충청북도 진천-음성군 일대에 발달한 금왕단층의 시간-공간적 활동형태

배한경·이희권^{*}

강원대학교 지질학과

요 약

ESR 수치연대 측정방법을 이용하여, 제4기 동안 충청북도 진천군 및 음성군 일대에 발달하는 금왕단층의 시간-공간적 활동형태를 연구하였다. 연구지역의 금왕단층에는 백악기 흑운모화강암으로부터 유래된 파쇄암 과 백악기 이암 사이에 약 90 cm폭의 단층비지로 이루어진 단층핵이 발달하고 있다. 파쇄암과 단층비지 사이에 발달된 단층면의 태위는 N66°E/70°SE이며, 이암과 단층비지 사이에 발달된 단층면의 태위는 N60°E/65°SE이다. 백악기 이암 내 단층손상대에는 Y-전단, R-전단, R'-전단, P-전단 방향으로 부수단층들이 발달되어 있다. 연구지역에서 주 단층 및 부수단층으로부터 얻은 ESR 연대는 약 560 ka부터 140 ka에 이른다. ESR 연대자료는 연구지역에 발달하는 금왕단층이 장주기를 가지고 플라이오세까지 반복적으로 재활동 했음을 지시한다. 이러 한 반복적인 재활동은 금왕단층의 북동쪽에서 실시된 기존연구에서도 보고되었다. ESR 연대자료에 의하면 금 왕단층의 단층활동이 주향방향을 따라 이동하는 경향을 보인다.

주요어: 금왕단층, 단층비지, 단층핵, 단층손상대, ESR 수치연대측정

Han-Kyung Bae and Hee-Kwon Lee, 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. v. 50, no. 6, p. 735-752

ABSTRACT: We investigated space-time patterns of Quaternary fault activity of the Keumwang Fault developed in the Jincheon-gun and Eumseong-gun regions, Chungcheongbuk-do, using ESR dating method. The fault core which consists of 90 cm thick fault gouge was developed between the cataclasite derived from Cretaceous biotite granite and Cretaceous mudrocks in the study area. The fault plane developed between cataclasite and fault gouge strikes N66°E and dips 70°SE and the fault plane between mudrocks and fault gouge strikes N60°E and dips 65°SE. Some subsidiary faults including R-shear, R'-shear, P-shear and Y-shear were developed in the damage zone of Cretaceous mudrocks. ESR dates from the main fault strand and subsidiary faults range from 560 ka to 140 ka. The result demonstrates that the long-term cyclic fault activity of the Keumwang Fault in the study area continued into the Pleistocene. Similar cyclic patterns of fault activity were presented in previous studies of the Northeast region of the Keumwang Fault. ESR ages also indicate that fault activities appear to migrate along the strike of the Keumwang Fault.

Key words: Keumwang Fault, fault gouge, fault core, fault damage zone, ESR dating

(Han-Kyung Bae and Hee-Kwon Lee, Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea)

1. 서 론

충청북도 진천군 및 음성군 일대에 발달된 음성 분지의 북서쪽 경계에는 기반암인 쥐라기 흑운모화 강암과 백악기 초평층이 단층접촉하고 있다. 이 단

층은 Choi (1996)에 의해 금왕단층으로 명명되었으며, 좌수향 주향이동단층으로 알려져 있다. 금왕단 층은 북동-남서 주향을 가지고 음성분지의 북서쪽 경계를 이루며, 북동쪽으로 풍암분지를 지나 설악산까 지 약 170 km 연장성을 가지며 발달하고 있다 (Choi,

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

1996; Lee and Kim, 2005; Lee, 2010).

Sibson (1977)은 지하 약 1~4 km 이내의 깊이에 서는 취성 변형작용에 의해 단층비지, 단층각력암 등이 발달하고, 지하 약 1~4 km 이상 10~15 km 이 내의 깊이에서는 파쇄유동작용(cataclastic flow)에 의해 파쇄암계열(cataclasite series)이 발달한다고 보고 하였다. 지하 약 10~15 km 이상의 깊이에서는 소성변형작용(plastic deformation)이 우세하게 작용 하여 압쇄암계열(mylonite series)이 형성된다(Ramsay, 1967; Sibson, 1977). 또한, Watts and Williams (1979) 는 지하 약 10~15 km 이상의 깊이에서 형성된 압쇄 암계열이 융기한 후, 단층의 재활동에 의해 슈도타 킬라이트(pseudotachylyte) 및 파쇄암계열이 압쇄 암계열 내에 중첩된 흥미로운 결과를 보고하였다.

