

# 이성분계 초유동 콘크리트의 배합설계 및 제조

朴 沘 林

〈(株)大宇 建設技術研究所 所長, 工博〉

權 寧 鎬

〈(株)大宇 建設技術研究所 先任研究員〉

李 相 洙

〈(株)大宇 建設技術研究所 主任研究員〉

- |                  |                       |
|------------------|-----------------------|
| 1. 서언            | 2.5 콘크리트 배합 계산        |
| 1.1 연구배경         | 2.6 고성능 감수제 및 AE제 사용량 |
| 1.2 연구목적         | 3. 배합설계에 따른 실험적 고찰    |
| 2. 초유동콘크리트의 배합설계 | 3.1 구속수비 시험결과         |
| 2.1 배합설계의 기본개념   | 3.2 물/결합재 용적비 시험결과    |
| 2.2 잔골재 용적비      | 3.3 잔골재 용적비 시험결과      |
| 2.3 물/시멘트 용적비    | 3.4 굵은골재 용적비 실험결과     |
| 2.4 굵은 골재 용적의 산정 | 4. 결론                 |

## 1. 序 言

### 1. 1 연구배경

초유동 콘크리트는 1980년대 후반에 일본의 동경대 岡村교수가 다짐 불필요의 고내구성 콘크리트로 “High Performance Concrete”의 개념을 발표(1)한 이래, 많은 발전을 거듭해 왔으며, 국내에서도 건설교통부가 시행한 1994년도 국책과제로 “超流動 콘크리트의 開發 및

實用化 研究”가 시작되면서 연구성과<sup>(2)(3)</sup>가 일부 발표되기도 하였다.

초유동 콘크리트의 개발배경은 콘크리트 품질결함의 誘發要因을 인력에 의한 타설 및 다짐작업으로 간주하고, 이를 개선시키면 콘크리트의 품질이 확보된다는 것이다. 또한, 콘크리트의 품질개선을 통한 인력절감 외에 플라이애쉬와 같은 산업부산물을 건설산업에 再活用하는 효과를 얻을 수 있기 때문에, 콘크리트와 관련된 學界 및 建設業界, 材料業界

등에서 연구개발을 위한 관심이 증대되고 있는 실정이다.

이에 대한 연구동향을 분석해 보면, 일본의 경우에는 1995년 후반까지 28개 건설회사가 각종 초유동 콘크리트의 개발에 착수하였으며<sup>(4)</sup>, 국내에서도 1994년 건설교통부의 국책과제를 수행한 바 있는 (株)大宇 建設技術研究所 및 東洋中央研究所, 韓國科學技術院 등을 비롯하여 水原大<sup>(5)</sup>, 忠南大<sup>(6)</sup>, 淸州大<sup>(7)</sup>, 慶北大<sup>(8)</sup> 및 시멘트 업계<sup>(9)</sup> 등의 관련기관에서도 개발연구를 시작하고 있다.

이처럼 초유동 콘크리트가 주목을 받는 배경은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 건설공사의 不實防止 및 구조물의 品質向上
- ② 콘크리트의 高流動·高強度·高耐久化
- ③ 건설현장 작업자의 고령화·숙련공의 부족(3D 현상) 및 인력절감
- ④ 구조물의 大型化·高層化·特殊化 및 다짐 작업이 어려운 구조물의 증대

그러나, 초유동 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 매우 특수한 콘크리트이기 때문에, 배합·제조·품질선정·현장시공 등에 있어서 매우 엄격한 품질관리 및 기술력이 필요하다.

따라서, 초유동 콘크리트를 汎用化시키기 위해서는 초유동 콘크리트의 사용재료, 기본적인 성능범위 및 배합설계법 등에 관한 새로운 접근이 필요하며, 이에 대한 명확한 규명이 요구되고 있는 실정이다.

