

울산단층북부 갈곡리 치실 지점의 마지막 단층 운동시기 결정 Determination of the latest fault movement by trench survey at Galgok-Chisil site in the northern Ulsan fault system

최원학* 장천중* 井上大榮** 田中竹延***
Choi, Weon Hack, Chang, Chun Joong, D. Inoue, T. Tanaka

ABSTRACT

Along the Ulsan Fault System, many Quaternary faults have been reported and investigated with outcrop observation and trench excavation to clarify the neotectonic movements and fault parameters such as length, displacement, slip rate and recurrence interval. In the northern part of the Ulsan fault system, we have interpreted small scale(1:10,000) aerial photographs and extracted lineaments by geomorphological features to select trench site. After precise field survey and tracing for lineaments, two trench sites at Galgokri, Gyeongju were selected on the lineament to elucidate the fault movement history. One is successful in finding faults but the other is not. In the Galgok-Chisil trench(3m(w) x 1.5m(d) x 10m(l)), very closed two Quaternary faults cut the alluvial deposits of which age shows about 10-3ka. More than three times of fault movements can be inferred by geologic structures and C-14 dating. Repeatedly fault movements had been occurred before 10 ka, between 10ka-4.9 ka, between 4.9-1.4 ka at Galgok-Chisil trench section.

1. 서론

최근 들어 국내외에서 대규모 지진 발생과 그로 인한 쓰나미 발생 등으로 단층의 활동성에 대한 관심이 높아졌다. 1980년대 초에 한반도 남동부의 양산단층의 활성여부의 논란이 제기되고, 1990년대에 제4기 동안 단층운동의 보고와 함께 우리나라에서도 제4기 단층 운동과 관련된 신기 지체구조(Neotectonics)에 대한 연구가 이루어지고 있다⁽¹⁾. 특히, 1997년 경주에서 발생한 경주지진을 계기로 하여 지진 발생과 단층과의 연관성에 대하여 논의가 시작되었고, 특히 제4기 단층의 특성중 단층길이, 변위량, 운동시기와 재발주기 등에 대한 조사가 진행되었다⁽²⁾. 이후에 한반도 남동부 지역에 대한 지속적인 조사와 연구의 결과에 따르면, 양산단층과 울산단층, 그리고 해안선을 따라서 수십여 개의 제4기 단층노두가 보고되고 있다. 국내에서의 제4기 단층 또는 활성단층에 대한 연구는 연구 연혁이 짧고 지표 지진단층이 나타나지 않고 있어서, 지표 또는 하천변에 노출된

* 정회원 · 한전 전력연구원

** 일본 전력중앙연구소(CRIEPI)

*** 일본 Hanshin Consultants Co. Ltd.

단층 노두에 대한 기초적인 수준의 지질학적 기재와 단편적인 보고에 머물고 있다. 다만, 최근에 울산단층 동측에 발달하고 있는 왕산, 마동, 감산사, 원원사, 개곡 및 입실 단층 등의 제4기 단층에 대한 자료들을 종합하여 이들 단층에 의한 제4기 지구조 운동에 대하여 논의한 바 있다⁽³⁾. 또한 단층운동의 재발주기에 대한 평가도 연대측정결과에 의하여 부분적으로 수행되었다⁽⁴⁾.

이 연구에서는 울산 단층계의 북부에 해당하는 경북 경주시 천북면 갈곡리 주변지역에서 제4기 단층활동성 평가를 위하여 정밀 항공사진 분석, 선형구조 도출, 현장 지질조사를 실시하였다. 선형구조와 지형분석을 통하여 갈곡 치실 지점과 갈외교 지점 등 2개의 트렌치 지점을 선정하고 굴착하였으며, 제4기 단층의 운동시기와 재발주기 등 단층의 제반특성을 정확히 파악하고자 하였다. 갈곡 치실 지점에서는 두 조의 제4기 단층이 관찰되었으나, 갈외교 지점에서는 단층의 흔적을 찾을 수 없었다. 이 논문에서는 갈곡-치실지점에서 실시된 트렌치의 단면에 대한 정밀 스케치와 구조지질학적 해석을 통해 단층 운동 순서를 결정하고, 유기물을 이용하여 C-14 연대를 측정하여 단층의 운동시기와 순서를 결정하였다.

