

## 한반도 동남부 제3기 분지지역에서의 고응력장 복원

문태현<sup>1</sup> · 손문<sup>2</sup> · 장태우<sup>1</sup> · 김인수<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 지질학과, 702-701, 대구광역시 북구 산격동 1370

<sup>2</sup>부산대학교 지질학과, 609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30

### Paleostress Reconstruction in the Tertiary Basin Areas in Southeastern Korea

Tae-hyun Moon<sup>1</sup> · Moon Son<sup>2</sup> · Tae-Woo Chang<sup>1</sup> · In-Soo Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology, Kyungpook National University,

Taegu 702-701, Korea

<sup>2</sup>Department of Geology, Pusan National University,

Pusan 609-735, Korea

**Abstract:** Southeastern Korean Peninsula has undergone the polyphase deformations according to the changes of regional tectonic settings during the Cenozoic. Through analyses of more than 600 fault-slip data gathered in the study area, five tectonic events are revealed as the followings: (I) NW-SE transtension, (II) NW-SE transpression, (III) NE-SW pure or radial extension, (IV) NNE-SSW transpression, (V) NE or ENE-WSW transpression. Event I was induced by the pull-apart type extension of the East Sea during 24-16 Ma, which resulted in the NW-SE extension of the Tertiary Basins in SE Korea. Event II was resulted from the collision of SW Japan and Izu-Bonin Arc (or Kuroshio Paleoland) on the Philippine Sea Plate at ~ 15 Ma, which stopped the extension of the Tertiary Basins and originated the uplift of fault blocks in and around SE Korean Peninsula. It was continued until ~10 Ma. Event III is interpreted as the post-tectonic event after the block-uplifts due to the event II, which indicates a temporal lull in activity of the Philippine Sea Plate since 10 Ma. Event IV was originated from the resumption in activity of the Philippine Sea Plate which was restarted to move toward north at ~6 Ma. The event made the EW compressional structures behind SW Japan as well as in the Korea Straits, and thus the block-uplifts in SE Korea was resumed again. Lastly, event V was resulted from the gradual decrease in influence of the Philippine Sea Plate and the cooperative compression due to the subduction of the Pacific Sea Plate and the collision of the Indian Plate since 5-3.5 Ma, which generated the NS compressional structures in the offshore along the eastern coast of the Korean Peninsula and thrust up the fault-blocks toward west. This event is continuing so far, and thus is making the active faultings resulting in the present earthquakes of the Korean Peninsula.

Key Words: SE Korea, Cenozoic, paleostress, polyphase deformations, Asian tectonic settings

**요약:** 한반도 동남부는 신생대 동안 동아시아 광역 지구조환경의 변화에 의하여 복합 지구조운동을 겪었다. 취성변형요소들을 이용하여 복원한 고응력장은 (I) 북서-남동 횡인장, (II) 북서-남동 횡압축 (III) 북동-남서 순수인장 내지 방사상인장, (IV) 북북동-남남서 횡압축, (V) 동서 내지 동북동-서남서 횡압축의 순서이다. (I)은 24-16 Ma사이 동해의 당겨열림형 확장 결과로써 연구지역 제3기 분지들의 확장을 주도하였다. 지구조 사건 (II)는 15 Ma경 필리핀해판의 이주보닌 아크 혹은 고대륙 쿠로시오와 일본 남서부의 충돌에 의한 압축력의 결과로써, 연구지역 제3기 분지들의 확장을 종결시켰으며 분지일원의 지괴들을 융기시켰다. 이 사건은 10 Ma까지 지속되었다. (III)은 10 Ma경에 이르러 필리핀해판의 활동이 소강상태에 들어감으로서 (II)에 의해 발생한 지각용기의 후 지구조적 응력사건으로 해석된다. (IV)는 6 Ma경 필리핀해판이 북쪽으로 이동을 재개한 결과로서, 대한해협과 일본 남서부의 배후에 동서 방향의 압축구조를 만들었으며 연구지역의 지괴들을 다시 융기시켰다. (V)는 5-3.5 Ma사이에 필리핀해판의 북상에 의한 남북 압축력이 약해지고 태평양판의 섭입과 인도판의 충돌에 의한 동서 압축력의 영향이 점진적으로 증가한 결과로서, 한반도 동해안에 남북 방향의 압축구조를 만들었으며 한반도 동남부의 지괴들을 서쪽으로 충상시켰다. 이 응력장은 현재까지도 계속되어 오늘날 동서 방향의 제4기 충상단층들과 지진을 발생시키고 있다.

주요어: 한반도 동남부, 신생대, 고응력장, 복합 지구조운동, 동아시아 지구조환경

## 서론

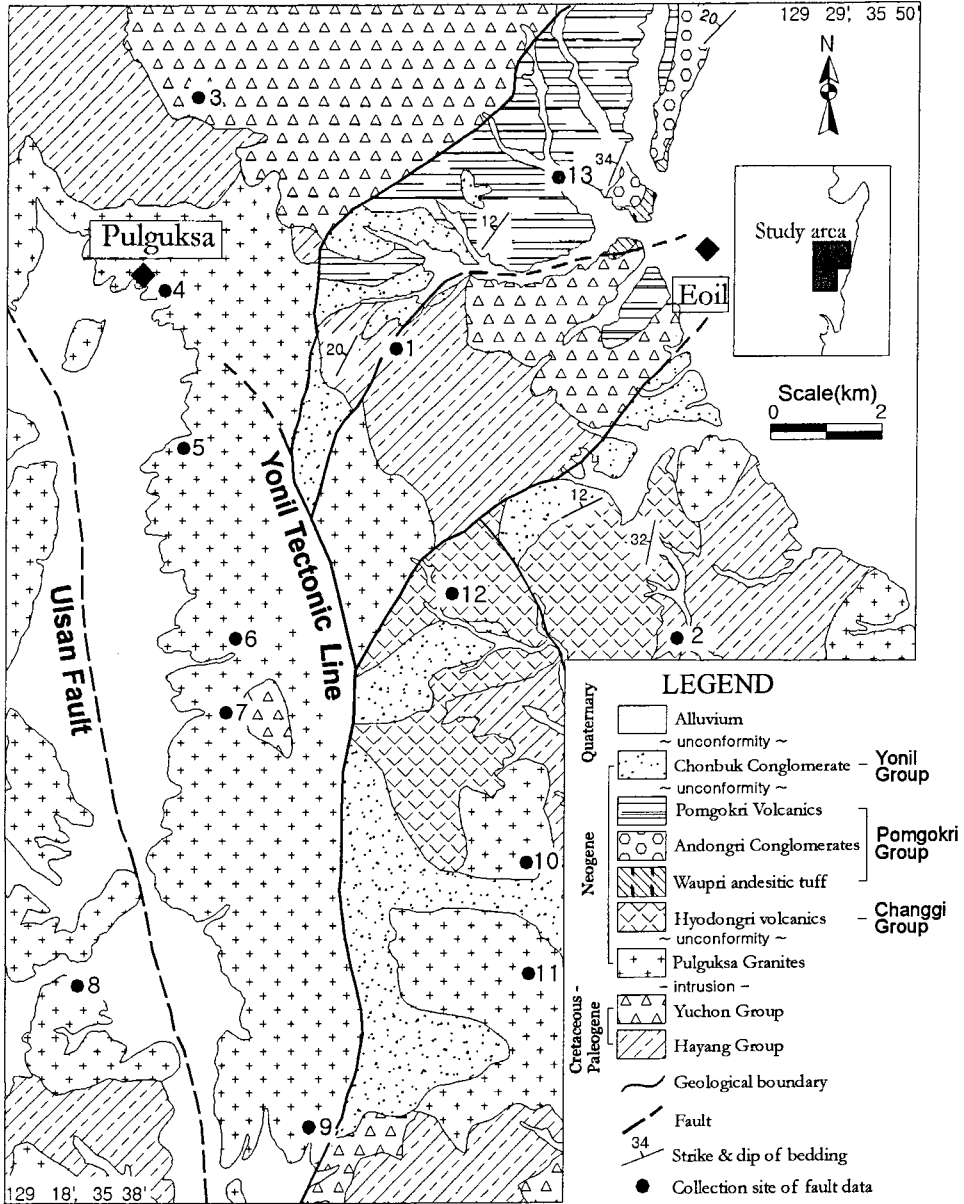
한반도 동남부에는 양산단층과 울산단층과 같은 주요 단층들이 존재하며 신생대 지구조운동의 주요 결과물인 제3기 퇴적분지들이 밀집되어 분포한다. 퇴적분지들은 올리고세-중기 마이오세초 동안의 동해확장에 기인한 지각신장에 의해 만들어졌으며(한중환 외, 1987; 김인수, 1992; Yoon and Chough, 1995; 손문, 1998), 약 15Ma에 이르러서는 태평양판과 필리핀판의 섭입각과 섭입방향의 변화로 응력이 반전되면서 확장이 종결되고 융기를 경험한 것으로 알려져 있다(Chough and Barg, 1987; 김인수, 1992; 손문 외, 1996, 손문·김인수, 1996). 또한, 최근 들어 울산단층대와 그 동쪽 제3기 분지지역에서 활동성이 의심되는 다수의 제4기 단층들이 보고되고 있어(Kyung and Okada, 1995; 류충렬 외, 1996; 경재복 외, 1999; 이봉주 외, 1999; 장태우, 1999), 한반도 동남부는 현재까지도 구조운동이 계속되고 있는 지역임이 밝혀지고 있다. 따라서, 이 지역은 신생대 동안 지구조환경의 변화에 따라 여러 번의 구조운동을 겪었음이 분명하다. 그러므로 동해 확장을 비롯한 동아시아 신생대 주요 지각변형사를 명확히 이해하기 위해서는 한반도 동남부의 지각변형에 관한 연구가 필수적일 것이다. 그러나, 이러한 연구는 아직은 시작단계에 불과하며(손문·김인수, 1994; 황재하, 1994; 장태우·백용, 1995) 현재까지 충분히 수행되지 못하였다. 때문에 이 지역에 산재하고 있는 단층과 절리와 같은 취성 변형요소들을 이용한 고응력장 복원의 필요성이 오늘날 크게 부각되고 있다.

본 연구지역은 울산단층 일원과 그 동쪽 제3기 분지 지역이다(Fig. 1). 이 지역의 주요 단열대로는 북북서 내지 남북 방향으로 뻗어있는 울산단층과 연일구조선, 그리고 연일구조선에 의해 남서쪽으로의 연장이 규제되며 북동쪽으로 뻗어있는 정단층들이 이에 해당한다. 울산단층은 김중환 외(1976)의 Landsat-1 영상판독에 의하여 주요 구조선으로 처음 인지된 후, 양산단층과 함께 한반도 동남부 제3기 분지의 형성과 발달을 제어한 주요 지구조선(우수향 주향이동단층)으로 인식되어져 왔다(김옥준 외, 1980; 한중환 외, 1987; 김인수, 1992). 그러나 최근의 야외조사 및 고자기학적 연구에서 신생대 지체구조 및 제3기분지 발달에서 주된 역할을 하였던 구조선은 울산단층이 아니라 이보다 동쪽으로 약

5km 떨어진 곳에 위치한 연일구조선(우수향 주향이동단층)임이 주장되고 있다(김인수 외, 1998; 손문 외, 1999). 이 구조선은 울산단층이나 다른 대규모 단층들처럼 선상의 단층계곡을 형성하지는 않으나 약 50m 이상의 단층각력 및 비지대가 연속적으로 관찰되며 지층의 분포 및 지질구조를 규제하고 있다. 특히, 구조선과 접하여 연일층군 천북역암이 대규모로 퇴적되어 있어(Fig. 1), 연일구조선은 이들 역암의 퇴적과 밀접한 관련을 갖는 단층선인 것으로 판단된다(손문 외, 1999). 연일구조선과 사교하며 북동 방향으로 뻗어있는 단층들은 대부분 제3기 분지들을 경계하는 정단층들로서, 이들 단층들의 활동은 마이오세초기-중기 동안 동해가 북북서-남남동방향으로 활발히 확장되는 시기에 동해연변 대륙지각이 북서-남동 방향으로 신장된 결과로 해석되고 있다(Son et al., 1997; 손문, 1998). 이들 단층들은 1:25,000 지형도 및 항공사진상에 선상구조로 명확히 인지된다.

한편, 연구지역에서 알려져 있는 지각변형의 주요 특징 중 하나로 지괴의 시계방향 수평회전운동을 들 수 있다. 고자기학적 연구결과에 의하면(김광호 외, 1993; 민경덕 외, 1994; 김인수·강희철, 1996; 손문 외, 1996; 손문, 1988) 제3기 암석들의 잔류자기 편각들의 다수가 시계방향으로 평균 30~40° 편향되어 있어 이 지역에서 대규모 우수향 주향이동단층운동에 의한 지괴의 수평회전운동이 발생한 것으로 판단된다(Beck, 1976). 이와 관련하여 김인수 외(1998)는 이러한 지괴회전의 서쪽 한계선이 연일구조선임을 보고하였다.

