

지질학회지 제 54권 제 6호, p. 605-614, (2018년 12월) J. Geol. Soc. Korea, v. 54, no. 6, p. 605-614, (December 2018) DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2018.54.6.605 ISSN 0435-4036 (Print) ISSN 2288-7377 (Online)

# 인장 분지 형성을 구현하기 위한 상사 모델링 벤치마크 실험 및 원심모형실험의 적용성 평가

# 이성복<sup>1</sup>·박헌준<sup>2,‡</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술원 지오센트리퓨지실험센터 <sup>2</sup>울산과학기술원 도시환경공학부

#### 요 약

지질학적 현상을 연구하는 물리적 실험의 경우, 반복성 있는 현상 재현이 가능할 때 실험의 신뢰성을 증대시 킬 수 있다. 본 연구에서는 인장력에 의해 발생한 정단층 구조를 대상으로 모형 토조를 이용한 벤치마크 실험을 수행하였다. 이를 위해 모형 실험의 상사성을 검토하고, 벤치마크 실험에서와 같은 방법으로 실험 재료와 인장 조건, 그리고 경계조건을 설정하여 실험을 수행하였다. 또한 대형 원심모형실험시설을 이용하여 동일한 크기의 모형에서 원심중력가속도와 인장 속도를 변화시켜 인장 거동 시의 물리량에 대한 상사비를 고려하였다. 1 g 상 태에서의 벤치마크 실험과 10 g 상태에서의 원심중력장에서 일정한 속도의 인장 응력을 구현하고, 지표면의 형 상을 신뢰성 있게 계측하였다. 이를 통해 지각의 변형 실험 연구를 수행 시, 대형 원심모형실험의 신뢰성과 적 용성을 평가하였다.

주요어: 인장 응력, 정단층, 벤치마크 실험, 원심모형실험, 상사비

Sung-Bok Lee and Heon-Joon Park, 2018, A benchmark experiment for analogue modeling of extensional basin formation and evaluation of applicability of centrifuge test. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 6, p. 605-614

**ABSTRACT:** For physical experiments like analogue modeling that designed for studying geological deformation, reproducibility of the deformation is important to guarantee the reliability of the experiment. In this study, the normal fault generated by extensional stress is benchmarked using a sand box model. The scaling factors for the modeling test are considered and the experiments are conducted by setting the appropriate material, extensional stress, and boundary condition in the same way as in a benchmark experiment. In addition, a large centrifuge facility is used to vary the centrifugal acceleration and extension rate in the same sized model to account for the scaling factors of the physical quantity during extensional behavior. At 1 g benchmark condition and a centrifugal field at 10 g, a constant rate of the extensional stress is implemented and the topographic evolution is reliably measured. In this study, the reliability and applicability of large centrifuge model tests are evaluated for formulating experiments designed to study geological deformation.

Key words: extensional stress, normal fault, benchmark test, centrifuge model test, scaling factors

(Sung-Bok Lee, Geotechnical Centrifuge Testing Center, KAIST, Daejeon 34141, Republic of Korea; Heon-Joon Park, School of Urban and Environmental Engineering, UNIST, Ulsan 44919, Republic of Korea)

# 1. 서 론

과거 수십년 동안 지질구조가 생성되는 현상 및 과정을 실험적으로 모사하고 증명하기 위한 상사 모 델링(analogue modeling) 연구들이 수행되어 왔다 (Ramberg, 1981; Koyi, 1997). 상사 모델링 실험은 지 질구조가 형성되는 과정들을 직접적으로 관찰하여 그 결과를 확인할 수 있으며, 지질구조를 형성시키 는데 중요한 요소들에 대하여 직관적으로 이해할 수 있다는 점에서 장점이 있다. 이러한 지질학적 현상 을 연구하는 상사 모델링 실험의 경우, 반복성이 확 보될 때 실험 결과의 신뢰성을 증대시킬 수 있으며,

\* Corresponding author: +82-52-217-2850, E-mail: heonjoon@unist.ac.kr

수치 모델링과의 교차 검증과 현장에의 적용을 가능 하게 한다. 그럼에도 불구하고 상사 모델링 실험을 수 행할 때, 사용하는 장비 및 재료, 연구자의 경험과 배 경, 그리고 변형 유발 및 계측, 분석 등에 대한 기술 차이 등으로 인해 같은 실험을 수행함에도 연구자들 간의 결과에 차이가 발생하며, 직접적인 대조가 불가 한 경우가 발생한다. 이러한 문제를 보완하기 위해 서 로 다른 기관의 연구자들이 동일한 재료, 방법 및 절 차를 논의하여 결정한 후, 각자 실험을 수행하여 그 결과를 비교 분석하여 실험의 의미를 논하는 벤치마 크 연구가 수행되고 있다(Buiter *et al.*, 2016).

