

단층슬립의 기하분석에 의한 양산단층의 거동 특성

장천중^{1*} · 장태우²

¹한전 전력연구원, ²경북대학교

Behavioral Characteristics of the Yangsan Fault based on Geometric Analysis of Fault Slip

Chun-Joong Chang^{1*} and Tae Woo Chang²

¹Korea Electric Power Research Institute, ²Kyungpook National University

단층슬립의 기하분석에 의한 단층의 거동특성을 평가하고자 주단층의 주향변화, 단층 선단부의 발달 상태, 단층대의 폭의 주기적 변화, 단층암의 변형양상, 2차 소단층의 각관계를 근거로 양산단층의 주향을 따라 남쪽 양산에서 북쪽으로 포항시 신광면에 이르는 구간을 5개의 구역(A~E)으로 구분하였다. 또한 가상의 단층비지를 대상으로 시행한 이전 여러 실험연구 결과들로부터 얻어진 단층작용의 운동 양상과 변형 조직과의 관계를 양산단층에 적용하고자 하였다. 단층의 미끄럼 거동을 이해하기 위하여 양산단층을 따라 단층의 자세와 단층슬립을 측정하였고, 주단층과 2차 소단층의 Riedel shear 각 관계를 분석하였다. 양산단층 각 구역에서 주단층과 2차 단층의 방향성 및 단층슬립을 이용하여 각 구역별 단층의 거동특성을 해석한 결과 A, D 및 E와 같은 직선구역들은 안정된 전단운동을 한 creeping 운동의 구역으로 평가되었고, 반대로 B와 같은 곡선구역은 stick-slip 운동을 한 locked 구역으로 평가되었다.

주요어 : 양산단층, 단층거동, 2차 소단층, 단층슬립

In order to assess the fault behavior by the geometric analysis of fault slip, the study area between Yangsan city and Shinkwang-myon, Pohang city along the strike of the Yangsan fault is divided into 5 domains(A~E domains) based on the strike change of main fault, the type of fault termination, the cyclic variation of fault zone width, deformation pattern of fault rocks and angular deviation of secondary shears. And, we would apply the relationship between the mode of fault sliding and the resultant deformation texture obtained from previous several experimental studies of simulated fault gouge to the study of the Yangsan fault. To understand sliding behavior of the fault we measured the data of fault attitude and fault slip, and analyzed relationships between the main fault and secondary Riedel shear along the Yangsan fault. The sliding behavioral patterns in each section were analyzed as followings; the straight sections of A, D and E domains were analyzed as the creeping section of stably sliding. In contrast, the curved section of B domain was analyzed as the locked section of stick-slip movement.

Key words : Yangsan fault, fault behavior, secondary minor fault, fault slip

서 론

양산단층과 그 주변지역의 지진 진앙지 분포와의 관계, 역사 및 계기지진의 발생특성 그리고 경상분지 내의 미진활동을 근거로 양산단층의 활동성 논의가 제기된 이후(Lee and Na, 1983; Lee et al., 1986) 한반도 남동부에 위치하고 있는 대표적 단층인 양산단층 및 울산단층

주변지역 지진발생과 함께 인근 원자력발전소에 대한 지진 안전성 논란이 끊임없이 야기되어왔다. 이러한 초기 단층 활동성 연구의 내용은 대부분 지진학적 관점에서 의 논의였다. 그 후 Okada et al.(1994)가 양산단층의 통도사 지역 일부 구간에서 고지진학적 연구를 위한 트랜치 조사를 처음으로 실시하여 일부 양산단층 지역에서 제4기 단층운동을 지시할만한 지질학적 증거를 제시하

*Corresponding author: cjchang@kepri.re.kr

면서 새로운 방향의 연구가 이루어지게 되었다. 초기 양산단층과 그 주변단층들의 활동성 여부와 원자력발전소의 지진 안전성 문제들은 양산단층 자체에 대한 연구결과의 부족과 지진 관측망 설비의 미흡으로 인한 문제로 귀결될 수 있다. 즉, 그동안 많은 관심에도 불구하고 양산단층에 대해서는 운동 시기, 운동특성, 연장성에 대하여 학자들 간에 이견이 있었으며, 이러한 원인은 양산단층과 같은 대단층의 경우 넓은 단층대 폭과 단층 파쇄대로 지표면이 덮혀 있기 때문으로 단층대 자체를 직접적으로 자세히 관찰할 수 없기 때문이었다.

그러나, 보다 최근에 경상분지 및 양산단층 운동에 대한 응력해석(Hwang and Angelier, 1992; 장천중과 장태우, 1996), 주변 지구조 운동과 단층운동 관계(장천중과 장태우, 1998), 단층의 분절화 해석(Lee and Jin, 1991; 장태우 외, 1993; 장천중과 이종립, 1997) 등 보다 정량적이고 구체적인 연구가 수행되면서 점차 그 실상이 밝혀지고 있으며, 원전의 지진 안전성과 관련하여 많은 연구가 수행되어 최근까지 양산단층대 19개 지점, 울산단층대 24개 지점 그리고 동해안 지역 10개 지점으로 총 53개 지점에서 제4기 단층들이 트렌치, 야외노두 상태에서 발견되어 평가되었다. 이들 각 단층에 대한 기하학적 및 운동학적 특성과 연대측정에 관한 상세한 기술 내용의 종합은 Q-GIS(Quaternary Geological Information System) 프로그램으로 등록하였다(한국수력원자력, 2009).

