

지질학회지 제 54권 제 4호, p. 335-357, (2018년 8월) J. Geol. Soc. Korea, v. 54, no. 4, p. 335-357, (August 2018) DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2018.54.4.335 ISSN 0435-4036 (Print) ISSN 2288-7377 (Online)

충청북도 음성군 쌍정리 지점에 발달한 금왕단층의 특성 및 ESR 연대

원효정 · 이희권^{*}

강원대학교 지질학과

요 약

쌍정리 지점의 금왕단층은 쥐라기 흑운모 화강암에서 유래한 뚜렷한 엽리를 가지는 파쇄암과 백악기 퇴적암 사이에 발달하여 있다. 단층비지로 구성된 단층핵은 지질구조적 특성에 따라 5개의 영역으로 구분되어진다. 기 존 연구에 따르면 금왕단층은 백악기에 좌수향 주향이동 단층운동이 우세한 것으로 보고되었으나, 이번 연구에 서 단층핵에 발달된 지질구조 요소들은 제3기 이후에는 우수향 주향이동 운동이 우세했던 것으로 해석된다. 단 층핵과 손상대로부터 얻은 총 27개 시료 중 20개의 시료는 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었 으며, 나머지 7개 시료로부터 얻어진 ESR 연대는 약 50만 년 전~약 34만 년 전이다. ESR 연대를 갖는 이들 단 층비지띠들 폭은 약 8 cm로서 전체 단층비지 폭을 약 2 m로 볼 때, 약 4%만이 제4기에 재활동한 것으로 해석된 다. C 지점(340±20 ka)의 가중평균 ESR 연대는 A 지점(330±50 ka) 및 B 지점(320±20 ka)의 가중평균 ESR 연 대와 오차범위 내에서 일치한다. 이 세 지점으로부터 얻은 ESR 연대의 가중평균 ESR 연대는 330±10 ka이며, 금왕단층은 약 33만 년 전에 A 지점으로부터 C 지점에 걸쳐 적어도 약 10 km 이상의 연장성을 가지고 재활동 한 것으로 추정된다. 이번 연구에서 얻은 ESR 연대자료들을 해석한 결과, 쌍정리 지점에 발달한 금왕단층의 제 4기 활동패턴은 활동기와 비활동기로 나누어지며, 장주기를 가지고 여러번에 걸쳐 재활동 한 것으로 해석된다.

주요어: 금왕단층, 단층핵, 단층비지, 제4기 단층운동, ESR 연대

Hyo-Jeong Weon and Hee-Kwon Lee, 2018, ESR age and characteristic features of the Keumwang Fault developed in the Ssangjeong-ri, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 4, p. 335-357

ABSTRACT: The core of the Keumwang fault is developed between Jurassic biotite granite and Cretaceous sedimentary rocks at the Ssangjeong-ri site. The fault core consists of 5 bands of fault gouge which have characteristic features. Although the Keumwang fault was formerly considered to be sinistral strike-slip fault, structural elements in the fault core appear to show the dextral strike-slip fault movement after Tertiary period. 20 out of 27 samples collected from the fault core and damage zone are saturated, ESR ages of the other 7 samples range from 500 to 340 ka. Only 4% in width of the fault core reactivated in the Quaternary period. The ESR age (weighted mean: 340±20 ka) of the C site is consistent with ESR ages from A (weighted mean: 330±50 ka) to B (weighted mean: 320±20 ka) sites. This suggest that the Keumwang fault were reactivated at the same time in 330 ka ago about 10 km from location A to C. ESR ages obtained in this study suggest that the long term cyclic fault activities continued during the Pleistocene.

Key words: Keumwang fault, fault core, fault gouge, quaternary fault activity, ESR age

(Hyo-Jeong Weon and Hee-Kwon Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

1. 서 론

2016년 9월 12일 경상북도 경주시에서 발생한 규

모 5.8의 지진과 2017년 11월 15일 포항시 북구 흥해 읍에서 발생한 규모 5.4의 지진으로 인하여, 지진 및 지진을 일으키는 활성단층에 대한 관심이 증가되고

^{*} Corresponding author: +82-33-250-8558, E-mail: heekwon@kangwon.ac.kr

있다. 중·대규모 지진의 약 70% 정도는 활성단층에 서 발생하는 것으로 알려져 있으며, 지진에 의한 재 난을 예측 및 대비하기 위해서는 활성단층에 대한 조사 및 연구가 필수적이다(Kim *et al.*, 2011).

Choi (1996)에 의해 명명된 금왕단층은 충청북도 진천군~음성군 일대에서 음성분지 내에 분포하는 백 악기 퇴적암과 기반암인 쥐라기 흑운모화강암과의 경 계부에 발달해 있으며 강원도 인제군 설악산 일대까지 170 km의 연장성을 가진다(Choi, 1996; Lee and Kim, 2005; Choi and Choi, 2007; Kim and Lee, 2017).

단층핵 및 단층손상대에 관한 연구결과에 따르면 금왕단층은 약 1~50 m 폭의 단층비지로 이루어진 단층핵과 이를 둘러싼 약 30~100 m 폭의 단층손상 대로 이루어져 있다고 알려져 있다(Choi, 1996; Lee and Kim, 2011; Hong and Lee, 2012; Jang and Lee, 2012; Park and Lee, 2012; Kim and Lee, 2017). Kim and Lee (2016)은 금왕단층을 따라 분포하는 단층암의 특성을 분석하여 서로 다른 변형환경, 변형시기, 변 형기작에 의해 구별되는 최소 6단계의 단층운동에 대하여 보고하였다. 첫 번째 단계에는 좌수향 연성 전단에 의해 압쇄암 계열이 형성되었고, 두 번째 단 계에서는 취성변형환경에서 파쇄암 계열이 압쇄암 계열에 중첩되었다. 세 번째 단계인 백악기 초기에 금왕단층을 따라 단층비지가 형성되었으며, 좌수향 주향이동 운동으로 인하여 충청북도 음성군 일대에 인리형 퇴적분지(pull-apart basin)인 음성분지가 형 성되었다(Choi, 1996; Ryang and Chough, 1999; Ryang et al., 1999; Choi and Choi, 2007). 네 번째 단계에 서는 백악기에 금왕단층의 재활동으로 인하여, 퇴적 분지 내에 좌수향 주향이동 운동을 지시하는 안행상 의 습곡, 절리 및 단층 등의 지질구조가 형성되었다. 금왕단층을 따라 관입한 안산암(70~84 Ma; Cheong and Kim, 1999)에 우수향 주향이동 단층운동을 지 시하는 전단면과 전단띠가 발달하였으며, 이는 좌수 향 주향이동 운동에서 우수향 주향이동 운동으로 역 전현상이 일어난 것으로 해석하여 제3기에 다섯 번 째 단층운동이 일어난 것으로 해석하였다. 여섯 번 째 단계에서는 제4기에, 활동기에는 단층운동이 집 중적으로 일어나고 휴지기에는 일어나지 않았으며, 주향방향을 따라 단층운동이 이동하는 경향을 보여 준다고 보고하였다(Kim and Lee, 2016).

Hong and Lee (2012)는 A 지점에서 단층핵에서

북동방향으로 약 7 km 떨어진 B 지점(충청북도 음 성군 맹동면 두성리)에서, 폭이 약 3 m인 단층핵에 서 채취한 단층비지를 ESR 연대측정하여 710±70 ka, 480±40 ka, 330±20 ka의 재활동시기를 보고하였으 며 단층핵의 동쪽에서 서쪽으로 갈수록 ESR 연대가 젊어지는 경향을 보인다고 하였다(그림 1; Hong and Lee, 2012).

Bae and Lee (2014)는 진천군~음성군 일대(A 지 점; 충청북도 진천군 오갑리)에 발달한 폭이 약 1 m 인 단층핵에서 채취한 단층비지의 ESR 연대측정 결 과, 약 370±100 ka, 310±60 ka의 재활동시기를 보고 하였다(그림 1). 약 7 km 떨어진 A, B 두 지점의 단 층핵에서 ESR 연대가 오차범위 내에서 일치하며 화 강암과 단층핵의 경계부에 발달된 단층비지띠가 약 310~330 ka에 마지막으로 재활동한 것으로 보인다.