## 1. 2 연구목적

국내의 초유동 콘크리트 개발경향은 초유동 콘크리트의 재료 및 이에 대한 배합설계를 명확하게 평가하지 않은 상태에서 일반 콘크리트와 동일한 방법으로 초유동 콘크리트에 요구되는 기본성능을 부여하는 방향으로 추

진되고 있는 실정이다. 초유동 콘크리트는 일반 콘크리트와 전혀 다른 개념을 갖는 콘크리트이며, 따라서 이에 接近하는 方法도 다를 수밖에 없다는 것을 대부분 認知하고 있지만, 아직 개념이 명확히 정립되어 있지 않기 때문에 이에 대한 개념정립 및 배합설계법이 필요하다.

즉, 초유동 콘크리트의 성능평가 및 측정항목이 다르기 때문에 기존의 일반 콘크리트에서 사용하고 있는 性能評價 및 配合設計法을 그대로 적용한다는 것은 모순이며, 이에 대한 기본적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 초유동 콘크리트에 사용되는 재료평가 및 배합설계 단계를 제시한 연구결과<sup>(10)</sup>를 토대로 결합재의 특성에 따른 배합설계 방안을 이론적으로 제안하고 실험적으로 증명하여, 합리적인 초유동 콘크리트의 배합설계 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 초유동 콘크리트의 배합설계

### 2. 1 配合設計의 기본개념

본 연구에서의 초유동 콘크리트는 분체형 2성분계에 국한시키고 증점제 및 3성분계는 제외하였으며, 분체는 화력발전소의 F급 플라이애쉬 및 울산 열병합발전소의 C급 플라이애쉬를 주대상으로 하였다.

초유동 콘크리트 配合設計의 기본개념은 콘크리트에 流動性·充塡性·材料分離 抵抗性和 같은 요구성능을 부여하기 위한 것으로, 이에 적합한 배합수, 시멘트, 잔골재, 굵은골재, 공기량의 比率 및 필요한 高性能 減水劑와 AE劑의 사용량을 합리적으로 산정하는 것이다.

기존의 일반 콘크리트 배합설계는 각국의 규정에 따라 약간의 차이가 있지만, 주로 물/

시멘트비, 슬럼프, 잔골재율(S/a), 굵은골재 최대크기(Gmax)와 같은 배합요인을 고려하여 단계별 요구성능에 따라 산정하는 방식이었다.

그러나, 초유동 콘크리트가 갖는 기본적인 성능은 이와 같은 배합요인으로 평가할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 초유동 콘크리트의 컨시스턴시를 평가하는 방안으로 새로운 배합요인을 설계개념에 도입하여 수행하는 방안을 제시하고자 한다.

따라서, 주된 배합요인인 물/결합재비(W/B) 외에 결합재의 拘束水比( $\beta_p$ ), 잔골재 용적비( $S_r$ ), 굵은골재 용적비( $G_V$ ) 등의 개념으로 유동성, 충전성, 재료분리 저항성을 평가하고자 한다.

이러한 성능을 갖는 초유동 콘크리트의 배합설계 개념은 [그림 1]과 같다.

