

21개 심부 시추코아와 육상 노두 대비로 확인되는 포항분지 연일층군의 사건층서

황인걸^{1,*} · 손정희² · 조순미²

¹한국지질자원연구원 석유해저연구본부

²과학기술연합대학원대학교 석유자원공학과

요 약

포항분지의 21개 심부 시추공에서 분지 전반에 분포하는 열쇠층(거대저탁류 및 화산재 퇴적층, 사암군집, 급격한 암상변화)을 통하여 층서 대비를 수행하였으며, 육상 노두와 대비하여 포항분지 연일층군의 사건층서를 정립하였다. 분지형성 초기(Stage P1)인 초기 마이오세에는 분지 서측에서 조립질 퇴적물이 공급되어 천해형 선상지 삼각주가 형성되었으나 분지 내부에는 기반암 상부에 반원양성 이암이 퇴적되었다. 두 번째 시기(Stage P2)인 초기 마이오세 말에 들어와 분지 내부에서 단층 활동에 수반된 침강이 일어났으며, 이로 인해 분지 서측 도음산 및 덕성 선상지 삼각주에서는 이전 시기에 퇴적된 표면층(topset)과 이 시기에 퇴적된 전면층(foreset) 사이에 대규모 절단면이 형성되었다. 단층면의 불안정한 퇴적물은 재동되어 단층면 인근의 침강지에 퇴적되었으며, 분지 내부에서는 두꺼운 이암 사이에 분포하는 사암군집으로 나타난다. 이후 조립질 선상지 삼각주가 지속적으로 전진구축하였으며, 분지 내부에는 반원양성 이암만 퇴적되었다. 세 번째 시기(Stage P3)인 중기 마이오세에 들어와 분지 서측에서 조립질 퇴적물 공급량이 줄어들며 조립질 선상지 삼각주 상부에 세립질 선상지 삼각주가 형성되었다. 세립질 선상지 삼각주가 전진구축하면서 분지 내부에서는 상향 조립화 경향을 보이는 저탁류 사암/이암 및 반원양성 이암이 퇴적되었다(Stage P3.1). 대규모의 사태에 의해 형성된 2매의 거대저탁류(Stage P3.m1.1, P3.m1.2) 사암/이암이 대부분의 시추공에서 확인된다. Stage P3.2 시기에는 불안정한 사면에서 혼합류(hybrid flow)에 의해 이동된 이질 역암이 저탁류 사암/이암 및 반원양성 이암 사이에 퇴적되었다. 포항분지 외곽의 화산 분출로 두꺼운 데사이트질 화산재 퇴적층(Stage P3.ash)이 퇴적된 후 분지 서측에서 쇄설성 퇴적물의 공급이 줄어들며 분지 내부에서는 상향세립화 경향을 보이는 반원양성 이암 및 저탁류 사암/이암이 퇴적되었다(Stage P3.3). 이 시기의 후반에 들어와 쓰나미 등에 의해 천해 및 사면의 세립질 퇴적물이 다시 재동되어 2차 거대저탁류가 형성되었다(Stage P3.m2). 분지형성 마지막 시기(Stage P4)인 중기 마이오세 말에는 분지 서측에서 쇄설성 퇴적물의 공급이 급격히 줄어들어 분지 내부에는 구조질 이암이 퇴적되었다.

주요어: 포항분지, 사건층서, 거대저탁류, 화산재, 사암군집

In Gul Hwang, Junghee Son and Soonmi Cho, 2021, Event stratigraphy of Yeonil Group, Pohang Basin : Based on correlation of 21 deep cores and outcrop sections. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 5, p. 649-678

ABSTRACT: Well-to-well correlation of 21 deep cores were carried out using key beds such as basinwide megaturbidites, ash layers and a group of sandstone layers as well as abrupt changes in sedimentary facies. Key beds in these wells were correlated with outcrops, revealing event stratigraphy of the Yeonil Group in Pohang Basin. During the early stage of the basin formation (Stage P1; late Early Miocene), coarse-grained sediments were supplied from the western margin of the basin, forming shallow marine fan deltas. In the basin center, however, the basement is directly overlain by hemipelagic mudstone. The basin experienced rapid tectonic subsidence (Stage P2; latest Early Miocene), forming large-scale truncation surface between the topset and foreset successions of the Doumsan and Duksung fan deltas in the western part of the basin. The unstable sediments on the fault scarp were resedimented, depositing a group of sandstone layers in the basin center. During the third stage (Stage P3; Middle Miocene), progradation of fine-grained fan deltas on the steeply-inclined slope in the western part of the basin resulted in the deposition of thick hemipelagic mudstone in the basin center with intercalating turbidite sand

* Corresponding author: +82-42-868-3326, E-mail: ighwang@kigam.re.kr

stone/mudstone, showing a coarsening-upward trend (Stage P3.1). Chaotic resedimentation of the steeply-inclined slope deposits, probably related to the seismic event, formed two layers of basinwide megaturbidite (Stage P3.m1.1 and P3.m1.2). Further progradation of the fan deltas on the unstable slope resulted in the deposition of hybrid flow deposits (Stage P3.2). An eruptive volcanism formed thick dacitic ash layers (Stage P3.ash). Sediment supply from the western basin margin gradually decreased, depositing fining-upward trends of turbidite sandstone/mudstone and hemipelagic mudstone (Stage P3.3). A giant tsunami scoured most of the fine-grained foreset deposits, forming a second megaturbidite (Stage P3.m2). The basin was, then, covered by thick diatomaceous mudstone (Stage P4; late Middle Miocene), probably related to the closure of the basin and related decrease in clastic sediment supply.

Key words: Pohang Basin, event stratigraphy, megaturbidites, volcanic ash, groups of sandstone

(In Gul Hwang, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource, Daejeon 34132, Republic of Korea; Junghee Son and Soonmi Cho, Department of Petroleum Resources Technology, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea)

1. 서론

포항분지는 한반도 남동부에 위치한 가장 큰 신생대 퇴적분지로 마이오세에 들어와 동해의 급격한 확장과 관련하여 형성되었다(Otofuji and Matsuda, 1984; Han *et al.*, 1986; Jolivet *et al.*, 1991; Yoon and Chough, 1995). 이 분지는 우수향 주향이동을 한 서측의 양산단층에 의해 형성된 단거열림형 분지로 알려져 왔다(Han *et al.*, 1986; Kim, 1992). 그러나 이 연구와는 달리 포항분지가 형성되는 기간에는 양산단층의 주향이동이 제한적이었으며(Hwang, 1993; Hong *et al.*, 1998), 분지 서측 경계는 양산단층 동측에 분포하는 북북동-남남서 방향의 정단층과 북서-남동 방향의 이음단층(transfer fault)에 의해 조절되었고(Hwang, 1993; Hwang *et al.*, 1995), 분지 동측의 후포단층 및 울릉단층의 우수향 전단력이 분지 서측으로 전파되어 형성된 것으로 보고되고 있다(Yoon and Chough, 1995; Sohn and Son, 2004; Son *et al.*, 2007; Cheon *et al.*, 2012). 포항분지의 연일층군은 분지 서측의 일부 선상지를 제외한 대부분의 지역에서 해성환경에서 퇴적된 두께 1 km 이상의 역암, 사암 및 이암으로 구성되어 있으며, 퇴적 시기는 수많은 고생물학적 연구들에 의해 전기 마이오세 말에서 중기 마이오세로 알려져 왔다(Yoon, 1976a, 1976b; You *et al.*, 1986; Kim, W.H., 1990; Yi and Yun, 1995; Kim, J.M., 1999). 연일층군은 주로 육성 및 호성환경에서 퇴적된 역암, 사암, 이암 및 화산재 퇴적층 그리고 화성암으로 구성된 초기 마이오세의 장기층군 상부에 부정합 관계를 가지며 놓인다(Kim *et al.*, 2011; Cheon *et al.*, 2012; Kim, 2018; Gu *et al.*,

2018; Kim and Hwang, 2020).

포항분지 연일층군은 Tateiwa (1924) 이후로 수많은 층서연구가 진행되었으나 아직까지 통일된 층서는 확립되지 않았다(표 1). 암층서를 기반으로 수행된 기존 층서 연구는 포항분지 연일층군을 암상에 따라 최하부의 천북역암(단구리역암 및 천곡사역암, 서암역암 등), 그 상부의 사암이 우세한 학림층(학전층, 송학동층 등), 사암 및 이암이 교호하는 흥해층(이동층, 학전층, 대곡층 등) 그리고 최상부의 두호층(포항층 등)으로 구분하였다(Tateiwa, 1924; Kanehara, 1936; Um *et al.*, 1964; Kim, 1965; Yoon, 1975; Yun, 1986)(표 1). 그러나 암층서에 따른 기존 층서 연구는 분지 서측에 분포하는 수 개의 강에서 시기에 따라 퇴적물 공급량이 변하면서 다양한 암상이 서로 중첩되는 양상을 고려하지 못하여 통일된 층서 확립이 불가능하였다. 또한, 분지 내부에서 시추된 코아 시료와 육상 층서의 대비는 퇴적물의 수평적 암상 변화를 충분히 고려하지 못하여 서로 다른 시기에 퇴적된 유사한 암상을 동일한 층으로 구분하기도 하였다(Han *et al.*, 1986). 이후 Hwang (1993), Hwang *et al.* (1995)은 야외조사를 통해 포항분지 서쪽에서 공급되는 주요 퇴적물 공급지를 기준으로 방사상으로 분포하는 6 개의 선상지 삼각주를 확인하였고, 퇴적상 조합의 수평, 수직적 변화 및 고수류 방향 등을 종합하여 연일층군의 기원층서(genetic stratigraphy)를 확립하였다. 이후 Sohn *et al.* (2001), Sohn and Son (2004), Park *et al.* (2013)은 포항분지 퇴적층의 암상변화를 해수면 변화 및 구조운동에 따른 순차층서로 해석한 바 있다. 그러나 순차층서 연구는 선상지 삼각주의 일부 단면에서 나타나는 암상 변화를

Table 1. Stratigraphy of Pohang Basin, based on lithostratigraphy (Tateiwa, 1924; Kanehara, 1936; Um *et al.*, 1964; Kim, 1965; Yoon, 1975; Yun, 1986), genetic stratigraphy (Choe and Chough, 1988; Hwang, 1993), sequence stratigraphy (Sohn *et al.*, 2001) and event stratigraphy (this study).

	Tateiwa (1924)	Kanehara (1936b)	Um <i>et al.</i> (1964)	Kim (1965)	Yoon (1975)	Yun (1986)	Choe & Chough (1988)	Hwang (1993)	Sohn <i>et al.</i> (2001)	This Study			
Yeonil Group	Ennichi Shale.	Ennichi Shale.	Yonam F.	Oomockdong F.	Eulichang Group	Yonghan F.	Duho F.	Duho & Idong F.	Duho F. (150-200 m)	Sequence 6	P4		
			Duho F.	Pohang F.		Duho F.							
			Idong F.	Eedong F.		Idong F.	Hagjeon F.	Hunghae F.	Hunghae F. (180-200 m)	Sequence 5	P3	P3.3 P3.2 P3.1	
			Heunghae F.	Daegoek F.		Heunghae F.							
			Hakrim F.	Songhacdong F.		Hagjeon F.							Hakrim F. (100-180 m)
	Senpoku Conglo.	Senpoku Conglo.	Chunbuk Conglo.	Seoam Conglo.	Eulichang Group	Chungogsa F.	Chunbuk Conglo. F.	Chunbuk F.	Chunbuk F. (150-600 m)	Sequence 2	P1	P1.2 P1.1	
						Daljeon Alt. Mem.							Daljeon Alt. Mem.
						Doumsan Bomunji Alt. Mem. Alt. Mem.							Doumsan Bomunji Alt. Mem. Alt. Mem.
						Daunguri Conglo.							Daunguri Conglo.

구조운동 및 해수면 변화로 해석하여 대비를 시도한 것으로 연구가 수행된 도음산 선상지 삼각주 내부의 여러 단면에서도 명확한 대비가 불가능하며, 인근의 타 선상지 삼각주의 단면에서는 동일한 암상 변화가 확인되지 않아 분지 전반의 층서를 대비하는데 활용하기 어렵다. 즉, 해수면 변화에 따른 암상의 변화는 분지 전반에 걸쳐 나타나 분지 충전물 전체에서 대비가 가능해야하나 선상지 삼각주 별로 퇴적 시기에 따른 구조운동 및 퇴적물 공급량 변화가 달라 순차 층서의 개념으로는 포항분지의 층서를 정립하기는 불가능하다.

포항분지에는 과거 1970년대에 석유탐사를 위해 시추된 8개 공(A-공 ~ H-공)과 최근에 이산화탄소 지중저장을 위해 시추된 4개 공(PH-CLH-1 ~ 3공, TB-2공), 이산화탄소 지중저장이 수행되고 있는 1개 공(PYDC공), 지하수 관측을 위해 시추된 3개 공(PH-1, 3, 4공) 및 천연가스 매장량 평가를 위해 시추된 5개 공(PD-1, -2, PSG-1, -2, -3)이 매우 잘 보존되어 있어 정밀한 주상도 작성이 가능하였다(그림 1; 표 2). 포항분지 중앙부에 위치한 대부분의 시추공에서는 화산재 퇴적물과 거대저탁류 사암층, 그리고 두꺼운 이암 사이에 분포하는 얇은 사암군집이 분포하고 있어 21개 시추공 사이의 대비가 가능하였다. 그러나 시추공의 대부분은 분지의 중앙에 위치하여 단순히 암상만 비교하여 육상 층서와 대비하는 것은 불가능하다. 본 논문에서는 분지 서쪽에서 공급되는 육성퇴

적물이 분지 내부로 들어오며 퇴적작용이 변하는 양상(Hwang *et al.*, 1995)과 분지전체의 구조운동 및 퇴적물 공급량 변화를 고려하여 육상 노두에서 확인되는 기원층서와 시추공에서 확인되는 사건층서를 대비하여 포항분지의 퇴적사를 밝히고자 한다.

2. 포항분지 기원층서(genetic stratigraphy) 기 존연구

Hwang (1993) 및 Hwang *et al.* (1995)은 분지 서측 및 분지 내부의 급격한 구조운동과 이에 따른 퇴적물 공급량 변화 및 퇴적심도 변화에 따라 분지 서측의 6 개 선상지 삼각주는 4 단계의 진화과정을 거친 것으로 해석하였다(그림 2). 분지형성 초기(Stage 1)에 도음산 및 덕성 선상지 삼각주는 천해 환경에 전진구축하였으며, 분지가 침강하면서 길버트형 선상지 삼각주로 진화하였다(Units D-1, DS-1; Hwang *et al.*, 1995)(그림 2a). 도음산 선상지 삼각주의 남측에 위치한 말골 선상지 삼각주는 퇴적물 공급량이 적어 초기에는 분지 경계에서 각력암이 선상지 환경에 퇴적되었으며(Unit M-1), 이후 분지가 침강함에 따라 각력암이 해저 단층 인근에 형성된 단층애형 선상지 삼각주로 발달하였다(Unit M-2). 이 기간 동안 매산 선상지 삼각주는 퇴적물 공급량이 적어 남측의 도음산 선상지 삼각주와 북측의 덕성 선상지 삼각주의 전면층 퇴적물(Units D-1, DS-1)이 각각

북쪽 및 남쪽으로 전진구축하였다(그림 2a).

분지형성 두 번째 시기(Stage 2)에는 분지 내부에서 급격한 침강이 일어나면서 도음산 선상지 삼각주와 덕성 선상지 삼각주에는 대규모 절단면이 형성되었다(그림 2b). 단층면의 불안정한 퇴적물은 재동되었고, 그 상부에 급경사를 이루는 전면층이 퇴적되었다. 도음산 선상지 삼각주에서는 조립질 퇴적물이 지속적으로 공급되어 전면층이 분지 내부로 약 800 m 전진구축하였다(Unit D-2). 덕성 선상지 삼각주에서는 퇴적물 공급량이 점차 감소하여 상향세립화

경향을 보이며(Unit DS-2), 이후 매산 선상지 삼각주의 퇴적물 공급량보다 줄어들어 그 상부에 매산 선상지 삼각주의 화강암 거력 퇴적물이 놓이게 된다(Unit MS-1). 말골 선상지 삼각주는 퇴적물 공급량이 줄어들어 말골 선상지 삼각주의 사면에서 퇴적된 이암층(Unit M-3) 상부에 도음산 선상지 삼각주의 전면층(Unit D-2)에서 퇴적된 역암이 놓이게 된다.

