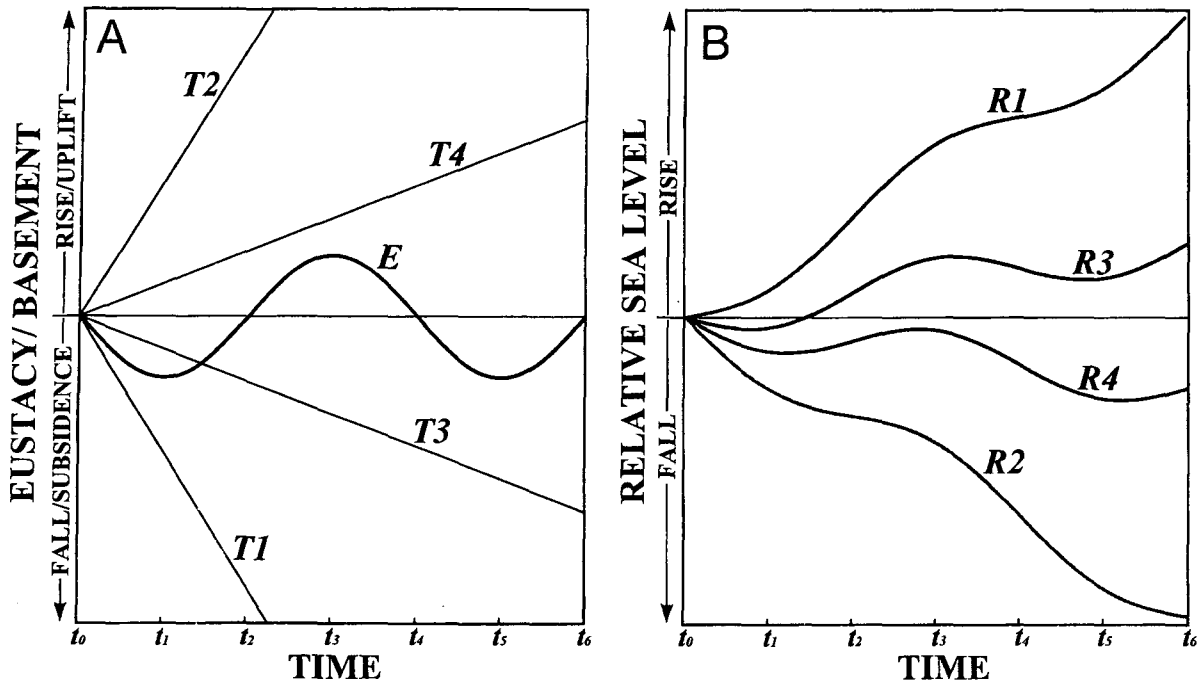


Fig. 4. Four types of relative sea-level change (B) as a function of eustatic sea-level change (E) and vertical movement of seafloor or basement (T1~T4) (A).

**퇴적물 공급**: 퇴적물의 공급속도, 정확히 말해서 퇴적물 집적속도는 퇴적물 수용공간의 얼마나 많은 그리고 어느 부분이 퇴적물로 채워질 것인가를 결정한다. 퇴적물 공급과 상대적 해수면 상승 사이의 평형은 퇴적상대 (facies belt)가 분지쪽으로 전진할 것인지, 아니면 육지쪽으로 후퇴할 것인가를 결정하고, 분지로 공급되는 퇴적물의 입도는 퇴적상에 큰 영향을 미친다. 분지 주변부로 운반되는 퇴적물의 부피와 입도는 배후지의 지형, 지구조, 기후와 같은 요소가 복잡하게 작용하여 결정된다. 국지적인 퇴적물 공급은 분지 주변부로 들어가는 하천 유입지와의 근접성에 의해 결정되기도 한다. 또한 빙하에 의한 범세계적 해수면 변동과 하천배수분지에서의 기후 사이에도 관련이 있을 수 있는데, 이는 곧 퇴적물 공급이 배수분지의 특성 양상에 따라 해수면 변동 동안 변화될 수 있음을 의미하기도 한다. 따라서, 분지 주변부로의 퇴적물 공급을 공간적 또는 시간적으로 일정한 요소로 간주하기는 곤란하다. 그러나 이러한 퇴적물 공급 특성에도 불구하고, 본 연구에서는 모델의 복잡성을 피하고 일반성을 부여하기 위해, 퇴적물 공급을 적어도 1주기의 3차수 상대적 해수면 변동 동안에는 일정하게 유지되는, 즉 2차수 정도의 주기성을 갖고 변화하는 영향요소로 가정하고자 한다. 그리고 퇴적물 집적속도 ( $S'=dS/dt$ )의 등급은 상대적 해수면 변동속도 ( $R'=dR/dt$ )와 비교하여 다음과 같이 세 등급으로 구분하였다: (i)  $S' > R'_{max}$ , (ii)  $R'_{max} > S' > R'_{min}$ , (iii)  $R'_{min} > S'$  또는  $S' \approx 0$ .