2. 기존 트렌치 조사 및 선형구조 조사

2.1 기존 트렌치 조사

울산 단층계의 북부 지역중 갈곡리 천북 목장과 그 남부에서 이미 트렌치 조사를 실시한 바가 있다⁽⁵⁾. 이 지점에서 단층으로 추정되는 남북 방향의 선형구조가 약 1 km의 길이로 서쪽으로 휘어진 모양으로 관찰되며, flexure scarp를 형성하고 있다. 경재복(1999)은 동측 산록에서 서측으로 3개의 단구면(중위 2개면, 저위면)을 기재하고 단층선에 따라서 이들 단구면이 변위되어 동측이 상승한 역단층의 성격을 보이고 있기 때문에, flexure scarp을 따라 5개 지점에서 트렌치 조사가 수행하였다. 지표 지형면의 변위량은 중위면인 M1면에서 약 5 m, M2 면에서 약 3 m, 저위면인 L면에서 1 m로 각각 계산하였다⁽⁶⁾.

트렌치 조사의 단면해석 결과에 따르면 2조의 역단층이 발달하고 있으며 이를 각각 F1과 F2로 이라 명명하였다. F1 단층은 주향과 경사가 N50°E, 70°SE, F2 단층은 N09°E, 38°SE로 측정되었다. 트렌치 단면상에서 단구내의 물질에서 측정된 ¹⁴C 연대는 최상부에서 1,560±60 yr BP, 중부에서 13,760±140 yr BP, 14,010±240 yr BP와 그 하부에서 25,750±240 yr BP로 이들 연대와 단면 해석을 통하여 단층 운동이 14,000~25,000 yr BP 사이에 일어났다고 추정하였다⁽⁶⁾. 단구면상에서 변위는 각 단구면마다 다르게 나타. 나며, 오래된 단구면일수록 커져서 단층변위의 누적성이 확인되며, 하위면 퇴적 후에 2~3 회, 중위면 퇴적 후에 1~2 회 정도의 단층운동을 산정하였다. 지형면의 변위로부터 1회의 운동량을 단층이 2회인 경우 1.9 m, 3회를 가정할 경우 1.1 m로 해석하였다. 평균적인 변위율은 0.1~0.08 mm/yr로 계산되었으며, 단층 경사각이 지표에 가까울수록 완만해지는 특성을 보여준다.

