

울진 남대천 유역의 수계분석을 통한 단층 규명 사례 연구

한종규 · 최성자*

한국지질자원연구원 국토지질연구본부, 과학기술연합대학원대학교 지리정보시스템공학과

Case Study of Fault Based on Drainage System Analysis in the Namdae Stream, Uljin Area

Jong-Gyu Han and Sung-Ja Choi*

Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea
Geoinformatic Engineering, University of Science & Technology, Daejeon 305-350, Korea

A DEM (digital elevation model) is produced using a digital topographic map and is now a commonly used tool in geologic surveys. This study aimed to clarify the relationship between knickpoints and faults in the Namdae stream by analyzing a DEM of the area. The Namdae drainage basin was divided into three subbasins (S1, S2 and S3) and their knickpoints developed for the middle to mid-upper regions were extracted from the DEM. The relative steepness K_s and concavity depending on the incision rate was higher in S1 than in S2 and S3 regions. We assumed that the incision rate caused by active erosion resulted from several faults crossing the basins rather than differences in rock types. There are 77 knickpoints in the Namdae drainage area, including the low-ranking branch, and 24 of these are on the main river system (S1, S2, S3). Of these 77 knickpoints, 27 (38%) are matched by faults, and from the three basins, 13 (54%) correspond with faults, indicating that the knickpoints are connected closely with the faults. For example the average K_s (relative steepness), was 38.8, but in the overlapping area of the Samdang and Doocheon faults the K_s value was 42.99 ~ 43.39. We suggest that the faults resulted in geomorphic deformation such as the high- K_s knickpoints. There was little evidence of relationship between the knickpoints and rock boundaries, with 54% of the knickpoints distributed on the S1, S2, and S3 subbasins. We concluded that the drainage basin knickpoints are the result of fault movement and are a type of geomorphologic deformation that could be useful for surveying Quaternary faults or fault extension.

Key words : Digital Elevation Model, knickpoint, Geomorphic deformation, Quaternary fault or fault extension

지형정보가 전산화됨으로서 수치표고모델 및 위성영상사진 등이 지질조사에 활용되고 있다. 이 연구에서는 남대천 유역의 하천 수계 천이점을 추출하여 단층운동과의 연관성을 규명하고자 하였다. 경상북도 울진군에 위치하고 있는 남대천 유역은 S1, S2, S3 등 세 개의 소유역으로 구분되며, 수치표고모델로 추출된 천이점들은 거의 모두 소유역의 종류 및 중앙류에 분포하고 있다. S1 구역에서는 하각률과 관련 있는 지형경사도 K_s 와 하천 수계의 요형도 값이 S2 나 S3 보다 높은 값을 보이고 있다. 이는 삭박작용이 활발하여 하각률이 높은 것에 기인되는 것으로 암상 차에 의한 것 보다는 다수의 단층에 의한 것으로 해석된다. 하위지류를 포함한 남대천 유역의 천이점은 모두 77개이며, 이 중 주요 수계 S1, S2, S3에 발달하고 있는 천이점은 24개소이다. 77개소 중 이중 단층과 일치하고 있는 천이점은 27개소 (38%)이며, 주요 수계 상에서 단층과 일치되는 천이점은 13개 지점(54%)이다. 그러므로 주요 수계와 단층과는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 조사지역의 상대 경사도 값 K_s 의 평균은 38.8이다. 그러나 두천단층과 삼당단층이 중첩되는 부분에서는 해발고도를 고려하더라도, 상대적 경사도 K_s 은 42.99 ~ 43.39로 다른 천이점보다 매우 높은 값을 보이므로, 천이점 형성은 단층과 유관한 지형변위를 지시한다. 또한 천이점의 분포와 지질 경계부를 비교해볼 때, 천이점은 암상 경계부와도 무관하게 발달하고 있으나, 단층분포와 연관성이 있음을 알 수 있다. 결론적으로, 수계의 천이점 발달은 단층 운동에 의하여 형성될 수 있는 지형변위로 판단된다. 수계 분석을 통해 천이점이 단층에 의한 지형변위로 볼 수 있으며, 제4기 단층을 규명하거나 단층 연장을 규명할 수 있는 수단으로 활용 될 수 있다.

주요어 : 수치표고모델, 천이점, 지형변위, 제4기 단층

*Corresponding author: sjchoi@kigam.re.kr

1. 서 론

학문적 정의로 본다면, 제4기 단층은 제4기 동안 운동한 활성단층으로 정의하고 있으며 (RGAF, 1991), 이 기간 동안 일어난 단층운동은 현재에서 관찰할 수 있는 지형 변형을 가져온다. 예를 들어, 동일 시대의 단구 혹은 선상지의 고도차, 수계 및 산계의 어긋남 등에 대한 지형 변위 조사로 제4기 단층 발달을 입증한다. 일본의 경우에는 항공사진 판독으로 활성선구조도를 작성하고 이를 토대로 시추 및 트랜치 조사를 하여 활성단층을 연구한다 (RGAF, 1991).

제4기 단층 조사는 영상 판독, 수계 분석 프로그램 등을 통하여 지형 변위를 도출하여 단층을 규명하고 있다. 과거에는 항공사진 판독에 거의 의존하여 제4기 단층을 연구하였다. 그러나 최근 지형정보의 전산화, 수치표고모델(DEM: Digital Elevation Model), 위성 영상사진 판독 등이 제4기 단층 조사에 활용되고 있다. 우선, 영상자료에서 산계와 수계, 단구, 선상지 등의 지형들이 단층에 의하여 변형된 증거들을 수집한 후, 현장조사를 해오고 있다. 이중, 능선, 절벽(崖), 선상지 및 단구 등은 활성단층 인지에 도움을 주는 지형이다. 한편, 수계의 어긋남, 절단하도, 사천(死川) 등의 지형특성 뿐만 아니라, 수로의 하상 단면도를 작성하여 하상의 단면도 형태, 하천의 천이점(遷移點, knickpoint) 등

을 활성단층 판단 기준으로 삼았다 (RGAF, 1991; Keller and Pinter, 1996). 특히, 하도의 단면도 분석은 육안으로 그 천이점을 찾아내 단층과의 관계성을 규명짓기도 하였으나, 지금까지 육안으로 판단되는 천이점 분석은 활성단층 연구에 크게 기여하지는 못하였다. 최근, 지형정보의 전산화에 의하여 수계 분석 프로그램을 통하여, 하천지형의 변수를 추출하여 하도의 변위를 정량적으로 유추 해석하는 시도가 있어왔다 (Snyder *et al.*, 2000; Duvall *et al.*, 2004; Crosby and Whipple, 2006; Hayakawa and Oguchi 2006; Wobus *et al.*, 2006; Rantitsch *et al.*, 2009; Lee and Tsai 2010). 하천 경사도와 천이점이 지구조 운동과 직접적으로 연관되어 있으며(Wobus *et al.*, 2006; Burbank and Anderson, 2001), 하도 변위에 대한 정량적 분석은 ArcGIS와 MATLAB 프로그램에 의한 수치해석 방법에 의하여 정량적인 수치로 규명하고 있다. 이 연구는 ArcGIS와 MATLAB 프로그램을 이용한 새로운 기법을 경북 울진의 남대천 유역에 적용하여 단층과의 연계성을 규명하였다.