본 연구는 연구지역에서 수집된 취성변형요소들의 해석에 따라 시기별로 고응력장을 복원함으로써 한반도 동남부의 신생대 지각변형사를 체계화하는데 그 목적이 있다. 이를 위해, 분지기반암과 분지층전물을 대상으로 13개 지점에서 약 900여 개의 취성변형요소들로부터 운동학적 자료들이 수집되었다. 이 중 신뢰도가 높은 580개의 자료를 이용하여 Choi(1995)의 단층구조 분석(fault tectonic analysis) S/W를 이용하여 고응력장을 복원하였으며, 그 결과를 동아시아 신생대 지체구조사와 대비하였다. 이번 연구에서는 넓은 지역에서 여러 노두를 대상으로 취성변형요소를 측정함으로써 국부적이고 지엽적인 자료의 오염을 막고 또한 인접한 지역과의 규칙성을 찾는 데 역점을 두었다.



**Fig. 1.** Geologic and study locality map. 1, Antapjung(ANT); 2, Taegungsa(TAE); 3, Hangyongdong(HAN); 4, Sinwonsa(SIN); 5, Kamsansa(KAM); 6, Kaegokri(KAE); 7, Ipsil(IPS); 8, Upak(UPA); 9, Yaksu(YAK); 10, Tobang(TOB); 11, Kundae(KUN); 12, Hyodongri(HYO); 13, Changhangri(CHA).

### 일반 지질

연구지역의 지질은 경상누층군의 하양층군과 유천층군, 그리고 이들을 관입하고 있는 고제3기의 불국사화강암류로 구성되며, 그 상위에 제3기 화산암류와 퇴적암류가 분출, 피복되며 최상위에는 제4기 충적층이 하

위층들을 피복하고 있다(Fig. 1).

연구지역에서 백악기 하양층군에 해당하는 퇴적암류는 울산도폭의 울산층, 대구도폭의 대구층, 마산도폭의 함안층에 대비되며(박양대·윤형대, 1968), 녹회색 및 암회색을 띠는 사암과 셰일 그리고 소량의 응회질 사암, 역암, 이회암층으로 구성된다.

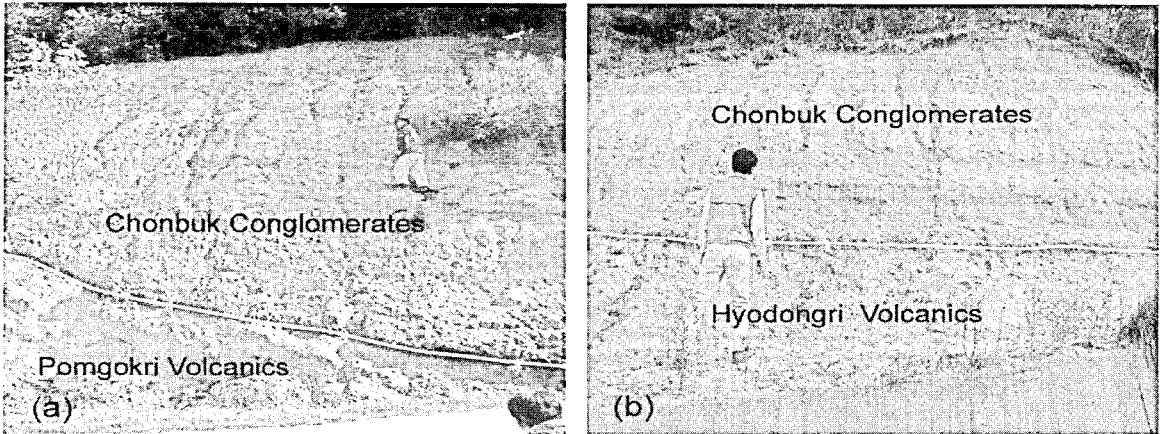


Fig. 2. Photographs showing angular unconformities between the Chonbuk Conglomerates and the lower formations. (a) an angular unconformity between the Chonbuk Conglomerates and the Hyodongri Volcanics. (b) an angular unconformity between the Chonbuk Conglomerates and the Pomgokri Volcanics.

이번 연구의 유천층군 화산암류는 윤선(1988)의 왕산 석영안산암질화산암류의 일부를 포함하는 것으로 암편들을 다량 포함하는 용결응회암이 대부분이며, 부분적으로 소량의 결정질 응회암과 안산암질 용암류로 구성된다. 이들은 접촉변성작용을 받았으며 치밀 견고하여 험준한 산악지형을 형성하고 있다. 왕산석영안산암질화산암류의 휘선티랙 및 K-Ar 전암연대는 팔레오세-에오세인 것으로 알려져 있다(진명식 외, 1988).

불국사 화강암류는 울산단층 주변에 넓게 분포하고 있으며, 암상에 따라 각섬석흑운모 화강섬록암, 각섬석화강암, 흑운모 화강암, 알카리장석 화강암의 네 암상으로 구분된다(이윤종, 1980; 윤성호·황인호, 1990; 고정선, 1994; 이미정 외, 1995; 이준동·황병훈, 1999). 이들 화강암류에 대한 방사성 절대연령을 종합하면 전체적으로 그 정치시기가 고제3기(약 65~40 Ma: Paleocene-Eocene)인 것으로 나타나나(진명식 외, 1990, 1991; 김근수 외, 1995; 이미정 외, 1995), 암상에 따른 확실한 연령차이를 발견하기는 어렵다(김인수 외, 1998). 한편, 이들 화강암류에 대한 고자기학적 연구에서는(손문 외, 1996; 김인수 외, 1998; 손문, 1998) 화강암류가 정치이후 경동운동을 겪지 않은 것으로 보고되었다.

연구지역의 동부에 분포하는 제3기 암석은 장기층군의 효동리화산암류, 범곡리층군의 와읍리응회암, 안동리층, 범곡리화산암류, 그리고 연일층군의 천북역암 등으로 구성된다(최위찬 외, 1988; 손문, 1998). 인접한 단

층활동에 의해 교란된 일부 지층을 제외하고는 지층들은 대체로 북동 방향의 주향을 가지며 북서 방향으로 경사져 있다. 그러나 지층의 상대적 연령에 따라 경사각의 크기는 차이를 가지는데 신기의 지층일수록 경사각이 알아지는 경향이 있다(손문·김인수, 1994; 손문, 1998). 특히 연일층군의 경우, 하위의 지층들에 비해 경사각의 감소가 현저하며, 하위의 범곡리층군 및 장기층군과 경사부정합적 관계를 보여준다(Fig. 2). 이러한 특징들은 제3기 지층들이 퇴적되는 동안 분지내부에서 북서쪽으로 향하는 퇴적동시성 지각 경동운동이 있었음을 의미하며, 특히 연일층군이 퇴적되는 시점 혹은 그 직전에 지각이 빠르게 경동되는 사건이 있었음을 지시해 준다.

장기층군의 효동리화산암류는 수매의 안산암질 용암류와 응회암 그리고 곳곳에 협재되어 있는 응회질 사암과 역암으로 구성된다. 안산암질 응회암에 대한 휘선티랙 연대는 저어콘과 인회석에서 각각 20.99, 24.38 Ma로 보고된 바 있다(진명식 외, 1989).

범곡리층군의 최하부층에 해당하는 와읍리응회암은 밝은 회색 또는 회갈색의 용결응회암과 결정질 응회암으로 구성되며 결정편으로는 사장석, 흑운모 그리고 각섬석이 관찰된다. 이 응회암의 절대연령은 21-22 Ma이며(Yoon, 1992), 휘선티랙 연령은 저어콘과 인회석에서 각각 18.52, 22.07 Ma로 보고되었다(진명식 외, 1989).

안동리층은 하부 역암대와 상부의 사암대로 구분된

다. 역암대는 분급이 불량한 아각형 내지 각형의 역들로 구성되며 상부로 갈수록 역의 원마도가 증가하고 상향세립화되는 특징을 보여준다. 역의 직경이 1m 이상인 것도 관찰된다. 이러한 퇴적학적 특징들은 대규모 단층운동과 함께 발생한 급격한 분지침강의 결과일 가능성이 크다(손문, 1998). 상부의 사암대는 역질 사암과 실트스톤의 교호대를 이루고 있으며 세일과 응회암질 사암이 협재된다. 층리의 발달이 뚜렷하며 호성환경에서 퇴적된 것으로 알려져 있다(최위찬 외, 1988).

범곡리화산암류는 주로 석영안산암질 화산쇄설암으로 구성되며 간헐적인 안산암질 화산활동에 의한 화산쇄설암을 포함하는 화산복합체이다(손문, 1998). 이들에 대한 휘선티랙 연령은 저어콘과 인회석에서 각각 20.64, 19.07 Ma로 보고되었다(진명식 외, 1989).

제3기 암석 중 최후기 지층인 연일층군 천북역암은 연구지역에서 경주시 양북면 토함산과 양남면 삼태봉을 잇는 능선, 즉 연일구조선을 따라 그 동쪽에 분포한다. 역은 대부분 화강암질 암석들이며 아각형 내지 각형으로 분급이 불량하다. 서쪽 산 능선에서 동쪽 저지로 갈수록 역의 원마도는 증가하며 세립화되어 역질 사암 및 이암으로 변하는 측방변화를 보여준다. 양북면 송전리일대의 이들 사암과 이암에서는 기수성(brackish) 내만 환경을 지시하는 연체동물화석군의 존재가 보고되고 있으며 화석 연령은 중기 마이오세초에 해당한다(Yoon, 1976).

제4기 층적층은 주로 연구지역의 서쪽부인 울산단층대를 따라 두껍게 분포하며, 동쪽에서 불국사화강암류와 충상단층으로 접하고 있다(Kyung and Okada, 1995; 손문 외, 1999).

## 고응력장 분석

### 단층구조요소의 수집과 분석

단층의 생성 및 운동과 관련된 고응력장 해석에 관한 시도로서, Anderson (1942), Bott(1959), Arthaud(1969) 등의 기본 이론을 근거하여 단층 이동(fault slip) 자료의 역산에 의한 지구조 응력 텐서(tectonic stress tensor)를 구하는 다양한 방법과 이론들이 제안되어 왔다. 이러한 방법의 대부분은 실제 야외에서 측정된 이동 벡터(slip vector)와 이들 자료에서 구한 이론적인 벡

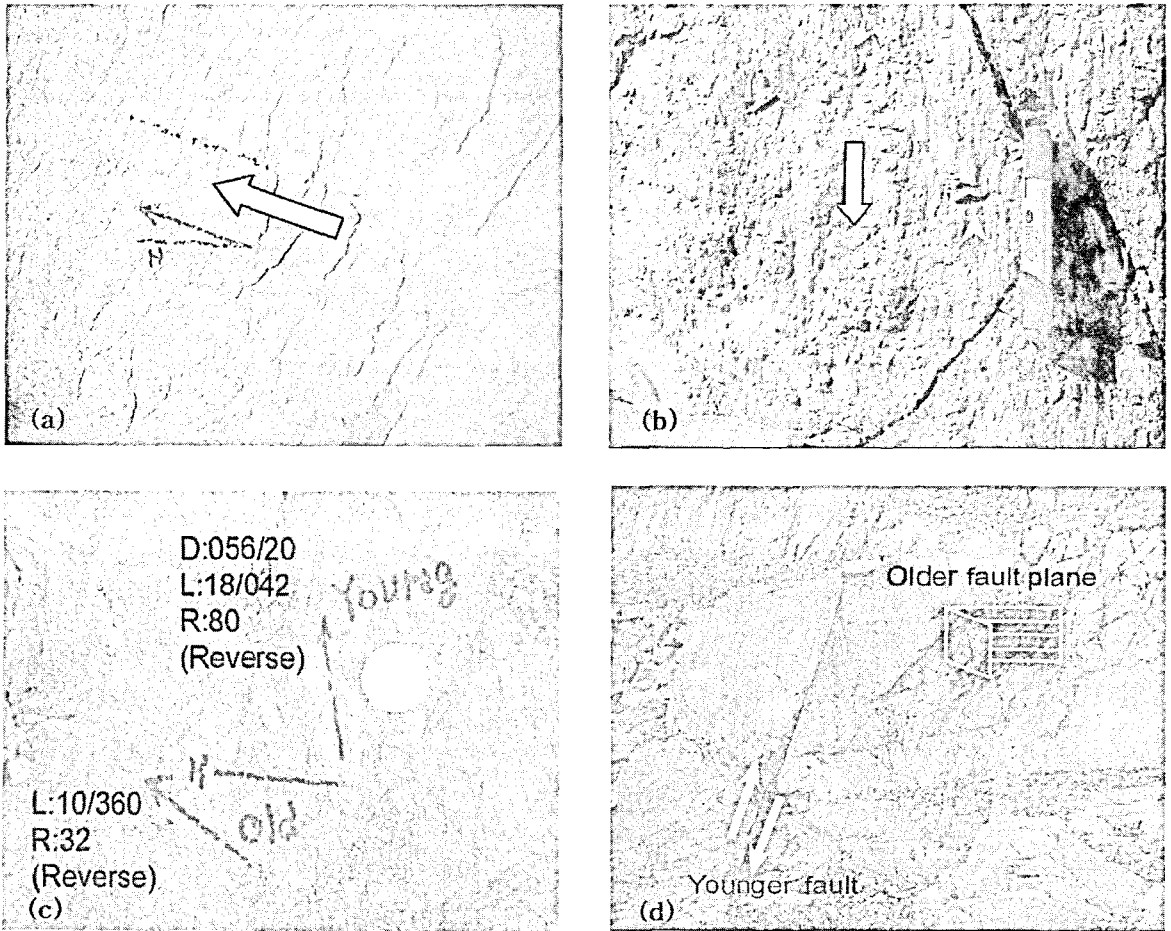
터와의 차가 최소화되게 하는 최소자승법을 사용하여 해를 찾아낸다(Angelier, 1989, 1990; 최범영, 1991, Choi, 1995, Choi *et al.*, 1996). 이 연구에서는 단층구조 분석(fault tectonic analysis)을 위해 Choi(1995)의 역산 방법을 이용하여 고응력장을 복원하였으며, 관찰된 상대년대에 따라 지구조사건의 계통을 결정하고, 그 결과를 광역적인 지구조 변형특성과 대비하였다.

