

# LNG 지하연속벽에 사용되는 併用係超流動 콘크리트의 製造 및 現場品質管理

권 영 호

(대우건설 인천LNG 지하탱크현장, 품질시험실장)

전 성 근

(대우건설 인천LNG 지하탱크현장, 토목소장)

김 무 한

(충남대학교 공과대학 건축공학과 교수)

- |                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| 1. 머리말                 | 4. 현장 B/P의 제조 및 품질관리   |
| 1.1 연구배경               | 4.1 연속생산성에 대한 시험결과     |
| 1.2 LNG 지하탱크의 구조개요     | 4.2 B/P의 생산효율에 대한 시험결과 |
| 1.3 연구범위               | 4.3 콘크리트 소요량 및 공급계획    |
| 2. 초유동 콘크리트의 최적배합 선정시험 | 4.4 콘크리트 운반계획          |
| 2.1 초유동 콘크리트의 배합강도 산정  | 5. 초유동 콘크리트의 품질관리 결과분석 |
| 2.2 초유동 콘크리트의 요구성능     | 5.1 사용재료에 대한 품질관리 결과분석 |
| 2.3 최적배합 선정시험          | 5.2 굳지 않은 콘크리트의 결과분석   |
| 3. 초유동 콘크리트의 현장배합 선정시험 | 5.3 압축강도에 대한 결과분석      |
| 3.1 현장의 콘크리트 생산설비      | 5.4 코아강도에 대한 결과분석      |
| 3.2 현장 B/P의 생산성 시험     | 6. 맺음말                 |

## 1. 머리말

### 1.1 연구배경

LNG 저장탱크는 정부가 안정적이고 환경친화적이면서, 저렴한 에너지를 공급하기 위하여 국책사업의 일환으로 수행하고 있는 대규모 건설공사이다. LNG 저장탱크의 역사는

1970년 일본에서 처음으로 1만kl가 시공된 이래, 기술의 진보 및 가스수요의 증대에 따라 저장용량이 점차 증대되어 왔다. 국내에서도 평택, 인천 등지에서 10만kl의 저장용량을 갖춘 지상탱크가 건설된 바 있으며, 최근에는 통영에 14만kl의 저장용량을 갖는 LNG 지상탱크가 건설될 예정이다.

지금까지 국내에서 건설된 LNG 저장탱크

는 대부분 지상탱크였기 때문에, 설계·엔지니어링·기계 및 운전 등에 대한 Know-how는 매우 중요한 요소기술로 인식되어 왔으나, 외부탱크의 콘크리트는 Pre-stressed 또는 Post-tension을 도입하여 건설되는 관계로 콘크리트 부분이 중요한 요소기술로 간주되지 않았다.

그러나, 최근에 와서 시공기술 및 콘크리트 요소기술의 발전에 따른 기술력 향상 및 LNG 저장탱크의 안정성 확보, 지상설비의 불필요, 그리고 토지 이용율의 증대를 목적으로, 1998년부터 해상운송 및 수도권 공급이 원활한 지리적 이점을 갖춘 인천 LNG 인수기지 저장설비 공사에서 지하 LNG 저장탱크가 건설되기 시작하였다.

지하 LNG 저장탱크는 일본의 동경가스에서 도시가스의 수요증가에 대응하기 위하여 1991년부터 대용량으로 건설되기 시작하였으며, 현재 根岸공장의 경우에는 세계 최대규모인 20만kl 용량을 가동하고 있다. 국내에서도 1998년 인천 LNG인수기지에 국내 최초로 14만kl의 저장용량을 갖는 지하탱크(#211,212-TK)가 현대건설·한양J.V에 의해 건설되기 시작하였으며, 후속공사로 세계 최대의 저장용량(20만kl)을 갖는 LNG 지하탱크가 삼성물산·대우건설J.V(#213,214-TK) 및 대우건설·한양J.V(215,216-TK)에 의해 건설되고 있다.

LNG 지하탱크는 저장조의 최고액면이 지표면 아래에 있기 때문에, 탱크의 안정성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 지상설비의 불필요 및 토지 이용율의 증대 등과 같은 장점이 있지만, 지하굴착 깊이의 증대에 따른 토수압의 증가로 부재두께가 증대될 뿐만 아니라 지하연속벽(Slurry wall)의 공사에 따른 콘크리트의 고강도화 및 고유동화가 필수적인 성능으로 요구된다.

특히, 지하연속벽에 사용되는 콘크리트는 고강도일 뿐만 아니라, 구조체 내의 자기충전성 및 트레미(Tremie)에 의한 시공성을 확보해야 하기 때문에 고유동성이 필요하며, 경화과정에서 구조체에 발생할 수 있는 온도균열을 방지하기 위하여 저발열성이 요구된다.

지금까지 국내의 콘크리트 요소기술은 기업연구소, 대학을 중심으로 활발히 진행되어 왔으며, 이러한 연구성과가 인천 LNG 저장탱크의 지하연속벽에 사용되는 초유동 콘크리트의 적용에 밑거름이 될 수 있었다.<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>

특히, 대우건설기술연구소·동양시멘트·한국과학기술원에서 공동으로 수행한 바 있는 건설교통부의 국책과제인 “초유동 콘크리트의 개발 및 실용화 연구”는 인천 LNG 지하탱크의 지하연속벽에 사용되는 초유동 콘크리트 및 본체에 사용되는 저발열 콘크리트의 배합설계 및 품질관리에 많은 도움이 되었다.<sup>(5)</sup>

본 논문에서는 20만kl 저장용량을 갖는 인천 LNG 지하탱크(#213,214-TK)의 지하연속벽에 사용된 병용계 초유동 콘크리트의 요구성능, 평가기준, 배합설계 및 제조, 현장적용에 따른 품질관리 결과를 서술하고자 하며, 이를 통해 국내 콘크리트 기술의 선진화·고품질화 및 기술의 공유화를 실현하고자 한다.

## 1.2 LNG 지하탱크의 구조개요

인천 LNG 지하탱크(#213,214-TK)의 주요구조는 크게 지하연속벽, 본체의 바닥슬래브(Bottom slab), 벽체(Side wall) 및 지붕(Roof)으로 구성되어 있으며, 구조개요는 [Table 1]과 같다.

지하연속벽의 구조개요는 내부직경이 78.58m, 두께가 1.7m이며, 깊이는 지반조건에 따라 72.4~76.4m정도의 범위에 있다. 또한, 지하연속벽은 평균 길이가 7.24m인 26개

(Table 1) Summary for main structure of Incheon LNG tanks(#213,214-TK)

Classification	Slurry wall	Bottom slab	Side wall
Design strength (kg/cm <sup>2</sup> )	400 (91days)	240 (91days)	270~300 (91days)
Structure size(m)	- Inner diameter : 78.5 - Wall thickness : 1.7 - Wall depth : 75.0	- Inner diameter : 72.6 - Slab thickness : 9.0	- Wall thickness : 3.0 - Wall height : 50
Pouring schedule	- Primary panel : 26 (length 7.24m) - Secondary panel: 26 (length 2.8m)	- Separate pouring by 2Lifts - 1Lift : 6.0 m - 2Lift : 3.0 m	- Separated pouring by 10Lots - Pouring by Lot step - 1Lot : Ave. 5m
Concrete property	Super flowing con' c	Low heat con' c	Low heat con' c
Concrete quantity	37,500m <sup>3</sup> /tank	35,500m <sup>3</sup> /tank	55,000m <sup>3</sup> /tank

의 선행판넬(Primary panel)과 선행판넬 사이에 평균길이가 2.8m인 26개의 후행판넬(Secondary panel) 및 2개의 Drainage Pit로 구성되어 있다. 선행판넬의 경우에는 평균 콘크리트의 설계물량이 949m<sup>3</sup>정도이며, 후행판넬의 경우에는 339m<sup>3</sup>로 #213,214-TK 지하연속벽 전체의 초유동 콘크리트 물량은 약 75,000m<sup>3</sup>이다.

지하탱크의 시공순서는 ①지반 및 지질조사 → ②가설 공사 및 Guide wall공사 → ③ Slurry wall공사 → ④Top portion공사 → ⑤ 내부굴착공사 → ⑥Side wall 1Lot공사 → ⑦ Bottom slab 1Lift공사 → ⑧Side wall 2Lot 및 Bottom slab 2Lift공사 → ⑨Side wall 3~10Lot공사 → ⑩Roof air raising → ⑪Roof 콘크리트 공사 및 성토공사 순으로 진행된다.

특히, 인천 LNG 저장탱크의 지반조건이 실패계 사질토이기 때문에, SMW(Soil mixing wall) 시공 및 벤토나이트 안정액의 배합설계, 지반개량 등이 사전에 충분히 검토되어야 하며, 지하연속벽 및 본체의 시공과정에는 트레미관을 통한 콘크리트의 자기충전성, 타설 속도 및 수화열 등이 중요하기 때문에, 콘크리

트 배합설계 및 현장 품질관리에 대한 면밀한 기술적 검토가 선행되어야 한다.

