

# 초유동 콘크리트의 현장적용 및 품질관리

## (인천지하철 1-10공구 적용사례)

박 칠 립

<<주> 대우건설 기술연구소 소장, 공박>

권 영 호

<<주> 대우건설 기술연구소 선임연구원>

이 상 수

<<주> 대우건설 기술연구소 주임연구원>

- |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. 머리말                | 3.3 레미콘 공장 선정 및 시험 배합 |
| 2. 현장적용 사례 및 배합설계     | 3.4 경시변화 및 최적배합       |
| 2.1 지금까지의 현장적용사례      | 3.5 현장 예비시공           |
| 2.2 사용재료의 특성          | 4. 현장시공 및 결과 분석       |
| 2.3 초유동 콘크리트의 평가항목    | 4.1 초유동 콘크리트의 제조 및 운반 |
| 2.4 초유동 콘크리트의 배합설계 순서 | 4.2 현장 품질관리 방안        |
| 2.5 배합강도 산정           | 4.3 현장시공              |
| 3. 현장적용 개요 및 시험 배합    | 4.4 현장시공에 따른 결과분석     |
| 3.1 공사개요              | 5. 결론                 |
| 3.2 시공계획              |                       |

## 1. 머리말

건설교통부의 국책과제로 "초유동 콘크리트의 개발 및 실용화 연구"가 수행된 이래, 최근의 연구동향을 살펴보면, 레오로지의 기초물성<sup>1)</sup> 및 유동특성<sup>2)</sup>· 재료특성<sup>3)</sup>· 증점제<sup>4)</sup>· 보통강도화에 관한 연구<sup>5)</sup> 등과 같은 분야의 기초연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 이러한

연구성과를 바탕으로 몇차례 현장에 초유동 콘크리트를 적용한 사례도 보고되었다.<sup>6),7),8)</sup>

본 연구는 최근에 언더피닝(Under pinning) 공법으로 시공중인 인천광역시 지하철의 상부슬래브(Top slab)에 적용한 초유동 콘크리트의 제조, 배합설계 및 현장 품질관리에 관한 연구결과를 분석한 것이다. 특히, 지금까지의 초유동 콘크리트 적용사례는 대부분 건축

구조물에 국한되었지만, 본 연구를 통해 지하철과 같은 토목구조물에 적용하게 되므로 초유동 콘크리트의 적용범위를 한층 더 넓히는 계기가 되었다.

시공구간의 콘크리트 타설작업이 어려웠던 점 외에도 중요한 국가 기간산업인 지하철 구조물에 초유동 콘크리트를 적용하게 된 배경은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 실용화에 대한 자료 및 경험축적
- (2) 구조물의 복잡화 및 시공의 어려움
- (3) 발주처 · 감리단 · 시공사의 신기술 마인드
- (4) 초유동 콘크리트의 필요성 제기
- (5) 레미콘 제조설비 및 공급망 확보

특히, 시공의 어려움과 공사관련 기관들의 적극적인 적용의지 및 품질관리에 대한 높은 의식은 초유동 콘크리트의 실용화에 매우 바람직한 현상으로 자리매김을 하는 계기가 되었다.

었다.

본 연구에서는 현장조건 및 레미콘의 사용재료와 제조시스템에 적합한 초유동 콘크리트의 최적배합비를 도출한 후, 현장에서 요구하는 성능을 만족하는 초유동 콘크리트의 제조 · 운반 · 타설 · 마감 및 품질관리 등을 대상으로 고품질 시공성에 대해 서술하고자 한다.

## 2. 현장적용 사례 및 배합설계

### 2.1 지금까지의 현장적용 사례

건설교통부 국책과제를 수행하면서 지금까지 초유동 콘크리트를 현장에 적용한 사례는 [표 1]과 같다.

동광양 슬래그공장 및 DWS시흥 대우아파트의 경우, 현장타설 및 2차제품 적용성에 대

[표 1] 기존의 초유동 콘크리트 적용사례

조건 \ 현장	동광양 슬래그 공장	대우연구소 대형구조 실험동	DWS 시흥 대우Apt	을지로 덕수빌딩
타설부위	벽체, 슬래브	반력벽	Unit (3D)	벽체, 코아, 기둥
배근조건	R/C구조	과밀배근 관매립	벽식구조, 과밀배근	Top Down (다짐불가)
타설조건	2층 건물	약 15m	1층 Unit	지하2~3층
타설시기	94년 12월	95년 8월	96년 8월	97년 6월
레미콘 생산조건	플라이애쉬 수동투입	플라이애쉬 자동투입	플라이애쉬 자동투입	플라이애쉬 자동투입
설계강도	210 kg/cm <sup>2</sup>	350 kg/cm <sup>2</sup>	270 kg/cm <sup>2</sup>	270 kg/cm <sup>2</sup>
거푸집 조건	일반 거푸집	대형시스템 거푸집	Unit 시스템 거푸집	일반 거푸집
운반시간	30분	30분	45분	50분
레미콘 제조	동양레미콘 동광양	동양레미콘 군포공장	유진레미콘 소래공장	삼표레미콘 성수공장
비 고	-동계공사 -일반공사 -시험적용 (48m <sup>2</sup> )	-초유동 (70m <sup>2</sup> ) -저발열 (350m <sup>2</sup> )	-증기양생 -표면상태 -시험적용 (30m <sup>2</sup> )	-부순모래 사 용 -초유동 (100m <sup>2</sup> )

한 시험적용이었지만, 대우연구소 및 덕수빌딩의 경우에는 현장에서 초유동 콘크리트가 필요한 조건으로 인하여 Needs형 적용사례는 분류할 수 있다. 특히, 레미콘 공급원도 동양, 유진, 삼표레미콘 등과 같이 다변화되었으며, 적용지역도 동광양, 인천, 서울, 군포 등에 분포되어 있기 때문에 초유동 콘크리트의 범용화를 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

이러한 적용사례를 바탕으로 초유동 콘크리트의 재료선정, 배합설계, 현장 품질관리를 실시하게 되었으며, 특히 초유동 콘크리트의 제조경험이 없는 레미콘 공장을 공급원으로 정하여 자연스런 초유동 콘크리트의 기술이전이 가능하게 되었다.