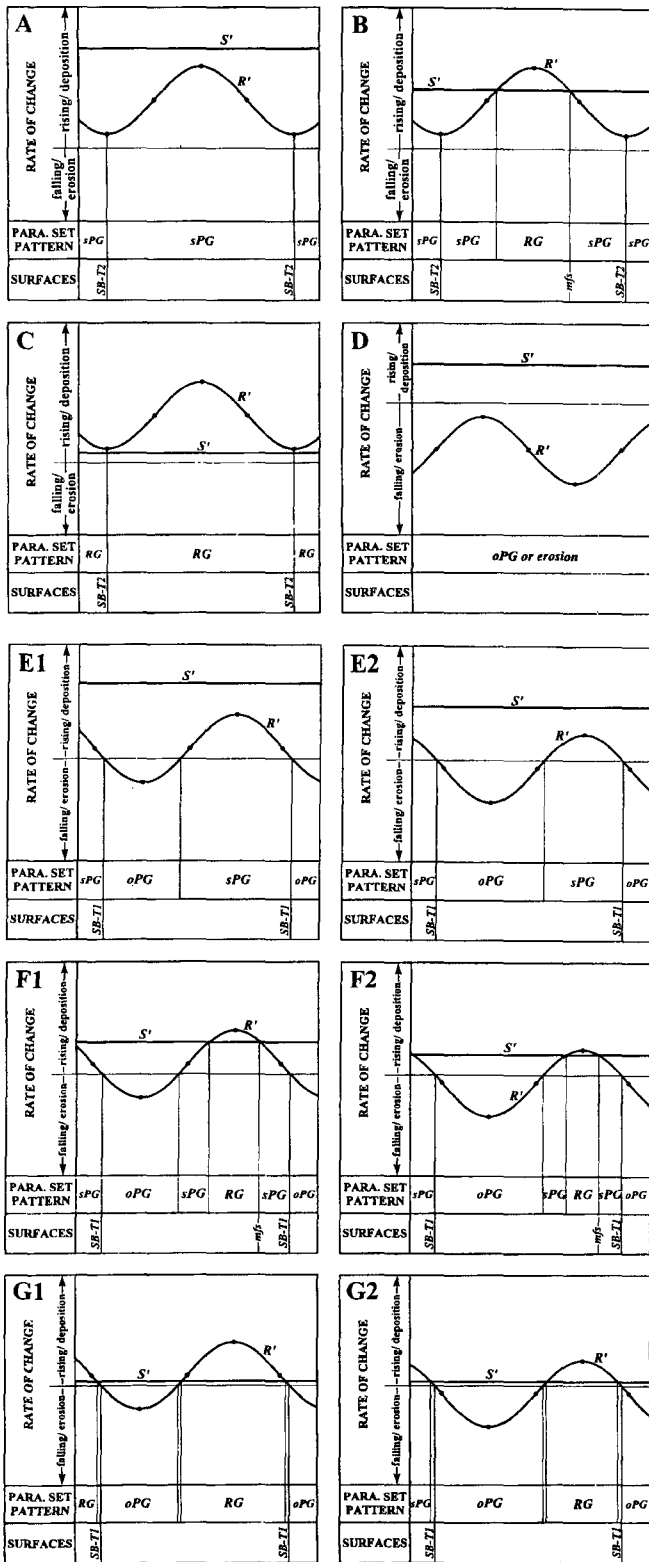
**층서 모델**

상대적 해수면 (퇴적물 수용공간)이 비교적 규칙적인 반복양상을 보이면서 변화하는 경우, 적어도 1주기의 상대적 해수면 변동 동안 퇴적물 집적속도가 일정하게 유지된다고 가정한다면, 이 기

간 동안에 형성되는 부순차층세트의 층형은 주기적으로 변화되는 상대적 해수면의 상승 또는 하강 속도와 퇴적물 집적속도 사이의 관계에 따라 일정한 순서를 보이면서 반복될 것이며, 이들은 한 주기 동안에 형성되는 단일 또는 2~4개의 부순차층세트로 구성된 7개 타입의 순차층으로 모델화 할 수 있다 (그림 5; 표 1).

**타입 A**: 타입 A 순차층은 S-자 전진형 (sPG)의 단일 부순차층세트로 구성된다 (그림 5A). 이러한 순차층은 상대적 해수면이 속도에 차이는 있지만 하강곡면이 없이 지속적으로 상승하면서, 퇴적물 집적은 상대적 해수면의 최대 상승속도보다 빠른 정도 ( $S' > R'_{max}$ )로 많은 양의 퇴적물이 급격히 공급되는 경우에 형성될 수 있다 (그림 5A). 즉, 퇴적물 수용공간이 지속적으로 증가하지만 퇴적물 집적이 더 빠른 속도로 일어나기 때문에 퇴적층은 외해쪽으로 계속 전진하면서, 해퇴가 일어나고 S-자 전진형의 부순차층세트가 전 기간 동안 형성된다. 이러한 부순차층세트를 구성하는 부순차층의 두께는 퇴적물 공급이 충분히 이루어지기 때문에 상대적 해수면의 상승속도에 비례하여 증가될 것이다. 한편, 타입 A의 순차층이 형성되는 동안 대부분의 퇴적면은 지속적인 상대적 해수면 상승으로 인해 수중에 잠겨있기 때문에 뚜렷한 부정합면은 형성되지 않고, 다만 상대적 해수면의 상승속도가 최저로 되는 시기에 Van Wagoner et al. (1988)의 타입-2에 해당되는 순차층 경계면이 형성될 수 있다 (Posamentier et al., 1988) (그림 5A). 타입-2 순차층 경계면이 형성되는 시기에는 광범위한 침식이 일어남이 없이 해안 또는 연안지역에 위결침 (onlap) 퇴적이 일어난다고 알려져 있다 (Van Wagoner et al., 1988).

**타입 B**: 타입 B 순차층은 상대적 해수면이 하강곡면이 없이 지



**Fig. 5.** Sequence types in multi-variable sequence model, determined by a series of para-sequence set patterns (see Fig. 3) as a function of sediment supply rate ( $S'$ ) and rate of relative sea-level change ( $R'$ ). oPG: oblique progradation, RG: retrogradation, sPG: sigmoid progradation, SB-T1: type-1 sequence boundary, SB-T2: type-2 sequence boundary.

속적으로 상승하고, 퇴적물 집적은 최소 상대적 해수면 상승속도 보다는 빠르지만 최대 상대적 해수면 속도보다는 느리게 ( $R'_{max} > S' > R'_{min} > 0$ ) 이루어지는 조건에서 형성될 수 있다 (그림 5B). 이러한 경우, 상대적 해수면 상승속도가 퇴적물 집적속도보다 빠른 시기에는 새로이 생성되는 퇴적물 수용공간을 퇴적물이 완전히 채우지 못하게 되므로 해침이 일어나면서 후퇴형 (RG)의 부순차층세트가 형성되고, 이후 상승속도가 점차로 느려지면서, 상대적으로 퇴적물 집적속도가 커지게 되면 해퇴가 일어나면서 S-자 전진형 (sPG)의 부순차층세트가 만들어진다.

타입 B 순차층도 타입 A와 마찬가지로 대부분의 퇴적면은 지속적인 상대적 해수면 상승으로 인해 항상 수중에 잠겨있기 때문에 상대적 해수면의 상승속도가 최저로 되는 시기에 타입-2 순차층 경계면이 형성될 수 있다. 따라서 하나의 타입 B의 순차층은 하부로부터 S-자 전진형 (sPG), 후퇴형 (RG), 다시 S-자 전진형 등 3개의 부순차층세트로 구성되며 (그림 5B), 이는 Exxon group 모델의 타입-2 순차층과 유사하다. 하부의 S-자 전진형은 상대적 해수면의 최저 상승속도 ( $R'_{min}$ ) 시점 (또는 범세계적 해수면의 하강속도가 최대인 시점)이 지난 후 점차 상승속도가 빨라지는 단계 (범세계적 해수면의 경우에는 하강속도가 점차 느려지는 단계)에 형성되며, 타입-2 순차층의 대륙붕 주변부 퇴적계 연합체 (shelf-margin systems tract)에 해당된다. 이후 상대적 해수면 상승속도가 퇴적물 집적속도를 초과할 만큼 빨라지게 되면 점차 해퇴가 가속화되면서 후퇴형의 부순차층세트가 형성되며, 이는 타입-2 순차층의 해침 퇴적계 연합체 (transgressive systems tract)에 해당된다. 해수면 상승이 최대 ( $R'_{max}$ ) 시점을 지나 점차 느려져서 퇴적물 집적속도 이하로 떨어지게 되면, Exxon group 순차층의 고해수면 퇴적계 연합체 (highstand systems tract)에 해당되는 S-자 전진형의 부순차층세트가 형성된다.

