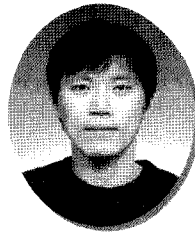


지반 변위에 대한 지중관 거동 연구를 위한 원심모형실험 연구사례 (미국 NEES-R 연구사례)



추연욱
한국과학기술원 건설및환경공학
연구교수
(ywchoo@kaist.ac.kr)

본 기사는 필자의 미국 RPI(Rensselaer Polytechnic Institute)에 포닥 근무 기간 동안 참여했던 코넬대학-RPI의 프로젝트 결과 자료와 이들의 논문을 토대로 구성된 연구사례 소개 기사로서, 본 기사의 자료는 코넬대학-RPI 연구진의 연구결과임을 밝힙니다.

1. 서론

영구적인 지반 변위(permanent ground deformation)는 일반적으로 지표 단층, 산사태, 및 지진 액상화로 인한 침하 및 측방유동에 의해 발생한다. 이러한 지반 변위는 도로, 터널, 다리, 수도 및 가스관로 등 많은 인간 사회의 생명선에 큰 위협이 되어 왔고, 사회가 발달함에 따라 그 위험은 더욱 커지고 있다. 지중관의 피해 형태는 그림 1과 같고, 그

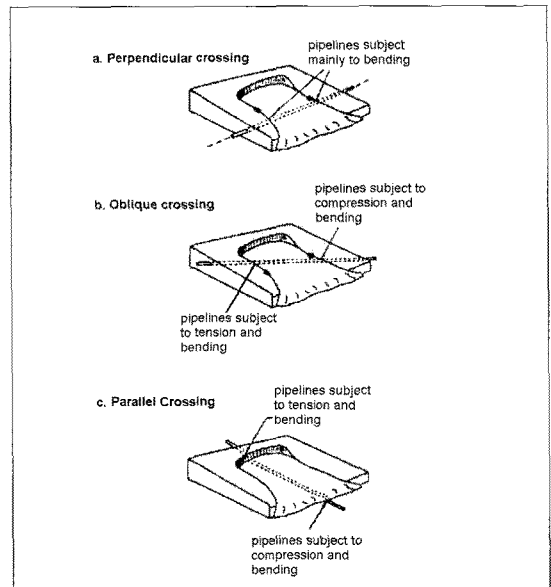


그림 1. 지반변형에 의한 관로 (O'Rourke 등, 1998)

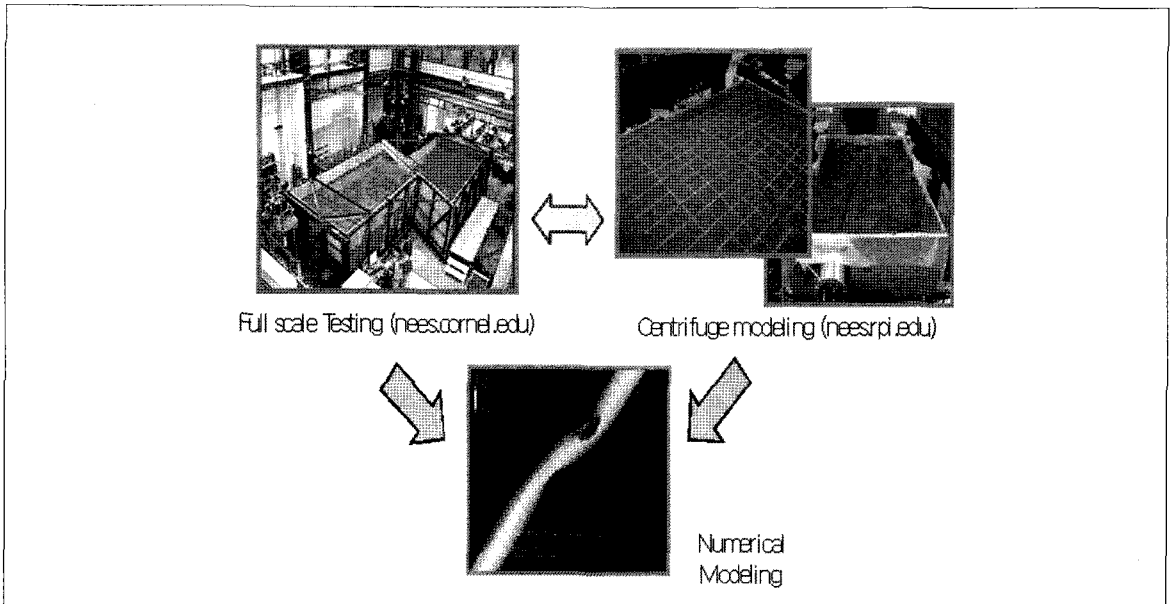


그림 2. 코넬-RPI 지중관 연구 체계

유형에 따라 지중관은 인장, 압축, 휨의 다양한 변형을 경험하게 된다. 지반 변위에 의한 지중관의 파열은 발생 영역이 제한적이나 그 잠재적인 파괴력이 매우 심각하여, 그 거동에 대한 연구와 방재가 중요하게 다루어지고 있다.

지반 변위로 인한 지중 매설관 거동의 해석 및 설계는 최근까지 많은 부분을 수치해석에 의존해 왔고, 그 결과를 기반으로 기준들이 만들어졌다. 현행 설계법이나 이론을 검증하는 방법은 현장 사례 연구에 전적으로 의존하고 있으나 사례의 수가 적고 또한, 사후 작업이라는 한계로 인해 자료 확보에 어려움이 있다. 이러한 연유로 미국, 일본 등지에서는 실험실 시험 시설들이 추진되고 있으나, 여전히 상당한 자원과 시간이 요구되는 어려운 작업이다. 최근 들어 원심모형기법이 지반 변위로 인한 지중관 변형 연구를 위해 적용되었고, 가능성 있는 결과들이 발표되었다 (O'Rourke 등, 2003; Ha 등, 2005).