## 2.2 사용재료의 특성

본 연구에 사용되는 시멘트와 플라이애쉬의 품질시험 결과는 [표 2]와 같다.

여기서, \*는 플라이애쉬 30%를 치환한 혼합시멘트의 특성을 의미한다. 또한, 굵은골재는 용원석산의 19mm쇄석이며, 잔골재는 남양만의 세척모래로 품질시험 결과는 [표 3]과 같다. 그리고, 고성능 감수제는 J社의 나프탈렌계를 사용하였다.

## 2.3 초유동 콘크리트의 평가항목

초유동 콘크리트의 성능은 [표 4]의 항목으로 평가하였으며, 시험장치 및 규정값은 기존의 제안<sup>8)</sup> 및 지금까지의 실적을 근거로 정하였다.

[표 2] 시멘트의 품질시험 결과

구 분 종 류	강열 감량 (%)	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	안정도 (%)	응결시간 (hr:min)		압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )		
				초결	종결	3일	7일	28일
시멘트	0.71	3,260	0.05	3:83	6:10	195	293	397
플라이애쉬	3.91	3,187	0.03*	6:25*	9:05*	121*	193*	325*

[표 3] 골재의 품질시험 결과

구 분 종 류	비중	흡수율 (%)	조립율 (F.M)	실적율 (%)	안정성 (%)	단위 중량 (kg/m <sup>3</sup> )
잔골재	2.60	0.35	2.85	58.3	-	1,516
굵은골재	2.63	0.62	6.57	58.3	5.15	1,530

[표 4] 품질관리의 항목 및 규정값

구 분	시험장치	규정값	검사빈도	비고
유동성	슬럼프 플로우	65±5cm	· 시험배합 (매회)	플로우
	O형 깔대기	10±5sec		유하시간
충진성	U형 Box	5cm이하	· 현장검사 (100m <sup>2</sup> 당)	높이차
	과밀 배근	관찰		-

유동성 평가는 슬럼프 플로우 및 깔대기 유하시험을 대상으로 하였으며, 충전성 평가는 간극통과성 박스시험, 과밀배근 충전성을 대상으로 재료분리 저항성도 함께 검토하였다.

특히, 현장에서는 초유동 콘크리트의 품질이 안정될 때까지 매차당 품질시험을 실시하고, 그후에는 100m³당 1회 실시하는 것이 바람직하다.

## 2.4 초유동 콘크리트의 배합설계 순서

배합설계의 기본개념은 콘크리트에 유동성·충전성·재료분리 저항성을 부여하기 위한 것으로, 이에 적합한 배합수, 시멘트, 잔골재, 굵은골재, 공기량의 비율 및 필요한 고성능 감수제와 AE제의 사용량을 합리적으로 산정해야 한다.

따라서, 물/결합재비(W/B) 외에 결합재의 구속수비(拘束水比:β<sub>p</sub>), 잔골재 용적비(S<sub>r</sub>), 굵은골재 용적비(G<sub>v</sub>)와 같은 새로운 개념을 도입하여, 레오로지 측면에서 초유동 콘크리트의 배합설계를 다음과 같이 수행하도록 하였다.

### (1) 잔골재 용적비(S<sub>r</sub>)

초유동 콘크리트에 사용되는 잔골재는 0.06mm 이상을 대상으로 배합설계에 반영해야 한다. 잔골재 용적비(S<sub>r</sub>)는 전체 모르타에서 잔골재가 차지하는 용적비를 나타낸 것으로 미립잔골재의 비율(S<sub>m</sub>)을 고려하여 다음식으로 산정한다.

$$S_r = \frac{S/M}{1 - S_m} \dots \dots \dots (1)$$

여기서, S는 잔골재 용적, M은 모르타의 용적, S<sub>m</sub>은 잔골재 용적에서 0.06mm 미만인 입자의 비율을 나타낸 것이다. 0.06mm 미만의 입자가 2%미만일 경우에는 결합재의 구속수비

에 미치는 영향이 적기 때문에 무시한다.

### (2) 물/시멘트 용적비

배합설계에 앞서 시멘트 또는 분체입자가 구속하는 단위수량, 즉 유동에 기여하지 않는 수량을 먼저 산정해야 한다. 이를 구속수량, 시멘트 입자가 구속하는 수량비를 구속수비로 정의한다.

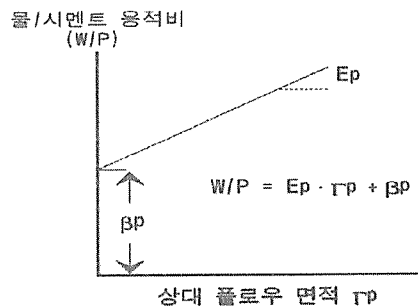
구속수비는 페이스트의 물/시멘트 용적비(W/P) 1.1, 1.2, 1.3 및 1.4를 대상으로 실험하여 다음식과 같은 상대플로우 면적비(Γ<sub>p</sub>)의 관계로 회귀분석하여 산정한다.

$$\begin{aligned} \Gamma_p &= \frac{\pi(F_p/2)^2 - \pi(F_0/2)^2}{\pi(F_0/2)^2} \\ &= (F_p/F_0)^2 - 1 \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

여기서, F<sub>p</sub>는 페이스트의 플로우 값(mm), F<sub>0</sub>는 플로우-콘의 단면직경(100mm)을 나타낸다.

플로우 시험에서 물/시멘트 용적비는 상대플로우 면적비와 매우 밀접한 상관성을 갖는다. 상대플로우 면적비와 물/시멘트 용적비를 직선회귀분석하여 상대플로우 면적비가 0이 되는 물/시멘트 용적비, 즉 직선의 절편값을 구속수비(β<sub>p</sub>)라 하며 다음식 및 [그림 1]과 같이 나타낸다.

$$W/P = E_p \cdot \Gamma_p + \beta_p \dots \dots \dots (3)$$



(그림 1) 구속수비의 회귀분석(Γ<sub>p</sub>-W/P)

이성분계 초유동 콘크리트의 경우에도 결합재의 치환율에 따라 동일한 과정으로 구속수비를 결정한다.

