

# 양산단층대 남부 제 4기 단층에 대한 ESR 절대연대 측정

이희권\*, 양주석

강원대학교 자연과학대학 지질학과

## 1. 서론

한반도의 남동부에는 핵발전소를 비롯한 많은 산업시설들이 건설되어 있다. 양산 단층계가 한반도의 남동부에 위치하고 있으므로 양산단층계의 시간·공간적 활동형태의 특징은 이 지역의 지각 안정성을 평가하는데 중요한 자료를 제공한다. 단층의 마지막 활동시기를 결정하고 단층대의 기하학적 특징 및 다른 지질구조요소를 종합 분석하여 단층대의 활동 특성을 파악할 수 있다. 이번 연구에서는 제 4기 단층의 절대연령 측정법 중에서 ESR 절대 연령 측정 방법을 이용하여 양산단층대의 상천 1지점, 가천 1지점, 가천 2지점, 그리고 조일지점에서 채집된 단층암 시료의 연대를 측정하고, 지질 구조 특성 및 시간·공간적 활동형태의 특성을 파악하였다.

## 2. 본론

### 2.1 상천 1지점

울주군 상남면 상천리 중남초등학교 동측에 신설된 35번 국도변에 선상지퇴적층과 화강암이 단층접촉을 하고 있다. 이 단층의 주향과 경사는  $N23^{\circ}E/90^{\circ}$ 이다. 이의 북측 연장선인 중남초등학교 정문 앞의 삼남 농협창고 남측 밭에서 트렌치 조사가 실시되었다. 단층을 경계로 동측은 파쇄된 화강암이 분포하고 있으며, 서측은 안산암역을 포함하는 제 4기의 선상지퇴적층이 분포한다.

울주군 상남면 상천리 중남초등학교 동측에 신설된 35번 국도변 노두의 단층암대는 4개의 단층비지띠와 한 개의 미단층 각력암띠로 구성되어 있으며, 각각의 단층암띠의 경계부는 명확한 단층면으로 경계되어진다. 4개의 단층비지띠와 1개의 미단층각력암띠는 한 번의 단층 활동 중에 전단변형의 세기의 차이에 의해 형성되었다기보다는 단계적으로 여러 번의 단층 활동에 의해 단층암석대가 진화되었다고 여겨진다.

트렌치 조사를 실시한 곳의 밑바닥에는 약 2개의 단층비지띠와 1개의 미단층각력암 띠가 발달한다. 노두에서의 4개의 단층비지띠와 1개의 미단층 각력암띠가 트렌치를 실시한 곳에서는 2개의 단층비지띠와 1개의 미단층각력암띠로 감소하였다. 이는 주향방향 또는 경사방향으로 단층암석대 형태의 변화를 암시한다. 즉 몇몇의 단층비지띠는 소멸되어 단층면으로 바뀐 것으로 추정된다.

ESR 절대연령 측정을 위해 상천 제 1지점의 트렌치를 실시한 장소와 35번 국도변 노두에서 총 8개의 시료를 채취하였으며 ESR 절대연령 측정 결과는 Sang 1 : >3,000 ka, Sang 2 : 850±240 ka, Sang 3 : 630±150 ka, Sang 4 : 520±50 ka, Sang 5 : 660±60 ka, Sang 6 : 540±60 ka, Sang 7 : 480±40 ka 그리고 Sang 8 : 340±30 ka이다.

상천리 중남초등학교 일대에 분포하는 주향이동 단층의 단층암대 진화과정을 추론하면 다음과 같다. 적어도 약 3백만 년 이전에 화강암에 단층이 형성되어 전단변형 작용에 의해 쇄설성 엽리가 잘 발달된 쇄설암(cataclasite)을 발달시켰다. 그 이후 제 4기에 선상지 환경에서 이 지역에 퇴적층이 퇴적되었다. 약 66만년 전에 이 단층이 재활동 함으로써 쇄설암 남서쪽에 약 2.5 cm 두께의 단층비지띠를 형성하였다. 약 54만년 전에 이 단층이 재활동 할 때 단층암석대 진화양상 I(Type I faulting mode)에 의해 기존의 단층비지띠 남서쪽에 새로운 단층비지띠가 형성되었다. 약 52만년 전에 기존의 단층암띠 북동쪽에 약 1 cm의 단층비지띠를 형성하였고 화강암과 제 4기 퇴적암은 단층접촉(약 48만년 전)을 하게 되었으며, 화강암과 퇴적암 접촉부에 약 4 cm 두께의 미 단층각력암띠를 형성하였다. 그 이후 약 34만년 전에 이 단층이 마지막 재활동 할 때 주 단층면인 남서쪽 단층면 주변에 부분적으로 단층비지띠를 마찰(attrition) 변형작용에 의해 발달 시켰다. 트렌조사 지점에서는 약 85만년 전과 63만년 전에 재활동하였다. 이상을 종합하면 이 단층은 약 85만년 전 부터 35만년 전까지 적어도 6번 이상 재활동하였으며 주로 Type I 의 단층암석대 진화양상에 따라 단층암대의 두께를 증가시켰다.