이러한 일련의 노력을 토대로, 코넬 대학과 RPI는 지반 변위에 대한 지중관로 거동을 분석하기 위하여, 미국 과학재단 NEES프로그램의 재원으로 공동연구팀을 구성하였고, 실험실시험, 원심모형시험, 수치해석을 통해 각각적으로 지반-지중관의 거동을 해석하는 프로젝트를 시작하였다(그림 2). 코넬 대학은 실제 크기의 지중관의 매설과 동시

에 지반 변위 모사가 가능한 실험실 시험 시설을 구축하였다. 반면, RPI는 상대적으로 효율적인 원심모형시험을 통하여 다양한 조건 지중관 모사 시험을 계획·수행하여, 코넬대학의 실험실 시험의 설계를 지원하고 연구 흐름을 조율하는 상호보완적인 역할을 담당하고 있다. 또한, RPI 수치해석 연구팀이 합류하여 수치해석을 통한 지중관 거동의 깊은 이해를 더하면서, 설계 가이드라인의 개선을 위한 체계를 마련하고 있다.

본 기사에서는 코넬 대학-RPI 공동연구팀에 의해 수행되었던 연구결과 중, 필자가 참여했던 RPI의 원심모형 시험연구 결과를 중심으로하여, 지반-지중관 거동에 대한 최근 미국의 연구 현황과 원심모형시험의 활용사례를 소개하고자 한다.

2. 지반-지중관 거동 모사를 위한 원심모형시험

지반변위로 인해 나타나는 지중관의 변형은 지반 변위면(단층면)과 지중관의 매설 방향에 따라 다양하게 나타난다(그림 3). 정단층(그림 3 b)과 주향이동단층(그림 3 a)에서

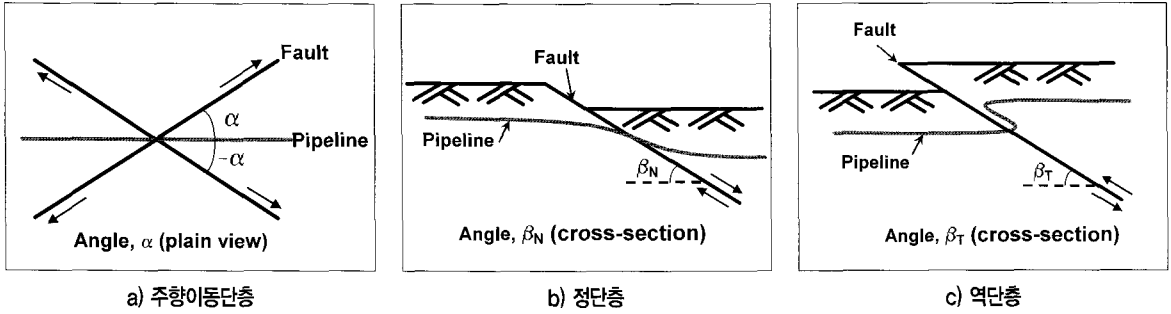


그림 3. 단층에 의한 관로의 거동 (Choo 등, 2007)

지반 변위 방향과 관로 방향의 교차각이 (-)각인 경우, 축방향 인장과 휨변형이 발생한다. 역단층(그림 3 c)의 경우와 주향이동단층에서 관로-단층면각이 (+)인 경우, 축방향 압축 및 휨변형이 발생한다.

지반 변위로 인한 다양한 지중관의 변형을 모사하기 위하여, RPI에서는 원심모형시험에서 지반 변위를 모사할 수 있는 '스플릿 박스(split box)'를 개발하였다(그림 4). 스플릿 박스는 원심가속 중에 지반 변위(단층 변위)를 모사할 수 있는 장비로서, 그림 4에서처럼 하나의 박스가 갈라져 있는 구조로 되어 있다. 박스 안에는 모형 지반을 조성할 수 있고, 양쪽 박스가 상대편 박스에 대하여 독립적으로 이동이 가능하여 모형 지반에 지반 변위(단층)를 일으킬 수 있다. 이와 동시에, 양쪽 박스를 가로 질러 모형관이 매설되는 구조를 가지고 있어, 지반 변위가 유발될 때 지중관에 지반 하중이 작용되도록 하였다(그림 5). 한쪽 박스는 수평으로, 다른 편 박스는 수직으로 이동이 가능하다. 이를 조합

하여 수직단층, 주향이동단층 및 조합단층(Oblique)을 모사할 수 있다(Ha, 2005).

본 프로젝트에서는 HDPE관과 강관에 대하여 수평, 수직, 조합단층 등 다양한 지반 변위에 대한 지반-관의 거동 분석이 계획되어 수행되고 있으나, 본 기사에서는 HDPE관의 수평 지반 변위 케이스에 대한 원심모형실험 연구사례만을 다루고자 한다. 본 기사에서 다루어지는 원심모형 시험은 세가지 지반 변위 조건으로 표 1과 같고, 3가지 지반 변위면-지중관 교차각이 모사되었다. 뒤채움 높이(H)는 1.1m(원형스케일)로 H/D = 2.8 조건에서 시험이 수행되었다. 모든 실험에서 동일한 공장에서 생산된 HDPE(고밀도 폴리에틸렌)관이 사용되었고, HDPE관은 AWWA 규준 C901을 만족하는 수자원 공급용 관이다. 원심모형시험에서 사용된 모형관은 코넬대학의 실대형 모형관(외경 0.4m, 두께 0.024m)을 모사하기 위하여 외경 33.4mm, 관 두께 1.96mm의 소구경 HDPE관이 사용되었다.

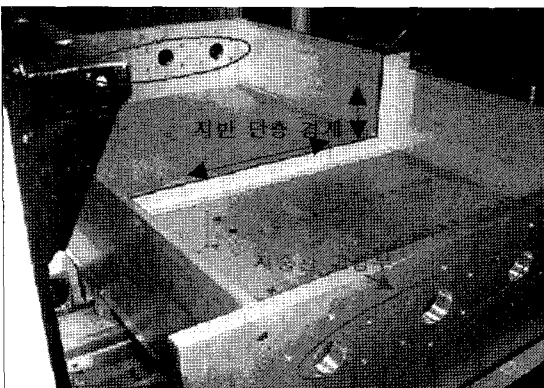


그림 4. 스플릿 박스 (Ha 등, 2005)

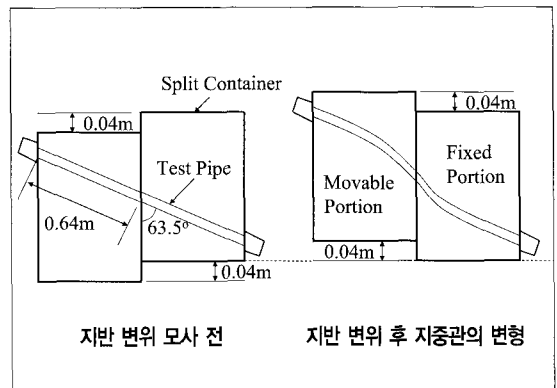


그림 5. 스플릿 박스를 이용한 지반 변위 및 지중관 변형 모사 (Ha, 2008)