물/시멘트 용적비는 시멘트의 구속수비에 적당한 상수( $K_p$ )를 곱하여 산정하며, (1)식에서 산정한 잔골재 용적비( $S_r$ )로부터 고성능 감수제의 첨가량을 변화시키면서 플로우 시험 및 깔대기 시험을 실시한다. 여기서 구한 물/시멘트 용적비와 잔골재 용적비로부터 모르타 배합을 계산한다.

모르타의 깔대기 유하시험에서 상대깔대기 속도비( $R_m$ )는 다음식으로 산정한다.

$$R_m = \frac{10}{T_r} \dots\dots\dots(4)$$

여기서,  $T_r$ 은 V형 깔대기의 유하시간(流下時間:sec)을 의미한다.

또한, 모르타의 상대플로우 면적비와 상대 깔대기 속도비의 관계에서 상대플로우 면적비 5에 대응하는 상대깔대기 속도비를 구한다.

상대깔대기 속도비가 0.9~1.1의 범위에 있을 때, 설정한 물/시멘트 용적비를 콘크리트의 배합에서 물/시멘트 용적비라고 한다.

### (3) 굵은골재 용적비(GV)

굵은골재는 초유동 콘크리트의 충전성에 영향을 미치며, 골재의 최대크기, 입도분포, 입형 등에 따라 다르다. 따라서, 굵은골재 용적비는 골재의 실적율을 고려하여 충전성 시험으로 결정해야 하며, 공기를 제외한 콘크리트의 용적에서 굵은골재가 차지하는 비율로 표시한다.

### (4) 콘크리트 배합계산

초유동 콘크리트의 배합계산은 앞에서 선정한 잔골재 용적비, 물/시멘트 용적비, 굵은골재 용적비, 공기량 및 굵은골재의 실적율( $G_a$ )

에 따라 다음식으로 재료용적( $l$ )을 산정한다.

$$A = \text{목표공기량 (Air)} \dots\dots\dots(5)$$

$$G = G_o \times G_d \times (1 - A) \dots\dots\dots(6)$$

$$S = S_r \times (1 - A - G) \dots\dots\dots(7)$$

$$W = (1 - A - G) \times (1 - S_r) \times \frac{K_p \times \beta_p}{1 + (K_p \times \beta_p)} \dots\dots(8)$$

$$C = (1 - A - G) \times (1 - S_r) \times \frac{1}{1 + (K_p \times \beta_p)} \dots\dots(9)$$

여기서, 산정된 각각의 재료량은 용적이기 때문에 비중을 곱하면 필요한 중량을 구할 수 있다. 또한, 이성분계 초유동 콘크리트에서는 치환율에 따른 결합재(C+FA)의 식 또는 각각의 산정식으로 계산한다. 이 경우에는 각각의 비중 및 구속수비를 함께 고려해야 한다.

### (5) 고성능 감수제 및 AE제 사용량

고성능 감수제 및 AE제의 사용량은 시험에 의해 결정한다. 공기량은 목표범위내에서, 슬럼프 플로우는  $65 \pm 5\text{cm}$  범위에서 각각의 사용량을 구하며, 모르타와 마찬가지로 콘크리트의 V형 깔대기 유하시험을 실시한다.

## 2.5 배합강도 산정

초유동 콘크리트의 배합강도는 다음식에서 큰 값으로 산정하였다.

$$F \geq 0.85 \cdot (F_q + T) + 3 \cdot \sigma \dots\dots\dots(10)$$

$$F \geq F_q + T + 1.73 \cdot \sigma \dots\dots\dots(11)$$

여기서,  $F$ 는 배합강도,  $F_q$ 는 품질기준강도로 설계기준강도에  $30\text{kg/cm}^2$ 를 더한 값이다. 또한, 압축강도의 최소보증값은 품질기준강도와 온도보정값( $T$ )의 85%로, 정규편차는 불량율을 4%로 한 1.73을 적용하였다. 또한, 표준편차( $\sigma$ )는  $35\text{kg/cm}^2$ 로 하였다. 따라서, 설계기

준강도(240kg/cm<sup>2</sup>)에 따른 배합강도는 340kg/cm<sup>2</sup>이상을 목표로 정하였다.

### 3. 현장적용 개요 및 시험배합

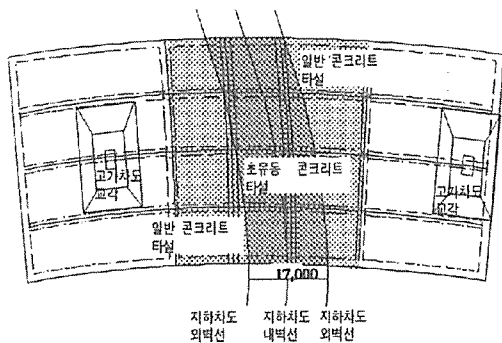
#### 3.1 工事概要

초유동 콘크리트의 적용현장은 인천광역시에서 건설중인 인천지하철 1-10공구로 공사개요는 [표 5]와 같고, 적용부위의 평면 및 단면상세는 각각 [그림 2] 및 [그림 3]과 같다.

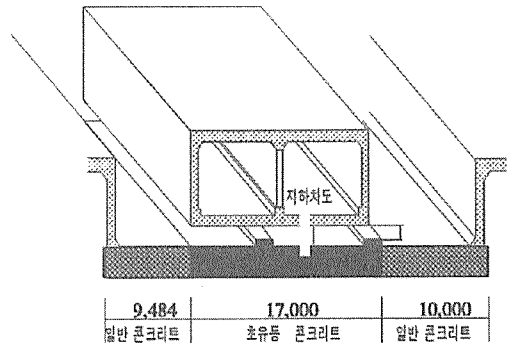
특히, [그림 3]에 나타난 바와 같이 기존의 지하차도와 상부슬래브 사이는 10~40cm 정도로 매우 협소한 공간이기 때문에 콘크리트 타설작업이 곤란하였다.

