

퇴적분지형성 메커니즘에 관한 아날로그 모델 실험

김우석* · 정자혜

한국건설기술연구원 인프라안전연구본부, 수석연구원

An Analog Experimental Model of the Formation Mechanism of Sedimentary Basins

Woo-Seok Kim* · Jahe Jung

Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea, Senior Researcher

Abstract

Izumi sedimentary basin (ISB), west of Shikoku, Japan, is widely distributed across the western side of the Sakuragi Bend of the Japan Median Tectonic Line (MTL). It is not obvious how the ISB formed, but this feature is similar to an asymmetric pull-apart basin. The stratigraphic succession and tuff layers show that ages tend to decrease toward the Sakuragi Bend. We investigate whether the ISB is an asymmetric pull-apart basin using analogue model experiments with running sand. A pull-apart basin of length 60 cm and width 20 cm is formed, and secondary normal faults appear on the surrounding surface. A cross-section parallel to the direction of displacement shows that the stratigraphic succession of the pull-apart basin becomes younger toward the releasing bend. A listric normal fault, which has the opposite dip to the master fault, is observed in a cross-section perpendicular to the direction of displacement. These results are consistent with the observed properties of the ISB west of Shikoku, thereby supporting the possibility that the ISB is an asymmetric pull-apart basin.

Keywords: sedimentary basin, pull-apart, analog experimental model, asymmetric

초 록

일본 시코쿠 서부의 이즈미 퇴적분지는 중앙구조선의 굴곡부(사쿠라기 굴곡) 서쪽에 널리 분포하고 있다. 시코쿠 서부의 이즈미 퇴적분지의 형성 메커니즘은 아직 잘 알려지지 않고 있다. 이즈미 퇴적분지의 층서는 일반적으로 굴곡부를 향해서 퇴적시기가 짧게 퇴적되는 경향을 보인다. 이 특징은 비대칭 pull-apart 퇴적분지와 비슷하다. 그래서, 이즈미 퇴적분지가 비대칭 pull-apart 퇴적분지인지에 대한 연구를 아날로그 모델실험을 이용하여 수행하였다. 실험을 실시하여 길이 60 cm, 폭 20 cm 정도의 퇴적 분지가 형성되었다. 모래 표면에는 퇴적분지를 감싸듯 2차 단층으로 정단층이 나타났다. 또한, 변위방향과 평행한 단면에서는 퇴적한 층이 개방성의 굴곡부를 향해서 층리가 짧아져 가는 구조가 보였다. 변위방향과 수직단면에서는 주로 단층과 반대의 경사를 가진 선상(listric) 정단층이 확인되었다. 이 결과는 이즈미 시코쿠 서부의 퇴적분지와 매우 유사하며, 이즈미 시코쿠 서부의 퇴적분지가 비대칭 pull-apart 퇴적분지의 가능성을 지지하는 것이다.

주요어: 퇴적분지, 인렬, 아날로그 모델실험, 비대칭

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Woo-Seok Kim
E-mail: kws@kict.re.kr

Received: 15 June, 2018
Revised: 4 July, 2018
Accepted: 9 July, 2018

© 2018 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/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

일본 남서부에 존재하는 대규모 단층으로는 중앙구조선(Median Tectonic Line (이하, “MTL”이라 함))을 들 수 있다. 이 MTL 북쪽지역에는 시코쿠(shikoku) 서부에서 키이(kii)반도까지 걸쳐 상부 백악기층인 이즈미(izumi)층군이 료케(ryoke) 변성대와 산바가와(sanbagawa) 변성대에 MTL과 동일 방향성으로 협재하는 형태로 분포하고 있다(Fig. 1). 이즈미층군은 폭 5~20 km, 길이 약 300 km에 이르는 좁고 긴 지역에 분포하고 있다(Goto et al., 2009). MTL 북쪽에 인접한 이즈미층군은 분포 폭과 단층운동에 의하여 Fig. 1의 A와 같이 몇 개의 세그먼트로 나누어져 있다. 특히, 시코쿠 서부(A 지역)에서는 MTL의 굴곡부인 사쿠라기(sakuragi) 굴곡부의 서쪽과 동쪽에서 이즈미층군의 분포하는 폭이 변화하며, 서쪽에서는 약 13 km, 동쪽에서는 약 6 km이다. 다른 세그먼트(키이반도 이즈미산맥, D지역)는 백악기 후기에 MTL이 좌수향성 단층운동에 의해 생성된 pull-apart 퇴적분지이라고 할 수 있으며(Shimamoto, 1996; Miyata et al., 1994; Miyata, 1990). 이 단층운동에 의해 사쿠라기 굴곡부에서도 비슷하게 pull-apart 퇴적 분지가 형성됐을 가능성을 생각할 수 있지만, 시코쿠 서부의 이즈미층군이 어떻게 퇴적했는지에 대한 형성 메커니즘에 대한 연구는 아직 미비하여 정확히 결론내리기 힘든 실정이다.

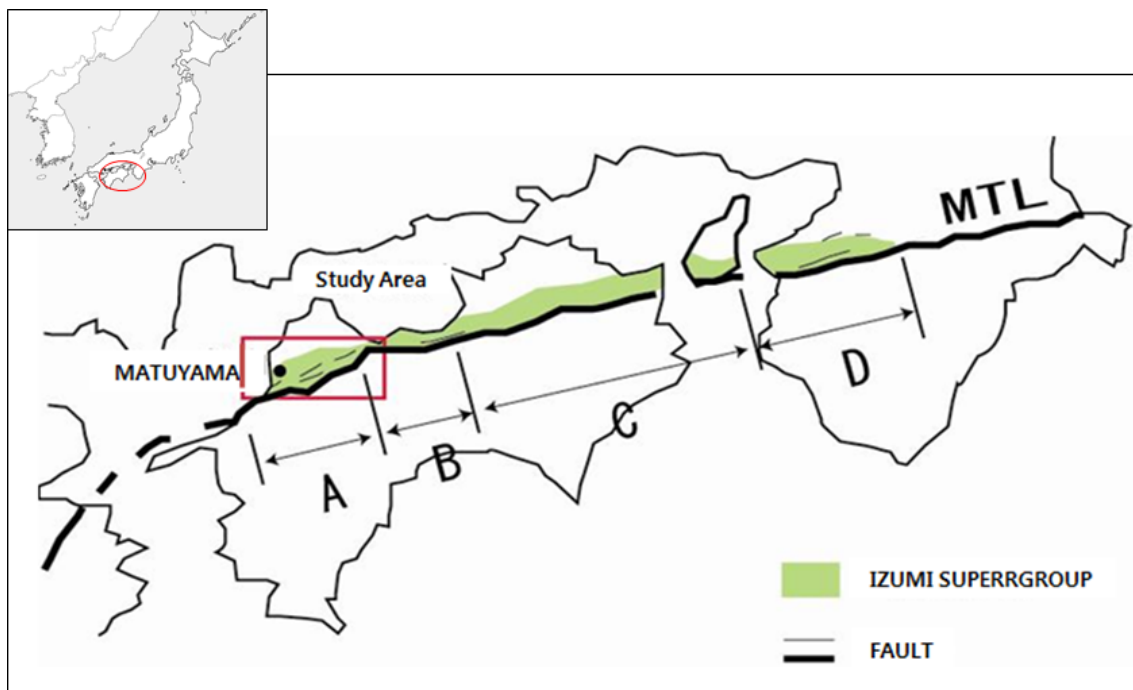


Fig. 1. Distribution of the Izumi group and MTL in the Shikoku region, Japan. fault segments are designated A-D based on the distribution of the Izumi group.

