



## 구벽안정성을 위한 SMW 최적배합비 및 현장적용 사례에 관한 연구

권영호<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>동양대학교 건축소방행정학과

### An Experimental Study on the Optimum Mix Design and Site Application Case of Soil Mixing Wall for Trench Stability

Yeong-Ho Kwon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architecture and Fire Service Administration, Dong Yang University, Youngju 750-711, Korea

**ABSTRACT** The purpose of this study is to investigate experimentally the optimum mix design and site application case of soil mixing wall (SMW) method which is cost-effective technique for construction of walls for cutoff wall and excavation support as well as for ground improvement before constructing LNG storage tank typed under-ground. Considering native soil condition in site, main materials are selected ordinary portland cement, bentonite as a binder slurry and also it is applied 1,833 kg/m<sup>3</sup> as an unit volume weight of native soil, Variations for soil mixing wall are as followings ; (1) water-cement ratio 4cases (2) mixing velocity (rpm) 3levels (3) bleeding capacity and ratio, compressive strength in laboratory and site application test. As test results, bleeding capacity and ratio are decreased in case of decreasing water-cement ratio and increasing mixing velocity. Required compressive strength (1.5 MPa) considering safety factors in site is satisfied with the range of water-cement ratio 150% below, and test results of core strength are higher than those of specimen strength in the range of 8~23% by actual application of element members including outside and inside in site construction work. Therefore, optimum mix design of soil mixing wall is proposed in the range of unit cement 280 kg/m<sup>3</sup>, unit bentonite 10 kg/m<sup>3</sup>, water-cement ratio 150% and mixing velocity 90rpm and test results of site application case are satisfied with the required properties.

**Keywords** : excavation support, cutoff wall, bentonite, mixing velocity, bleeding ratio

### 1. 서 론

최근 도심지에서의 건축구조물의 초고층화 및 연약지반에서의 LNG 저장탱크 등과 같은 대용량 지하구조물이 많이 건설되고 있다. 이러한 깊은 지하구조물의 시공에 따른 지반이완 및 붕괴, 소음진동 등의 방지대책으로 자연상태의 원위치 흙과 시멘트를 지중에서 교반·시공하는 Soil Mixing Wall (이하, SMW) 공법을 많이 사용되고 있다.

특히 이 공법은 지하수 관리를 위한 지수벽 및 지반개량과 굴착지지가 요구되는 지하연속벽(Slurry wall)의 시공에 경제적이고 효과적인 요소기술로 평가되고 있다.<sup>1)</sup>

지하식 LNG 저장탱크의 지하연속벽과 같이 대심도 굴착시공을 해야 하는 구조물에는 사전공정으로 깊은 SMW의 적용이 필수적이기 때문에, 이에 대한 기술적·경제적

인 관점에서 연구가 필요한 실정이다.

깊은 SMW 공법은 안정제와 함께 현장 원위치의 흙을 교반하여 소일-시멘트 기둥의 연속벽체를 형성하는데, 일반적으로 드릴이나 오우거 회전을 이용하여 오버랩핑하면서 연속벽체를 시공하기 때문에, 시공장비의 성능과 더불어 SMW 제조를 위한 배합설계 기술이 매우 중요하다.

SMW 배합설계에 사용되는 재료는 시멘트, 플라이애쉬(Fly ash) 등의 안정제에 벤토나이트(Bentonite)를 첨가하는 것이 일반적이며, 원위치 흙의 성질과 더불어 슬러리의 특성, 배합조건 및 시공조건 등을 고려하여 SMW의 최적 배합조건을 실험을 통하여 선정해야 한다.<sup>1,2)</sup>

본 연구에서는 지하식 LNG 저장탱크 시공에 앞서 연약지반을 개량하기 위한 방안으로 SMW 공법을 선정하였으며, 이를 통하여 구벽안정(Trench stability) 및 지하연속벽 굴착시 정밀한 수직도와 준설 매립흙에 의한 붕괴현상을 방지하고자 한다.

이러한 목적을 위하여 SMW 배합변수별 실내실험을 실시하여 최적배합 조건을 도출하고, 이에 따른 현장적용성 실험으로 현장시공의 적용방안을 제시하고자 한다.

\*Corresponding author E-mail : kyh00127@hanmail.net

Received February 10, 2015, Revised April 27, 2015,

Accepted July 1, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

## 2. 요구성능 및 배합조건

### 2.1 요구성능 및 시험방법

#### 2.1.1 요구성능 및 시험단계

SMW 공법은 현장에서 원위치 흙을 그대로 교반하기 때문에, 일반적으로 SMW 배합설계는 Table 1과 같이 현장의 흙을 사질토, 사력토, 점성토 등으로 구분하여 시멘트 및 벤토나이트 사용량을 먼저 결정한다. 또한, 국내의 지질조건에 적합한 3축 오거(Auger)가 많이 사용되는데, 지중의 원위치 흙에 시멘트 결합재 용액을 로드를 통해 주입하면서 벽체를 조성하게 되며, 단부는 각각 오버랩을 시켜서 연속적으로 지수벽을 시공하게 된다.<sup>3)</sup>

먼저 SMW 배합조건을 결정하기 위해서는 현장의 지반 및 시공조건을 검토해야 한다. 일반적으로 물-시멘트 비(이하, W/C)와 결합재 주입량은 SMW 압축강도 및 지

수성 등에 영향을 미치는 배합요소이다. 특히, W/C는 펌프의 압송능력, 그리고 점성토 지반의 경우에는 배합의 균일성과 워커빌리티 등을 고려하여 가급적이면 낮은 범위에서 선정하는 것이 바람직하다.

