

석회석 자원 탐사 및 개발의 효율성 증대를 위한 통합 층서적 접근

유 인 창

고려대학교 지구환경과학과(inchang@korea.ac.kr)

요 약

비금속 및 금속 광물자원의 탐사는 국가경영에 있어서 절대적으로 필요한 공공의 기반산업에 해당된다. 지금까지 수행되어 왔던 자원 탐사사업의 대부분은 비교적 개발이 용이한 천부 광상들에 집중되어 왔으며, 천부 광상들의 과도한 개발로 인하여 자원 탐사의 범위가 점차 심부화 되고있는 실정이다. 지하 심부에 분포하는 광상들을 효율적으로 탐사해 내기 위해서는 분지 내 심부 퇴적층들에 대한 정밀한 대비와 평가가 요구된다. 그러나, 그 동안 천부 광상들의 평가에 적용되어 왔던 기재적 층서 원리들은 심부에 분포하는 광상들을 도출해 내는데 한계가 있어 왔다. 따라서, 분지 내 퇴적층들에 대한 보다 명확한 이해를 위해 새로운 고해상도의 층서틀 수립이 시급하다. 본 연구에서는 태백산분지 오오도비스 중기 퇴적층들에 대한 통합 층서적 접근을 통하여 고해상도 층서틀 수립에 대한 예를 제시하고자 한다. 이러한 통합 층서적 접근은 퇴적 분지의 지체 구조적 진화에 따른 층서를 규명하는데 있어서 보다 나은 통찰을 제공하고 있으며, 아울러 분지 내 비금속 및 금속 광물자원 탐사 및 개발사업의 효율성을 증대시키는데 사용될 수 있을 것이다. 따라서, 통합 층서적 접근을 통한 퇴적층들에 대한 고해상도 층서틀 수립은 분지 내에 부존 되어 있는 모든 형태의 자원 탐사 및 개발사업에 있어서 성공률을 극대화시킬 수 있는 새로운 층서적 규범으로 강조되어야 한다.

서 론

비금속 및 금속 광물자원의 개발사업은 국가경영에 있어서 절대적으로 필요한 공공의 기반산업에 해당된다. 지금까지 국내·외를 통해 수행되어 왔던 비금속 및 금속 광물자원 개발사업의 대부분을 보면 비교적 탐사가 용이한 지하 천부의 광상들에 집중되어 왔으며, 이들의 집중적인 개발에 따른 신규 매장량 확보를 위해 탐사의 범위가 점차 심부화 되고 있는 실정이다. 그러나, 그 동안 천부에 분포하는 광상들의 개발에 적용되어 왔던 기존의 개념들로는 심부에 분포하는 광상들을 탐사해 내는데 한계가 있어 왔으며, 이들을 효율적으로 탐사해 내기 위해서는 개량된 지질학적 원리를 바탕으로 지하 심부 퇴적층에 대한 보다 정밀한 대비와 해석이 선행되어야 할 것이다. 또한 부존 자원의 평가에 대한 개념도 기존의 유망 구조나 광상별 평가에서 퇴적분지별 평가로 광역화가 필요하며, 퇴적분지별 평가도 1개의 특정 분지만을 한정 조사하는

것으로 완결되는 것이 아니라 광역 지체구조 운동을 근간으로 인접 지역에 분포하는 각 퇴적분지들의 발달사를 상호 비교하여 각 분지 내 퇴적층들의 성인에 대한 시·공간적 관계를 정립함으로써 각 분지별 비금속 및 금속 광물자원의 부존 가능성이 보다 입체적으로 평가될 수 있도록 탐사 전략의 일대 전환이 필요하다.

광역 지체 구조운동과 함께 퇴적분지 발달사의 상호 비교와 분지 내 퇴적층들의 정밀 해석에 따른 분지별 자원 부존 가능성의 입체적 평가는 그 동안 국내·외 자원 탐사사업에 주로 적용되어 왔던 기재적 층서 원리들로는 불가능하며, 1990년 이후 자원 탐사사업에 적용되기 시작하면서 탐사 성공률을 높이는데 있어 괄목할 만한 성과를 거두고 있는 순차 층서학(sequence stratigraphy)이나, 또는 이들을 바탕으로 최근에 새롭게 대두되기 시작한 통합 층서 기술(integrated stratigraphy technology)의 도입이 선행되어야 만이 가능하다. 본 연구에서는 이와 같이 자원 탐사에 있어서 새로운 층서 해석 기법으로 부상하고 있는 통합 층서 기술을 국내의 태백산분지 오오도비스 중기 퇴적층에 실험적으로 적용해 봄으로써 분지 내 비금속 및 금속 광물자원 탐사기술을 더 한층 발전시킬 수 있는 발판을 마련함과 동시에 향후 대한광업진흥공사 주도하에 수행될 국내·외 비금속 및 금속 광물자원 탐사사업의 성공률 증대를 위해 필수적으로 고려되어야 할 새로운 층서적 규범에 대한 예를 제시하고자 한다.

통합 층서 기술(Integrated Stratigraphy Technology)

통합 층서 기술은 석유자원 탐사에 있어서 핵심인 퇴적지질학의 원류에 해당하는 기술로 그 동안 퇴적층들의 동정과 지역간 대비를 위해 독립적으로 발전되어 왔고, 필요에 따라 선택적으로 적용되어 왔던 각각의 기재적 층서 원리(예: 암층서, 생층서, 시층서)들을 하나의 통합된 개념으로 묶어 분지 내 퇴적층들을 보다 정량적으로 해석하려는 시도이며, 분지형성 구조운동, 퇴적작용 및 분지변형 구조운동 등 퇴적층들의 성인에 대한 시·공간상의 대비가 가능토록 고해상도의 층서틀을 제시하기 위한 기술이다.

이러한 통합 층서 기술은 미국 엑슨사(Exxon Exploration & Production)의 층서 연구팀에 의해 지하 심부에 분포하는 퇴적층 대비의 정밀성과 석유자원 탐사 및 개발사업의 성공률을 높이기 위해 제안된 탄성과 층서학이 순차 층서학의 개념으로 발전하면서 시작되었으며, 1990년 순차 층서학의 개념이 본격적으로 석유자원 탐사사업에 적용된 이후 탐사 성공률 제고에 괄목할 만한 성과를 거두고 있다(Weimer and Posamentier, 1993). 그러나 순차 층서학의 개념들은 대체적으로 범 세계적 해수면의 변화가 퇴적 작용을 지배한다는 가정 하에 출발하였기 때문에 해수면 변화에 영향을 덜 받는 심해저 기원의 퇴적층이나 육성 기원의 퇴적층 및 구조운동의 영향을 많이 받는 구조 활성 지역, 또는 화성 활동과 연계된 퇴적 분지들에 대한 적용에 한계가 있어 왔으며, 이러한 적용성의 한계 및 단점들을 극복해 내기 위해 보다 발전된 층서 개

념으로의 통합 층서 기술에 대한 연구가 현재 미국 주요 석유회사 층서 연구실을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 특히, Mobil사의 층서 연구팀은 통합 층서 연구의 일환으로 퇴적층 내에서 산출되는 화석들을 정량적으로 분석하거나, 또는 점토 광물 및 유기 물질의 수직 분포를 지구화학적 방법을 통해 정량적으로 분석, 심해저 기원의 퇴적층이나 구조 활성 지역의 퇴적층들에 대한 통합 층서 기술의 적용 범위를 넓히고 있다(Armentrout, 1996). 이러한 기술 개발의 가시적 효과로 과거의 탐사 개념으로는 자원 부존 가능성이 없거나 희박하다고 판단되었던 지역이나 지하 심부의 퇴적층 내에서 경제성 있는 규모의 광상들을 확보하기 시작하였다.

이와 같이 통합 층서 기술은 퇴적층들을 단순히 퇴적 작용이라는 물리적 현상의 산물로 이해하기보다는 하나의 통합된 체계 속에서 물리·화학·생물학적 현상들의 상호관계에 의해 복합적으로 일어나는 역동적 현상의 산물로 이해하려는 하나의 새로운 층서적 사고의 틀로 퇴적 지질학, 지구화학, 고생물학, 지구물리학 등 다양한 지구과학 분야를 근간으로 에너지 및 비금속·금속광물 자원탐사의 성공률을 높이기 위해 새롭게 부상하고 있는 기술이다.

태백산분지 오오도비스 중기 퇴적층의 통합 층서

층서 개요 및 문제점

강원도 일대의 태백산분지에 분포하는 고생대 퇴적층은 그 동안 지역에 따른 암상 및 화석군의 차이에 따라 두위봉형, 정선형, 평창형 및 영월형으로 구분되어 왔다(그림 1). 태백산분지 백운산 향사대를 따라 분포하는 고생대 퇴적층은 두위봉형으로 선캠브리아기의 기반암을 부정합으로 덮는 캠프로-오오도비스기의 조선누층군과 이를 다시 부정합으로 덮는 석탄기 및 페름기(또는 트라이아스기 초?)의 평안누층군으로 대별된다(그림 1, 2). 총 두께 1,500 m 이상인 두위봉형 캠프로-오오도비스기 조선누층군을 암층서적으로 분류하면 캠브리아기의 삼척층군과 오오도비스기의 상동층군으로 구분되며, 캠브리아기 삼척층군은 하부로부터 장산규암층, 묘봉슬레이트층, 풍촌석회암층(또는 대기층) 및 화절층(세송슬레이트층과 화절층으로 구분하기도 함)으로, 오오도비스기 상동층군은 동점규암층, 두무골세일층, 막골석회암층, 직운산세일층 및 두위봉석회암층으로 세분된다(그림 2).

암층서적 분류에 따른 두위봉형 조선누층군은 각 암층서 단위층들의 접촉관계가 상당히 점이적이기 때문에 캠프로-오오도비스기 동안 연속적으로 퇴적된 하나의 정합적인 퇴적체로 해석되어져 왔다. 또한 이들의 암상이 수직 층서상 규암, 세일, 석회암 또는 세일, 석회암 등과 같이 규칙적으로 반복되는 양상을 보이고 있으며(그림 2), 구조 운동 등에 기인한 급격한 횡적 상변화가 인지되지 않기 때문에 두위봉형 조선누층군은 대륙 지각 내 천천히 침강하는 탄산염 대지 위에 해수면의 반복적인 상승과 하강에 따른 연속적인 퇴적사를 기록하는 것으로 해석되어져 왔다(Cheong, 1969).

