

## 유기오염물 차단을 위한 반응재료의 강도 특성 평가

### Evaluation on Strength Characteristics of Reactive Materials to Prevent the Diffusion of Organic Pollutants

이재영<sup>1</sup>, 오승진<sup>2</sup>, 김수희<sup>3</sup>, 이기철<sup>4</sup>, 박정준<sup>5</sup>, 홍기권<sup>6\*</sup>

Jai-Young Lee<sup>1</sup>, Seung-Jin Oh<sup>2</sup>, Su-Hee Kim<sup>3</sup>, Kicheol Lee<sup>4</sup>, Jeong-Jun Park<sup>5</sup>, Gigwon Hong<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Professor, Dept. of Environmental Engineering, The University of Seoul, 163 Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Researcher, Dept. of Environmental Engineering, The University of Seoul, 163 Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

<sup>3</sup>Non-member, Graduate Student, Dept. of Environmental Engineering, The University of Seoul, 163 Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Research Director, Corporate Affiliated Research Institute, UCI Tech, 313 Inha-ro, Michulhol-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

<sup>5</sup>Member, Principal Researcher, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

<sup>6</sup>Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Halla University, 28 Halladae-gil, Wonju-si, Gangwon-do 26404, Republic of Korea

#### ABSTRACT

This paper described the strength variation characteristics to evaluate the applicability of a reactive material that can absorb organic pollutants as an underground barrier. The Strength was evaluated by unconfined compression test. The test results showed that the strength of the reactive material according to the absorption of each pollutant was in the order of water > TCE > TPH. However, the strength of the reactive material absorbing TPH was greater than that of the case absorbing TCE, when the composition ratio of polynorborene was 12% or less. The strength of the reaction material in contact with water continued to decrease as the polynorborene composition ratio decreased. The strength of the reaction material in contact with TCE and TPH increased as the polynorborene composition ratio decreased from 30% to 21%, and then decreased. In other words, the optimal composition ratio of the reactive material should be applied considering the strength due to contact with pollutants according to the stress conditions occurring in the ground.

#### 요 지

본 연구에서는 유기오염물의 흡수가 가능한 차수재의 반응재료에 대하여 지중 매입 재료로서의 적용성을 평가하기 위해 오염물의 접촉에 의한 강도 특성 변화를 평가하였으며, 강도 평가는 일축압축시험 결과를 이용하였다. 시험 결과, 오염물 종류에 따른 반응재료의 강도는 물 > TCE > TPH의 순서로 확인되었다. 그러나 폴리노보넨의 구성비가 12% 이하에서는 TPH의 강도가 TCE에 비하여 크게 나타났다. 물로 접촉된 반응재료는 폴리노보넨의 구성비가 작을수록 강도가 지속적으로 감소하였지만, TCE 및 TPH와 접촉된 반응재료의 강도는 폴리노보넨의 구성비가 30%에서 21%까지 작아질수록 증가하다가 이후에는 감소하였다. 즉, 지중에서 발생하는 응력 조건에 따라 오염물의 접촉에 의한 강도를 고려하여 반응재료의 최적 구성비가 적용되어야 한다.

**Keywords** : Organic pollutants, TCE, TPH, Reactive material, Unconfined compressive strength

Received 10 Dec. 2023, Revised 16 Dec. 2023, Accepted 17 Dec. 2023

\*Corresponding author

Tel: +82-33-760-1843; Fax: +82-33-760-1261

E-mail address: g.hong@halla.ac.kr (G. Hong)

# 1. 서론

도시 및 산업 개발이 지속적으로 가속화됨에 따라, 국내외의 오염물 유출 사고가 꾸준히 발생되고 있다. 특히, 독성이 매우 강한 유기화합물로 알려진 TCE(Trichloroethylene) 및 TPH(Total Petroleum Hydrocarbons)와 같은 유기오염물의 지중 유출 사고가 지속되고 있으며, 이 오염물의 확산 예측은 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 또한 유기오염물로 한번 오염된 지반 및 지하수의 완전한 정화 및 복원이 쉽지 않기 때문에, 오염물의 확산 차단과 정화에 대한 중요성은 끊임없이 이슈화되고 있다(Han et al., 2015; Park and Kim, 2018; Park, 2022). 이에 지중 생태계에 심각한 문제를 야기하는 유기오염물의 제거 및 정화와 관련한 연구가 지속될 필요가 있다(Ko, 2002; Jung, 2003).