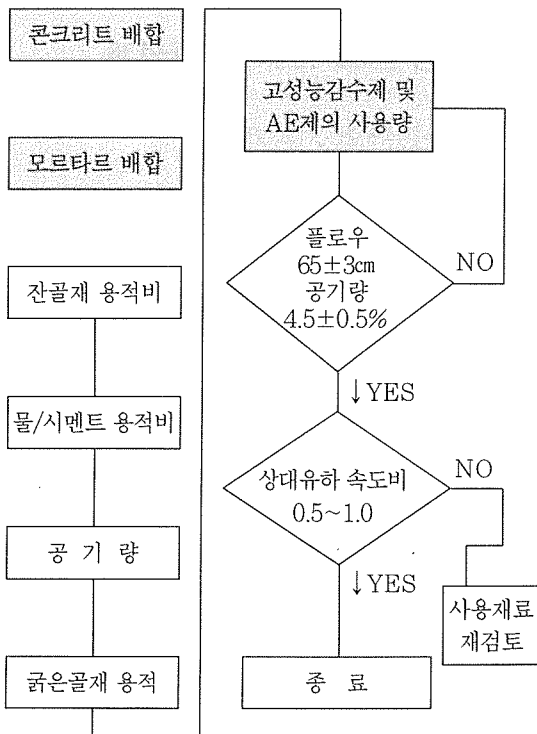


그림 1 초유동 콘크리트의 배합설계 순서

## 2. 2 잔골재 容積比

잔골재에는 시멘트와 같이 분체의 거동을 나타내는 미립자가 함유될 수 있기 때문에, 이러한 영향을 고려하여 초유동 콘크리트의 배합설계에 반영해야 한다. 일반적으로 초유동 콘크리트에 사용되는 잔골재에 대해 입경이 0.06mm以下인 微粒 잔골재는 분체(결합재)로 간주하며, 그 이상의 입경을 만족하는 골재를 잔골재로 분류한다.

이러한 미립 잔골재는 초유동 콘크리트의 流動性 및 充填性能에 큰 영향을 미치기 때문에, 이러한 영향을 배합설계에 반영해야 한다.

잔골재 용적비( $S_r$ )는 전체 모르타르에서 잔골재가 차지하는 容積比를 나타낸 것으로 미립 잔골재의 비율을( $S_m$ ) 고려하여 다음식으로 산정한다.

$$S_r = \frac{S/M}{1 - (S_m)} \quad (\text{식 1})$$

여기서, S는 잔골재 용적, M은 모르타르 용적,  $S_m$ 은 잔골재 용적에서 0.06mm 미만인 입자의 비율을 나타낸 것이다. 잔골재에 0.06mm 미만의 입자가 2%이하일 경우에는 결합재의 구속수비에 미치는 영향이 적기 때문에 무시할 수 있지만, 2%이상일 경우에는 반드시 잔골재 용적비에 반영해야 한다.

## 2. 3 물/시멘트 容積比

초유동 콘크리트의 배합설계에 있어서 필요한 단위수량은 시멘트 또는 분체입자가 구속하는 단위수량 즉, 유동에 기여하지 못하는 수량을 먼저 산정해야 한다. 이러한 단위수량을 拘束水量이라 하며 분체입자가 구속하는 수량비를 拘束水比로 정의한다. 구속수비의 산정방법은 [표 1]과 같은 순서로 실시한다.

표 1 시멘트(또는 분체)의 拘束水比 산정방법

페이스트의 플로우시험	물/시멘트 용적비 1.1~1.4(4종) 페이스트의 플로우 시험
↓	
相對 플로우면적비-물/시멘트 용적비의 관계	시험결과, 相對 플로우 면적비-물/시멘트 용적비 (直線回歸)
↓	
시멘트(분체)의 拘束水比	相對 플로우 면적비가 0인 물/시멘트 용적비(拘束水比)

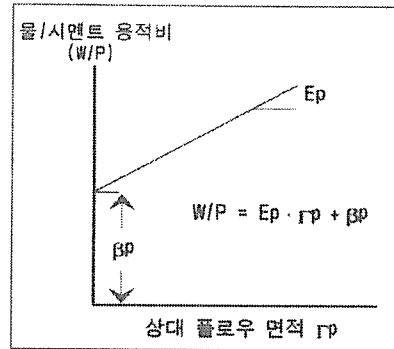


그림 3 구속수비의 회귀분석( $\Gamma_p$ -W/P)

### 2. 3. 1 페이스트의 플로우 시험

[표 1]에서 물/시멘트 용적비(W/P)는 0.1, 0.2, 0.3 및 0.4를 대상으로 [그림 2]에 따라 1 l 정도의 페이스트를 제작한 후에 플로우 시험을 실시한다.

플로우 시험은 KS L 5201(시멘트의 물리적 시험방법)규준을 준용하며, 낙하운동을 가하지 않고 플로우 콘( $\phi$ 100mm)을 제거한 후, 페이스트의 變形이 종료된 時點에서 2방향의 플로우 값을 측정하여 평균값을 산정한다.

