현생 응력하에서 단층 마찰계수에 따른 임곡단층의 거동 가능성 해석

나현우¹ · 장찬동^{1*} · 장천중²

¹충남대학교 지질환경과학과, ²한국수력원자력(주) 중앙연구원

Friction-dependent Slip Behavior of Imgok Fault under the Present-day Stress Field

Hyun-Woo Na¹, Chandong Chang^{1*}, and Chun-Joong Chang²

¹Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University

²Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power

강릉지역의 NNE-SSW 주향을 갖는 선형구조(임곡단층)를 대상으로, ASTER 영상과 항공사진을 이용한 구조 영상 분석과 야외지질조사를 통해 단층의 기하 및 운동학적 특성을 관찰하고 단층의 지질역학적 특성에 대한 분석을 시도하였다. 현생 응력장 하에서 임곡단층의 운동 가능성 여부를 파악하기 위해 이용된 주변 지진자료는 이 지역의 현생 최대응력방향이 약 N70°E이며 주향이동과 역단층 운동에 유리한 응력상태임을 보여준다. 현생 응력장 하에서 임곡단층이 운동하기에는 최적의 방향에서 오차 범위 밖의 주향을 보여 전단 성향이 낮은 것으로 분석되었다. 그러나 단층의 역학적 특성을 나타내는 마찰계수(μ)가 상당히 낮은 경우(예를 들어 0.25 이하) 현생 응력장 하에서도 운동 가능성이 있는 것으로 파악된다.

주요어 : 임곡단층, 지질역학, 현생 응력, 전단성향, 마찰계수

We carried out geometrical, kinematic, and geomechanical analyses on a lineament (the Imgok fault) near Gangneung, observed in ASTER images and aerial photographs, and field surveys. Earthquake focal mechanism solutions, used to estimate the present-day stress state, revealed that the direction of maximum compression is approximately N70°E and that the stress condition is in favor of either strike-slip or reverse movement on the fault. The strike of the fault is not ideal for slip under the present-day stress field and thus the fault has a low slip tendency. However, the fault may be able to slip if the frictional coefficient (μ), representing the resistance of the fault to slip, is sufficiently low (e.g., $\mu < 0.25$).

Key words : Imgok fault, geomechanics, present-day stress, slip tendency, frictional coefficient

*Corresponding author: cchang@cnu.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

단층의 재활성 여부에 대한 이해는 부지 안정이 중요한 시설물들(원자력발전소, 방사성 폐기물 지층 처분지, 석유비축기지, 댐 등)의 안정성 평가에 중요하며, 또한 이산화탄소 지중저장 처분지 잠재적 누출 경로 파악에 있어서도 중요하다. 대규모 단층대 및 주변 단층들에 관한 국내 연구들은 단층에 대한 운동학적(kinematics)인 측면에 주로 초점을 두었고(예, Chang and Chang, 1998; Hwang, 1994; Ryoo et al., 2002; Kee et al., 2007a) 단층운동을 야기 시켰던 응력장에 대한 연구는 고응력 복원, 지역적 규모의 변형 운동사 이해를 위해 비교적 제한적으로 이루어져 왔다(예, Choi et al., 2001; Son and Kim, 2005). 그러나 현생 응력 하에서 이들 단층들의 전단성향(slip tendency) 및 지질역학적 특성에 대한 연구는 국내에서는 상당히 제한적으로 이루어졌다(Lee and Chang, 2009; Chang et al., 2010). 단층에 대한 지질역학적 연구가 제한된 이유 중 하나는 분석에 필요한 현생 지각응력장의 크기에 대한 대표적인 응력 측정 자료가 미비하기 때문이다. 단지 현생 응력의 방향에 대해서는 지진자료를 통해 지각 규모에서의 현생 응력의 방향을 유추할 수 있다(Jun, 1991; Jun and Jeon, 2010).