국내외에서 수행된 다양한 관련 연구를 살펴보면, Cho et al.(2020)은 지중의 TPH 제거를 위해 마이크로파를 적용하는 경우의 제거 메커니즘에 관한 연구를 수행하였다. Karer et al.(2015)은 바이오차(Biochar)를 이용하여 오염된 지반에서 중금속 분리 가능성을 평가하였으며, Das and Kumar(2016)는 독성을 갖는 석유로 오염된 지반에서 바이오계면활성제의 정화 성능을 평가한 바 있다. Pinedo et al.(2013)은 TPH가 지반의 지속성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며, Li et al.(2018)은 석유 유출로 오염된 지반을 정화함과 동시에 오일을 회수하기 위한 기술을 제안하였다. Méndez et al.(2012)은 동전기 방법을 이용하여 오염지반에서의 탄화수소 제거를 위한 전극 재료의 특성을 평가하였으며, Shackelford et al.(2016)은 GCLs(geo-synthetic clay liners)이 오염물질의 확산 거동에 미치는 영향을 분석하였다. Kang et al.(2020)은 원유 유출 사고로 인해 오염된 지반의 샘플을 이용하여 열분해 처리 기술의 효율성을 검증하였으며, Falciglia et al.(2013)은 디젤로

오염된 지반의 정화를 위해 기존의 정화 기법의 한계성을 해결하고자 마이크로파의 효율성을 실험적으로 평가하였다. Collazos et al.(2003)과 Park(2007)은 각각 토양증기추출법과 연직배수 시스템을 이용한 휘발성 오염물질의 제거 효율 및 연직배수재를 이용한 오염지반의 정화 기법에 관한 연구를 수행한 바 있다.

상기와 같이 오염이 발생된 지중에서의 오염물 확산 예측, 제어, 차단과 같은 사후 대응 기술과 관련한 많은 연구가 수행되고 있지만, 사전 대응 기술에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 편이다. 이에 최근에는 유기오염물의 확산을 사전에 차단하기 위한 기술로서 유기오염물 유출 발생이 높은 지역의 지중에 지하수 조건에 관계없이 오염물만 흡수차단할 수 있는 차수재가 개발된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 유기오염물만 흡수할 수 있는 차수재의 반응재료가 지반 내에 설치되는 점을 고려하여, 지중 매입 재료로서 적용성을 고찰하기 위해 유기오염물의 흡수에 따른 강도 특성 변화를 평가하였다.

## 2. 유기오염물 확산 차단을 위한 차수재

전술한 바와 같이, 최근 지중에서 유출된 유기오염물의 확산을 차단하기 위하여, 유기오염물을 선택적으로 흡수하여 오염물의 확산을 방지할 수 있는 차수재(Geosynthetic Oil Absorbent Liners, GOALS)가 개발된 바 있다(Hong et al., 2023a). Fig. 1에서 보는 바와 같이, 개발된 차수재는 유기오염물과 반응하는 반응재료의 이탈 방지와 함께, 오염물 흡수 및 지하수 유동의 용이성을 확보하기 위하여 직포와 부직포가 반응재료를 감싸고 있는 형태를 갖는다. 그리고 유기오염물과의 반응을 유도하는 반응재료는 표준사, 벤토나이트, 폴리올레핀 및 폴리노보넨으로 구성된다. 이와 같은 반응재료의 유기오염물 차단 개념은 Fig. 2에

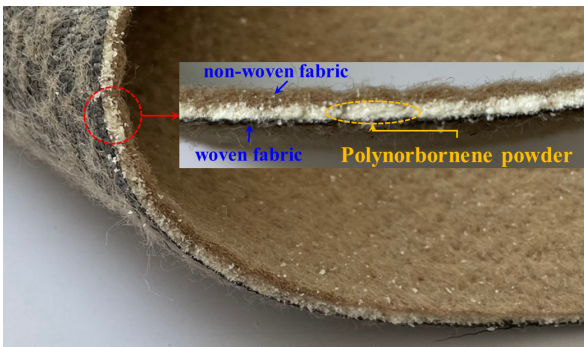


Fig. 1. Cross-section of the reactive materials with geosynthetics (Park, 2021)