분지 형성 세 번째 시기(Stage 3)에 들어와 도음산 선상지 삼각주에서는 퇴적물의 공급량이 급격히 줄어 역암으로 구성된 전면층(Unit D-2) 상부에 세립

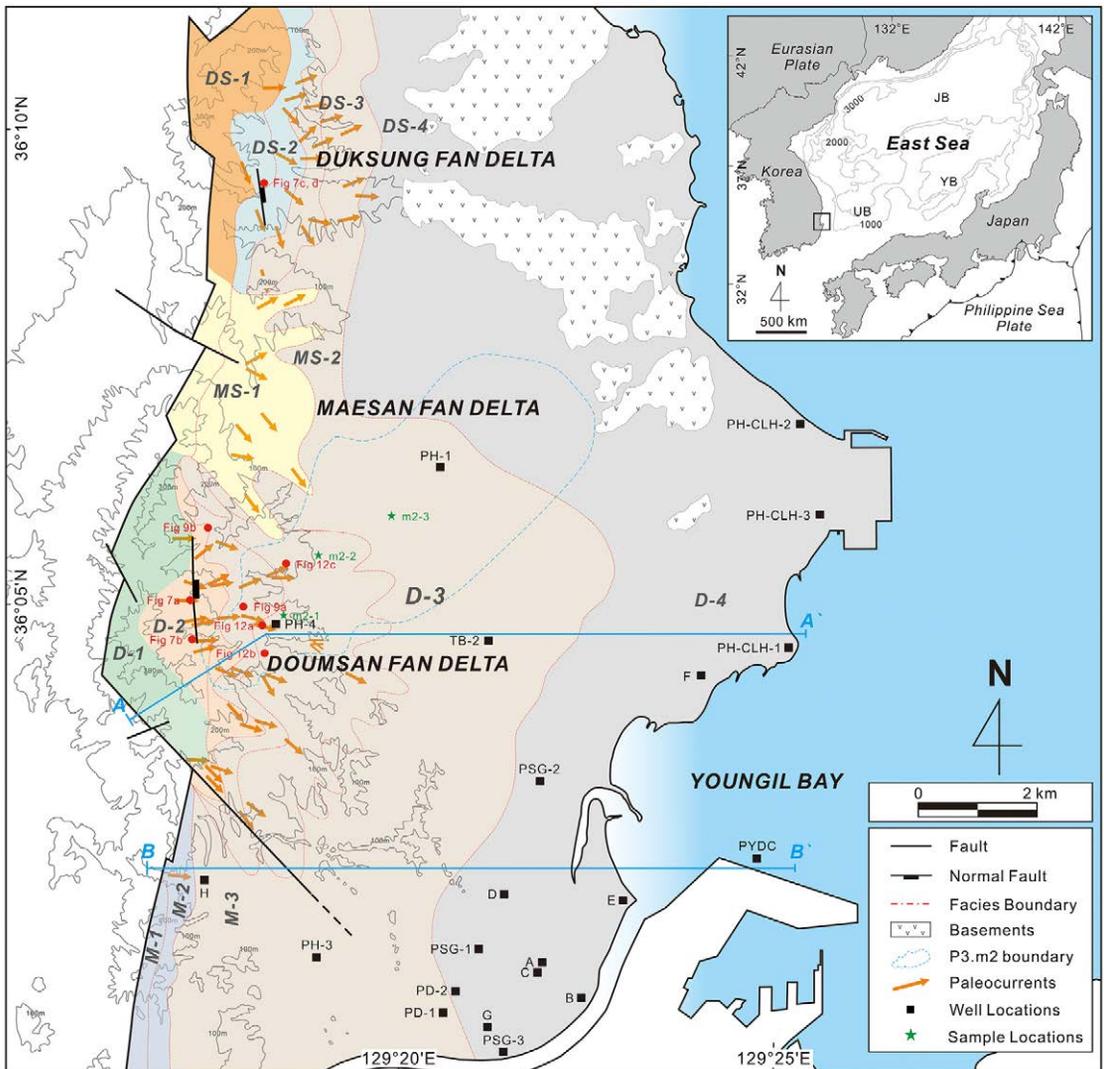


Fig. 1. Genetic stratigraphic map of fan-delta systems in the Miocene Pohang Basin and location of exploratory wells (D : Doumsan fan delta, DS : Duksung fan delta, M : Malgol fan delta, and MS : Maesan fan delta) (modified after Hwang, 1993; Hwang *et al.*, 1995).

Table 2. Location of 21 wells in the Pohang Basin and depth of key beds.

Name	Latitude	Longitude	Total Depth (m)	Basement Depth (m)	P1, P2 Boundary (m)	P3. m1.1, m1.2 (m)	P3. ash (m)
A-well	36.0223000	129.3650000	1523	423.3	411.7	306.3	172.4
B-well	36.0232000	129.3740000	1627	672.5	578.3	445.1	321.3
C-well	36.0219000	129.3650000	3000	435.3	416.1	320.7	180
D-well	36.0259000	129.3570000	1571	482	426.3	324.35	196.5
E-well *	36.0316720	129.3806260	1276	668.2	571	464	381.6
F-well *	36.0695820	129.3996630	1217	639.7	478.1	421.7	307.3
G-well	36.0113000	129.3550000	1005	493.2	396.7	238	-
H-well *	36.0098000	129.2970000	972	302.2	-	-	-
PH_CLH-1	36.0763889	129.4186111	630	551.7	500	447.1	-
PH_CLH-2	36.1100556	129.4275556	616	561.1	476.8	430	293
PH_CLH-3	36.0986667	129.4261111	763	664.7	646.6	560.3	460
PD-1	36.0125556	129.3403333	301.1	-	-	185.8	21.3
PD-2	36.0166944	129.3457500	268.5	-	-	204.6	54.6
PSG-01	36.0232222	129.3496389	274.1	-	-	274	122.3
PSG-02	36.0520000	129.3625556	360.8	-	2	355.3	263
PSG-03	36.0041667	129.3545833	289.7	-	-	274.7	136.3
PYDC	36.0349444	129.4216667	979.4	736.4	615	517	-
TB-2	36.0787833	129.3545528	604	542	518.1	425.2	298.3
PH-1	36.1071800	129.3407560	100	-	-	100	-
PH-3	36.0255690	129.3116440	100	175	-	64.9	-
PH-4	36.0796230	129.3049290	85	-	-	-	-

* Corrected coordinates

질 전면층이 퇴적되었다(Unit D-3)(그림 2c). 세립 질 퇴적물이 급사면에 퇴적된 관계로 대규모 사태가 자주 일어나 사면 하부 및 분지저 환경에서는 두꺼운 반원양성 이암과 함께 하도/로브형 및 판상의 중력류 퇴적물이 퇴적되었다(Choe and Chough, 1988; Hwang *et al.*, 1995; Kim and Chough, 2000). 도음산 선상지 삼각주 북쪽의 매산 선상지 삼각주는 이 시기 후반부에 들어와 퇴적물 공급량이 늘어나 도음산 및 덕성 선상지 삼각주의 기저층 및 사면 퇴적층(Units D-3, DS-3) 상부에 매산 선상지 삼각주의 급사면에서 퇴적된 거력 퇴적물(Unit MS-1)이 놓이게 된다. 이후 매산 선상지 삼각주의 퇴적물 공급량도 점차 줄어들어 상향 세립화 경향을 보이는 이암 및 사암이 퇴적되었으며, 이 퇴적단위는 퇴적 동시성

교란을 심하게 받았다(Unit MS-2). 분지형성 마지막 시기(Stage 4)에 들어와 분지전체에 걸쳐 구조질 반원양성 이암이 퇴적되었다(Units D-4, DS-4) (그림 2d). 이는 포항분지 형성 마지막 시기에 들어와 쇄설성 퇴적물의 공급이 급격히 감소하였기 때문으로 추정된다.

3. 육상 및 시추공에서 확인되는 열쇠층

포항분지의 노두와 시추공에서 뚜렷한 암상의 차이를 보이며 넓은 지역에서 걸쳐 대비가 가능한 8개의 열쇠층을 발견하였다. 이 열쇠층은 일부 지역에서는 점이적이며, 일부 지역에서는 대비가 불가능하다. 각 열쇠층을 하부로부터 열거하면 다음과 같다.

3.1 기반암과의 경계

포항분지 시추코아에서 확인되는 기반암은 페름기의 (화강)섬록암, 쥐라기의 각섬석 화강암(Lee *et al.*, 2008), 백악기 경상분지에서 형성된 퇴적암 및 화성암, 그리고 백악기 말 내지 팔레오세 초기의 불국사 화강암, 팔레오세 내지 에오세의 화산암 및 재

동된 화산암, 초기 마이오세의 장기분지 퇴적층과 대비되는 데사이트질 화산재를 포함하는 역암, 사암 및 이암, 그리고 초기 마이오세로 추정되는 현무암질 안산암 등으로 구성되어 있다(그림 3, 4, 5).

기반암과 연일층군의 경계는 기반암까지 시추된 14개 공 중 7개 공에서 기반암 풍화대 상부에 분급이

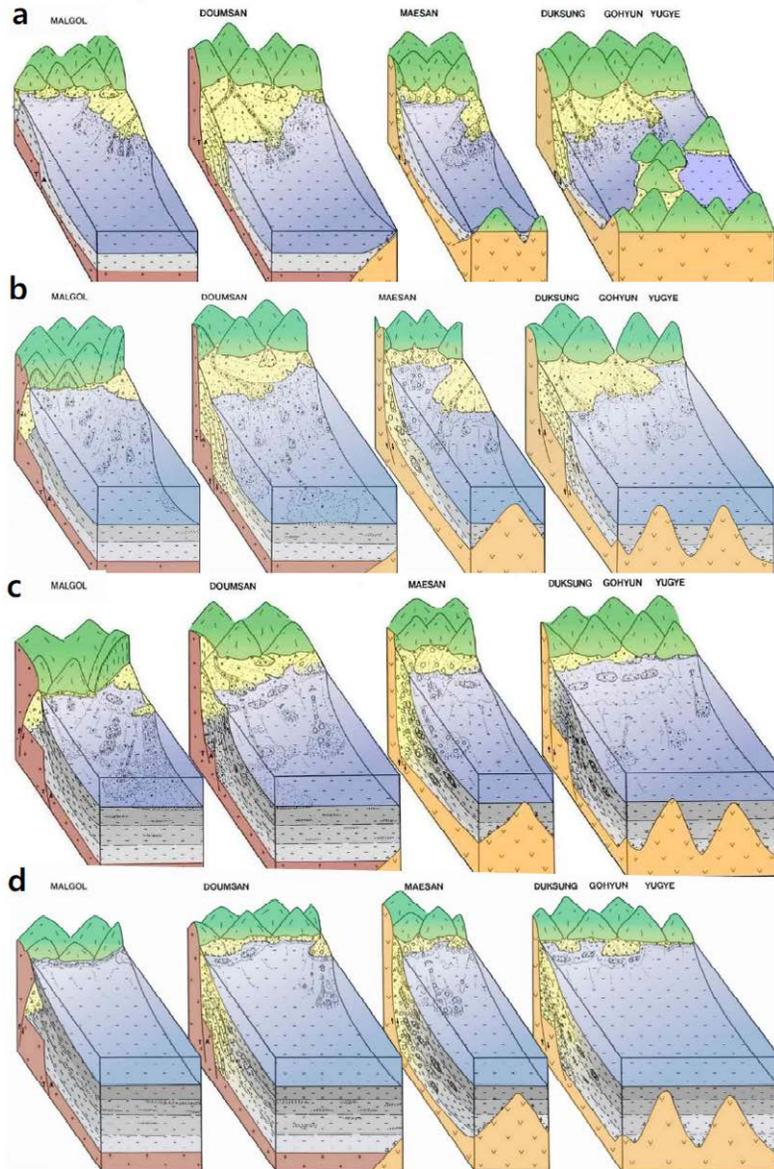


Fig. 2. Depositional model of fan-delta systems in the Miocene Pohang Basin. (a) Stage 1 : progradation of shallow-marine-type fan deltas, (b) Stage 2 : rapid subsidence of the basin and progradation of coarse-grained fan deltas, (c) Stage 3 : abrupt decrease in sediment supply and progradation of fine-grained fan deltas, and (d) Stage 4 : decrease in clastic sediment supply and deposition of diatomaceous mudstone (after Hwang, 1993; Hwang *et al.*, 1995).

불량한 각력암, 이질 사암, 사질 이암, 탄질 셰일 및 재동된 화산재 퇴적층이 놓이며, 나머지 시추공에서는 해성 이암이 기반암 직상부에 분포한다(그림 4, 5, 6a). 각력암, 이질 사암, 사질 이암, 탄질 셰일 및 화산재 퇴적층 상부에서도 급격한 퇴적상 변화를 보이며 두꺼운 해성 이암이 퇴적되었다(그림 4, 5). 이 경계는 시추공 각 지점에서 해침이 일어나는 시기가 기반암의 고도에 따라 서로 달라 일부 저지대에서는 각력암 등이 퇴적되었고, 일부 고지대에서는 해침이 늦게 일어나면서 지속적인 침식이 일어나 기반암 상부에 해성 이암이 놓인 것으로 해석된다.

3.2 도음산 및 덕성 선상지 삼각주의 대규모 절단면
 포항분지의 도음산 및 덕성 선상지 삼각주에서는

천해 환경에서 퇴적된 상향조립화 경향을 보이는 역암 및 사암(Units D-1, DS-1)과 그 상부의 30° 이상의 경사를 가지는 전면층(Units D-2, DS-2) 사이에 대규모 절단면이 나타난다(Hwang, 1993; Hwang *et al.*, 1995)(그림 7). 도음산 선상지 삼각주에서 이 경계면은 남북으로 1.5 km 연장되며, 높이는 야외 노두에서 150 m 이상인 것이 확인되었다(Hwang, 1993)(그림 7a, 7b). 덕성 선상지 삼각주는 하부의 천해 환경에서 퇴적된 역암 및 사암이 서쪽으로 약 5° 정도 기울어져 있으며, 그 상부의 역암은 30° 이상 동쪽으로 경사져있다(Chough and Hwang, 1997)(그림 7c, 7d). 도음산 선상지 삼각주에서는 상향조립화 경향을 보이는 역암 및 사암의 총 두께가 약 250 m 이상인 점으로 보아 분지형성 초기에 분지가 250 m 이상

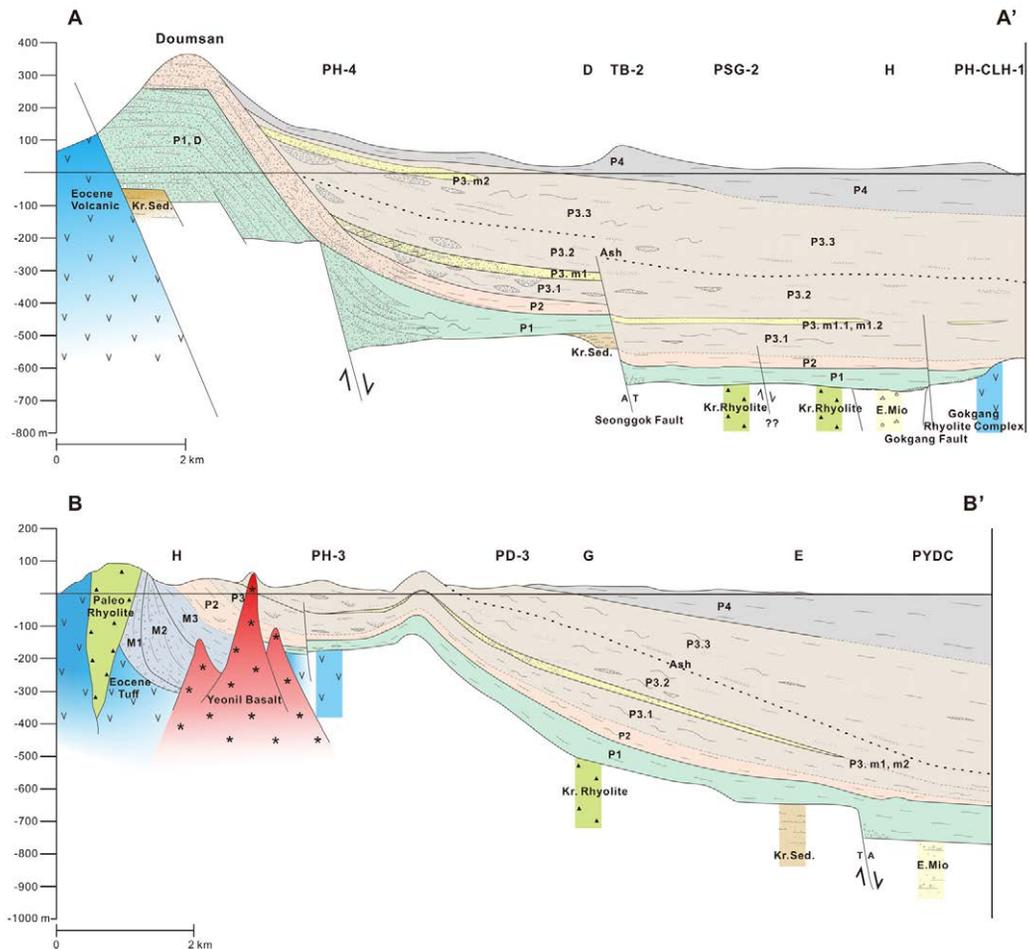


Fig. 3. Cross-sections of Pohang Basin, based on correlation of 21 exploratory wells and outcrops. Depth of key bed is listed on Table 2. For location, see Fig. 1.

침강하면서 많은 양의 조립질 퇴적물이 공급되었으며, 천해형 선상지 삼각주가 점차 길버트형 선상지 삼각주로 진화한 것으로 해석된 바 있다(Hwang *et al.*, 1995). 이후 분지 내부에서 단층운동에 의한 급격한 침강이 일어나며 단층면의 불안정한 퇴적물이 재동되었고 지속적으로 다량의 조립질 퇴적물이 공급되어 대규모의 조립질 길버트형 선상지 삼각주(Unit D-2)가 형성되었다(Hwang *et al.*, 1995). 이 경계면에서 재동된 역암 및 사암의 부피는 경계면의 연장성 등으로 보아 1억 m³ 이상으로 추정된다. 반면 덕성 선상지 삼각주에서는 천해 퇴적층의 두께가 80 m 이상으로 누적된 것이 확인되었으며(Unit DS-1), 이후 분지 내부의 급격한 침강으로 단층면의 불안정한 퇴적물은 재동되었고 그 상부에 길버트형 선상지 삼각주가 퇴적된 것으로 해석하였다(Chough and

Hwang, 1997). 하부의 천해 퇴적물이 서쪽으로 5° 정도 경사진 점은 분지 내부에서 침강이 일어나며 단층면의 하반이 하중의 감소로 용기하면서 회전한 것으로 추정된다(Mckenzie and Jackson, 1986).

3.3 두꺼운 이암 사이의 사암군집

이 사암군집은 포항분지 대부분 시추공에서 확인되며, 열쇠층 역할을 하는 대규모 거대저탁류 퇴적층(P3.m1.1, P3.m1.2)의 약 80 ~ 120 m 하부에 위치한다(그림 4, 5). 사암군집의 상부와 하부는 두께 50 m 이상의 사암이 거의 분포하지 않는 이암으로만 구성되어 있다(그림 8). 분지 서측에 분포하는 시추공에서는 수 cm에서 수십 cm 정도 두께의 사암층이 수 매 나타나나, 분지 동측에서는 수 cm 내외로 얇아지는 경향을 보인다.

