한국산학기술학회논문지
Vol. 11, No. 10 pp. 3998-4004, 2010

지하저장고 누출현상 자가치료 시스템

이성진[1], 김영욱[1*], 박지호[1]
[1]명지대학교 토목환경공학과

Self healing system for leaking from UST(underground storage tank)

Sung-Jin Lee[1], Young-Uk Kim[1*] and Ji-Ho Park[1]
[1]**Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji University**

요 약 지하저장고 및 파이프 누출현상을 제어하는 센서 및 단거리 무선통신 기술을 이용한 자가치료시스템 기술 중 자가치료제에 대한 연구이다. 이 논문은 시중에서 판매되고 있는 4가지 실리콘을 선정하여 치료제로서의 적용성을 평가하고, 매질속에서의 흐름을 전산 유체해석 프로그램을 이용하여 해석하여 자가치료제로서의 가능여부를 검토하였다.

Abstract This study investigated the agents for self-healing system that could be developed to prevent UST(underground storage tank) from leaking. The system involves short range wireless communication to locate a leakage. Four commercially available silicons are arbitrarily chosen to evaluate suitability as a self-healing agent through a series of laboratory experiments. finally the experiments are simulated using computational Fluid Dynamic Program.

Key Words : Self-healing system, Silicon, UST, Leakage, Agent

1. 서론

최근 지반의 오염은 지반의 공학적 특성 변화뿐만 아니라 흙 입자 사이에 갇혀 있는 오염물이 지하수로 흘러가게 되어 이에 따른 식수의 오염으로 국민 건강에 직접적으로 영향을 미치게 되며 큰 사회 문제를 야기할 수 있다.[1] 지반 및 지하수를 오염시키는 주된 원인으로 지하에 매설되어 있는 지하유류저장고 및 연결파이프로부터의 누출 사고가 아주 큰 비중을 차지하고 있다.[2] 그러므로 지하유류저장고 및 연결파이프와 같은 지하구조물은 공공성, 수명, 사용조건 등의 관점에서 보면 아주 오랫동안 그 기능이 발휘될 수 있도록 항상 유지/관리하는 것이 매우 중요 하다. 유지관리 기술은 지속적으로 이루어지고 있고, 이에 대한 중요성도 날로 커지고 있다. [3] 특히 성능저하 진단기술중에서 가장 중요한 역할을 담당하고 있는 비파괴시험법에 관하여서는 국내외에서 연구 및 발표가 행하여지고 있다. 하지만 기계부품 및 소형 구조물의 결함 또는 성능진단에만 국한되고 있고 현존하는 구조물의 대부분을 차지하는 인프라 구조물에 대한 연구가 활발하지 못한 실정이다.

이 논문은 지하저장고 및 파이프 누출현상을 제어하는 기술 중에 자가치료제에 대한 연구로 시중에서 판매되고 있는 일반적인 4가지 실리콘을 선정하여 치료제로서의 적용성을 평가하고, 매질속에서의 흐름을 전산 유체해석 프로그램을 이용하여 해석하여 자가치료제로서의 가능여부를 검토하였다.

2. 실내실험

치료제로서 선정한 4가지의 실리콘은 시중에서 쉽게 구할 수 있고, 실링재로서 사용하고 있는 기성품으로 결

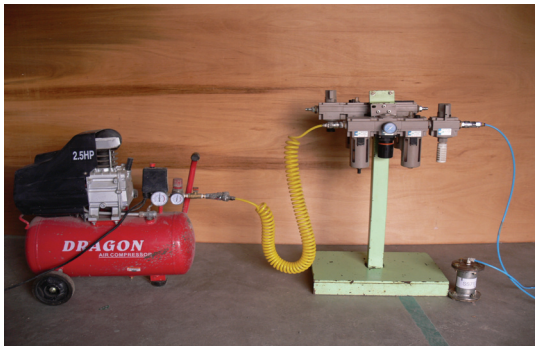
이 논문은 한국연구재단 핵심연구지원사업(협동)과 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업에 의해 수행된 연구입니다.
*교신저자 : 김영욱(yukim@mju.ac.kr)
접수일 10년 08월 05일 수정일 10년 10월 04일 게재확정일 10년 10월 15일

정했다. 치료제로서 적용성을 평가하기 위해, 투수 저항성능실험, 수중 유실 저항성능 실험, 내화학성 실험 그리고 스스로 크랙부위에 갈 수 있는가를 알아보기 위한 흐름실험 및 치료실험을 수행한 후 전산유체프로그램으로 해석한다.