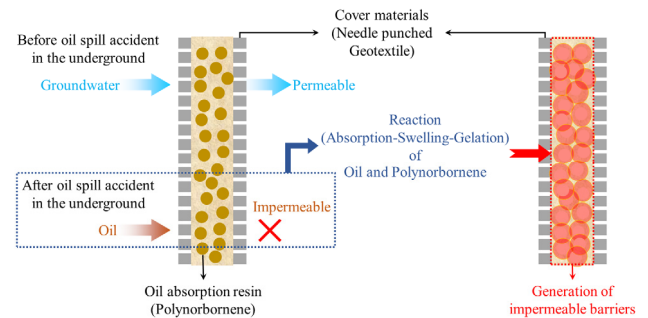


Fig. 2. Conceptual diagram on organic pollutant absorption of reactive materials (Park, 2021 [modified from 2020, goldenpow])

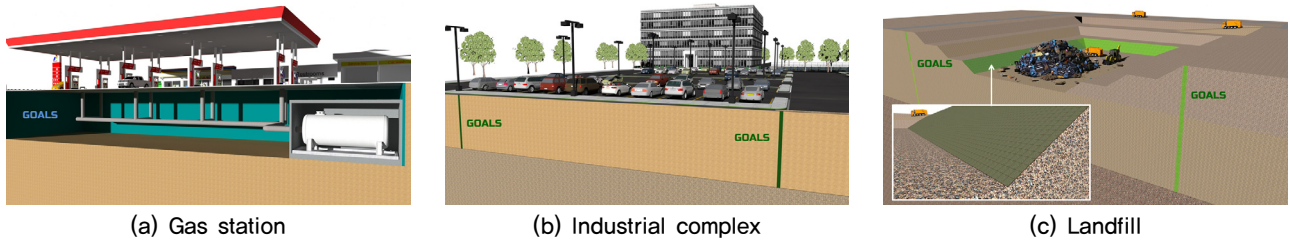


Fig. 3. Application of reactive materials with geosynthetics (Hong et al., 2023b)

Table 1. Composition ratio of reaction material applied in the tests

Classification	Pollutants in contact	Composition ratio of reaction material			
		Sand (%)	Bentonite (%)	Polynorbornene (%)	Polyolefine (%)
Case 1	Water TCE TPH	55	15	30	0
Case 2				27	3
Case 3				24	6
Case 4				21	9
Case 5				18	12
Case 6				15	15
Case 7				12	18
Case 8				9	21
Case 9				6	24
Case 10				3	27
Case 11				0	30

나타낸 바와 같다. 즉, 반응재료는 오염물 반응 전의 지하수 유동에 있어서 투수성은 유지하되, 지중의 유기오염물 유출에 따라 반응재료와 접하는 경우에만 흡수-팽창-겔화의 반응으로 오염물 확산을 차단하게 되는데, 반응을 유도하는 주 반응제는 폴리노보넨이다. 반응재료의 물리적 특성과 오염물에 대한 반응 메커니즘은 기존 연구(Park, 2021; Hong et al., 2023a, 2023b)를 참조할 수 있다.

이와 같은 반응재료 기반의 차수재는 유기오염물 유출 사고 발생이 높은 지중 구조물, 폐기물 매립지 및 산업단지 등에서 오염물 확산에 대한 사전 차단 기술로의 적용이 가능하다(Fig. 3). 이에 본 연구에서는 지중에서 오염물과 반응한 차수재의 반응재료가 지반 침하 등과 같은 지반공학 문제 발생 원인의 가능성을 확인하고자 일축압축시험을 통한 강도 특성을 평가하였다.

### 3. 반응재료의 강도 평가

#### 3.1 시험 방법 및 내용

반응재료의 강도 평가는 일축압축시험으로 수행되었다. 다만, 반응재료에 대한 별도의 일축압축시험 규정이 없기 때문에, 지반공학적 접근방법으로 흙의 일축압축시험방법(KS F 2314)을 준용하였다.