야외작업으로, 단층면들의 주향과 경사, 단층면상에 존재하는 조선의 선경사(plunge)와 선주향(bearing) 그리고 선주각(rake)을 측정하였으며, 운동 감각을 인식할 수 있는 지시자들을 관찰·기재하였다(Fig. 3a, b). 또한, 취성변형요소들간의 선후관계를 밝히기 위하여 서로 다른 시기의 단층조선간의 상호 절단관계, 맥암과 소단층의 상호 절단관계, 소단층들간의 상호 절단관계와 같은 상대년대 인식자료들을 관찰하였다(Fig. 3c, d).

총 13개 지점에서 약 900개의 취성변형요소들이 측정되었는데, 백악기 하양층군 퇴적암류 2개 지점, 고제3기 불국사 화강암류 8개 지점과 유천층군 1개 지점, 그리고 신제3기 마이오세 암석 2개 지점을 연구대상으로 하였다(Fig. 1). 따라서 이번 연구에서 수행되는 고응력장 복원의 지질시대에는 주로 신생대이며 하양층군 퇴적암류를 대상으로 한 경우에는 백악기말의 응력장도 포함될 수 있다. 이번 연구에서 측정된 취성변형요소들은 대부분 노두 규모의 소단층들로서, 이들 모두의 주향, 경사방향, 경사각, 그리고 선주각을 장미도표로 도시하면 Fig. 4와 같다. 주향은 N80°~90°W, N50°~60°W, N40°~50°E 방향이 우세하며, 경사방향은 남쪽이 가장 우세하고 대부분 남동쪽으로 향하는 것이 특징이다. 그리고 경사각은 전반적으로 50°이상이며 70°이상의 고각도의 단층면이 대부분을 차지하고 있다. 선주각은 20~30°에서 가장 높은 빈도수를 보인다.

### 결과와 해석

변형요소들의 기하학적 특성과 야외에서 관찰된 상대년대 지시자를 근거로 획득된 13개 지점 총 46개의 응력장들을 상호 대비시켜 보면, 총 5번의 지구조사건을 지시하는 일련의 단층군집이 인지된다(Table 1). 이렇게 구분된 단층군집에 대해 상대년대 인식자료를 이용하여 행렬분석(matrix analysis)을 시도하면, 전체 54개의 자료들 중 80%인 43개의 자료가 만족하는 응력순서를 도출하였다(Table 2).



**Fig. 3.** Photographs showing the slip-sense indicators observed on the fault surfaces and the geometric relationship indicating relative chronology of minor faults. (a) Secondary R fractures showing dextral-slip movement. White arrow indicates the movement of missing block. (b) A slickenside possessing striae and a congruous step. Longer white arrow is parallel to the striae and shows the movement direction of missing block. Shorter white arrow indicates the congruous step. (c) Cross-cutting relationship of striae. Younger striae overprint on older striae. H: horizontal line, D: the attitude of fault surface, L: the attitudes of striae, R: the rakes of striae. (d) Cross-cutting relationship of adjacent small faults.

지표 근처 지각변형을 야기하는 응력장의 성격은 수직 응력축(vertical stress axis)의 종류에 따라 세 가지로 구분할 수 있다. 즉,  $\sigma_1$ 이 수직일 때는 인장상태,  $\sigma_2$ 가 수직일 때는 주향이동상태,  $\sigma_3$ 가 수직일 때는 압축상태라 할 수 있다. 또한, 이 세 가지 응력 체제는 응력비인  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 에 따라 다시 7가지 응력장으로 세분화시킬 수 있다(Delvaux *et al.*, 1997). 즉, 방사상인장(radial extension:  $\sigma_1$  수직,  $0 < \Phi < 0.25$ ), 순수인장(pure extension:  $\sigma_1$  수직,  $0.25 < \Phi < 0.75$ ), 횡인장(transensional:  $\sigma_1$  수직,  $0.75 < \Phi < 1$  또는  $\sigma_2$  수직,

$0.75 < \Phi < 1$ ), 순수주향이동(pure strike-slip:  $\sigma_2$  수직,  $0.25 < \Phi < 0.75$ ), 횡압축(transpression:  $\sigma_2$  수직,  $0 < \Phi < 0.25$  또는  $\sigma_3$  수직,  $0 < \Phi < 0.25$ ), 순수압축(pure compression:  $\sigma_3$  수직,  $0.25 < \Phi < 0.75$ ), 그리고 방사상압축(radial compression:  $\sigma_3$  수직,  $0.75 < \Phi < 1$ )으로 구분된다.

북서-남동 횡인장 응력장(지구조사건 1)

총 10개 지점에서 149개 소단층들의 운동학적 자료들이 수집되었다(Fig. 5a). 단층들의 주향은  $N0 \sim 90^\circ E$ 의 범위가 대부분이며, 특히  $N40 \sim 60^\circ E$  방향으로 집중된

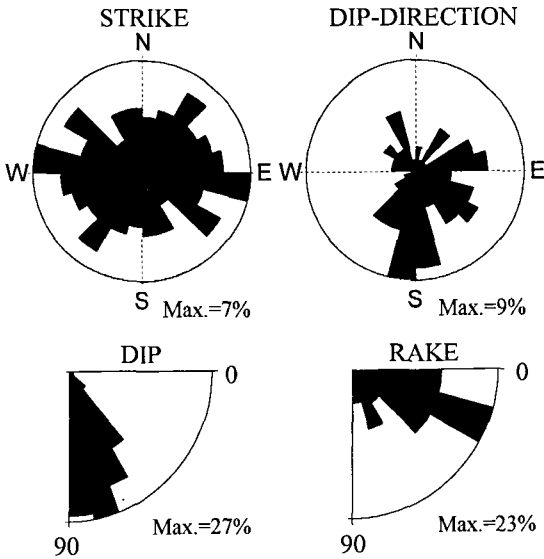


Fig. 4. Rose diagrams showing the distributions of attitudes of fault planes and striae observed in this study. N=580.

다. N40~60°E 방향의 단열들은 경사이동이 우세하며, 그 외 단열들은 주향이동이 우세하다. 경사각은 60~70°가 가장 우세하며, 선주각은 20~30°에서 가장 집중되나 전체적으로는 20~80°까지 넓은 범위의 분포를 보여준다. 각 지점별로 산출된 응력장의 특징을 살펴보면(Fig. 6; Table 1), 10개 지점 중 하양층군 퇴적암류인 안탑정(ANT)과 대궁사(TAE), 유천층군인 황룡동(HAN), 그리고 불국사 화강암류인 감산사(KAM), 개곡리(KAE), 입실(IPS), 토방(TOB) 지역에서는  $\sigma_1$ 이 수직 또는 아수직으로 나타나며, 불국사 화강암류인 우박(UPA), 건대(KUN), 신원사(SIN) 지역에서는  $\sigma_2$ 가 수직 또는 아수직으로 나타난다. 전체적으로  $\Phi$ 값은 0.7이상의 높은 값을 보이고 있으나 국부적으로 신원사, 대궁사 지역에서는 각각 0.259, 0.586의 다소 낮은 값이 나타나기도 한다. 따라서, 지구조 사건 I은 북서-남동 방향의  $\sigma_3$ 가 일관되게 작용하며  $\sigma_1$  또는  $\sigma_2$ 가 수직 또는 아수직으로 작용하는 횡인장의 특징을 보여준다.

연구지역에 분포하고 있는 제3기 분지들은 북동 방향의 축을 가진 반지구(half graben) 혹은 지구(graben) 형태를 이루고 있다. 또한, 이 지역의 주요 단열대인 북동 방향의 정단층들이 퇴적동시성 분지 경계단층을 이루고 있어 분지의 확장 방향은 북서-남동 방향인 것

으로 알려져 있다(손문 · 김인수, 1994; Son et al., 1997; 손문, 1998). 따라서, 지구조사건 I의 응력장은 제3기 분지 생성 및 확장과 직접적인 관련을 가지는 것으로 판단된다. 이 응력장이 작용한 시기는 이러한 응력장 하에서 생성된 분지내 충전물의 연령을 알아보면 쉽게 유추할 수 있다. 장기층군 효동리화산암류의 저어콘과 인회석의 휘선티랙 연령이 각각 20.99, 24.38 Ma이고(진명식 외, 1989), 범곡리층군 와읍리용회암의 절대연령은 21~22 Ma(Yoon, 1992), 저어콘과 인회석에서의 휘선티랙 연령은 각각 18.52, 22.07 Ma(진명식 외, 1989)인 것으로 보고되고 있으며, 연일층군의 사암층내 연체동물군의 화석연령이 중기 마이오세초(Yoon, 1976)임을 고려해 보면, 이 응력장은 24~16 Ma 사이에 작용한 것으로 결론지워진다. 이 시기는 동해가 활발하게 확장되던 시기과도 일치한다(Tamaki, 1986; Kaneoka et al., 1990; Chough and Lee, 1992; Jolivet and Tamaki, 1992).

북서-남동 횡압축 응력장(지구조 사건 II)

총 7개 지점에서 128개의 소단층들의 운동학적 자료가 수집되었다(Fig. 5b). 주향은 N30~80°W에서 주로 발달하며 경사각은 70°이상의 고각도를 이룬다. 선주각은 0~30°에 집중되어 있어 경사이동보다는 주향이동이 우세한 것이 특징이다. 이 응력장이 도출된 지점은 하양층군의 안탑정과 대궁사, 유천층군의 황룡동, 그리고 불국사 화강암류의 신원사, 입실, 우박, 건대로써 모든 지점에서  $\sigma_2$ 가 수직 내지 아수직으로 나타난다(Fig. 7; Table 1). 대궁사( $\Phi=0.597$ )를 제외하고는 응력비  $\Phi$ 은 대체로 0.1~0.2 내외의 낮은 값을 보여주고 있어 북서-남동 방향으로  $\sigma_1$ 이 강력하게 작용되었으며, 북동-남서방향으로 작용된  $\sigma_3$ 는  $\sigma_2$ 에 비해 세기가 큰 차이를 가지지 않은 것으로 판단된다. 따라서 지구조 사건 II는 북서-남동 방향의 강한 압축력이 주도하는 횡압축성 응력장이 특징이다.

연일구조선 연변에 산출되는 연일층군 천북역암은 최고 570m의 높은 산록부에 분포하고 있으며 퇴적 이후 상당량 침식되고 삭박된 흔적이 야외에서 관찰된다. 이러한 점은 연구지역에서 분지의 확장 및 퇴적활동의 종결은 물론이거니와 최소한 570m 이상의 지각 융기가 있었음을 지시하고 있다. 이러한 지구조적 응력반전현상은 15 Ma경에 시작된 것으로 알려져 있다(김인수,

Table 1. Results of paleostress tensors determined in this study.