[표 1] 치료제 선정

CASE	경화형태	비중	작업가능 온도
LC-303	초산형	1.01	-20℃ ~ 50 ℃
LC-707	옥심 경화형	1.01	-37℃ ~ 60 ℃
SS710	옥심 경화형	1.03	-40℃ ~ 150 ℃
실리콘 실란트	옥심 경화형	1.03	-40℃ ~ 150 ℃

첫 번째로 투수저항성능 실험은 지하구조물의 누수, 보수에 사용되는 치료제의 가장 기본적인 성능으로서 재료자체의 불투수성을 보유하고 있어야 한다. 또한 치료제가 적용되는 부위가 항상 습윤상태 또는 수중상태를 유지하고 있으므로 동일하게 수중에서 같은 조건을 적용하며, 최소 1시간 동안 0.3N/mm^{2}의 수압조건에서 투수되지 않는 것을 확인하여 치료제의 적정성 여부를 판단한다. 방법은 특수재작한 상부와 하부에 ϕ=10mm의 구멍이 있는 몰드의 상부에는 압력코크를 장비하고, 하부에는 구멍 위에 ϕ=50mm, t=5mm의 원형틀을 준비하여 치료제를 충분히 충진한 뒤 수중에서 7일간 경화시킨다. 충분히 경화된 몰드를 조립하고 0.3N/mm^2 수압까지 0.1N/mm^2 단위로 올린 후에 0.3N/mm^2 에서 1시간 동안 수압을 주어 투수되는 지의 유무를 확인한다.



[그림 1] 투수저항성능 실험

두 번째로 수중 유실 저항성능 실험은 치료제가 액상 또는 점성을 유지한 상태로 주입되므로 주입 이후 경화가 되기 전 혹은 경화 이후에도 수중에서 물이나 다른 매질에 의해 용해되거나, 유속에 의해 유실된다면 방수성능을 가질 수 있는 두께를 확보할 수 없으므로 실링재가 유속에 의해 유실되는 최소 유실량을 규정하여 치료제로서의 역할을 수행할 수 있는지에 대한 실험을 수행한다. 방법은 KS F 4935 [4]를 따르며, 시험결과 후 치료제의 중량변화율을 측정하여 기중치 이내로 오는 것으로 치료제의 적정성 여부를 판단한다.

[그림 2] 수중 유실 저항성능 실험

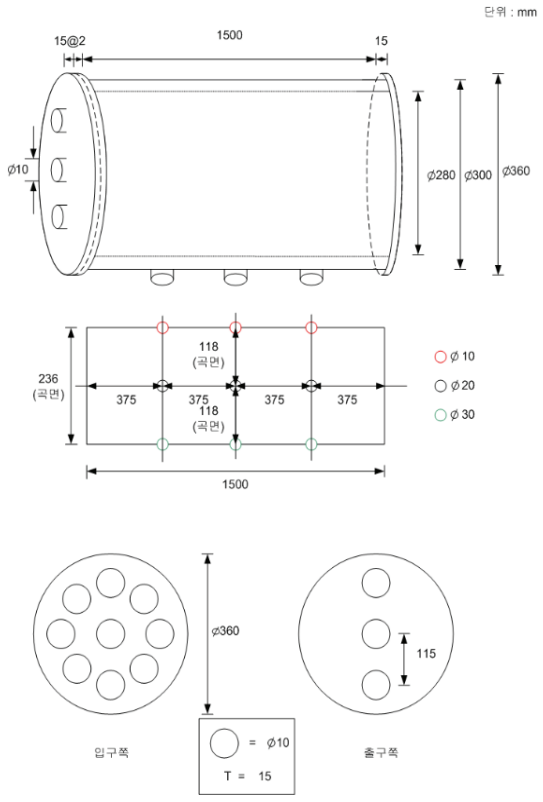
세 번째로 내화학 성능 실험은 지하유류저장고나 연결파이프 내에서 이동하는 치료제재의 성능을 평가하는 실험의 한 방법으로 항상 토양과 접하고 있는 지하구조물에 주변의 토양과 지하수에 의한 산, 알칼리, 염수 등의 화학적 물질과 반응하여 치료제로서의 역할을 수행할 수 있는지에 대한 시험을 수행한다.[5] 여기서 산(황산, 염산), 알칼리(수산화나트륨), 염수(염화나트륨)에서 치료제가 유실되는 중량변화율을 측정하여 기준치 이내로 오는 것으로 치료제의 적정성 여부를 판단한다.