본 연구는 강원도 강릉지역에 위치한 임곡단층에 대

해서 위성 및 항공영상을 통해 관찰한 단층운동과 관련된 것이라 판단되는 지형학적 흔적과 단층 자세로부터 이 단층이 최근에 운동한 단층이 아닐까라는 의문에서 시작되었다. 임곡단층은 Son (1966)에 의해 그 실체가 최초로 인지되었고 그 후 Kihm et al. (2012)에 의해 조사된 바 있는 NNE-SSW 주향의 단층이다. 임곡단층의 재활 가능성 여부 판단을 위해서는 연대측정, 고응력 복원 등의 다양한 연구들이 충분히 선행되어야 하겠지만 본 연구에서는 독립적으로 파악 또는 유추된 현생 응력장 하에서 이 단층의 전단성향을 분석하는 것에 초점을 두었다. 또한 단층의 전단운동이 가능하기 위한 조건에 대한 분석을 시도하였으며 이를 통해 임곡단층의 역학적 상태, 현생 응력과의 상관관계를 파악하고자 하였다.

임곡단층의 지질구조

구조 영상 분석

본 연구에서 주목하고 있는 선형구조는 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 영상에서 처음 관찰되었다(Fig. 1a). 이 선형구조는 강원도 강릉시 강동면 일대에 위치하며, ASTER 영상에서 이 선형구조는 NNE-SSW 방향으로 10 km 이상의 연속성을 보이며 발달해 있다. Fig. 1a

Fig. 1. (a) ASTER satellite image showing a NNE-SSW lineament (the Imgok fault) and (b) aerial photograph showing a close-up view of the lineament and associated dextral ridge and channel offsets.

상에서는 표현이 되어있지 않으나 입체경을 이용한 3차원 지형 분석을 통해서 선형구조의 서쪽지괴는 동쪽지괴에 비해 비교적 융기되어 있는 지형적 양상을 보임을 알 수 있었다. 또한 서쪽지괴의 경사면 아래로 분포하는 선상지 지형면과 삼각 말단면은 선형구조의 주향과 동일하게 발달한다.

선형구조 주변의 지형적 특성 및 변위지형 특성에 대한 보다 자세한 분석을 위해 1:20,000 축척의 항공사진을 이용하였다. 선형구조의 상부 북단의 약 2 km 구간에 대한 항공사진(Fig. 1b)에서 선형구조를 가로지르는 수 개의 하천과 능선들이 선형구조에 의해 우수향으로 이격되어 있음을 관찰할 수 있다. 선형구조를 기준으로 좌우가 이격되어 있는 양상은 비교적 소규모이지만 국지적으로만 나타나는 것이 아니라 선형구조를 따라 일관되며 체계적인 형태로 나타나고 있다. 이러한 지표 변위의 흔적들은 이 선형구조가 우수향 주향이동 단층일 것이라는 가능성을 시사한다. 항공사진상(Fig. 1b)에서 관찰되는 하천의 겹보기 수평 변위량은 모든 하천에서 동일하지 않다. 변형된 지형의 구체적 형성 시기는 알 수 없으나 이는 하천의 형성 연대가 동일하지 않고, 오래된 하천 일수록 여러 번 단층운동을 겪었기 때문일 것으로 볼 수도 있다. 즉, 하천의 이격정도로 표현되는 단층의 주향이동 변위량이 다르다는 것은 하천에 반영된 누적된 단층 변위량이 다르기 때문일 것이라는 것이다. 이것이 사실이라면 이 선형구조는 신기 운동을 한 것이고 활성단층일 가능성이 높은 것으로 해석되게 된다(KEPRI, 2002). 이러한 선형구조에 동반된 기하학적 특징들로부터 유추할 수 있는 단층의 활성 여부를 지질역학적인 다른 접근으로 분석하여 확인하고자 하는 것이 본 연구의 동기이다.

최근 Kihm et al. (2012)은 독립적인 연구를 통해 강릉탄전 북부 지역의 단층(임곡단층)이 약 20 km 이상의 연장성을 갖는 것으로 추적되는 주향 약 N15°E, 고경사의 우수향의 주향이동단층임을 보고하였다. 또한, Hwang et al. (2011)은 임곡단층의 동쪽 지역 즉, 임곡단층의 연장부에서 NNE-SSW 방향으로 주향하는 단층구조를 보고한 바 있다. 이러한 증거들을 근거로 볼 때 위성 및 항공영상을 통해 관찰한 선형구조는 임곡단층과 일치한다. Fig. 1b의 한 예에서 보여진 선형구조 주변에서 관찰되는 변위지형들(channel offset, ridge offset)과 유사한 특징들이 선형구조 거의 전 구간에 걸쳐 관찰된다. 이러한 분석은 야외 지질 조사를 통해 규명될 수 있으며 다음 장에 기술하였다.