### 1.3 연구범위

본 연구에서는 초유동 콘크리트의 배합설계 단계에서 선정된 최적배합 조건을 현장의 Batch plant(B/P)에 적용하기 위한 수정배합, 배합시간, 연속성 시험 및 생산량 결정, 타설 속도에 따른 에지테이터 댓수, 타설시간 등을 산정하고, 선행 및 후행판넬의 콘크리트 타설량, 굳지 않은 콘크리트에 대한 시험결과 및 이에 따른 평균값 · 표준편차, 그리고 재령별 압축강도 시험결과 및 이에 따른 평균값 · 표준편차, 지하연속벽의 콘크리트 타설을 완료한 후에 굴착을 하면서 채취한 코어강도 등의 결과를 분석하였다.

## 2. 초유동 콘크리트의 최적배합 선정 시험

### 2.1 초유동 콘크리트의 배합강도 산정

인천 LNG 지하탱크의 지하연속벽에 타설

되는 초유동 콘크리트의 설계기준강도(400kg/cm<sup>2</sup>)에 대한 배합강도는 JSCE에서 제시한 산정식에 따라 변동계수(V) 10%로 할 때, 활중계수( $\alpha$ )를 1.2로 적용하였으며, 수중 콘크리트의 저감계수( $\gamma$ )는 해외 기술채휴선인 일본의 大成建設에서 건설한 Ogishima LPG 지하탱크 공사의 실적을 고려하여 0.93으로 적용하여 다음의 (식 1)로 배합강도(520kg/cm<sup>2</sup>)를 산정하였다. 이때, 콘크리트의 강도관리 재령은 91일로 하였다.

$$\begin{aligned} & \text{배합강도}(f_{cr}) \\ & = \text{설계기준강도}(f_{ck}) \times \frac{\text{활중계수}(\alpha)}{\text{저감계수}(\gamma)} \\ & = 400 \times \frac{1.2}{0.93} \approx 520 \text{kg/cm}^2 \dots\dots\dots (\text{식 1}) \end{aligned}$$

## 2.2 초유동 콘크리트의 요구성능

초유동 콘크리트의 요구성능은 구조물의 형

상, 치수, 배근상태 등과 같은 구조조건이나 시공시의 운반·타설방법, 마감·양생방법 등과 같은 시공조건을 고려하여 선정하는 것이 바람직하다.

인천 LNG 지하탱크의 지하연속벽에 사용되는 초유동 콘크리트는 70m이상의 지하심도에 트레미 관을 사용하여 자유낙하 시켜야 하기 때문에, 유동성 및 분리저항성이 필수적인 요구성능이다. 또한, 콘크리트와 안정액과의 혼합을 방지하기 위하여 트레미 관의 끝단을 일정깊이 이상으로 타설된 콘크리트의 내부에 유지하면서 상부로 콘크리트를 충전시켜야 하기 때문에, 우수한 자기충전성이 요구된다.

일본의 JSCE에서는 자기충전성에 대한 요구성능을 3단계로 구분하여 [Table 2]와 같이 규정하고 있다.<sup>(6)</sup>

인천 LNG 지하탱크의 지하연속벽에 타설되는 초유동 콘크리트의 요구성능은 해외기술선의 시공실적 및 [Table 2]의 1~2Rank를

(Table 2) Evaluation standard and rank for self-compaction

Level of self-compaction		1 Rank	2 Rank	3 Rank
Structure condition	Min. thickness of steel(mm)	35~60	60~200	min. 200
	Steel quantity (kg/m <sup>3</sup> )	min. 350	100~350	max. 100
Self-compaction height by U type or Box type (mm)		min. 300 (Obstacle R1)	min. 300 (Obstacle R2)	min. 300 (No obstacle)
Unit volume of coarse aggregate (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		0.28~0.30	0.30~0.33	0.32~0.35
Flow-ability	Slump flow (mm)	600~700	600~700	500~650
Resistance for segregation	V-Lot flowing time (sec)	9~20	7~13	4~11
	500mm flow time (sec)	5~20	3~15	3~15

(Table 3) Evaluation items and required performance of super flowing concrete

Standard	Slump flow (cm)	SF 50cm reaching time (sec)	V-lot flow time (sec)	U-box height (mm)	Air content (%)
JSCE	65±5	4~10	10~20	min. 300	4±1

\* 모든 평가항목은 90분까지의 경시변화 특성을 만족해야 함.

고려하여 [Table 3]과 같이 정하였다.

여기서, 콘크리트의 유동성은 슬럼프 플로우로 평가하며, 점성 및 재료분리 저항성은 슬럼프 플로우가 50cm에 도달하는 시간 및 V-lot 유하시간으로 평가하였다. 또한, 자기충전성은 U-type 간극통과성 높이로 평가하였으며, 최종 슬럼프 플로우의 퍼짐상태로 재료분리의 여부를 평가하도록 하였다.

특히, 이러한 요구성능은 초유동 콘크리트를 제조한 직후부터 90분간 경시변화의 특성에도 적용되는데, 이는 콘크리트의 운반·대기 및 타설시간뿐만 아니라 지하연속벽의 트레미 관에 타설된 후 역충전되면서 유동되는 시간까지 성능을 유지해야 하기 때문이다.

## 2.3 최적배합의 선정시험

### 2.3.1 사용재료

인천 LNG 지하탱크의 지하연속벽에 사용된 초유동 콘크리트는 심도, 타설조건 및 자기충전성을 고려하여 분체뿐만 아니라 증점제를 함께 사용하는 병용계 초유동 콘크리트로 선정하였으며, 이에 따라 선정된 콘크리트의 재료는 [Table 4]와 같다.

인천 LNG 지하탱크의 지하연속벽은 대형매스 구조물일 뿐만 아니라, 먼저 타설되어 어느 정도의 압축강도(200kg/cm<sup>2</sup>이상)를 발현한 상태인 선행판넬이 후행판넬을 타설하게 되면

접합면이 구속조건으로 작용하기 때문에 수화열을 저감시키는 방안이 필요하다. 이외에도 장기강도, 수밀성, 내화학적 및 해외기술선의 시공실적 등을 고려하여 시멘트는 국내에서 생산되는 고로슬래그 시멘트(특급)을 선정하였다.

굵은골재는 비교적 현장과 가까운 위치에서 생산되는 19mm 쇄석을 대상으로 품질시험을 실시하였으며, 그중에서 실적율, 마모율, 흡수율 등과 같은 품질이 가장 우수한 원우석산의 골재를 선정하였다. 또한, 잔골재는 LNG 지하탱크의 요구상 강모래를 대상으로 품질시험을 실시하였으며, 입도·비중·단위중량 등의 품질이 우수한 금강산 강모래를 선정하였다.

고성능 감수제는 초유동 콘크리트에 유동성 및 분산·유지성능을 부여하는 중요한 요인이 될 뿐만 아니라, 블리딩, 응결시간 및 증점제와의 적합성에 영향을 미치기 때문에 재료선정에 유의해야 한다. 따라서, 이러한 요구성능에 가장 적합한 것으로 알려진 Poly-carbone계의 고성능 감수제와 Poly-saccaride계의 증점제를 선정하였다.

석회석 미분말은 초유동 콘크리트의 잔골재 치환용으로 사용한 사례가 많지만, 유동성에 미치는 영향을 고려할 경우에는 분체의 역할을 하는 것으로 간주한다.<sup>(7)</sup> 또한, 석회석 미분말은 주로 수화과정에서 콘크리트의 온도상승 및 경화후의 과도한 강도발현을 억제할 목적

(Table 4) Material properties used in super flowing concrete (combined type)

Slag cement	Lime stone powder	Coarse aggregate	Fine aggregate	Super-plasticizer	Viscosity
-Slag cement(T)	-C-140(W)	-19mm(Crushed)	-River sand	-PHOENIX-HPC	-PHOENIX-V (J)
-Slag ratio(46.5%)	-Blaine	-F.M(6.64)	-F.M(2.50)	-Poly-carbone	-Poly saccaride
-Blaine	(7.975cm <sup>2</sup> /g)	-Specific gravity	-Specific gravity	-Solid(36.4%)	+HPMC
(4.035cm <sup>2</sup> /g)	-Specific gravity	(2.60)	(2.63)	-Specific gravity	-Viscosity(800cp)
-Specific gravity	(2.64)	-Absorption	-Absorption	(1.202)	-Powder type
(3.03)	-Particle (9.7 $\mu$ m)	(1.05%)	(0.71%)		

(Table 5) The optimum mix condition of super flowing concrete (combined type)

Mix design condition (%)					Unit material weight (kg/m <sup>3</sup> )						
W/C	W/B	S/a	Sr	Gv	Water	Cement	LSP	Sand	Gravel	S.P	V.A
38	35	50.8	47	53	180	474	40	805	795	12.3	0.25
41	35.4	50.8	47	53	180	438	70	806	795	11.2	0.25
44	35.6	50.8	47	53	180	409	97	806	795	9.6	0.25

으로 많이 사용하지만, 콘크리트의 소성점도를 증대시키기 때문에 재료분리 저항성 및 유동성을 개선시킬 수 있다.<sup>(8),(9)</sup> 따라서, 이러한 특성 및 기술제휴선의 시공실적을 고려하여 지하연속벽의 결합재로 선정하였다.

### 2.3.2 실내 최적배합의 선정시험

인천 LNG 지하탱크의 지하연속벽에 타설되는 병용계 초유동 콘크리트의 최적배합조건은 각각의 변수에 대한 실험적 검증을 통하여 [Table 5]와 같이 3단계의 물/시멘트비를 제안하였으며, 현장 수정배합을 통하여 굳지 않은 콘크리트의 성능 및 압축강도 결과로부터 최적배합을 선정하고자 하였다.

