

## LNG 지하저장탱크의 침투해석 및 용수 대책공법에 대한 사례분석

### Case Study on Seepage Analysis and Countermeasure Against the Seepage Flow of In-ground LNG Storage Tank

신은철<sup>1)</sup>, Eun Chul Shin, 오영인<sup>2)</sup>, Young In Oh, 이상혁<sup>3)</sup>, Sang Hyuk Lee

- <sup>1)</sup> 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental System Eng., University of Incheon
- <sup>2)</sup> 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 박사과정, Ph. D. Student, Dept. of Civil & Environmental System Eng., University of Incheon
- <sup>3)</sup> 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 석사과정, MS. Student, Dept. of Civil & Environmental System Eng., University of Incheon

**SYNOPSIS** : Since Pyoungtaek thermal power plant began using natural gas in 1986, the annual using volume has rapidly increased and reached 12.7 million tons in 1999. When the natural gas is cooled to a temperature of approximately  $-162^{\circ}\text{C}$  at atmospheric pressure, it condenses to a liquid called liquefied natural gas(LNG). LNG has a special characters such as odorless, colorless, non-corrosive, and non-toxic. So, LNG storage tank, tanker ship, transfer pipelines are required the special storage and transportation systems and technology. The presently operating LNG terminals are Pyongtaek and Incheon terminals. A total of 19 above-ground LNG storage tanks(100 thousand kℓ grade) are currently in operation with a sendout capacity of 4,360tons/hour. To meet the growing domestic demand of LNG supply, the Incheon receiving terminal is expanding(six in-ground tank) and constructing a third LNG terminal at Tongyong. In this paper, case study on seepage analysis and countermeasure against increasing the seepage volume of in-ground LNG storage tank excavation work is reported. The results of an additional seepage analysis are presented to verify the design seepage volume of assumption section and seepage volume after curtain-grouting in the slurry wall.

**KEYWORDS** : In-ground LNG storage tank, Seepage analysis, Excavation, Curtain-grouting

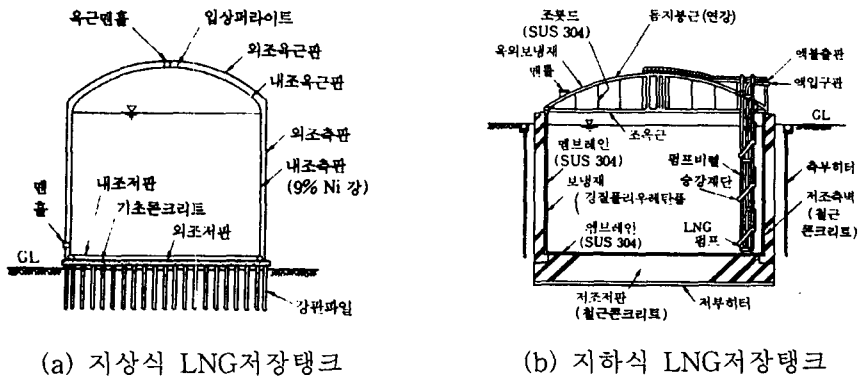
## 1. 서론

1980년대 이후, 1, 2차에 걸친 석유쇼크로 인하여 석유 대체 에너지의 개발이 촉진되었으며, 특히, 환경적인 문제가 대두되어, 무공해 에너지인 LNG의 도입이 요구되었다. 1986년 말 평택화력발전소에서 4만 5천톤의 발전용 천연가스를 사용한 이래 천연가스 사용량은 지속적인 증가추세를 보이고 있다. 세계 각지의 천연가스 생산국으로부터 LNG수송선으로 도입되는 LNG는 인수기지에서 하역되어 액체상태로 저장탱크에 보관되었다가 다시 기화되어 전국 배관망으로 송출된다. 현재 국내에서 가동중인 LNG저장탱크는 평택기지와 인천기지에 10만kℓ급 지상식 저장탱크 19기가 있으며, 확충예정인 LNG인수기지는 인천기지의 지하탱크 6기(14만kℓ급 2기, 20만kℓ급 4기)와 통영기지 저장탱크가 있다. 본 연구에서는 현재 건설 중에 있는 OO기지 지하식 저장탱크 TK-A, TK-B탱크의 굴착공사를 위한 침투해석과 용수량 증가에 대한 대책공법의 적정성에 대하여 연구를 수행하였다. 침투해석시 고려한 대표단면 설정, 지층단면의 변화, 투수계수변화, 히빙 안정성 등을 분석하였으며, 용수량 증가에 대한 대책공법으로 선정된 그라우팅 공법의 타당성을 분석하였다.

### 1.1 LNG 지하저장 탱크

천연가스로부터 수분과 유황산화물 등의 불순물을 제거한 후,  $-162^{\circ}\text{C}$ 라는 초저온으로 냉각하여 생산되는 LNG는 생산, 수송, 저장의 각 단계에서 특수한 시설을 필요로 한다. 예를 들면, 저장탱크의 경우, 지상식 금속성 2중 탱크와 지하식 멤브레인 탱크, 또는 콘크리트 탱크 등의 특수한 탱크가 사용되고 있다. 지하

식 탱크는 저장액의 액위가 주위의 지반표면 아래 혹은 탱크 주위성토의 꼭대기 아래에 있어, 방액제를 필요로 하지 않는 탱크형식으로 지상식에 비해 만일의 사고에도 저장액의 유출이 없고 증발량이 적은 것이 특징이며, 특히 화재시의 발열량도 적어 방재상 유리한 형식이다. LNG저장탱크의 일반적인 구조형식은 그림 1.1에 나타낸 바와 같으며, 지하식은 그림 1.1(b)와 같이 멤브레인식 철근콘크리트형식이 일반적이다.