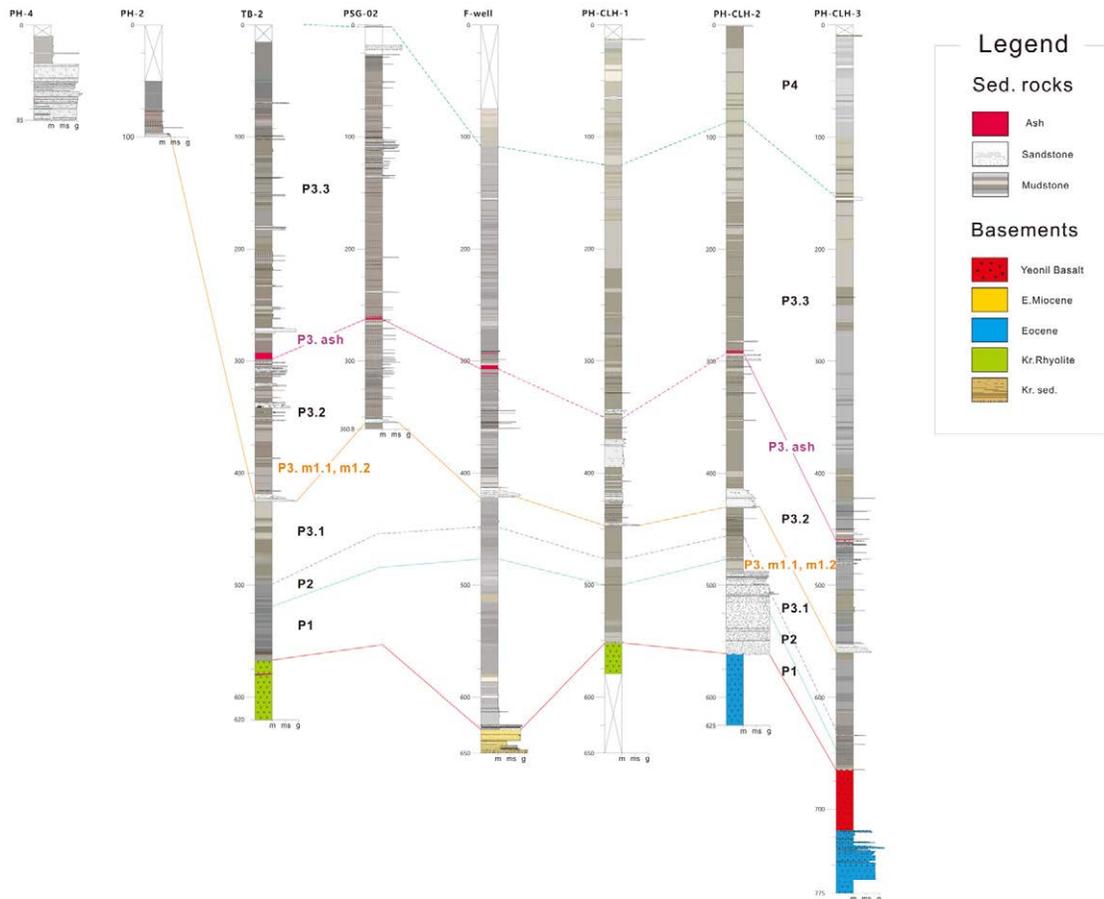


Fig. 4. Simplified columnar logs of exploratory wells and correlation of key beds around the cross-section A-A'. For location, see Fig. 1.

이 사암군집은 분지 서측에서 조립질 퇴적물이 거의 공급되지 않는 상태에서 분지 서측의 단층 운동 또는 지진 등에 의해 분지 내부까지 사암이 공급된 것으로 해석된다. 이 사암 군집은 도음산 및 덕성 선상지 삼각주에서 확인되는 대규모 절단면의 형성과 관련 있는 것으로 추정된다. 즉, 분지 내부의 단층 운동에 의해 급격한 침강이 일어나면서 단층면의 불안정한 역암 및 사암이 1억 m³ 이상 재동되었고, 재동된 퇴적물의 대부분은 단층면 인근 침강지에 퇴적되었으며, 분지 내부에서는 얇은 사암군집의 형태로 퇴적된 것으로 추정된다.

3.4 조립질 선상지 삼각주와 세립질 선상지 삼각주의 경계

포항분지의 도음산 선상지 삼각주에서는 역암이 90% 이상인 조립질 전면층과 역암의 양이 대폭 감소하고 이암이 우세한 세립질 전면층 사이에 매우 급격한 퇴적상 변화가 확인된다(Hwang, 1993; Hwang *et al.*, 1995)(그림 9). 이 경계면은 도음산 선상지 삼

각주의 꼭지점(fan apex)을 중심으로 방사상으로 분포하며, 고수류 방향도 방사상의 분포를 보인다(그림 1). Hwang (1993)은 이 경계면이 분지 서측에서 구조운동이 일어나 퇴적물의 공급량이 급격히 줄어들어 형성된 것으로 해석하였다. 이 경계면은 시추코아에서 뚜렷하게 나타나지 않는다.

3.5 거대저탁류 퇴적층

거대저탁류 퇴적층인 이 사암/이암은 포항분지에서 기재된 21개 시추공에서 분지의 가장 서측에 위치한 H-공 및 PH-4공을 제외한 모든 시추공에서 확인된다(그림 3, 4, 5, 10). 거대저탁류 퇴적층 사암의 두께는 1.6 m에서 최대 12 m이며, 사암 상부에는 이암이 2 ~ 7 m로 두껍게 누적되어 있다. 사암은 점 이층리를 보이며, 하부로부터 괴상의 역질 사암 내지 조립사암(Ta), 층리를 보이는 조립 내지 중립 사암(Tb), 사층리, 엽리, 퇴적동시성 교란을 보이는 세립사암(Tc) 그리고 수평엽리 및 퇴적동시성 교란을 보이는 극세립 사암 내지 실트암(Td)으로 구성되어

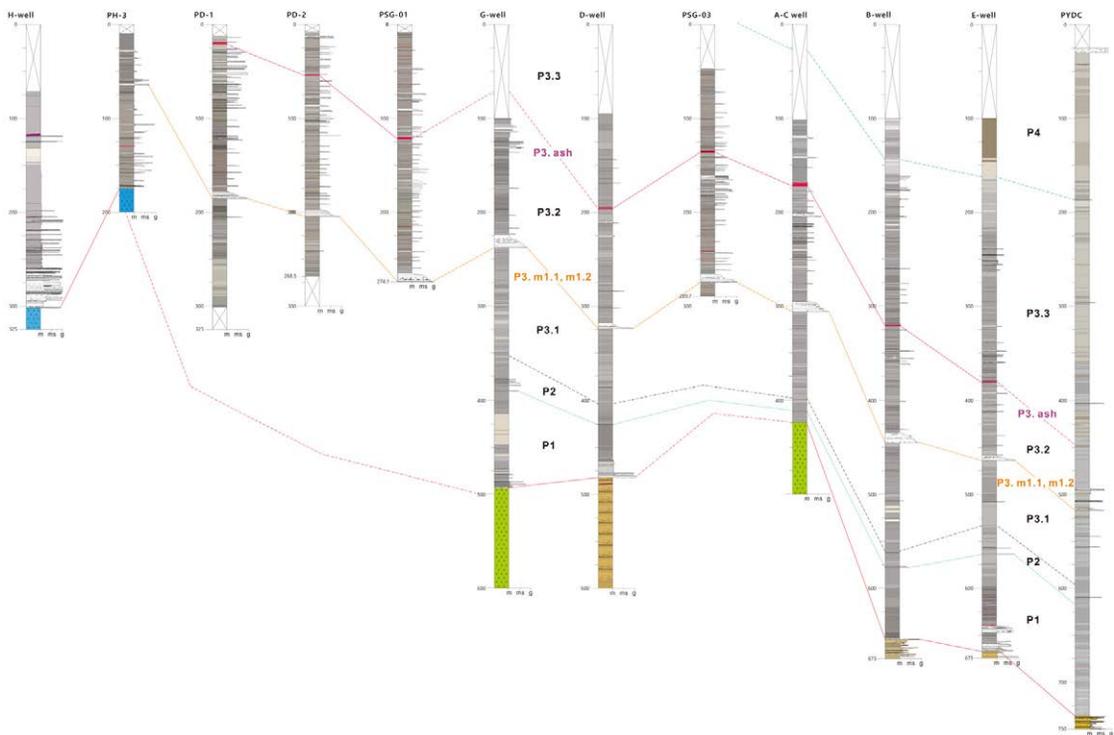


Fig. 5. Simplified columnar logs of exploratory wells and correlation of key beds around the cross-section B-B'. For location, see Fig. 1.

있다(그림 10, P3.m1.1). 상부의 이암은 주로 괴상이나 하부의 일부구간은 점이층리 및 엽리를 보이며 이는 저탁류 퇴적층의 Te 구간에 해당된다(그림 10). 이암의 암색은 회색 내지 암회색(N4~N5)으로 상부로 갈수록 짙어지는 경향을 보인다(그림 10). 이 거대저탁류 사암/이암은 포항분지에서 시추를 통해 분포가 확인된 지역의 면적이 85 km² 이상이며, 평균 두께가 14 m에 달하는 점을 고려하면 총 부피가 1.2 km³에 달한다. 시추가 이루어지지 않은 지역까지 포함하고 압밀작용을 고려하면 퇴적당시에 약 3 ~ 5 km³ 이상의 퇴적물이 저탁류로 분지 내부까지 공급된 것으로 추정된다.

이 거대저탁류 사암/이암의 상부에는 두께 수십 cm 정도의 담회색 이암이 놓이며, 그 상부에는 두께 1 ~ 2 m 정도의 점이층리를 보이는 사암/이암이 놓인다(그림 10, P3.m1.2). 일부 시추공에서는 담회색의 이암이 침식되어 나타나지 않기도 한다. 이 사암은 대규모의 사태로 거대저탁류가 형성된 이후 불안정한 사면에서 2차로 대규모의 사태가 일어나면서 형성된 거대저탁류로 해석된다.

이 거대저탁류 퇴적층은 육상의 노두에서는 확인

되지 않는다. 그러나 이 퇴적층은 조립질 길버트형 선상지 삼각주(Unit D-2)가 퇴적된 후 퇴적물의 입도가 급격히 감소하면서 세립질의 길버트형 선상지 삼각주(Unit D-3)가 표면층 및 전면층 등에서 매우 두껍게 퇴적된 이후 대규모 사태가 일어나며 형성된 것으로 추정된다. 현재 노두에서 확인되는 세립질 길버트형 선상지 삼각주의 부피로는 3 ~ 5 km³에 이르는 대규모 사태가 일어나기 힘들다. 따라서 이 시기에는 현재의 육상 노두에서 확인되는 선상지 삼각주보다 훨씬 큰 규모의 선상지 삼각주가 분지 서측에 퇴적되었던 것으로 추정된다.

3.6 데사이트질 화산재 퇴적층

백색 내지 유백색의 데사이트질 화산재 퇴적층은 전체 21개 공 중 이 구간의 시추코어가 보존되어 있지 않은 PH-1, PH-3, G-공과 시추코어가 보존되어 있으나 확인하지 못한 PYDC공, PH-CLH-1공을 제외한 15개 공에서 모두 확인된다(그림 4, 5, 11). 이 화산재 퇴적층은 괴상 또는 점이층리를 보이며, 층리를 보이기도 한다(그림 11). 이는 화산재가 해저면에 침전하면서 분급이 일어났거나 저탁류에 의해 이



Fig. 6. (a) Mudstone of Yeonil Group which directly overlying the Cretaceous lapilli tuff (arrow) (C-well, 435 m), (b) Coarsening-upward trend of coaly shale and tuffaceous sandstone in the lowest part of B-well, and (c) Dacitic tuff on the Cretaceous lapilli tuff (arrow) (G-well, 485 m).

동되었음을 지시한다. 퇴적동시성 교란도 흔하다(그림 11). 화산재 구간의 일부는 연갈회색 및 연담회색을 띠며(그림 11), 이는 화산활동과 함께 반원양성 퇴적물이 섞여 침전하였거나 저탁류로 이동되면서 화산재 퇴적물과 해저면의 반원양성 이암이 혼합된 것으로 추정된다. PYDC공과 PH-CLH-1공에서 이 화산재 퇴적층이 확인되지 않는 것은 저탁류 등에 의해 침식되었을 가능성을 지시한다.

테사이트질 화산재 퇴적층은 육상 노두에서 확인되지 않는다. 이는 분지 서쪽의 급사면에서는 이 화산재 퇴적층이 재동되었을 가능성을 제시한다. 또한, 이 화산재 퇴적층은 다량의 몬모릴로나이트를 함유하여 육상에 이 화산재 퇴적층이 노출될 경우 급격한 팽창과 함께 침식되어 보존이 어려울 가능성이 매우 높다. 아울러 이 구간에 해당되는 육상 노두는 대규모 사태로 인해 교란되어 있어 확인이 불가능할 가능성도 있다.

3.7 2차 거대저탁류 퇴적층

이 층은 야외노두에서 포항공원묘원 남측에서부터 흥해읍 남서 측까지 연장되는 거대저탁류 퇴적층으로 구성되어 있다(그림 12). 포항공원묘원 남측에서 이 층은 점이층리를 보이는 두께 37 m 이상의 역암, 사암 및 이암으로 구성되어 있으며, 학천리 인근에서는 두께 25 m 이상의 역질 사암, 사암 및 이암, 그리고 초곡리와 흥해읍 사이에서는 6 m 이상의 두께를 가지는 점이층리를 보이는 사암 및 이암으로 구성되어 있다(그림 1, 12). 육상 노두에서 이 사암은 5 km² 이상의 지역에서 나타나, 시추공에서는 확인되지 않는다. 이 저탁류 퇴적층은 분지의 남서 측에서는 길버트형 선상지 삼각주 전면층(Unit D-2, Unit P2) 직상부에 분포하며, 초곡리 및 흥해읍 사이에서는 구조질 이암(Unit D-4, Unit P4) 약 10 m 하부에서 확인된다(그림 3). 따라서 이 저탁류 퇴적층은 길버트형 선상지 삼각주가 형성된 이후 그 상부

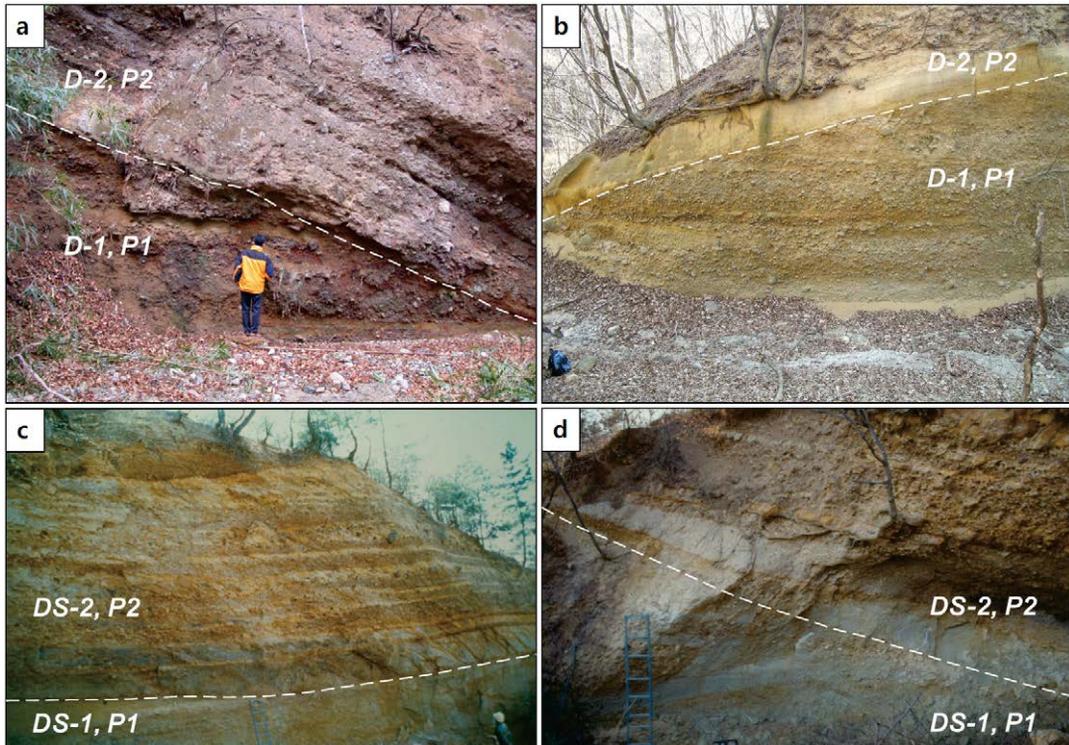


Fig. 7. (a), (b) Large-scale truncation surfaces between the flat lying shallow marine conglomerate (Unit D-1) and steeply-inclined foreset (Unit D-2) of the Doumsan fan delta. This boundary can be traced more than 1.5 km in the outcrop, with height for more than 150 m. (c), (d) Large-scale truncation surfaces between the shallow marine conglomerate (Unit DS-1) and steeply-inclined foreset (Unit DS-2) in Duksung fan delta. The underlying shallow marine succession is back-tilted (dipping 5° westward) (after Hwang *et al.*, 1995). For location, see Fig. 1.

에 상당 기간 동안 세립질 선상지 삼각주(Unit D-3, Unit P3)가 퇴적된 이후 급사면에서 사태가 일어나 세립질 전면층이 대부분 재동되었으며, 이에 따라 급

사면에서는 조립질 전면층(Unit D2, Unit P2) 직상부에 놓이고 분지저 환경에서는 규조질 이암(Unit D-4, Unit P4) 직하부에 퇴적된 것으로 해석된다(그림 3).

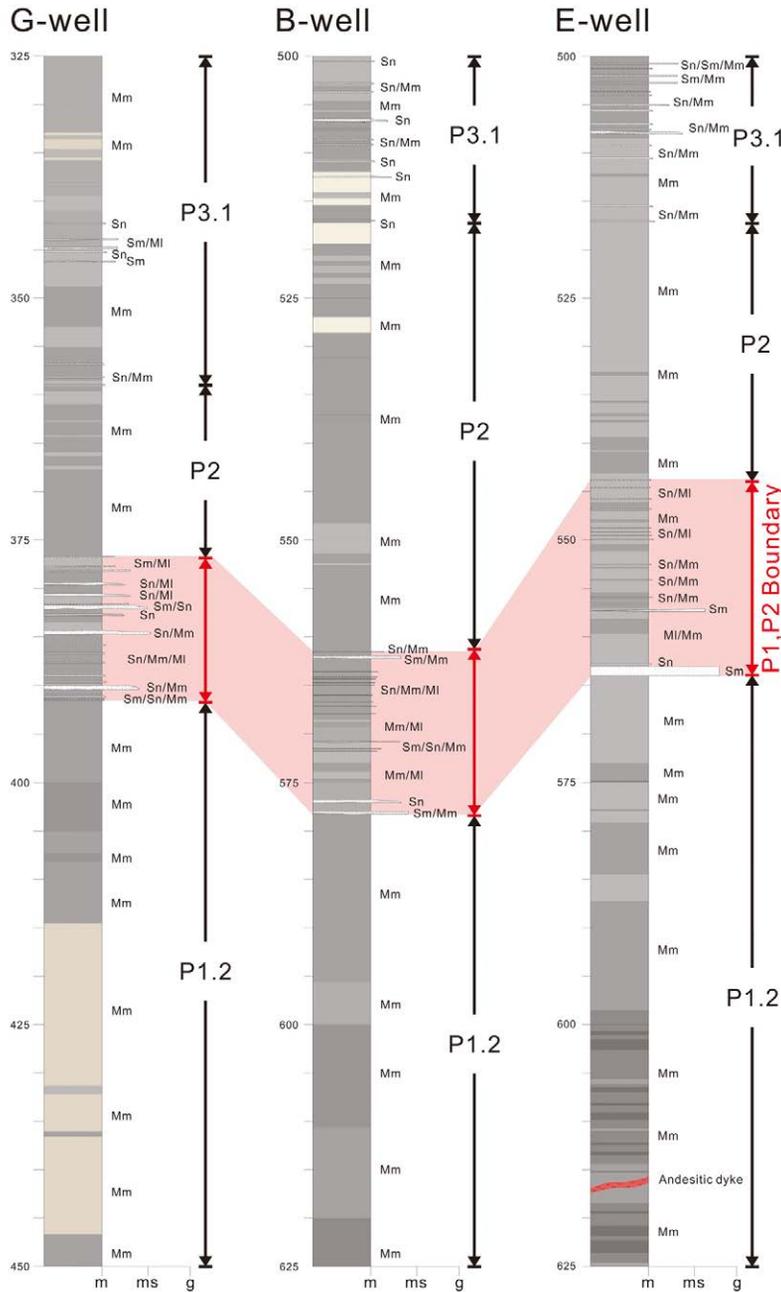


Fig. 8. A group of sandstone layers between thick, homogeneous mudstone, forming the boundary between Unit P1 and Unit P2. For location, see Fig. 1. (Sm : massive sandstone; Sn : normally graded sandstone; Mm : homogeneous mudstone; Ml : laminated mudstone).

