

고응력 분석을 통한 양산단층의 구조운동사 Movement History of the Yangsan Fault based on Paleostress Analysis

장 천 중 (Chun Joong Chang)

장 태 우 (Tae Woo Chang)

전력연구원

경북대학교 지질학과

요약 / ABSTRACT

양산단층의 구조운동사를 해석하기 위하여 양산단층의 주향을 따라 양산시에서 경북 신평면까지 37개 지점에서 단층조선이 발달된 약 1,000개의 소단층과 330개의 인장절리를 분석하였다. 그 결과 순서별로 (I) NW-SE 신장, (II) ENE-WSW 압축과 NNW-SSE 신장, (III) NW-SE 압축, (IV) ENE-WSW 신장, (V) E-W 압축과 N-S 신장, 그리고 (VI) NNE-SSW 압축과 ESE-WNW 신장의 6개의 지구조 사건이 복원되었다. 이렇게 얻어진 6개의 순차적인 지구조 사건으로부터 북북동향하는 양산단층의 운동사를 해석할 때, 양산단층의 형성 초기에는 NW-SE 신장기를 갖는 지구조 사건 (I)과 연관된 인장절리가 발달하였고, 후에 지구조 사건 (I)과 매우 밀접한 사건 (II)에 의해 우수향 주향이동을 하였다. 이러한 운동은 마이오세 말까지 지속되었으며, 이 시기가 양산단층이 가장 활발히 운동했던 시기로 해석된다. 후속되는 지구조 사건 (III)과 (IV)에 의해 양산단층은 좌수향 주향이동을 하였다. 그 후 양산단층의 운동은 단층주향에 직각으로 작용하는 사건 (V)에 의해 일시적으로 접지되었다. 이 기간은 시기적으로 매우 일시적이었으며 응력의 크기도 역시 작은 것으로 판단된다. 마지막으로 지구조 사건 (VI)에 의한 미약한 신장 혹은 우수향 주향이동을 하였다.

To interpret the movement history of the Yangsan fault, the paleostresses were analyzed from about 1,000 striated small faults and 330 extension joints which were measured from 37 sites near and along the strike of the Yangsan fault from Yangsan-si, Kyeongsangnam-do to the Shinkwang-myeon, Kyeongsangbuk-do. Six sequential tectonic events have been established as followings : (I) NW-SE extension, (II) ENE-WSW compression and NNW-SSE extension, (III) NW-SE compression, (IV) ENE-WSW extension, (V) E-W compression and N-S extension, and (VI) NNE-SSW compression and ESE-WNW extension. The movement history of the Yangsan fault running in NNE direction were interpreted based on these six sequential stress fields. The initial feature of the Yangsan fault was

formed at the first stage with the development of extension fractures by tectonic event (I) of NW-SE extension. The fault was acted continuously with a right-lateral strike-slip movement by tectonic event(II) closely related to event(I). The movements had been continued until the Late Miocene. This age was the most active period in faulting. The left-lateral strike-slip movement was followed by subsequent tectonic events (III) and (IV). The activity of the Yangsan fault was suspended temporarily by compression of tectonic event (V) which was perpendicular to the strike of the fault. This period might be very short and the magnitude of the tectonic was also small. In the last stage, the fault acted with slight extension or right-lateral movement by tectonic event (VI).

서 론

양산단층의 운동에 대해서는 주향이동단층(엄상호 등, 1983; Lee et al., 1986; 장기홍, 1990), 경사단층(이민성, 강필중, 1964; 이윤중, 이인기, 1972; 손치무 등, 1978; 김종열, 1988) 및 회전단층(pivotal fault) (최현일 등, 1980) 등 다양한 의견이 있으나 이들 연구는 주로 지질분포의 차이에 의한 평면특성에 기인한 것이며, 전반적으로 단순 우수향주향이동으로 보는 견해가 지배적이었다. 최근 경상분지 전반 혹은 양산단층을 대상으로 고응력장 해석의 연구가 수행되면서 백악기 이후 지구조 응력장(Hwang, Angelier, 1992; 황재하, 1994)과 양산단층 운동시의 응력복원(이준동 등, 1993; 채병곤, 장태우, 1994)을 통하여 양산단층의 운동사를 해석하려는 연구가 활발히 수행되고 있다. 지금까지 양산단층의 연구는 경상분지 전반에 대한 연구의 일부로 수행되거나 혹은 지구물리탐사에 의한 단층존재의 확인 및 단순히 지질분포의 차이로만 단층의 운동을 해석하였고, 단층자체의 운동특성 및 발달에 관한 연구는 국지적으로만 수행된 실정이다.

지금까지 광역적인 지질구조와 그의 변형작용의 특성을 해석하기 위해서는 암석역학의 실험과 광역적인 단층분포의 기하학적 유사성에 근거한 Anderson(1951)의 단층이론을 근간으로 지구조 운동을 지배했던 응력장을 해석해 왔다. 그러나 단층운동이란 새로이 단층이 형성되기보다는 기존의 단층이 사교이동(oblique-slip)을 하면서 재 이동된다는 개념이 Bott(1959)에 의해 제안되었고, 이러한 개념을 바탕으로 Carey and Brunier(1974)가 다양한 방향으로 위치하고 있는 단층면에서 단층조선들의 방향을 이용하여 운동벡터를 역산하는 알콜리즘

을 처음으로 제시하면서 고응력축을 계산하는 방법이 제안되었다. 이러한 분야의 연구는 그 후 단층운동의 특성 뿐아니라 지구조운동 해석으로까지 확대되면서 단층운동 해석에 중요한 도구로 자리잡았다(Angelier, 1979, 1990; Armijo et al., 1982; Gephart, Forsyth, 1984; Reches, 1987; 최범영, 1991; Decker et al., 1993; Choi, 1996).

단층대의 형성은 지속적이며 반복적인 운동과정을 통해 이루어지며, 단층대의 중앙부부터 일정한 범위까지 단층운동에 따른 변형이 기록된다. 따라서, 본 연구에서는 양산단층의 구조운동사를 규명하고자 단층파쇄대의 폭과 단층의 연장길이 등을 근거로 주단층을 따라 약 4km 폭의 범위 내는 단층운동의 변형이 충분히 기록될 수 있는 영향범위로 판단하고 이 범위에서 단층이동 자료를 측정하였다. 이 범위 내에서 양산단층의 주향을 따라 전체 1,280개의 자료가 측정되었는데 이들 중 98.7%인 1,264개가 단층조선이 발달된 단층들이다. 단층 주변에는 소단층과 더불어 많은 절리들이 발달하고 있지만 양산단층과 같은 대단층들은 일반적으로 넓은 폭의 단층계곡 및 단층파쇄대를 형성하고 있어 단층대 자체를 자세히 관찰하기란 매우 힘들다. 따라서 단층의 운동특성을 해석하기 위한 자료로는 변위운동이 기록되어 있는 소단층을 이용하는 것이 더 효과적이라고 판단했기 때문에 주로 단층조선이 발달된 단층들을 측정하고, 단층운동 해석에 중요한 도구가 되고있는 고응력해석을 통하여 양산단층의 구조운동사를 해석하고자 한다.