(a) 지상식 LNG저장탱크 (b) 지하식 LNG저장탱크  
그림 1.1 일반적인 LNG저장탱크 개요도

## 2. 설계개요 및 지반조건

### 2.1 지하저장탱크 실시설계 및 설계변경

본 LNG 인수기지 TK-A, TK-B는 저장용량 20만 kl급의 지하식 탱크로 설계되었다. 상세설계 시 상세설계 지반조사를 바탕으로 탱크 내경 72m, 굴착심도 EL-49.2m로 설계되었으며, 탱크의 기초형식은 풍화암층을 지지층으로 하는 직접기초형식으로 설계되었다. 직접기초의 형식은 EL-49.2m까지 굴착한 후, 지하수의 배수를 위하여 약 1.2m의 자갈층을 포설하며, 배수층 포설 후, 9m높이의 바닥슬래브를 2차에 걸쳐 타설하여 직접기초를 완성하게 된다. 그러나, 인접지역의 지하저장탱크의 시공과정에서 국부적인 과다 침하와 대단위 용수량 발생으로 인하여 설계 변경이 제기되었으며, 추가 지반조사를 실시하여 대책공법 선정 및 설계변경을 실시하였다. 본 연구의 대상인 TK-A, TK-B탱크에 대한 대책공법은 인접지역 지하저장탱크와 유사하게 기초형식을 강관 말뚝기초로 변경하는 것으로 결정되어, 설계변경을 실시하였으며 현재 시공 중에 있다. 강관 말뚝기초공법은 약 EL-50.6m까지 추가굴착을 실시하여 직경 711.2mm의 강관말뚝을 연암층까지 타입한 후, 파일캡 슬래브를 설치한다. 또한, 파일캡 슬래브에 하부 지하수의 배수를 위하여, 1.25m 두께의 자갈층을 설치한 후, 바닥슬래브를 타설하게 된다. 직접기초로 사용된 바닥슬래브의 단면도와 대표지층단면도는 그림 2.1에 나타낸 바와 같으며, 설계 변경된 강관말뚝기초의 계획평면도는 그림 2.2에 나타낸 바와 같다.

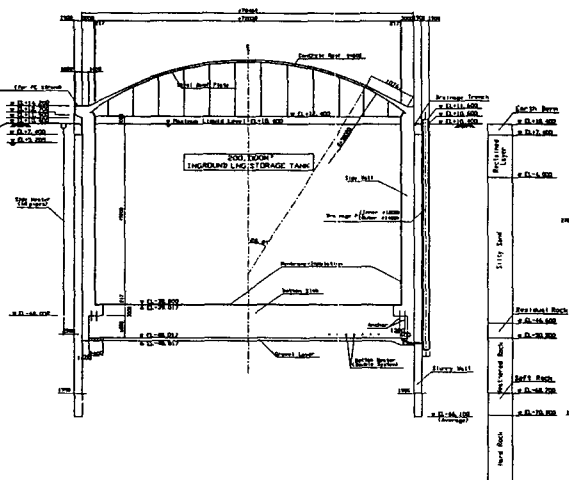


그림 2.1 설계시 단면도 및 대표지층단면도

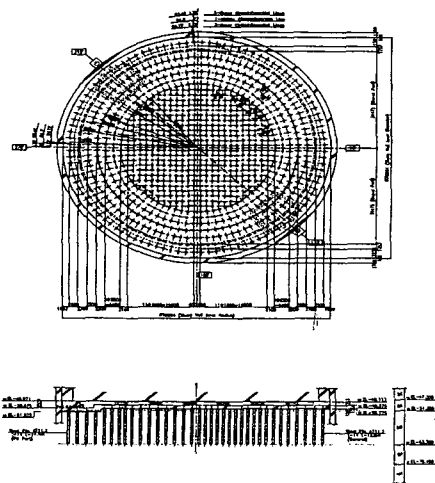


그림 2.2 강관 말뚝기초공법 배치도

## 2.2 현장 지반조건

TK-A, TK-B탱크 시설부지에 대한 하부지반 조건 및 물성치를 파악하기 위한 지반조사는 총 3회에 걸쳐서 실시되었다. 1차 지반조사는 LNG 인수기지 2단계 3차공사를 위한 기본 설계를 위하여 총 8공의 시추조사와 각종 현장시험 및 실내시험이 수행되었다. 2차 지반조사는 상세설계를 위하여 총 10공의 시추조사와 수압시험, 공내재하시험, Downhole검층 등의 현장시험 및 실내시험이 수행되었다. 3차 지반조사는 굴착 후 기초지반의 침하 가능성 및 용수량 변화를 분석하기 위하여, RS층과 풍화암층의 침하, 변형특성을 판단하기 위한 실내시험을 실시하였다. TK-A, TK-B탱크는 직접기초형식일 경우, 풍화암층에 바닥슬래브가 설치되도록 되어있었으며, 말뚝기초형식일 경우에는 강관말뚝을 연암층까지 타입하고, 파일캡 슬래브가 풍화암층에 설치되도록 설계되어 있다. 따라서, TK-A, TK-B탱크의 침투해석 및 용수량 검토는 풍화대층의 풍화암층과 기반암층의 연암과 경암의 특성 및 분포에 따라 많은 영향을 받게 된다. 시추조사결과에 따른 풍화암 분포는 그림 2.3과 2.4에 나타낸 바와 같다.