**타입 C:** 타입 C 순차층은 후퇴형 (RG)의 단일 부순차층세트로 구성된다 (그림 5C). 이러한 순차층은 퇴적물 집적이 최저 상대적 해수면 상승속도보다 느릴 정도 ( $S' < R'_{min}$ )로 소량의 퇴적물이 공급되면서, 상대적 해수면은 하강국면 없이 지속적으로 상승하는 경우 형성된다. 즉, 퇴적물 수용공간은 지속적으로 증가하지만 퇴적물 집적이 충분치 못하여 해침이 일어나는 경우이다. 이때 대부분의 퇴적면은 지속적인 상대적 해수면 상승으로 인해 수중에 잠겨있기 때문에 뚜렷한 부정합면은 형성되지 않고, 다만 상대적 해수면의 상승속도가 최저로 되는 시기에 Van Wagoner *et al.* (1988)의 타입-2에 해당되는 순차층 경계면이 형성될 수 있다 (Posamentier *et al.*, 1988).

**타입 D:** 타입 D 순차층은 전 순차층 구간이 하나의 경사전진형 (oPG) 부순차층세트로 구성된다 (그림 5D). 이러한 순차층은 퇴적물 공급속도에 관계없이 상대적 해수면이 지속적으로 하강하면서, 퇴적물 수용공간이 계속 감소하는 경우 (즉 해저면의 용기 속도가 범세계적 해수면의 최대 상승속도보다 빠른 경우)에 형성될 수 있다. 해수면 하강속도가 비교적 느린 시기에는 광범위한 대기중 노출로 인하여 퇴적체 정상부 (topset)보다는 경사부

**Table 1.** Recognition criteria and control factors of multi-variable sequence model.

Seq. type	Recognition criteria			Control factors		
	Paraseq. set association	Seq. stacking pattern	Sequence boundary	Tectonics vs. eustasy	Relative sea level	Sediment supply or deposition rate
A	sPG	Aggradational	Type-2	Subsidence faster than max. eustatic fall	Continuous rise	High
B	sPG→RG→sPG	Aggradational	Type-2	Subsidence faster than max. eustatic fall	Continuous rise	Low to moderate
C	RG	Aggradational	Type-2?	Subsidence faster than max. eustatic fall	Continuous rise	Very low to low
D	oPG	Back-stepping offshore	Type-1	Uplift faster than max. eustatic rise	Continuous fall	Low to high
E1	oPG→sPG	Aggradational	Type-1	Subsidence faster than max. eustatic fall	Rise-dominated fluctuation	High
E2	oPG→sPG	Back-stepping offshore	Type-1	Uplift faster than max. eustatic rise	Fall-dominated fluctuation	Moderate to high
F1	oPG→sPG→RG→sPG	Aggradational	Type-1	Subsidence faster than max. eustatic fall	Rise-dominated fluctuation	Low to moderate
F2	oPG→sPG→RG→sPG	Back-stepping offshore	Type-1	Uplift slower than max. eustatic rise	Fall-dominated fluctuation	Low
G1	oPG→RG	Aggradational	Type-1	Subsidence faster than max. eustatic fall	Rise-dominated fluctuation	Very low
G2	oPG→RG	Back-stepping offshore	Type-1	Uplift slower than max. eustatic rise	Fall-dominated fluctuation	Very low

(foreset)에서 퇴적이 일어나, 전형적인 경사전진형의 퇴적체가 형성될 수 있을 것이다. 그러나 상대적 해수면 하강속도가 점차 빨라지게 되면 경사부 퇴적층 (foreset bed)이 두껍게 집적될만한 시간적 여유가 충분치 못하기 때문에 두꺼운 경사전진형의 부순차층이 형성되기는 곤란할 것으로 보인다. 다만 소규모로 형성된 정상부 퇴적층이 빠른 해수면 상승으로 인해 완전히 재동되지 못하고 남겨지면서, 경사면을 따라 단계적으로 하향되는 (back-stepping) 켜기형 퇴적체로 나타날 수 있을 것이다. 이러한 일련의 소규모 경사전진형의 퇴적체는 Posamentier *et al.* (1992)의 강제후퇴 퇴적계 연합체 (forced regressive systems tract)와 유사하다.

**타입 E :** 타입 E 순차층 (그림 5E1, 5E2)은 경사전진형 (oPG)과 S-자 전진형 (sPG), 두 개의 부순차층세트로 구성된 층서형태를 보인다. 이러한 순차층은 상승우세 교호형 (그림 5E1) 또는 하강우세 교호형 (그림 5E2)의 상대적 해수면 변동이 진행되는 동안, 퇴적물 집적은 최대 상대적 해수면 상승속도보다 빠른 정도 ( $S' > R'_{max}$ )로 퇴적물 공급이 급격히 이루어지는 경우에 형성된다. 즉, 전 시기를 통하여 공급되는 퇴적물의 양이 새로이 생성되는 퇴적물 수용공간을 채우고 남은 만큼 충분하기 때문에, 해수면이 상승되는 기간에도 해퇴가 일어나 S-자 전진형의 퇴적체가 형성된다. 다만 상대적 해수면 하강기에 광범위한 대기중 노출로 인하여 퇴적체 정상부 (topset)보다는 경사부 (foreset)에서 퇴적이 일어나면서 경사전진형의 퇴적체가 형성된다. 따라서 Van Wagoner *et al.* (1988)의 타입-1에 해당되는 순차층 경계면이 상대적 해수면 하강이 시작되는 시기, 즉 경사전진형 부순차층 세트의 기저부에 형성될 수 있다.

타입 E 순차층의 층서구성은 상승우세 교호형과 하강우세 교호형의 상대적 해수면 변동, 모두에서 동일하게 나타난다. 다만 연속된 순차층들의 집적형태가 전진과 동시에 매적 (aggrada-

tion) 양상을 보이면 상승우세의 교호형을 반영한다고 할 수 있을 것이며, 하강우세 교호형의 경우에는 매적이 일어나지 않고 하강후퇴 (back-stepping)형의 집적양상을 보일 것이다. 한편, 한 주기의 상대적 해수면 변동 동안 퇴적물 공급속도에 큰 변화가 없다면, 각 부순차층세트의 두께가 차이날 수 있다. 즉 상승우세 교호형의 경우 (그림 5E1)에는 해수면 상승기가 해수면 하강기에 비해 더 오래 유지되기 때문에 S-자 전진형의 부순차층세트가 하부의 경사전진형 부순차층세트에 비해 두껍게 나타날 가능성 크며, 하강우세 교호형 (그림 5E2)의 경우에는 이와 반대의 현상이 나타날 수 있다. 그러나 상대적 해수면 하강기에 형성되는 경사전진형의 부순차층세트는 대기중 노출로 인한 침식이나 해류 또는 해파 등에 의한 재동으로 인해 완전한 형태로 보존될 가능성이 낮기 때문에, S-자 전진형의 부순차층세트가 경사전진형의 부순차층세트보다 두껍다고 해서 상승우세 교호형 해수면 변동의 결과로 해석하기는 곤란하다. 그러나 경사전진형의 부순차층세트의 두께가 더 큰 경우에는 하강우세 교호형의 해수면 변동의 영향이라고 해석해도 큰 무리는 없을 것이다.