일축압축시험에 있어서 주 반응제(폴리노보넨)의 구성비에 따른 반응재료의 강도 특성을 평가하기 위하여, 반응재료의 구성성분 비율(중량비)을 고려하였으며, Table 1은 일축압축시험에 적용된 반응재료의 구성비를 나타낸 것이다. 본 연구는 유기오염물을 흡수한 반응재료의 강도 변화 특성 평가에 목적이 있기 때문에, 반응재료를 감싸고 있는 직포 및 부직포의 인장강도 영향을 배제하기 위하여 반응재료에 대한 일축압축시험만 실시하였다. 또한 유기오염물의 오염원이 매우 다양한 점을 고려하여, 대표적인 유기오염물인 TCE와 TPH에 반응된 반응재료 공시체의 강도를 평가하였다. 그리고 오염물 미접촉 상태(지하수 반응 조건)에서의 강도 변화 특성에 대한 상대적 비교를 위하여, 반응재료의 동일한 구성비 조건에서 물에 반응한 공시체의 일축압축시험을 수행하였다. 일축압축시험은 각 구성성분에 대한 유기오염물 반응 조건에 따라 3회씩 실시하였다.

#### 3.2 시험 결과

Fig. 4는 대표적인 구성비 조건에 대하여 오염물 종류(water, TCE, TPH)에 따라 반응된 공시체의 파괴형상을 나타낸 것이다. 물 또는 유기오염물로 반응된 공시체의 파괴는 선명한 파괴각을 보이지는 않았지만, 흙의 전단파괴형상과 유사한 것을 알 수 있었다.

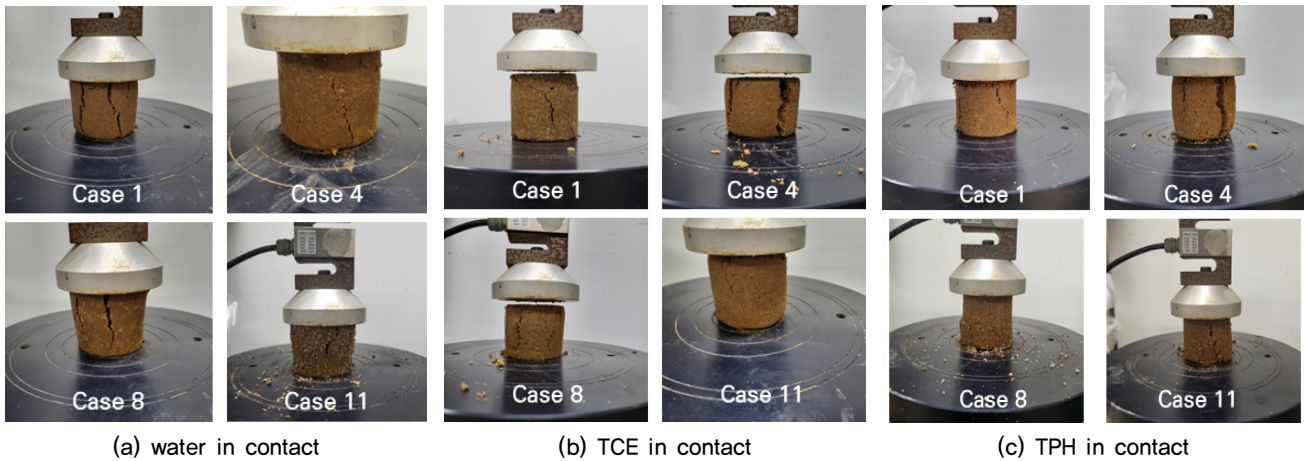


Fig. 4. Shear failure of specimens by unconfined compression test

각 구성비 조건에 대하여 3회의 일축압축시험 결과와 함께 평균 일축압축강도를 Table 2 및 Fig. 5에 나타내었다. 동일한 구성비 조건에서 물과 접촉한 반응재료의 일축압축강도가 TCE 및 TPH로 반응된 재료의 강도에 비하여 약 1.5배 ~ 2개 가량 높은 것으로 나타났으며, 강도의 크기는 물 > TCE > TPH 순으로 확인되었다.

3회의 시험에 의한 일축압축강도는 다소 오차가 발생한 것을 알 수 있었다. 이는 물 또는 오염물이 반응재료와 반응하는 과정에서 공시체의 균질성 및 균일한 반응 정도의 차이에 의한 것으로 추정되었다. 그리고 폴리노보넨 구성비의 감소에 따라 각 시험 결과의 오차율은 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 평균 강도를 이용한 평가에 있어서 오차가 강도 변화 분석에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다. 평균 강도는 폴리노보넨의 구성비가 증가함에 따라 물, TCE, TPH와 접촉된 반응재료는 각각 85.0kPa ~ 106.5kPa, 32.1kPa ~ 51.3kPa, 37.2kPa ~ 41.0kPa의 범위를 보였다.