이번 연구의 목적은 첫째, C 지점(충청북도 음성 군 맹동면 쌍정리)의 단층핵에 발달한 지질구조 특성 을 제4기 동안의 금왕단층의 단층운동감각을 규명하 는데 있다. 둘째, Hong and Lee (2012)가 보고한 단 층핵(B 지점)에서 주향방향을 따라 약 3 km 떨어진 음성군 쌍정리 지점(C 지점)에 노출된 단층핵으로부 터 단층비지를 채취하여 ESR 연대를 얻어 A, B 및 C 지점의 ESR 연대를 비교 및 분석하여 금왕단층의 남 서 말단부(A 지점; Bae and Lee, 2014)로부터 약 10 km (B, C 지점)에 걸친 금왕단층의 제4기 단층운동 특성을 파악하는데 있다.

2. 연구지역의 일반지질

연구지역에는 선캠브리아 누대 편마암류와 쥐라 기의 흑운모화강암을 기반암으로 하여, 백악기의 초 평충군이 분포하고 있다. 기반암과 초평충군은 금왕 단층과 공주단층을 경계단층으로 하여 접하고 있다 (그림 1). 쥐라기 화강암과 백악기 초평층군은 풍화 및 침식 정도의 차이에 의해 명확한 지형상의 고저 를 보인다(그림 2).

기반암에 해당하는 선캠브리아 누대 편마암류는 음성분지의 남동부에 걸쳐 분포하고 있으며(그림 1), 호상편마암과 화강암질 편마암으로 구성되어 있다. 호상편마암의 입자크기는 중립 내지 조립질이며(그림 3a, 3b), 일부 지역에서는 뚜렷한 편마구조를 보이지 않고 괴상의 형태를 보이기도 한다. 박편상에서 석영,

로 단일화하기도 하였다(Chun et al., 1993). 분지 형성 이후 분지를 충진한 퇴적물에 대하여 Kim and Cheong (1999)은 역암상, 사암상, 이암상 및 화산쇄설암상으 로 암상을 구분하였고 선상지, 선상지 평원 및 호수 환경으로 퇴적환경을 해석하였다. Choi (1996)는 역 암, 역질 사암 및 사암으로 구성된 역암 멤버, 적색 이 암, 사암 내지 역질 사암으로 구성된 적색 이암과 사 암의 호층 멤버, 적색 이암 멤버, 느리고 녹색 내지 흑 색 이암과 사암 내지 역질 사암으로 구성된 녹색 이 암과 사암의 호층 멤버 등 퇴적상을 고려하여 5개의 멤버로 나누었다. 이번 연구에서는 Cheong et al. (1976), 그리고 Choi and Choi (2007)의 지질도를 바탕으로 일부 수정하여 사용하였다(그림 1).

Ryang (2013)은 음성분지 경계부에는 조립질 충 적퇴적층이 우세하고 하류방향인 남쪽으로 진행될

흑운모, 백운모 등의 광물이 관찰되며 석영, 장석이 우세한 우백대와 흑운모, 백운모가 우세한 우흑대로 이루어진 명확한 호상구조가 관찰된다(그림 3c, 3d). 연구지역 북서부와 남동부에 걸쳐 넓게 분포하고

있는 쥐라기 흑운모화강암은 기반암인 선캠브리아 누대 편마암류를 관입하고 있으며 백악기 퇴적암과 는 단층접촉하고 있으며(그림 1), 비교적 풍화 정도가 심한 상태로 산출된다(그림 4a). 조립질의 등립상 조 직을 보이며(그림 4b), 현미경상에서 석영, 장석, 사장 석 및 흑운모가 주 구성광물로 관찰된다(그림 4c, 4d).

연구지역 중앙부에는 금왕단층을 따라 음성분지가 발달해 있다(그림 1). 음성도폭(Cheong et al., 1976) 에서는 분지 내 분포하는 퇴적층을 하부의 초평층과 상부의 백야리층으로 구분 짓고 이들을 초평층군이 라 명명하였으나(Cheong et al., 1976) 분지의 퇴적 환경을 고려해 분지 내 분포하는 퇴적층을 초평층으



Fig. 1. Geological maps of the study area and sampling locations. (a) Geologic map of Eumseong basin showing the sampling locations. (b) Inset map shows the study area and the Cretaceous sedimentary basins developed along the Kongju fault system (modified from Cheong *et al.*, 1976; Choi and Choi, 2007).

질 호소퇴적층이 퇴적되었다고 보고하였다. 지질조 사 결과, 역암/사암 호층대가 분지 북부 중앙에 분포 하는 것으로 인지되었다(그림 1). 역암은 흑색 내지 회색을 보이며, 역의 크기는 그래뉼 사이즈에서 약6 cm까지로 다양하게 나타난다. 역암의 역은 석영, 편 마암, 화강암 및 안산암 등의 암편으로 구성되어 있 으며, 기질은 사암 내지 조립질 사암으로 구성되어 있 다(그림 5a, 5b). 현미경상에서 역암의 기질은 석영입 자, 사장석 및 점토광물 등을 포함하고 있다(그림 5c, 5d). 역암층과 호층을 이루는 사암층은 흑색 내지 회 색으로 나타나며 사암의 입자크기는 중립 내지 조립 이다(그림 6a, 6b). 현미경상에서 석영입자와 기질로 이루어져 있으며 원마도는 낮은 편이며 분급도는 불 량한 편이다(그림 6c, 6d). 이암은 분지의 남서부에 우세하게 분포하고 있다(그림 1). 야외에서 적색 내 지 녹회색으로 나타나며 괴상의 또는 층리가 발달된 형태로 나타난다(그림 7a, 7b). 현미경 관찰시 점토 광물로 이루어져 있으며, 미립의 석영입자를 포함하 기도 한다(그림 7c, 7d). Choi et al. (1995)는 음성분 지 남단의 녹회색 내지 암회색 이암층에서 산출된 윤조화석 연구를 통하여 초평층군 하부 초평층의 지 질시대 하한은 백악기 초 오트리브세(Hauterivian), 상한은 백악기 초 압트세(Aptian)라 보고하였다.

3. 단층핵의 지질구조적 특성

3.1 단층핵의 지질구조적 특성 및 시료채취

맹동면 쌍정리 일대(북위 36°46′~37°02′, 동경 127°28′ ~127°37′)에는 단층비지로 이루어진 단층핵이 약 2 m 의 폭으로 발달되어 있다. C-1과 C-2 노두는 주향방 향으로 약 9 m 떨어져 있다. C-1 노두에 발달한 단층 핵의 북서쪽으로는 쥐라기 흑운모화강암에서 유래한 파쇄암이 분포하고 있으며, 파쇄암에는 N57°E/83°NW 의 방향을 가지는 파쇄엽리가 발달해 있다(그림 8). 남동쪽으로는 백악기의 역질 사암이 분포하고 있다. 단층핵의 북서쪽에는 파쇄암에서 유래한 폭이 약 20~ 50 cm인 단층각력암이 발달되어 있다. 단층각력암과 단층핵 사이에는 폭이 약 8~15 cm인 암회색 단층비 지띠가 발달해 있으며 단층면의 방향은 N36°E/87°NW 이다. 북서쪽으로는 역질 사암과 단층핵 사이에 폭이 약 3~12 cm인 암회색 단층비지띠가 발달되어 있으 며 단층면의 방향은 N43°E/85°NW이다(그림 9). C-2

수록 조립질과 세립질의 퇴적층이 교호하는 하천계 퇴적층이 발달해 있으며, 분지의 퇴적중심에는 세립

Fig. 2. Digital elevation model (DEM) of the study area showing the locations of localities A, B and C along the Keumwang fault. Black arrows indicate the trace of the Keumwang fault.