**타입 F :** 타입 F 순차층 (그림 5F1, 5F2)은 하부에서부터 경사전진형 (oPG), S-자 전진형 (sPG), 후퇴형 (RG)과 다시 S-자 전진형으로 이어지는 4개의 부순차층세트로 구성되며, 이러한 구성은 Exxon group이 제안한 타입-1 순차층과 거의 동일하다. 타입 E 순차층은 상승우세 교호형 (그림 5F1)과 하강우세 교호형 (그림 5F2)의 상대적 해수면 변동, 모두에서 형성될 수 있다. 이러한 교호형의 상대적 해수면 변동이 진행되는 동안, 퇴적물 집적이 최소 상대적 해수면 상승속도보다는 빠르지만 최대 상대적 해수면 속도보다는 느리게 이루어질 경우 ( $R'_{max} > S' > R'_{min}$ ) 형성될 수 있다.

이 경우, 상대적 해수면 하강기, 즉 강제후퇴 (forced regression)가 일어나는 시기에는 경사전진형의 부순차층이 타입-1 순차층 경계면 위에 집적되며, 이는 Exxon group의 저해수면 퇴

적계 연합체 (lowstand systems tract)의 하부에 나타나는 해저선상지 (submarine fan) 퇴적층 (그림 2)과 동시기로 볼 수 있다. 그 후 상대적 해수면이 상승을 시작하여 퇴적물 공급속도보다 더 빨라지기 전까지는 S-자 전진형이 형성되며, 이는 Exxon group의 저해수면 퇴적계 연합체의 상부에 속하는 저해수면 썰기체 (lowstand wedge; 그림 2)에 해당된다. 상대적 해수면 상승속도가 점차 빨라져서 새로이 생성되는 퇴적물 수용공간 증가속도가 퇴적물 집적속도를 초과하게 되면, 해침이 일어나면서 후퇴형의 부순차층이 형성되며, 이는 Exxon group의 해침 퇴적계 연합체 (그림 2)와 동일한 것이다. 상대적 해수면 상승속도가 최대점을 통과하여 상승이 점차 느려지면서, 퇴적물 공급이 상대적으로 빨라지게 되면, 다시 S-자 전진형의 부순차층세트가 최대해침면 (maximum flooding surface) 위에 집적되며, 이는 Exxon group의 고해수면 퇴적계 연합체 (그림 2)로 해석되는 부분이다. 타입 F 순차층의 층서구성은 상승우세 교호형과 하강우세 교호형의 상대적 해수면 변동, 모두에서 동일하다. 그러나, 타입 E에서와 같이 순차층의 집적 양상이나 부순차층세트의 두께의 차이로써 상대적 해수면 변동 양상을 추정할 수 있을 것이다.

**타입 G :** 타입 G 순차층 (그림 5G1, G2)은 Van Wagoner *et al.* (1988)의 타입-1 순차층 경계면을 경계로 하여 하부의 경사전진형 (oPG)과 상부의 후퇴형 (RG), 두 개의 부순차층세트로 구성된다. 이러한 순차층은 상승우세 교호형 (그림 5G1) 또는 하강우세 교호형 (그림 5G2)의 상대적 해수면 변동이 진행되는 동안, 퇴적물 집적이 매우 느리게 일어나는 경우 ( $S'=0$ )에 형성될 수 있다. 이때 형성되는 순차층의 종류나 순서는 타입 E와 동일하나, 퇴적물 집적속도가 매우 느리게 됨에 따라 S-자 전진형의 부순차층세트가 형성될 수 있는 조건, 즉  $S'>R'>0$ 을 만족하는 기간이 매우 짧아져서, 실제로 형성되는 S-전진형의 부순차층세트는 탄성과 탐사 단면의 해상도 이하로 얇아지게 되어 인지되지 않는 경우이다.

타입 G 순차층의 층서구성도 상승우세 교호형과 하강우세 교호형의 상대적 해수면 변동, 모두에서 동일하기 때문에 부순차층세트의 구성만으로는 상승우세인지 하강우세인지를 판단하기 곤란하다. 다만 한 주기의 상대적 해수면 변동 동안 퇴적물 공급속도에 큰 변화가 없다고 가정하면, 타입 E 순차층에서와 같이, 후퇴형의 부순차층세트에 비해 경사전진형의 부순차층세트가 더 두꺼운 경우에는 상대적 해수면은 하강국면이 우세하게 교호하는 양상으로 변동되었다고 해석할 수 있을 것이다. 또한 순차층의 집적양상이나 대륙붕단의 위치가 전반적으로 상승되는지 또는 하강되는지에 따라 상대적 해수면 변동양상을 알 수 있을 것이다.

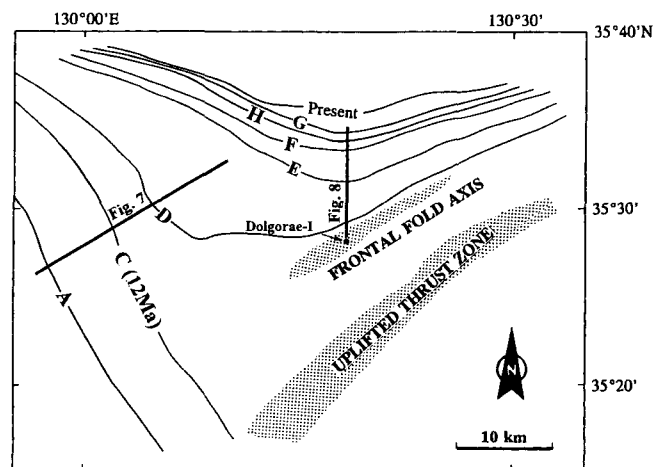
**울릉분지 남서주변부 층서분석**

**지역 개요**

울릉분지 남서주변부에는 현재 넓은 대륙붕과 급경사의 대륙사면이 한반도와 일본열도 사이에 자리잡고 있다 (그림 1). 이 지역의 음향기저 (acoustic basement)는 해저면 하 약 10 km에 위

치하며, 대부분 퇴적암과 화산암으로 이루어져 있을 것으로 추정되는데, 한반도 남동지역에 노출되어 있는 백악기-고제삼기 암석의 연장으로 보인다 (장기홍, 1977; 최현일과 박관순, 1985). 탄성과 반사단면과 중력자료에서는 약 8~10 km 두께의 퇴적층이 울릉분지 남서부에 형성된 좁은 부채형태의 해곡 (trough)에 집적되어 있음을 보여준다 (Barg, 1986; Park, 1992). 전기 마이오세의 퇴적층은 주로 분지형성 초기에 야기된 해침의 초기단계와 그 후의 대륙사면이나 심해저분지로 깊어지는 조건 하에서 형성된 연안 (paralic) 환경에서 집적된 것으로 보인다 (Chough, 1983). 울릉분지 남서주변부에서의 퇴적물 집적은 외해로 전진하는 대륙붕-대륙사면 퇴적층을 형성하면서 중기 마이오세까지 계속되었으며, 후기 마이오세부터는 주로 연안에서 대륙붕까지의 천해환경이 우세한 상태에서 퇴적물로 채워진 것으로 알려져 있다 (한국동력자원연구소, 1982; Yoon, 1994) (그림 6).

