

Slurry Wall用 安定液의 配合設計에 관한 研究

A study on the mix design for stabilizing liquid of slurry wall

權 寧 鎬^{*} 全 成 根^{**} 白 承 峻^{***} 有 山 元 茂
Kwon, Yeong Ho Jun, Seong Keun Baek, Seung Jun Motoshige Ariyama

ABSTRACT

The purpose of this study is to design the requirements for the materials of stabilizing slurry and to determine the optimum slurry mix design used in the underground diaphragm wall of Incheon LNG #213 and 214 tank. After the materials and mix conditions of stabilizing slurry investigated and tested, we propose materials and optimum mix design according to testing items including funnel viscosity, fluid loss, cake thickness and specific gravity.

As test results, we select optimum mix design that the upper limit ratio of bentonite is 2.0%, polymer is 0.1% considering the funnel viscosity and dispersion agent is 0.05% considering the fluid loss. Also we select all materials which are composed of GTC4 as bentonite, KSTP as polymer and Bentocryl as dispersion agent. All test results are satisfied our specifications for stabilizing slurry.

1. 서론

슬러리 안정액은 19세기 유전개발의 Drilling Hole을 지지하는 방법으로 개발된 이래, 계속적인 기술개발을 통해 Casing이 없는 지하구조물 시공에 점차적으로 사용이 증대되고 있다. 특히, 인천 LNG 지하탱크의 경우, 굴삭깊이가 평균 72.4~76.4m로 깊을 뿐만 아니라 지반조건도 실트계 미분이 많고 해수의 영향 및 Secondary panel의 경우 Primary panel 측면의 굴삭으로 인한 시멘트 성분의 영향을 받기 때문에 안정액의 배합설계가 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 20만kl 용량의 인천 LNG 지하탱크의 굴삭에 사용할 안정액의 최적 배합조건에 대한 추진과정 및 실험결과를 서술하고자 한다.

2. 안정액의 기능 및 요구성능

자연상태의 안정지반을 수직으로 굴삭하면 지압의 불균형으로 굴삭벽면이 붕괴하기 쉽다. 안정액은 지반의 붕괴를 방지하기 위하여 사용하는데, 일반적인 기능은 다음과 같다.

(1) 벽면의 안정

안정액은 굴착벽면에서 지반내로 침투한 후 토립자에 부착하여 불투수층을 형성하므로써 안정액압을 유효하게 작용시켜 벽면에 작용하는 토압 및 수압에 저항하여 벽면의 안정을 도모한다.

*정회원, 대우건설 인천LNG 지하탱크현장 시험실장

**정회원, 대우건설 인천LNG 지하탱크현장 토목부장

***정회원, 삼성물산 인천LNG 지하탱크현장 대리

****일본 대성건설 국제토목부, 한국 인천LNG 지하탱크 작업소 엔지니어

(2) 콘크리트와의 치환

적절하게 관리된 안정액은 굴착중에 혼입된 토사를 흡착하여 저면에 가라앉는 것을 방지할 수 있으며, 혼입토사가 많을 경우에는 비중이 증대되어 콘크리트와의 치환이 불량하게 되므로 비중관리가 중요하다.

(3) 굴삭토사의 배출

인천 LNG지하탱크의 경우, 회전식 굴삭기(BC cutter)를 사용하기 때문에 안정액을 지상으로 순환시켜 굴삭토사를 배출한다. 따라서, 굴삭토를 신속하게 배출하지 않으면 안정액에 혼입된 토사량이 많아져 굴삭기의 기능이 저하되며, 이로 인해 굴삭효율이 저하될 수 있다.

(4) 요구성능

안정액에 요구되는 성능은 크게 比重, 粘性, 砂分率 등으로 크게 구분할 수 있으며, 인천 LNG지하탱크 공사에 요구되는 기준은 표 1과 같다. ()안은 대성건설 관리기준을 의미한다.