석회석 자원 탐사 및 개발의 효율성 증대를 위한 통합 층서적 접근
유인창

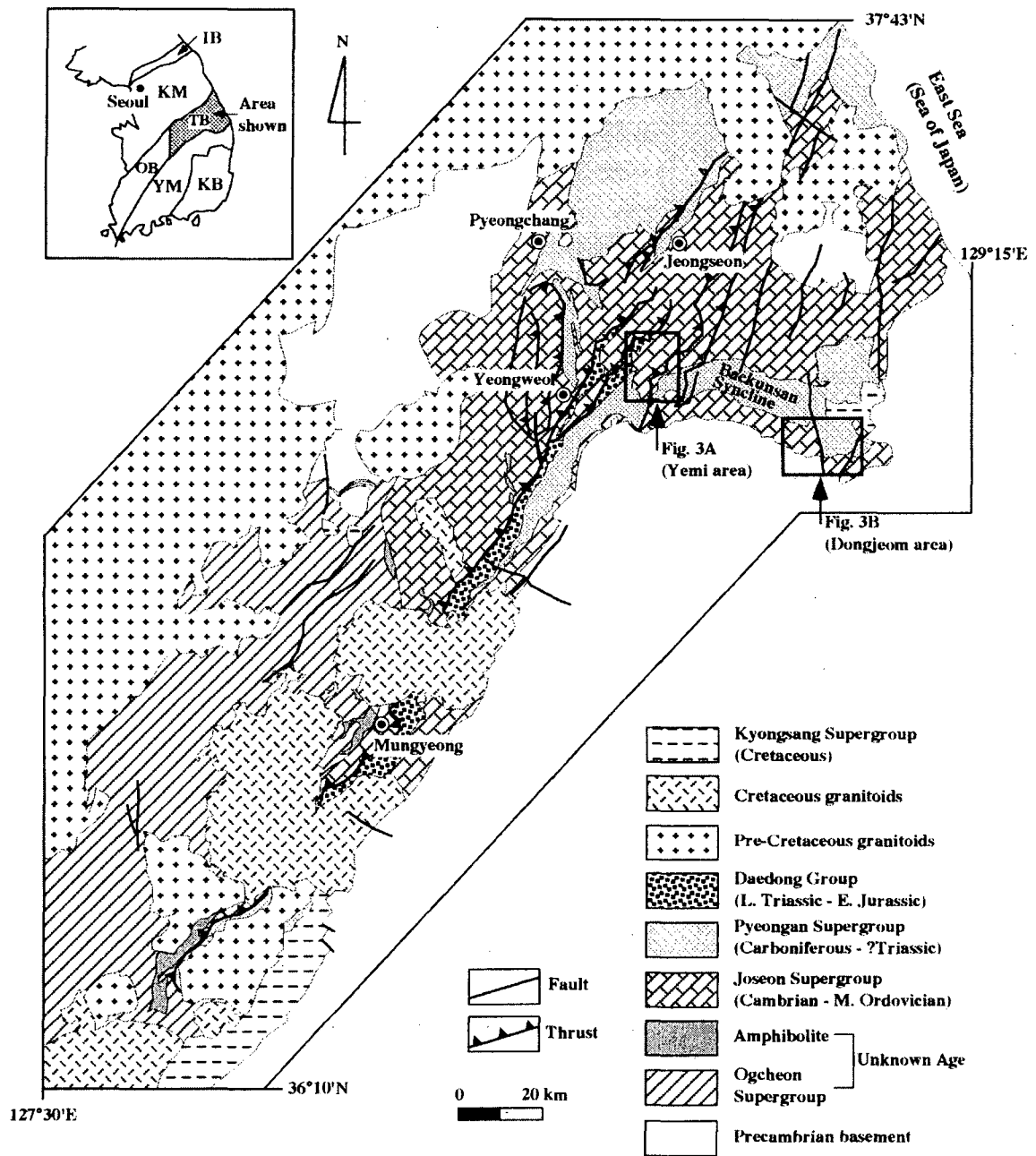


Fig. 1. Geologic map of the Taebaeksan Basin. The study areas include northwestern (Yemi area) and southeastern (Dongjeom area) limbs of the Backunsan Syncline. Abbreviations in the index map: IB = Imjingang Belt; KM = Kyonggi Massif; TB = Taebaeksan Basin; OB = Ogcheon Basin; YM = Yongnam Massif; KB = Kyongsang Basin.

이와 같이 암층서 단위층들이 수직 층서상 주기적으로 반복되어져 나타나는 특징은 그 동안 태백산분지 캄브로-오오도비스기 퇴적층들의 동정 및 인접 지역과의 대비를 위한 기준이 되어 왔으며(정창희 외, 1973), 이를 기준으로 지역에 따른 암상 및 화석군의 차이를 기재적 의미로 두위봉형, 정선형, 평창형 및 영월형 등으로 구분하여 왔다(그림 1). 그러나, 수직 층서상 반복되어 나타나는 암상의 주기성을 기준으로 하는 퇴적층의 동정 및 대비는 공간상에서 일어날 수 있는 퇴적 작용의 다양성을 간과하고 있기 때문에, 분지 전반에 걸쳐 일어나는 퇴적 양상 및 층서 관계 등, 실체적 분지 발달사를 연구하는데 있어 하나의 문제점으로 지적되어 왔다(Wilgus et al., 1988; Van Wagoner et al., 1990). 최근에 제기된 태백산분지 고생대 퇴적층들의 층서 및 퇴적작용에 관한 재고찰의 필요성은 바로 이러한 문제점을 반영한 것으로 볼 수 있으며, 기존의 태백산분지 고생대 퇴적층들에 대한 지질학 전반의 연구결과에 심각한 해석적 오류가 있을 수 있음을 시사한(유인창 외, 1997a; 1997b). 아울러, 이와 같은 해석적 오류를 바탕으로 수행되었을 수 있는 태백산분지 내 비금속 및 금속 광물자원의 개발사업 또한 재고되어야 함을 의미한다.

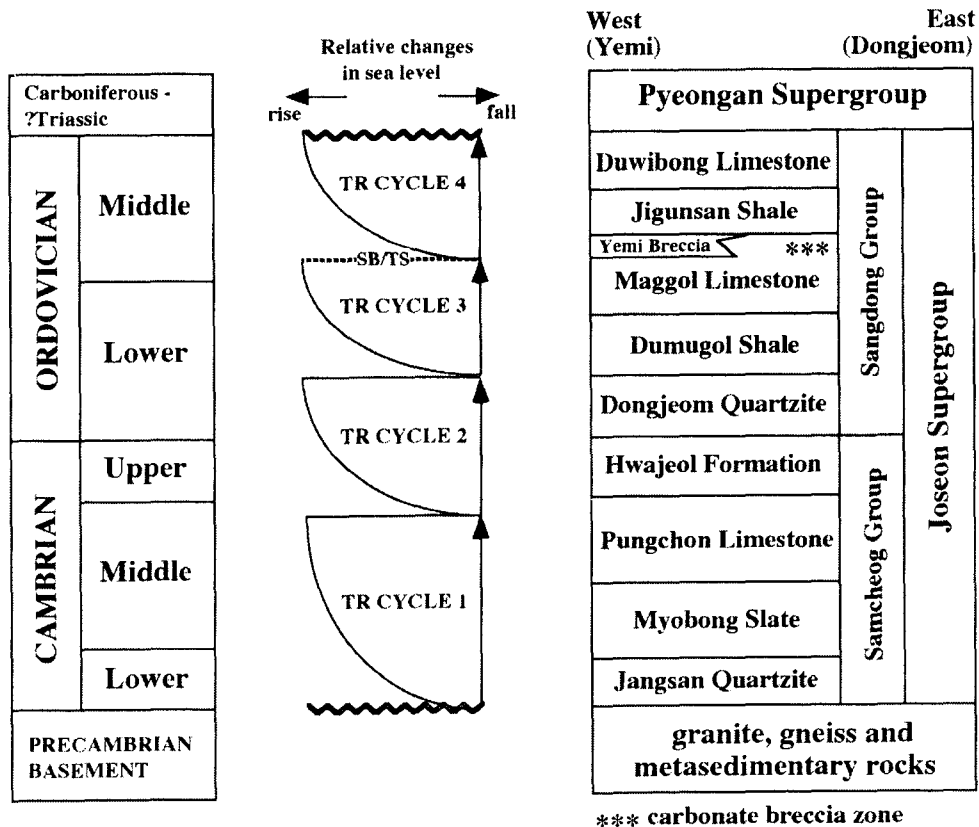


Fig. 2. Lithostratigraphic nomenclature of the Cambro-Ordovician Joseon Supergroup, Backunsan Syncline (Cheong, 1969).

두위봉형 오오도비스 중기 퇴적층의 암층서 및 퇴적환경

본 연구의 대상인 태백산분지 오오도비스 중기의 퇴적층은 막골석회암 상부와 직운산세일 및 두위봉석회암층으로 구성된다(그림 2). 이들 오오도비스 중기 퇴적층은 대체로 동-서 방향의 주향을 따라 30-50° 북경사하여 연구 지역 내에 대상으로 분포한다(그림 3). 400 m 정도의 두께를 가지는 막골석회암층은 주로 판상 및 렌즈상, 또는 괴상의 돌로마이트질 석회암과 돌로마이트로 구성되며, 일부 탄산염 각력암이나 평력암들이 협재한다. 일반적으로 막골석회암의 하부층준은 돌로마이트질 석회암이, 상부층준은 돌로마이트가 우세하게 나타나며, 이러한 돌로마이트질 석회암과 돌로마이트들은 속성작용 초기에 일어난 돌로마이트화 작용에 의한 것으로 해석된다(Paik, 1986). 막골석회암을 정합으로 덮는 30-40 m 두께의 직운산세일층은 주로 괴상의 흑색 세일로 구성되어 있으며 상부로 갈수록 단괴상 세일로 전이한다(그림 4). 직운산세일층을 정합으로 덮는 두위봉석회암층은 두위봉형 조선누층군의 최상부층으로 60-100 m 정도의 두께를 보이며, 석탄기-페름기 평안누층군에 의해 부정합으로 덮인다(그림 2). 두위봉석회암층은 주로 담회색의 괴상 또는 생쇄설성 석회암으로 이루어져 있으며 평력암 및 단괴상 또는 석회질 세일들이 협재한다.

Paik(1987)은 막골석회암층 내에 발달하는 퇴적 구조와 암상을 바탕으로 막골석회암층의 퇴적 환경을 탄산염 대지로 해석하였으며, 막골석회암층 하부층준에는 조하대 환경이 우세하게 나타나나, 상부로 갈수록 조상대의 환경으로 전이되는 해퇴상의 수직층서를 보인다고 하였다. 막골석회암층을 정합으로 덮는 직운산세일층은 주로 괴상의 흑색 세일로 구성되어 있기 때문에 아직까지 퇴적상에 대한 연구가 진행된 바는 없으나, 암상만을 기준으로 깊은 조하대에서 퇴적된 것으로 이해되어져 왔다. 한편 Lee(1988) 및 Hyeong(1990)은 직운산세일층을 정합으로 덮는 두위봉석회암층에서 8개의 퇴적상을 인지하고 수직 층서상 두위봉석회암층이 비교적 깊은 조하대로부터 폭풍 퇴적물이 우세한 얕은 조하대를 거쳐 조간대에 이르는 환경 하에서 퇴적되었던 것으로 해석하였다. 따라서 태백산분지의 오오도비스 중기 동안의 퇴적 작용은 막골석회암층이 조하대 퇴적상으로부터 조간대를 거쳐, 조상대의 퇴적상으로 전이되고, 직상부의 깊은 조하대의 직운산세일층에 의해 정합으로 덮이며 이를 다시 얕은 조하대를 거쳐 조간대 퇴적상으로 전이되는 두위봉석회암층이 정합으로 덮고 있기 때문에, 수직 층서상 해퇴에 이은 해침과 또 한번의 해퇴를 기록하는 연속적인 퇴적 윤회로 해석되어져 왔다(Paik, 1985, 1987; Woo and Park, 1989).