돌고래-I 시추공 자료에 근거한 지질사분석 결과 (Chough and Barg, 1987)에 따르면, 중기 마이오세 이후 울릉분지 남부 주변부의 지구조적 진화는 광역 지구조운동의 양상과 변형속도에 있어서 2차수의 변화 (변화주기 300만~5000만년, Emery and Myers, 1996)를 반영하는 3단계의 과정을 거쳤다. 초기 단계는 중기 마이오세에 시작된 약 3 m/만년의 속도로 진행된 지구조적 침강의 단계로서, 약 1200만년전 지각압축(중기 단계)이 시작되면서 종료되었다. 수축적 변형의 초기 효과는 돌고래-I 지점의 습곡작용을 야기했으며, 이어서 남쪽으로 확산되면서 북동-남서 방향의 드리스트 단층대를 활성화시켰다 (그림 6). 이러한 광역적인 변형은 후기 마이오세의 말기 (약 650만년전)까지 서쪽과 남서쪽으로 전이되면서 지역적인 배사구조를 형성하였다 (Yoon, 1994). 중기 단계의 광역적 변형은 평균 2.4 m/만년의 속도로 지반을 융기시켰다. 약 650만년전 이후의 말기 단계 동안에는, 대륙주변부가 점차 침강되면서 일부 지역에 정단층을 야기시켰으며, 이 기간 동안 침강은 1 m/만년의 느린 속도로 일어났다.



**Fig. 6.** Paleogeography of the shelf. Contours indicate paleoposition of the shelfbreak which prograded north-eastward until about 12 Ma; the progradation turned northward as the western shelfal region merged with the newly-uplifted thrust zone to the east.



**순차층 구분**

다중변수 순차층서 분석에서 기본적인 층서 구분단위는 부순차층세트 (parasequence set)로서, 개별 반사면의 집적되는 층형에 따라 S-자 전진형 (sPG), 경사 전진형 (oPG), 후퇴형 (RG)으로 구분하였고, 이들 부순차층세트의 조합으로써 순차층서 타입을 결정하였다. 층서분석에 이용된 자료들은 대륙주변부의 전진 퇴적층의 형태를 잘 보여주는 경사면에 수직의 축선에서 얻어진 것들인데, 조사지역 대륙붕의 전진이 울릉분지의 확장기 (약 1200만년전 이전)에는 북동쪽으로 이루어지다가, 확장이 종결된 후에는 돌고래 변형대에서의 용기에 의해 대륙붕이 확장되면서 전진방향도 북쪽으로 바뀌었기 때문에 (그림 6), 조사지역 북서부의 비변형 지역에서는 북동-남서 방향의 축선에서 취득된 자료를, 돌고래 변형대에서는 남-북 방향의 축선에서 취득된 자료들을 구분해 대상으로 하였다 (그림 1, 6).

**비변형 지역 (그림 7):** 분석 가능한 퇴적층의 최하부에 해당되는 건층면 B의 하부 구간에서는 S-자 전진형 (sPG) 층형을 보이는 단일 부순차층세트로 이루어진, 2개의 타입 A 순차층으로 구성되며, 건층면 B-C 구간은 S-자 전진형, 후퇴형, 다시 S-자 전진형의 부순차층세트로 이어지는 타입 B의 순차층으로 이루어진다. 이들 순차층의 경계는 타입-2 경계면 (Van Wagoner et al., 1988)으로서, 이론적으로는 해안지역에 형성되는 위결침 경계면 (onlap bounding surface)에 의해 구분되나, 본 분석자료는 해안지대까지 연장되지 않기 때문에 이러한 경계면이 직접 확인되지는 않는다. 대신 S-자 전진형 퇴적층이 매적보다는 외해로 급격히 전진되는 부분을 경계로 했는데, 타입-2 순차층 경계면은 상대적으로 상승속도가 최소일 경우 (상승지속형 또는 상승우세 교

호형)에 형성되며, 이러한 경우 퇴적물 수용공간의 증가가 최소로 되어 매적보다는 외해로의 전진이 빠른 속도로 일어나게 된다. 건층면 C-F 구간은 3개의 타입 E 순차층으로 구성된다. 이들 순차층은 하부의 경사전진형 (oPG) 부순차층세트와 상부의 S-자 전진형 (sPG) 부순차층세트로 구성된다. 이들 순차층의 경계면은 광범위한 지역에 걸쳐 많은 침식구조가 관찰되는 타입-1 경계면에 해당된다.

**돌고래 변형대 (그림 8):** 돌고래 변형대 인접부분에서 건층면 E 하부의 순차층은 경사 전진형 (oPG)의 하부 부순차층세트와 후퇴형 (RG) 하부 부순차층세트로 구성된 타입 G 순차층에 해당된다. 상부 후퇴형 부순차층세트는 연속성이 좋은 고진폭의 반사면을 보이며, 대부분 대륙붕 주변을 덮고 있는 매우 얇은 (<0.02 초) 퇴적층으로 나타난다. 경사 전진형의 하부 부순차층세트에서는, 전면층이 외해로 가면서 소멸하거나 (즉 아래걸침) 얇은 기저부 (bottomset)로 전이된다. 또한 육지쪽으로 가면서는 얇은 판상 또는 썰기형의 퇴적층으로 변화되는데, 이 퇴적층은 내부 반사면이 불량하고 여러 곳에서 수로침식이 관찰된다. 돌고래-I 시추공에서, 내부 반사면이 불량한 층은 근해에서 연안환경으로 알아짐을 지시하는 두 개의 유공층 구간으로 구성되어 있다 (한국 동력자원연구소, 1982).

한편 건층면 E-F 구간은 최하부의 두꺼운 경사전진형 (oPG) 부순차층세트 위에 얇은 S-자 전진형, 후퇴형, 다시 S-자 전진형 부순차층세트로 이어지는 타입 F 순차층에 해당한다. 최하부의 경사전진형 부순차층세트는 형태나 내부 반사파 형태에 있어서 매우 유사한 특성을 보인다. 건층면 D-E1 구간의 부순차층세트는 점진적으로 외해로 하강-후퇴하는 계단형 (back-stepping)의

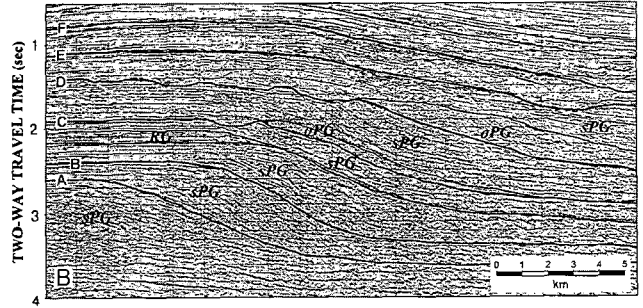
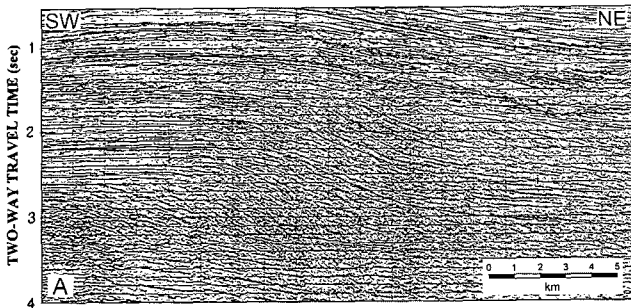


Fig. 7. Multichannel airgun profile (A) from the undeformed region and its interpretation (B). For location, see Fig. 1.