기존연구에서 금왕단층에는 압쇄암계열, 파쇄암 계열, 단층비지 및 단층각력암 등이 발달되어 있으 며, 이는 지질시간 동안에 여러 번 재활동 했음을 지 시한다고 보고하였다(Choi, 1996; Lee, 2010; Lee and Kim, 2011; Hong and Lee, 2012; Park and Lee, 2012; Hong, 2013). 금왕단층의 제4기 이전 운 동사 및 단층암 특성을 정리하면 다음과 같다. 음성 분지의 동쪽에 분포하는 기반암에 압쇄암계열이 분 포하며, 압쇄변형작용이 음성분지 경계부로 갈수록 강해짐이 보고되었다(Kim et al., 1982). Jang and Lee (2012)와 Park and Lee (2012)는 강원도 횡성군 학곡리 일대에 발달하는 금왕단층의 내부구조 및 단 층암을 Sibson의 분류기준에 의해 분류하고 미구조 특성을 파악하였으며, 그들의 생성순서를 비교하여 금왕단층의 운동사를 파악하였다. 그들은 파쇄암계 열 내부에 압쇄암계열이 잔유물로 남아 있음을 보고 하였다(Jang and Lee, 2012). 이러한 압쇄암계열은 중생대 쥐라기에 기반암이 지하 약 10~15km 이상 에서 연성전단운동에 의해 형성될 때 금왕전단대 (Keumwang Shear Zone) 내에 발달한 것으로 추정 된다. 금왕전단대는 백악기 초기의 대보조산운동 중 에 지하 약 1~4 km 보다는 깊고 10~15 km 얕은 곳 까지 상승하였으며, 좌수향 주향이동 운동의 취성단 승대로 전이되어 파쇄암계열의 단층암을 형성하였 던 것으로 해석된다(Choi, 1996; Lee, 2010; Lee and Kim, 2011; Hong and Lee, 2012; Park and Lee, 2012; Hong, 2013). Choi (1996)에 의해 명명된 금 왕단층은 파쇄암 계열로 이루어진 취성단층을 의미 하며, 초파쇄암을 중심으로 파쇄암, 원파쇄암, 파쇄 미각력암이 대칭적으로 분포하고 있는 것으로 보고 되었다(Lee and Kim, 2011; Hong and Lee, 2012; Jang and Lee, 2012; Park and Lee, 2012). Lee and Kim (2011)은 금왕단층대를 가로지르면서 미구조, 구성광물, 반상쇄정의 크기, 원마도 값의 변화 등을 분석하여 단층의 내부구조와 상호관계를 밝혔다. 그 들은 파쇄 미각력암에서 원파쇄암, 파쇄암, 초파쇄 암으로 갈수록 변위량이 증가함에 따라 파쇄유동작 용이 증가하여 균열밀도, 쇄정의 원마도 값, 기질의 함량이 증가하고 쇄정입자의 크기가 감소한다고 보 고하였다(Lee, 2010; Lee and Kim, 2011; Hong and Lee, 2012; Jang and Lee, 2012; Park and Lee, 2012). Park and Lee (2012)는 연구지역에 분포하는 단층암과 기반암들의 생성순서를 이용하여 금왕단 층의 단층활동 역사를 파악하였다. 그들은 파쇄암계 열의 단층암이 지표 약 1~4 km 보다 얕은 곳까지 융 기한 후 금왕단층이 재활동하여 파쇄암계열의 일부 단층암이 단층비지로 전이되었으며, 음성분지, 풍암 분지를 형성하였다고 보고하였다(Cluezel et al., 1991; Kim et al., 1994; Koh, 1995; Cheong et al., 1999, 2000; Lee, 2010; Lee and Kim, 2011; Hong and Lee, 2012; Park and Lee, 2012; Hong, 2013). 이러한 퇴적분지에 백악기 퇴적암이 퇴적된 후, 금 왕단층이 재활동함에 따라 전단압축(transpression) 작용에 의해 퇴적암에 습곡, 절리, 단층 등의 지질구 조가 형성된 것으로 해석된다(Cheong, 1987; Choi, 1996).

또한 최근 Lee (2010)는 금왕단층의 북동쪽 연장 부인 인재군 상남면 일대에 발달하는 금왕단층의 특 성 및 활동시기를 규명하였다. Lee (2010)는 단층비 지의 ESR 연대측정방법을 이용하여 110 ka, 170 ka, 220 ka에 금왕단층이 재활동 하였다고 보고하였다. Hong (2013)은 홍천군 동면 및 서석면 일대에 발달 된 단층암의 형성시기를 이용하여 금왕단층의 운동 사를 밝혔다. Hong (2013)은 단층비지의 ESR 연대 측정에 의하여 260 ka, 340~370 ka, 470 ka, 780~790 ka에 금왕단층이 재활동 하였다고 보고하였다. 또 한, Hong and Lee (2012)는 충북 음성군 맹동면 일 대에 발달된 금왕단층에서 채취한 단층비지를 이용 하여 ESR 연대측정을 실시하여 활동시기를 규명하 고 시간-공간적 활동패턴을 파악하였다. 그들은 710 ka, 480 ka, 290~350 ka에 단층비지가 재활동 하였 다고 보고하였다.

단층대 내에 발달된 각각의 단층들은 각각의 활 동역사를 가지고 있으며, 활동하고 있는 몇몇의 단 층들은 어느 순간 단층운동이 멈추고 다른 단층들이 활동하게 된다(Knipe, 1989). ESR 연대측정방법은 단층비지의 마지막 활동시기만을 결정할 수 있다. 예를 들어 단층대 내에 세 개의 단층이 발달되어 있 으며, 이미 여러 번 재활동 했다고 가정해보자(그림 1). 반복되는 단층활동에 의해 각 단층비지의 ESR 신호세기는 여러 번 영(zero)이 될 수 있지만, 우리 는 오직 주단층 및 부수단층 1과 2에서 채취한 단층 비지의 마지막 활동시기만을 결정할 수 있다. 그림 1 에서 활동시기 A에는 주단층 및 부수단층 1, 부수단 층 2가 모두 활동하였다. 활동시기 B와 C에는 주단 층과 부수단층 2만 재활동 하였으며, 부수단층 1은 활동하지 않았다. 단층 활동시기 D에서는 주단층만 재활동 하였으며, 부수단층들은 재활동하지 않았다 고 가정해보자. 부수단층 1로부터 활동시기 A를 결 정할 수 있고 부수단층 2로부터 활동시기 C를 결정 할 수 있다. 주단층으로 부터는 오직 마지막 활동시



Fig. 1. Temporal variations of ESR intensities of a fault zone. The intensities of ESR signals are zeroed by a series of fault activities. The main fault and subsidiary faults have their own movement histories. However, we can determine the time of the last reactivation of fault gouge for each fault, using ESR method. Steeper rise in ESR intensity after faulting results from creation of new precursor ESR centers by shearing (modified from Lee and Schwarcz, 1996).

기 D만 결정할 수 있었지만, 부수단층들로부터 활동 시기 A와 B를 결정함으로써 단층대의 활동사를 규 명할 수 있다(그림 1). 하지만 활동시기 C의 기록에 의하여 활동시기 B의 기록이 지워져 주단층 및 부수 단층들을 통해서 활동시기 B를 결정할 수 없으며, 각각 단층들의 과거 단층활동이력을 알아낼 수 없다 는 것은 ESR 연대측정 방법의 단점일 수 있다. 하지 만 역사지진 및 계기지진의 연구에 의하면, 지진이 발생했을 때, 단층대 내의 일부 주단층 및 부수단층 들은 활동하고 일부 단층들은 활동하지 않았음이 보 고되었다(Kamb *et al.*, 1971).

단층비지대는 주향방향 또는 경사방향으로 폭의 변화가 심한 편이며, 일부 지점에서는 여러 단층비 지띠로 구성되어 있다. 단층비지의 ESR 연대측정에 의하면 각각의 비지띠는 다른 연대를 보이며, 이는 위에서 설명한 단층활동 중에 모든 단층비지의 ESR 신호가 모두 영이 되지 않는다고 해석하였다(Lee and Schwarcz, 1996; Lee, 2010; Hong and Lee, 2012; Yang and Lee, 2012). Lee and Schwarcz (1996, 2001)는 단층비지대의 진화양식을 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ 및 Ⅳ으로 나누어 구분하였다(그림 2). 진화양식 Ⅰ 은 변형경화작용(strain hardening)의해 기존에 발 달되어 있던 단층비지띠와 기반암 사이에 새로운 단층비지띠가 형성되는 것을 말한다(그림 2a). 이 경우에는 단층비지대의 두께가 증가하게 되며, 기 존에 발달되어 있던 단층비지띠는 활동하지 않고 새로운 단층비지띠가 형성되어 단층비지대의 중앙 부와 주변부는 각기 다른 활동시기를 지시하게 된



Fig. 2. Schematic diagram of faulting mode (modified from Lee and Schwarcz, 1996, 2011). (a) Type I faulting mode. (b) Type II faulting mode. (c) Type III faulting mode. (d) Type IV faulting mode.