최근 Ryu(2002)는 동점 지역에 분포하는 막골석회암층의 정밀 기재를 바탕으로 5가지 형태의 5차 단위 상향천심화 순차층(fifth-order shallowing-upward cycle)들을 구분해 내고, 이들을 다시 4차 단위의 순차층으로 묶어 중부 및 상부 막골석회암층을 5개의 단위층(I-V)으로 세분하였다(그림 4).

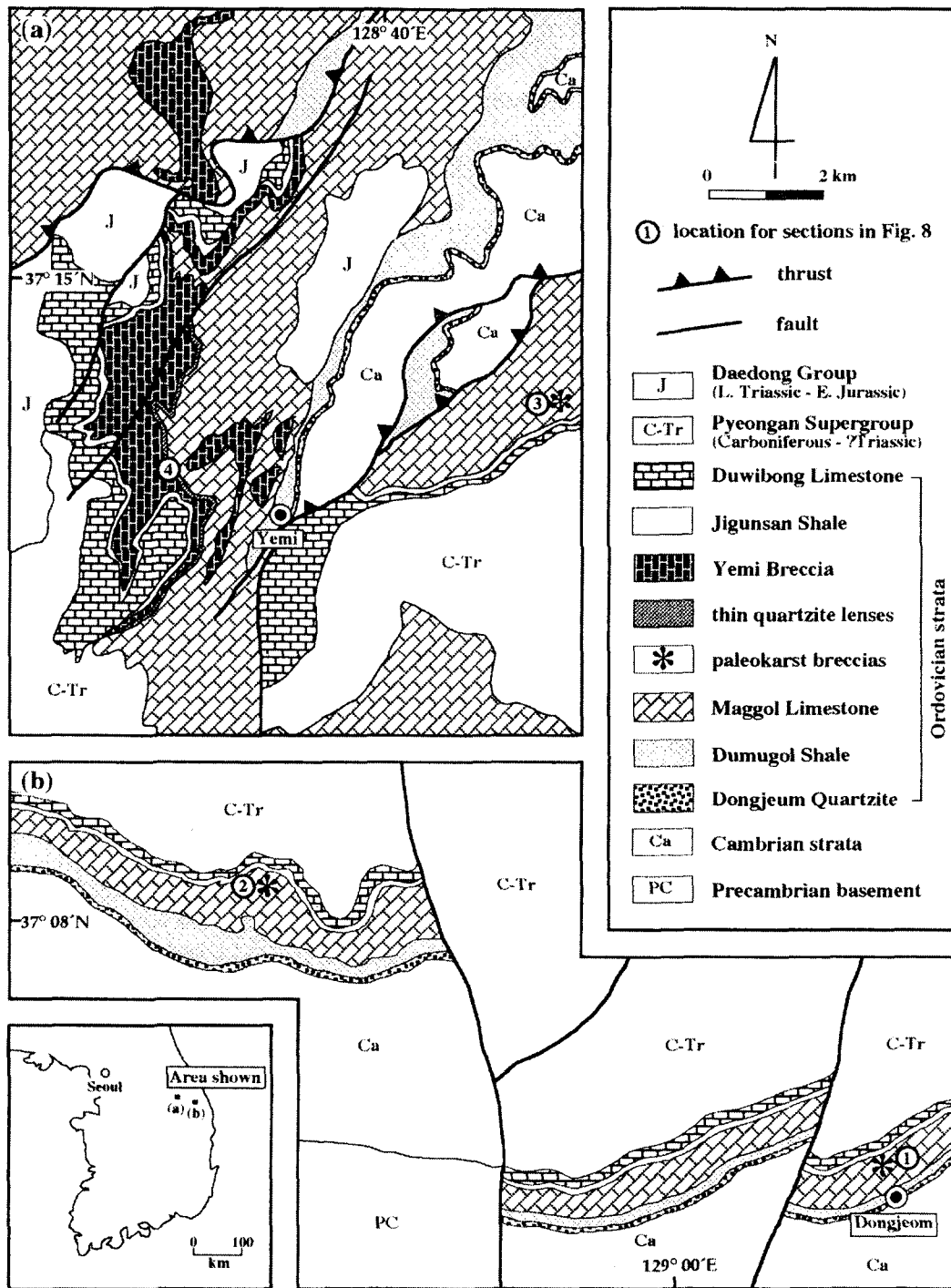


Fig. 3. Detailed geologic maps of the study areas. A) Yemi area and B) Dongjeom area. Asterisk indicates the occurrence of paleokarst-related solution-collapse breccias in the upper Maggol Limestone. Note the occurrence of siliciclastic quartzite lenses and the Yemi Breccia near west of Yemi, which are interpreted as a coeval off-platform lowstand systems tract.

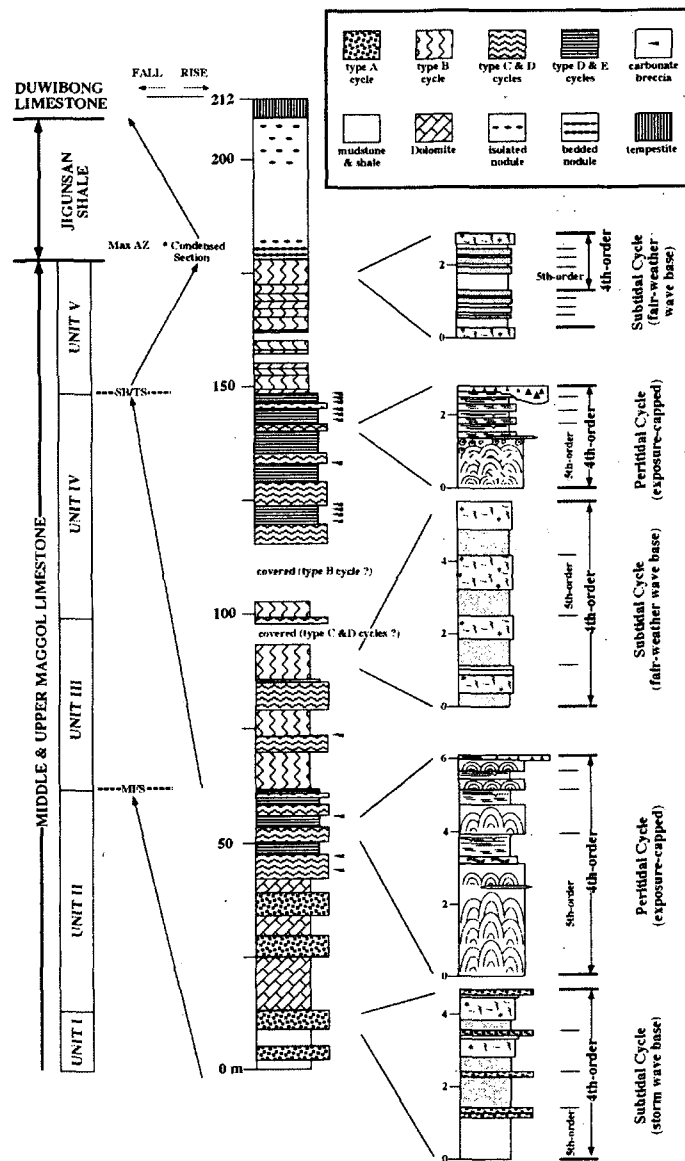


Fig. 4. Simplified columnar section of the middle and upper Maggol Limestone and the overlying Jigunsan Shale at Dongjeom area. On the basis of the systematic changes in stacking pattern of meter-scale fourth-order cycles, the middle and upper Maggol Limestone can be subdivided into five distinct units (I to V). Two third-order shallowing-upward cycles are recognized in the units I to IV. The overlying unit V is a stack of subtidal fourth-order cycles. Each boundary of third-order cycles represents a major marine-flooding surface. However, the boundary between units IV and V is a sequence boundary as well as transgressive surface. Note the 4:1 bundling of fifth-order cycles within fourth-order cycles. Abbreviations: MFS = major marine-flooding surface; Max AZ = Maximum Accommodation Zone; SB/TS = sequence boundary/transgressive surface.

생층서 및 시층서

막골석회암층의 지질시대는 대체로 오오도비스 초기의 아레니지안(Arenigian)과 오오도비스 중기의 란비니안(Llanvirnian) 초에 해당됨이 그 동안의 고생물학적 연구를 통해 밝혀졌다(Kobayashi, 1966; 이하영과 이종덕, 1971; Lee, 1976; Lee and Lee, 1990). Kobayashi(1966)는 막골석회암층 기저부에서 삼엽충 및 28종의 대형화석을 기재하고, 막골석회암층을 오오도비스 초기 아레니지안에 해당되는 캐나다안 Canadian) 중부와 상부에 대비시켰다. 한편 이하영과 이종덕(1971) 및 Lee(1976)는 본 층에서 39종의 코노돈트 화석을 기재하고 이 화석군에 의해 막골석회암층을 아레니지안과 란비니안 초기에 해당되는 캐나다안 상부와 채즈앤(Chazyan) 중부에 대비시켰다. 특히, Lee and Lee(1990)는 막골석회암층과 직운산세일 및 두위봉석회암층에 대한 집중적인 코노돈트 화석 연구를 통해 3개층을 5개의 코노돈트 생층서대로 분대 하였으며(그림 5), 이들을 북미 대륙 중부의 코노돈트 생층서대와 대비시켜 막골석회암층의 상한이 오오도비스 중기의 란비니안까지 연장됨을 밝혀내고, 막골석회암층을 오오도비스 초기의 아레니지안과 오오도비스 중기의 란비니안 초에 대비시킴으로, 막골석회암 상부층 중에서 오오도비스 초기와 중기 사이의 시층서 경계가 존재함을 시사하였다.

이와 같은 Lee and Lee(1990)의 코노돈트 생층서 자료를 최근에 개정된 코노돈트 생층서 분대와 함께 Ryu(2002)에 의해 세분된 막골석회암층의 암층서와 비교해 보면, 단위층 II와 III의 경계면이 오오도비스 초기 및 중기의 경계인 아이벡시안(Ibexian)과 화이트록키안(Whiterockian)의 시층서 경계에, 단위층 III과 IV의 경계면이 아레니지안과 달리윌리안(Darriwilian)의 시층서 경계에 각기 해당되는 것으로 해석된다(그림 5). 또한, 각 단위층들에 대한 코노돈트의 산출량을 비교해 보면, 단위층 IV에서 단위층 V로 전이되면서 코노돈트의 산출량이 급격히 감소하는 현상과 함께 직운산세일층 내에서 산출량이 또한 급격히 증가하는 현상이 인지된다(그림 5). 이러한 현상들은 각기 해수면의 하강에 따른 연계층 경계와 해수면이 최고조에 달하였을 때 퇴적되는 응축층(condensed section)의 형성과 연관된 것으로 해석된다(Armentrout, 1996).