Schreurs et al. (2006)은 여러 상사 모델링 관련 실험 기관이 참여하여 같은 실험을 수행한 실험의 조 건 및 결과를 정리하여 제시하였다. 모든 기관이 같은 재료 및 장비들을 이용하여 수행하기 보다 각 기관이 보유한 재료와 장비 및 실험 기술 등으로 같은 실험 을 수행하고 비교한 것은 큰 의미가 있다. 하부 지각 및 약한 층을 모사한 점성 재료인 Polydimethylsiloxane (PDMS)에 모래를 덮어 취성 특성의 상부 지각을 모 사한 실험 모델(길이 20~29.2 cm, 폭 25~90 cm)에 대해 수평방향으로 인장력을 발생시켜 모래와 점성 재료의 리올리지(rheology)적 변화를 유발하는 실 험을 하였다. 모든 실험 기관 결과에서 인장력에 의 한 정단층 및 지구조 형성 과정이 매우 유사하게 나 타났으며, 이는 실험에 대한 반복성 및 재현이 가능 하다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 Schreurs *et al.* (2006)에서 제시된 다섯 기관에서 수행한 상사 모델링 실험을 벤치마크 하였으며, 모델 구성 및 제작 방법 등을 동일하게 반 복함으로써 얻어진 결과를 비교하였다. 상사 모델링 실험을 위해, 토조 상부에 모래를 낙사(sand raining) 하여 상부 지각을 모사하였으며, 인장력을 발생시켜 정단층 및 인장 분지의 형성 과정을 벤치마크 하였다. 인장 분지는 한반도와 그 주변에 다수 존재하며, 형 성 메커니즘에 대한 비교적 많은 연구들이 수행되었 다는 점에서 상사 모델링 연구의 잠재성이 높다(Park *et al.*, 2005; Sato *et al.*, 2014; Yoon *et al.*, 2014).

Ramberg (1967)는 상사 모델링을 지구 중력 조 건보다 높은 중력가속도 조건에서 수행하는 원심모 형실험에 적용하였다. 국외에서는 원심모형실험을 지질 분야에 적용하여 다양한 상사 모델링 연구가 수행되고 있지만 국내에서는 적용된 사례가 아직 없 다(Sokoutis *et al.*, 2007; Corti, 2012). 원심모형실험 은 모형을 회전시켜 인위적으로 큰 가속도를 가함으 로써 실제 크기의 모형보다 작은 축소 모형을 사용 하여 실제의 응력조건을 재현하여 실험을 수행할 수 있는 이점이 있다(Park and Kim, 2013; Park *et al.*, 2017). 이는 상사 모델링에서 사용된 모형의 크기를 더욱 축소시켜 실험을 수행할 수 있다는 것을 의미 하며, 따라서 조산대 등의 광역 지구조 사건 연구에 활용될 수 있음을 시사한다.

본 연구에서는 지구 중력 조건 하에서 실시한 상 사 모델링 벤치마크 실험과 더불어 원심모형실험을 통해 보다 높은 중력가속도 조건에서 추가적으로 실 험하였다. 원심모형실험 조건으로써 원심중력장 10 g 조건을 사용하였고, 획득된 결과를 1 g 조건에서 수행된 실험 결과와 비교하였으며, 이를 통해 원심 모형실험의 적용성에 대해 논의하고자 한다.

# 2. 실험 방법 및 구성

#### 2.1 벤치마크 실험

본 연구에서는 Schreurs *et al.* (2006)과 유사한 실 험조건을 갖추기 위해, 이용한 토조 크기(길이 120 cm, 폭 45 cm, 높이 70 cm)를 고려하여 알루미늄으로 길 이 19.4 cm, 폭 44.7 cm, 높이 5 cm의 내부 크기를 가지고 중앙 부분에서 인장을 유발할 수 있도록 L-모양의 이동식 구조물(mobile wall)과 고정식 구조물 (fixed wall)을 제작하였다(그림 1). 구조물 두께의 경우, 벌어지는 구조물의 두께(구조물과 토조바닥과 의 높이 차이)로 인해 발생할 수 있는 모래의 변형을 최소화하기 위해 0.1 cm로 가능한 얇게 제작하였다.