표 1. 시험 조건

시험명	지중관-단층 초기각(α)	계측센서
A1	-63.5°	변형률계
A2	-63.5°	Tactile
A3	-85°	변형률계
A4	-85°	Tactile
A5	60°	변형률계
A6	60°	Tactile

관로의 거동을 관측하기 위하여 지중관의 변형과 지반의 반력을 계측하였다. 동일한 조건의 실험을 반복하면서 변형을 측정하는 센서와 반력을 측정하는 센서를 번갈아가면서 적용하여 획득하였다. 시험 A1, A3, A5는 모형관의 주동 및 수동측 스프링선을 따라 변형률계를 부착한 시험으로 지중관 변형을 계측하였다. 반면, 시험 A2, A4, A6는 모형관에 TEKSCAN사의 Tactile 압력 센서를 설치하여, 관과 지반 사이에 발생하는 지반 반력을 측정하였다. Tactile 압력센서는 측정부가 유연한 시트 형태로 되어 있어, 모형관을 둘러싸 부착이 가능하며 모형관과 함께 지중에 매설되었다. 관과 지반 사이에 부착되었기 때문에, 지반-관 사이에 발생하는 접촉응력을 측정하게 된다. Tactile 센서에 대한 추가적인 설명은 뒤에서 다루고자 한다. 그림 6은 변형률계와 Tactile 센서가 설치된 모형관을 보여주고 있다.

뒤채움 모래는 입자 크기의 영향이 나타내지 않도록 40

표 2. 뒤채움 지반재료의 물성

기본물성	물성치
건조단위중량, γ_d , kN/m ³	14.7
점착력, c , kPa	0
미찰각, ϕ , deg	40
D_{50}	0.29
균등계수, C_u	1.55
곡률계수, C_c	1.0

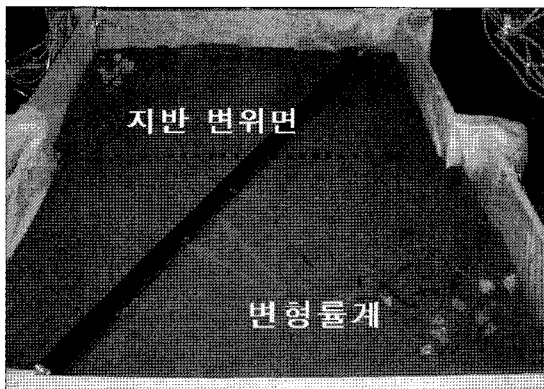
번체(0.42mm)를 통과하고 200번체(0.075mm)에 잔류하는 모래를 채취하여 사용하였다. $D_{50}=0.29$ 의 균등한 모래가 채취되어, 관외경 대 중간입경 비(OD/D_{50})가 115로, TC2 (2005)에서 의해 제안된 기준 $OD/D_{50} \geq 48$ 에 적합하도록 선택하였다. 뒤채움재로 사용된 모래시료의 기본물성을 표 2와 같다. 뒤채움 모래는 4~5%의 함수비로 조성되었고, 현장의 일반적인 불포화 조건을 모사하였다.

3. 지반 변위에 따른 지중관의 거동

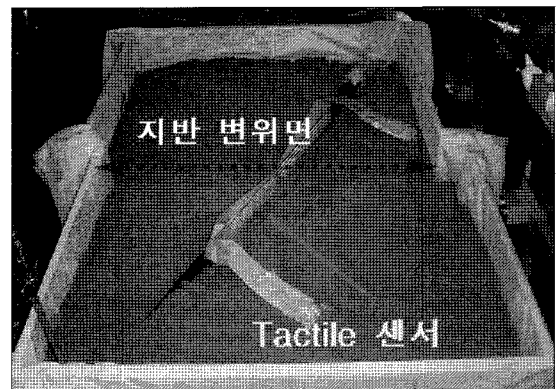
3.1 인장을 받는 지중관의 거동

3.1.1 관로의 축변형률과 횡변형률

변형률계를 통하여 측정된 축변형률과 횡변형률은 그림 7, 그림 8과 같다. 지반변위와 지중관 매설방향의 교차각이



a) 변형률계 설치



b) tactile센서 설치

그림 6. 변형률계 및 tactile센서가 부착된 모형관 (Ha 등, 2008)

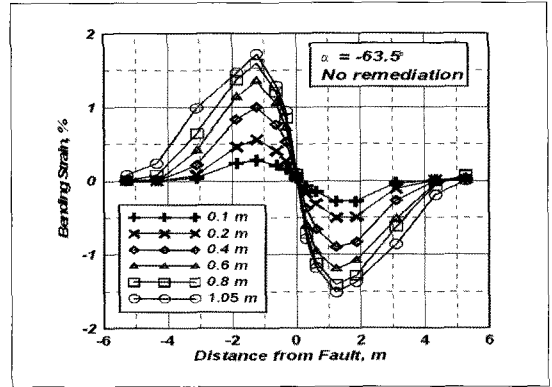
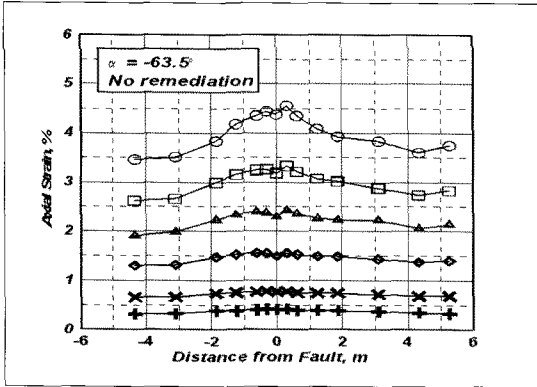


그림 7. 시험 A1($\alpha=-63.5^\circ$)의 축방향 및 휨변형률(Choo 등, 2007)