Location	N	Method	$\sigma 1$		$\sigma 2$		$\sigma 3$		$\Phi$
			didp.	dip	didp.	dip	didp.	dip	
ANT	30	DAGUR	152.7	85.5	036.4	20.0	306.2	04.0	0.685
TAE	12	DAGUR	040.4	69.7	210.7	20.0	301.9	03.1	0.586
HAN	16	DAGUR	207.2	73.1	051.2	15.5	319.3	06.5	0.715
KAE	17	ASI	233.8	67.2	048.7	22.7	139.5	01.8	0.913
KAM	08	ASI	042.9	79.4	218.9	10.5	309.0	00.7	0.729
KUN	14	BURIAT	034.7	03.3	263.6	85.0	125.0	03.8	0.722
IPS	14	DAGUR	005.1	72.4	220.9	14.4	128.3	09.8	0.648
SIN	20	DAGUR	241.0	15.7	080.4	73.4	332.5	05.3	0.259
TOB	09	DAGUR	003.3	71.9	229.3	12.8	136.4	12.6	0.741
UPA	09	ASI	210.9	25.4	037.1	64.5	302.0	02.4	0.805
<b>TOTAL( I )</b>	<b>149</b>	<b>DAGUR</b>	<b>6.8</b>	<b>88.4</b>	<b>218.2</b>	<b>1.3</b>	<b>128.2</b>	<b>0.8</b>	<b>0.724</b>
ANT	16	BURIAT	299.8	18.6	080.3	66.4	205.0	13.9	0.069
TAE	11	BURIAT	296.6	08.6	045.9	65.3	202.9	22.9	0.579
HAN	19	DAGUR	145.0	03.0	245.5	73.8	054.1	15.9	0.137
KUN	18	DAGUR	328.8	07.3	101.0	79.2	237.8	07.9	0.251
IPS	33	BURIAT	131.7	05.1	245.1	77.3	040.7	11.6	0.150
SIN	07	ASI	294.5	05.2	187.9	72.2	026.1	17.0	0.191
UPA	24	DAGUR	143.7	02.9	332.0	87.1	233.7	00.4	0.364
<b>TOTAL( II )</b>	<b>128</b>	<b>DAGUR</b>	<b>313.1</b>	<b>2.9</b>	<b>206.6</b>	<b>80.0</b>	<b>43.6</b>	<b>9.6</b>	<b>0.100</b>
ANT	08	ASI	074.9	87.8	306.8	01.3	216.8	01.7	0.512
TAE	10	BURIAT	297.4	64.4	162.4	18.7	066.5	16.8	0.249
KAE	04	DAGUR	287.3	61.8	156.1	19.4	058.9	19.6	0.360
KUN	16	DAGUR	328.5	76.7	163.9	12.8	073.2	03.4	0.176
HAN	14	BURIAT	130.1	73.2	293.8	16.1	025.1	04.4	0.229
SIN	04	DAGUR	263.8	76.5	140.8	07.4	049.4	11.2	0.393
YAK	04	DAGUR	281.5	60.3	160.2	16.5	062.7	23.9	0.025
UPA	09	DAGUR	112.5	83.8	363.0	04.5	245.7	04.2	0.126
HYO	07	DAGUR	208.7	84.3	115.3	00.3	025.3	05.7	0.575
<b>TOTAL( III )</b>	<b>69</b>	<b>DAGUR</b>	<b>281.4</b>	<b>87.9</b>	<b>132.1</b>	<b>1.8</b>	<b>42.0</b>	<b>1.1</b>	<b>0.299</b>
TAE	09	ASI	196.7	17.0	102.2	14.5	333.8	67.3	0.308
KAE	09	ASI	035.0	03.1	125.6	12.5	291.2	77.1	0.164
HAN	19	DAGUR	013.5	03.8	104.9	20.0	273.2	69.6	0.275
KAM	06	DAGUR	022.6	12.7	290.9	07.7	170.4	75.1	0.161
IPS	06	ASI	025.7	04.4	117.5	22.2	285.1	67.4	0.313
CHA	18	DAGUR	204.2	01.3	111.6	62.5	294.9	27.4	0.174
SIN	11	DAGUR	009.6	05.9	111.3	63.3	276.7	26.0	0.380
TOB	10	ASI	203.6	16.1	324.8	60.9	106.3	23.6	0.385
UPA	09	DAGUR	008.7	18.2	132.1	59.2	270.3	23.9	0.389
HYO	03	DAGUR	195.1	00.6	287.3	74.6	105.0	15.4	0.288
<b>TOTAL( IV )</b>	<b>84</b>	<b>DAGUR</b>	<b>204.8</b>	<b>1.5</b>	<b>114.2</b>	<b>21.2</b>	<b>298.6</b>	<b>68.7</b>	<b>0.085</b>
ANT	17	BURIAT	268.1	08.9	019.9	67.2	174.6	86.4	0.168
TAE	06	DAGUR	098.3	23.9	192.7	09.9	303.7	63.9	0.286
KAE	15	BURIAT	088.5	02.8	358.4	02.2	230.4	18.6	0.134
KAM	14	DAGUR	265.4	01.9	355.6	07.1	160.3	82.7	0.242
KUN	20	DAGUR	263.8	04.6	166.8	56.8	356.7	32.8	0.408
HAN	17	DAGUR	253.2	07.6	343.3	00.6	077.8	82.4	0.330
IPS	10	DAGUR	073.1	17.7	226.0	70.2	340.4	08.4	0.226
SIN	09	DAGUR	246.0	03.7	336.6	09.9	135.5	79.4	0.351
YAK	08	ASI	094.2	15.1	004.2	00.1	273.9	74.9	0.214
CHA	16	DAGUR	264.5	04.2	169.1	51.8	357.7	37.9	0.418
<b>TOTAL( V )</b>	<b>132</b>	<b>DAGUR</b>	<b>79.8</b>	<b>2.4</b>	<b>170.3</b>	<b>12.4</b>	<b>339.0</b>	<b>77.4</b>	<b>0.104</b>

Note; See the Fig. 1 in this study for study locations, and see Choi (1995) for detailed explanations of methods. N, number of data;  $\sigma 1, \sigma 2, \sigma 3$ , principal stress axes ( $\sigma 1>\sigma 2>\sigma 3$ ); didp., dip-direction;  $\Phi$ , stress ratio ( $(\sigma 2-\sigma 3)/(\sigma 1-\sigma 3)$ ).

1992; 손문·김인수, 1996). 한반도 동남부와 인접한 대한해협과 단면도에서 중기 마이오세 이전의 퇴적층에서 북동-남서 방향의 습곡 및 역단층구조가 관찰되었으며(최동림 외, 1994), 취성변형요소들을 이용한 고응력장 복원연구에서는 22~16 Ma 동안 북동-남서 방향으로 작용하던 압축력이 15~10 Ma 사이에는 북서-남동 방향의 압축력으로 반전되어 쓰시마단층계가 우수향 주향이동운동에서 좌수향 주향이동운동으로 전

환된 것으로 보고되었다(Fabbri et al., 1996). 따라서, 지구조사건 II의 응력장은 15~10 Ma경 대한해협과 한반도 동남부에 가해진 북서-남동 방향의 압축력의 결과이며, 제3기 퇴적분지의 확장종결과 지괴운동의 원인이 된 것으로 판단된다.

북동-남서 순수 내지 방사상인장 응력장(지구조사건 III) 중 9개 지점에서 69개의 소단층들의 자료가 수집되



**Table 2.** Matrix analysis of relative chronology of tectonic events. Left first column and top rank: arbitrary relative chronological order. Number in blocks: number of data obtained from field observations. Chronology matrix corresponds to the best possible solution.

O	Y	I	II	III	IV	v
I			3	4	3	7
II				4	4	3
III	1		2		4	5
IV	2		1			6
v	1				4	

었다(Fig. 5c). 주향은 N80-180°E 범위내가 대부분으로, 지구조사건 II와 관련된 단열들의 주향과 유사한 방향성을 보여주고 있다. 경사각은 50-90° 범위에서 골고루 분포하며, 선주각은 60-80° 범위에 집중되어 주향이동보다는 경사이동의 특징을 보여준다. 도출된 9개 지점 모두에서  $\sigma_1$ 이 수직 내지 이수직이다(Fig. 8; Table 1). 하양층군인 대공사, 유천층군인 황룡동, 불국사 화강암류인 감산사, 입실, 우박에서는  $\Phi$ 값이 0.1~0.3 내외인 것으로 보아  $\sigma_3$ 은 북동-남서 방향으로 작용되었으나 북서-남동 방향의  $\sigma_2$ 와 세기에서 큰 차이가 없었던 것으로 판단된다. 따라서, 이들 지점에서의 응력장은 방사상인장의 특징을 보여준다. 한편, 하양층군 안탑정과 장기층군 효동리화산암류인 효동리(HYO)에서는  $\Phi$ 값이 0.5 내외로 북동-남서 방향으로  $\sigma_3$ 이 작용하는 순수인장의 응력장을 지시해준다. 종합하면, 지구조사건 III은 북동-남서 방향으로의 방사상인장 응력이 우세하였으며 지역적으로 순수인장 응력이 작용한 것으로 특징 지을 수 있다.

이 응력장과 관련된 소단층들의 주향과 경사방향이 대체로 지구조사건 II와 유사하고(Fig. 5) 방사상인장 응력이 우세하다는 점과 연구지역에 북동-남서 방향의 인장력에 의해 생성된 것으로 의심되는 주요 신장구조가 없다는 점으로 볼 때, 지구조사건 III은 지구조사건 II에 의해 발생한 지각응기 이후의 후 지구조(post-tectonic) 운동을 반영하는 것으로 판단된다.

**북북동-남남서 횡압축 응력장(지구조 사건 IV)**

10개 지점에서 84개의 소단층들의 자료가 수집되었다(Fig. 5d). 주향은 N0~10°W와 N70~90°W 방향이 우세한데 남북 방향의 것들은 주로 주향이동이 대부분

인 반면, 동서 방향의 것들은 경사이동이 우세한 특징을 보인다. 경사각은 70~90°가 우세하며 선주각은 20~30°에서 분포밀도가 높다. 하양층군 대공사, 유천층군 황룡동, 불국사 화강암류인 감산사, 입실, 우박에서는  $\sigma_3$ 가 수직 내지 이수직으로 작용하고 남북 내지 북북동 방향으로  $\sigma_1$ 이, 동서 내지 서북서 방향으로  $\sigma_2$ 가 작용되고 있다. 반면, 불국사화강암류인 신원사와 토방, 장기층군 효동리, 그리고 범곡리층군 장항리(CHA)에서는  $\sigma_2$ 가 수직 내지는 이수직으로 작용하며 남북 내지 북북동 방향으로  $\sigma_1$ 이, 동서 내지 서북서 방향으로  $\sigma_3$ 가 인지된다(Fig. 9; Table 1). 전체적으로  $\Phi$ 값은 0.1~0.3 내외의 낮은 값을 보이고 있어  $\sigma_1$ 은 남북 내지 북북동 방향으로 강하게 압축력을 작용하였으나  $\sigma_2$ 와  $\sigma_3$ 는 그 세기의 차이가 현저하지 않았던 것으로 판단된다. 따라서, 사건 IV는 북북동-남남서 횡압축 응력장으로 특징지을 수 있다. 이 응력장은 각 지점별 산출 빈도수가 타 응력장에 비해 적으나 산출지점들은 연구지역에 전반적으로 골고루 분포하고 있다.

이 응력장의 시기를 명확하게 결정지을 수 있는 광역적 지각변형에 관한 자료는 아직은 부족한 상태다. 그러나 최근 들어, 일본 남서부 시마네(Shimane)반도 동쪽 해안에서 얻어진 시추자료와 탄성과 단면도에서 후기 마이오세(약 6 Ma)를 전후로 하여 남북방향의 압축력과 관련된 용기 및 습곡구조가 관찰되었다(Itoh et al., 1997). 그리고 동해 울릉분지 남부해역의 탄성과 탐사자료에서는 후기 마이오세 증기에서 제4기층에 이르기까지 비교적 약한 압축운동에 의해 생성된 동서 방향의 단층 및 습곡 구조가 관찰되기도 하였다(최동림 외, 1994). 또한, Tada(1994)는 동해 ODP 시추자료를 대상으로 한 구조류 미화석연구에서 후기 마이오세 동안 동해에는 한류성 구조류가 난류성 구조류에 비해 매우 번성하였으며 3.5 Ma에 이르러 난류성 구조류가 번성하기 시작하였음을 밝혀냈다. 이는 후기 마이오세와 전기 플라이오세 동안 대한해협에 압축력이 가해져 난류의 유입이 자유롭지 못했음을 의미한다. 따라서, 지구조사건 IV는 약 6~3.5 Ma 전후 동해 남서부에 생성된 이들 동서 방향의 압축구조들과 밀접한 관련을 가질 가능성이 크다.