Fig. 3. Outcrop photographs (a, b) and microphotographs (c, d) of gneiss in the study area (Bt: biotite, Qtz: quartz).



Fig. 4. Outcrop photographs (a, b) and microphotographs (c, d) of biotite granite in the study area (Bt: biotite, Mc: microcline, Qtz: quartz).

쇄암이 분포한다. 단층핵과 역질 사암 사이에 폭이 약 20~25 cm인 괴상의 담회색 단층비지띠가 발달해 있

노두에 발달한 단충핵의 남동쪽에는 백악기의 역질 사암이 분포하며, 북서쪽에는 화강암에서 유래된 파



Fig. 5. Outcrop photographs (a, b) and microphotographs (c, d) of conglomerate in the study area (Rf: Rock fragment).



Fig. 6. Outcrop photographs (a, b) and microphotographs (c, d) of sandstone in the study area (Qtz: quartz).

색의 단층비지띠가 발달되어 있으며, 단층면의 방향 은 N27°E/88°SE이다(그림 15).

으며, 단층면의 방향은 N32°E/79°NW이다. 남동쪽 으로는 파쇄암과 단층핵 사이 폭이 약 7~10 cm인 황



Fig. 7. Outcrop photographs (a, b) and microphotographs (c, d) of mudstone in the study area.



Fig. 8. Outcrop photographs of the cataclasite in the study area. The dashed red lines showing the trace of the foliations developed with in the cataclasite.

3.1.1 C-1 지점

C-1 지점의 단층핵은 지질구조적 특성에 따라 5개 의 영역으로 구분되며(그림 10), 스테레오넷을 이용 해 각 영역에 발달되어 있는 지질구조요소의 방향성 분석을 실시하였다. Domain 1은 백악기 퇴적암과 단층핵 사이에 발달한 폭 약 3~12 cm의 암회색 비지 띠로 이루어지며(그림 10a, 10b), 점토광물의 정향배 열에 의한 엽리가 우세하게 발달되어 있으며, 원마도 가 좋은 0.5~3 cm 크기의 암편들이 단층비지 내에 포 함되어 있다. N36~43°E/84~89°NW 방향(Y-전단방 향)의 전단면 및 전단띠들이 우세하게 발달되어 있으 며, N01~23°E/47~85°SE 방향의 S-엽리면들이 우세 하게 발달되어 있다(그림 11c). N64~72°E/30~43°SW 방향의 인장단열면들이 발달되어 있는 것이 특징이 다. Domain 2는 단층각력암으로, 기질부에 전단띠 가 매우 잘 발달해 있으며 야외에서 관통상의 형태 로 나타난다(그림 10a, 10c). 주단층면과 유사한 주 향을 갖는 N32~43°E/68~89°NW 방향의 Y-전단면 들과 N09~15°E 및 N01~14°W 방향의 P-전단면들 및 N44~56°E/54~83°SE 방향이 우세한 R-전단면들 이 발달되어 있다(그림 11d). Domain 3은 단층각력 암으로, 기질부에 일부 전단띠가 발달된 형태를 보인 다(그림 10a, 10d). 주로 N04~20°W 내지 N03~21°E/ 70~88°NW 방향의 P-전단면 및 전단띠들이 우세하 게 발달해 있다(그림 11e). Domain 4는 단층각력암 으로, 기질부에 전단띠가 매우 잘 발달되어 있어, 관 통상의 형태로 관찰된다(그림 10a, 10e). 주로 N08~21°E/ 63~84°NW 또는 77~89°SE의 경사를 갖는 P-전단방 향의 전단면들이 발달되어 있다(그림 11f). Domain 5는 흑운모화강암에서 유래한 파쇄암과 단층핵 사 이에 발달된 암회색 비지띠로(그림 10a, 10f), 단층 비지띠 내에 발달한 엽리면의 주향이 주단층면의 방 향과 유사한 방향으로 우세하게 발달한 것으로 보아 Domain 1~5 중 가장 전단변형을 심하게 받은 것으 로 판단된다. 암회색 비지띠 내 전단면들은 Y-전단방 향(N31~39°E/83~88°NW)과 P-전단방향(N07~18°E/ 57~66°NW 또는 84~86°NW)이 우세하게 발달해 있 다(그림 11g).



Fig. 9. Outcrop photographs of the fault core of the Keumwang fault at the C-1 site. The dashed red lines showing fault surfaces bounding the fault core, the dashed yellow line showing boundary between fault breccia and cataclasite and the blue line showing foliations in the fault core.

우수향 주향이동 운동감각을 지시한다. 이는 단층핵 내에 발달된 지질구조요소들이 우수향 주향이동 운

C-1 지점 Domain 1과 5 내에 발달한 S-엽리면의 방향은 N01~23°E/75~85°NW로, 그림11b와 같이



Fig. 10. (a) Internal structure of the fault core of the Keumwang fault. (b) Close-up photograph of domain 1; foliated dark-gray fault gouge. (c) Close-up photograph of domain 2; fault gouge with penetrative shear bands. (d) Close-up photograph of domain 3; fault breccia with shear bands, (e) Close-up photograph of domain 4; fault gouge with penetrative shear bands, (f) Close-up photograph of domain 5; foliated dark-gray fault gouge.

R-전단면(N88°E/70°SE)에 의해 P-전단면(N09°E/ 87°NW)이 절단되어 약 2 cm의 변위를 가지고 어긋 난 것으로 보인다. 우수향의 운동감각을 가지는 Y-전단면(N27°E/60°SE)에 의해 P-전단면(N17°E/77°SE) 이 절단되어 약 0.7 cm의 변위를 가지고 어긋났으며 (그림 12c), R-전단면(N84°E/64°NW)에 의해 P-전 단면(N08°E/80°NW)이 절단되어 약 0.6 cm의 변위 를 갖게 된 것으로 추정된다(그림 12d). 따라서, 우수 향 주향이동 운동을 고려할 때, 가장 우세하게 발달

동에 의해 발달된 것임을 지시한다. 만약, 좌수향 주향 이동 운동이 우세했다면 S-엽리면들은 ENE 방향으 로 발달된다(그림 11b). 단층핵 내 발달된 전단띠들 중 일부는 전단면들간 절단이 일어남으로써 명확한 우수향 주향이동 운동감각을 보여준다(그림 12). 그 림 12a에서는 우수향의 운동감각을 가지는 Y-전단면 (N31°E/67°SE)에 의해 P-전단면(N05°E/72°NE)이 절단되어 약 2 cm의 변위를 가지게 된 것으로 인지 되며, 그림 12b에서는 우수향의 운동감각을 가지는



Fig. 11. (a) Outcrop photoraphs of the fault core of the Keumwang fault. (b) The directional nomenclature and geometrical relationships of the structural elements followed Rutter *et al.*, 1986; Passchier and Trouw, 1996. (c) Stereo plots of shear surfaces and shear bands, foliations and fractures within domain 1. (d) Stereo plots of shear surfaces and shear bands and fractures within domain 2. (e) Stereo plots of shear surfaces and shear bands, fractures in the relics and shear surfaces and shear bands within domain 3. (f) Stereo plots of shear surfaces and shear bands within domain 4. (g) Stereo plots of shear surfaces and shear bands within domain 5.

한 N32~43°E/84~89°NW 방향의 전단면 및 전단띠 들은 Y-전단면이며, N44~56°E/54~83°SE 방향의 전 단면 및 전단띠들은 R-전단면, N07~18°E/57~66°NW 또는 84~86°NW 방향으로 발달한 전단면 및 전단띠 들은 P-전단면에 해당한다. 다만, Domain 3의 모암 의 잔유물에 발달한 NW 방향의 인장단열면들은 좌 수향 주향이동 운동을 지시하며, N02~16°W 내지 N11~ 19°E 방향의 주향을 갖는 전단면 및 전단띠들은 운 동감각을 구분하기 어렵다. Domain 3의 나머지 부 분에서 측정한 N04~20°W 내지 N03~21°E 방향의 주향을 갖는 전단면 및 전단띠들은 P-전단면에 해당 한다.