표준배합은 SMW의 설계기준강도를 사질토, 사질점토, 점성토에서 0.5 N/mm<sup>2</sup>으로 상정하고 있으며, 지수성은 굴삭에 지장을 주지 않는 투수계수( $\kappa$ )  $1 \times 10^{-5}$  cm/sec 범위를 권장하고 있다. 따라서 SMW 시공현장에서 채취한 원위치 흙에 대한 토질특성 및 이에 따른 실내실험을 실시한 후에 배합조건을 선정하는 것이 필요하다.<sup>2,3)</sup>

특히, SMW 설계기준강도에 영향을 미치는 것은 재료의 품질 외에도 W/C, 시멘트 슬러리의 교반속도 및 시공 조건 등이 제시되고 있기 때문에, 본 연구에서는 Fig. 1에 제시한 배합조건 및 시험과정을 통하여 최적배합조건을 선정하고, 이를 현장에 시험시공(Mock-up)하여 그 품질을 확인하도록 계획하였다.

#### 2.1.2 현장의 지반조건

현장의 지반조건을 파악하기 위한 시추조사 결과, 매립층과 퇴적층인 실트질 모래층의 경계가 EL-2.6 m 정도에 위치하고 있으며, 매립층의 평균두께는 약 10 m로 나타났다. 해성퇴적층인 실트질 모래층은 EL-15.0 m~EL-22 m와 EL-33.0 m~EL-40.0 m에 점토층이 협재되어 있으며, 그 하부에서 자갈층, 풍화토층, 풍화암 및 연암, 경암층이 존재하는 것으로 나타났다.<sup>3)</sup>

경질 모래층에서 선행굴착 병행방법으로 시공할 경우의 배합조건은 시멘트 280 kg/m<sup>3</sup>, 벤토나이트 10 kg/m<sup>3</sup>으로 하며, 점성토 지반의 경우에는 시멘트 300 kg/m<sup>3</sup>, 벤토나이트 5 kg/m<sup>3</sup>으로 한다. 본 연구에서 적용할 현장의 지반조건은 실트질 모래층으로 조사되었기 때문에, Table 1에 제시된 배합조건에서 시멘트 및 벤토나이트의 단위재료량을 각각 280 kg/m<sup>3</sup> 및 10 kg/m<sup>3</sup>을 기본배합 조건으로 선정하였다.

또한, 현장 원위치 주상도 측정결과, 습윤밀도는 12 m 깊이에서 평균 최대값 1,857 kg/m<sup>3</sup> (평균 최소값 1,808 kg/m<sup>3</sup>)을 적용하였으며, 원위치 시료채취는 현장에서의 대표적인 토층 및 역학적인 특성을 대표할 수 있는 심도 등을 고려하여 정하였다.<sup>3)</sup> 채취된 시료는 물리적, 화학적 변화가 일어나지 않도록 밀봉하여 보관하도록 하였다.

#### 2.1.3 시험방법

SMW 공법을 적용하는 현장의 토질 층이 주상도 위치에 따라 다르기 때문에, 이에 따른 소일-시멘트의 배합설계 및 설계기준강도 평가가 충분히 검토되어야 한다.

특히, 사질토의 경우에는 흙입자간의 결합력이 약하기 때문에 SMW 혼합이 비교적 쉽지만, 점성토의 경우 흙입자간의 결합력도 강하고 자연함수비가 액성한계를 크게 하향하면 균일한 교반이 어려울 수 있기 때문에, 사전에 오우거의 회전수 및 배합속도 등을 검토해야 한다.

Table 1 Standard SMW mix design for soil type

Soil condition	N Value	Material content (kg/m <sup>3</sup> )		Remark
		Cement	Bentonite	
Silt+fine sand	10~50	280	10	- Fine sand ratio $\geq$ 20%
Sand+gravel (below 35mm)	below 50	250	15	
Sand+gravel (above 35mm)	above 50	Primary 50 SMW 250	Primary 20 SMW 15	- Not use viscosity agent
Clay+silt	0~5	300	5	