**동서 내지 동북동-서남서 횡압축 응력장(지구조 사건 V)**

9개 지점에서 132개의 소단층 자료들이 수집되었다

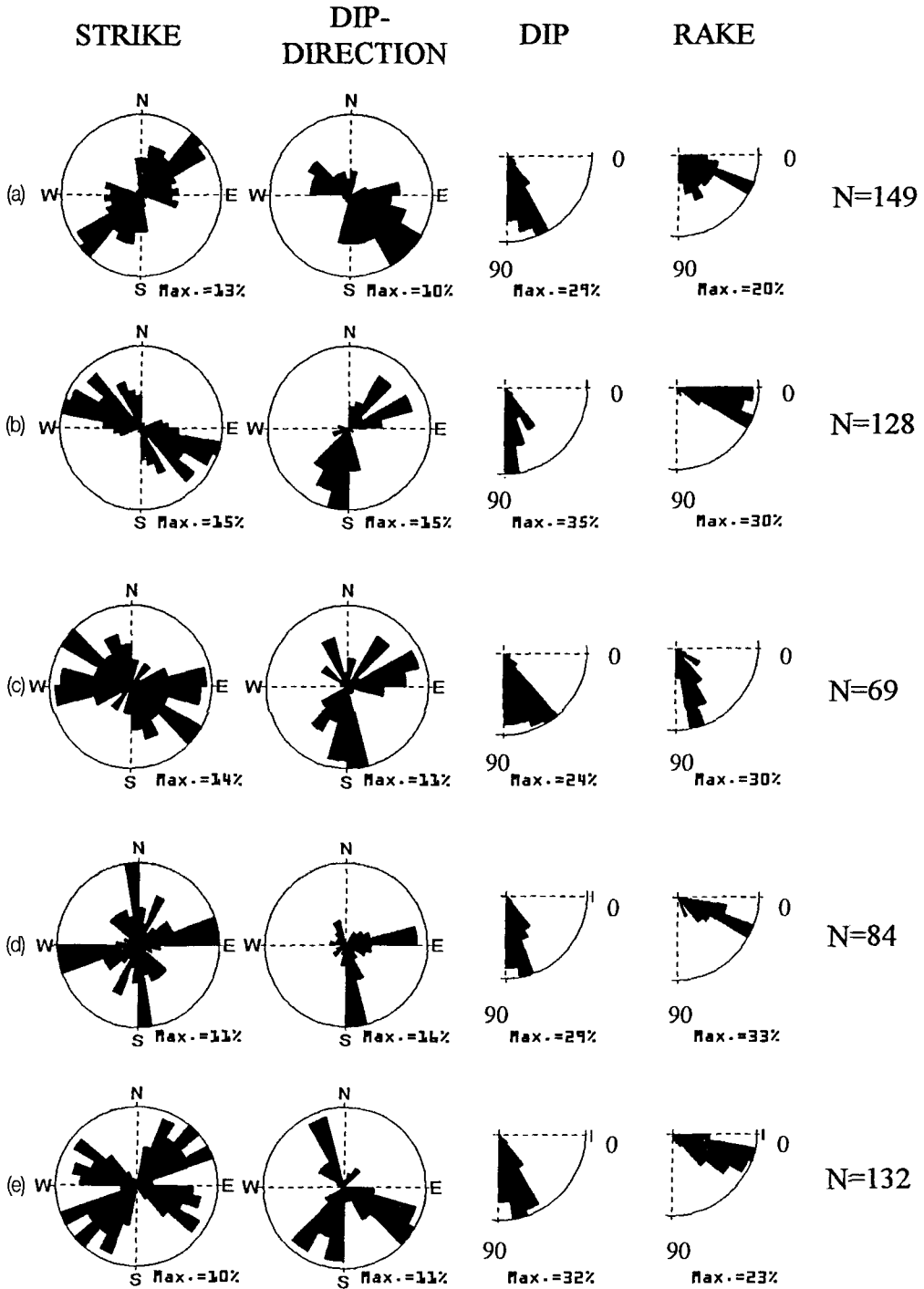
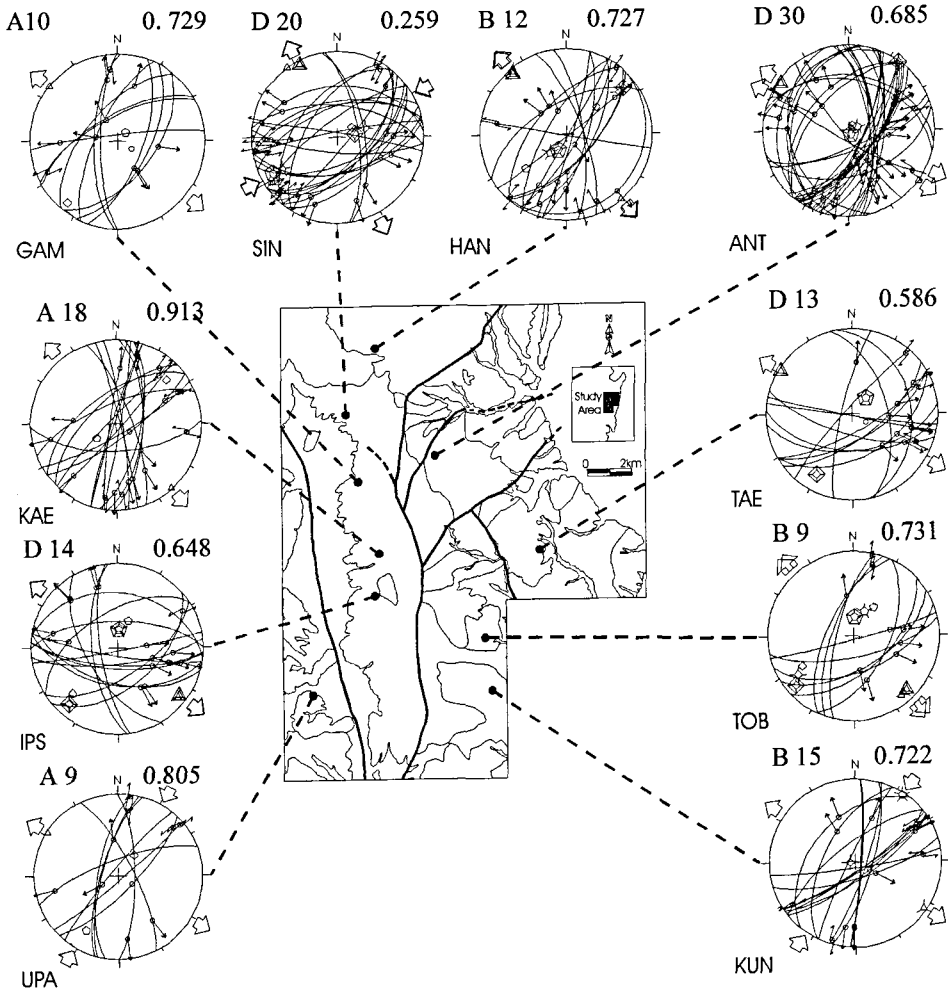


Fig. 5. Rose diagrams showing the distributions of attitudes of fault planes and striae, which are classified by tectonic events determined in this study. (a) tectonic event I, (b) II, (c) III, (d) IV, (e) V, respectively. See the text for detailed explanations. N: number of data.



**Fig. 6.** Stereographic projections of minor fault data and paleostress axes for stress field I (NW-SE transtension). Alphabets in upper left of stereograms mean the methods of stress inversion by Choi (1995). D: DAGUR, B: BURIAT, A: ASI. Numbers of upper left of them mean the number of used data for the calculations. Numbers of upper right of them show  $\Phi$  ratio ( $\sigma_2\text{-}\sigma_3/\sigma_1\text{-}\sigma_3$ ), and Alphabets of the lower left mean the site locations in Fig. 1. All polygons indicate the principal stress axes (pentagons:  $\sigma_1$ , squares:  $\sigma_2$ , triangles:  $\sigma_3$ ). Double polygons are those determined by DAGUR, branched polygons by BURIAT, and simple polygons by ASI.

(Fig. 5e). 주향은  $N20\sim70^\circ E$ 와  $N50\sim90^\circ W$ 의 두 그룹으로 나눌 수 있다. 경사각은  $60\sim80^\circ$  범위에서 우세하며 선주각은 전반적으로  $10\sim40^\circ$  사이로 주향이동성이 우세하다. 하양층군 안압정, 유천층군의 황룡동, 그리고 불국사화강암류인 신원사, 감산사, 개곡리, 입실, 대궁사에서는  $\sigma_3$ 가 수직 내지 이수직이며  $\sigma_1$ 이 동서 내지 동북동 방향,  $\sigma_2$ 가 남북 내지 북북서 방향이다(Fig. 10; Table 1). 불국사화강암류인 입실과 건대 그리고 범곡리층군 장항리에서는  $\sigma_2$ 가 수직 또는 이수직이고 역시

$\sigma_1$ 이 동서 내지 동북동 방향으로,  $\sigma_3$ 가 남북 내지 북북서 방향으로 작용한다. 전체적으로  $\Phi$ 값은 0.1~0.3 내외로서  $\sigma_2$  또는  $\sigma_3$ 가 수직 또는 이수직이며 동서 내지 동북동 방향으로  $\sigma_1$ 이 강하게 작용하는 횡압축성 응력의 특징을 보여준다.

지구조사건 V와 관련된 자료들을 살펴보면 다음과 같다. 한반도 동해안에 인접한 후포분지에서 실시된 탄성과 자료해석에서 전기 플라이오세경에 남북 방향의 역단층 및 습곡구조가 형성되었음이 보고되었다(Yoon

