

선형구조 분석을 통한 양산 단층계와 울산 단층계의 비교 Comparison between the Yangsan and Ulsan fault systems based on the lineament Features

최원학* 장천중* 신정환*
Choi, Weon-Hack Chang, Chun-Joong Shin, Jung-Hwan

ABSTRACT

Lineaments along the Yangsan and Ulsan fault systems were extracted through aerial photograph interpretation in the southeastern part of Korean Peninsula. Lineaments can be classified into five ranks on the basis of certainty and divided by curvatures. Mean strikes of all lineament by aerial photograph interpretation is dominant in NS~N05°E direction along the Ulsan fault system and N15~20°E direction along the Yangsan fault system respectively. The curvature of lineament around Yangsan Fault is different from around the Ulsan Fault system, the former shows that straight lineament is dominant but the latter curved lineaments are dominant. It indicates that the Quaternary faults around Ulsan Fault would be appeared as reverse fault.

1. 서론

한반도 남동부에 발달하고 있는 주요 단층인 양산 단층계와 울산 단층계를 따라서 나타나는 선형구조 분석을 위하여 약 400여 매의 축척 1:20,000 흑백 항공사진과 1:50,000, 1:25,000 및 1:5,000의 지형도를 동시에 이용하였다. 항공사진은 국립지리원에서 1987년 촬영한 것과 일부 1982년 촬영한 것을 임대하여 사용하였으며, 1954년에 미군이 촬영한 1:40,000의 항공사진도 부분적으로 이용하였다. 이와 같이 항공사진 촬영시의 시간에 따른 항공사진의 변화양상을 보면 많은 부분이 도시화 및 도로개발, 경지정리 등으로 인하여 인공적인 지형변화를 보이고 있다. 또한 양산단층을 따라서 발달하고 있는 선형구조와 울산단층 주변의 선형구조를 종합하여 주요 대단층을 따른 선형구조 발달 양상을 비교하였다.

항공사진 분석을 위한 대상지역은 양산단층을 따른 축척 1:50,000 지형도로는 영덕, 포항, 경주, 언양, 양산이 포함되고, 축척 1:25,000 지형도로는 경정, 도천, 청하, 포항, 기계, 연일, 안강, 경주, 서하, 대현, 상북 언양, 통도사, 삼호 양산, 좌천이 포함된다. 울산 단층계 주변은 축척 1:50,000지형도로는 포항, 경주, 불국사, 감포, 울산 및 방어가 포함되며, 축척 1:25,000 지형도로는 연일,

* 한국전력공사 전력연구원, 정회원

경주, 불국사, 어일, 감포, 입실, 하서, 울산, 정자 및 방어가 포함된다. 또한, 분석 대상 지역중에서 정밀 분석이 필요한 부분에 대해서는 축척 1:5,000 지형도와 수치지형자료(DEM, Digital Elevation Map)를 이용하여 지형 분석과 단면 해석을 하였다. 항공사진 해석을 통하여 도출된 선형구조의 분석 결과에 근거하여 각 선형구조의 지점에 대한 현장확인을 실시하였다.

선형구조의 분석에 있어서 등급구분은 선형구조의 확실도에 따라서 도면상에 색을 달리하여 L-A(red), L-B(orange), L-C(green), L-D(blue) 및 L-E(pencil)까지 5등급으로 구분하였으며, 이와 같은 분류기준은 일본의 확실도에 의한 활성단층 기준을 참조하였다(표 1, 活斷層研究會, 1991⁽¹⁾ Inoue et al., 2002⁽²⁾).

표 1. Criteria for certainty classification of lineament based on terrace and topographic feature(after 活斷層研究會, 1991 and Inoue et al., 2002).