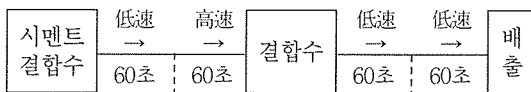


그림 2 페이스트의 배합방법

### 2. 3. 2 拘束水比 산정

연속 2회 실시한 플로우 시험결과로부터 다음식에 의해 상대플로우 면적비( $\Gamma_p$ )를 산정한다.

$$\Gamma_p = \frac{\pi(F_p/2)^2 - \pi(F_0/2)^2}{\pi(F_0/2)^2} \quad (\text{식 2})$$

여기서,  $F_p$ 는 페이스트의 플로우 값(mm),  $F_0$ 는 플로우-콘의 단면직경(100mm)을 나타낸다.

플로우 시험에서 물/시멘트 용적비 (W/P)

를 변화시키면, 상대플로우 면적비와 물/시멘트 용적비가 매우 밀접한 상관성을 나타낸다. 상대플로우 면적비와 물/시멘트 용적비를 線形關係로 直線回歸하여 상대플로우 면적비가 0이 되는 물/시멘트 용적비, 즉 직선의 切片값을 拘束水比( $\beta_p$ )라 하며 [그림 3] 및 다음식과 같이 나타낸다.

$$W/P = E_p \cdot \Gamma_p + \beta_p \quad (\text{식 3})$$

이성분계 초유동 콘크리트의 경우에는 플라이애쉬의 치환율에 따라 결합재(시멘트+플라이애쉬)를 대상으로 물/결합재 용적비를 1.1, 1.2, 1.3 및 1.4로 정하고, 동일한 시험 방법으로 구속수비를 결정한다.

### 2.3.3 물/시멘트 용적비 선정

물/시멘트 용적비는 시멘트의 拘束水比에 적당한 상수( $K_p$ )를 곱하여 산정하며, (식 1)에서 구한 잔골재 용적비( $S_r$ )로부터 高性能減水劑의 첨가량을 변화시켜 플로우시험 및 깔대기 시험을 실시한다. 여기서 구한 물/시멘트 용적비와 잔골재 용적비로부터 모르타르 배합을 계산한다.

계량된 재료를 이용하여 모르타르 배합을 할 때는 KS L 5105에서 규정한 믹서를 사용하여 [그림 4]와 같은 방법으로 약 1.5 l 정도

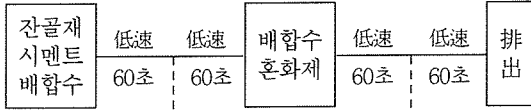


그림 4 모르타르의 배합방법

의 모르타르를 제조한다.

배합방법은 잔골재 및 시멘트를 건비빔한 후, 1차 배합수를 투입하여 低速으로 60초 배합하고, 계속하여 2차 결합수와 고성능 감수제를 투입하여 저속으로 60초 배합한 후 믹서에 부착된 모르타르를 긁어내고 저속으로 60초 배합하는 순서로 한다. 모르타르의 플로우 시험은 페이스트와 같은 방법으로 하며, 모르타르의 相對 플로우 面積比를 구한다.

모르타르의 깔대기 유하시험은 [그림 5]와 같은 규격의 시험장치를 사용하여 측정하며, 相對 깔대기 速度比를 다음식으로 구한다. 여기서,  $T_r$ 은 V형 깔대기의 流下時間(sec)을 의미한다.

$$R_m = \frac{10}{T_r} \quad (\text{식 4})$$

모르타르의 상대깔대기 속도비는 깔대기 유하시험에서 측정된 모르타르의 流下時間을 초로 나타낸 값의 역수를 10배한 값이다.