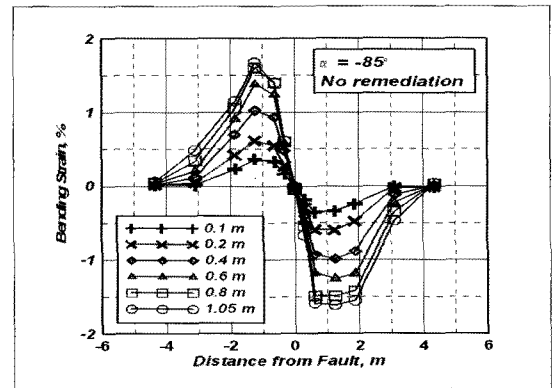
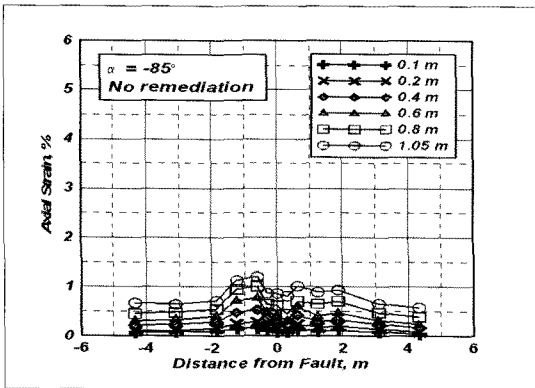


그림 8. 시험 A3($\alpha=-85^\circ$)의 축방향 및 휨변형률 (Choo 등, 2007)

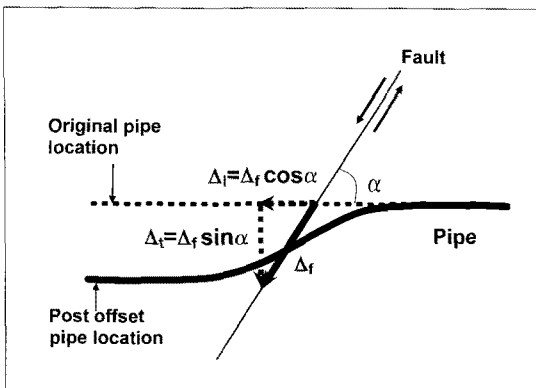


그림 9. 단층 변위의 성분 분해도 (Choo 등, 2007)

-63.5°인 경우, 축변형률과 휨변형률 모두 지반 변위에 따라 커지는 결과를 보인다. 반면, 교차각이 수직에 가까울수록 (-85° 시험) 축변형률은 거의 나타나지 않고, 휨변형률

은 비슷한 양이 발생하였다. 이 결과로부터, 매설 각도를 조절하는 것만으로도 지중관의 축변형을 대폭 줄일 수 있음을 알 수 있다.

지반의 변위를 그림 9와 같이 축방향 성분과 수직방향 성분으로 나누어지고, 최대 축변형률과 최대 휨변형률과 함께 나타내면 그림 10과 같다. -63.5°와 -85° 시험 결과가 잘 일치하고 있어, 각 방향의 변위 성분이 각 방향 변형률 성분에 직접적인 원인이 됨을 확인할 수 있다. 축변형률은 1%에서 4%까지 직선적으로 증가하는 반면, 휨변형률은 0.73m 이상의 변위에서 일정한 값에 도달하고 있으며, 이는 반력을 형성하는 지중관의 수동측 지반이 파괴되고 있음을 나타낸다.

3.1.2 횡방향 지반반력

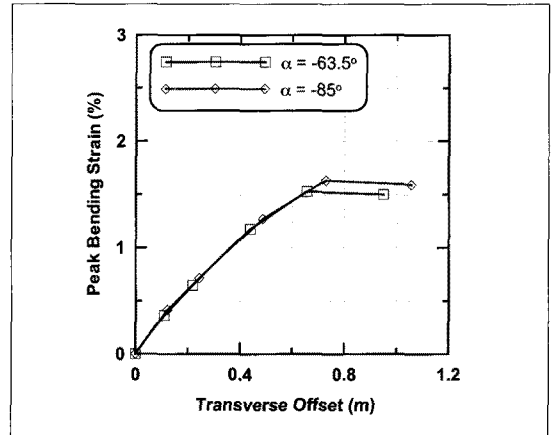
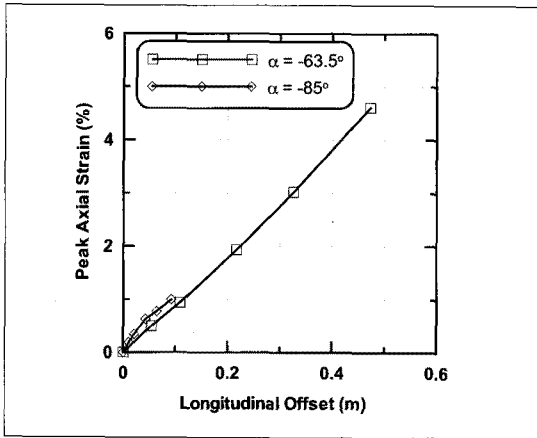
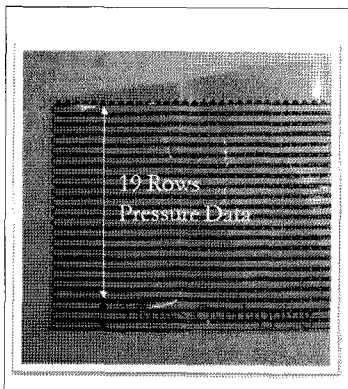
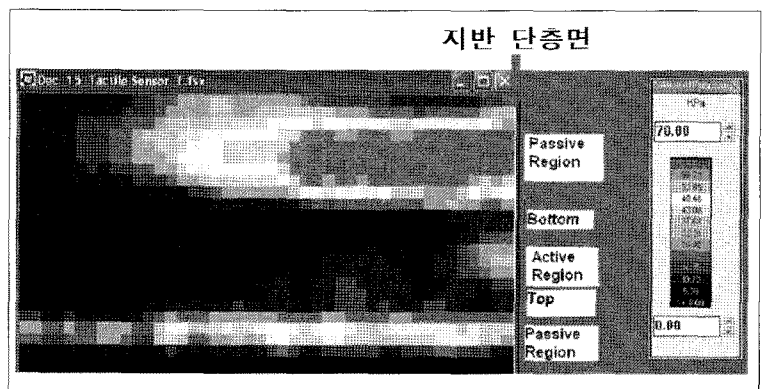


그림 10. 최대 축변형률 및 휨변형률(Ha 등, 2008)



a) Tactile 센서의 측정시트



b) Tactile 센서 측정 화면(Ha, 2008)

