

양산단층의 구조적 분절화 기초연구 Preliminary Structural Segmentation of the Yangsan Fault

장천중* 이종림**
Chang, Chun-Joong* • Lee, Jong-Rim**

ABSTRACT

Most large strike-slip faults do not rupture their entire length during single faulting but generally break in segments which are different in location and time of faulting. Studies related to the development of the Yangsan fault have been reported based on partial results from characteristics of geolocial distribution, geophysical prospecting and paleostress analyses.

This paper shows, based on preliminary results, that the Yangsan fault could be divided into four structural areas along entire length. These areas are different in geological distribution, bedding attitude measured from sedimentary rocks, strike of main fault, geometry of small faults, termination types of fault tips, cyclic variation of fault zone width, and arrangement of paleostress. Therefore, the Yangsan fault could be divided into at least four segments.

1. 서론

양산단층에 대한 연구는 1970년대 이래 원자력발전소의 부지조사가 시작되어 일부학자들 간에 활성론이 제기되면서 단층의 활동성 여부, 단층의 연장길이, 생성시기, 단층구조 및 단층의 운동특성 등에 대한 연구가 진행되어왔다. 단층의 운동에 대해서는 주향이동단층, 경사단층 및 회전단층 등의 견해가 있으나 전반적으로 단순우수향 주향이동으로 보는 견해가 지배적이었다. 그러나 최근 고응력 해석을 통한 연구결과 다중변형작용(Multiple deformation)을 받았음이 점차 나타나고, 또한 단층의 분절화(Segmentation)라는 개념이 추가되어 해석되고 있다(Lee and Jin, 1991; 장태우 외, 1993; 장천중, 장태우, 1997).

* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

** 한국전력공사 전력연구원 책임연구원, 정회원

양산단층의 분절화에 대한 연구는 지진학적 특성을 근거로 3개의 분절로 나눈 바 있지만(Lee and Jin, 1991) 이는 최근에 일어난 지진발생의 특징을 근거로 한 것이고, 본 연구에서는 구조지질학적인 단층발달과정의 관점에서 인공위성 영상분석 및 지형의 특징과 단층의 주향변화, 단층대 폭의 변화, 고응력장의 배열, 주단층과 2차 소단층의 각관계를 근거로 단층의 분절화에 대하여 검토하였다.

이를 위하여 지금까지 연구된 결과들을 중심으로 양산단층 주변부의 지층의 변화, 주단층의 주향변화와 단층 선단부의 발달상태, 단층대 폭의 변화 그리고 단층대로 부터 약 4km 범위 이내에서 단층주향을 따라 1,200여개의 소단층을 측정하여 소단층의 기하특징 및 고응력의 배열을 근거로 단층의 분절화에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 분절화 해석

단층대 특히 긴 단층대는 전체길이가 한번의 지진운동으로 파쇄되어 나타나는 것이 아니라 단층대의 위치와 시간을 달리하면서 점차 성장하여 발달하는 것이 일반적이다(Knuepfer, 1989). 이로써 단층의 발달단계에 따른 동일시기에 일정한 운동특성을 가지는 분절로 나누어 질 수 있다. 이러한 관점에서 단층발달에 분절화란 개념이 처음으로 Allen(1968)에 의해 제시되었고, 이 개념은 적용상에 약간의 차이를 두고있지만 최근 큰단층의 해석에 중요한 개념으로 자리잡고 있다.

단층의 분절을 나누는 기준은 목적에 따라 다양하지만 단층구조의 기하학적 특징, 구조요소들의 특징 및 운동학적 특징으로 구분되어지는데, 기하학적 특징으로는 단층의 주향변화, 단층의 응곡(Bend) 등을 특징으로 삼고, 구조적 특징으로는 단층 선단의 분지(Brench) 및 선단모양의 특징(Termination type)을 근거로 하며, 운동학적 특징으로는 단층의 운동속도 및 거동특성(Locked 및 Creeping behavior)을 기준으로하고 있다(De Polo et al., 1991). 이러한 점에서 볼 때 양산단층의 분절개념을 살펴보면 아래와 같이 몇가지 특징적인 현상들을 볼 수 있다.