다(Wojtal and Mitra, 1986; Lee and Schwarcz, 1996; Yang and Lee, 2012). 진화양식 Ⅱ는 변형연 화작용에 의해 기존에 발달되어 있던 단층비지대 내에 새로운 단층비지띠가 형성되는 것을 말한다(그 림 2b). 이 경우 기존의 단층비지 활동연대와 재활동 한 단층비지띠의 활동시기를 각각 결정할 수 있다 (Wojtal and Mitra, 1986; Lee and Schwarcz, 1996; Yang and Lee, 2012). 진화 양식 Ⅲ은 변형연화작용 에 의해 단층비지대 전체가 재활동한 것을 말한다 (그림 2c). 이 경우에는 단층비지대 내에 단층비지 띠들이 혼합되고 지질구조요소들이 중첩되기 때 문에 단층활동 시기를 구분할 수 없다(Woital and Mitra, 1986; Lee and Schwarcz, 1996; Yang and Lee, 2012). 진화양식 Ⅳ은 변형경화작용에 의해 단 층비지대가 분리되거나 단층손상대 내에 부수단층 이 형성된 것을 말한다(그림 2d; Lee and Schwarcz, 2001; Yang and Lee, 2012). 따라서 진화양식 I, II 및 Ⅳ는 한 지점에서 1회 이상의 단층활동 시기를 지

시할 수 있으며, 진화양식 III은 마지막 단층활동 시 기만을 지시한다(그림 1; Lee and Schwarcz, 1996; Yang and Lee, 2012).

이 논문의 목적은 충청북도 진천-음성군 일대에 발달된 음성분지의 경계단층인 금왕단층의 제4기 시간-공간적 활동형태를 파악하는 것이다. 이를 수 행하기 위하여 주단층과 부수단층들이 각기 다른 활동시기를 대표한다는 점(그림 1)과 여러 띠로 구 성된 단층비지대에서는 각각의 단층비지띠들이 각 기 다른 활동시기를 지시한다는 점(그림 2)을 이용 하여 연구지역에서 금왕단층의 활동이력을 파악하 였다.

2. 일반지질

연구지역의 북서쪽에는 쥐라기 흑운모화강암이 분포하고 남동쪽 음성분지에는 백악기 초평층이 분 포하고 있다. 흑운모화강암과 초평층은 금왕단층으



Fig. 3. Location and geological maps of the study area. (a) Geological map. (b), (c) Location map (modified from Choi and Choi, 2007).



Fig. 4. Digital elevation model (DEM) of the study area. White arrows indicate the trace of the Keumwang Fault.

로 접촉하고 있다(그림 3). 금왕단층의 남동쪽에 초 평층이 분포하는 지역은 비교적 높은 산지로 되어 있으며, 북서쪽의 흑운모화강암 분포지역은 낮은 평 야 및 구릉지대로 되어있다(그림 4).

흑운모화강암은 중립 내지 조립의 입자크기를 보 이며, 주요 구성광물은 석영, 장석류 및 흑운모이다 (그림 5). 풍화정도는 매우 심하며, 화학적 풍화에 의 해 장석류가 세리사이트나 점토광물로 변질되어 있 다(Cheong *et al.*, 1976). Ryang (2013)은 음성분지 경계부에는 조립질 충적퇴적층이 우세하고 하류방 향으로 가면서 조립질과 세립질 퇴적층이 교호하는 하천계 퇴적층이 발달하며, 분지의 퇴적중심에는 세 립질 호소퇴적층이 퇴적되었다고 보고하였다. 연구 지역의 음성분지 경계부에는 층리가 발달된 조립사 암이 우세하게 나타나고, 분지 중앙부로 갈수록 괴 상의 적색 세립질 사암(그림 6a, 6b)과 이암(그림 6 c, 6d)이 주를 이루며 분포한다.



Fig. 5. Outcrop photographs and microphotograph of the biotite granite in the study area (Bt: biotite, Qtz: quartz, Mc: microcline).



Fig. 6. Photographs of rock slabs and thin sections of the sedimentary rocks in the study area. (a), (c), (e) Sandstones. (b), (d), (f) Mudrocks.

3. 연구지역에 발달된 금왕단층의 기하학적 특성

주향이동성 단층작용은 정단층, 역단층, 충상단 층, 습곡, 부수단층(subsidiary faults), 절리 등을 포 함한 여러 이차적인 지질구조들을 형성하며(그림 7a), 부수단층들은 전체적인 주향이동 방향과 운동 감각에 기초하여 Y-전단, R-전단, R'-전단, P-전단으 로 분류된다(그림 7b). Y-전단은 주향이동단층의 방 향과 평행하게 발달되며, 주향이동단층의 운동감각 과 일치한다. R-전단은 주단층 방향에 저각으로 발 달되며, 주향이동단층의 운동감각과 일치하는 반면 R'-전단은 R-전단보다는 덜 발달하며, 주단층 방향 에 고각을 이루며 역운동감각으로 발달한다. P-전단 은 보통 R-전단이 형성된 이후에 발달하고 주단층의 운동감각과 일치한다(Fossen, 2010).

3.1 A 지점 금왕단층의 특성 및 ESR 연대

Hong and Lee (2012)는 A 지점에서 금왕단층의



Fig. 7. (a) Faults and folds generated by left-lateral simple shear in a strike-slip fault (modified from Waldron, 2005; Davis *et al.*, 2012). (b) Directional nomenclatures and geometrical relationships of the structural elements (modified from Rutter *et al.*, 1986).



Fig. 8. Outcrop photographs of the fault core of the Keumwang Fault at the A site (after Hong and Lee, 2012).