단층 지진원을 고려한 원자력발전소의 설계지진 평가를 위해서는 제4기 단층이 활동성 단층(capable fault)의 범주에 있어야 하는데, 국내 원전에 적용되고 있는 활동성 단층의 기준은 미국의 규제기준인 10CFR Part App.A(US NRC, 1997)를 따르고 있다. 이 기준은 단지 단층의 운동시기 만을 근거로 하는 것이기 때문에 연대측정 시료의 확보가 용이하지 않은 지역에서는 많은 어려움이 있다. 특히 우리나라와 같이 강진발생이 많지 않은 안정대륙지역(SCR: stable continental region)에서는 단층의 연대측정에 많은 어려움이 있어 이를 근거로 한 지진재해평가에 불확실성이 존재하게 된다. 이러한 문제점을 해결하고자 확률론적 지진재해평가 방법(PSHA: Probabilistic Seismic Hazard Assessment)이 제안되었고, 또한 확률론적 단층 지진원 활동도 평가(Chang et al., 2009), 단층의 분절화(장천중과 이종립, 1997) 등의 연구가 제안되었다. 그러나 이러한 연구들은 최근에 운동을 겪은 단층은 가까운 장래에도 재활동할 가능성이 있으며, 또한 양산단층과 같이 거대한 단층은 한번의 운동으로 전체 단층이 파열되는 것이 아니라 서

로 다른 시기에 그 위치를 달리하면서 각 분절 단위로 파열 혹은 재활동한다는 개념이다. 보다 최근에는 이러한 분절화 개념에 추가하여 각 단층 분절의 파열 시나리오와 각 시나리오에 가중치를 고려한 단층파열모델(fault rupture model)을 적용하는 방법들이 제시되고 있다(W/G 2003).

이상의 단층 지진원을 고려한 지진재해평가는 단층의 거동이 stick-slip성 운동을 하는 지진성 단층(seismogenic fault)이라는 전제 하에서 평가되는 것이다. 단층운동에 따른 지진동 발생의 원인을 밝히기 위하여 야외조사 연구, 실내실험 및 이론적 모델 등 여러 가지 방법들의 연구가 진행되어 왔으나 취성 단층운동(brittle faulting)을 파악하는 데는 단층면에서의 구조요소들이 운동에 대한 세밀한 정보를 간직하고 있지 않기 때문에 이를 해석하는데 많은 어려움이 있었다. 일부 실내 암석실험을 통한 마찰실험의 물리적 특성과 부가적으로 형성되는 미구조의 발달과정을 비교하여 단층의 거동특성을 해석하려는 연구가 진행되었다. 이러한 실험에서는 일라이트(illite) 단층비지(fault gouge)를 대상으로 온도, 봉압, 공극수압, 변형속도 등의 다양한 조건으로 삼축마찰실험을 실시하여 마찰강도와 마찰거동에 따른 단층비지 내 변형구조의 발달과정을 비교하여 단층거동의 특성을 해석하고자 하였다(Moore et al., 1989). 이러한 연구결과를 대표적인 활성단층인 San Andreas 단층에 적용하여 이 단층의 구간별 stable sliding 구간 및 stick-slip 구간을 구분한 바 있다(Moore and Byerlee, 1991). 본 연구에서는 이러한 개념을 기본으로 하여 양산단층의 주단층과 주변에 발달하고 있는 2차 단층의 단층슬립 및 기하학적 특성을 분석하여 양산단층의 구간별 거동특성을 해석하고자 한다.

단층의 거동 해석

이론적 배경

단층의 거동특성을 이해하기 위해서는 실제 야외규모의 단층을 직접적으로 실험할 수 없기 때문에 실험실에서 전단모델시험을 수행하여 나타난 결과를 야외 대규모 단층 체계와 비교하여 해석하는 것일 일반적이다. 과거부터 지질구조의 발달과정과 단층운동의 sliding mode를 이해하기 위하여 실험실 규모에서 다양한 실험들이 수행되면서 야외 단층의 기하학적 현상과 단층운동에 대한 해석이 이해되게 되었다. 이러한 해석이 가능한 것은 실험실 규모에서 모래상자 실험이나 점토재료 혹은 단

층물질로 모래나 혹은 점토광물들을 이용하여 일정한 응력의 조건과 변형속도를 제어하면서 발달되는 지질구조의 현상을 비교한 결과, 실험실에서 관찰되는 지질구조의 현상이 규모에 관계없이 야외에서 관찰되는 지질구조의 기하학적 현상과 유사하다는 사실로부터 실제 지질구조를 해석할 수 있게 된 것이다(Tchalenko, 1970; Rutter et al., 1986). 특히 단층운동의 특성에 따라 주 단층의 운동양상이 어떻게 운동하느냐에 따라 단층대 내의 미구조의 발달단계와 경계단층면과 2차단열 사이의 각 관계에서 특징적인 현상을 보인다는 사실이 밝혀졌다(Summers and Byerlee, 1977; Byerlee et al., 1978; Logan et al., 1979; Moore et al., 1986, 1989).