2. 연구지역

연구지역은 경북 울진군 울진읍 부근에 위치하고 있는 남대천 유역이다. 남대천은 서쪽의 약 300~800 m

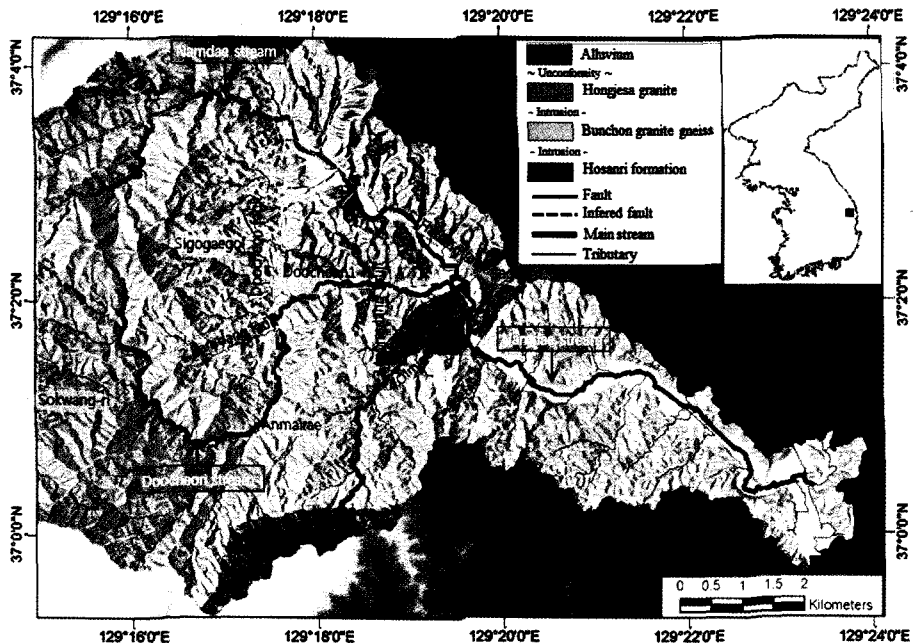


Fig. 1. Modified geological map of the Namdae drainage basin located in Uljin-gun (Lee *et al.*, 1993).

에 이르는 산지로부터 발원하며 유향은 북서-동남 방향으로 동해로 유입한다. 총길이는 약 20 km 내외이고, 2~3조의 하안단구 및 선상지가 간헐적으로 발달하고 있다. 남대천의 본류는 울진 주변지역에서 5차수까지 구성되어 있으며, 남대천의 지류 중 가장 큰 유역은 4차수의 두천천이다. 두천천은 동서와 남북방향의 유향이 복합된 수계로서, 총길이는 약 6.5 km이다. 남대천 주변 산지는 장기간의 지표 식박작용에 의하여 형성된 2차성 산지이고 산계는 뚜렷하지 않다. 남대천 주변 산계의 사면은 30° 미만의 완경사를 보이나 전체 15%는 35° 이상의 급경사를 보인다.

남대천 지역은 영남육괴 북동부 말단에 위치하고 있으며, 주로 선캠브리아기 호산리층의 편암류와 이를 관입하고 있는 분천화강편마암, 홍제사화강암 등이 분포하고 있다. 남대천 유역 밖에는 이보다 후기의 암석들이 분포한다 (Fig. 1).

울진지역의 단층 보고는 그리 많지 않다. 기존 지질도 (Lee *et al.*, 1993) 와 PSAR 보고서 (KHNP, 2008)에서 나곡단층, 태봉동단층, 검성동단층, 중리단층, 마분동단층 등 5조의 단층이 기재된 바 있다. 이들 단층의 운동 시기는 제3기 이전으로 보고 있으나, 마분동단층은 최근세에 움직인 단층으로 규명된 바 있다 (KHNP, 2008). 한편, 이들 5조의 단층 모두는 남대천 주변으로부터 멀리 떨어져 있어 천이점과 단층과의 연관성 분석연구의 대상은 되지 않는다.

남대천 주변 지역의 지질조사를 통해 수조의 단층을 조사·기재하였다 (Fig. 1). 이 지역 단층들은 남북과 동서계열의 방향이 우세하며, 그중 규모가 큰 단층은 두천단층과 중당단층이다. 그리고 소단층인 북서 및 북동계열의 단층이 발달한다.

남대천 유역에서 대표적인 단층은 남북방향의 두천단층이다. 이 단층은 S1, S2 소유역을 통과하고 있으며, 구수곡자연휴양림-시고개골-두천1리-안말래까지 발달하는 총길이 약 4.5 km 이다 (Fig. 1). 두천단층에서는 단층대를 따라서 염기성암맥이 집단으로 관입하고 있는 것이 특징이며, 암맥들은 심하게 파쇄되어 있다 (Fig. 2). 이 단층의 파쇄대폭은 약 100 m 이상 발달하고 있으며, 단층운동 방향을 정하기가 매우 어려울 정도로 단층대 내에 아주 많은 소단층들이 발달하고 있다. 단층파쇄대에 발달하고 있는 단층조선과 파쇄염리는 주향이동 운동을 지시한다.

동서계열의 삼당단층은 S2 구역의 수계를 따라 발달하는 충상단층이며 두천단층 남단부에서 시작하여 사계리까지 연장된다. 삼당단층의 각력대 폭은 약 1~5 m 이다 (Fig. 1).

S3 구역에는 남북방향의 중당단층과 동북동방향의 울미골 추정단층이 발달한다. 중당단층은 N5-10E/80SE 방향을 갖는 우수향주향이동 단층으로 하당리~울미골로 연장된다. 중당리 노두에서는 고각도의 단층대가 형성되어 있으며, 단층대내에는 약 30 cm 내외의 단층 각력암대가 발달하고 있다. 두고개골 노두에서는 약 1.2 m 폭의 단층 각력대가 형성되어 있으며, 충상단층 운동감각을 보이고 있다. 울미골 추정단층은 동북동방향으로 발달하고 있으며, 남북방향의 중당단층과 교차한다. 울미골 노두에서 약 5 m 폭의 단열대가 발달하고 있으나 그 연장부에서는 단층 노두를 발견하지 못하였다. 그러나 항공사진에서는 북동방향의 선구조가 뚜렷하게 발달하고 있어, 추정단층으로 정하였다.

남대천의 지류를 따라서 발달하고 있는 북서방향의 추정단층과 이를 가로지르고 있는 남북방향 단층과 북동



Fig. 2. The outcrop of Doocheon fault with N15E/45NW in granite gneiss. The strike slip sense (the red straw in the black circle) on the fault plane is shown in the left photo.

방향 단층이 각 2조씩 발달한다. 이들 단층대를 따라 암맥들이 관입하고 있다.

3. 연구방법

3.1. GIS 공간분석을 통한 수계망 추출

수계망 추출을 위한 GIS 공간분석 단계에서는 일차적으로 수치지형도로부터 등고선을 분류해 내고, 분류해 낸 등고선을 이용하여 불규칙 삼각망 (TIN: Triangulated Irregular Network)을 생성하여 격자 형태의 수치표고 모델을 제작한다. 수치지형도의 등고선에는 간혹 고도값이 잘못 입력된 경우도 있으니, 오류 유무를 잘 살펴 사용해야 한다. 수치표고모델에서 각각의 격자는 지형고도에 대한 수치값을 기록하고 있다. 수치표고모델에는 유수의 이동에 걸림돌이 되는 웅덩이가 존재할 수 있으며, 이 부분은 채움 처리한다. 채움처리를 마친 수치표고모델로부터 유수의 이동방향을 나타내는 유향값으로 이루어진 유향배열을 생성하고, 이로부터 유량누적값이 계산된 유량누적배열을 생

성한다. 유량누적배열을 이용하여 하천 수계들이 서로 연결된 형태의 수계망을 추출하였다. 추출된 수계망을 이용하여 Strahler 방식 (Horton 1945; Strahler 1952, 1957)으로 남대천의 하천 차수를 구분하면 남대천의 본류는 5차수 하천으로 분류된다. 추출된 수계망은 크게 3개의 소유역과 1개의 합류유역으로 구분된다. 남대천 상류부분은 S1, 중상류 부분은 S2, 중류 부분은 S3, 그리고 세조의 소유역이 합류되는 유역은 S0로 구분하였다 (Fig. 3a). 이들 소유역들의 하천 종단면도를 그려보면 남대천 상류천과 중상류 부분이 거의 유사한 요형도(concavity)와 경사각을 보이는 반면, 남대천 중류의 하도는 경사가 급하고 짧다 (Fig. 3b).