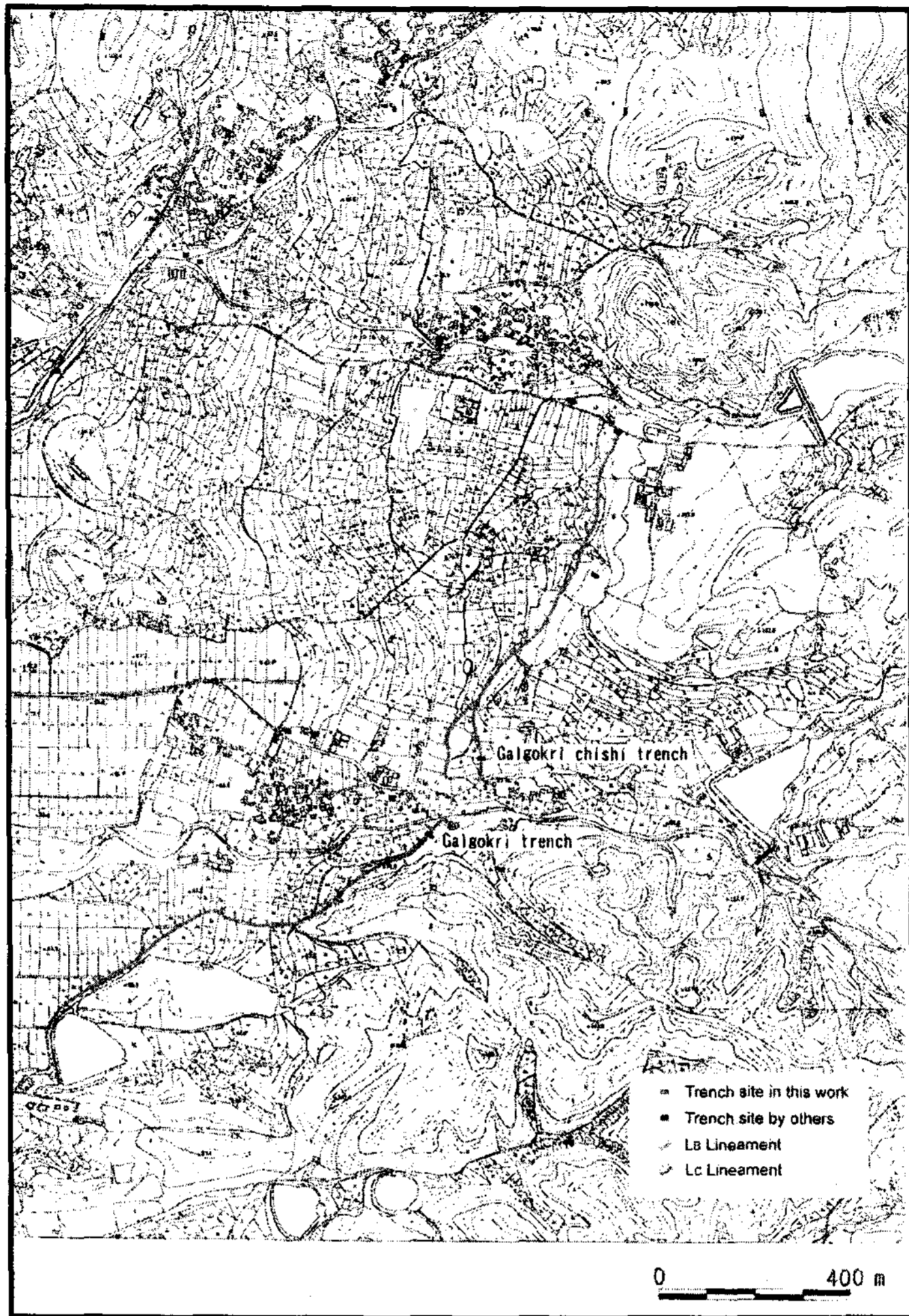


그림 1. 경북 경주시 천북면 갈곡리 주변의 선형구조 분포와 트렌치 지점

2.2 선형구조 조사

울산 단층계의 북부지역중 갈곡리 주변에 노출되어 있는 제4기 단층 노두는 직접적으로 확인하기 어렵다. 하지만 항공사진 분석과 현장조사를 통하여 단층운동에 의해 형성된 선형구조를 확인할 수 있다(그림 1). 이 지역에 발달하는 선형구조의 등급은 LB와 LC로 상대적으로 활동성이 높지 않으나 동일한 단구면상에서 변위를 지시한다. 선형구조가 직선형태보다는 남동방향으로 불룩한 형태를 띠며 기존 지형과 평행한 양상을 보여, 역단층 운동에 의해 형성된 선형구조로 판단된다.

천북목장 정문에서 시작하는 LB 등급의 선형구조는 N20-30°E 방향을 가지고 남서로 연장되다가 갈곡리 치실지점에서 N20°E방향과 N10°W방향의 선형구조로 분기된다(그림 1). 분기된 선형구조중 서쪽의 선형구조를 따라 가옥이 형성되어 있어 트렌치 지점으로 부적합하였으며, 동측의

선형구조는 경작이 끝난 밭을 관통하고 있어 트렌치 지점으로 선정하였다. 선형구조를 따른 지형 변위는 동측이 융기한 양상을 보이며 1m 내외의 낙차를 보인다.

N60°E방향의 선형구조는 LC등급으로 갈곡리 하천에 위치한 갈외교에서 산록과 논외 경계를 따라 남서측의 저수지까지 연장된다. 항공사진상에서는 선형구조를 중심으로 지형의 낙차를 보여주자 현장조사결과 전답의 개발과 수로 형성 등으로 정확한 선형구조 통과 지점을 확인하기는 어렵다. 갈곡-갈외교 남서측에 있는 수로를 가로지르는 트렌치에서는 단층이 나타나지 않았다.

