

**단층파쇄대 및 침하에 관련된 대규모 전면기초
설계사례 및 유의사항**
**Design and Recommendations of Large Mat Foundation Related
to Fault Zone and Settlements**

1. 서론
2. 사례 I
3. 사례 II
4. 결론

김홍택

Hong-Taek Kim

홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik Univ.

강인규

In-Kyu Kang

(주)브니엘컨설턴트 책임

Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

단층파쇄대 및 침하에 관련된 대규모 전면기초 설계사례 및 유의사항

Design and Recommendations of Large Mat Foundation Related to Fault Zone and Settlements

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 강인규²⁾, In-Kyu Kang

- ¹⁾ 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik Univ.
- ²⁾ (주)브니엘컨설팅 책임
Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

1. 서론

본 고에서는 기초지반 주변에 단층파쇄대가 존재하는 경우에서의 대규모 전면기초의 3차원 해석사례(사례 I)와 시공 중 당초 설계시의 예상침하량 이상으로 침하가 발생하여 이에 대한 원인규명을 위해 수행한 해석사례(사례 II)를 정리하였다. 사례 I에서는 기초지반 주변에 단층파쇄대의 존재로 인해 기초 지지력의 저하 및 부등침하 등이 예상되므로 기초설계시 이에 대한 영향을 반영하기 위해 기초지반 주변의 단층파쇄대를 고려한 3차원 해석사례를 정리하였다. 또한 사례 II에서는 LNG 지하저장탱크 콘크리트 저판(바닥슬래브)이 당초 설계시의 예상침하량 보다 과다하게 발생하여 이에 대한 원인 분석을 체계적으로 살펴보기 위한 단계적 노력이 이루어 졌다. 이상과 같이 대규모 전면기초의 설계와 관련하여 수행된 몇 가지 해석사례로 부터 향후 유사 설계사례에 도움이 되었으면 한다.

2. 사례 I

본 사례는 기초지반 주변에 그림 2.1과 같이 단층파쇄대(N70E/70~80SE, EW~N60E/70~80SE)가 존재하여 이에 대한 영향을 반영하기 위해 기초지반 주변의 shear zone을 고려한 3차원 해석을 실시한 것으로 해석은 FLAC-3D(Ver 2.0) 프로그램을 사용하였다. 해석에 사용한 격자요소망은 그림 2.2와 같으며, Mat 기초는 Shell 요소로 모델링하였다. 해석에 사용한 Mat 기초의 특성치는 표 2.1과 같으며, 지반 특성치는 재하시험결과로부터 표 2.2와 같이 결정하였다.

표 2.1 해석에 사용한 Mat 기초의 특성치

Unit Weight(t/m ³)	Young's Modulus(Pa)	Poisson's Ratio	Thickness(m)
2.4	2.305 × 10 ¹⁰	0.18	3.75

표 2.2 해석에 사용한 지반의 특성치

구 분	Foundation Rock	Shear Zone-I	Shear Zone-II
Type	FSR	Fracture Zone	Fault Zone
단위중량(t/m ³)	2.60	2.30	2.20
내부마찰각(°)	40	30	27
점착력(t/m ²)	12	8	6.5
전단탄성계수(Pa)	1.50 × 10 ⁹	3.12 × 10 ⁸	1.60 × 10 ⁸
체적탄성계수(Pa)	3.25 × 10 ⁹	9.35 × 10 ⁸	4.79 × 10 ⁸

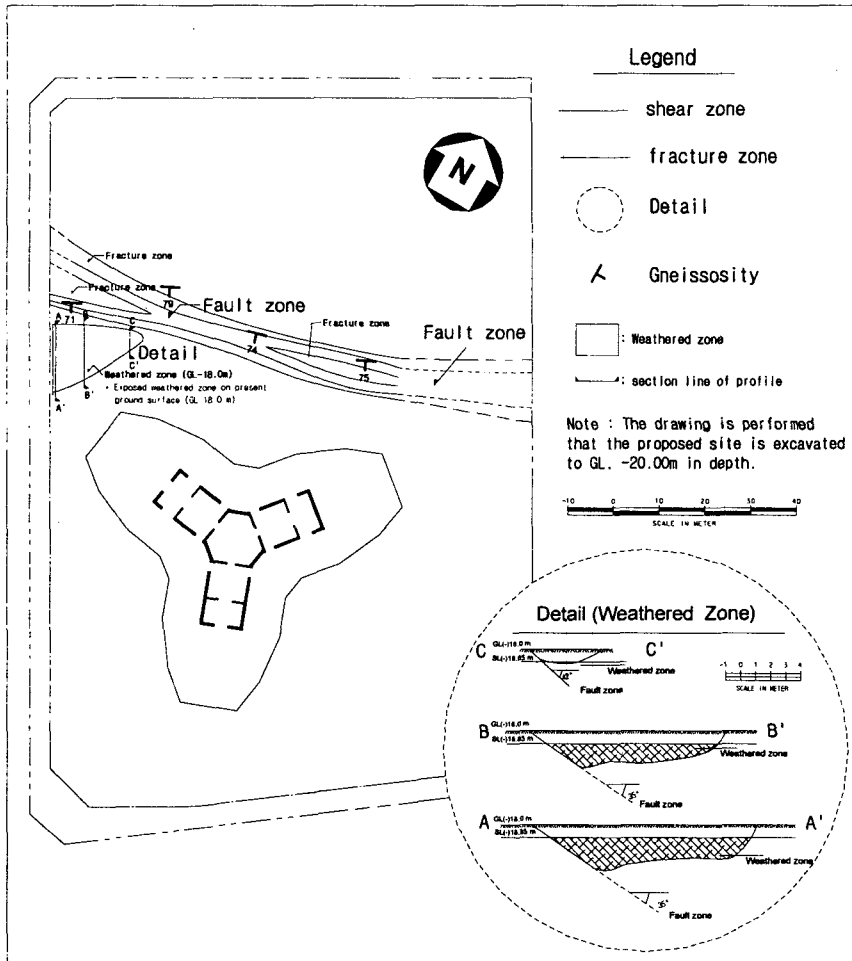


그림 2.1 기초지반 주변의 지질현황

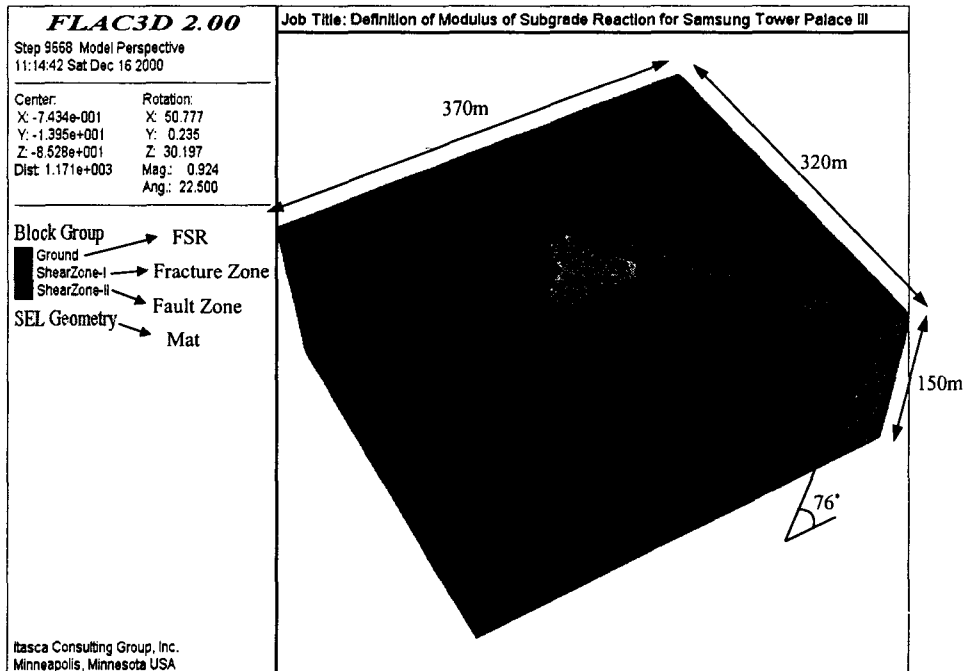


그림 2.2 해석에 사용한 격자요소망

2.1 작용하중

Mat 기초에 작용하는 하중은 건물의 자중, 작업하중 등의 활하중 및 풍하중 등으로 작용이 예상되는 다양한 하중의 크기를 각 기둥별(그림 2.3) 요약·정리하면 표 2.3과 같다. 또한 해석에 사용된 하중계수 및 하중조합은 식(2.1)과 같다.