지 질

연구지역 전체의 지질은 백악기 하양층군의 퇴

적암류와 유천층군의 화산암류, 불국사 화강암류 및 제3기 퇴적암류로 구성되며 양산단층을 경계로 양쪽의 지질분포에 있어서 뚜렷한 차이를 보인다. 이러한 양지역 퇴적암의 평면적인 지질분포의 차이를 바탕으로 양산단층에 의해 절단된 양지괴의 엇갈린 거리를 원상복귀시켜 양산단층을 25km(엄상호 등, 1983) 혹은 35km(장기홍, 1990) 우수향주향이동으로 해석한 바 있다.

하양층군의 퇴적암류는 양산단층을 기준으로 연구지역 북서쪽(경주 서쪽)과 남동쪽(언양 동쪽)에 양분되어 서로 엇갈린 모양으로 분포하고 있으며, 주로 회색의 셰일, 저색의 실트스톤과 녹색 및 녹색의 사암으로 구성되어 있다. 북서부의 퇴적암류는 이윤종과 이인기(1972) 및 김남장 등(1971)에 의해 대구층으로 기재되었고, 최현일 등(1980)은 사연리층과 조일리층으로 구분하고 이들을 각각 함안층과 진동층에 대비하였으며, 장천중(1986)은 남동부의 퇴적암류인 사연리층과 조일리층을 세밀히 분대하여 사연리층의 하부층원은 송내동층에 상부층원은 채약산층 그리고 조일리층은 건천리층에 각각 대비한 바 있다. 하양층군에 나타나는 층리면의 자세를 보면 북서부 지역에서는 북에서 남으로 가면서 층리면의 경사방향이 북서쪽, 서쪽 및 남서로 점차 변화되면서 완만한 습곡을 보이고, 남동부 지역의 퇴적암류는 북에서 남으로 가면서 층리면의 경사방향이 서쪽, 남서쪽 및 남쪽 경사를 보이는데 양지역 퇴적암의 층리면이 서로 다른 자세를 취하고 있다(Fig. 1).

유천층군은 주로 연구지역의 중남부에 분포하며 화산각력암 및 래필리 응회암, 응회암으로 구성되며 이들은 안산암질의 암편을 풍부히 포함하고 있다. 불국사관입암류도 주로 연구지역의 중남부에 분포하고 하양층군과 유천층군을 관입하고 있으며 주로 흑운모 화강암으로 구성되어 있는데 일부 반상화강암 및 각섬석화강암의 암상을 이루기도 한다. 이 불국사관입암류에 대해서는 일부 연령측정이 이루어진 바 있는데, 이윤종과 Ueda(1976)에 의한 본 암류의 K-Ar 연대 측정결과는 연구지역 중앙부의 화강섬록암에서는 63 my., 연구지역 남부인 언양부근의 석영관입암에서는 62 my.를 각각 보여주고, 또한 양산단층 동편의 이천리 화강섬록암에서는 87 my.를 보임으로써 이들 화강암류들이 후기

백악기 내지 고제3기에 관입했음을 시사하고 있다. 또한 제3기의 퇴적암류가 연구지역 북동부에 분포하고 있는데 주로 역암, 사질셰일, 회색 및 갈색 사암, 응회질 이암으로 구성되며 이 암상은 엄상호 등(1964)의 천북역암 및 학림층에 해당된다.

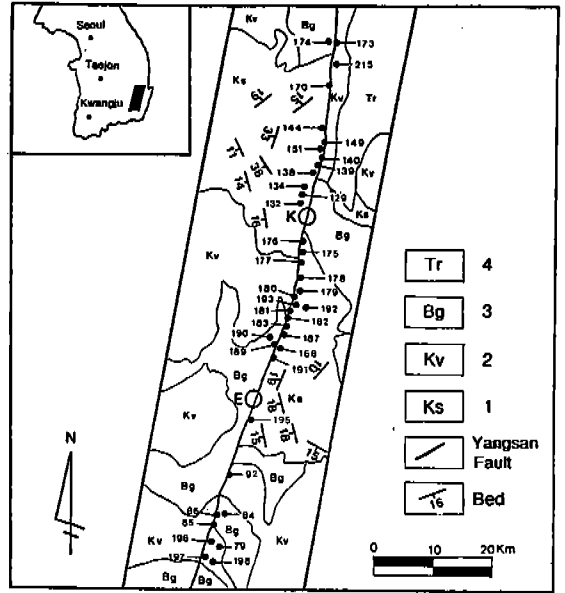


Fig. 1. Geological map and outcrop localities of small faults measured. 1; Hayang Group, 2; Yucheon Group, 3; Bulgo-gsa granitic rocks, 4; Tertiary rocks, E; Eonyang, K; Gyeongju.

단층 이동 자료의 기하학적 특성

전체 연구지역에 대한 자료에서 단층의 주향 분포는 NS 및 NNE 방향과 NNW 방향이 비교적 뚜렷한 편이며, 통계적으로 이 계열의 방향성이 전체 자료의 약 70%(893개)에 이른다. 소단층의 경사는 79%(993개)가 60° 이상의 고각도 경사를 보이며 단층조선의 주선각(rake)은 62%(785개)가 30° 이하로 나타나고 있다(Fig. 2). 또한 소단층의 경사와 주선각의 분포에서 단층의 경사는 대부분이 60° 이상의 고각도를 보이며(Fig. 3a), 주선각은 전반적으로 20° 이하를 보인다(Fig. 3b). 특히 주향이동성 운동의 특징을 잘 나타내는 75° 이상의 고각도 경사를 가

지는 594개의 단층들만을 가지고 분석한 결과 20° 이하의 주선각을 보이는 것이 매우 뚜렷하게 우세를 보여준다(Fig. 3c). 따라서, 양산단층의 운동영향 범위 내의 소단층들의 기하분석 결과는 양산단층이 고각도의 경사를 가지면서 주향이동성 운동이 지배했음을 의미한다.

고응력 해석

고응력 복원

양산단층의 운동특성을 파악하기 위해서는 이 단층자체의 노출면으로부터 구조요소들을 직접 측정하여 해석하는 것이 유용하나, 주단층대 자체의 노출면을 관찰하기가 매우 어렵기 때문에 이 단층 운동과 같은 응력 하에서 형성된 2차적인 소단층의 운동흔적을 이용하여 광역지구조응력장 및 주단층의 운동을 해석하는 것이 좋은 방법이다(Tchalenko, 1970; Angelier et al., 1985; Bergerat, 1987; Frizzel, Zoback, 1987; Hardcastle, 1989; Hatzor, Reches, 1990; Decker et al., 1993). 따라서 대규모의 단층과 이와 관련된 소단층이 동시기에 동일한 응력장에 지배받았다고 가정하면 소규모의 단층을 이용하여 주단층의 응력장을 해석할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 양산단층의 고응력 해석을 위하여 주로 단층 인접지역(최대 약 4km 범위)에서 단층의 주향을 따라 경남 양산시에서 경북 영일군 신광면에 이르는 37개 지점으로부터 단층조선이 발달된 1,264개의 소단층을 측정하였는데 이들 중 변위 감각이 뚜렷하지 않은 231개를 제외한 1,033개의 자료를 이용하였다. 소단층에서는 단층의 주향, 단층조선의 주선각 및 운동감각을 측정하였으며, 이들을 각 지점별로 각오차(angular deviation)를 최소화하는 동일한 응력텐서를 지시하는 자료들의 집합으로 각각의 응력텐서를 구하였다. 응력텐서 계산은 Angelier방법(Angelier et al., 1982; Angelier, 1990)을 주로 이용하였으며 Reches 방법(Reches, 1987)도 겸하여 검토하였다. 이렇게 이루어진 자료들로부터 총 69개의 응력텐서가 복원되었다(Table 1). 개개 자료에 대한 신뢰도를 나타내는 각오차는 1.5°-17.9°의 범위이며 각오차의 평균은 10.1°로서 계산된 응력텐서의 결과는 상당히 신뢰도가 높음을 알 수 있다.