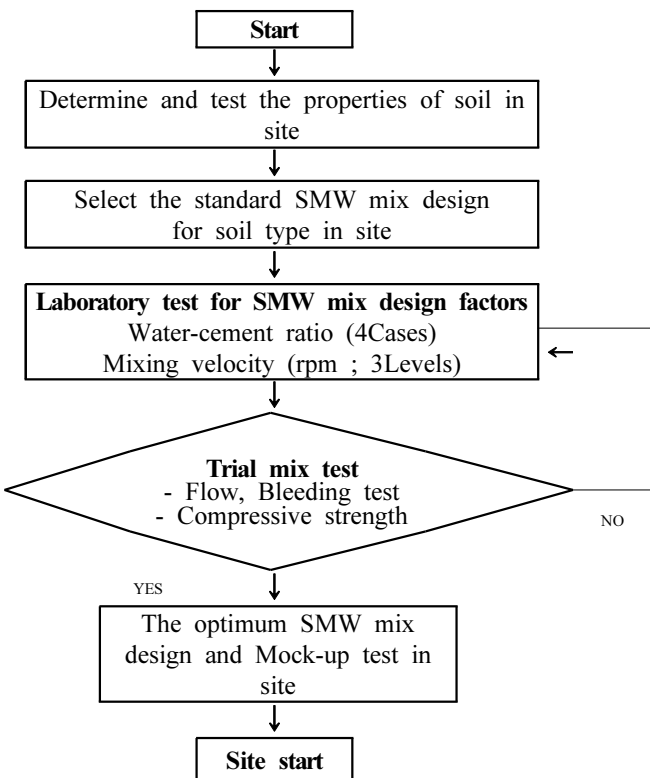


Fig. 1 Test procedures of mix design for SMW

SMW 강도시험은 3종류 방안을 고려하였다. 먼저, 1) SMW 시공 전에 원위치 흙을 채취하여 실내 배합시험을 실시하는 방법(실내 시험법), 2) 시공할 때 시료채취 붓을 SMW 혼합 도중의 소정심도까지 삽입하여 시료를 채취하는 방법(시료채취 시험법), 3) 소정의 깊이에서의 벽면에 코아를 채취하여 강도를 시험하는 방법(현장코아 시험법) 등이 있다.<sup>3)</sup> 본 연구에서는 실내 시험법 및 현장 시료채취 시험법, 그리고 현장코아 시험으로 강도평가를 하였다.

강도시험용 공시체는  $\Phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$ 를 원칙으로 하며, 강도시험은 KS F 2405 (압축강도 시험방법)에 따라 실시하였다. 흙의 특성시험은 KS F 2306 (흙의 함수비 시험) 및 KS F 2308 (흙의 밀도 시험방법)에 따라 실시하였으며, SMW 배합직후의 플로우 및 블리딩 시험은 KS L 5111 (시멘트 시험용 플로우 테이블) 및 KS F 2414 (블리딩 시험방법)에 따라 실시하였다.

## 2.2 사용재료 및 배합변수

### 2.2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 시멘트는 S사의 보통 포틀랜드 시멘트로, 물리적 특성의 시험결과는 Table 2와 같다.

또한, 본 연구에서 사용된 벤토나이트는 국내에서 시판되는 K사의 토목용으로 물리적 특성의 시험결과는 Table 3과 같다.

일반적으로 벤토나이트는 물과 반응하여 팽윤작용을 하기 때문에 지하연속벽의 이수로 사용할 경우에는 공벽의 붕괴방지 및 지수작용에 효과적인 것으로 알려져 있지만, SMW 공법에서는 시멘트 입자의 침강에 따른 시멘트 슬러리 액의 분리방지도 효과적이다.<sup>4)</sup>

벤토나이트의 점도측정은 깔대기 시험법(Mash funnel)을 이용하여 45 g/L의 물과 5분 동안 배합한 후에 시험을 실시하였다.<sup>5)</sup> 또한, 팽윤도와 함수량, 메칠렌 블루 흡착량 및 pH의 측정은 일본 벤토나이트 공업협회 표준시험방법(JBAS, 1977)에 따라 실시하였다.<sup>6,7)</sup>

**Table 2** Physical properties of cement (Type1)

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Soundness(%)	Setting time (min)		Compressive strength (MPa)		
			Initial	Final	3d	7d	28d
3.15	3,220	0.08	233	351	22.7	29.4	40.0

**Table 3** Physical properties of bentonite

Moisture (%)	pH	Funnel viscosity (sec)	Swelling volume (ml/g)	MBA (mmol/100g)	CEC (meq/100g)
10.8	10.3	43.8	13.1	75	83.2

MBA : Methylene blue adsorption, CEC : Cation exchange capacity

그리고 SMW용 배합수는 시수를 사용하였으며, 흙시료 채취는 현장 원위치 4 m 지점에서 샘플링하였으며, 시료는 밀봉한 후에, 48 rpm의 호퍼형 믹서로 혼합하여 균질하게 만든 후에 함수비 및 습윤밀도를 측정하였다. 이때, 흙의 함수비는 현장 6개소에서 측정한 결과, 6.2~9.7% 범위로 평균 7.4%를 나타내었다. 또한, 습윤밀도는 평균 1,833 kg/m<sup>3</sup>로 측정되었다.

### 2.2.2 시험장치 및 사용장비

SMW 최적 배합조건의 선정 및 현장적용 시험을 위한 시험장치 및 사용장비는 Table 4와 같다.

여기서, 현장적용성 실험에 사용되는 시료 및 장비는 현장공사용과 동일한 것이며, 한 엘리먼트(D550 mm×3Rod)의 시공 사이클은 굴착혼합(1 m/min)에 12분, Turning혼합(1 m/min×6 time)에 6분, 인발교반(1.5 m/min)에 8분을 포함하여 26분이 소요되는 것으로 계획하였다.<sup>3)</sup>

### 2.2.3 SMW 목표성능 및 배합변수

본 연구에서 SMW 적용현장의 지반조건을 고려한 기본배합조건(시멘트 280 kg/m<sup>3</sup> 및 벤토나이트 10 kg/m<sup>3</sup>)에 대한 목표성능과 배합변수는 Table 5와 같다.