일반적으로 낮은 봉압 하에서 암반에는 전단단열이 발달하고, 단열면은 점착력이 거의 없는 연약대 면이 되며, 이 단열면에서 마찰 슬라이딩(frictional sliding) 작용과 함께 지속적인 변형으로 암반의 거동이 일어나게 된다. 이와 같이 낮은 봉압 하에서의 마찰 슬라이딩은 부드럽고 연속적으로 일어나는데 이러한 거동을 stable sliding 이라할 수 있다. 봉압의 증가와 함께 마찰면에 압축응력이 증가하면 stick-slip 거동으로 변하게 되는데, 이러한 거동은 stick 이라는 전단응력의 증가하면서 움직임이 없는 구간과 응력이 해방되면서 갑작스런 변위가 일어나는 slip 구간으로 특징지을 수 있다(Fig. 1). 이러한 현상은 지진발생의 원인을 밝히기 위한 방안으로 많은 실험적 연구가 수행되었고, 이러한 현상은 현재

에도 활동하고 있는 San Andreas 단층과 같은 대단층에서 일부 구간에는 지진이 활발하게 일어남에도 불구하고 또 다른 구간에서는 지진이 거의 일어나지 않는다는 사실로부터 그 차이점을 해석하고자 활용되었다. 즉, 대규모 단층의 운동 시 stable sliding과 stick-slip 운동양상에 따라 지진현상들에 차이가 있으며 이러한 거동 특성에 따라 단층대 내의 미세구조들의 발달과 기하학적 특징도 달리 나타난다는 것이다.

단층의 거동특성을 해석하기 위한 실내실험으로써 단층비지의 두께를 달리하면서 그 영향을 분석하였고(Byerlee and Summers, 1976), 구성 암석의 영향을 해석하기 위하여 실험실에서 단층비지의 성분을 달리하면서 그 영향을 분석해 보았으며(Summers and Byerlee, 1977), stable sliding과 stick-slip에 따른 단층대 내의 구조발달을 살펴보기도 하였다(Byerlee et al., 1978). 대표적인 실험현상을 살펴보면 온도를 400°C 이상으로 높였을 경우 stick-slip 운동이 좀 더 잘 나타날 뿐 아니라 실험장치 내의 단층비지의 강도도 더 크게 나타나는 경향이 있다.

또한 이 실험 단층비지에서는 실험 조건과 현상에 따라 단층대 조직구조의 발달과정을 분석해 본 결과 (1) 저각의 kink band를 가지면서 광물조직구조가 전체 비지에서 발달하고, (2) 다음으로 저각의 kink band의 무리가 점차 Riedel shear와 boundary shear로 발달하고, (3) 좀더 진전되면 잘 발달된 보조 전단띠가 형성되고,

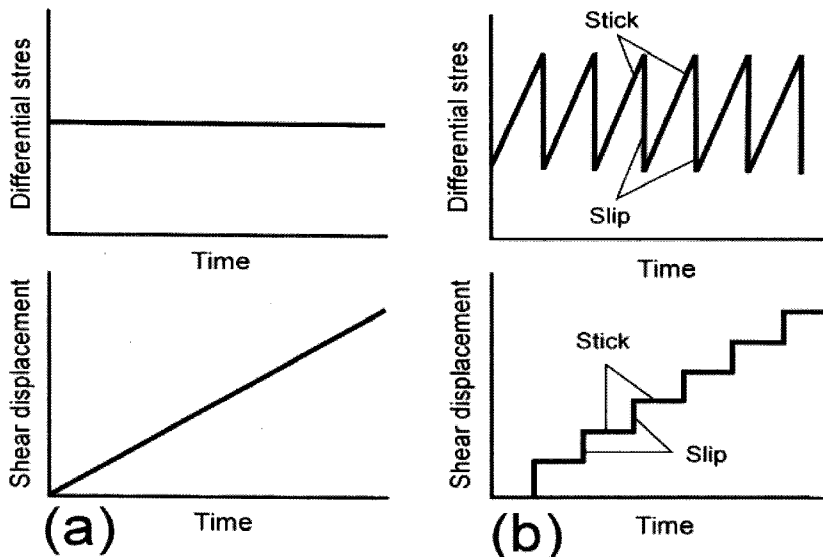


Fig. 1. Two types of faulting mode. (a) stable sliding, (b) stick-slip movement (Twiss and Moores, 1992).

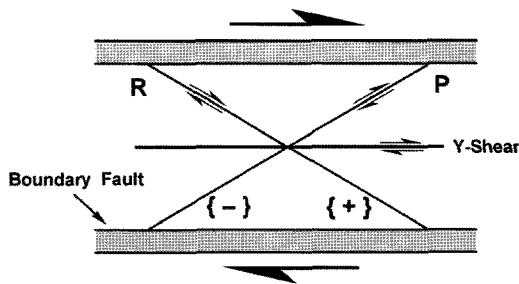


Fig. 2. Secondary shears developed in gouge layers.

(4) 마지막으로 좁은 띠의 boundary shear와 Riedel shear가 뚜렷하게 형성되는 과정으로 발달한다. 이러한 삼축마찰실험, 단층비지 내 미구조의 발달과정과 sliding mode 사이의 관계를 정리하였다(Moore et al., 1989). 이 밖에도 단층운동 시 발달되는 조직구조와 운동특성을 비교하기 위하여 여러 연구결과를 종합한 바 있는데, 이들 연구들은 단층비지의 생성과정, 봉합과 온도에 따른 영향, 단층비지의 두께와 광물 그리고 단층 비지대 내의 변형으로 요약되며, 실험실 결과와 야외단층에 적용을 하고자 하였다(Tsutsumi, 2002).