### 3.3 폴리노보넨의 구성비에 따른 강도 변화 특성

Fig. 6은 물 또는 유기오염물과 반응한 반응재료의 일축압축강도(평균 강도)를 폴리노보넨 구성비에 따라 도식화한 것이다.

먼저, 물로 접촉된 반응재료는 주 반응제인 폴리노보넨의 구성비가 작을수록 강도가 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 TCE로 접촉된 반응재료는 폴리노보넨의 구성비가 30%에서 21%까지 감소하였을 때, 강도가 크게 증가하였지만, 폴리노보넨의 구성비가 더욱 감소하게 되면 강도도 크게 감소하면서 수렴하는 경향을 보였다.

TPH로 접촉된 반응재료는 폴리노보넨의 구성비가 30%에서 21%까지 작아질수록 TCE로 반응된 재료와 동일한 강도가 증가하였지만 강도 증가율은 TCE에 비해 낮은 것으로 분석되었다. 그리고 폴리노보넨의 감소에 따라 강도도 감소하였으나, 그 감소율은 TCE와 비교하여 낮은 것으로 나타났다.

이를 바탕으로 물과 접촉된 반응재료는 폴리노보넨 구성비에 따른 강도 변화 예측이 용이한 반면에, TCE로 반응된 재료의 강도 변화는 다소 불규칙한 특성을 보여 예측이 쉽지 않은 것으로 판단되었다. 그리고 TPH로 반응된 재료의 강도 변화는 TCE에 비하여 상대적으로 경향을 예측하는데 수월한 것으로 판단되었다.

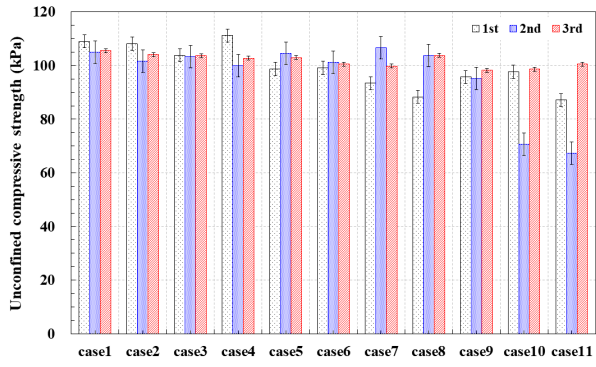
물과 접촉한 반응재료의 폴리노보넨 구성비에 따른 강도를 기준으로 TCE 및 TPH의 강도 감소율을 분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. TCE로 반응된 경우에는 폴리노보넨의 구성비에 따라 약 52% ~ 62% 범위의 감소율을 나타내었지만, 감소율 평가를 위한 경향 분석이 어려운 것으로 평가되었다. 이는 본 연구에서 적용된 반응재료가 TCE의 흡수에 따른 오염물 차단 특성을 보유할 수는 있으나, 지반공학적 문제를 예측하는데에는 불규칙적인 특성에 기인한 원인 분석이 요구되는 것을 의미하는 결과라 판단되었다.

TPH로 반응된 재료는 폴리노보넨 감소에 따라 약 62% ~ 56% 범위의 감소율을 보였으며, 감소율 경향은 'U'자형으로 평가되었다. 즉, 폴리노보넨 구성비에 따른 강도 감소율의 경향은 TCE에 의한 경우보다 안정적인 것으로 평가되었다. 다만, 폴리노보넨이 15% 이상인 경우의 감소율은 TCE와 비교하여 크게 나타났기 때문에, 반응재료 적용을 위해서는 이를 고려할 필요가 있다.