Rank	Probability	Feature				Note	Certainty
		Terrace	Mountains and/or Hills				
			cliffs, cols and other elements	streams and ridges bendin			
L A (Red)	Very High	A straight fresh cliff and steep slope, which didn't erode, continue on a same terrace surface lying at different level. A straight cliff and steep slope continue on several terrace surfaces which are of different age.	Fresh cliffs, cols and other elements arrange straight and continuously, and break the continuity of a same geomorphic surface by separating the level uniformly, and a cliff continue on a terrace surface	Streams and ridges bend to the same direction systematically and clearly in long distance. The amount of offset and the scale of the rivers are closely correlated, or a topography, like shutter ridge, wind gap, formed by faulting certainly, can be seen	A direction of the lineament makes a right or obtuse angle with erosion scarps. A cliff and steep slope face in toward the general slope. The lineament continuing well, along which geomorphic surfaces lie at different level distinctly and uniformly, despite the similar direction and inclination of cliff and steep slope to erosion scarps and general slope.	Certainty I (Confirmed active fault)	
L B (Orange)	High	A straight fresh cliff and steep slope, which didn't erode, continue inferably on a same terrace surface lying at different level	Cliffs, cols and other elements arrange straight and continuously, and break the continuity of a same geomorphic surface by separating the level uniformly, and (1) Elements are fresh. (2) A cliff continue on a terrace surface, despite the elements are not so fresh	Streams and ridges bend to the same direction systematically and clearly. Moreover, (1) The lineament is long, (2) The amount of offset and the scale of the rivers are closely correlated, or a topography, like shutter ridge, wind gap, formed by faulting certainly, can be seen, despite the lineament is short.	A direction of the lineament makes a right or obtuse angle with erosion scarps. A cliff and steep slope face in toward the general slope. The lineament continuing well, along which geomorphic surfaces lie at different level distinctly and uniformly, despite the similar direction and inclination of cliff and steep slope to erosion scarps and general slope.	Certainty II (Probable active fault)	
L C (Green)	Low	A almost straight cliff and steep slope continue on a terrace surface, which is partially indistinct.	Cliffs, cols and other elements are partially indistinct or intermittently, despite the elements arrange straight and along which geomorphic surfaces lie at different level uniformly"D	The amount of offset and the scale of the rivers are not correlated, despite streams and ridges bend to the same direction. Moreover, (1) Bending are not clear, despite the lineament is long. The lineament is short, despite bending are clear	A direction of the lineament makes a acute angle with erosion scarps. The lineament continuing well, along which geomorphic surfaces lie at different level uniformly, despite the similar direction and inclination of cliff and steep slope to erosion scarps and general slope. But partially indistinct.	Certainty III (Possible active fault)	
L D (Blue)	Very low	A indistinct cliff and steep slope on a terrace surface continue intermittently"D	Elements continue intermittently or are indistinct, despite they arrange almost straight. If geomorphic surfaces lie at different level, the amount of offset are not uniform	The lineament is short, despite streams and ridges bend to the same direction	Discontinuity of geomorphic surfaces is not clear. The lineament, which is the similar direction and inclination of cliff and steep slope to erosion scarps and general slope, continues intermittently.		
L E (Pencil)	Suspicious	No cliff and steep slope on a terrace surface.	An obscure cliffs, eroded well, cols and other elements continue intermittently.		Discontinuity of geomorphic surface is obscure. The lineament, that are the similar direction and inclination of cliff and steep slope to river cliff and general slope, continue intermittently.		

2. 본 론

한반도의 남동부 지역에 대한 항공사진 분석을 통하여 도출된 선형구조는 총 102개이며, 이 중 에서 양산 단층계 주변에서 50개, 울산 단층계 주변에서 31개를 도출하였다. 21개는 해안을 따른 지역과 방어진 지역에서 나타나는 선형구조로서, 전체 선형구조에 대한 통계분석 및 양산 단층계 와 울산 단층계 주변에 대한 통계분석을 하여 이들 두 단층계와 연관된 선형구조의 특성을 비교

하였다.

2.1 선형구조의 방향 특성과 등급별 분포

전체 선형구조 102개에 대한 방향을 분석한 결과에 따르면, 남북 방향에 해당하는 NS~N05°E 방향과 N15~20°E이 가장 우세하며, 평균적인 방향은 N15°E이다(그림 1). 한반도의 남동부 지역에서 우세한 NNE 방향보다 약간 북쪽으로 치우친 경향을 나타내는 것은 인공위성 사진상의 대규모 방향성을 가지는 단층곡(fault valley)의 지형적인 특성보다는 항공사진상에서 제4기층의 분포 지역을 위주로 하여 선형구조를 도출하였기 때문인 것과 남북방향이 우세한 울산단층 주변의 선형구조가 동시에 표현되었기 때문이라 해석된다.

