

단층요소로 부터 최대 잠재지진 평가에 관해서 Estimation of the Maximum Potential Earthquake from the Fault Parameters

장천중* 이종림** 최원확* 임창복***
Chang, Chun-Joong* • Lee, Jong-Rim** • Choi, Weon Hack* • Im, Chang-Bock***

ABSTRACT

The assessment of earthquake hazards involved consideration of earthquake magnitude, frequency, last movement and probability of occurrence. The appraisal of earthquake potential is feasible because historical data show a good correlation between earthquake size and the fault rupture parameters of length, displacement, and area. Additionally, the characteristics of fault behavior should be considered to evaluate the earthquake potential magnitude. In this study, in order to evaluate the earthquake potential by the fault behavioral patterns, based on the experimental background which the geometric characteristics of the individual domains, such as strike, width, fault tip patterns, and orientation of secondary shears reflect sliding behavioral patterns in each section, the straight sections of A, D and E domains were examined to the creeping section of stably sliding. In contrast, the curved section of B domain was examined to the locked section of stick-slip movement. These results of studies can be applied to evaluate the earthquake potential magnitude from the fault structural parameters.

1. 서론

최근 활성단층 논란과 지진발생에 따라 원자력발전소 지진 안전성에 대한 관심이 고조되면서 관련 분야의 연구가 과거 어느 때보다 활발하게 진행되고 있다. 원자력발전소의 지진 안전성을 평가하기 위한 주요 내용은 발전소 구조물에 얼마의 지진동이 영향을 미치는 가를 수행하게 되는데, 지금까지 국내 지진관측망 설비의 부족과 지진유발 단층에 대한 정량적 평가가 부족한 관계로 최대 잠재 지진의 평가에 불확실성이 많이 내재되어 있었다. 즉, 어느 위치에 얼마 크기의 지진이 얼마의 주기로 발생하는 가를 평가하는 것이 가장 중요한 문제이다. 이에 대한 문제 해결을 위한 방법으로 단층길이-지진규모, 단층변위-지진규모 등 경험식을 이용하는 것이 흔히 사용되어 왔으나, 같은 규모의 단층이라도 단층의 거동특성에 따라 그 결과에 많은 차이가 있기 때문에 단순히 적용하는 데는 문제점이 있다. 즉, 같은 변위의 단층이라도 안정된 운동(Stable sliding)을 한 단층

* 한전 전력연구원 선임연구원, 정회원
** 한전 전력연구원 수석연구원, 정회원
*** 한국원자력안전기술원 책임연구원, 정회원

과 급격 운동(Stick-slip movement)을 한 단층과는 단순 경험식으로 최대 잠재지진을 평가하는데는 차이가 있기 때문이다.

그동안 국내 관련 연구의 주된 중심은 양산단층 및 울산단층을 포함한 인근 원전 부근의 지진과 단층들이 주된 관심사 였는데, 기본적인 연구로는 양산단층에 대해서는 단층운동에 대한 응력 해석(장천중, 장태우, 1996), 주변 지구조운동과 단층운동 관계(장천중, 장태우, 1998), 단층의 분절화 해석(장태우 외, 1993; 장천중, 이종립, 1997) 등 보다 정량적이고 구체적인 연구가 수행되면서 점차 실상이 밝혀지고 있는 실정이지만 아직도 단층의 거동을 고려한 최대 잠재지진을 평가에는 수행되어야 할 과제를 많이 남겨두고 있는 실정이다.

본 연구에서는 실내 암석실험과 야외 단층현상을 비교하여 단층의 거동특성을 해석하려는 연구 배경을 바탕으로 단층대의 거동특성을 해석하는 초기 연구로써 양산단층대 주변 주단층의 운동과 연관되어 발달된 2차 단열의 기하학적 특징을 분석하여 양산단층에 대한 거동특성 해석에 적용하여 보았다.