3.8 쇄설성 이암과 구조질 이암의 경계

야외노두에서 이 경계면은 쇄설성 이암과 구조질 이암의 경계로 나타난다(그림 13). 하부의 이암은 주로 암회색, 담회색 및 담갈색을 띠는 쇄설성 이암으로 구성되어 있으며, 얇은 사암이 협재하는 것이 특

징이다(그림 13a). 상부의 구조질 이암은 연담회색을 띤다(그림 13). 노두에서 이 경계는 급격한 암색 변화 및 얇은 사암의 존재 유무로 뚜렷이 구분된다(그림 13). 그러나 하부의 쇄설성 이암도 대기에 노출되어 산화작용을 받으면 연담회색을 띠는 경우가 있어

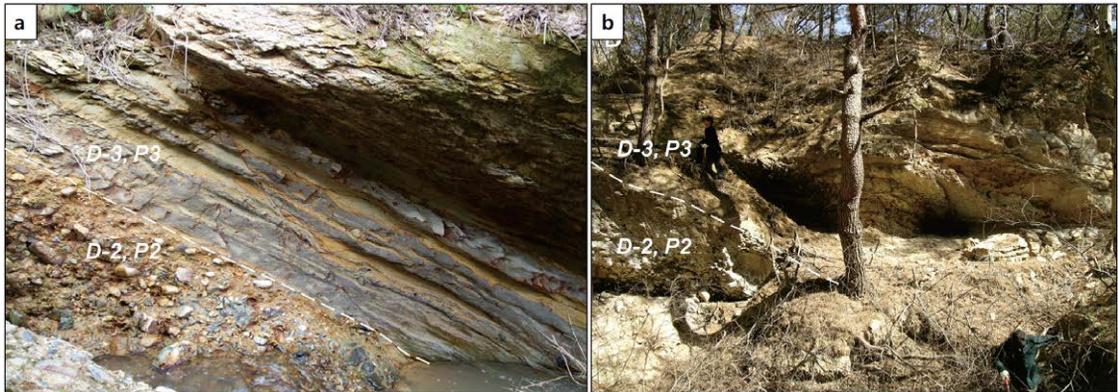


Fig. 9. The boundary between the coarse-grained foreset (Unit D-2) and fine-grained foreset (Unit D-3), occurring in Chungoksa (a) and Maesan (b) valleys. This boundary shows a radial distribution pattern from the apex of the Domsan fan delta (after Hwang *et al.*, 1995). For location, see Fig. 1.

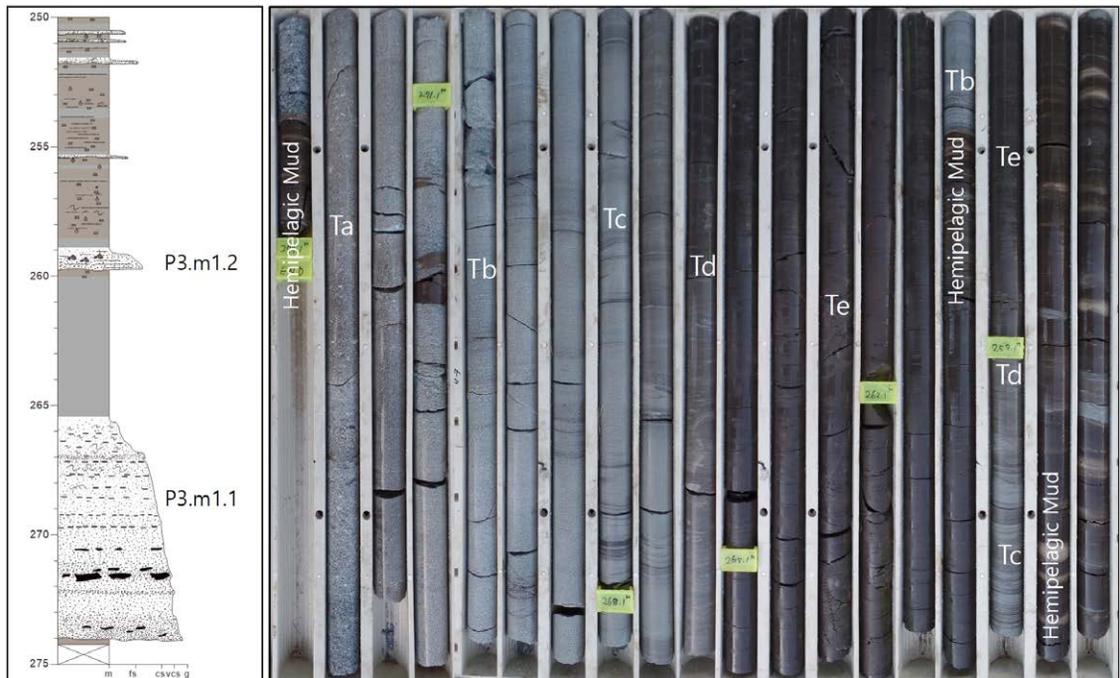


Fig. 10. Columnar section and photograph of megaturbidite deposit (Units P3.m1.1, P3.m1.2) in PSG-1 well. The 1st megaturbidite (Unit P3.m1.1) is composed of 14 m thick gravelly sandstone, sandstone and mudstone. It is overlain by approximately 30 cm thick hemipelagic mudstone and, then, overlain by 1.5 m thick turbidite sandstone and mudstone (Unit P3.m1.2).

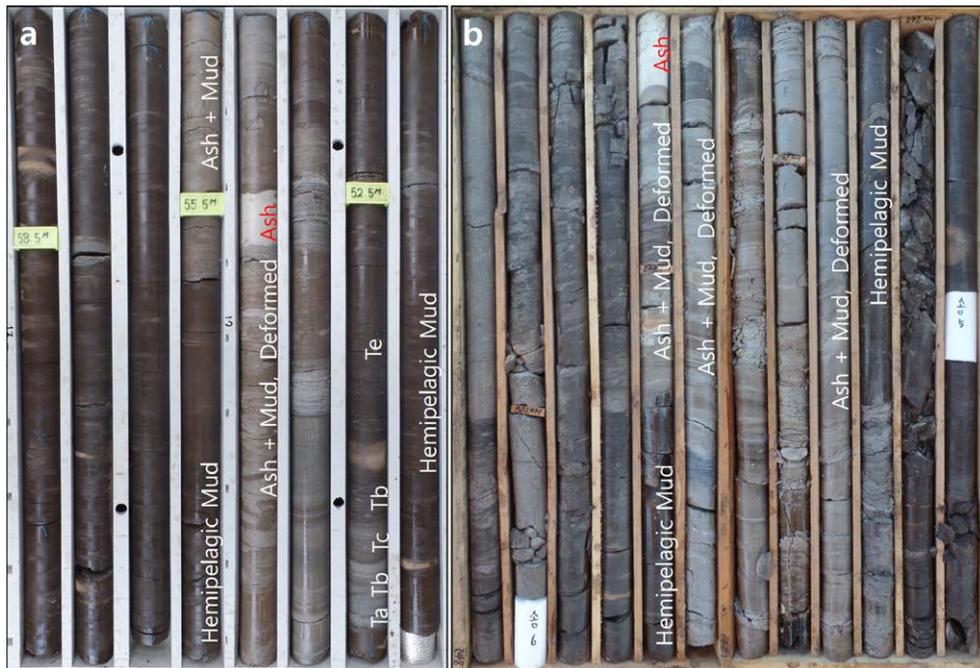


Fig. 11. Photograph of dacitic tuff deposits in PD-2 and TB-2 wells. Some tuff are mixed with hemipelagic mudstone.

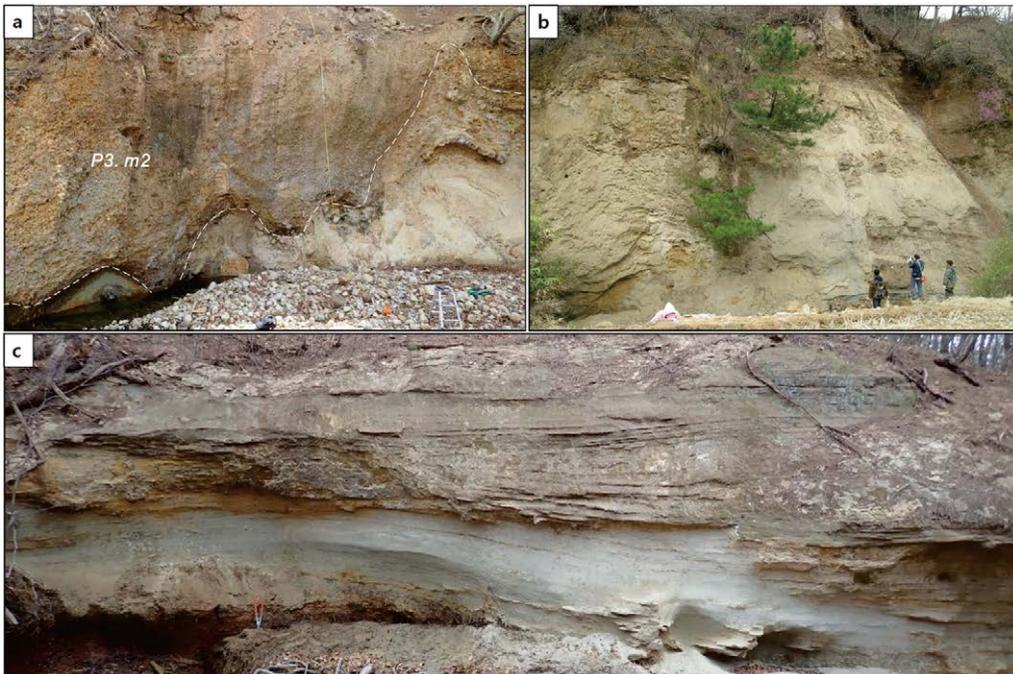


Fig. 12. The 2nd megaturbidite (Unit P3.m2), occurring in outcrops. The megaturbidite is composed of more than 37 m thick gravelstone, sandstone and mudstone in the proximal part (a). In the bottomset, it is composed of more than 25 m thick graded sandstone and mudstone (b). In the prodelta, the sandstone shows a long-wavelength wavy bedding (c), suggesting a supercritical behavior of the giant turbidity current. For location of photograph, see Fig. 1. Blue dotted line in Fig. 1. shows distribution of the 2nd megaturbidite.

명확한 구분을 위해서는 쇄설성 이암 및 얇은 사암의 존재유무를 확인해야 한다. 이 경계는 포항지역 야외노두 일부분에서는 대규모 부정합면으로 나타난다(그림 13b). 즉 하부의 쇄설성 이암 및 얇은 사암은 퇴적동시성 교란을 심하게 받았고 그 상부에 담회색 이암이 놓이는 현상이 자주 나타난다(그림 13b).

시추코아에서도 이 경계는 급격한 암상의 변화로 나타난다. 그러나 분지 동쪽에서 시추된 PYDC공 및 PH-CLH-1, -2, -3공 등에서는 암상의 변화가 매우 점이적으로 두 층의 경계는 확인이 불가능하다(그림 4, 5).

4. 포항분지 사건층서(event stratigraphy)

심부 시추공 대부분은 포항시 인근에 집중되어 있으며, 분지 경계 인근의 말골 선상지 삼각주 지역에 위치한 H-공을 제외한 20개 시추공은 가장 많은

퇴적물을 공급하는 도음산 선상지 삼각주의 영향을 받았다. 이는 선상지 삼각주 분포도(그림 1)에서 대부분의 시추공이 도음산 선상지 삼각주의 꼭지점을 중심으로 방사상의 분포를 보이는 반경 내에 분포하는 점으로도 확인된다. 따라서 심부 시추공의 층서는 도음산 선상지 삼각주의 퇴적단위 경계가 되는 건층을 기준으로 대비하여 시추공의 퇴적단위를 4개로 구분하였고, 각 퇴적단위 내에 분포하는 건층을 기준으로 이를 세분하였다.

4.1 기반암

포항분지 시추코아에서 연일층군의 직하부는 백악기 퇴적암류(B, D, E 공), 백악기 화산암류(A, C, G, PB-2, PH-CLH-1 공), 팔레오세 내지 에오세의 화산암 및 재동된 화산암(H, PH-3, PH-CLH-2 공), 초기 마이오세의 장기분지 퇴적층과 대비되는 데사이트질 화산암을 포함하는 퇴적암(F, PYDC 공), 그

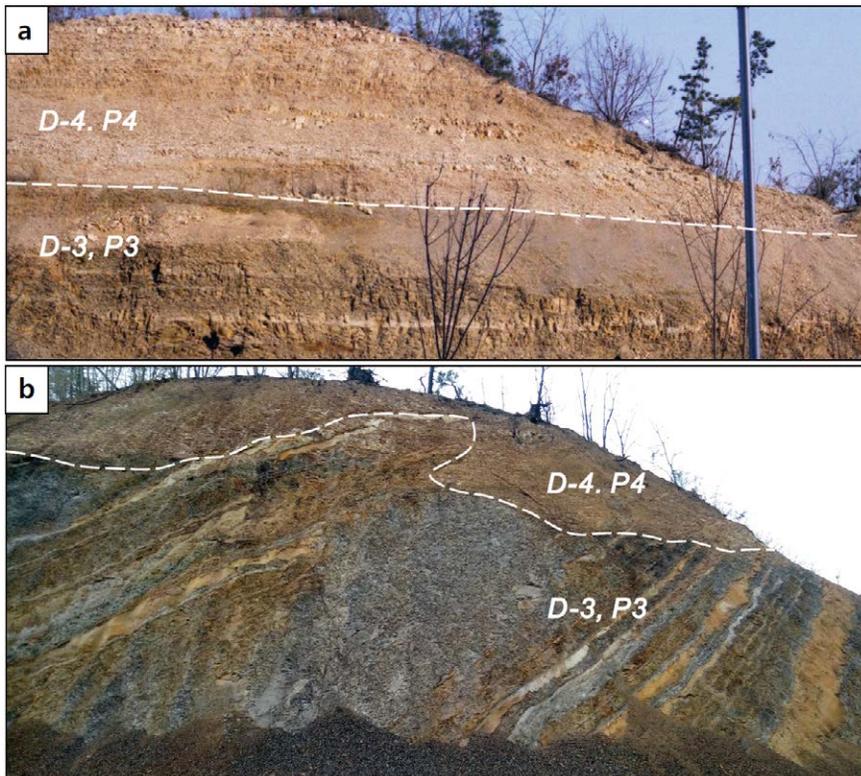


Fig. 13. The boundary between the clastic mudstone and sandstone (Unit D-3; Hunghae Fm.) and diatomaceous mudstone (Unit D-4; Duho Fm.). (a) This boundary is represented by an abrupt change in sedimentary facies from grayish clastic mudstone to pale orange mudstone. (b) In some cases, this boundary occurs as an unconformity, where the underlying unit is represented by chaotic mudstone and sandstone. For location, see Fig. 1.

리고 초기 마이오세로 추정되는 시대 미상의 현무암질 안산암(PH-CLH-3 공)으로 구성되어 있다(그림 3, 4, 5). 심부 시추공(A, B, C 공의 심부)에서는 페름기의 (화강)섬록암과 이를 관입하는 주라기의 각섬석 화강암(Lee *et al.*, 2008)이 분포하며, PYDC 공의 최하부에서는 백악기 말 내지 팔레오세 초기의 불국사 화강암도 나타난다. 특히 데사이트질 화산암을 포함하는 초기 마이오세 퇴적암은 기존 연구에서 연일층군 하부의 천북역암으로 기재된 경우도 있었으며, 일부 고화가 미흡한 백악기 역암은 연일층군 하부의 천북역암(단구리역암)으로 오인하여 분지의 단면도 및 구조도를 작성하기도 하였다(Han *et al.*, 1986; Song *et al.*, 2015).

4.2 포항 퇴적단위 P1(Unit P1)

이 퇴적단위는 기반암 풍화대 상부에 분포하는 분급이 불량한 각력암, 이질 사암, 사질 이암, 탄질 셰일 및 재동된 화산재 퇴적층과 그 상부의 해성 이암으로 구성되어 있다(그림 4, 5). 본 연구에서는 포항 퇴적단위 P1 내에서 해성 이암 하부에 분포하는 각력암 등을 포항 퇴적단위 P1.1, 그 상부의 해성 이암을 포항 퇴적단위 P1.2로 세분하였다. 이 경계는 시추공 각 지점에서 기반암의 고도에 따라 해침이 일어나는 시기가 다르므로, 서로 다른 시기에 형성된 경계면(diachronous boundary)으로 추정된다(표 1).