양산 단층계 주변에 대한 항공사진 분석결과로 도출된 50개의 선형구조는 N25~30°E 방향이 가장 우세하며 일부 NEE방향의 선형구조도 관찰된다. 양산 단층계는 대규모의 구조선으로 NNE 방향이 뚜렷하며, 일부 구역에서는 남북 방향을 보여주기도 한다. 항공사진 분석에 의한 선형구조는 이 대구조선에 평행하게 발달하는 주향이동 단층이 우세하며, 지역에 따라서는 그 방향이 바뀌기도 한다. 따라서 선형구조의 특성으로 보아 양산 단층계를 4개의 구간으로 나눌 수 있다(최원학 외, 2002)⁽³⁾. 울산 단층계는 경주에서 울산만에 이르는 남북 내지 NNW 방향의 계곡을 형성하고 있는 큰 선형구조이지만, 항공사진의 분석결과에 의하면 남북 방향(NS~N05°E)과 N10~15°W 방향의 선형구조 들도 우세하게 관찰된다. 남북 방향을 기준으로 하여 동쪽이나 서쪽의 주향을 가

지는 선형구조의 빈도가 서로 비슷하며, 평균 방향은 남북에서 N05°E 사이 이다(그림 1).

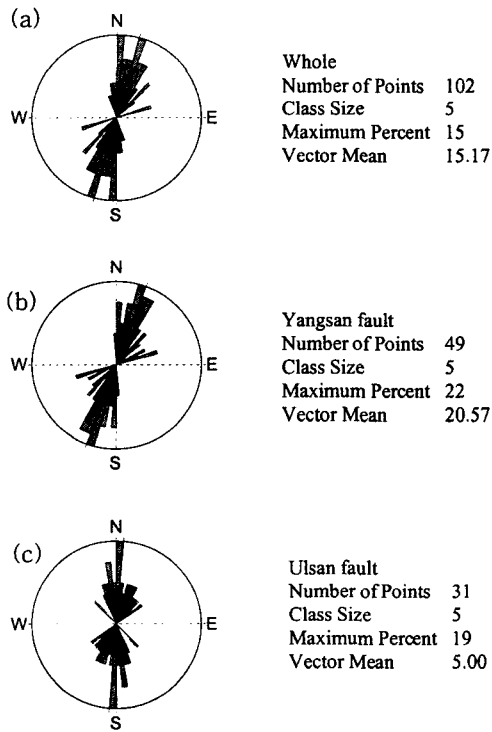


그림 1. Rose diagrams for total lineaments (a), around the Yangsan (b) and the Ulsan fault systems (c).

확실도에 따른 빈도와 방향의 분포는 양산 단층계와 울산 단층계에서 L-D등급의 선형구조가 27개로 가장 많으며, L-A등급이 11개로 가장 적다(그림 2a, 그림 3). 이를 보아 한반도 남동부에서의 신기지체 구조운동은 상대적으로 오래된 L-D 등급의 선형구조 형성시 활발하였으며, 최근에 우수록 미약해진 것으로 해석된다. 등급별 방향 분포에서는 N10~20°E 범위내에서 각 등급의 선형구조들이 고르게 분포하고 있으나, L-A 등급의 선형구조에서 보다 방향의 집중하고 있음을 보인다. L-A 등급의 빈도는 양산 단층계 주변에서 10개로 우세하게 나타나고(그림 6), L-B, L-C 와 L-D 등급의 선형구조의 빈도가 일정하게 분포하는데, 이는 양산 단층계에서의 신기 지체구조상 주향이동성의 단층 운동이 최근까지 지속적으로 활발하였으며, 상대적으로 울산 단층계에서는 단층의 운동이 오래되었고 최근의 운동이 감소하였음을 시사한다(그림 7a, 그림 8 a).

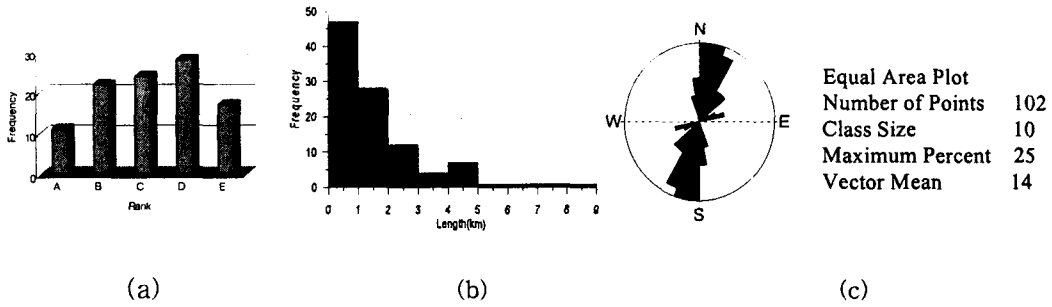


그림 2. Distribution of total lineament around Yangsan and Ulsan fault systems. (a) Frequency distribution according certainty. Classification of certainty is followed on Table 1 (b) Length distribution, (c) Rose diagram of lineaments.