단층대에 나타나는 2차단열의 발달은 암석 역학적으로 Coulomb 이론으로 설명되어진다. 이 이론에 의하면 주단층의 운동이 시작되면 1차적으로 Coulomb 전단에 해당되는 R-shear(경계단층과 약 15°)가 먼저 발달하고, R-shear 발달에 따른 단층대의 응력장이 변화되고 변위가 진행되면서 더 작은 각도의 R-shear와 Y-shear 및 P-shear가 발달한다(Summers and Byerlee, 1977; Byerlee et al., 1978; Moore et al., 1989) (Fig. 2). 그런데 전 단실험에 의한 2차단열의 발달과정을 분석한 결과 R-shear와 Y-shear가 P-shear 보다 우세하게 발달하며, R-shear의 집중도와 방향은 전단거동과 관련이 있는 것으로 알려졌다. 즉, stable sliding 거동에서는 R-shear의 각이 10° 이하이고 stick-slip에서는 14° 보다 더 크게 나타나며, R-shear의 최대값에서 가장 큰 응력강하(stress drop)가 있음이 알려졌다(Table 1)(Moore et al., 1989; Moore and Byerlee, 1991). 이러한 연구결과는 지진기록이 미흡한 지진단층으로부터 지진학적 특성을 알아내려는 고지진학적 연구에도 많은 도움을 줄 수 있을 것이며(de Polo et al., 1991), 실제로 San Andreas 단층과 같이 자연 단층에도 적용이 가능할 것이라고 제안하였다(Logan et al., 1979; Moore and Byerlee, 1991, 1992; Tsutsumi, 2002). 이와 같이 기본적 실험연구에서 밝혀진 Riedel shear의 방향과 sliding 거동과의 관계가

Table 1. Relationships between sliding behavior and Riedel shear angle (after Moore et al., 1989).

Maximum Riedel shear angle		
$R < 10^\circ$	$10^\circ < R < 14^\circ$	$14^\circ < R$
Stable	Stable, part stable/ part stick-slip or stick-slip	Stick-slip

성립한다면 야외 단층에 적용하는 것이 가능할 것이다. 특히 고지진학 연구에서 과거 지진을 연구할 때 단층대의 여러 분절에서 지진해의 잠재성을 평가하게 되는데, 이 경우 주어진 단층분절에서 주단층과 2차로 발생되는 Riedel shear 방향을 이용하여 과거에 지진이 일어났는지 혹은 그 분절을 따라서 지진이 발생할 것인지 해석하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

양산단층 주변 소단층의 기하분석

양산단층대 주변 소단층의 기하학적 자료들로부터 주 단층과 관계를 해석하는 것은 양산단층의 분절특성 해석에 기초가 되는 단층거동의 양상을 알아내는 중요한 도구이다(Logan et al., 1979; Gamond, 1983; Gamond, 1987). 이러한 해석을 국내 활동성 단층으로 많은 관심의 대상이 되고 있는 양산단층에 적용하고자 하였다. 양산단층을 따라 남쪽의 양산시에서 북쪽으로 포항시 신광면에 이르는 17개 지역에서 주단층대 주변에 발달하고 있는 2차적인 소단층 999개의 자료들을 측정하였다. 각 소단층에서는 단층의 주향과 경사, 2차 소단층의 단층슬립을 측정하였다. 각 지점에서 단층조건의 발달이 미약하거나 운동감각을 판정하기 곤란한 경우에는 해석에 제외하였으며, 단층면의 운동감각 결정방법으로 열쇄층(key bed)과 같은 기준이 될만한 층리면들의 어긋나기를 측정하였고, 방해석 혹은 석영암맥들의 방향성도 중요한 자료가 되었다. 또한 단층면 상에서 단층의 운동감각을 지시할만한 광물섬유 성장구조, 변형된 비대칭공극, 이차단열인 Riedel shear의 특징과 단단한 입자의 굵은 흔적 등을 이용하여 판별하였다.

전체 지역에 대한 소단층 999개의 방향성을 살펴보면 북북서 방향과 남북 및 북북동 방향의 주향들이 우세하며 이들의 평균 방향은 N12°E로서 양산단층의 주향과 유사한 방향을 보인다(Fig. 3). 또한 양산단층의 주 운동 방향이 우수향이라는 이전의 연구결과들을 근거로 이들 우세방향을 살펴보면 주단층에 대하여 R-shear에 해당되는 북북동 방향과 P-shear에 해당되는 북북서 방향이 주류를 이루고 있다. 이로써 단층발달과정에서 주단층과

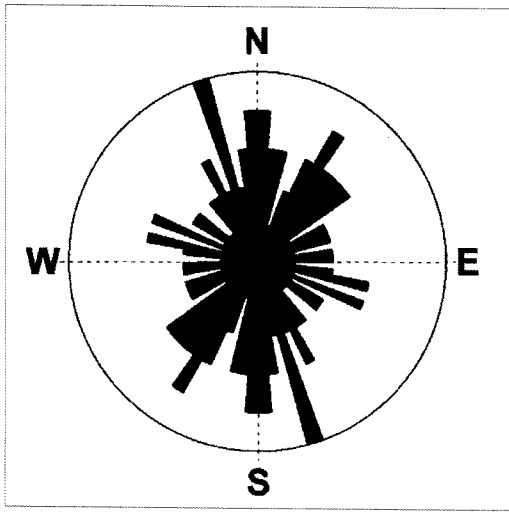


Fig. 3. Rose diagram showing the orientation of small faults in whole area. Number of the small faults are 999.

2차단열의 발달관계를 근거로 살펴보면 전반적으로 양산단층은 오랜 기간 동안 변위량이 많은 성숙된 단층으로 해석할 수 있을 것이다.

지진이란 단층 형성 시 지반이 파괴됨으로 생성되는 탄성파로서 양자간에 매우 밀접한 관계가 있다. 즉 단층 운동이 대규모이면 수반되는 지진동의 크기가 클 것이며, 또한 대규모 단층은 전체 단층이 한번에 파괴되어 형성되는 것이 아니라 지역적으로 단위 사건에 발생하는 파괴영역을 달리하면서 점차 전파되어간다. 이러한 현상은 세계적으로 유명한 미국 캘리포니아의 San Andreas 단층의 분절화와 최근 발생한 터키 대지진의 북아나톨리안 단층 부근의 진앙지가 서쪽으로 이동되는 현상에서 분절화 현상의 특징을 잘 보여주고 있다.

