양산단층의 구조운동과 한반도 주변 지구조사
Movement of the Yangsan Fault and Tectonic History around the Korean Peninsula

장천중* 장태우** 이종림*** 정인수****
Chang, Chun-Joong* • Chang, Tae Woo** • Lee, Jong-Rim*** • Chung, In Soo****

ABSTRACT

To interpret the relationship between movement of the Yangsan fault and tectonics around the Korean peninsula, the six sequential paleostresses were reconstructed from 1,033 striated small faults which were measured at 37 outcrops along the strike of the Yangsan fault. And, the relationship between these paleostresses of the Yangsan fault and the tectonic events around the Korean peninsula were compared.

As compared with the tectonic history around the Korean peninsula, the movement of the Yangsan fault is interpreted as follows; The initial feature of the Yangsan fault was formed with the development of extension fractures by the NW-SE extension. The fault experienced a right-lateral strike-slip movement continuously. The movements had been continued until the Late Miocene age, which was the most active period in faulting. The left-lateral strike-slip movement was followed by subsequent tectonic events. In the last stage, the fault acted with a slight extension or right-lateral movement.

1. 서 론

원자력발전소의 안전성과 관련하여 양산단층에 대한 관심이 증대되고 있지만 양산단층의 운동특성에 대하여는 충분한 설명을 하지 못하고 있다. 그러나, 최근 고응력 해석 방법이 적용되면서 (Hwang, Angelier, 1992; 채병곤, 장태우, 1994; 장천중, 장태우, 1996, 1998) 양산단층의 운동사를 해석하려는 연구가 활발해지고 있다.

단층운동의 특성을 해석하려는 목적은 대규모 단층을 포함한 주변 지질특성들이 광역적인 지구조운동에 의하여 체계적으로 지배받았을 것이라는 원칙 하에서 접근하게 된다. 따라서, 양산단층의 구조운동사를 밝히려는 연구는 일부 노두 지점에서의 단층조사 결과와 연대측정만으로 수행되고 있는 미완성의 부분을 주변 동일 단층계(모량단층, 동래단층, 울산단층 등)를 포함한 양산단층

* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원
** 경북대학교 자연과학대학 지질학과 교수, 정회원
*** 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 정회원
**** 한국전력공사 원자력건설처 부장, 정회원

계의 체계적인 운동학적 결과를 얻기 위함으로 관련된 연구의 점진적인 종합은 양산단층에 대한 보다 구체적인 해석에 크게 기여할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 양산단층의 구조운동과 한반도 주변의 지체구조운동과의 관계를 해석하고자 양산단층의 주향을 따라 37개 지점에서 단층이동 자료를 측정하였고, 그들 자료로부터 순서적인 6개의 응력장을 해석하였다. 이 결과를 바탕으로 주변 지체구조운동과 연관지어 양산단층의 운동사를 조명하고자 한다.

2. 양산단층의 고응력 해석

2-1. 연구 방법

단층운동의 해석은 Anderson의 단층이론을 적용하여 왔으나, 기존의 불연속면들이 재운동한다는 개념이 정립되면서 단층운동의 응력장을 역산하는 방법이 제시되었다(Carey and Brunier, 1974). 이 이론은 그 후 단층운동의 특성 뿐아니라 지구조운동 해석으로까지 확대되면서 단층운동 해석에 중요한 도구로 자리잡고 있다(Angelier, 1979, 1990; Gephart, Forsyth, 1984; Reches, 1987; 최범영, 1991; Choi, et al., 1996).

주단층의 단층대에 나타나는 구조요소를 조사하여 단층운동을 해석하는 것이 편리한 방법이나 단층면 자체의 노출면을 직접 관찰하기 어렵기 때문에 주단층이 운동할 때 같은 응력장에서 형성된 2차적인 소단층의 이동 흔적을 이용하여 광역 지구조응력장 및 주단층의 운동을 해석하게 된다(Tchalenko, 1970; Angelier et al., 1985; Bergerat, 1987; Hatzor, Reches, 1990; Decker et al., 1993).

본 연구에서는 경남 양산에서 경북 신광까지 단층의 주향을 따라 단층노두가 잘 노출된 37개 지점으로부터 단층조선이 발달된 1,280개의 소단층과 330개의 인장절리를 측정하였다. 이들 중 단층이동자료가 뚜렷한 1,033개의 단층주향, 단층조선의 주선각 및 운동감각을 측정하였으며, 각 지점별로 각오차(angular deviation)를 최소화하는 동일한 응력텐서를 지시하는 자료들의 집합으로 69개의 응력텐서를 구하였다. 응력텐서 계산은 Angelier방법(Angelier et al., 1982; Angelier, 1990)을 주로 이용하였으며 Reches 방법(Reches, 1987)도 겸하여 검토하였다.

