

# 화학적 영향을 고려한 토목섬유-지반 접촉면의 동적상대변위

## Dynamic Relative Displacement of Geosynthetic-Soil Interface Considering Chemical Effect

곽 창 원<sup>1</sup> Kwak, Chang-Won 오 명 학<sup>2</sup> Oh, Myoung-Hak  
장 동 인<sup>3</sup> Jang, Dong-In 박 인 준<sup>4</sup> Park, Inn-Joon

### Abstract

Recently, the construction of onshore waste landfill sites has been studied due to the increase of waste and geosynthetics are widely utilized to enforce and protect waste landfill. Geosynthetics comprises the interface with soil and the seismic behavior and stability mostly depend on the dynamic shear behavior of the geosynthetic-soil interface. Therefore, the understanding of dynamic shear behavior and dynamic relative displacement of the interface is critical. The dynamic shear behavior of the interface is affected by surrounding conditions and loading and shows very complicated response, and, it is difficult to study theoretically. In this study, laboratory test to investigate dynamic relative displacement is performed under chemical condition. Dynamic interface apparatus is utilized and cyclic simple shear tests are conducted under short term (60 days of submerging period) and long term (840 days of submerging period) conditions. Consequently, relative displacement of the interface shows the largest values under acid condition, which means more severe damage of the interface.

### 요 지

최근 늘어나고 있는 폐기물량에 따라 해상 폐기물 매립장의 건설이 연구되고 있으며, 매립장 내 폐기물의 보강 및 보호 목적으로 토목섬유가 널리 사용되고 있다. 토목섬유는 흙과의 접촉면을 형성하는데 지진시 접촉면에서의 동적 전단 거동이 폐기물 매립장의 지진시 거동 및 안정성을 지배하는 가장 중요한 요소이다. 따라서 접촉면 동적 전단거동 및 동적상대변위 파악이 매우 중요하다. 이러한 접촉면 거동은 주위 환경 및 하중조건에 의해 영향을 받으며 복잡한 응답을 보이므로 이론적 접근이 곤란하다. 본 연구에서는 침출수 내의 산성 및 염기성과 같은 성분이 반복 전단하중 상태에서 지반-토목섬유 접촉면의 동적 상대변위특성에 대하여 실내 시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 이를 위하여 동적 접촉면 전단 시험기를 이용하여 산성 및 염기성 용액에 840일 장기수침 시료와 60일 단기수침 시료에 대하여 반복 단순전단 시험을 수행 하였다. 그 결과 산성 및 염기성 조건 공통적으로 산성일 경우 접촉면의 상대변위가 가장 큰 값을 나타내어 접촉면 손상 정도의 크기가 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

**Keywords :** Onshore waste landfill, Geosynthetic-soil interface, Dynamic shear behavior, Dynamic relative displacement

1 정회원, 한국지역난방기술 토건설계그룹 (Member, Engineer, Korea District Heating Engrg. Co. Ltd.)

2 정회원, 한국해양과학기술원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Korea Institute of Ocean Science & Technology)

3 비회원, 한서대학교 대학원 토목공학과 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Hanseo Univ.)

4 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanseo Univ., Tel: +82-41-660-1054, Fax: +82-41-660-1054, [geotech@hanseo.ac.kr](mailto:geotech@hanseo.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

최근 환경에 대한 범국민적 관심이 증가하면서 폐기물 매립장과 같이 파괴시 주위 환경에 미치는 영향이 큰 구조물에 대하여 보다 심도 있는 연구가 진행되어야 할 필요성이 증가하고 있다. 또한 폐기물 매립장에 대한 환경적 요구사항이 날로 엄격해지고 있고 규모 또한 커지고 있으나 극심한 님비(NIMBY) 현상으로 인하여 부지선정조차 쉽지 않은 실정이다. 따라서 그에 대한 대안으로 등장한 것이 해상에 건설하는 해상 폐기물 매립장이다. 일본의 경우 이미 일반폐기물 최종처분장의 전체 용량 중 해상 매립장의 비율이 25%에 이르며, 특히 도쿄도에서는 이 비율이 89%를 차지하고 있다(Kwon et al., 2012). 따라서 국내에서도 해상 폐기물 매립장에 대한 관심이 증가하고 있으며 이에 대한 연구도 진행되고 있다. 해상 폐기물 매립장은 해상에 건설되므로 육상 매립장에 비해 파괴시 환경에 미치는 영향이 지대하므로 지진시 동적거동을 보다 정확하게 파악하여야 한다. 폐기물 매립장에 설치되는 토목섬유와 지반은 직접 접촉하여 접촉면을 형성하게 되는데 이러한 접촉면의 거동은 기하학적 형상, 상재하중, 지반강성 등 여러 인자에 의하여 큰 영향을 받는다(Desai, 2001). 토목공학에서 정의하는 접촉면은 다른 물질로 구성된 2가지 물질이 접촉할 때 이며, 두 물질 사이의 접촉면에는 제한된 스미어 존(smeared zone)이 존재할 수 있다. Fig. 1은 토목섬유-지반 접촉면의 기본 개념을 표현하고 있다. 여기서  $\sigma_n$ 은 상재하중,  $t$ 는 접촉면 두께,  $u_r$ 은 접촉면의 상대변위이다.