3.2. 천이점 위치선정을 위한 수치해석방법

하천지형에서 천이점은 하천 경사가 급격히 변하는 지점을 가리키며 급경사변곡점, 경사급변점 등의 용어로 사용되고 있다. 천이점은 지형의 용기, 침강, 단층 운동 등 지구조운동과 암석의 물성차에 의한 차별침식에 의해 발달한다. 일반적으로 천이점은 신기조산대의 단층이나 지반운동을 받은 산지의 주변에 형성되는 선상지의 선정부근에 잘 발달하는 것으로 알려져 있다. 이러한 천이점은 단층운동으로 형성된 폭포와 하천 상류지역에서 볼 수 있는 계단형의 못 등이 좋은 예이다.

하천 수계에서 천이점을 찾기 위한 기존 방법은 등고선을 이용하여 작성한 하천종단면도 상에서 전문가의 육안 판독으로 천이점 위치를 선정하는 주관적인 방법으로 이루어져 왔다. 이러한 주관적인 판단은 전문가마다 상이한 직관으로 해석된 결과이기 때문에 단층조사에 활용하기에는 매우 역부족이다. 따라서 본 연구에서는 보다 객관적이면서 정량적인 방법으로 천이점을 다음과 같은 수치해석방법 (Hack, 1973; Flint, 1974; Howard and Kerby, 1983; Whipple and Tucker 1999; Snyder *et al.*, 2000; Kirby and Whipple 2001; Duvall *et al.*, 2004; Wobus *et al.*, 2006)을 적용하여 산출하였다.

하천의 경사와 유역 면적과는 다음과 같은 멱함수(power-law function) 관계를 가진다.

$$S = K_s A^\theta \quad (1)$$

여기서, S는 하천경사, A는 유역면적을 나타내며, 이들 값들은 수치표고 모델로부터 얻을 수 있다. 하천유역면적에 대한 하천수계의 상대적 경사도를 나타내는 K_s 와 하천수계의 요형도를 나타내는 θ 는 하천 유역면적과 경사에 대한 멱함수 회귀분석을 통해 계산할 수

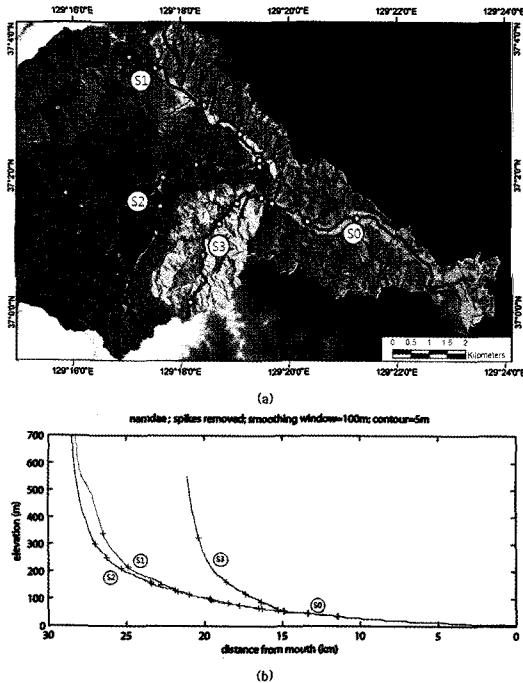


Fig. 3. Knickpoint distribution of three main streams: (a) detected knickpoints on drainage network of the relief map. The Namdae drainage basin is divided into three lower rank tributaries; S1, S2, and S3. S0 is a confluence of three tributaries. (b) plotted knickpoints on the longitudinal profile (a blue cross hair).

있다. 위 식의 양변에 로그(log)를 취하면 $-\theta$ 를 기울기로 하고, $\log(K_s)$ 를 y절편으로 하는 직선의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\log(S) = -\theta \log(A) + \log(K_s) \quad (2)$$

하천경사 S는 Y축의 표고를 기준으로 일정간격(일반적으로 등고선 간격으로 계산)으로 계산되어야 한다. 이러한 이유는 X축의 거리를 기준으로 S를 계산하면 $\log(\text{Slope})-\log(\text{Area})$ 그래프에서 데이터 값들이 하천의 하류지역에 편중되게 되며, 반면에 Y축의 표고를 기준으로 계산하면 데이터 값들이 고르게 분포하게 된다. Fig. 4는 하천 수계에 대한 $\log(\text{Slope})-\log(\text{Area})$ 그래프를 개념적으로 나타낸 것으로 자료 분포특성이 다른 3개 영역으로 구분된다. 봉적하도 영역은 하천 유역 면적이 좁으면서 하천경사가 급한 지역으로 산의 정상부근의 경사가 가파른 수계가 해당된다. 하천하도 영역은 하천유역면적이 증가함에 따라 하천경사가 작아지는 지역으로 일반적인 하천수계를 의미하며, 충적하도 영역은 충적지형에 발달한 충적하천으로 경사가 아주 완만한 수계이다. 봉적하도에서 하천하도로 전이되는 지점인 A_{cr} 은 보통 유역면적이 약 10^6 m^2 이하인 지역에서 나타난다(Wobus *et al.*, 2006). θ 와 K_s 값은 하천하도 영역에 분포하는 자료에 대한 선형 회귀식에서 각각 기울기와 y절편에 해당된다.

하천중단면과 요형도(θ)와의 관계에서 요형도가 클수록 $\log(\text{slope})-\log(\text{area})$ 그래프에서 직선의 기울기가 가파르게 나타난다 (Fig. 5a). 하천중단면과 상대적

경사도(K_s)와의 관계에서는 두 하천수계의 요형도는 같지만 하천수계의 상대적 경사도는 차이가 있음을 보여준다 (Fig. 5b). $\log(\text{slope})-\log(\text{area})$ 그래프에서 직선의 기울기는 같지만 y절편이 다른 모양을 보인다. 즉 중단면 A와 중단면 B의 요형도는 같지만, 중단면 A보다 중단면 B의 상대적 경사도가 큰 것을 알 수 있다.

정규화된 상대적 경사도 K_{sn} 을 구하기 위해 기준요형도(reference concavity) θ_{ref} 값을 이용한다. 기준요형도 θ_{ref} 는 회귀분석에서 상대적 경사도 K_s 와 요형도 θ 사이에 밀접한 상관관계가 있기 때문에 상대적 경사도 K_s 를 해석하기 위해 필요하다. 실제적으로 기준요형도 θ_{ref} 는 하천수계 세그먼트에서 측정된 요형도 θ 의 지역 평균값을 사용하는데, 기존의 많은 연구에서 기준요형도 θ_{ref} 값이 0.35 ~ 0.65 범위내로 떨어지는 것으로 보고되고 있다(Snyder *et al.*, 2000; Kirby and Whipple, 2001; Brocklehurst and Whipple, 2002; Kirby *et al.*, 2003; Wobus *et al.*, 2003). 정규화된 상대적 경사도 K_{sn} 은 다음과 같은 식을 이용하여 계산할 수 있다(Wobus *et al.*, 2006).

