

구조요소를 이용한 양산단층의 진화 해석

Evolution of the Yangsan Fault Using the Structural Elements

장 천 중(Chun-Joong Chang)

한전 전력연구원

장 태 우(Tae Woo Chang)

경북대학교 지질학과

요약

단층이동자료를 이용하여 지구조 사건을 분별하고 단층의 운동시기 및 한반도 주변 지구구조계와 비교하여 양산단층의 진화과정을 해석하였다. 양산단층은 팔레오세 때 단층형성이 시작되었고 그 후 NW-SE 신장 사건에 의해 우수주향이동을 했다. 우수주향이동은 장구한 시간동안 진행되어 마이오세 초에 확장축이 바뀔에 따라 약간의 변화가 있지만 우수운동은 지속되었다. 마이오세 말에 양산단층은 좌수이동으로 변하여 운동하게 되며, 마이오세 말 혹은 플라이스토세 초에 와서 양산단층은 N-S 방향의 최대 수평압축응력을 받게 된다. 이후 플라이스토세를 전후해서 E-W 방향의 최대 수평압축응력에 의해 양산단층은 다시 우수이동을 한다. 이와 같이 양산단층은 한번의 운동으로 발달된 단층이 아니라 서로 다른 응력체계 하에서 다중변형을 받아 현재의 모습으로 진화되었다고 판단된다.

서론

과거에는 단층 자체로부터 단층운동을 해석하는 것이 그리 쉬운 일이 아니었다. 그러나 1970년대 말에 단층이동자료를 수집하여 단층운동을 야기한 응력체계를 해석할 수 있게 됨에 따라 취성구조 (brittle structures)에서 지구조 사건들을 분리할 수 있는 도구가 새로이 마련되게 된 것이다 (Angelier, 1984). 이러한 방법은 양산단층을 포함한 경상분지 전반에 묶여있던 지질사건을 풀어내는데 중요한 도구가 되었다. 국내에서는 1990년대 초부터 경상분지 전반을 대상으로 백악기 이래 지구조사를 풀어가는 연구와 양산단층, 동래단층의 응력장 해석에 상당한 성과를 거두고 있다 (채병곤과 장태우, 1994; 황재하, 1994; Choi et al., 2001).

지금까지의 양산단층 연구는 경상분지 전반에 대한 연구의 일부로 혹은 지질분포를

이용한 단층운동 해석으로 수행되었으며 양산단층 전반에 대한 구조적 특성과 진화에 대해서는 심도 있는 연구가 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 양산단층의 구조적 진화라는 관점에서 양산단층 운동시의 응력장을 복원하고 이들 자료들을 종합하여 한반도 주변 지구조 체계의 발달과정과 비교하면서 양산단층의 발달 진화사를 밝히는 데 그 목적을 두었다.

고응력 해석

1. 연구 방법

양산단층의 구조운동사를 규명하고자 주단층의 단층운동의 자취가 충분히 기록될 수 있는 영향범위를 최대 4 km 폭의 범위로 추정하고 주단층 인접지역을 따라 경남 양산시에서 경북 포항시 신광면에 이르는 약 80여개 지점에서 단층이동 자료를 측정하였다. 이들 지역 중 단층조선의 발달이 미약하거나 단층조선의 운동감각을 판정하기 곤란한 경우를 제외하고 37개 지점 (Fig. 1)으로부터 1,264개의 단층이동자료를 얻었다.

단층면의 운동감각을 판별하기 위하여 열쇄층과 같은 기준이 될만한 층리면들의 어긋나기, 광물섬유성장구조, 변형된 비대칭 변형공극, 이차단열인 리델전단의 특징과 단층운동으로 예인된 습곡구조 등을 활용하였으며, 또한 단층운동의 선후관계를 확인하기 위해서는 인접한 단층간의 절단관계, 단층대 내의 광물성장구조와 단층운동으로 변위된 암맥과의 상호관계, 동일 단층면 상에 여러 방향의 단층조선이 존재할 경우 중첩된 단층조선의 상호 절단관계를 면밀히 조사하여 활용하였다.