시코쿠 서부에 위치한 사쿠라기 굴곡부를 모델로 한 아날로그 모형실험을 실시하여, 단층형성에 대한 모사실험 및 이에 따른 굴곡부의 신장 영역 부분, 퇴적 분지가 형성되는 모습을 재현한 경우는 있으나(Wada, 2009). 형성된 퇴적 분지는 퇴적물의 최대 수심, 퇴적물의 프로토타입(실지반 형태)인 이즈미층군과는 일치하지 않았다. 이는 현재 지표에 관찰되는 이즈미층군내 산출되는 제올라이트의 연구에서 지하 5.5 km에 있던 것이라고 추정이 가능하며(Nishimura, 1984), 이는 최소 5.5 km 보다 더 두꺼운 층후의 층서로 발달하고 있음을 알 수 있으며, 이는 Wada (2009)의 실험 결과에서 퇴적분지 최

대 수심이 5 km인 것과는 일치하지 않는 것이다.

본 연구에서는 Rahe et al. (1998)이나 Sims et al. (1999)이 수행하였던 아날로그모델 실험을 참고하여, 실험모델 결과에 따른 지질구조를 분석하여, 실제 이즈미층군내 존재하는 퇴적분지의 형성 메커니즘에 대하여 검토하였다.

지질개요 및 퇴적분지

본 연구는 시코쿠 서부, 에히메(ehime)현 마쓰야마(matsuyama)시 인근의 MTL의 굴곡부(사쿠라기 굴곡)에 대한 지반 생성 메커니즘을 모델화를 하였다. Fig. 2는 연구지역의 지질도이며, 이 지역에는 상부 백악기 이즈미층군 외 산바가와대~미카부 대의 변성암과 화성암류, 료케대의 변성암류 및 화강암류, 제 3기층인 이시즈치야마층이 주로 분포하고 있다 (Ando, 2005). 이즈미층군은 동쪽으로 경사하고 있으며 사쿠라기 굴곡부가 있는 동쪽으로 갈수록 경사가 완만해 지는 것을 알 수 있었다(Fig. 3). 산바가와대~미카부대의 변성암과 화성암류는 중앙 구조선과 경계지어져 있으며, 북측에서는 료케 변성암류와 부정합으로 경계지어져 있다.

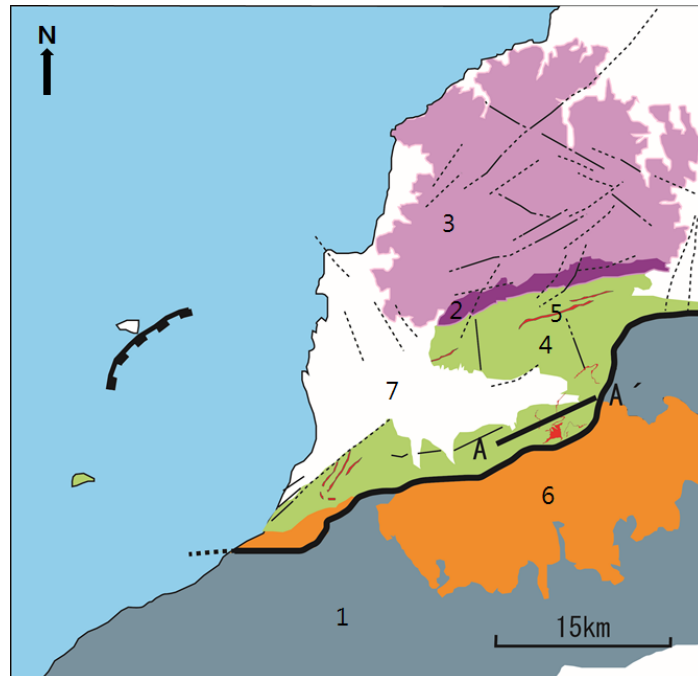


Fig. 2. Geology of the study area modified from the ehime geological map editorial committee 1/200,000 geological map 1957. no. 1: metamorphic and volcanic rocks (sambagawa-migabu zones). no. 2: ryouke metamorphic rock. no. 3: ryouke and hirosima granites. no. 4: izumi group. no. 5: tuff layer. no. 6: ishizuchiya tertiary system. no. 7: quaternary sediments. solid and dotted lines indicate observed and inferred faults, respectively. Line A-A' indicates the cross-section.

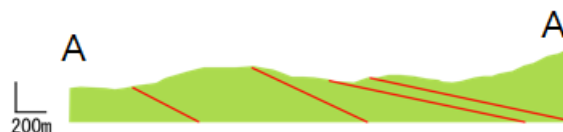


Fig. 3. Geological cross-section of the study area. the red solid line indicates the dip direction of the bedding plane.

또한, 연구지역에 분포하고 있는 퇴적분지의 경우, 일반적으로 pull-apart 퇴적분지는 주향이동단층을 따라 나타나는 퇴적분지 중 하나이다(Kano et al., 1998). 주향이동단층이 연속된 1개의 직선이 아니라 계단 또는 굴곡의 형상을 하고 있는 경우가 있으며, 그 부분에 신장응력이 생겨 최종적으로는 분지가 형성된다. 그리고, 신장성 단층운동이 계속적으로 발생하게 되면, 주위로부터 퇴적물이 공급되어 충전된 단층의 주향방향으로 이어진 퇴적 분지가 생성된다. 단층의 측면운동 방향과 스텝의 방향에 따라 인장성 환경 또는 압축성 환경이 될지 정해지며, 주향을 향해 왼쪽으로 스텝 하는 단층이 좌수향으로 이동하는 경우, 그 장소는 인장성 환경이 되는 분지가 형성된다(Fig. 4). 전형적인 pull-apart 퇴적분지는 그 성인에서, 평면적으로 마름모 꼴을 보이는 경우가 많으며, 그 주위는 단층에 의해 상대적으로 융기한 기반암의 바위로 이루어진 배후지에 의해 둘러싸이게 된다(Woodcock et al., 1986). Pull-apart 퇴적분지는 다른 분지에 비해 아주 깊고 단층을 따라 길쭉한 형상을 하고 있는 것이 특징이다(Basile et al., 1999).

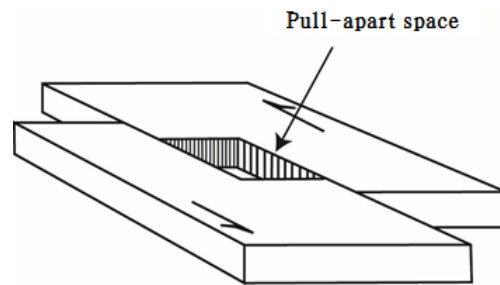


Fig. 4. Model of pull-apart sedimentary basin formation (modified from Kato, 1991).

모형실험을 위한 이론적 배경

본 연구에서는 건조모래를 이용한 유사모델실험을 수행하였다. 유사모델실험을 통하여 긴 시간에 걸쳐 형성되는 지질 구조를 실내에서 짧은 시간에 실제상황과 유사하게 재현할 수 있게 된다. 유사모델실험에는 유사요소법과 같은 프로그램을 이용한 수치해석 실험과 모래, 점토 등의 상사층을 고려하여 수행하는 아날로그 모델실험이 있다. 본 연구의 목적은 상사법칙을 고려하여 실험하는 아날로그 모델실험을 이용한 pull-apart 퇴적분지의 생성메커니즘을 확인하고자 한다.