$$K_{sn} = K_s \cdot A_{cent}^{(\theta_{ref} - \theta)}$$

$$K_{cent} = 10^{(\log A_{max} + \log A_{min})/2} \quad (3)$$

여기서, K_s 와 θ 는 A_{min} 과 A_{max} 사이의 하천수계 세그먼트에 대한 회귀식을 통해 얻을 수 있으며, A_{cent} 는 분석하고자 하는 하천수계 세그먼트(segment)의 중간 지점이다. 남대천 유역의 하천수계에 적용한 θ_{ref} 값은

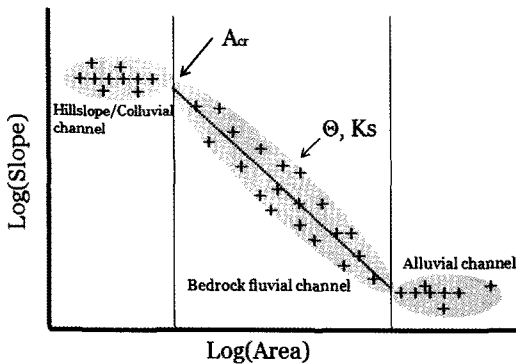


Fig. 4. Log(slope)-Log(Area) schematic graph. This figure consists of hillslope or colluvial, bedrock fluvial channel and alluvial channel. In general, scaling breaks interpreted to mark the transition (A_{cr}) between hillslope or colluvial channels and the fluvial channel network can be identified in topographic data by an abrupt decrease in channel slope with increasing drainage area.

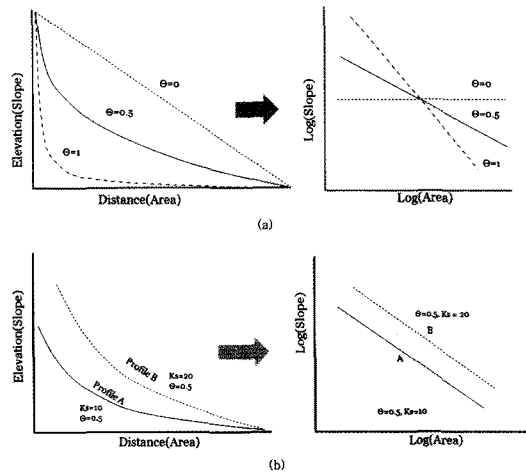


Fig. 5. Schematic graphs showing the relationship between longitudinal profile and $\log(\text{slope})-\log(\text{area})$ graph, (a) longitudinal profile and concavity (θ), (b) longitudinal profile and relative steepness (K_s).

0.45이다.

하천수계에서 천이점의 위치를 찾기 위해서는 하천의 표고를 기준으로 일정 구간별로 나누어 상대적 경사도 K_s 값과 하천경사도 그래디언트(gradient) 값을 계산하여 각각 하천수계 거리별로 도시한 그래프를 사용한다. 천이점 위치는 K_s 값이 높았다 낮아지는 지점과 그래디언트 값이 회귀선(regression line) 보다 위에 있는 지점과 일치선상에 있는 지점을 선정한다.

4. 결과 및 토의

앞에서 제시한 수치해석방법을 적용하여 분석한 결과, 남대천 유역에 분포하는 천이점은 모두 77개지점이다. 남대천 유역의 모든 하천지류를 분석한 결과, 총 369개의 천이점이 추출되었으며, 이들 중 중복 지점을 제외하면 77개 지점이다. 전체 천이점 중 85%가 고도 150 m 이하에 분포하며, 상대적 경사도 K_s 값의 평균은 38.8이며, 주로 20 ~ 50 사이에 분포한다. 그리고 고도가 증가하면서 K_s 값도 증가하는 패턴을 보인다.

주요 수계 S1, S2, S3에 대해 천이점 그래프를 분석한 결과 각각 10, 12, 8개의 천이점이 추출되었다(Fig. 6, 7, 8). 이들 중 합류지역(S0)의 중복지점을 제외하면 총 24개 지점이다(Table 1). 하도의 길이가 유사한 S1수계와 S2수계의 천이점 분석 그래프 Log(slope)-Log(Area)(Fig. 6a and 7a)에서, S1에서는 봉적하도에서 하천하도로 전이되는 지점인 A_{cr} 이 유역면적이 약 $10^6 m^2$ 인 지점에서 뚜렷한 경계를 보이고 있으나, S2수계에서는 봉적하도와 하천하도의 경계가 뚜렷하지 않다. 따라서 S2수계의 하천하도에 대한 천이점 분석을 위해 하도길이가 유사한 S1수계의 A_{cr} 지점인 유역면적이 약 $10^6 m^2$ 인 지점을 S2수계의 A_{cr} 로 판단하여 분석하였다. S3수계에서는 A_{cr} 이 유역면적이 약 $10^4 m^2$ 인 지점에서 나타나는데(Fig. 8a), 이는 하도의 길이가 짧은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

수치표고모델과 지형종단면 상에서의 천이점은 주로 상류와 중류 구간에 분포하고 있다. 특히 S3 수계와 같이 하천의 경사각이 급할수록 천이점 발달이 뚜렷하게 감소하는 경향을 보이는 반면, 이와 대조적으로, 완만한 경사를 보이는 S2 수계에서는 많은 천이점이 발달하고 있다(Fig. 3b). 주요 수계의 천이점 변수에서도, 하천수계의 요형도 θ 값에서는 S1과 S2가 각각 0.88, 0.86으로 비슷한 값을 보인 반면, 정규화된 상대경사도 K_{sn} 값은 하천수계 S1은 34.9 그리고 S2는 26.1이다. S1과 S2수계의 K_{sn} 값이 차이가 나는 원인

은 A_{cr} 의 위치에 따라 지형종단면 상에서 하천하도 구간이 S1수계에서는 고도 약 500 m에서 시작되지만 S2수계에서는 고도 약 300 m에서 시작되어, K_{sn} 값이 S1수계에서 높은 반면 S2수계에서는 낮게 나타났다. 요형도 θ 값이 비슷하여도 정규화된 상대적 경사도 K_{sn} 은 시작되는 고도에 의하여 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. S3수계에서 K_{sn} 은 S1과 비슷한 반면, 요형도 θ 값은 가장 낮은 0.54이다. S1 수계는 정규화된 상대적 경사도 K_{sn} 과 요형도 θ 모두 높은 값을 보여주고 있다. 이는 K_{sn} 값과 요형도 θ 값이 지형의 하각률(incision rate)과 관련성이 있으므로, 하천수계 S1에서 삭박작용이 다른 수계보다 다소 활발했을 것으로 판단

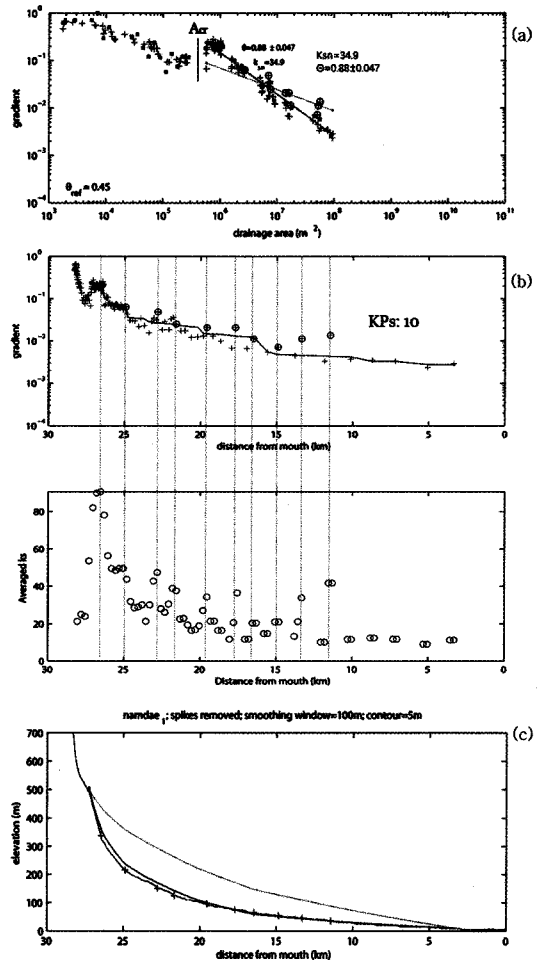


Fig. 6. Knickpoint analysis graphs of main stream S1, (a) Log(slope)-Log(Area) graph, (b) Schematic graphs of gradient and K_s parameters for the selection of knickpoint location, (c) plotted knickpoints on longitudinal profile.