이와 같이 판 경계부에서 활성단층의 특징을 잘 보여주는 세계적 주요단층들과는 달리, 양산단층은 생성시기가 오래되었고, 제4기 단층운동의 특징을 잘 보여주지 않기 때문에 잘 관찰할 수는 없지만, 한반도 대규모 단층 중 가장 신기에 해당되고 그 연장성이 약 200 km에 달하는 것으로 이 단층의 거동특성과 지진과의 연관성을 해석하기 위해서는 1차적으로 단층요소에 의해 영역을 구분하여 해석하는 것이 바람직하다. 이에 따라 본 연구에서는 양산단층의 주향을 따라 전체 단층길이 중 남쪽 경남 양산시 동면 석산리(No. 197)에서 울산시 울주군 두서면 활천리(No. 182), 경주시 성건동(No. 132)을 거쳐, 북쪽으로 포항시 북구 신평면 흥곡리(No. 171)에 이르는 지역까지 양산단층의 주단층 주향변화, 단층

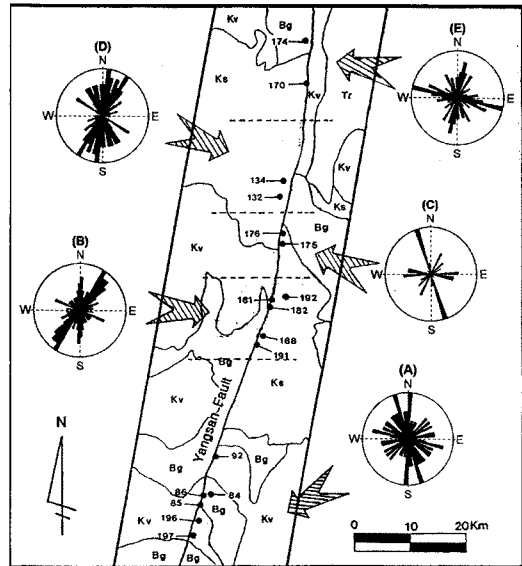


Fig. 4. Geological map and outcrop localities of small faults measured along the Yangsan fault. Ks : Hayang Group; Kv: Yucheon Group; Bg: Bulguksa Granite; Tr: Tertiary rocks. Dashed lines are the domain boundaries.

선단부의 발달상태, 고응력 해석 및 각 영역에서의 소단층의 기하특징과 단층대 폭의 변화(장천중과 이종립, 1997)에 따라 연구지역 단층구간을 5개의 구역으로 구분하고, 각 구역의 소단층에 대한 주향을 Rose diagram으로 도시하였다(Fig. 4).

이들 소단층의 자료들은 양산단층이 한번의 운동을 한 것이 아니라 여러 번의 다중변형을 받았고, 이렇게 서로 다른 시기에 주향이동 및 경사이동 운동의 서로 다른 운동을 한 단층구조들이 복합적으로 나타난 결과일 뿐 아니라(장천중과 장태우, 1998), 지질학적 변형매질은 불균질하고 이방성이란 특성 때문에 이에 수반되어 나타나는 2차 단열들이 매우 규칙적이지는 못하다. 따라서 좀 더 세분하여 분석하고자 주단층의 주향과 관련하여 단일 운동을 나타내는 것으로 판단되는 선경사가 45° 이하인 주향 이동성 특징만을 보이는 단층들로만 구조요소들을 구분하여 선별하였다. 이러한 작업은 양산단층의 주단층의 주향을 두고 주향이동이라는 가정하에서 개개 소단층들의 주향과 운동감각을 고려하여 주단층에 대한 소단층들의 각 관계로부터 분석한 것이다. 즉, 각 구역에서의 주단층의 주향과 소단층의 단층슬립 벡터에 의한 좌수향 및 우수향의 소단층들을 구분하고 이를 근거로 주단층과의 각관계 의한 P-Shear 및 R-shear를 구분하여 분석하였다. 단층의 주향과 평행한 단

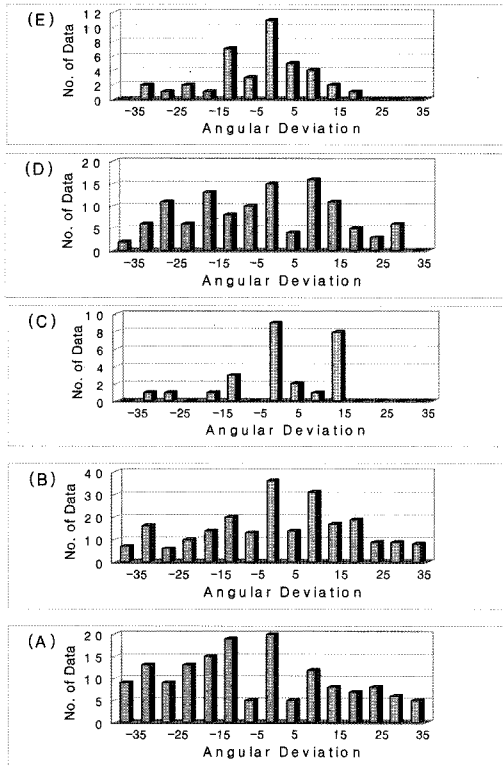


Fig. 5. Histograms of angular deviation between small faults and the trend of the Yangsan fault. Zero degree is the trend of main fault. (-) : P-shear; (+) : R-shear.