스케일 모델을 설정할 때, 프로토타입(대상이 되는 실지반 형태)과의 상사법칙에 대하여 검토해야 한다(McClay, 1996; Audin et al., 1982). 프로토타입의 암석 변형 거동을 취성파괴로 가정했을 경우 상사법칙을 만족시키는 실험재료의 조건은

- 프로토타입의 거시적인 변형시 암석의 접착강도와 실험재료의 고착강도의 비율(강도비)이 프로토타입과 스케일 모델의 길이비와 동일할 것
- 프로토타입의 거시적인 변형시 암석의 내부마찰각과 실험 재료의 내부마찰각 단일 값을 나타낼 것

이다(Yamada et al., 2006). 이 때, 중력가속도에 대해서는 프로토타입과 스케일 모델에는 동일하지만 그 영향은 고려하지 않아도 된다. 왜냐하면, 본 연구에서는 프로토타입의 암석에 대한 변형거동을 취성(brittle)파괴로 가정하고 있기 때문에, 양자에게 공통되는 단층의 형성 메카니즘은 Mohr-Coulomb의 파괴 기준식을 따른다(Yamada et al, 2006; Rahe et al., 1998; McClay, 1996).

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

(τ : 전단 응력 c ; 점착력 σ_n ; 수직 응력 ϕ ; 내부 마찰각)

내부 마찰각에 대해, 암석과 건조사의 큰 차이가 없기(20°~40°의 범위)때문에 점착력에 대해 검토한다. 여기서 응력에 관한 다투음비는

$$\text{응력비} = \text{밀도비} \times \text{중력 가속도비} \times \text{길이비} \quad (2)$$

이다. 밀도비는 약 1~0.5, 중력 가속도비는 1, 길이비는 10^{-5} 에서 유사하기 위하여 응력비는 $5 \times 10^{-6} \sim 10^{-5}$ 가 된다. 암석의 점착률(일반적으로 5~20 MPa)을 이 응력의 다투음비로 스케일 다운되면 $c < 200$ Pa이 된다. 즉, 지각상부의 취성파괴를 모델화하는 경우, 매우 작은 점착률을 가지는 실험 재료를 선택할 필요가 있다. 현재 모델 재료로서 널리 이용되는 건조사 등의 입상체 재료는 점착률이 매우 작으며, 내부 마찰각이 20°에서 40°의 범위 내이다(Yamada et al., 2006). 그러므로, 이번 실험에서는 이러한 조건을 충족하는 토요우라(toyouura) 건조사를 사용한다.

또한, 프로토타입의 변형 거동을 전부 취성파괴로 가정하며, 스케일 모델 내에는 Sims et al. (1999) 이나 Jonathan et al. (2008)과 같은 연성층을 포함시키지 않았다. 따라서 시간비는 상사법칙의 검토 항목에 포함하지 않고, 건조사나 모래상자에 가속도의 영향을 주지 않는 “정적인” 변형 실험을 실시하며, 변위 속도는 임의로 설정할 수 있는 것으로 하였다(Yamada et al., 2006).

아날로그 모형실험

본 연구를 위한 실험 장치는 아크릴 판으로 둘러싸인 직육면체 상자가 좌우 수평방향으로 변위하는 리텔박스형 실험장치를 이용하였다(Sims et al., 1999; Rahe et al., 1998; Iwamoto et al., 1994). 실험에 사용하는 모래상자는 아크릴 판으로 형성한다. 아크릴 판의 두께는 5 mm이며, 건조사의 무게를 연직으로 지원하는 것은 아니므로, 아크릴 판 자체의 변형은 발생하지 않았다.

상자는 같은 형태의 독립된 2개의 블록으로 구성되어 있으며, 각각의 블록은 3장의 아크릴 판의 측면과, 1장의 플라스틱 시트를 맞춰 붙인 형태이다. 2개의 블록을 조합하면 1개의 직육면체 상자도 된다(Fig. 5a). 2개의 블록을 조합한 모래상자의 사이즈는 50×100×10 cm로, 각각의 블록의 바닥에 깔린 플라스틱 시트는 저속 서브 모터와 연동되어 있으며, 시트를 잡아당기는 것으로 시트에 접착된 아크릴 판의 측면, 내부에 퇴적시킨 건조사와 함께, 0.3 cm/분의 속도로 왼쪽사이드 슬립의 움직임을 재현할 수 있다. 실험 시 모래상자의 긴 길이변의 방향을 동서 방향, 짧은 길이변의 방향을 남북 방향으로 설정하였다.

블록 A, B는 바닥에 깔린 2장의 플라스틱 시트에 따라 접해있지만, 그 사이에 각도 50°, 폭 7 cm의 왼쪽으로 경사를 주어 이 단계의 형상은 프로토타입(실지반 형태)인 시코쿠 서부의 MTL, 사쿠라기 굴곡의 형상과 유사하게 일치시키도록 하였다. 블록 A, B가 좌수향성 주향이동하면, 이 스텝부가 인장부가 되고, 모래상자 내에 퇴적시킨 건조사에 pull-apart 퇴적 분지가 형성된다.

본 연구에서는 모래상자의 최대 변위는 23 cm, 프로토타입(실지반 형태)에서는 23 km이다. Sims et al. (1999), Rahe et al. (1998), McClay (1996)은 유사한 실험을 수행하였지만, 각각의 모래상자의 변위량은 10 cm, 10 cm, 6 cm이다. 이들

실험에서도 스케일 모델 내에 형성되는 pull-apart 퇴적 분지 모양과 지표면에 나타나는 단층, 퇴적 분지 내부구조에 대해 기술하고 있다. 하지만, 이러한 실험에서는 대규모로 바뀐 pull-apart 퇴적 분지에 대해서는 논의되지 않았으며, 퇴적분지에 퇴적한 퇴적물이 어떤 지질학적 특징을 갖는지에 대해서도 언급하고 있지 않다. 20 cm 이상의 변위를 모래상자에 주면 형성되는 퇴적 분지의 길이 및 변위 방향에 대한 설명 및 스케일 모델 내에 퇴적시킨 퇴적물의 지질학적 특징에 대해서도 논의할 수 있다고 여겨진다. 프로토타입(실지반 형태)의 퇴적물인 이즈미 층군은 MTL의 변위 방향을 따라 키이 반도에서는 약 300 km, 시코쿠 서부 사쿠라기 굴곡부터라도 최저 약 60 km를 추적할 수 있다. 또한, 이즈미층군에는 서쪽에서 동쪽을 향해 지층이 경사져, 퇴적 나이대도 젊어진다는 특징이 있다. 그래서 대규모 변위를 준 실험을 실시하고, 스케일 모델 실험과 프로토타입(실지반 형태)을 비교할 필요가 있다. 또한, 단층을 경계로 양쪽의 상반 및 하반에 해당하는 블록(본 연구에서는 블록 A, B)의 변위율을 컨트롤한 후에 대규모 변위를 준 실험을 한 예도 없으며, 각 블록의 변위율과 퇴적물의 상부층 방향에 대한 논의도 기존 유사 연구에서는 이루어지지 않았다. 주향이동단층의 변위량을 단층의 양쪽 어느 쪽의 블록으로 얼마나 차지하느냐에서 퇴적물의 지질학적 특징에 대하여도 고려할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 블록 A, B의 변위율을 10:0과 5:5의 실험을 실시하는 것으로 각각의 퇴적물의 지질학적 특징으로 프로토타입(실지반 형태)과 비교가 가능하도록 하였다(Fig. 5b).