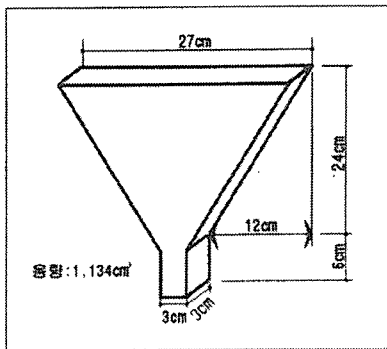


그림 5 모르타르용 깔대기 시험

또한, 모르타르의 상대플로우 면적비와 상대 깔대기 속도비의 관계에서 상대플로우 면적비 5에 對應하는 상대깔대기 속도비를 구한다.

상대깔대기 속도비가 0.9~1.1의 범위에 있을 때, 設定한 물/시멘트 용적비를 콘크리트의 배합에서 물/시멘트 용적비라고 한다. 상대 깔대기 速度比가 0.9이하인 경우에는 물/시멘트 용적비를 증대시키고, 1.1이상인 경우에는 물/시멘트 용적비를 감소시키는 과정을 거쳐 0.9~1.1의 범위내로 들어올 때까지 반복한다.

다만, 물/시멘트 용적비가 시멘트 拘束水比의 0.80~0.90배의 범위를 벗어난 경우에는 시험을 중지하고 사용재료를 재검토해야 하며, 高性能 減水劑, 잔골재, 시멘트의 순서로 하는 것이 바람직하다.

이를 만족할 경우에는 모르타르의 상대플로우 면적비 및 상대깔대기 속도비의 經時變化가 아래의 조건을 만족하는 지를 검토해야 한다.

- (1) 상대 플로우 면적비 - - - - -  $5 \pm 0.5$
- (2) 상대 깔대기 속도비 - - - - -  $1.0 \pm 0.1$

이때의 측정시간은 배합직후부터 타설예정 시간까지로 한다.

## 2. 4 굵은골재 용적의 산정

굵은골재는 초유동 콘크리트의 充填性을 좌우하며 골재의 최대크기, 입도분포, 입형 등에 따라 다르다. 특히, 골재의 실적율에 따른 영향은 매우 크다. 굵은골재의 용적비( $G_v$ )는 充填性試驗에 의해 평가하며, 일반적으로 공기를 제외한 콘크리트 용적의 %로 나타낸다.

굵은골재의 최대크기는 20mm일 때, 일반적으로 공기량을 제외한 콘크리트 용적에 대해 굵은골재 용적비는 사용할 굵은골재의 실적

율에 50%정도로 하는 것이 바람직하다. 초유동 콘크리트에서 굵은골재의 接觸·衝突로 인해 막히는 현상이 발생하면, 모르타르와 굵은골재의 일체성을 유지하기 어렵기 때문에 間隙通過性 및 充塡性이 低下된다.<sup>(10)(11)</sup> 이러한 현상을 방지하기 위하여 굵은골재 입자간의 거리를 충분히 확보하여 골재표면에 충분한 모르타르를 附着시킬 필요가 있다.<sup>(12)</sup>

超流動 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 단위 굵은골재량이 적다. 비교적 단위 결합재량이 적고 굵은골재의 용적이 큰 배합으로 셀루로스계 분리저감제를 사용한 경우에도 굵은골재량은 일반 콘크리트에 비해 325kg/m<sup>3</sup> 정도로 낮기 때문에 충전성을 개선할 수 있다.<sup>(13)</sup> 또한, 아크릴계 분리저감제는 굵은골재의 용적비를 감소시키면, 모르타르의 粘着力이 증가되어 材料分離抵抗性이 증대된다.<sup>(13)</sup>

초유동 콘크리트의 배합설계는 잔골재 용적비, 물/시멘트(또는 물/결합재) 용적비, 공기량 및 굵은골재 용적에 근거하여 콘크리트 1m<sup>3</sup>중의 각 재료용적을 계산한 후, 각 재료의 비중을 이용하면 重量配合를 計算할 수 있다.