지질구조

임곡단층의 주변 지질은 옥천대의 북동부에 속하는 고생대 퇴적암으로 구성되어있다(Fig. 2, Kihm and Hwang, 2011). 이 퇴적암류는 오르도비스기의 석빙산층, 석탄기의 만항층, 금천층과 페름기의 장성층, 함백산층, 망덕산층, 언별리층 등으로 분포하며 제4기 충적층은 임곡단층의 북쪽을 피복하여 임곡천을 따라 분포한다(Dong-A geologic consultant, 1975; Hwang et al., 2011; Kihm et al., 2012). 지질도상에서 보이는 여러 암상들(만항층, 평안누층군 등)이 임곡단층을 기준으로 우수향으로 약 3 km에서 4 km 정도로 이격되어 있음을 관찰할 수 있는데 이러한 개략적인 수평변위는 단층활동에 의한 누적 변위(cumulated displacement)일 가능성도 있으며 과거 복잡한 지질운동에 의해 실제 단층의 변위를 왜곡하여 보여줄 가능성도 있다. 임곡단층 동쪽의 연장부인 NNE-SSW 방향으로 주향하는 단층들은 단면 A-A'를 포함한 전체적인 기하학적 특성이 횡압축성 전단응력에 의하여 발생하는 꽃구조(positive flower structure)를 수반한 주향이동성 단층 특성을 보이는 것으로 추정되며 이는 임곡 주단층의 우수향 주향이동운동과 상반된다. 즉, 임곡단층 운동 이전에 형성된 구조적 특징으로 생각된다. 과거의 복잡한 지질운동은 선후관계가 명확하지 않으나 구조 영상 분석에서 언급한 서쪽 지괴의 융기와 관련하여 연구지역의 지각운동이 활발하였을 것이라고 생각된다. 꽃구조를 형성할 수 있는 압축력은 NNW-SSE 방향으로 추정할 수 있다. 이 압축력이 한반도에 광역적인 영향을 미친 것으로 가정하여 남동부지역 고응력 자료(Hwang, 1994; Moon et al., 2000; Son and Kim, 2005)를 관련지어 본다면 적어도 약 5 Ma 이전으로 판단된다. 또한 이들 구조들의 운동 시기는 정확히 알 수 없으나 이들 구조가 끊고 있지 않은 강릉화강암의 SHRIMP zircon U-Pb 절대연대는 약 176-174 Ma (쥬라기 대보화강암, Kihm et al., 2012)로 그 이전에 활동했다고 판단하는 것이 현재로서는 최선이다.

임곡단층의 실체와 운동특성을 알아보기 위하여 위에 기술한 주단층대와 연장부에 해당하는 지역의 선형구조 분석을 토대로 야외지질조사를 실시하였으며, 본 논문에서는 두 곳의 단층 노두에 대해 기술한다. 첫 번째 노두는 임곡단층의 주향을 따라 단층대 동쪽편의 장성층 경계에서 노출된 단층의 노두이다(Fig. 3). 이 노두는 단층 파열에 의해 단층을 따라 직선의 계곡이 발달해 있는 지역에 위치한다. 따라서 이러한 연약대를 따라 침식

Fig. 2. Geological map of the area around the Imgok fault (modified from Kihm et al., 2012).

Fig. 3. Outcrop photographs of the Imgok fault showing (a) the internal structure of the fault zone, and (b) a rock fragment detached from the fault plane showing striations, indicating strike-slip movement.

Fig. 4. Outcrop photograph of a fault, presumed to be an extension of the Imgok fault, and fault gouge.

작용이 쉽게 발생하여 하천이나 계곡이 형성되었다 (Keller and Pinter, 1999). 노두에서 관찰된 임곡단층의 주향은 N20°E, 경사는 90°로 측정되었다. 단층의 동쪽 단층면에서 채취한 탄질세일 암편에서 단층의 운동감각을 지시하는 단층조선을 관찰할 수 있었다(Fig. 3b). 단층조선의 선주각은 준수평($<5^\circ$)이어서 단층 경사가 준수직이라는 사실과 함께 주변의 단층면에서 관찰되는 운동감각은 임곡단층이 우수향 주향이동 단층운동을 했음을 지시한다(Fig. 3b). 이 노두의 단층은 관찰되는 자세, 위치 및 운동 특성으로 보아 Hwang et al. (2011)과 Kihm et al. (2012)이 보고한 임곡단층의 주 단층대로 판단된다.