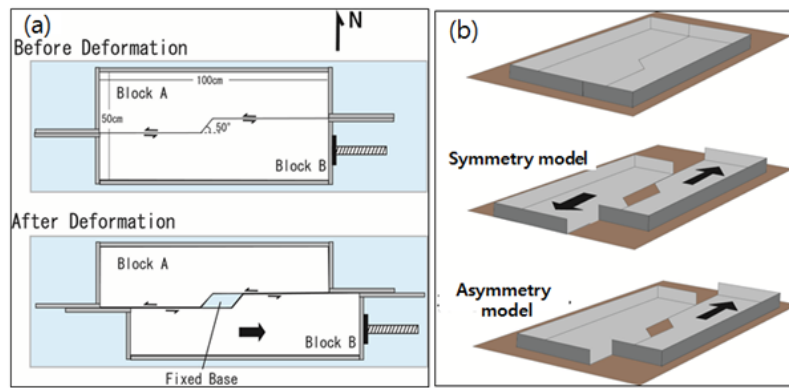


Fig. 5. (a) Experimental apparatus. A step-over section is positioned at the border between blocks; the displacement of the sandbox produces extension. The asymmetric model has only one block displacement. (b) By causing displacement of the experimental apparatus, the symmetrical model moves the blocks on both sides, while the asymmetric model moves the block on only one-side for the sinistral sense.

실험 결과

대칭 및 비대칭 모델: 지표면

Pull-apart 퇴적 분지 대칭 모델은 단층의 양쪽 블록의 변위율이 거의 같은 비율일 때의 모델이다(Rahe et al., 1998). 실험을 시작하자, 양쪽 블록의 경계상 변위 방향과 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 횡단한 파단면(R₁면)이 형성되었다(Fig. 6a- 0.6 cm case, 단층 ①). 이 파단면은 좌수향의 이동성분을 가지고 있으며, 모래상자 변위의 증대와 함께 좌수향이동성분도 커져 간다. 또 스케일 모델 내의 인장영역인 스텝 오버부 부근에서는 변위 방향을 이루는 각이 고각으로 되면서 긴 파단면이 발달한다(Fig. 6a- 0.6 cm case, 단층 ②). 이 파단면도 좌수향 이동성분을 가지고 있지만, 모래상자의 변위가 커짐에 따라 연직 성분이 우세하게 나타난다. 이 연직 성분이 우세한 파단면 안쪽에 현저한 침강부가 나타나고, 이 파단면이 pull-apart 퇴적 분지의 가장 바깥측 경계를 나타내는 단층이 되었다 이들의 파단면은 블록 A와 블록 B 모두 발달한다. 모래상자의 변위가 3 cm까지

되면, 건조사의 침강부인 pull-apart 공간의 내부에 주향이동단층(Fig. 6a- 1 cm case, 단층 ③)이 나타난다. 이 단층은 pull-apart 공간을 가로지르며, 스텝 오버부의 바깥쪽에 있는 순수 전단 부분을 잇는 역할을 한다. 또한, 이 단층은 경사 이동 성분도 가지고 있으며, 단층 ③이 발달하면서 퇴적 분지의 경계를 이루는 단층 ②의 측면운동이 약해짐을 알 수 있다.

비대칭 모델 실험의 경우, 대칭 모델 실험과 마찬가지로 건조사의 표면에 변위 방향은 대략 10°~20°의 파단면(Fig. 6b- 0.8 cm case, 단층 ①)이 형성되었다. 이 파단면도 좌수향 이동성분을 가지고 있으며, 모래상자의 변위에 따라 그 변위도 증가한다. 이들의 파단면은 각 블록의 경계부에는 순수 전단부의 상향으로 발달한다. 모래상자의 저면에 있는 스텝오버부의 상향에는 단층 ①보다 변위 방향을 이루는 각이 큰(45°~50°) 파단면(Fig. 6b- 0.8 cm case, 단층 ②)이 발달하다 이 파단면은 순수 전단부의 위쪽으로 발달하는 단층 ①보다 길고 주향이동 성분보다도 연직의 성분이 우세하다. Fig. 6b 단층 ②와 같이 형성 초기단계에서는 주향이동성분이 눈에 띄지만, 모래상자의 변위가 증가함에 따라 연직 성분이 우세하고 주향이동 성분은 거의 없어지는 특징을 가진다. 변위가 3 cm에 이르면, 대칭 모델과 같이 단층 ②의 안쪽에 연직의 성분을 가진 주향이동단층이 2개 형성된다(Fig. 6b- 1.2 cm case, 단층 ③). 이들 단층은 건조사 표면의 주향이동부에서 신장성 형태로 발달하고 있으며, 모래상자의 변위 방향을 이루는 각도는 12°로 단층 ①의 주향방향과 거의 일치한다. 이 단층이 발달하면 단층 ②의 활동은 저하되며, 모래상자의 변위가 증가함에 따라 2개의 단층은 서로 결합하여 1개의 주향이동단층으로 된다. 형성된 pull-apart 공간에 붉은색 모래를 퇴적시켜 더욱 모래상자의 변위를 진행하면, 다시 단층 ②나 단층 ③이 모래 표면에 나타난다. 그러나 이들의 단층이 나타나는 장소는 대칭 모델과는 다르다. 남동쪽의 단층 ②는 붉은 모래의 퇴적 전에 형성된 곳에 생성 되지만, 북서측의 단층 ②는 이전에 형성된 곳이 아닌, 퇴적시킨 붉은색 모래 속에 형성된다. 모래상자의 변위가 진행되면 pull-apart 공간이 다시 형성되지만, 그 장소도 이전의 pull-apart 공간이 있던 자리가 아닌 동쪽으로 조금 이동하여 형성된다.