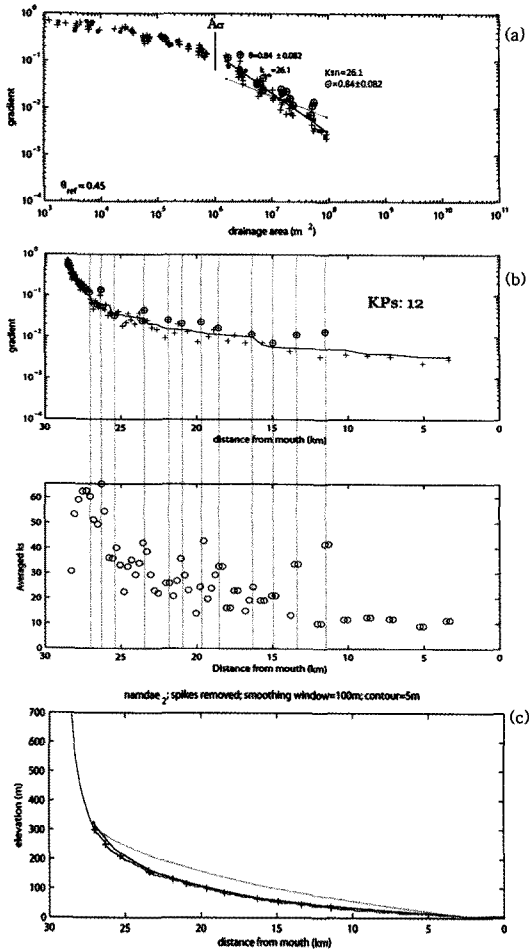


Fig. 7. Knickpoint analysis graphs of main stream S2; (a) Log(slope)-Log(Area) graph, (b) Schematic graphs of gradient and Ks parameters for the selection of knickpoint location, (c) plotted knickpoints on longitudinal profile.

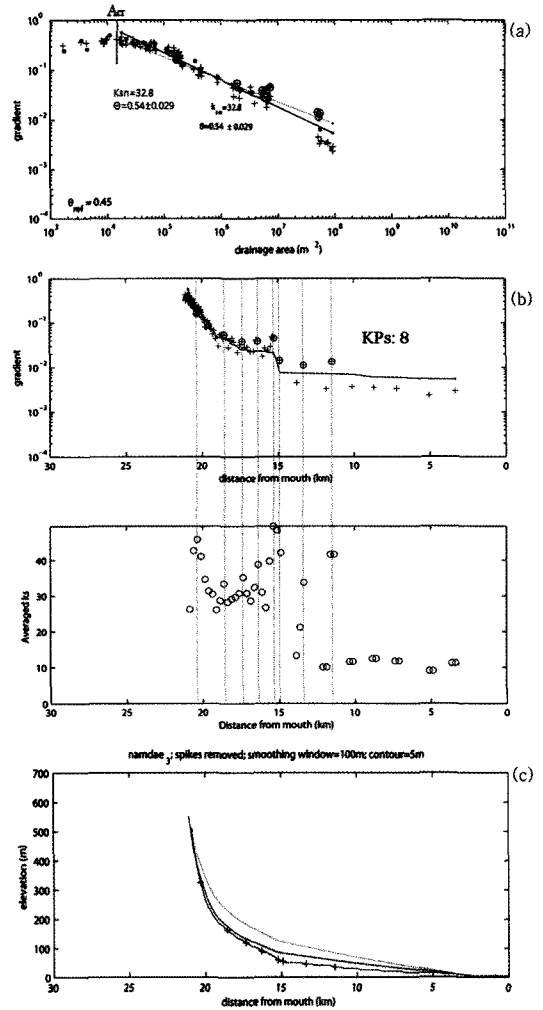


Fig. 8. Knickpoint analysis graphs of main stream S3; (a) Log(slope)-Log(Area) graph, (b) Schematic graphs of gradient and Ks parameters for the selection of knickpoint location, (c) plotted knickpoints on the longitudinal profile.

된다. 한편, S1 수계는 홍제사화강암인 단일암석이 분포하는 지역이므로 암상경계 내지 암상차에 의한 것으로 볼수 없다. 그러나, 이 수계에서는 S2나 S3보다 많은 단층이 통과하고 있어, 단층작용에 의한 삭박작용이 가속화 되어 천이점이 형성된 것으로 해석된다.

결론적으로, 77개소의 천이점과 그중에서 주요 수계의 천이점들의 분포를 보았을 때, 대부분 단일 암상내에서도 분포하고 있으며, 일부 천이점들은 암상 경계를 따라 위치한다 (Fig. 9). 그러나 이들 암상 경계를 따라서 두천단층과 삼당단층 등이 발달하고 있다. 그러므로, 남대천의 천이점들은 암상차에 의한 것보다는 지구조 운동과 연관된 것으로 볼 수 있다.

남대천 유역을 통과하는 남북방향, 북서-남동방향 및

동서방향의 단층을 따라서 천이점이 잘 일치한다. 남대천의 천이점과 단층을 비교해 보면, 수계 전체에 발달하고 있는 77개소의 천이점 중에서 27개 지점 (35%)에 단층이 통과한다. 77개의 천이점 중 남대천 주요 수계에 발달하고 있는 천이점은 24개이며 이 중에서 13개 (54%)지점에서 단층이 통과하고 있다 (Fig. 10). 그러므로 지류 보다는 주요 수계의 천이점이 단층운동과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이 밖에도 단층이 발견된 단층 노두위치 인근에도 천이점이 위치하고 있다.

남북방향의 두천단층은 주요수계 상의 4곳의 천이점과 하천지류 천이점 6곳을 통과하며, 하천지류에서 발

Table 1. Knickpoint parameters of Namdae drainage basins are divided into S0, S1, S2 and S3. S0 is the confluence of three tributaries

Stream	Knickpoint #	Drainage Area (m ²)	Elevation (m)	K _s	K _{sn}	θ
S1	mKP1	1013375	338	78.13	34.9	0.88±0.047
	mKP2	2708550	215	43.69		
	mKP3	7158125	150	27.99		
	mKP4	7651600	125	37.63		
	mKP5	14043925	95	21.38		
	mKP6	16197975	75	36.45		
	mKP7	17334700	65	20.45		
S2	mKP8	1741650	300	51.25	26.1	0.84±0.082
	mKP9	2865325	250	54.6		
	mKP10	5682300	210	40.12		
	mKP11	7370575	155	38.74		
	mKP12	15203800	130	26.06		
	mKP13	15935525	115	29.21		
	mKP14	18876875	100	42.99		
	mKP15	21725100	85	32.75		
	mKP16	24559850	65	24.58		
S3	mKP17	167350	324	45.85	32.8	0.54±0.029
	mKP18	1970550	163	28.31		
	mKP19	5425075	120	35.23		
	mKP20	6495450	90	31.01		
	mKP21	7514575	60	48.46		
S0	mKP22	-	55	21.05	-	-
	mKP23	-	45	33.81		
	mKP24	-	35	41.68		