3. 트렌치 단면해석 및 연대측정

경주시 천북면 갈곡리 치실의 밭에 남아있는 N20°W 방향의 완만한 경사를 가진 단층애에 거의 수직인 N72°E방향으로 길이 10m, 폭 2.5m 깊이 1.5m 제원의 트렌치를 굴착하였다. 트렌치 단면에 분포하는 지질은 선상지 환경에서 형성된 것으로 판단되는 쇄설성 퇴적층들이 분포한다(그림 2와 3). 퇴적층은 구성입자의 크기, 기질의 종류 및 색, 분포 위치 등 의해 모두 6개 층준(KB, KC, KDa, KDb, KDc, KDd)으로 구분되는데, 대부분 아각형 내지 아원형의 형태의 역들을 포함하는 역질층으로 구성되고 사질층이 일부 분포한다(그림 4와 5).

KDd층은 단층 상반에 분포하며, 이 지점에 분포하는 퇴적층의 최하위 층준으로서 황갈색 내지 암갈색의 사질 기질 내에 잔자갈 내지 왕자갈 크기의 역들을 포함하는 역층이다. 이 층은 서쪽으로 27° 내외의 경사를 이루는 층리구조가 뚜렷하게 발달되어 있는 것이 특징이며, 단층면과의 인접부에는 지하수 유동에 의해 기질의 일부가 제거되어 빈 공간으로 남아있는 것이 관찰된다. KDc층은 두 조의 단층 사이에 제한적으로 분포하며, 주로 황갈색의 사질층으로 구성된다. 간혹 잔자갈 크기의 역들을 드물게 포함하는 이 층은 부분적으로 층리면이 뚜렷하게 관찰되나 단층작용에 의한 변형으로 심하게 굴곡된 형태를 이룬다. 층리는 전반적으로 단층면과 거의 평행한 동쪽에서의 경사를 이룬다. KDb층은 단층 하반의 최하위 층준으로서 잔자갈 내지 표력 크기의 역들로 구성된다. 기질은 황갈색과 회색이 서로 혼재하는 색을 띠며, 사질보다는 점토질이 우세하다. KDb층 상위에 분포하는 KDa층은 주로 잔자갈 내지 왕자갈 크기의 역으로 구성되고 황갈색의 사질 기질을 갖는다. KDb층과 KDa층 내에는 뚜렷한 층리구조가 관찰되지 않는다. KC층은 하위의 KDa층과는 심하게 굴곡된 경계면을 이루고 있으며, 두 조의 단층 중 하위의 것과 KC층 상위를 직접 덮으면서 분포한다. 이것은 이 층의 퇴적 직전에 침식작용이 발생했음을 암시한다. 북측 단면에서의 이 층은 황갈색의 함력 니사질층으로 분포하나, 남측 단면에서는 진자갈이 우세한 역층으로 접이한다. 트렌치 지점의 퇴적층 최상위 층준을 이루는 KB층은 단층 상반 및 하반에 걸쳐 분포하며, 주로 갈색의 니사질층으로 구성되고 암회색의 얇은 표토층이 일부 혼재한다.

트렌치 단면 스케치와 구조해석, 제4기층내 유기물의 연대측정을 실시하여 단층의 운동시기를 결정하였다. 갈곡-치실지점의 트렌치 단면에서 관찰된 단층 운동의 횟수는 최소한 3회 이상이며, 단층의 마지막 운동시기는 1,440±40에서 4,930±40 y B.P. 사이이며, 그 이전의 단층운동은 4,930±40 y B.P.에서 9,480±50y B.P. 사이에 있었다. 또한 단층 상반에 있는 층상의 역층이 동에서 서로 약 30°내외의 경사를 가지고 발달하며, 이 층을 절단하는 단층은 약 10,000년 이전부터 반복적으로 운동을 하였으며 상당한 변위를 가질 것으로 보인다.