(표 5) 적용현장의 공사개요

구분	내용
현장명	인천지하철 1-10공구 (간석오거리)
타설부위	Under Pinning Top Slab (W17m×L40m×t1.2m)
적용기간	1998. 5.11~1998. 5.20
구조물 특징	과밀배근, 작업공간 협소
발주처	인천광역시 지하철건설본부
감리단	(주)대우건설
시공사	동부건설(주)



(그림 2) 적용구조물의 평면도



(그림 3) 적용구조물의 단면도

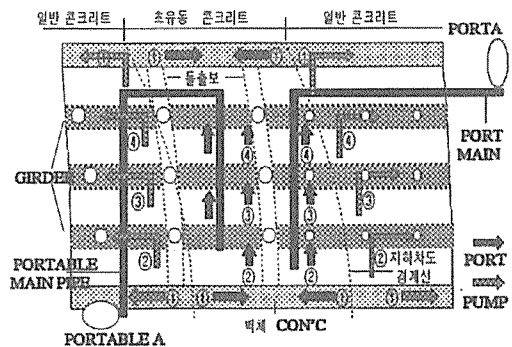
#### 3.2 施工計劃

적용현장은 교통이 혼잡한 5거리일 뿐 아니라 타설부위인 지하차도와 상부슬래브와의 사이가 협소하기 때문에, 사전에 면밀한 시공계획을 세워야 한다. [그림 4]는 초유동 콘크리트의 현장 시공계획을 나타낸 것이다.

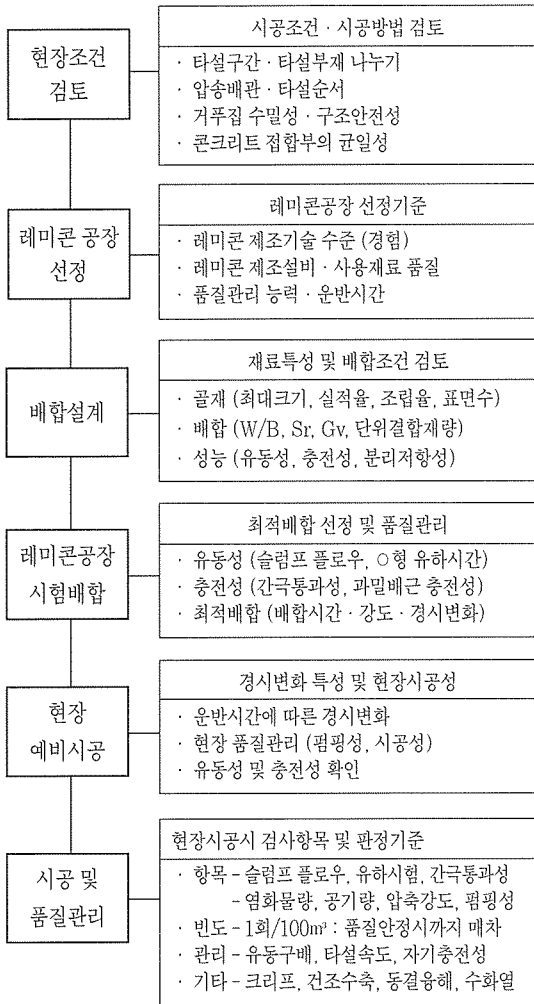
또한, 초유동 콘크리트의 압송배관 및 타설계획은 [그림 5]와 같이 설정하였다.

현장조건을 고려하여 타설작업이 어려운 지하차도 하부는 초유동 콘크리트로 타설하고, 양쪽은 일반 콘크리트로 타설하도록 계획하였다.

따라서, 일반 콘크리트를 이동식 펌프로 먼저 타설하여 경계블록을 형성하면서 포터블 펌프로 초유동 콘크리트를 타설하는 방안을 채택하였으며, 이를 위해 작업자 1명이 초유동



(그림 5) 압송배관 및 타설계획



(그림 4) 초유동 콘크리트의 현장 시공계획

콘크리트의 유동구배를 고려한 타설간격에 따라 압송배관을 제거하면서 일방향으로 타설하도록 하였다.

[사진 1]은 현장의 철근배근 상황을 나타낸 것이며, [사진 2]는 상부슬래브에 초유동 콘크리트의 타설을 위해 설치한 압송배관이다.

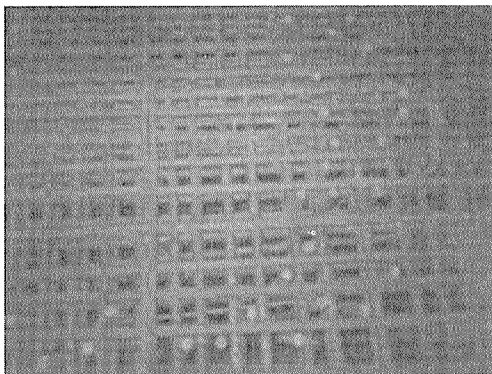
### 3.3 레미콘공장 선정 및 시험배합

현재, 인천지역에서 초유동 콘크리트의 제조경험이 있는 레미콘공장은 드물기 때문에, 제조설비 및 현장과의 운반거리를 고려하여 공장을 선정한 후, 본 연구팀과 공장의 품질관리팀이 공동으로 제조 · 품질관리를 담당하도록 하였다.

이러한 조건에 적합한 레미콘공장을 조사한 결과, 현장에서 30분정도가 소요되며 비교적 제조설비 및 품질관리 능력이 있는 것으로 평가된 경인레미콘 원창공장을 공급처로 선정하였다. 배치 플랜트(이하, B/P)의 설비조건은 [표 6]과 같다.