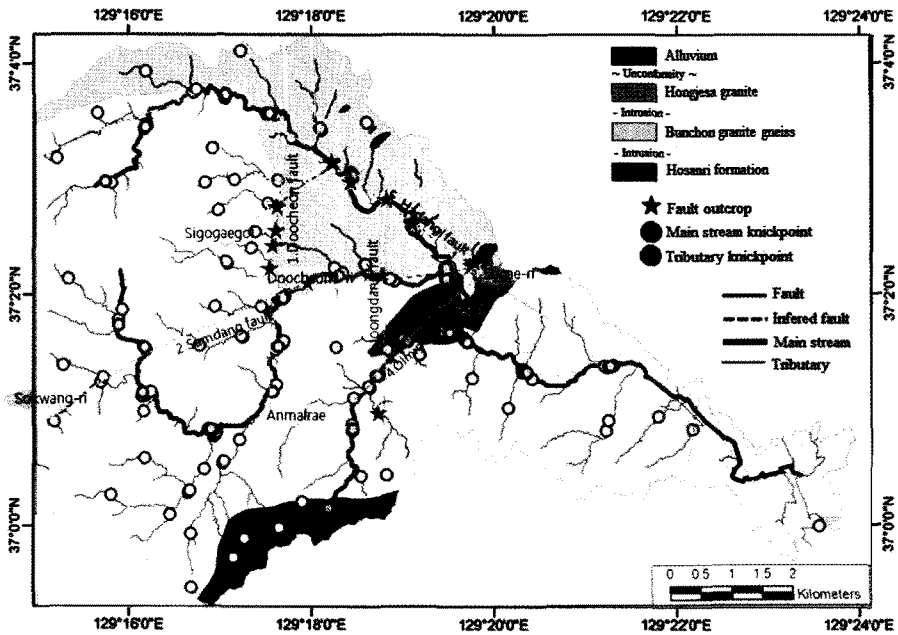


Fig. 9. The geological map shows the relationship between rock boundaries and knickpoints.

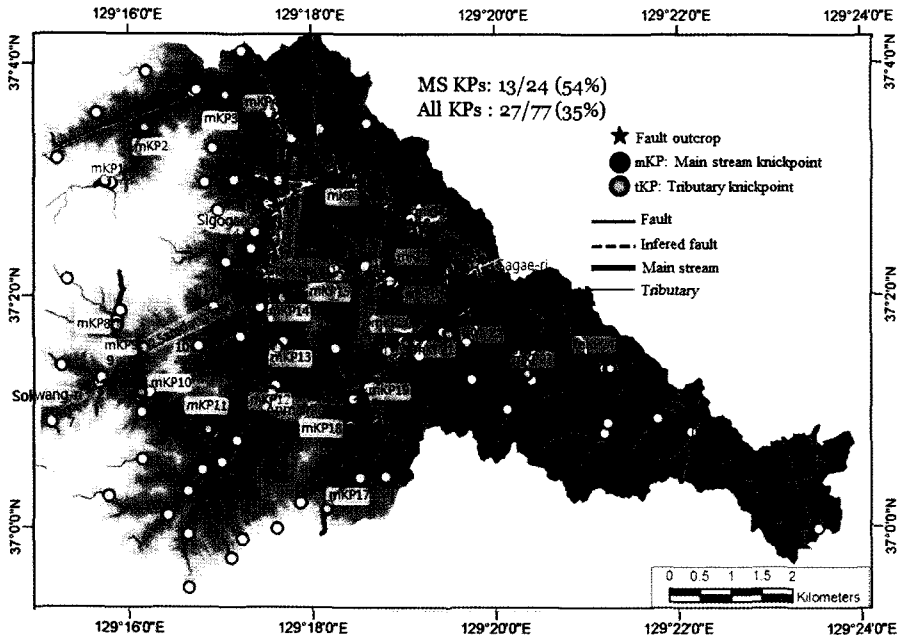


Fig. 10. The relief map shows a relationship between knickpoints and faults within the Namdae drainage basin. 54% of main stream knickpoints correspond with the faults.

달한 3, 4, 5, 6번의 천이점은 단층과 142 m ~ 369 m 떨어진 지점에 위치하고 있다 (Table 2). 단층으로부터 이격된 천이점은 침식작용에 의하여 천이점이 후퇴된 것으로 해석할 수 있다 (Burbank and Anderson, 2001). 단층에 의하여 형성되었다 할지라도 침식 삭박 작용이 일어나 천이점은 수계와 반대 방향으로 후퇴하게 된다. 천이점들은 대부분 해발고도 100 m ~ 130 m (평균 121.15 m) 사이에 위치하고 있으며, 상대적 경사도는 K_s 값은 22.48 ~ 43.55 (평균 35.57)이다. 두 천단층과 삼당단층이 교차하는 지역 부근에는 6번과 mKP14의 천이점에서 K_s 은 42.99 ~ 43.39로 두천단층을 통과하는 지역의 천이점들 중에서 가장 큰 값을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 두조의 단층운동에 의한 효과로 해석된다.

동서계열의 삼당단층은 주요수계 상의 5곳의 천이점과 하천지류 천이점 9곳을 통과한다 (Table 3). 대부분의 천이점들은 삼당단층이 통과하는 지역과 잘 일치하고 있으나, 하천지류 상의 10, 11번 천이점은 단층 통과 지점으로부터 약 229 m ~ 255 m 정도 떨어져 위치하고 있다. 이격된 천이점은 단층운동 후 하천의 삭박작용에 의한 천이점 후퇴일 수 있다. 삼당단층이 통과하는 지역의 지형은 서쪽이 높고 동쪽이 낮은 특징을 보이고 있으며, 천이점들은 해발고도 65 m ~ 320 m

(평균 121.15 m) 사이에 분포하며, 천이점의 K_s 값은 20.45 ~ 62.75 (평균 31.66) 사이에 분포를 보인다. 해발고도 100 m 이하에 분포하는 천이점의 상대적 경사도 K_s 값은 20.45 ~ 42.99 (평균 31.66) 사이에 분포를 보이며, 해발고도 110 m 이상에 분포하는 천이점의 K_s 값은 29.63 ~ 62.75 (평균 50.68) 사이에 분포를 보인다. 고도가 높을수록 천이점의 K_s 값은 다양하며 평균값도 높다.

S3 구역에는 남북방향의 중당단층과 동북동 단층인 울미골 추정단층이 발달한다. 남북방향의 중당단층은 주요 수계상에서 1곳의 천이점과 하천지류 천이점 3곳을 통과한다 (Table 4). 중당단층에서는 3곳의 단층 노두중 2곳 노두 인근에 2개의 천이점(13, 14번)이 위치하고 있다 (Table 4). 이 지점은 동서방향의 삼당단층과 교차하는 지점으로 해발고도 약 72 m ~ 75 m 사이에 위치하고 있으며, 상대적 경사도 K_s 값은 23.15이다. 중당단층 상에 분포하는 천이점들은 해발고도 72 m ~ 120 m (평균 106.71 m) 사이에 위치하고 있으며, 상대적 경사도 K_s 값은 23.15 ~ 35.37 (평균 31.80)의 분포를 보인다. 해발고도가 높을수록 경사도 K_s 값은 높다. 이 지역의 천이점의 상대적 경사도의 평균값은 두천과 삼당단층의 것과 거의 비슷하다.