순차층서

동점 지역에 분포하는 막골석회암층의 정밀 기재를 바탕으로 Ryu(2002)에 의해 세분된 5개의 단위층들은 탄산염 조석평지에서 해수면의 변동에 의해 퇴적되었으며, 단위층 I은 조하대, 단위층 II는 조간대 및 조상대, 단위층 III은 조하대, 단위층 IV는 조간대 및 조상대, 단위층 V는 조하대 환경으로 각기 해석된다(그림 4). 따라서, 세분된 5개의 단위층들을 단위층 I과 단위층 II를 하나로, 단위층 III과 단위층 IV를 하나로 묶어 각기 상향천심화를 기록하는 3차 단위 순차층 내의 고수위기 퇴적계로 해석하였다(그림 4). 아울러, 막골석회암층 최상부의 단위층 V와 이를 정함으로 덮는 직운산세일층 및 두위봉석회암층을 하나의 해침과 해퇴를 보이는 3차 단위 순차층으로 해석하여 단위층 IV와 단위층 V 사이에 하나의 연계층 경계가 있음이 인지되었다(그림 4).

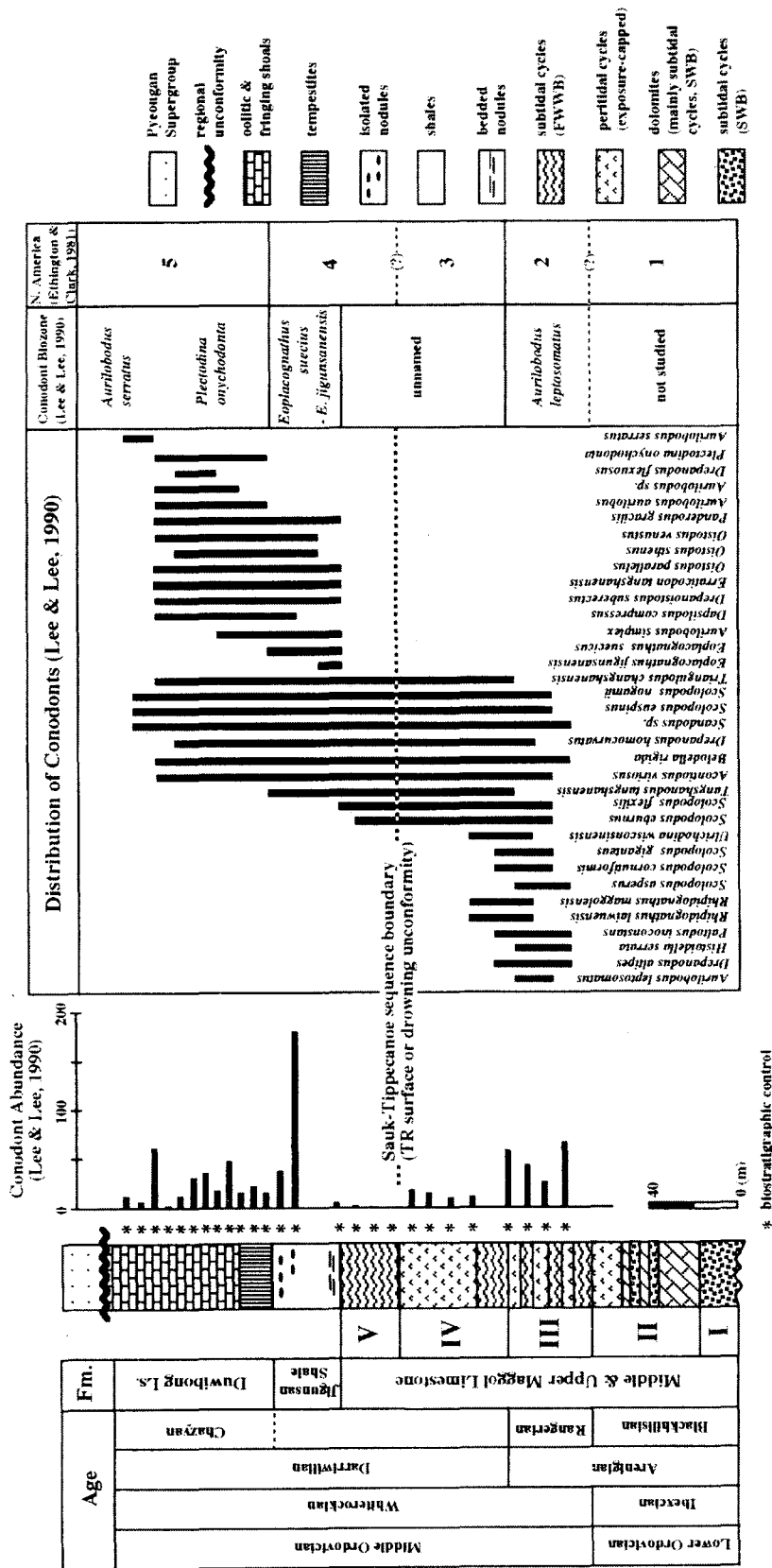


Fig. 5. Composite stratigraphic column and conodont biostratigraphy of the upper Maggol Limestone, the Jigunsan Shale, and the Duwibong Limestone. Conodont biostratigraphy indicates that the Lower to Middle Ordovician chronostratigraphic boundary lies between the unit II and the unit III. Also, the boundary between the unit IV and the unit V may be coincident with the Sauk-Tipppecanoe sequence boundary of Sloss (1963). Conodont data from Lee and Lee (1990).

특히, 생층서 연구 결과의 새로운 해석과 함께 Ryu(2002)는 태백산 분지 오오도비스 중기 퇴적층인 막골석회암 상부 층준(단위층 IV) 내에 집중적으로 나타나는 탄산염 각력암들에 대한 새로운 해석을 시도하였다. 일반적으로 탄산염 암층 내에 발달할 수 있는 각력암들을 성인적으로 분류하면 단층과 연계되어 발달하는 단층 각력암, 열수의 관입에 의한 열수 각력암, 퇴적당시의 요인에 의한 퇴적 각력암 및 고기 카르스트의 형성에 수반되어 발달하는 용식·붕락 각력암 등으로 분류될 수 있다. 이러한 탄산염 각력암들의 산출상태를 보면, 단층 각력암은 단층면에 규제되어 단층면을 따라 판상이나 썩기상으로 발달하며, 열수 각력암은 층리와 무관하게 관입상으로 산재되어 발달하나, 퇴적 각력암이나 용식·붕락 각력암들은 층리에 규제되어 여러 층준에 걸쳐 층상으로 협재되어 발달하는 것으로 알려져 있다(Fritz et al., 1993).

막골석회암층 내의 탄산염 각력암들은 일부 층리와 무관하게 산재되어 발달하거나, 또는 층리에 규제되어 여러 층준에 걸쳐 층상으로 발달하고 있기 때문에, 그 동안 단층 각력암이나, 열수 각력암, 또는 폭풍이나 암설류 등과 같은 퇴적 당시의 요인에 의한 퇴적 각력암등으로 비교적 단순하게 해석되어 왔다. 따라서, 막골석회암 상부 층준에 발달하는 탄산염 각력암들에 대한 층서적 중요성이 인식되지 못하여 왔으며(김옥준과 권영식, 1970; Paik, 1985, 1987; Woo and Park, 1989), 막골석회암층의 퇴적상 및 암상이 직상부의 직운산세일층으로 갈수록 점이적으로 변화한다는 사실에 의거, 막골석회암층과 직운산세일층의 층서 관계가 단순한 해퇴와 해침에 의한 정합적인 것으로 해석하였다(Paik, 1987; Woo and Park, 1989). 그러나 Ryu (2002)는 막골석회암 상부 층준인 단위층 IV 내에 집중적으로 발달하는 탄산염 각력암들을 산출상태를 기준으로 고기 카르스트의 형성에 수반되어 발달하는 용식·붕락 각력암으로 분류하고 이들의 발달은 곧 막골석회암 상부 층준 내에 고기 카르스트의 형성에 관계된 대기 노출면 및 부정합이 존재한다고 해석하였다(그림 4). 따라서 수직 층서상 단순한 해퇴에 이은 해침의 퇴적순회로 해석되었던 막골석회암층과 직운산세일층과의 정합적인 층서 관계는 오오도비스 초기와 중기 초까지 탄산염 대지 환경 하에서 퇴적된 막골 탄산염 암층들은 오오도비스 중기 달리윌리안 초에 들어와 해수면 하강에 의해 대기 중에 노출되었던 것으로 판단되며, 대기노출에 의한 고기 카르스트의 발달과 함께 용식·붕락 각력암들이 막골 탄산염 암층(단위층 IV) 내에 기록되었고, 이후 해침상의 막골 석회암(단위층 V)과 직운산세일층이 차례로 퇴적되었던 것으로 재해석하였다(Ryu, 2002; 그림 4, 5).

단위층 IV 내에 발달하는 탄산염 각력암들에 대한 새로운 해석을 코노돈트 생층서 연구 결과와 비교해 보면 태백산 분지 오오도비스 중기 퇴적층에 대한 순차 층서 해석에 있어서 매우 중요한 의미가 도출된다. 즉, 막골석회암층 내 단위층 III과 단위층 IV 사이에 아레니지안과 달리윌리안의 시층서 경계가 존재한다는 생층서 연구 결과는 그 상위 층준인 단위층 IV에 나타나는 용식·붕락 각력암들의 형성이 오오도비스 중기 초에 전세계적으로 기록된 해수면 하강과 밀접한 관계가 있음을 시사한다(그림 6).

따라서, 단위층 IV과 단위층 V 사이의 경계가 Sloss(1963)의 Sauk-Tippecanoe 연계층 경계인 전세계적 규모의 부정합과 잘 대비되기 때문에 순차 층서 해석에 있어서 연계층 경계를 설정할 수 있는 기준이 되며, 대륙간 또는 지역간 퇴적층 대비에 있어 견층으로서의 가능성을 가진다(그림 5, 6). 아울러, 오오도비스 중기 초의 해수면 하강에 의해 북미 대륙 오오도비스기 탄산염 퇴적층 내에 Knox 부정합(Kerans, 1993) 및 St. George 부정합(Knight et al., 1991)과 이에 따른 용식·붕락 각력암층들이 이들 부정합면 직하부에 잘 발달되어 있으며, 한반도와 인접해 있는 북중국의 오오도비스기의 표식지 탄산염 퇴적층에도 동 시대의 부정합 및 용식·붕락 각력암층들이 보고되고 있다(Fang et al., 1979). 따라서, 막골석회암 상부 층준인 단위층 IV 내에 발달하는 용식·붕락 각력암층들은 오오도비스 중기 탄산염 퇴적층들의 대륙간 또는 지역간 대비에 있어서 매우 중요한 연계층 경계가 된다(그림 6).