최근에는 이러한 인자들 뿐만 아니라 지반의 화학적 특성에 의해서 영향을 받고 이를 정량적으로 분석하기 위한 연구가 진행되어 왔다(Kwak et al., 2013). 특히 지진시의 동적하중 하에서는 접촉면의 전단거동이 더욱 복

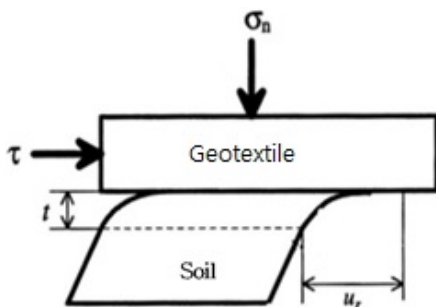


Fig. 1. Basic concept of geotextile-soil interface (Modified after Park et al., 2012)

잡해지며 불확실성이 커지므로 이론적인 연구보다는 실험적인 연구가 필수적이다. 또한 접촉면의 동적 상대변위는 동적하중 재하시 접촉면에 미치는 영향범위를 파악할 수 있는 지표이므로 이를 직접적이고 연속적으로 측정할 수 있는 시험 장치를 통하여 변위특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 폐기물 매립장의 침출수로 인한 지반에 토목섬유와 지반과의 산성, 염기성으로 오염된 접촉면을 형성하고, 이러한 조건이 접촉면의 동적 상대변위에 미치는 영향을 파악하기 위하여 다기능 접촉면 동적 전단시험기(Multi-purpose Interface Apparatus, M-PIA)를 이용하여 실험적 연구를 수행하였다.

## 2. 접촉면 동적 전단시험

접촉면의 거동은 전단강도에 영향을 받으며 동적하중 재하시 전단강도의 저감현상이 발생하게 된다. 토목섬유-지반 접촉면의 정적 전단특성에 대한 연구는 그간 성공적으로 수행된 바 있다(Seo et al., 2007; Seo et al., 2004; Park et al., 2000). 본 연구에서는 이러한 토목섬유-지반 접촉면의 동적 전단거동을 파악하기 위하여 다기능 접촉면 전단시험기를 이용하여 실내시험을 수행하였다. 화학적 영향을 고려한 토목섬유-지반 접촉면의 동적 거동은 기존 연구에서도 수행된 바 있으나(Park et al., 2012; Kwak et al., 2013), 접촉면 상대변위를 중점적으로 연구한 성과는 다소 미비한 실정이다. 또한 다기능 접촉면 전단시험기에 대한 내용은 이전 연구(Kwak et al., 2016)에서 상세히 거론되었으며 본 연구에서는 그동안 연구성과가 적었던 접촉면에서 측정한 상대변위 발생 특성을 중점적으로 분석하였다.

실내 시험에서 사용된 흙 시료는 주분진표준사를 이용하였으며 장, 단기 거동을 분석하기 위하여 산성( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) 및 염기성( $\text{NaOH}$ ) 용액에 각각 840일, 60일간 수침시켜 사용하였다. 상재하중은 0.3MPa로 적용하였는데, 이는 폐기물의 개략적인 단위중량인  $15\text{kN/m}^3$ (Oweis and Khera, 1998)을 고려할 경우 폐기물 매립시의 적재 높이 약 20m에 해당하는 하중이다. 다기능 접촉면 전단시험기의 외형도는 다음 Fig. 2와 같다.

시료 직경은 다음 Fig. 3과 같이 100mm이고, 높이는 40mm이다. 두께 3mm의 전단 링 12개가 시료 전체를 둘러싸고 있으며 시료 하부의 재하판이 수평방향의 전단변위를 가하여 시료에 동적 전단응력을 재하하는 변



Fig. 2. Multi-purpose Interface Apparatus, M-PIA

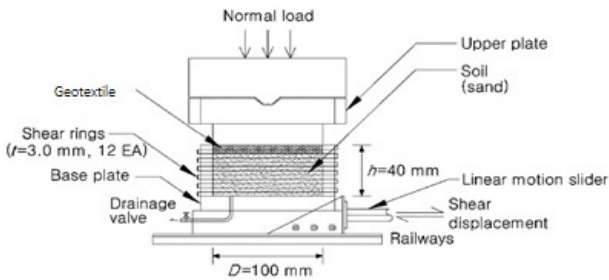


Fig. 3. Shear box detail (Kwak et al., 2016)

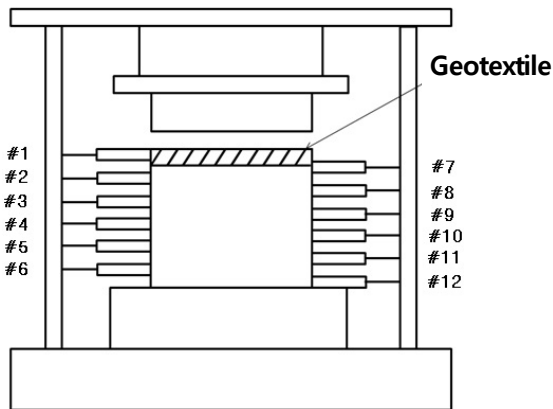


Fig. 4. Location of shear ring gauges

형을 제어 방식(strain-controlled)의 반복 단순전단시험을 수행하게 된다.