2-2. 고응력 해석

양산단층의 주향을 따라 잘 나타난 노두에서 얻어진 단층운동자료들은 양산단층의 최초 형성이후 계속적으로 지배받은 변형운동의 복합적인 산물을 동반하고 있다. 따라서 단층이동자료에서 얻어진 69개의 응력텐서들을 동일한 응력장으로 구분하면 6개의 동일 응력장으로 구별되고, 이들의 생성시기에 대한 선후관계를 밝히기 위하여 중첩되어 나타나는 서로 다른 시기의 단층조선, 맥암과 소단층의 상호 절단관계 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)으로 분석하였다. 이렇게 분석한 결과 전체 176개의 자료들 127개의 자료를 만족하는 응력순서가 도출되었다(장천중, 장태우, 1998).

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. 1), 구분된 6개의 응력장에 대한 자료의 수, 주응력축의 방향 및 응력축의 비에 대한 계산결과는 Table 1과 같다.

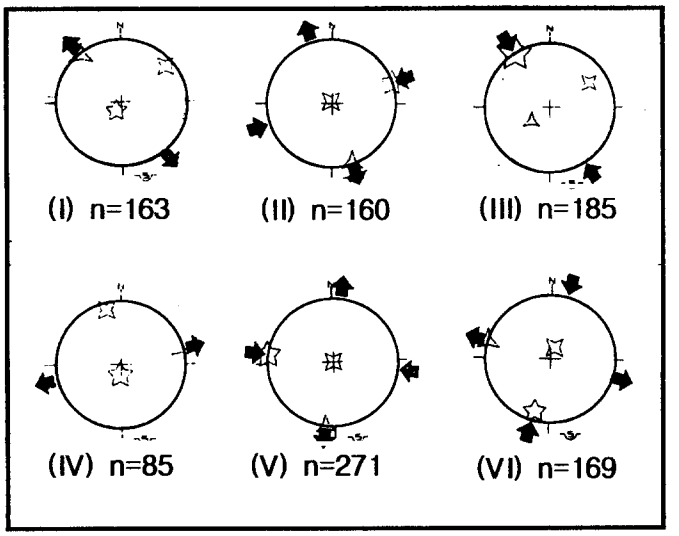

Fig. 1. The 6 geological paleostress tensors obtained from 37 outcrops along the strike of Yangsan fault.

Table 1. 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

3. 양산단층의 구조운동

6개의 응력텐서를 근거로 양산단층의 운동사를 해석하면 사건 (I)은 양산단층이 형성된 시기이다. 단층의 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, 1978) 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(장천중, 장태우, 1998)에서 잘 보여주고 있다. 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 오랫동안 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 25 km(엄상호 등, 1983), 35 km (장기홍, 1990) 혹은 15-30 km(장태우 등, 1993) 등으로 추정된 변위가 있었던 가장 활발한 시기이다.

지구조 사건 (III)과 (IV)에서는 양산단층이 좌수향 운동을 했던 시기이다. 지금까지 양산단층이 우수향주향이동으로만 보는 지배적인 의견과 다른 견해로서 절리연구에 의한 NNW-SSE 압축응력장(김상욱, 이영길, 1981), 자기 비등방성구조에 의한 NW-SE 압축과 미세균열에 의한 NW-SE 및 ESE-WNW 압축응력장(이준동 등, 1993)의 응력해석 등 좌수향 운동을 지시할만한 부분적인 연구결과들이 이를 뒷받침한다.

사건 (V)의 환경은 압축응력의 방향이 양산단층의 주향에 직각으로 놓임으로써 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 단층주향에 평행하면서 고각도로 기울어진 층리면들이 이에 해당된다고 볼 수 있을 것이다. 마지막으로 최후기 지구조 사건 (VI)에서는 양산단층이 미미한 우수향 혹은 신장을 받은 것으로 해석된다.

4. 한반도 주변 지구조 운동과의 관계

양산단층의 운동시기를 파악하기 위하여 부분적으로 연대측정이 이루어졌는데, 양산단층 주변 인보리 화강섬록암에서 63 m.y., 언양부근 화장산 석영반암에서 62 m.y., 이전리 화강섬록암에서 87 m.y.가 얻어졌고(이윤종, Ueda, 1976), 주사산 안산암에서 65 m.y.(진명식 등, 1988), 모량도폭 역 경주 남산화강암체가 약 54 m.y(진명식 등, 1989)와 지경동 화산암류에서 약 47 m.y. (진명식 등, 1988)가 얻어졌다. 또한 김상중과 이현구(1996)는 맥상광상의 모암변질물과 주변의 화성암류의 K-Ar 연령측정 결과 약 50 m.y.이 얻어졌다. 이로써 양산단층은 에오신으로 부터 마이오신초까지의 지질시대동안 가장 활발했던 것으로 판단되며(장태우 등, 1993) 그 이후에도 미미하지만 주변의 지구조응력장의 영향을 받았을 것으로 보인다.