고응력 해석에서 매우 중요한 요소가 단층면의 운동감각을 판별하는 것으로 이는 작은 수의 판단 착오에도 불구하고 해석결과에 상당한 영향을 줄 수 있기 때문에 신중하게 판별되어야 한다. 단층의 운동감각 결정방법으로 층리면들의 엇갈림(offset)을 측정하는 것이 매우 뚜렷한 기준이 될 수 있지

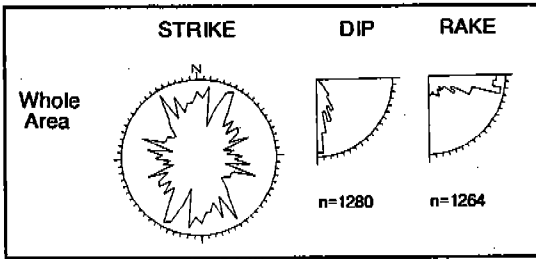


Fig. 2. Distribution of strikes, dips, and rakes of the fault slip data measured in the study area.

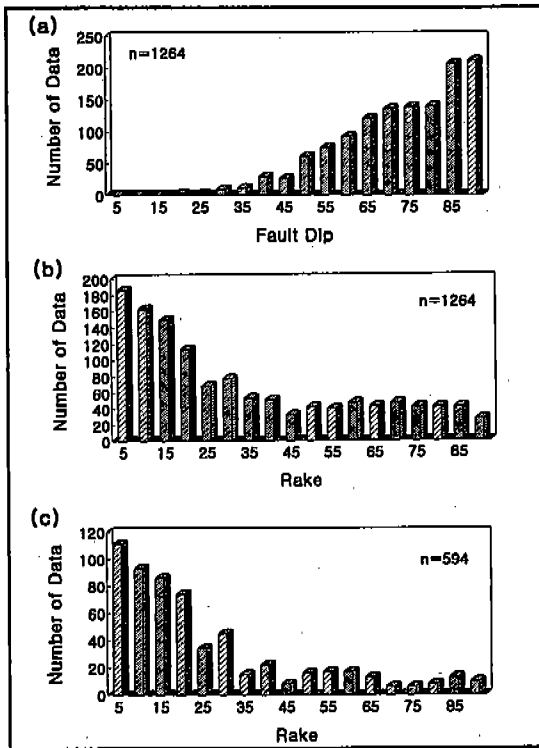


Fig. 3. Histograms showing the distribution of fault slip data. (a) dip of 1,264 faults, (b) pitch of 1,264 faults, and (c) pitch of 594 faults which have high-angle dip over 75°.

고응력 분석을 통한 양산단층의 구조운동사

만 이러한 현상은 야외에서 흔히 관찰하는 것이 쉽지 않기 때문에 단층면 상에서 관찰되는 이차단열인 리델전단(Riedel shear)의 특징(Petit, 1987)과 석

영 등과 같은 단단한 입자의 굵은 흔적(Means, 1987), 광물섬유성장(Angelier, 1994) 및 비대칭 변형공간 등으로 판별하였다(Fig. 4).

Table 1. Results of paleostress tensor determinations for the Yangsan fault. Principal stresses ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), Φ : stress ratio($\sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$), Δ : average angular misfit.

Site No.	No. of Data	Stress Tensor			Φ	Δ	
		σ_1	σ_2	σ_3			
174	II	33	253/12	007/63	158/24	0.325	12.1
	III	7	155/14	020/70	249/13	0.699	12.2
	VI	14	198/10	078/70	291/17	0.693	11.2
173	III	10	163/21	346/70	253/01	0.606	10.3
	V	6	247/40	107/43	356/21	0.651	15.8
	VI	19	021/02	132/84	291/05	0.744	11.1
215	III	19	303/01	212/62	033/28	0.248	9.4
170	I	13	058/47	256/41	158/09	0.878	10.3
	VI	8	002/13	251/58	099/29	0.521	12.0
144	II	4	221/44	041/46	311/00	0.755	1.5
149	II	9	077/05	201/81	346/07	0.642	5.7
151	II	4	248/16	088/73	340/06	0.667	4.4
140	VI	7	198/09	300/51	102/37	0.383	5.8
139	I	9	254/46	083/44	349/05	0.416	7.6
138	III	13	327/03	068/76	236/14	0.615	10.2
	V	10	272/07	039/79	181/09	0.436	17.1
134	IV	48	158/70	002/19	269/08	0.498	8.1
	V	30	088/07	244/83	357/03	0.423	10.1
	VI	15	179/08	015/82	269/02	0.559	5.5
129	I	8	214/20	049/69	306/05	0.962	14.9
132	III	21	158/06	016/82	249/05	0.362	7.0
	V	18	104/34	275/56	011/04	0.803	16.7
	VI	19	201/02	086/85	292/04	0.577	12.4
176	II	6	245/32	088/56	342/10	0.660	3.2
175	I	9	206/02	307/78	115/12	0.984	9.2
	IV	10	300/68	161/17	067/14	0.635	10.3
177	V	12	273/18	051/67	178/15	0.535	4.1
178	IV	10	234/69	344/08	077/20	0.274	10.2
	V	6	094/05	199/73	003/17	0.592	5.5
	VI	13	174/09	353/81	084/00	0.718	6.0
192	I	31	077/76	239/13	330/04	0.903	10.4
	III	36	156/02	260/81	066/09	0.321	13.7
	V	57	106/03	201/54	014/36	0.359	14.8
179	II	7	226/01	132/83	316/08	0.252	9.8

Table 1. (continued)

Site No.	No. of	Stress Tensor			σ	A	
		σ ₁₁	σ ₂₂	σ ₃₃			
180	II	7	040/18	286/52	142/33	0.364	6.9
	III	6	315/11	090/75	223/10	0.181	14.9
	V	15	092/16	345/46	196/40	0.484	10.9
193	III	10	142/33	311/57	048/05	0.769	5.7
181	II	10	225/10	101/72	317/14	0.605	9.2
	III	15	336/20	126/61	258/20	0.589	13.1
	V	32	291/05	152/84	021/04	0.185	12.2
182	I	19	225/75	043/15	133/00	0.313	7.7
	III	8	336/37	096/33	214/35	0.743	10.0
183	V	9	098/18	299/71	190/06	0.203	10.8
187	II	9	059/20	310/41	169/42	0.892	7.7
188	I	7	227/08	037/82	137/01	0.973	11.7
	II	17	261/03	354/51	167/39	0.057	12.0
	III	7	357/39	140/44	250/20	0.544	8.1
189	IV	9	200/80	323/06	054/09	0.521	17.9
190	IV	8	351/54	171/36	081/00	0.944	8.9
	VI	10	202/12	093/57	299/30	0.260	14.4
191	II	24	253/04	121/84	344/04	0.834	9.5
	VI	11	191/34	081/56	283/03	0.695	9.9
92	V	20	109/14	292/76	199/01	0.349	6.6
	VI	17	191/02	007/88	101/00	0.372	5.1
86	I	13	177/70	046/13	313/14	0.368	17.4
85	I	15	144/84	034/02	304/06	0.573	8.2
84	II	5	042/03	308/46	135/43	0.162	16.2
	V	6	268/04	167/70	000/20	0.658	11.6
196	II	6	035/05	254/84	125/04	0.144	5.1
	III	33	126/01	035/55	217/35	0.161	10.9
	V	25	272/08	142/78	004/09	0.340	9.9
	VI	13	178/10	300/72	085/15	0.722	9.1
79	II	5	061/02	325/71	152/19	0.744	16.3
	V	10	104/04	287/86	194/00	0.575	14.2
198	II	14	236/04	351/79	146/10	0.712	7.9
197	I	39	201/73	068/12	336/12	0.292	12.6
	V	15	275/43	022/18	128/42	0.455	12.4
	VI	23	198/41	015/49	107/02	0.455	6.7