특히, 선정된 레미콘 공장은 저발열 콘크리트를 제조한 경험 및 설비가 구비되어 있기 때문에, 초유동 콘크리트의 생산성 및 품질관리에는 큰 문제가 없는 것으로 평가되었다.

배합설계 방법에 따라 구속수비, 모르터의



(사진 1) 상부슬래브의 과밀배근 상황



(사진 2) 상부슬래브의 압송배관 설치상황

[표 6] 레미콘 공장의 설비 및 재료사양

구분	설비 및 재료사양
Mixer Type	· Twin Shaft 2기 (240m <sup>3</sup> /hr) · 배합용량 (4m <sup>3</sup> /회)
Silo	· 시멘트 사이로 (2기) · 플라이애쉬 사이로 (1기)
계량용량	· 플라이애쉬 (300kg/회) · 혼화제 (40kg/회)
골재	· 잔골재 (세척모래) · 굵은골재 (19mm쇄석)
시멘트	· S社 (보통 포틀랜드 시멘트)
혼화재료	· 플라이애쉬 (보령산 F급) · 고성능감수제 (J社 Phoenix)

특성을 검토한 후에 플라이애쉬 30%를 시멘트의 중량비(內割)로 치환하도록 결정하였다.

레미콘 시험배합을 실시하기 전에 사용재료에 대한 실내 시험배합을 실시하였으며, 결과는 [표 7]과 같다.

여기서, FA-35-177은 F급 플라이애쉬-물/

결합재비-단위수량을 나타낸 것이다. 이때, 플라이애쉬 30%를 치환한 결합재의 구속수비( $\beta P$ )는 1.03, 변형계수( $E_r$ )는 0.08로, 이를 배합설계에 반영하였다. 시험배합은 60 l 용량의 강제식 믹서로 30 l 씩 하였으며, 배합방법은 일괄투입법, 비빔시간은 2분으로 하였다.

고성능 감수제의 첨가량은 1.5%로 동일하였다. 실험결과, FA-35-177 및 FA-37-180 조건이 우수한 유동성·충진성을 나타내어, 실내 최적배합으로 결정하였다.

실내 최적배합 조건을 대상으로 B/P의 시험배합을 실시하였으며, 실험결과는 [표 8]과 같다.

이때, 재료 투입방법은 일괄투입이며, 전체 배합시간은 믹서 암페어가 균일하게 되는 60 초로 하였다.

실험결과, 고성능 감수제 첨가량을 0.3% 증대시킨 FA-35-177조건이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이때, 공기량은 배합조건에 관계

[표 7] 레미콘 공장의 실내시험 결과

구분 배합명	배합조건(%)			슬럼프 플로우 (cm)	유동 속도 (cm/s)	유하 시간 (sec)	간극 통과성 (cm)
	W/B	Sr	Gv				
FA-35-177*	35	47	51	66.0	0.92	11.2	4.0
FA-35-184	35	47	52	67.0	0.34	8.0	6.0
FA-36-180	36	47	52	61.5	0.53	7.4	5.0
FA-37-180	37	48	52	65.0	0.77	9.0	4.5

[표 8] 배처 플랜트의 시험배합 결과

배합명	배합조건(%)			슬럼프 플로우 (cm)	유동 속도 (cm/s)	유하 시간 (sec)	간극 통과성 (cm)
	W/B	Sr	Gv				
FA-35-177	35	47	52	57.0	0.67	8.6	4.0
				68.5*	0.71	7.5	4.0
FA-37-180	37	48	52	52.0	0.81	4.0	7.0

\*는 고성능 감수제 첨가율 1.8% (그외 1.5%)



없이 3.5% 정도를 나타내었다.

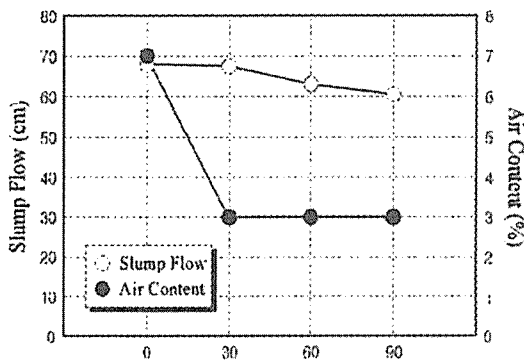
### 3.4 경시변화 및 최적배합

레미콘 시험배합 결과를 토대로 B/P에서 타설현장까지의 운반시간을 고려한 경시변화 특성을 실험하였으며, 결과는 [표 9] 및 [그림 6]과 같다.

실험결과, 시간경과에 따라 슬럼프 플로우 및 공기량은 감소되는 반면에 유하시간은 증

[표 9] 경시변화에 따른 특성결과

경과시간	결과	슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	유하 시간 (sec)	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	
					7일	28일
직후 (0분)*		68.0	7.0	7.6	325	448
경시 30분		67.5	3.0	8.1	317	435
경시 60분		63.0	3.0	8.8	317	439
경시 90분		60.5	3.0	9.0	323	430



[그림 6] 경시변화에 따른 특성시험 결과

대되었는데, 이는 고성능 감수제의 분산성능 저하 및 상대적인 점성증대로 사료된다. 따라서, 타설시간을 1시간 이내로 설정하고 현장에서 고성능 감수제를 후첨가하지 않고 타설하는 방안으로 결정하였으며, 이때의 레미콘 최적배합 조건은 [표 10]과 같다.

즉, 최적배합 조건은 물/결합재비 35%, 잔골재 용적비 47%, 굵은골재 용적비 52%이며, 플라이애쉬 치환율은 30%이다. 또한, 굵은골재의 실적율은 58.3%이다.

[표 10] 레미콘 공장의 최적배합

배합조건(%)			단위재료량(kg/m <sup>3</sup> )					고성능 감수제 (B×%)
W/B	Sr	Gv	C	FA	W	S	G	
35	47	52	354	152	177	825	748	1.8

### 3.5 현장 예비시공

본 구조물인 언더피닝 상부슬래브를 타설하기 전에 현장의 시공성을 확인하기 위하여 지하철 터널라이닝 기초부위에 초유동 콘크리트의 예비시공을 실시하였다. 레미콘 공장에서 현장 타설지점까지 소요되는 시간은 40분 정도였으며, 타설직전의 품질시험 결과는 [표 11]과 같다.