상부 지각의 취성환경을 모사하기 위해 건조 상태 의 규사(silica sand)를 이용하였다. 규사는 인공적으 로 파쇄하여 제작하였으며, 최대, 최소 밀도는 각각 1.65 g/cm<sup>3</sup>, 1.24 g/cm<sup>3</sup> 이며, 균등계수(Cu)와 곡률 계수(Cc), 평균입경(C50)은 각 1.96, 1.11, 0.22으로 통 일분류법에 의해 입도분포가 불량한 모래(SP)로 분류 된다. 상부 지각에서 단층을 유발하는 약한 층(weak layer)을 모시하기 위해 점성 유체인 Polydimethylsiloxane (PDMS)을 이용하였다. Schreurs *et al.* (2006)에서 사 용된 PDMS와 같은 모델의 제품을 이용하였으며, PDMS 의 점성은 실온과 3 × 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>의 변형률 조건 하에서 5 × 10<sup>4</sup> Pa·s이다(Weijermars, 1986; Ten Grotenhuis et al., 2002; Cruden et al., 2006).

상사 모델링 실험에서 일정한 마찰 특성을 가지 는 취성 재료들은 쿨롱의 파괴 기준을 따라 변형한 다고 가정하고 있지만, 본 실험에서 이용한 규사는 탄성 및 소성 거동을 보이며, 역학적인 거동이 암석 과 유사하다는 연구 결과가 있다(Jaeger and Cook, 1979; Lohrmann *et al.*, 2003; Barnhoorn *et al.*, 2004; Panien, 2004). 모래의 내부마찰각이 33°에서 45°의 범위에 포함되면 상부 지각 암석을 모사할 수 있다 (Byerlee, 1978). 본 실험에서 이용된 모래의 내부마 찰각은 41°로 범위에 포함된다(Kim, 2016).

실험 모델은 Schreurs et al. (2006)의 실험들과 유 사한 방법으로 조성 및 제작하였다. 먼저, 두 개의 구 조물을 토조 바닥에 설치한 후 이들이 벌어지는 부 분(인장력 유발)인 장비 중앙부에 길이 10 cm, 높이 0.5 cm, 폭 44.7 cm 크기의 PDMS로 구성된 약한 층 을 조성하였다(그림 1). 상부 지각은 손으로 조작할 수 있는 낙사 장치를 활용하여 모래가 1분에 약 250 g씩 일정하게 나오도록 시브(sieve) 크기를 조절한 후 20 cm 높이를 유지하며 규사를 자유낙하 시켜 조 성하였다. 인장 정도에 따른 단층 및 균열 형성과정 과 실험 전, 후 변형을 가시적으로 확인하기 위해 상 부 지각 층의 가운데 부분(1 cm)을 붉은색으로 염색 된 규사를 이용하여 총 3개의 층으로 구분되게 조성 하였다(그림 1).

실험 모델 제작을 완료한 후 토조 위에 수직방향 으로 하중을 가할 수 있는 선형 엑츄에이터(actuator) 를 거치하고 인장 하중을 가하기 위한 시스템을 설 치하였다. 인장 응력은 모델의 전면 중앙, 높이 2/3 지점에 가하였으며, 변위제어 방식으로 일정한 속도 로 변위를 유발시켰다. 인장 속도는 Schreurs *et al.*  (2006)에서 이용한 2.5 cm/h와 유사하게 0.007 mm/s 로 결정하였다. 모델과 토조바닥과의 마찰, 토조 벽 면과의 마찰, 모래의 무게 등과 같은 여러 원인에 의 해 실험 모델 전체에 균일하게 인장을 유발하는 것 에 어려움이 존재하는데, 모델 전면에 두 개의 레이 저 센서를 설치하여 모델의 기울어짐 또는 일정한 속도로 인장이 유발되는지 여부를 확인하였다.