**Table 4** Equipments and instruments for testing

		Type	Capacity	Remark
Lab.	Mixer	Hoper	4.7 L	- rpm : 48, 90, 160(3Level)
	Mold	Cylinder	$\Phi 50 \times 100 \text{ mm}$	Compressive strength
	Bleeding	Cylinder	$\Phi 250 \times 285 \text{ mm}$	- KS F 2414
Site	Earth auger	Rotary	150Hp	Excavating bit
	Spiral fin	Mixing	D550 mm×3	DH658-135M(25~64rpm)
	Agitator	Tank	6 m <sup>3</sup>	Stabilizing agent
	Mixer	Fan	min. 20 m <sup>3</sup> /hr	Mixing cement slurry
	Silo	Vertical	50 Ton×2	Cement, bentonite
	Back-hoe	Hydraulic	0.6 m <sup>3</sup>	Grading and carrying
	Water tank	Vertical	10 m <sup>3</sup>	Water storage
	Pump	Delivery	350 L/min	Slurry pump

**Table 5** Required performance and SMW variations

Design strength (MPa)	Excavation depth (m)	Mix design factors		Bleeding ratio (%)
		Water-cement ratio (%)	Mixing velocity (rpm)	
1.0	12.0	130~190 (4Cases)	48~160 (3Levels)	2 max.

여기서, W/C는 130, 150, 170 및 190% 범위로 선정하였으며, 배합속도는 48, 90 및 160 rpm을 대상으로, 이에 따른 영향을 실험적으로 분석하고자 하였다.

### 2.2.4 배합방법 및 배합시간

SMW 실내 배합방법 및 배합시간은 Fig. 2와 같다. 먼저, 호퍼형 믹서에 채가름을 실시한 흙 시료를 물과 함께 넣고 예비배합을 한 후, 차례로 벤토나이트 및 시멘트를 넣고 6분간 배합한 다음에 소일-시멘트 슬러리 상태의 SMW를 배출하여 요구되는 시험을 실시하였다. 그리고 재령별 압축강도 시험용 공시체(Φ50×100 mm)를 제작하여, 1일 외기양생 후에 소정의 재령까지 양생온도 20±3°C, 습도 95%이상의 항온항습조 내에서 양생시켰다.

### 2.2.5 물-시멘트비에 따른 배합조건

현장의 지반조건과 Table 1에서 제시한 기본배합에 근거한 W/C에 따른 SMW 배합조건은 Table 6과 같다. 여기서, 호퍼형 믹서의 배합속도는 90 rpm을 대상으로 W/C에 따른 압축강도 결과를 고려하여 배합속도에 따른 실험을 실시하도록 하였다. Fig. 3은 SMW 배합시험에 사용한 호퍼형 믹서를 나타낸 것이며, Fig. 4는 배합 후에 압축강도 측정용 공시체 제작하는 것을 나타낸 것이다.

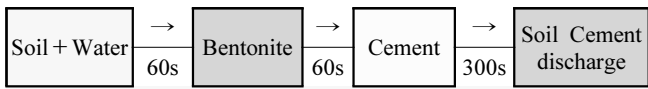


Fig. 2 Mixing method and mixing time for SMW

Table 6 SMW mix proportions for water cement ratio

No.	W/C (%)	Unit material weight (kg/m <sup>3</sup> )				Remark
		Cement	Bentonite	Soil	Water	
WC-130	130	280	10	1,833	364	90rpm
WC-150	150	280	10	1,833	420	
WC-170	170	280	10	1,833	476	
WC-190	190	280	10	1,833	532	



Fig. 3 Hopper type mixer for SMW mixing

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 물-시멘트비에 따른 영향 분석

#### 3.1.1 물-시멘트비에 따른 플로우 실험결과

물-시멘트비에 따른 플로우 실험결과는 Fig. 5와 같다. 실험결과, 물-시멘트비가 증가할수록 플로우값은 7~16% 증가하는 경향을 보였으며, 유동성과 점성 및 블리딩을 고려하면 250 mm정도가 가장 양호한 것으로 나타났다. 특히 물-시멘트비 190%의 경우에는 잉여수로 인한 재료 분리현상을 나타내었다. 따라서, 블리딩 및 압축강도 실험 결과를 고려하여 최적배합을 선정하는 것이 바람직하다.

#### 3.1.2 물-시멘트비에 따른 블리딩 실험결과

물-시멘트비에 따른 SMW 배합의 블리딩량 실험결과는 Fig. 6과 같다. 실험결과, SMW의 블리딩량은 물-시멘트비 및 경시변화 증가에 따라 증대하는 것으로 나타났다. 이는 벤토나이트 사용량이 동일한 조건에서 물-시멘트비가 증가할수록 단위수량이 증가되며, 이에 따른 소일-시멘트 슬러리의 점성이 감소되기 때문으로 사료된다.<sup>8)</sup> 특히, W/C-130 및 W/C-150은 블리딩량이 크게 증가하지 않았지만, W/C-170 및 W/C-190은 내부 잉여수의 증



Fig. 4 Cylinder mold for compressive strength test

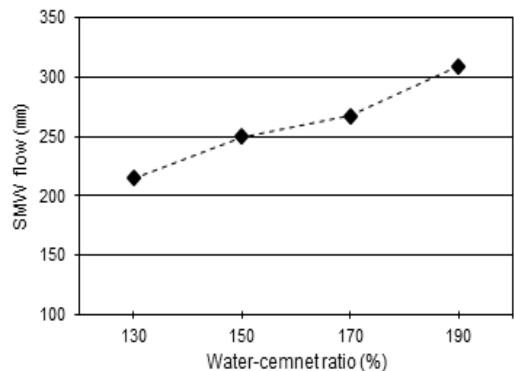


Fig. 5 SMW flow results for water-cement ratio

대로 블리딩량이 증가하는 경향을 나타내었다.