접촉면 상대변위는 다음 Fig. 4와 같이 전단링의 좌, 우측부에 총 12개의 센서를 부착하여 하중 재하시 실시간으로 자동 기록되도록 하였다.

### 3. 시험 결과

#### 3.1 장기 수침 결과

산성용액과 염기성용액에 840일간 장기 수침시킨 시

Table 1. Relative displacement (840 days, acid condition)

Surcharge	No. of gauge	(-)direction relative disp. (mm)	(+)direction relative disp. (mm)	Absolute relative disp. (mm)
0.3 MPa	1	0.00	0.43	0.43
	2	0.00	0.59	0.59
	3	0.00	0.60	0.60
	4	0.00	0.93	0.93
	5	0.00	0.82	0.82
	6	0.00	1.01	1.01
	7	-0.79	0.00	0.79
	8	-0.81	0.00	0.81
	9	-0.90	0.00	0.90
	10	-0.97	0.00	0.97
	11	-1.03	0.00	1.03
	12	-2.92	0.00	2.92

Table 2. Relative displacement (840 days, alkalic condition)

Surcharge	No. of gauge	(-)direction relative disp. (mm)	(+)direction relative disp. (mm)	Absolute relative disp. (mm)
0.3 MPa	1	0.00	0.51	0.51
	2	0.00	0.47	0.47
	3	0.00	0.80	0.80
	4	0.00	0.83	0.83
	5	0.00	1.00	1.00
	6	0.00	1.19	1.19
	7	-0.30	0.00	0.30
	8	-0.49	0.01	0.50
	9	-0.45	0.00	0.45
	10	-0.54	0.00	0.54
	11	-0.78	0.01	0.79
	12	-0.84	0.01	0.85

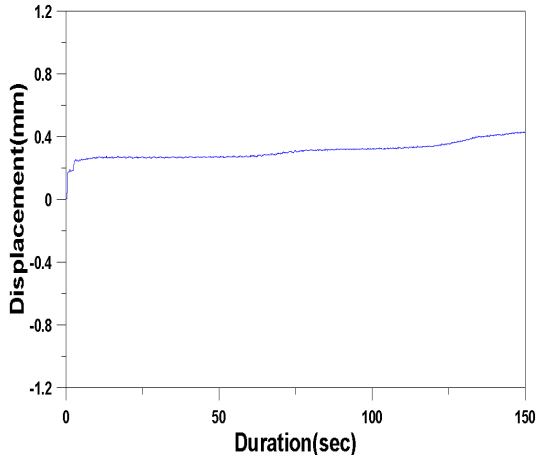
료에 대한 상대변위 산정 결과는 다음 Table 1, Table 2와 같다. 0.3MPa의 상재하중을 재하하였고 시험결과 산성용액이 상대적으로 염기성 보다 큰 변위가 발생하였다.

산성 조건인 경우 최대 상대변위는 동적 전단변위 가진 지점과 가장 가까운 12번 게이지에서 2.92mm로 측정되었고, 바로 위 6번 게이지에서는 1.01mm로 측정되었다. 반면, 하부 재하판에서 가장 먼 1번 게이지에서 0.43mm로 측정되어 전단변위를 가진하는 하부 재하판에 근접할 수록 변위가 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 다음 Fig. 5와 같이 전단시험 초기단계에 변위가 급격히 변화하였고 시간이 지남에 따라 점차 동적 변위의 변동 폭이 감소하는 경향을 나타내었다. 하부 재하판과 가장

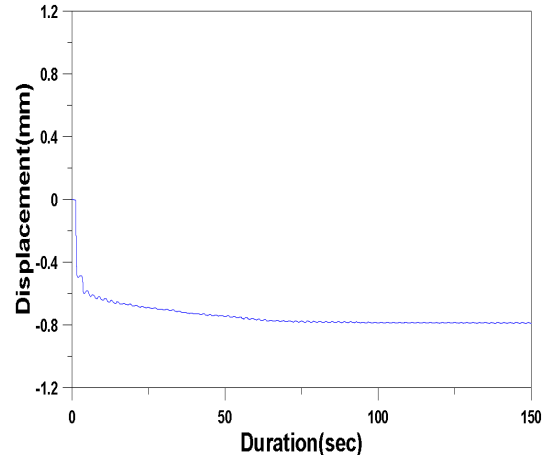
멀리 떨어져 있는 1번 및 7번 게이지에서의 상대변위는 각각 0.43mm, 0.79mm로 측정되었다.