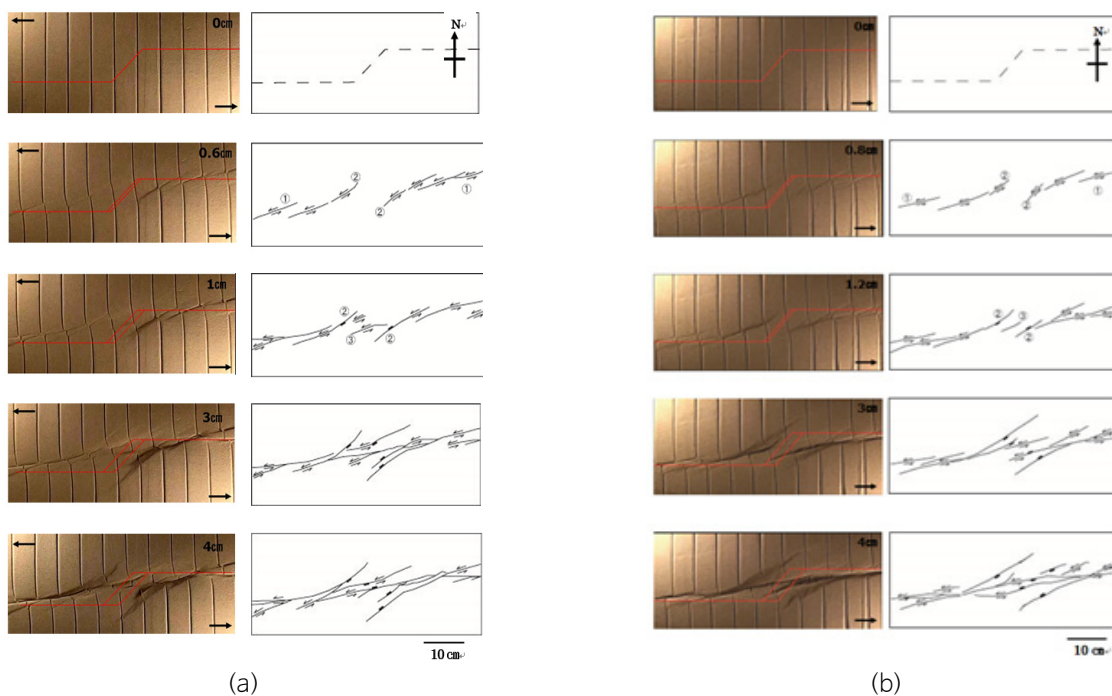


Fig. 6. Fault development on the surface plane of symmetric (a) and asymmetric (b) models. A sequence of faults is represented by a number on the white schematic. the numerical value is the total displacement of the block in centimeters. the red line symbolizes the step of the bottom of the sand box.

대칭 및 비대칭 모델: 동서단면, 남북단면

변위를 증가시키는 실험을 종료한 후, 모델박스 내 건조사에 물을 주입하여 포화상태로 만든 후, 그 단면을 쉽게 잘라서 관찰하였다.

Fig. 7a는 대칭모델 실험을 종료한 모델의 상부(지표면 해당)의 모습이며, Fig. 7b는 동서 단면이다. 단면을 남쪽에서 관찰하기 때문에 사진 오른쪽이 동쪽에 해당된다. 어느 단면도 실험 개시 전에 충전한 모래(파랑모래를 포함시킨 층)와 실험 중에 퇴적시킨 모래(빨간모래를 포함시킨 층)의 경계는 심부에서 35~50°, 천부에서 약 10°가 되는 단층에 의해 잘려있다. 그러나 그 경계부는 Fig. 7b의 A-A'와 B-B'에서와 같이 반대로 되어 있어, A-A'(블록 A의 단면)는 서쪽이 약 50°, 동쪽이 약 35°인 것에 비해 B-B'(블록 B의 단면)는 서쪽이 35°, 동쪽이 50°이다. 또한, 퇴적 분지 가운데 지루가 형성되어 양쪽에 2개의 퇴적 중심이 존재한다.

대칭 모델의 남북 단면에서는 실험 개시 전에 충전한 모래층과 실험 중에 퇴적시킨 모래층이 어떻게 변형하는지 알 수 있다(Fig. 7c). 이 사진들은 남북 단면을 서쪽에서 관찰한 것으로 고각의 연직 성분을 가진 단층군에 의해서 형성되는 negative flower structure가 관찰된다(Fig. 9a). 그러나, 퇴적 분지 내부에서는 동일방향으로 경사진 정단층군에 의한 퇴적 분지가 형성된다. 이들 퇴적분지의 경우 최대 침강량은 모래상자의 변위량이 23 cm일 때, 7.3 cm이었다.

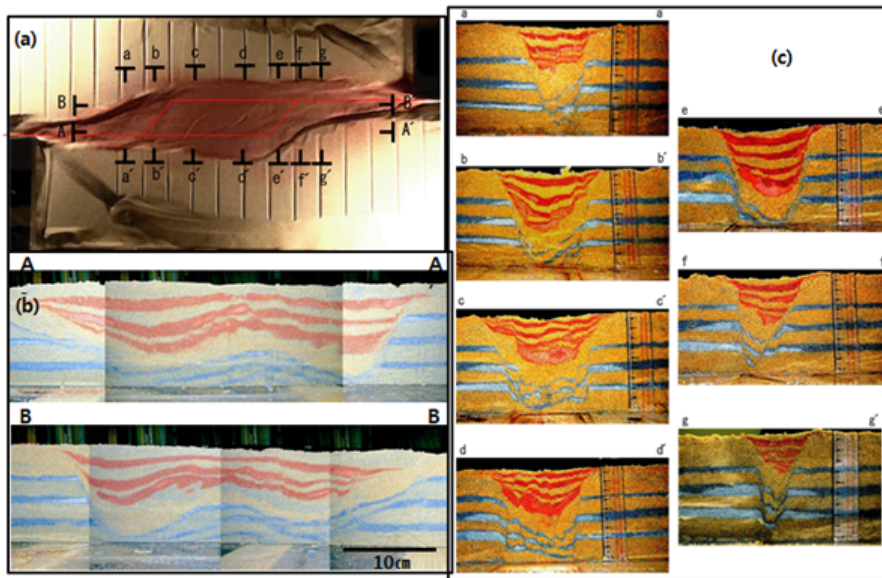


Fig. 7. Pull-apart sedimentary basin formed by a symmetric model after the experiment. (a) The red line denotes a step over-type feature on the underside of the sandbox at the end of the experiment. (b) The east-west cross-section shown. (c) The north-south cross-section shown.

Fig. 8a는 비대칭모델 실험을 종료한 모델의 상부(지표면 해당)의 모습이며, Fig. 8b는 퇴적분지의 중앙부를 가로지르는 단면이다. 본 실험에서 형성된 pull-apart 공간에 퇴적시키는 모래의 경우 빨간 모래를 사용하지 않았기 때문에, 그림상의 상부가 실험 중에 퇴적시킨 모래층이다. 대칭모델의 동서 단면과 달리 층리의 방향과 동일한 동쪽으로 경사하고 있으며, 그 각도는 약 20°이다. 퇴적물의 상부화(젊은층) 방향도 동쪽이다. 퇴적분지의 가장 외측의 경계단층은 동쪽 및 서쪽 모두 약 50°였다. 퇴적분지 내부의 단층도 45~50°의 동쪽 경사가 대부분이다. 또한, 퇴적물의 최대 깊이는 9.5 cm이었다. 2개의 퇴적 중심을 가진 대칭 모델과는 달리 퇴적 중심은 1개밖에 없다.

남북방향의 단면의 경우(Fig. 8c), 퇴적분지의 가장 바깥 단층은 대부분 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 의 고각이다. 그러나 실험 개시부터 퇴적시킨 모래와 실험 중에 형성된 pull-apart 공간에 퇴적시킨 모래와의 경계에 관해서는, 북쪽도 남쪽도 지표에서 1cm이하의 천부에서 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 로 매우 완만하다. 퇴적 분지 밖의 단면(Fig. 9b)에서는 negative flower structure가 형성되어 있으며, 파란 모래는 남쪽을 향해 경사지고 있다. 이 단면은 모래상자 바닥에 있는 스텝 오버부의 외측 슬립부의 상부에 해당하므로 퇴적 분지 폭도 스텝 오버부의 상방 단면보다 좁아진다. 퇴적 분지 내부의 단면(Fig. 8c-b, c, d)에서는 단면의 중앙에 거의 수직인 단층이 2개 존재하고, 이 단층에 낀 부분이 가장 수직방향 변위량이 커서 침강량도 크다.