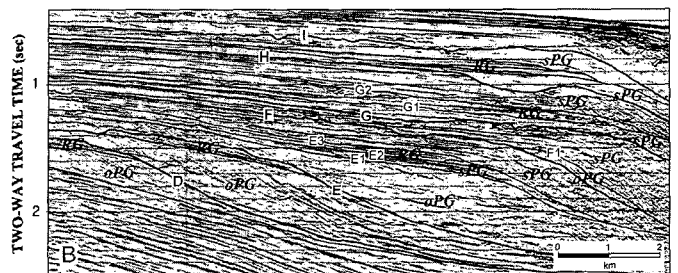
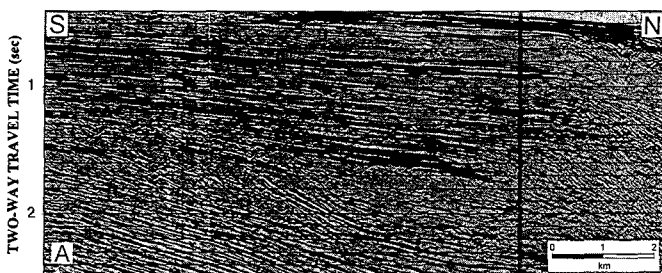


Fig. 8. Multichannel airgun profile (A) crossing the front of uplifted thrust belt and its interpretation (B). For location, see Fig. 1.

집적양상을 보인다.

건층면 F-G 구간의 순차층은 하부의 경사전진형 부순차층세트와 상부의 S-자 전진형 부순차층세트로 구성된 타입 E 순차층 (그림 5)에 해당한다. 순차층의 경계면은 광범위한 침식이 특징인 타입-1 경계면이다.

건층면 G-I 구간은 2개의 타입 B 순차층으로 구성된다. 이들 순차층은 동일하게 S-자 전진형 → 후퇴형 → S-자 전진형 등 3개의 부순차층세트로 이루어진 타입 B 순차층 (그림 5)이다. 순차층 경계면 G, H는 부분적으로 침식지형을 보이지만, 분포가 광범위하지 않기 때문에 타입-2 순차층 경계면으로 해석된다.

### 층서 발달 요인 분석

순차층의 층발달 양상과 층서불연속면은 퇴적물 수용공간과 퇴적물 공급 사이의 상호작용에 의해 결정된다. 퇴적물 수용공간 (또는 상대적 해수면)의 변화는 다시 예상가능한 범세계적 해수면 변동과 지역 또는 국지적 지구조운동의 함수이다 (Jervey, 1988; Posamentier *et al.*, 1988). 울릉분지 남부 경계부에서 신계 삼기 지구조 운동은 후열도분지의 진화동안 지구조권의 재구성에 따른 3단계의 2차수 (지속기간 550만년~650만년)의 지구조 운동이 특징적이다 (Chough and Barg, 1987). 이러한 지구조 운동의 타입과 속도에 있어서의 주요 변화는 순차층계의 경계면에서 나타나는 부순차층세트의 구성변화와 시기적으로 일치하여 나타난다 (표 2).

건층면 C 하부의 구간은 돌고래-I 시추공에서의 고생물 분석에 근거한 시간층서 결과에 따르면 약 1200만년전 이전의 시기에 형성된 퇴적층으로서, 급격한 침강 (약 300 m/백만년)을 동반한 울릉분지의 후열도 열개의 후기 단계와 관련되어 있다. 이 구간은 단일 S-자 전진형 부순차층세트로 구성된 타입 A 순차층이 우세하다 (그림 7). 이러한 층양상은 퇴적물 수용공간의 지속적인 증가 및 상대적 해수면의 연속적인 상승을 반영하는 것으로 해석할 수 있다. 이들 순차층의 퇴적 기간 동안 (1600만년전?

1200만년전), 전세계적으로 볼 때, 2번의 3차수 해수면 하강이 1550만년전과 1380만년전에 일어났다 (Haq *et al.*, 1988). 따라서 이 기간 동안의 지속적인 상대적 해수면의 상승은 지구조적 침강 속도가 범세계적 해수면 하강의 최대 속도보다 빨랐음을 지시한다. 이러한 경우, 해저면은 범세계적 해수면이 하강하는 것보다 더 빨리 침강하였으며, 따라서, 범세계적 해수면이 변화되는 동안 상대적인 해수면은 하강하는 대신, 처음에는 느리게 상승하고 그리고 후에는 상승이 더 빨리 일어났을 것이다. 이와 같이 퇴적물 수용공간이 지속적으로 증가되는 경우, 반복적인 S-자 전진형의 부순차층세트는 퇴적물 수용공간의 증가 속도보다 훨씬 빠를 정도로 많은 양의 퇴적물이 급격히 공급되었음을 지시한다. 한편, 이 구간의 상부 (건층면 B-C 구간)에서 S-자 전진형 부순차층세트 사이에 후퇴형의 부순차층세트가 나타나는 것 (타입 B 순차층)은 퇴적물의 집적속도가 점진적으로 감소하게 되면서 상대적 해수면 상승속도가 최대일 때는 해퇴가 일어났음을 나타내는 것으로 해석된다.

건층면 C-F 구간이 퇴적되는 동안 (1200만년전-650만년전)에는, 울릉분지의 남쪽 주변부는 후열도분지 닫힘이 시작됨에 따라 압축성 지구조운동을 겪게 되었으며 (그림 3), 북동쪽으로 전진하던 대륙붕이 동쪽에 드러스트대 (thrust zone)가 융기됨에 따라 함쳐져서, 전반적인 대륙붕의 전진은 북쪽으로 바뀌게 되었다 (그림 6). 드러스트대의 앞부분에 분포하는 돌고래 변형대의 순차층들은 하부의 두꺼운 경사전진형 부순차층세트와 상부의 얇은 후퇴형 부순차층세트와 이루어지며, 점진적으로 외해로 하강 후퇴되는 집적양상을 보이는 타입 G2 순차층으로 구분된다. 이러한 순차층들은 전반적으로 강제해퇴 (forced regression)기에 나타나며, 간혹 단기간의 상대적 해수면 상승이 일어났음을 지시한다. 하강이 우세한 상대적 해수면 변동은 지구조적 융기의 속도가 범세계적 해수면 하강의 최대 속도보다 작을 때 가능하다. 그러나 상대적 해수면의 최저와 최고점에서 S-자 전진형 부순차층세트가 형성되지 않음은 이 지역에서 퇴적물의 집적이 매우 느리게 일어났음을 지시한다. 만일 퇴적물 집적속도가 상당히 감

**Table 2.** Internal organization of sedimentary successions and related controlling factors in the south-western margin of the Ulleung Basin.