그림 11. Tactile 센서의 측정시트와 측정화면

Tactile센서를 사용하여 지반-관로의 접촉응력을 측정하고 횡방향 지반반력을 산정하였다. 그림 6b에서처럼 Tactile 센서는 모형관 표면을 감싸면서 설치되어, 모형관의 둘레를 따라 발생하는 표면의 접촉응력을 실시간으로 측정한다. Tactile센서의 측정부를 자세히 살펴보면, 그림 11과 같이 측정선이 수평-수직으로 나열되어 있고, 각 교차점에서 접촉응력을 측정하는 구조이다. 본 시험에서는 모형관을 감싸서 설치되었기 때문에, 모형관 주변에 작용하는 접촉응력의 분포를 그림 11b와 같이 실시간으로 측정하게 된다. 실시간으로 측정된 Tactile 계측자료로부터, 모형관의 각 지점에서 발생하는 관 둘레의 접촉응력 변화를 분석할 수 있다(그림 12). 최종적으로, 모형관 둘레의 수직

응력 분포를 적분하여 모형관에 작용하는 지반의 횡방향 반력을 구할 수 있다(그림13). Tactile 센서 기술은 코벌대학 실험실에서도 활용되어, Tactile 센서를 실험대형 크

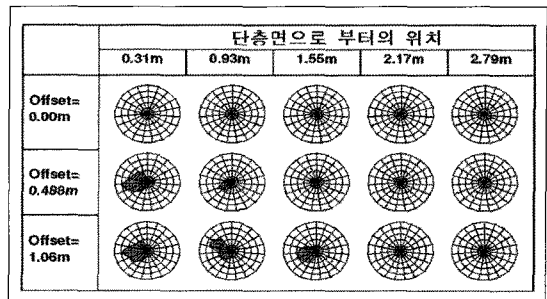


그림 12. 시험 A2 ($\alpha = -63.5^\circ$)의 5단면에서의 응력분포(Ha 등, 2008)

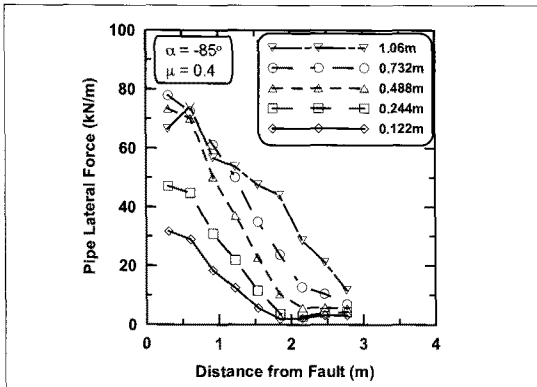


그림 13. 측정된 지반 접촉응력으로부터 계산된 횡방향 지반 반력 (Ha 등, 2008)

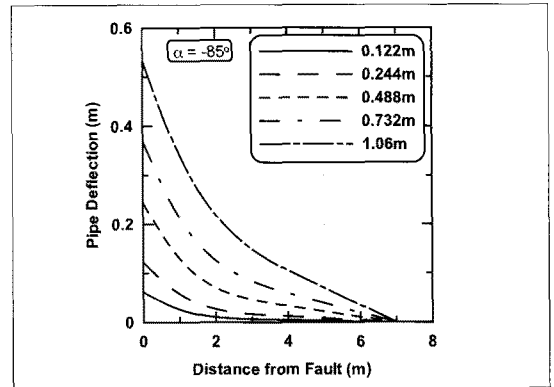


그림 14. 단층 변위에 따른 관의 횡변위 (Ha 등, 2008)

기의 HDPE관 둘레에 설치하여 실물 크기에서의 지반 접촉 응력의 변화를 연구하고 있다. 이 결과는 원심모형 시험 결과를 보완하여 지반-관로 상호작용의 메카니즘에 대한 이해를 더욱 높일 것으로 기대된다.

3.1.3 지반-관로 상호작용력 p-y 관계

변형률계를 통하여 측정되는 횡변형률로부터 탄성보 이론을 이용하여 지중관의 횡변위(y)를 구할수 있다(그림 14). 지반의 반력(그림 13)과 지중관의 횡변위(그림 14)를 조합하여, 지반반력-변위 관계(p-y관계)를 그림 15와 같이 얻을 수 있다. 원심모형시험의 p-y결과를 ASCE 가이드라인 (1984)과 Turner(2004)의 연구 결과와 함께 비교하면(그림 15) 원심모형시험의 결과의 최대 반력은 Turner (2004)의 결과는 두 배 정도의 차이를 보이나, 오히려 ASCE 가이드라인(1984)에 비슷한 값을 보였다. ASCE 가이드라인은 건조 모래에 대한 결과이기 때문에, 원심모형 시험결과는 기존의 연구결과보다 작은 값을 도출하고 있다. Turner(2004)과 ASCE 가이드라인(1984)은 평면변형을 조건으로 지반-관로의 상호작용이 2차원적으로 묘사 되어 관로 방향으로 동일하게 가정되었다. 반면, 원심모형 시험의 지반-관로 거동은 3차원적인 거동을 보이게 되고, 관로의 위치에 따라 나타나는 반력과 변형이 다르게 된다. 두 배에 가까운 차이의 원인은 원심모형의 경우 3차원 거동의 묘사인 반면 기존의 연구결과는 2차원 묘사로 이루어 졌기 때문으로 판단된다. 그러나 코넬대학에서 진행되고

있는 실험실 실험 결과와 비교가 필요하며, 그 결과가 좋은 지표를 제공할 것으로 기대된다.

3.2 압축을 받는 관의 거동

인장을 묘사한 시험과 압축을 묘사한 시험의 지표면의 형상을 비교하면(그림 16), 압축 시험의 경우는 지표면 균열이 거의 발생하지 않는 반면, 인장의 경우는 지표면 균열 및 융기가 두드러지게 발생하였다. 인장시험의 지표면 균열과 융기는 지중관이 지반변위에 의해 수동측 지반을 끌고 나가면서, 썩기형 파괴를 유발하기 때문으로 해석된다.