2. 양산단층 운동의 고응력장 복원

양산단층 주변의 지질구조요소들은 양산단층이 한번의 운동으로 이루어진 대규모 단층이 아니라 다중 변형사를 겪은 복합 구조운동의 산물임을 시사하고 있다 (장천중, 장태우, 2002). 양산단층대 내에는 주단층과 사교하는 소단층들도 다수 포함하고 있는데 다양한 방향으로 혼재하고 있는 단층이동 자료들은 단일 운동사를 지시하는 자료 혹은 각 지점별로 각편차 (angular deviation)를 최소화하는 동일한 응력텐서를 지시하는 균질한 자료들의 집합으로 구분하였다. 또한 Mohr-Coulomb의 암석마찰이론을 적용하면서 동일한 응력장을 지시하는 단층자료들을 분별하였다.

이러한 방법으로 분리된 동일한 응력장을 지시하는 단층자료들로부터 각 지점별로

Site No.	I	II	III	IV	V	VI
174						
173						
215						
170						
144						
149						
151						
140						
139						
138						
134						
129						
132						
176						
175						
177						
178						
192						
179						
180						
193						
181						
182						
183						
187						
188						
189						
190						
191						
092						
086						
085						
084						
196						
079						
198						
197						

Fig. 2. Sequential tectonic events at 37 sites in the study area. Black, yellow, red and white arrows indicate tectonic events obtained from fault slip data, calcite veins, quartz veins and tension gashes respectively.

또한 서로 다른 사건별로 응력텐서를 계산하였다. 축소응력텐서를 계산하는 방법으로 Choi (1995)의 반복선형역산법 (iterative linear inversion method)을 주로 이용하였으며, Angelier (1990)의 직접역산법 (direct inversion method)과 Reches 방법 (Reches, 1987)도 겸하여 검토하였다. 연구지역의 37개 지점에서 86개의 응력텐서를 복원하고 상대적인 운동시기를 구분하였다. 이와 더불어 양산단층을 따라 일정한 방향성을 가지면서 나타나는 방해석 암맥으로부터 14개의 응력장을 석영암맥으로부터 3개의 응력장을 도출하였으며 장력틈 혹은 깃털구조와 같이 개구상 절리를 잘 지시하는 구조요소들로부터 8개의 응력장을 도출하고 단층이동자료로부터 얻어진 응력장과의 선후관계를 살펴본 결과 전체적으로 6개의 지구조 사건이 분별되었다 (Fig. 2).

양산단층의 활동시기

양산단층의 형성과 그 발달시기는 이 단층을 포함한 북북동 방향의 구조선들이 불국사화강암류와 유천층군의 화산암류를 절단하고 있음을 확인하여 과거 많은 학자들이 백악기 말에서 고제3기라고 하였다 (Choi and Park, 1985). 정량적으로 단층 자체에 대한 운동시기를 결정한다는 것은 연대측정 방법들의 제한성과 시료의 한계성 때문에 많은 어려움이 있다. 양산단층의 운동시기에 대해서는 양산단층으로 절단된 주변의 관입암들의 연대측정 결과들은 44~73 Ma를 보이고 (진명식 외, 1988; 정창식 외, 1998), 이와 더불어 최근 제4기 단층연구들이 많이 시도됨에 따라 양산단층을 따라 제4기 운동을 지시할만한 야외 증거들이 발견되었는데, 제4기 단층 노두지역의 단층비지 대한 K-Ar 혹은 Rb-Sr 연대가 60 Ma 를 전후로해서 20 Ma (장태우와 추창오, 1999; 정창식, 2000) 까지로 그리고 ESR 및 C-14 연대측정 결과들은 수십만년에서 수만년으로 나타났다 (이희권, 1998; 최위찬 외, 2000; 경제복과 장태우, 2001).

이상의 양산단층대를 따라 주변 화강암류와 화산암류에 대한 연대측정 결과와 단층비지로부터 얻은 K-Ar 연대와 Rb-Sr 연대 및 ESR 연대측정결과들을 근거로 양산단층의 운동시기를 살펴보면 양산단층의 운동은 팔레오세 시기인 약 60 Ma 전후부터 시작하여 제3기 동안 여러번의 운동사를 겪었고 제4기에 와서도 운동하였음을 알 수 있다 (Fig. 3).