[그림 3] 내화학성능 실험

마지막으로 치료제의 흐름 및 치료실험, 그리고흐름을 전산유체해석프로그램을 이용하여 해석하였다. 흐름시험은 크랙을 생성할 수 있는 특수한 실험기에 치료제를 주입하여, 치료제가 크랙을 찾아 크랙에 안착하여 치료제로서의 기능수행 능력을 확인하기 위해 수행하며, 실험의 여건상 유류대신 물을 이용하여 실험한다.

실험 조건은

- 실험기는 치료제의 거동을 확인할 수 있도록 투명한 아크릴을 이용
- 실험기의 재원은 그림 4와 같다
- 실험기 유입유속을 2.3m/s로 일정하게 유입하며, 크랙을 형성하기위한 밸브의 개·폐 외에는 아무런 조건의 변화를 주지 않는다.
- 앞서 말한 4가지의 치료제를 투입하여, 치료제의 흐름 및 치료여부를 확인한다.



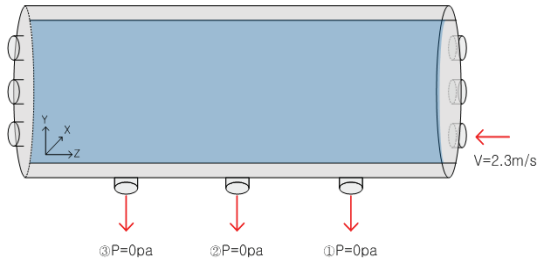
[그림 4] 실험기의 재원

흐름시험에서 얻어진 치료제의 흐름결과를 전산유체해석프로그램을 이용하여 실제의 유체의 흐름과 비교한다.

이를 위해 모델링 프로그램인 Solidworks로 모델링하고, 해석프로그램인 CFdesign 9.0을 이용하여 해석하였다.

해석 대상 및 경계조건은

- 재질 : CFdesign 9.0 프로그램내 정해진 폴리에틸렌, 물
- 크기 : 직경 300mm, 길이 1500mm, 두께 100mm인 실험기
- 크랙크기 : 직경 20mm인 원형 크랙
  크랙위치 : 실험기 하부 3지점(유입구 기준 ①1/4지점, ②2/4지점, ③3/4지점)
- 좌표 : 그림 5와 같다.
- 경계조건
  유입부 : 실내실험시의 조건인 유입속도 2.3m/s를 적용
  유출부 : 각 경우에 따라 유출부는 압력이 대기압인 0pa을 적용



[그림 5] 경계조건 및 좌표

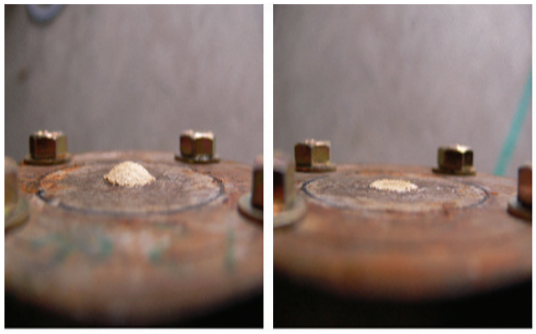
해석방법 transient 방법으로 해석하였고, 유체의 흐름을 추적하기 유입부 방향을 기준으로 20%, 40%, 60%, 80%길이에 해당하는 구역에 XY평면에 10 × 10 격자를 형성하여 그 점을 지나는 유체의 흐름을 가시적으로 표현한다.