3시간 및 최종 블리딩율의 경우, W/C-130은 1.05% 및 1.23%로, W/C-150은 1.3% 및 1.53%로 나타나 관리기준 (max 2%)을 만족하였다. 그러나, W/C-170은 1.9% 및 2.19% 와 W/C-190은 2.34% 및 2.65%를 나타내어 관리기준을 벗어나는 것으로 나타났다.<sup>9)</sup>

### 3.1.3 물-시멘트비에 따른 압축강도 실험결과

물-시멘트비에 따른 SMW의 재령별 압축강도 실험결과는 Table 7 및 Fig. 7과 같다.

SMW의 압축강도는 물-시멘트비가 감소할수록 증가하는 경향을 보였으며, 재령 28일 대비 재령7일의 강도발현이 51.9~66.9% 범위로 높게 측정되었다. 본 연구에서 현장에 적용할 SMW 설계기준강도가 1.0 MPa에 안전율을 고려하면, W/C-130 및 W/C-150의 경우가 적합한 것으로 사료된다. 따라서, 만족하는 두 종류의 물-시멘트비에 대

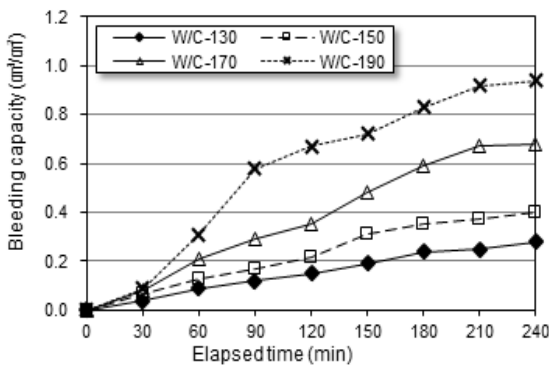


Fig. 6 Bleeding capacity-W/C for elapsed time

Table 7 Compressive strength-W/C for test ages

Testing ages (Days) W/C Series No.	Compressive strength (MPa)			Remarks (D7/D28)
	7	14	28	
W/C-130	1.21	1.55	1.81	66.9%
W/C-150	0.84	1.09	1.49	56.4%
W/C-170	0.56	0.78	1.03	54.4%
W/C-190	0.42	0.61	0.81	51.9%

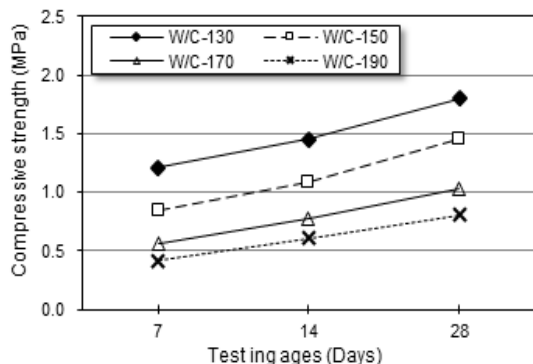


Fig. 7 Compressive strength-W/C for test ages

하여 믹서의 배합속도(rpm)에 따른 영향을 검토하여 최적배합조건 및 현장관리 방안을 제시하고자 한다.

## 3.2 믹서의 배합속도(rpm)에 따른 영향 분석

### 3.2.1 믹서의 배합속도에 따른 시험조건

SMW의 압축강도는 물-시멘트비 뿐만 아니라 배합속도(rpm)에 따른 영향도 있을 것으로 예상된다. 따라서, 설계기준강도를 만족하는 배합조건에 대하여 믹서의 배합속도(rpm)를 변수로 Table 8과 같은 시험조건을 대상으로 압축강도의 영향을 검토하였다.

여기서, H (High), M (Medium), L (Low)은 배합속도의 수준을 나타낸 것으로, 예를 들면 H-160-130에서 160은 배합속도(rpm)를, 130은 물-시멘트비(W/C)를 의미한다.

### 3.2.2 믹서의 배합속도에 따른 플로우 실험결과

믹서의 배합속도에 따른 플로우 실험결과는 Fig. 8과 같다.

실험결과, 믹서의 배합속도가 증가할수록 플로우는 약간 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 배합에너지 증대에 따른 효율성과 균일한 분산성의 영향으로 사료된다. 그러나 배합속도 90 rpm을 기준으로 분석해 볼 때, 증감비율이 2~8% 정도의 범위를 나타내었기 때문에, 물-시멘트비에 비해 배합속도의 영향은 크지 않은 것으로 사료된다.

Table 8 SMW mix proportions for mixing velocity(rpm)

No.	W/C (%)	Unit material weight (kg/m³)				Remark (rpm)
		Cement	Bentonite	Soil	Water	
H-160-130	130	280	10	1,833	364	High-160
M-90-130		280	10	1,833	364	Medium-90
L-48-130		280	10	1,833	364	Low-48
H-160-150	150	280	10	1,833	420	High-160
M-90-150		280	10	1,833	420	Midium-90
L-48-150		280	10	1,833	420	Low-48