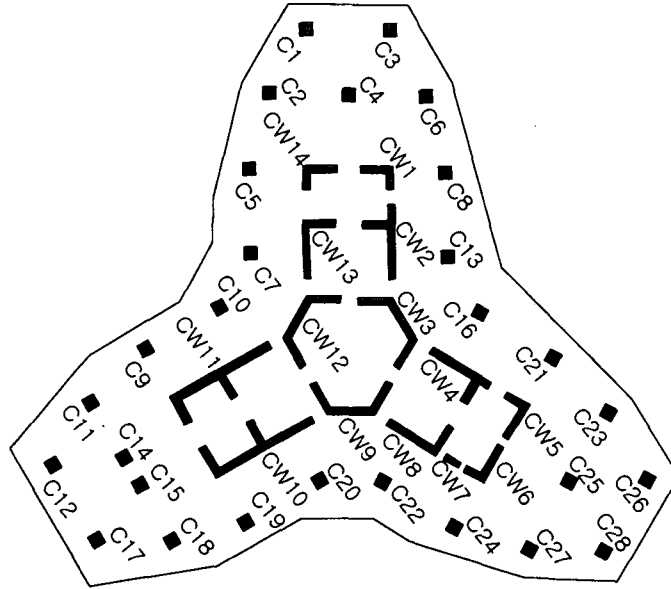


그림 2.3 작용하중의 위치 평면도

표 2.3 작용하중(단위 : kN)

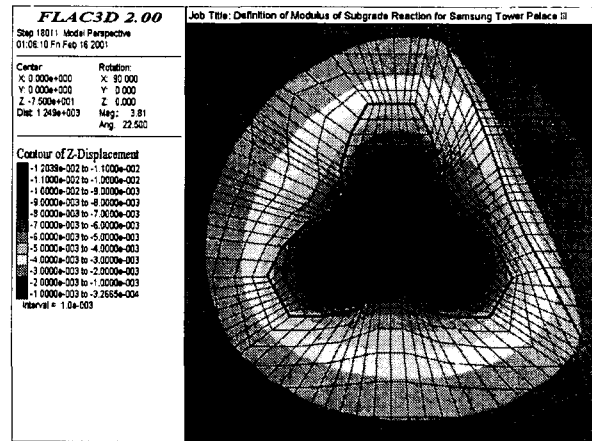
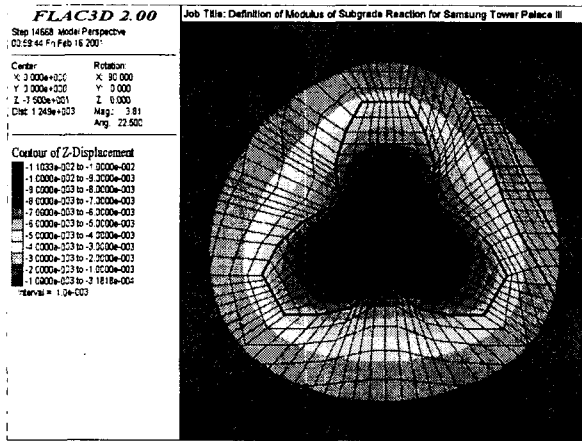
Column	DL	SDL	LL	Wind Loads in Various Directions				Column	DL	SDL	LL	Wind Loads in Various Directions			
				WL (East)	WL (West)	WL (North)	WL (South)					WL (East)	WL (West)	WL (North)	WL (South)
C 1	22905	9346	5434	-11075	10700	4191	-4056	C22	22368	8549	5364	4847	-4672	-1649	1571
C 2	23815	9704	5621	-9918	9574	1824	-1767	C23	18168	7022	4271	6738	-6500	7400	-7143
C 3	21383	8717	5092	-9377	9061	7077	-6838	C24	21048	7968	4954	7944	-7647	-14	14
C 4	9263	3805	3040	-883	885	481	-482	C25	9798	4169	3384	915	-918	523	-525
C 5	23923	9545	5592	-8112	7809	-203	193	C26	17843	6774	4304	9390	-9073	7296	-7046
C 6	20937	8516	4973	-6730	6495	7243	-6994	C27	19943	7602	4674	9791	-9449	2043	-1975
C 7	24205	9553	5772	-5076	4893	-1777	1691	C28	18782	7081	4517	11016	-10642	4444	-4297
C 8	20320	8061	4781	-4052	3892	6663	-6424	CW 1	31,965	12,031	7,087	-11689	11704	9195	-8752
C 9	26324	10287	6144	-4134	3991	-7412	7073	CW 2	62,384	22,838	13,501	-13010	12344	16734	-15987
C10	24905	9772	5931	-3905	3768	-3892	3713	CW 3	59,692	21,616	13,548	-114	110	10326	-9433
C11	27525	10823	6307	-3341	3227	-9979	9574	CW 4	59,098	21,046	12,809	12949	-12282	17061	-16302
C12	28683	11220	6741	-1908	1842	-12237	11766	CW 5	28,939	10,377	6,426	11678	-11680	9512	-9047
C13	20644	8098	4968	-1207	1161	4828	-4660	CW 6	29,472	10,559	6,535	14482	-13972	5110	-5148
C14	7683	2815	2155	-570	541	-846	844	CW 7	11,597	4,172	2,484	4942	-4718	857	-877
C15	7557	2748	2128	531	-502	-826	826	CW 8	46,986	16,858	10,324	14757	-14295	835	-950
C16	20207	7859	4871	1184	-1138	4858	-4688	CW 9	63,081	22,840	14,562	8875	-8103	-4264	3985
C17	28083	10895	6607	1394	-1346	-12194	11726	CW10	117,216	42,854	25,666	12713	-12190	-35784	34405
C18	26400	10212	6058	2879	-2782	-9898	9499	CW11	80,318	28,841	17,569	-9285	8910	-25191	24910
C19	24877	9506	5824	3724	-3598	-7308	6978	CW12	24,289	23,539	14,818	-9479	8636	-4283	3994
C20	23476	8997	5614	3605	-3479	-3786	3614	CW13	50,262	18,715	11,024	-14962	14492	623	-745
C21	18834	7249	4452	4066	-3905	6767	-6521	CW14	12,730	4,791	2,730	-5006	4782	784	-807

$$\begin{aligned}
 \text{하중조합 I} &= 0.75 [1.5(DL + SDL) + 1.8(LL + WL_{(East)})] \\
 \text{하중조합 II} &= 0.75 [1.5(DL + SDL) + 1.8(LL + WL_{(West)})] \\
 \text{하중조합 III} &= 0.75 [1.5(DL + SDL) + 1.8(LL + WL_{(North)})] \\
 \text{하중조합 IV} &= 0.75 [1.5(DL + SDL) + 1.8(LL + WL_{(South)})]
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

여기서, DL : 사하중, SDL : 추가 사하중, LL : 활하중, WL : 풍하중

2.2 침하분석

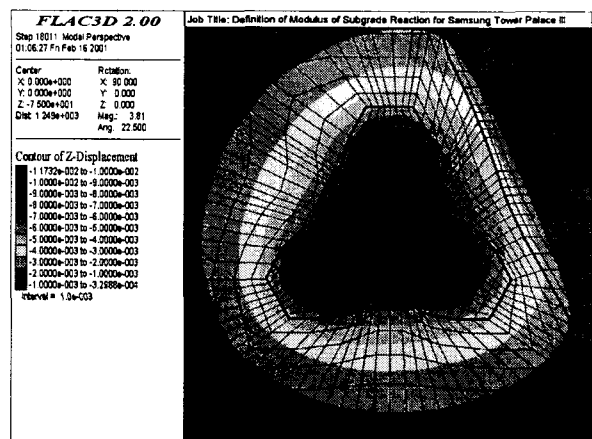
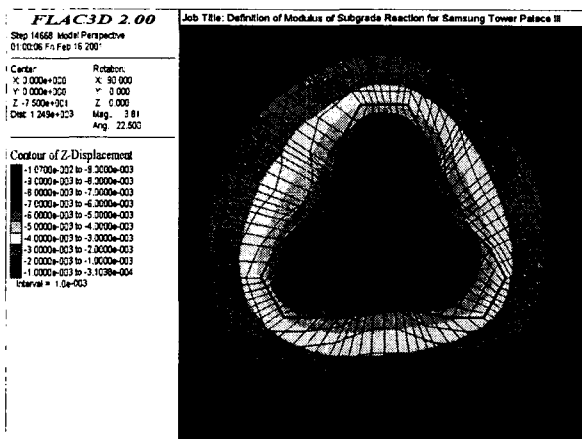
FLAC-3D 프로그램 해석을 통해 계산된 침하량을 shear zone의 영향을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 2가지로 각각 구분하여 정리하면 그림 2.4~2.7과 같다.