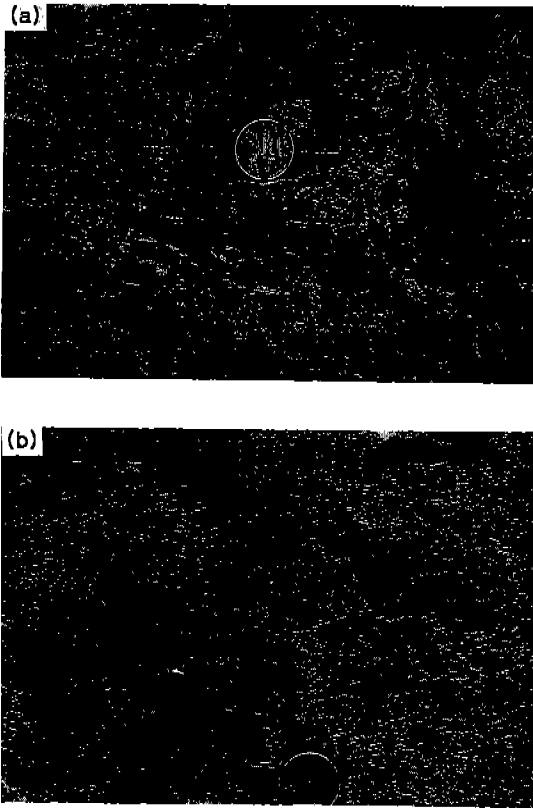


Fig. 4. Criteria for determining the sense of motion on a fault surface. (a) Mineral fiber growth, (b) deformed cavity. Arrows indicate the slip directions of missing blocks.

전체 양산단층의 운동특성을 해석하고자 37개 지점에서 얻어진 69개의 응력텐서들을 동일한 응력장들로 묶어보면 6개의 응력장으로 구별되어진다. 이들 6개의 응력장의 선후관계를 밝히기 위하여 야외에서 관찰된 중첩되어 나타나는 서로 다른 시기의 단층조선(Fig. 5a), 백암과 소단층의 상호 절단관계(Fig. 5b) 및 소단층들의 상호 절단관계 등으로 판별될 수 있는 176개의 상대적인 연대가 조사되었다. 이와 같이 상대적인 연대가 구분되어지는 자료들을 서로 대응되는 응력텐서에 선후관계를 적용하여 행렬분석(matrix analysis; Angelier, 1991)으로 분석하였다(Fig. 6). 이렇게 분석한 결과 전체 176개의 자료들 중 72%인 127개의 자료를 만족하는

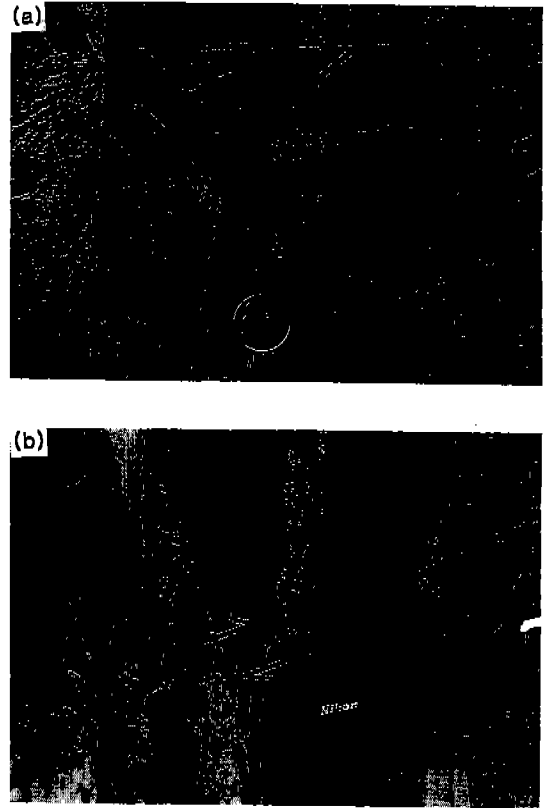


Fig. 5. Examples for determining the relative chronology between fault slips. (a) superposed fault striae, (b) offset by quartz vein.

응력순서가 도출되었다. 6개의 응력텐서는 (I) NW-SE 신장기, (II) ENE-WSW 압축과 NNW-SSE 신장기, (III) NW-SE 압축기, (IV) ENE-WSW 신장기, (V) E-W 압축과 N-S 신장기, (VI) NNE-SSW 압축과 ESE-WNW 신장기의 순서로 나타났으며(Fig. 7), 구분된 6개의 응력장에 대한 자료의 수, 주응력축의 방향 및 응력축의 비에 대한 계산결과는 Table 2와 같다.

양산단층의 주향을 따라 소단층이 측정된 37개 지점의 자료들로부터 69개의 응력텐서가 얻어졌다. 이들을 연구지역 최남단 197번 지역에서 최북단 174번 지역까지 그 위치별로 각 지역의 응력텐서의 조합을 구분하였다(Table 3). 그림 내의 숫자는 해

Younger

	I	II	III	IV	V	VI
Older	I	10	6	4	12	7
	II	2		5	7	5
	III	6	2		1	27
	IV	4				4
	V	2	6	3	2	
	VI	2	3	4	3	10

Fig. 6. Matrix of relative chronologies obtained from 37 sites, 6 tectonic events, 176 binary chronologies. Chronology matrix corresponds to the best possible solution.

Table 2. Calculation results for six tectonic events. σ_1 , σ_2 , and σ_3 are principal stresses($\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3$), Φ : stress ratio($\sigma_2-\sigma_3/\sigma_1-\sigma_3$).