## 2.2 가천 1지점

경상남도 울주군 삼남면 가천리에 경부고속도로의 서쪽 시냇가에 높이 2 m, 가로 1 m 규모의 하천 노두에 단층(가천 1지점)이 이암과 제 4기로 추정되는 역암 사이에 발달되어 있다. 단층암대의 폭은 약 110 cm이며, 단층면의 방향은 N10oE/76oSE이다. 단

층암대는 5개의 단층암띠(fault rock band)로 구성되어 있으며, 제 4기 역암이 분포하는 서쪽으로부터 약 4-12 cm의 폭을 가지는 담갈색의 단층비지띠(시료, Kachon 1-1), 두께 약 8 cm의 암회색의 단층비지띠(시료, Kachon 1-2), 약 90 cm 두께의 고화된 단층비지띠(시료, Kachon 1-3), 두께 약 3 cm이며 녹색을 띠는 전단띠(시료, Kachon 1-4) 및 이암과 단층비지대의 경계부에 경계전단띠(시료, Kachon 1-5)가 약 1 cm 이하의 두께를 가지고 발달되어 있다.

하천 노두에서 남쪽으로 약 3 m 50 cm 떨어진 곳의 트랜치 조사 결과 단층암대는 폭이 약 40 cm이며, 단층면의 방향은 N130E/730SE이다. 이 단층암대는 이암이 분포하는 동쪽에서부터 약 9.5 cm의 폭을 가지는 담갈색의 단층비지띠(시료, Kachon T-1)에는 파쇄엽리가 발달해 있으며, 하천노두의 1-3에 대비된다. 두께 약 6 cm의 괴상의 단층비지띠(시료, Kachon T-2)는 하천노두의 1-2에 대비되며, 폭이 약 9.5 cm인 파쇄엽리가 발달한 단층비지띠(시료, Kachon T-3)는 하천노두의 1-1에 대비된다. 파쇄엽리와 괴상이 함께 나타나는 단층비지 물질이 역암쪽으로 주입되어 있는 부분에서 시료(Kachon T-4)를 채취하였다. 하천노두에서 남쪽으로 약 24 m 30 cm 거리에 있는 곳의 트랜치 조사 결과, 두께 약 23 cm의 엽리가 발달된 단층비지띠가 발달되어 있으며, 단층면의 방향은 N250E/850SE이다. ESR 절대연대 측정을 위해 이 단층비지띠에서 시료를 채취하였다(시료, Kachon T-5). ESR 절대연대 측정 결과는 Kachon 1-1 : 1,010±190 ka, Kachon 1-2 : 1,000±260 ka, Kachon 1-3 : 1,290±250 ka, Kachon 1-4 : >3,000 ka, Kachon 1-5 : >3,000 ka, Kachon T-1 : 1,400±100 ka, Kachon T-2 : 1,150±70 ka, Kachon T-3 : 1,150±110 ka, Kachon T-4 : >3,000 ka 그리고 Kachon T-5 : 1,160±110 ka이다.

하천 노두의 Kachon 1-4와 1-5 그리고 트랜치 조사중에 채취한 시료 T-4는 ESR 신호가 포화되어 ESR 연령을 구할 수 없었으며, 하천노두에서 채취한 시료(Kachon 1-3), 하천노두에서 남쪽으로 3.5 m 떨어진 트랜치에서 채취한 시료(Kachon T-1)의 ESR연령이 오차한계 내에서 일치한다. 또한 하천노두에서 채취한 시료(Kachon 1-1과 1-2)와 하천노두에서 남쪽으로 3.5 m 떨어진 트랜치에서 채취한 시료(Kachon T-2와 T-3) 및 하천노두에서 24.5 m 떨어진 트랜치에서 채취한 시료(Kachon T-5)의 ESR연령이 오차한계 내에서 일치한다. 따라서 가천 1지점에서의 단층은 약 130-140만년 전, 100-120만년 전에 재활동하였으며, 단층암대는 Type II의 활동형태에 따라 진화하였다.

### 2.3 가천 2지점

가천 1지점에서 시냇가를 따라 동쪽으로 약 500 m 떨어진 노두에는 제 4기 역암과 백악기 이암이 부정합적으로 놓여 있으며, 여기에 단층이 제 4기 역암과 이암 사이에 발달되어 있다. 단층비지띠는 60-90 cm 정도의 폭을 가지고 있으며, 단층면의 방향은 N37°E/80°NW이다. 단층암대에는 전단띠와 칼집습곡이 발달하여 있으며, 칼집습곡의 습곡축면의 방향은 N87°W/53°NE이며, 습곡축은 41°→056°이다. 가천 2지점에서의 단층비지띠는 2개로 나뉘어지며 역암 쪽에 발달한 단층비지의 색은 암녹회색이며 두께는 약 10-20 cm이다. 이암 쪽에 발달한 단층비지는 폭이 5-10 cm 정도이며 색은 녹회색이다. 파쇄엽리가 양쪽 경계부에 잘 발달하여 있으며 엽리면의 방향은 N33°E/90°이다. 가천 2지점에서 두 개의 시료를 채취하였다. 가천 2-1은 역암쪽에 발달한 단층비지(시료, Kachon 2-1)를 채취한 것이며, 가천 2-2는 이암쪽의 단층비지(시료, Kachon 2-2)를 선택하였다. ESR 절대연령측정 결과는 Kachon 2-1 :  $750 \pm 90$  ka, Kachon 2-2 :  $830 \pm 130$  ka이다. 두 시료의 ESR 연령이 오차내에서 일치한다.