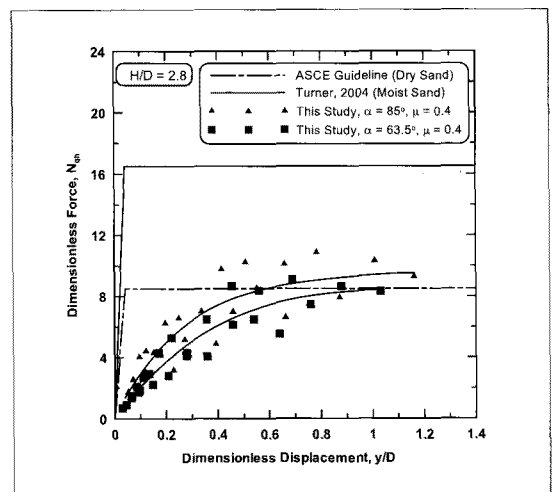
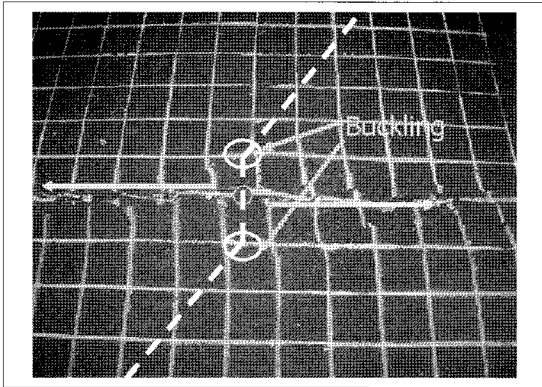
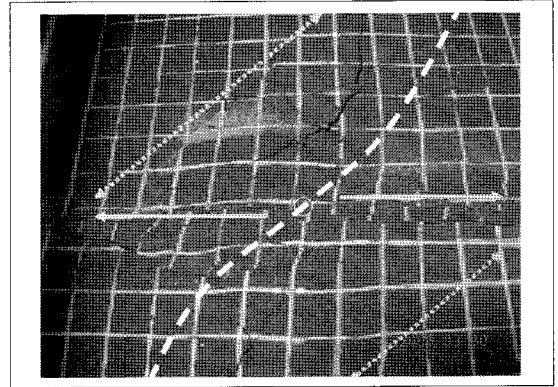


그림 15. 측정된 p-y관계와 ASCE 설계식 (1984) 비교(Ha 등, 2008)



a) 압축



b) 인장

그림 16. 단층 이후 지표면 사진(Ha 등, 2007)

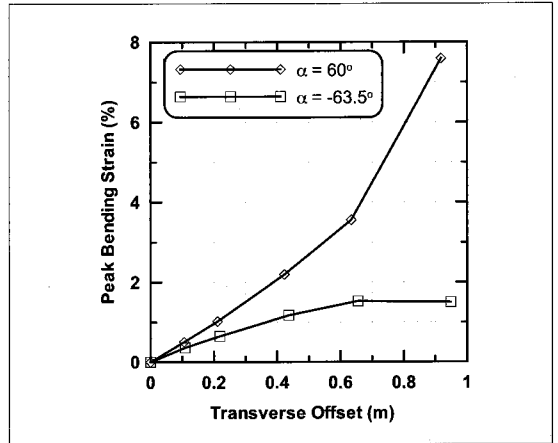
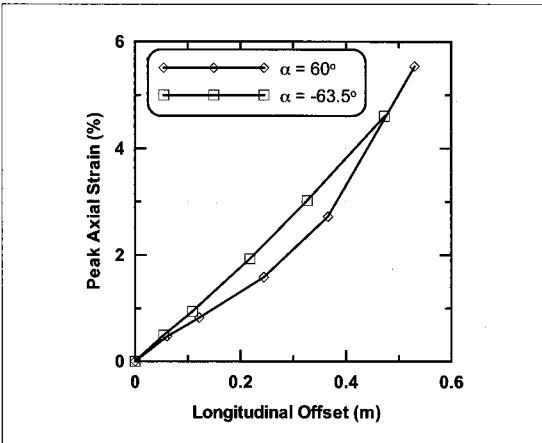


그림 17. 모델 A1과 A5의 최대 축방향 변형률 및 휨변형률(Ha 등, 2007)

그림 16의 중심에 보이는 백색 점선은 변형된 관의 대략적인 형상을 나타낸다. 그림 16b의 흰색 점선은 수동측 지반의 파괴면의 끝부분을 나타낸다. 압축 하중으로 인해, 모형 관은 단층면에서 대칭이 되는 두 지점에서 좌굴이 발생하였고, 좌굴로 인해 50%이상의 관내부 단면적 감소가 확인되어 HDPE관로의 수송능력에 큰 손실이 예상되었다.

압축시험에서 관측된 최대 축변형률과 최대 휨변형률은 인장을 받는 경우와 달리, 좌굴 발생 이후 급격히 증가한다(그림 17). 결론적으로, 지중 매립 관로가 압축의 변형을 받게 되는 경우, 좌굴과 같은 치명적인 피해를 경험하고, 회복이 불가능한 손실을 가진다. 그러므로 관로 매설 경로를 설계할 때 예상 단층면을 고려하여 초기 각도를 조절하여, 압축의 경우가 발생하지 않도록 미연 방지해야 한다.

4. 경량매립재를 활용한 지중관 피해 경감 기술의 검증

지반-관로 거동의 이해만큼이나, 지반 변위의 피해를 경감시키기 위한 기술의 개발은 중요한 사안이다. 지반 변위에 의한 지중관의 변형은 지반-관의 접촉면에 발생하는 상호작용에 의하여 발생하고, 축변형률은 관로 매설 계수(β_p)에 대하여 증가하는 이론적인 관계가 제안되었다(O'Rourke 등, 1999).

$$\beta_p = \frac{\mu\gamma H}{t} \quad (1)$$

여기서, μ 는 관 표면 마찰계수, γ 는 뒤채움재 단위중량,

H는 매설깊이, t 는 관두께이다. 축변형률은 매설깊이와 마찬가지로 줄이거나, 뒷채움재의 경량화를 통하여 감소시킬 수 있고, 비슷한 논리가 횡방향 변형에도 적용할 수 있다. 그러나 매설깊이는 동결 응기에 대한 보호를 위하여 일정 두께가 유지되어야 하는 경우가 많기 때문에 뒷채움재의 경량화가 효율적인 해법이 된다. 본 연구에서는 경량재를 이용한 방법을 제안하였고, 검증을 위하여 원심모형시험이 이용되었다.