4.2.1 포항 퇴적단위 P1.1(Unit P1.1)

B-공, D-공, E-공, G-공, H-공, PH-3공 그리고 PH-CLH-2공에서는 다양한 형태의 분급이 불량한 각력암, 이질 사암, 사질 이암, 탄질 셰일 및 화산재 퇴적층이 나타난다(그림 4, 5). B-공에서는 기반암 직상부에 수 개의 상향조립화 경향을 보이는 이질 역암 및 사암 그리고 역질 이암과 토탄층이 18 m 정도 퇴적되어 있다(그림 6b). 사암 및 이암은 재동된 데사이트질 화산재로 구성되어 있다. D-공 및 E-공에서는 기반암 상부에 약 10 m 정도의 두께를 가지는 상향조립화 경향을 보이는 이질 역암, 이질 사암 및 역질 이암과 재동된 화산재 퇴적층이 놓인다. G-공에서도 백악기 화산각력암 상부에 약 4 m 정도의 재동된 화산재 퇴적층이 분포한다(그림 6c).

H-공의 경우 에오세 화산암으로 구성된 기반암 상부에 약 43 m 두께의 각력암, 이질 역암, 역질 이

암이 놓인다(그림 5). 상부구간에서는 이매패류 및 복족류 화석과 함께 상향조립화 경향을 보이는 이질 역암 및 역질 이암이 특징이다(그림 14a, 14b). PH-CLH-2공의 경우 에오세의 화산각력암으로 이루어진 기반암 상부에 약 74 m 정도의 각력암이 놓이며, 그 상부에 해성 이암이 놓인다(그림 14c). 이 각력암은 기존 연구에서 저어콘 SHRIMP 연대측정을 통하여 후기 백악기(71.34±0.85 Ma; KIGAM, 2014)로 확인되어 기반암으로 해석된 바 있으나, 이 각력암 하부에 분포하는 화산각력암은 암상 및 형성 연대가 주변의 곡강동 유문암과 동일한 에오세(49.4±0.37 Ma; KIGAM, 2014)로 측정된 바 있다. 또한 각력암 사이에 이암이 협재하며, 각력의 기질이 이질 사암으로 구성된 점 등으로 보아 포항분지에서 단층면 인근에 분포하는 연일층군의 각력암으로 해석된다. 각력의 조성은 시추공 서측 약 500 m 지점 천마지 인근에 위치한 백악기 화산암과 유사하다(그림 14c).

B-공 및 E-공의 경우 기존 연구에서는 파쇄가 심한 백악기의 역암, 사암 및 이암을 천북역암(혹은 단구리역암)으로 오인하여 기반암의 심도를 각각 875 m 및 874 m로 기재하였으나, 역암의 조성은 각력암으로 이루어진 단층면 인근에서 퇴적된 단구리역암(Yoon, 1975)과는 달리 적색 또는 녹회색을 띠는 원형 내지 아원형의 화산암, 퇴적암 및 화강암으로 구성되어 있다(그림 14d). 또한 일부 구간은 백악기 퇴적암과 유사하게 심하게 고화된 구간도 존재하여 백악기 기반암으로 간주되며, 이에 따라 기반암의 심도를 각각 672.5 m 및 669.0 m로 수정하였다.

기원층서 및 암층서 대비

B, D, E, G-공에서 기반암 직상부에 나타나는 재동된 데사이트질 화산암은 장기분지의 성동리층과 유사하며, 이는 이 퇴적층이 초기 마이오세에 형성되었을 가능성을 제시한다(Sohn *et al.*, 2013; Gim *et al.*, 2016; Gu and Hwang, 2017; Gu *et al.*, 2018; Kim, 2018; Kim and Hwang, 2020). 기반암 상부에 분포하는 상향조립화 경향을 보이는 역질 이암, 탄질 셰일 등은 분급이 불량하며 각형 내지 아각형의 역으로 이루어진 것으로 보아 인근의 고지대에서 침식된 퇴적물이 인근 저지대의 습지 혹은 천해 환경에 퇴적된 것으로 해석된다(그림 15a). 이 퇴적물은 분지 서측 천북역암 하부에서 나타나는 천해로 전진

구축하는 선상지 삼각주와 유사하다. 그러나 분지 내부까지 조립질 퇴적물을 공급하는 대규모의 퇴적물 공급원이 없어 매우 얇은 두께로 퇴적된 것으로 추정된다(그림 15a).

H-공에서 나타나는 43 m 두께의 각력암, 이질 사암, 사질 이암은 시추공에서 약 400 m 서측에 위치한 말골 선상지 삼각주의 최하부(Unit M-1)에서 하성 퇴적물이 분포하며, 그 상부에서는 해저 급경사면에서 퇴적된 역암(Unit M-2)이 확인되는 점으로 보아 분지 경계 인근에서 하성 각력암(Unit M-1)이 퇴적되는 시기에 분지 경계에서 약 400 m 떨어진 지점에서는 천해 환경으로 전진구축하는 퇴적체가 형성된 것으로 추정된다(그림 2a, 3b).

PH-CLH-2공에서 확인되는 약 74 m 두께의 각력암은 시추지점 서측 약 300 m 지점에 전기비저항 탐사 등으로 확인되는 곡강단층(KIGAM, 2014)이 분

포하는 점으로 보아 곡강단층의 서측 고지대에서 공급된 각력암이 곡강단층 동측의 저지대에 퇴적된 것으로 보인다. 이 역암은 육상 노두에서 천북역암 하부의 일부 지역에서 확인되는 각력암(단구리역암; Yoon, 1975)과 유사하다. 따라서 포항 퇴적단위 P1.1은 천북역암(단구리역암, 천북역암층 등; Um *et al.*, 1964; Kim, 1965; Yoon, 1975; Yun, 1986) 하부와 대비될 수 있다.

생층서 및 시층서 대비

포항분지 최하부의 가장 오래된 퇴적층은 유공층, 미소플랑크톤, 연체동물 등 고생물학적 연구와 하부 지층의 연대측정을 통해 초기 마이오세 말(17.5 Ma ~ 16.5 Ma)로 해석된 바 있다(Lee and Pouclet, 1988; Kim, W.H., 1990; Ingle, 1992; Yi and Yun, 1995; Kim, J.M., 1999). 이 시기는 동해의 확장이 가속화



Fig. 14. (a) Coarsening-upward trend of muddy sandstone and breccia, just above the basement (Paleocene to Eocene lapilli tuff) of H-well. (b) Gastropoda fossil in the lowest part of H-well, (c) Breccia in the lowest part of PH-CLH-2 well. Previous studies interpreted this interval as Cretaceous basement (KIGAM, 2014). However, intercalating muddy sandstone and mud matrix in the breccia suggest that this interval was deposited during the Miocene. (d) Cretaceous conglomerate, sandstone and mudstone around 730 m interval of B-well. Previous studies interpreted this interval as a Yeonil Group (Han *et al.*, 1986). However, brownish mudstone and rounded clasts as well as locally lithified units suggest that this interval is a Cretaceous sedimentary rock.

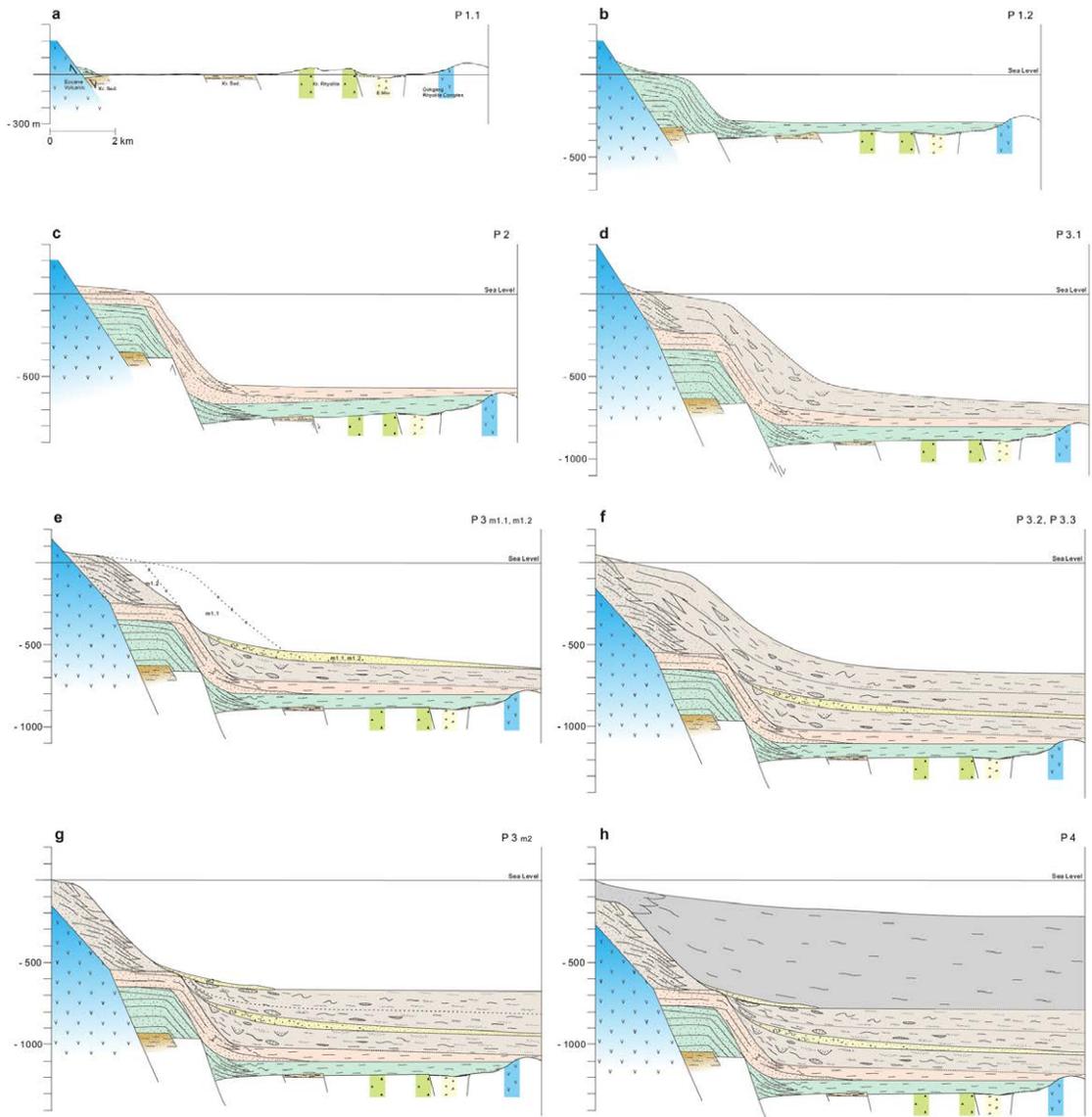


Fig. 15. Evolution of Pohang Basin with time (cross-section A-A'), based on correlation of key beds in 21 exploratory wells and outcrop sections. (a) Stage P1.1 : Formation of alluvial fans in the western boundary of the basin, and erosion of basement highs and deposition of swamp deposits in the basin center, (b) Stage P1.2 : Progradation of Gilbert-type fan deltas in the western boundary of the basin and deposition of hemipelagic mudstone in the basin center, (c) Stage P2 : Rapid subsidence of the basin and formation of large-scale truncation surface in the western part of the basin and deposition of a group of sandstone in the basin center. Continuous supply of coarse clastic sediments from the western part resulted in the progradation of Gilbert-type fan deltas. The basin center is, however, draped by hemipelagic mudstone, (d) Stage P3.1 : Progradation of fine-grained fan deltas in the western part of the basin and deposition of hemipelagic mudstone and turbiditic sandstone/mudstone, showing a coarsening-upward trend in the basin center, (e) Stage P3.m1.1, m1.2 : Chaotic resedimentation of the slope and deposition of megaturbidites in the basin center, (f) Stage P3.2, P3.ash, P3.3 : Progradation of fine-grained fan deltas in the western part of the basin and deposition of hemipelagic mudstone, turbiditic sandstone/mudstone and hybrid flow deposits as well as volcanic ash in the basin center, (g) Stage P3.m2 : Chaotic resedimentation of the slope and deposition of 2nd megaturbidite in the basin center, and (h) Stage P4 : decrease in clastic sediment supply and deposition of diatomaceous mudstone.

되면서 해침이 일어난 시기와 유사하다(Otofuji and Matsuda, 1984).

H-공의 최하부에 분포하는 43 m 두께의 각력암, 이질 사암, 사질 이암에는 굴껍질 화석 및 복족류 화석이 분포하며, 이는 초기 마이오세 말에 들어와 해침이 일어나는 시기에 퇴적된 것으로 해석된다(Yoon, 1975). PH-CLH-2공에서 확인되는 약 74 m 두께의 각력암은 곡강단층의 형성과 관련이 있는 것으로 추정된다.

4.2.2 포항 퇴적단위 P1.2(Unit P1.2)

기반암까지 시추된 14개 공에서 이 퇴적단위는 분지경계단층 인근에 시추된 H-공과 PH-3공을 제외한 모든 시추공에서 약 30 ~ 150 m 두께의 두꺼운 이암으로만 구성되어 있다(그림 4, 5). 수 cm 내외의 분급이 불량한 사암이 최하부에 수 매 나타나기도 한다. 암색은 하부에서는 연갈회색(5YR 6/1) 내지 연담회색(5Y 6/1)이나 상부로 갈수록 갈회색(5YR

4/1) 내지 담회색(5Y 4/1)으로 변하여 색상이 점차 짙어지는 양상을 보인다.

H-공에서는 약 67 m 두께의 이암 사이에 이질 기질을 가지는 괴상, 점이층리 및 역점이층리를 보이는 각력암이 분포한다(그림 5). 각력암의 조성은 분지 서측에 분포하는 팔레오세에 형성된 테사이트질 기반암과 유사하며, 에오세의 화산암 및 백악기의 퇴적암도 나타난다. 그 상부에는 121 m 두께의 이암이 분포하며(그림 5), 얇은 각력암이 협재한다. 상부로 가면서 각력암의 두께 및 산출 빈도가 감소하는 경향을 보인다. PH-3공은 기반암 상부에 약 30 m 두께의 퇴적동시성 교란을 심하게 받은 이암, 사암 및 역암이 분포한다(그림 16a). 역의 조성은 이 시추공 하부의 기반암인 에오세의 화산암 및 시추공 서측에 분포하는 안산암질 현무암과 유사하며, 일부 구간에서는 분지 서측에서 확인되는 팔레오세의 테사이트질 화산암으로 구성된 경우도 있다(그림 16b, 16c).

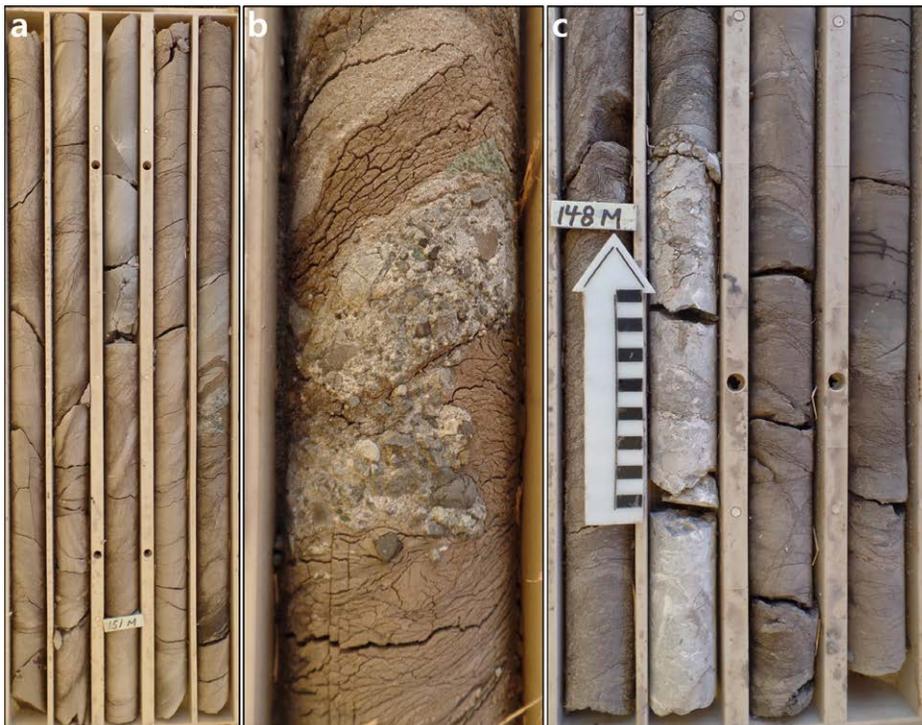


Fig. 16. (a) Chaotic mudstone, sandstone and conglomerate in the lowest 30 m interval of PH-3 well, (b) Conglomerate in 149.7 m depth in PH-3 well. Clasts are composed of Paleocene to Eocene volcaniclastic rock (greenish), Paleocene dacitic tuff (white) and basaltic andesite (black), and (c) Breccia in 147 m depth of PH-3 well, composed of dacitic tuff. The dacitic tuff crops out approximately 1.3 km west of the well location. The lower part of this unit is extensively deformed, whereas the upper part is less well deformed, suggesting a chaotic event (earthquake and tsunami) during the deposition.

기원층서 및 암층서 대비

대부분의 시추공에서 약 30 ~ 150 m 두께의 이암이 분포하며, 이암의 암색이 상부로 갈수록 짙어지는 현상은 분지형성 초기에 분지의 중앙에는 두꺼운 반원양성 이암이 퇴적되었으며, 분지가 점차 침강함에 따라 외해와의 해수 순환이 점차 차단되어 혐기성 환경이 조성되면서 점차 암색이 짙어진 결과로 해석된다(그림 15b). 이와 같은 양상은 분지 서측의 도음산, 덕성 선상지 삼각주 등에서 공급된 조립퇴적물은 주로 분지 경계의 단층면 하반의 깊은 곳에 퇴적되었고 이로 인해 분지 중앙에는 뜬짐으로 운반된 세립 퇴적물만 침전된 결과로 해석된다(그림 15b). 이 퇴적단위는 분지 서측의 도음산 선상지 삼각주에서 분지가 점차 침강하며 천해형 선상지 삼각주에서 길버트형 선상지 삼각주가 발달한 퇴적단위 D-1(Hwang, 1993)과 같은 시기에 퇴적된 것으로 추정된다. 도음산 선상지 삼각주에서 이 시기에 250 m 이상의 천해형 역암 및 사암이 누적되었으며, 덕성 선상지 삼각주에서는 80 m 이상 누적되었다(Hwang, 1993)(그림 15b).