특성을 파악하고 단층비지의 활동시기를 ESR 연대 측정방법으로 규명하여 고지진과 연관된 단층운동 패턴을 파악하였다. A 지점에는 화강암에서 유래된 파쇄암과 백악기 퇴적암 사이 경계부에 폭이 약 3 m인 단층비지로 구성된 단층핵이 발달되어 있다(Hong and Lee, 2012). 퇴적암에 발달된 단층손상대와 단 층핵 사이에는 폭이 약 7 cm인 단층비지띠가 발달되 어 있으며, 이곳에서 시료 KW-1을 채취하였다(그림 8a). KW-1을 채취한 지점에서 경사방향으로 약 150 cm 떨어진 곳에서 KW-2 시료를 채취하였다(그림 8b). KW-3은 KW-2에서 서쪽으로 약 50 cm 지점에 서 채취하였으며(그림 8c), KW-4는 비교적 암편이 많은 단층비지에서 채취하였다(그림 8d). 파쇄암에 발달된 단층손상대와 단층핵 사이에 폭이 약 2~5 cm인 단층비지띠가 N35°E/83°NW의 태위를 갖고 발달되어 있다. 이곳에서 KW-5와 KW-6을 약 10 cm간격으로 채취하였다(그림 8e, 8f).

Hong and Lee (2012)에 의하면 A 지점의 화 강암에서 유래된 파쇄암과 단층핵 사이에 발달된 단층비지띠에서 채취한 KW-5, KW-6 시료의 ESR 연대는 각각 290±30 ka, 350±30 ka이며, 오차한계 내에서 일치하며 이들의 평균을 320 ka로 해석하 였다(그림 8e). 단층비지대의 중앙부에서 채취한 KW-4의 ESR 연대는 480±40 ka이며(그림 8d), 파쇄암의 잔유물을 포함한 단층비지에서 채취한 KW-3의 ESR 연대는 710±10 ka이다(그림 8c). 단 층핵과 백악기 사암의 단층손상대 사이에 발달된 단층비지띠에서 채취한 KW-1과 KW-2는 ESR 신 호가 포화되어 ESR 연대를 측정할 수 없었다(그림 8a, 8b).

3.2 B 지점의 단층손상대에 발달된 부수단층의 특성 및 시료채취

B 지점에서는 흑운모화강암에서 유래된 파쇄암과 백악기 퇴적암의 경계부가 야외에서 발견되지 않았 으며, 백악기 퇴적암에 분포하는 단층손상대에는 부 수단층들이 발달되어 있다. 따라서 주단층의 단층면은 확인할 수 없었으며, 그림 3에서 확인되는 금왕단층의 일반적인 방향성을 토대로 B 지점 내에 발달된 부수단 층들을 결정하였다. N71~81°E/60~65°SE 방향의 단 층들은 Y-전단방향의 단층으로 해석되며, N80~86°W/ 60~67°NE 및 N80~86°W/62~68°SW 방향의 단층 들은 P-전단방향의 단층으로 해석된다(그림 9). 이 중에서 N86°W/62°SW 방향의 단층을 따라 폭이 약 3~7 cm인 단층비지가 발달되어 있으며, 이곳에서 시료 HK27-1을 채취하였다(그림 10a). 또한, 단층면 의 태위가 N82°W/67°NE인 P-전단방향의 부수단 층에 발달된 단층비지의 폭은 약 3~10 cm이며, 이 곳에서 시료 HK27-2를 채취하였다(그림 10b). 약 15 cm 폭의 단층비지띠를 가지는 부수단층도 발달되어 있으나 단층면의 방향은 측정하기 어려웠으며, 이곳 에서 시료 HK27-3을 채취하였다(그림 10c). 단층면 의 방향이 N76°E/65°SE인 Y-전단방향의 부수단층 에는 폭 약 7 cm인 단층비지가 발달되어 있으며, 이 곳에서 시료 HK27-4를 채취하였다(그림 10d).

3.3 C 지점의 금왕단층 특성 및 시료채취

쥐라기 흑운모화강암에서 유래된 파쇄암과 백악 기 초평층의 이암 경계를 따라 주단층의 단층핵이 발달되어 있다. 단층비지로 구성된 단층핵의 폭은 약 90 cm이며, 단층비지 내부에는 이암의 암편이 잔 유물로 포함되어 있다(그림 11a). 단층핵과 단층손 상대 사이의 경계에는 N60°E/65°SE 방향으로 주 단층면이 발달되어 있으며, 이곳에서 시료 HK001-1 을 채취하였다(그림 11a). 단층핵과 화강암에서 유 래된 파쇄암 사이의 경계에는 N66°E/70°SE 방향으 로 단층면이 발달되어 있으며, 이곳에서 시료 HK001-3 을 채취하였다(그림 11a). 단층비지에는 점토광물 의 선택배향에 의한 엽리가 단층면과 거의 평행인 N66°E/70°SE의 방향으로 발달되어 있다(그림 11b).

이암에 발달된 단층손상대에는 부수단층들이 발 달되어 있으며, 금왕단층의 좌수향 주향이동 운동을 고려하여 각각을 Y-전단방향의 단층, R-전단방향의



Fig. 9. Stereo plots of subsidiary faults in the B site. (a) Faults in the orientation of Y-shear. (b) Faults in the orientation of P-shear.

선택배향에 의한 엽리가 N53°E/60°SE의 방향으 로 발달되어 있다(그림 13a). R-전단방향의 단층은 N14°E/75°NW의 방향으로 발달되어 있으며, 단층 비지의 폭은 약 3 cm이다. 이곳에서 시료 HK001-2

단층, R'-전단방향의 단층으로 구분하였다(그림 12). Y-전단방향의 단층은 주단층 방향과 유사한 N50°E/ 55°SE의 방향으로 발달되어 있으며, 5 cm 폭의 단층 비지가 발달되어 있다. 단층비지 내에는 점토광물의



Fig. 10. Outcrop photographs of subsidiary faults developed in the damage zone of the Keumwang Fault at the B site.



Fig. 11. Outcrop photographs of the fault core of the Keumwang Fault at the C site.

를 채취하였다(그림 13b). R'-전단방향의 단층은 N26°W/80°NE 및 N59°W/64°NE 방향을 가진 우 수향의 주향이동단층이다(그림 13c, 13d).

 Table 1. Amount of U, Th, K for each sample of fault gouges.