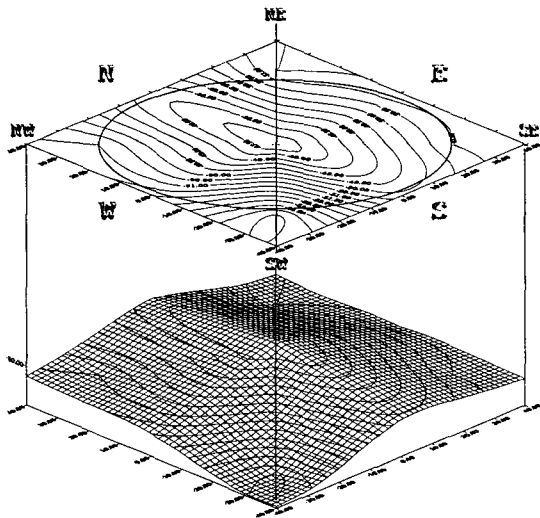


그림 2.3 TK-A탱크 지역의 풍화암층 상단분포

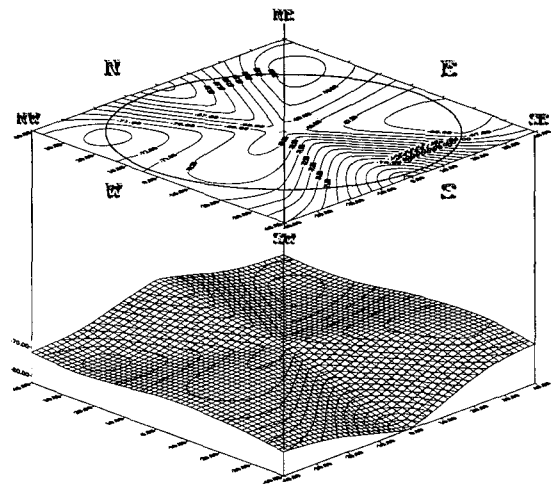


그림 2.4 TK-B탱크 지역의 풍화암층 상단분포

## 3. 침투해석조건 및 설계시 용수량 검토

### 3.1 침투해석 지반의 투수계수 변화

본 연구에서는 TK-A, TK-B탱크의 지반조건 및 시공조건에 따른 침투해석과 용수량 증가에 따른 Curtain-Grouting 시공시 침투해석을 비교·분석함으로써, 설계용수량 및 Curtain-Grouting의 적정성을 분석한다. TK-A, TK-B탱크 지역의 용수량 관련 설계는 총 4회에 걸쳐 실시되었으며, 각각의 설계시 적용된 지층별 투수계수는 표 3.1에 나타낸 바와 같다.

표 3.1 지층별 설계투수계수

토층	상부층 심도(m)	두께(m)	단위중량 $\gamma_t$ ( $tf/m^3$ )	투수계수, k(cm/sec)			
				1차 지반조사	용수량 설계	Curtain- Grouting 설계	Deep- Well 설계
매립토	7.4	10.0	1.90	$3.7 \times 10^{-4}$	$3.7 \times 10^{-4}$	$3.7 \times 10^{-4}$	$3.7 \times 10^{-4}$
모래층1	-2.6	14.3	1.90	$2.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4}$
점토층1	-16.9	5.4	1.85	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$
모래층2	-22.3	15.3	2.00	$1.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$
점토층2	-37.6	1.5	1.95	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$
모래질자갈	-39.1	8.2	2.05	$6.5 \times 10^{-4}$	$6.5 \times 10^{-4}$	$6.5 \times 10^{-4}$	$6.5 \times 10^{-4}$
풍화토층	-47.3	4.0	2.05	$6.5 \times 10^{-4}$	$6.5 \times 10^{-4}$	$6.5 \times 10^{-4}$	$6.5 \times 10^{-4}$
풍화암층	-51.3	12.0	2.55	$5.1 \times 10^{-5}$	$5.1 \times 10^{-5}$	$5.1 \times 10^{-4}$	$3.7 \times 10^{-4}$
연암층	-63.3	6.8	2.55	$1.2 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-4}$	$6.5 \times 10^{-4}$
경암층	-70.1	-	2.70	$7.1 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$

표 3.1에서 보는 바와 같이 매립토층부터 풍화토층까지의 투수계수는 1차 지반조사결과에 의한 투수계수를 사용하였으나, 실제 굴착에 따른 용수량에 결정적인 영향을 미치는 풍화암, 연암, 경암층의 투수계수는 총 3회에 걸쳐 수정되었다. 본 침투해석 검토에서는 상세설계시의 초기 용수량설계 검토를 위하여 1차 수정 투수계수를 적용하였으며, Curtain-Grouting 시공 후의 용수량 검토를 위하여, Pumping Test결과로 도출된 3차 수정 투수계수를 사용하였다.