2.1 층리면의 자세

양산단층을 기준으로 연구지역 전체의 지질분포를 살펴보면 남측은 유천층군의 안산암류와 불국사관입암군이 주로 분포하고, 중앙부를 기준으로 남부지역의 단층서측은 안산암류와 불국사화강암질암류가 동측은 백악기 퇴적암류가 분포하고 있다. 북부지역은 반대로 단층서측은 백악기 하양층군의 퇴적암류가 분포하고 동측은 불국사 화강암류 및 제3기의 퇴적암류가 분포하고있다(Fig. 1).

측정된 층리면의 자세는 양지역 모두 완만한 습곡을 이루는데, 층리면 자료에 의한 π -axis는 북부구역에서는 $10^{\circ} N88^{\circ}W$, 남부구역은 $9^{\circ} S68^{\circ}W$ 로 그 방향은 각각 서쪽과 남서쪽 방향으로 달리 나타난다(Fig. 1). 즉, 연구지역의 중앙부를 중심으로 북부지역의 퇴적암류는 서쪽방향으로 남부지역의 퇴적암류는 남서쪽으로 서로다른 방향으로 기울어진 완만한 습곡을 보임으로써 과거에 부분적으로 언급되었던 양산단층의 동일한 운동에 의한 단층예인(Fault drag)은 아닌 것으로 판단되며 양지역이 서로 상이하거나 다른 크기의 운동을 받았음을 지시하고 있다. 또한 단층대(Site

No. 188)에서 측정된 층리면의 π -axis는 $29^\circ N318^\circ E$ 로써 전체 지층의 배향과 또 다른 양상을 보인다. 이는 전체 단층이 동시기에 동일한 응력장에 의한 운동으로 변형을 받았다고 가정하면 이론적으로 단층대 내의 소규모 습곡과 주변의 단층예인에 의한 퇴적암의 층리면들의 습곡축들은 중간 주응력축의 방향(B-axis)과 같은 방향의 π -axis를 보여야할 것이다. 그러나 위와 같이 양산단층 주변의 서로 상이한 층리면의 자세는 양산단층이 서로다른 시기에 서로다른 응력장에 의하여 지배받은 다중변형(Multiple deformation)을 받았음을 뒷받침하고 있다.