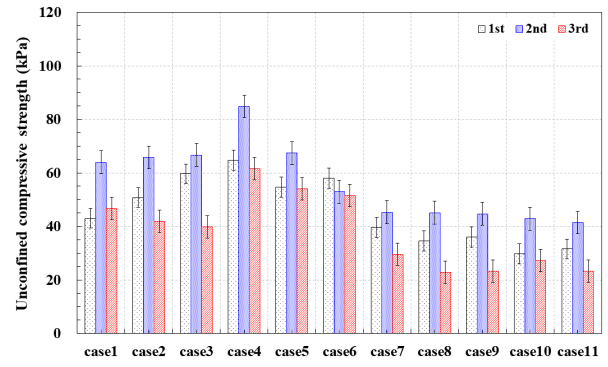


Table 2. Unconfined compression test results

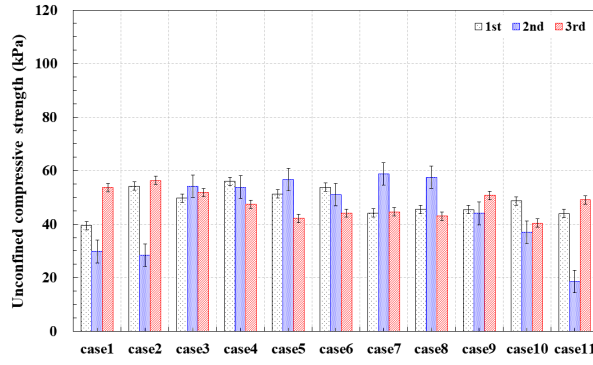
Classification		Unconfined compressive strength (kPa)		
		water in contact	TCE in contact	TPH in contact
Case 1	1st	109,0	43,1	39,4
	2nd	104,9	63,9	29,8
	3rd	105,6	46,8	53,7
	mean value	106,5	51,3	41,0
Case 2	1st	108,2	50,8	54,2
	2nd	101,6	65,8	28,4
	3rd	104,1	42,0	56,3
	mean value	104,6	52,9	46,3
Case 3	1st	103,9	59,6	49,7
	2nd	103,4	66,7	54,1
	3rd	103,7	39,8	51,9
	mean value	103,6	55,4	51,9
Case 4	1st	111,2	64,7	56,0
	2nd	99,9	84,8	53,8
	3rd	102,8	61,6	47,5
	mean value	104,6	70,4	52,4
Case 5	1st	98,8	54,7	51,3
	2nd	104,6	67,4	56,7
	3rd	103,0	54,1	42,2
	mean value	102,1	58,7	50,0
Case 6	1st	99,1	58,1	53,8
	2nd	101,3	53,0	51,0
	3rd	100,5	51,5	44,1
	mean value	100,3	54,2	49,7
Case 7	1st	93,5	39,6	44,2
	2nd	106,6	45,3	58,8
	3rd	99,8	29,6	44,6
	mean value	100,0	38,2	49,2
Case 8	1st	88,4	34,5	45,5
	2nd	103,8	45,1	57,6
	3rd	103,9	22,8	43,1
	mean value	98,7	34,2	48,7
Case 9	1st	95,7	36,0	45,4
	2nd	95,2	44,7	44,0
	3rd	98,3	23,3	50,8
	mean value	96,4	34,7	46,7
Case 10	1st	97,7	29,8	48,6
	2nd	70,6	42,9	37,0
	3rd	98,7	27,2	40,4
	mean value	89,0	33,3	42,0
Case 11	1st	87,2	31,6	43,9
	2nd	67,3	41,5	18,5
	3rd	100,5	23,3	49,1
	mean value	85,0	32,1	37,2