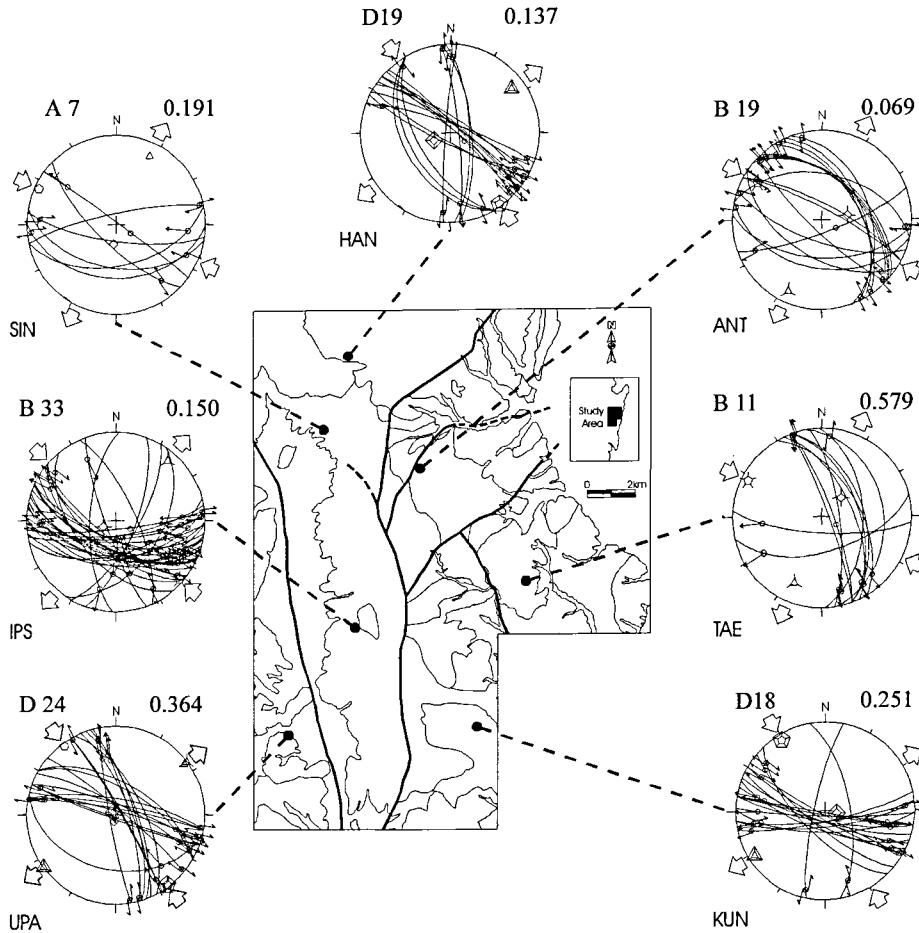


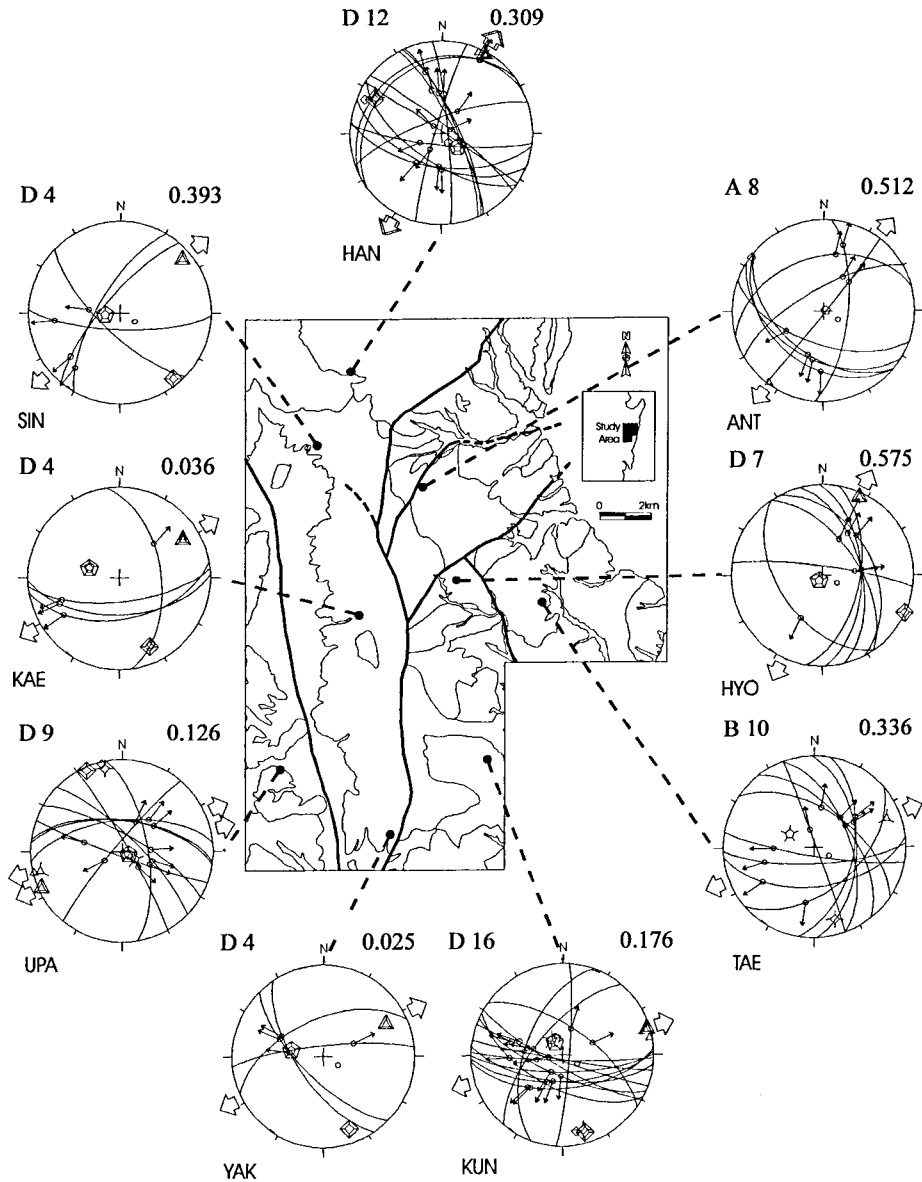
Fig. 7. Stereographic projections of minor fault data and paleostress axes for stress field II (NW-SE transpression). Numbers, alphabets, and symbols mean them as same as those in Fig. 6.

and Chough, 1995). 또한, 일본열도 이토이가와-시즈오카 구조선(ISTL, Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line)에서 약 5 Ma 이전까지는 인장응력상태였으나 그 이후부터는 동서압축과 관련한 역단층구조가 나타남이 보고되었다(Ikeda *et al.*, 1996). 그리고 한반도 동남부에서도 동서 내지 동북동방향의 압축력을 지시하는 제4기 충상단층 및 지진해석자료가 제시되고 있다(이봉주 외, 1999; 전명순 외, 1999; 장태우, 1999). 이와 관련하여 경재복 외(1999)는 양산단층 주변 제4기 단층의 단층비지에 대한 TL 연대측정 결과 단층의 최후기 활동시기를 약 10만년 이내일 것으로 결론지었다. 따라서, 지구조사건 V는 빠르면 약 5 Ma, 늦어도 대한해협에 난류가 유입되기 시작한 3.5 Ma(Tada, 1994)에는 시작하여

현재까지 지속되어 오는 응력기인 것으로 해석된다.

### 토 의

한반도 동남부는 신생대 동안 다중 구조변형을 겪은 지역으로서 지역적인 응력장보다는 동아시아의 광역적인 지체구조 환경변화의 영향을 받은 것으로 판단된다. 한반도는 거시적으로 보면 유라시아판에 위치하며 태평양판과 필리핀해판의 섭입에 영향을 받는 활동성 연변부(active margin)에 접하고 있을 뿐만 아니라 (Kimura and Tamaki, 1986; Celaya and McCabe, 1987) 유라시아판과 인도판의 충돌과 관련한 동아시아의 광역적 대륙지각변형운동(Tapponnier *et al.*, 1982)의 영향



**Fig. 8.** Stereographic projections of minor fault data and paleostress axes for stress field III (NE-SW pure or radial extension). Numbers, alphabets, and symbols mean them as same as those in Fig. 6.

을 함께 받고있다(Jolivet *et al.*, 1990; 김인수, 1992; Wei and Seno, 1998).

지구조 사건 I 은 24~16 Ma경 제3기 분지 생성 및 확장과 밀접한 관련을 가지는 응력장으로써 이는 동해가 활발히 확장하던 시기와도 일치한다. 동해 생성에 관한 이론은 학자들간에 다양한 의견이 있기는 하나 크게 보면, 동해의 동쪽과 서쪽 경계부에서 발생한 대

규모 우수향 주향이동단층활동에 의한 당겨열림형 (pull-apart) 확장모델(Kimura and Tamaki, 1986; Lallemand and Jolivet, 1986; Jolivet *et al.*, 1990; Fabbri *et al.*, 1996)과 일본열도의 해구쪽 퇴각(trenchward retreat)에 의한 부채꼴식(fan-shape 또는 bar room door) 확장모델(Otofuji *et al.*, 1985, 1994; Celaya and McCabe, 1987; Hayashida *et al.*, 1991)로 양분된다. 한

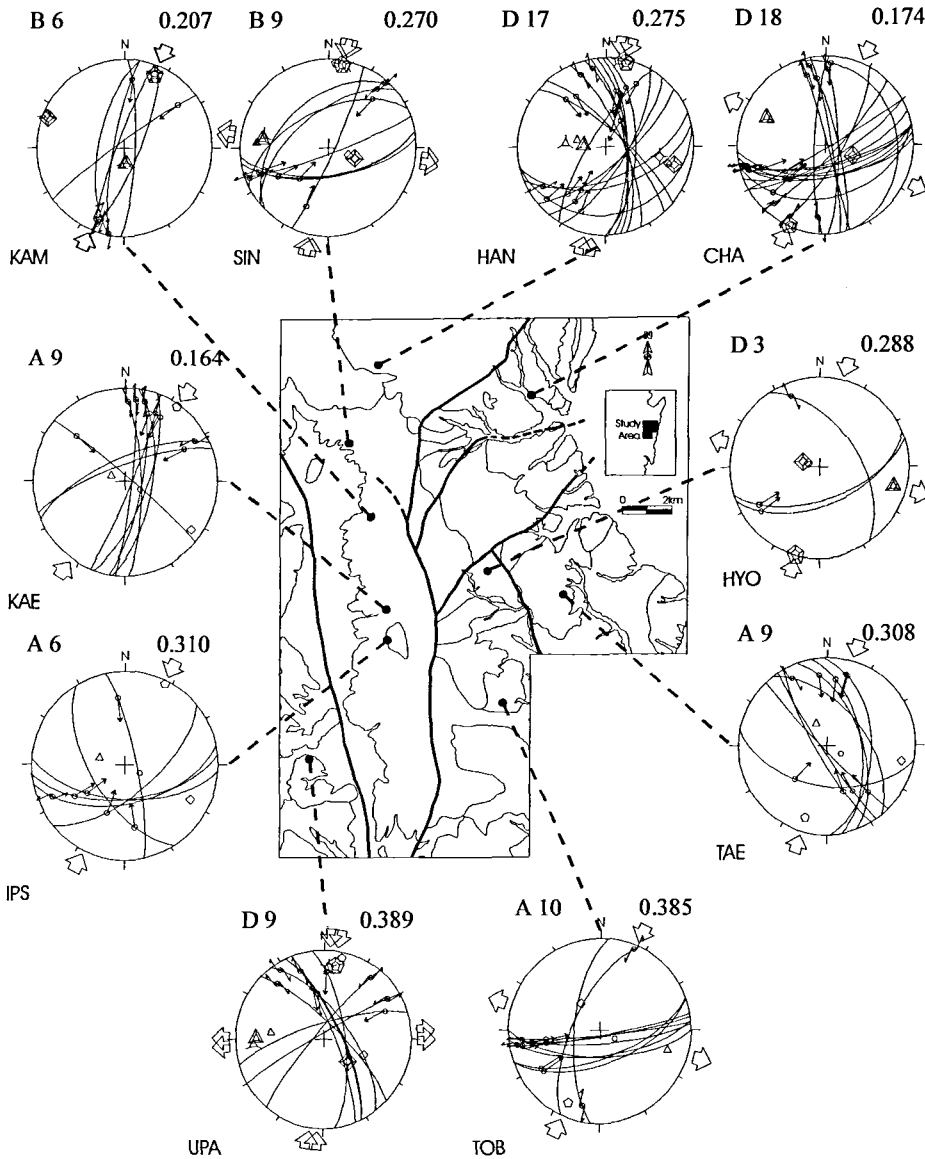


Fig. 9. Stereographic projections of minor fault data and paleostress axes for stress field IV (N-S transpression). Numbers, alphabets, and symbols mean them as same as those in Fig. 6.

편, 연구지역의 제3기 분지의 생성에 관한 이론도 학자에 따라 크게 우수향 주향이동단층활동에 의한 당겨열림형 모델(한중환 외, 1987; 김인수, 1992; Yoon and Chough, 1995; 손문, 1998)과 지하 소성체물질에 의한 다이아피어(diapir) 모델(Yoon, 1992, 1997)로 양분된다. 이번 연구의 고응력장 분석결과에 의하면, 지구조사건 1은 횡인장성 응력장, 즉 주향이동과 정단층성 경사이동의 성격이 함께 나타나는 응력장의 특징을 보이고 있

으므로 동해와 제3기 분지의 생성기구는 당겨열림형 확장임을 지지하고 있다.

한편, 연구지역에는 신생대동안 지괴의 시계방향 수평회전운동이 있었던 것으로 알려져 있다. 최근 연구들에서(김광호 외, 1994; 손문, 1998; Lee et al., 1999) 이러한 회전운동은 에오세에 시작하여 17 내지 16 Ma까지 계속되었으며, 회전량은 전기 마이오세 초 암석에서 평균 30~40°인 것으로 보고되었다. 따라서, 지구조사

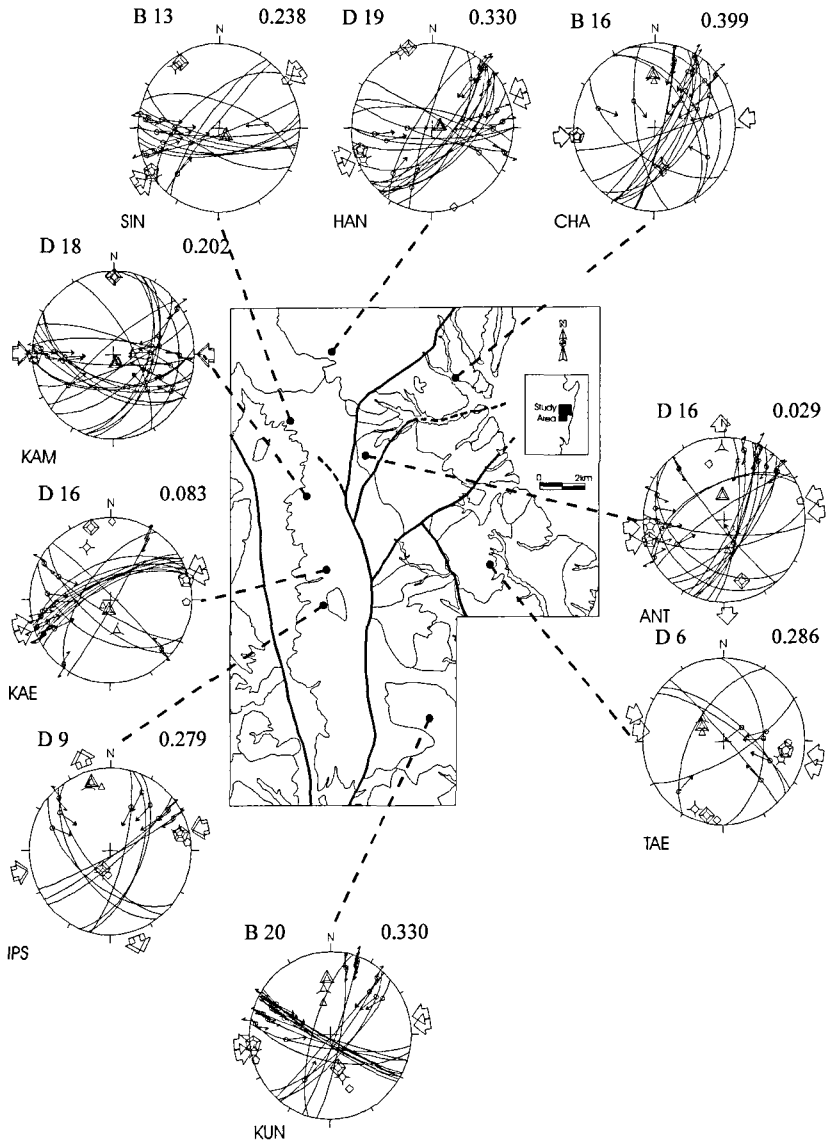


Fig. 10. Stereographic projections of minor fault data and paleostress axes for stress field V (E-W transpression). Numbers, alphabets, and symbols mean them as same as those in Fig. 6.