두 번째 노두(Fig. 4)는 임곡단층 주단층에서 연장되는 북동부상에 위치한다. Kihm et al. (2012)에 의하면 이 노두에서 관찰되는 단층은 송촌 층상단층으로 명명하였다. 그러나 본 연구에서는 구조 영상 분석을 통해 우수향 주향이동 단층으로 추정하였다. 이 노두의 단층이 재활 하였는지는 명확하지 않다. 다만 이 노두에서 관찰되는 단층은 장성층과 망덕산층을 N20°E/90° 방향으로 나누고 있다. 단층의 운동감각을 나타내는 명확한 정보는 찾을 수 없었지만 단층은 폭 30 cm 가량의 미고결 단층 점토를 포함하고 있으며 단층의 서측 암반(장성층)은 약 20 cm 두께로 심하게 파쇄 되어 있다. 비교적 두꺼운 폭의 단층 점토와 파쇄대는 이 단층이 수회의 운동을 반복 했으며 단층 변위가 상당히 컸을 가능성을 시사한다(Caine et al., 1996). 이러한 야외에서

얻은 정보는 항공사진의 변위지형 특성으로부터 유추한 여러 번의 단층운동 가능성과 일치함을 보인다. 이 단층의 운동 시기에 대한 좀 더 상세한 정보를 알기 위해서는 단층 점토의 연대측정이 필요하다. 그러나 단층운동 시기는 운동 당시의 고응력장과 단층의 방향 분석을 통해서도 일정정도 유추 가능하다. Hwang et al. (2011)은 연구지역을 포함하는 강릉탄전 동북단부 안인진리 지역의 단층운동을 통해 구성된 고응력장이 N-S 방향의 압축응력기, NE-SW 방향의 신장응력기, ESE-WNW 방향의 압축응력기의 순으로 다양하게 변화했음을 보고한 바 있다. 특히 최후의 응력방향은 한반도 현생 응력과 유사하여 임곡단층이 현생 응력 하에서 운동했을 가능성도 있음을 보였다. 따라서 본 논문에서는 먼저 임곡단층과 현생 응력장의 관계를 알아보려고 하였다. 즉, 현생 응력장 하에서 임곡단층이 전단운동하기에 적합한 방향성을 갖는지에 대한 역학적 분석 결과에 대하여 다음 장에 기술한다.

임곡단층의 지질역학적 특성

임곡단층이 현생 응력체계 하에서 임곡단층의 지질역학적 안정성, 또는 전단성향(slip tendency) 분석을 실시하였다(Stewart and Hancock, 1994). 이러한 분석을 하기 위해서는 현생 응력의 방향과 크기 그리고 단층의 역학적 특성을 나타내는 마찰계수에 대한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 현생 응력의 방향에 초점을 두어 연구를 수행하였으며 이 분석을 통해 임곡단층이 현생 응력 하에서 운동이 가능한지, 또는 운동이 가능하기 위한 지구조 응력의 조건은 무엇인지를 유추 하려고 한다.

한반도에서의 현생 지구조 응력장의 최대압축 방향은 평균적으로 E-W 또는 ENE-WSW인 것으로 알려져 있다(Haimson et al., 2003; Reinecker et al., 2003; Chang et al., 2010; Jun and Jeon, 2010). 임곡단층 지역의 응력장을 좀 더 국한시키기 위해 이 지역 주변에서 발생한 지진들의 포컬메커니즘 자료를 수집하여 응력장 분석을 하였다. 연구지역을 포함하는 강원도 지역에서 광역적 규모의 응력장 분석에 필요한 중규모($M > 4$) 지진은 계기측정 이후 총 3회 관찰되었다. 그 외 소규모($M < 4.0$) 지진들도 다수 발생 하였지만 본 연구에서는 최대압축 방향의 오차범위를 최소화 하기위해 제외하였다. 중규모 지진들은 울진지진(1982년, $M_L = 4.6$), 영월지진(1996년, $M_L = 4.5$), 그리고 오대산지진(2007년 $M_w = 4.6$)으로 명명되었으며 지진들의 포컬메

Table 1. Parameters of three seismic events that occurred near the Imgok fault.