(a) Water in contact

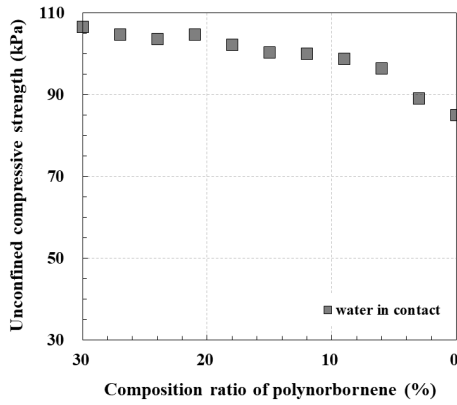


(b) TCE in contact

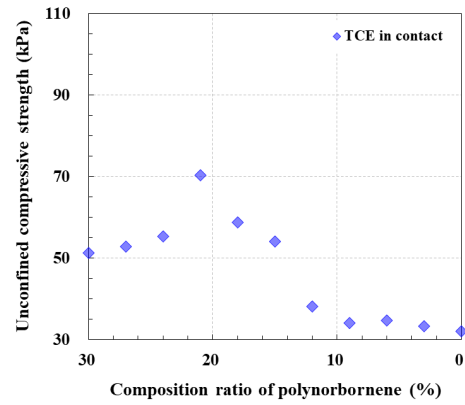


(c) TPH in contact

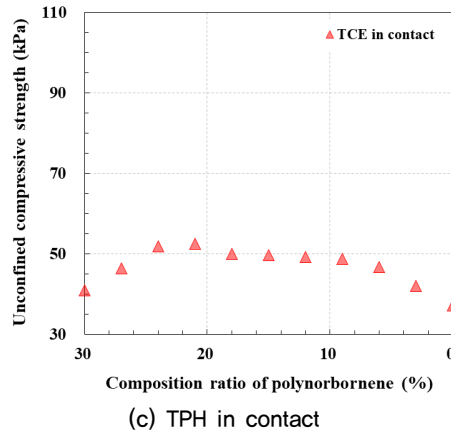
Fig. 5. TGA curves of graphite and GO



(a) Water in contact



(b) TCE in contact



(c) TPH in contact

Fig. 6. Unconfined compressive strength

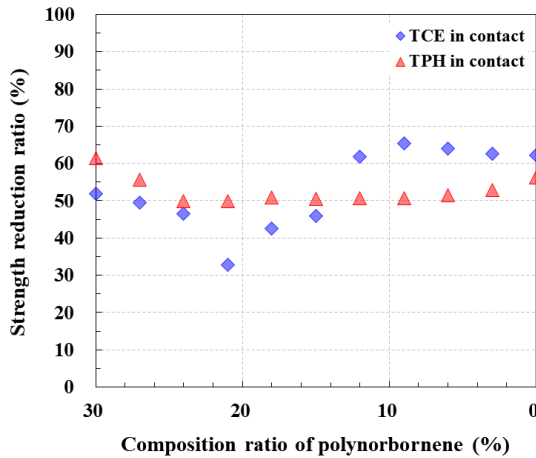


Fig. 7. Relationship of polynorborene composition ratio - strength reduction ratio

#### 4. 결론

본 연구에서는 유기오염물만 흡수가 가능한 반응재료에 대하여 물 또는 오염물 종류에 따른 강도 특성 변화를 평가하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 오염물 종류(water, TCE, TPH)에 따라 실시된 3회의 일축압축시험 결과에 대한 평균값을 통해 모든 구성 성분 비율 조건에 관계없이, 물로 접촉된 반응재료의 강도가 가장 크게 나타났으며, TCE, TPH 순으로 강도가 높은 것을 확인하였다.
- (2) 물로 접촉된 반응재료는 폴리노보넨의 구성비가 낮을수록 강도가 지속적으로 감소하였고, TCE 및 TPH와 접촉한 반응재료는 폴리노보넨의 구성비가 30%에서 21%까지 작아질수록 강도가 증가하는 경향을 보였다.
- (3) 물과 접촉한 반응재료를 기준으로 반응재료의 강도 감소율을 평가한 결과, TCE와 반응한 경우에는 강도 변화의 불규칙성에 기인해 경향 파악이 어려웠으며, TPH와 반응한 경우에는 강도를 예측하는데 상대적으로 안정적인 것을 알 수 있었다.
- (4) 강도 변화에 대한 분석결과를 바탕으로, 반응재료의 강도만으로는 지중 매입 재료로서의 적용에 한계가 있을 수 있지만, 개발된 차수재의 구성재료(직포, 부직포) 및 지중 구속 조건 등을 고려한 반응재료의 최적 구성비에 따라 충분히 적용이 가능할 것으로 판단된다. 이에 반응재료의 폴리노보넨 구성비는 21% 이상인 조건에 한해 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This subject is supported by Korea Ministry of Environment as “project No. 2021002470006”.