여기서, Sr은 잔골재 용적비로 콘크리트의 모르타르 용적에서 잔골재가 차지하는 용적비를 의미하며, 특히 콘크리트의 유동성 및 재료분리 저항성에 영향을 미친다. 또한, Gv는 굵은골재 용적비로 공기량을 제외한 콘크리트 용적에서 굵은골재의 실적율을 고려한 굵은골재가 차지하는 용적비를 의미하며, 주로 콘크리트의 간극통과성에 영향을 미친다.

굳지 않은 콘크리트의 시험은 [Table 3]에 규정된 항목에 대하여 실내배합 및 현장 B/P 수정 배합을 실시하였다. 실내시험에서는 [Table 5]의 모든 배합조건이 슬럼프 플로우, 50cm도달시간, V-lot, U-box 및 공기량 규준을 만족하였으며, 압축강도의 경우에는 물/시멘트비 38%가 700kg/cm<sup>2</sup> 이상의 압축강도를 나타내었기 때문에 현장의 수정배합에

서는 제외하였다. 따라서, 현장시험에서는 물/시멘트비 41% 및 44%에 대하여 실시하도록 하였다.

## 3. 초유동 콘크리트의 현장배합 선정 시험

### 3.1 현장의 콘크리트 생산설비

인천 LNG 지하탱크(#213,214-TK)의 지하연속벽, 본체 구조물에 필요한 콘크리트를 생산하기 위한 B/P의 설비사양은 [Table 6]과 같다.

콘크리트용 골재관리는 품질의 안정성을 확보하기 위하여, 호퍼에 투입하기 전에 중간저장고(12×10×20m)에서 2일 저장후 사용하는 것을 원칙으로 하였으며, 골재호퍼는 지하터널식으로 수평 및 경사 콘베어벨트를 이용하여 믹서에 투입되도록 설치하였다.

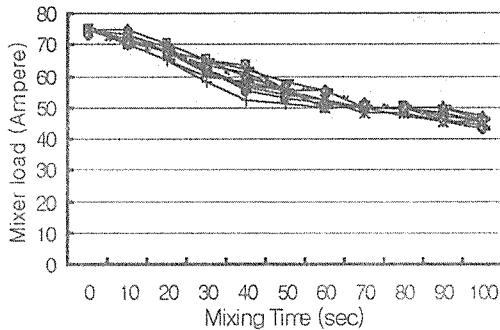
### 3.2 현장B/P의 생산성 시험

#### 3.2.1 배합시간 선정시험

초유동 콘크리트의 배합시간은 콘크리트의 성능뿐만 아니라, 선행 및 후행판넬에 요구되는 타설량 및 시간당 생산량을 결정하는데 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 따라서, 현장 B/P의 최적배합시간은 믹서부하를 나타내는 압폐어 게이지 값을 통해 산정하도록 하였다.

일반적으로 배합중인 콘크리트의 품질이 안

정되면, 믹서의 암페어는 일정한 값을 유지하게 된다. 이러한 관점에서 B/P의 최적배합시간을 선정하기 위하여 콘크리트 3m<sup>3</sup>/batch를 대상으로 모든 재료가 믹서내에 투입된 후 10초 단위로 암페어를 측정하였으며, 측정결과는 [Fig.1]과 같다.



(Fig. 1) Mixer ampere for mixing time (A)

B/P의 배합시간을 선정하기 위하여 믹서의 암페어를 측정한 결과, 암페어는 50A 부근에서 안정되는 경향을 나타내었으며, 이때의 배합시간은 70초 범위였다. 특히, 굳지 않은 콘크리트의 시험결과가 요구되는 성능을 만족하는 범위를 고려하여, 안정값에 +5초 정도를 하여 최적배합시간을 75초로 선정하였다.

### 3.2.2 현장배합의 확인시험

[Table 5]에서 물/시멘트비 38%를 제외한

(Table 6) Production facilities of site batcher plant

Classification	Facility item	Remark
Capacity of facilities	① Cement Silo: 500Ton×2기	Binder: - Lime stone powder - Fly ash
	② Binder Silo: 500Ton×2기	
	③ Admixture Tank: 15Ton×2기	
	④ Water Tank: 200Ton×2기	
Additive facilities	① Chiller capacity: 150RT	- Hot concrete
	② Boiler capacity: 400,000kcal	- Cold concrete
	③ Generator capacity: 500kW	- Emergency
Production capacity	① Mixer type: Twin shaft	- Mixing time
	② Mixer capacity: 210m <sup>3</sup> /hr×2	

배합조건으로 B/P의 현장배합에 대한 최적배합의 확인시험을 실시하였다. 이때, 배합시간은 75초로, 재료투입 순서는 일괄투입으로 하였으며, 증점제는 소량이기 때문에 인력에 의해 투입하도록 하였다.

최적배합에 대한 확인시험은 해외기술선 및 삼성·대우J.V에 의한 자체시험과 KOGAS 및 해외감리에 의한 공인시험 등 2회 시험을 실시하였다. 이때, 모든 조건은 현장의 생산조건과 동일하게 하였으며, 에지테이터 드럼의 회전속도도 6rpm으로 일정하게 하였다. 본 시험은 12월 22일에서 23일까지 실시되었기 때문에, 보일러 시스템을 가동하여 콘크리트 온도를 관리범위에 맞도록 조절하였다. 현장 최적배합에 대한 확인시험 결과는 다음과 같다.

#### 1) 굳지 않은 콘크리트의 시험결과

현장 B/P에서의 최적배합에 대한 확인시험 및 생산성 시험은 11~12월 사이에 실시되었기 때문에, 사용재료의 품질변동에 따른 초유동 콘크리트의 품질변동에 대한 민감도 시험 결과를 다음과 같이 요약하고 이를 반영하도록 하였다.<sup>10)</sup>

1) 민감도 시험결과, 콘크리트 온도는 10~20℃범위에서 관리한다. (30℃미만)

2) 잔골재의 조립율은 2.6±0.2범위에서 관리한다.

3) 잔골재의 표면수율에 대한 변동오차는 ±0.6%이내에서 관리한다.

4) 슬래그 치환율의 변동은 온도의존성을 고려하여 46.5±1.5%에서 관리한다.

5) 고성능 AE감수제의 계량오차는 1%이내에서 관리한다.

이러한 민감도 시험결과는 유동성, 충전성, 재료분리 저항성에 영향을 미치기 때문에, 현장B/P에서 초유동 콘크리트를 제조·품질관리에 기준으로 정하였다.

[Table 7] Test result of adjusted mix condition in site B/P

Mixing condition		W/C=41%, S.P=2.2%				W/C=44%, S.P=1.9%			
Elapsed Time	Spec.	0min	30min	60min	90min	0min	30min	60min	90min
Slump Flow (cm)	65±5	62.0 (64.0)	66.0 (67.0)	68.0 (67.5)	65.0 (67.0)	63.0 (65.0)	67.0 (67.0)	68.0 (68.0)	68.0 (68.0)
50cm (sec) reach time	4~10	4.9 (5.2)	5.2 (6.2)	6.2 (6.5)	6.9 (8.1)	5.0 (5.2)	5.5 (5.3)	6.9 (6.2)	10.5 (6.7)
V-lot (sec) flow time	10~20	14.1 (14.4)	14.6 (15.1)	15.5 (15.2)	18.7 (16.1)	12.1 (12.4)	12.1 (13.1)	13.6 (15.1)	16.2 (16.5)
U-box H (mm)	min 300	352 (352)	345 (348)	345 (346)	344 (342)	352 (350)	350 (346)	346 (345)	338 (337)
Air (%)	4±1	4.1 (3.8)	4.0 (4.0)	4.6 (4.7)	4.5 (4.3)	3.5 (3.7)	4.1 (4.0)	4.5 (4.2)	3.9 (4.5)
Con' c (°C) temperature	max 30	12.5 (13.0)	12.7 (13.1)	12.7 (13.0)	12.4 (12.9)	12.3 (13.3)	12.3 (13.4)	12.2 (13.1)	12.2 (13.1)

\* ( )안의 결과는 삼성·대우·해외기술선 자체시험 결과임.

B/P의 현장배합에 대한 확인시험에서의 굳지 않은 콘크리트에 대한 시험결과는 [Table 7]과 같다.

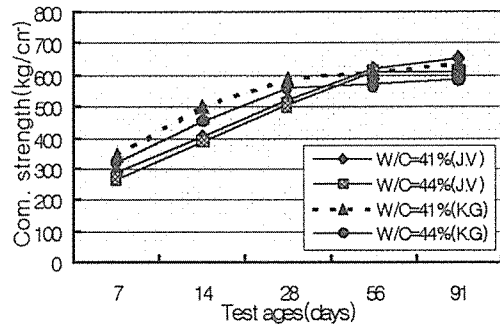
시험결과, 대부분의 성능이 관리규준을 만족하였으며, 고성능 AE감수제의 분산 및 유지성능, 그리고 현장 대기시간 등을 고려하여 생산직후 15분부터 슬럼프 플로우가 증가되는 형태로 배합조건을 선정하였다. 따라서, 최적 배합은 재령별 강도시험 결과로 선정하도록 하였다.