Tectonic Stage		I	II		III
Time		16~12 Ma	12~6.5 Ma		6.5~0 Ma
Sequence Organization	Paraseq. association	sPG (type A) or sPG→RG→sPG (type B)	oPG→sPG (type E)	oPG→RB (type G)	oPG→sPG (type E) or sPG→RG→sPG (type B)
	Stacking pattern	Aggradation	Aggradation	Back-stepping	Aggradation
Controlling Factors	Relative sea-level	Continuous rise	Rise-dominated fluctuation	Fall-dominated fluctuation	Rise-dominated fluctuation or continuous rise
	Tectonic movement	Subsidence faster than max. eustatic fall	Subsidence slower than max. eustatic fall	Uplift slower than max. eustatic rise	Subsidence slower than max. eustatic fall
	Deposition rate	High to subsequent moderate	High	Very low	High to subsequent moderate
Tectonic events*		Overall subsidence (300 m/m.y.) related to back-arc opening	No data	Uplift (240 m/m.y.) due to initiation of back-arc closure	Overall subsidence (100 m/m.y.)

\*After Chough and Barg (1987)

소된다면, 퇴적물 공급이 봉단의 전진을 일으킬 만큼 새로운 수용공간을 충분히 채우지 못하게 되어, S-자 전진형 부순차층세트는 탄성과 단면에서 인지되기 어려울 정도로 매우 얇게 될 것이다. 대신 후퇴형의 해침 부순차층세트가 상대적 해수면이 상승하는 동안 모든 대륙붕 상에 상당한 두께로 형성될 것이다.

이 당시, 남동쪽 육상으로부터 공급되는 퇴적물은 드러스트대의 용기로 인해 울릉분지로 나아가지 못하고 대부분 변형지역의 남동쪽에 주로 집적되었을 것이나, 용기된 드러스트대의 퇴적층이 침식되면서 변형지역의 북서쪽 외해로 적지 않은 양의 퇴적물이 공급되었을 것으로 추정된다. 그럼에도 불구하고 순차층 분석 결과는 낮은 퇴적물 집적 속도를 지시하는데, 이는 공급되는 대부분의 퇴적물이 대륙붕-사면 퇴적계를 그냥 통과하여 심해로 이동되었음을 반영하는 것으로 해석된다. 즉, 용기로 인해 대륙사면의 경사가 증가되었고 아울러 드러스트대의 침식으로 공급되는 퇴적물이 과거 하부대륙사면이나 해저분지평원에서 집적된 세립질 퇴적물이기 때문에 대륙붕과 사면에 집적되지 못하고 대부분 울릉분지까지 이동되어 버린 것으로 보인다.

건층면 E-F 구간에서 최하부의 경사전진형 부순차층세트는 하부의 순차층들과는 달리 S-자 전진형, 후퇴형, 다시 S-자 전진형으로 이어지는 타입 F로 바뀐다. 이러한 변화는 압축성 지구조 운동의 말기에 퇴적물 집적이 점차로 증가되었음을 지시하는 것으로 해석된다.

한편, 돌고래 변형대와는 달리 동일 시기(건층면 C-F 구간)에 지구조적으로 안정된 연구지역 북서부 비변형 지역에서 형성된 순차층들은 대부분 침식성 경계면을 보이며, 부순차층세트들은 매적 전진형의 집적양상을 보인다. 이러한 총양상은 상대적인 해수면 상승을 야기하는 상승우세 교호형의 상대적 해수면변동을 반영한다. 상승이 우세한 상대적 해수면 변동은 범세계적 해수면 하강의 최고속도보다 느린 지구조 침강을 지시한다. 이러한 경우, 해저의 침강은 상대적인 해수면 상승의 지속시간과 상승속도를 증가시킨다. 이 구간의 순차층들은 상대적 해수면 하강 기간에 형성된 경사전진형 부순차층세트와 그후의 상대적 해수면 상승기간에 형성된 S-자 전진형 부순차층세트로 구성된다. 상대적 해수면 상승속도가 증가되었음에도 불구하고 후퇴형 부순차층세트가 형성되지 않음은 대륙붕-사면 퇴적계로 공급, 퇴적되는 퇴적물의 양이 비교적 많았기 때문으로 보인다. 상대적 해수면 상승이 가장 빠르게 진행되는 동안에도, 육상으로부터의 퇴적물 공급이 새로이 형성되는 퇴적물 수용공간을 채울 정도로 충분할 경우, 대륙붕-사면 퇴적계의 전진이 모든 상대적 해수면 상승기간 동안에 일어날 것이다. 비변형 지역에서의 빠른 퇴적물 집적은 남동쪽에 새로이 형성되는 드러스트대와, 서쪽 또는 남서쪽의 한반도로부터의 퇴적물 공급이 활발히 일어났음을 반영하는 것으로 해석된다.

건층면 F-I 구간의 연속된 순차층들의 집적형태는 매적 전진형으로서 상승이 우세한 상대적 해수면 변동을 지시하는데, 이 시기는 비교적 느린(약 100 m/백만년; Barg, 1986) 해저침강과 관련되어 있다. 즉 이전의 해저면 용기 운동이 종결되고 다시 하강이 지속되었음을 지시한다. 건층면 F-G 구간의 순차층은 타입

E로서 상승-하강 교호형의 상대적 해수면변동이 진행되는 동안, 퇴적물 집적은 최대 상대적 해수면 상승속도보다 빠른 정도로 급격히 이루어졌음을 지시한다. 이러한 빠른 퇴적물 집적은 건층면 E-F 구간에서의 점진적인 퇴적물 공급 증가 상태가 이 시기에 들어와서도 계속 유지된 것으로 해석된다. 건층면 G-I 구간은 타입 B1의 순차층이 우세하다. 이러한 순차층은 Van Wagoner *et al.* (1988)의 타입-2 순차층에 해당되는 것으로서, 상승지속형의 상대적 해수면 변동을 반영한다. 즉 대부분의 대륙붕 지역이 범세계적 해수면 하강에도 불구하고 대기중으로 노출된 적이 없음을 지시한다. 한편 퇴적물 공급은 상대적 해수면 변동 속도와의 관계를 고려할 때, 이전과 같이 계속 활발히 이루어지거나 다소 감소되었던 것으로 해석된다.

## 결론

다중변수 순차층서 모델에서는 범세계적 해수면 변동, 지구조 운동, 퇴적물 공급 등의 순차층서 영향요소를 모두 변수로 간주한다. 범세계적 해수면 변동과 해저면의 지구조 운동에 의해 결정되는 상대적 해수면 변동은 두 영향요소의 변화속도를 비교하여 상승지속형, 하강지속형, 상승우세 교호형, 하강우세 교호형으로 구분하였고, 퇴적물 공급속도는 상대적 해수면 변동 속도와 비교하여 세 등급으로 구분하였다. 순차층을 구성하는 기본 단위로는 내부층의 집적형태에 따라 구분되는 해석이 배제된 기술적 층서단위인 부순차층세트(parasequence set)를 채택하였으며, 그 형태를 상대적 해수면 변동 속도와 퇴적물 공급 속도와와의 비로써 S-자 전진형, 경사전진형, 후퇴형으로 구분하였다. 따라서 순차층서 모델은 상대적 해수면 변동과 퇴적물 공급 변화 사이의 조합으로써 예상되는 단일 또는 2~4개의 부순차층세트로 구성된 7개 타입의 순차층을 보여준다(표 1).