(a) shear zone의 영향을 고려하지 않은 경우

(b) shear zone의 영향을 고려한 경우

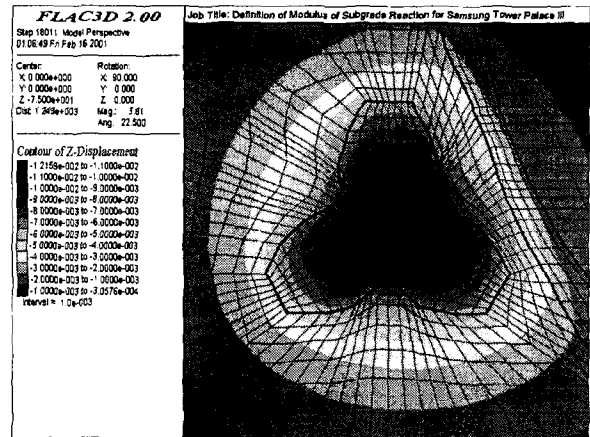
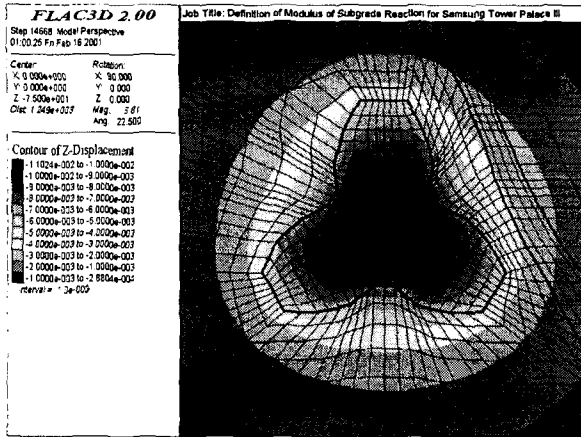
그림 2.4 연직침하량 분포도(하중조합 I의 경우)



(a) shear zone의 영향을 고려하지 않은 경우

(b) shear zone의 영향을 고려한 경우

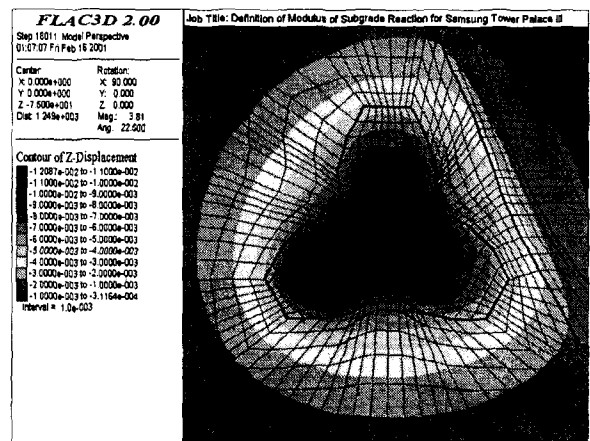
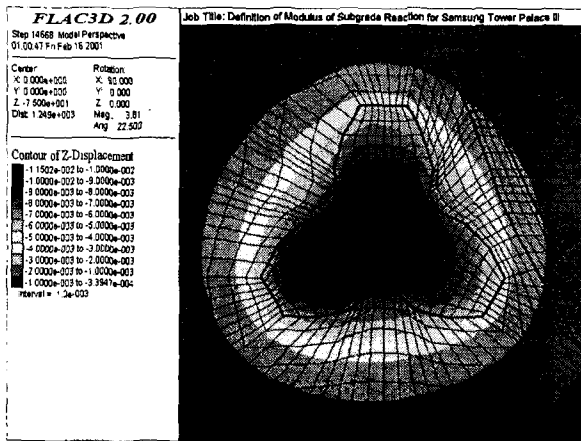
그림 2.5 연직침하량 분포도(하중조합 II의 경우)



(a) shear zone의 영향을 고려하지 않은 경우

(b) shear zone의 영향을 고려한 경우

그림 2.6 연직침하량 분포도(하중조합 III의 경우)



(a) shear zone의 영향을 고려하지 않은 경우

(b) shear zone의 영향을 고려한 경우

그림 2.7 연직침하량 분포도(하중조합 IV의 경우)

그림 2.4~2.7과 같이 각 하중조합별 발생하는 연직방향 침하량은 풍하중의 방향에 따라 shear zone의 영향을 고려하지 않은 경우에는 10.70~11.50mm가 발생하는 것으로 계산되었으며, shear zone의 영향을 고려한 경우에는 11.73mm~12.16mm가 발생하는 것으로 평가되었다. 따라서 shear zone의 영향을 고려할 경우 shear zone의 영향을 고려하지 않은 경우에 비해 5.1~10.3% 정도 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

3. 사례 II

3.1 침하발생 현황

LNG 지하저장탱크(TK-211, TK-212) 저판하부 기초지반에서 발생한 침하는 저판 1단 및 2단 콘크리트 타설 중 저판에 매설된 침하계측기(수직변위계, 철근계)에서 침하가 감지되어, 타설 후 상부에 노출된 전단철근의 상부레벨 및 측벽에 설치된 저판 1단 거푸집의 레벨을 측량하여 계측하였으며, 계측결과는 표 3.1, 그림 3.1 및 3.2와 같다.

표 3.1 LNG 지하저장탱크 저판의 실측 침하량

구 분	TK-211	TK-212	비 고
1단 콘크리트 타설시	최대 30cm	최대 10cm	
2단 콘크리트 타설시	최대 2.5cm	최대 2.3cm	

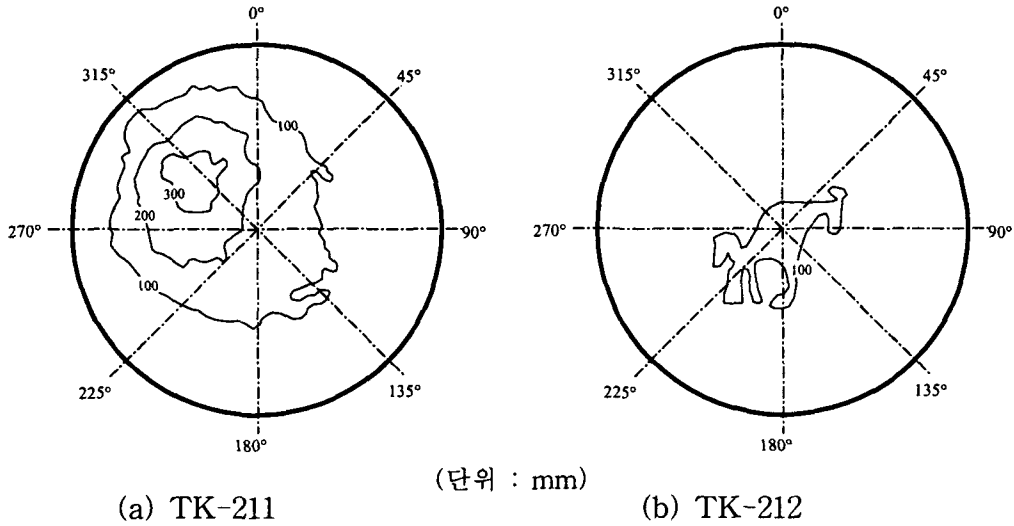


그림 3.1 LNG 지하저장탱크 저판의 침하분포도(1단 콘크리트 타설시)

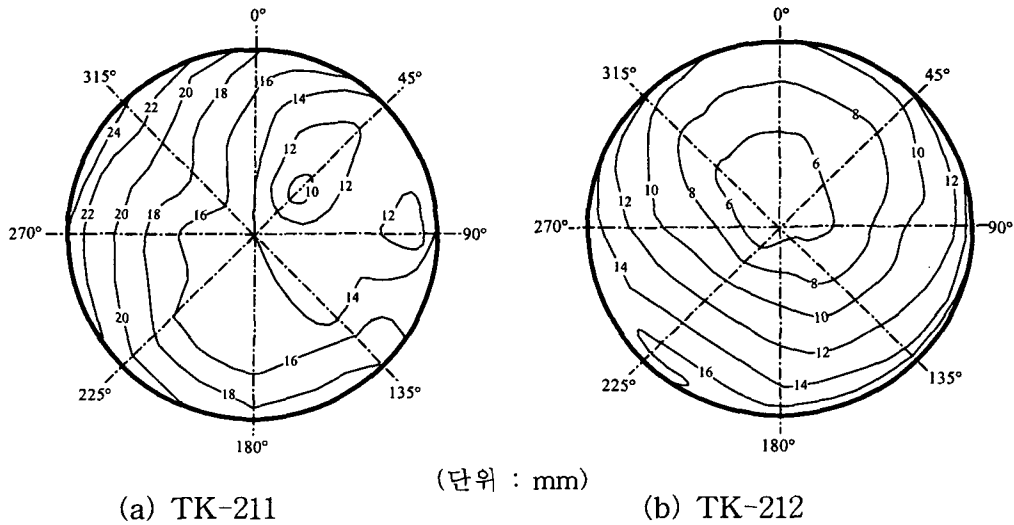
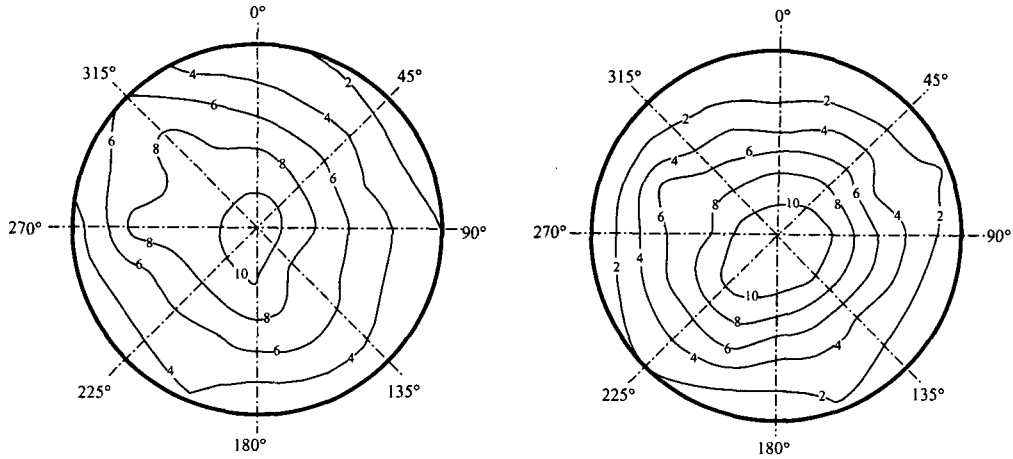