표 1 안정액에 요구되는 성능 및 관리기준

Specification Item	Control criteria		Test method
	Excavation slurry	Qualified slurry	
Specific gravity	Below 1.1 (1.03~1.1)	Below 1.08 (1.03~1.08)	Mud balance electric scale
Fluid loss (cc)	below 15.0 (max 30)	Below 15.0 (max 30)	Filter pressure (7kg/cm ² , 7.5min)
Cake thickness (mm)	Below 5.0 (max 2.0)	Below 1.5 (max 1.0)	Vernier calipers after filter pressure
pH	7.5 ~ 12.5 (7~11)	7.5 ~ 12.5 (7~11)	pH meter
Funnel viscosity (sec)	30 ~ 45	30 ~ 45	Funnel viscometer (946cc/1500cc)
Sand content (%)	Below 5.0 (max 5.0)	Below 1.0 (max 1.0)	Sand content meter

표 1의 기준은 현장의 지반조건, 일본 대성건설과 API⁽¹⁾ 및 JBAS⁽²⁾의 기준을 참고로 정한 값이다.

3. 실험개요

3.1 사용재료

본 연구에 사용된 재료는 벤토나이트, 폴리머, 분산제이며, 각각의 재료특성은 표 2와 같다.

표 2 안정액 배합선정을 위한 사용재료의 특성

Bentonite (GTC4)		Polymer (KSTP)	Dispersion Agent (Bentocryl 86)
Physical property	Rheological property		
- 수 분 : 10.8% (max 11)	- Marsh 점도: 42.8s (min 40s)	- 형상: 백색 분말	- 비중 : 1.3
- pH : 10.2 (10~11.5)	- Gel 강도(ibs/100ft ³): 5.7 (min 3.0)	- 점도: 870cp(1%용액)	- pH : 8.0
- 가비중 : 0.8 (0.75~0.85)	- 여과 투수량 (ml):17.9(max20)	- pH : 7.9 (1%용액)	- 비등점 : 65℃
- 입도(200mesh잔량): 22.3 (max 25)		- 수분: 7.9%	

* ()안의 수치는 기준값

여기서, 벤토나이트는 점토 광물질인 Montmorillonite를 주성분으로 SiO₂ 64%, Al₂O₃ 15.4%가 함유된 분말이다. 벤토나이트는 팽창성이 강하며 비교란시에는 Gel상태로 존재하나 교란시 액체의 성질을 갖는 Sol상태로 되는 특성이 있다. 특히, LNG현장 조건에서는 벤토나이트와 콘크리트 중의 Ca⁺⁺이온 및 수중의 Na⁺⁺이온이 흡착하여 응집반응을 하면 벤토나이트가 열화될 수 있기 때문에, 폴리머와 분산제를 함께 사용하였다. 폴리머는 안정액에 점성을 부여하는 반면에, 분산제는 유동성을 증진시키는 수용성 아크릴 폴리머로 액체성능을 유지시키기 위하여 사용하였다.

3.2 안정액의 계획배합

안정액의 배합설계는 지반 및 시공조건을 고려하여 결정해야 한다. 먼저, 지반조건은 Clay, Silt+ Sand 및 Gravel과 Rock으로 구성되어 있기 때문에, 표 1과 같은 점성범위를 선정하였으며, 지하수의 상태 및 수질, 굴삭공법, Primary panel의 면적 등을 고려하여 결정하도록 하였다.

따라서, 안정액의 배합설계는 표 3과 같은 조건에 대해 각각의 특성을 비교하여 선정하고자 하였다. 배합조건에서 시멘트를 사용한 것은 콘크리트 타설시 경계면의 화학반응 및 Secondary panel 굴삭시에 Primary panel의 커팅에 의한 시멘트 침입으로 안정액이 열화되는 것을 고려한 것이다.