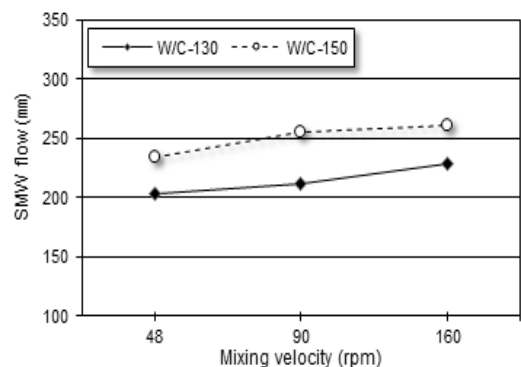
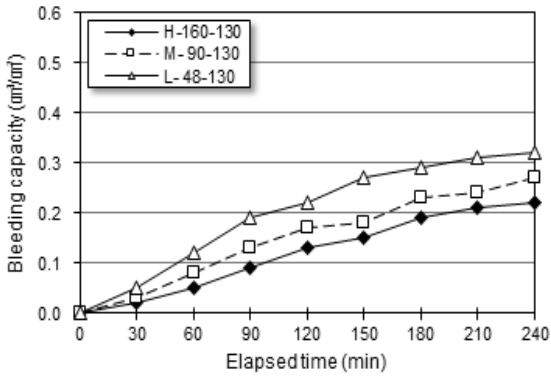
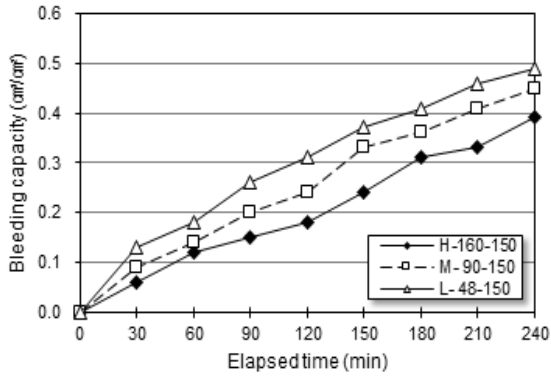


Fig. 8 SMW flow results for mixing velocity



(a) W/C=130%



(b) W/C=150%

Fig. 9 Bleeding capacity for mixing velocity(rpm)

### 3.2.3 믹서의 배합속도에 따른 블리딩 실험결과

믹서의 배합속도에 따른 물-시멘트비 130% 및 150%의 블리딩량 실험결과는 Fig. 9와 같다.

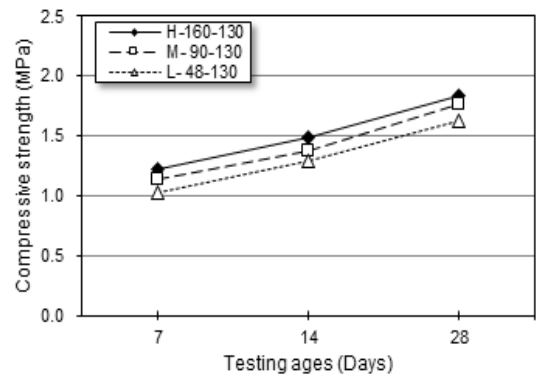
믹서의 배합속도에 따른 SMW의 블리딩량은 물-시멘트비의 영향처럼 크지는 않았지만, 배합속도가 증가할수록 전체 블리딩량은 감소하는 경향을 나타내었다. 단위 시멘트량 및 벤토나이트 사용량이 일정한 조건에서 배합속도가 증가할수록 흡입자와 시멘트-페이스트의 배합효율의 증대로 부착력 및 점성이 증가되기 때문으로 사료된다.<sup>10)</sup>

3시간 및 최종 블리딩율의 경우, W/C 130%에서 0.97~1.41% 및 0.83~1.27%로, W/C 150%에서 1.45~1.83% 및 1.15~1.53%로 나타나 대부분 관리기준(max 2%)을 만족하는 것으로 나타났다.

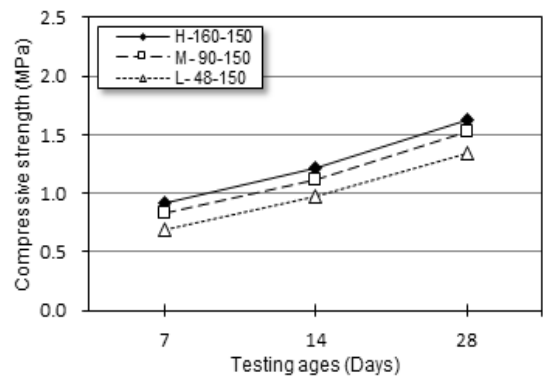
### 3.2.4 믹서의 배합속도에 따른 압축강도 실험결과

믹서의 배합속도(rpm)에 따른 SMW 압축강도의 실험결과는 Fig. 10과 같다.

실험결과, 물-시멘트비에 관계없이 믹서의 배합속도가 증가할수록 재령별 압축강도가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 흡입자와 시멘트 결합재의 배합효율에 따른 영향으로 사료된다.<sup>10)</sup> 배합속도 90 rpm을 기준으로 160 rpm은 4~9.6%의 강도가 증가한 반면에, 48 rpm은 7~16.8%의 강도감소가 나타났다. 또한, 재령별 강도발현 비율은 물-



(a) W/C=130%



(b) W/C=150%

Fig. 10 Compressive strength for mixing velocity(rpm)

Table 9 Optimum mix proportions of SMW in Lab

No.	W/C (%)	Unit material weight (kg/m³)				Remark
		Cement	Bentonite	Soil	Water	
WC-150	150	280	10	1,833	420	90rpm

시멘트비 130%에서 28일 강도에 대한 7일강도 발현비율이 63.4~66.3%로 나타난 것에 비하여, 물-시멘트비 150%에서는 51.5~55.8% 범위로 나타났다.

따라서, 설계기준강도에 대한 안전율을 고려하여 믹서의 배합속도는 90 rpm 이상으로 선정하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

## 3.3 실내 최적배합 및 현장적용성 실험결과 분석

### 3.3.1 실내 최적배합조건

실내실험 결과로부터 블리딩, 재령별 압축강도의 영향을 고려한 SMW 실내 최적배합조건은 Table 9와 같다.