그림 3.2 LNG 지하저장탱크 저판의 침하분포도(2단 콘크리트 타설시)

또한 그림 3.3은 LNG 지하저장탱크 저판 1, 2단 콘크리트 타설 이후 최근까지 계측된 추가 침하량을 도시한 것으로서, 탱크의 중앙부에서 비교적 추가 침하가 크게 발생한 양상을 보이고 있다. 그 크기는 최대 11mm 정도의 추가 침하가 발생한 이후 추가 침하가 거의 진행되지 않는 것으로 계측되었다.



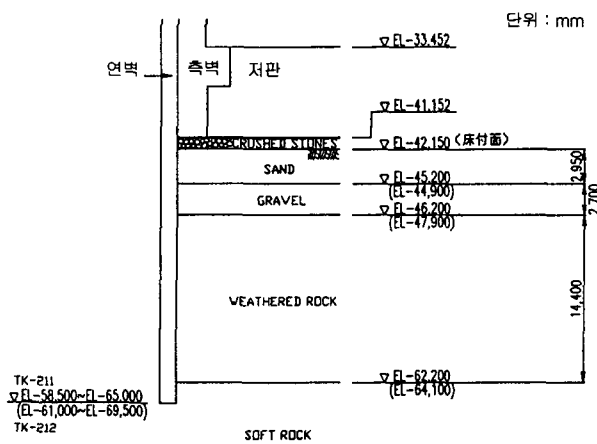
(단위 : mm)

(a) TK-211(1999. 12~2000. 6)

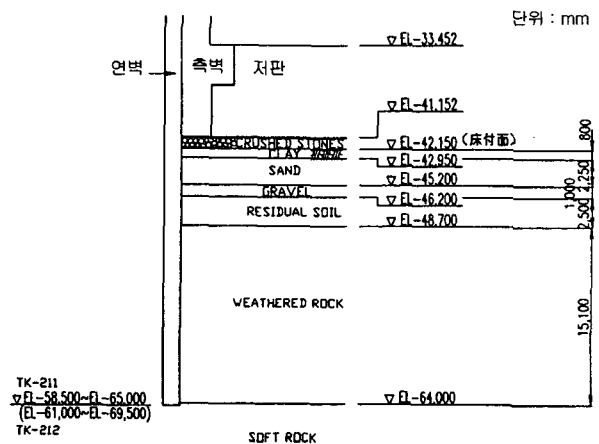
(b) TK-212(1999. 11~2000. 6)

그림 3.3 LNG 지하저장탱크 저판의 침하분포도

당초 설계시 LNG 지하저장탱크(TK-211, TK-212) 저판하부 기초지반의 대표단면은 그림 3.4(a)와 같으며, 또한 그림 3.4(b)는 인접한 LNG 탱크 TK-214의 굴착시 저판바닥 설치면 지반 부근(EL. -46 ~ -48m)의 풍화암층 지층상태를 추가로 확인하여(운모 혼합의 실트질 모래를 residual soil로, 그 아래에 존재하는 백색과 회색이 점재하는 형태의 색조를 띤 풍화암을 weathered rock으로 분류하여), 그림 3.4(a) 대표단면에 대해, 추정하여 제시된 지층구조(이하 '추정 현상태'로 정의함)에 해당된다.



(a) 당초 설계시



(b) 추정 현상태

그림 3.4 LNG 지하저장탱크 저판하부 기초지반의 지층구조

과다침하 발생 이후 추정하여 제시된 그림 3.4(b)의 지층구조에서, 풍화잔류토층은 N값이 50~100 정도로 대단히 조밀한 상태였으며, 공내재하시험으로 부터 측정된 변형계수를 분석한 결과 견고하여 당초 설계시에는 풍화암으로 분류하였으나, 전술한 바와 같이, 인접한 LNG 탱크 TK-214의 굴착시 풍화잔류토 및 풍화암으로 구분하여 채취된 시료에 대해 압밀시험을 실시한 결과 그림 3.5와 같이 재압축률이 비교적 큰 것으로 나타났다.

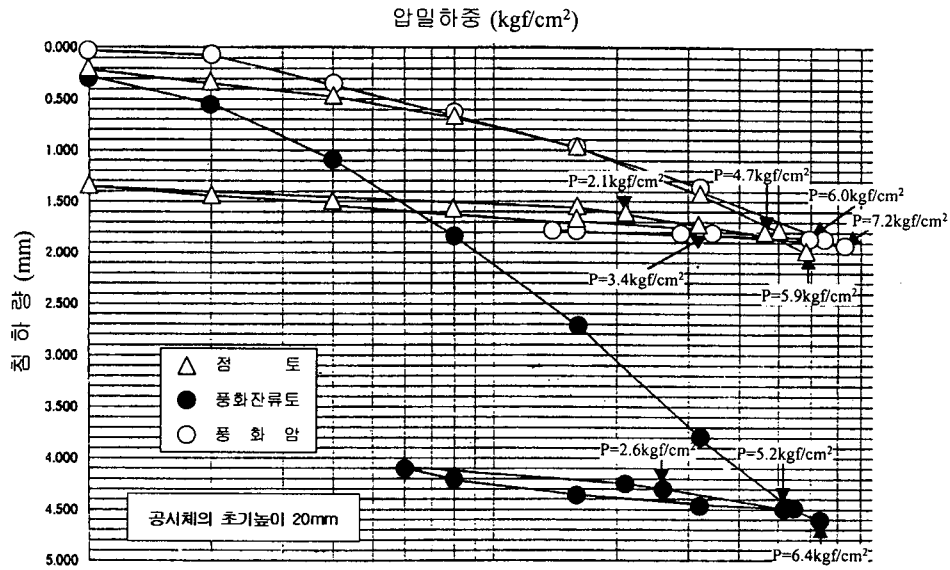


그림 3.5 LNG 지하저장탱크(TK-211, TK-212) 저판하부 기초지반의 압밀특성

3.2 침하발생 원인분석

3.2.1 시공단계별 압밀침하량 분석

본 절에서는 ‘당초 설계시’ 및 ‘추정 현상태’ 지층구조 각각에 대해, 저판하부 기초지반에서 예상되는 압밀침하량을 동결축진공정 개시 이전까지, 시공단계별(그림 3.6)로 분석하였다. 본 분석에 사용한 프로그램은 TCON으로 1차원 유한요소법에 의한 압밀침하 해석용 프로그램이다. TCON 프로그램 압밀침하 해석에 적용된 저판하부 기초지반의 관련특성치는 표 3.2 및 3.3과 같다.

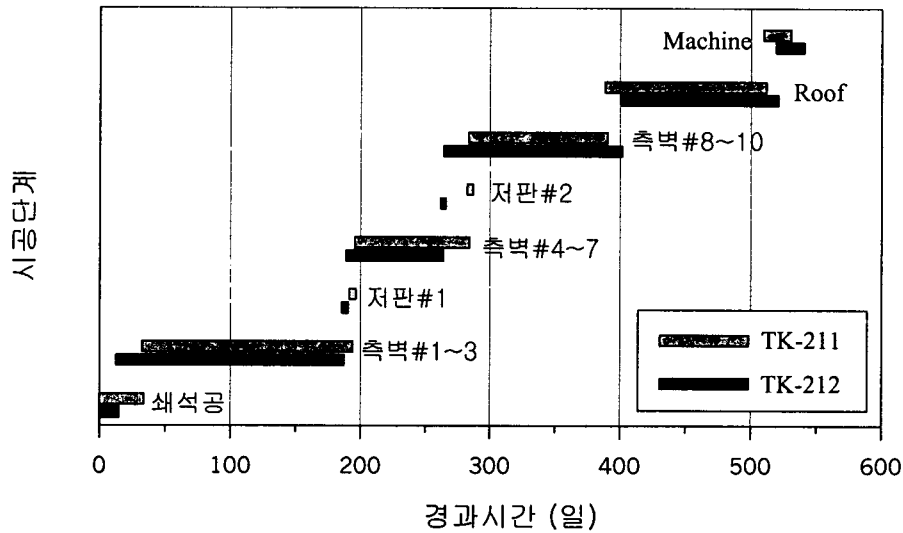


그림 3.6 LNG 지하저장탱크(TK-211, TK-212)의 시공 주요공정

표 3.2 LNG 지하저장탱크(TK-211, TK-212) 저판하부 기초지반의 특성치(당초 설계시)