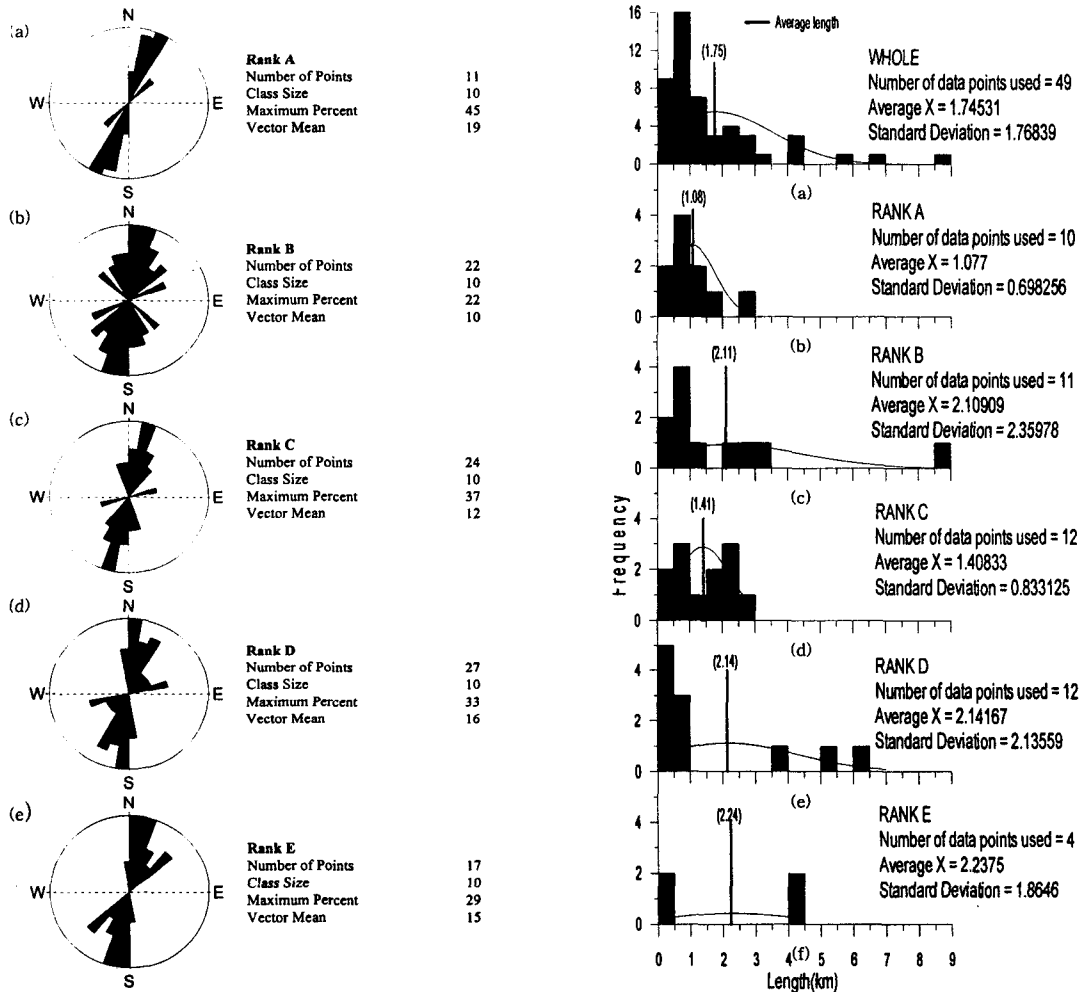


그림 3. Rose diagram for lineament of each rank round Yangsan and Ulsan fault systems.

그림 4. Length distribution for lineament of each rank around Yangsan fault system.