이러한 순차층서 모델을 울릉분지 남서부 대륙주변부에 적용한 결과, 총 5개 타입의 순차층이 구분되었다. 이들 순차층은 울릉분지의 형성과 닫힘에 따른 분지주변부의 지구조 운동과 밀접한 관계를 갖는다. 울릉분지 남부 경계부에서 신제삼기 지구조 운동은 후열도분지의 진화동안 지구조권의 재구성에 따른 3단계의 2차수 지구조 운동이 특징적인데, 이러한 지구조 운동의 타입과 속도에 있어서의 주요 변화는 부순차층세트의 구성(즉 순차층 타입) 변화와 시기적으로 일치하며, 이는 순차층의 발달에 지구조운동이 주요 요인으로 작용했음을 지시한다. 지구조 운동에 있어서의 2차수의 변화는 범세계적 해수면변동의 3차수 변화와 복합적으로 작용하였으며, 이로 인해 울릉분지 남서주변부에서는 상대적 해수면의 3가지 변동 유형이 야기되었다. 첫째, 급격한 해저면의 침강으로 인한 지속적인 해수면의 상승, 둘째, 해저면의 용기로 인한 상승우세의 상대적 해수면 변동, 그리고 세째는 해저면의 완만한 침강으로 인한 하강우세의 해수면 변동이다. 해저면의 급격한 침강을 동반한 울릉분지의 후열도 열개동안에는 상대적인 해수면이 지속적으로 상승되었고, 많은 양의 육성퇴적물이 공급되어 순차층은 1개의 S-자 전진형의 부순차층세트로 구성된다. 한편, 활발한 압축성 변형을 동반한 닫힘단계에서는,

하강 또는 상승우세의 상대적 해수면 변동과 지구조적 요인에 의해 통제되는 퇴적물 집적율의 지역적인 차이에 따라 변형대와 비변형대에서 상이한 층형태를 보이는 순차층이 형성되었다. 후열도 닫힘단계 이후에는 다시 해저면이 침강되면서 상승이 우세한 상대적 해수면 변동이 중간 또는 빠른 퇴적물 집적속도와 결합하여 2-3개의 부순차층세트로 구성된 순차층을 형성하였다.

## 사 사

본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단의 학술연구조성비 지원 (신진교수과제)에 의해 이루어졌다. 본 연구의 기초 자료를 제공해주신 한국석유개발공사 관계자에게 감사할 따름이다. 아울러 논문을 심사하여 주신 군산대학교 이광훈 교수님과 한국해양연구소 허식 박사님께 깊은 사의를 표한다.

## 참고문헌

- 장기홍, 1977. 경상분지 상부 중생세의 층서, 퇴적 및 지구조. 대한지질학회지, 13, 76-90.
- 최동립, 1995. 동해 울릉분지 남쪽 연변부의 신생대 탄성과 퇴적층서, 지질구조 및 지구조 진화. 이학박사 학위논문, 인하대학교, 127p.
- 최현일, 박관순, 1985. 한국 동남해안과 그 해역에서의 백악기-신세 3기 층서변이와 경상퇴적 이후의 구조조적 발전. 대한지질학회지, 21, 281-296.
- 한국동력자원연구소, 1982. 대륙붕 석유탐사자료 평가 연구, 342p.
- Barg, E., 1986. Cenozoic Geohistory of the Southwestern Margin of the Ulleung Basin, East Sea. MS thesis, Seoul National University, 174p.
- Chough, S.K., 1983. Marine Geology of Korean Seas. International Human Resources Development Corporation, Boston, 157p.
- Chough, S.K. and Barg, E., 1987. Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea (Sea of Japan). *Geology*, 15, 45-48.
- Chough, S.K., Yoon, S.H. and Park, S.J., 1997. Stratal patterns in the southwestern margin of the Ulleung Basin off southeast Korea: sequence architecture controlled by back-arc tectonism. *Geo-Marine Letters*, 17, 207-212.
- Emery, D. and Myers, K.J. (Editors), 1996. *Sequence Stratigraphy*. Blackwell Science Ltd., Oxford, 297p.
- Haq, B.U., Hardenbol, J. and Vail, P.R., 1988. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea level change. In: Wilgus, et al., (Editors), *Sea-Level Changes: An integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 42, 71-108.
- Jervey, M.T., 1988. Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. In: Wilgus, et al., (Editors), *Sea-Level Changes: An integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 42, 47-69.
- Mitchum, R.M., Jr., Vail, P.R. and Thompson, S., III, 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level, part 2: the depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. In: Payton, C. E. (Editor), *Seismic Stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration. American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 26, 53-62.
- Nester, D., Mitchum, B., et al., 1989. Exploration and production evaluation Block VI-1, Ulleung Basin. Exploration Report, Exploitech Inc., Houston.
- Park, K.S., 1992. Geological structure and seismic stratigraphy of the southern part of Ulleung basin. In: Chough, S.K. (Editor), *Sedimentary Basins in the Korean Peninsula and Adjacent Seas. Korean Sedimentary Research Group Special Publication*, Harnlimwon Publishers, 40-59.
- Posamentier, H.W. and Vail, P.R., 1988. Eustatic controls on clastic deposition II - Sequence and systems tract models. In: Wilgus, et al., (Editors), *Sea-Level Changes: An integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 42, 125-154.
- Posamentier, H.W., Jervey, M.T. and Vail, P.R., 1988. Eustatic controls on clastic deposition I - conceptual framework. In: Wilgus, C.K. et al. (Editors), *Sea-Level Changes: An integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 42, 109-124.
- Posamentier, H.W., Allen, H.W., James, D.P. and Tesson, M., 1992. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples and sequence stratigraphic significance. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 76, 1687-1709.
- Vail, P.R., Mitchum, R.M., Jr. and Thompson, S., III, 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap. In: Payton, C.E. (Editor), *Seismic Stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration. American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 26, 63-81.
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M., Vail, P.R., Sarg, J.F., Loutit, T.S. and Hardenbol, J., 1988. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In: Wilgus, et al., (Editors), *Sea-Level Changes: An integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 42, 39-45.
- Van Wagoner, J.C., Mitchum, R.M., Jr., Campion, K.M. and Rahmanian, V.D., 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies. *American Association of Petroleum Geologists Method Exploration Series*, 7, 55pp.
- Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A. and Van Wagoner, J.C. (Editors), 1988. *Sea-Level Changes: An integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, 42, 407pp.
- Yoon, S.H., 1994. The eastern continental margin of Korea: seismic stratigraphy, geologic structure and tectonic evolution. Ph.D. thesis, Seoul National University, 235p.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1995. Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Geological Society of America Bulletin*, 107, 83-97.