특성치 지층	습윤중량 (kg/m ³)	함수비 (%)	비중	압축지수	팽창지수	압밀계수	팽창계수
실트질 모래	2030	23.0	2.66	-	-	-	-
자갈	2030	23.0	2.66	-	-	-	-
풍화암	2200	20.0	2.70	0.21	0.018	7.51	3.66
연암	2600	10.0	2.70	-	-	-	-
경암	2630	10.0	2.63	-	-	-	-

표 3.3 LNG 지하저장탱크(TK-211, TK-212) 저판하부 기초지반의 특성치(추정 현상태)

특성치 지층	습윤중량 (kg/m ³)	함수비 (%)	비중	압축지수	팽창지수	압밀계수	팽창계수
점토	2090	21.0	2.60	0.14	0.051	0.657	1.23
실트질 모래	2000	21.0	2.60	-	-	-	-
자갈	2090	12.0	2.66	-	-	-	-
풍화토	2050	32.0	2.68	0.28	0.128	1.909	2.06
풍화암	2080	20.0	2.64	0.21	0.018	7.51	3.66
연암	2600	10.0	2.70	-	-	-	-
경암	2630	10.0	2.63	-	-	-	-

각 지층별 및 시공단계별로 예측된 TCON 프로그램 압밀침하량 해석결과는 표 3.4 ~ 3.6에 요약 정리되어 있으며, 이 결과를 경과시간에 따른 누적 압밀침하량 형태로 도시하면 그림 3.7 및 3.8과 같다. 실제 시공시, 측벽과 저판은 분리되어 시공되므로, 본 TCON 프로그램 압밀침하 해석에서는 측벽하중이 저판하부 기초지반의 압밀침하에 미치는 영향은 고려하지 않았다.

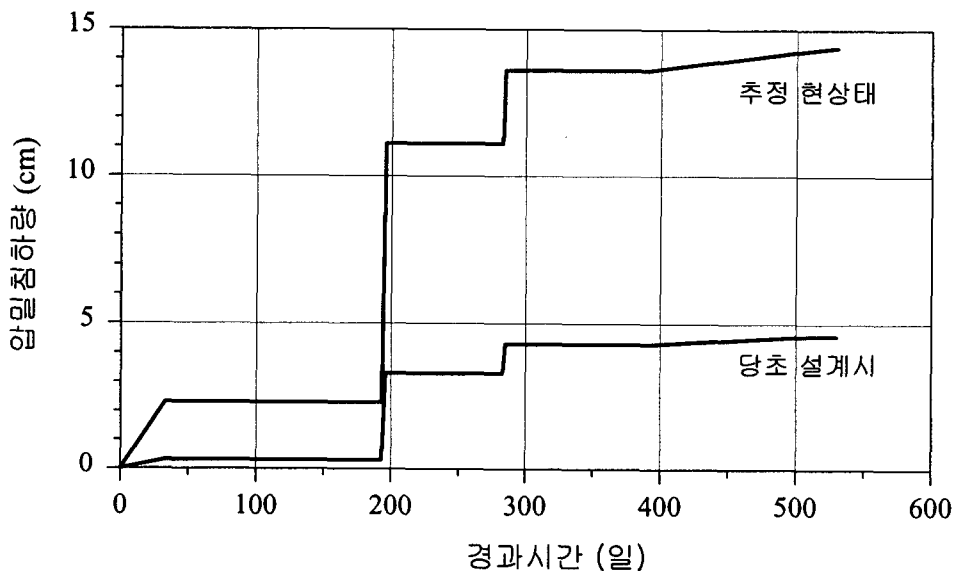


그림 3.7 경과시간에 따른 LNG 탱크(TK-211) 기초지반의 누적 압밀침하량

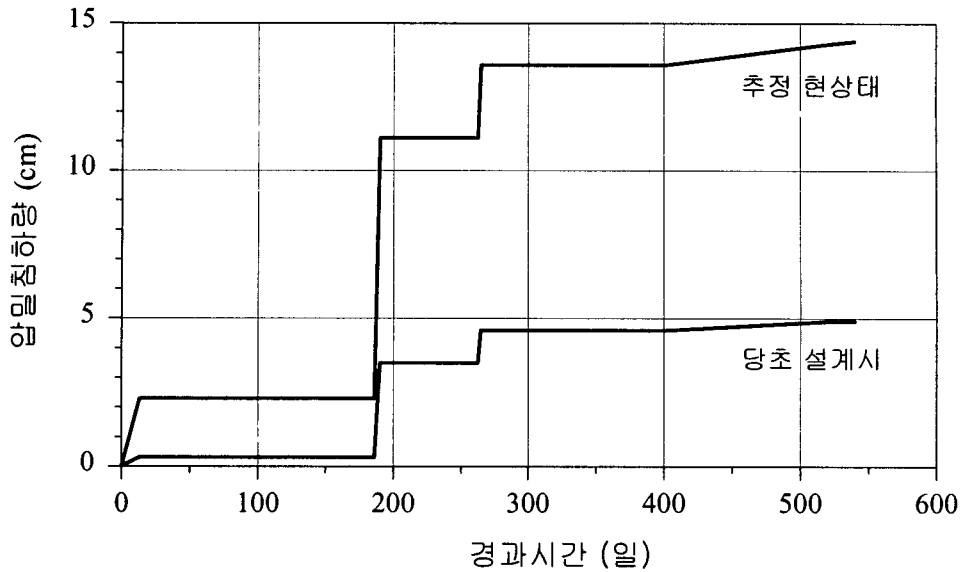


그림 3.8 경과시간에 따른 LNG 탱크(TK-212) 기초지반의 누적 압밀침하량

우선 ‘추정 현상태’ 지층구조에 대한 TCON 프로그램 압밀침하량 해석결과를 살펴보면, 저판 1단, 2단 타설과정 중에 총 11.3cm의 압밀침하가 예측됨을 알 수 있다. 이와 같은 압밀침하량 예측결과는, LNG 탱크 TK-212의 경우, 저판 #1부터 저판 #2까지의 시공과정에서 실제 계측된 최대침하량 12.3cm와 1.0cm의 차이에 머물고 있으나, LNG 탱크 TK-211의 경우에는 실제 계측된 최대침하량 32.5cm와 21.2cm의 큰 차이를 보이고 있다. 여기서 ‘추정 현상태’의 경우, LNG 지하저장탱크 TK-211과 TK-212의 압밀해석시 적용된 지층구조는 동일하며, 단지 시공 주요공정 일정이 일부 차이가 있긴 하나, 해석결과는 결과적으로 거의 차이가 없었다.

비교상의 목적이긴 하나, 계속해서 ‘당초 설계시’ 지층구조에 대한 TCON 프로그램 압밀침하량 해석결과를 살펴보면, 저판 1단, 2단 타설과정 중에 총 4.0cm(LNG 탱크 TK-211의 경우) 및 4.3cm(LNG 탱크 TK-212의 경우)의 압밀침하가 예측됨을 알 수 있다. 이와 같은 압밀침하량 예측결과는, LNG 탱크 TK-212의 경우 실제 계측된 최대침하량 12.3cm와는 8.0cm의 차이를, 또한 LNG 탱크 TK-211의 경우에는 실제 계측된 최대침하량 32.5cm와 28.5cm의 상당히 큰 차이를 보이고 있다.

여기서, 기 분석된 5.1.3절 LNG 지하저장탱크 저판하부 기초지반의 층후 분석결과를 살펴보면, 기초지반중 점토층, 풍화잔류토층 및 풍화암층 등의 총두께는 TK-211의 경우와 TK-212의 경우가 대체적으로 서로 비슷하나, 실제 발생된 침하량 및 침하양상 등은 서로 상이한 결과를 나타내고 있다. 또한 본 절의 분석을 통해, TK-211의 경우 및 TK-212의 경우 각각에 대해 평가 예측된 압밀침하량도 서로 차이가 큰 결과를 나타내고 있다. 결국 이를 종합하면, 지층특성 등에 연관된 압밀침하 이외의 요인에 대한 검토가 필요시 되며, 따라서 본 연구에서는 추가적으로, LNG 지하저장탱크 저판하부 기초지반에서의 용수(히빙 등)에 의한 지반침하 가능성에 대해 분석이 계속 시행되었다.

3.2.2 용수시의 안정성 검토 및 탄성침하량 평가

본 절에서는 추가적으로, LNG 지하저장탱크 저판하부에서의 용수(Piping 등)에 의한 지반침하의 영향을 분석하기 위해, SEEP/W 프로그램을 이용하여 침투류 해석(Seepage Analysis)을 실시하였다.

(1) 지층별 투수계수 분석

‘당초 설계시’ 및 ‘추정 현상태’ 지층구조 각각에 대해 축대칭 2차원 침투류 문제로 가정하여 침투류 해석을 실시하였으며, 해석에 적용된 지층별 투수계수를 요약 정리하면 표 3.4와 같다.