H-공에서 확인되는 이암 및 협재하는 괴상 또는 점이층리를 보이는 각력암은 말골 선상지 삼각주가 해저 급사면에서 퇴적된 시기(Unit M-2)에 사면 하부에 공급된 쇄설류 및 저탁류에 의해 퇴적된 것으로 해석된다(Hwang *et al.*, 1995)(그림 2, 5). 그 상부의 두꺼운 이암과 협재하는 괴상 또는 점이층리를 보이는 각력암은 말골 선상지 삼각주에서 퇴적물 공급량이 급격히 줄어든 시기(Unit M-3)에 퇴적된 것으로 해석된다(Hwang *et al.*, 1995). 말골 선상지 삼각주 상부 퇴적층(Unit M-3)이 도음산 선상지 삼각주와의 경계지점에서 길버트형 선상지 삼각주의 전면층(foreset) (Unit D-2) 하부에 놓이는 점은 이 구간이 포항분지 형성 초기(Stage P1)에 퇴적된 것임을 지시한다(그림 2, 5). 암층서에 의하면 포항 퇴적단위 P1.2는 천북역암(단구리역암, 천북역암층, 서암역암 등; Um *et al.*, 1964; Kim, 1965; Yoon, 1975; Yun, 1986)과 대비된다.

생층서 및 시층서 대비

포항분지 육상 노두에서 이 시기 퇴적층에서는 유공충, 미소플랑크톤, 연체동물 화석 등 다양한 고생물학적 연구가 수행되었다(Kim, 1965; Yoon, 1975; Yun, 1990; Paik *et al.*, 1995). 기존 연구에 따르면 이

지역은 담수와 기수의 영향을 받는 얇은 바다였고, 퇴적 시기는 초기 마이오세 말(17.5 ~ 16.5 Ma)로 해석된 바 있다(Lee and Pouclet, 1988; Kim, W.H., 1990; Ingle, 1992; Yi and Yun, 1995; Kim, J.M., 1999). Kim (1999)은 B-공의 600 m ~ 590 m 구간에서 저서성 유공충과 부유성 유공충에 대한 연구를 통해 퇴적 시기를 초기 마이오세 말(16.5 Ma)로 추정하였다. 사권층서에 따른 본 연구에서는 B-공의 퇴적단위 P1.1과 P1.2의 경계를 654.2 m, 그리고 퇴적단위 P1과 P2의 경계는 578.3 m 심도로 설정하였다(그림 8). 따라서 포항 퇴적단위 P1.2의 상부구간(600 ~ 590 m)에서 채취한 시료에서 초기 마이오세 말(16.5 Ma)로 추정하는 시기는 기존의 고생물학적 연구결과(17.5 Ma ~ 16.5 Ma)와도 일치한다. 또한 B-공의 이 구간에서는 두꺼운 이암만 분포하고 두께 수 mm 내외의 얇은 사암은 2매 밖에 확인되지 않는 점으로 보아(그림 8) 분지 서측에서 저탁류 등에 의해 이전 시기에 퇴적된 사암/이암이 재동되어 퇴적되었을 가능성도 매우 희박하다.

4.3 포항 퇴적단위 P1과 P2의 경계(Unit P1, P2 boundary)

도음산 선상지 삼각주에서 천해 환경에서 퇴적된 상향조립화 경향을 보이는 역암 및 사암(Unit D-1)과 시추공에서 두꺼운 이암 사이에 나타나는 사암 균집은 퇴적이 일어나는 중, 분지 내부에서 단층운동에 의한 급격한 침강이 일어났음을 지시한다(그림 15c). 즉, 분지 형성 초기에 분지 경계단층 인근에서는 대규모 침강이 일어나면서 조립 퇴적물은 단층면 인근의 상반에 집중되어 퇴적되고 분지 내부에는 조립질 퇴적물이 공급되지 못하여 세립질 퇴적물만 공급된다(Heller *et al.*, 1988). 시추공에서 확인되는 퇴적단위 P1.2에서 사암이 거의 없는 두꺼운 이암만 퇴적된 점(그림 8)은 분지경계단층의 지속적인 침강에 의해 조립 퇴적물이 공급되지 못한 것으로 보인다. 분지 내부에서 단층운동으로 대규모 침강이 일어난 후 단층면의 불안정한 퇴적물은 재동되었다. 야외노두에서 남북으로 1.5 km 이상 연장되고 높이가 150 m 이상인 점을 고려하면 이 시기에 재동된 퇴적물은 1억 m³ 이상이 될 것으로 추정된다. 재동된 퇴적물은 대부분이 단층면 인근의 상반에 퇴적되었고 일부 사암, 실트암 및 이암은 분지 내부로 이동되어 두꺼운 이암 사이에 분포하는 사암 균집의 형

태로 퇴적된 것으로 추정된다(그림 8, 15c). 분지 침강 이후에도 조립질 퇴적물은 침강지 상반의 깊은 곳에서만 퇴적되고 분지 내부에는 두꺼운 이암(퇴적단위 P.2)만 퇴적된 것으로 보인다(그림 8, 15c).

B-공에서 퇴적단위 P1과 P2의 경계는 561.5 ~ 578.3 m 구간의 이암 사이에 분포하는 수 mm에서 수십 cm에 이르는 괴상 또는 점이층리를 보이는 사암 및 실트암으로 구성되어 있다(그림 8). Kim (1999)은 B-공 570 m 지점에서 다량으로 산출되는 부유성 유공층을 통하여 퇴적시기를 16.3 Ma로, 540 m 심도는 16.2 Ma로 추정한 바 있다. 따라서 포항분지 내부에서의 급격한 침강은 초기 마이오세 말(16.5 Ma ~ 16.0 Ma)에 일어났을 가능성이 높으며, 이 시기는 일본열도 남서부가 시계방향으로 빠르게 회전하면서 동해가 빠른 속도로 확장한 시기와 일치한다(Otofuji and Matsuda, 1984; Jolivet *et al.*, 1991). 그러나, 570 m 심도 인근에 분포하는 저탁류 사암/이암은 이전 시기에 사면 상부에서 퇴적된 사암/이암이 재동되어 퇴적되었을 가능성도 제시한다.

4.4 포항 퇴적단위 P2(Unit P2)

이 구간은 분지 서측의 기반암 인근에서 시추된 PH-3공을 제외하고는 주로 갈회색(5YR 4/1) 내지 담회색(5Y 4/1)의 이암으로 구성되어 있다(그림 4, 5, 8). 이암 내에는 이매패류 화석, 토탄파편, 성계바늘, 유공층 등의 화석이 흔하며 생교란 흔적도 나타난다. 시추코아에서 이 퇴적단위 상부인 포항 퇴적단위 P3과의 경계는 불명확하다(그림 4, 5, 8). 그러나 시추코아에서 이 경계는 얇은 사암이 출현하기 시작하는 지점의 하부로 추정되며, 이 퇴적단위의 두께는 약 30 ~ 50 m 정도이다(그림 8).

기원층서 및 암층서 대비

이 구간은 도음산 선상지 삼각주에서 길버트형 표면층과 전면층이 형성된 퇴적단위 D-2 구간과 대비된다(그림 3). 도음산 정상 인근의 노두에서는 이 시기에 퇴적된 표면층(topset)이 약 100 m 이상의 두께로 누적된 것이 확인되며, 전면층(foreset)은 분지 동측으로 약 800 m 전진구축하였다(그림 3, 15c). 분지가 급격히 침강하며 길버트형 선상지 삼각주가 형성된 이 시기에 역암 및 사암은 분지 내부에 형성된 단층면 인근의 침강지에 집적되어 분지 내부로

조립질 퇴적물이 공급될 가능성이 매우 낮은 것으로 해석된다. 따라서 이 시기에 퇴적된 질은 암색의 이암은 도음산 선상지 삼각주의 퇴적단위 D-2와 같은 시기에 퇴적된 것으로 추정된다.

암층서에 따르면 포항 퇴적단위 P2는 도음산 선상지 삼각주 인근에서는 천북역암(천북역암층, 서암역암 등)과 대비되며, 남측의 말골 선상지 삼각주 인근에서는 흥해층(이동층, 대곡층 등), 매산 선상지 삼각주 인근에서는 천북역암, 북쪽의 덕성 선상지 삼각주에서는 학전층(학림층, 송학동층 등)과 대비된다(Um *et al.*, 1964; Kim, 1965; Yoon, 1975; Yun, 1986).

생층서 및 시층서 대비

Kim (1999)은 B-공에서 유공층 연구를 통하여 540 m 심도를 16.2 Ma, 510 m 심도를 ~16 Ma로 추정한 바 있다. B-공에서 퇴적단위 P2가 퇴적된 구간은 515 ~ 561.5 m이며, 이 구간 내에서는 2 mm 내외의 실트암이 1 매 밖에 관찰되지 않는 점(그림 8)으로 보아 대부분의 이암은 반원양성 침전으로 형성되어 저탁류에 의해 오래된 하위지층이 침식되어 재퇴적된 것은 아닌 것으로 보인다. 따라서 퇴적단위 P2는 초기 마이오세 말(16.5 Ma ~ 16.0 Ma)에 형성되었을 가능성이 높다.

4.5 포항 퇴적단위 P2와 P3의 경계(Unit P2, P3 boundary)

이 경계는 도음산 선상지 삼각주에서 역암이 90% 이상인 조립질 전면층과 이암이 우세한 세립질 전면층 사이에 매우 급격한 퇴적상 변화로 나타난다(Hwang, 1993; Hwang *et al.*, 1995)(그림 9). 이 경계면은 분지 서측에서 구조운동이 일어나 역암의 공급량이 급격히 줄어들어 형성된 것으로 해석된다(Hwang, 1993; Hwang *et al.*, 1995).

이 경계는 시추공에서는 뚜렷하지 않으나 저탁류에 의해 퇴적된 사암층이 출현하는 심도로 추정된다. 그러나 분지 내부까지 저탁류 사암이 공급되기 위해서는 분지 서측 도음산 선상지 삼각주에서 표면층, 전면층 및 기저층에 세립질 퇴적물이 충분히 누적되어야하므로 분지 내부의 시추공에서는 저탁류 사암이 첫 출현하는 지점보다 하부에 위치하는 두꺼운 이암 사이에 이 경계가 위치할 것으로 추정된다(그림 8).

Kim (1999)은 B-공에 대한 유공층 연구를 통해 두꺼운 이암 사이에 사암이 출현하는 500 m 심도의 퇴적층(Unit P3)을 초기 마이오세 말(~16 Ma)로 추정하는 바 있으며, 이암으로만 구성된 540 m 심도의 퇴적물(퇴적단위 P2)도 초기 마이오세 말(16.2 Ma)로 추정하였다. 따라서 분지 서측에서 단층운동 등으로 역암 퇴적물의 공급이 급격히 줄어든 시기는 약 16 Ma로 추정된다.

4.6 포항 퇴적단위 P3(Unit P3)

시추코아에서 이 퇴적단위는 주로 갈회색(5YR 4/1) 내지 담회색(5Y 4/1)의 이암으로 구성되어 있다(그림 4, 5). 이암에는 이매패류 화석, 토탄파편, 성계바늘, 유공충 등의 화석이 흔하며, 생교란흔적도 나타난다. 이 이암은 반원양성 침전에 의해 퇴적된 것이다(Choe and Chough, 1988; Hwang *et al.*, 1995). 협재하는 사암 및 실트암은 두께 수 mm에서 수 m 정도이며, 괴상, 점이층리, 층리, 사층리, 퇴적동시성 교란, 엽리 등을 보인다. 사암 및 실트암 직상부의 이암은 회색(medium gray; N4 ~ N6)을 띤다. 점이층리를 보이는 이 사암/이암은 전형적인 저탁류 퇴적층이다. 이 퇴적단위는 내부에 분포하는 거대저탁류, 화산재 퇴적층 등에 의해 3 개의 퇴적단위로 구분된다.

4.6.1 포항 퇴적단위 P3.1(Unit P3.1)

이 퇴적단위는 분지 서측의 기반암 인근에서 시추된 PH-3공을 제외하고는 주로 갈회색(5YR 4/1) 내지 담회색(5Y 4/1)의 이암으로 구성되어 있다(그림 4, 5). 얇은 괴상 내지 점이층리를 보이는 사암이 협재하며, 사암의 두께 및 산출 빈도는 상부로 가면서 증가하는 경향을 보인다. 시추공에서는 두꺼운 이암 사이에 수 cm 내지 수십 cm 두께의 사암 수매가 상향조립화 내지 상향세립화 경향을 보이며 분포하기도 한다.

기원층서 및 암층서와 대비

이 퇴적단위에서 전반적으로 사암의 두께 및 산출 빈도가 상부로 갈수록 증가하는 점은 분지 서측의 세립질 선상지 삼각주가 지속적으로 전진구축하였음을 지지하고, 수 매의 얇은 사암층이 상향조립화 내지 상향세립화 경향을 보이는 점은 분지 서측

의 세립질 선상지 삼각주에서 소규모의 하도/로브가 단속적으로 발달하는 동안 분지 내부에서는 수매의 얇은 사암이 로브를 형성하였음을 지지한다(그림 15d). 도음산 선상지 삼각주에서 이와 같은 하도/로브형 사암 및 이암이 퇴적된 시기는 퇴적단위 D-3(Unit D-3)에 해당된다(Choe, 1990; Hwang *et al.*, 1995). 말골 선상지 삼각주, 덕성 선상지 삼각주는 이 시기에 들어와 퇴적물 공급이 줄어들어 분지 내부에 조립질 퇴적물을 공급하지 못하였다. 매산 선상지 삼각주에서는 퇴적물이 지속적으로 공급되어 화강암 거력(Unit MS-1)이 북쪽의 덕성 선상지 삼각주의 이암/사암층(Unit DS-3) 상부에 놓이고, 남쪽의 도음산 선상지 삼각주와의 경계에서는 세립질 전면층(Unit D-3) 상부에 분포한다.

이 퇴적단위는 도음산 선상지 삼각주 인근에서 기존 암층서의 학림층(학전층, 송학동층 등)과 대비된다(Um *et al.*, 1964; Kim, 1965; Yoon, 1975; Yun, 1986). 도음산 선상지 삼각주 남측의 말골 선상지 삼각주 및 북쪽의 덕성 선상지 삼각주에서는 흥해층(이동층, 대곡층 등)과 유사한 시기에 퇴적된 것으로 추정된다. 그러나 매산 선상지 삼각주는 이 시기에도 지속적으로 화강암 거력이 공급되었으므로 매산리 인근에서는 천북역암이 퇴적된 시기보다도 대비된다.

생층서 및 시층서 대비

이 시기의 퇴적층에 해당되는 육상의 학림층(학전층, 송학동층 등)과 흥해층(이동층, 대곡층)에서는 유공충, 화분포자, 규조류, 규질 편모충류, 나뭇잎 등의 다양한 화석에 대한 고생물학 연구가 수행되었으며, 퇴적 시기는 중기 마이오세로 해석된 바 있다(Tateiwa, 1924; Kim, 1965; Yoo, 1969; Yoon, 1975; Yun, 1981; Bong, 1982, 1985; Chun *et al.*, 1983; You, 1983; Lee, 1986; Kim, 1990). Kim (1999)은 B-공에서 유공충 분석을 통하여 510 m 심도를 초기 마이오세 말(~16 Ma), 420 m 심도를 중기 마이오세 초(15.27 Ma)로 추정하였다. B-공에서 퇴적단위 P3.1이 퇴적된 구간은 445.1 m에서 515 m 심도에 해당되므로(그림 8)로 이 구간이 퇴적된 시기는 초기 마이오세 말에서 중기 마이오세 초(16 Ma ~ 15 Ma)일 가능성이 높다.

4.6.2 거대저탁류 퇴적층(Unit P3.m1.1 & P3.m1.2)

포항분지 대부분의 시추공에서 확인되는 이 거대

저탁류 사암/이암은 현재 시추공에서 확인된 부피가 1.2 km³이며, 시추가 이루어지지 않은 지역까지 포함하고 압밀작용을 고려하면 퇴적당시에 약 3 ~ 5 km³ 이상의 재동된 것이다. 이는 이 거대저탁류가 퇴적될 당시 도음산 선상지 삼각주의 표면층과 전면층에서는 현재 노두에서 확인되는 퇴적층보다 훨씬 두꺼운 역암, 사암 및 이암이 퇴적되었던 것으로 추정된다(그림 15e). 대규모의 지진 등에 의해 거대저탁류(Unit P3.m1.1)가 형성되었고, 두께 30 cm 내외의 얇은 반원양성 이암이 퇴적된 후, 침식면의 불안정한 퇴적물은 다시 재동되어 또 다른 거대저탁류(Unit P3.m1.2)가 퇴적된 것으로 보인다(그림 15e).

Kim (1999)은 유공층 연구를 통하여 B-공의 510 m 심도를 ~16 Ma, 420 m 심도를 15.27 Ma, 410m 심도를 15.2 Ma로 추정한 바 있다. B-공에서 퇴적단위 P3.m1.1과 P3.m1.2가 출현하는 구간은 428.5 m에서 445.2 m 심도에 위치하므로 이 거대저탁류 사암/이암은 중기 마이오세 초(15.5 Ma ~ 15 Ma)에 퇴적된 것으로 추정된다. 그러나 이 구간은 저탁류에 의해 이동된 이암도 분포하여, 이전 시기에 사면 상부에서 퇴적된 유공층이 재동되어 퇴적되었을 가능성도 배제할 수 없다. 이 시기는 일본열도 남서부가 시계방향으로 빠르게 회전하면서 동해가 빠른 속도로 확장하는 동안 분지 인근에서 대규모의 지진으로 포항분지 내에는 거대저탁류가 퇴적된 것으로 추정된다(Otofujii and Matsuda, 1984; Jolivet *et al.*, 1991).

PSG-1 및 PSG-2공의 거대저탁류 사암에서 104개의 저어콘에 대하여 SHRIMP 연대측정결과 초기 에오세 ~ 후기 백악기, 초기 백악기 피크가 확인되며, 초기 마이오세(18.3±1.4 Ma)에 해당되는 저어콘도 1개가 확인된다(그림 17). 이는 대부분의 사암이 도음산 선상지 삼각주 서측의 초기 에오세 ~ 후기 백악기의 화산암류 및 초기 백악기의 퇴적암류에서 기원하였으며, 장기분지에서 확인되는 초기 마이오세의 화산암류는 포항분지 중앙에 공급되지 못하였음을 의미한다. 초기 마이오세를 지시하는 1개의 저어콘은 오차범위가 넓으나 이 거대저탁류는 최소 18 Ma 이후에 이동된 것임을 지시한다(그림 17).