4.1 EPS 지오포의 원심모형시험

경감기술의 효과를 검증하기 위하여, 그림 18과 같이 기존의 시험 A1~A6 조건에 대하여 지반 변위면 주변을 4가

지 형태로 치환한 시험을 수행하고 그 효과를 검토하였다. 지반개량은 우선적으로 횡방향 지반-구조물의 상호작용력을 줄이기 위하여 관로의 수동영역예상지역을 빼기꼴 형태로 경량 지오포 블록으로 치환하도록 하였다. 단층의 발생 위치를 정확하게 예측하기는 어려운 관계로, 관로를 중심으로 양쪽 영역을 모두 치환하였다. 특히, 그림 18c와 같이 부분 치환된 경우를 추가하여 치환량에 따른 경감 효과를 비교해보고자 하였다.

원심모형시험에서 사용된 지오포 블록의 단위 중량은 0.237kN/m^3 으로 모래 단위중량의 2%정도이다. 모형 지오포 블록은 폭 8.2cm, 길이 12.3cm, 두께 2.5cm으로, 원형크기로 폭 1m, 길이 1.5m, 두께 0.31m의 지오포를 모사하였다. 그림 19는 시험에 사용된 모형 지오포와 시험 준비

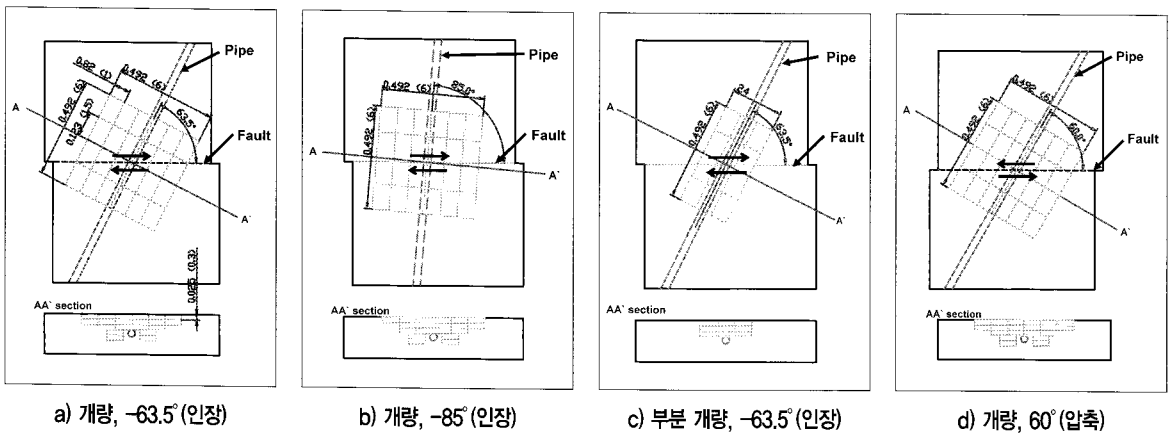


그림 18. 지반 개량 모델의 평면도 및 단면도 (Choo 등, 2007)

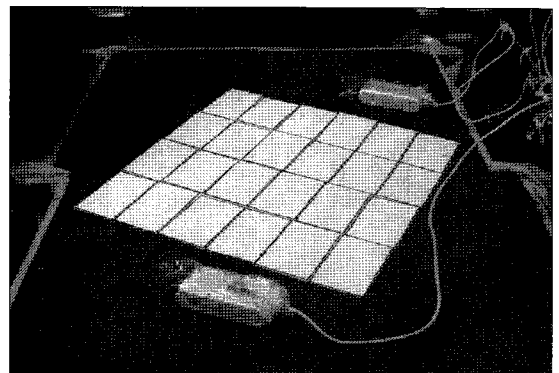
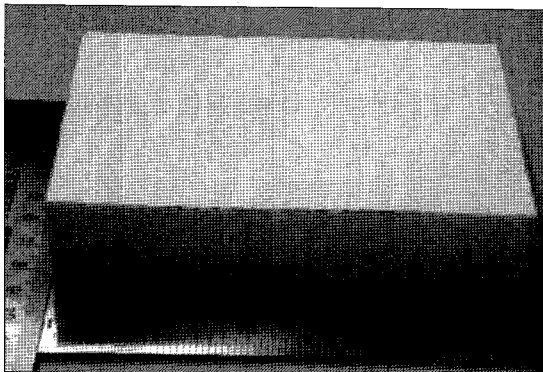


그림 19. 지오포 모델 블록 및 제작 완료 후 센트리퓨지 모델(Choo 등, 2007)

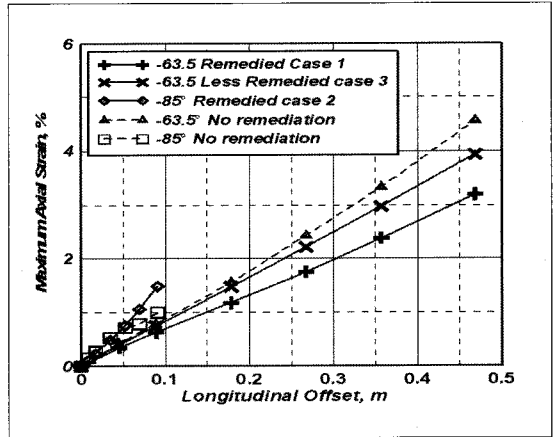
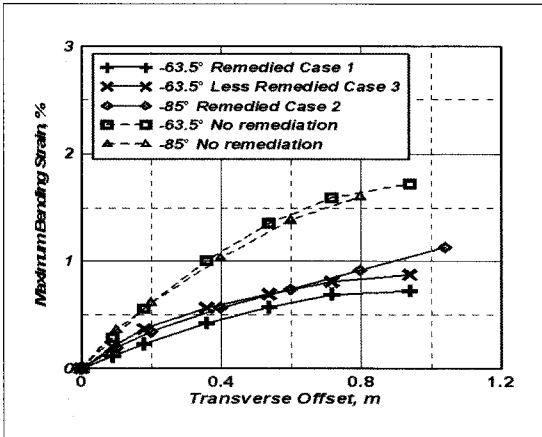


그림 20. 최대 휨변형률 및 축방향 변형률 비교(Choo 등, 2007)

가 완료된 원심모형 시험체를 나타낸다.

