

지하 LPG저장공동의 박테리아 제거를 위한 수벽시설 세정시스템의 설계

정일문¹, 한일영², 안정환³, 조원철⁴

1. 서론

지하 LPG저장공동은 수벽터널(water curtain tunnel)과 수벽공(water curtain hole)에 의한 인위적 충전에 의해 수밀(水密)조건이 충족되고 있다. 한편, 저장공동 주변에는 지속적인 박테리아의 증식이 우려되며, 이로 인한 암반투수성의 감소로 인해 수벽시설로부터의 물공급이 원활히 이루어지지 못하게 됨으로써 수밀성이 저하되고 저장효율이 낮아지게 된다. 본 연구는 저장공동 주변암반내에 증식하는 박테리아를 원위치에서 생화학적으로 처리하기 위한 세정용량을 설계한 것으로, 박테리아의 살균을 위해 투여되는 NaOCl용액의 파괴점 농도를 결정한 후 용질이동시간을 산출하고 거리에 따른 적정 주입시간을 결정하는 것을 목적으로 한다.

본 연구에서는 Robert(1989)의 제안식에 의해 박테리아 파괴점 농도 표준곡선도를 작성한 후, 박테리아 감소지수를 결정하여 적정 반응시간을 설정하였다. 적정 박테리아 파괴농도가 결정되면, 세정용질의 이동해석 결과를 적용하여 거리별 세정용액의 주입시간을 산정하였다. 주입시간의 결정을 위해 수벽터널과 수벽공을 다지관(多枝管)으로 가정한 세정용액의 흐름과 용질이동해석과 함께 암반내에서의 용질이동해석을 수행하였다. 박테리아 처리 대상지점에 따라 세정용액 주입이 시작된 후 수평 수벽터널 시스템내 각 지점에서, 그리고 깊이방향으로 암반내 공동까지의 거리별로 파괴농도에 도달하는 시간을 산정하여 이를 적정주입시간으로 결정하였다. 이 시스템은 저장공동내의 박테리아 비활성화를 위한 의사결정의 도구로 활용될 수 있을 것이다.

2. 이론적 배경

2.1 수벽시스템내 흐름 및 용질이동해석

평택 LPG기지는 수벽터널에 다수의 수벽공이 연결되어 지속적인 인위적 충전에 의해 공동 상부의 지하수위를 유지하여 수밀조건을 만족시키고 있다. 따라서, 세정용질의 이동해석을 위해서는 이러한 수벽터널과 수벽공을 고려한 다지관의 흐름해석을 통해 수벽터널 및 수벽공의 위치에 따른 수압, 유량, 유속의 변화등을 고려하여 용질이동해석에 반영할 필요가 있다. 본 연구에서는 다지관의 흐름해석을 위해 상용프로그램인 SWS(Stoner Workstation System; Stoner Associates Inc., 1996)를 이용하였다. 다지관은 상수도관이나 가스관처럼 여러개의 관

-
1. SK건설주식회사 연구소 선임연구원 (E-mail : imchung@skec.co.kr)
 2. SK건설주식회사 연구소 수석연구원 (E-mail : iyhan@skec.co.kr)
 3. 연세대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : daliza@nownuri.net)
 4. 연세대학교 사회환경 건축공학부 교수 (E-mail : woncheol@mail.yonsei.ac.kr)

이) 서로 복잡하게 연결된 것으로 단일관로와 마찬가지로 연속방정식과 베르누이 방정식을 적용한다. 다지관을 구성하는 각 관로의 내경, 길이, 관내벽의 조도, 관으로 유입하는 수량과 유출수량이 주어지면 각 관로의 유량과 유속이 계산되고, 각 지점(nodes)에 대한 연립방정식을 풀므로써 각 관에 배분되는 유량 및 수압을 계산할 수 있다. 관로내 평균유속공식으로는 Hazen-Williams 공식을 적용하였다. 또한 계산된 관로내 흐름에 의한 수변시스템내 농도분포를 계산하는 용질이동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C_{ij}}{\partial t} = \left(\frac{q_{ij}}{A_{ij}} \right) \left(\frac{\partial C_{ij}}{\partial x_{ij}} \right) + \theta(C_{ij}) \quad (1)$$

여기서, C : 용질의 농도(mg/L)
 q : 유량(m^3/sec)
 θ : 용질의 반응율(reaction rate)

2.2 암반내 용질이동해석

암반내 용질이동해석을 위해서는 다공매질내 1차원 이송확산 방정식을 적용하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

여기서, C : 용질의 농도(mg/L)
 D_L : 분산지수(m)