건 I의 응력장을 반시계 방향으로 35° 복원하면 당시의 주 최대응력축( $\sigma_1$ )은 북동 방향이 아니라 북북동 방향이며, 주 최소응력축( $\sigma_3$ )은 북서 방향이 아니라 서북서 방향일 가능성이 있다. 그러나, 김인수 외(1998)가 제안한 지괴회전의 서쪽 한계선인 연일구조선을 경계로 동쪽지역과 서쪽지역의 주 응력축들의 방향을 비교해 보면 양 지역간에 응력축 방향의 뚜렷한 차이를 발견하기

어렵다(Fig. 6). 이러한 현상을 명확히 해석하기에는 현재로서는 무리가 있으나 두 가지의 가능성을 생각해 볼 수 있다. 첫째, 지괴회전의 서쪽 한계선이 연일구조선이 아닐 가능성이 있다. 그러나, 지질도상에서 이 구조선은 마이오세 암석들의 분포와 지질구조들을 명확히 규제하고 있으며(Fig. 1), 또한 이 보다 서쪽지역에서 행해진 고자기학적 연구들(강희철 외, 1996; 김인수 외, 1998)

에서 편향된 잔류자기가 전혀 관찰되지 않고 있음은 이러한 가정을 어렵게 하고 있다. 둘째로, 지괴의 수평회전운동은 연구지역에서 비교적 규모가 큰 기존 단층들의 재활성에 의해 주도되었으며, 이번 연구의 대상이 된 소단층들은 지괴회전이 30~40° 진행된 후 이차적으로 생성되었을 가능성이 있다. Ron *et al.*(1990)은 주향이동성 지구조환경에서 지괴의 회전량이 약 35° 전후가 될 때 회전을 주도한 기존 단층면상에 수직응력(normal stress)이 증가하여 지괴회전이 멈추고 단층지괴내에 이차적인 단열이 발생함을 제안한 바 있다. 이와 함께, 지괴회전 전에 존재했던 단열면의 조선은 지괴회전운동과 이후 뒤따르는 응력장에 의해 단열면이 재활성되면서 변질되고 지워졌을 가능성도 배제할 수 없다. 현재로서는 이 두 가지 가정 중 어떠한 것이 옳은지를 정확하게 판단하기는 어려우나, 연구지역의 백악기에서 신제3기에 이르는 모든 암석들에서 분지형성 이전의 응력장이 도출되지 않고 있어 전자보다는 후자에 원인이 있을 가능성이 크다.

약 15 Ma경에 이르러 남서 일본열도는 매우 빠른 속도로 시계방향의 회전운동을 경험하였다(Hayashida and Itoh, 1984; Otofujii *et al.*, 1985, 1994; Jolivet and Tamaki, 1992). 또한, 대한해협은 북동 방향의 역단층과 습곡구조가 생성되고 쓰시마단층계는 우수향에서 좌수향의 주향이동단층운동으로 반전되었다(김인수, 1992; 최동림 외, 1994; Fabbri *et al.*, 1996). 당시 동북아시아에서는 필리핀해판의 이즈-보닌 아크(Izu-Bonin arc)(Otofujii and Matsuda, 1987) 혹은 고대륙 쿠로시오(Kuroshio)와 일본 남서부가 충돌해(김인수, 1992) 대한해협에 북서향 압축력이 가해지는 반면, 동해의 북동부에 위치한 야마토(Yamato) 분지는 태평양판의 영향으로 계속적으로 남동쪽으로 확장됨으로써 일본 남서부를 시계방향으로 회전시키는 짝힘(couple force)이 발생하고 있었을 가능성이 크다. Chough와 Barg(1987)에 의하면 약 10 Ma까지 태평양판의 섭입각이 고각도로 유지되어 계속적으로 울릉분지가 확장된 것으로 해석한 바 있다. 따라서 남서일본 지괴의 회전과 함께 대한해협에 가해진 북서-남동 방향의 압축력은 연구지역에 까지 영향을 미쳐 지구조 사건 II와 관련된 지각변형을 주도한 것으로 보인다. 이 응력장은 연구지역 퇴적분지들의 확장을 종결시켰으며 지괴를 융기시켰을 것이다. Fabbri *et al.*(1996)은 쓰시마섬 일원에서 약 10 Ma 이

후의 암석들은 이 북서-남동 방향의 압축력에 의해 변형되지 않았음을 보고하였다. 따라서 이러한 응력장은 약 10 Ma까지 지속된 것으로 결론지었다. 한편, 지구조 사건 III은 앞서 서술한 바와 같이 지구조사건 II에 의해 발생한 지각융기 이후의 후 지구조적 응력의 성격을 보여주고 있다. 따라서 사건 III은 10 Ma 전후에 시작되었으며, 이때부터 필리핀해판의 북서향 활동은 일정 기간동안 소강상태를 유지하였을 가능성이 크다(Seno, 1989).

필리핀해판은 약 6 Ma에 이르러서 북쪽으로 다시 이동을 시작하여(Seno, 1989; Itoh *et al.*, 1997, 1998) 일본 남서부에 남북 방향의 압축력을 가한 것으로 보인다. 필리핀해판의 섭입이 재개됨에 따라 일본 남서부 동해안에는 동서 방향의 역단층과 습곡구조가 만들어졌으며(Itoh *et al.*, 1997, 1998), 대한해협은 융기되고 좁아져 난류의 유입이 차단되고 동해에는 한류성 구조류가 번성하기 시작하였다(Tada, 1994). 이로 인해 한반도 동남부에는 남북 내지 북북동 방향의 횡압축 응력으로 특징지어지는 지구조사건 IV가 발생하였으며, 이 때 연구지역은 다시금 지각융기를 경험하였을 것이다. 그러나 이 응력장에 의한 지각변형은 지구조 사건 II에 비해 그 정도가 약했던 것으로 보인다. 대한해협에서의 탄성과 탐사자료를 살펴보면 북동 방향에 비해 동서방향의 압축구조들이 그다지 뚜렷하지 않다(최동림 외, 1994). 본 연구에서도 지구조 사건 IV와 관련된 단열들이 약 14% 정도로 상대적으로 낮은 빈도수를 보이고 있다. 한편, 3.5 Ma경에 동해로 난류의 유입이 재개되었다(Tada, 1994). 이와 같은 변화는 필리핀해판의 섭입에 의한 남북 압축응력장이 매우 약화되어 대한해협에서 지괴의 침강활동이 재개되고 난류의 자유로운 소통이 발생하였음을 의미한다. 따라서, 연구지역의 지구조사건 IV는 이 때에 완전히 종결되었을 가능성이 크다.

5 Ma경에 이르러서는 일본의 이토이가와-시즈오카 구조선(ISTL, Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line)을 따라 인장응력이 동서압축응력으로 전환되면서 역단층구조가 형성되었으며(Ikeda *et al.*, 1996), 3.5 Ma경에는 동해로 난류의 유입이 재개되었음을 앞서 지적한 바 있다. 약 1.5 Ma경에는 필리핀해판의 섭입방향이 남북 방향에서 반시계 방향으로 회전되어 북서 방향으로 바뀌었다(Itoh *et al.*, 1998). 한반도 동해안에 인접한 후포분지에서는 전기 플라이오세에 남북 방향의 역단층 및 습곡



구조가 형성되었다(Yoon and Chough, 1995). 이러한 일련의 사건들은 5 Ma를 시작으로 필리핀해판에 의한 남북 방향의 압축력이 약해지면서 한반도 동남부 일원이 동서 방향의 압축력장으로 점진적으로 변화되었음을 시사해 주는 것이다. 따라서, 동서 내지 동북동 횡압축 응력장으로 대변되는 지구조사건 V는 5~3.5 Ma 사이에 시작된 것으로 결론지어진다. 이러한 동서 방향의 압축력은 현재 한반도가 동쪽에서 유라시아판 아래로 침강하는 태평양판의 압축응력(Caputo and Sato, 1996; Werff, 2000)과 서남쪽에서 유라시아판과 충돌하는 인도판의 압축응력의 영향(Tapponnier *et al.*, 1982; Caputo and Sato, 1996; Wei and Seno, 1998)을 동시에 받고 있기 때문일 가능성이 크다. 최근 양산 및 울산단층지역에서 발견되는 제4기 단층들은 이러한 동서 압축과 관련하여 동쪽의 상반이 서쪽의 하반위로 충상되는 기하를 보여준다(류충렬 외, 1996; 이봉주 외, 1999; 장태우, 1999). 이로 볼 때, 지구조사건 V를 통해서도 한반도 동남부에서 지각의 융기가 발생하고 있음을 알 수 있다. 현재 최고 570m 고지에 노출되어 있는 연일층군 천북역암은 15 Ma 이후의 이러한 일련의 지각 융기 사건들에 의한 결과일 것이다. 한편, 경재복 등(1999)의 제4기 단층비지에 대한 TL연대 측정결과에서 최후기 단층활동 시기가 약 10만년 이내일 가능성이 제시되었다. 따라서 지구조사건 V는 약 5~3 Ma경에 이르러 점진적으로 시작되었으며 현재까지 지속되어 오는 것으로 결론지어진다.

## 결론

한반도 동남부의 신생대 지각변형운동을 연구하기 위하여 13개 지점에서 900여 개의 단층이동자료들을 대상으로 고응력장을 분석하였다. 그 결과, 연구지역은 신생대동안 동아시아의 광역적인 지구조환경 변화에 의하여 다중의 지구조사건을 겪었음이 밝혀졌다.

지구조사건은 발생순서별로 (I) 북서-남동 횡인장기, (II) 북서-남동 횡압축기 (III) 북동-남서 순수인장 내지 방사상인장기, (IV) 북북동-남남서 횡압축기, (V) 동서 내지 동북동-서남서 횡압축기로 구분된다. 사건 I은 24~16 Ma사이 동해의 당겨열림형 확장의 결과로서 연구지역 제3기 분지들의 확장을 주도하였다. 지구조 사건 II는 15 Ma경 필리핀해판의 이즈-보닌 아크(Izu-

Bonnin arc) 혹은 고대륙 쿠로시오(Kuroshio)와 일본 남서부의 충돌에 의한 압축력의 결과로서 연구지역 제3기 분지들의 확장을 종결시켰으며 분지일원의 지괴들을 융기시키는 결과를 가져왔다. 이 사건은 10 Ma까지 지속되었다. 사건 III은 10 Ma경에 이르러 필리핀해판의 활동이 소강상태에 들어감으로서 사건 II에 의해 발생한 지각융기의 후지구조적 응력사건으로 해석된다. 사건 IV는 6 Ma경 필리핀해판이 북쪽으로 다시 이동을 재개한 결과로서 대한해협과 일본 남서부의 배후에 동서 방향의 압축구조를 만들었으며 연구지역의 지괴들을 다시 융기시켰다. 마지막으로, 사건 V는 5~3.5 Ma 사이에 한반도 일원에 필리핀판의 북상에 의한 남북 압축력이 점점 약해지고 태평양판의 섭입과 인도판의 충돌에 의한 동서 압축력의 영향이 점진적으로 증가한 결과로서 한반도 동해안에 남북 방향의 압축구조를 만들었으며 연구지역의 지괴들을 서쪽으로 충상시키는 결과를 가져왔다. 이 사건은 현재까지도 계속되고 있어 오늘날 동서 방향의 제4기 충상단층들과 지진을 발생시키고 있다.

## 사사

논문의 심사과정에서 유익한 지적과 충고를 해주신 한국자원연구소 황재하 박사님과 최병영 박사님께 감사드립니다. 본 연구는 저자들 중 손문의 1998년도 학술진흥재단 박사후연수과정 연구지원을 받은 연구임을 밝히며 이에 감사드립니다. 1999년 한국학술진흥재단의 학술연구비(1999-015-D1010)의 지원을 받았습니다.

## 참고문헌

- 강희철 · 김인수 · 손문 · 정현정, 1996, 양산단층지역에 분포하는 퇴적암 및 화성암류에 대한 고자기 연구. *자원환경지질*, 29, 753-765.
- 경재복 · 이기화 · 岡田篤正 · 渡 満久 · 鈴木康弘 · 竹村專二, 1999, 양산단층대 남부 상천리 일대의 트랜치조사에 의한 단층특성 규명. *한국지구과학회지*, 20, 101-110.
- 고정선, 1994, 경주 남산 일대의 A-type 화강암류의 지화학적 특징 및 성인. *부산대학교 교육학석사학위논문*, 61 p.
- 김광호 · 도성재 · 임동성, 1994, 장기반도에 분포하는 제3기 지층의 고자기. *한국지구과학회지*, 15, 278-285.
- 김광호 · 도성재 · 황창수 · 임동성, 1993, 포항분지에 분포하는 연일층군의 고자기 연구. *자원지질*, 26, 507-518.