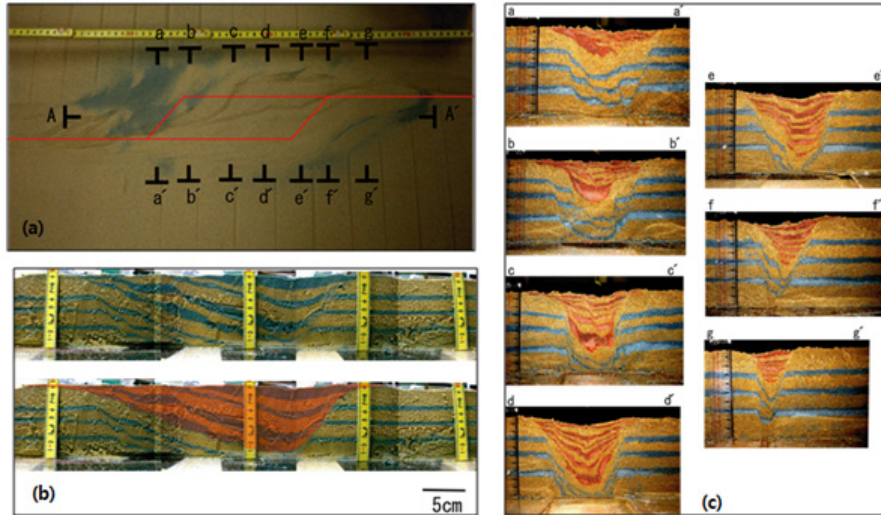


Fig. 8. Pull-apart sedimentary basin formed by an asymmetrical model after the experiment. (a) The red line denotes a step over-type feature on the underside of the sandbox at the end of the experiment. (b) The east-west cross-section shown. (c) The north-south cross-section shown. Along the basin, the right block is displaced toward the inside of the figure, while the left block is stationary.

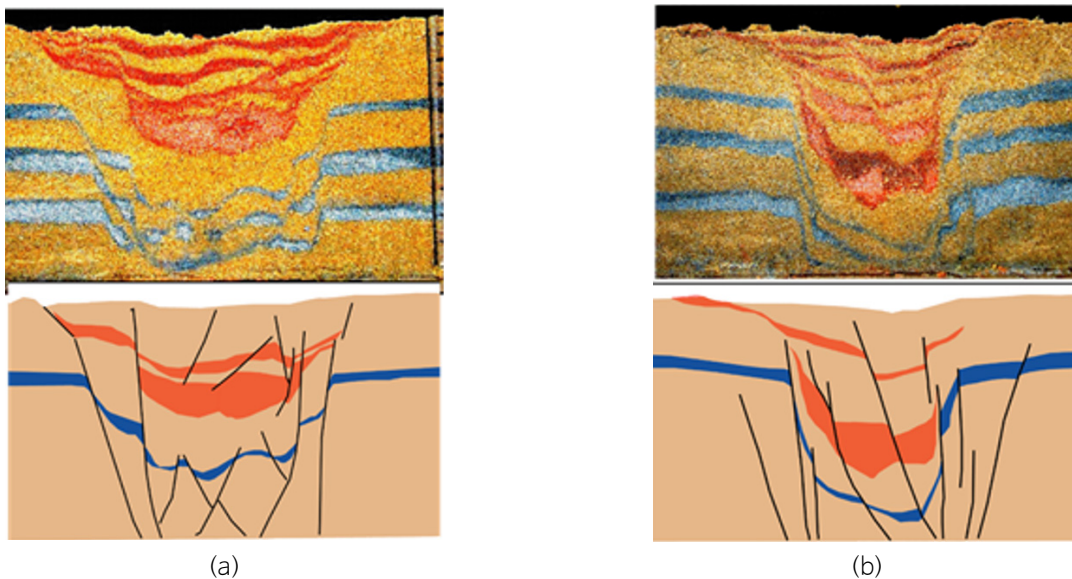


Fig. 9. Photographs of the north-south cross-section and analytical plots of symmetric (a) and asymmetric (b) models. It corresponds to the center of each basin.

고찰

지표면의 단층에 대해서는 대칭 모델과 비대칭 모델을 비교하면, 같은 발달 과정을 거쳐 pull-apart 퇴적분지가 발달되었다. 또한, 형성된 퇴적분지는 건조사 바닥에 연성영역을 포함하지 않고 순수 취성변형이 발생하였으며, Rahe et al. (1998)의 실험과 공통되는 부분도 많다.

대칭 모델에서는 단층을 경계로 접한 블록의 양쪽 모두가 역방향으로 바뀌면서 좌수향 변위가 발생하였으며, 형성된 pull-apart 퇴적분지 내부단층은 분지의 중앙에서 경사가 역전하였다. 퇴적분지 서쪽의 남북단면에서는 분지 내 형성된 단층이 북을 향해 경사진 데 반해, 동쪽에서는 분지 내에 형성된 단층이 남쪽을 향해 경사져 있다. 퇴적 분지 중심의 단면에서는 북쪽 또는 남쪽 경사의 단층이 퇴적분지 안에 뒤섞여 발달하고 있다(Fig. 9a). 또한, 동서 방향의 단면을 보면 퇴적분지 중심에는 지루 구조가 존재하며, 그 양쪽에 2개의 퇴적 중심이 자리잡고 있었다(Fig. 7b and Fig. 9a). 비대칭 모델에서는 단층의 양쪽에 존재하는 블록 중 한쪽만 바뀌는 것으로 좌수향 이동을 한다. 이렇게 형성된 pull-apart 퇴적분지가 대칭 모델과 같은 퇴적분지 내부에 형성되는 단층의 경사 방향이 분지의 장소에 따라 역전하는 특징은 없다. 비대칭 모델에서 발생한 단층은 실험 중에 움직이고 있는 블록을 향하여 경사져 있다(Fig. 9b).

이러한 차이는 단층에서 나뉜 2개 블록 중 어느 쪽이 변위의 대부분을 차지하느냐에 따라 대칭모델과 비대칭 모델 모두에서 다음과 같은 메커니즘으로 지표면에 단층이 발달하며, pull-apart 공간을 형성한다(Fig. 6).

- a) 실험 시작 초기에 모래상자 바닥의 순수 전단부의 상부에 R면으로 생각되는 단층 ①, 모래상자 바닥의 스텝 오버부 위에 pull-apart 공간의 경계를 이루는 아치 형태의 경사 주향이동단층 ②가 형성된다.
- b) 그 후 R면과 스텝 오버부의 상향의 아치 형태 단층이 연결되며, 끝이 주향에 대해서 좌수향의 단층대가 2개 형성된다 (대칭 모델 1 cm, 비대칭 모델 1.2 cm). 그 때 단층 ②는 주향이동변위는 거의 사라지고 경사이동 변위가 우세하다. 이 2개의 측면 운동 폭이 단층대의 pull-apart 공간이 된다
- c) 모래상자의 변위가 더 진행되면, pull-apart 공간 내부에 좌수향 이동단층 ③이 나타난다. 단층 ③은 경사이동 성분도 갖고 있으며, 이 단층이 발달한 이후에 단층 ②의 활동은 현저히 감소한다.