현장적용에 요구되는 SMW의 설계기준강도 1.0 MPa에서 현장 안전율 및 경제성을 고려하여, 재령 28일 압축강도 1.5 MPa를 만족하는 물-시멘트비 150% 및 배합속도 90 rpm을 최적 배합조건으로 선정하였다.

### 3.3.2 현장적용성 실험

Fig. 11은 실내 실험에서 도출된 SMW의 최적배합 조



Fig. 11 SMW mixing test for soil excavation in site

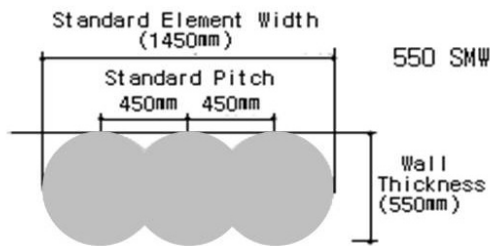


Fig. 12 Actual element size of 550 SMW with 3guts

Table 10 SMW construction size and material contents

Circle radius (m)		Element numbers (Set)			Material contents (ton)		SMW (m <sup>3</sup> )
Inside	Outside	Inside	Outside	Edge	Cement	Bentonite	
39.165	41.455	547	579	260	1,132	41	7,656

건에 대하여 현장적용성 실험의 전경을 나타낸 것이다. 현장적용성 실험은 Table 4에 제시한 장비 및 실험기기를 사용하여 실시하였으며, SMW 엘리먼트에 따른 크기는 Fig. 12와 같다.

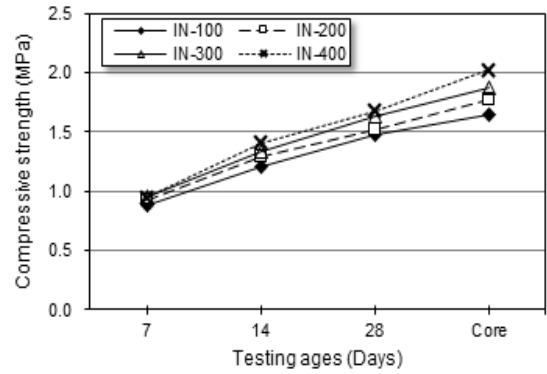
SMW 시공순서는 작업구간에 대하여 깊이와 폭이 1 m × 1 m 줄과기를 실시한 후, 상부에 가이드 보(Guide beam)를 설치하고 시공위치를 결정하였다.

결정된 위치에 굴착장비(DH 658-135M)를 설치한 후에 시공사이클에 맞추어서 굴착과 동시에 그라우팅 플랜트로 배합된 시멘트 밀크를 삼축 로드 선단에서 토출시켜 굴착공과 병행하여 연속주입을 실시하였으며, 이때의 굴착속도는 1 m/min로 하였다.

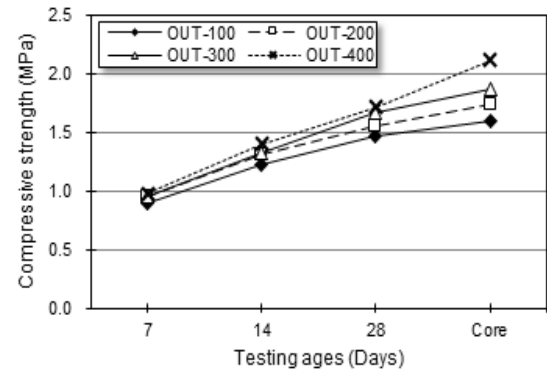
계획심도에 도달한 후에는 깊이 1 m에 대하여 3회에 걸쳐 Turning하면서 흙 입자와 시멘트 밀크가 균일하게 배합되도록 하였으며, 인발속도는 1.5 m/min로 하였다.<sup>3)</sup>

또한, 굴착 도중의 소정심도에 삽입하여 시료를 채취하여 시험체를 제작하였으며, 재령별 현장 SMW 코아강도와 비교하도록 하였다.

Table 10은 SMW 현장의 규모 및 공사수량을 나타낸 것이다.



(a) Inside(In)



(b) Outside(Out)

Fig. 13 Compressive strength for excavation depth

SMW 굴착공의 전체 엘리먼트는 1,418개소로 Table 10에 나타난 것 외에도 배수조(Drainage pit) 주변에 32개소가 시공될 예정이며, SMW 굴착장비 2대를 사용하였다.

### 3.3.3 현장적용 압축강도 실험결과 분석

현장적용성 실험에서 SMW 위치별 시료에 대한 압축강도 실험결과는 Fig. 13과 같다.

여기서, 현장적용성 실험의 위치에 따라 외경(Out) 및 내경(In)을 나타낸 것이며, 숫자는 시료채취의 깊이(단위 cm)를 의미한다. 실험결과, 대부분의 위치에서 재령 28일 설계기준강도를 만족하는 것으로 나타났다.

또한, 각 재령별 SMW의 시료채취 깊이가 깊을수록 압축강도가 약간 증대하는 것으로 나타났는데, 이는 굴착 깊이가 깊을수록 균일하고 안정적인 SMW의 배합효율을 달성할 수 있기 때문으로 사료된다.<sup>10)</sup>

각각의 시공위치에서 채취한 코아공시체의 28일 압축강도와 비교해 볼 때, 내경(In)에서는 코아강도가 11.5~20% 범위에서 증가하는 값을 보였으며, 외경(Out)에서는 8~23% 증대하는 값을 나타내었다. 이는 배합효율 외에도 깊이가 깊을수록 외기의 영향을 비교적 덜 받고 안정적인 양생조건을 갖기 때문으로 사료된다.