양산단층의 운동 초기를 이렇게 설정하고 보면 당시 한반도 주변부에 작용했던 지구조 운동과 연관시켜 생각해 볼 수 있을 것이다. 이때 가장 두드러진 지질현상이 동해의 확장운동과 일본 서남부의 지구조 운동으로 주변 유라시아판과 태평양판, 필리핀 해양판의 상호작용에 의한 동해의 확장과 일본열도의 회전으로 설명될 수 있을 것이다(Uyeda, Miyashiro, 1974; Otsuki, Ehiro, 1978; Otofuji et al., 1985; Tamaki, 1985; Chough, Barg, 1987; Celaya, McCabe, 1987, Yoon, Chough, 1995). 동해의 확장에 대한 2가지 모델은 호후방 확장모델(back-arc spreading)과 인열모델(pull-apart)이다. 이들 중 인열 모델은 기존의 양산단층에 대한 연구결과를 기반으로 단지 에오신/올리고신 때 양산단층이 단순우수향 주향이동만을 가정하여 설정된 것이다. 또한 양산단층의 북단부 연장이 실제 야외노두에서는 뚜렷하게 확인되지 않음에도 불구하고(채병곤, 장태우, 1994) 단지 거시적인 인공위성 영상분석에 의한 해석결과들 만을 근거로 양산단층이 낙동강 하구에서 경북 영덕을 지나 동해까지 매우 길게 연장된다는 전제하에서 East Korean Fault를 동해의 좌측 대단층으로 설정한 것이다. 따라서, 인열모델은 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 많은 연구자들이 동해의 확장과 일본열도의 회전에 대한 원인으로 설명하고 있다(Chough, Barg, 1987; Celaya, McCabe, 1987, Yoon, Chough, 1995). 양산단층이 운동을 시작한 에오신 초 쿨라판(Kula plate)과

태평양판이 북북서 방향으로 침강하였다. 그리고 태평양 판의 운동이 서북서 방향으로 바뀌고 필리핀 해양판이 북서방향으로 운동을 하면서 일본분지가 형성되기 시작한다(43 m.y.; Celaya, McCabe, 1987). 이러한 운동은 계속되면서 올리고신을 거쳐 마이오신 중기까지 일본분지, 울릉분지 및 야마토 분지가 확장되면서 지속적으로 그 확장이 이루어지는데, 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)에 이어지면서 양산단층의 우수향 주향이동을 지배하였고 가장 큰 변형을 기록한 시기이다. 이는 Chough and Barg(1987)에 의한 마이오신 중기 말까지 가장 오랜기간 동안 지속되었으며 울릉분지 서남부의 확장속도가 가장 큰 시기와 일치할 것으로 생각된다.

나아가서 Chough and Barg(1987)의 폐쇄단계인 마이오신 후기 초에 동해의 확장이 정지되고 압축응력을 받게될 때, 이때 나타나는 것이 사건 (III)과 (IV)의 시기이고, 양산단층은 미약하지만 좌수향 운동을 기록하기도하고 사건 (V)의 응력장에 의해서는 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 작용되면서 사건 (VI)의 시기에 도달하여 현재에 이르는데(Chough, Barg, 1987), 황재하(1994)의 마지막 응력장(NW-SE 신장)과도 부합된다.

5. 결 론

양산단층의 운동특성을 파악하기 위하여 단층의 주향을 따라 단층조선이 발달된 소단층 1,000여개를 측정하여 69개의 응력텐서를 복원하였고, 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.

이를 한반도 주변 지구조 운동과 연관지어 해석한 결과 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 이래로 시기를 달리하면서 주변의 동해의 확장운동을 포함한 광역지구조 운동에 의하여 다중변형을 받은 것으로 해석된다.

참 고 문 헌

김상욱, 이영길(1981), "유천분지 북동부의 암석학 및 구조지질," 광산지질, 14권, pp.5-49.

김상중, 이현구(1996), "경상분지 북부에 배태된 금속광상 및 화성암체의 K-Ar 연대측정을 통한 NW계 및 NE계 단층운동의 시기추정," 양산단층대 학술심포지움, 1996년 대한지질학회 구조. 에너지 분과 학술심포지움 및 학술답사 자료집, pp.88-91.