염기성 조건인 경우 최대 상대변위는 6번 게이지에서 1.19mm로 측정되었고, 바로 아래 12번 게이지에서는 0.84mm로 측정되었다. 전반적으로 산성 시료인 경우와

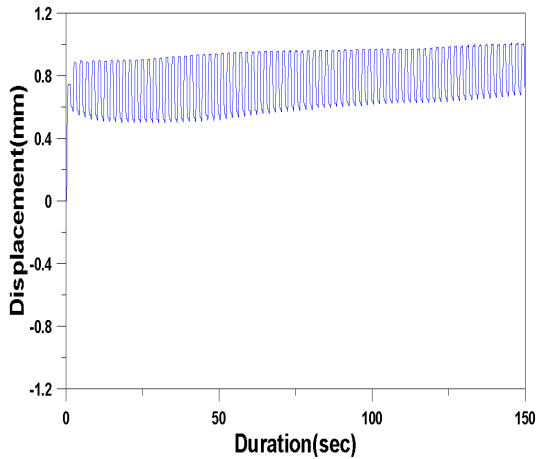
동일하게 하부 재하판에 근접할수록 변위가 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 반복하중에 대한 변위 응답값의 변동폭이 상대적으로 더 크게 발생하였다. 상대적으로 하부 재하판과 가장 멀리 떨어져 있는 1번 및 7번 게이지에서 각각 0.51mm, 0.30mm의 상대변위가



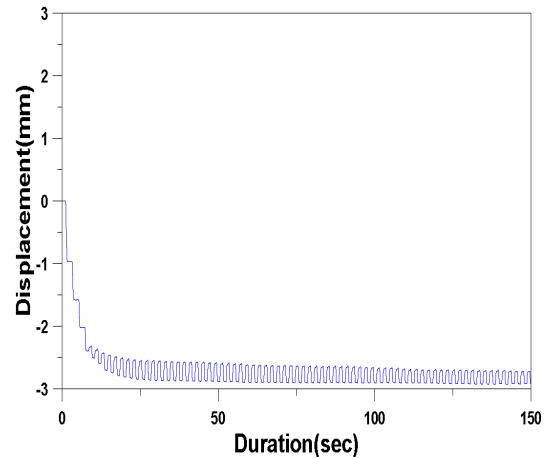
(a) Gauge #1



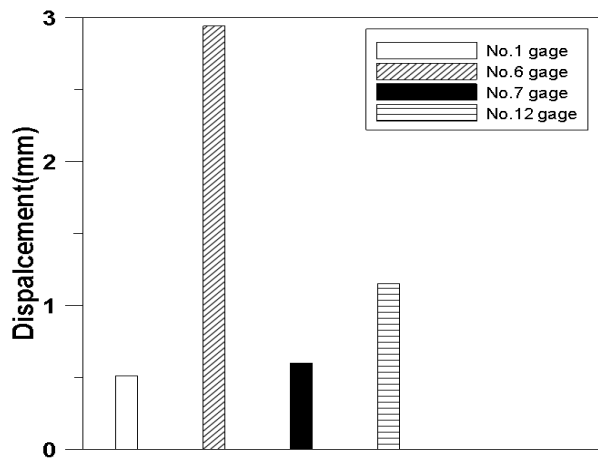
(b) Gauge #7



(c) Gauge #6



(d) Gauge #12

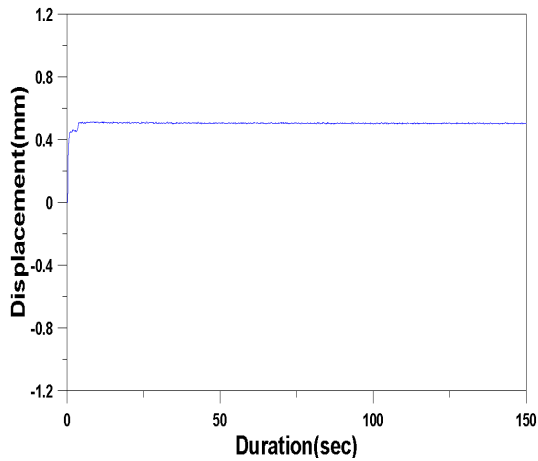


(e) Total gauge

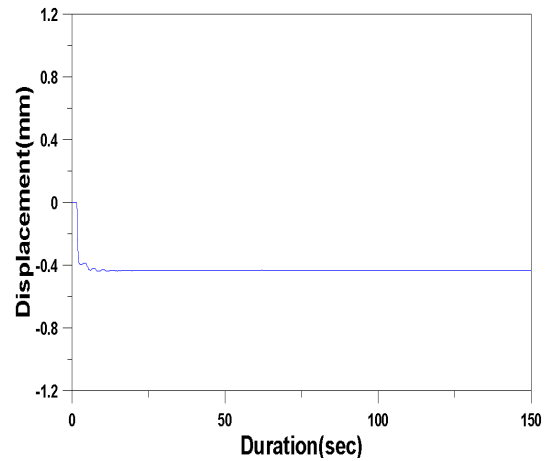
Fig. 5. Relative displacement at gauges (840 days, acid condition)

발생하였다. Fig. 6과 같이 12개의 게이지 계측 결과 하부모듈에 가까운 6, 12번 게이지에서는 초기에 급격한 변화를 나타내었고 시간이 지남에 따라 점차 동적 변위 변동폭이 줄어드는 경향을 나타내었다. 또한 산성, 염기성 조건 공통적으로 재하판과 근접한 지점에서 동적변