## 2) 재령별 압축강도 시험결과

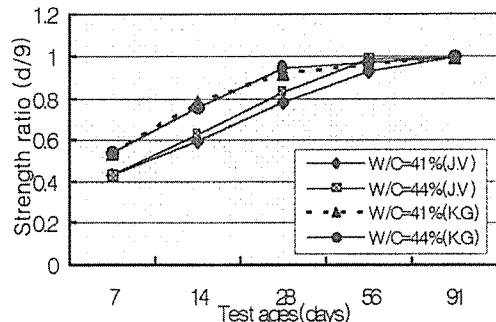
현장 B/P에서의 최적배합에 대한 확인시험의 재령별 압축강도 및 발현율은 각각 [Fig.2]와 같다.

압축강도 시험결과, 재령 7일에서 91일 압축강도의 43~54%정도 발현하였으며, 28일에서 78~95%의 발현율을 나타내었다. 또한, 재령 28일에서 배합강도를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 강도발현에 대한 안정값을 고려하여 현장최적배합을 물/시멘트비 41%

로 결정하였다.



(Fig.2(a)) Strength for test age



(Fig.2(b)) Strength ratio for test age



## 4. 현장B/P의 제조 및 품질관리

현장B/P에 대한 초유동 콘크리트의 안정적인 품질관리를 확인하기 위하여 1회에 3m<sup>3</sup>씩 연속적으로 생산하여 품질시험을 실시하였으며, 이를 통해 B/P의 시간당 생산량 및 현장 타설량을 산정하여 제조 및 공급계획을 세우도록 하였다.

### 4.1 연속생산성에 대한 시험결과

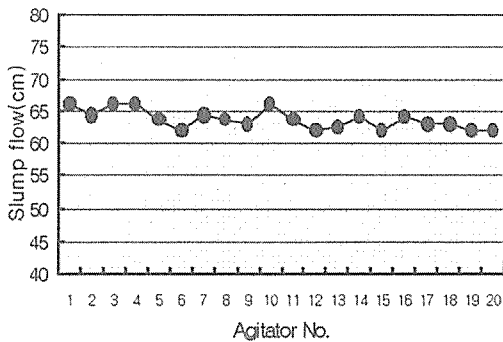
B/P의 연속생산에 대한 품질을 확인하기 위하여 20회 시험을 실시하였으며, 초유동 콘크리트의 유동성 및 점성, 공기량 등에 대한 현장B/P의 연속성 시험결과는 [Fig.3]과 같다.

시험결과, 슬럼프 플로우는 평균 63.7cm, 최

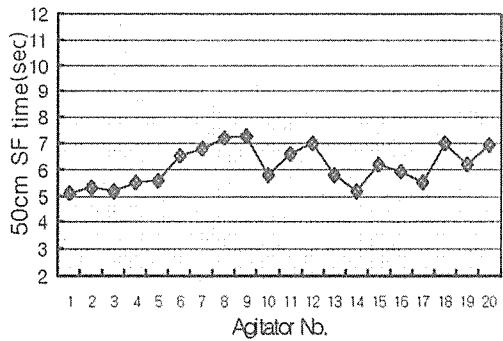
대 66cm, 최소 62cm범위이며, 표준편차는 1.5cm로 나타났다. 또한, 슬럼프 플로우 시험에서 측정된 플로우 50cm 도달시간은 평균 6.1초, 최대 7.3초, 최소 5.1초이며, 표준편차는 0.7초를 나타내었다.

또한, V-lot 유하시간은 평균 14.4초, 최대 17.1초, 최소 12.2초이며, 이때의 표준편차는 1.2초로 측정되었다. 공기량은 평균 4.0%, 최대 4.5%, 최소 3.5%이며, 표준편차는 0.3%를 나타내었다. 일반적으로 50cm 도달시간이 증대되면 V-lot 유하시간도 함께 증대하게 되는데 이는 초유동 콘크리트의 점성이 높아지기 때문이다.

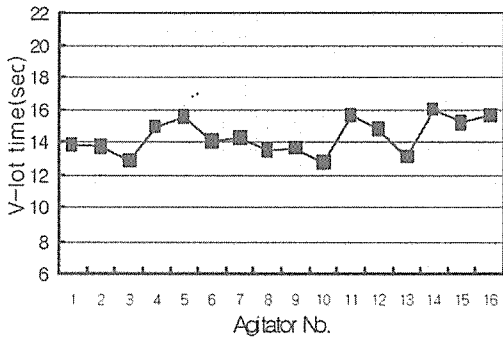
연속생산성 시험결과, 대부분의 측정값이 허용범위를 만족하기 때문에 B/P에 대한 콘크리트 생산품질의 안정성을 확보할 수 있었다.



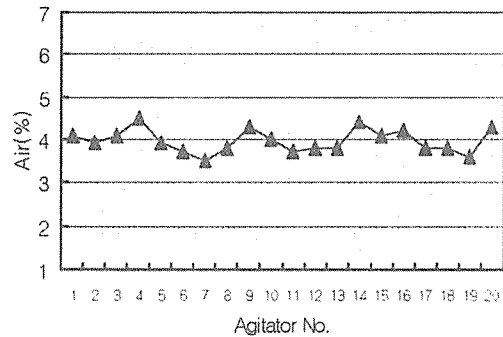
(Fig.3(a)) Slump flow by Lots



(Fig.3(b)) 50cm flow time by Lots



(Fig.3(c)) V-lot flowing time by lots



(Fig.3(d)) Air content by lots

## 4.2 B/P의 생산능력에 대한 시험결과

병용계 초유동 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 점성이 높기 때문에, 믹서부하가 많이 걸릴 뿐만 아니라 콘크리트의 요구성능을 만족하기 위한 배합시간이 증대된다. 그러나, 배합시간의 증대는 콘크리트의 생산성을 저하시키기 때문에 가능한 한 최적배합시간을 선정하는 것이 필요하다. 따라서, 본 단계에서는 앞에서 선정한 배합시간 75초에 대하여 시간당 생산량을 산정하기 위한 시험을 실시하였다.

[Fig.4]는 3m³의 콘크리트를 생산하는데 소요되는 시간 및 6m³를 연속적으로 생산할 경우에 소요되는 시간을 B/P에서 측정된 결과이다.

시험결과, 3m³의 콘크리트를 생산하는데 133초가 소요되지만, 6m³를 연속적으로 생산할 경우에는 계량 및 배출시간이 중복되기 때문에 208초가 필요하다. 또한, 계속 생산을 할

경우에는 계량과 배출시간을 중복되기 때문에, 6m³당 200초 정도면 생산이 가능하다. 따라서, 시간당 생산량은 안전율을 고려하여 100~110m³정도로 산정할 수 있다.

## 4.3 콘크리트의 소요 및 공급계획

인천 LNG 저장탱크의 지하연속벽(선행 및 후행판넬, Drainage Pit)에 타설되는 초유동 콘크리트의 소요량 및 각각의 사양은 [Table 8]과 같다.

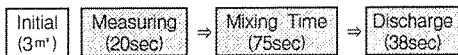
각각 판넬별 콘크리트 소요량은 손실을 3%를 고려한 물량이며, 시간당 소요량을 B/P의 시간당 생산량과 비교할 때 큰 문제가 없는 것으로 확인되었다. 특히, 현장에서 트레미관 제거 및 연결시간을 고려하지 않았기 때문에, 실제 현장에서 콘크리트를 타설하는 시간은 증가될 것으로 예상된다.

## 4.4 콘크리트의 운반계획

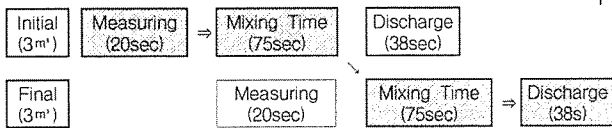
[Table 8]에 표기한 바와 같이 현장에 소요되는 콘크리트 물량을 공급하기 위해서는 이에 적합한 운반계획이 필요하다. 인천 LNG 지하탱크의 지하연속벽에 타설되는 초유동 콘크리트의 운반계획 및 필요한 예치테이더는 [Table 9]와 같다.

선행판넬의 경우, 트레미관이 3개 설

1) Required production time for 3m³(1batch) --- (133sec)



2) Required production time for 6m³(1agitator) --- (208sec)



[Fig.4] Required production time for 3m³ and 6m³

[Table 8] Required concrete quantity for slurry wall panels

Classification	Primary panel	Secondary panel	Drainage pit
Ave. Panel size(m)	7.24×1.74×75	7.24×1.74×75	7.24×1.74×75
Ave. concrete quantity(m³)	975	376	937
Tremie pipe	3	2	2
Pouring height(m/hr)	max. 8	max. 8	max. 4.5
Quantity by hr(m³/hr)	max. 100	max. 40	max. 60
Total pouring time(hr)	11~13	9~10	15~16
Total panel	26	24	2

치되어 있으며, 첫 타설은 에지테이터가 트레미관 1개당 각각 2대씩 6대가 필요하며 그 후 부터는 각각 1대씩 동시에 타설해야 한다. 이때, 트레미관 1개당 평균 타설량을 30m<sup>3</sup>/hr로, 에지테이터 1대당 타설시간을 5분으로, 타설높이에 따른 트레미관 제거시간을 5분으로 가정하면, 에지테이터 1대당 2cycle/hr가 된다. 따라서, 출하시간 4분, 운반시간 6분, 타설 및 대기시간 11분, 회차 및 생산대기 시간을 고려하면, 선행판넬에 요구되는 에지테이터 댓수는 초기에 12대, 공급이 안정된 후에는 9대가 필요하다.