층은 중심 (0)에 두고 P-shear와 R-shear에 해당되는 자료들은 Fig. 5에서 제시한 방향으로 각각 (+)와 (-) 방향으로 설정하였다. 이와 같이 개별 노두에서 단층슬립에 의한 2차 소단층의 운동특성을 구분하고, 각각에 해당되는 2차 소단층과 주단층과의 각 편차에 대한 가중치를 반영하고자 주단층과 2차 소단층 사이의 각 편차 자료의 수를 곱한 누적 수치를 고려하여 평가하였으며, 이들 자료로부터 각각의 구역에 대한 P-shear와 R-shear의 비율을 환산하였다(Table 2).

이러한 연구방법은 단층의 전단운동에 따라 단층대 내의 단층비지에 나타나는 조직의 현미경적 관찰에서부터 출발하지만, 단층 발달과정은 규모에 관계없이 그 현상이 유사하게 나타나기 때문에 주단층과 주변 소단층에서 나타나는 구조요소들로부터 단층거동을 해석할 수 있을 것이다. 각 구역별로 소단층에 대한 특징을 살펴보면 경남 양산에서 울산시 두동면에 이르는 A 구역은 넓은 단층대 폭을 가지고 있으며, 단층대 중앙부에 좌쇄된 단층암을 뚜렷이 볼 수 있다. 이 구역에서 측정된 소단

층들은 총 286개로 전체 평균주향은 N26°W이며 주 우세방향은 N-S 방향과 NNW방향이 우세군을 이루고 있다. 이들 중 면진각(rake)이 작은 단층운동과 연관된 2차단열 154개만을 가지고 주단층과의 각관계에 의한 자료들의 누적량을 살펴보면 P-shear/R-shear의 비는 1.615로 P-shear가 우세함을 보여준다. 이 구역은 그 길이가 매우 길게 설정되었으나 단층대 폭이 넓기 때문에 상세한 구분이 어렵지만 미세구조 연구를 통한 보다 세분된 구역의 설정이 수행되어야 할 것이다.

울산시 울주군 두동면에서 경주시 내남면에 이르는 B 구역은 인공위성 사진과 선형구조 및 주단층의 발달상태로 보아 단층분절의 특징을 매우 잘 보여주는 지역이다. 이 지역은 남쪽의 A 구역과는 달리 단층대 폭이 매우 좁으며 단층암의 좌쇄양상도 비교적 덜 변형된 망상구조의 특징이 잘 나타난다. 이 구역에서 관찰된 총 348개의 소단층들의 평균방향은 N27°E로서 양산단층의 일반적 주향과 유사하며 NNE 방향과 N-S방향이 주 우세군을 보인다. 2차단열의 누적 각관계는 0.976으로 R-shear이 우세하게 발달하는 것으로 나타나고 있다.

경주시 내남면에서 경주시 남쪽 입구에 이르는 C 구역은 노출된 자료들이 많지 않아 별도의 구역으로의 특징을 설명하기 곤란하나 야외 구조요소들을 근거로 구분하였다. 경주시 남쪽 입구에서 동국대 경주분교 부근 및 안강에 이르는 D 구역은 넓은 단층대를 이루고 있다. 이 구역에서 측정된 전체 189개 소단층들의 NS 방향과 NNE방향이 우세하면 이들 전체의 평균방향은 N9°E로 이는 이 지역의 주단층의 주향과 일치한다. 전체 자료들 중 2차단열의 각관계를 해석할 수 있는 자료 116개만을 분석한 결과 누적 각관계에 의한 P-shear/R-shear 값은 1.386으로 P-shear가 우세하게 발달한 것으로 나타났다.

안강에서 포항시 신평면 냉수리에 이르는 E 구역은 점차 단층대 폭이 좁아지면서 북으로 연장되는 양상을 보인다. 이 구역에서 관찰된 총 96개의 자료들은 WNW방향의 자료들이 우세하고 NNE 방향이 다음으로 우세하게 나타나는데 WNW 방향의 우세군에 대한 원인과의 현상과 달리 P-shear의 우세현상은 좀 더 많은 자료를 이용하여 분석할 필요가 있을 것이다.

양산단층의 거동 해석

단층의 거동 해석은 지진계측이 이루어지기 이전 단층기록으로 나타난 지역에서 과거 지진으로 인한 지진 재해 평가에 매우 유용한 방법이다. 이러한 연구는 과거

Table 2. Geometric analysis of small faults along the Yangsan fault.

Domain (Total Data)	Site No.	No. of Data	Mean Strike	P-Shear	R-Shear	P/R Ratio
E (96)	174	16	N29°E	225	115	1.956
	170	23				
D (189)	134	74	N9°E	970	700	1.386
	132	42				
C (80)	176	7	N4°W	110	140	0.786
	175	19				
B (348)	192	98	N27°E	1,625	1,665	0.976
	181	42				
	182	34				
	188	32				
	191	23				
A (286)	92	16	N26°W	1,550	960	1.615
	86	7				
	85	17				
	84	12				
	196	61				
	197	41				

수십년 동안 지진재해도 분석과 활동성 지구조 운동 해석에 많은 향상을 가져왔다. 이렇게 하여 수행된 연구들은 전세계적으로 역사시대 이전 정량적 지진활동의 평가에 많이 기여하였는데, 역사지진의 지진규모, 단층면의 파괴길이 및 단층면의 변위량 등의 관계로 나타난다. 이들에 대한 대표적인 연구는 지진발생이 빈번하고 단층운동이 활발한 판경계부 지역인 미국 서부 California 지역의 San Andreas 단층대와 터키의 북아나톨리안 단층대 지역의 연구가 좋은 사례이다.