2. 단층의 거동 해석

2-1. 이론적 배경

단층대의 거동특성을 해석하는 연구는 야외단층을 직접적으로 실험할 수 없기 때문에 실험실에서 전단모델시험을 통하여 나타난 운동양상과 야외의 대규모 단층 체계와 비교하여 해석하는 방법이 있다. 이러한 연구 결과 지질구조의 발달과정 및 운동양상(sliding mode)이 규모에 관계없이 유사함이 알려졌다으며(Tchalenko, 1970; Rutter et al., 1986), 또한 주단층의 운동과 이에 수반되는 2차 전단단열이 체계적으로 발달하고, 주단층의 운동양상에 따라 경계단층면과 2차단열 사이의 각 관계에 특징적인 차이가 있음이 밝혀졌다(Fig. 1). 즉, 대규모 단층의 운동시 Stable sliding과 Stick-slip의 운동양상에 따라 다른 양상의 지진현상들이 나타나며 또한 단층대 내의 미세구조들의 기하특징도 달리 나타난다는 것이다. 따라서 이러한 2차단열의 분석에 의한 단층의 운동특성을 밝힘으로써 대규모 단층의 분절 경계의 설정 기준이 될 수 있을 뿐만 아니라, 이는 단층으로 인한 지진활동의 평가에 활용할 수 있을 것이다.

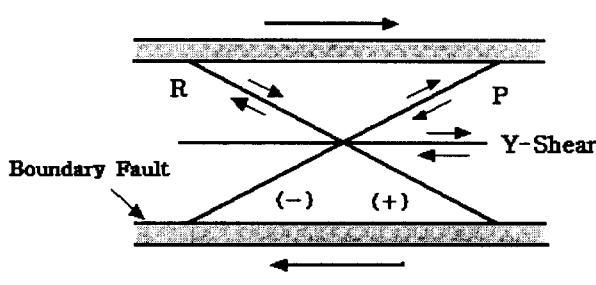


Fig. 1. Secondary shears developed in gouge layers.

일반적으로 단층대에 나타나는 2차단열의 발달은 암석역학적으로 Coulomb 이론으로 설명하고 있다. 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-Shear이 발달한다(Summer and Byerlee, 1977; Byerlee et al., 1978; Moore et al., 1986)(Fig. 1).

그런데 전단실험에 의한 2차단열의 발달과정을 분석한 결과 R-Shear와 Y-Shear가 P-Shear 보

다 우세하게 발달하며, R-Shear의 집중도와 방향은 전단거동과 연관이 있는 것으로 알려졌다. 즉, Stable sliding에서는 R-Shear의 각이 10° 이하이고 Stick-slip에서는 14° 보다 더 크게 나타나며, R-shear의 최대값에서 가장 큰 응력강하(stress drop)이 있음이 알려졌다(Moore et al., 1989, 1991)(Table 1). 이러한 연구결과는 지진기록이 미흡한 지진단층으로부터 지진학적 특성을 알아내려는 고지진학적 방법인 단순 단층규모에 적용하기 보다는 단층 거동특성이 고려된 최대 잠재지진 평가에 활용할 수 있을 것이다(de Polo et al, 1991).

Table 1. Relationships between sliding behavior and Riedel shear angle(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

2-2. 주단층과 주변 소단층의 기하특성

양산단층대 주변 소단층의 기하학적 자료들로부터 주단층과 관계를 해석하는 것은 단층의 거동 특성 해석 및 이를 바탕으로 한 단층의 분절해석에 기초가 되는 중요한 도구이다(Logan et al., 1979; Gamond, 1983, 1987). 본 연구에서는 양산단층의 주향을 따라 양산시에서 포항시 신평면에 이르는 17개 지역에서 측정된 소단층 999개의 자료들은 북북서 방향과 남북 및 북북동 방향의 주향들이 우세하며 이들의 평균 방향은 N12°E로서 양산단층의 주향과 유사한 방향을 보인다(Fig. 2).

양산단층의 주 운동방향이 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 2차단열의 발달관계를 근거로 살펴보면 전반적으로 양산단층은 오랜기간동안 변위량이 많은 성숙된 단층으로 해석할 수 있을 것이다.