No.	Date	Location	Mag.	P-axis		T-axis	
				Az.	Dip	Az.	Dip
1	1982.02.28	37.0°N 129.5°E	M _L 4.6	261.2	4	170.5	26
2	1996.12.13	37.3°N 128.8°E	M _L 4.5	58	8	158	30
3	2007.01.20	37.7°N 128.6°E	M _W 4.6	253	1	163	1

1: Jun and Kulhanek (1991), 2: Baag et al. (1998), 3: KIGAM (2007)

Fig. 5. Locations of the three earthquakes (listed in Table 1) near the Imgok fault and (b) their P- (open circles) and T-axes (solid circles).

커니즘은 각각 Jun and Kulhanek (1991), Baag et al. (1998), KIGAM (2007)에 의해 분석되었다. 지진들의 위치와 분석된 포컬메커니즘의 P, T축은 Table 1과 Fig. 5에 나타내었다. 세 지진 해의 P축은 ENE-WSW 방위각의 일관된 수평방향(선경사 8° 이내)으로, T축은 NNW-SSE의 방위각을 보인다. 지진 포컬메커니즘은 포컬면으로 나타나는 기존 단층의 파열에 의해 P, T축이 결정되므로 그 자체가 응력방향을 직접 지시하지는 않지만 분석된 세 중규모 지진의 P, T축의 일관성으로 볼 때 이들의 방향이 주응력의 방향을 지시할 가능성이 높다고 유추할 수 있다. P, T축의 방향을 주응력 방향과 같다고 가정하면 최대압축응력은 평균 $N70 \pm 12^\circ E$ (즉, ENE-WSW) 방향으로, 최소압축응력은 NNW-SSE의 준수평 방향으로 작용하여 주향이동단층운동(부분적으로 역단층운동 성분 포함)에 유리한 응력상태를 나타낸다. 또한 다른 연구에서 최근 발생한 미소 지진($M < 3$)들의 포컬메커니즘 자료와 비교적 얕은 심도에서의 응력측정 자료는 경상분지의 현생 응력장이 역단층과 주향이동단층에 유리한 상태임으로 보고된 바 있다(Chang et al., 2010). 특히 이 연구에서는 최대주응력의 방향과 밀접한 관계를 갖는 P축의 방향은 ENE-WSW의 수평방향에 대부분 제한되어 있는 반면 최소주응력을 지시하는 T축

의 방향은 NNW-SSE에서 연직방향으로 고르게 회전하며 분포하는 경향을 보인다. 이는 최소주응력(σ_3)과 중간주응력(σ_2)의 크기가 유사하여 두 주응력의 방향이 명확히 제한되지 않기 때문으로 해석되었다. 이들 기존 자료와 연구지역 주변 지진자료를 근거로 임곡단층 주변 응력상태는 ENE-WSW 방향의 최대압축응력, 그리고 연직응력과 최소수평주응력의 크기가 거의 같다고 가정하여 분석을 진행하였다.

지진자료를 근거로 유추된 현생 응력 상태에서 임곡단층이 운동에 유리한지 여부를 분석하였다. Fig. 6에 보인 모어원(Mohr circle)은 세 주응력의 상대적 크기가 $\sigma_1 > \sigma_2 \approx \sigma_3$ 상태를 도시한 것이다. 이 모어원은 단층면의 방향에 따른 그 면에 작용하는 유효 수직응력(σ')과 전단응력(τ)의 변화를 나타낸다. 모어원의 위치와 크기를 정확히 정의하기 위해서는 공극압이 고려된 최대, 중간, 최소 유효 주응력을 알아야 하나 심부 응력의 크기에 대한 정량적인 자료가 없기 때문에 응력의 상대적인 크기와 주응력의 방향만을 이용하여 현생 응력의 방향성과 임곡단층의 방향과의 관계를 유추하고자 한다. 이를 위하여 세 유효주응력의 크기를 연직 유효응력(σ'_3)으로 정규화하고 적어도 어느 한 방향 이상에서 단층운동이 가능하게 되는 크기로 모어원을 도시하였다. 역학

Fig. 6. Shear stress versus effective normal stress normalized by vertical stress for faults (including the Imgok Fault) under the present-day stress field. Different frictional coefficients μ are assumed for these analyses: (a) $\mu = 0.85$ and (b) $\mu = 0.25$.