이때, 운반시간에 따른 슬럼프 플로우의 손실은 약 2.2cm였으며, 대부분 현장에서 목표하는 품질규준을 만족하였다. 초유동 콘크리트의 예비시공을 위한 부재는 폭50cm×높이30cm×

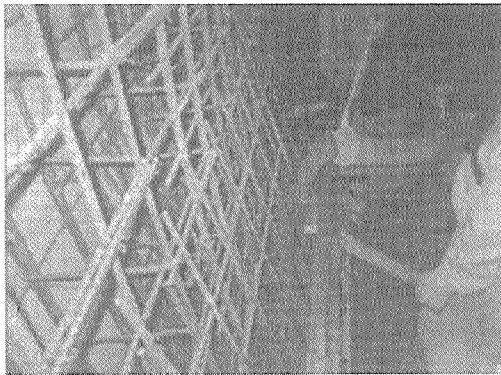
[표 11] 초유동 콘크리트의 품질시험 결과

배합명	배합조건(%)			슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	유하 시간 (sec)	간극 통과성 (cm)
	W/B	Sr	Gv				
FA-35-177	35	47	52	66.5	3.2	5.8	4.3

길이800cm의 터널라이닝 양쪽기초로 과밀배근 조건을 갖고 있다. 예비시공에서는 [표 11]과 같은 품질성능도 중요하지만, 재료분리없이 유동시킬 수 있는 유동거리(유동구배)를 선정하는 것이 중요하였다. 콘크리트 펌핑은 실시공과 마찬가지로 포터블 펌프로 하였으며, [사진 3]은 예비시공 구간인 터널라이닝 하부에 초유동 콘크리트를 타설하는 광경이다.

시공결과, 끝단에서 타설할 경우 자체 유동성으로 800cm까지 충전되었을 뿐만 아니라 셀프레벨 성능까지 나타내었으나, 균일한 콘크리트의 타설을 위한 유동구배의 조절이 필요하였다.

즉, 재료분리가 없는 상태에서 균일한 콘크리트의 특성을 갖는 유동구배는 약 1/7정도로 제한하는 것이 바람직하였다.



[사진 3] 현장 예비시공 (터널라이닝 기초)

## 4. 현장시공 및 결과분석

### 4.1 초유동 콘크리트의 제조 및 운반

초유동 콘크리트의 제조는 일괄투입방법으로 1배치당 비빔시간을 60초로 하였고, 운반량은 트럭 에지테이터당 6m³로 하였다. 레미콘 출하는 평균 8.5분에 1대로 하였으며, 현장 배차간격은 A, B펌프당 각각 15분에 1대로

배정하였다.

특히, 간석5거리의 교통체증을 고려하여 출·퇴근시간에는 배차간격을 조정하도록 하였다.

### 4.2 현장 품질관리 방안

초유동 콘크리트의 품질관리는 크게 레미콘 공장에서 실시하는 항목과 현장 받아들이기 시점에서 실시하는 항목으로 나눌 수 있다.

본 구조물에 초유동 콘크리트를 시공하는데 있어서의 품질관리 항목은 [표 12]와 같다.

특히, 레미콘 공장에서 콘크리트를 적재하기 전에 트럭 에지테이터의 드럼에 잔류수가 있는지를 반드시 확인해야 한다. 또한, 현장의 거푸집 상태가 기밀성을 유지하고 있는 지도

[표 12] 초유동 콘크리트의 품질관리 항목

구분	관리항목	시험방법	기준값	시험빈도
레미콘 공장	잔골재 표면수	KSF 2509	5% 이하	수시
	콘크리트 비빔시간	-	60±10sec	배치당
	에지테이터 관리	-	세척수 배출	매차
	위커빌리티*	육안관찰	-	매차
현장 받아들이기	슬럼프 플로우	JASS 5T-503	65±5cm	1회/80m³
	깔대기 유하시간	JASS 5	10±5sec	1회/100m³
	Box 간극통과성	JASS 5	5cm 이하	1회/100m³
	공기량	KSF 2409	4.5±1.5%	1회/100m³
	콘크리트 온도	디지털 봉형	35℃ 이하	1회/80m³
	콘크리트 염화물	퀀타브법	0.3kg/m³ 이하	1회/80m³

\* 공장출하시의 슬럼프 플로우 시험은 1회/80m³ 실시

사전에 검사해야 하며, 받침기둥은 소요하중을 견딜 수 있도록 견고하게 보강하도록 하였다.

압송배관의 직경은 125mm이며, [그림 5]에서 보듯이 A펌프는 곡관부가 3개소(수평2, 수직1)에 총길이 70m이고, B펌프는 곡관부 2개소(수평1, 수직1)에 총길이 40m로 배관되어 있다.

포터블 펌프는 게이트 벨브식으로 토출량이 81m<sup>3</sup>/hr, 평균 타설속도는 40m<sup>3</sup>/hr이다.

### 4.3 현장시공

레미콘 공장에서 오전 5시 30분에 첫 배치를 시작하여 오후 5시까지 콘크리트를 출하하였다. 품질이 안정될 때까지 공장 출하전에 슬럼프 플로우 시험을 실시하였으며, 현장 받아들이기 검사에서도 초기에는 매차마다 슬럼프 플로우, 유하시간, 간극통과성 시험을 실시하였다.

콘크리트의 품질이 안정된 후에는 [표 12]에서 정한 빈도로 시험을 실시하였다. 초유동

콘크리트의 시공은 [그림 5]와 같이 ①⇒②⇒③⇒④의 순서로 실시하였으며, 일반 콘크리트를 미리 타설하면서 경계블록을 만들어 초유동 콘크리트가 지하차도 외부로 유동되는 것을 방지하였다.