엄상호, 최현일, 손진담, 오재호, 곽영훈, 신성천, 윤현수(1983), "경상분지의 경상누층군에 대한 지

질 및 지화학적 연구," 연구특보-36, 자원개발연구소, 118p.
이윤종, Ueda, Y.(1976), "한국 경상남도 언양도폭 및 북서부 울산도폭 지역산 화강암질암의 K-Ar 연대," 광산지질, 9권, pp.127-134.
이준동, 김인수, 윤선, 상기남, 김영화(1993), "언양지역을 중심으로한 양산단층에 관한 연구,"- 특히 파쇄작용과 자기 비등방성 고찰을 중심으로 -, 지질학회지, 29권, pp.128-144.
장기홍(1990), "경상분지 동부 지질발달사," 1989년도 전국대학 기초과학연구소 지구과학(지질)분야 학술 심포지움, 경북대학교, 1990. 2. 12, pp.1-3.
장천중(1986), "울산-언양 일대 하양층군의 층서 및 퇴적," 경북대 석사학위논문, 66p.
장천중, 장태우(1996), "양산단층의 고응력해석과 단층의 분절화," 양산단층대 학술심포지움, 1996년 대한지질학회 구조.에너지 분과 학술심포지움 및 학술답사 자료집, pp.54-73.
장천중, 장태우(1998), "고응력 분석을 통한 양산단층의 구조운동사," 지질공학, 제8권, 제1호, pp.35-49.
장태우, 장천중, 김영기(1993), "언양지역 양산단층 부근 단열의 기하분석," 광산지질, 26권, pp. 227-236.
진명식, 김성재, 신성천, 이주위(1988), "K/Ar 및 횟션트랙법에 의한 한국 동남부 지역 화강암 및 화산암의 암석광물 연령측정 연구," 한국동력자원연구소, KR-88-6D.
진명식, 신성천, 김성재(1989), "K/Ar과 횟션트랙 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, pp.379-394.
최범영(1991), "단층자료를 이용한 응력텐서 계산방법에 대하여," 지질학회지, 27권, pp.383-393.
황재하(1994), "백악기초 이후 한반도 남동부에 작용한 고응력 복원," 지질학회지, 30권, pp.27-34.
Angelier, J.(1979), "Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population," Tectonophysics, Vol. 56, pp.T17-T26.
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., Vol. 103, pp.363-376.
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., Vol. 69, pp.607-621.
Aydin, A. and Johnson, A.M.(1978), "Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstone," Pure & Applied Geophy., Vol. 116, pp.931-942.
Bergerat, F.(1987), "Stress fields in the European platform at the time of Africa-Eurasia collision," Tectonics, Vol. 6, pp.99-132.
Carey, E. and Brunier, B.(1974), "Analyse theorique et numerique d'un modele mecanique elementaire applique a l'etude d'und population de failles," C.R.Acad.Sc.Paris, Vol. 279, pp.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, Vol. 15, pp.53-57.
Choi, P.-Y., Angelier, J., and Souffache, B.(1996), "Distribution of angular misfits in fault-slip data," Jour. of Stru. Geol., Vo. 18, pp.1353-1368.
Chough, S.K. and Barg, E.(1987), "Tectonic history of Ulleung basin margin, East Sea(Sea of Japan)," Geology, Vol. 15, pp.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, Vol. 223, pp.291-312.

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., Vol. 89, pp.9305-9320.

Hatzor, Y. and Reches, Z.(1990), "Structure and paleostresses in the Gilboa' region, western margins of the central Dead Sea rift," Tectonophysics, Vol. 180, pp.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, Vol. 28, pp.471-482.

Lallemand, S. and Jolivet, L.(1986), "The Japan Sea: A pull-apart basin ?," Earth and Planet. Sci. Lett., Vol. 76, pp.375-389.

Otofuji, Y. and Matsuda, T.(1983), "Paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of Southwest Japan," Earth and Planet. Sci. Lett., Vol. 62, pp.349-359.

Otsuki, K. and Ehiro, M.(1978), "Major strike-slip faults and their bearing on spreading in the Japan Sea," Jour. Phys. Earth, Vol. 26, pp.S537-S555.

Reches, Z.(1987), "Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield condition," Tectonics, Vol. 6, pp.849-861.

Tamaki, K.(1985), "Two modes of back-arc spreading," Geology, Vol. 13, pp.473-478.

Tchalenko, J.S.(1970), "Similarities between shear zones of different magnitudes," Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 81, pp.1625-1640.

Uyeda, S. and Miyashiro, A.(1974), "Plate tectonics and the Japanese islands; A synthesis," Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 85, pp.1159-1170.

Yoon, S.H. and Chougn, S.K. (1995), "Regional strike slipin the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea(Sea of Japan)." Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 107, pp.83-97.