토조 전면과 실험 모델의 상부에 카메라(Gopro Hero4)를 설치하여 1초당 1장의 연속적인 사진을 촬영하였으며, 이를 단층의 형성과정 분석에 활용하 였다. 실험을 완료한 후 레이저 센서를 설치한 수평 엑츄에이터를 토조 위에 거치하여 일정한 높이에서 속도 차이로 인한 왜곡 제거 및 균일한 결과 취득을 위해 일정한 속도(4 mm/s)로 제어하여 거리를 측 정하였다. 인장 방향으로 거리를 측정하였으며, 일 정 간격(2.5 cm)으로 총 15개 지점에서 측정하였다.

## 2.2 원심모형실험

본 연구에서는 중력가속도 10 g 조건에서의 원심 모형실험을 통해 1 g(대기압) 조건에서 수행한 실험 과 비교하였다. KAIST에 위치한 KOCED 지오센트 리퓨지 실험센터의 원심모형실험기를 이용하였으며 (그림 2), 회전 반경 5.0 m, 최대 2,400 kg의 모형 하 중을 100 g까지 가속할 수 있는 최대 용량 240 g·tons 인 장비이다(Kim *et al.*, 2013). 축소 모형을 회전시켜 인위적으로 원심력을 가하여 실제 현장과 동일한 응 력 상태를 재현할 수 있어 다양한 실험이 가능하다.

원심모형실험은 고중력(Ng) 환경에서 실험을 수 행하기 때문에 그에 맞는 상사비를 적용해야 한다. 지 반공학 분야에서 널리 활용되고 있는 원심모형실험 의 경우, 상사비와 관련하여 많은 연구들이 수행되



**Fig. 1.** Setup of the extension experiment. A thin viscous material of PDMS, 10 cm wide and 0.5 cm high, lied in the central of the test model. Half of the PDMS is located on the mobile wall sheet. The mobile wall was moved constant velocity by actuator.

| Quantity / Parameter   | Model ratio   |  |
|--|---|--|
| Linear dimension (e.g. thickness)  | $\frac{l_m}{l_0} = l_r$   |  |
| Body force per unit mass (centrifugal acceleration a <sub>m</sub> and gravity g) | $\frac{a_m}{g_0} = a_r$   |  |
| Density  | $\frac{\rho_m}{\rho_0} = \rho_r$  |  |
| Strain   | $\frac{\Delta l_m/l_m}{\Delta l_0/l_0} = \varepsilon_r = 1$                       |  |
| Stress   | $\frac{\sigma_m}{\sigma_0} = \sigma_r = \rho_r l_r a_r$                           |  |
| Strength of materials  | $\frac{s_m}{s_0} = s_r = \sigma_r$  |  |
| Viscosity  | $\frac{\mu_m}{\mu_0} = \mu_r = \frac{\sigma_r t_r}{\varepsilon_r} = \sigma_r t_r$ |  |
| Time   | $\frac{t_m}{t_0} = t_r = \frac{\mu_r}{\rho_r l_r a_r}$                            |  |

Table 1. Model ratios used in centrifuged models.



Fig. 2. KOCED Geo-centrifuge facility at KAIST.

어 있으며, 기본적인 물리량들에 대한 상사비가 정 립되어 있다(Schofield, 1980; Taylor, 1995). 지반공 학 분야의 원심모형실험에서는 일반적으로 현장과 동일한 밀도의 재료를 사용하여 원심중력장 하에 현 장의 응력을 모사할 수 있다. 한편 지구조 규모의 상 사성을 원심중력장에서 표현하기 위해서는 실제 지 구조 환경과 실험 재료 사이의 점성과 밀도, 그리고 시간에 대한 물리량에 대하여 보다 큰 상사성을 표 현할 수 있는 물리적 표현이 필요하다. 이를 요약하 면 표 1과 같다(Ramberg, 1981).

1 g 조건과 같은 속도로 인장을 유발하기 위해 상 사비를 고려하여 0.07 mm/s를 적용하였다. 원심모 형실험은 1 g 조건에서 수행한 절차와 같은 방법으 로 수행하였으며, 중력가속도를 10 g까지 가속하는 동안 발생할 수 있는 수직 변위(모래의 침하 발생)를 확인하기 위해 수직 방향으로 레이저 센서를 설치하 여 측정하였다. 10 g의 중력가속도에 도달한 후 수 직 변위가 발생하지 않는 것을 확인하고 엑츄에이터 를 이용하여 변위 제어로 수평 인장 하중을 가하여 실험 모델의 인장을 유발하였다.