Tensors	No. of Data	σ_1	σ_2	σ_3	Φ
I	163	211/77	052/12	321/04	0.613
II	160	071/01	324/87	161/03	0.462
III	185	327/02	058/29	233/60	0.073
IV	85	187/76	345/13	076/05	0.385
V	271	279/00	019/90	189/00	0.357
VI	169	195/15	021/75	285/02	0.537

당되는 지역의 각 응력텐서 계산에 포함된 자료의 수를 나타낸 것이다. 전체적으로는 각각의 응력텐서가 전지역에 골고루 분포하는 것처럼 보이나 비교적 신뢰도가 높다고 판단되는 10개 이상의 자료들(그림 내에서 망상으로 처리된 부분)만을 근거로 구분하면 주단층 및 소단층의 기하학적 분석결과에 의한 181번 지역과 182번 지역 사이를 기준으로 남부 및 북부구역으로 나누어질 수 있다. 이렇게 남부 및 북부구역의 구분과 응력텐서의 조합을 비교하면 응력텐서 (I)과 (III)로 나타나는 지구조 사건 (I)과 (II) 및 응력텐서 (V)와 (VI)으로 나타나는

사건 (V)와 (VI)은 남부 및 북부구역에 전반적으로 나타나지만, 응력텐서 (III)과 (IV)로 나타나는 사건 (III)과 (IV)는 북부구역에 우세한 모습을 보인다. 이는 각각의 응력장으로 나타나는 지구조 사건이 초기단계에서는 전반적으로 그 영향이 미쳤으며(사건 I과 II), 다음으로 사건 (III)과 (IV)의 단계에서는 북부구역에 주로, 그리고 사건 (V)와 (VI)의 단계에서는 다시 전체지역에 그 영향이 작용되었음을 볼 수 있다. 이는 양산단층이 전체길이를 따라 각 단계별 운동이 달리 작용되었음을 의미한다.

Table 3. Arrangement of stress tensor. Number in each box indicates measurements which were included in calculation of stress tensor. Boxes which contain more than 10 data are shaded.

Site No.	Stress Tensors					
	I	II	III	IV	V	VI
174		33	7			14
173			10		6	12
215			15			
170	13					8
144		4				
149		9				
151		4				
140						7
139	9					
138			13		10	
134				23	30	15
129	8					
132			21		18	19
176		6				
175	9			10		
177						12
178				10	6	15
192	31		30		37	
179		7				
180		7	6		15	
193			10			
181		10	13		32	
182	19		8			
183					9	
187		9				
188	7	17	7			
189				9		
190				6		10
191		24				11
92					20	17
86	13					
85	15					
84		5			6	
196		6	33		25	13
79		5			10	
198		14				
197	39				15	23
1033	163	160	185	85	271	169

양산단층의 운동사

서론에서 언급한 바와 같이 양산단층의 운동에

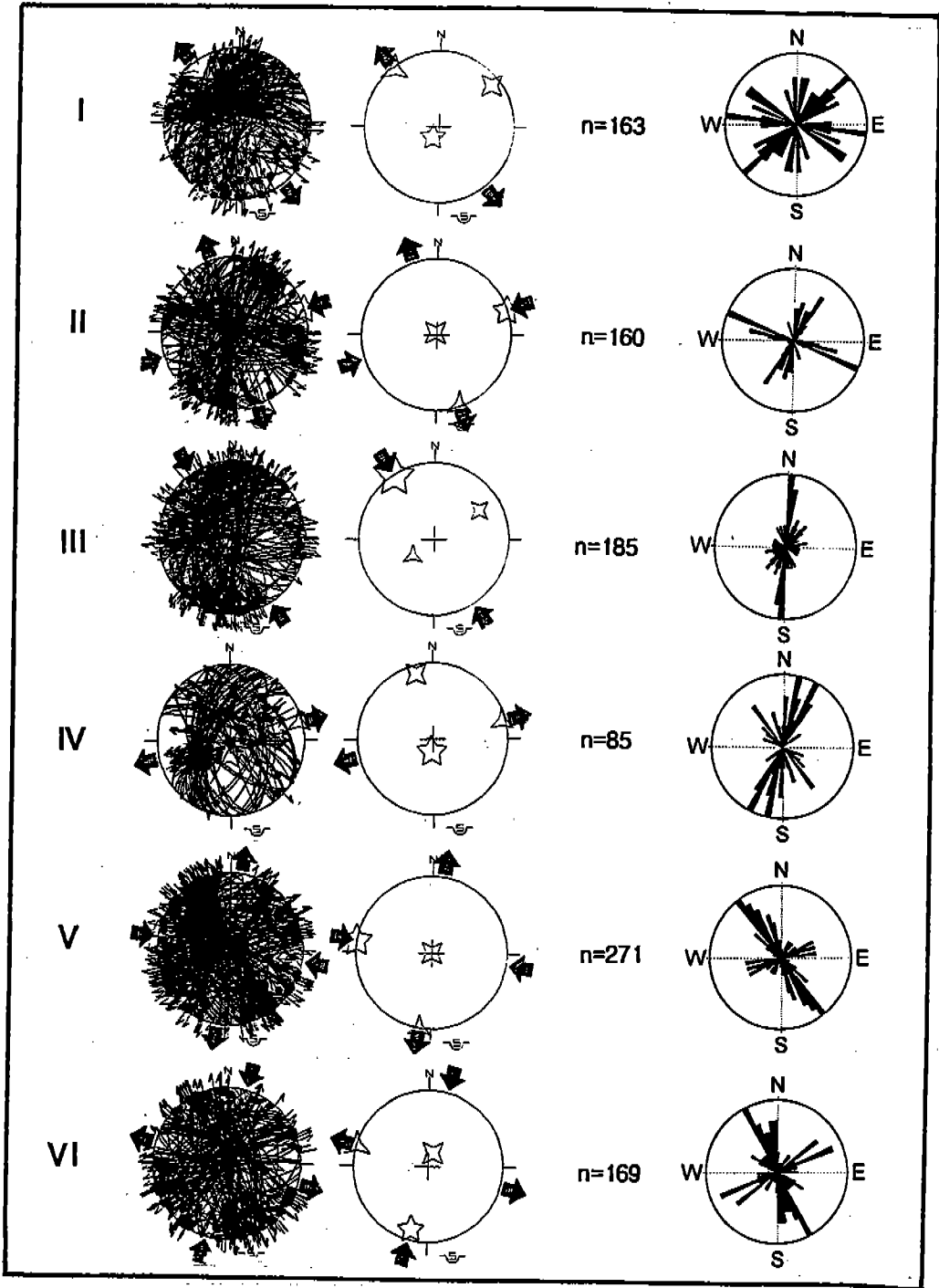


Fig. 7. Geometry of fault populations and reconstruction of the 6 geological paleostress tensors. Left : plots of individual small faults, Center : results of numerical determination of stress tensors, Right : rose diagrams of small faults.

대한 다양한 의견이 제시되었던 것은 아마도 양산 단층이 서로 다른 시기에 서로 다른 응력장에 의하여 다중변형을 받았기 때문에 나타난 결과로 보인다. 즉, 여러 연구자들이 획득한 개개자료의 내용들이 하나의 운동요인에 편중되어 해석된 결과로 보이며 실상은 그들 모두를 포함한 다양한 운동의 복합적인 결과들일 수 있다는 것이다.