표 3 안정액의 최적배합 선정을 위한 배합조건

Mix series	Bentonite (GTC4)	Polymer (KSTP)	Dispersion Agent (Bentocryl86)	Cement	Remark
No. A	1.0, 2.0, 3.0, 4.0%	-	-	-	GTC4 range
No. B	2.0%	0.05, 0.1, 0.2%	-	-	KSTP range
No. C	1.5, 2.0%	0.1%	0.05, 0.1, 0.2%	1.5%	Bentocryl86
No. D	2.0%	0.1%	0.05%	0.0, 1.5%	Optimum

3.3 안정액의 시험방법

안정액의 시험방법은 기본적으로 표 1에 나타난 바와 같지만, Funnel viscosity 및 Fluid loss, Cake thickness 측정방법은 크게 일본방법과 한국방법(유럽 및 구미포함)으로 구분된다. 이러한 차이는 시험용기의 크기 및 압력차에 의한 것으로, Funnel viscosity의 경우 일본방법은 용기의 크기가 500cc인데 비해 한국방법은 946cc를 사용한다. 또한, Fluid loss 및 Cake thickness의 경우 일본방법은 3kg/cm²의 압력을 30분간 가하는 반면에 한국방법은 7kg/cm²의 압력을 7.5분간 가하여 측정한다. 따라서, 이러한 방법차이에 따른 시험결과의 상관관계는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$Funnel\ viscosity(Japanese) = -3.34 + 0.837 \times Funnel\ viscosity(Korean) \quad \text{--- (식 1)}$$

$$Fluid\ loss(Japanese) = 2.0 \times Fluid\ loss(Korean) \quad \text{--- (식 2)}$$

이러한 방법의 차이를 규명해야 하는 것은 현장 여건상 해외기술선인 일본의 규준과 국내의 규준을 정립하기 위한 것으로, 향후 국내 방법을 정착시키기 위한 계기로 평가된다.

3.4 안정액의 순환방법

현장에서의 안정액 순환사이클은 그림 1과 같다.

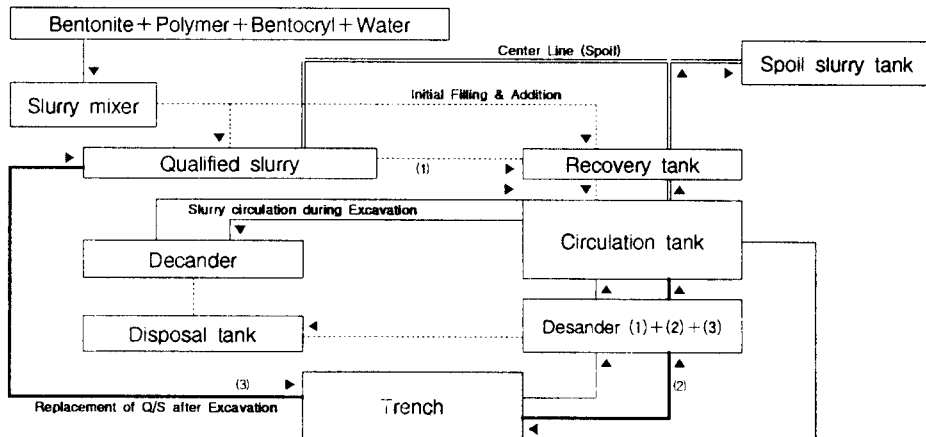


그림 1 안정액의 순환사이클

4. 실험결과 및 고찰

안정액의 계획배합에 따른 시리즈별 실험결과와는 다음과 같다.

4.1 벤토나이트 치환율에 따른 실험결과

벤토나이트(GTC4)의 최적치환율 범위를 선정하기 위한 No.A 시리즈의 실험결과는 표 4 및 그림 2 그림 3과 같다.