울미골단층이 통과하는 지역에는 주요수계 상의 천

Table 2. Knickpoint parameters on the Doocheon fault

Knickpoint #	DrainageArea(m ²)	Elevation(m)	K _s	Remark	
mKP4	mKP4	7651600	125	37.63	main stream
	mKP4-1	7625475	130	37.63	
	mKP4-2	7639675	127	37.63	*
	mKP4-3	7654350	126	26.61	
	mKP4-4	7660300	125	26.61	
1	8903050	110	22.99	tributary	
2	1291650	125	26.64	tributary	
3	532025	150	36.43	tributary (142 m)**	
4	156225	198	22.48	tributary (365 m)**	
5	327925	165	43.55	tributary (369 m)**	
mKP14	mKP14	18876875	100	42.99	main stream (187 m)**
	mKP14-1	18695975	100	42.99	
	mKP14-2	18874550	100	42.99	
	mKP14-3	18874800	100	42.99	*
	mKP14-4	18879000	100	42.99	
	mKP14-5	18885250	100	42.99	
	mKP14-6	18885350	100	42.99	
6	907275	110	43.39	tributary (163 m)**	
mKP13	mKP13	15935525	115	29.21	main stream
	mKP13-1	15921425	116	35.79	
	mKP13-2	15936525	115	36.67	
	mKP13-3	15938900	115	23.27	*
	mKP13-4	15940075	115	23.27	
	mKP13-5	15941100	114	36.67	
mKP12	mKP12	15203800	130	26.06	main stream
	mKP12-1	15210725	130	43.44	*
	mKP12-2	15277000	130	43.44	

* Tributary knickpoint superimposed on the main stream knickpoints

** Distance from fault

이점 2곳과 하천지류 상의 천이점 3곳이 발달하고 있다 (Table 5). 북동방향의 울미골단층과 남북방향의 중당단층이 교차하는 부근에 천이점(15번)이 위치하고 있다. 이 지점은 해발고도 120 m에 위치하고 있으며, 상대적 경사도 K_s 값은 35.37이다. 울미골단층 상에 분포하는 천이점들은 해발고도 90 m ~ 139 m (평균 108.79 m) 사이에 위치하고 있으며, 상대적 경사도 K_s 값은 31.01 ~ 47.1 (평균 38.29)의 분포를 보인다.

남대천의 지류를 따라 북서방향의 하당단층이 발달

하고 있으며, 하당1리의 중평교, 중석교, 상당리 부근에 단층과 산성암맥 노두가 노출되어 있다. 중평교에서도 약 10 m폭의 단층 파쇄대를 갖는 단층이 발달하며, 이보다 북쪽 연장부인 중석교에서는 N40E/70SE 주향을 보이고 약 5 m 단층파쇄대와 그리고 N73W/80SW의 폭 10 m의 산성암맥이 발달하고 있다. 상당리에서도 북서주향을 보이는 산성암맥과 단층이 노출되어 있다. 하당단층이 통과하는 지역에는 주요수계 상의 천이점 4곳과 하천지류 상의 천이점 1곳이 발달하

Table 3. Knickpoint parameters on the Samdang fault

Knickpoint #	DrainageArea(m ²)	Elevation(m)	K _s	Remark	
7	213800	320	59.24	tributary	
8	270625	254	35.48	tributary	
9	697150	250	29.63	tributary	
mKP9	mKP9	2865325	250	54.60	main stream
	mKP9-1	2856700	255	60.41	
	mKP9-2	2865350	250	54.60	*
	mKP9-3	2908175	243	62.75	
10	669500	235	59.51	tributary (255 m)**	
11	341950	215	47.17	tributary (229 m)**	
6	907275	110	43.39	tributary	
mKP14	mKP14	18876875	100	42.99	tributary
	mKP14-1	18695975	100	42.99	
	mKP14-2	18874550	100	42.99	
	mKP14-3	18874800	100	42.99	*
	mKP14-4	18879000	100	42.99	
	mKP14-5	18885250	100	42.99	
	mKP14-6	18885350	100	42.99	
mKP15	mKP15	21725100	85	32.75	main stream
	mKP15-1	21722500	85	32.75	
	mKP15-2	21722725	85	56.96	
	mKP15-3	21723400	85	32.75	
	mKP15-4	21723900	85	32.75	
	mKP15-5	21725175	84	32.75	*
	mKP15-6	21727400	84	32.75	
	mKP15-7	21728200	83	32.75	
mKP15-8	22566425	82	32.75		
12	433025	88	30.88	tributary	
13	23828150	75	23.15	tributary ***	
14	23860525	72	23.15	tributary ***	
mKP7	mKP7	17334700	65	20.45	main stream
	mKP7-1	17337050	65	20.45	
	mKP7-2	17334150	65	20.45	
	mKP7-3	17330375	65	20.45	*
	mKP7-4	17329700	65	20.45	
	mKP7-5	17329200	65	20.45	
mKP16	mKP16	24559850	65	24.58	main stream
	mKP16-1	24551325	65	24.58	
	mKP16-2	24553525	65	24.58	*
	mKP16-3	24562700	65	24.58	

* Tributary knickpoints superimposed on the main stream knickpoints

** Distance from a fault

*** Fault outcrop by knickpoint

고 있다 (Table 6). 북서방향의 하당단층은 남북방향의 두천단층과 중당단층, 북동방향의 올미골단층과 하당단

층 인근의 소규모 단층들과 교차하며, 이들 교차지점에 단층노두와 천이점들이 발달하고 있다 (Fig. 10). 북

Table 4. Knickpoint parameters on the Joongdang fault

Knickpoint #	DrainageArea(m ²)	Elevation(m)	K _s	Remark
13	23828150	75	23.15	tributary ***
14	23860525	72	23.15	tributary ***
15	590925	120	35.37	tributary
mKP19	5425075	120	35.23	main stream (105 m)**
mKP19-1	5422950	120	35.23	
mKP19-2	5424475	120	35.23	*
mKP19-3	5425275	120	35.23	

* Tributary knickpoint superimposed on the main stream knickpoints

** Distance from fault

*** Fault outcrop by knickpoint

Table 5. Knickpoint parameters on the Olmigol fault

Knickpoint #	DrainageArea(m ²)	Elevation(m)	K _s	Remark
17	3394175	139	38.86	tributary
16	1317125	134	47.10	tributary
mKP19	5425075	120	35.23	main stream
mKP19-1	5422950	120	35.23	
mKP19-2	5424475	120	35.23	*
mKP19-3	5425275	120	35.23	
15	590925	120	35.37	tributary (89 m)**
mKP20	6495450	90	31.01	main stream fault outcrop
mKP20-1	6473975	95	35.70	
mKP20-2	6475050	95	38.83	
mKP20-3	6475250	95	38.83	
mKP20-4	6475800	95	35.70	
mKP20-5	6494275	90	46.88	
mKP20-6	6495175	90	46.88	*

* Overlapping knickpoints of tributaries and the main stream

** Distance from fault

서 지류 상에 발달하고 있는 천이점 mKP5와 mKP6에서는 증석교 및 증평교 단층노두가 발달하고 있다. 해당단층에 분포하는 천이점들은 해발고도 65 m ~ 125 m (평균 87.72 m) 사이에 위치하고 있으며, 상대적 경사도 K_s 값은 20.45 ~ 37.63 의 분포를 보인다. 이곳의 해발고도는 타 지역에 비해서 낮지만, 상대적 경사도 K_s의 평균값은 삼당단층(평균 31.80)과 중당단층(평균 31.80)의 것과 거의 유사하다.

5. 결 론

1) 남대천 유역에 분포하는 천이점들은 거의 모두 증류 및 증상류에 분포하고 있으며, 하천 수계 상대경사도 K_s와 요형도 θ 값이 높은 S1 구역은 타 수계 보다 많은 수의 단층이 통과하고 있다. 그러므로 하천경사도와 요형도도 암상차에 의한 것보다는 단층에 의한 삭박작용에 기인 한 것으로 해석된다.