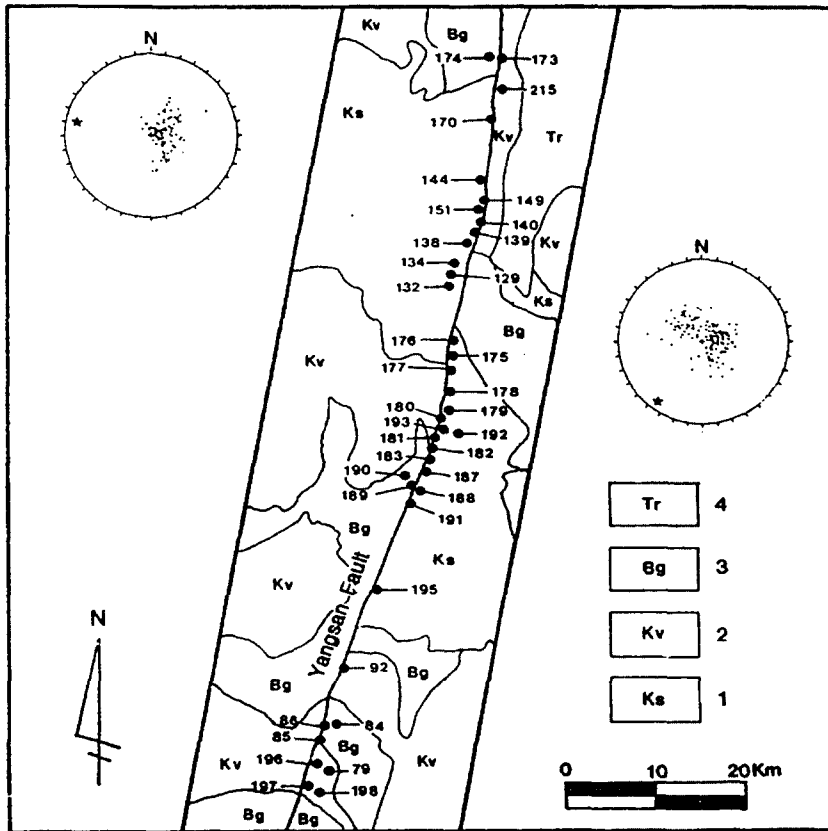


Fig. 1. Location map of outcrops measured the small faults. 1; Cretaceous sedimentary rocks, 2; Volcanic rocks, 3; Bulgooksa granitic rocks, 4; Tertiary rocks. Two Stereonet diagrams present poles of bedding in (left circle) north and (right circle) south areas. Star marks are π -axes of bedding poles in lower hemisphere

2.2 주단층의 주향변화

본 연구지역 중앙부를 중심으로 한 양산단층의 분절화에 대해서는 장태우 외(1993)에서 언급된 바 있는데, 먼저 단층의 주향을 살펴보면 연구지역의 중앙부를 중심으로 남부지역에서는 단층의 주향이 N20°E로 나타나고 북부지역에서는 N6°E로 갑작스럽게 주향이 변화함과 또한 이 곳에 단층들의 선단이 분지되는 현상을 볼 수 있다(Fig. 2). 이 지점을 기준으로 남북의 지질분포를 보면 퇴적암류의 분포가 서로 엇갈린 모양으로 하고 있는 것이 특징적인데(Fig. 1), 이는 이러한 지질분포의 중앙부를 기준으로 회전단층(Pivotal fault)특징으로 분절화 개념이 잘 도입된 Fuyun 단층(Deng and Zhang, 1984)과도 유사한 모습을 보인다.

양산단층 자체를 두고 볼 때 단층의 주향은 남부지역에는 N20°E이고 중앙부를 지나 북부지역으로 가면서 N6°E로 변한다. 즉 연구지역의 중앙부를 중심으로 남부지역과 북부지역의 단층의 주향 변화가 뚜렷이 보인다. 또한 대규모의 주향이동단층은 흔히 단층의 발달과정에서 그 선단부에 주향이 변하며 이들 주향의 갑작스런 변화를 기준으로 분절로 나눈다(Knuepfer, 1989; Moore and Byerlee, 1991). 특히 이들 지역에서는 단층대의 발달이 현저히 좁으며 이러한 경향은 본 연구지역의 중앙부인 울산시 두동면, 경북 청하 및 후포 지역에서 그 특징을 잘 보여주고 있다(Fig. 2).