후행판넬의 경우, 트레미관이 2개 설치되었으나, 선행판넬과 동일한 타설조건이기 때문에 요구되는 에지테이터 댓수는 초기에 8대, 공급이 안정된 후에는 6대가 필요하다. Drainage pit의 경우, 콘크리트 전체물량은 많지만 Drainage pit의 outer pipe에 대한 부력을 고려하여 시간당 타설높이가 낮기 때문에 요구되는 에지테이터 댓수는 후행판넬과 동일하다.

(Table 9) Transport plan and agitator for slurry wall panel

Classification	Primary panel	Secondary panel	Drainage pit
Ave. quantity for tremie	30 m <sup>3</sup> /hr	20 m <sup>3</sup> /hr	30 m <sup>3</sup> /hr
Removal time of tremie	5 min/hr	5 min/hr	5 min/hr
Pouring time for agitator	5 min	5 min	5 min
Required agitators	12cars/panel (9/panel)	8cars/panel (6/panel)	8cars/panel (6/panel)

(Table 10) Test frequency for used material

Classification	Test frequency		Remark
	Independent	Self	
Cement	1time/3,000 ton	1time/300 ton*	* gravity, Temp.
Lime stone powder	1time/1,200 ton	1time/300 ton*	* Mill sheet
Aggregate	1time/10,000m <sup>3</sup>	1time/1,000m <sup>3</sup>	
Chemical admixture	1time/1month	—	ASTM C 494

## 5. 초유동 콘크리트의 품질관리 결과 분석

### 5.1 사용재료에 대한 품질관리 결과분석

초유동 콘크리트의 사용재료에 대한 Lot별 품질시험 빈도는 [Table 10]과 같다.

#213, 214 지하탱크의 지하연속벽에 타설된 초유동 콘크리트의 총물량은 75,000m<sup>3</sup>이며, 여기서, 시멘트가 35,500ton, 석회석 미분말이 5,800ton, 굵은골재가 49,580m<sup>3</sup>, 잔골재가 45,500m<sup>3</sup>정도 사용되었다. 그리고 고성능 감수제 및 증점제는 각각 896 및 18.7ton이 사용되었다. 각각의 사용재료에 대한 공인시험기관의 품질의뢰 결과는 다음과 같다.

#### 5.1.1 시멘트

지하연속벽에 사용된 고로슬래그 시멘트(특급)의 Lot별(3,000ton당) 공인시험기관의 품질시험 결과는 [표 11]과 같다.

시멘트에 대한 Lot별 품질시험결과, KS L 5210 규준을 만족하는 것으로 나타났다.

특히, 초유동 콘크리트의 특성에 영향을 미치는 응결시간, 압축강도, 분말도 및 수화열에 대한 시험결과는 양호한 것으로 나타났다. 응결시간의 경우, 초결은 평균 270분이며 표준편차는 16분으로 측정되었으며, 종결은 평균 7:54이며 이때의 표준편차는 29분이었

[Table 11] Test result for slag cement (KS L 5210)

Lot No.	Setting time		Com. strength (kg/cm <sup>2</sup> )			Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Loss Ig. (%)	SO <sub>3</sub> (%)	S (%)	Hydration heat (cal/g)		Auto claved (%)
	Initial (min)	Final (hr:min)	3d	7d	28d					7d	28d	
C1	250	7:40	171	248	436	4,008	0.4	2.6	0.9	64	73	0.02
C2	285	8:00	198	301	453	3,458	0.8	2.3	0.9	67	78	0.06
C3	270	8:10	203	300	458	3,492	1.0	2.3	0.9	68	76	0.07
C4	280	8:15	194	265	480	3,847	0.7	2.6	1.0	64	75	0.07
C5	270	8:00	176	248	465	3,805	0.8	2.7	1.1	65	76	0.04
C6	260	7:40	182	255	473	3,827	0.7	2.7	1.0	68	77	0.05
C7	270	8:10	191	267	422	3,668	0.4	2.3	0.9	65	76	0.04
C8	300	8:40	202	282	433	3,637	0.6	2.4	0.9	63	76	0.06
C9	285	8:30	197	278	430	3,617	0.5	2.4	0.9	67	74	0.02
C10	270	7:30	184	268	426	3,867	1.1	2.5	1.0	61	73	0.06
C11	240	7:00	167	248	431	3,918	0.5	2.4	0.8	65	71	0.05
C12	270	7:20	179	254	424	4,057	0.5	2.6	0.9	63	74	0.04
C13	265	7:50	175	254	433	4,028	0.4	2.6	0.9	63	74	0.02
KS L 5210	min. 60	max. 10	min. 130	min. 200	min. 250	min. 2,800	max. 3.0	max. 3.0	max. 2.0	max. 70	max. 80	max. 0.2

[Table 12] Test results for lime stone powder (JIS A 5008)

Lot No.	Chemical component(%)								Specific gravity	Passing particle(%)	
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Mgo	K <sub>2</sub> O	moisture	Loss lg		75 $\mu$ m	150 $\mu$ m
	L1	1.4	0.2	1.0	53.1	1.5	0.2	0.1	42.3	2.62	100
L2	1.4	0.3	0.8	52.7	1.2	0.1	0.2	42.8	2.60	100	100
L3	0.9	0.1	0.4	53.8	1.3	0.1	0.1	43.1	2.60	100	100
L4	0.8	0.2	0.5	54.2	1.4	0.1	0.1	42.5	2.61	100	100
L5	1.0	0.2	0.4	53.6	1.2	Tr	0.1	43.3	2.60	100	100
L6	1.2	0.1	0.4	54.4	1.5	0.1	0.1	42.1	2.60	100	100
L7	1.6	0.1	0.9	54.0	1.8	0.1	0.1	41.2	2.62	100	100
L8	1.4	0.2	0.9	53.4	1.7	0.1	0.1	42.1	2.61	100	100
L9	1.7	0.2	0.7	53.5	1.9	0.2	0.1	41.5	2.60	100	100
L10	1.2	0.2	0.8	53.4	1.4	0.1	0.1	42.6	2.61	100	100
Jls A 5008	-	-	-	-	-	-	max. 1.0	-	min. 2.60	min. 90	min. 70

다. 분말도의 경우, 평균 3,787cm<sup>2</sup>/g이고 표준 편차는 192cm<sup>2</sup>/g을 나타내었다.

### 5.1.2 석회석 미분말

석회석 미분말에 대한 Lot별(1,200ton당)

공인시험기관의 품질시험 결과는 [Table 12]와 같다.

석회석 미분말에 대한 Lot별 품질시험결과, JIS A 5008 규준을 만족하는 것으로 나타났다. 특히, 초유동 콘크리트의 생산에 영향을 미치는 습분함량은 평균 0.1%로 매우 양호한 값을 나타내었으며, 비중도 매우 균일한 것으로 나타났다.

그러나, 규준에는 없지만 강열감량이 높게 나타난 것은 석회석 미분말이 상온에서 주로 CaCO<sub>3</sub> 형태로 존재하지만, 강열감량 측정을 위해 고온(750±50℃)을 가할 경우 CaO+CO<sub>2</sub>로 분리되기 때문으로 사료된다.

### 5.1.3 잔 · 굵은골재

잔 · 굵은골재에 대한 Lot별(10,000m<sup>3</sup>당) 공인시험기관의 품질시험 결과는 각각 [Table 13] 및 [Table 14]와 같다.

잔골재의 경우, 강모래를 사용하기 때문에 조립율 관리가 매우 중요하다. 즉, 조립율에 대한 초유동 콘크리트의 민감도 시험결과를 고려해 볼 때, 잔골재의 조립율은 2.6±0.2범위에서 관리하는 것이 바람직하다. 잔골재의 조립율은 평균 2.58이며, 표준편차는 0.1정도로 사전에 제시한 관리범위를 만족하는 것으로 나타났다.