3.1.2 C-2 지점

C-2 지점의 단층핵은 C-1 지점의 단층핵으로부터 금왕단층의 주향방향인 북북동 방향으로 약 9 m 떨 어진 곳에 발달한 약 2 m 폭을 갖는 단층핵이다. 특 성에 따라 5개의 영역으로 구분된다(그림 13). Domain 1은 백악기 퇴적암과 단층을 경계로 접하고 있으며 폭 이 약 20~25 cm인 담회색 단층비지로 이루어져 있 는데(그림 13a, 13b), 괴상의 형태를 보이며 1~2 mm 크기의 원마도가 좋은 역들을 포함하고 있다(그림 13b). Domain 2는 폭이 약 1 cm 미만인 백색의 단층비지 띠들이 망상의 형태로 발달되어 있다(그림 13c). Domain 3는 단층비지띠가 발달된 단층각력암으로 구성되어 있다(그림 13d). Domain 4는 화강암으로부터 유래된 잔유물이 많은 단층비지로 구성되어 있다(그림 13e). Domain 5는 엽리가 발달된 두 개의 황색 단층비지 띠로 이루어진다(그림 13f). 파쇄암과 단층핵의 경계 에 발달한 단층면의 방향은 N27°E/88°NW이다.

3.2 시료채취

ESR 연대측정을 위하여 C-1 지점에서 단층암 시 료 21개, C-2 지점에서 단층암 시료 6개를 채취하였 다(그림 14, 15).

3.2.1 C-1 지점

C-1 지점의 쥐라기 흑운모화강암에서 유래한 파 쇄암과 단층핵의 경계에는 약 50 cm 폭의 단층각력 암이 발달해 있으며, 이곳에서 역은 제외한 기질부만 으로 시료 HJ055-1#을 채취하였다(그림 14a, 14c). 이의 동쪽에는 약 20 cm 폭을 가지는 엽리가 발달된



Fig. 12. Outcrop photographs showing dextral movement. (a) P-shear band (N05°E/72°NE) transected by Y-shaer surface (N31°E/67°SE), (b) P-shear band (N09°E/87°NW) transected by R-shaer surface (N88°E/70°SE), (c) P-shear band (N17°E/77°SE) transected by Y-shaer surface (N27°E/60°SE), (d) P-shear band (N08°E/80°NW) transected by R-shaer surface (N84°E/64°NW).

를 채취하였다(그림 14a, 14c). 암회색 단층비지띠와 담회색 단층비지띠의 경계에서 약 20 cm 간격을 두 고 암회색 단층비지 시료 HJ055-6과 HJ055-7을 채 취하였으며(그림 14a, 14c), 해당 단층비지띠의 경계 를 따라 약 25 cm 정도의 간격을 두고 HJ055-8을 채

암회색 단층비지띠가 발달해 있는데, 암회색 단층비 지띠와 단층각력암과의 경계부를 따라 약 25 cm 정 도 간격을 두고, HJ055-1, HJ055-2, HJ055-3, HJ055-4 그 리고 HJ055-5를 채취하였다(그림 14a, 14b, 14c). 그리고 암회색 단층비지띠의 중앙부에서는 시료 HJ055-2#



Fig. 13. Outcrop photograph of the fault core at the C-2 site showing internal characteristic features. (b) Close-up photograph of domain 1; massive light-gray fault gouge. (c) Close-up photograph of domain 2; fault gouge with shear bands. (d) Close-up photograph of domain 3; fault breccia with shear bands, (e) Close-up photograph of domain 4; fault gouge with relics of host rocks, (f) Close-up photograph of domain 5; foliated brown fault gouge.

취하였다(그림 14a, 14b). 암회색 단층비지띠의 경계 와 맞닿아 있는 담회색 단층비지띠에서 시료 HI055-3# 을 채취하였고, 이곳에서 동쪽으로 약4 cm 떨어진 곳 에서 녹회색 단층비지 시료 HJ055-4#을 채취하였다 (그림 14a, 14c). 시료 HJ055-4# 채취 지점으로부터 동 쪽으로 약 20 cm 떨어진 괴상의 단층비지띠 내에서 담색 단층비지시료 HJ055-12를 채취하였다(그림 14a, 14c). HJ055-4# 채취 지점에서 약 35 cm 떨어진 괴상 의 단층비지띠 내에서 적색 단층비지시료 HJ055-5# 를 채취하였으며, 이로부터 동쪽으로 약 7 cm 떨어 진 암회색 단층비지띠에서 시료 HI055-6#을 채취하 였다(그림 14a). 이곳에서 동쪽으로 약 50 cm 떨어진 지점의 백색 단층비지띠에서 시료 HJ055-19를(그림 14), HJ055-19의 엽리방향의 남쪽 연장선에 있는 흑 색 비지띠에서 단층비시료 HI055-7#을 채취하였다 (그림 14a). 백악기 퇴적암과 암회색 단층비지띠의 경 계에서 단층비지시료 HJ055-21을 채취하였다(그림 14a). 동일 암회색 단층비지띠와 서쪽에 발달한 담 회색 단층비지띠의 경계에서 암회색 단층비지시료 HJ055-10#와 담회색 단층비지 시료 HJ055-9#을 채 취하였다(그림 14a). 시료 HJ055-9# 채취지점의 서쪽 에 위치한 렌즈상의 잔유물로부터 시료 HI055-8#을 채취하였다(그림 14a).

3.2.2 C-2 지점

C-2 지점은 C-1 지점으로부터 금왕단층의 주향방 향인 북북동 방향으로 약 9 m 떨어져있다. 단층핵의 가장 서쪽에 발달한 황색 단층비지띠에서 단층비지 시료 HJ055-11#을, 동쪽으로 약 10 cm 떨어진 곳에 N25°E/89°NW의 방향으로 발달한 황색 단층비지 띠에서 단층비지시료 HJ055-12#를 채취하였다(그 립 15a, 15d). HJ055-12#으로부터 약 80 cm 동쪽에 발달한 백색 단층비지띠에서 HJ055-13#, 경사방향 으로 약 10 cm 간격을 두고 녹회색 단층비지띠에서 HJ055-14#을 채취하였다(그림 15a, 15c). 괴상의 황 색 단층비지띠에서 HJ055-15#, 괴상의 담회색 단층 비지띠에서 HJ055-16#을 채취하였다(그림 15a, 15b).

4. 금왕단층의 ESR 연대

4.1 C-1 지점 ESR 연대

C-1 지점에서 채취한 21개 시료의 연대측정에 이 용된 자료는 표 1과 표 2에 제시되어 있다.

시료 HJ055-1에서 분리한 석영의 E' 신호 세기는 ESR 신호의 성장곡선(growth curve)를 통해 보았 을 때, 모든 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양 이 증가함에 따라 규칙적으로 증가한다(그림 16a). Al 신호의 세기는 0.025~0.045 mm 입자크기에서



Fig. 14. Outcrop photographs of the fault core with sampling locations and ESR ages at the C-1 site. Symbol; Satu. representing saturation of ESR signals.