현장적용성 실험결과, 재령 28일 압축강도는 위치에 따라 차이는 있지만, 1.48~1.71 MPa 범위로 설계기준강도를 만족하는 것으로 나타났다. 따라서, Table 9에 제시한

SMW 최적 배합조건을 현장배합으로 제시하고자 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 수행한 SMW 배합조건 및 현장적용성 실험의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 현장 지반조건을 고려하여, 시멘트 280 kg/m<sup>3</sup>, 벤토나이트 10 kg/m<sup>3</sup>을 기본배합조건으로 하였으며, 원위 치 흙의 단위용적중량은 1,833 kg/m<sup>3</sup>을 적용하였다.
- 2) 블리딩 실험결과, 물-시멘트비가 감소할수록, 배합속도(rpm)가 증가할수록 블리딩량 및 블리딩율이 감소하는 것으로 나타났으며, 물-시멘트비 130~150% 범위에서 관리기준(max 2%)을 만족하였다.
- 3) 압축강도 실험결과, 물-시멘트비 150% 이하에서 설계기준강도를 만족하였으며, 현장 코아강도는 공시체강도보다 8~23% 증가하는 값을 나타내었다.
- 4) 블리딩 및 압축강도를 고려하여, 최적배합조건은 물-시멘트비 150%, 배합속도(rpm) 90이상이 바람직하다.

#### 감사의 글

본 연구는 2014년 동양대학교 교내과제 연구비지원을 통해 수행된 연구로, 이에 감사드립니다.

#### References

1. Yang, D. S., Scheibel, L. L., Lobedan, F. and Nagata, C., "Oakland Airport Roadway Project, Deep Foundations Institute Specialty Seminar-Soil Mixing", St. Louis, Missouri, 2001, pp.55-71.

2. Rutherford, C. J., Biscontin, G., and Koutsoftas, D., "Design Process of Deep Soil Mixed Walls for Excavation Support", *International Journal of Geoengineering Case Histories*, Vol.1, No.2, 2007, pp.56-72.
3. Korea Gas Corporation., "The Report of Working Procedure for SMW in Incheon Receiving Terminal", Obayashi Corporation Document No. T-C-TW-0003, 2002.10, pp.1-22.
4. American Petroleum Institute (API) RP 13B-1., "Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids", June 1, 1990.
5. Hwang, J. Y., Park, S. W., and Hwang, H. S., "Physico-chemical Properties of the Bentonites Used for the Civil Engineering Works in Korea", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.7, No.2, August, 1997, pp.127-137.
6. Japan Bentonite Manufactures Association., "Measuring Method of Methylene Blue Adsorption Value of Bentonite", JBAS-107-91, 1(1991) in Japanese.
7. Japan Bentonite Manufactures Association., "Measuring Method of Swelling Test of Bentonite(Powder)", JBAS-104-77, 1(1997) in Japanese.
8. Hwang, Y. S., Kim, K. J., La, W., Kim, G. D., and Han, C. G., "Influence of Environment and Construction Factor on the Bleeding of Concrete", *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol.15, No.1, 2003, pp.65-68.
9. Lee, J. K., Choi, J. H., Yoon, J. S., and Cho, I. S., "Comparison of Standard Testing Methods for PC Grout Bleeding", *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol.21, No.2, 2009, pp.337-338.
10. Chen, J., Zhang, L., Zhu, Y., and Wang, J., "Field tests, Modification and Application of Deep Soil Mixing Method in Soft Clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139, No.1, January 2013, pp.24-34.

**요 약** 본 연구는 지하식 LNG 저장탱크의 시공에 앞서 연약지반의 개량을 위하여 현장 원위치의 흙과 시멘트, 벤토나이트 등을 사용하는 소일-시멘트 연속벽체를 효과적으로 시공하는 SMW 공법에 대한 배합설계 및 현장적용 사례를 실험적으로 규명하기 위한 것이다. 현장조건을 고려하여, 보통 포틀랜드 시멘트와 벤토나이트를 주재료로 선정하였고, 흙의 단위용적중량은 1,833 kg/m<sup>3</sup>을 적용하였으며, 이에 따른 물-시멘트비 4종류와 배합속도 3수준을 대상으로 블리딩 및 압축강도 실험을 실시하였다. 실험은 실내실험 및 현장적용 사례로 나누어 수행되었으며, 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다. (1) 물-시멘트비가 감소할수록, 배합속도(rpm)이 증가할수록, 블리딩량 및 블리딩율이 감소하는 것으로 나타났다. (2) 물-시멘트비 150% 이하에서 현장 적용강도(1.5 MPa)를 만족하였으며, 현장 코아강도는 공시체 강도에 비해 8~23% 증가하였다. 따라서 적용현장 조건을 고려하여 단위시멘트량 280 kg/m<sup>3</sup>, 벤토나이트 10 kg/m<sup>3</sup>, 물-시멘트비 150%, 그리고 배합속도 90 rpm을 현장시공의 최적배합으로 제안하였으며, 현장적용 사례의 실험결과로부터 요구되는 성능을 만족하였다.

**핵심용어** : 굴착지지, 차수벽, 벤토나이트, 물-시멘트비, 배합속도(rpm), 블리딩율