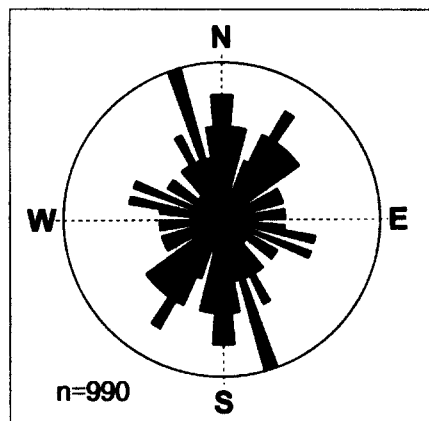


Fig. 2. Rose diagram showing the orientation of small faults in whole area.

지진이란 단층 형성시 지반이 파괴됨으로 생성되는 탄성파로서 양자간에 매우 밀접한 관계가 있다. 즉 단층운동이 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 200km에 달하는 것으로 이 단층의 거동특성과 지진과의 연관성을 해석하기 위해서는 1차적으로 단층요소에 의해 영역을 구분하여 해석하는 것이 바람직하다. 양산단층의 운동특성을 평가하기 위하여 먼저 특정 분절에 따른 경향을 해석하고자 전체 단층길이 중 남쪽에서 북쪽으로 가면서 주단층의 주향변화, 단층 선단부의 발달상태, 고공력 해석 및 각 영역에서의 소단층의 기하특징과 단층대 폭의 변화에 따라 연구지역 단층구간을 5개의 구역으로 구분하였다(Fig. 3).

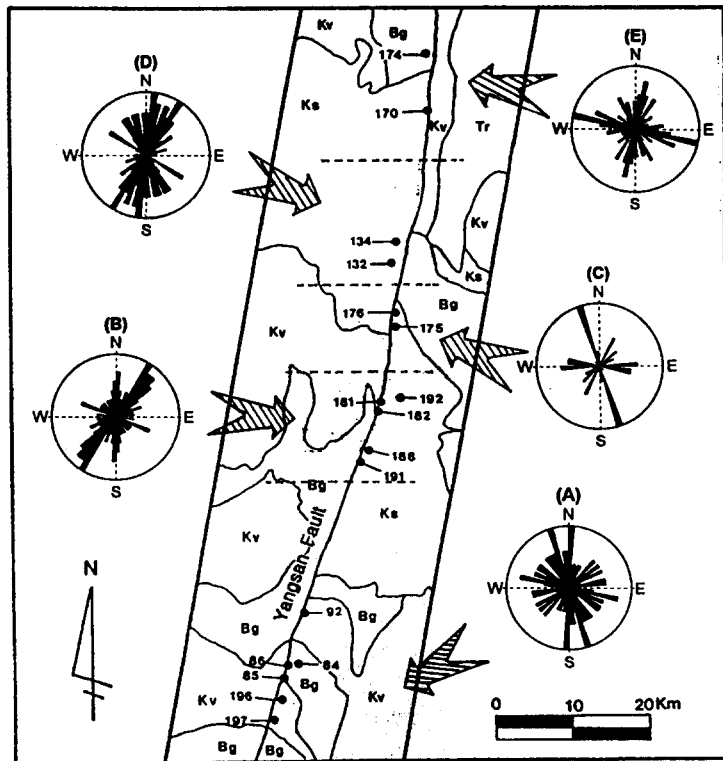


Fig. 3. Geological map and outcrop localities of small faults measured. KS : Hayang Group; Kv:Yucheon Group; Bg: Bulguksa Granite; Tr:Tertiary rocks. Dashed lines are the domain boundaries.

각 구역의 소단층에 대한 주향은 Rose diagram으로 Fig.3에 나타나있다. 이들 소단층의 자료들은 양산단층이 한번의 운동을 한 것이 아니라 여러번의 다중변형을 받았고, 이렇게 서로 다른 시기에 주향이동 및 경사이동 운동의 서로 다른 운동을 한 단층구조들이 복합적으로 나타나 있음을

시사한다. 지질학적 변형매질은 불균질하고 이방성이란 특성 때문에 이에 수반되어 나타나는 2차 단열들이 매우 규칙적이지는 못하지만, 특징적인 양상인 주단층의 주향과 관련하여 단일 운동을 나타내는 구조요들을 구분하여 구조요소들을 선별하였다. 또한 각 구역에서의 주단층의 주향, 주단층과의 각관계 의한 P-Shear 및 R-shear를 구분하여 분석하였고, 각각에 해당되는 2차단열과 주단층과의 각 편차에 대한 자료의 수를 곱한 누적 수치를 함께 표기하였으며, 이들 자료로부터 P-shear과 R-shear의 비율을 환산하였다(Table 2).