4.6.3 포항 퇴적단위 P3.2(Unit P3.2)

시추공에서 이 퇴적단위는 거대저탁류 퇴적층(Unit P3.m1.1, m1.2)과 그 상부의 화산재 퇴적층(Unit

P3.ash) 사이에 분포하는 90~150 m 두께의 이암과 그 사이에 분포하는 사암으로 구성되어 있다(그림 4, 5). 이암은 (연)갈회색(5YR 4/1 ~ 5YR 6/1) 혹은 (연)담회색(5Y 4/1 ~ 5Y 6/1)을 띠며 조개껍질, 성게바늘, 나뭇잎 파편, 유공층 등 다양한 화석이 분포한다. 단괴형 혹은 층리를 따라 발달한 탄산염 교결이 흔하며, 반원양성 침전에 의해 퇴적된 것으로 해석된다(Choe and Chough, 1988). 사암 및 실트암은 괴상 혹은 점이층리를 보이며, 두께는 수 mm에서 수 m에 이르기기도 한다. 점이층리 사암 및 실트암 상부에는 회색(N5 ~ N4) 이암이 놓이며, 이는 저탁류 퇴적층으로 해석된다. 일부 사암층은 수 매가 반복되며 상향조립화 내지 상향세립화 경향을 보인다. 이는 하도의 말단에서 형성된 로브 퇴적체로 해석된다(Choe and Chough, 1988). 이 퇴적단위에는 뜰어울림 이암편을 다량으로 함유한 이질 사암 내지 이질 역암이 모든 시추공에서 수 매 분포하며, 이는 혼합류(hybrid flow; Haughton *et al.*, 2003, 2009; Talling *et al.*, 2004, 2012; Amy *et al.*, 2009; Talling, 2013)에 의해 퇴적된 것으로 해석된다. 이 퇴적단위의 두께는 분지 동쪽으로 가면서 전반적으로 감소하는 경향을 보인다(그림 4, 5).

기원층서 및 암층서 대비

이 퇴적단위의 두꺼운 이암 사이에 상향세립화 내지 상향조립화 경향을 보이는 사암체는 도음산 선상지 삼각주의 퇴적단위 D-3 시기에 해저사면(slope apron) 환경에서 퇴적된 로브형 사암 및 이암 교호층과 유사하다(Choe and Chough, 1988).

이 퇴적단위는 기존 암층서에서 기재된 흥해층(이동층, 대곡층, 학전층; Um *et al.*, 1964; Kim, 1965; Yoon, 1975; Yun, 1986)과 대비된다. 그러나 도음산 선상지 삼각주와 매산 선상지 삼각주가 교호하는 매산리 인근에서 이 시기에 퇴적된 이암 및 사암 교호층(흥해층) 상부에 천북역암으로 기재된 화강암 거력으로 구성된 퇴적층(Unit M-1)이 놓이는 점으로 보아 이 퇴적단위는 기존 암층서의 천북역암과도 대비된다.

생층서 및 시층서 대비

육상의 흥해층(이동층, 대곡층)에서 다양한 화석에 대한 고생물학 연구가 수행되었으며, 퇴적 시기는

중기 마이오세로 해석된 바 있다(Tateiwa, 1924; Kim, B.K., 1965; Yoo, 1969; Yoon, 1975; Yun, 1981; Bong, 1982, 1985; Chun *et al.*, 1983; You, 1983; Lee, 1986; Kim, W.H., 1990). Kim (1999)은 B-공에서 유공층 분석을 통하여 410 m 심도를 중기 마이오세 초(15.2 Ma), 340 m 심도를 중기 마이오세(15 Ma), 330 m 심도를 중기 마이오세(14.9 Ma)로 추정하였다. B-공에서 퇴적단위 P3.2가 퇴적된 구간은 321.3 ~ 428.5 m에 해당되므로 이 구간이 퇴적된 시기는

중기 마이오세(~15 Ma)로 추정된다. 그러나 이 구간은 저탁류 또는 혼합류 등에 의해 이전 시기에 천해 또는 사면 상부에서 퇴적된 사암 및 이암이 재동되어 퇴적된 저탁류 사암/이암 및 혼합류 역질이암이 연일층군 내에서 가장 많은 구간으로 15 Ma 이후에 퇴적되었을 가능성도 배제할 수 없다.

4.6.4 데사이트질 화산재(Unit P3.ash)

백색 내지 유백색을 띠는 데사이트질 화산재 퇴

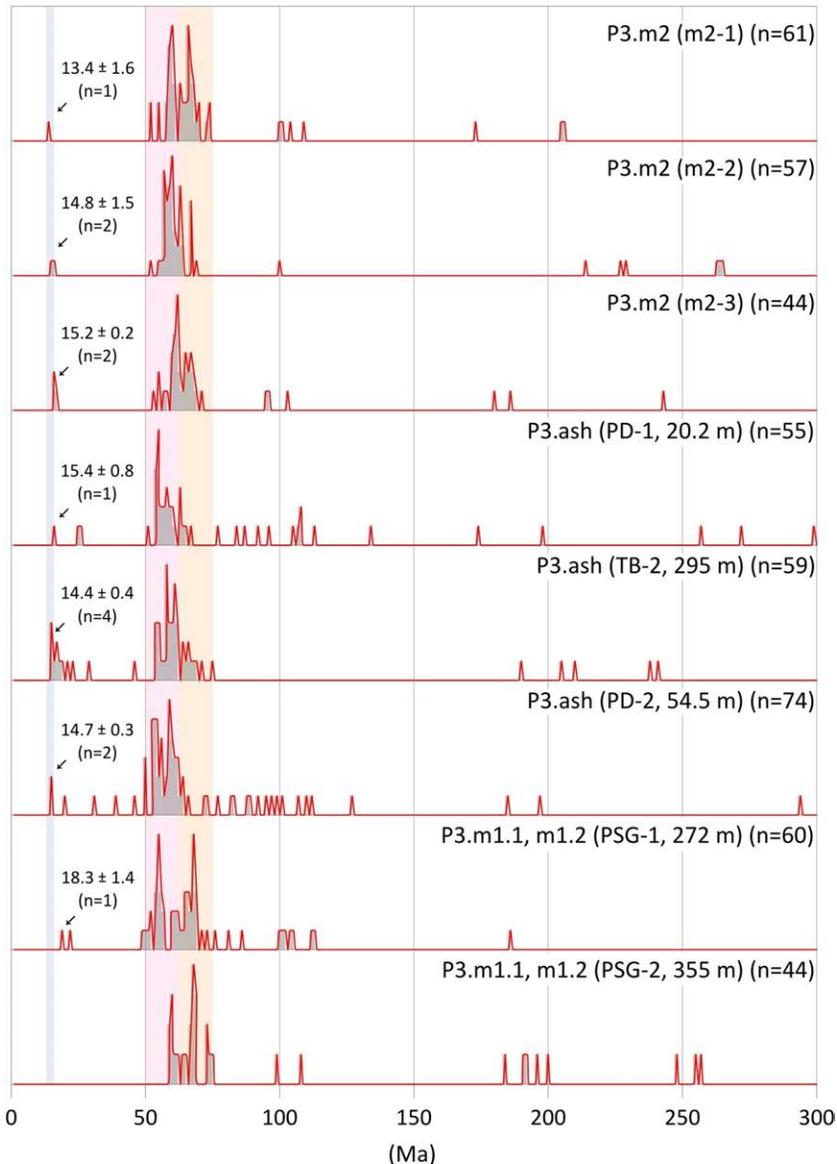


Fig. 17. Probability curve of zircon SHRIMP ages in exploratory wells and outcrops.

적층은 포항분지 시추공 대부분에서 확인된다(그림 4, 5, 10). 이 화산재 퇴적층 중 3개 시추공(PD-1, PD-2, TB-2 공)에서 188개의 저어콘에 대한 SHRIMP 연대측정 결과 중기 마이오세, 초기 마이오세, 팔레오세에서 에오세 및 백악기의 피크가 확인되며, 7개의 저어콘은 중기 마이오세(14.4±0.4 Ma ~ 15.4±0.8 Ma)를 지시한다(그림 17).

4.6.5 포항 퇴적단위 P3.3(Unit P3.3)

이 구간은 약 100 ~ 150 m 두께의 두꺼운 이암이 특징이다. 담갈색 내지 갈회색을 띠며, 상부로 갈수록 암색이 열리는 경향을 보인다(그림 4, 5). 토탄 파편, 조개껍질화석, 성게바늘, 유공충 등 다양한 화석이 나타나며, 일부 이암은 탄산염에 의해 교결되어 단괴형 혹은 층리형태로 나타난다. 생교란 흔적 화석도 흔하다. 이암 사이에는 수 mm에서 수 m 두께를 가지는 괴상 또는 점이층리를 보이는 실트암 내지 사암이 분포한다. 실트암과 사암은 저탁류에 의해 이동된 것으로 해석된다. 실트암과 사암은 이 구간의 상부로 갈수록 두께 및 산출 빈도가 감소하여 전반적인 상향세립화 경향을 보인다(그림 4, 5, 15f). 암색이 상부로 가면서 점차 열리는 양상은 분지가 점차 융기하거나 해수면이 하강하면서 외해와의 순환이 양호해졌다는 것을 의미하며, 상향세립화 경향은 분지 서측에서 퇴적물의 공급량이 점차 감소하였음을 지시한다. 일부 시추코아에서는 수 m에서 수십 m 두께의 퇴적동시성 교란을 보이는 이암 및 사암이 흔하며, 이는 사태에 의해 형성된 것으로 해석된다.

기원층서 및 암층서 대비

이 구간에서 나타나는 전반적인 상향세립화 경향은 도음산 선상지 삼각주에서 퇴적단위 D-3가 퇴적되던 시기에 형성된 사암 및 이암과 유사하다(Hwang, 1993; Hwang *et al.*, 1995). 육상 노두에서 퇴적동시성 교란이 가장 심한 이인리 지역의 동측에서 시추된 PSG-2공의 경우 퇴적동시성 교란을 받은 구간이 수 m 나타나며(그림 4), 이 역시 도음산 선상지 삼각주의 퇴적단위 D-3 구간과 유사하다(그림 15f). 매산 선상지 삼각주의 경우 퇴적단위 MS-1 시기에 퇴적된 화강암 거력퇴적층(천북역암) 상부에 상향세립화 경향을 보이는 이암 및 사암 구간(Unit MS-2)이 나타나며, 이 구간에 대규모 사태에 의한 습곡 및 역

단층이 확인되는 점도 이 퇴적단위의 형성시기가 퇴적단위 MS-2가 퇴적된 시기와 유사한 것으로 추정된다(Hwang, 1993, Hwang *et al.*, 1995; Hwang and Chough, 2000). 또한 이 퇴적단위는 기존 암층서의 흥해층(이동층, 대곡층 등) 상부 구간에 대비된다(Um *et al.*, 1964; Kim, 1965; Yoon, 1975; Yun, 1986).

생층서 및 시층서 대비

이 구간에 해당되는 육상 노두의 흥해층(이동층, 대곡층)에서도 다양한 화석에 대한 고생물학 연구가 수행되었으며, 퇴적 시기는 중기 마이오세로 해석된 바 있다(Tateiwa, 1924; Kim, B.K., 1965; Yoo, 1969; Yoon, 1975; Yun, 1981; Bong, 1982, 1985; Chun *et al.*, 1983; You, 1983; Lee, 1986; Kim, W.H., 1990). Kim (1999)은 B-공에서 유공충 분석을 통하여 330 m, 250 m, 180 m, 190 m 심도를 14.9 Ma, 14.5 Ma, 14.1 Ma, 14.06 Ma로 추정한 바 있다. B-공에서 퇴적단위 P3.3가 퇴적된 구간은 158.5 ~ 317 m에 해당되므로 이 퇴적단위는 중기 마이오세(15 Ma ~ 14 Ma)로 추정된다. 그러나 이 퇴적단위에서도 중력류에 의해 이동된 사암, 실트암 및 이암이 다양으로 분포하므로 도음산 선상지 삼각주의 사면 상부에 분포하던 하위지층이 재동되어 분지 내부에 퇴적되었을 가능성이 있다. 또한 이 시기는 기존의 고생물학적 연구보다 오래되었다.

하위지층인 테사이트질 화산재 퇴적층(Unit P3.ash)에서 7개의 저어콘 SHRIMP 연대측정 결과(14.4±0.4 Ma ~ 15.4±0.8 Ma)와 상위지층인 2차 거대저탁류 퇴적층(Unit P3.m2)에서의 5개의 저어콘 연대측정 결과(13.4±1.6 Ma ~ 15.2±0.2 Ma)를 고려하면 분지 주변부에서 화산분출은 약 14 Ma 시기에 일어났을 가능성이 높다(그림 17). 테사이트질 화산재(Unit P3.ash) 상부에 이암 및 사암이 100 ~ 150 m 두께로 퇴적된 점을 고려하면 이 퇴적단위는 13 Ma 이후까지 퇴적되었을 가능성도 있다.

4.6.6 2차 거대저탁류 퇴적층(Unit P3.m2)

포항분지 육상에 분포하는 이 거대저탁류는 길버트형 선상지 삼각주 전면층(Unit D-2, Unit P2) 직상부에서는 37 m 이상의 역암, 사암 및 이암으로 구성되어 있으며, 분지 동쪽의 분지저 환경에서는 규

조질 이암(Unit D-4, Unit P4)의 약 10 m 하부에 6 m 두께의 사암 및 이암으로 나타난다. 이는 퇴적단위 P3.3 퇴적시기 마지막에 들어와 도음산 선상지 삼각주의 전면층에서는 퇴적단위 P3.1, P3.2, P3.3 시기에 퇴적된 대부분의 퇴적물이 재동되어 분지저 환경으로 이동되었음을 의미한다(그림 15g). 이 사암에서 저어콘 SHRIMP 연대측정 결과 초기 에오세 ~ 후기 백악기 및 초기 백악기의 피크가 확인되며, 중기 마이오세(13.4±1.6 Ma ~ 15.2±0.2 Ma)를 지지하는 저어콘 입자도 5개가 확인된다. 따라서 2차 거대저탁류 퇴적층은 약 13 Ma 이후에 이동된 것으로 추정된다.

4.7 포항 퇴적단위 P3와 P4의 경계(Unit P3, P4 경계)

포항분지의 야외노두에서 확인되는 이 경계는 기존 암층서의 이동층(학전층, 흥해층)과 두호층(포항층) 경계에 해당된다(Um *et al.*, 1964; Kim, 1995; Yoon, 1975; Yun, 1986; Choe and Chough, 1988). 시추공에서 퇴적단위 P3와 P4의 경계가 분지 동측에서 점이적인 점은 분지 서측의 주요 퇴적물 공급지에서 쇄설성 퇴적물의 공급이 서서히 감소하였고, 구조질 퇴적물이 점차 증가한 것으로 해석된다. 그러나 분지 중앙의 시추공에서는 이 경계가 급격하며, 분지 서측의 노두에서 부정합면도 나타나는 점은 구조질 이암이 퇴적되는 도중 분지 서측에서 대규모의 사태가 일어났음을 의미한다.

4.8 포항 퇴적단위 P4 (Unit P4)

시추공에서 이 퇴적단위는 연담회색(5Y 6/1)을 띠는 이암으로 구성되어 있으며 상부로 갈수록 연황갈색(10YR 5/2)을 띠는 구간이 많아진다(그림 4, 5). 사암은 거의 분포하지 않으며, 생교란 흔적, 조개파편 등의 화석이 나타난다. 이 구간은 분지의 서측에서 시추된 B-공, E-공, F-공, PYDC공, TB-2공, PH-CLH-1, -2, -3공 등 8개 공에서 확인된다. 이 이암은 주로 구조질 이암으로 구성되어 있으며, 하부의 사암이 협재된 쇄설성 이암과는 점이적인 경계를 가지고 있다. 이 이암은 구조류와 쇄설성 이질 퇴적물이 반원양성 침전을 통해 형성된 것이다(그림 15h).

기원층서 및 암층서 대비

이 이암은 도음산, 덕성, 매산 선상지 삼각주의 최

상위구간(Units D-4, DS-4, MS-4)과 대비된다. 기존 암층서에서는 두호층(포항층 등; Um *et al.*, 1964; Kim, 1995; Yoon, 1975; Yun, 1986; Choe and Chough, 1988)과 동일하다.

생층서 및 시층서 대비

Lee *et al.* (1991)은 포항분지의 서암역암층 최상부와 이동층 최상부의 규질화석에 대한 연구를 통해 퇴적시기를 중기 마이오세(14.5 Ma ~ 11.5 Ma)에 해당되는 것으로 해석한 바 있으며, Yi and Yun (1995)은 미소플랑크톤 연구를 통해 포항분지 육상 노두에서 가장 젊은 층은 12 Ma 인 것으로 해석한 바 있다. 이는 포항 퇴적단위 P4는 중기 마이오세 후반부(13 Ma 이후 ~ 11.5 Ma)에 퇴적되었을 가능성을 지시한다.

5. 결론 : 분지형성 및 퇴적과정

1970년대 이후 포항분지에서 시추된 21개 코아에서 분지 전반에 걸친 수직, 수평적 암상변화, 화산재 및 거대저탁류 퇴적체 등을 열쇠층으로 시추공 간 대비를 수행하였다. 또한 육상 노두에서 확인되는 건층과도 대비하여 포항분지 연일층군의 사건층서를 정립하였다. 노두와 시추공에서 확인되는 열쇠층을 기준으로 포항분지의 퇴적사를 4개의 퇴적시기로 구분하였고(Stage P1 ~ P4), 각 시기의 퇴적물은 분지 전반에 걸쳐 대비되는 열쇠층을 기준으로 세분하였다.

1) 분지형성 초기(Stage P1)에는 폐름기의 (화강) 섬록암, 주라기의 각섬석 화강암, 백악기의 퇴적암 및 화성암, 팔레오세 및 에오세의 화산암 그리고 초기 마이오세의 화산 퇴적암 등으로 구성된 기반암 상부에 습지 및 천해 환경 또는 단층에 인근지역에 퇴적된 이질 역암, 사질 이암, 탄질 셰일 및 각력암이 퇴적되었다(Stage P1.1). 이 퇴적단위는 인근 기반암 고지대서 공급된 퇴적물이 저지대에서 퇴적된 것이다. 초기 마이오세 장기층군의 성동리층과 유사한 데사이트질 화산재 퇴적층도 얇게 분포한다. 분지가 지속적으로 침강하며 해침이 일어났고, 분지 서측에는 두께 250 m 정도의 천해형 선상지 삼각주가 형성되었다(Stage P1.2). 분지 서측의 하천에서 공급된 역암 및 사암은 분지 내부까지 공급되지 못하여 분지 내부의 시추공에서는 30 ~ 150 m 두께의 암회색

의 반원양성 이암이 퇴적되었다. 분지가 지속적으로 침강함에 따라 해수의 순환이 원활하지 못하여 이암의 암색은 상부로 갈수록 짙어지는 경향을 보인다. 퇴적 시기는 초기 마이오세 말(17.5 Ma ~ 16.5 Ma)로 추정된다.