2.3 Robert 모형

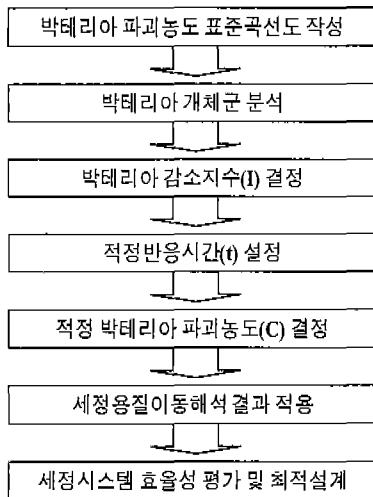
박테리아의 과괴농도를 결정하기 위한 방정식으로 Robert의 제안식(Christon, 1992)을 사용하였다. 이 식은 실내실험을 통해 영양인자들의 상관관계를 규명하고, 각 영향인자들의 지수를 결정하여 제안된 모형이다.

$$C \cdot t = 0.32(-\log_{10} I)^{1.18} C^{0.14} pH^{2.49} temp^{-0.17} \quad (3)$$

여기서, I : 박테리아 감소지수(N_t/N_0)
 C : 염화이온의 농도(mg/l)
 t : 박테리아와의 반응시간(min)
 N_t : t 시간에서의 박테리아의 개체수
 N_0 : 초기 박테리아의 개체수
 pH : 반응이 진행되는 용매의 pH
 $temp$: 반응이 진행되는 용매의 온도(°C)

3. 원위치 박테리아 화학적 처리기법

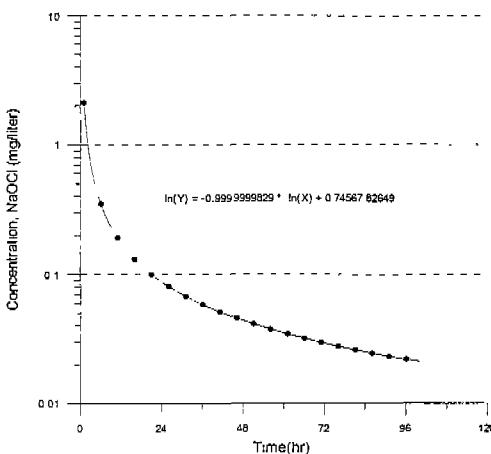
세정시스템의 최적설계를 위한 원위치 박테리아 화학적 처리 기법의 흐름은 다음과 같다.



<그림 1> 원위치 박테리아 화학적 처리기법 흐름도

3.1 박테리아 파괴농도 표준곡선도

표준곡선도 작성시에는 세정용질이 박테리아와 반응하는 환경의 pH와 온도를 모니터링 데이터를 이용해서 구하고, 이를 박테리아 화학처리 모형에 적용하여 박테리아의 반응시간과 박테리아 감소지수에 따른 박테리아 파괴농도를 도시해야 한다. 본 연구의 대상이 되는 평택 LPG 기지의 경우 모니터링 자료를 통해 pH값은 9로 정하였다. 온도는 지하에서 연종 일정하게 유지되는 15°C로 정하였고 이러한 현장환경 자료를 근간으로 박테리아 파괴농도 표준곡선도를 <그림 2>와 같이 작성하였다.



<그림 2> 박테리아 파괴농도 표준곡선도($pH=9, I=0.01$)

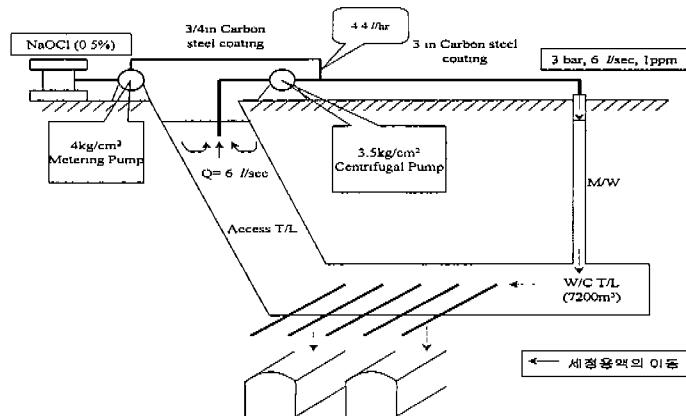
3.2 박테리아 개체군분석을 통한 박테리아 감소지수 및 파괴점 농도 결정

현장의 환경에 알맞게 박테리아 파괴농도 표준 곡선도를 작성한 후에는 모니터링 데이터 분석을 통해 박테리아 개체군의 증식경향을 파악하고 박테리아를 감소시키기 위한 감소지수를 결정한다. 일반적으로 실내실험에서 실시하는 세정용질과 박테리아와의 적정 반응시간은 수분에서 수시간 정도이지만 실제 구조물에 적용시에는 현재 시행되고 있는 세정시스템의 규모를 충분히 고려하여 적정 반응시간을 설정해야 하며, 본 평택기지에 대해서는 암반내에서 적정 파괴농도로 박테리아와 반응하는 적정반응시간을 1일로 설정하였다. 현재 운영되고 있는 세정시스템의 규모는 실내실험의 규모와 비교해 볼때 상대적으로 충분한 규모 효과(scale effects)를 고려해야 할 것으로 판단되었기 때문이다. 박테리아의 감소지수는 0.01로 보고 있으며, 이에 따른 파괴점 농도는 0.087mg/L로 계산되었다.