(Table 13) Test results for fine aggregate (KS F 2526)

Lot No.	F.M	Absorption ratio (%)	Specific gravity	Soundness (%)	Chloride content (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Passing 0.08mm (%)
S1	2.61	1.09	2.57	4.6	0.002	1,547	1.6
S2	2.46	1.04	2.56	4.4	0.003	1,538	2.0
S3	2.48	0.84	2.60	3.8	0.003	1,550	0.9
S4	2.55	1.22	2.57	3.3	0.006	1,549	0.7
S5	2.65	1.20	2.56	4.4	0.005	1,556	1.6
S6	2.71	1.44	2.55	3.1	0.004	1,549	0.9
KS F 2526	2.3~3.1	max. 3.0	min. 2.50	max. 10.0	max. 0.04	-	max. 5.0

(Table 14) Test results for coarse aggregate (KS F 2526)

Lot No.	F.M	Absorption ratio (%)	Specific gravity	Soundness (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Abration ratio (%)	Passing 0.08mm (%)
G1	6.57	0.67	2.62	3.1	1,520	19.8	0.1
G2	6.64	0.78	2.66	3.8	1,552	22.7	0.1
G3	6.59	0.43	2.67	3.1	1,557	24.1	0.1
G4	6.64	0.63	2.64	3.5	1,575	21.7	0.3
G5	6.56	0.63	2.64	4.2	1,585	22.1	0.2
G6	6.53	0.67	2.64	3.7	1,573	22.4	0.4
Jls A 5008	6~8	max. 3.0	min. 2.50	max. 12.0	-	max. 40	max. 1.0

굵은골재의 경우, 초유동 콘크리트에 큰 영향을 미치지 않지만, 조립율이 평균 6.59로 매우 양호하게 나타났으며 표준편차도 0.04로 낮게 측정되었다. 특히, 초유동 콘크리트의 매트릭스에 영향을 미치는 입형 판정 실적율은 58.6%로 양호한 값을 보였다. 또한, 강도에 영향을 미치는 마모율의 경우 평균 22.1%, 표준편차 1.4%를 나타내었고, 비중 및 흡수율도 각각 평균 2.65, 0.64%를 나타내었다.

### 5.1.4 고성능감수제

고성능 감수제에 대한 Lot별(1회/month) 공인시험기관의 품질

(Table 15) Test results for high water reducing agent (ASTM C 494)

Lot No.	Water content (%)	Setting time (hr:min)		Compressive strength ratio (%)			Flexural strength ratio (%)		
		Initial	Final	3d	7d	28d	3d	7d	28d
J1	82	+15	+20	130	124	120	119	108	108
J2	83	+25	+15	131	124	120	115	108	106
J3	82	+20	+16	130	124	120	117	108	107
J4	81	+20	+15	131	123	119	117	108	107
ASTM C 494	max. 88	1:00 earlier nor 1:30 later		min. 125	min. 115	min. 110	min. 110	min. 100	min. 100

시험 결과는 (Table 15)와 같다.

시험결과, ASTM C 494의 F급에 규정된 품질관리 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 초유동 콘크리트의 경우에는 ASTM 기준 외에도 분산, 유지성능 및 증점제와의 적합성에 대한 평가항목이 필요할 것으로 사료된다.

## 5.2 굳지 않은 콘크리트의 결과분석

굳지 않은 콘크리트에 대한 품질관리는 슬럼프 플로우, 플로우 50cm 도달시간, 공기량 및 염화물 측정을 기본으로 하였다. 시험시기는 고성능 AE감수제의 분산성능을 고려하여 생산후 15분으로 정하였으며, 시험빈도는 초기에 3대의 에지테이터에 대해 실시하고 그후에

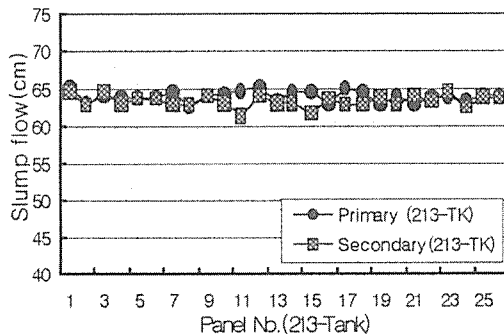
는 콘크리트 100m<sup>3</sup>당 1회로 측정하였다. #213, 214-Tank의 판넬별 굳지 않은 콘크리트에 대한 측정결과는 다음과 같다.

### 5.2.1 슬럼프 플로우에 대한 결과분석

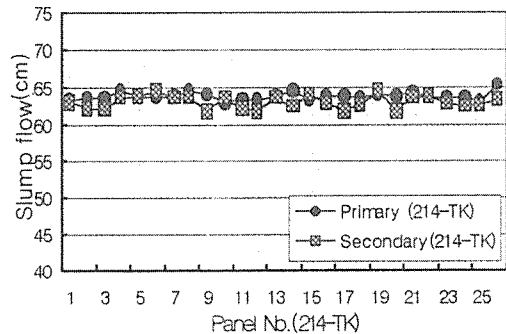
인천 LNG 지하탱크(213, 214-TK)의

지하연속벽에 타설된 초유동 콘크리트의 슬럼프 플로우에 대한 판넬별 품질관리 결과는 (Fig.5) 및 (Fig.6)과 같다.

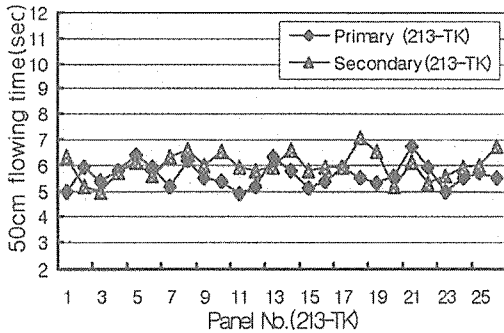
슬럼프 플로우에 대한 측정결과, (Fig.5)에 나타난 213-TK의 경우, 선행판넬은 평균 64.0cm, 최대 65.3cm, 최소 62.7cm이고, 이때의 표준편차는 0.7cm였으며, 후행판넬은 평균 63.3cm, 최대 54.5cm, 최소 61.5cm이며, 이때의 표준편차는 0.8cm로 나타났다. (Fig.6)의 214-TK 경우, 선행판넬은 평균 63.7cm, 최대 65.1cm, 최소 62.9cm이고, 이때의 표준편차는 0.8cm였으며, 후행판넬은 평균 63.0cm, 최대 64.5cm, 최소 61.8cm이며, 이때의 표준편차는 0.8cm로 나타났다. 각각의 탱크에서 선행판넬의 경우에는 26판넬의 시험Lot가 판넬당 평균 10회임을 감안하면 260회의 슬럼프 플로우에



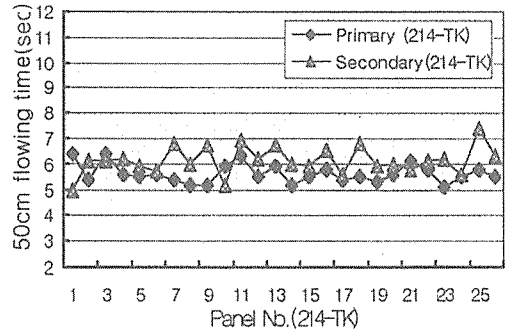
(Fig.5) Test results for slump flow(213)



(Fig.6) Test results for slump flow(214)



(Fig.7) Test results for 50cm flow(213)



(Fig.8) Test results for 50cm flow(214)

대한 결과이며, 후행판넬의 경우에는 24판넬의 시험Lot가 판넬당 평균 4회이며 여기에 Drainage pit 20회를 포함하면 116회의 슬럼프에 대한 결과로써 관리규준인  $65 \pm 5\text{cm}$ 를 만족할 뿐만 아니라 편차도 매우 적은 것으로 나타났다.

### 5.2.2 플로우 50cm 도달시간에 대한 결과분석

슬럼프 플로우를 측정하면서 초유동 콘크리트의 플로우가 50cm에 도달하는 시간을 측정한 품질관리 결과는 [Fig.7] 및 [Fig.8]과 같다.

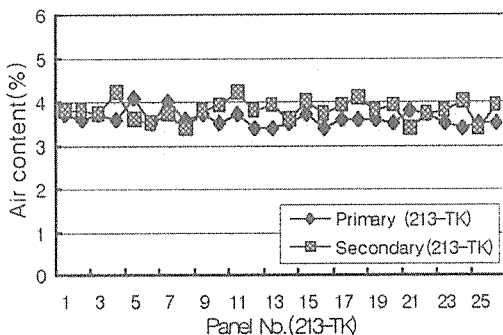
플로우 50cm 도달시간에 대한 측정결과, [Fig.7]에 나타난 213-TK의 경우, 선행판넬은 평균 5.6초, 최대 6.7초, 최소 4.9초이며, 표준편차는 0.5초였다. 후행판넬은 평균 6.0초, 최대 7.1초, 최소 5.0초이며, 이때의 표준편차는 0.5초였다.

[Fig.8]의 214-TK 경우, 선행판넬은 평균 5.6초, 최대 6.4초, 최소 5.1초이고, 표준편차는 0.4초였다. 후행판넬은 평균 6.1초, 최대 7.4초, 최소 5.0초이며, 표준편차는 0.5초로 나타났다. 전체적으로는 관리규준인 4~10초를 만족하고 있으나, 대체로 점성이 낮은 것으로 판단된다. 특히, 콘크리트 온도가 높을수록 점성이 낮게 나타났으며, 이는 증점제의 온도 민감성에 따른 것으로 평가된다.

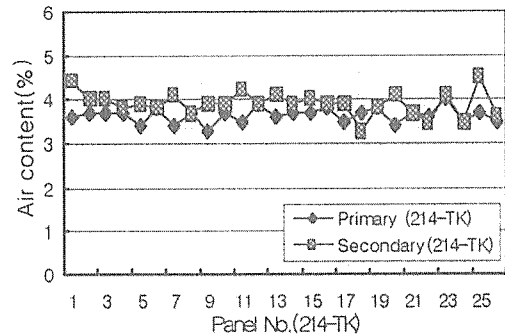
### 5.2.3 공기량에 대한 결과분석

인천 LNG 지하탱크(213, 214-TK)의 지하연속벽에 타설된 초유동 콘크리트의 공기량에 대한 품질관리 결과는 [Fig.9] 및 [Fig.10]과 같다.