규칙적으로 증가하나, 나머지 입자크기에서는 불규 칙하게 증감한다(그림 16b). 시료 HJ055-2에서 분리 한 석영의 E' 신호의 세기는 모든 입자크기에서 조 사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규칙적으로 증가한다(그림 16c). Al 신호의 세기는 모든 입자크 기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 불 규칙하게 감소 및 증가한다(그림 16d). 시료 HJ055-3 에서 분리한 석영 시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라, E' 신호는 0.025~0.075 mm 입자크 기까지는 대체로 규칙적으로 증가하나, 나머지 입자 크기의 E' 신호 및 Al 신호의 모든 입자크기에 대하 여 ESR 신호가 일정하거나 불규칙하게 증감한다(그 림 16e, 16f). 시료 HJ055-4에서 분리한 석영 시료에 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라, E' 신호 는 0.025~0.045 mm 입자크기까지는 비교적 규칙적 으로 증가하나, 나머지 입자크기 및 Al 신호의 모든 입자크기에 대하여 ESR 신호가 일정하거나 불규칙 하게 증감한다(그림 16g, 16h). 시료 HJ055-1#에서 분리한 석영의 E' 신호는 0.15~0.25 mm 입자크기를 제외한 나머지 입자크기에서는 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규칙적으로 증가한다(그림 17a). Al 신호는 모든 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 불규칙하게 감소 및 증가하는 경향을 보인다(그림 17b). 시료 HJ055-7#에서 분리 한 석영의 E' 신호는 0.025~0.045 mm, 0.045~0.075 mm, 0.075~0.1 mm 그리고 0.1~0.15 mm의 입자크 기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가함에 따라 규 칙적으로 증가하는 양상을 보이며, 0.15~0.25 mm 입자크기에서 계단상 혹은 불규칙적으로 증감한다 (그림 17c). Al 신호 또한 모든 입자크기에서 불규칙 하게 증가 및 감소한다(그림 17d).

시료 HJ055-5, HJ055-6, HJ055-7, HJ055-8, HJ055-12, HJ055-19, HJ055-21, HJ055-2#, HJ055-3#, HJ055-4#, HJ055-5#, HJ055-6#, HJ055-8#, HJ055-9# 및 HJ055-10# 에서 분리한 석영의 E' 신호 및 AI 신호는 조사된 감 마에너지의 양이 증가함에 따라 거의 증가하지 않거 나 불규칙하게 증가 및 감소하며, 이는 단층활동 시 에 ESR 신호가 줄어들었다가 단층활동 이후에 주변



Fig. 15. Outcrop photographs of the fault core with sampling locations and ESR ages at the C-2 site. Symbol; Satu. representing saturation of ESR signals.

| Sample | U (ppm) | Th (ppm) | K (%) |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| HJ055-1 | 4.89±0.12 | 15.69±0.37 | 3.26±0.03 |
| НЈ055-2 | 4.69±0.06 | 19.20±0.37 | 3.74 ± 0.03 |
| НЈ055-3 | 4.53±0.14 | 13.20±0.35 | 2.78 ± 0.03 |
| HJ055-4 | 3.71±0.06 | 20.69±0.34 | 3.22 ± 0.03 |
| HJ055-6 | 3.81±0.09 | 18.38±0.31 | 4.19±0.03 |
| HJ055-7 | 4.08±0.15 | 17.60±0.42 | 2.93 ± 0.03 |
| HJ055-8 | 3.37±0.09 | 14.16±0.29 | 2.65 ± 0.03 |
| HJ055-12 | 2.78±0.05 | 13.67±0.35 | 3.10±0.03 |
| HJ055-19 | 4.27±0.08 | 17.73±0.41 | 2.30 ± 0.03 |
| HJ055-21 | 3.19±0.06 | 18.90±0.37 | 2.45 ± 0.02 |
| HJ055-1# | 1.32±0.12 | 4.85±0.29 | 1.89 ± 0.03 |
| HJ055-2# | 4.15±0.14 | 19.41±0.54 | 3.97±0.03 |
| HJ055-3# | 1.46±0.09 | 5.34±0.34 | 1.74 ± 0.03 |
| HJ055-4# | 13.50±0.47 | 3.71±0.11 | 2.55±0.03 |
| HJ055-5# | 1.05 ± 0.07 | $4.84{\pm}0.28$ | 1,73±1.05 |
| HJ055-6# | 1.23±0.07 | 5.24±0.31 | 1.58 ± 0.03 |
| HJ055-7# | $1.04{\pm}0.05$ | 5.82±0.32 | 2.16±1.04 |
| HJ055-8# | 1.05 ± 0.08 | 4.91±0.30 | 1.98 ± 0.03 |
| HJ055-9# | 2.51±0.11 | 13.67±0.35 | 3.16±2.51 |
| HJ055-10# | 1.33±0.09 | 8.01±0.32 | 1.62 ± 0.03 |
| HJ055-11# | 1.60±0.10 | 6.58±0.33 | 1.93 ± 0.03 |
| HJ055-12# | 2.87±0.10 | 15.67±0.54 | 3.12±0.03 |
| HJ055-13# | 3.05±0.11 | 19.23±0.55 | 3.40 ± 0.03 |
| HJ055-14# | 3.86±0.11 | 10.36±0.47 | $2.84{\pm}0.03$ |
| HJ055-15# | 7.60±0.16 | 16.44±0.58 | 2.82±0.03 |
| HJ055-16# | 1.09±0.10 | 5.40±0.25 | 2.01±0.03 |

Table 1. Amounts of U(ppm), Th (ppm) and ${}^{40}K(\%)$ for each sample of Keumwang fault gouges and fault breccia.

방사성 원소로부터 방사성 에너지를 받아 ESR 신호 가 포화된 것으로 판단된다. 따라서 이들에 대한 그 림은 생략하였다.

C-1 지점의 각각의 시료에 대한 ESR 연대와 그 특 징은 다음과 같다. 시료 HJ055-1의 E' 신호의 0.025~ 0.045 mm, 0.045~0.075 mm, 0.075~0.1 mm 및 0.1~ 0.15 mm의 입자크기를 이용하여 구한 평탄 ESR 연 대는 340±30 ka, Al 신호의 0.025~0.045 mm 입자 크기를 이용하여 구한 최대 ESR 연대는 380±80 ka 이며 다른 입자크기에서는 ESR 신호가 포화되어 연 대를 결정 할 수 없었다. E', Al 신호로 가중평균을 이용하여 구한 다센터 평탄 ESR 연대는 340±30 ka 이다(그림 18a). 시료 HJ055-2의 Al 신호는 모든 입 자크기에 대하여 ESR 신호가 포화되어 그 연대를 결 정 할 수 없었으며, E' 신호의 0.025~0.045 mm, 0.045~ 0.075 mm, 0.075~0.1 mm 입자크기에서 연대평탄을 보이고 가중평균을 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 330±40 ka이다(그림 18b). 시료 HJ055-3의 Al 신호 는 모든 입자크기에 대하여 ESR 신호가 포화되어 그 연대를 결정 할 수 없었으며, E' 신호의 0.025~0.045 mm, 0.045~0.075 mm, 0.075~0.1 mm 입자크기에서 연대평탄을 보이고 가중평균을 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 330±50 ka이다(그림 18c). 시료 HJ055-4 의 Al 신호는 모든 입자크기에 대하여 ESR 신호가 포화되어 그 연대를 결정 할 수 없었으며, E' 신호의 0.025~0.045 mm, 0.045~0.075 mm 입자크기에서 연