양산단층의 구조적 진화

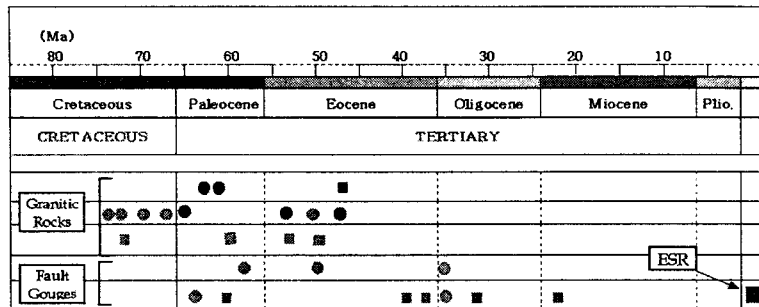


Fig. 3. Summary of age data measured from the fault gouges and granites along and around the Yangsan fault.

양산단층의 성인과 운동에 관해서는 주향이동단층, 경사단층 및 회전단층 등 다양한 의견이 있으나 단순 우수주향이동으로 보는 견해가 지배적이었다. 양산단층의 운동이 우수주향이동이라는 견해는 한반도 동남부 혹은 동해의 확장과 관련한 연구에서 양산단층의 연구결과를 인용하면서 양산단층을 우수운동 단층이라는 기본 가정을 먼저 설정하여 적용하는 경우도 많았다. 양산단층의 운동에 관하여 다양한 의견이 제시되었던 것은 그들이 제시한 개별자료의 내용들이 각각 하나의 운동성격으로 편중하여 해석한 결과로 보이며, 실상은 양산단층이 하나의 운동성격만을 갖는 것이 아니라 그들 모두를 포함한 다양한 운동의 복합적인 산물의 결과일 수 있다.

1. 한반도 주변 지구조 체계

양산단층의 구조적 진화를 설명하려면 먼저 백악기 말 불국사변동을 고려하지 않을 수 없으며, 불국사변동과 함께 양산단층의 운동이 고제3기의 팔레오세부터 시작했다고 생각할 수 있다. 이는 양산단층의 단층비지로부터 시료를 채취한 연대측정 결과로부터 짐작할 수 있다 (Fig. 3). 다음으로 양산단층의 운동을 지배했던 요인들로 동해의 확장과 일본열도의 회전과 같은 주변 지구조 사건의 체계로 설명될 수 있을 것이다 (Otsuki and Ehiro, 1978; Otofujii et al., 1985; Lallemand and Jolivet, 1986; Celaya and McCabe, 1987, Yoon and Chough, 1995). 이들 결과를 종합하면 에오세 말에 NW-SE 방향으로 일본열도의 분리가 시작되면서 동해의 형성이 이루어지기 시작하였고, 이후 약 18 Ma를 기점으로 한 동해의 확장은 NNW-SSE 방향으로 변하게 되는데 (Otsuki and Ehiro, 1978) 이 시기에는 동해의 남단에 위치하고 있는 야마토해

분과 울릉해분의 형성시기이다. 그후 약 12~15 Ma에 와서는 남서일본의 시계방향 회전사건과 결부되어 대한-쓰시마 해역은 좌향전단력과 WNW-ESE 방향의 횡압력의 지배하에 들어가게 된다. 그리고 10 Ma 를 전후해서 일본열도의 회전은 정지된다. 대부분의 연구는 마이오세 말 일본열도의 회전 정지 이후에 대한 지구조 체계에 대해서 자세한 언급이 없다. 최근 발견되고 있는 제4기 단층들의 형상과 지진진원기구로 밝혀진 현재의 응력장의 최대압축응력 방향이 ENE-WSW 방향이라는 사실과 이 응력장은 일본에서 밝혀진 연구결과를 비교하여 과거 0.5 Ma 이후라고 설명하고 있고, 그 이전에는 수평의 주압축방향이 남북으로 작용하였다 (Okada et al., 1998).

2. 양산단층의 구조적 진화

먼저 양산단층은 한반도 동남부에 활발했던 불국사변동의 대사건과 연관되어 팔레오세부터 형성되기 시작하였고 그후 NW-SE 신장의 지구조 사건 (I)과 (II)에 의해 우수주향이동을 했다. 이러한 우수주향이동은 장구한 시간동안 진행되었으며 이 시기에 대부분의 현재와 같은 우수변위를 기록하였다. 이러한 양산단층의 우수이동은 일본열도가 유라시아대륙으로부터 분리되는 약 40~30 Ma 부근에서 더욱 활발하게 되었고 이러한 운동은 약 20 Ma까지 지속되었다. 20 Ma를 기점으로 동해의 확장방향은 NNW-SSE 신장으로 바뀌면서 사건 (I)의 신장기와 사건 (II)의 신장기에 양산단층은 주도적으로 우수주향이동이 지배한다. 이러한 신장기는 일본열도의 남서부가 시계방향으로 회전하는 시점인 15 Ma까지 지속된다.