Sample	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)
HK001-1	3.12±0.06	21.58±0.35	4.11±0.03
HK001-2	2.43±0.05	14.81 ± 0.30	2.67 ± 0.02
HK001-3	1.51±0.03	7.75±0.23	2.65 ± 0.02
HK27-1	3.85±0.09	25.34±0.57	3.73±0.03
HK27-2	3.74 ± 0.08	27.72±0.61	$3.94{\pm}0.03$
HK27-3	4.18±0.08	26.65±0.56	3.82±0.02
HK27-4	2.65 ± 0.05	27.95±0.62	4.99±0.03



Fig. 12. Stereo plots of subsidiary faults in the damage zone of the Keumwang Fault in the C site. (a) Faults in the orientation of main fault. (b) Faults in the orientation of Y-shear. (c) Faults in the orientation of R-shear. (d) Faults in the orientation of R'-shear. (e) Faults in the orientation of P-shear. (f) Orientation of reverse(thrust) fault.

4. 연구지역에 발달된 금왕단층의 ESR 연대

4.1 B 지점에서의 단층비지 ESR 연대

B 지점에서 채취한 시료에 대한 ESR 연대측정자 료는 표 1과 표 2에 제시되어 있으며, ESR 신호의 성 장곡선(growth curve)은 다음과 같은 특징을 보인 다. HK27-1에서 분리된 석영의 E'신호는 모든 입자 크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가하는 양상을 보 이며(그림 14a), Al 신호는 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 µm의 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 일정하게 증가 하는 양상을 보이나 100~150 μm 및 150~250 μm 의 입자크기에서는 Al 신호의 세기가 감마에너지의 양이 증가할수록 계단상으로 증가하는 경향이 있다 (그림 14b). HK27-2에서 분리된 석영 E' 신호는 25 ~45 µm, 45~75 µm, 75~100 µm의 입자크기에 서 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호세기가 규칙적으로 증가하며, 100~150 μm 및 150~250 μm 의 입자크기에서는 감마에너지의 양이 증가할수록 계단상으로 증가하는 경향이 있다(그림 14c). Al 신 호는 모든 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 불규칙하게 증가하 는 양상을 보인다(그림 14d). HK27-3의 석영 E' 신 호는 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 μm, 100~ 150 μm의 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호세기가 규칙적으로 증가하며, 150~250 μm의 입자크기에서 E' 신호세기는 감마 에너지의 양이 증가할수록 계단상으로 증가하는 경 향이 있다(그림 14e). Al 신호세기는 25~45 μm, 45 ~75 µm, 75~100 µm, 100~150 µm의 입자크기 에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신 호세기가 규칙적으로 증가하며, 150~250 μm의 입 자크기에서 Al 신호세기는 감마에너지의 양이 증가할 수록 계단상으로 증가하는 경향이 있다(그림 14f). HK27-4에서 분리된 석영의 E'와 Al 신호세기는 모 든 입자크기에 대해서 조사된 감마에너지의 양이 증 가할수록 ESR 신호세기가 규칙적으로 증가한다(그림 14g, 14h).

각각의 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계를 나타내는 그래프는 다음과 같은 특징을 보인다(그림 15). HK27-1은 입자크기 25~45 μm, 45~75 μm,



Fig. 13. Outcrop photographs of subsidiary faults in the damage zone of the Keumwang Fault at the C site.

75~100 μm에서 Al 신호를 이용하여 구한 ESR 연대 가 평탄역을 보이며, 입자크기 25~45 µm에서 E' 신 호로부터 구한 ESR 연대는 이 평탄역에 수렴한다. Al 신호를 이용한 ESR 연대 평탄역과 평탄역에 수렴하는 E' 신호를 이용하여 계산된 평탄 ESR 연대는 390±40 ka이다(그림 15a). HK27-2의 입자크기 25~45 µm, 45~75 μm, 75~100 μm에서 E' 신호를 이용하여 구한 ESR 연대는 연대 평탄역을 보이며, 이를 토대 로 계산된 평탄 ESR 연대는 530±40 ka이다(그림 15b). HK27-3의 입자크기 25~45 μm, 45~75 μm, 75~ 100 μm에서 E' 신호를 이용하여 구한 ESR 연대는 평탄역을 보이며, 이를 토대로 계산된 평탄 ESR 연 대는 560±50 ka이다(그림 15c). HK27-4는 입자크기 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 μm의 Al 신호를 이용하여 구한 ESR 연대가 평탄역을 보이며, 이를 토대로 계산된 평탄 ESR 연대는 140±10 ka이다(그 릮 15d).

4.2 C 지점에서의 단층비지 ESR 연대

C 지점에서 채취한 시료에 대한 ESR 연대측정 자료는 표 1과 표 2에 제시되어 있으며, ESR 신호의 성장곡선은 다음과 같은 특징을 보인다. HK001-1 에서 분리된 석영의 E'와 Al 신호의 세기는 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 μm의 입자크기에서 조 사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기가 규칙적으로 증가한다. 100~150 µm 및 150 ~250 µm의 입자크기에서 E' 및 Al 신호의 세기는 감마에너지의 양이 증가할수록 계단상으로 증가하 는 경향이 있다(그림 16a, 16b). HK001-2에서 분리 된 석영의 E' 신호의 세기는 25~45 μm, 45~75 μm, 75~100 μm, 100~150 μm의 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호의 세기 가 규칙적으로 증가하며, 150~250 μm의 입자크 기에서 E' 신호세기는 감마에너지의 양이 증가할 수록 불규칙하게 증가하는 경향이 있다(그림 16c).