국내에서도 양산단층에 대한 활동성에 대한 논의가 되면서 이 단층운동으로 인한 지진규모가 얼마인가에 대한 관심사가 집중되고 있다. 단층운동에 의한 지진크기의 평가는 단층운동-지진크기의 실측자료들이 많지 않기 때문에 쉽게 해결될 수 없었으며, 약 10여년전부터 취성단층운동의 분절에 따른 생성 및 전파과정과 그들 단층의 운동을 해석하기 위한 응력해석에 대한 연구, 그리고 실험실에서 단층운동에 대한 거동특성이 해석되면서 좀더 구체화되기에 이른다.

본 연구에서는 단층대 내의 단층암 조직의 발달과 거동과의 관계 해석에 기초한 기본적 이론을 바탕으로 양산단층의 주향을 따라 양산시에서 북으로 연양 및 경주를 거쳐 포항시 신평면에 이르는 약 80 km 이 이르는

영역에서 주단층의 주향변화, 단층대 폭의 변화, 단층의 선단부 발달형태, 주단층과 주변 소단층의 기하특성 등에 의해 5개의 구역(A-E)으로 구분하였고, 이를 근거로 구역별 단층의 거동을 해석하였다.

연구지역에서 최남단인 A 구역에서는 단층의 주향이 N18°E이며 단층대의 폭이 넓게 발달하고 있다. 또한 단층대를 가로질러 지표면에 토양층으로 덮여 있기 단층암을 관찰하기가 쉽지 않지만 간헐적으로 중앙부에 심한 단층운동으로 미세하게 파쇄된 단층암을 쉽게 볼 수 있다. 또한 주단층과 주변 2차단열의 누적 각 관계에 의한 P/R-shear 비를 살펴보면 P-shear이 매우 우세하게 발달된 양상을 볼 수 있다. 이상의 내용을 근거로 A 구역에서의 양산단층의 거동은 많은 변위량을 가진 안정된 전단운동을 한 직선구간(straight section)에 해당되는 Creeping 운동 구역으로 해석할 수 있다. 그러나 이 구역의 길이는 약 40 km로서 단층대 폭의 변화에 의한 25~30 km 분절 가능성에 비추어보면 좀 더 세분된 구분이 필요할 것이다.

B 구역은 야외조사 뿐 아니라 인공위성 영상에서도 양산단층의 주향이 NNE 방향에서 NS방향으로 급격히 변화되는 지역으로 단층대의 폭이 매우 좁아지는 현상을 뚜렷이 볼 수 있는 단층분절의 특징을 잘 보여주는

구역이다. 이 구역에 나타난 단층암의 파쇄 양상도 비교적 덜 변형된 망상구조의 단층암을 볼 수 있으며, 2차 단열에 의한 누적 각관계 및 단층선단의 분지된 양상으로 보아 초기 변형 양상을 보이는 R-shear가 우세하다. 따라서 B 구역은 곡선구간(curved section)에 해당되는 Locked 운동을 한 구역으로 해석할 수 있다.

C 구역은 경주시 내남면에서 경주시 남쪽 입구에 해당되는 구역으로 단층의 주향이 NS-NS^oE에 해당되는 직선구간이다. 야외 노두의 자료가 빈약하므로 정확한 해석이 용이하지 않은 구역이다. 경주시 입구에서 안강 및 포항시 신광면에 이르는 D 구역과 E 구역은 넓은 단층대와 남북방향에 가까운 주향에 선형적인 주단층 발달이 유사하지만, 두 구역의 구분은 단층대 폭의 변화와 단층대의 발달과 단층암의 변형양상도 점차 약해짐을 근거로 나누었다. 이들 단층대의 구조요소와 P-shear 발달 우세 등으로 보아 이들 구간은 직선구간에 해당되며 Creeping 운동을 한 구역으로 해석된다.

결 론

국내 원전의 지진 안전성과 관련하여 양산단층의 활동성 및 이 단층으로 인한 지진재해 평가가 학자들 간에 관심이 집중되어 있다. 단층으로 인한 지진력의 평가는 전체 단층이 한번에 운동한 것이 아니라 단층의 각 분절의 운동에 따른 지진발생을 정량적으로 평가하는 것이다.

본 연구에서는 주단층의 주향변화, 단층대의 폭, 단층암의 변형양상, 주단층과 2차단열의 누적 각 관계를 근거로 양산에서 북으로 가면서 언양, 경주 및 포항시 신광면에 이르는 양산단층 구간을 5개의 구역(A-E)으로 구분하였다. 야외 단층암의 구조요소와 실내 단층모델실험에 의한 단층운동을 근거로 양산단층의 각 구역에서의 단층거동을 해석하면 A, D, E 구역들은 직선구간에 해당되며 안정한 전단운동을 한 Creeping 운동의 구역이고, B 구역은 주단층의 주향변화와 선단부의 발달형태, 단층대 폭의 변화 및 2차단열에 의한 누적 각 관계 등으로 보아 곡선구간에 해당되고 Locked 운동을 한 구역으로 해석된다.