다음 단계에서는 양산단층은 좌수이동을 한다. 단층이동자료들로부터 해석된 사건 (III)과 사건 (IV)는 NW-SE 최대 수평압축응력기라고 할 때 같은 계열의 응력체계라고 할 수 있다. 이 두 사건의 시기가 양산단층을 좌수했던 시기이다. 이 기간은 매우 짧은 기간이었으며 대략 10 Ma를 전후해서 일본열도의 회전이 끝나는 시점과 같다고 볼 수 있다.

다음으로 작용했던 사건 (V)의 시기에 양산단층에 작용했던 응력방향은 N-S 방향으로 이 시기의 사건에 대해서는 일본열도의 남서부가 시계방향으로 회전하는 것이 정지되는 마이오세 말을 전후를 시점으로 하고, 현재의 수평압축응력이 0.5 Ma 이전부터 지배했다고 보면 이 시기는 플라이오세를 주로하고 플라이스토세까지도 연장된다고 보아할 것이다.

마지막으로 제4기 플라이스토세에 들어와서 E-W 방향으로 최대 수평압축응력이 지배했던 사건 (VI)의 시기이다. 현재 양산단층을 따라 발견되고 있는 제4기 단층에서

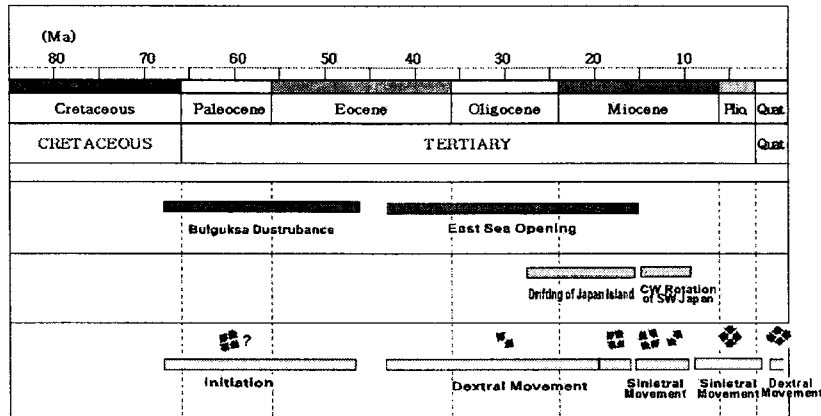


Fig. 4. Tectonic chronology of southeastern part of the Korean peninsula and evolution of the Yangsan fault.

우수이동갑각을 갖는 단층의 이동흔적을 찾기란 그리 어렵지 않다. 이와 같이 양산단층은 각 단계별로 주변의 지구조 사건과 함께 발달하여 현재의 단층모습으로 진화하였다고 판단된다 (Fig. 4).

결론

양산단층의 진화과정을 파악하기 위하여 37개 지점에서 단층이동자료로부터 6개의 지구조 사건을 분별하였다. 또한 양산단층의 활동시기를 살펴본 결과 양산단층은 고제3기 팔레오세부터 운동을 시작하였고 그 운동은 제4기까지 지속되었음을 알 수 있다. 이러한 결과를 본 연구에서 얻어진 지구조 사건과 단층대에서 관찰된 구조적인 요소들을 종합하여 경상분지 동남부 변동사건과 한반도 주변 지구조 체계를 비교 분석한 결과 양산단층은 팔레오세 때 단층형성이 시작되었고 그 후 NW-SE 신장 사건에 의해 우수주향이동을 했다. 우수주향이동은 장구한 시간동안 진행되어 마이오세 초에 확장축의 변화가 있지만 우수운동은 지속되었다. 마이오세 말에 양산단층은 좌수이동으로 변하여 운동하게 되는데, 좌수운동을 지배했던 사건은 일본열도 남서부의 시계방향 회전과 같은 급격한 지구조 사건과 결부될 수 있다. 좌수운동에 이어 마이오세 말부터 혹은 플라이스토세 초에 와서 양산단층은 N-S 방향의 최대 수평압축응력을 받게 된다. 이후 플라이스토세를 전후해서 E-W 방향의 최대 수평압축응력에 의해 양산단층은 다시 우수이동을 한다. 이러한 내용은 현재 양산단층을 따라 발견되는 제4기 단층에서 관찰되는 우수이동의 자료들과 현생 지구조 응력장으로 제시되고 있