### 3.2 용수량 설계시 대표단면 및 설계용수량

상세설계, Curtain-Grouting 설계, Deep-Well 설계의 용수량 산정은 ABAQUS라는 유한요소해석 프로그램을 이용하여 침투해석을 수행하였다. 침투해석을 수행한 해석단면은 전체의 지층단면 중 대표단면을 선정하여 수행하였으며, 적용 해석모델은 Cylindrical Axisymmetric Model을 적용하였다. 또한 경계조건은 지하수위 또는 해수면에 따른 수위변화 무시, 영향반경 150m, 하부 바닥 경계층은 불투수층, 굴착 바닥면과 슬러리월은 투수층으로 고려하여 설계하였다. 각각의 설계시 침투해석에 적용한 대표단면에 대한 FEM 모델링은 그림 3.1에 나타낸 바와 같으며, 상세설계, Curtain-Grouting 설계, Deep-Well 설계시 용수량 산출결과는 표 3.2에 나타낸 바와 같다.

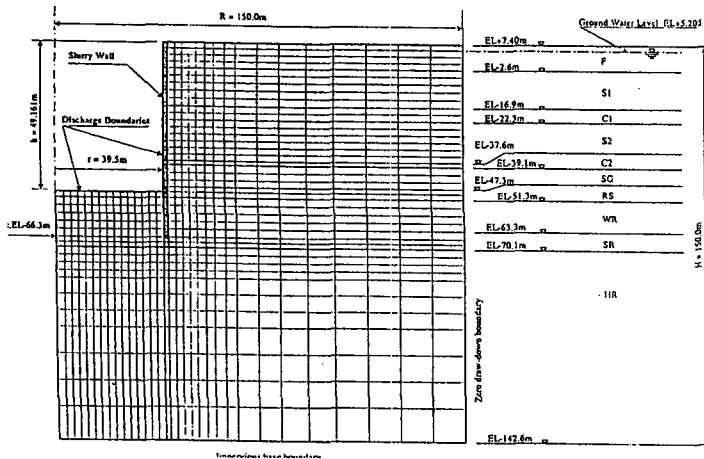


그림 3.1 침투해석을 위한 FEM모델링(ABAQUS)

표 3.2 설계단계에서의 용수량 산출결과

		총용수량 (m <sup>3</sup> /day)
기본설계		210.84
상세설계	점토층고려	248.5
	점토층무시	249.6
Curtain-Grouting설계	시공전	1097.5
	시공후	269.6
Deep-Well 설계	Curtain-Grouting 시공전	1623.5
	Curtain-Grouting 시공후	326.5

표 3.2의 해석결과에서 보는 바와 같이, 기본설계와 상세설계시의 용수량은 투수계수의 변화가 크지 않아 거의 동일한 용수량을 보이고 있으나, 인접 저장탱크 지역의 투수계수를 사용한 Curtain-Grouting 설계와 Pumping Test에 의해 도출된 투수계수를 사용한 Deep-Well 설계시의 용수량은 하루 1000m<sup>3</sup>/day 이상이 발생됨을 알 수 있다. 따라서, Pumping Test 결과를 바탕으로 도출한 허용 용수량 500m<sup>3</sup>/day의 용수량을 맞추기 위하여 Curtain-Grouting을 시공해야만 하는 지반조건이었으며, Curtain-Grouting 시공에 따라 용수량이 급격히 감소하여 허용용수량에 만족하는 결과를 얻었다.

### 3.3 침투해석 조건

본 연구에서는 설계용수량 및 Curtain-Grouting의 적정성을 검토하기 위하여 SEEP/W(Ver. 4.22) 프로그램을 이용하여 추가 침투해석(Seepage Analysis)을 실시하였다. SEEP/W(Ver. 4.22)는, 캐나다의 GEO-SLOPE International Ltd.에서 개발하였으며, 2차원 유한요소법에 근거한 침투류 해석 프로그램이다. 본 연구에서 실시한 침투해석의 개요는 표 3.3에 나타낸 바와 같다. 설계시의 침투해석은 굴착완료 및 Curtain-Grouting보강완료 후의 조건에 대하여 평균적인 대표지층 단면을 적용하였으나, 본 검토의 침투해석에서는 방위별 지층조건을 고려하여 해석을 수행하였다.

표 3.3 침투해석 방법

	적용투수계수	해석단면	
		대표단면	방위별 단면
상세설계 검토	1, 2차 지반조사 결과에 의한 투수계수	용수량 검토	TK-A
			TK-B
Curtain-Grouting 설계검토	Pumping Test에 의한 투수계수	Curtain-Grouting 시공전	TK-A
			TK-B
		Curtain-Grouting 시공후	TK-A
			TK-B

방위별 해석단면은 1, 2차 지반조사의 시추조사 결과를 바탕으로 각 방위별(North, North-East, East, South East, South, South-West, West, North-West)로 8개의 단면으로 세분하였으며, 각 단면별 용수량은 해석조건이 Axisymmetric이므로 전체 방위  $2\pi$ 에 대하여 계산한 후, 45radian만큼의 유량으로 환산하였다. 슬러리월의 투수계수는  $1.07 \times 10^{-7}$  cm/sec를 사용하였으며, Curtain-Grouting심도는 대표단면의 경우, 평균심도 11m, 방위별 단면의 경우, Curtain-Grouting시공단면을 고려하여 적용하였다.