2) 하위지류를 포함한 남대천 유역의 천이점은 모두

Table 6. Knickpoint parameters on the Hadang fault

Knickpoint #	DrainageArea(m ²)	Elevation(m)	K _s	Remark	
mKP4	mKP4	7651600	125	37.63	main stream
	mKP4-1	7625475	130	37.63	*
	mKP4-2	7639675	127	37.63	*
	mKP4-3	7654350	126	26.61	*
	mKP4-4	7660300	125	26.61	*
1	8903050	110	22.99	tributary	
mKP5	mKP5	14043925	95	21.38	main stream
	mKP4-1	14042275	95	34.37	
	mKP4-2	14042650	95	34.37	
	mKP4-3	14043400	95	27.10	
	mKP4-4	14043850	95	27.10	*
	mKP4-5	14044775	95	27.10	
	mKP4-6	14064875	91	21.38	
mKP6	mKP6	16197975	75	36.45	main stream
	mKP6-1	16133600	75	26.69	
	mKP6-2	16195950	75	36.45	
	mKP6-3	16199825	75	36.45	
	mKP6-4	16199950	75	36.45	
	mKP6-5	16200850	75	36.45	*
	mKP6-6	16201400	75	36.45	
	mKP6-7	16202950	75	36.45	
	mKP6-8	16203675	75	36.45	
	mKP6-9	16307200	75	36.45	
mKP7	mKP7	17334700	65	20.45	main stream (243m)**
	mKP7-1	17337050	65	20.45	
	mKP7-2	17334150	65	20.45	
	mKP7-3	17330375	65	20.45	*
	mKP7-4	17329700	65	20.45	
	mKP7-5	17329200	65	20.45	

* Overlapping knickpoints of tributaries and the main stream

** Distance from fault

77개이며, 이중 주요 수계 S1, S2, S3에 발달하고 있는 천이점은 24개소이다. 77개소 중 이중 단층과 일치하고 있는 천이점은 27개소 (38%)이며, 주요 수계상에서 단층과 일치되는 천이점은 13개 지점(54%)이다. 그러므로 주요 수계상의 천이점들은 단층과 밀접한 관계가 있음을 지시한다.

3) 조사지역에서 전체 천이점 중 85%가 고도 150 m 이하에 분포하며, 상대적 경사도 K_s 값의 평균은 38.8이며, 주로 20 ~ 50 사이에 분포한다. 천이점들의 상대적 경사도 K_s값은 암상경계부와 무관하게 발달하고 있

는 반면 단층분포와 관련된 것으로 판단된다. 두천단층과 삼당단층이 중첩되는 수계 지역에서는 해발고도를 고려하더라도, 상대적 경사도 K_s 값이 42.99 ~ 43.39로 다른 천이점보다 매우 높은 값을 보이므로, 천이점 형성은 단층과 무관한 지형변위임을 지시한다.

4) 결론적으로, 수계의 천이점 발달은 단층 운동에 의하여 형성될 수 있는 지형변위임이 인지되었다. 즉 천이점은 단층에 의하여 형성된 지형변위의 증거로 생각되며, 이와 같은 천이점은 제4기 단층을 규명하거나 단층 연장을 규명할 수 있는 수단으로 활용 될 수 있다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원에서 수행하고 있는 자연재해저감기술개발사업의 “활성단층지도 및 지진위험지도 제작”(NEMA-자연-2009-24)과제와 원자력기술개발사업의 “원전부지 인근신기지구조 및 해안단구 검증조사연구”(NP2010-005)과제의 일환으로 수행되었습니다. 논문을 심사받아 유익한 조언을 해주신 익명의 심사위원, 이희권교수님, 권상훈교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- Lee, C.H., Kim, Y.J. and Choi, B.R. (1993) Korea geological map(1:50,000), Explanatory text of the geological map of Chukpyon and Imwonjin sheet, KIGAM(Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources), p38.
- KHNP(Korea hydro & Nuclear Power Co. Ltd.) (2008) Preliminary Safety Analysis Report (PSAR) for New Unit 1 and 2 at Uljin.
- Burbank, D.W. and Anderson, R.S. (2001) Tectonic Geomorphology. Blackwell Science, 274p.
- Brocklehurst, S.H. and Whipple, K.X. (2002) Glacial erosion and relief production in the Eastern Sierra Nevada, California: Geomorphology, v.42, p.1-24.
- Crosby, B.T. and Whipple, K.X. (2006) Kickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa Rivier, North Island, New Zealand: Geomorphology, v.82, p.16-38.
- Duvall, A., Kirby, E. and Burbank, D. (2004) Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles and processes in coastal California: Journal of Geophysical Research, v.109, n.f03002, doi:10.1029/2003JF000086.
- Flint, J.J. (1974) Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge: Water resources Research, v.10, n.5, p.969-973.
- Hack, J.T. (1973) Stream profile analysis and stream-gradient index: U.S. Geological Survey Journal of Research, v.1, n.4, p.421-429.
- Hayakawa, Y.S. and Oguchi, T. (2006) DEM-based identification of knickzones and its application to Japanese mountain rivers: Geomorphology, v.78, p.90-106.
- Horton, R.E. (1945) Erosional development of streams and their drainage basin: hydro-physical approach to quantitative morphology: Geological Society of America Bulletin, v.56, n.3, p.275-370.
- Howard, A.D. and Kerby, G. (1983) Channel changes in badlands: Geological Society of America Bulletin, v.94, p.739-752, doi: 10.1130/00167606(1983)94<739:CCIB>2.0.CO;2.
- Keller A.E. and Pinter N. (1996) Active Tectonics-Earthquakes, Uplift, and Landscape. Prentice Hall, New Jersey, 338p.
- Kirby, E. and Whipple, K.X. (2001) Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis: Geology, v.29, n.5, p.415-418.
- Kirby, E., Whipple, K.X., Tang, W. and Chen, Z. (2003) Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from bedrock channel longitudinal profiles: Journal of Geophysical Research, v.108, n.B4.
- Lee, C.S. and Tsai, L.L. (2010) A quantitative analysis for geomorphic indices of longitudinal river profile: a case study of the Choushui River, central Taiwan: Environmental Earth Science, v.59, p.1549-1558.
- Rantitsch, G., Pischinger, G. and Kurz, W. (2009) Stream profile analysis of the Koralm Range (Eastern Alps): Swiss Journal of Geoscience, v.102, p.31-41.
- Snyder, N.P., Whipple, K.X., Tucker, G.E. and Merritts, D.J. (2000) Landscape response to tectonic forcing: DEM analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California: Geological Society of America Bulletin, v.112, n.8, p.1250-1263.
- Strahler, A.N. (1952) Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography: Geological Society of America Bulletin, v.63, n.11, p.1117-1142.
- Strahler, A.N. (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology: Transactions of the American Geophysical Union, v.8, n.6, p.913-920.
- The Research Group for Active Faults of Japan (RGAF) (1991) Maps of Active Faults in Japn with an Explanatory Text. University of Tokyo Press, 437p.
- Whipple, K.X. and Tucker, G.E. (1999) Dynamics of the stream-power river incision model: Implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs: Journal of Geophysical Research, v.104, n.b8, p.17,661-17,674.
- Wobus, C.W., Hodges, K.V. and Whipple, K.X. (2003) Has focused denudation sustained active thrusting at the Himalayan topographic front?: Geology, v.31, p.861-864.
- Wobus, C., Whipple, K.X., Kirby, E., Snyder, N., Johnson, J., Spyropolou, K., Crosby, B. and Sheehan, D. (2006) Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls, in Willett, S.D., Hovius, N., Brandon, M.T., and Fisher, D.M., eds., Tectonics, Climate, and Landscape Evolution: Geological Society of America Special Paper 398, Penrose Conference Series, p.55-74.