1 \			e ,		1	
Sample	Grain size (um)	Center	$D_E(Gy)$	Dose rate (uGv/year)	ESR age (ka)	Weighted mean (ka)
HK001-1 B	25-45	E'	1.852 ± 678	5.171±432	358±134	
HK001-1 C	45-75	E'	1.985 ± 725	5.033±418	394±147	370±100
HK001-1 D	75-100	- E'	2.880 ± 719	4.892 ± 405	588±154	
HK001-1 B	25-45	Al	2.155±666	5.171±432	416±133	
HK001-1 C	45-75	Al	2.473 ± 541	5.033 ± 418	491±114	
HK001-1 D	75-100	Al	3.045 ± 649	4.892 ± 405	622±142	
HK001-2 B	25-45	Е'	1.664±489	3.488±291	477±145	
HK001-2 C	45-75	E'	1.665 ± 377	3.394±281	490±118	480±90
HK001-2 D	75-100	E'	2.638 ± 705	3.299±271	799±223	
HK001-2 E	100-150	E'	2,864±414	3,181±260	900±149	
HK001-3 B	25-45	E'	885±162	2,868±246	308±62	310±60
HK001-3 C	45-75	E'	$2,175\pm888$	2,788±238	780±325	
HK001-3 D	75-100	E'	2,220±343	2,707±229	820±144	
HK001-3 E	100-150	E'	1,490±234	2,605±218	571±101	
HK001-3 F	150-250	E'	2,263±485	2,428±201	932±213	
HK001-3 B	25-45	Al	2,057±258	2,868±246	717±108	
HK001-3 C	45-75	Al	1,896±437	2,788±238	680±167	
HK001-3 D	75-100	Al	2,907±593	2,707±229	1,073±236	
HK001-3 E	100-150	Al	2,742±847	2,605±218	1,052±336	
HK001-3 F	150-250	Al	2,855±964	2,428±201	1,175±408	
HK27-1 B	25-45	E'	2,098±249	5,261±441	398±57	
HK27-1 C	45-75	E'	2,649±425	5,123±426	517±93	
HK27-1 D	75-100	E'	3,700±572	4,984±413	712±130	
HK27-1 E	100-150	E'	4,155±564	4,810±396	863±137	
HK27-1 F	150-250	E'	4,967±807	4,513±367	1,100±199	
HK27-1 B	25-45	Al	362±70	5,258±441	371±127	
HK27-1 C	45-75	Al	1,148±322	2,150±426	383±72	390±40
HK27-1 D	75-100	Al	423±109	4,978±413	382±128	
НК27-2 В	25-45	E'	2,570±278	5,547±463	463±63	
HK27-2 C	45-75	E'	3,310±308	5,404±450	612±76	530±40
HK27-2 D	75-100	E'	$2,900 \pm 350$	5,255±435	551±80	
HK27-3 B	25-45	E'	3,730±794	6,410±542	581±133	
HK27-3 C	45-75	E'	3,381±421	6,239±524	541±81	560±50
HK27-3 D	75-100	E'	3,519±367	6,065±507	580±77	
HK27-3 E	100-150	E'	3,978±847	5,848±485	680±155	
HK27-4 B	25-45	Ε'	1,422±266	6,174±522	230±47	
HK27-4 C	45-75	E'	1,193±192	6,010±506	198±36	
HK27-4 D	75-100	E'	1,203±68	5,842±489	205±20	
HK27-4 E	100-150	E'	1,748±316	5,636±468	310±61	
HK27-4 F	150-250	E'	2,126±249	4,276±433	402±57	
HK27-4 B	25-45	Al	967±117	6,171±5222	156±23	
HK27-4 C	45-75	Al	496±109	6,007±506	132±21	140 ± 10
HK27-4 D	75-100	Al	821±103	5,839±489	140±21	
HK27-4 E	100-150	Al	1,229±198	5,631±468	218±55	
HK27-4 F	150-250	Al	1,294±126	5,271±433	245±31	

Table 2. Analytical data for ESR dating of fault gouge. 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.



Fig. 14. Typical examples of growth curves of ESR signals for samples collected in the B site.

HK001-2에서 분리된 석영의 Al 신호세기는 모든 입자크기에서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수 록 ESR 신호세기가 불규칙적으로 증가한다(그림 16d). HK001-3에서 분리된 석영의 E'와 Al 신호세 기는 모든 입자크기에 대해서 조사된 감마에너지의 양이 증가할수록 ESR 신호세기가 규칙적으로 증가 한다(그림 16e, 16f).

각각의 시료에 대한 ESR 연대와 입자크기의 관계 를 나타내는 그래프는 다음과 같은 특징을 보인다 (그림 17). HK001-1의 입자크기 25~45 μm, 45~ 75 μm에서 E' 신호를 이용하여 구한 ESR 연대는 평 탄역을 보이며, 이를 토대로 계산된 평탄 ESR 연대 는 370±100 ka이다(그림 17a). HK001-2는 입자크



Fig. 15. ESR ages vs. grain sizes for samples collected in the B site.



Fig. 16. Typical examples of growth curves of ESR signals for samples collected in the C site.

기 25~45 μm, 45~75 μm에서 E' 신호를 이용하여 구한 ESR 연대가 평탄역을 보이며, 이를 토대로 계



Fig. 17. ESR ages vs. grain sizes for samples collected in the C site.

산된 평탄 ESR 연대는 490±90 ka이다(그림 17b). HK001-3은 E' 신호를 이용하여 구한 ESR 연대가 입자가 작아질수록 감소하는 경향을 보이며, 입자크 기 25~45 μm를 이용하여 구한 최대 ESR 연대는 310±60 ka이다(그림 17c).

5. 토 의

5.1 단층비지 ESR 연대측정의 한계점

ESR 연대측정법을 이용하여 단층비지의 마지막 활동시기를 결정하기 위해서는 단층활동 중에 ESR 신호가 완전히 영(0)이 되어야 하며, 단층비지 내 석 영입자의 ESR 신호가 완전히 영이 되기 위해서는 단층면에 작용하는 수직응력이 적어도 약 3 MPa이상 이어야 한다(Fukuchi, 1988; Lee and Schwarcz, 1994; Schwarcz and Evans 1998). 예를 들면, Little Tujunga 지역에서 홀로세 동안의 상승률은 0.3 mm/yr 로 계산되었으며(Menges et al., 1979), 산안드레아스 단층에서 측정된 응력자료에 따르면, 최대수평응력 은 16 m 깊이에서 3 MPa의 값에 도달한다(Zoback et al., 1987; Hickman et al., 1988; Stock and Healy, 1988; Mount and Suppe, 1992). 이를 토대 로 Lee and Schwarcz (1996)은 Little Tujunga 지 역에서 ESR 연대의 하한(lower limit of ESR age) 을 다음과 같이 계산하였다. 깊이 16 m를 상승률 0.3 mm/yr로 나누어 Little Tujunga 지역에서 ESR 연 대의 하한을 5만 년으로 계산하였다. 일반적으로 석 영입자의 포화선량(saturation dose)은 6000~2000 Gy 범위를 갖는다. 조사율(dose rate)이 3000 μGy/yr 일 경우, 단층암에 대한 ESR 연대의 상한은 약 2~4 Ma로 추정된다. ESR 연대의 오차는 5~20%이며, ESR 신호의 세기가 포화상태에 가까울수록 오차가 커진다.

연구지역에서는 상승률 및 응력자료가 없어 연구 지역 단층비지의 ESR 연대 상한 및 하한을 계산할 수 없었다. 우리가 구한 단층비지의 ESR 연대는 단 층비지가 적어도 수십 m 이상의 깊이에 있을 때, 단 층이 재활동 했던 시기를 지시한다. 만일 화강암으 로부터 유래된 파쇄암과 단층비지 사이에 발달된 단층면을 따라 천부에서 단층운동이 일어났을 경 우, 단층비지의 ESR 신호는 영향을 받지 않기 때문 에 주 단층의 마지막 단층운동의 시기를 ESR 연대 측정법으로는 알아낼 수 없다. 따라서 연구지역에는 금왕단층에 의해 절단된 제4기 퇴적층이 분포하지 않아, 금왕단층의 마지막 활동시기를 결정할 수 없 었다.