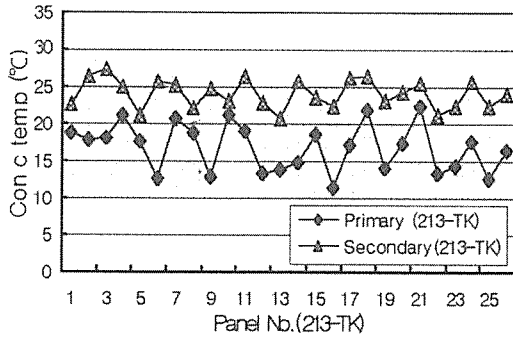
공기량 측정결과, [Fig.9]에 나타난 213-TK의 경우, 선행판넬은 평균 3.6%, 최대



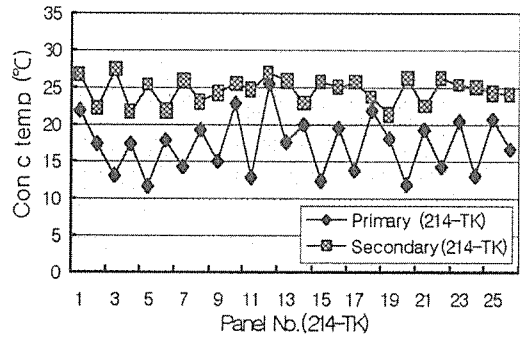
(Fig.9) Test results for air content(213)



(Fig.10) Test results for air content(214)



(Fig. 11) Test results for con'c temp. (213)



(Fig. 12) Test results for con'c temp. (214)

4.1%, 최소 3.4%이며, 후행판넬은 평균 3.8%, 최대 4.2%, 최소 3.4%로 나타났다. 표준편차는 동일하게 0.2%를 나타내었다. [Fig.10]의 214-TK 경우, 선행판넬은 평균 3.6%, 최대 4.0%, 최소 3.3%이고, 표준편차는 0.2%였다. 후행판넬은 평균 3.9%, 최대 4.5%, 최소 3.3%이며, 표준편차는 0.3%로 나타났다. 전체 판넬의 공기량 시험결과는 관리규준인  $4 \pm 1\%$ 를 만족하는 것으로 나타났다.

#### 5.2.4 콘크리트 온도에 대한 결과분석

지하연속벽에 타설된 초유동 콘크리트의 온도에 대한 품질관리 결과는 [Fig.11] 및 [Fig.12]와 같다

콘크리트의 온도 측정결과, [Fig.11]에 나타난 바와같이 선행판넬은 평균 16.2°C, 최대 22.3°C, 최소 11.4°C였으며, 후행판넬은 평균 24.1°C, 최대 27.4°C, 최소 20.6°C를 나타내었으며, 표준편차는 각각 3.2°C 및 1.9°C로 나타났다. [Fig.12]의 214-TK 경우, 선행판넬은 평균 17.3°C, 최대 25.4°C, 최소 11.7°C이며, 표준편차는 3.8°C였다.

후행판넬은 평균 24.6°C, 최대 27.3°C, 최소 21.4°C이며, 표준편차는 1.7°C로 나타났다. 이러한 차이는 지하연속벽 콘크리트의 타설기간이 3월부터 6월말까지 계속된 것이기 때문에, 외기온의 변동에 따른 것으로 시기적

으로 6월에 타설한 후행판넬의 콘크리트 온도가 높게 나타났다. 그러나, 콘크리트 온도의 관리기준인 10~30°C를 만족하고 있다.

### 5.3 압축강도에 대한 결과분석

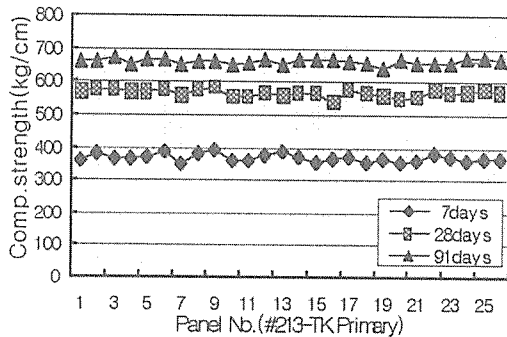
압축강도에 대한 품질관리는 91일을 목표강도로 하고 7일, 28일을 재령강도로 측정하였다. 시험빈도는 초기에 3대의 에지테이터에 대해 1회, 그후에는 콘크리트 100m<sup>2</sup>당 1회로 9개의 공시체를 제작하였다. #213, 214-Tank의 판넬별 콘크리트의 압축강도 측정결과는 다음과 같다.

#### 5.3.1 #213-TK의 재령별 압축강도

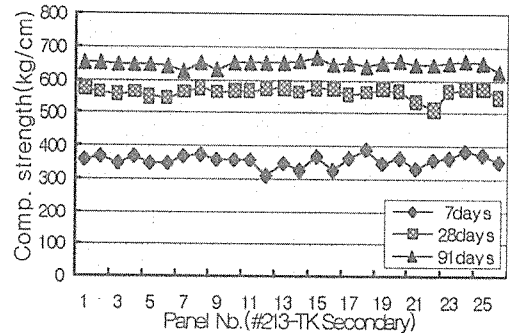
인천 LNG #213 지하탱크의 지하연속벽에 대한 선행판넬 및 후행판넬의 재령별 압축강도는 각각 [Fig.13] 및 [Fig.14]와 같다.

#213-TK 지하연속벽의 선행판넬에 대한 압축강도 시험결과, 재령 7일의 압축강도는 평균 368kg/cm<sup>2</sup>, 최대 390kg/cm<sup>2</sup>, 최소 351kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었으며, 표준편차는 10.3kg/cm<sup>2</sup>였다. 재령 28일의 압축강도는 평균 565kg/cm<sup>2</sup>, 최대 582kg/cm<sup>2</sup>, 최소 536kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었으며, 표준편차는 10.6kg/cm<sup>2</sup>였다. 재령 91일의 경우, 평균 659kg/cm<sup>2</sup>, 최대 672kg/cm<sup>2</sup>, 최소 641kg/cm<sup>2</sup>으로 이때의 표준편차는 7.9kg/cm<sup>2</sup>였다.





(Fig. 13) Strength results (213-Primary)



(Fig. 14) Strength results (213-Secondary)

후행판넬의 경우, 재령 7일의 압축강도는 평균 356kg/cm<sup>2</sup>, 최대 389kg/cm<sup>2</sup>, 최소 312kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었으며, 표준편차는 17.4kg/cm<sup>2</sup>였다. 재령 28일의 압축강도는 평균 561kg/cm<sup>2</sup>, 최대 576kg/cm<sup>2</sup>, 최소 511kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었으며, 표준편차는 11.0kg/cm<sup>2</sup>였다. 재령 91일의 경우, 평균 647kg/cm<sup>2</sup>, 최대 665kg/cm<sup>2</sup>, 최소 623kg/cm<sup>2</sup>으로 이때의 표준편차는 9.9kg/cm<sup>2</sup>였다.

재령 91일을 기준으로 볼 때, 재령 7일에서 55~56%, 재령 28일에서 86~87%정도의 강도발현을 나타내고 있다.

### 5.3.2 #214-TK의 재령별 압축강도

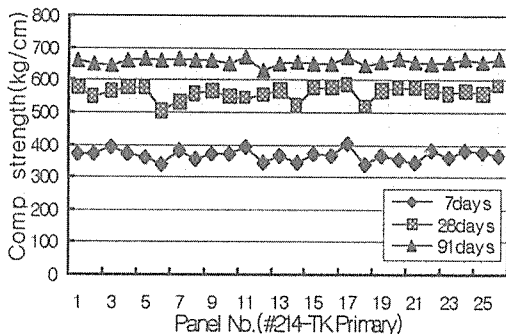
LNG #214 지하탱크의 지하연속벽에 대한 선행판넬 및 후행판넬의 재령별 압축강도는 각각 [Fig. 15] 및 [Fig. 16]과 같다.

#214-TK의 선행판넬에 대한 압축강도 시

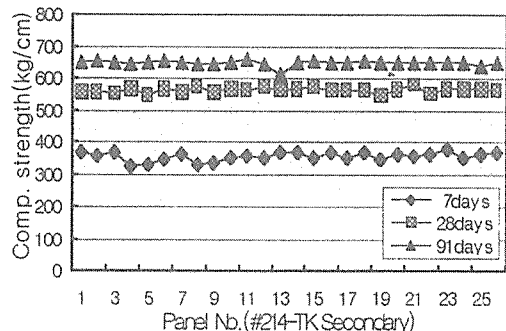
험결과, 재령 7일에서 평균 366kg/cm<sup>2</sup>, 최대 384kg/cm<sup>2</sup>, 최소 344kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었으며, 표준편차는 16.8kg/cm<sup>2</sup>였다. 재령 28일의 경우에는 평균 559kg/cm<sup>2</sup>, 최대 583kg/cm<sup>2</sup>, 최소 530kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었으며, 표준편차는 20.6kg/cm<sup>2</sup>였다. 재령 91일의 경우, 평균 657kg/cm<sup>2</sup>, 최대 674kg/cm<sup>2</sup>, 최소 638kg/cm<sup>2</sup>으로 이때의 표준편차는 9.7kg/cm<sup>2</sup>였다.