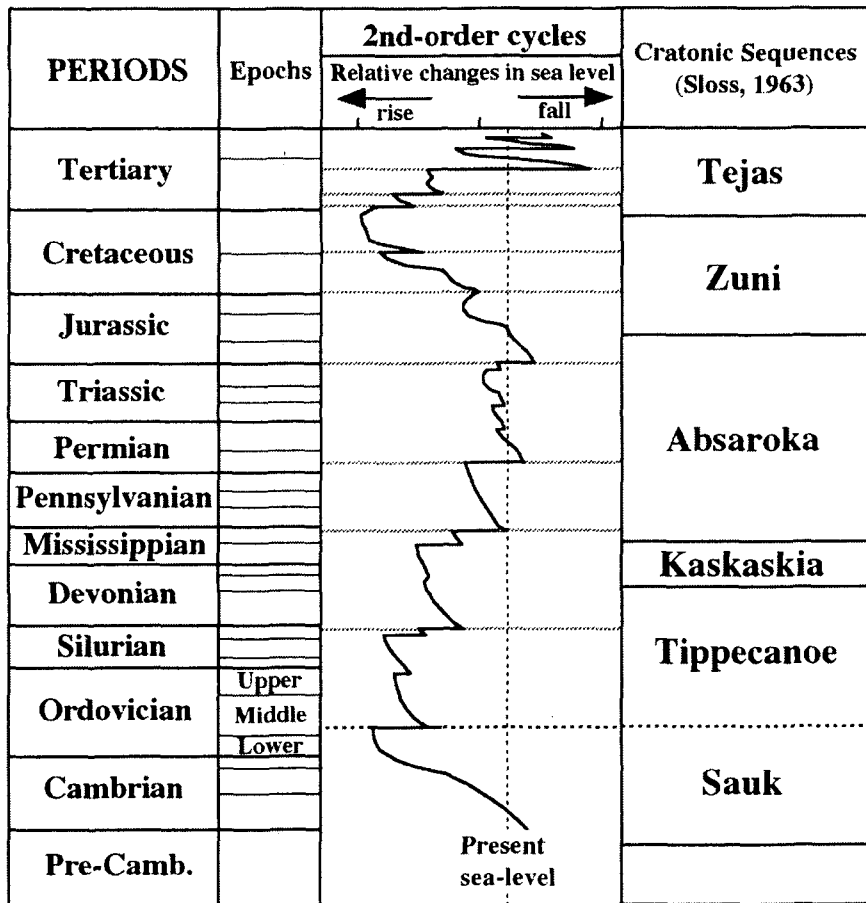


Fig. 6. Temporal correlation of the global sea level change with the subaerial exposure event inferred in the upper Maggol Limestone. The exposure event coincides with the second-order relative sea level drop during the early Middle Ordovician. The second-order global sea level curve from Vail et al. (1977).

연계층 경계와 함께 퇴적층들의 대비에 있어서 또 하나의 중요한 의미를 가지는 퇴적층은 최대 해침기 동안에 퇴적된 응축층이다(Loutit et al, 1988). 이러한 응축층은 해침상의 퇴적층과 해퇴상의 퇴적층을 나누는 층서적 기준이 되며(Loutit et al, 1988), 또한 석유 지질학적 의미에 있어서 다량의 유기 물질들을 포함하고 있어 양질의 근원암으로 평가되고 있다(Katz and Pratt, 1993). 통합 층서 연구의 일환으로 막골석회암층과 직운산세일층 내에서 수행한 유기 및 무기 지화학 분석은 태백산분지 오오도비스 중기 퇴적층 해석에 있어 새로운 가능성을 제시한다(그림 7). 유기 지화학 분석 결과 유기탄소의 값은 직운산세일층에서 1-3.4 wt.%의 매우 큰 값을 보이며, 직운산세일층의 최하부 50 cm 층준에서 최대치를 보인 후 점차적으로 감소한다(그림 7). 따라서 직운산세일층 전체가 양질의 근원암으로 평가될 수 있다. 또한 막골석회암층 내에서 가장 큰 값을 보이는 무기탄소의 값은 직운산세일층 내에서는 급격한 증가와 감소를 반복하는 양상을 보이면서 전체적으로 감소한다(그림 7). 아울러 X-선 회절 분석에 의한 점토광물의 분포 역시 유기 탄소의 값이 최대치를 보이는 직운산세일층의 최하부 50 cm 층준을 기준으로 뚜렷한 변화를 보인다(그림 7). 이 층준을 기준으로 하부의 해침상의 막골석회암층 내에서는 일라이트만이 나타나, 상부의 직운산세일층으로 갈수록 일라이트의 양은 점차적으로 감소함과 동시에 캐올리나이트와 녹니석 등의 점토광물들이 나타나기 시작한다(그림 7).

이러한 분석 결과는 직운산세일층의 최하부 50 cm에 나타나는 다량의 유기 탄소를 포함하는 층준이 최대 해침기에 퇴적된 응축층이라는 해석이 가능하며, 그 상위의 직운산세일층의 대부분은 과거에 일반적으로 알려진 바와는 달리 해침기가 아니라 해퇴기에 퇴적된 퇴적층임을 지시한다. 또한 직운산세일층 내에서의 무기 탄소 성분의 급격한 증가와 감소의 반복은 이들이 암상으로는 차이가 인지되지 않는 작은 규모의 4차 또는 5차 단위의 순차층으로 구성되어 있음을 알 수 있으며(그림 7), 이는 조간대나 조상대에서와 마찬가지로 깊은 조하대 환경에서도 해수면의 변동으로 인한 주기적인 육성 기원의 퇴적물의 유입과 이로 인한 깊은 조하대 퇴적층 내에서의 운회성을 지시하는 결과로 해석될 수 있다. 아울러 응축층 하부에 분포하는 석회암들은 CaO와 MgO의 성분이 각기 52% 이상, 1% 미만으로 고품위 석회석으로의 개발 가능성이 매우 양호한 것으로 판단된다.

이와 같은 사실을 모두 종합하면 태백산 분지 오오도비스 중기 퇴적층 내에서 하나의 독립적인 연계층이 정의 될 수 있다. 즉 막골석회암 상부층준 내에 고기 카르스트의 발달과 연계되어 나타나는 불연속면(부정합)은 해수면이 최대로 하강하였을 때 형성되는 연계층의 하부 경계이며 이를 덮는 해침상의 막골석회암층(단위층 V)과 직운산세일층 최하부에 나타나는 응축층이 해침기 퇴적계에 해당된다. 따라서 응축층 상위의 직운산세일층과 이를 정합으로 덮는 두위봉석회암층은 해퇴기 퇴적계(또는 고수위기 퇴적계)이며 두위봉석회암층과 평안누층군 사이의 부정합은 오오도비스 중기 연계층의 상부 연계층 경계에 해당된다.

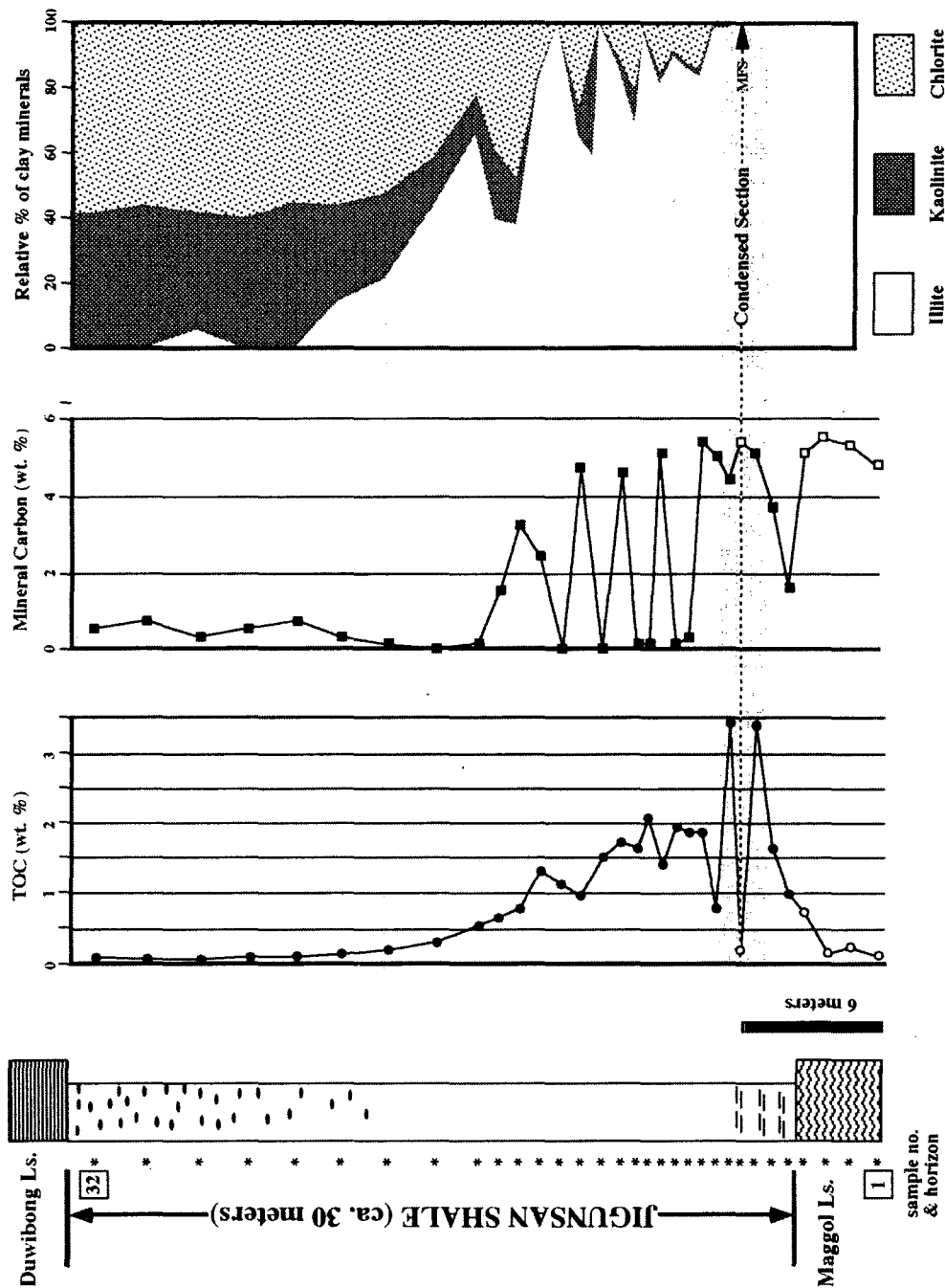


Fig. 7. Vertical variations of total organic carbon, mineral carbon contents, and clay minerals of the Jigunsan Shale in the study area.