| Sample | Grain size (µm) | Center | DE (Gy) | Dose rate (µGy/year) | ESR age (ka) | Weighted mean(ka) | |
|-----------|--------------------|---------------|----------|-------------------------|-----------------|-------------------|--|
| НЈ055-1 | 25-45 | E' | 1335±149 | 4059±717 | 328±68 | | |
| | 45-75 | \mathbf{E}' | 1221±192 | 3949±694 | 309±72 | | |
| | 75-100 | \mathbf{E}' | 1227±204 | 3838±672 | 319±77 | 340±30 | |
| | 100-150 | \mathbf{E}' | 1335±239 | 3699±643 | 360±90 | | |
| | 150-250 | \mathbf{E}' | 1693±310 | 3462±596 | 489±122 | | |
| | 25-45 | Al | 1553±194 | 4060±717 | 382±82 | | |
| НЈ055-2 | 25-45 | E' | 1391±133 | 4059±717 | 342±68 | | |
| | 45-75 | E' | 1311±206 | 3949±694 | 332±78 | 330±40 | |
| | 75-100 | E' | 1246±222 | 3838±672 | 324±81 | | |
| | 100-150 | E' | 2528±534 | 3702±643 | 682±186 | | |
| | 150-250 | E' | 921±87 | 3460±596 | 266±56 | | |
| НЈ055-3 | 25-45 | E' | 1254±263 | 3739±626 | 335±90 | | |
| | 45-75 | E' | 1341±279 | 3638±608 | 345±92 | 330±50 | |
| | 75-100 | E' | 1157±166 | 3535±589 | 327±72 | | |
| HJ055-4 | 25-45 | E' | 1369±92 | 3740±626 | 366±66 | 250.00 | |
| | 45-75 | E' | 1372±516 | 3638±608 | 377±155 | 3/0±60 | |
| HJ055-1# | 25-45 | E' | 1795±249 | 4060±717 | 442±99 | | |
| | 45-75 | E' | 1654±206 | 3950±694 | 418±90 | 120 50 | |
| | 75-100 | E' | 1741±355 | 3839±672 | 453±121 | 430±50 | |
| | 100-150 | E' | 1594±205 | 3700±643 | 430±93 | | |
| HJ055-7# | 25-45 | E' | 1127±240 | 2337±695 | 482±176 | 500 - 100 | |
| | 45-75 | E | 1159±139 | 2272±671 | 510±162 | 500±120 | |
| | 75-100 | \mathbf{E}' | 1581±281 | 2208±646 | 716±245 | | |
| | 100-150 | E' | 1294±430 | 2124±614 | 609±208 | | |
| HJ055-11# | 25-45 | E' | 961±151 | 3208±677 | 299±78 | 220+60 | |
| | 45-75 | \mathbf{E}' | 1174±91 | 3122±656 | 376±84 | 330±00 | |
| | 75-100 | E' | 1496±188 | 3034±636 | 453±115 | | |
| | 100-150 | \mathbf{E}' | 1218±233 | 2924±610 | 416±118 | | |
| | 150-250 | E' | 793±121 | 2732±566 | 290±74 | | |

Table 2. Analytical data for ESR dating of fault gouges and fault breccia in the study area. Weighted mean is calculated from the ESR ages within the plateau (shown as rectangle in column of ESR age) and the values have been rounded up.

대평탄을 보이고 가중평균을 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 370±60 ka이다(그림 18d). 시료 HJ055-1#의 Al 신호는 모든 입자크기에 대하여 ESR 신호가 포 화되어 그 연대를 결정 할수 없었으며, E' 신호는 0.025~ 0.045 mm, 0.045~0.075 mm, 0.075~0.1 mm 및 0.1~ 0.15 mm 입자크기에서 연대평탄을 보이고 가중평균 을 이용하여 구한 평탄 ESR 연대는 430±50 ka이다 (그림 18e). 시료 HJ055-7#의 Al 신호는 모든 입자크 기에 대하여 ESR 신호가 포화되어 그 연대를 결정 할

수 없었으며, E' 신호의 0.025~0.045 mm, 0.045~0.075 mm 입자크기에서 연대평탄을 보이고 가중평균을 이 용하여 구한 평탄 ESR 연대는 500±120 ka이다(그림 18f).

4.2 C-2 지점 ESR 연대

C-2 지점에서 채취한 6개 시료에 대한 ESR 연대 측정 자료는 표 1과 표 2에 제시되어 있다.

시료 HJ055-11#에서 분리한 석영의 E' 신호는 모 든 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가함 에 따라 비교적 규칙적으로 증가한다(그림 19a). Al 신호는 모든 입자크기에서 불규칙하게 증가하거나 감소한다(그림 19b). 시료 HJ055-12#, HJ055-13#, HJ055-14#, HJ055-15# 및 HJ055-16#에서 분리한 석영의 E' 신호와 Al 신호 는 모든 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증



Fig. 16. Growth curves of ESR signals for four fault gouge samples (HJ055-1, 2, 3, 4) collected in the C-1 site.

가함에 따라 불규칙하게 증가 및 감소한다. 이는 앞 에서 언급한 것과 마찬가지로 단층활동 시 ESR 신호 가 줄어든 뒤 단층활동 이후 주변의 방사성원소로부 터 공급받은 방사성 에너지로 인해 포화된 것으로 추 정된다.

시료 HJ055-11#의 Al 신호는 모든 입자크기에 대 하여 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대를 결정 할 수 없었으며, E' 신호는 0.025~0.045 mm 및 0.045~0.075 mm의 입자크기에서 연대평탄을 보인다. 이를 이용하 여 구한 평탄 ESR 연대는 330±60 ka이다(그림 19c).

5. 토 의

5.1 진천군~음성군 일대 금왕단층의 운동감각

Lee and Kim (2005)은 강원도 홍천군 일대 금왕 단층에서 단층비지로 이루어진 단층핵에 발달된 S-엽 리면들 및 전단변형 받은 이암에 발달된 S-엽리면들 의 방향 분석 자료를 근거로 하여 좌수향 주향이동 운동이 우세함을 보고하였다. 점토광물의 선택배향에 의해서 만들어진 S-엽리는 단층면(전단면)에 135~180° 범위의 각을 가지고 발달한다(Berthe *et al.*, 1979). 이 S-엽리면은 변형타원체에서 XY면을 지시하며 전 단 초기에는 전단면에 약 135° 각을 가지나, 전단변 형이 증가할수록 전단면에 거의 평행(180°)해지는 경 향이 있다(Ramsay and Huber, 1983). 따라서, S-엽 리면의 주향방향이 변형타원체에서 X방향을 지시하 며 운동감각을 파악하는데 이용될 수 있다(그림 11b). Hong and Lee (2012)와 Bae and Lee (2014)는 충 청북도 진천군~음성군 일대에 분포하는 A 지점 및 B 지점(그림 1)의 단층핵 및 단층손상대에 발달한 지 질구조 요소들의 방향성 분석을 통해 금왕단층은 백 악기 이전에 좌수향 주향이동 운동이 우세하다고 보 고하였다. Kim and Lee (2016)는 금왕단층을 따라 관입한 안산암(70~84 Ma, Cheong and Kim, 1999) 에 우수향 주향이동 단층운동을 지시하는 현미경 규 모의 전단면과 전단띠가 발달하였으며, 이는 금왕단 층의 단층운동이 좌수향 주향이동 운동에서 우수향 주향이동 운동으로 역전현상이 일어난 것으로 해석 하여 제3기 이후에 우수향 주향이동 단층운동이 우 세했던 것으로 해석하였다.

C-1 지점에는 백악기 퇴적암과 단층핵의 경계에 발 달한 주단층면의 방향이 N43°E/85°NW, 흑운모화



Fig. 17. Growth curves of ESR signals for two fault gouge samples (HJ055-1#, 7#) collected in the C-1 site.

향이동 운동이 우세하다면 S-엽리가 그림 11b에서 처럼 ENE 내지 NE 방향으로 발달해야한다(그림 11). 다만, Domain 3에 분포하는 모암의 잔유물에 발달 한 NW 방향의 인장단열면들(그림 11e)은 좌수향 주 향이동 운동을 지시하며, N02~16°W 내지 N11~19°E 방향의 전단면 및 전단띠들은 운동감각을 구분하기 어렵다(그림 11e). 이는 제3기 이전의 좌수향 주향이 동 운동이 우세할 때 형성된 지질구조 요소로 추정된 다. Domain 3의 나머지 단층비지에서 측정한 전단 면 및 전단띠들은 Y-전단면 및 P-전단면에 해당되며 우수향 주향이동 운동을 지시하는 제3기 이후에 중

강암에서 유래한 파쇄암과 단층핵의 경계에 발달한 주단층면의 방향이 N36°E/87°NW로 발달해 있다. 단층핵에 발달된 전단띠 및 전단면들의 절단관계 및 변위 방향은 우수향 주향이동 운동을 지시한다(그림 12). 단층핵에는 주단층면과 평행한 Y-전단면(N32~43°E/ °84~89NW)과 P-전단면(N04~17°E/70~88°NW)이 우 세하게 발달해 있다(그림 11). Domain1과 5(그림 11c, 11g)에는 점토광물의 정향배열로 형성된 S-엽리면이 Y-전단방향(N32~43°E/84~89°NW) 및 P-전단방향 (N01~17°E/75~85°NW)으로 발달되어 있으며, 이는 우수향 주향이동 운동을 지시한다. 만일, 좌수향 주



Fig. 18. ESR ages vs. Grain sizes for six fault rock samples collected in the C-1 site.