#### 4. 침투해석 및 Heaving 검토 결과

##### 4.1 상세설계 검토 결과

본 침투해석시 사용한 SEEP/W 프로그램을 통한 대표단면에 대한 격자요소망과 경계조건, 해석결과는 그림 4.1에 나타난 바와 같다. 그림 4.1에서 보는 바와 같이 총 용수량이 250.95m<sup>3</sup>/day로 설계용수량 248.5m<sup>3</sup>/day(표 3.2)와 거의 동일한 결과를 나타내었다. TK-A탱크 지역의 방위별 침투해석결과, 각각의 방위별 용수량은 표 4.1에 나타난 바와 같이, 국부적인 용수량 집중이 없이 균질한 분포를 보이며, 총용수량 합계는 243.12m<sup>3</sup>/day로 대표단면과 거의 동일한 값을 나타내었다.

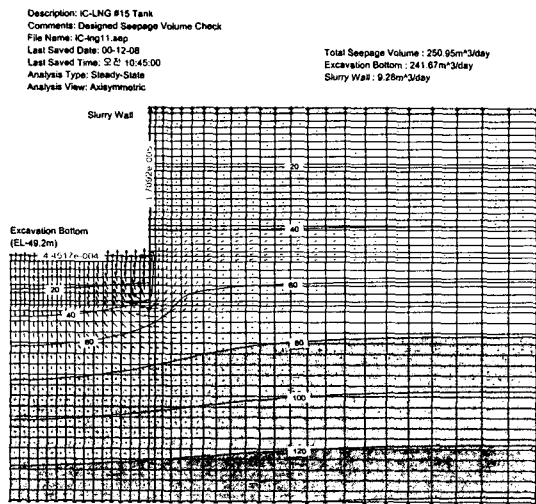


그림 4.1 상세설계용수량 검토 해석 결과

표 4.1 TK-A탱크의 방위별 침투해석결과

방위	풍화암 심도 (m)	풍화암 두께 (m)	굴착바닥면 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	슬러리월 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	총용수량 (m <sup>3</sup> /day)
N	EL-50.7	5.0	27.99	1.17	29.16
NE	EL-49.5	11.5	28.45	1.25	29.70
E	EL-49.0	10.3	27.29	1.12	28.41
SE	EL-48.8	13.6	28.97	1.23	30.20
S	EL-48.5	16.0	30.90	1.20	32.10
SW	EL-50.5	11.0	28.76	1.24	30.00
W	EL-49.0	15.9	31.12	1.26	32.38
NW	EL-48.9	13.1	30.91	1.26	32.17
합계					243.12

TK-B탱크 지역의 방위별 침투해석결과, 각각의 방위별 용수량은 표 4.2에 나타난 바와 같으며, 총용수량 합계는 319.28m<sup>3</sup>/day로 대표단면에 비하여 68.33m<sup>3</sup>/day만큼 크게 산정되었다. 또한, 경암층의 심도에 따른 용수량변화는 그림 4.2에 나타난 바와 같이, 경암심도가 깊은 South-East 방위의 용수량이 타 방위의 용수량에 비하여 최대 2.0배이상 많이 발생되어 국부적인 용수량 집중이 발생되는 것으로 나타났다.

표 4.2 TK-B탱크의 방위별 침투해석결과

방위	경암 심도 (m)	풍화암 두께 (m)	굴착바닥면 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	슬러리월 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	총용수량 (m <sup>3</sup> /day)
N	EL-72.1	13.4	26.42	1.38	27.80
NE	EL-67.4	7.75	24.57	0.93	25.50
E	EL-69.1	9.15	30.49	1.24	31.73
SE	EL-66.5	4.30	65.55	1.13	66.68
S	EL-64.7	7.05	47.59	1.05	48.64
SW	EL-70.0	12.05	35.40	1.39	36.79
W	EL-76.3	10.30	35.18	1.39	36.57
NW	EL-72.9	11.15	44.10	1.47	45.57
합계					319.28

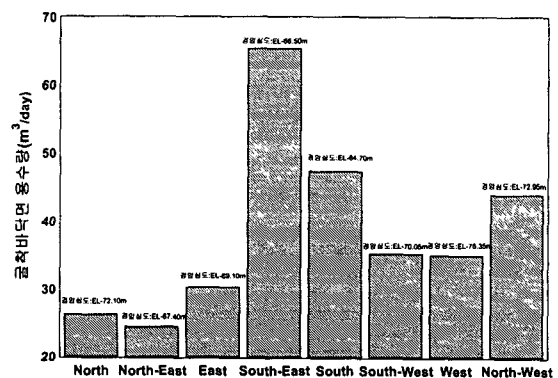


그림 4.2 경암 심도에 따른 용수량 변화곡선

## 4.2 Curtain-Grouting 시공전의 침투해석 결과

Curtain-Grouting 시공전의 침투해석에서는 Pumping Test를 통하여 도출된 암반층의 투수계수를 적용하여 해석을 수행하였다. 대표단면에 대한 격자요소망과 경계조건, 해석결과는 그림 4.3에 나타난 바와 같다. 그림 4.3에서 보는 바와 같이 총 용수량이 1129.77m<sup>3</sup>/day로 설계용수량 1623.5m<sup>3</sup>/day과 다소 차이는 있으나 투수계수 증가로 인하여 대단위의 용수량이 발생되었다. Curtain-Grouting 시공전의 TK-A탱크 지역의 방위별 침투해석결과, 각각의 방위별 용수량은 표 4.3에 나타난 바와 같이, 풍화암 두께가 상대적으로 두꺼운 South 방위에서 용수량이 집중되는 것으로 나타났으며, 총용수량 합계는 1255.56m<sup>3</sup>/day로 도출되었다.