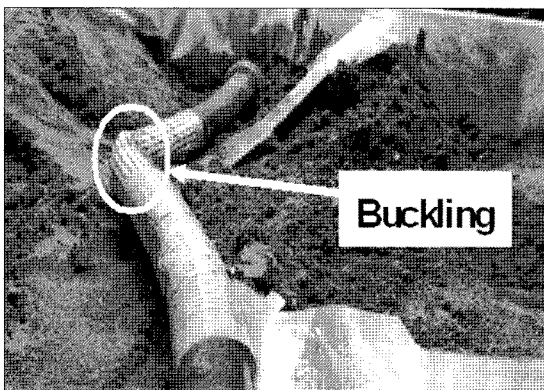
4.2 인장 하중하의 관로에 대한 개량 효과

최대 축방향과 최대 휨변형률을 개량되지 않은 조건의 결과와 그림 20에 비교하였다. 제안된 경량 뒤채움재 기법에 의해 휨변형률에서 큰 감소효과를 얻었다. -63.5°와 -85° 시험의 경우, 일반 개량의 경우 45~60%의 휨변형률 감소 효과를 보였고, 부분 개량의 경우는 29~49%의 감소 효과를 보였다. 반면, 축변형률에 대하여 큰 효과를 보이지 않았고, 축방향 변형률이 많이 발생하는 -63.5°의 경우 일반 개량시 17~30%의 감소를, 부분 개량시 4~14%의 감소를 보였다. 원심모형시험결과를 볼 때, 경량 뒤채움재는

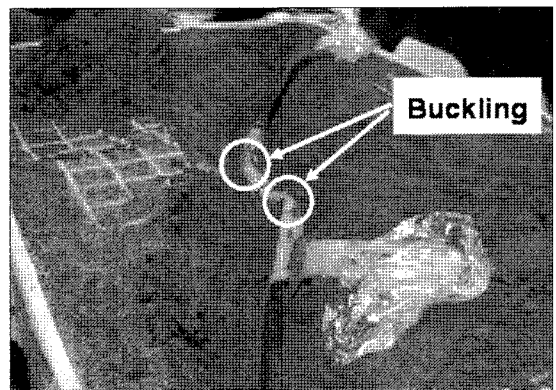
상대적으로 휨변형에서만 뛰어난 효과를 보였고, 이는 지오폴 블록의 치환 영역이 휨변형이 발생하는 단층면 근처에 집중되었기 때문으로 판단된다. 기본 개량 시험은 부분 개량 시험에 비하여 두 배 이상의 지오폴을 필요로 하나, 휨변형률에 대한 피해 경감 효과는 비슷하게 나타났다. 휨변형률이 주되게 예상되는 경우, 부분 개량이 경제적인 이점을 가질 것으로 판단된다. 축변형률이 주되게 예상되는 경우, 단층으로부터 관로 방향으로 치환 영역을 보다 넓게 적용되어야 한다.

4.3 압축 하중하의 관로에 대한 개량 효과

축방향 압축을 받는 경우에는 아무런 경감 효과를 보



a) 지오폴 지반 개량 적용



b) 지반 개량 미적용

그림 21. 단층 모사 이후 굴착에 의한 관로 관찰

지 못하였다. 개량이 되지 않은 경우에는 단층면으로부터 대칭되는 2곳에서 좌굴이 발생한 반면, 경량재 치환 경우에는 1곳에서 좌굴이 발생하였다. 결론적으로, 압축 조건하의 관로에 대해서는 경량 뒤채움재 기법이 어떠한 이점을 가지지 못함을 확인할 수 있었고, 관로에 압축변형이 예상되는 경우, 압축 조건을 피하기 위하여 설계 단계에서부터 초기 관로-단층면 교차각을 조절하여 설계·매설되어야 함이 다시 한번 강조되었다.

5. 맺음말

원심모형시험을 통하여 지반 변위를 받는 지반-관로 거동의 이해를 한층 높이는 것을 확인하였다. 다양한 지반변위 조건에 대한 거동 뿐 아니라, 새로이 제안되는 피해 경감 기법의 실증적인 검증에도 유용하게 활용되었다. 특히, 지반-관로 거동을 분석하는데 있어, 새로운 관점을 제시하고 실험과 수치해석연구에 있어 많은 시너지 효과를 가져왔다. 원심모형시험은 밝은 가능성을 보이고 있으나, 여전히 축소 모형에서 오는 오차들과 물리량 계측의 제한성 때문에, 실험과 수치해석기법과의 비교 연구가 절실히 요구되고 있다. 국내에서도 실험-수치해석-원심모형시험을 연계한 통합적인 연구가 활발히 추진되기를 기대한다.

참고 문헌

1. Abdoun, T., Ha D., O'Rourke, M., Symans, M., O'Rourke, T., Palmer, M., (2009), "Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29, No.3, pp. 415-427.
2. Choo, YW, Abdoun, TH, O'Rourke, MJ, and Ha, D, (2007), "Remediation for Buried Pipeline system subject to Permanent Ground Deformation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.27, No.12 pp.1043-1055.
3. Ha, D., Abdoun, T., O'Rourke, M., Van Laak, P., O'Rourke, T. and Stewart, H., (2006), "Split-containers for centrifuge modeling of permanent ground deformation effects on buried pipeline systems," *The Sixth International Conference on Physical Modeling in Geotechnics*, August 4-6, 2006, Hong Kong, China. 729-734.
4. Ha D., Abdoun, T., O'Rourke, M., Symans, M., O'Rourke, T., Palmer, M., (2008), "Buried HDPE pipelines subjected to normal vs strike-slip faulting - a centrifuge investigation," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 45, No.12. pp.1733-1742.
5. Ha, D., Abdoun, T., O'Rourke, M., Symans, M., O'Rourke, T., Palmer, M., (2007), "Centrifuge modeling of earthquake effects on buried high density polyethylene (HDPE) pipelines crossing fault zones," *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 134, No.10, pp.1501-1515
6. Ha, D. 2007, Evaluation of ground rupture effect on buried HDPE pipelines, Ph.D. dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute.
7. Ha, D., Abdoun, T., O'Rourke, M., Symans, M., O'Rourke, T., Palmer, M., 2007, Earthquake faulting effects on buried pipelines case history and centrifuge study, *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*. (accepted for publication.)
8. O'Rourke, and M., Liu, X.(1999), Response of Buried Pipelines Subject to earthquake Effects, *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Monograph Series. No. 3.*
9. Technical Committee TC2, 2005. "Catalogue of scaling laws and similitude questions in centrifuge modeling." <http://geo.citg.tudelft.nl/allersma/tc2/TC2%20Scaling.pdf>