- 김근수 · 김종열 · 정규귀 · 황진연 · 이준동, 1995, 경상북도 경주-감포 일원에 분포하는 화강암류의 Rb-Sr연대. 한국지구과학회지, 16, 272-280.
- 김옥준 · 정봉일 · 엄상호 · 장기홍 · 박봉순 · 강필중, 1980, 한반도의 지진지체구조 분석에 관한 연구. 과학기술지, 101-112.
- 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향 이동운동. 지질학회지, 28, 84-109.
- 김인수 · 강희철, 1996, 남한 제3기 분지지역에 대한 고자기 연구: 1. 장기지역. 자원환경지질, 29, 357-367.
- 김인수 · 손문 · 정현정 · 이준동 · 김정진 · 백인성, 1998, 경주-울산일원에 대한 지역지질 특성 연구: 울산단층주변 화강암류의 잔류자기와 대자율. 자원환경지질, 31, 31-43.
- 김종환 · 강필중 · 임정웅, 1976, Landsat-I 영상에 의한 영남지역 지질구조와 광상과의 관계연구. 지질학회지, 12, 79-89.
- 류충렬 · 양경희 · 이상원 · 김인수, 1996, 울산단층 주변의 제4기 단층. 부산대학교 사대논문집, 33, 311-327.
- 민경덕 · 김원균 · 이대하 · 이윤수 · 김인수 · 이영훈, 1994, 포항일원에 분포하는 제3기 암류에 대한 고지자기 연구. 자원환경지질, 27, 49-63.
- 박양대 · 윤형대, 1968, 한국지질도(1:50,000), 울산도폭(Sheet-7020-I) 및 설명서. 국립지질조사소, 20 p.
- 손문, 1998, 한반도 동남부 제3기 마이오세 분지의 형성과 발달: 구조지질학 및 고자기학적 고찰. 부산대학교 이학박사 학위논문, 233 p.
- 손문 · 강희철 · 김인수, 1996, 남한 제3기 분지지역에 대한 고자기 연구: 3. 정자-울산분지와 그 일원. 자원환경지질, 29, 509-52.
- 손문 · 김인수, 1994, 울산군 강동면 제3기 정자분지의 지질구조와 분지발달. 자원환경지질, 27, 65-80.
- 손문 · 김인수, 1996, 남한 제3기 분지지역에 대한 고자기 연구: 2. 포항분지 중부의 현무암질암. 자원환경지질, 29, 369-380.
- 손문 · 정혜윤 · 김승현 · 김인수 · 문태현 · 장태우, 1999, 한반도 동남부 신생대 지각변형과 연일구조선. 제54차 대한지질학회 학술발표회 초록집, 대한지질학회, 50.
- 윤선, 1988, 한반도 남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구보고서, 25 p.
- 윤성호 · 황인호, 1990, 경주 남산일대의 화강암의 암석학 및 지구화학의 특성. 한국지구과학회지, 11, 51-66.
- 이미정 · 이종익 · 이민성, 1995, 경주지역의 A-형 알카리장석 화강암에 대한 광물학 및 주성분원소 지구화학. 지질학회지, 31, 583-607.
- 이봉주 · 류충렬 · 최위찬, 1999, 경주시 양남면 일대의 제4기 단층. 지질학회지, 35(1), 1-14.
- 이윤중, 1980, 언양 및 울산지역 화강암질암류의 암석화학적 연구. 광산지질, 13, 69-79.
- 이준동 · 황병훈, 1999, 경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 20, 80-95.
- 장태우, 1999, 울산단층 동쪽지괴의 제4기 단층운동. 제54차 대한지질학회 학술발표회 초록집, 대한지질학회, 25.
- 장태우 · 백용, 1995, 경주-어일간 제3기 분지의 지구조 운동. 지질학회지, 31, 200-214.
- 전명순 · 전정수 · 제일영, 1999, 한반도 및 주변지역에서 발생한 지진의 지진발생 메커니즘 분석. 제54차 대한지질학회 학술발표회 초록집, 28.
- 진명식 · 김성재 · 신성천, 1988, K/Ar 및 쥘선트랙법에 의한 포항-감포 일대 화산암류의 암석연령 측정연구. 연구보고서 KR-87-27 동위원소 지질연구, 한국동력자원연구소, 51-88.
- 진명식 · 김성재 · 신성천, 1989, K/Ar 및 쥘선트랙법에 의한 한국동남부 지역 화강암 및 화산암의 암석 광물연령 측정연구. 연구보고서 KR-89-1C, 한국동력자원연구소, 65-105.
- 진명식 · 김성재 · 신성천, 1990, K-Ar과 쥘선트랙 연령측정에 의한 한국 동남부지역 화강암류의 지열사와 냉각사 연구. 연구보고서 KR-89-1C, 한국동력자원연구소, 65-105.
- 진명식 · 김성재 · 신성천, 1991, 한국 동남부지역 화강암류의 쥘선트랙 및 K-Ar 연령: 화성 활동사와 지체구조적 의의. 연구보고서 KR-90-1B-2, 한국동력자원연구소, 57-98.
- 최동림 · 오재경 · Mikio, S., 1994, 동해 울릉분지 남부해역의 신생대 지질구조 및 지구조 진화. 한국석유지질학회지, 2, 59-70.
- 최범영, 1991, 단층자료를 이용한 응력 텐서 계산방법에 대하여. 지질학회지, 27, 383-393.
- 최위찬 · 황재하 · 윤옥 · 김동학, 1988, 대한민국 지질도 어일(1:25,000)도폭 및 도폭설명서. NI 52-2-07-4, 한국동력자원연구소, 42.
- 한종환 · 광영훈 · 손진담 · 손병국, 1987, 한국 동남부지역 제3기 퇴적분지의 지체구조발달 및 퇴적환경 연구 (II). 연구보고서 KR-86-2-(B)-4, 한국동력자원연구소, 109 p.
- 황재하, 1994, 백악기초 이후 한반도 남동부에 작용한 고응력 복원. 지질학회지, 30 27-34.
- Anderson, E. M., 1942, The dynamic of faulting. Oliver and Boyd, Edinburgh, 191.
- Angelier, J., 1989, From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. Journal of Structural Geology, 11, 37-50.
- Angelier, J., 1990, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress - III. A new rapid direct inversion method by analytical means. International Journal of Geophysics, 103, 363-376.
- Arthaud, F., 1969, Methode de determination graphique de directions de raccourcissement, dallongement et intermediaire dune population de failles. Societe

- Geologique de France Bulletin, XI-7, 729-737.
- Beck, M. E., Jr., 1976, Discordant Paleomagnetic pole positions as evidence of regional shear in the western Cordillera of North America. *American Journal of Science*, 276, 694-712.
- Bott, M. H. P., 1959, The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine*, XCVI-2, 109-117.
- Caputa, R. and Sato, H., 1996, An integrated study to recent tectonics in Centra Japan: seismological, geodetic, morphotectonic and structural data compared. *Tectonophysics*, 262, 133-157.
- Celaya, M. and McCabe, R., 1987, Kinematic model for the opening of the Sea of Japan and the bending of the Japanese islands. *Geology*, 15, 53-57.
- Choi, P. Y., 1995, Aspects of stress inversion methods in fault tectonic analysis. *Annales Tectonic*, 9, 22-38.
- Choi, P. Y., Angelier, J., and Souffache, B., 1996, Distribution of angular misfits in fault slip data. *Journal of Structural Geology* 18, 1353-1367.
- 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. and Lee, K. E., 1992, Multi-stage volcanism in the Ulleung back-arc basin, East Sea (Sea of Japan). *The Island Arc*, 1, 32-39.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V., and San'kov, V., 1997, Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282, 1-38.
- Fabbri, O., Charvet, J., and Fournier, M., 1996, Alternate senses of displacement along the Tsushima fault system during the Neogene based on fracture analyses near the western margin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 257, 275-295.
- Hayashida, A., Fukui, T., and Torii, M., 1991, Paleomagnetism of the Early Miocene Kani group in southwest Japan and its implication for the opening of the Japan Sea. *Geophysical Research Letter*, 18, 1095-1098.
- Hayashida, A. and Itoh, Y., 1984, Paleoposition of southwest Japan at 16 Ma: implication from paleomagnetism of the Miocene Ichishi Group. *Earth and Planetary Science Letter*, 68, 335-342.
- Ikeda, Y., Shimazaki, K., and Yamazaki, H., 1996, A Primer on Active Faults in Japan. University of Tokyo Press, 133-137.
- Itoh, Y., Nakajima, T., and Takemura, A., 1997, Neogene deformation of the back-arc shelf of Southwest Japan and its impact on the palaeoenvironments of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 281, 71-82.
- Itoh, Y., Takemura, K., and Kamata, H., 1998, Basin forming history and tectonic evolution at the termination of a large transcurrent fault system: deformation mode of central Kyushu, Japan. *Tectonophysics*, 284, 135-150.
- Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the northeast Japan Arc. In: Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., McWilliams, M., et al. (eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 127/128, Part 2, 1311-1331.
- Jolivet, L., Davy, P., and Cobbold, P., 1990, Right-lateral shear along the northwest Pacific margin and the India-Eurasia collision. *Tectonics*, 9(6), 1409-1419.
- Kaneoka, I., Notsu, K., Takigami, Y., Fujioka, K., and Sakai, H., 1990, Constraints on the evolution of the Japan Sea based on <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar ages and Sr isotopic ratios for volcanic rocks of the Yamato Seamount Chain in the Japan Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 97, 195-204.
- Kimura, G and Tamaki, K., 1986, Collision, rotation and back-arc spreading: the case of the Okhotsk and Japan seas. *Tectonics*, 5, 389-401.
- Kyung, J. B. and Okada, A., 1995, Liquefaction phenomena due to the occurrences of great earthquake: Some cases in central Japan and Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 31, 237-250.
- Lallemant, S. and Jolivet, L., 1986, The Japan Sea, a pull-apart basin ? *Earth and Planetary Science Letter*, 76, 375-389.
- Lee, Y. S., Ishikawa, N., and Kim, W. K., 1999, Paleomagnetism of Tertiary rocks on the Korean Peninsula: Tectonic implications for the opening of the East Sea(Sea of Japan). *Tectonophysics*, 304, 131-149.
- Otofuji, Y. and Matsuda, T., 1987, Amount of clockwise rotation of southwest Japan-fan shape opening of the southwestern part of the Japan Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 85, 289-301.
- Otofuji, Y., Kambara, A., Matsuda, T., and Nohda, S., 1994, Counterclockwise rotation of Northeast Japan: Paleomagnetic evidence for regional extend and timing of rotation. *Earth and Planetary Science Letter*, 121, 503-508.
- Otofuji, Y., Matsuda, T., and Nohda, S., 1985, Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism of

- the Japan Arc. *Nature*, 317, 603-604.
- Ron, H., Nur, A. and Eyal, Y., 1990, Multiple strike-slip fault sets: a case study from the Dead Sea transform. *Tectonics*, 9(6), 1421-1431.
- Seno, T., 1989, Philippine Sea plate kinematics. *Modern Geology*, 14, 87-97.
- Son, M., Seo, H-J., Jung, H-J., and Kim, I-S., 1997, Extension direction and tectonic boundaries of the Miocene basins, Southeast Korea. *Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent: Short papers for the international symposium on the occasion of the 50th Anniversary of the Geological Society of Korea*, 104-109.
- Tada, R., 1994, Paleooceanographic evolution of the Japan Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, and Palaeoecology*, 108, 397-405.
- Tamaki, K., 1986, Age estimation of the Japan Sea on the basis of stratigraphy, basement depth, and heat flow data. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 35, 427-446.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Dain, A. Y. L., and Armijo, R., 1982, Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10, 611-616.
- Wei, D. and Seno, T., 1998, Determination of the Amurian Plate Motion. In Martin F. J. Flower and et al. (eds.), *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*, American Geophysical Union, *Geodynamic Series* 27, 337-346.
- Werff, W., 2000, Backarc deformation along the eastern Japan Sea margin, offshore northern Honshu. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18, 71-95.
- 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.
- Yoon, S., 1976, The geological and paleontological study of the Tertiary deposits of the Janggi-Eoil District of Korea. No. 1. Stratigraphy and geologic age of the Songjeon Formation. *Journal of Science*, Pusan National University, 15, 67-71.
- Yoon, S., 1992, Geology of the Tertiary Yangnam and Pohang basins, Korea. *Bulletin of Mizunami Fossil Museum*, 19, 13-31.
- Yoon, S., 1997, Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 281, 53-70.

---

2000년 2월 25일 원고 접수

2000년 6월 10일 원고 채택