적으로 단층운동은 전단에 대한 쿨롱 마찰 저항을 능가하는 응력이 가해져야 가능하며 이는 모어원이 마찰계수(μ)로 정의되는 기준선에 접하거나 초과할 경우 발생한다(Scholz, 2000).

본 연구에서는 두 가지 경우의 단층 마찰계수를 가정하여 분석하였다. 첫 번째 경우에는 실내시험 및 실제 응력 측정을 통해 밝혀진 일반적으로 받아들여지는 단층 마찰계수($\mu=0.85$)를 가정하였으며(Byerlee, 1978; Zoback and Healy, 1984; Stock et al., 1985; Zoback and Healy, 1992; Scholz, 2000) 그 분석 결과를 그림 6a에 도시하였고, 두 번째 경우는 단층이 전단에 매우 약하다고($\mu=0.25$) 가정하여 Fig. 6b에 모어원을 도시하였다. 마찰계수가 낮은 경우는 단층 점토의 함량에 따라 마찰계수가 상당히 낮아 질 수 있다는 기존의 연구 결과들(Crawford et al, 2008; Tembe et al, 2010)에 근거하여 가정한 것이다(Fig. 7). 그러나 이 가정은 임곡단층의 활동 가능성을 모사하기 위해 임의로 설정한 값이며, 좀 더 정확하고 객관적인 해석을 위해서는 임곡단층 내 존재하는 점토의 함량을 직접 분석하거나 단층 가우지 마찰전단시험을 통해 마찰계수를 직접 규명하는 것이 타당하다.

Fig. 6a에서 실선으로 표시된 모어원은 현생 응력장

Fig. 7. Frictional coefficients of fault gouge as a function of clay content. Data are from Tembe et al. (2010) and Crawford et al. (2008).

상태(최대압축응력방향 $N70 \pm 12^\circ E$)에서 전단운동 하기에 최적인 단층은 $N45 \pm 12^\circ E$ 의 주향을 갖는 단층임을 보여준다. 한편 주향이 $N20^\circ E$ 인 임곡단층은 현생 응력장 하에서 운동을 하기에 최적의 방향에서 최대 주응력의 오차범위($\pm 12^\circ$) 밖의 방향성을 보인다. 이 방향의 임곡단층이 현생 응력장 방향 하에서 운동을 하기 위해서는, 즉, 임곡단층면에 작용하는 응력상태가 쿨롱 마찰 전단 기준선을 초과하기 위한 조건은 점선으로 도시된 모어원의 경우처럼 현생 차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)이 충분히 높아 모어원의 크기가 충분히 커야 가능하다. 그러나 이 경우에도 여전히 $N45 \pm 12^\circ E$ 의 주향을 갖는 단층면들이 전단파열하기 최적임으로 이 지역 어딘가에 이 주향의 단층 또한 존재해야 할 당위성이 있다. 반면 역으로 임곡단층이 전단운동하기에 최적인 방향이기 위해서는 최대 압축응력이 좀 더 북쪽으로 회전되어 있는 NE-SW ($N45^\circ E$) 방향인 경우에 가능하다.

단층의 마찰계수가 낮아 $\mu = 0.25$ 라고 가정하면(Fig. 6b) 전단운동하기 최적인 단층의 방향은 $N31 \pm 12^\circ E$ 의 주향을 갖는 단층이다. 임곡단층은 최적 주향의 오차범위 내에 인접하며 일정 정도의 차응력만 보장되면 현생 응력 방향에서도 운동 할 수 있는 조건을 만족한다.

이러한 일련의 가상 분석을 통해 임곡단층의 운동 가능성에 대해 몇 가지 해석을 내릴 수 있다. 첫째, 임곡단층이 보편적으로 받아들여지는 마찰계수($\mu=0.85$)를 갖는 단층이라면 현생 응력 방향 하에서 운동을 하기에 최적의 방향이 아니며 최대 압축응력 방향이 NE-SW의 방향일 경우 가능하다. 둘째, 임곡단층이 전단에 약한 단

층이라면(즉, 마찰계수가 상당히 낮다면) 현생 응력 방향 조건 하에서 운동이 가능할 수 있다. 이 경우는 단층 노두에서 관찰된 두꺼운 단층 점토에 대한 후속 연구가 이루어져야 할 것이라고 생각된다.