3. 해석결과

3.1 투수 저항성능 실험

투수 저항성능 실험 결과는 충분히 수중 경화시킨 치료제가 1시간 동안 0.3N/mm^2 수압에서의 유실의 유무를 실험한다. 투수 저항성능 실험결과 0.3N/mm^2 수압을 가한 경우에서, 특히 LC 303의 경우 수압에 대한 조금의 변형도 없이 치료제의 역할을 수행하였다. LC707, SS710, 실리콘실란트의 경우는 0.3N/mm^2 수압을 가하니, 몰드

하부에서 치료제의 변형이 어느 정도 일어났지만, 치료제로서의 수행능력은 가능함이 판명되었다. 또한 0.3N/mm^2 수압에서 멈추지 않고, 0.5N/mm^2 수압까지 증가 시켰으나 역시 물이 세지 않고 치료제의 역할을 수행하였다.



(a) LC707,SS710,실리콘실란트 (b) LC303

[그림 6] 투수 저항성능 실험 결과

3.2 수중 유실 저항성능 시험

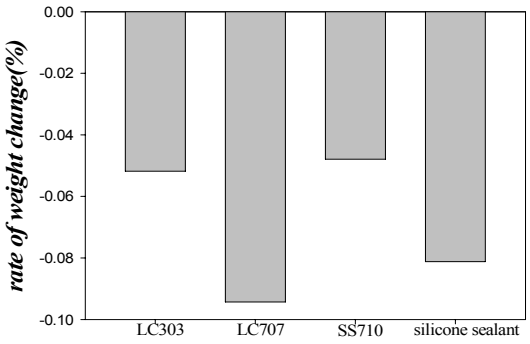
수중 유실 저항성능 실험의 결과는 시험체의 중량변화율을 통해 결정된다. 각 치료제의 중량변화율은 표 2와 같다. 표를 보면 각 치료제의 유속 0.2m/s의 흐름에 따른 중량 변화율을 알 수 있는데 각 6개의 시험체의 평균을 통해 중량변화율을 산출한다.

LC303의 경우 -0.0518(%)의 중량변화율을 보이고, LC707의 경우에는 -0.0943(%)의 중량감소율을 그리고 SS710의 경우 -0.0479(%), 실리콘실란트의 경우 -0.0812(%)의 감소율을 보인다. 수중 유실 저항성능 실험에서는 6개 시료의 평균치가 KS의 성능규정인 -0.1%이내를 만족하므로, 모든 종류의 치료제에서 규정치 이내인 것을 확인할 수 있다.

[표 2] 수중 유실 저항성능 결과

시험체 순번	시험결과(중량변화율(%))			
	LC303	LC707	SS701	실리콘 실란트
1	-0.0294	-0.0626	-0.0633	-0.0454
2	-0.0102	-0.0205	-0.0204	-0.0461
3	0	-0.0606	-0.0525	-0.0602
4	-0.1045	-0.2765	-0.0614	-0.1067
5	0	-0.1357	-0.0406	-0.0909
6	-0.0746	-0.0102	-0.0493	-0.1378
평균	-0.0518	-0.0943	-0.0479	-0.0812

위의 표의 내용을 그래프로 보여주면 다음과 같다.



[그림 7] 수중 유실 저항성능 결과

3.3 내화학 성능 실험

내화학성 실험의 결과는 시험체의 중량변화율을 통해 결정된다. 각 치료제의 중량변화율은 [표 3]과 같다. 표를 보면 각 치료제의 산처리, 알카리처리, 염화나트륨 처리에 따른 중량 변화율을 알 수 있는데 각 3개의 시험체의 평균을 통해 중량변화율이 산출된다.