표 3.4 LNG 지하저장탱크(TK-211, 212) 기초지반의 투수계수(단위: m/sec)

지 층	당초 설계시			추정 현상태		비 고
	기존자료	수 정		기존자료	수 정	
		용수량 400t/day	용수량 600t/day			
매 립 층	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	
실트질 모래 1	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	
점 토	-	-	-	4.0×10^{-9}	4.3×10^{-7}	
실트질 모래 2	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	3.6×10^{-7}	3.6×10^{-6}	
자 갈	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	2.5×10^{-5}	2.5×10^{-5}	
풍 화 토	-	-	-	1.3×10^{-8}	3.0×10^{-7}	
풍 화 암	6.0×10^{-7}	1.6×10^{-6}	1.0×10^{-6}	3.0×10^{-8}	3.0×10^{-6}	
연 암	3.0×10^{-7}	4.0×10^{-7}	1.9×10^{-6}	3.0×10^{-7}	3.0×10^{-6}	
경 암	2.0×10^{-7}	8.0×10^{-7}	2.1×10^{-6}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-6}	
Slurry Wall	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	

표 3.4에 명기된 '수정' 투수계수는 현장에서 콘크리트 저판 1단, 2단 타설이 실시된 시점에 측정된 실제 용수량 600t/day(TK-211 LNG 탱크의 경우) 및 400t/day(TK-212 LNG 탱크의 경우)에 근접하도록 투수계수를 역해석하여 본 연구에서 결정한 값이다. SEEP/W 프로그램에 의한 침투류 해석결과, LNG 지하저장탱크(TK-211, TK-212)의 저판 바닥면과 측면에서 유입되는 용수량은 표 3.5와 같다.

표 3.5 LNG 지하저장탱크(TK-211, TK-212)에 유입되는 용수량(단위: t/day)

구 분	당초 설계시			추정 현상태	
	기존자료	수 정		기존자료	수 정
		용수량 400t/day	용수량 600t/day		
바 닥 면	167.5	389.7	606.5	17.9	622.8
측 면	9.5	13.7	13.4	1.4	1.4
총 계	177.0	403.4	619.9	19.3	624.2

(2) 용수시 히빙에 대한 안정성 검토

본 분석에서는 용수로 인한 LNG 지하저장탱크(TK-211, TK-212) 저판 바닥면의히빙에 대한 안정성을 검토하였다. 여기서 '추정 현상태' 지층구조(그림 3.4(b) 참조)의 경우, 기 제시된 지층별 투수계수 값을 적용하여 용수량을 평가하여 보면, 실제 현장에서 측정된 용수량과 상당한 차이가 있는 점, 또한 관련자료에서 제시된 '추정현상태'의 투수계수는 압밀시험으로 부터 얻어진 체적변화계수를 토대로 계산된 결과이므로 실제의 투수계수와는 차이가 있을 수 있는 점 등, 현실적으로 맞지 않는 점이 있어, 본 분석에서는 '당초 설계시'의 지층구조를 토대로, 그림 3.9와 같이 3개의 지층 경계면에 대해 용수시 히빙에 대한 안정성을 각각 검토하였다. 이외에, 본 안정성 검토시 적용된 지반정수는 표 3.6에 요약 정리되어 있다.

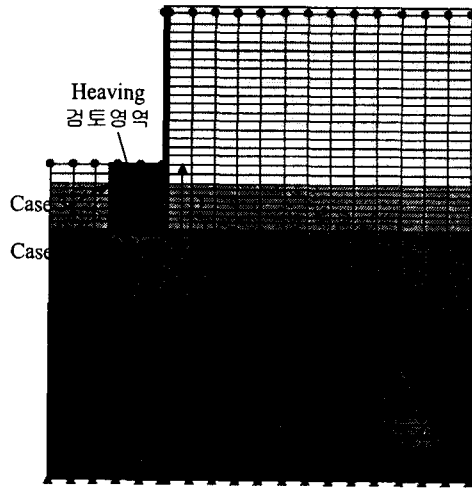


그림 3.9 히빙에 대한 안정성 검토단면

표 3.6 히빙에 대한 안정성 검토시 적용된 지반정수

토 층	두께 (m)	비 중	간극비	수중 단위중량 (kN/m ³)	중별 총 중량 (kN/m)	비 고
실트질 모래 2	2.95	2.66	0.63	9.99	709.54	
자갈	2.7	2.66	0.63	9.99	649.41	
풍화암	14.4	2.7	0.28	13.03	4516.86	
연암	1.8	2.7	0.07	15.59	675.42	

용수량이 당초 설계시와 같이 177t/day 정도인 경우, SEEP/W 프로그램 해석에 의거한 침투수압 평가결과를 요약 정리하면 표 3.7과 같다.

표 3.7 SEEP/W 프로그램 해석결과

LNG 탱크 중앙에서의 거리 (m)	절점에서의 장부수압 (kN/m ²)			비 고
	Case 1	Case 2	Case 3	
10.925	99.8	83.1	2.2	
14.0	102.5	86.5	2.2	
21.0	119.7	100.3	2.6	
28.0	145.5	127.0	3.0	
35.0	237.7	165.9	3.4	

1) Case 1 : Slurry Wall 하부 경계면에서 히빙에 대한 안정성 검토결과

• 토괴의 수중중량 :

$$W' = 709.54 + 649.41 + 4516.86 + 675.42 = 6551.23t/m$$

◦ 침투수압 :

$$U = \frac{1}{2}(99.8 + 102.5)(14.0 - 10.925) + \frac{1}{2}(102.5 + 119.7)(21.0 - 14.0) \\ + \frac{1}{2}(119.7 + 145.5)(28.0 - 21.0) + \frac{1}{2}(145.5 + 237.7)(35.0 - 28.0) \\ = 3356.23 \text{ t/m}$$

◦ 히빙에 대한 안정성 평가 :

$$F_s = \frac{W'}{U} = \frac{6551.23}{3356.23} = 1.95 > 1.2 \quad (\text{O.K})$$

2) Case 2 : 풍화암층 하부 경계면에서의 히빙에 대한 안정성 검토결과

◦ 토피의 수중중량 :

$$W' = 709.54 + 649.41 + 4516.86 = 5875.81 \text{ t/m}$$

◦ 침투수압 :

$$U = \frac{1}{2}(83.1 + 86.5)(14.0 - 10.925) + \frac{1}{2}(86.5 + 100.3)(21.0 - 14.0) \\ + \frac{1}{2}(100.3 + 127.0)(28.0 - 21.0) + \frac{1}{2}(127.0 + 165.9)(35.0 - 28.0) \\ = 2734.93 \text{ t/m}$$

◦ 히빙에 대한 안정성 평가 :

$$F_s = \frac{W'}{U} = \frac{5875.81}{2734.93} = 2.15 > 1.2 \quad (\text{O.K})$$

3) Case 3 : 자갈층 하부 경계면에서의 히빙에 대한 안정성 검토결과

◦ 토피의 수중중량 :

$$W' = 709.54 + 649.41 = 1358.95 \text{ t/m}$$

◦ 침투수압 :

$$U = \frac{1}{2}(2.2 + 2.2)(14.0 - 10.925) + \frac{1}{2}(2.2 + 2.6)(21.0 - 14.0) \\ + \frac{1}{2}(2.6 + 3.0)(28.0 - 21.0) + \frac{1}{2}(3.0 + 3.4)(35.0 - 28.0) \\ = 65.56 \text{ t/m}$$

◦ 히빙에 대한 안정성 평가 :

$$F_s = \frac{W'}{U} = \frac{1358.95}{65.56} = 20.7 > 1.2 \quad (\text{O.K})$$

용수량이 600t/day일 경우(TK-211), SEEP/W 프로그램 해석에 의거한 침투수압 평가결과를 요약 정리하면 표 3.8과 같다.