결 론

본 연구에서는 임곡단층의 구조지질학적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구조 영상 분석을 통해 강원도 강릉지역 NNE-SSW 방향의 선형구조에서 단층운동의 흔적인 주향이동 단층의 지형적 특징을 관찰하였다. 이를 토대로 야외지질조사를 실시하여 단층(N20°E/90°)의 실체와 우수향 주향이동 단층 운동특성을 보이는 단층 조선 그리고 단층 점토를 확인하였다. 이는 구조 영상 분석내용과 야외에서 관찰되는 실체들이 일치함을 보인다.

(2) 강원도 인근지역에서 발생한 지진자료(focal mechanism)를 이용한 현생 응력의 방향($N70 \pm 12^\circ E$)에서 임곡단층(N20°E/90°)의 역학적인 분석(마찰계수 0.85)을 시도한 결과 전단운동에 적합한 단층의 자세는 N45°E/90°이며 임곡단층은 오차범위 밖을 갖는 단층으로 현생 응력장에서 운동의 가능성이 낮은 것으로 분석되었다.

본 연구를 통해 임곡단층에 대한 역학적인 단층운동 메커니즘의 이해를 돕고자 하였다. 이 논문에서 적용한 현생 응력에 대한 상당한 불확실성에 근거한 분석이지만 임곡단층의 역학적 상태, 현생 응력과의 상관관계 등의 의미 있는 결과들을 보여준 연구라 생각된다. 보다 신뢰성 있는 연구는 연대측정과 트랜치 조사와 함께 전단운동 횡수, 발생 시기, 재발주기, 단층 규모 등의 자료가 축적되면 가능하리라 생각된다. 또한 연구지역에 대한 응력장이 보다 명확히 규명된다면 분석 결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것이라 기대된다.

사 사

논문심사과정에서 유익한 조언과 의견을 주신 최정해 박사님, 임명혁 박사님 그리고 익명의 심사위원 덕분에 본 논문의 내용이 좀 더 명확해졌습니다.

References

Baag, C. -E., Shin, J. S., Chi, H. C., Kang, I. -B. and Ryoo, Y., 1998, Fault-plane solutions of the Decem-

- ber 13, 1996 Yeongweol earthquake, Journal of the Korean Geophysical Society, 1, 1, 23-30.
- Byerlee, J. D., 1978, Friction of Rocks, Pageoph, 116, 615-626.
- Caine, J. S., Evans, J. P. and Forster, C. B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure. Geology, 24, 1125-1128.
- Chang, C., Lee, J. B. and Kang, T. -S., 2010, Interaction between regional stress state and faults: Complementary analysis of borehole in situ stress and earthquake focal mechanism in southeastern Korea. Tectonophysics, 485, 164-177.
- Chang, C. J. and Chang, T. W., 1998, Movement History of the Yangsan Fault based on Paleostress Analysis. The Journal of Engineering Geology, 8, 1, 35-49.
- Choi, P. Y., Kwon, S. K., Hwang, J. H. Lee, S. R. and An, G. O., 2001, Paleostress analysis of the Pohang-Ulsan area, Southeast Korea: Tectonic sequence and timing of block rotation. Geosciences Journal, 5, 1-18.
- Crawford, B. R., Faulkner, D. R. and Rutter, E. H., 2008, Strength, porosity, and permeability development during hydrostatic and shear loading of synthetic quartz-clay fault gouge. Journal of Geophysical Research 113, 1-14.
- Dong-A geologic consultant, 1975, Geological survey report of Gangneung Coal-field, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 54 p.
- Haimson, B. C., Lee, M. Y. and Song, I., 2003, Shallow hydraulic fracturing measurements in Korea support tectonic and seismic indicators of regional stress, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40, 1243-1256.
- Hwang, J. H., 1994, Reconstitution of Paleostress in the Southeastern Korean Peninsula since the Early Cretaceous. Journal of the Geological Society of Korea, 30, 1, 27-34.
- Hwang, J. H., Kihm, Y. H. and Kim, S. W., 2011, Geological structure and Fault chronology of the Aninjinri area, north-east end of the Gangneung Coal-field. Journal of the Geological Society of Korea, 47, 4, 411-421.
- Jun, M. S. 1991, Body-wave analysis for shallow intraplate earthquakes in the Korean Peninsula and Yellow Sea, Tectonophysics, 192, 3, 345-357.
- Jun, M. S. and Jeon, J. S., 2010, Focal Mechanism in and around the Korean Peninsula, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, 13, 3, 198-202.
- Jun, M. S. and Kulhanek, O., 1991, Source parameters of earthquakes in and around the Korean Peninsula deduced from spectral analysis, Phys. Earth Planet. Inter., 65, 255-266.
- Kee, W. -S., Kim, B. C., Hwang, J. H., Song, K. -Y. and Kihm, Y. -H., 2007a, Structural Characteristics of Quaternary revers faulting on the Eupcheon Fault, SE Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 43, 3, 311-333.
- Keller, E. A. and Pinter, N., 1999, Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape, Prentice Hall, New Jersey, 338 p.