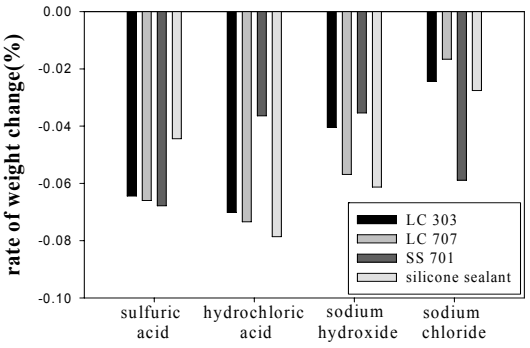
황산 처리에서는 각 치료제의 중량변화율이 -0.0444 ~ -0.0678(%)의 중량 감소율을 보이고, 염산처리 -0.0364 ~ -0.0786(%), 알카리 처리 -0.0354 ~ -0.0613(%), 염화나트륨처리 -0.0166 ~ -0.0589(%)의 중량감소율을 보인다.

내화학성 시험에서는 KS의 성능규정인 -0.1%이내를 모두 만족하므로, 모든 종류의 치료제에서 규정치 이내인 것을 확인할 수 있다.

[표 3] 내화학성 실험결과

화학처리종류		시험체순번	시험결과(중량변화율(%))			
			LC303	LC707	SS701	실리콘 실란트
산처리	황산	1	-0.0495	-0.0979	-0.0523	-0.0561
		2	-0.0477	-0.0503	-0.0726	0
		3	-0.0961	-0.0496	-0.0785	-0.0770
		평균	-0.0644	-0.066	-0.0678	-0.0444
	염산	1	-0.0714	-0.0746	-0.0828	-0.079
		2	-0.067	-0.0741	0	-0.0709
		3	-0.0719	-0.0715	-0.0265	-0.0859
		평균	-0.0701	-0.0734	-0.0364	-0.0786
알카리 처리		1	-0.0488	-0.0742	-0.0547	-0.0781
		2	-0.0478	-0.049	-0.0516	-0.0255
		3	-0.0245	-0.0474	0	-0.0803
		평균	-0.0404	-0.0569	-0.0354	-0.0613
염화나트륨 처리		1	-0.0244	0	-0.0270	0
		2	-0.0488	-0.0238	-0.0763	-0.0257
		3	0	-0.0261	-0.0734	-0.0571
		평균	-0.0244	-0.0166	-0.0589	-0.0276

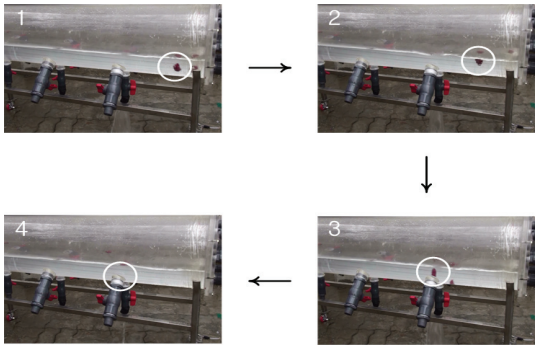
위의 표의 내용을 그래프로 보여주면 다음과 같다.



[그림 8] 내화학 성능 실험 결과

3.4 흐름 및 치료실험

흐름 실험결과 실험기내에서 치료제인 실리콘의 흐름은 그림 9과 같았으며, 모든 제품에서 크랙에서 생긴 압력차에 의해 치료가 되는 것을 육안으로 확인할 수 있다. 실험기 내의 흐름을 형성하는 유입속도에 의해 치료제는 흐름을 따라 시험기내에서 이동을 하였으며, 이동하면서 크랙주변에 위치할 때 압력 차에 의해 크랙으로 치료제가 빨려 들어갔다. 치료제가 빨려들어간 크랙에서는 크랙에 의해 유출되는 누수량이 눈으로 확연히 구분 될 정도로 줄어들었다.



[그림 9] 흐름시험 결과

흐름의 시험결과 치료제가 크랙에 안착하는 것을 볼 수 있었다. 구멍에 안착된 크기가 작은 치료제는 실리콘의 점착성이 강한 성질 그대로 서로 조밀하게 결합하여 밸브 안에 자리잡게 되었고, 크기가 비교적 큰 치료제의 경우 구멍 전체에 걸쳐 실링을 하게 되었다.