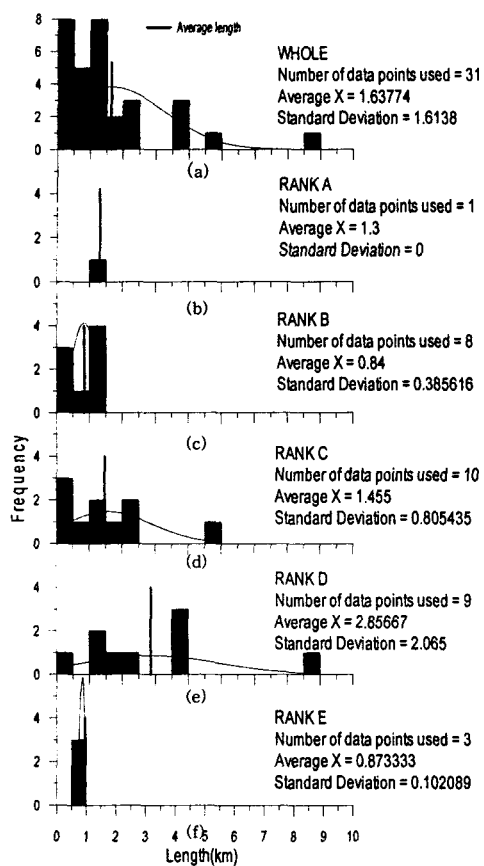


그림 5. Length distribution for lineament of each rank around Ulsan fault system.

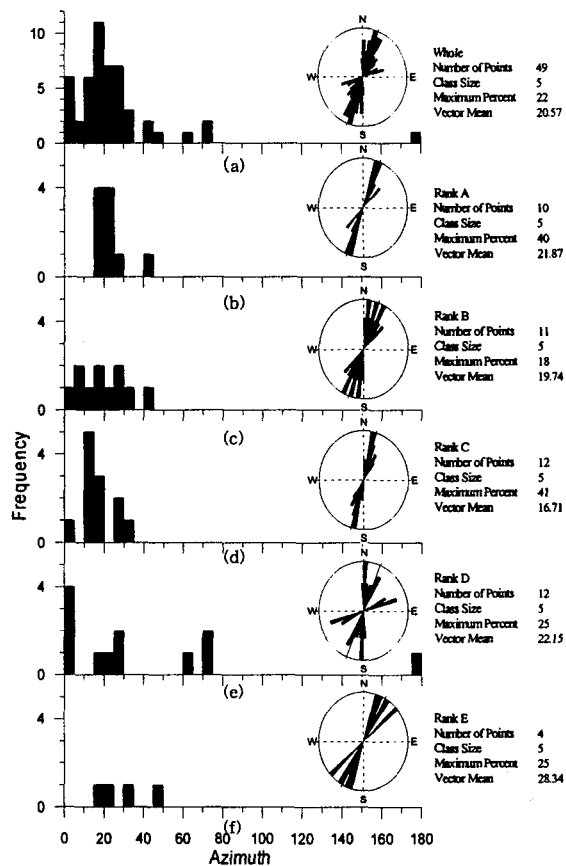
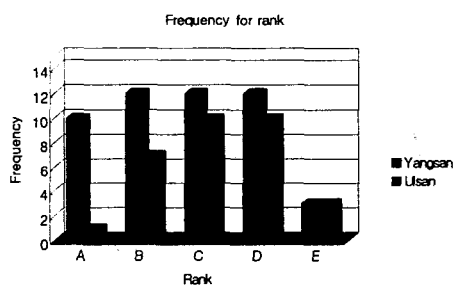
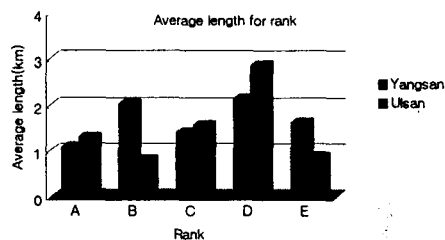


그림 6. Orientation distribution and rose diagram of lineaments for each rank. From top, total (a), rank A (b), rank B (c), rank C (d), rank D (e), and rank E (f).



(a)



(b)

그림 7. Frequency (a) and length (b) distribution for the Yangsan and Ulsan fault systems according to the rank classification.