5.2 금왕단층 ESR수치연대의 일관성

C 지점의 화강암으로부터 유래된 파쇄암과 퇴적 암 사이에 발달된 단층비지대에서 채취한 HK001-1 (370±100 ka)과 HK001-3 (310±60 ka)은 오차한 계 내에서 일치한다(그림 18c). 또한 이들은 C 지 점으로부터 북동쪽으로 약 7.5 km떨어진 A 지점의 화강암으로부터 유래된 파쇄암과 단층비지대 사 이에 발달된 단층비지띠에서 채취한 KW-5 (290± 30 ka), KW-6 (350±30 ka) 시료의 연대와 오차한 계 내에서 일치한다(그림 18a, 18c; Hong and Lee, 2012). B 지점에서는 화강암으로부터 유래된 파쇄암 과 백악기 퇴적암의 경계부에 발달된 단층핵을 발 견하지 못하였다. 다만 퇴적암의 단층손상대에 발 달된 부수단층의 단층비지에서 채취한 HK27-1 (390± 40 ka)의 연대가 A 및 C 지점의 단층핵에서 구한 ESR 연대와 오차범위 내에서 일치한다(그림 18a-c). 이는 약 290~390 ka에 A 지점부터 B 지점을 지나 C 지점까지 금왕단층이 활동했던 것으로 해석 된다(그림 18a-c).

A 지점의 KW-4 (480±40 ka), B 지점의 HK27-2 (530±40 ka), HK27-3 (560±50 ka) 및 C 지점의

HK001-2 (480±90 ka)의 ESR연대는 오차범위 내에 서 일치하며 약 480~560 ka에 A 지점부터 B 지점을 거쳐 C 지점까지 금왕단층이 활동했던 것으로 해석 된다(그림 18a-c).

A지점에서는 단층비지가 화강암으로부터 유래 된 파쇄암의 재활동으로 형성되었으며, B와 C 지점 에서는 단층비지가 이암으로부터 유래되었다. 이렇 게 모암 및 상응 조사량, 조사율 등이 다름에도 불구 하고 단층비지의 ESR 연대가 오차한계 내에서 일치 한다. 이러한 사실은 단층활동 중에 ESR 신호가 영



Fig. 18. Schematic diagrams showing the consistent ESR age estimates along the Keumwang Fault.

이 되지 않는다면 설명하기 어렵다.

5.3 연구지역 금왕단층의 제4기 활동형태

연구지역에서 시간적인 단층활동 특성을 보면, 4 번의 활동기와 4번의 휴식기가 약 18~20만 년 주기 로 반복되었음을 알 수 있다(그림 19). 약 710 ka에 음성군 맹동면 일대(A 지점)에서 단층활동이 일어 났으며(그림 20a), 이후 480~560 ka, 290~390 ka 에 음성군 맹동면 일대부터 진천군 덕산면 일대 (A, B, C 지점)까지 금왕단층이 재활동하였다(그림 20b, 20c). 140 ka에는 진천군 덕산면 일대(B 지점) 의 금왕단층이 재활동하였다(그림 20d). 이때 단층 핵에서는 파쇄암과 단층비지 사이에 발달된 단층면 을 따라 천부 단층운동이 일어난 것으로 추정된다. 연구지역의 금왕단층 주변에는 제4기 퇴적층이 분 포하지 않아 제4기 퇴적층을 절단한 단층노두가 발 견되지 않았다. 따라서 다른 연대측정 방법(OSL, C¹⁴ 연대측정)을 이용하여 단층활동 특성을 파악할 수 없었다. 위에서 분석한 단층활동 형태는 단층비 지의 ESR 연대측정자료만을 이용하여 파악하였으 며, 위 분석결과의 신빙성을 높이기 위해서는 제4기 층의 분포와 그를 절단하는 단층을 분석할 필요가 있다.



Fig. 19. Temporal activity patten of the Keumwang Fault in the study area.



Fig. 20. Spatial activity patten of the Keumwang Fault in the study area. (a) The Keumwang Fault was active in the Maedong-myeon, Eumseong-gun about 71 million years ago. (b), (c) The Keumwang Fault was active from Maedong-myeon, Eumseong-gun to Deoksan-myeon, Jincheon-gun about 48~56 million years and 29~39 million years ago. (d) The Keumwang Fault was active in the Deoksan-myeon, Jincheon-gun about 14 million years ago.

6. 결 론

첫째, 연구지역에서 채취한 단층비지의 ESR 연대 는 약 14만 년 전부터 56만 년 전 사이에 있다.

둘째, 연구지역 내 금왕단층은 14만 년 전, 31~39 만 년 전, 48~56만 년 전에 재활동하였다.

셋째, 연구지역의 융기율 및 응력자료가 없어 연 구지역 단층비지 ESR 연대의 상한 및 하한을 계산 할 수 없었으나, 이번 연구에서 측정한 단층비지의 ESR 연대는 적어도 지하 수십 m 이상의 깊이에서 재활동 했던 시기로 추정하였다.

넷째, 연구지역에는 금왕단층에 의해 절단된 제4 기 퇴적층이 분포하지 않아, 금왕단층의 마지막 활 동시기를 결정할 수 없었다.

다섯째, 화강암으로부터 유래된 파쇄암과 퇴적암 사이에 발달된 단층비지대에서 채취한 HK001-1, HK001-3과 이들로부터 북동쪽으로 약 7.5 km 떨어 진 곳에서 채취한 KW-5, KW-6 시료, 총 4개의 ESR 연대가 오차범위 내에서 일치함으로써 단층핵에 발 달된 단층비지에 기록된 마지막 활동시기는 약 34만 년 전이지만, 진천군 덕산면 일대의 단층손상대에서 약 14만 년 전의 단층활동이 기록되어 있기 때문에 금왕단층의 최후 운동시기는 약 14만 년 이후일 것 으로 해석된다.