표 3.8 SEEP/W 프로그램 해석결과

LNG 탱크 중앙에서의 거리(m)	절점에서의 침투수압 (kN/m ²)			비 고
	Case 1	Case 2	Case 3	
10.925	251.9	238.1	9.3	
14.0	255.0	241.1	9.5	
21.0	267.8	252.8	9.9	
28.0	287.2	273.7	10.4	
35.0	331.3	302.8	10.8	

1) Case 1 : Slurry Wall 하부 경계면에서의 히빙에 대한 안정성 검토결과

◦ 토피의 수중중량 :

$$W' = 709.54 + 649.41 + 4516.86 + 675.42 = 6551.23\text{t/m}$$

◦ 침투수압 :

$$U = \frac{1}{2}(251.9 + 255.0)(14.0 - 10.925) + \frac{1}{2}(255.0 + 267.8)(21.0 - 14.0) \\ + \frac{1}{2}(267.8 + 287.2)(28.0 - 21.0) + \frac{1}{2}(287.2 + 331.3)(35.0 - 28.0) \\ = 6716.46\text{ t/m}$$

◦ 히빙에 대한 안정성 평가 :

$$F_s = \frac{W'}{U} = \frac{6551.23}{6716.46} = 0.98 < 1.2 \quad (\text{N.G})$$

2) Case 2 : 풍화암층 하부 경계면에서의 히빙에 대한 안정성 검토결과

◦ 토피의 수중중량 :

$$W' = 709.54 + 649.41 + 4516.86 = 5875.81\text{t/m}$$

◦ 침투수압 :

$$U = \frac{1}{2}(238.1 + 241.1)(14.0 - 10.925) + \frac{1}{2}(241.1 + 252.8)(21.0 - 14.0) \\ + \frac{1}{2}(252.8 + 273.7)(28.0 - 21.0) + \frac{1}{2}(273.7 + 302.8)(35.0 - 28.0) \\ = 6326.47\text{ t/m}$$

◦ 히빙에 대한 안정성 평가 :

$$F_s = \frac{W'}{U} = \frac{5875.81}{6326.47} = 0.93 < 1.2 \quad (\text{N.G})$$

3) Case 3 : 자갈층 하부 경계면에서의 히빙에 대한 안정성 검토결과

• 토괴의 수중중량 :

$$W' = 709.54 + 649.41 = 1358.95\text{t/m}$$

• 침투수압 :

$$U = \frac{1}{2}(9.3+9.5)(14.0-10.925) + \frac{1}{2}(9.5+9.9)(21.0-14.0) \\ + \frac{1}{2}(9.9+10.4)(28.0-21.0) + \frac{1}{2}(10.4+10.8)(35.0-28.0) \\ = 241.62\text{t/m}$$

• 히빙에 대한 안정성 평가 :

$$F_s = \frac{W'}{U} = \frac{1358.95}{241.62} = 5.6 > 1.2 \quad (\text{O.K.})$$

용수량이 400t/day일 경우(TK-212), SEEP/W 프로그램 해석에 의거한 침투수압 평가결과를 요약 정리하면 표 3.9와 같다.

표 3.9 SEEP/W 프로그램 해석결과

LNG 탱크 중앙에서의 거리(m)	절점에서의 침투수압 (kN/m ²)			비 고
	Case 1	Case 2	Case 3	
10.925	123.5	87.8	5.6	
14.0	126.2	90.0	5.7	
21.0	139.5	98.5	6.3	
28.0	153.3	114.0	6.8	
35.0	239.4	137.8	7.3	

1) Case 1 : Slurry Wall 하부 경계면에서의 히빙에 대한 안정성 검토결과

• 토괴의 수중중량 :

$$W' = 709.54 + 649.41 + 4516.86 + 675.42 = 6551.23\text{t/m}$$

• 침투수압 :

$$U = \frac{1}{2}(123.5+126.2)(14.0-10.925) + \frac{1}{2}(126.2+139.5)(21.0-14.0) \\ + \frac{1}{2}(139.5+153.3)(28.0-21.0) + \frac{1}{2}(153.3+239.4)(35.0-28.0) \\ = 3713.11\text{t/m}$$

• 히빙에 대한 안정성 평가 :

$$F_s = \frac{W'}{U} = \frac{6551.23}{3713.11} = 1.76 > 1.2 \quad (\text{O.K.})$$

2) Case 2 : 풍화암층 하부 경계면에서의 히빙에 대한 안정성 검토결과

- 토괴의 수중중량 :

$$W' = 709.54 + 649.41 + 4516.86 = 5875.81\text{t/m}$$

- 침투수압 :

$$U = \frac{1}{2}(87.8 + 90.0)(14.0 - 10.925) + \frac{1}{2}(90.0 + 98.5)(21.0 - 14.0) \\ + \frac{1}{2}(98.5 + 114.0)(28.0 - 21.0) + \frac{1}{2}(114.0 + 137.8)(35.0 - 28.0) \\ = 2558.9\text{ t/m}$$

- 히빙에 대한 안정성 평가 :

$$F_s = \frac{W'}{U} = \frac{5875.81}{2558.9} = 2.30 > 1.2 \quad (\text{O.K.})$$

3) Case 3 : 자갈층 하부 경계면에서의 히빙에 대한 안정성 검토결과

- 토괴의 수중중량 :

$$W' = 709.54 + 649.41 = 1358.95\text{t/m}$$

- 침투수압 :

$$U = \frac{1}{2}(5.6 + 5.7)(14.0 - 10.925) + \frac{1}{2}(5.7 + 6.3)(21.0 - 14.0) \\ + \frac{1}{2}(6.3 + 6.8)(28.0 - 21.0) + \frac{1}{2}(6.8 + 7.3)(35.0 - 28.0) \\ = 154.5\text{ t/m}$$

- 히빙에 대한 안정성 평가 :

$$F_s = \frac{W'}{U} = \frac{1358.95}{154.5} = 8.80 > 1.2 \quad (\text{O.K.})$$

(3) 용수시의 탄성침하량 평가

본 분석에서는, LNG 지하저장탱크 저판 1단, 2단 타설이 시행된 시기에 용수에 따른 LNG 지하저장탱크 저판하부 기초지반에서의 탄성침하량을 평가하기 위해 지반-구조물 수치해석 프로그램인 FLAC-2D를 사용하였다. 본 해석시 쇄석공부터 저판#2 공정까지 적용한 용수량은, 저판 1단 타설이 실시된 시점에 현장에서 측정된 실제의 용수량 각각 600t/day(TK-211 LNG 탱크의 경우) 및 400t/day(TK-212 LNG 탱크의 경우)이고, 또한 지층별 투수계수는 전술한 용수량을 토대로 역해석을 시행하여 결정한 값들(표 3.4의 '수정' 값들 참조)을 적용하였다. 그 이후 측벽#8~10 공정부터 동결축진공정 개시 이전까지는 현장측정자료를 토대로 용수량 300t/day(TK-211, TK-212 LNG 탱크의 경우)를 적용하였다.

본 FLAC-2D 프로그램 해석에 적용된 지반정수를 당초 설계시 및 추정 현상태로 각각 구분하여 요약 정리하면 표 3.10 및 3.11과 같으며, 프로그램 해석결과는 표 3.12에 정리되어 있다.

표 3.10 LNG 지하저장탱크 기초지반의 탄성침하량 평가에 적용한 지반정수(당초 설계시)

지 층	단위중량 (t/m ³)	전단탄성계수 (Pa)	체적탄성계수 (Pa)	마찰각 (°)	점착력 (Pa)	비 고
매 립 층	1800	1.43×10^7	1.14×10^8	30	0	
실트질 모래 1	1920	2.67×10^7	1.32×10^9	36	0	
실트질 모래 2	2030	7.49×10^9	1.85×10^9	45	0	
자 갈	2030	1.04×10^8	2.58×10^9	45	0	
풍 화 압	2220	1.07×10^8	1.03×10^9	35	40000	
연 압	2600	5.42×10^8	3.69×10^9	37	60000	
경 압	2630	6.86×10^8	4.67×10^9	40	90000	
뒤 채 움 1	1900	1.38×10^7	6.87×10^8	30	0	지하수위 아래쪽
뒤 채 움 2	1900	1.43×10^7	1.14×10^8	30	0	지하수위 위쪽
Slurry Wall	2400	1.16×10^{10}	1.55×10^{10}	-	-	
Crushed Stone	1900	1.07×10^8	1.03×10^9	40	0	
측벽 콘크리트	2400	1.06×10^{10}	1.42×10^{10}	-	-	
바닥 슬래브	2400	0.95×10^{10}	1.27×10^{10}	-	-	

표 3.11 LNG 지하저장탱크 기초지반의 탄성침하량 평가에 적용한 지반정수(추정 현상태)

지 층	단위중량 (t/m ³)	전단탄성계수 (Pa)	체적탄성계수 (Pa)	마찰각 (°)	점착력 (Pa)	비 고
매 립 층	1800	1.43×10^7	1.14×10^8	30	0	
실트질 모래 1	2000	7.49×10^7	1.85×10^9	45	0	
점 토	2090	6.78×10^7	3.17×10^7	0	11400	
실트질 모래 2	2000	7.49×10^7	1.85×10^9	45	0	
자 갈	2090	1.04×10^8	2.58×10^9	45	0	
풍 화 토	2050	5.82×10^6	7.08×10^7	33	0	
풍 화 압	2080	1.00×10^7	9.67×10^7	35	40000	
연 압	2600	5.42×10^8	3.69×10^9	37	60000	
경 압	2630	6.86×10^8	4.67×10^9	40	90000	
뒤 채 움 1	1900	1.38×10^7	6.87×10^8	30	0	지하수위 아래쪽
뒤 채 움 2	1900	1.43×10^7	1.14×10^8	30	0	지하수위 위쪽
Slurry Wall	2400	1.16×10^{10}	1.55×10^{10}	-	-	
Crushed Stone	1900	1.07×10^8	1.03×10^9	40	0	
측벽 콘크리트	2400	1.06×10^{10}	1.42×10^{10}	-	-	
바닥 슬래브	2400	0.95×10^{10}	1.27×10^{10}	-	-	

표 3.12 LNG 지하저장탱크 기초지반의 누적 탄성침하량(단위: cm)