북북동 방향으로 주향하고 있는 양산단층의 관점에서 앞서 해석된 6개의 응력텐서를 근거로 양산단층의 운동사를 해석하면 사건 (I)은 양산단층이 형성된 시기이다. 단층대의 발달이 처음 개개의 인장절리(extension joint)로 부터 시작하여 변형띠(deformation band) 및 변형띠의 묶음(zone of deformation band), 미끄럼면(slip surface), 소단층(small fault), 단층대(fault zone)의 형성과정으로 진행된다고 보면(Aydin, Johnson, 1979) 초기 양산단층이 발달할 때 NW-SE 신장을 지시하는 인장절리와 소단층들이 기대될 수 있다. 이러한 해석은 인장응력의 산물로 잘 알려진 석영 및 방해석 암맥의 방향성 분석결과(Fig. 8)에서 잘 보여주고 있는데 측정된 330개의 인장절리의 방향은 압도적으로 NE-SW 방향을 보임으로써 초기의 NW-SE 인장응력과 잘 일치됨을 알 수 있고, 또한 이 응력장은 전반적으로 나타나는 인장절리의 분포로 보아 넓은 지역에 영향을 미친 상당히 큰 응력이었고 오랜동안 지속되었을 것으로 판단된다. 지구조 사건 (I)에 이어서 계속적으로 사건 (II)에 의하여 양산단층은 우수향 주향이동을 하였으며, 사건 (I)과 (II)의 이 두 시기가 양산단층이 발생되면서 우수향 이동을 지배했던 시기인데, 주로 이 시기에 약 25km(엄상호 등, 1983), 35km(장기홍, 1990) 혹은 15-30km(장태우 등, 1993) 등으로 추정된 변위가 있었을 것이며 초기인 이 시기에 가장 활발한 운동을 하였을 것으로 판단된다.

지구조 사건 (III)과 (IV)에서는 양산단층이 좌수향 운동을 했던 시기이다. 좌수향 이동의 양은 크지 않으나 야외노두에서 좌수향 운동을 지시하는 단층면의 증거들을 찾는 것은 어렵지 않다. 또한 지금까지 양산단층이 우수향주향이동으로만 보는 지배적인 의견과 다른 견해로서 절리연구에 의한 NNW-SSE 압축응력장(김상욱, 이영길, 1981), 자기비등방성구조에 의한 NW-SE 압축과 미세균열에

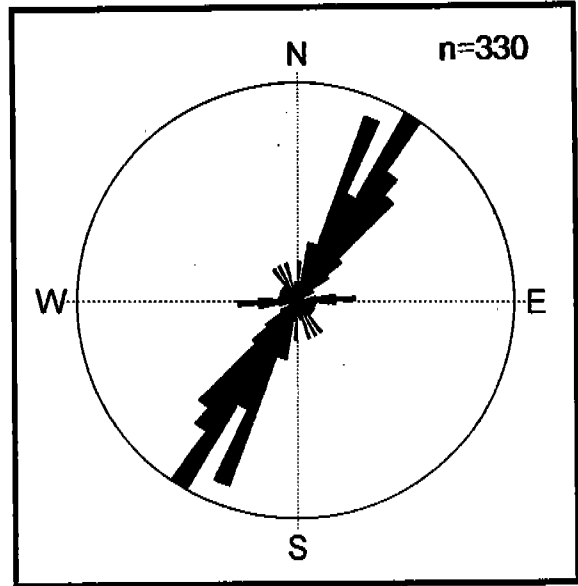


Fig. 8. Rose diagram showing the orientation of extension joints measured from quartz and calcite veins.

의한 NW-SE 및 ESE-WNW 압축응력장(이준동 등, 1993)의 응력해석 등 좌수향 운동을 지시할만한 연구결과들도 있다.

사건 (V)의 환경은 압축응력의 방향이 양산단층의 주향에 직각으로 놓이므로써 단층의 이동량은 거의 없었고 단지 약간의 압축을 받은 시기이다. 이때 나타난 현상이 비록 소규모이지만 울산시 신정동 일대 구영리층에 나타난 NNE 방향의 습곡축을 갖는 층리면들의 자세(장천중, 1986)와 울산시 삼남면 상천리 부근의 양산단층대에 나타나는 단층 주향에 평행하면서 고각도로 기울어진 층리면들이 이에 해당된다고 볼 수 있을 것이다.

마지막으로 최후기 지구조 사건 (VI)에서는 양산단층이 미미한 우수향 혹은 신장을 받은 것으로 해석된다. 이 사건은 황재하(1994)의 최후기 응력장인 NW-SE 신장의 응력장과의 유사한 방향으로 볼 수 있다.

토 의

양산단층의 운동시기에 대해서는 아직도 미비된 점이 없지 않지만 양산단층으로 절단된 주변의 관

입암들의 연령측정 결과 인보리 화강섬록암에서 63m.y., 언양부근 화장산 석영반암에서 62m.y., 이 전리 화강섬록암에서 87m.y.가 얻어졌고(이윤종 Ueda, 1976), 주사산 안산암에서 65m.y.(진명식 등, 1988), 모량도폭역 경주 남산화강암체가 약 54m.y.(진명식 등, 1989)와 지경동 화산암류에서 약 47m.y.(진명식 등, 1988)가 얻어졌다. 또한 김상중과 이현구(1996)는 맥상광상의 모암변질물과 주변의 화성암류의 K-Ar 연령측정 결과로 부터 양산단층의 운동이 약 50m.y. 전후부터 시작되었다고 추정하였다. 이로써 양산단층은 에오신으로 부터 마이오신초까지의 지질시대동안 가장 활발했던 것으로 판단되며(장태우 등, 1993) 그 이후에도 미미하지만 주변의 지구조운동장의 영향을 받았을 것으로 보인다.

이와 같이 양산단층의 운동시기를 설정하고 보면 양산단층의 운동원인은 이 시기에 한반도 주변부에 작용했던 지구조운동과 연관시켜 생각해 볼 수 있을 것이다. 이때 가장 두드러진 지질현상이 동해의 확장운동과 일본 서남부의 지구조 운동인데 지금까지의 연구결과를 요약하면 유라시아판과 태평양판, 필리핀 해양판의 상호작용에 의하여 동해의 확장과 일본열도의 회전을 설명하고 있다(Uyeda, Miyashiro, 1974; Otsuki, Ehiro, 1978; Otofujii et al., 1985; Tamaki, 1985; Chough, Barg, 1987; Celaya, McCabe, 1987). 동해의 확장에 대한 모델은 두가지가 있는데 하나는 호후방 확장모델(back-arc spreading)이고(Uyeda, Miyashiro, 1974; Chough, Barg, 1987; Celaya, McCabe, 1987) 다른 하나는 인열모델(pull-apart)(Lallemand, Jolivet, 1986)이다. 이들 중 인열 모델은 기존의 양산단층에 대한 연구결과를 이용하여 그 운동시기 및 운동특성을 단지 에오신/올리고신 때 양산단층의 단순우수향 주향이동만을 가정하여 설정된 것이다. 또한 양산단층의 북단부 연장이 실제 야의노두에서는 뚜렷하게 확인되지 않음에도 불구하고(채병곤, 장태우, 1994) 단지 거시적인 인공위성 영상분석(김중환 등, 1976; Kang, 1979) 등에 의한 선상구조(lineament)의 해석결과를 만을 근거로 양산단층이 북북동 방향으로 낙동강 하구에서 경북 영덕을 지나 동해까지 매우 길게 연장된다는 전제하에서 양산단층을 포함한 East Korean Fault를 동해의

좌측 대단층으로 설정한 것이다. 이렇게 설정된 주향단층의 인열에 의한 횡장력(transtension)으로 동해의 확장을 설명한 것이므로 인열모델은 양산단층의 다중변형의 측면에서 보면 잘 부합되지 않는다고 할 수 있다.