4. 세정시스템의 적용

4.1 수평수벽시스템의 용질의 이동

평택 LPG 저장기지에서는 Monitoring Well(M/W)로 NaOCl용액을 주입하여 수벽터널과 수벽공에 분포시킨 후 다공성 매질 혹은 열극의 이송확산 mechanism을 통해 암반내로 퍼져나가도록 하는 세정방안을 계획하였다. 세정용질의 이동경로 및 주입설계에 관한 계획도는 <그림 4>에 나타내었다.



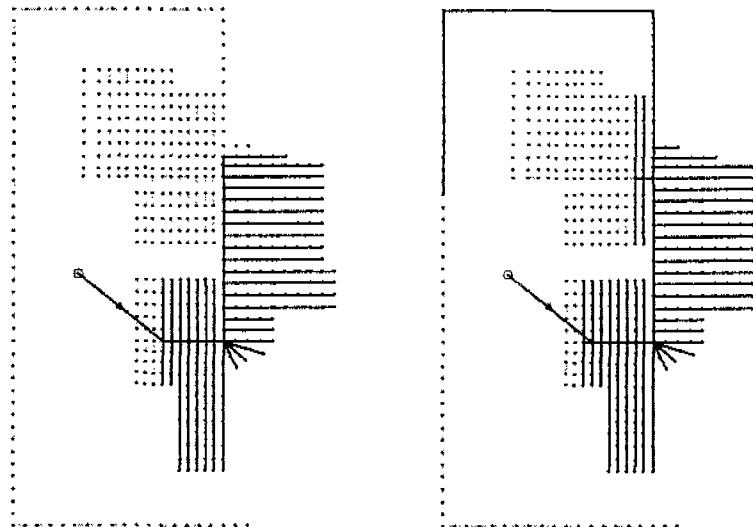
<그림 3> 세정용질의 이동 경로 및 주입계획

주입압과 주입유량은 관마찰과 현장조건을 고려하여 3bar, 6 l/sec로 가정하였다. 주입농도는 1 ppm으로 결정하였는데 이는 지하공동주변의 방식(防蝕)기준을 적용한 것으로 간극수압계의 부식을 방지하기 위해서는 1ppm이 넘어서는 안되므로 이를 상한치로 결정하였다. 최적 주입시간은 세정용액 주입이 시작된 후 W/C시스템내 각 지점에서 일정농도에 도달하는 시간과 각 공동지역의 암반내에서 파괴농도에 도달하는 시간, 그리고 암반내에서 박테리아와의 적정반응시간을 합산하여 산출하였다.

먼저, 수벽터널 시스템내로 주입된 세정용질이 수벽터널과 수벽공을 따라 이동하는 시간을 결정해야 한다. <그림 4>는 주입압을 3 bar로 하였을 때 세정용질의 시공적인 분포를 나타낸 것으로 약 100일이 되면 수벽시스템 전체의 약 80%에 용질이 분포하는 것으로 나타났다.

100일 이후에는 수벽시스템 내로의 이동은 크게 줄어들고, 진입터널 방향으로만 진행이 이루어진다. 따라서 수평수벽시스템의 초기농도 도달시간은 수평으로 200m를 이동한 시간으로 결정하였다. 수벽시스템내의 용질이동 해석결과를 통한 수평거리(X:m)별 도달시간(Y:day)은 다음과 같다.

$$Y = 1.58e^{(0.02X)} \quad (4)$$



(a) 주입 30일 후의 세정용액 농도분포
(b) 주입 100일 후의 세정용액 농도분포
<그림 4> 세정용질 주입에 따른 수벽시스템내 거리별 농도분포

4.2 암반내의 용질이동해석

세정용질의 암반내 이동해석 적용 구간은 수벽공에서 공동상부까지의 25m이며, 해석을 위해서 용질이동 수치모형 ST1(Istok, 1989)를 이용한 모의를 수행하였다. 용질이동 해석의 주요 매개변수인 종분산지수(12m)와 공극율(0.013)의 경우, 현장실험 결과를 인용하였으며, 포화 투수계수는 기반암의 투수계수인 $1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$ 를 적용하였다. 흡탈착을 무시한 비반응성 용질로 가정한 해석을 수행한 결과 60일이 지난 후 공동에 도달하는 용질의 상대농도(C/C_0)값은 최대운영압일때 10%로 나타났다.