이들 변위가 4 cm 이하의 비교적 얇은 심도의 지표면 단층의 형성 과정에 있어서는 큰 차이는 없다. 그러나, 보다 변위를 키워 가면 대칭 모델과 비대칭 모델의 차이가 뚜렷이 나타난다. Fig. 10은 더 큰 변위를 주었을 때 지표면에 나타나는 대표적인 단층의 모식도이다. 1개의 단층이 경사이동 성분과 주향이동 성분을 동시에 갖고 있는 경우에는 우세적인 성분이 나타난다. Fig. 10a에서 모래상자 변위가 8 cm인 시점에는 퇴적 분지 가운데 pull-apart 공간이 존재하고 있으며, 경사이동 성분을 가진 단층은 그 pull-apart 공간을 향해 경사져 있다. 그러나, 변위가 14 cm인 시점에는 pull-apart 공간은 퇴적 분지 중앙이 아닌, 좌우에 1개씩 존재해 퇴적 분지 중앙부는 실험 중에 형성된 pull-apart 공간을 메우기 위해 공급한 건조사가 쌓여 있으며 이 퇴적물의 양측이 동시에 침강한다고 본다. 주위의 경사이동 성분을 가진 단층은 최근의 pull-apart 공간을 향해 경사지며, 각각 독립된 pull-apart 공간의 내부에는 pull-apart 공간을 비스듬히 가로지르는 좌수향이동 단층이 발달한다. 모래상자 변위가 23 cm에 이르게 되면 퇴적 분지 중앙에 존재하는 독립된 2개의 pull-apart 공간의 거리는 더욱 멀어진다. 중앙의 지루부에서 이전 활동적이었던 경사이동 성분을 가진 단층은 비활동적으로 되며, 단층 활동의 중심은 퇴적 분지 전체의 동쪽과 서쪽으로 옮겨 가는 경향이 있었다.

한편, 비대칭 모델에서는 단층의 활동성과 pull-apart 공간의 위치가 퇴적 분지 전체의 동쪽을 향해 이동해 가는 경향이

있다(Fig. 10b). 모래상자 변위가 8 cm인 시점에는 퇴적분지 중심 pull-apart 공간이 형성되고 주위의 경사 이동 단층은 중심을 향해 경사진다. 변위가 14 cm가 되면 pull-apart 공간은 모래상자 변위가 8 cm인 단계보다 동쪽으로 이동하게 된다. 또한, 퇴적분지 서쪽 경사 이동 변위를 가진 단층은 이 시점에서 활동을 정지하고, 활동하는 단층도 pull-apart 공간 이동에 따라 동쪽 방향으로 움직인다. 모래상자의 변위가 20 cm에 이르게 되면 pull-apart 공간과 활동적인 단층군은 더욱 동쪽으로 이동하고 퇴적분지 서쪽의 활동을 정지한 단층의 수도 모래상자 변위가 14 cm 시점 보다 늘어난다.

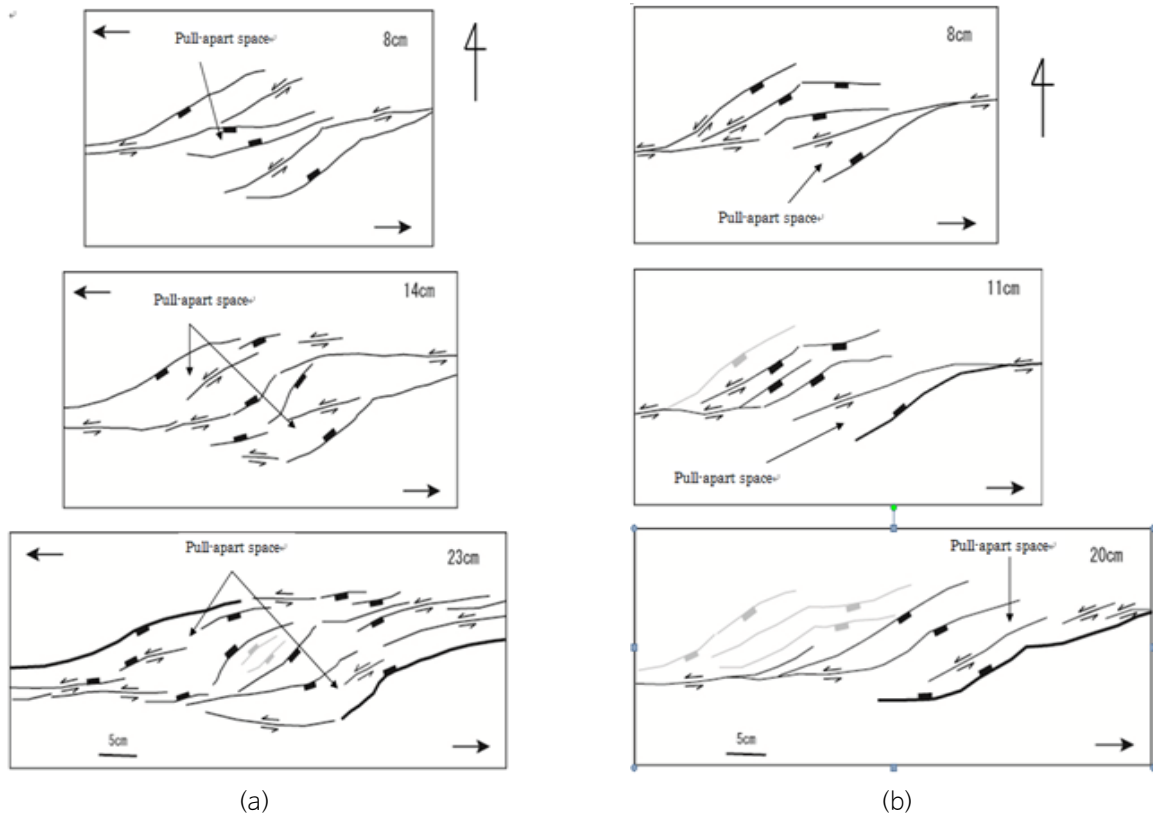


Fig. 10. Fault analysis diagram on the surface plane of the symmetric (a) and asymmetric (b) models at the point of displacement. Numerical values indicate the total displacement in centimeters.

Pull-apart 공간의 이동은 Rahe et al. (1998), Sims et al. (1999)에서는 논의하지 않았다. 그들도 실험에서의 모델과 실제 모델의 길이비를 10^{-5} 로 축소시켜 모델화하였으며, 모델 내의 변위량은 10 cm 이하, 프로토타입(실지반 형태)에서는 10 km 이하이다. 본 연구에서는 20 cm 이상의 변위를 재현하였으며, 이로 인하여 pull-apart 공간 이동이 더욱 명확히 나타난 것이라고 생각된다.

본 연구의 프로토타입(실지반 형태)은 에히메현 서부의 MTL의 굴곡부인 사쿠라기 굴곡과 그 주변에 분포하는 이즈미 층군이다. 이번 실험 결과와 사쿠라기 굴곡 서부의 이즈미 층군을 비교하면, 비대칭 모델과 유사점이 많이 나타난다. 이 지역의 이즈미 층군 안에는 많은 동북-남서 방향의 단층이 보이며, 이러한 단층의 경사는 모두 고경사이다(Tsutsumi et al., 1996; Tsutsumi et al., 1991). 이러한 배치 및 주향단층은 본 연구에서 수행한 실험 중에서도 많이 관찰된다. 시코쿠 서부 지역에서 MTL의 경사는 지표 부근에서 중각, 심부에서 저각이 된다고 생각되고 있지만(Ito et al., 1996), 본 연구의 실험에서 형성된 주요 주향이동단층은 약 70° 의 고각이다. 그러나, Ito et al. (1996)이 실시한 반사법 탄성파 탐사에서 확인된

중앙 구조선은 산바가와대와 이즈미 층군의 경계단층을 MTL로 정의하고 있으며, 저각으로 경계지워지고 있다고 결론지었다. 본 연구의 주요 단층은 고경사라 할 수 있지만, 실험 시작 전에 퇴적시킨 모래(프로토타입(실지반 형태)에서 기반)와 실험 중에 퇴적시킨 모래(프로토타입(실지반 형태)에서 이즈미 층군)의 경계는 지표 부근에서는 약 30° 정도로 중~저 각도이다. 이는 이즈미층군 퇴적분지의 지질학적 특징이 주 단층에 의해 나뉜 블록 중 한쪽의 블록이 크게 변위한 비대칭 모델과 유사하기 때문에 이즈미층군 퇴적 당시에는 MTL의 경계단층이 중저각으로 존재하며, 남쪽의 블록이 좌수향의 변위를 일으켰다고 생각하는 것이 타당하다. 그 이후, 지각변동(동해의 생성 등)에 의해 응력의 변화에 따라 고각으로 바뀌었을 수도 있음을 시사한다.