후행판넬의 경우, 재령 7일의 압축강도는 평균 355kg/cm<sup>2</sup>, 최대 367kg/cm<sup>2</sup>, 최소 343kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었으며, 표준편차는 13.5kg/cm<sup>2</sup>였다. 재령 28일에서는 평균 563kg/cm<sup>2</sup>, 최대 576kg/cm<sup>2</sup>, 최소 550kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었으며, 표준편차는 7.8kg/cm<sup>2</sup>였다. 재령 91일의 경우, 평균 645kg/cm<sup>2</sup>, 최대 654kg/cm<sup>2</sup>, 최소 637kg/cm<sup>2</sup>으로 이때의 표준편차는 8.4kg/cm<sup>2</sup>였다.

재령 91일을 기준으로 볼 때, 재령 7일에서



(Fig. 15) Strength results (214-Primary)



(Fig. 16) Strength results (214-Secondary)

55~56%, 재령 28일에서 85~87%정도의 강도발현을 나타내고 있다. 따라서, 슬래그 시멘트를 사용할 경우에는 초기강도 발현율이 현저히 높기 때문에, 수화열 측면에서 배합조건을 선정하는데 유의해야 할 것으로 사료된다.

#### 5.4 코아강도에 대한 결과분석

실제 지하연속벽에 타설된 초유동 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위하여 탱크의 내부 굴착을 하면서 높이별 코아시료를 채취한 후, 압축강도 시험을 실시하였다. #213-TK의 경우에는 선행판넬 A02, #214-TK의 경우에는 선행판넬 A22를 대상으로, 상부로부터 18.3m, 30m, 40m 및 50m 심도의 위치에서 코아시료에 대한 압축강도 결과와 해당판넬의 Lot에 대한 실린더 압축강도를 비교하면 [Fig.17] 및 [Fig.18]과 같다.

#213-TK의 A02번 판넬의 경우, 코아강도는 768~784kg/cm<sup>2</sup>의 범위를 나타내고 있는데, 이는 판넬 Lot별 실린더 압축강도에 비해 약 11~19% 증대된 값이며, 배합강도에 비해 48~51% 정도로 증대된 값을 보였다. #214-TK의 A22번 판넬의 경우에도 코아강도는 770~779kg/cm<sup>2</sup>의 범위로 실린더 압축강도에 비해 15~18% 증대된 값을 보였으며, 배합강도에 비해 46~50% 정도로 높은 값을 나타내었다.

이는 지하연속벽의 특수한 환경에서 외부에

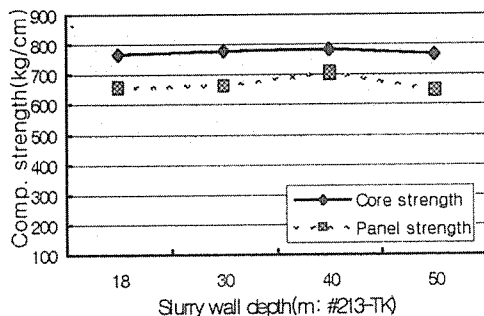
대한 열교환이 없기 때문에, 충분한 보온양생의 조건으로 인한 것으로 사료되며, 특히 콘크리트 타설온도가 높기 때문에 온도상승에 의한 초기강도 발현이 효과적으로 작용한 것으로 평가된다. 그러나, 콘크리트 배합조건에서 단위시멘트량(438kg/cm<sup>2</sup>)이 높기 때문에 병용계 초유동 콘크리트의 배합설계를 비경제적으로 선정된 원인도 간과할 수 없을 것으로 사료된다.

따라서, 해외기술선의 시공실적에 대한 국내 재료 및 배합조건에 대한 면밀한 검토가 선행되어야 할 것이며, 또한 LNG 지하탱크에 고로슬래그 시멘트를 사용할 경우에는 수화열 뿐만 아니라 슬래그 미분말의 자기수축에 대한 사전검토가 요구된다.

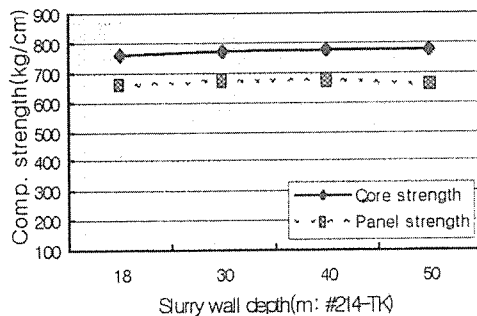
특히, 최근에 와서 일본에서는 슬래그 미분말의 자기수축 특성에 대한 우려 때문에 사용빈도가 감소되는 실정에 비해 국내에서는 슬래그 미분말 또는 슬래그 시멘트의 사용빈도가 증가되는 현실은 한번쯤 검토해 볼 필요가 있을 것으로 사료된다.

### 6. 맺음말

지면상 인천 LNG 지하탱크(#213,214-TK)의 지하연속벽에 타설된 병용계 초유동 콘크리트에 대해 상세한 결과분석을 서술하기는 매우 한정되어 있어서 어렵지만, 중요한 콘크리트 공정사항에 대한 결과 및 특성을 나



[Fig. 17] Core strength results(213)



[Fig. 18] Core strength results(214)

대로 분석하였다.

병용계 초유동 콘크리트에 고로슬래그 시멘트를 사용할 경우에는 무엇보다 단위시멘트량을 최소화시킬 필요가 있으며, 가능하면 자기수축에 의한 거동을 사전에 검토하는 것이 바람직하다. 특히, 매스구조물에 대한 균열대책으로 High Belite계 시멘트 또는 플라이애쉬를 사용하는 방안도 검토할 필요가 있다.

특히, 본 논문에서 분석한 LNG 지하탱크(#213,215-TK)의 경우에는 해외기술선에서 제시한 재료 및 배합조건에 대한 충분한 사전이 이루어지지 않았으며, 최적배합에 대한 국내 재료의 특성 및 경제성을 충분히 반영하지 못한 아쉬움이 남는다.

결론적으로 LNG 지하탱크의 지하연속벽과 같은 특수조건에 사용되는 초유동 콘크리트에 대한 요소기술의 축적과 이러한 엔지니어링 기술을 바탕으로 후속공사인 #215,216-TK는 물론 향후 해외공사에도 국내의 기술력이 해외기술선으로 참가할 수 있도록 많은 기술자들의 관심과 노력이 필요할 것으로 본다.

지금까지 #213,214-TK의 지하연속벽 공사를 위해 노력해 준 삼성·대우·대아건설 관계자 및 발주처인 한국가스공사, 그리고 동아지질을 포함한 협력업체 관계자 여러분께 감사드리는 바이다. 특히, 이러한 콘크리트의 요소기술 및 경험축적이 국내의 콘크리트 기술향상 및 시공기술에 기여할 수 있기를 바라며, 본 논문을 통해 많은 기술공유가 이루어지길 기대한다.

## 참고 문헌

- (1) 朴斗林, 安宰鉉, 權寧鎬, 李相洙., “碎砂を用いた高流動コンクリートの實施工例-トップダウン工法への適用”, 高機能コンクリートに関する第2回韓日セミナー講演論文集, 名古屋大學(日本) 1998.7. pp.61~71
- (2) Park-chil lim, Ahn-jae hyun, Kwon-yeong ho, Lee-sang soo., “The practical application on the super flowing concrete in a method of construction of under pinning”, Proceedings of the 4th Japan-Korea Joint symposium on building materials. Feb. 3. 1999. pp.91~96.
- (3) 朴斗林, 權寧鎬, 李相洙, 金東錫, 金鎮根, “초유동 콘크리트의 現場施工”, 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집 제8권1호, 1996.5. pp.402~407
- (4) 金武漢, 權寧鎬, 李相洙., “다짐불필요 콘크리트의 개발 및 시공상 문제점에 대한 고찰”, 대한건축학회 추계학술발표 논문집 제15권2호, 1995.11. pp.757~760
- (5) 건설교통부 '94연구개발사업 최종보고서, R&D/94-0022, “초유동 콘크리트의 개발 및 실용화 연구”, 대우건설기술연구소·동양시멘트·한국과학기술원, 1996.10
- (6) 魚本健人, 小澤一雅, 河井 徹, 渡部 正., “土木學會 高流動コンクリート施工指針について”, コンクリート工學 Vol 36, No.10, 1998.10. pp.9~17.
- (7) 朴斗林, 權寧鎬, 安宰鉉, 李相洙, 金武漢., “석회석분을 사용한 초유동 콘크리트의 유동특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표 논문집 제9권2호, 1997.11. pp. 369~374
- (8) 青木茂, 三浦律彦, 十河茂幸., “各種鑛物質微分末を用いた低發熱超高强度コンクリートに関する基礎研究”, コンクリート工學, Vol.15, No.1. pp.37~42, 1993.
- (9) 木村芳幹, 寺田早苗, 關口賢二, 田村 博., “碎石粉使用高流動コンクリートの硬化性狀”, コンクリート工學年次論文集, Vol.17, No.1. pp.167~172, 1995.
- (10) JSCE(日本土木學會) “高流動コンクリートに関する技術の現狀と問題”, Concrete Engineering Series 15. 1996.