이러한 연구방법은 단층의 전단운동에 따라 단층대 내의 단층비지(fault gouge)에 나타나는 조직의 현미경적 관찰에서부터 출발하지만, 단층 발달과정은 규모에 관계없이 그 현상이 유사하게 나타나기 때문에 주단층과 주변 소단층에서 나타나는 구조요소들로부터 단층거동을 해석할 수 있을 것이다.

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				

각 구역별로 소단층에 대한 특징을 살펴보면 경남 양산에서 울산시 두동면에 이르는 A 구역은 넓은 단층대 폭을 가지고 있으며, 단층대 중앙부에 파쇄된 단층암을 뚜렷이 볼 수 있다. 이 구역에서 측정된 소단층들은 총 286개로 전체 평균주향은 N26°W이며 주 우세방향은 N-S 방향과 NNW방향이 우세균을 이루고 있다. 이들 중 면선각(rake)이 작은 단층운동과 연관된 2차단열 153개만을 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 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 파쇄양상도 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 우세균을 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 측정

된 전체 189개 소단층들의 NS 방향과 NNE방향이 우세하면 이들 전체의 평균방향은 $N9^{\circ}E$ 로 이는 이 지역의 주단층의 주향과 일치한다. 전체 자료들 중 2차단열의 각관계를 해석할 수 있는 자료 116개 만을 분석한 결과 누적 각관계에 의한 P-shear/R-shear 값은 1.386으로 P-shear가 우세하게 발달한 것으로 나타났다.

안강에서 포항시 신광면 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 원인과 야외 현상과 달리 P-shear의 우세현상은 좀 더 많은 자료를 이용하여 분석할 필요가 있을 것이다.

3. 단층의 거동해석

단층의 거동 해석은 지진계측이 이루어지기 이전 단층기록으로 나타난 지역에서 과거 지진으로 인한 지진재해 평가에 매우 유용한 방법이다. 이러한 연구는 과거 수십년동안 지진재해도 분석과 활동성 지구조운동 해석에 많은 향상을 가져왔다. 이렇게 하여 수행된 연구들은 전세계적으로 역사시대 이전 정량적 지진활동의 평가에 많이 기여하였는데, 역사지진의 지진규모, 단층면의 파괴 길이 및 단층면의 변위량 등의 관계로 나타난다.

이와 같이 단층요소로 부터 잠재지진을 평가하기 위한 방법으로 기존에 파악된 단층규모와 지진기록으로부터 경험식을 도출하고 그 결과를 이용하는 방법이 흔히 사용되었으나, 이러한 방법은 단순히 단층규모만을 근거로 적용한 것으로 같은 규모의 단층이라도 거동특성(Stable-sliding 혹은 Stick-slip)에 따라 많은 차이를 가질 수 있기 때문에 단순 적용보다는 거동특성이 함께고려되어야 한다는 것이 최근의 추세이다.

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

본 연구에서는 먼저 단층대 내의 단층암 조직의 발달과 거동과의 관계 해석에 기초한 기본적인 바탕으로 양산단층의 주향을 따라 양산시에서 신광면에 이르는 약 80 km이 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 해석을 적용하였다.

연구지역에서 최남단인 A 구역에서는 단층의 주향이 $N18^{\circ}E$ 이며 단층대의 폭이 넓게 발달하고 있다. 또한 단층대를 가로질러 지표면에 토양층으로 덮혀있기 단층암을 관찰하기가 쉽지 않지만 간헐적으로 중앙부에 심한 단층운동으로 미세하게 파쇄된 단층암을 쉽게 볼 수 있다. 또한 주단층과 주변 2차단열의 누적 각관계에 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 분절가능성에 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, 2차단열에 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~N5°E에 해당되는 직선구간이다. 야외 노두의 자료가 빈약하므로 정확한 해석이 용이하지 않은 구역이다. 경주시 입구에서 안강 및 포항시 신평면에 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.