초유동 콘크리트의 타설부위인 지하차도 하부 언더피닝 구간은 타설공간이 10~40cm밖에 안되기 때문에, 작업원 2명을 배치하여 유동구배(1/7)에 따라 배관을 해체하면서 타설해 나오도록 하였으며, 총 600m<sup>3</sup>의 초유동 콘크리트를 대체로 신속하게 시공할 수 있었다.

### 4.4 현장시공에 따른 결과분석

전체적인 현장 품질관리 시험결과는 [표 13]에 나타난 바와 같다.

잔골재의 표면수는 3±0.5%에서 안정된 값을 나타내었으며, 10회 평균값은 2.85%였다.

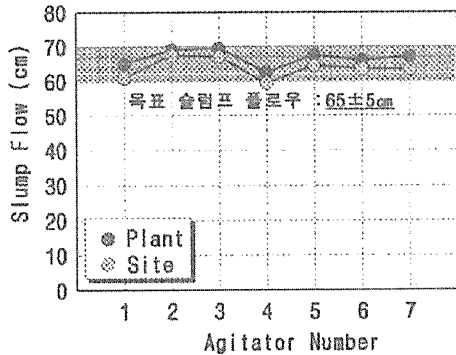
(1) 균지않은 콘크리트의 시험결과  
레미콘 공장과 현장 받아들이기 지점에서 측

[표 13] 초유동 콘크리트의 품질관리 시험결과

항 목	구 분	범 위 (R)	평 균 (x)	표준편차 (S)	변동계수 (V)	비 고
잔골재 표면수(%)		2.5~3.5	2.85	0.3	10.5	n=10 (레미콘)
슬럼프 플로우(cm)		60~67.5	63.8	2.9	4.5	n=7 (타설현장)
깔대기 유하시간(s)		5.0~8.0	6.5	0.76	11.7	n=7 (타설현장)
Box 높이차(cm)		1~3	2	0.8	40	n=7 (타설현장)
공기량(%)		2.9~4.0	3.4	0.38	11.2	n=7 (타설현장)
압축 강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	7일	331~418	372	36.3	9.8	n=7 (표준양생)
	28일	442~520	467	38.3	8.2	n=7 (표준양생)

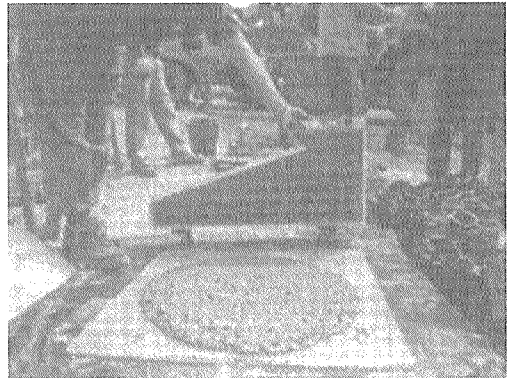
정한 슬럼프 플로우 결과는 [그림 7]과 같다.

또한, 유동성·충전성 및 콘크리트 온도에 대한 시험결과는 [표 14]와 같다.



(그림 7) 슬럼프 플로우에 대한 품질관리

공장 출하시와 현장 받아들이기의 슬럼프 플로우 차이는 [그림 7]에 나타난 바와 같이 평균 1.8cm로 운반시간에 따른 손실을 최소화 시킬 수 있었으며, 경시변화에 따른 품질변동



(사진 4) 현장받아들이기 시험검사

이 매우 작고 안정적인 것으로 나타났다.

[사진 4]는 현장 받아들이기 검사에서 슬럼프 플로우 및 충전성 시험결과를 나타낸 것이다.

또한, 유하시간, 간극통과성 및 공기량도 목표값을 만족하였으며, 외기온이 32.2℃까지 상승하는 조건에서도 콘크리트의 온도관리가 가능하였다. 또한, 콘크리트의 염화물량 실험 결과도 평균 0.03kg/m<sup>3</sup>로 목표 관리값(0.3kg/

(표 14) 초유동 콘크리트의 품질관리

구분	순서	현장 받아들이기 지점의 측정빈도							평균
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	
슬럼프 플로우 (cm)	공장	63.0	69.5	69.0	61.5	66.4	65.0	64.8	65.6
	현장	61.0	67.5	67.0	60.0	64.5	63.5	63.5	63.8
공기량(%)		2.9	3.5	3.7	3.5	3.2	4.0	3.1	3.41
유하시간(초)		8.0	6.0	6.5	6.0	6.4	5.5	7.0	6.49
간극통과성(cm)		3.0	2.0	1.0	2.5	1.0	2.0	2.5	2.0
콘크리트 온도(℃)		24.3	24.5	25.4	28.4	30.9	29.8	28.6	27.4
외기온(℃)		19.5	23.8	25.8	31.0	32.2	31.7	31.6	

(표 15) 초유동 콘크리트의 압축강도 시험결과

구분	순서	압축강도 및 탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )							평균
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	
재령 7일		392	418	400	390	333	331	339	372
재령 28일		496	500	520	451	422	453	427	467
탄성계수 (×10 <sup>5</sup> )		2.95	3.30	3.73	3.02	3.11	2.95	2.82	3.13

m<sup>3</sup>이하)을 만족하였다.

### (2) 압축강도 및 탄성계수의 시험결과

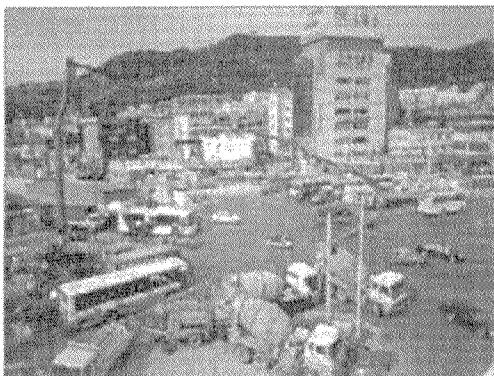
현장 받아들이기 시점에서 제작한 공시체의 재령별 압축강도 및 탄성계수는 [표 15]와 같다.