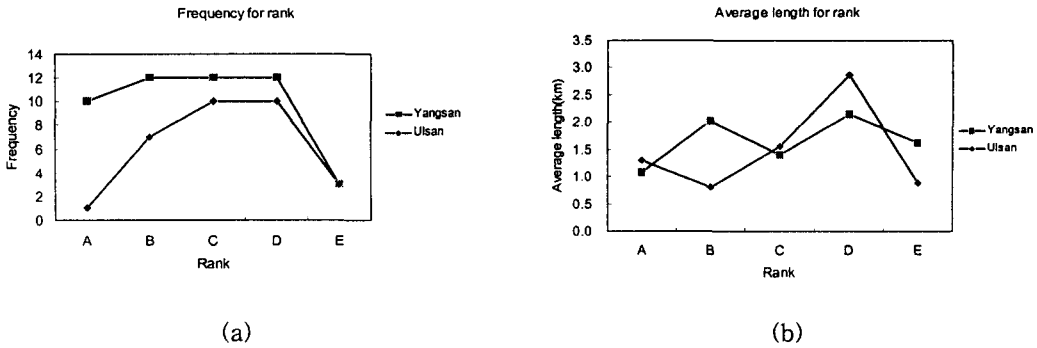


그림 8. Frequency (a) and length (b) distribution for the Yangsan and Ulsan fault systems according to the rank classification.

선형구조의 길이의 분포에서 전체 선형길이의 평균은 약 1.68 km이며 대부분이 1-2 km 사이에 분포하고 있지만, 5 km 이상이 되면서는 급격히 감소한다(그림 2b, 그림 4, 그림 9). 양산 단층계의 경우에는 선형구조의 길이가 평균 1.75 km이고, 각 등급별 길이의 분포는 L-C 등급을 제외하고는 L-A에서 L-E 등급으로 갈수록 길어지는 경향을 보인다(그림 4, 8b). 울산 단층계의 평균 길이는 1.64 km이며 등급에 따른 특별한 경향은 보이지 않지만, L-D 등급이 가장 길게 나타나는데 이는 입실 동층의 고기 단층에 따라서 관찰되는 선형구조의 영향으로 보인다(그림 5, 그림 8b).

이러한 선형구조의 길이의 분포는 일반적으로 지표 파열을 수반하는 지진의 규모가 6.5인 경우에 단층의 길이가 약 10 km임을 감안할 때(松田時彦, 1975)⁽⁴⁾, 상대적으로 짧은 편으로 이는 양산 단층계와 울산 단층계의 주변에서 제4기 층이 균일하게 분포하지 않으며, 퇴적양상이 선상지나 하상 퇴적물들이 불연속적으로 발달하고 있고, 이들에 단층 운동이 영향을 미쳐 선형구조를 형성하였다 하더라도 연속적으로 잔류하지 않았기 때문으로 해석된다.

2.2 선형구조의 모양의 특성

앞에서 분석한 선형구조들을 그 모양에 따라서 분류하고, 양산 단층계와 울산 단층계를 따른 모양의 특성을 분석하였다. 선형구조 모양의 분류는 전체 선형구조의 길이에 대하여 블록점의 원근에 근거하여 휘는 정도(curve feature)에 따라서 curved, slightly curved 및 straight로 분류하였다. 일반적으로 주향이동단층과 관련된 선형구조는 거의 직선형을 띠며 계단상으로 발달하는 경향이 있고, 역단층의 성격을 갖는 것은 그 이동방향 쪽으로 블록한 형태를 띠며, 그 연속성도 좋지 않은 모양을 가진다.

양산 단층계 주변에서의 선형구조들은 78% 정도의 선형구조가 직선상으로 나타나고, slightly curved 양상은 14%, curved 양상은 8%정도이다. 따라서 이들 선형구조의 모양만을 기준으로 해석할 때, 양산 단층계에 평행하게 발달하는 선형구조들은 주향이동단층의 성격이 우세함을 판단할 수 있다(표 2. 그림 9). 이에 비하여 울산 단층계의 경우에는 직선상의 선형구조가 10%를 약간 넘는 반면에 slightly curved 양상이 22%, curved 양상이 약 45%정도를 차지한다. 이는 주로 역단층 성격의 선형구조가 많이 발달하고 있다는 것을 의미하며, 이미 보고된 제4기 단층 노두에서 관찰

되는 역단층의 발달과도 잘 일치하는 결과를 보인다. 따라서 울산 단층계의 주변에서 발달하는 선형구조의 현장 확인은 주로 역단층 성격을 가지는 단층 절벽을 잘 관찰함으로써 조사의 효율성을 높일 수 있다.

표 2. Characteristics of lineament features between the Yangsan and Ulsan fault systems.