그림 2. 경북 경주시 천북면 갈곡리 치실지점 트렌치 단면의 북측 사진

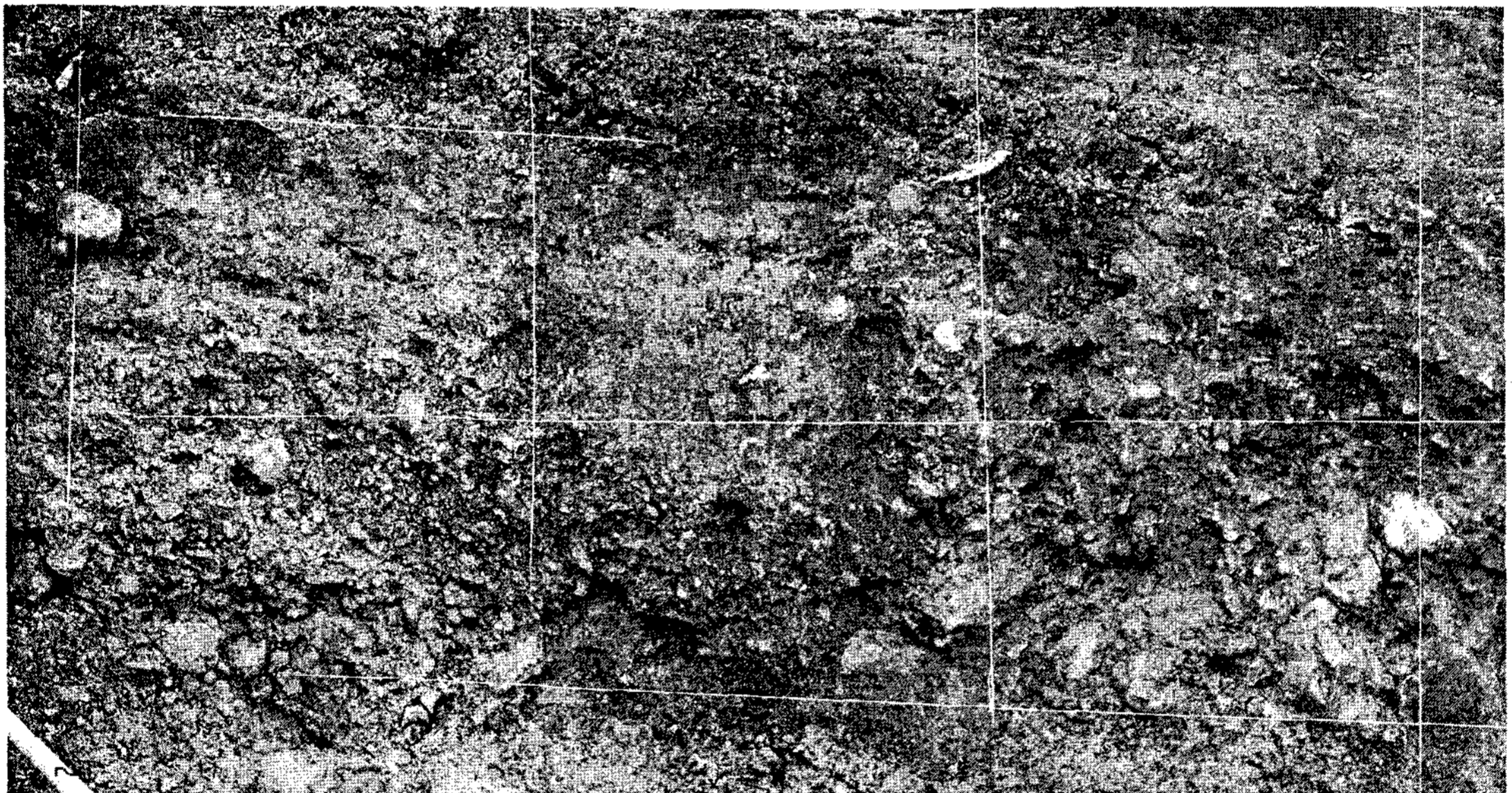


그림 3. 경북 경주시 천북면 갈곡리 치실지점 트렌치 단면의 북측 사진

표 1. 경북 경주시 갈곡리 치실지점 트렌치 단면상에서 채취된 시료와 C-14 연대

Sample No.	C-14 age	Sample type	Sampling layer
GS-C1	2,840±40	Humic sediments	KC
GS-C2	-740±30	Charcoal	
GS-C3	4,930±40	Humic sediments	KC
GS-C4	1,440±40	Humic sediments	KB
GS-C5	7,910±50	sediments	KB
GS-C6	10,580±50	sediments	KB
GS-C7	9,480±50	sediments	KD