첩된 지질구조 요소일 것으로 추정된다.

5.2 금왕단층 남서 말단부 단층비지의 ESR 수치 연대 분석

5.2.1 ESR 수치연대의 일관성

C-1 지점 단층암의 연대측정 결과, 21개의 단층비 지 시료 중 15개의 시료는 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대측정법으로 재활동시기를 결정할 수 없었으며, 적어도 제4기 이전에 재활동한 것으로 추정된다. Domain 2 내에 발달된 Y-전단띠에서 채취한 시료 HJ055-7# 의 ESR 연대는 500±120 ka이다. 서쪽의 흑운모화강 암에서 유래한 파쇄암과 단충핵의 경계에 발달한 단충 비지띠에서 채취한 시료 HJ055-1(340±30 ka), HJ055-2 (330±40 ka), HJ055-3(330±50 ka) 그리고 HJ055-4 (370±60 ka)는 오차범위 내에서 일치하며 이들의 가 중평균 ESR 연대는 340±20 ka이다(그림 20c). 약 2 m 폭의 단층핵 중 ESR 연대를 얻은 단층비지띠들 폭의 총합은 약 8 cm에 불과하며 이는 전체 단층핵



Fig. 19. Growth curves of ESR signals and ESR ages vs. grain sizes for fault rock sample (HJ055-11#) collected in the C-2 site.



Fig. 20. Schematic sketches of fault cores developed along the southwestern end of the Keumwang fault, sampling sites and ESR ages. Symbol; Satu. representing saturation of ESR signals.

의 약 4% 만이 제4기에 재활동한 것으로 추정된다.

C-2 지점의 연대측정 결과, 6개의 단층비지 시료 중 5개의 시료는 ESR 신호가 포화되어 ESR 연대측 정법으로 재활동시기를 결정할 수 없었으며, 적어도 제4기 이전에 재활동한 것으로 추정된다. 흑운모화 강암에서 유래한 파쇄암과 단층핵의 경계에 발달한 단층비지띠에서 채취한 시료 HJ055-11#에서 얻은 ESR 연대는 330±60 ka이다(그림 20d). C-1 지점 및 C-2 지점은 주향방향으로 약 9 m 떨어져 있음에도 불구 하고 화강암에서 유래한 파쇄암과 단층핵 사이에 발 달한 단층비지띠의 ESR 연대가 오차범위 내에서 일 치하고 있다. C-1 지점의 가중평균 ESR 연대는 340±20 ka이며, C-2 지점의 ESR 연대는 330±60 ka이다. C-1 및 C-2 지점에서 채취한 단층비지 시료들의 가중평 균 ESR 연대는 340±20 ka이다.

A 지점(Bae and Lee, 2014)의 단층손상대와 단층 핵의 경계부에 발달한 단층비지띠에서 채취한 HK001-1 (370±100 ka)과 화강암으로부터 유래한 파쇄암과 단 층핵의 경계에 발달한 단층비지띠에서 채취한 HK001-3 (310±60 ka)는 오차범위 내에서 일치하며 이들의 가 중평균 ESR 연대는 330±50 ka이다(Bae and Lee, 2014; 그림 20a).

B 지점(Hong and Lee, 2012)에서는 ESR 연대측 정 결과, 단층핵과 파쇄암으로 이루어진 단층손상대 사이에 발달한 단층비지띠에서 채취한 KW-5 및 KW-6 의 각 ESR 연대는 290±30 ka, 350±30 ka이고 이들 은 오차범위 내에서 일치하며 가중평균 ESR 연대는 320±20 ka이다(Hong and Lee, 2012; 그림 20b).

이들 결과를 종합해보면, A 지점(Bae and Lee, 2014) 의 가중평균 ESR 연대는 330±50 ka, B 지점(Hong and Lee, 2012)의 가중평균 ESR 연대는 320±20 ka이다. C 지점의 가중평균 ESR 연대는 340±20 ka이다. A 지점, B 지점 및 C 지점 각각의 가중평균 ESR 연대 는 오차범위 내에서 일치하며 이들의 가중평균 ESR 연대는 330±10 ka이다(그림 20).

B 지점(Hong and Lee, 2012)의 단층비지띠 시 료 KW-4(480±40 ka)과 C-1 지점의 단층비지띠 시료 HJ055-7#(500±120 ka)의 ESR 연대가 오차범위 내 에서 일치하며 이들의 가중평균 ESR 연대는 480±40 ka이다(그림 20).

5.2.2 금왕단층 남서 말단부에서의 제4기 단층운 동패턴

충청북도 진천군~음성군 일대 금왕단층의 남서 말단부(A, B 및 C 지점)에서의 제4기 단층운동패턴 은 활동기와 비활동기로 나누어지며, 약 33만 년 전 이후에는 단층비지의 재활동이 발생하지 않은 것으 로 해석된다(그림 21). 금왕단층의 북동 말단부에서 는 약 33만 년 전 이후에도 금왕단층의 단층비지가 재 활동한 것으로 보고되어 있으며(Kim and Lee, 2016;



Fig. 21. Temporal activity pattern at the southwestern end of the Keumwang fault during the Quaternary period (modified from Hong, 2013; Kim and Lee, 2016).

Kim, 2018), 이는 단층운동이 금왕단층의 주향방향을 따라 이동한 것으로 추정된다(Hong and Lee, 2012; Kim and Lee, 2016; Kim, 2018). 약 48만 년 전에 B 지점(Hong and Lee, 2012)과 C 지점에서 단층운동 이 일어났으며(그림 21), A 지점(Bae and Lee, 2014) 에서는 마지막 단층운동에 의해 그 이전의 단층운동 기록(ESR signal)이 지워졌기 때문에 A 지점에서는 해당 시기의 단층운동을 파악할 수 없었던 것으로 생각 되어진다. 약 43만 년 전에는 C 지점에서 단층 운동이 일어났으며(그림 21), A 지점(Bae and Lee, 2014)와 B 지점(Hong and Lee, 2012)에서는 마지 막 단층운동에 의해 그 이전의 단층운동 기록(ESR signal)이 지워졌기 때문에 A 지점과 B 지점에서는 해당 시기의 단층운동을 파악할 수 없었던 것으로 생각 되어진다. 이 시기에는 C 지점으로부터 금왕단 층의 북동부로 연장성을 가지고 단층활동이 일어났 을 가능성도 있을 것으로 보인다. 약 33만 년 전에는 A 지점(Bae and Lee, 2014), B 지점(Hong and Lee, 2012) 및 C 지점 모두에서 단층운동이 일어났으며, 그 연장은 적어도 약 10 km 이상이다(그림 20, 21).

B 지점(Hong and Lee, 2012)과 C-1 지점에서는 단층핵의 남동쪽에서 북서쪽으로 갈수록 ESR 연대 가 젊어지는 경향을 보인다(그림 20b, 20c).

6. 결 론

첫째, Lee and Kim (2005), Hong and Lee (2012) 그리고 Bae and Lee (2014)에 따르면 금왕단층은 백 악기에 좌수향 주향이동 운동이 우세한 것으로 보고 되었으나, Kim and Lee (2016)은 안산암 관입(70~80 Ma; Cheong and Kim, 1999) 이후 안산암 내 발달한 현미경 규모의 전단면 및 전단띠의 방향 분석 결과, 백악기 후기 이후 우수향 주향이동 운동이 우세함을 보고하였다(Hong, 2013; Kim and Lee, 2016). 충청 북도 음성군 맹동면 쌍정리 지점(C-1 지점)에 발달한 금왕단층의 단층핵 내에 발달한 전단면 및 전단띠들 은 주단층면의 방향과 평행한 Y-전단면(N32~43°E/ 84~89°NW)이 가장 우세하며, R-전단면과 P-전단면은 각각 N44~56°E/54~83°SE 방향, N04~17°E/70~88°NW 방향으로 우세하게 발달하여있다. 단층비지 내 발달 한 S-엽리면의 방향은 N01~17°E/75~85°NW 방향 이 우세하며 이는 우수향 주향이동 운동을 지시한다 (그림 11). 따라서, 금왕단층은 제3기 이전에는 좌수 향 주향이동 운동이 우세했으나, 제3기 이후에는 우 수향 주향이동 운동이 우세했을 것으로 추정된다.