- KEPRI, 2002, Aerial Photograph Interpretation for Active Fault and Case Studies, p. 26 (TM.01NS17. P2002.)
- Kihm, Y. H. and Hwang, J. H., 2011, Geological report of the Gangneung-Jumunjin sheets. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 74 p.
- Kihm, Y. H., Hwang, J. H. and Kim, S. W., 2012, Geological structures of the northern Gangneung coalfield. Journal of the Geological Society of Korea, 48, 2, 131-147.
- KIGAM, 2007, Development on Technology of Real Time Seismic Data Analysis and Quantitative Earthquake Hazard Prediction, GP2007-006-02, 27 p.
- Lee, J. B. and Chang, C., 2009, Slip tendency of Quaternary faults in southeast Korea under current state of stress. Geosciences Journal, 13(4), 353-361.
- Moon, T. -H., Son, M., Chang, T. W. and Kim, I. -S., 2000, Paleostress Reconstruction in the Tertiary Basin Areas in Southeastern Korea, Journal of Earth Science society, 21, 3, 230-249.
- Reinecker, J., Heidbach, O. and Mueller, B., 2003, The 2003 release of the World Stress Map available online at www.world-stressmap.org (December 4, 2003).
- Ryoo, C. -R., Lee, B. J., Son, M., Lee, Y. H., Choi, S. -J. and Chwae, U. -C., 2002, Quaternary faults in Gae-gok-ri, Oedong-eup, Gyeongju, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 38, 3, 309-323.
- Scholz, C. H., 2000, Evidence for a strong San Andreas fault, Geology, 28, 163-166.
- Son, C. M., 1966, Geologic Structure in the Eastern Part of Gangneung Coal Field. Journal of the Geological Society of Korea, 2, 2, 8-18.
- Son, M. and Kim, I. -S., 2005, Characteristics of the Cenozoic crustal deformation in SE Korea and their tectonic implications. The 21th Annual Conference of the Geological Society of Korea, KHNP, May 20, 7-31 p.
- Stewart, I. S. and Hancock, P. L., 1994, Neotectonics. In: Hancock, P. L. (ed.), Continental deformation. Pergamon Press, 370-409.
- Stock, J. M., Healy, J. H., Hickman, S. H. and Zoback, M. D., 1985, Hydraulic fracturing stress measurements at Yucca Mountain, Nevada, and relationship to the regional stress field, Journal of Geophysical Research, 90(B10), 8691-8706.
- Tembe, S., Lockner, D. A. and Wong, T. -F., 2010, Effect of clay content and mineralogy on frictional sliding behavior of simulated gouges: Binary and ternary mixtures of quartz, illite, and montmorillonite. Journal of Geophysical Research, 115, 1-22.
- Zoback, M. D. and Healy, J. H., 1984, Friction, faulting and in situ stress, Annales Geophysicae, 2, 6, 689-698.
- Zoback, M. D. and Healy, J. H., 1992, In situ stress measurements to 3.5km depth in the Cajon Pass scientific research borehole: implications for the mechanics of crustal faulting, Journal of Geophysical Research, 97(B4), 5039-5057.

원고접수일 : 2013년 7월 11일

수정본채택 : 2013년 8월 30일

게재확정일 : 2013년 9월 4일

나현우

충남대학교 지질환경과학과

305-764 대전광역시 유성구 대학로 99

Tel : 042-821-7563

Email : fishoil@cnu.ac.kr

장찬동

충남대학교 지질환경과학과

305-764 대전광역시 유성구 대학로 99

Tel : 042-821-6430

Email : cchang@cnu.ac.kr

장천중

한국수력원자력(주) 중앙연구원

305-343 대전광역시 유성구 유성대로 1312 번길

Tel : 042-870-5850

E-mail : geochang@khnp.co.kr