1 g 실험과 마찬가지로 인장을 유발하는 중에 토 조 전면과 실험 모델의 상부(표면)에서 카메라를 이 용하여 매초 한 장씩 사진을 촬영하였다. 그리고 중 력가속도 10 g 가속하는 중에는 모델 전체의 수직 변위 측정이 불가하여 실험 완료 후 원심모형시험기 를 멈춘 다음 레이저 센서를 이용하여 측정하였다. 그림 3은 인장 실험을 위해 준비된 엑츄에이터 시스 템과 원심모형실험 직전의 실험 시스템 설치 완성 모습을 보여준다.

# 3. 실험 결과

## 3.1 벤치마크 실험 결과

벤치마크 실험 수행 결과, 10 mm 수준의 인장을 유발하였을 때부터 실험 모델 상부 표면의 중앙 부 분에서 정단층들이 형성되는 것을 확인하였다. 이는 Schreurs *et al.* (2006)의 실험결과와 대체로 유사하 며, 10 mm 인장 되기 전부터 내부에서 균열이 형성 되고 있음을 의미한다. 추가적으로 인장을 계속 유 발할수록 모델의 중앙 부분을 중심으로 단층대가 양 방향으로 확장한다. 그러나 처음 발생한 단층대가 형 성된 이후에는 양방향이 아닌 주로 인장 방향으로 단 층대가 확장되는데, 이는 새로운 단층들이 인장 방 향 지괴에서 추가적으로 발달한다는 점을 의미한다. 그림 4는 모델의 표면을 촬영한 사진으로, 그림 4(a) 는 실험 전, 그림 4(b-d)는 각 20 mm, 60 mm, 70 mm 인장했을 때의 사진이다. 약 20 mm 인장했을 때 인 장 방향의 벽면을 따라 발생하는 마찰로 인해 형성되 는 끌림 구조가 관찰된다(그림 4(b)). 이는 Schreurs et al. (2006) 실험 결과와 비교적 유사한데, 이러한 곡 률 형태의 정단층은 벽면과 모래와의 주향이동으로 인해 최소 주응력(σ<sub>3</sub>)의 방향이 모델의 중앙에서 벽면 으로 갈수록 회전하는 것으로 이해할 수 있다(Schreurs et al., 2006).

실험 완료 후 레이저 센서를 이용한 변위 측정을 통해 모델의 전체적인 형상을 도시하였다(그림 5). 가 로축, 높이축, 세로축은 각각 실험모델의 길이, 높이, 폭을 의미한다. 그림 5(a)는 0.007 cm/s의 속도로 1 cm 인장하고 3~5분 대기한 후 다시 인장하는 방법 으로 이를 반복하여 총 7 cm 인장을 유발하였고, 그 림 5(b)는 같은 속도로 연속적으로 7 cm까지 유발하 였다. 두 실험 결과 단층대 및 정단층의 구조가 유사 하게 관찰되는 것으로 보아 1 cm 인장 후 대기하는 동안 시간에 의한 PDMS 변형으로 인해 모래의 구 조적 변형은 유발되지 않는 것으로 생각된다. PDMS 는 모래에 의해 구속되어 있기 때문에 변형되려면 더 많은 시간이 필요할 수 있다. 수직 변위가 가장 크게 발생한 부분은 인장을 유발시키는 장비의 끝 부분이 며, 전형적인 지구(graben) 양상 및 대칭성을 보인다.



Fig. 3. (a) Setup of the extension experiment system with actuator and Gopro measurement system. (b), (c) Installed two Gopro measure top and side view of model.

행 벤치마크 실험과의 비교를 위해 설정되었으며, 향후 이와 연관된 지질학적 현상이 정립되고 이를

인장력의 단속성과 연속성은 실험 수행 시 엑츄에이 터의 기술적 작용, 이동거리 및 형상 계측, 그리고 선



**Fig. 4.** Surface views of natural gravity field test model evolution at (a) 0 mm displacement, (b) 20 mm displacement, (c) 60 mm displacement and (d) 70 mm displacement.



**Fig. 5.** Laser scanning for natural gravity field test after induced extension (7 cm): (a) In this test, displacement was extended in step 1 cm by actuator. (b) In this test, displacement was directly extended by actuator. The mobile wall moves leftward. Red line is location of edge of mobile sheet, and blue line is initial center.

기술적으로 반영할 수 있다면, 정단층의 발달과 관 련된 다양한 지질학적 연구 수행이 가능할 것으로 기대된다.