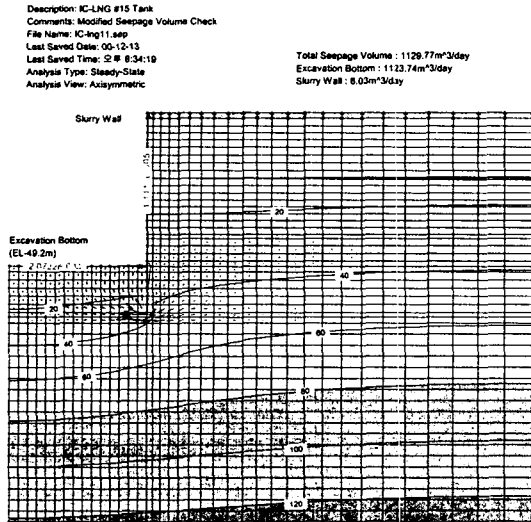


그림 4.3 Curtain-Grouting 시공전의 용수량 검토 해석 결과

표 4.3 TK-A탱크의 방위별 침투해석결과

방위	풍화 암심도 (m)	풍화암 두께 (m)	굴착바닥면 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	슬러리월 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	총용수량 (m <sup>3</sup> /day)
N	EL-50.7	5.0	161.23	1.00	162.23
NE	EL-49.5	11.5	161.41	0.80	162.41
E	EL-49.0	10.3	126.57	0.78	127.35
SE	EL-48.8	13.6	110.59	1.01	111.60
S	EL-48.5	16.0	220.00	0.83	220.83
SW	EL-50.5	11.0	134.86	0.70	135.56
W	EL-49.0	15.9	161.29	0.98	161.27
NW	EL-48.9	13.1	173.41	0.90	174.31
합계					1255.56

TK-B탱크 지역의 방위별 침투해석결과는 표 4.4에 나타난 바와 같으며, 총용수량 합계는 1499.40m<sup>3</sup>/day로 대표단면의 해석결과에 비하여 369.63m<sup>3</sup>/day만큼 크게 산정되었다. 또한, 경암층의 심도에 따른 용수량변화는 그림 4.4에 나타난 바와 같이, 경암층심도가 깊은 South-East, South, West방위에서 용수량이 집중되었다.

표 4.4 TK-B탱크의 방위별 침투해석결과

방위	경암 심도 (m)	풍화암 두께 (m)	굴착바닥면 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	슬러리월 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	총용수량 (m <sup>3</sup> /day)
N	EL-72.1	13.4	137.04	0.95	137.99
NE	EL-67.4	7.75	102.04	0.71	102.75
E	EL-69.1	9.15	172.04	0.91	172.95
SE	EL-66.5	4.30	258.35	0.63	258.98
S	EL-64.7	7.05	257.24	0.62	257.86
SW	EL-70.0	12.05	162.21	1.01	163.22
W	EL-76.3	10.30	222.16	0.85	223.01
NW	EL-72.9	11.15	181.64	1.0	182.64
합계					1499.40

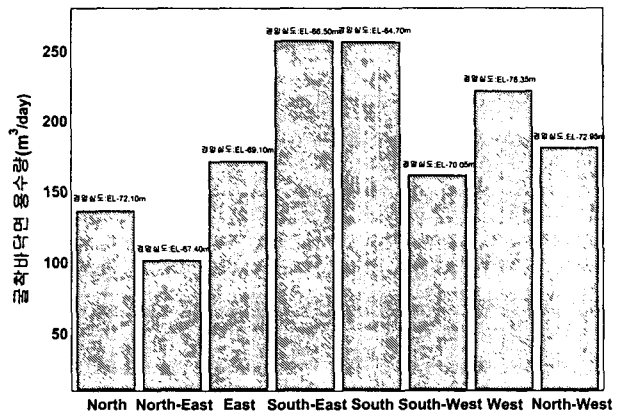


그림 4.4 Curtain-Grouting 시공전 경암층 심도에 따른 용수량 변화곡선

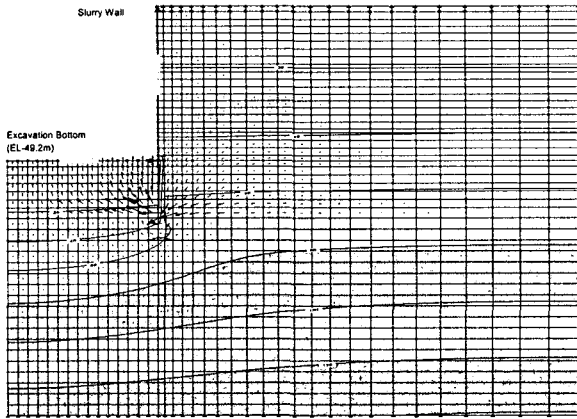
## 4.3 Curtain-Grouting 시공후의 침투해석 결과

Curtain-Grouting 시공후의 침투해석에서는 Pumping Test를 통하여 도출된 암반층의 투수계수를 적용하였다. Curtain-Grouting 심도는 11m, 두께는 2m이며, 투수계수는  $7.5 \times 10^{-6}$ cm/sec를 적용하여 해석을 수행하였다. 대표단면에 대한 격자 요소망과 경계조건, 해석결과는 그림 4.5에 나타난 바와 같다. 그