관경계부에서 활동하고 있는 대규모의 활성단층과는 달리 양산단층과 같이 큰 규모의 지진활동과 뚜렷한 변형을 보이지 않는 단층의 특성을 이해하는 것은 쉬운 일이 아니다. 이러한 차원에서 본 연구는 단층대 거동특성을 파악하고자 소단층들을 이용하였으며, 향후 보다

정밀한 양산단층의 운동해석을 위해서는 단층암의 미구조 연구가 추가로 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 원자력기술개발사업, “원전부지 설계지진 및 지표변형 평가 최적화 규제기술개발” 과제의 위탁과제인 “설계지진 평가 최적화 기반구축” 연구로 수행되었음을 밝히며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 장천중, 이종립, 1997, 양산단층의 구조적 분절화 기초연구. 한국지진공학회 추계학술발표회 논문집, 1(2), 49-56.
- 장천중, 장태우, 1996, 양산단층의 고응력 해석을 통한 단층의 분절화. 대한지질학회 양산단층대 학술심포지움, 54-73.
- 장천중, 장태우, 1998, 고응력 분석을 통한 양산단층의 구조운동사. 대한지질공학회 논문집, 8(1), 35-49.
- 장태우, 장천중, 김영기, 1993, 언양지역 양산단층 부근 단열의 기하분석. 광산지질, 26, 227-236.
- 한국수력원자력(주), 2009, 신기 지구조 운동 평가기준 정립 (최종보고서). R06SF25, 한국수력원자력(주), 685p.
- Byerlee, J., and Summers, R., 1976, A note on the effect of fault gouges thickness on fault stability. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 13, 35-36.
- Byerlee, J. Mjachkin, V., Summers, R. and Voevoda, O., 1978, Structures developed in fault gouge during stable sliding and stick-slip. *Tectonophysics*, 44, 161-171.
- Chang, C. J., Yun, K. H., Park, D. H. and Shim, T. M., 2009, Quantification of the seismogenic potential of a fault. *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Jeju, Korea, May 22, 2009.
- de Polo, C. M., Clark, D. G., Slemmons, D. B. and Ramelli, A. R., 1991, Historical surface faulting in the Basin and Range province, western N-America; Implications for fault segmentation. *Jour. of Structural Geology*, 13, 123-136.
- Gamond, J. F., 1983, Displacement features associated with fault zone: A comparison between observed examples and experimental models. *Jour. of Structural Geology*, 5, 33-45.
- Gamond, J. F., 1987, Bridge structures as sense of displacement criteria in brittle fault zones. *Jour. of Structural Geology*, 9, 609-620.
- 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.
- Lee, K. and Jin, Y. G., 1991, Segmentation of the Yangsan fault system: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang Basin. *Jour. Geol. Soc.*

- Korea, 27, 434-449.
- Lee, K. and Na, S. H., 1983, A study of microearthquake activity of the Yangsan fault. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 19, 127-135.
- 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.
- Logan, J. M., Friedman, M., Higgs, N., Dengo, C. and Shimamoto, T., 1979, Experimental studies of simulated gouge and their application to studies of natural fault zones. US Geological Survey Open-File Report 79-1239, 305-343.
- Moore, D. E. and Byerlee, J. D., 1991, Comparative geometry of the San Andreas fault, California, and laboratory fault zones. *Geol. Soc. of America Bull.*, 103, 762-774.
- Moore, D. E. and Byerlee, J. D., 1991, Comparative geometry of the San Andreas fault, California, and laboratory fault zones. *Geol. Soc. Ame. Bull.*, 103, 762-774.
- Moore, D. E. and Byerlee, J. D., 1992, Relationships between sliding behavior and internal geometry of laboratory fault zones and some creeping and locked strike-slip faults of California. *Tectonophysics*, 211, 305-316.
- Moore, D. E., Summers, R. and Byerlee, J. D., 1986, The effects of sliding velocity on the frictional and physical properties of heated fault gouge. *Pure and Applied Geophysics*, 124, 31-52.
- Moore, D. E., Summers, R. and Byerlee, J. D., 1989, Sliding behavior and deformation textures of heated illite gouge. *Jour. of Structural Geology*, 11(3), 329-342.
- Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J.-B., Jo, W.-R., Kim, S.-K., Oike, K. and Nakamura, T., 1998, Active fault topography and fault outcrops in the Central part of the Ulsan fault system. *Southeast Korea. Jour. of Geography*, 107, 644-658.
- Rutter, E. H., Maddock, R. H., Hall, S. and White, S. H., 1986, Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges. *Pure and Applied Geophysics*, 124, 3-30.
- Summers, R. and Byerlee, J. D., 1977, A note on the effect of fault gouge composition on the stability of frictional sliding. *Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.*, 14, 155-180.
- Tchalenko, J. S., 1970, Similarities between shear zones of different magnitudes. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 1625-1640.
- Tsutsumi, A., 2002, Sliding behavior and deformation textures of simulated gouge : A review. *Proceeding of Japan Geoscience Union Meeting*, May 27-31, 2002, Tokyo.
- Twiss, R. J. and Moores, E. M., 1992, *Structural geology*. W. H. Freeman and Company, New York, 532p.
- US NRC, 1997, Seismic and geologic siting criteria for nuclear power plants. 10CFR Part 100 App.A, 479-487.
- W/G(Working Group on California Earthquake Probabilities), 2003, Earthquake probabilities in the San Francisco Bay region: 2002-2031. USGS Open-File Report 03-214, United States Geological Survey.

2009년 8월 2일 원고접수, 2009년 9월 16일 게재승인

장천중

한전 전력연구원 원자력발전연구소
305-380 대전광역시 유성구 문지동 103-16
Tel: 042-865-5576
Fax: 042-865-5592
E-Mail: cjchang@kepri.re.kr

장태우

경북대학교 자연과학대학 지질학과
702-701 대구광역시 북구 산격동 1370
Tel: 053-950-5361
Fax: 053-950-5362
E-Mail: twchang@knu.ac.kr