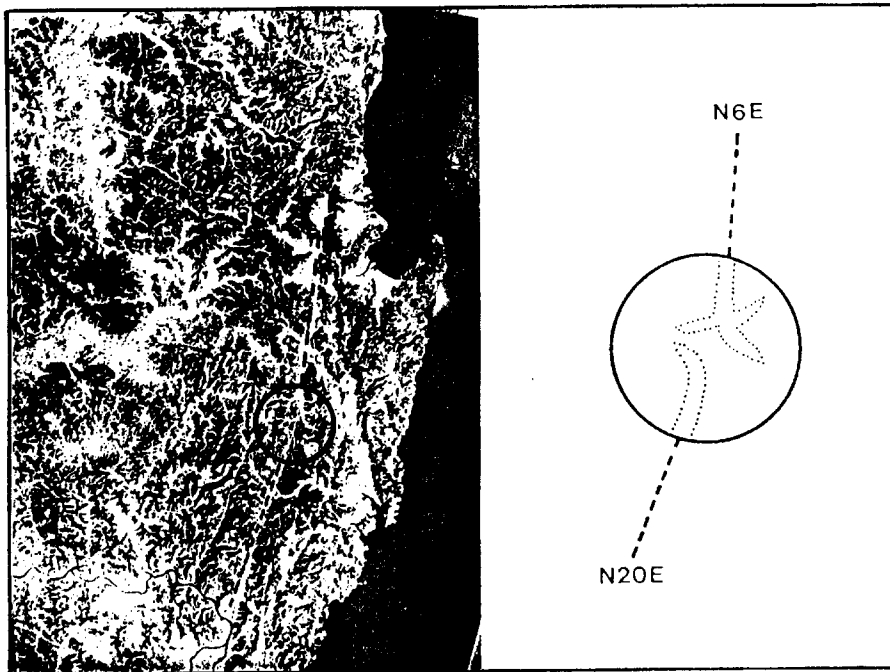


Fig. 2. Settelite image of southeastern Korean peninsula showing the sharp changing of the strike of Yangsan fault by N20°E in south and N6°E in north, and branching and cruing of fault tips in central large circle

2.4 복원된 고응력의 배열

고응력 복원은 다양한 방향의 단층의 주향과 경사 그리고 각각의 단층면상에서 나타난 단층조선과 조선의 변위감각을 측정하여 이들 자료들로 부터 해석되어지는 최대전단응력 벡터와 이들 단층들을 지배한 것으로 판단되어지는 이론적인 응력텐서에서 추론된 전단응력 벡터의 함수로 나타내어, 이들 두 벡터의 편차를 최소화하는 대표적인 응력텐서를 구하는 것이다. 본 연구에서는 양산단층의 고응력 해석을 위하여 양산단층의 주향을 따라 전체 38개 지점(Fig. 1)에서 총 1,200여 개의 자료를 측정하였으며, 각 지점에서 측정된 자료들은 단층의 운동특성과 Angelier et al.(1985)의 자동분류법에 따라 분류하였고, 각오차(Angular deviation)를 최소화하는 자료들의 집합으로 각각의 응력텐서를 구한 결과 69개가 복원되었으며(장천중, 장태우, 1977), 각 지역별 나타나는 응력텐서의 배열을 분석하였다(Fig. 3).

Site No.	Stress Tensors					
	I	II	III	IV	V	VI
174		33	7			14
173			10		6	19
215			19			
170	13					8
144		4				
149		9				
151		4				
140						7
139	9					
138			13		10	
134				48	30	15
129	8					
132			21		18	19
176		6				
175	9			10		
177					12	
178				10	6	13
192	31		36		57	
179		7				
180		7	6		15	
193			10			
181		10	15		32	
182	19		8			
183					9	
187		9				
188	7	17	7			
189				9		
190				8		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

Fig. 3 Arrangement of the paleostress tensors.

여기서 응력텐서(I)과 (II)는 남부지역에 집중되어 나타나고, 응력텐서(III)과 (IV)는 북부지역에 집중적으로 나타나며, 응력텐서 (V)와 (VI)은 남부와 북부 지역에 공히 나타난다. 이러한 현상은 양산단층이 발달하는 과정에 주로 인장응력에 의해 형성되는 우수향 주향이동 운동은 처음에 남부지역에서 부터 발달하였고, 중간단계인 좌수향주향이동을 움직인 단계에서는 북부지방에서 주로 운동을 하였으며, 마지막으로 우수향 의한 주향이동을 한 것으로 구분될 수 있다. 따라서 양산단층은 각 지역별로 서로 다른시기에 다른 운동을 한 여러개의 분절로 생각할 수 있을 것이다.