4.3 암반내 박테리아 파괴농도 도달시간

수평 수벽시스템에 주입된 세정용질이 약 100일 후에는, 주입구로부터 200m를 이동하게 되고, 수벽시스템의 80%의 해당하는 면적에 세정용질이 분포하게 되므로, 이 지점에서 깊이방향으로 파괴점 농도에 도달하는 시간을 결정하는 적정주입시간을 산정하였다. 초기화된 세정용질은 그 위치에서 공동방향의 흐름에 의한 이송확산에 의해 깊이 방향으로 이동한다. 이때 흐름의 속도를 좌우하는 요인은 저장공동의 운영압이 되며, 최대운영압일때 가장 낮은 유속이 되므로 공동의 최대운영압(8.8 kg/cm^2)을 기준으로 거리별 농도를 산정한 결과 공동상부에 파괴점 농도에 용질이 도달하는 시간은 60일로 계산되었다. 이러한 최적농도는 운영압 조건에 따라 달라지므로 공동의 최대운영압(8.8 kg/cm^2)을 기준으로 거리별 농도를 산정하였다. 또한 세정효율에 따라 파괴점 농도는 달라지며, 그 농도는 0.087ppm(99%), 0.039ppm(90%),

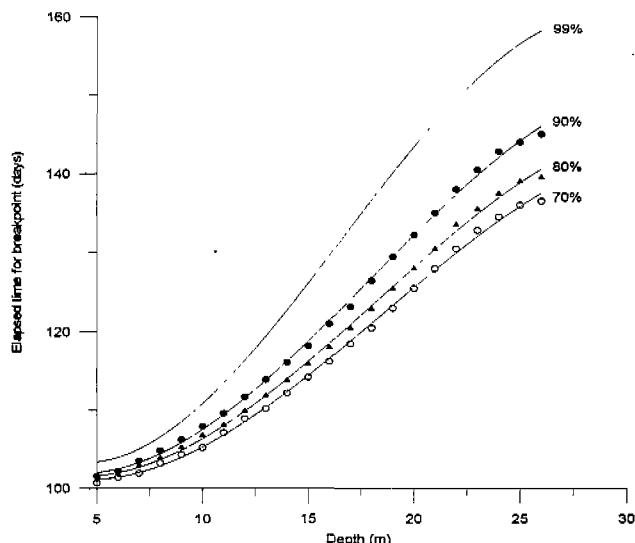
0.025ppm(80%), 그리고 0.018ppm(70%)이다. <그림 5>에는 M/W에서 수평으로 200m지점에서 깊이방향으로 거리별 파괴점 농도에 도달하는 최적주입시간을 나타내었다. 거리(X:m)별 주입시간(Y:day)에 관한 회귀식은 다음과 같다.

$$Y = 109.6 - 3.03X + 0.39X^2 + 0.0079X^3 \quad (99\%) \quad (5)$$

$$Y = 105.9 - 1.96X + 0.26X^2 + 0.0048X^3 \quad (90\%) \quad (6)$$

$$Y = 105.1 - 1.75X + 0.23X^2 + 0.0042X^3 \quad (80\%) \quad (7)$$

$$Y = 104.9 - 1.76X + 0.22X^2 + 0.0040X^3 \quad (70\%) \quad (8)$$



<그림 5> 수벽시설-공동간 거리별 파괴농도 도달시간 (주입구로부터의 거리=200m)

5. 결론

지하심부에서 증식하는 박테리아를 제거하는 방안으로 기존에는 세정제를 특별한 기준 없이 투입하여 왔으나, 이 경우 지하공동주변에 설치된 구조물들의 부식을 일으킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 방식기준농도를 상한값으로, 박테리아의 파괴점 농도를 하한값으로 정하여 수벽시스템내의 세정용액의 농도가 암반을 통해 확산되어 공동상부에 도달할 수 있도록 세정액 주입의 정량적인 설계지침을 제공하였다. 이 방법은 지하심부의 생화학적 처리를 위한 원위치 정화기술로 활용가능하며, 현장적용을 통한 검증과 박테리아의 반응계수 결정을 위한 정밀실험이 진행되면 보다 현실적인 적용을 기대할 수 있다.

6. 참고문헌

- SK건설 연구소(1996) 지하 LPG 저장공동 Water Curtain 세정시스템 최적운영기법 연구.
- Christon, J. H. (1992) Modeling The Environmental Fate of Microorganisms.
- Istok, J. D. (1989) Groundwater Modeling by the Finite Element Method, WRM 13, American Geophysical Union.
- Stoner Associates, Inc. (1996) SWSL user's guide, Version 2.22.