호후방 확장 모델은 초기 Uyeda and Miyashiro(1974)에 의해 제안된 이후 동해의 확장과 일본열도의 회전에 대한 원인으로 설명하고 있다(Chough, Barg, 1987; Celaya, McCabe, 1987). 양산단층이 운동을 시작한 초기에 오신 때 쿨라판(Kula plate)과 태평양판이 북북서 방향으로 침강하였다. 태평양 판의 운동이 서북서 방향으로 바뀌고 필리핀 해양판이 북서방향으로 운동을 하면서 일본분지가 형성되기 시작한다(43 m.y., Celaya, McCabe, 1987). 이러한 운동이 계속되면서 올리고신을 거쳐 마이오신 중기까지 일본분지, 울릉분지 및 야마토 분지가 지속적으로 그 확장되어지는데, 이 시기가 가장 확장속도가 큰 시기이다. 이 때 양산단층의 운동은 지구조 사건 (I)에 의해 초기 NW-SE 신장으로 영향을 받으면서 발달이 시작되고, 이 때가 전지역에 일관된 방향으로 나타나는 암맥들의 형성시기이다. 지속적인 동해의 확장과 함께 NW-SE 신장은 사건 (II)로 이어지면서 양산단층의 우수향 주향이동을 지배하였고, 가장 큰 변형을 기록한 시기이다. 이는 Chough and Barg(1987)에 의한 마이오신 중기 말까지의 울릉분지 서남부의 확장속도가 가장 크고 오랜기간 지속되었던 시기와 일치할 것으로 생각된다.

나아가서 Chough and Barg(1987)의 폐쇄단계인 마이오신 후기 초에 동해의 확장이 정지되고 압축 응력을 받게될 때, 이때 나타나는 것이 사건 (III)과 (IV)의 시기이다. 양산단층은 미약하지만 좌수향 운동을 기록하기도하고 사건 (V)의 응력장에 의해서 는 그 운동이 정지되기도 한다. 좌수향 운동을 지시하는 응력장의 연구결과(김상욱, 이영길, 1981; 이준동 등, 1993)들은 이 때 기록된 것으로 보인다. 또한 Lallemand and Jolivet(1985)도 양산단층과 같은 계열의 쓰시마 섬 내에 있는 좌수향 주향이동 단층을 설명하면서 이 단층은 우수향 이동의 단층보다 좀더 최근의 단층이며 한반도에서도 추후 조사로 좌수향 이동의 단층이 예상됨을 제기한 바 있다. 그 후 마이오신 후기부터 미약한 인장응력이

참 고 문 헌

작용되면서 사건 (VI)의 시기에 도달하여 현재에 이르는데(Chough, Barg, 1987), 황재하(1994)의 마지막 응력장(NW-SE 신장)과도 부합된다.

결 론

양산단층의 운동특성을 파악하기 위하여 단층의 주향을 따라 그 주변부 37개 지점에서 단층조선이 발달된 소단층 1,000여개와 330개의 인장절리(주로 인장암맥)를 측정하였다. 이들 자료로부터 69개의 응력텐서가 복원되었으며, 이들을 동일한 응력장으로 구분하고 그 상대시대를 지시하는 요소들을 이용하여 해석한 결과 응력장의 순서별로 (I) NW-SE 인장기, (II) ENE-WSW 압축과 NNW-SSE 인장기, (III) NW-SE 압축기, (IV) ENE-WSW 인장기, (V) E-W 압축과 N-S 인장기, (VI) NNE-SSW 압축과 ESE-WNW 인장기의 응력을 갖는 6개의 지구조 사건으로 확인되었다.

또한 지구조 사건 (I)과 (II)는 NW-SE 신장이라는 측면에서 그리고 사건 (III)과 (IV) 그리고 (V)는 NW-SE 혹은 WNW-ESE 압축이라는 측면에서 유사한 운동계열이며, 전체적으로 양산단층을 기준으로 운동특성을 분석하면 초기에는 지구조 사건 (I)과 (II)에 의해 신장 및 우수향 주향이동을 하였고, 사건 (III), (IV) 및 (V)에 의해 좌수향 주향 및 압축을 받았으며 마지막으로 사건 (VI)에 의해 우수향 주향이동을 한 것으로 해석된다. 따라서 양산단층은 지금까지의 해석과는 달리 단순 우수향주향이동이 아니라 에오신 이래 서로 시기를 달리하면서 주변의 동해의 확장운동을 포함한 광역지구조 운동에 의하여 다중변형을 받은 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 : 96-0703-05-01-3)의 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드린다. 또한 초고를 세심하게 심사하여 주시고 좋은 지적과 조언을 해주신 익명의 심사위원들께도 감사드린다.

김남장, 진명식, 권영일, 1971, 한국지질도(1 : 50,000) 모량도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
 김상욱, 이영길, 1981, 유천분지 북동부의 암석학 및 구조지질, 광산지질, 14권, 5-49.
 김상중, 이현구, 1996, 경상분지 북부에 배태된 금속광상 및 화성암체의 K-Ar 연대측정을 통한 NW계 및 NE계 단층운동의 시기추정, 양산단층대 학술심포지움, 1996년 대한지질학회 구조에너지 분과 학술심포지움 및 학술답사 자료집, 88-91.
 김종열, 1988, 양산단층의 산상 및 운동사에 관한 연구, 부산대학교 대학원 박사학위논문, 97.
 김종환, 강필중, 임정용, 1976, LANDSAT-1 영상에 의한 영남지역 지질구조와 광상과의 관계 연구, 지질학회지, 12권, 79-89.
 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 한국지질도(1 : 50,000) 동래,월래 도폭 및 설명서, 자원개발연구소, 27
 엄상호, 이동우, 박봉순, 1964, 한국지질도(1 : 50,000) 포항도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 21.
 엄상호, 최현일, 손진담, 오재호, 박영훈, 신성천, 윤현수, 1983, 경상분지의 경상누층군에 대한 지질 및 지화학적 연구, 연구특보-36, 자원개발연구소, 118.
 이민성, 강필중, 1964, 한국지질도(1 : 50,000) 양산도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 24.
 이윤종, Ueda, Y., 1976, 한국 경상남도 언양도폭 및 북서부 울산도폭 지역산 화강암질암의 K-Ar 연대, 광산지질, 9권, 127-134.
 이윤종, 이인기, 1972, 한국지질도(1 : 50,000) 언양도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 22.
 이준동, 김인수, 윤선, 상기남, 김영화, 1993, 언양지역을 중심으로한 양산단층에 관한 연구, - 특히 파쇄작용과 자기 비등방성 고찰을 중심으로 -, 지질학회지, 29권, 128-144.
 장기홍, 1990, 경상분지 동부 지질발달사, 1989년도 전국대학 기초과학연구소 지구과학(지질)분야 학술 심포지움, 경북대학교, 1990. 2. 12, 1-3.
 장천중, 1986, 울산-언양 일대 하양층군의 층서 및 퇴적, 경북대 석사학위논문, 66.