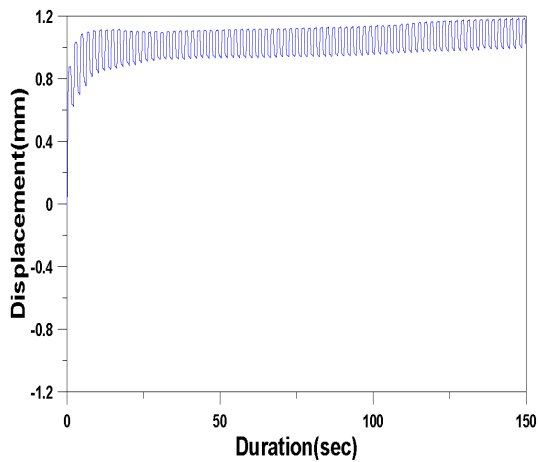
위 변동폭이 더 크게 발생하였다. 결과적으로, 시료의 화학적 특성에 따라 상대변위는 산성 조건시 최하단 게이지에서 2.92mm에서 염기성 조건시 1.19mm로 59.2% 감소하였으며, 동적 전단변위를 가진하는 하부 재하판에 가까운 게이지일수록 큰 상대변위를 나타내었다. 변



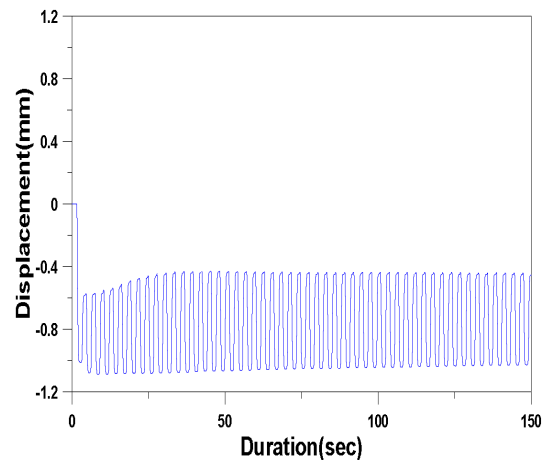
(a) Gauge #1



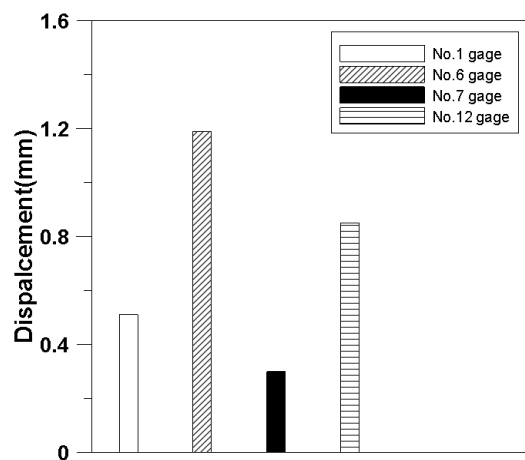
(b) Gauge #7



(c) Gauge #6



(d) Gauge #12



(e) Total gauge

Fig. 6. Relative displacement at gauges (840 days, alkalic condition)

형을 제어 시험에서 동일한 전단변형율을 재하할 경우 상대변위가 클수록 토목섬유-지반 접촉면의 손상 정도가 크기 때문에 산성 조건에서 초기에 보다 큰 손상이 발생함을 알 수 있다.

### 3.2 단기 수침 결과

산성용액 및 염기성 용액에 60일간 단기 수침시킨 시료에 대한 상대변위 산정 결과는 다음 Table 3, Table 4와 같다. 0.3MPa의 상재하중을 재하하였고, 산성 조건에서 염기성 조건 보다 상대적으로 큰 변위가 발생하였다.

산성 조건인 경우 최대 상대변위는 동적 전단변위 가진지점과 가까운 6번 게이지에서 2.94mm로 측정되었고,

Table 3. Relative displacement (60 days, acid condition)

Surcharge	No. of guage	(-)direction relative disp. (mm)	(+)direction relative disp. (mm)	Absolute relative disp. (mm)
0.3 MPa	1	0.00	0.51	0.51
	2	0.00	1.00	1.00
	3	0.00	1.23	1.23
	4	0.00	1.10	1.10
	5	0.00	1.43	1.43
	6	0.00	2.94	2.94
	7	-0.60	0.00	0.60
	8	-0.74	0.00	0.74
	9	-0.81	0.00	0.81
	10	-0.99	0.00	0.99
	11	-1.43	0.00	1.43
	12	-1.15	0.00	1.15

Table 4. Relative displacement (60 days, alkalic condition)

Surcharge	No. of guage	(-)direction relative disp. (mm)	(+)direction relative disp. (mm)	Absolute relative disp. (mm)
0.3 MPa	1	0.00	0.94	0.94
	2	0.00	0.78	0.78
	3	0.00	1.11	1.11
	4	0.00	1.12	1.12
	5	0.00	1.14	1.14
	6	0.00	1.15	1.15
	7	-0.21	0.07	0.28
	8	-0.79	0.00	0.79
	9	-0.87	0.00	0.87
	10	-0.95	0.00	0.95
	11	-1.01	0.00	1.01
	12	-1.08	0.00	1.08

바로 아래 12번 게이지에서는 1.15mm로 측정되었다. 장기 수침 시료의 경우와 동일하게 하부 재하판에 근접할수록 다음 Fig. 7과 같이 전단시험 초기단계에 변위가 급격히 변화하였고 시간이 지남에 따라 동적 변위의 변동폭이 감소하는 경향을 나타내었다. 하부 재하판과 가장 멀리 떨어져 있는 1번 및 7번 게이지에서의 상대변위는 각각 0.51mm, 0.60mm로 미소하게 측정되었다.