LC303의 경우 초산형으로 경화속도가 매우 빠른 제품이다. 그로인해 치료제가 쉽게 경화되어 실리콘 특유의 점착성을 잃게 되었고, 그것이 실리콘이 서로 결합하지 못해서 치료제 사이의 공극을 형성하게 되어 다른 제품보다 치료제로서의 기능이 떨어진다는 것을 알 수 있었다. 또한 LC303의 경우 다른 치료제보다 유출되는 양이 육안으로 식별할 수 있을 정도로 크다.

LC707, SS710, 실리콘 실란트의 경우는 옥심 경화형으로 초산형의 제품보다는 경화속도가 느려서, 치료제가 크랙에 안착할 때에도 실리콘의 점착성을 잃지 않는다. 그로인해 크랙에 안착해서도 치료제들끼리 조밀하게 결합하여 치료제로서의 기능을 더욱 우수하게 수행하였다. 그림 10는 치료성능이 가장 높은 SS710과 치료성능이 가장 낮은 LC303의 치료성능을 비교하였다.

(1) SS710치료제의 치료성능

(2) LC303치료제의 치료성능

[그림 10] 치료실험의 결과

프로그램해석을 통해 시험기안의 흐름을 해석한 결과 유입부 1/4 지점에서 크랙발생시 그림 11 (a)과 같이 유입부 1/4지점에서 유체가 유입부의 유속의 영향을 받아 유입부 부분에서 회전을 하는 것을 볼 수 있다. 이때 발생하는 회전은 치료제가 크랙에 도달할 수 있게 하는 중요한 인자가 된다. 실제 시험결과 치료제역시 이 흐름을 타고 이동하는 것을 볼 수 있었으며, 이와같은 흐름을 통해 크랙 가까이 이동한 치료제는 역시 크랙으로 찾아들어가 크랙을 실링하였다.

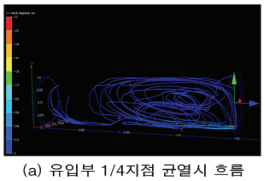
유입부 2/4 지점에서 크랙 시 그림 11 (b)과 같이 유입

부 2/4지점에서 유체가 유입부의 유속의 영향을 받아 유입부 부분에서 회전을 하는 것을 볼 수 있다. 이는 유입부 1/4지점의 흐름보다 회전이 짧은 것을 볼 수 있는데, 이는 유입부 1/4지점의 크랙보다 2/4지점의 크랙이 회전을 멀리 생기지 않게 하는 것을 알 수 있다.

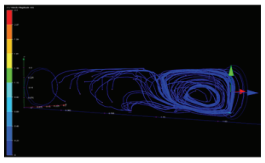
이로 인해 유입부 2/4지점에서의 유속이 적당하게 약해져서 유입부 1/4지점 크랙발생시의 흐름보다 크랙에 안정적으로 안착으로 가는 것을 볼 수 있다.

유입부 3/4지점에서 크랙발생시 그림 11 (c)와 같이 유입부 3/4지점에서 유체가 유입부의 유속의 영향을 거의 받지 않아 유입부에서 생기는 회전의 영향을 받지 않는다는 것을 볼 수 있다.

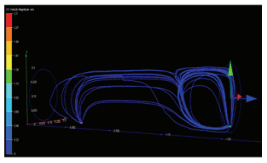
앞에서 말한바와 같이 치료제가 유입부의 회전을 타고 크랙에 안착하는데 이 지점에서는 그러한 모습을 볼 수 없었으며, 실제흐름 시험으로도 치료제가 크랙에 안착하는데 많은 어려움을 보였다.