3.5 단층대 폭의 주기변화

단층대는 그 자체가 단층운동에 의한 변형산물로 매질의 물성과 응력장의 분포 및 서로다른 지질구조의 위치 등에 따라 차이가 있지만, 일반적으로 그 단면구조를 살펴보면 그 중심부에 가장 심한 변형산물인 (1) 단층점토(Fault clay)가 있고, (2) 주변부에 고파쇄대(Completely fractured zone), (3) 가장자리로 가면서 약파쇄대(Weakly fractured zone) 및 (4) 손상대(Damage zone)로 구분된다(Chester et al., 1993). 또한 단층대에서 단층점토의 위치에 따라 (1) 단층대의 중앙부에 집중되어있는 경우, (2) 단층대의 한쪽 경계부에만 위치한 경우, (3) 망상모양의 단층대 단열에 분산되어 분포하고 있는 경우 등 다양한 양상으로 나타난다(Wallace and Morris, 1979). 이와 같이 단층대의 형상과 단층대 폭의 변화는 단층의 발달과정에 있어서 변형정도 및 단층운동의 거동특성을 나타내므로 그 구조를 세밀히 관찰할 필요가 있다. 그러나 본 연구지역의 경우 단층대는 경부고속도로와 층적층에 의한 단층계곡으로 덮여있기 때문에 단면구조 및 단층대의 폭을 정확하게 측정할 수 없지만 단층대 폭의 변화를 단층발달과 연관지어 살펴보았다.

Fig. 4는 양산단층을 따라서 부산에서 북으로 경북 영일군 신광면까지 지형적 및 지질학적 특징을 근거로 그 폭의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 주기적인 폭의 변화가 25-30km 정도로 규칙적으로 나타나며, 특히 부산에서 약 60km지점인 울산군 두동면 봉계리 부근에서 단층대의 폭이 아주 좁게 나타난다. 이 지점은 특히 지질분포가 교차하고 주단층의 주향이 갑자기 변화하는 지역이기도 하다. 특히 단층대의 폭이 변위정도를 반영한다고 볼 때(Hull, 1988, 1989; Evans, 1990) 단층대의 폭의 변화는 단층의 성장 및 단층의 운동특성을 해석하는데 중요한 단서가 될 수 있을 것이다.

단층대 폭의 변화주기를 살펴보면 여러개의 작은 변화주기를 볼 수 있는데 특히 울산시 두동면 지역에서는 폭이 좁게 나타난다. 이러한 현상은 청하지역과 후포지역에서 같은 현상을 보이는데, 일반적인 단층의 구조적 분절의 평균길이가 약 12km(Bilham and Williams, 1985; Moore and Byerlee, 1991)라는 연구결과를 바탕으로 비교해보면 단층대 폭의 작은 변화주기(25-30km)와 함께 현재까지 큰 규모의 분절은 적어도 4개 이상으로 나눌 수 있고, 좀 더 세분된 분절의 개념은 추가로 연구될 필요가 있다.

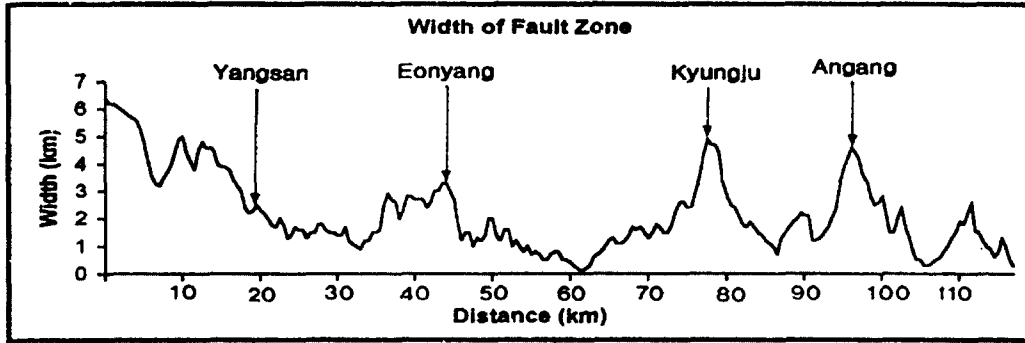


Fig. 4. The diagram showing the cyclic variation of width of the Yangsan fault. The cyclic period of the width of fault zone is about 30km and the location away about 60km from the Busan is the most narrow width of fault zone.