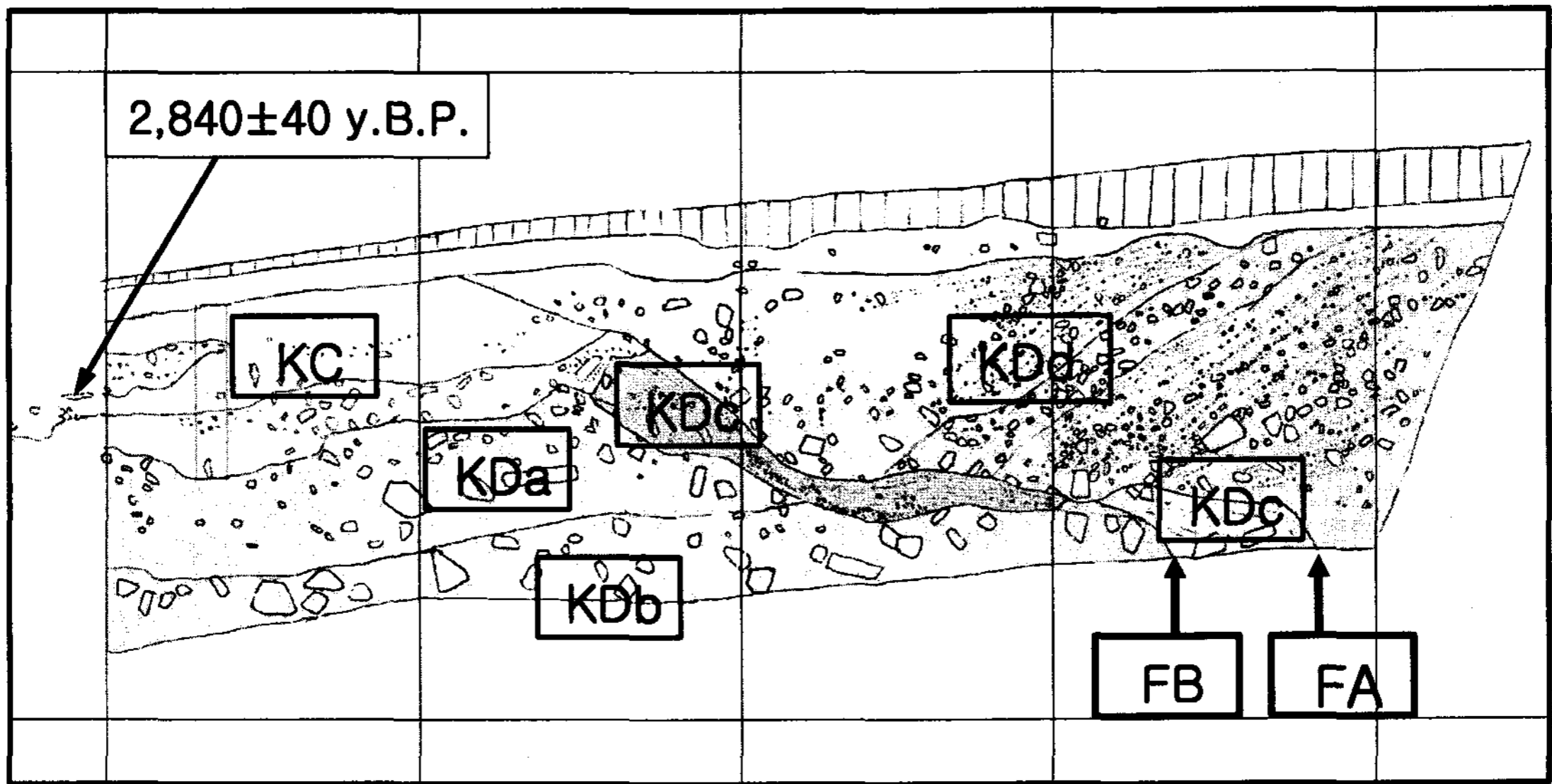


그림 4. 경북 경주시 갈곡리 치실지점 트렌치 북측 단면의 스케치와 연대 측정자료

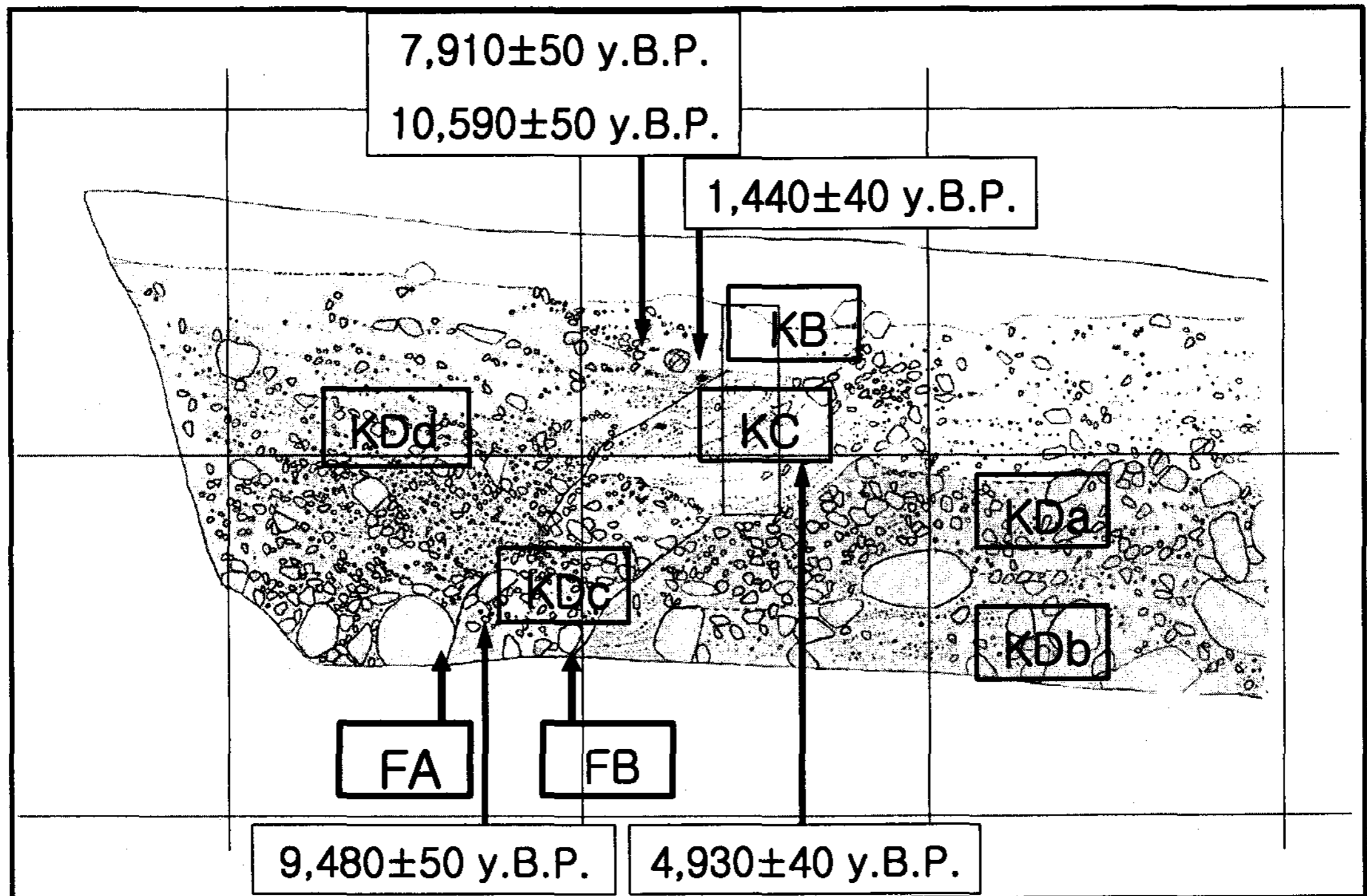


그림 5. 경북 경주시 갈곡리 치실지점 트렌치 남측 단면의 스케치와 연대 측정자료

4. 결 론

울산 단층계의 북부에 발달하고 있는 제4기 단층의 특성을 파악하기 위하여, 항공사진(축척 1 : 10,000)을 정밀 분석하고 선형구조를 도출하였다. 기존에 트렌치 조사와 새롭게 도출된 선형구조를 근거로 하여 정밀 지질조사를 실시하고 지형분석을 통하여 2개의 굴착지점을 선정하였다. 갈곡치실 트렌치에서는 단층이 관찰되었으나, 갈곡-갈외교에서는 나타나지 않았다. 경주시 천북면 갈곡리 치실의 발에 남아있는 N20°W 방향의 완만한 경사를 가진 단층애에 거의 수직인 N72°E방향으로 길이 10m, 폭 2.5m 깊이 1.5m 제원의 트렌치를 굴착하였다. 갈곡-치실지점의 트렌치 단면에서 관찰된 단층 운동의 횡수는 최소한 3회 이상이며, 단층의 마지막 운동시기는 1,440±40에서 4,930±40 y B.P. 사이며, 그 이전의 단층운동은 4,930±40 y B.P.에서 9,480±50y B.P. 사이에 있었다. 또한 단층 상반에 있는 층상의 역층이 동에서 서로 약 30°내외의 경사를 가지고 발달하며, 이 층을 절단하는 단층은 약 10,000년 이전부터 반복적으로 운동을 하였으며 상당한 변위를 가질 것으로 보인다. 