(a) 유입부 1/4지점 균열시 흐름



(b) 유입부 2/4지점 균열시 흐름



(c) 유입부 3/4지점 균열시 흐름

[그림 11] 프로그램 해석결과

4. 결론

이 연구는 선정해놓은 4가지의 실리콘을 투수 저항성능 실험, 수중 유실저항성능 실험, 내화학성능실험, 흐름·치료실험, 전산유체역학 프로그램을 이용한 흐름분석을 통해 치료제로서의 적용성을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같이 정리 될 수 있다.

1. 투수 저항성능 실험 결과 0.3N/mm^2 수압을 가한 경우에서, 특히 LC 303의 경우 수압에 대한 조금의 변형도 없이 치료제의 역할을 수행하였다. LC707, SS710, 실리콘실란트의 경우는 0.3N/mm^2 수압을 가하니, 몰드 하부에서 치료제의 변형이 어느 정도 일어났지만, 치료제로서의 수행능력은 가능함이 판명되었다.
   또한 0.5N/mm^2 수압까지 증가 시켰으나 역시 물이 세지 않고 치료제의 역할을 수행하였다.
2. 수중 유실저항성능 시험결과 LC303의 경우 -0.0518(%)의 중량변화율을 보이고, LC707의 경우에는 -0.0943(%)의 중량감소율을 그리고 SS710의 경우 -0.0479(%), 실리콘실란트의 경우 -0.0812(%)의 감소율을 보인다.
3. 내화학성능 실험결과 황산 처리에서는 각 치료제의 중량변화율이 -0.0444 ~ -0.0678(%)의 중량 감소율을 보이고, 염산처리 -0.0364 ~ -0.0786(%), 알카리처리 -0.0354 ~ -0.0613(%), 염화나트륨처리 -0.0166 ~ -0.0589(%)의 중량감소율을 보인다.
4. 흐름시험결과 실험기 내의 흐름을 형성하는 유입속도에 의해 모든 치료제는 흐름을 따라 시험기내에서 이동을 하였으며, 이동하면서 크랙주변에 위치할 때 압력 차에 의해 크랙으로 치료제가 빨려 들어갔다.
5. 치료시험결과 초산형인 LC303을 제외한 LC707, SS710, 실리콘실란트의 경우는 실리콘의 점착성을 빨리 잃지 않아 치료제들끼리 조밀하게 결합하여 치료제로서의 기능을 우수하게 수행하였다.
6. 프로그램해석결과 유입부의 유속의 영향으로 생성된 회전이 있는 흐름에 의해 치료제가 크랙을 찾아간다는 것을 알 수 있었다.

[표 4] 결론

	LC303	LC707	SS710	실리콘 실란트
투수 저항성 실험	○	○	○	○
수중 유실저항성 실험	○	○	○	○
내화학성 실험	○	○	○	○
흐름실험	○	○	○	○
치료실험	×	○	○	○

참고문헌

[1] 김미정, “지하유류저장탱크의 관리 강화 방안”, 한국

환경정책평가연구원 연구 보고서, pp. 1-141, 2003.
[2] 부성안, 장의웅 ,이기철, “지하수자원의 오염원인과 항구적 보전대책”, 지반환경, 제2권, 제2호, pp. 5-17, 6월, 2001.
[3] 김미정, “현행 주유소 지하유류저장시설 관리의 문제점과 토양·지하수 오염 방지를 위한 개선방안 연구”, 한국지하수토양환경학회지, 제9권, 제4호, pp. 62-73, 12월, 2004.
[4] 점착 유연형 고무 아스팔트계 누수보수용 주입형 실링재, KS F 4935
[5] 홍채훈, 김수련, 곽규성, 오상근, ”아크릴 수지계 수팽창성 누수보수재의 재료적 성능평가에 관한 실험적 연구”, 한국건축시공학회 논문지, 제5권, 제1호, pp. 51-56, 1월, 2005.

이 성 진(Sung-Jin Lee) **[준회원]**

- 2009년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 석사과정

<관심분야>
지반공학

김 영 욱(Young-Uk Kim) **[정회원]**

- 1989년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2000년 5월 : 펜실베니아 주립대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>
지반공학

박 지 호(Ji-Ho Park) **[정회원]**

- 2004년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 박사과정

<관심분야>
지반공학