압축강도 시험결과, 28일 평균값이 467kg/cm<sup>2</sup>으로 목표강도(340kg/cm<sup>2</sup>)를 초과하는 것으로 나타났다. 물론, 인천지하철은 중요한 구조물이기 때문에 강도확보가 중요하였으며, 19mm골재의 사용과 낮은 물/결합재비로 인해 강도발현이 우수한 것으로 평가된다.

### (3) 기타특성

작업공간의 협소로 시공하기 어려웠던 언더피닝 상부슬래브에 초유동 콘크리트의 자체 충전성으로 과밀배근 조건에도 불구하고 우수한 품질을 얻을 수 있었으며, 타설에 소요되는 시간도 초기 48시간 정도로 예상한 구간을 12시간만에 완료하였기 때문에 작업시간을 예정보다 75% 단축하는 효과가 있었다.

특히, 인력절감 차원에서 볼 때, 일반 콘크리트를 타설하는데 필요한 작업원이 펌프카 1대당 9명인 것에 비해 초유동 콘크리트는 3명만으로 타설할 수 있었기 때문에 인력절감 효과도 매우 큰 것으로 나타났다.



[사진 5] 초유동 콘크리트 현장 타설광경

또한, 타설·다짐으로 인하여 발생하는 현상소음도 70~85dB(일반 80~110dB)정도로 저감되어 건설현장의 작업환경을 개선할 수 있었다.

그리고 거푸집을 탈형후에 콘크리트의 마감면도 재료분리 또는 조인트가 발생하지 않은 상태에서 매우 매끈하고 균일한 성상을 나타내었다. [사진 5]는 간석5거리의 지하철 구간에 초유동 콘크리트를 타설하는 상황을 나타낸 것이다.

## 5. 結 言

현장적용 결과를 정리하면 다음과 같다.

### (1) 초유동 콘크리트의 범용화 계기

현장시공이 어려운 지하철 구조물에 다짐이 필요없는 초유동 콘크리트의 시공으로 우수한 품질을 확보함으로써 범용화의 계기가 되었다.

### (2) 레미콘 공장의 기술이전

제조경험이 없는 레미콘 공장에서 초유동 콘크리트의 배합설계·제조·운반 및 현장 품질관리를 수행함으로써 자연스런 기술이전을 통해 초유동 콘크리트의 실용화 및 공급망 다변화에 기여하게 되었다.

### (3) 초유동 콘크리트의 목표성능 만족

타설지점에서 슬럼프 플로우(65±5cm), 깔대기 유하시간(10±5sec), 간극통과성 높이차(5cm이하) 등의 목표성능을 만족하였으며, 설계기준강도(240kg/cm<sup>2</sup>)에 따라 선정된 배합강도(340kg/cm<sup>2</sup>)를 확보하였다.

### (4) 우수한 현장 품질관리

인력절감, 소음저감, 과밀배근부의 충전성,

우수한 콘크리트 표면 등을 확보하였으며, 효율적인 시공관리로 원가절감에 기여하게 되었다.

#### (5) 향후과제

크리프, 건조수축, 동결융해 저항성 등과 같은 장기특성 시험이 진행중에 있으며, 구조설계에 반영하여 경제적인 강도반영이 필요하다.

### 감사의 글

이번 현장적용은 국내에서 최초로 토목구조물인 지하철에 초유동 콘크리트를 적용한 것이기 때문에, 전체 콘크리트 물량뿐만 아니라 품질 측면에서도 매우 중요한 의미를 갖는다.

특히, 새로운 콘크리트 재료로 현장의 애로사항을 해결하려고 하였던 인천광역시 지하철본부 및 (주)대우건설 감리단 관계자의 마인드 및 지원에 감사를 드리는 바이다.

또한, 의욕과 정열로 레미콘 제조 및 품질관리에 많은 노력을 보내주신 경인레미콘 원장 공장 품질관리실 및 진용화학 관계자에게도 감사를 드리는 바이다. 이번 프로젝트는 대우연구소, 지하철본부, 대우감리단, 시공사인 동부건설, 혼화제 업체 및 레미콘 업체가 원활한 협조체계를 구축하고, 이를 통해 최고의 품질을 달성할 수 있었기 때문에, 향후 현장실용화의 방안을 제시해 주는 계기가 되었다.

### 참고문헌

- 1) 金和中, 池南龍 外., “混和劑 종류에 따른 시멘트페이스트의 레올로지특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제10권1호, pp.51~56, 1998.5
- 2) 金武漢, 金圭庸 外., “고유동 콘크리트의 유동 특성 평가방법에 관한 연구”, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 제17권1호, pp.707~710, 1997.4
- 3) Park-chil Lim, Kim-jin keun, Kwon-yeong Ho, at al., “An Experimental Research on the Material Properties of Super Flowing Concrete”, International Proceeding of RILEM Conference, U.K.(Scotland), 1996.6, pp.271-284
- 4) 韓千求, 崔應奎 外., “증점제를 이용한 다짐불요 콘크리트의 실용화에 관한 연구”, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 제17권1호, pp. 691~694, 1997.4
- 5) 尹在煥, 韓相大 外., “고유동 보통강도 콘크리트의 제조와 활용에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 제17권1호, pp.699~702, 1997.4
- 6) 朴シ七林, 權寧鎬, 李相洙., “超流動 콘크리트의 現場適用 및 實用化 研究”, 대한건축학회, 논문집 제12권3호, 1996.3, pp.127~1347)
- 7) 朴シ七林, 安宰鉉, 權寧鎬, 李相洙., “碎砂を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
- 8) 朴シ七林, 權寧鎬, 李相洙, 元澈., “초유동 콘크리트의 2차제품 적용에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제9권1호, pp.285~291, 1997.5
- 9) 小澤一雅, 前川宏一, 岡村 甫., “ハイパフォーマンスコンクリートの開發”, 콘크리트工學年次論文報告集, JCI, Vol.11, No.1, 1989.6