2) 두 번째 시기(Stage P2)에 들어와 분지 내부에서는 단층작용에 의한 급격한 침강이 일어났다. 도음산 및 덕성 선상지 삼각주에서는 Stage P1 시기에 퇴적된 길버트형 선상지 삼각주 표면층을 절단하며 그 상부에 Stage P2 시기의 길버트형 전면층이 퇴적되는 양상을 보인다. 단층면의 불안정한 역암 및 사암은 재동되어 대부분 단층면 상반 인근의 침강지에 퇴적되었으며, 일부 사암은 분지 내부로 이동되어 두꺼운 이암 사이에 분포하는 얇은 사암군집의 형태로 나타난다. 도음산 선상지 삼각주에서는 조립질 퇴적물의 공급이 지속되어 역암으로 이루어진 표면층이 약 100 m 이상의 두께로 퇴적되었고 전면층은 약 800 m 정도 전진구축하였다. 덕성 선상지 삼각주에서는 퇴적물 공급량이 점차 줄어들어 이 시기 퇴적물은 상향세립화 경향을 보인다. 반면 분지 내부에서는 30 ~ 50 m 두께의 반원양성 이암만 퇴적되었다. 퇴적 시기는 초기 마이오세 말(16.5 Ma ~ 16.0 Ma)로 추정된다.

3) 세 번째 시기(Stage P3)에 들어와 분지 서측에서 조립질 퇴적물의 공급이 급격히 감소하였으며, 이에 따라 조립질 길버트형 선상지 삼각주(Stage P2) 상부에 세립질 선상지 삼각주(Stage P3)가 퇴적되었다. 세립질 선상지 삼각주의 불안정한 사면에서는 사태가 자주 일어났으며, 분지 내부에서는 반원양성 이암 사이에 저탁류 사암/이암이 점차 증가하였다. 이로 인해 시추코아에서는 약 100 m 두께의 상향조립화 경향을 보이는 사암 및 이암 퇴적층이 확인된다(Stage P3.1). 이후 대규모의 지진에 의해 분지 서측의 세립질 선상지 삼각주 퇴적물 대부분이 재동되며 분지 내부에는 2 ~ 18 m 이상의 두께를 가지는 거대저탁류 사암/이암이 퇴적되었다(Stage P3.m1.1). 불안정한 사면은 다시 재동되어 1 ~ 2 m 두께의 저탁류 사암/이암이 분지 전반에 걸쳐 퇴적되었다(Stage P3.m1.2). 이후 불안정한 사면에서 재동된 세립퇴적물은 혼합류(hybrid flow)형태로 분지 내부에 공급되어 이질 역암이 퇴적되었으며, 이는 약 90 ~ 130 m 두께의 반원양성 이암 및 저탁류 사암/이암과 교

호한다(Stage P3.2). 분지 주변부에서 일어난 화산활동으로 분지 전반에 걸쳐 데사이트질 화산재(Stage P3.ash)가 침전되었으며, 일부는 재동되어 반원양성 이암과 교호하기도 한다. 이후 분지 서측에서 공급되는 조립질 퇴적물은 점차 감소하여 저탁류에 의해 운반된 사암/이암이 점차 감소하였으며, 이에 따라 분지 내부에는 약 100 ~ 200 m 두께의 상향세립화 경향을 보이는 사암 및 이암이 퇴적되었다(Stage P3.3). 이 시기 후반부에 들어와 쓰나미에 의해 형성된 것으로 추정되는 2차 거대저탁류 퇴적층이 육상 노두에서 확인된다(Stage P3.m2). 분지 서측의 사면 환경에서 Stage 3에 퇴적된 대부분의 퇴적물은 재동되어 이 거대저탁류 퇴적층은 Stage P2 시기에 퇴적된 조립질 전면층 직상부에 놓이고, 분지 동쪽의 분지저 환경에서는 후기에 퇴적된 구조질 이암층(Stage P4) 약 10 m 하부에 분포한다. Stage 3의 퇴적시기는 중기 마이오세(16 Ma ~ 13 Ma 이후)로 추정된다.

4) 분지형성 마지막 시기(Stage P4)에는 분지 서측에서 공급되는 쇄설성 퇴적물의 공급이 줄어들어 분지 내부에는 두꺼운 구조질 이암이 퇴적되었다. 분지 서측에서 Stage P3와 Stage P4의 경계는 급격한 쇄설성 퇴적물 및 사암의 감소와 구조질 이암의 급격한 증가로 특징지어지며, 일부 지역에서는 하부의 사암 및 이암이 사태로 인해 심하게 교란되어 부정합면으로 나타나기도 한다. 그러나 분지 동측의 시추공에서는 이와 같은 급격한 암상의 변화가 확인되지 않으며, 쇄설성 이암이 점차 구조질 이암으로 변하여 그 경계를 확인하기 힘들다. 퇴적시기는 중기 마이오세 말(13 Ma 이후 ~ 11.5 Ma)로 추정된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 '국내 대륙붕 3차원 석유시스템 평가 및 세일가스전 EGR+ 원천기술 개발(21-3311)'과 에너지기술평가원의 '육상 중소규모 천부가스전 탐사 및 활용기술 개발(20-4804)' 과제의 일환으로 수행되었다. PYDC공의 기재를 허락해 주신 공주대학교 권이균 교수님, BH공의 기재를 허락해 주신 한국지질자원연구원 심지충연구센터의 송윤호 박사님 및 이태중 박사님, PH-CLH공과 TB공의 기재를 허락해 주신 한국지질자원연구원 CO2지중저장연구단의 박권규 박사님, PH공의 기

재를 허락해 주신 연세대학교 우남철 교수님과 포항공과대학교의 이윤수 교수님, 그리고 PD공의 기재를 허락해주신 한국가스공사 박승수 박사님께 감사를 드립니다. 아울러 본 논문을 심사해 주시면서 세심한 부분까지 지적해 주신 두 분의 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Amy, L.A., Peachey, S.A., Gardiner, A.A. and Talling, P.J., 2009, Prediction of hydrocarbon recovery from turbidite sandstones with linked-debrite facies: Numerical flow-simulation studies. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 2032-2043.
- Bong, P.Y., 1982, Palynology and stratigraphy of Yeonil-Dongsanri area. Report on Geoscience and Mineral Resources, Korea Institute of Energy and Resources, 13, 7-18 (in Korean with English abstract).
- Bong, P.Y., 1985, Palynology and stratigraphy of the Neogene strata in the Pohang sedimentary basin. Unpublished Ph.D. thesis. Seoul National University, 219 p.
- Cheon, Y., Son, M., Song, C.W., Kim, J.S. and Sohn, Y.K., 2012, Geometry and kinematics of the Ocheon Fault System along the boundary between the Miocene Pohang and Janggi basins, SE Korea, and its tectonic implications. *Geosciences Journal*, 16, 253-273.
- Choe, M.Y., 1990, Submarine depositional processes of the Doumsan Fan-Delta system, Miocene Pohang Basin, Southeast Korea. Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, 287 p.
- Choe, M.Y. and Chough, S.K., 1988, The Hunghae Formation, SE Korea: Miocene debris aprons in a back-arc intra-slope basin. *Sedimentology*, 35, 239-255.
- Chough, S.K. and Hwang, I.G., 1997, The Duksung fan delta, SE Korea; growth of delta lobes on a Gilbert-type topset in response to relative sea-level rise. *Journal of Sedimentary Research*, 67, 725-739.
- Chun, H.Y., Lee, H.Y., Bong, P.Y. and Baek, I.S., 1983, Biostratigraphical study of Pohang Basin (northern part of the Hyungsan river). Report Geoscience and Marine Resource, Korea Institute of Energy and Resources, 7-29.
- Gim, J.H., Jeong, J.O., Ghim, Y.S., Gu, H.C. and Sohn, Y.K., 2016, Depositional environments and processes of the subsurface dacitic volcanoclastic deposits in the Miocene Janggi Basin, SE Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 775-798 (in Korean with English abstract).
- Gu, H.C., Gim, J.H. and Hwang, I.G., 2018, Variation in depositional environments controlled by tectonics and volcanic activities in the lower part of the Seongdongri Formation, Janggi Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 54, 21-46 (in Korean with English abstract).
- Gu, H.C. and Hwang, I.G., 2017, Depositional history of the Janggi Conglomerate controlled by tectonic subsidence, during the early stage of Janggi Basin evolution. *Journal of the Geological Society of Korea*, 53, 221-240 (in Korean with English abstract).
- Han, J.H., Kwak, Y.H. and Son, J.D., 1986, Tectonic evolution and depositional environments of the Tertiary sedimentary basin, southeastern part of Korea. Report R-86-2-(B)-4, Korea Institute of Energy and Resources, Seoul, 109 p.
- Haughton, P.D., Barker, S.P. and McCaffrey, W.D., 2003, 'Linked' debrites in sand-rich turbidite systems-origin and significance. *Sedimentology*, 50, 459-482.
- Haughton, P., Davis, C., McCaffrey, W.D. and Barker, S., 2009, Hybrid sediment gravity flow deposits-classification, origin and significance. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 1900-1918.
- Heller, P.L., Angevine, C.L., Winslow, N.S. and Paola, C., 1988, Two-phase stratigraphic model of foreland-basin sequences. *Geology*, 16, 501-504.
- Hong, S.W., Chough, S.K. and Hwang, I.G., 1998, Provenance of coarse-grained detritus in fan-delta systems, Miocene Pohang Basin, SE Korea: Implications for boundary fault movements. *Geosciences Journal*, 2, 46-58.
- Hwang, I.G., 1993, Fan-Delta Systems in the Pohang Basin (Miocene), SE Korea. Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, 923 p.
- Hwang, I.G. and Chough, S.K., 2000, The Maesan fan delta, Miocene Pohang Basin, SE Korea: Architecture and depositional processes of a high-gradient fan-delta-fed slope system. *Sedimentology*, 47, 995-1010.
- Hwang, I.G., Chough, S.K., Hong, S.W. and Choe, M.Y., 1995, Controls and evolution of fan delta systems in the Miocene Pohang Basin, SE Korea. *Sedimentary Geology*, 98, 147-179.
- Ingle, Jr. J.C., 1992, Subsidence of the Japan Sea: Stratigraphic evidence from ODP sites and onshore sections. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127-128, 1197-1218.
- Jolivet, L., Huchon, P. and Brun, J.P., 1991, Arc deformation and marginal basin opening: Japan Sea as a case study. *Journal of Geophysical Research*, 96, 4367-4384.
- Kanehara, K., 1936, Geological study of northern Yeongil Kun, N. Kyeongsan Province, Korea. *Japanese Journal of the Geological Society of Japan*, 13, 73-103.
- KIGAM, 2014, Characterization of storage strata and de-

- velopment of basis design technology for demonstration of CO₂ geological storage. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, GP2012-030-2014(2), 441 p (in Korean with English abstract).
- Kim, B.K., 1965, The stratigraphic and paleontologic studies on the Tertiary (Miocene) of the Pohang area, Korea. Seoul National University, Journal of Science and Technology Series, 15, 32-121.
- Kim, I.-S., 1992, Origin and tectonic evolution of the East Sea (Sea of Japan) and the Yangsan fault system: A new synthetic interpretation. Journal of the Geological Society of Korea, 28, 84-109 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.M., 1999, Early Neogene biochemostratigraphy of Pohang Basin: a paleoceanographic response to the early opening of the Sea of Japan (East Sea). Marine Micropaleontology, 36, 269-290.
- Kim, J.W. and Chough, S.K., 2000, A gravel lobe deposit in the prodelta of the Doumsan fan delta (Miocene), SE Korea. Sedimentary Geology, 130, 183-203.
- Kim, M.-C., 2018, Characteristics of basin fills and structural evolution of the Early Miocene Janggi Basin, SE Korea. Ph.D. thesis, Pusan National University, 229 p (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-C., Kim, J.-S., Jung, S., Son, M. and Sohn Y.K., 2011, Classification and stratigraphy of the Miocene basin fills in the northern area of the Janggi-myeon, Pohang, SE Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 47, 585-612 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.H. and Hwang, I.G., 2020, Depositional history of the upper part of the Seongdongri Formation, Janggi Basin, controlled by tectonics and volcanic activity. Journal of the Geological Society of Korea, 56, 285-310 (in Korean with English abstract).
- Kim, W.H., 1990, Significance of early to middle Miocene planktonic foraminiferal biostratigraphy of the E-core in the Pohang Basin, Korea. Journal of the Paleontological Society of Korea, 6, 144-164.
- Lee, J.-S. and Pouclet, A., 1988, The Neogene volcanism of the Pohang basin (SE-Korea), new geochronological constraints for the opening of the Japan Sea. Geodynamics, C.R. Academy of Science, Paris, 307, Series II, 1405-1411.
- Lee, S.G., Lee, T.J. and Shin, H.J., 2008, Rb-Sr age and its geochemical implication of granitoid cores from deep borehole at Pohang area, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 44, 409-423 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.G., 1986, Micropaleontological study of Neogene strata of southeastern Korea and adjacent sea floor. Journal of the Paleontological Society of Korea, 2, 83-113.
- Lee, Y.G., You, H.S. and Koh, Y.K., 1991, Biostratigraphy and paleoenvironment of Yeonil Group in Pohang area. Journal of the paleontological Society of Korea, 7, 32-62.
- Mckenzie, D. and Jackson, J., 1986, A block model of distributed deformation by faulting. Journal of the Geological Society, 143, 349-353.
- Otofujii, Y.I. and Matsuda, T., 1984, Timing of rotational motion of Southwest Japan inferred from paleomagnetism. Earth and Planetary Science Letters, 70, 373-382.
- Paik, K.H., Cheong, H.K. and Baek, D.S., 1995, Miocene foraminifera from the Chumbuk Conglomerate in the Pohang basin, Korea. Journal of the Paleontological Society of Korea, 11, 47-60 (in Korean with English abstract).
- Park, M.E., Cho, H.S., Son, M. and Sohn, Y.K., 2013, Depositional processes, paleoflow patterns, and evolution of a Miocene gravelly fan-delta system in SE Korea constrained by anisotropy of magnetic susceptibility analysis of interbedded mudrocks. Marine and Petroleum Geology, 48, 206-223.
- Sohn, Y.K., Ki, J.S., Jung, S.H., Kim, M.C., Cho, H.S. and Son, M., 2013, Synvolcanic and syntectonic sedimentation of the mixed volcaniclastic-epiclastic succession in the Miocene Janggi Basin, SE Korea. Sedimentary Geology, 288, 40-59.
- Sohn, Y.K., Rhee, C.W. and Shon, H., 2001, Revised stratigraphy and reinterpretation of the Miocene Pohang basinfill, SE Korea: sequence development in response to tectonism and eustasy in a back-arc basin margin. Sedimentary Geology, 143, 265-285.
- Sohn, Y.K. and Son, M., 2004, Synrift stratigraphic geometry in a transfer zone coarse-grained delta complex, Miocene Pohang Basin, SE Korea. Sedimentology, 51, 1387-1408.
- Son, M., Kim, J.-S., Chong, H.-Y., Lee, Y.H. and Kim, I.-S., 2007, Characteristics of the Cenozoic crustal deformation in SE Korea and their tectonic implications. The Korean Journal of Petroleum Geology, 13, 1-16 (in Korean with English abstract).
- Song, C.W., Kim, H.J., Kim, J.S., Kim, M.C. and Son, M., 2015, Stratigraphic Implication of the Daljeon Basalt in the Miocene Pohang Basin, SE Korea. The Journal of the Petrological Society of Korea, 24, 609-735 (in Korean with English abstract).
- Talling, P.J., 2013, Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow: Deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models. Geosphere, 9, 460-488.
- Talling, P.J., Amy, L.A., Wynn, R.B., Peakall, J. and Robinson,

- M., 2004, Beds comprising debrite sandwiched within co-genetic turbidite: origin and widespread occurrence in distal depositional environments. *Sedimentology*, 51, 163-194.
- Talling, P.J., Masson, D.G., Sumner, E.J. and Malgesini, G., 2012, Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types. *Sedimentology*, 59, 1937-2003.
- Tateiwa, I., 1924, 1: 50,000 Geological atlas of Chosen, No. 2, Ennichi, Kuryuho and Choyo sheets. Geological Survey of Chosen (in Japanese).
- Um, S.H., Lee, D.W. and Park, B.S., 1964, Geological Map of Korea, Pohang Sheet (1: 50,000). Geological Survey of Korea, 21 p.
- Yi, S. and Yun, H., 1995, Miocene calcareous nannoplankton from the Pohang Basin, Korea. *Palaeontographica Abteilung B*, 237, 113-158.
- Yoo, E.K., 1969, Tertiary foraminifera from the PY-1 well, Pohang basin, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 5, 269-283.
- Yoon, S., 1975, Geology and paleontology of the Tertiary Pohang Basin, Pohang district, Korea, Part 1. *Journal of the Geological Society of Korea*, 11, 187-214.
- Yoon, S., 1976a, Geology and paleontology of the Tertiary Pohang basin, Pohang district, Korea: Part 2, Paleontology (Mollusca), No. 1, Systematic description of Bivalvia. *Journal of the Geological Society of Korea*, 12, 1-21.
- Yoon, S., 1976b, Geology and paleontology of the Tertiary Pohang basin, Pohang district, Korea: Part 2, Paleontology (Mollusca), No. 2, Systematic description of Scaphopoda and Gastropoda, with descriptions of fossil localities. *Journal of the Geological Society of Korea*, 12, 63-78.
- 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.
- You, H.S., 1983, Biostratigraphy of the Neogene Tertiary deposits, Korea. Unpublished Ph.D. thesis, Seoul National University, 180 p.
- You, H.S., Koh, Y.K. and Kim, J.Y., 1986, A study on the Nannoplankton from the Neogene formation, Pohang, Korea. *Journal of Paleontological Society of Korea*, 2, 137-154.
- Yun, H., 1990, Problems in stratigraphy and paleoecology of the Pohang and the Bomun basin. *Geoyonsei News, Yeonsei University*, 4, 104-108.
- Yun, H.S., 1981, Dinoflagellates from Pohang Tertiary Basin, Korea. *Report Geoscience and Marine Resource, Korea Institute of Energy and Resources*, 11, 5-18.
- Yun, H.S., 1986, Emended stratigraphy of the Miocene Formations in the Pohang Basin, Part 1. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 2, 54-69.

Received : June 3, 2021

Revised : August 4, 2021

Accepted : September 5, 2021