표 4 벤토나이트 치환율에 따른 안정액의 품질특성

Mix No.	Bentonite (GTC4)	Polymer	Benticryl86	Cement	pH	Specific gravity	Cake thickness	Funnel viscosity(sec)		Fluid loss(cc)	
								500cc	946cc	3kg/cm ²	7kg/cm ²
A-1	1.0%	-	-	-	9.9	1.002	0.33	21.1	29.6	14.5	7.2
A-2	2.0%	-	-	-	9.9	1.006	0.35	22.2	32.8	19.6	9.5
A-3	3.0%	-	-	-	9.9	1.020	0.40	27.8	40.1	22.1	11.7
A-4	4.0%	-	-	-	9.9	1.025	0.47	48.6	-	-	-
Control specification in site					7.5~12.5	Below1.1	Below5.0	30~45		Below30	Below15

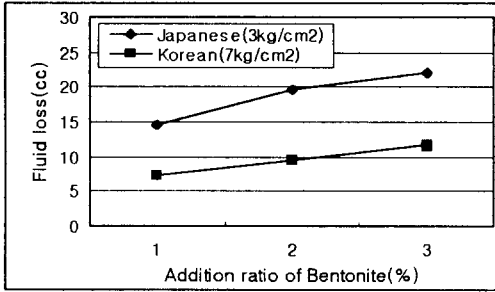


그림 2 벤토나이트 치환율에 따른 점성변화

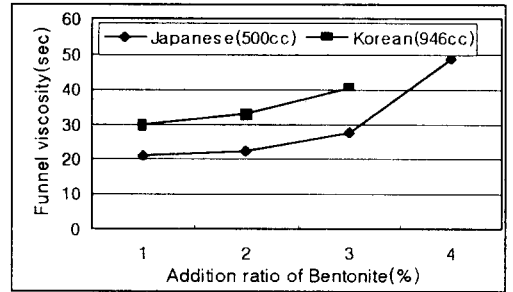


그림 3 벤토나이트 치환율에 따른 유동손실

실험결과, 벤토나이트의 치환율에 따라 pH, Specific gravity 및 Cake thickness 등이 증대하는 것으로 나타났으나, 대부분 관리규준을 만족하였다. 또한, 치환율이 증가할수록 점성 및 유동손실도 증대하는 것을 알 수 있다. 따라서, 현장규준(Site standard)을 만족하는 벤토나이트 치환율은 2.0%정도가 적합한 것으로 사료된다.

4.2 폴리머 치환율에 따른 실험결과

폴리머(KSTP)의 최적치환율 범위를 선정하기 위한 No.B 시리즈의 실험결과는 표 5 및 그림 4, 그림 5와 같다.

표 5 폴리머 치환율에 따른 안정액의 품질특성

Mix No.	Bentonite (GTC4)	Polymer (KSTP)	Benticryl86	Cement	pH	Specific gravity	Cake thickness	Funnel viscosity(sec)		Fluid loss(cc)	
								500cc	946cc	3kg/cm ²	7kg/cm ²
B-1	2.0%	0.05%	-	-	10.5	1.008	0.48	22.1(24.2)	30.8(33.8)	15.0(15.0)	8.5(7.5)
B-2	2.0%	0.1%	-	-	10.1	1.011	0.50	27.7(33.1)	39.2(41.2)	13.5(13.0)	7.0(6.5)
B-3	2.0%	0.2%	-	-	9.8	1.013	0.51	81.1(94.2)	85.0(87.0)	12.0(11.7)	-
Control specification in site					7.5~12.5	Below1.1	Below5.0	30~45		Below30	Below15

* ()안은 24시간 경과후의 품질특성

실험결과, 폴리머 치환율이 0.05%인 경우에는 점성이 낮은 반면, 0.2%에서는 점성이 매우 높은 것으로 나타났다. 또한, 24시간 경과후의 점성은 약간 증대한 반면에 유동손실은 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서, 점성을 고려한 폴리머의 최적 치환율은 0.1%가 적합한 것으로 사료된다.