Fault system Shape	Yangsan		Ulsan		Total	
	No.	Percent	No.	Percent	No.	%
Curved	4	22.2	14	77.8	18	100.0
Slightly curved	7	50.0	7	50.0	14	100.0
Straight	39	79.6	10	20.4	49	100.0
Sum	50	100.0	31	100.0	81	

선형구조의 모양에 따른 분류에 의해 전체 직선상의 선형구조 49개중 39개가 양산 단층계 주변에서 관찰되어 전체 선형구조의 약 80%정도이고, 울산 단층계에서는 10개가 나타난다. Slightly curved 양상은 총14개로 양산 단층계 지역과 울산 단층계 주변에서 동일하게 7개씩 나타난다. Curved 양상은 18개중에서 울산 단층계 주변에서 14개로 약 78%를 차지하여 양산 단층계 주변부에서의 4개와는 뚜렷한 차이를 볼 수 있다(표 2. 그림 9).

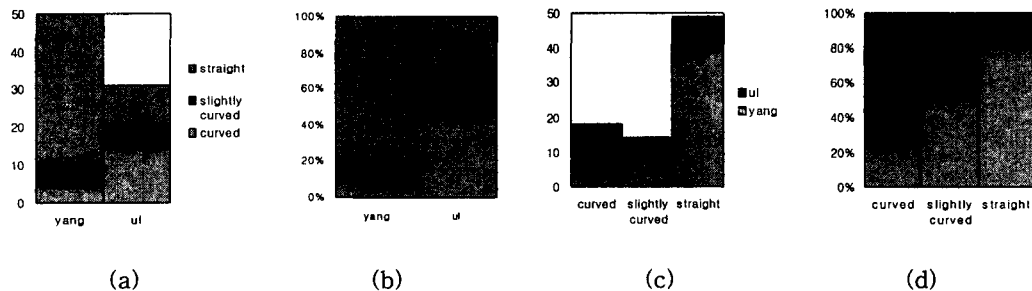


그림 9. (a) Numbers and (b) relative percentages of lineaments according to curvature classification around the Yangsan and Ulsan Fault systems. Relative comparison of number(c) and portion(d) for lineament curvature.

3. 결론

한반도 남동부 지역에 발달하고 있는 주요 단층대를 따라서 1:20,000 항공사진을 이용하여 선형구조를 도출하고 현장 확인을 실시하였다. 선형구조의 확실도에 따라 등급을 구분하였으며, 선형구조의 휘어진 모양에 따라 분류하였다. 한반도 남동부 지역에서 총 102개의 선형구조가 도출되었고, 양산 단층계에서 50개, 울산 단층계에서 31개가 도출되었다. 이들에 대하여 통계적인 분

석을 하였으며, 두 단층계간의 선형구조 양상을 비교하였다. 분석결과 선형구조의 평균 길이는 일반적으로 지진성 단층에 의한 파열길이보다 작은 1.5 km 내외였으며 이는 제4기층의 퇴적 범위제한과 선형구조의 연속성이 파괴되었기 때문으로 해석된다. 선형구조 등급 분포를 보면 양산 단층계 주변의 선형구조들이 확실도가 높은 것들이 많아 울산 단층계에 비하여 최근의 단층운동이 더 컸음을 의미한다. 또한, 선형구조의 모양에 있어서 울산 단층계에서 휘어진 양상이 많이 나타나고 있으나, 양산 단층계 주변에서는 직선형이 우세하다. 이는 울산 단층계에서 보고된 제4기 단층의 특성이 주로 역단층 성격으로 나타나므로 단층의 흔적이 지표에서 나타날 때 서쪽으로 휘어진 양상과 일치한다고 해석된다.

감사의글

본 연구는 과학기술부 2002년도 원자력연구개발 중장기 계획사업 "원전 내진설계를 위한 기반구축연구"과제로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 최원학, 장천중, Inoue, D., Yanagida, M., "한반도 남동부 주요 단층주변의 선형구조 분석", 대한지질학회 추계공동학술발표회 초록집, 2002, pp.86.
2. 活斷層研究會, "新編 日本の活斷層-分布圖と資料, 東京大學校 出版社" 1991.
3. 松田時彦, "活斷層から發生する地震の規模と週期について", 地震 2, 1975. pp.269-283.
4. Inoue, D., Miyakoshi, K., Ueta, K., Miyawaki, A. and Mastuura, K., "Active fault study in the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake area", Chishin 54, 2002, 557-573.