염기성 조건인 경우 최대 상대변위는 6번 게이지에서 1.15mm로 측정되었고, 바로 아래 12번 게이지에서는 1.08mm로 측정되었다. 장기수침 시료의 경우와 동일하게 하부 재하판에 근접할수록 초기단계에서 변위가 급격히 변화하는 경향을 나타내었고, 반복하중에 대한 변위 응답값의 변동폭이 상대적으로 더 크게 발생하였다. 상대적으로 하부 재하판과 가장 멀리 떨어져 있는 1번 및 7번 게이지에서 각각 0.94mm, 0.28mm의 상대변위가 발생되었다. Fig. 8과 같이 12개의 게이지 계측 결과 하부모듈에 가까운 6, 12번 게이지에서는 초기에 급격한 변화를 나타내었고 시간이 지남에 따라 점차 동적 변위 변동폭이 줄어드는 경향을 나타내었다. 또한 산성, 염기성 조건 공통적으로 재하판과 근접한 지점에서 동적변위 변동폭이 더 크게 발생하였다. 단, Table 1에서는 Table 2~4와 달리 12번 게이지의 상대변위가 6번 게이지보다 더 크게 발생하였다. 일반적으로 상, 하면 모두 테플론 전단링과 접촉하고 있는 6번 전단링에서 보다 큰 변위가 발생하게 되고 가장 아래쪽에 위치한 12번 전단링의 하부면은 전단링과 같은 테플론 재질이 아닌 알루미늄 바닥판과 접촉하게 되므로 보다 작은 변위가 발생하게 된다. Table 1에서 12번 게이지의 변위가 더 크게 발생한 것은 시험 오차인 것으로 생각되나, 다른 게이지의 변위 경향은 나머지 경우와 일치하므로 전체적인 변위 발생경향에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

결과적으로, 상대변위는 산성 조건시 염기성 조건 대비 하단 6번 게이지에서 60.9% 감소(2.94mm에서 1.15mm) 하였으며, 동적 전단변위를 가진하는 하부 재하판에 가까운 게이지일수록 큰 상대변위를 나타내었다. 따라서 장기 수침조건과 동일하게 산성 조건에서 초기에 보다 큰 손상이 발생함을 알 수 있다.