- 장천중, 장태우, 1996, 양산단층의 고응력해석과 단층의 분절화, 양산단층대 학술심포지움, 1996년 대한지질학회 구조-에너지 분과 학술심포지움 및 학술답자 자료집, 54-73.
- 장태우, 장천중, 김영기, 1993, 연양지역 양산단층 부근 단열의 기하분석, 광산지질, 26권, 227-236.
- 진명식, 김성재, 신성천, 이주위, 1988, K/Ar 및 췌선트랙법에 의한 한국 동남부 지역 화강암 및 화산암의 암석광물 연령측정 연구, 한국동력자원연구소, KR-88-6D.
- 진명식, 신성천, 김성재, 1989, K/Ar과 췌선트랙 연령측정에 의해 한국 동남부 화강암류의 지열사와 냉각사 연구, 한국동력자원연구소, 동위원소 지질연구, KR-89-1C.
- 채병곤, 장태우, 1994, 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련단열 발달상태, 지질학회지, 30권, 379-394.
- 최범영, 1991, 단층자료를 이용한 응력 텐서 계산방법에 대하여, 지질학회지, 27권, 383-393.
- 최현일, 오재호, 신성천, 양문열, 1980, 울산지역 경상계 지층의 지질 및 지화학적 연구, 연구특보-20, 자원개발연구소, 33.
- 황재하, 1994, 백악기초 이후 한반도 남동부에 작용한 고응력 복원, 지질학회지, 30권, 27-34.
- Anderson, E.M., 1951, The dynamics of faulting, Oliver and Boyd, Edinburgh, 206.
- Angelier, J., 1979, Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population, Tectonophysics, 56, T17-T26.
- Angelier, J., 1984, Tectonic analysis of fault slip data sets, Jour. of Geophys. Res., 89, 5835-5848.
- 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, Geophys. J. Int., 103, 363-376.
- Angelier, J., 1994, Fault slip analysis of small-scale brittle structures, In Hancock, P.L. (ed.), Continental Deformation, Pergamon Press, Oxford, 53-120.
- Angelier, J., Colletta, B. and Anderson, R.E., 1985, Neogene paleostress changes in the Basin and Range: A case study at Hoover Dam, Nevada-Arizona, Geol. Soc. Amer. Bull., 96, 347-361.
- Angelier, J., Tarantola, A., Valette, B. and Manoussis, S., 1982, Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress, I. Single phase fault population: A new method of computing the stress tensor, Geophys. J. of the Royal Astro. Soc., 69, 607-621.
- Armijo, B., Carey, E., and Cisternas, A., 1982, The inverse problem in microtectonics and the separation of tectonic phases, Tectonophysics, 82, 145-160.
- Aydin, A. and Johnson, A.M., 1978, Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstone, Pure & Applied Geophys., 116, 931-942.
- Bergerat, F., 1987, Stress fields in the European platform at the time of Africa-Eurasia collision, Tectonics, 6, 99-132.
- Bott, M.H.P., 1959, The mechanics of oblique slip faulting, Geol. Mag., 96, 109-117.
- Carey, E. and Brunier, B., 1974, Analyse theorique et numerique d'un modele mecanique elementaire applique a l'etude d'une population de failles, C.R.Acad.Sc.Paris, 279, 891-894.
- 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., Angelier, J., and Souffache, B., 1996, Distribution of angular misfits in fault-slip data, Jour. of Stru. Geol., 18, 1353-1368.
- Choi, H.I. and Park, K.S., 1985, Cretaceous/Neogene stratigraphic transition and Post-Kyeongsang tectonic evolution along and off the southeast coast, Korea, Jour. Geol. Soc. Korea, 21, 281-296.

- Chough, S.K. and Barg, E., 1987, Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea(Sea of Japan), *Geology*, 15, 45-48.
- Decker, K., Mexchede, M. and Ring, U., 1993, Fault slip analysis along the northern margin of the Eastern Alps (Molasse, Helvetic nappe, North and South Penninic flysch, and the Northern Calcareous Alps), *Tectonophysics*, 223, 291-312.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. and Daignieres, M., 1981, An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis, *Jour. of Stru. Geol.*, 3, 51-65.
- Frizzel, V.A. and Zoback, M.L., 1987, Stress orientation determined from fault slip data in Hampel Wash area, Nevada, and its relation to contemporary regional stress field, *Tectonics*, 6, 89-98.
- Gephart, J.W. and Forsyth, D.D., 1984, An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data : Application to the San Fernando earthquake sequence, *Jour. of Geophy. Rese.*, 89, 9305-9320.
- Hardcastle, K.C., 1989, Possible paleostress tensor configurations derived from fault-slip data in Eastern Vermont and Western New Hampshire, *Tectonics*, 8, 265-284.
- Hatzor, Y. and Reches, Z., 1990, Structure and paleostresses in the Gilboa' region, western margins of the central Dead Sea rift, *Tectonophysics*, 180, 87-100.
- Hwang, J.H. and Angelier, J., 1992, Paleostress reconstructions and the tectonic evolution of the Kyungsang Basin : a case example near Goryeong-eup, *Jour. Geol. Soc. Korea*, 28, 471-482.
- Kang, P.C., 1979, Geology analysis of Landsat imagery of south Korea(II), *Jour. Geol. Soc. Korea*, 15, 181-191.
- Knuepfer, P.L.K., 1989, Implications of the characteristics of end-points of historical surface fault ruptures for the nature of fault segmentation, U.S. Geol.Surv. Open File Report, USGS-OFR 89-315, 193-228.
- Lallemand, S. and Jolivet, L., 1986, The Japan Sea : A pull-apart basin ?, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 76, 375-389.
- Lee, K., Kim, K.H. and Chang, T.W., 1986, Seismicity of the Korean Peninsula(II) : Seismicity of the northern part of the Yangsan fault, *Jour. Geol. Soc. Korea*, 22, 347-365.
- Means, W.D., 1987, A newly recognized type of slickenside striation, *Jour. of Stru. Geol.*, 9, 585-590.
- Moore, D.E. and Byerlee, J.D., 1991, Comparative geometry of the San Andreas fault, California, and laboratory fault zones, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 103, 762-774.
- Otofujii, Y. and Matsuda, T., 1983, Paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of Southwest Japan, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 62, 349-359.
- Otsuki, K. and Ehiro, M., 1978, Major strike-slip faults and their bearing on spreading in the Japan Sea, *Jour. Phys. Earth*, 26, S537-S555.
- Petit, J.P., 1987, Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks, *Jour. of Stru. Geol.*, 9, 597-608.
- Reches, Z., 1987, Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield condition, *Tectonics*, 6, 849-861.
- Sillitoe, R.H., 1977, Metallogeny of Andean-type continental margin in South Korea : Implication for opening of the Japan sea, In Talwani, M. and Pitman, W.C. (eds), *Island arcs, deep sea trenches and back-arc basins*, Am. Geophy. Union, Maurice Ewing Ser., 1, 303-310.
- Tamaki, K., 1985, Two modes of back-arc spreading, *Geology*, 13, 473-478.

- Tchalenko, J.S., 1970, Similarities between shear zones of different magnitudes, Geol. Soc. Am. Bull., 81, 1625-1640.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A., 1974, Plate tectonics and the Japanese islands ; A synthesis, Geol. Soc. Am. Bull., 85, 1159-1170.
- Will, T.M. and Powell, R., 1991, A robust approach to the calculation of paleostress fields from fault plane data, Jour. of Stru. Geol., 13, 813-821.

장 천 중

전력연구원 기계공학연구소 토건그룹
305-380 대전시 유성구 문지동 103-16

TEL : (042) 865-5908

FAX : (042) 865-7504

E-Mail : geochang@kepri.re.kr

장 태 우

경북대학교 자연과학대학 지질학과
702-701대구시 북구 산격동 1370

TEL : (053) 950-5361

FAX : (053) 950-5362