여섯째, 약 71만 년 전에 음성군 맹동면 일대에서 단층활동이 일어났으며, 이후 약 48~56만 년 전, 약 29~39만 년 전에 음성군 맹동면 일대부터 진천군 덕 산면 일대까지 금왕단층이 재활동 하였다. 약 14만 년 전에는 진천군 덕산면 일대의 금왕단층이 재활동 하였다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-8110)의 지원으로 수행 되었습니다. 이 논문의 심사를 맡아 유익한 조언을 통해 논문의 질을 향상 시켜 주신 최원학 박사님과 익명의 심사위원님께 감 사드립니다.

REFERENCES

- 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).
- Cheong, S.W., 1987, Structural characteristics of the Northern Part of the sedimentary basin in the Eumseong-Jeungpyeong-gun, Korea. MS. thesis, Seoul National University, 64 p (in Korean with English abstract)-Unpublished.
- Cheong, S.W., Kim, J.H. and Choi, Y.S., 1999, The pencil structures of Cretaceous sedimentary rocks in the northern part of the Eumseong basin, Korea. Journal of Korean Earth Science Society, 20, 497-504 (in Korean with English abstract).
- Choi, P.Y. and Choi, Y.S. 2007, Stress Model of the opening of the Cretaceous Eumseong Basin. Journal of KIGAM Bulletin, 11, 4, 3-16 (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).
- Chough, S.K., Kwon, S.T., Ree, J.H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. Earth Science Reviews, 52, 175-235.
- Cluzel, D., Lee, B.J. and Cadet, J.P., 1991, Indosinian dex-

tral ductile fault system and synkinematic plutonism in the southwest of the Ogcheon belt (South Korea). Tectonophysics, 194, 131-151.

- Davis, G.H., Reynolds, S.J. and Kluth, C.F., 2012, Structural geology of rocks and regions, Third edition, Wiley, 336 p.
- Fossen, H., 2010, Structural geology, Cambridge, 358-360 p.
- Fukuchi, T., 1988, Applicability of ESR dating using multiple centres to fault movement-The case of the Itoigawa-Shizuoka tectonic line, a major fault in Japan. Quaternary Science Reviews, 7, 509-514.
- Hickman, S.H., Zoback, M.D. and Healy, J.H., 1988, Continuation of a deep borehole stress measurement profile near the San Andreas fault. 1. Hydraulic fracturing stress measurements at Hi Vista, Mojave desert, California. Journal of Geophysical Research, 93, 15183-15195.
- Hong, N.R., 2013, Structural features and movement history of the Keumwang Fault at Hongcheon-gun, Kangwon-do, Korea. MS. thesis, Kangwon National University, Chuncheon, 87 p (in Korean with English abstract)- Unpublished.
- 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, Ganwon-do. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 11-26 (in Korean with English abstract).
- Kamb, B., Silver, L.T., Abrams, M.J., Carter, B.A., Jordan, T.H. and Minster, J.B., 1971, Pattern of faulting and nature of fault movement in the San Fernando earthquake. U.S. Geological Survey Professional Paper 733, 41-54 p.
- Kim, J.H., Hong, S.H. and Hwang, S.K., 1982, Geological report of the Shinhung sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 27 p (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H., Lee, J.Y. and Kee, W.S., 1994, Structural evolution of the Cretaceous Puyeo Basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 30, 182-192 (in Korean with English abstract).
- Knipe, R.J., 1989, Deformation mechanisms-Recognition from natural tectonics. Journal of Structural Geology, 11, 127-146.
- Koh, H.J., 1995, Structural analysis and tectonic evolution of the Ogcheon Supergroup, Goesan, central part of the Ogcheon belt, Korea. Ph.D. thesis, Seoul National University, 282 p.
- Lee, H.K., 2010, Structural features of the Keumwang fault zone at Sangnam-myon, Inje-gun, Gangwon-do. Journal

of the Geological Society of Korea, 46, 561-576 (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).
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P., 1994, Criteria for complete zeroing of ESR signals during faulting of the San Gabriel fault zone, Southern California. Tectonophysics, 235, 317-337.
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P., 1996, Electron spin resonance plateau dating of periodicity of activity on the San Gabriel fault zone, Southern California. Journal of Geological Society of America Bulletin, 108, 735-746.
- Lee, H.K. and Schwarcz, H.P., 2001, ESR dating of the subsidiary faults in the Yangsan fault system, Korea. Quaternary Science Reviews, 20, 999-1003.
- Menges, C.M., Mcfadden, L.D. and Bull, W.B., 1979, Terrace development in a thrust-faulted terrane, San Fernando area, Southern Caulifornia. Geological Society of America Abstracts with Programs, 17, 370 p
- Mount, V.S. and Suppe, J., 1992, Present-day stress orientation adjacent to active strike-slip faults: California and Sumatra. Journal of Geophysical Research, 97, 11995-12013.
- 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).
- Ramsay, J.G., 1967, Folding and Fracturing of rocks. McGraw-Hill, New York, 568 p.
- Rutter, E.H., Maddock, R.H., Hall, S.H. and White, S.H., 1986, Comparative microstructures of natural and ex-

perimentally produced clay-bearing fault gouges. Pure and Applied Geophysics, 124, 3-30.

- 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.
- Schulz, S.E. and Evans, J.P., 1998, Spatial variability in microscopic deformation and composition of the Punchbowl fault, southern california: implications for mechanism, fluid-rock interaction, and fault morphology. Tectonophysics, 296, 223-244.
- Sibson, R.H., 1977, Fault rocks and fault mechanisms. Journal of Geological Society of London, 133, 191-213.
- Stock, J.M. and Healy, J.H., 1988, Continuation of a deep borehole stress measurement profile near the San Andreas fault. 2. Hydraulic fracturing stress measurements at Black Butte, Mojave Desert, California. Journal of Geophysical Research, 93, 15196-15206.
- Waldron, J.W.F., 2005, Extensional fault arrays in strike-slip and transtension. Journal of Structural Geology, 27, 23-34.
- Watts, M.J. and Williams, G.D., 1979, Fault rocks as indicators of progressive shear deformation in the Guingamp region, Brittany. Journal of Structural Geology, 1, 323-332.
- Wojtal, S. and Mitra, G., 1986, Strain hardening and strain softing in fault zones from foreland thrusts. Geological Society of American Bulletin, 97, 674-687.
- Yang, J.S. and Lee, H.K., 2012, ESR dating of fault gouge from the Gacheon 1 site on the Yangsan fault zone. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 459-472 (in Korean with English abstract).
- Zoback, M.D. and 12 others, 1987, New evidence on the state of stress of the San Andreas fault system. Science, 238, 1105-111.

투	고	일	:	2014년	12월	5일
심	사	일	:	2014년	12월	5일
심서	사완료	로일	:	2014년	12월	26일