이와 같이 아날로그 모델 실험을 통하여 지반의 형성 메커니즘을 분석할 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 실험은 추후 해저나 육상지반의 구조적 해석을 하는데 많은 도움이 될 것으로 다양한 응용분야에 기초자료로 제공할 수 있을 것이다.

결론

본 연구는 시코쿠 서부의 이즈미 층군이 백악기 후기의 MTL 좌수향 운동에 의해 형성된 pull-apart 퇴적 분지에 대한 아날로그 모형실험을 이용하여 검토하였다.

시코쿠 서부, MTL 사쿠라기 굴곡의 이즈미 층군은 층서의 경사 방향이나 퇴적방향, 퇴적분지 내부단층의 배치와 같은 지질적 특징이 pull-apart 퇴적분지 형성에 관한 아날로그 모델 실험 결과와 매우 유사하다. 이 사실로부터, 시코쿠 서부의 이즈미층군은 백악기 후기에 MTL이 좌수향 운동을 하였을 때 사쿠라기 굴곡 부근이 인장장이 되어 형성된 pull-apart 퇴적분지임을 알 수 있다. 백악기 후기의 MTL에 따른 좌수향 운동의 폭은 현재의 MTL 남쪽 블록(외대)이 변위의 대부분을 차지한다. 주향이동단층에 따라 형성되는 pull-apart 퇴적분지는 주로 단층에 의해 나뉘어 지는데, 2개 블록의 변위량 차이로 퇴적물의 경사방향, 퇴적방향, 퇴적분지 내부단층의 경사에 차이가 있다. 이즈미 층군 내에 존재하는 동북-남서 주향을 가진 단층은 퇴적 분지 형성시에 pull-apart 공간을 형성하는 수직변위가 우세한 경사 단층일 가능성이 있다.

아날로그 모델 실험의 경우, 동일한 스케일 축소의 실제 지반형태의 재현이 가능하며, 결과물의 여러 단면을 확인한다면 실지반 내부의 지질구조 및 지반형성 메커니즘 분석을 용이하게 할 수 있을 것이다. 또한, 해상이나 육지에서의 지반조사를 위한 시추위치 선정과 관련된 알고리즘 개발 부분에 적용시 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Ando, H., 2005, Geologic setting and stratigraphic correlation of the Cretaceous to Paleocene Yezo forearc basin in Northeast Japan, Journal of the Japanese association for petroleum technology, 70(1), 24-36 (in Japanese with English abstract).
- Audin, A., Nur, A., 1982, Evolution of pull-apart basins and their scale independence, Tectonics, 1, 91-105.
- Basile, C., Brun, J., 1999, Transtensional faulting patterns ranging from pull-apart basins to transform continental margin

- s : an experimental investigation, *Journal of Structural Geology*, 21, 23-37.
- Goto, H., Nakata, T., Okumura, K., Umeki, K., Mizumoto, K., 2009, Timing of recent surface faulting events on the Shigenobu fault of the Median Tectonic Line Active Fault zone, Southwest Japan, *Active Fault Research*, 31, 19-25 (in Japanese with English abstract).
- Ito, T., Ikawa, T., Adachi, I., Asanuma, T., Miyauchi, T., Matsumoto, M., Takahashi, M., Matsuzawa S., Suzuki, M., Ishida, K., Okuike, S., Kimura, G., Kunitomo, T., Goto, T., Sawada, S., Takeshita, T., Nakaya, H., Hasegawa, S., Maeda, T., Murata, A., Yamakita, S., Yamaguchi, K., Yamaguchi, S., 1996, Geophysical exploration of the subsurface structure of the Median Tectonic Line, East Shikoku, Japan, *Journal of Geological Society, Japan*, 102(4), 346-360.
- Iwamoto, M., Miyata, T., 1994, Analogue model experiments of asymmetric pull-apart basins, *Structural Geology*, 40, 131-138 (in Japanese with English abstract).
- Kano, K., Murada, A., 1998, *Structural Geology*, Asakura Publishing Co., 1-298 (in Japanese).
- Jonathan, E. W., McClay, K., Dooley, T., 2009, 4D analogue modeling of transtensional pull-apart basins, *Marine and Petroleum Geology*, 26(8), 1608-1623.
- Kato, H., 1991, Overview of pull-apart basin, *Structure geology*, 36, 3-17 (in Japanese with English abstract).
- McClay, K., 1996, Recent advances in analogue modeling : uses in section interpretation and validation . *Geological Society Special Publication*, 99, 201-225.
- Miyata, T., 1990, Basin formation associated with transcurrent faulting, *Structural Geology*, 35, 65-70 (in Japanese with English abstract).
- Miyata, T., Iwamoto, M., 1994, Growth mechanism of Cretaceous Izumi sedimentary basin, *Structural Geology*, 40, 139-144 (in Japanese with English abstract).
- Nishimura, T., 1984, Basin analysis of the Upper Cretaceous Izumi Group in Western Shikoku, Japan, *Journal of Geological Society, Japan*, 90(3), 157-174 (in Japanese with English abstract).
- Rahe, B., Ferrill, D., Morris, A., 1998, Physical analog modeling of pull-apart basin evolution . *Tectonophysics*, 285, 21-40.
- Shimamoto, T. 1996, *Tectonics and Metamorphism*, Soubun, 220-226 (in Japanese).
- Sims, D., Ferrill, D., Stamatakos, J., 1999, Role of a ductile decollement in the development of pull-apart basins : Experimental results and examples, *Journal of Structural Geology*, 21, 533-554.
- Tsutsumi, H., Okada, A., 1996, Segmentation and Holocene surface faulting on the Median Tectonic Line, southwest Japan, *Journal of Geophysical Research*. 101, 5855-5871.
- Tsutsumi, H., Okada, A., Nakata, T., Ando, M., Tsukuda, T., 1991, Timing and displacement Holocene Faulting on the Median Tectonic Line in Central Shikoku, Southwest Japan, *Journal of Structural Geology*, 13, 227-233.
- Wada, T., Miyata, T., 2009, The analogue experiment about forming of the Cretaceous Izumi sedimentary basin, western Shikoku, Japan, 116th Japan Geological Society (in Japanese).
- Woodcock, N.H., Fischer, M., 1986, Strike-slip duplexes, *Journal of Structural Geology*, 7, 725-735.
- Yamada, Y., Kaneda, K., Matsuoka, T., 2006, Influences of material properties on analogue model experiments of geologic structures, *Journal of Materials Science*, 55(5), 452-457 (in Japanese with English abstract).