는 E-W 압축방향과도 잘 일치된다. 이상과 같이 양산단층은 한번의 운동으로 발달된 단층이 아니라 지역적으로 서로 다른 응력체계 하에서 다중변형을 받아 현재의 모습으로 진화되었다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기 계획사업으로 일부 수행되었으며, 이에 깊이 감사드린다.

참고문헌

- 경제복, 장태우, 2001, 양산단층대 북부 유계리 일대의 신기단층 운동. 대한지질학회지 Vol.37, No.4, pp.563-577.
- 이희권, 1998, 단층 활동시기 결정 (양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가) 최종 보고서. 한국자원연구소, pp.555-671.
- 장천중, 장태우, 2002, 양산단층의 구조적 특성과 운동학적 고찰. 대한지질공학회 춘계 정기학술발표회 논문집, 2002.4.12-4.13, 부경대학교, 부산.
- 장태우, 추창오, 1999, 양산단층대 단층비지의 K-Ar 연대와 단층작용. 대한지구과학회지, Vol.20, pp.25-37.
- 정창식 외 12인, 2000, 신기 단층에 대한 절대연대 측정법 정립. 원자력안전기술원.
- 정창식, 권성택, 김정민, 장병욱, 1998, 경상분지 북부에 분포하는 온정리 화강암에 대한 암석학적, 동위원소 지구화학적 연구 : 경상분지 다른 지역과 서남 일본 내대에 분포하는 백악기-제3기 화강암류와의 비교 고찰. 한국암석학회지, Vol.7. No.2, pp.77-97.
- 진명식, 김성재, 신성천, 이주연, 1988, K/Ar 및 핏선트랙법에 의한 한국 동남부 지역의 화강암 및 화산암의 암석광물 연령측정 연구. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-88-6D, pp.53-84.
- 채병근, 장태우, 1994, 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련 단열 발달상태. 대한지질학회지, Vol.30, No.4, pp.379-394.
- 최위찬, 최성자, 조동룡, 이영준, 류충렬, 고인세, 신현모, 송미주, 이진한, 권성택, 이희권, 최광선, 2000, 신기 지각변형 연구. N2-01-02-A-01, 과학기술부.
- 황재하, 1994, 백악기초 이후 한반도 남동부에 작용한 고응력 복원. 지질학회지,

- Vol.30, No.1, pp.27-34.
- Angelier, J., 1984, Tectonic analysis of fault slip data sets. *Jour. of Geophys. Res.*, Vol.89, pp.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.*, Vol.103, pp.363-376.
- 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, 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. Soci. Korea*, Vol.21, pp.281-296.
- Choi, P.-Y., 1995, Aspects of stress inversion methods in fault tectonic analysis. *Annales Tectonic*, Vol.IX, No.1-2, pp.22-38.
- Choi, P.-Y., Kwon, Seok.-K., Hwang, J.-H., Lee, S. R., and An, G.-O., 2001, Peleostress analysis of the Pohang-Ulsan area, Southeast Korea: tectonic sequence and timing of block rotation. *Geoscience Journal*, Vol.5, No.1, pp.1-18.
- Lallemand, S. and Jolivet, L., 1986, The Japan Sea: A pull-apart basin ?, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, Vol.76, pp.375-389.
- Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J.-B., Jo, W.-R., Kim, S.-K., Oike, K., Nakamura, T., 1998, Active fault topography and fault outcrops in the Central part of the Ulsan fault system, Southeast Korea. *Jour. of Geography*, Vol.107, pp.644-658.
- Otofujii, Y., Matsuda, T., and Nohda, S., 1985, Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism of the Japan Arc. *Nature*, Vol.317, pp.603-604.
- 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.
- 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). Geol. Soc. Am. Bull., Vol. 107, pp.83-97.