## References

1. Cho, K., Myung, E., Kim, H., Purev, O., Park, C. and Choi, N. (2020), “Removal of Total Petroleum Hydrocarbons from Contaminated Soil through Microwave Irradiation”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol.17, No.16, p.5952.
2. Collazos, O. M., Bowders, J. J. and Bouazza, A. (2003), “Laboratory evaluation of prefabricated vertical drains for use in soil vapor extraction systems”, *Journal of Ground Improvement*, Vol.7, No.3, pp.103-110.
3. Das, A. J. and Kumar, R. (2016), “Bioremediation of petroleum contaminated soil to combat toxicity on *Withania somnifera* through seed priming with biosurfactant producing plant growth promoting rhizobacteria”, *Journal of Environmental Management*, Vol.174, pp.79-86.
4. Falciglia, P.P., Urso, G. and Vagliasindi, F.G.A. (2013), “Microwave heating remediation of soils contaminated with diesel fuel”, *Journal of Soils and Sediments*, Vol.13, pp.1396-1407.
5. Hong, G., Yeo, J., Jeong, D., Park, J. J. and Lee, K. (2023a), “Variation of spectral information according to mixing conditions of reactive materials for oil contaminant absorption”, *KGS Spring National Conference 2023*, Yeosu, Korea, pp. 325-326.
6. Hong, G., Yeo, J., Park, J. J., Lee, K., You, S. Y. and Choi, C. L. (2023b), “Spectral Information Characteristics of Reactive Materials for Absorption of Organic Contaminant in the Ground”, *2023 Spring Geosynthetics Conference*, Seoul, Korea, pp.109-110.
7. Han, J. G., Kim, D. C. and Hong, K. (2015), “The Effects of pH on Microfluidics Flow Characteristics of Heavy Metals”, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.14, No.1, pp.23-32.
8. Jung, H. I. (2003), *Remediation of Contaminated Groundwater by Prefabricated Vertical Drain*, 2003 *Geoenvironment*, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea.
9. Kang, C. U., Kim, D. H., Khan, M. A., Kumar, R., Ji, S. E., Choi, K. W., Paeng, K. J., Park, S. and Jeon, B. H. (2020), “Pyrolytic remediation of crude oil-contaminated soil”, *Science of The Total Environment*, Vol.713, 136498.
10. Karer, J., Wawra, A., Zehetner, F., Dunst, G., Wagner, M., Pavel, P. B., Puschenreiter, M., Friesl-Hanl, W. and Soja, G. (2015), “Effects of Biochars and Compost Mixtures and Inorganic Additives on Immobilisation of Heavy Metals in Contaminated Soils”, *Water Air Soil Pollut.*, Vol.226, 342.

11. Ko, S .O. (2002), Soil and Groundwater Remediation Technologies Trends and Field Application, 2002 Geoenvironment, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea.
12. Li, D. C., Xu, W. F., Mu, Y., Yu, H. Q. and Jiang, H., Crittenden, J. (2018), “Remediation of Petroleum-Contaminated Soil and Simultaneous Recovery of Oil by Fast Pyrolysis”, *Environmental Science & Technology*, Vol.52, pp.5330-5338.
13. Méndez, E., Perez, M., Romero, O., Beltran, E. D., Castro, S., Corona, J. L., Corona, A., Cuevas, M. C. and Bustos, E. (2012), “Effects of electrode material on the efficiency of hydrocarbon removal by an electrokinetic remediation process” *Electrochimica Acta*, Vol.86, pp.148-156.
14. Park, J. (2021), “Evaluation of Changes in the Permeability Characteristics of a Geotextile-Polynorborene Liner for the Prevention of Pollutant Diffusion in Oil-Contaminated Soils”, *Sustainability*, Vol.13, No.9, 4797.
15. Park, J. (2022), “Permeability Characteristics of Geosynthetics Vertical Barrier Connections for the Prevention of Contaminants Diffusion”, *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol.18, No.1, pp.1-9.
16. Park, J. J. (2007), *Applicability of Prefabricated Vertical Drain System for Remediation of Contaminated Soils*. Ph.D. Thesis, University of Incheon, Korea.
17. Park, J. J. and Kim, S. H. (2018), “Field investigation for identification of contamination sources in petroleumcontaminated site”, *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol.14, No.2, pp.141-153.
18. Pinedo, J., Ibañez, R., Lijzen, J. and Irabien, A. (2013), “Assessment of soil pollution based on total petroleum hydrocarbons and individual oil substances”, *Journal of Environmental Management*, Vol.130, pp.72-79.
19. Shackelford, C. D., Meier, A. and Sample-Lord, K. (2016), “Limiting membrane and diffusion behavior of a geosynthetic clay liner”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.44, No.5, pp. 707-718.