## 4. 결론

해상 폐기물 매립장을 시공할 경우 지반-토목섬유가

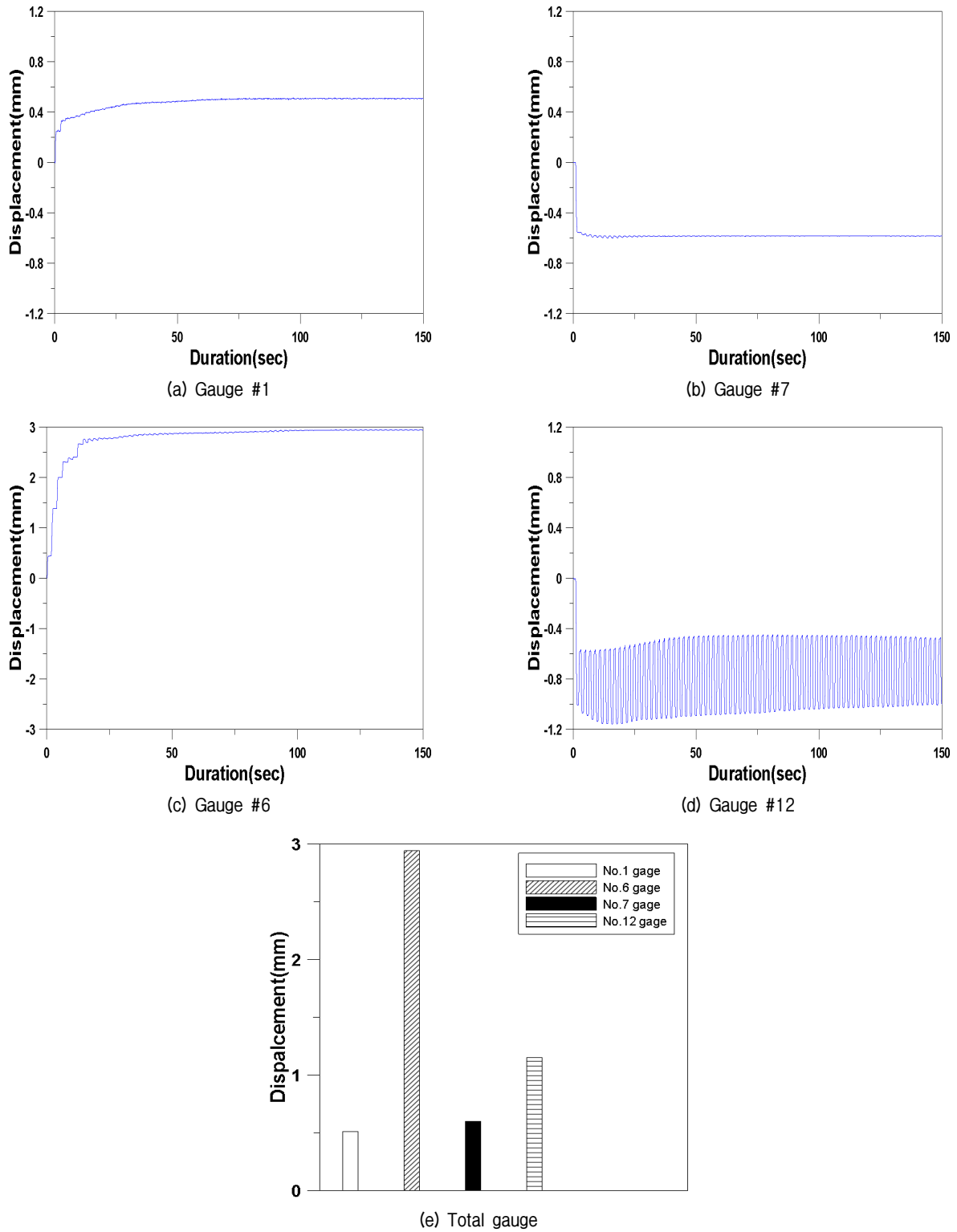
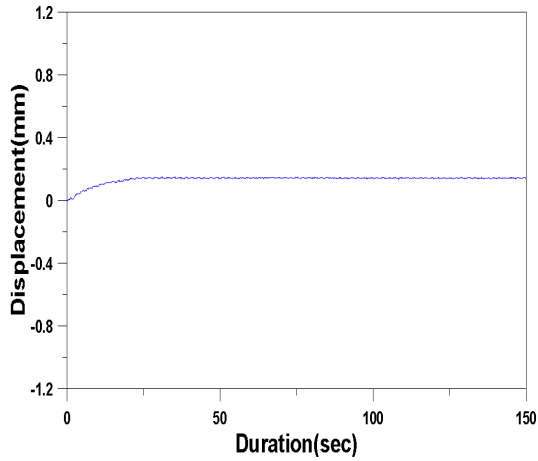


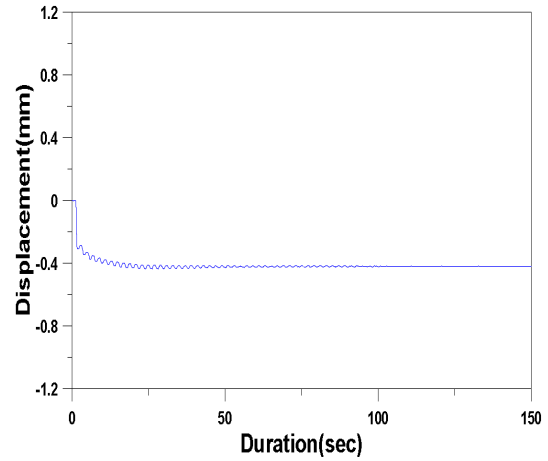
Fig. 7. Relative displacement at gauges (60 days, acid condition)

산성 및 염기성으로 오염된 지반과 접촉면을 형성하게 되는데 이러한 조건에서의 접촉면의 동적 상대변위를 다기능 접촉면 동적 전단시험기를 이용하여 실험적 연구를 수행하였으며 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

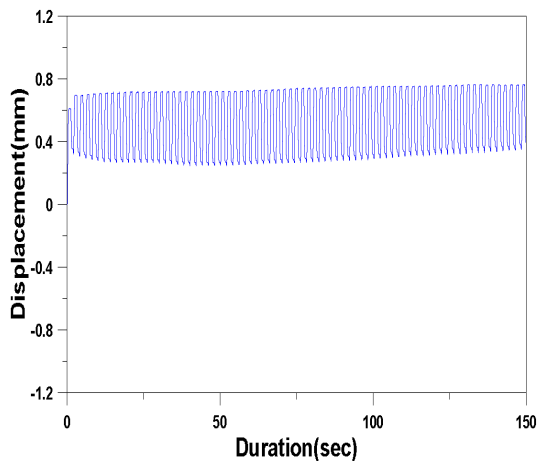
(1) 840일간 장기 수침시킨 시료를 이용한 시험 결과, 화학적 조건에 관계 없이 전단하중을 재하하는 하부 재하판에 근접할수록 10 cycle 미만의 초기단계에서 변위가 급격히 변화하는 경향을 나타내었고 하부 재하판에서 가장 큰 변위가 발생하였다. 산성