이러한 트렌치 결과와 연대측정자료, 운동시기의 결과는 울산단층계의 중남부의 단층 요소(변위속도, 재발주기 등)를 비교함으로써 울산단층의 분절화와 지진 활동성을 평가하고 주요 최대잠재지진평가 및 주요 설비의 지진안전성 평가에 중요한 자료로 활용될 수 있다⁽⁹⁾.

참고문헌

1. 최원학, "경주-울산간 신기 지체구조 운동의 연구", 박사학위논문, 서울대학교, 2003. pp. 205.
2. 최위찬, 최성자, 조동룡, 이영준, 류충렬, 고인세, 신형모, 송미주, 신기지가변형연구, 과학기술부, 한국자원연구소, 2000, 278p.
3. 장태우, "울산단층 동쪽지괴의 제4기 조구조 운동", 지질학회지 37, 2001, pp. 431-444.
4. 최원학, 장천중, 이종립, "연대측정자료를 이용한 단층활동주기 산정방법", 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 제5권, 제1호, 2001, pp. 74-80.
5. Okada, A., Takemura, K., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J. B., Chae, Y.H., Taniguchi, K., Ishiyama, T., Kawabata, D., Kaneda, H., and Naruse, T., Trench excavation survey across the Ulsan (active) fault at Kalgok-ri, Kyongju City, Southeast of Korea, Jour. Geography 108, 1999, 276-288(in Japanese).
6. 경재복, 양산단층계 및 울산단층계의 지진활동과 구조. 한국과학재단 KOSEF 96-0703-050-01-03, 1999, 114-163.
7. 최원학, 장천중, 井上大榮, 柳田誠, 佐々木俊法, 田中竹延, "트렌치 조사를 통한 울산단층 남부의 마지막 단층운동 시기 결정", 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 제8권, 제1호, 2004, pp. 79-86.
8. Choi, Weon Hack, Neotectonic of the Gyeongju-Ulsan area in the southeastern part of Korean Peninsula, KMA/METRI International Workshop on the Fundamental Research for Mitigating Earthquake Hazards, 2004, pp. 5-8.
9. de Polo, C. M. and Slemmons, D. B., "Estimation of earthquake size for seismic hazards", in E. L. Krinitzsky and D. B. Slemmons eds, Neotectonics in earthquake evaluation. Geological Society of America, Review in Engineering Geology 8, 1990, pp. 1-28.