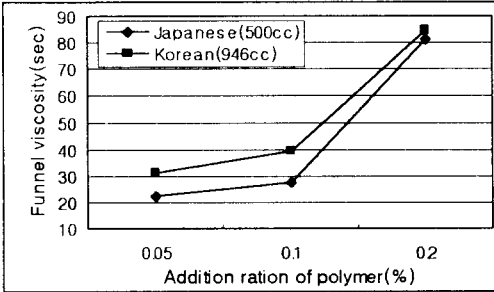


그림 4 폴리머 치환율에 따른 점성변화

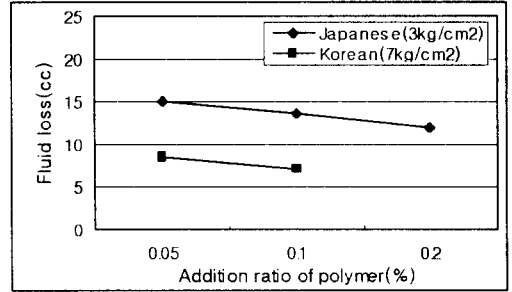


그림 5 폴리머 치환율에 따른 유동손실

4.3 분산제 치환율에 따른 실험결과

분산제(Bentocryl86)의 최적치환율을 선정하기 위한 No.C 및 D시리즈의 시험결과는 표 6 및 그림 6, 그림 7과 같다.

표 6 분산제 치환율에 따른 안정액의 품질특성

Mix No.	Bentonite (GTC4)	Polymer (KSTP)	Bentocryl86	Cement	pH	Specific gravity	Cake thickness	Funnel viscosity(sec)		Fluid loss(cc)	
								500cc	946cc	3kg/cm ²	7kg/cm ²
C-1	1.5%	0.1%	0.05%	1.5%	11.5	1.012	0.55(0.66)	24.3(25.4)	33.6(34.3)	14.1(16.0)	5.3(12.2)
C-2	1.5%	0.1%	0.1%	1.5%	11.5	1.013	0.58(0.65)	23.9(24.8)	33.1(34.1)	12.1(15.5)	5.3(13.0)
C-3	1.5%	0.1%	0.2%	1.5%	11.6	1.012	0.59(0.70)	21.8(22.5)	29.6(30.8)	10.2(11.5)	5.2(12.0)
D-1	2.0%	0.1%	0.05%	1.5%	11.8	1.011	0.56(0.60)	23.7(24.5)	34.9(36.3)	12.2(18.2)	5.0(11.9)
D-2	2.0%	0.1%	0.1%	1.5%	11.7	1.013	0.56(0.67)	22.8(23.3)	32.8(33.6)	12.0(19.0)	4.8(11.8)
D-3	2.0%	0.1%	0.2%	1.5%	11.8	1.012	0.57(0.61)	22.1(23.8)	30.2(30.9)	11.3(12.3)	5.1(12.0)
Control specification in site					7.5~12.5	Below1.1	Below5.0	30~45	Below30	Below15	

· ()안은 24시간 경과후의 품질특성

실험결과, 시멘트 및 폴리머의 치환율이 일정할 때, 분산제(Bentocryl86)의 치환율이 증가할수록 분산성능이 개선되기 때문에 점성이 감소하는 것으로 나타났다.