이와 같은 해석은 보다 거시적인 연구방법으로 광역적인 거동특성 및 단층분절 해석에 적용될 수 있으나, 최근 국내 발표된 제4기 단층의 구조요소로 부터 지진규모를 평가하기 위해서는 측정된 단층규모, 변위량, 변위률을 포함하여 단층대 내 미세구조 연구를 수행하면서 본 연구 방법이 적용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

최근 원전부지의 지진안전성과 관련하여 심도있는 연구가 진행되고 있으며 이에 따른 제4기 단층 연구가 활발하게 수행되고 있다. 지금까지의 연구결과는 제4기 단층의 발견과 신기지체구조 운동 등에 대한 새로운 연구가 모색되고 있으나, 단층요소로 부터의 잠재지진 평가에 필수적인 단층 구조의 정량적 평가 및 거동특성 해석에는 거의 연구가 수행되고 있지 못한 실정이다.

본 연구는 이러한 문제에 대한 해결방법으로 지금까지 연구된 양산단층에 대한 고응력 분석 및 분절화 해석 결과를 바탕으로 주단층과 2차단열에 대한 기하학적 특성을 근거로 단층의 구조요소로 부터 잠재지진을 평가하기 위한 가장 기본적인 과정으로 각 분절에 따른 안정운동(Stable-sliding) 및 급격운동(Stick-slip)을 해석하였다. 이는 현재 진행되고 있는 제4기 단층의 정량적 평가를 통한 단층의 분절화 및 지진유발 단층에 대한 잠재지진 평가에 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 기금으로 일부 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 장천중, 장태우(1996), "양산단층의 고응력 해석을 통한 단층의 분절화," 대한지질학회 양산단층대 학술심포지움, pp.54-73.
- 장천중, 장태우(1998), "고응력 분석을 통한 양산단층의 구조운동사," 대한지질공학회 논문집 제8권 제1호, pp.35-49.
- 장태우, 장천중, 김영기(1993), "언양지역 양산단층 부근 단열의 기하분석," 광산지질 제26권, pp.227-236.
- 장천중, 이종립(1997), "양산단층의 구조적 분절화 기초연구," 한국지진공학회 추계학술발표회 논문집 제1권 제2호, pp.49-56.
- Tchalenko, J.S.(1970) "Similarities between Shear Zones of Different Magnitudes," Geological Society of America Bulletin, Vol.81, pp.1625-1640.
- 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*, Vol.124, pp.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.*, Vol.14, pp.155-180.
- Byerlee, J., Mjachkin, V., Summers, R. and Voevoda, O.(1978), "Structures Developed in Fault Gouge During Stable Sliding and Stick-Slip," *Tectonophysics*, Vol.44, pp.181-171.
- Moore, E.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*, Vol.124, pp.31-52.
- Moore, E.E., Summers, R., and Byerlee, J.D.(1989), "Sliding Behavior and Deformation Textures of Heated Illite Gouge," *Jour. of Structural Geology*, Vol.11, No.3, pp.329-342.
- Moore, E.E., and Byerlee, J.D.(1991), "Comparative Geometry of the San Andreas Fault, California, and Laboratory Fault Zones," *Geol.Soc. of America Bull.*, Vol.103, pp.762-774.
- 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*, Vol.13, pp.123-136.
- 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*, pp.305-343.
- Gamond, J.F.(1983), "Displacement Features Associated with Fault Zone : A Comparison between Observed Examples and Experimental Models," *Jour. of Structural Geology*, Vol.5, pp.33-45.
- Gamond, J.F.(1987), "Bridge Structures as Sense of Displacement Criteria in Brittle Fault Zones," *Jour. of Structural Geology*, Vol.9, pp.609-620.