림 4.5에서 보는 바와 같이 총용수량이 327.72m<sup>3</sup>/day로 설계용수량 326.5m<sup>3</sup>/day와 거의 동일한 결과를 나타내었다. TK-A탱크 지역의 방위별 Curtain-Grouting 시공심도와 각각의 방위별 용수량은 표 4.5에 나타낸 바와 같이, 풍화암 두께가 가장 두꺼운 South 방위에서 용수량이 집중되는 것으로 나타났으며, 총용수량 합계는 329.02m<sup>3</sup>/day로 대표단면의 용수량과 거의 동일한 결과를 나타내었다.

Description: IC-LNG #15 Tank  
 Comments: Curtain Grouting Seepage Volume Check  
 File Name: IC-Ing11.sep  
 Last Saved Date: 00-12-14  
 Last Saved Time: 오후 4:27:50  
 Analysis Type: Steady-State  
 Analysis View: Axisymmetric  
 Total Seepage Volume : 327.72m<sup>3</sup>/day  
 Excavation Bottom : 315.35m<sup>3</sup>/day  
 Slurry Wall : 12.37m<sup>3</sup>/day

표 4.5 TK-A탱크의 방위별 침투해석결과



방위	Curatain-Grouting 심도 (m)	풍화암 두께 (m)	굴착바닥면 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	슬러리월 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	총용수량 (m <sup>3</sup> /day)
N	EL-84.9	5.0	35.59	1.66	37.25
NE	EL-79.4	11.5	40.94	1.59	42.53
E	EL-79.9	10.3	27.96	1.63	29.59
SE	EL-83.9	13.6	27.56	1.65	29.21
S	EL-86.4	16.0	62.34	1.52	63.86
SW	EL-85.9	11.0	38.58	1.53	40.11
W	EL-87.4	15.9	38.18	1.65	39.83
NW	EL-87.4	13.1	45.03	1.61	46.64
합계					329.02

그림 4.5 Curtain-Grouting 용수량 검토 해석 결과

TK-B탱크 지역의 방위별 Curtain-Grouting 시공심도와 각각의 방위별 용수량은 표 4.6에 나타낸 바와 같으며, 총용수량 합계는 389.67m<sup>3</sup>/day로 대표단면에 비하여 61.95m<sup>3</sup>/day만큼 크게 산정 되었다. 또한, 경암층의 심도에 따른 용수량변화는 Curtain-Grouting시공전 용수량이 집중된 South-East, East, West방위에서 국부적으로 집중되는 것으로 나타났다. 경암층 심도에 따른 용수량 변화는 그림 4.6에 나타낸 바와 같다.

표 4.6 TK-B탱크의 방위별 침투해석결과

방위	Curtain-Grouting 심도(m)	경암심도 (m)	굴착바닥면 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	슬러리월 용수량 (m <sup>3</sup> /day)	총용수량 (m <sup>3</sup> /day)
N	EL-78.52	EL-72.1	39.14	1.63	40.77
NE	EL-73.10	EL-67.4	23.69	1.19	24.88
E	EL-70.38	EL-69.1	36.04	1.43	37.47
SE	EL-68.43	EL-66.5	68.62	1.23	69.85
S	EL-66.96	EL-64.7	59.05	1.27	60.32
SW	EL-74.62	EL-70.0	36.73	1.68	38.41
W	EL-78.39	EL-76.3	63.59	1.57	65.16
NW	EL-81.75	EL-72.9	51.14	1.67	52.81
합계					389.67

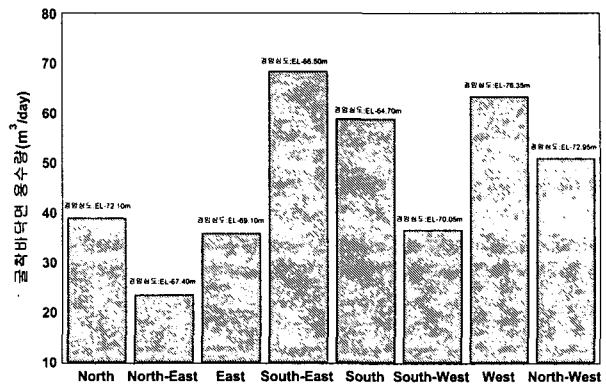


그림 4.6 Curtain-Grouting 시공후 경암층 심도 따른 용수량 변화곡선

#### 4.4 침투해석을 통한 히빙 안정성 검토결과

본 사례분석에서는 TK-A, TK-B탱크의 굴착면에서의 히빙을 검토하였으며, 굴착면 히빙검토방법은 유출동수경사에 의한 TK-A, TK-B탱크의 히빙안전율을 도출하였다. 유출동수경사는 침투해석시 사용 하였던 SEEP/W(Ver. 4.22)프로그램을 이용하여 굴착면에서의 유출동수경사(Y-Gradient)를 도출하였으며, 지층 변화에 대한 고려를 위하여 각각의 방위별 지층을 고려하여 검토를 수행하였다. 유출동수경사에 의한 TK-A, TK-B탱크 굴착면의 안전율은 그림 4.7에 나타낸 바와 같으며, 굴착 전단면에서의 안전율이 3~4이상을 나타내어 히빙에 대하여 안전한 것으로 나타났다.