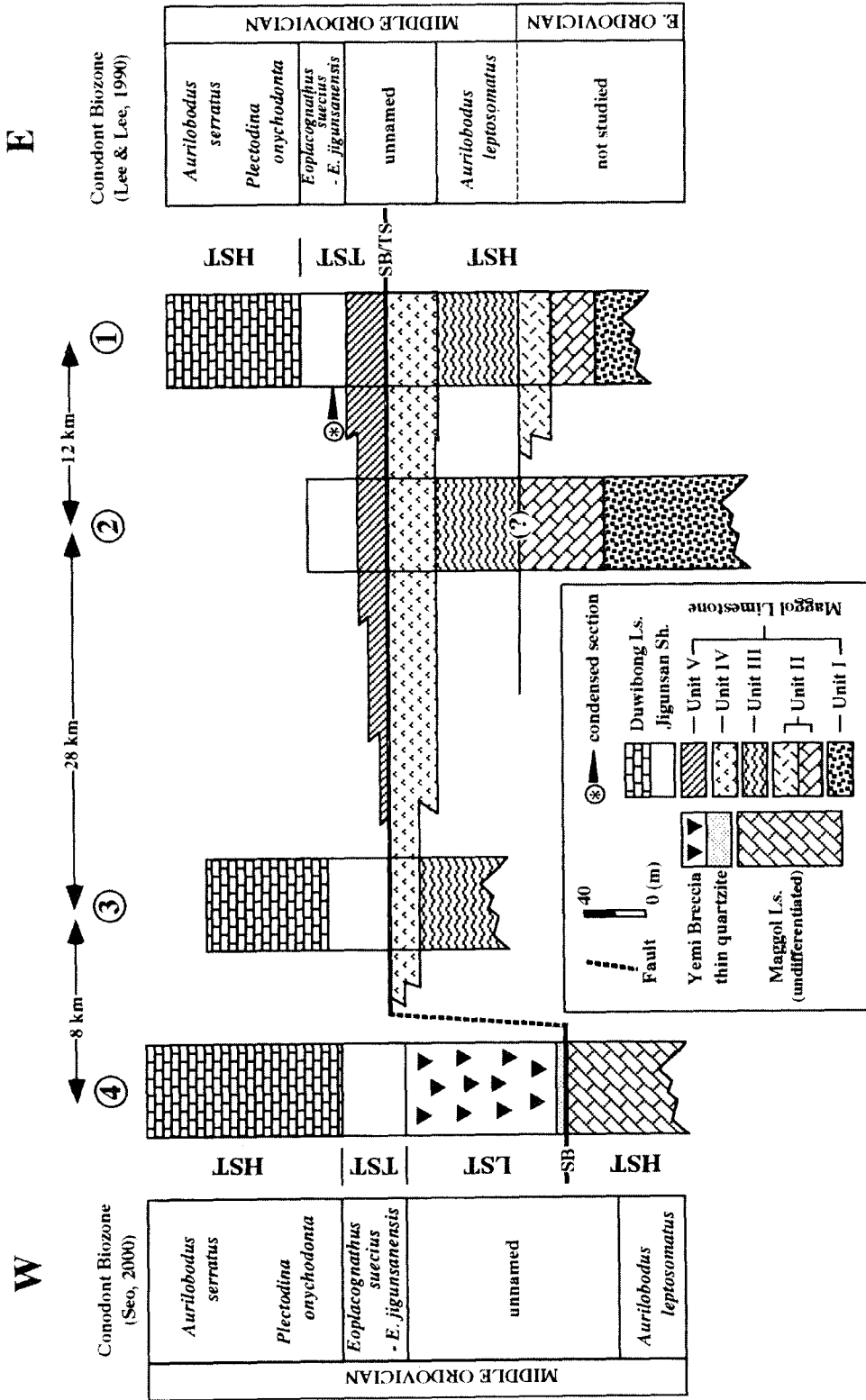


Fig. 8. Schematic sketch illustrating the sequence stratigraphic correlation of the Taebaeksan Basin during the Middle Ordovician.

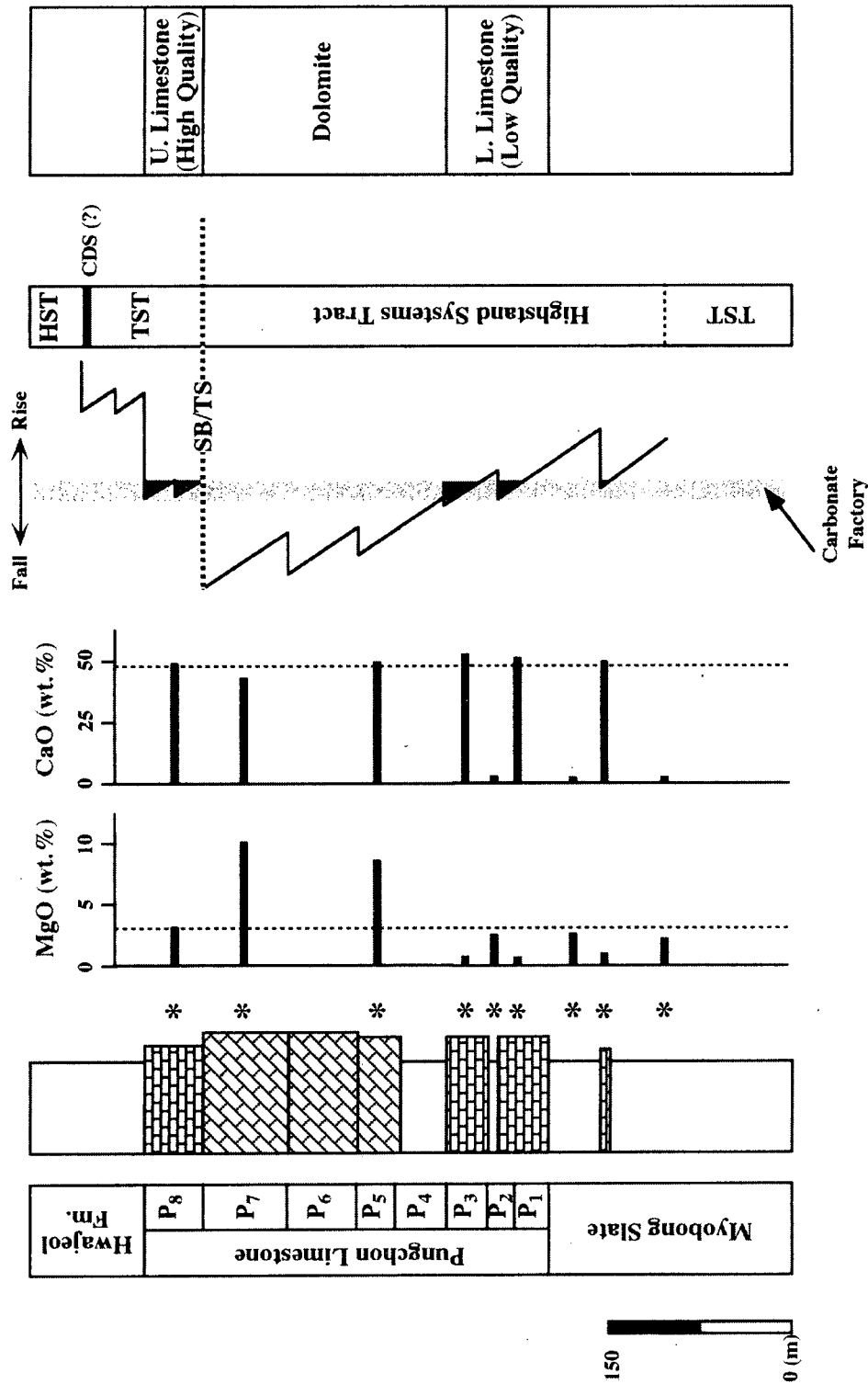


Fig. 9. Generalized lithostratigraphic column and cyclic sedimentation of the Pungchon Limestone. Note the occurrence of high-quality limestones between the sequence boundary and the condensed section as well as the early highstand systems tract.

태백산분지 오오도비스 중기의 통합층서 및 분지발달사

두위봉형 오오도비스 중기 퇴적층에서 설정된 하나의 독립적인 연계층은 인접 예미 및 정선 등지에 분포하는 정선형 오오도비스 중기 탄산염 퇴적층들을 비교 연구하는데 있어서도 매우 중요한 층서적 기준이 된다. 그 동안 이들 지역에 분포하는 정선형 오오도비스 중기 퇴적층들은 암층서적 기준에 의해, 또는 생층서적 기준에 의해 두위봉형 오오도비스 중기 퇴적층과 각기 다른 구조적·층서적 상이성을 보이는 것으로 해석되어져 왔다. 그러나 본 연구를 통해 이루어진 두 지역간 층서 대비는 이러한 상이성이 인지되지 않고 있으며 오히려 층서적 연관성이 인정된다.

그림 8은 연계층을 기준으로 하는 두위봉 및 정선형 오오도비스 중기 퇴적층의 층서 대비 단면이다. 예미 지역의 고성세일층과 고성석회암층은 두위봉형의 직운산세일층 및 두위봉석회암층에 각기 대비되기 때문에 고성세일층 내의 응축층을 제외하고 해퇴기 퇴적계에 해당된다. 또한 고성세일층 하부에 나타나는 예미각력암 및 예미각력암 직하부에 나타나는 박층 (5 m 내)의 규암층은 해수면이 낮았을 때 탄산염 사면을 따라 퇴적된 저수위기 퇴적계로 해석되며 천해성 막골석회암층과 규암층과의 경계가 두위봉 지역에서의 하부 연계층 경계면에 대비된다(그림 8). 특히 박층의 규암층은 정선 지역 일대에 까지 연장되고 있어 정선 지역에 넓게 분포하는 심해성 정선석회암층과 그 직하부의 천해성 막골석회암층을 나누는 기준이 되며 오오도비스 중기 연계층의 하부 경계로 해석된다(그림 3, 9). 이러한 층서 대비로부터 두 지역간 암상 및 화석상의 차이는 하나의 분지 내에서 공간적으로 일어나는 퇴적 작용의 다양성으로 해석되어 질 수 있다(그림 9). 따라서, 이들 태백산분지 고생대 퇴적층들의 층서적 상이성은 재고되어야 할 필요가 있으며, 본 연구의 결과로 제시되는 태백산분지 오오도비스 중기 퇴적층의 층서들은 향후 한반도 및 인접 지역의 고생대 퇴적층들의 층서 및 구조적 연관성을 비교 연구하는데 있어서 새로운 층서적 규범으로 적용되어야 한다.

태백산분지 내 고품위 석회석대의 성인

태백산분지 오오도비스 중기 퇴적층의 일부에 대한 XRF 분석 결과, 막골석회암층 최상부(단위층 V)가 개발 가능한 고품위 석회석인 것으로 판단된다(그림8). 이러한 사실을 통합 층서학적으로 해석하면 연계층 경계와 응축층 사이의 해침상 퇴적계가 고품위 석회석으로 개발 가능하다는 것을 의미하며, 향후 태백산분지 캄브로-오오도비스기 퇴적층 내의 석회석 자원 탐사 및 개발의 효율성 증대를 위한 새로운 개념을 제공한다.

현재 국내 고품위 석회석의 대부분이 생산되고 있는 풍춘층과 그 직하부의 묘봉스레이트층에 대해 통합 층서학적 개념을 예비적으로 적용해 본 결과, 동 퇴적층 내에서 6개의 단위층들이 인지되며, 이들은 대체적으로 캄브리아 초기와 중기에 걸쳐 일어났던 2차 단위 순차층(또는 연계층) 내의 해퇴기 동안 3차 단위 순차층들의 해침과 해퇴

의 반복에 의해 퇴적된 것으로 해석된다(그림 10). 아울러, 풍촌층 최상부의 고품위 석회석대도 막골석회암층 최상부의 고품위 석회석대와 마찬가지로 연계층 경계와 응축층 사이에 퇴적되는 해침기 퇴적계로 해석된다. 따라서 태백산분지 내 고품위 석회석대 및 개발 잠재성이 양호한 석회석대의 성인은 해수면의 변동과 carbonate factory의 상관 관계에 의해 퇴적된 것으로 판단되며, 각 연계층의 해퇴기 동안에 저품위의 석회석대와 백운암대가 퇴적된 후 대기 노출에 의해 연계층 경계가 형성되고, 뒤 이은 비교적 짧은 기간의 해침기를 거치는 동안에 고품위 석회석대가 퇴적된 것으로 해석된다(그림 11). 이러한 풍촌층 내 고품위 석회석대의 성인적 개념을 태백산 분지 전 지역으로 확장한다면, 현재 가행되고 있는 풍촌층과 함께 막골석회암층의 최상부의 해침기 퇴적계와 평안누층군 최하부 만항층의 해침기 퇴적계 및 이에 시간적으로 대비될 수 있는 층준들(예: 정선석회암층의 해침기 퇴적계 및 요봉층, 갑산층의 해침기 퇴적계)이 태백산분지 내 석회석 자원의 추가 매장량 확보를 위한 탐사 대상으로 고려되어야 할 것이다.