시공단계	TK-211의 경우		TK-212의 경우		용수량
	당초 설계시	추정 현상태	당초 설계시	추정 현상태	
쇄 석 공	-	-	-	-	(TK-211) 600t/day
측벽 #1~3	-	-	-	-	
저 판 #1	0.56	1.44	0.58	1.43	(TK-212) 400t/day
측벽 #4~7	0.56	1.45	0.59	1.48	
저 판 #2	0.77	1.89	0.81	1.91	(TK-211, TK-212) 300t/day
측벽 #8~10	0.79	1.83	0.81	1.81	
Roof	1.02	2.42	1.07	2.41	
Machine	1.05	2.50	1.11	2.49	

여기서 표 3.12에 정리된 누적 탄성침하량 해석결과를 시공단계별로 분석하여 보면, 쇄석공부터 측벽 #1~3까지의 공정에서는 지하굴착 및 용수 등으로 인하여 결과적으로 지반의 응력이 이완되어 구조물의 하중에 따른 탄성침하가 발생하지 않았고, 그 이후 저판 #1 공정 부터는 계속적으로 탄성침하가 발생하였다. 여기서, 표 3.12에 명기된 탄성침하량은 LNG 지하저장탱크 중앙부에서 침하량이다. 3.2.1절에서 기 분석된 압밀침하량과 3.2.2절에서 분석된 용수시 탄성침하량을 종합하면 LNG 지하저장탱크 TK-212의 경우는 총 13.21cm로 실제 측정된 침하량 12.3cm와 대체적으로 부합되는 경향을 보이고 있다. 그러나 LNG 지하저장탱크 TK-211의 경우는 기 분석된 압밀침하량과 본 절에서 분석된 용수시 탄성침하량을 종합하면 총 13.19cm로, TK-212의 경우와는 달리, 실제 측정된 침하량 32.5cm에 훨씬 못 미치는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 경향에 대한 원인을 추정하여 보면, LNG 지하저장탱크 TK-211의 경우는, 용수량이 600t/day일 경우 히빙에 대한 안정성이 충분치 못한 것으로 앞서 (2)에서 기 평가된 바 있으며, 따라서 이와 같은 과도한 용수에 따른 히빙 및 토사유출 등의 현상이 발생되어, TK-211의 경우는, 압밀침하 및 탄성침하 이외의 추가적인 침하가 유발되었을 가능성이 큰 것으로 판단된다.

3.3 향후 침하추이 검토

TCON 프로그램 해석에 의거한 압밀침하량 예측결과를 살펴보면, LNG 지하저장탱크(TK-211, TK-212) 저판 2단 타설 이후부터 향후 선급속동결 공정 개시 이전까지 예상되는 저판하부 기초지반의 압밀침하량은 0.8cm이며, 또한 용수시(용수량을 300t/day로 가정하여)의 탄성침하량은 0.58 ~ 0.61cm로, 결국 총 예상침하량은 1.38 ~ 1.41cm이다. 여기서, 저판 2단 타설 이후부터 최근까지 현장에서 실제 계측된 추가 침하량은 최대 11mm 정도로, 본 연구 예측치가 다소 크게 평가되기는 하나, 그 차이는 2.8 ~ 3.0mm 정도로 근소하며, 또한 그 이후 침하가 더 이상 진행되지는 않는 것으로 계측되긴 하나, 향후 내압기밀시험 및 선급속동결 등의 과정에서도 철저한 계측관리를 통해 침하에 대한 변화 추이를 계속적으로 확인함이 필요하며, 아울러 과도한 양수작업으로 인한 히빙 또는 토사유출 등이 발생하지 않도록 유의하여야 할 것이다. 참고적으로, 본 연구 SEEP/W 프로그램 해석을 통해 분석된 한계용수량을 제시하면 570t/day 정도이다(그림 3.10).

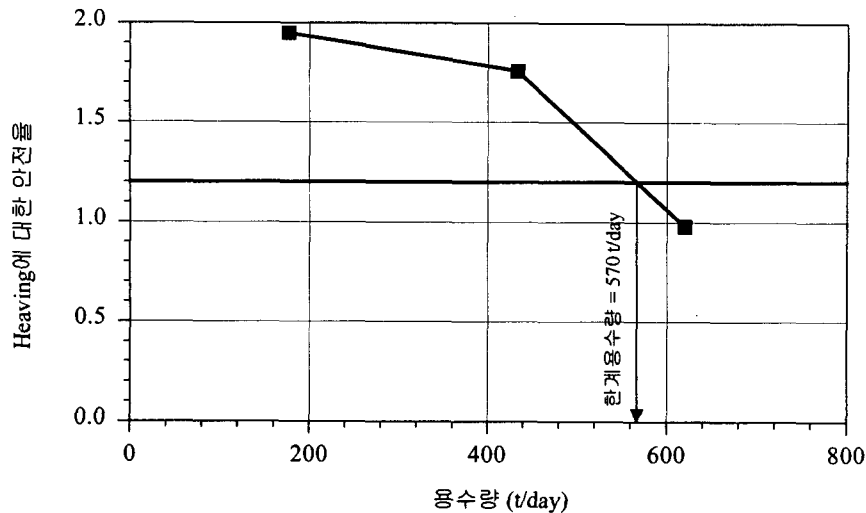


그림 3.10 한계용수량 분석결과

4. 결론

본 고에서는 기초지반 주변에 단층파쇄대가 존재하는 경우에서의 대규모 전면기초의 3차원 해석사례 (사례 I)와 시공 중 당초 설계시의 예상침하 이상으로 침하가 발생하여 이에 대한 원인규명을 위해 수행한 해석사례(사례 II) 등 대규모 전면기초의 설계와 관련하여 수행된 몇 가지 해석사례를 소개하였으며, 이상의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기초지반 주변의 shear zone을 고려한 3차원 해석 실시결과 연직방향 침하량은 풍하중의 방향에 따라 shear zone의 영향을 고려하지 않은 경우에는 10.70~11.50mm가 발생하는 것으로 계산되었으며, shear zone의 영향을 고려한 경우에는 11.73mm~12.16mm가 발생하는 것으로 평가되었다. 따라서 shear zone의 영향을 고려할 경우 shear zone의 영향을 고려하지 않은 경우에 비해 5.1~10.3% 정도 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 압밀에 의한 침하량(TCON 프로그램 해석)과 용수시 탄성침하량(FLAC-2D 프로그램 해석)을 종합하면, LNG 지하저장탱크 TK-212의 경우는, 콘크리트 저판하부 기초지반에서 총 13.2cm의 침하가 예상되고, 이와 같은 예측결과는 실제 측정된 침하량 12.3cm와 대체적으로 부합되는 경향을 보이고 있다. 그러나 TK-211의 경우는, 압밀침하량과 용수시 탄성침하량을 종합하면 총 13.19cm로, 실제 측정된 침하량 32.5cm에 훨씬 못 미치는 경향을 나타내고 있다.
- (3) 침투류 해석결과(SEEP/W 프로그램 해석), 용수량이 400t/day로 측정된 LNG 지하저장탱크 TK-212의 경우는, 히빙에 대한 안정성 확보가 가능하였던 것으로 평가되었다. 그러나 용수량이 600t/day로 측정된 TK-211의 경우는, 히빙에 대한 안정성이 충분치 못한 것으로 평가되었다. 참고적으로 SEEP/W 프로그램 해석을 통해 분석된 한계용수량을 제시하면 570t/day 정도로 평가된다.
- (4) 결과적으로, LNG 지하저장탱크 TK-211의 경우는, 과다한 용수에 따른 히빙 및 토사유출 등의 현상이 발생되어, 압밀침하 및 탄성침하 이외의 추가적인 침하가 유발되었을 가능성이 큰 것으로 판단된다.

- (5) LNG 지하저장탱크(TK-211 및 TK-212) 콘크리트 저판 2단 타설이 종료된 시점 이후부터, 향후 선급속동결 공정 개시 이전까지 예상되는 저판하부 기초지반의 압밀침하량을 평가하면 0.8cm이며, 또한 용수시(용수량을 300t/day로 가정하여)의 탄성침하량은 0.58 ~ 0.61cm로, 결국 총 예상침하량은 1.38 ~ 1.41cm이다. 여기서, 바닥슬래브 2단 타설 이후부터 최근까지 현장에서 실제 계측된 추가 침하량은 최대 11mm 정도로, 본 연구에서 분석된 예측치가 다소 크게 평가되기는 하나, 그 차이는 2.8 ~ 3.0mm 정도로 비교적 근소하게 나타났다.
- (6) 향후 LNG 지하저장탱크와 같은 대규모 시설에 있어서 풍화잔류토 및 풍화암과 같은 비압밀 지층의 경우에 있어서도 지하굴착 등에 의한 응력이완이 발생한 경우 잔류침하량이 크게 발생할 수 있음을 설계시 유의해야 할 것이며, 시공시에도 과도한 양수작업으로 인한 히빙 또는 토사유실이 발생하지 않도록 유의하여야 할 것이다.