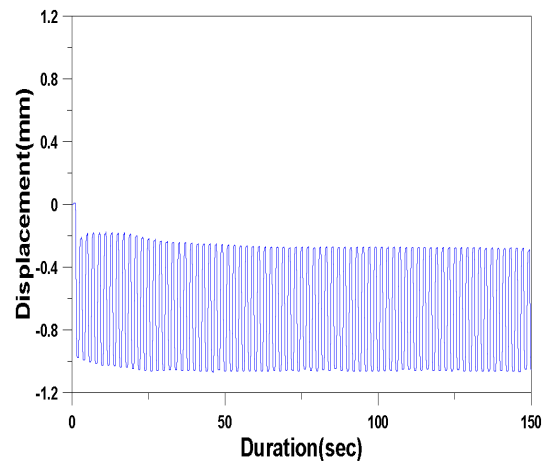
(a) Gauge #1



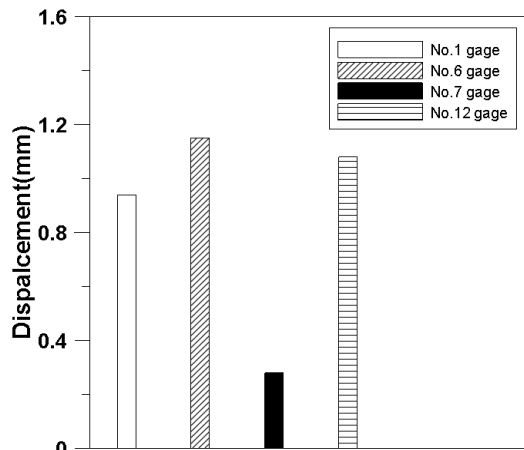
(b) Gauge #7



(c) Gauge #6



(d) Gauge #12



(e) Total gauge

Fig. 8. Relative displacement at gauges (60 days, alkalic condition)

조건에서 가장 큰 상대변위가 발생하였으며 산성 조건시 최하단 2.92mm에서 염기성 조건시 1.19mm로 59.2% 감소하는 경향을 나타내었다.

(2) 60일간 단기 수침시킨 시료를 이용한 시험 결과, 장기 수침시와 동일하게 화학적 조건과 관계없이 전

단하중을 재하하는 하부 재하판에 근접할수록 10 cycle 미만의 초기단계에서 변위가 급격히 변화하는 경향을 나타내었고 하부 재하판에서 가장 큰 변위가 발생하였다. 장기 수침시 결과와 동일하게 산성 조건에서 가장 큰 상대변위가 발생하였으며 산성



조건시 염기성 조건 대비 상대변위가 하단 6번 계이  
지에서 60.9% 감소(2.94mm에서 1.15mm)하는 경향  
을 나타내었다.

- (3) 장, 단기 수침조건에서 모두 산성 조건시 접촉면 초  
기 상대변위가 가장 큰 값을 보였으므로 토목섬유-  
지반 접촉면의 손상 정도가 동적하중 재하 초기에  
손상도가 가장 큰 것으로 판단된다. 그러나 이는 오  
직 상대변위의 절대량 산정 결과에 한하며 전체적  
인 접촉면 전단강도의 저하는 동적 전단응력-변형  
율 거동을 분석하여 판단하여야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원 주요사업(PE99422)  
으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌 (References)

1. Kwon, O.S., Oh, M.H., and Chae, K.S. (2012), "Manual for Design, Construction, Management of Managed Waste Landfill", CIR, pp. 2-3.
2. Park, I.J., Kwak, C.W., Park, J.B., and Cho, J.S. (2012), "A Study on the Shear Behaviors of Geosynthetic-soil Interface in the Waste Landfill Site", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.3, pp.45-54.
3. Park, I.J., Yoo, J.H., and Kim, S.I. (2000), "Disturbed State Modeling for Dynamic Analysis of Soil-Structure Interface", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.16, No.3, pp.5-13.
4. Desai, C.S. (2001), "Mechanics of Materials and Interfaces", CRC Press LLC, Florida, pp.421-472.
5. Kwak, C.W., Park, I.J., and Park, J.B. (2013), "Evaluation of Disturbance Function for Geosynthetic-soil Interface Considering Chemical Reactions based on Cyclic Direct Shear Tests", *Soils and Foundations*, Vol.53, No.5, pp.720-734.
6. Kwak, C.W., Park, I.J., and Park, J.B. (2016), "Development of Modified Interface Apparatus and Prototype Cyclic Simple Shear Test Considering Chemical and Thermal Effects", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol.39, No.1, pp.20-34.
7. Oweis, I.S. and Khera, R.P. (1998), "Geotechnology of Waste Management", Second Edition, PWS Publishing Company, pp.24.
8. Seo, M.W., Park, I.J., and Park, J.B. (2004), "Development of Displacement-softening Model for Interface Shear behavior between Geosynthetics", *Soils and Foundations*, Vol.44, No.6, pp.27-38.
9. Seo, M.W., Park, J.B., and Park, I.J. (2007), "Evaluation of Interface Shear Strength between Geosynthetics under Wet Condition", *Soils and Foundations*, Vol.47, No.5, pp.845-856.

Received : September 12<sup>th</sup>, 2016

Revised : September 27<sup>th</sup>, 2016

Accepted : September 30<sup>th</sup>, 2016