4. 토의 및 결론

양산단층의 분절화 특성을 파악하기 위하여 양산단층의 전 구간을 따라 주단층의 주향변화, 층면의 자세를 분석하였으며, 구간별 고응력 배열상태를 파악하기 위하여 단층대 폭 약 4km 범위의 38개 지점에서 단층조선이 발달된 소단층 1,200여개로 부터 69개의 응력텐서를 복원하였고 이들로 부터 6개의 구별되는 응력장을 구하여 응력장 조합을 비교하였으며, 단층의 분절 구역으로 잘 지시하는 갑작스런 주향변화, 단층선단의 발달상태를 분석하였다. 또한 단층대 폭의 변화를 분석한 결과 약 25~30km의 주기로 변화됨을 파악하였다.

이로써 퇴적암의 분포양상, 단층의 주향변화와 선단부의 분지현상 등에 의하면 양산단층의 남부지역은 뚜렷한 분절현상을 잘 보여주며, 북부지역인 청하지역과 후포지역에서도 이와 같은 현상을 잘 나타내고 있다. 따라서 양산단층은 적어도 4개 이상의 분절로 나누어질 수 있으며, 단층대 폭의 변화주기로 볼 때 좀더 세분된 작은 규모의 분절로 나누어질 수 있을 것이나 이에 대해서는 추가적인 정밀연구가 수행되어야 할 것이다.

이러한 결과는 개념의 차이에도 불구하고 단층작용에 의한 분절된 단위파괴길이와 지진의 규모와의 관계를 해석함에 있어서 지금까지 밝혀진 양산단층의 큰 규모의 분절길이를 고려할 것이 아니라 좀 더 세분된 한 번의 단층작용에 의한 단위분절에 대한 결과가 밝혀진 후에 해석하는 것이 바람직함을 의미한다.

참 고 문 헌

장태우, 장천중, 김영기(1993), "언양지역 양산단층 부근 단열의 기하분석", 광산지질, 제26권, pp.227-236.

- 장천중, 장태우(1997), "양산단층의 운동사 및 주변 소단층의 기하분석", 대한자원환경지질학회, (논문투고).
- Allen, C.R.(1968), "The tectonic environments of seismically active and inactive areas along the San Andreas fault system", Standford University Publications in Geological Sciences, Vol. 11, pp.70-82.
- 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., Vol.96, pp.347-361.
- Billhan, R. and Williams, P.(1985), "Sawtooth segmentation and deformation processes on the southern San Andreas fault, California", Geophy. Rese. Letters, Vol.12, pp.557-560.
- Chester, F.M., Evans, J.P., and Biegel, R.L.(1993), "Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas Fault", Jour. of Geophy. Rese., Vol.98, pp.771-786.
- 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 Stru. Geol., Vol.13, pp.123-136.
- Deng, Q. and Zhang, P.(1984), "Research on the geometry of shear fracture zones", Jour. of Geophy. Rese., Vol.89, pp.5699-5710.
- Evans, J.P.(1990), "Thickness-displacement relationships for fault zones", Jour. of Stru. Geol., Vol.12, pp.1061-1065.
- Hull, J.(1988), "Thickness-displacement relationships for deformation zones", Jour. of Stru. Geol., Vol.10, pp.431-435.
- 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, pp.193-228.
- 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, Vol.27, pp.434-449.
- Moore, D.E., and Byerlee, J.D.(1991), "Comparative geometry of the San Andreas fault, California, and laboratory fault zones", Geol. Soc. of Amer. Bull., Vol.103, pp.762-774.
- Wallace, R.E., and Morris, H.T.(1979), "Characteristics of faults and shear zones as seen in mines at depths as much as 2.5km below the surface", U.S. Geol.Surv. Open File Report, USGS-OFR 79-1239, pp.79-100.