국내·외 자원 탐사의 효율성 증대를 위한 통합 층서의 필요성

전술한 바와 같이 기재적 층서 원리들을 바탕으로 수행되었던 기존의 퇴적층 평가에는 해석적 오류가 내포되어 있음을 잘 보여준다. 이러한 문제는 암층서, 생층서 및 시층서 등 기재적 층서 원리들의 배타성에 기인하며, 지금까지 특정 분지들의 퇴적층 해석을 위해 암층서, 생층서 및 시층서 등의 연구가 필요에 따라 각기 독자적으로 수행되어져 왔기 때문인 것으로 판단된다. 이는 곧 국내 퇴적분지 내에 분포하는 비금속 및 금속광물 자원의 효율적 탐사를 위한 전략 수립에 있어 하나의 장애가 되고 있으며, 따라서 이에 대한 보완책으로 통합 층서 기술에 대한 적용이 시급한 실정이다.

그림 12에 제시된 것은 통합 층서 기술 개발의 계통도를 보여주는 것으로 국내에서는 지금까지 주로 기재적 의미의 층서 연구가 수행되어져 왔음을 보여준다. 일부, 국내 퇴적 분지 내의 자원 탐사를 위해 순차 층서의 개념이 도입되고는 있으나 전반적인 층서학의 수준은 주요 과학 선진국과 비교해 볼 때 20여년 뒤진 상태에 있으며, 통합 층서의 기술 수준 역시 아직까지 미미한 수준에 머물고 있다. 그러나 통합 층서 발전에 중요한 관건이 되고 있는 시설 기반들은 선진국과 비교해 볼 때 대등한 수준에 있는 것으로 판단된다. 즉, 통합 층서 기술 개발을 위한 시설 기반은 구축되어 있으나, 이를 효율적으로 이용하여 국내·외 자원 탐사사업에서 필요로 하는 연구 개발로 연계 시킬 수 있는 개념적 기반이 취약한 상태이다. 따라서, 통합 층서 기술을 국내의 퇴적 분지들에 심도있게 적용함으로써 새로운 개념으로 이들 퇴적 분지들의 자원 부존 가능성을 재평가함과 동시에 국내 자원 관련 산·학·연·관간의 개념적 기반을 공고히 하여 향후 국내·외 자원 탐사 사업의 성공률을 높이기 위한 기술력을 확보하여야 할 것이다.

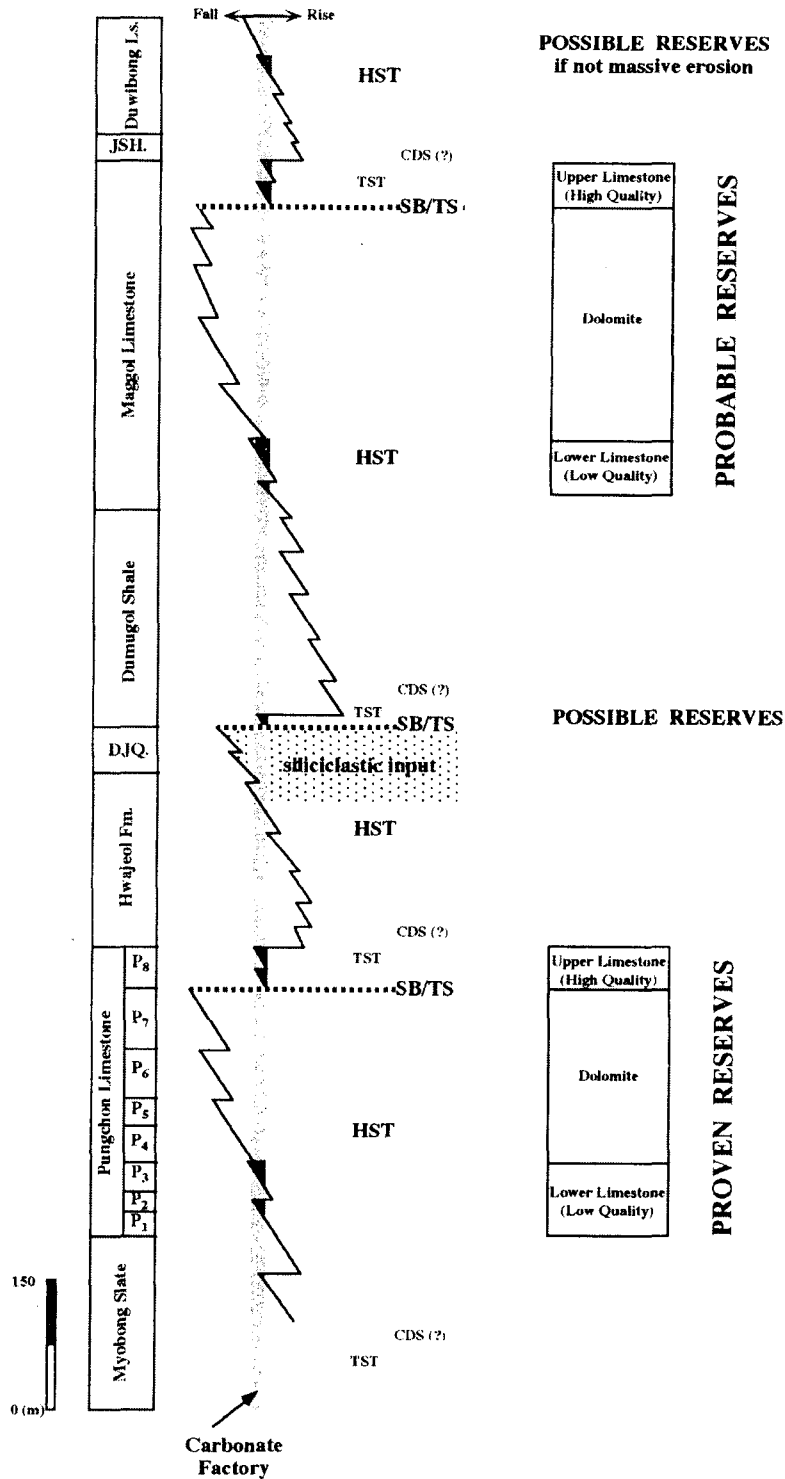


Fig. 10. Vertically-oriented Fischer plot of the Cambro-Ordovician Joseon Supergroup, Dongjeom area, Taebaksan Basin. Additional limestone reserves in the Taebaksan Basin probably occur in the Maggol Limestone as well as the lowermost Dumugol Shale and the upper Duwibong Limestone.

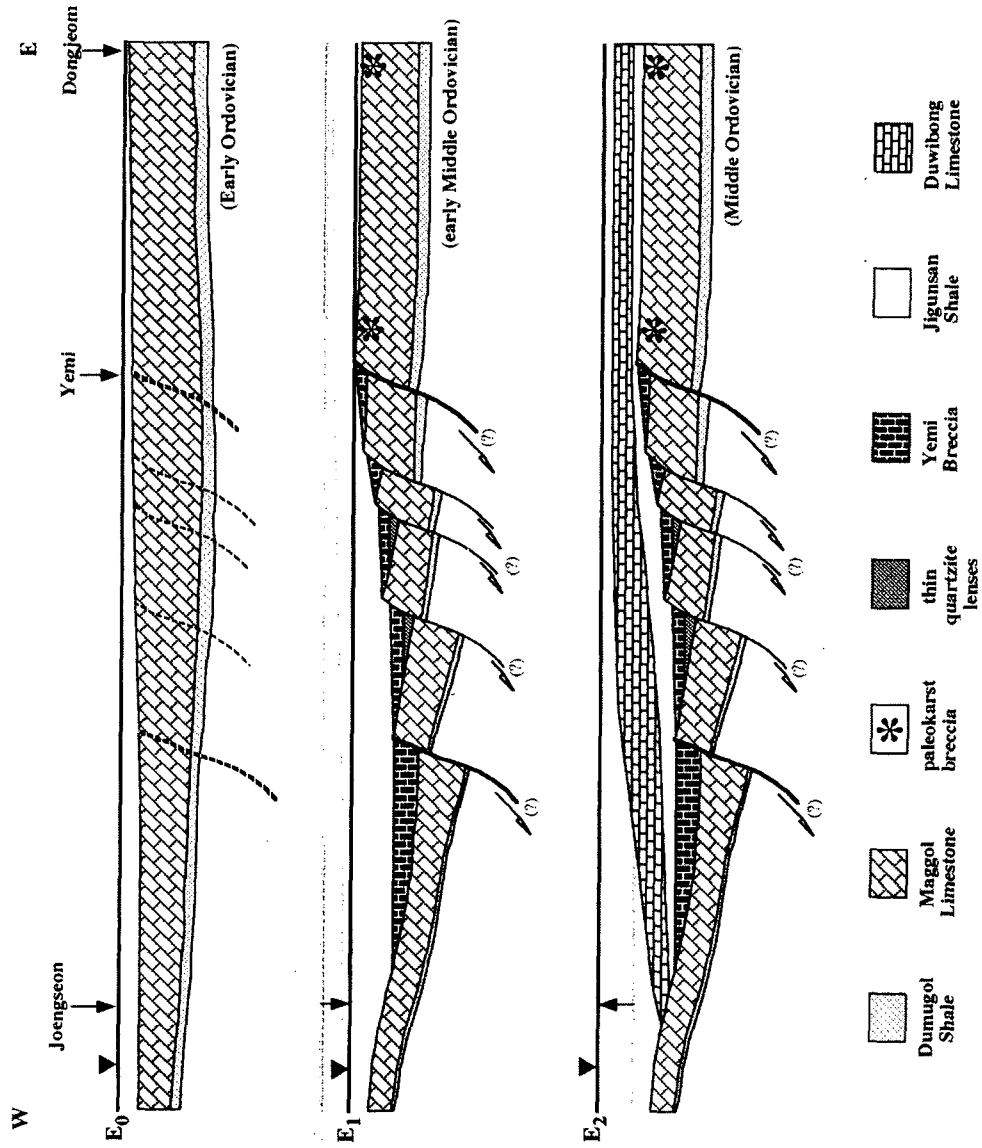


Fig. 11. Schematic sketch illustrating the stratigraphic and tectonic evolution of the Taebaeksan Basin during the Early to Middle Ordovician.