#### 3.2 원심모형실험 결과

그림 6은 중력가속도 10 g에서 인장 중에 촬영한 사진으로 그림 6(a)는 실험 전, 그림 6(b-d)는 각 20 mm, 60 mm, 70 mm 인장을 유발한 후 촬영한 사진 이다. 약 10 mm 인장이 유발된 이 후 모델의 중앙 부 분에서 단층이 발생하였는데, 이는 원심모형실험 결 과 1 g 실험 결과와 유사하다. 원심모형실험 결과에 서도 1 g 실험 결과와 같이 끌림 구조가 관찰되나, 약 40 mm 이상 인장 된 후 관찰된다. 한편 표면에 나타 나는 단층대 선형구조의 패턴은 1 g 실험의 경우 준선 형적으로 연결성을 가지며 형성되는 반면 10 g 실험 의 경우 초기에는 단속적으로 형성되다가 점차 이들 이 연결되어 형성됨을 보인다(그림 6(b-d)).

토조 전면에서 카메라를 이용하여 모델의 측면을 촬 영한 결과(그림 7), 인장력의 증가에 따른 정단층 형 성과정이 잘 나타난다. 또한 인장을 유발할수록 PDMS 의 길이가 길어지고 얇아지는 것이 보인다. 이는 실험 목적에 맞게 PDMS가 모래의 변형을 유발하고, 단층 을 형성하였음을 의미한다. 실험 후 레이저 센서를 이용한 변위 측정을 통해 모델의 전체 형상을 도시하였다(그림 8). 인장을 유발 시키는 장비의 끝 부분에서 가장 큰 변형이 발생하였 고, 1 g 실험 결과와 같은 지구 형상을 보이며, 전체 적인 형상이 유사하게 나타난다.

## 4. 토 론

한반도 중부, 남부 지역에 분포하는 분지들 중에 는 주향이동 단층에 수반된 당겨열림분지(pull-apart basin), 단층 휨 분지(fault-bend basin)에 의해 형성 되었다. 그중에서도 인장력에 의한 횡인장(transtension) 분지가 압축력에 의한 횡압축(transpression) 분지보 다 많이 분포한다(Ryang, 2013). 횡인장 분지 즉 인 장력에 의해 형성된 분지는 정단층이 생성되고 지구 (graben) 또는 반지구(half-graben) 형태를 가진다 (Gibbs, 1984). 따라서 국내 횡인장 분지에 대한 연 구 시 인장력에 의한 지구조 변형이 중요하며, 본실 힘에서 인장력에 의한 정단층 생성 및 지구의 형성 까지 모사하였고, 다른 벤치마크 실험 결과와의 유 사성을 확인하였다. 주향이동 분지의 경우 복잡한 형성 과정을 겪기 때문에 이 연구 결과를 국내 분지 에 대해 직접적인 적용에는 한계가 있지만, 정단층



**Fig. 6.** Surface views of centrifuge test model evolution at (a) 0 mm displacement, (b) 20 mm displacement, (c) 60 mm displacement and (d) 70 mm displacement.

형성 및 인장 분지를 대상으로 기초적인 상사 모델 링을 시도한 것에 의미가 있다(Nilsen and Sylvester, 1995).

한편 실험 중 인장 정도에 따른 모델의 단면에 대 한 형상 및 계측 결과 도출에 기술적인 어려움이 있 었으며, 이에 인장에 의한 모래와 PDMS의 리올리 지적 변화 및 내부 단층의 형성 과정 등에 대해 연구 하는 데에는 한계를 지닌다.

국내에 분포하는 인장 분지의 지구조, 지질구조,

층서, 응력 등의 조건을 상사 모델링에 적용하면 국 내의 인장 분지의 형성과 진화사 및 지구조 대한 연 구에 활용될 수 있고, 국내에서 상사 모델링에 대한 연구가 활발해질 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 인장 응력에 의해 형성되는 정단 층과 인장 분지 구조와 관련된 벤치마크 인장 실험



**Fig. 7.** Side view of centrifuge test model evolution at (a) 0 mm displacement, (b) 20 mm displacement, (c) 60 mm displacement and (d) 70 mm displacement.



**Fig. 8.** Laser scanning for centrifuge test model after induced extension (7 cm). In this test, displacement was extended in step 1 cm by actuator. The mobile wall moves leftward. Red line is location of edge of mobile sheet, and blue line is initial center.