### 2.4 조일지점

경남 울주군 삼남면 동서기계 주식회사 뒤쪽에 발달한 조일지점의 노두는 길이 약 15 m, 높이 3 m이다. 이 노두에는 백악기 이암과 제 4기 역암이 단층접촉을 하고 있다. 백악기 이암과 제 4기 역암 사이 단층대의 폭은 20-110 cm 정도이다. 단층암대는 두 갈래로 갈라져 있으며 두 단층암대 사이에는 변형을 받은 이암이 분포하고 있다. 제 4기 역암 쪽에 발달한 단층비지띠는 폭이 8 cm이며 갈색을 띤다. 단층면의 방향은 N32°E/80°SE이며 단층비지에는 파쇄엽리가 발달되어 있다. 백악기 이암 쪽에 발달한 단층비지띠는 폭이 수 mm - 1 cm이며 자주색을 띤다. 단층면의 방향은 N20°E/62°SE이며 단층비지에는 파쇄엽리가 발달하여 있다. 조일지점에서는 2개의 시료를 채취하였다(조일 1, 2). 조일 1은 역암쪽의 단층비지대(시료, Joil 1)에서 채취하였으며, 조일 2은 이암쪽의 단층비지대(시료, Joil 2)에서 채취하였다. ESR 절대연령측정 결과는 Joil 1 :  $800 \pm 100$  ka, Joil 2 :  $830 \pm 190$  ka이다.

Joil 1과 Joil 2의 ESR 연령이 오차 한계 내에서 같으므로 조일지점에서의 단층이 두 갈래로 갈라져 있으나 동시에 마지막 활동을 한 것으로 여겨진다.

## 3. 결론

상천 1지점, 가천 1지점, 가천 2지점 및 조일지점에 발달한 단층들은 양산단층대를 따라 약 9 km 떨어져 있지만 고각도의 경사를 가지며 거의 평행한 주향이동단층들로서 양산단층대를 구성하고 있다. 이번 연구의 결과 가천 1지점에서의 단층은 약 130-140만년 전, 100-120만년 전에 재활동하였으며, 단층암대는 Type II의 활동형태에 따라 진화하였다. 가천 2지점과 조일지점에 발달한 단층의 마지막 운동시기는 약 80만년 전으로 오차한계 내에서 일치한다. 단층 비지씨의 두께, 모암, 조사율, 상응조사량, 수분 함량 등이 다름에도 불구하고 두 지점 사이의 거리가 약 7 km 떨어져 있는 단층의 ESR 연령이 일치한다는 것은 ESR 신호가 단층활동 중에 영이 된 증거이며, 이 단층들의 마지막 활동 시기로 간주 할 수 있다. 가천 1지점에서 양산단층대를 따라 북동쪽으로 약 1.5 km 떨어져 있는 상천 1지점의 단층은 약 85만년 전부터 35만년 전까지 적어도 6번 이상 재활동 한 것으로 보고되었다(최위찬외, 1998). 따라서 상천 1지점부터 조일지점까지 길이 약 9 km 이상의 양산단층대가 각각 약 130-140만년 전, 100-120만년 전, 85만년 전, 80만년 전, 65만년 전, 55만년 전, 50만년 전 그리고 35만년 전에 재 활동했음을 알 수 있다. 이는 동시에 활동한 단층 자취의 최소 길이이며, 상천 1지점 북동쪽이나 조일지점 남서쪽으로는 연장은 이번 연구에서는 확인이 되지 않았다. 육지에서 확인된 길이만 해도 약 170 km인 양산단층대가 동시에 단층활동을 했을 가능성은 거의 없으며 분절된 단층대를 따라 단층들이 재 활동했을 가능성이 높다. 따라서 양산단층대를 따라 체계적으로 단층암 시료를 채취하여 마지막 운동시기를 결정한다면 각각의 활동 기간에 운동한 단층대의 길이를 유추할 수 있을 것이며, 이 자료를 이용하여 양산단층대의 시·공간적 활동형태를 규명할 수 있을 것이다.

#### 4. 참고문헌

Lee, H.K., and Schwarcz, H.P. (1996). ESR plateau dating of periodicity of activity on the San Gabriel fault zone, Southern California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 108, 735-746.

최위찬 외 45인, 1998a. 양산단층을 고려한 설계기준지진의 재평가. 최종보고서, 제1권, 한국자원연구소, 한국전력공사.