둘째, 충청북도 음성군 맹동면 쌍정리 일대의 C 지 점에 발달한 금왕단층의 단층핵 및 단층손상대로부터 채취한 27개의 시료 중 20개의 시료는 ESR 신호가 포 화되어 ESR 연대를 결정할 수 없었으며, 나머지 7개의 단층암 시료로부터 얻은 ESR 연대는 500 ~ 340 ka에 이른다. 약 2 m 폭의 단층핵 중 ESR 연대를 얻은 단층 비지띠들 폭의 총합은 약 8 cm (약 4%)에 불과하다. 따 라서, 전체 단층핵의 폭 중 약 4%의 단층비지띠만이 제4기에 재활동 하였을 것으로 추정된다(그림 14).

셋째, A 지점(Bae and Lee, 2014)에서 채취한 단 층비지 시료들의 가중평균 ESR 연대는 330±50 ka 이며, A 지점으로부터 북동쪽으로 약 7 km 떨어진 B 지점(Hong and Lee, 2012)에서 채취한 단층비지 시료들의 가중평균 ESR 연대는 320±20 ka 그리고 B 지점으로부터 북동쪽으로 약 3 km 떨어진 C 지점에 서 채취한 단층비지 시료들의 가중평균 ESR 연대는 340±20 ka으로 약 10 km 이상에 걸쳐 ESR 연대가 오차범위 내에서 일치하며 그들의 가중평균 ESR 연 대는 330±10 ka이다(그림 20).

넷째, 충청북도 진천군~음성군 일대 금왕단층의 남서 말단부(A, B 및 C 지점)에서의 제4기 단층운동 패턴은 활동기와 비활동기로 나누어진다. 약 33만 년 전 이후에는 단층비지의 재활동이 일어나지 않은 것으로 추정된다(그림 21).

감사의 글

이 연구는 기상청 기상 지진기술개발사업(KMI2018-02010), 강원대학교 학술연구조성비(연구과제번호 D100 0430-01-01)의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문은 행 정안전부장관의 지진방재분야 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다. 건설적인 조언으로 이 논문의 질을 향상 시켜주신 장천중 박사님, 최영섭 박사님께 감사드립니다.

REFERENCES

Bae, H.K. and Lee, H.K., 2014, Space-time patterns of fault activity of the Keumwang Fault developed in the Jincheon-Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do. Journal of the Geological Society of Korea, 50, 735-752 (in Korean with English abstract).

- Berthe, D., Chouroune, P. and Jegouzo, P., 1979, Orthogneiss, mylonite and non-coaxial deformation of granites: the example of the south Armorican shear zone. J. Struc. Geol., 1, 31-42.
- Chun, H.Y., Um, S.H., Choi, S.J., Kim, Y.B., Kim, B.C. and Choi, Y.S., 1993, Fossil floral and faunal assemblage and paleoenvironmental modelling study on the Cretaceous sedimentary basins scattered in/near the Ogcheon belt. Roport KR-93(T)-11, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 122 p.
- Cheong, D.K. and Kim, K.H., 1999, Basin evolution and provenance of sediments of the Cretaceous Poongam sedimentary Basin. Korean journal of petroleum geology, 7, 28-34.
- Cheong, C.H., Park, Y.A. and Kim, H.M., 1976, Geological map of the Eumseong sheet (1:50,000). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 32 p (in Korean with English abstract).
- Choi, P.Y. and Choi, Y.S., 2007, Stress model of the opening of the Cretaceous Eumseong Basin. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources Bulletin, 11, 3-16.
- Choi, S.J., Kim, B.C., Chun, H.Y. and Kim, Y.B., 1995, Charophytes from the Chopyeong Formation (Cretaceous) of the Eumseong Basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 31, 523-528 (in Korean with English abstract).
- Choi, Y.S., 1996, Structural evolution of the Cretaceous Eumseong Basin, Korea. Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, 158 p (in Korean with English abstract).
- Hong, N.R., 2013, Structural features and movement history of the Keumwang Fault at Hongcheon-gun, Kangwon-do, Korea. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon (in Korean with English abstract).
- Hong, N.R. and Lee, H.K., 2012, Structural features and ESR dating of the Keumwang Fault at Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 473-489 (in Korean with English abstract).
- Jang, B.G. and Lee, H.K., 2012, Structural features of fault rocks developed in the Keumwang Fault at Hakgok-ri, Hoengseong-gun, Gangwon-do. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 11-26 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H. and Cheong, D.K., 1999, Sedimentary facies of the Cretaceous Poongam Sedimentary Basin in Hongcheon Area, Kangwon-do, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 35, 279-296 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J. and Lee, H.K., 2016, Internal structure and movement history of the Keumwang Fault. Journal of the Petrological Society of Korea, 25, 211-230 (in Korean with English abstract).

- Kim, M.J., 2018, Active features of the Keumwang Fault in the Inje-gun, area, Gangwon-do. M.S. thesis, Kangwon National University, Chuncheon (in Korean with English abstract).
- Kim, M.J. and Lee, H.K., 2017, Quaternary activity patterns of the Keumwang Fault in the Wonju-si area, Gangwon-do. Journal of the Geological Society of Korea, 53, 79-94 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.S., Jin, K.M., Choi, W.H. and Kee, W.S., 2011, Understanding of active faults: A review for recent researched. Journal of the Geological Society of Korea, 47, 723-752 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.K. and Kim, H.S., 2005, Comparison of structural features of the fault zone developed at different protoliths: crystalline rocks and mudrocks. Journal of Structural Geology, 27, 2099-2112.
- Lee, H.K. and Kim, J.Y., 2011, Microstructural features within the fault rocks in the Keumwang fault zone at Sangnam-myon, Inje-gun, Gangwon-do. Journal of the Geological Society of Korea, 47, 395-409 (in Korean with English abstract).
- Park, J.R. and Lee, H.K., 2012, Internal Structure and microstructural features of Keumwang fault zone at Jwaun-ri, Hongcheon-gun, Gangwon-do. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 27-47 (in Korean with English abstract).
- Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J., 1996, Microtectonics. Springer-Verlag Berlin Helidelberg, Germany, 289 p.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1983, The techniques of modern structural geology, strain analysis. vol. 1, Academic Press, London.
- Rutter, E.H., Maddock, R.H., Hall, S.H. and White, S.H., 1986, Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouge. Birkhauser Verlag, Basel, 124.
- Ryang, W.H., 2013, Characteristics of strike-slip basin formation and sedimentary fills and the Cretaceous small basins of the Korean peninsula. Journal of the Geological Society of Korea, 49, 31-45 (in Korean with English abstract).
- Ryang, W.H. and Chough, S.K., 1999, "Alluvial-to-lacustrie systems in a pull-apart margin: southwestern Eumsung Basin (Cretaceous), Korea." Sedimentary Geology, 127, 31-46.
- Ryang, W.H., Chough, S.K., Kim, J.S. and Shon, H., 1999, "Three-dimensional configuration of a pull-apart basin from high-resolution magnetotelluric profiling: Eumsung Basin (Cretaceous), Korea." Sedimentary Geology, 129, 101-109.

| Received | : | July | 18, | 2018 |
|----------|---|--------|-----|------|
| Revised | : | August | 17, | 2018 |
| Accepted | : | August | 20, | 2018 |