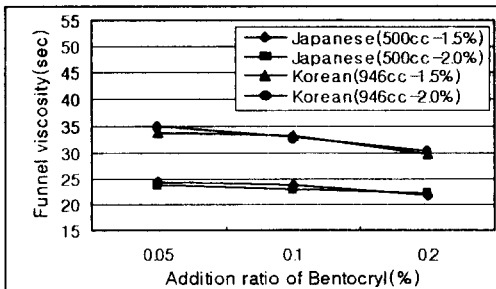


그림 6 분산제 치환율에 따른 점성변화

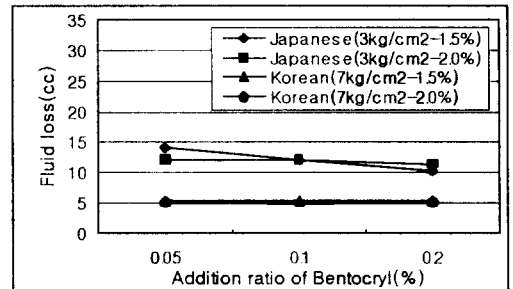


그림 7 분산제 치환율에 따른 유동손실

LNG지하탱크의 슬러리 시공실적(14kl #211, 212 TK)을 고려할 때, 점도가 최소 33sec 이상을 유지해야 여과수량 및 Gel 강도를 얻을 수 있기 때문에 높은 지하수 압력에도 공벽을 유지할 수 있다. 그러나, 점도가 43sec 이상이 되면 공벽유지에는 효과적이나 작업능률이 저하되는 단점이 있으며, 특히 시멘트의 침해로 점도가 증대되면 붕괴 가능성이 높다. 따라서, 점도 및 유동손실을 고려할 때, D-1의 실험결과가 가장 적합한 배합조건으로 평가된다.

4.4 안정액의 현장배합 선정

지금까지의 실험결과를 근거로 현장배합을 실시한 안정액의 실험결과는 표 7과 같다.

표 7 안정액의 현장 최적배합 선정시험 결과

Bentonite (GTC4)	Polymer (KSTP)	Bentocryl86	Cement	pH	Specific gravity	Cake thickness	Funnel viscosity(sec) 946cc	Fluid loss(cc) 7kg/cm ²	Remark
2.0%	0.1%	0.05%	0.0%	10.5	1.013	0.33	35.4	4.2	Immediately
				11.4	1.013	0.33	36.4	4.6	After 24hrs
			1.5%	11.8	1.015	0.36	34.9	5.0	Immediately
				12.3	1.015	0.40	36.3	11.9	After 24hrs
			0.1%	9.7	1.084	0.36	36.4	4.0	After 24hrs
			0.2%	9.5	1.084	0.35	35.6	4.0	After 24hrs
			0.3%	9.3	1.084	0.35	34.8	4.0	After 24hrs

• Sea-water 첨가량

최적배합 실험결과, 순수 안정액의 경우에는 모든 성능이 현장의 관리기준을 만족하고 있지만, 시멘트 1.5% 첨가된 안정액의 배합조건에서는 pH 및 비중이 증가되는 경향을 나타내고 있다. 따라서, 후행의 Secondary Panel을 굴삭할 때 선행의 Primary Panel 측벽을 Cutting하게 되므로 pH 및 비중관리에 유의해야 하며, 이에 대한 대책으로 신액의 치환빈도를 증대시킬 필요가 있다.

이외에도 해수의 침해에 대한 영향을 검토하기 위하여 최적배합을 대상으로 Sea-water 투입량을 조정하여 실험한 결과는 표 7에 나타난 바와 같이 모든 성능을 만족하였다.

5. 결론

LNG지하탱크 슬러리 굴삭에 사용할 안정액의 최적 배합조건은 Bentonite(GTC4) 2.0%, Polymer (KSTP) 0.1%, Dispersion agent(Bentocryl) 0.05%로 선정되었으며, 이러한 배합조건은 현장의 관리기준을 만족하는 것으로 나타났다. 특히, 시멘트 및 해수의 침해에도 우수한 성능을 발휘할 수 있는 배합조건을 선정할 수 있었다.

또한, Polymer의 점도를 개선하여 Bentocryl의 함량을 저감시켰기 때문에, 인천 LNG 14만kl(#211, 212 TK)에 비해 매우 경제적인 효과도 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) American Petroleum Institute (API) RP 13B-1., "Recommended practise standard procedure for field testing water-based drilling fluidse", 1990.
- (2) Japan Bentonite Manufacturers Association Standard (JBAS) 101-77, 1977.