을 수행하였다. 이를 위해 지각 암석을 모사할 수 있 다고 알려진 재료를 선택하고, 토조의 경계조건을 최소화할 수 있도록 실험을 구성하였다. 또한 대형 원심모형실험 시설을 이용하여 원심중력장 하에서 벤치마크 실험의 상사성과 적용성을 검토하였다. 원 심중력장이 가해지는 동안 원격으로 인장 응력을 가 하기 위하여 엑츄에이터를 통해 일정한 인장 응력을 가하였고, 모형 토조의 고속 회전 중 인장 상태를 원 격으로 계측하기 위한 시스템을 구축하였다.

벤치마크 실험 수행 결과, 10 mm 수준의 인장을 유발하였을 때부터 실험 모델 상부 표면의 중앙 부 분에서 단층들이 형성되는 것을 확인하였다. 추가적 으로 인장을 계속 유발할수록 모델의 중앙 부분을 중심으로 단층대가 양방향으로 확장하였다. 일정한 인장 응력이 가해진 이후에는 주로 인장 방향으로 단 층대가 확장되었고, 추가적으로 새로운 단층들이 인 장 방향으로 발생하였다. 10 g 상태의 원심중력장 하 에서도 1 g 실험 결과와 유사하게 약 10 mm 인장이 유발된 후부터 모델의 중앙 부분에서 단층이 발생하 였다. 1 g 실험 결과에서 보인 끌림 구조가 원심모형 실험 결과에서는 약 40 mm 이상 인장 된 후 나타났 다. 그리고 표면에 나타나는 단층대의 선들이 1 g 실 험의 경우 준선형적으로 연결성을 가지며 형성되지 만, 10 g 실험에서는 단층이 보다 부분적으로 형성 되었다. 1 g 실험과 10 g 실험 모두, 인장을 유발시키 는 장비의 끝 부분에서 가장 큰 변형이 발생하였고, 레이저 센서를 이용한 스캐닝을 통하여 전체적으로 유사한 표면 형상을 얻을 수 있었다.

대형 센트리퓨지는 경계조건을 최소화하고, 상사 비를 유연하게 조절할 수 있을 수준의 큰 모델 실험 이 가능하게 하였으며, 이를 통해 인장 응력뿐 아니 라 다양한 응력 조건에서의 지구조 변형을 예측하는 데에 있어 신뢰성 높은 실험결과를 도출할 수 있을 것이라 기대된다.

## 감사의 글

본 논문의 심사에 응해주시고, 세심하게 검토해 주신 두 분의 위원님, 그리고 편집위원님께 깊이 감 사드립니다. 본 연구가 시작될 수 있도록 해외 관련 연구사례를 공유해 주신 소병달 교수님, 그리고 연 구 수행 과정에서 통찰력 있는 조언과 아낌 없는 격 려를 해 주신 이창열 교수님께 진심으로 감사드립니 다. 이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한 국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입 니다(No. NRF-2014R1A6A3A04056405).

#### REFERENCES

- Bamhoom, A., Bystricky, M., Burlini, L. and Kunze, K., 2004, The role of recrystallisation on the deformation behaviour of calcite rocks: large strain torsion experiments on Carrara marble. Journal of Structural Geology, 26, 885-903.
- Buiter, S.J., Schreurs, G., Albertz, M., Gerya, T.V., Kaus, B., Landry, W., Le Pourhiet, L., Mishin, Y., Egholm, D.L. and Cooke, M., 2016, Benchmarking numerical models of brittle thrust wedges. Journal of Structural Geology, 92, 140-177.
- Byerlee, J., 1978, Friction of rocks. Pure and applied Geophysics, 116, 615-626.
- Corti, G., 2012, Evolution and characteristics of continental rifting: Analog modeling-inspired view and comparison with examples from the East African Rift System. Tectonophysics, 522, 1-33.
- Gibbs, A.D., 1984, Structural evolution of extensional basin margins. Journal of the Geological Society, 141, 609-620.
- Cruden, A.R., Nasseri, M.B. and Pysklywec, R., 2006, Surface topography and internal strain variation in wide hot orogens from three-dimensional analogue and twodimensional numerical vice models. In:Buiter, S.J.H. and Schreurs, G. (eds.), Analogue and Numerical Modelling of Crustal-Scale Processes. Geological Society, London, Special Publications, 253, 79-104.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W., 1979, Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd edn. Chapman and Hall, London, 593 p.
- Kim, D.-S., Kim, N.-R., Choo, Y.W. and Cho, G.-C., 2013, A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in Korea. KSCE Journal of Civil Engineering, 17, 77-84.
- Kim, J.-H., 2016, Model testing of bucket foundations for offshore structure in the centrifuge and development of miniature cone. Ph.D. thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 259 p.
- Koyi, H., 1997, Analogue modelling: from a qualitative to a quantitative technique-a historical outline. Journal of Petroleum Geology, 20, 223-238.
- Lohrmann, J., Kukowski, N., Adam, J. and Oncken, O., 2003, The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand

wedges. Journal of Structural Geology, 25, 1691-1711.

- Nilsen, T.H. and Sylvester, A.G., 1995, Strike-slip basins. In:Busby, C.J. and Ingersoll, R.V. (eds.), Tectonics of Sedimentary Basins. Blackwell Science, Cambridge, 425-457.
- Panien, M., 2004, Analogue modelling experiments of basin inversion using well-characterised granular materials and comparisons with numerical models. Ph.D. thesis, University of Bern, Switzerland.
- Park, H.-J., Ha, J.-G., Kwon, S.-Y., Lee, M.-G. and Kim, D.-S., 2017, Investigation of the dynamic behaviour of a storage tank with different foundation types focusing on the soil-foundation-structure interactions using centrifuge model tests. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 46(14), 2301-2316.
- Park, H.-J. and Kim, D.-S., 2013, Centrifuge modelling for evaluation of seismic behaviour of stone masonry structure. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 53, 187-195.
- Park, K.-S., Kang, D.-H., Shin, Y.-J. and Shin, J.-B., 2005, Tectonic evolution of the western Kunsan Basin, Yellow Sea, offshore Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 41, 141-155 (in Korean with English abstract).
- Ramberg, H., 1967, Gravity, Deformation and the Earth's Crust, 1<sup>st</sup> edition, Academic Press, London, 214 p.
- Ramberg, H., 1981, Gravity, deformation, and the earth's crust: In theory, experiments, and geological application. Academic press, Cambridge, 452 p.
- 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).
- Sato, T., No, T., Kodaira, S., Takahashi, N. and Kaneda, Y., 2014, Seismic constraints of the formation process on the back-arc basin in the southeastern Japan Sea.

Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119, 1563-1579.

- Schofield, A.N., 1980, Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations. Géotechnique, 30(3), 227-268.
- Schreurs, G., Buiter, S.J., Boutelier, D., Corti, G., Costa, E., Cruden, A.R., Daniel, J., Hoth, S., Koyi, H., Kukowski, N., Lohrmann, J., Ravaglia, A., Schlische, R.W., Withjack, M.O., Yamada, Y., Cavozzi, C., DelVentisette, C., Elder Brady, J., Hoffmann-Rothe, A., Mengus, J.M., Montanari, D. and Nilforoushan, F., 2006, Analogue benchmarks of shortening and extension experiments. In:Buiter, S.J.H. and Schreurs, G. (eds.), Analogue and Numerical Modelling of Crustal-Scale Processes. Geological Society, London, 1-27.
- Sokoutis, D., Corti, G., Bonini, M., Brun, J.-P., Cloetingh, S., Mauduit, T. and Manetti, P., 2007, Modelling the extension of heterogeneous hot lithosphere. Tectonophysics, 444, 63-79.
- Taylor, R., 1995, Centrifuges in modelling: principles and scale effects. Geotechnical centrifuge technology, Talor & Francis, USA, 19-33.
- Ten Grotenhuis, S.M., Piazolo, S., Pakula, T., Passchier, C.W. and Bons, P.D., 2002, Are polymers suitable rock analogs?. Tectonophysics, 350, 35-47.
- Weijermars, R., 1986, Flow behaviour and physical chemistry of bouncing putties and related polymers in view of tectonic laboratory applications. Tectonophysics, 124, 325-358.
- Yoon, S., Sohn, Y. and Chough, S., 2014, Tectonic, sedimentary, and volcanic evolution of a back-arc basin in the East Sea (Sea of Japan). Marine Geology, 352, 70-88.

| Received | : | October  | 31, | 2018 |
|----------|---|----------|-----|------|
| Revised  | : | December | 7,  | 2018 |
| Accepted | : | December | 7,  | 2018 |