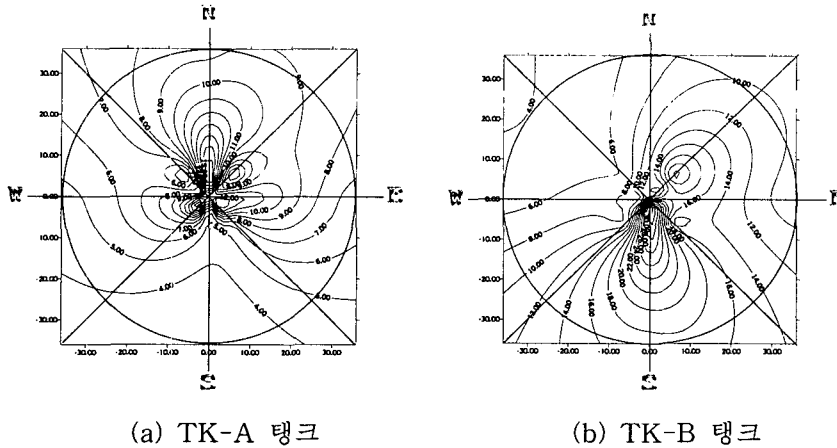


그림 4.7 유출동수경사에 따른 굴착면에서의 히빙에 대한 안전율 분포도

## 5. 결론

본 연구는 설계시 침투해석 및 투수계수변화, 대책공법 적용등의 사례분석과 추가적인 침투해석을 수행하여 다음과 같은 주요 결론을 도출하였다.

1. TK-A, TK-B탱크 지역에 대한 지반조사는 총 3차에 걸쳐 수행되었으며, 지반조사 결과를 바탕으로 슬러리월, 굴착공법 등 상세설계를 수행하였으나, 지반굴착과 풍화대의 암반층 지반조건변화로 인하여 굴착공사시 대단위의 용수량이 발생하였다. 즉, 설계 용수량 산정시 지반의 투수계수 및 지층 조건변화에 대한 면밀한 검토가 수행되어야 할 것으로 판단되며, 특히, 대심도의 굴착공사에서 용수량변화에 주요 영향인자인 암반층의 투수계수의 산정시 현장투수시험결과와 암반층 코아채취를 통한 풍화정도, 균열상태 등에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.
2. 설계시 침투해석을 위하여 선정된 대표단면의 경우, 슬러리월 상단의 토층변화(점토층, 모래층)에 대하여 충분히 고려하여 선정하였으나, 용수량변화에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 반면, 방위별 추가 침투해석결과, 풍화대층과 연암, 경암층의 지층변화에 따라 국부적으로 대단위의 용수량 집중이 발생되었다. 즉, 굴착공사를 위한 슬러리월, Deep-Well, Curtain-Grouting 등의 설계시 방위별 침투해석을 통하여 국부적 용수량 집중을 고려하여야 할 것으로 판단된다.
3. 대표단면에 대한 검토용수량은 Curtain-Grouting 시공전 용수량을 제외하고는 설계시의 용수량과 거의 동일한 값을 나타내며, Curtain-Grouting 시공전 용수량의 경우, 지하수 영향반경 및 미소한 해석조건 변화로 차이가 발생된 것으로 판단된다.
4. TK-A, TK-B탱크 지역의 방위별 검토용수량은 TK-A탱크의 경우, 대표단면의 용수량과 거의 동일한 값을 나타내었으며, TK-B탱크는 대표단면의 용수량에 비하여 18.9~32.7%까지 증가하는 것으로 나타났다. 또한, Curtain-Grouting 시공전의 용수량은 TK-A, TK-B탱크 모두, 허용용수량의 약 2~3배 이상 발생되었으나, Curtain-Grouting 시공후의 용수량은 허용용수량 이하로 감소하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 사단법인 인천과학아카데미(2000), "OO LNG 인수기지 #OO, OO탱크의 기초지반 안정성검토에 관한 연구", 연구보고서.
2. 사단법인 대한토목학회(2000), "OO LNG 생산기지 #OO, OO탱크 지반침하관련 구조물안전 및 안정성 평가와 대책공법의 타당성검토", 연구보고서.
3. Cedergren, H. R.(1977), "Seepage, Drainage, and Flow Nets", Second Edition, JOHN WILEY & SONS.
4. Geo-Slope International Ltd(1994), "User's Guide SEEP/W for finite element seepage analysis" Version 3.
5. Harza, L. F.(1935), "Uplift and Seepage under Dams in Sand", Transaction ASCE, Vol. 100.