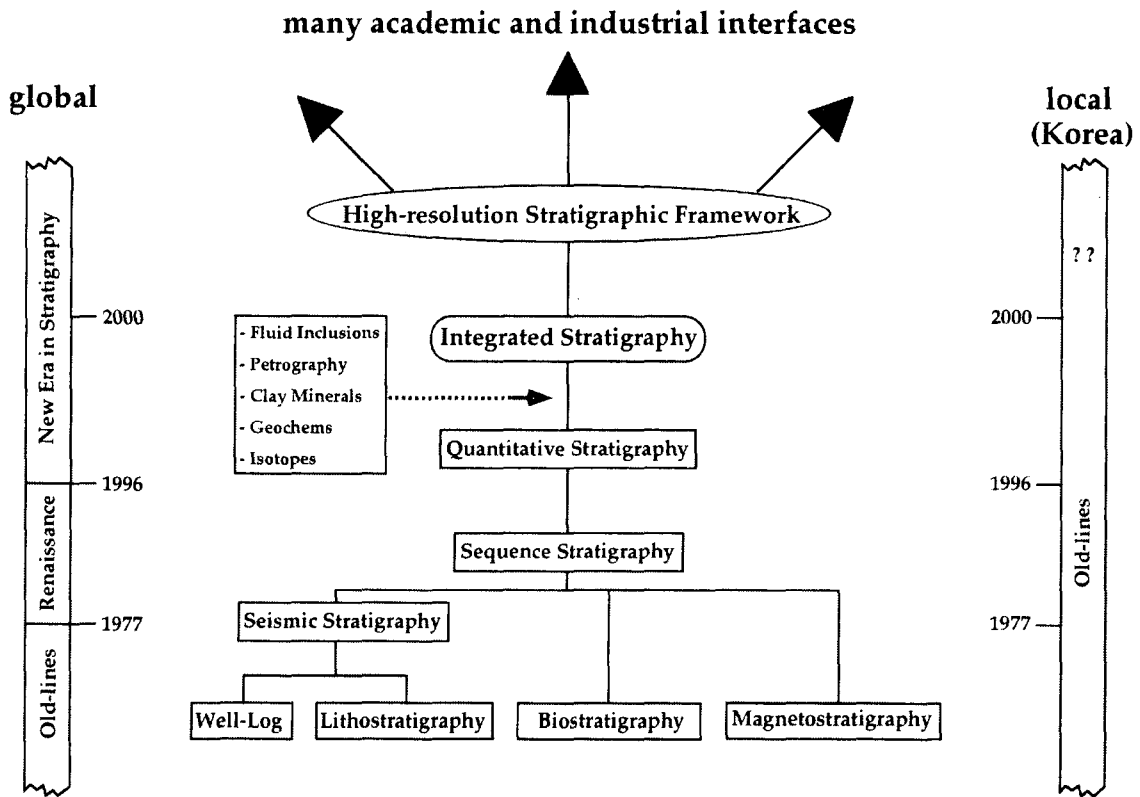


Fig. 12. Diagram showing the developing stage of the integrated stratigraphy technology.

결론 및 제언

비금속 및 금속광물 자원의 탐사사업은 국가경영에 있어서 절대적으로 필요한 공공의 기반산업에 해당한다. 그러나 그 동안 수행되었던 자원 탐사사업 대부분은 천부에 분포하는 광상들에 집중되어 왔으며, 이들의 기 개발로 인하여 점차 심부에 분포하는 광상들로까지 탐사범위가 확대되고 있다. 이러한 심부의 광상들을 효과적으로 개발해 내기 위해서는 광역적 퇴적 분지 해석 뿐만이 아니라 이를 근간으로 한 분지 내 퇴적층들의 정밀 해석이 요구되고 있는 실정이다. 분지 내 퇴적층들의 정밀 해석은 그동안 독립적으로 발전되어 왔고 각기 선택적으로만 적용되어 왔던 기존의 기재적 층서원리들로는 불가능하며, 1990년 이후 대두되기 시작한 순차 층서학이나 이를 바탕으로 최근에 들어와 새롭게 발전되기 시작한 통합 층서 기술의 도입이 선행되어야 만이 가능하다.

통합 층서 기술을 국내 육상 퇴적 분지인 태백산분지 두위봉형 오오도비스 중기 퇴적층에 실험적으로 적용해 본 결과, 지역간 대비에 있어서 기존의 기재적 층서 개념에

의한 퇴적 모델에 비하여 보다 실제적인 새로운 모델이 제안되었다. 새로운 퇴적 모델은 현재 태백산분지 퇴적층에 대한 자원 탐사 및 개발사업의 방향을 설정해 나가는데 있어서 필수적인 새로운 층서적 규범으로 쓰여 질 수 있으며, 분지 내 주요 광상들에 대한 신규 매장량 확보를 위한 탐사사업의 성공률을 높이는데 기여할 수 있다. 또한 국내 대륙붕 에너지자원 부존 가능성 평가를 위한 연구에도(예: 울릉분지) 통합 층서 기술이 적용되기 시작하여 가시적 효과(예: 동해 가스전)가 나타나고 있으며, 향후 국내 대륙붕 에너지자원 탐사 및 개발사업의 성공률을 높이는데 기여할 것으로 전망된다. 아울러 차세대 에너지원으로 주목 받고 있는 가스 수화물(gas hydrate) 및 분지중심 가스전(basin-centered gas) 등의 개발 사업을 위해 필수적인 기술이라는 점에 있어서 통합 층서 기술의 중요성이 강조되어야 한다.

참고문헌

- 김옥준, 권영식, 1970, 의림길 부근의 지질-특히 예미 각력암층에 대하여. 지질학회지, 제6권, p. 213-220.
- 유인창, 도성재, 최선규, 백광호, 1997a, 삼척 탄전 장성 지역에 분포하는 폐름기 장성층의 층서에 대한 재고찰. 지질학회지, 제33권, p. 78-86.
- 유인창, 도성재, 최선규, 1997b, 하부 오오도비스기 막골석회암내에 발달한 탄산염 각력암: 성인 및 층서적 중요성. 지질학회지, 제33권, p. 234-243.
- 이하영, 이종덕, 1971, 강원도 삼척군 동점부근에 분포된 대석회암통의 코노돈트 화석군과 그의 층서학적 의의. 지질학회지, 제7권, p. 89-101.
- 정창희, 이대성, 엄상호, 장기홍, 김항묵, 1973, 한국의 지질 계통 확립을 위한 조사 연구. 과학기술처, R-73-51, 68p.
- Armentrout, J. M., 1996, High resolution sequence biostratigraphy: examples from the Gulf of Mexico Plio-Pleistocene, In: Howell, J. A. and Aitken J. F. (eds.), High resolution sequence stratigraphy: innovations and applications. Geological Society of London Special Publication 104, p. 65-86.
- Cheong, C. H., 1969, Stratigraphy and paleontology of Samcheog coalfield, Korea(1). Journal of the Geological Society of Korea, v. 5, p. 13-56.
- Ethington, R. L. and Clark, D. L., 1980, Lower and Middle Ordovician conodonts from the Ibex area western Millard County, Utah. Bingham Young University, Geology Studies, v. 28, p. 1-60.
- Fang, T. C., Xia, T. L. and Liu, H. L., 1979, Paleontological stratigraphy. Geological Press, Beijing, 308p. (in Chinese).

- Fritz, R. D., Wilson, J. L. and Yurewicz, D.A., 1993, Paleokarst related hydrocarbon reservoirs. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Core Workshop 18, 275 p.
- Hyeong, K. S., 1990, Depositional environments of the Duwibong Formation (Late Ordovician). Unpublished MS thesis, Seoul National University, Seoul, Korea 140p.
- Katz, B. J. and Pratt, L. M., 1993, Source rocks in a sequence stratigraphic framework. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology 37, 247p.
- Kerans, C., 1993, Description and interpretation of karst-related breccia fabrics, Ellenburger Group, West Texas, In: Fritz, R. D., Wilson, J. L. and Yurewicz, D. A., (eds.), Paleokarst related hydrocarbon reservoirs. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Core Workshop 18, p. 181-200.
- Knight, I., James, N. P. and Lane, T. E., 1991, The Ordovician St. George Unconformity, northern Appalachians: The relationship of plate convergence at the St. Lawrence Promontory to the Sauk/Tippecanoe sequence boundary. Geological Society of America Bulletin, v. 103, p. 1200-1225.
- Kobayashi, T., 1966, Stratigraphy of the Chosen Group in Korea and South Manchuria and its relation to the Cambro-Ordovician formations of other areas, Section A, The Chosen Group of South Korea. Journal of Faculty and Science, University of Tokyo, v. 16, p. 1-73.
- Lee, H. Y., 1976, Conodonts from the Maggol and Jeongseon Formation (Ordovician), Kangweon-Do, South Korea. Journal of the Geological Society of Korea, v. 12, p. 151-181.
- Lee, K. W. and Lee, H. Y., 1990, Conodont biostratigraphy of the Upper Choseon Supergroup in Jangseong-Dongjeom area, Gangweon-do. Journal of the Paleontological Society of Korea, v. 6, p. 188-210.
- Lee, Y. I., 1988, Storm sedimentation in the Middle Ordovician Duwibong Formation, southern Taebaeg city. Journal of the Geological Society of Korea, v. 24, p. 234-242.
- Loutit, T. S., Hardenbol, J., Vail, P. R., and Baum, G. R., 1988, Condensed section: the key to age determination and correlation of continental margin sequence, In: Wilgus, C. W., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., Posamentier, H. W., Ross, C. A. and Van Wagoner, J. C., (eds.), Sea Level Change: An integrated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 42, p. 183-213.

- Paik, I. S., 1985, Evaporite mineral casts in the Maggol Formation (Ordovician), Jangseong, Kangweondo. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 21, p. 219-226.
- Paik, I. S., 1986, Dolomitization of the Middle Ordovician Maggol Formation in Jangseong Area, Gangweondo, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 22, p. 333-346.
- Paik, I. S., 1987, Depositional environments of the Middle Ordovician Maggol Formation, southern part of the Baegunsan Syncline area. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 23, p. 360-373.
- Ryu, I. C., 2002, Tectonic and stratigraphic significance of the Middle Ordovician carbonate breccias, Ogcheon Belt, South Korea. *Island Asrc*, v. 11, p. 149-169.
- Seo, K. S., 2000, Biostratigraphy and conodonts from the Lower Paleozoic sequence in the Singdongeup, Jeongseon area, Kangwondo, Korea. *Journal of Geological Society of Korea*, v. 36, p. 499-516.
- Sloss, L. L., 1963, Sequences in the cratonic interior of North America. *Geological Society of America Bulletin*, v. 74, p. 93-114.
- Vail, P. R., Mitchum, R. M. and Thompson, S., 1977, Global cycles of relative changes of sea level, In: Payton, C. E., (ed.), *Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, p. 83-98.
- Van Wagoner, J. C., Mitchum, R. H., 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 Methods in Exploration Series 7*, 55p.
- Weimer, P. and Posamentier, H. W., 1993, Siliciclastic sequence stratigraphy - recent developments and applications. *American Association of Petroleum Geologists Memoir 58*, 492p.
- Wilgus, C. W., Hastings, B. S., Kendall, C. G. St. C., Posamentier, H. W., Ross, C. A. and Van Wagoner, J. C., 1988, Sea-level changes: an integrated approach. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publications 42*, 407p.
- Woo, K. S. and Park, B. K., 1989, Depositional environments and diagenesis of the sedimentary rocks, Choseon Supergroup, Korea: past, present, and future; the status of the art. *Journal of the Geological Society of Korea*, v. 25, p. 347-363.