## 2. 5 콘크리트 배합계산

앞에서 선정된 잔골재 용적비(S<sub>r</sub>), 물/시멘트 용적비, 굵은골재 용적비(G<sub>v</sub>), 공기량 및 굵은골재의 실적을(G<sub>d</sub>)에 따라 콘크리트 1m<sup>3</sup>의 재료용적을 산정하며, 이러한 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$A \sim = \text{목표공기량 (Air)} \quad (\text{식 } 5)$$

$$G = G_v \times G_d \times (1-A) \quad (\text{식 } 6)$$

$$S = S_r \times (1-A-G) \quad (\text{식 } 7)$$

$$W = (1-A-G) \times (1-S) \times \frac{1}{1+(K_p \times \beta_p)} \quad (\text{식 } 8)$$

$$C = (1-A-G) \times (1-S) \times \frac{1}{1+(K_p \times \beta_p)} \quad (\text{식 } 9)$$

여기서, 산정한 값은 容積이기 때문에 각각의 比重을 곱하면 필요한 重量을 구할 수 있다. 또한, 이성분계 초유동 콘크리트에서는 치환율에 따른 결합재(C+FA)의 식으로 도출하거나, 각각의 산정식을 만들면 된다. 이 경우에는 각각의 비중 및 구속수비를 적절히 분배해야 한다.

## 2. 6 고성능 감수제 및 AE제 사용량

고성능 감수제 및 AE제의 사용량은 시험에 의해 결정한다. 空氣量은 目標範圍內에서, 슬럼프 플로우는 65±3cm 범위에서 각각의 사용량을 구하며, 모르타르와 마찬가지로 콘크리트의 V형 깔대기 유하시험을 실시한다. 이때, 상대깔대기 속도비가 0.5~1.0 범위 내에 있으면 充塡性을 만족하는 것으로 한다.

## 3. 배합설계에 따른 실험적 고찰

### 3. 1 拘束水比 시험결과

국내에서 시판되는 시멘트 및 초유동 콘크리트에 사용할 플라이애쉬에 대한 拘束水比 시험을 실시하였다.

拘束水比 시험에 사용된 시멘트는 쌍용양회 및 동양시멘트의 보통 포틀랜드 시멘트(1종)를 사용하였으며, 플라이애쉬의 구속수비 측정을 위해 보령 화력발전소 및 울산 열병합발전소의 플라이애쉬를 시멘트 중량비(內割)로 각각 30% 치환한 혼합시멘트를 사용하였다.

시험방법은 [그림 2]에 따라 실시하였으며, 플로우값을 만족하는 범위에서 결과평가는 (식 2)에 따라 산정하였다. 구속수비에 대

표 2 시멘트별 플라이애쉬의 拘束水比

종류 \ 구분	W/C 용적비 (%)	상 대 플로우 면적비	구속 수비 ( $\beta_p$ )	변형 계수 ( $E_p$ )	비 고
쌍용시멘트 + 열병합 플라이애쉬 (70 : 30)	1.1	0.22	1.10	0.15	□ 열병합(C) 플라이애쉬 - 분말도 : 2,470 $\text{cm}^2/\text{g}$ - 비 중 : 2.69
	1.2	0.50			
	1.3	1.23			
	1.4	2.05			
쌍용시멘트 + 화력 플라이애쉬 (70 : 30)	1.1	1.08	1.03	0.08	□ 화력(F) 플라이애쉬 - 분말도 : 3,158 $\text{cm}^2/\text{g}$ - 비 중 : 2.21
	1.2	2.09			
	1.3	3.23			
	1.4	4.83			
동양시멘트 + 열병합 플라이애쉬 (70 : 30)	1.1	0.22	1.08	0.17	□ 동양시멘트 - 분말도 : 3,031 $\text{cm}^2/\text{g}$ - 비 중 : 3.12
	1.2	0.59			
	1.3	1.15			
	1.4	1.93			
동양시멘트 + 화력 플라이애쉬 (70 : 30)	1.1	1.21	0.96	0.11	□ 쌍용시멘트 - 분말도 : 3,200 $\text{cm}^2/\text{g}$ - 비 중 : 3.15
	1.2	2.35			
	1.3	3.02			
	1.4	4.06			

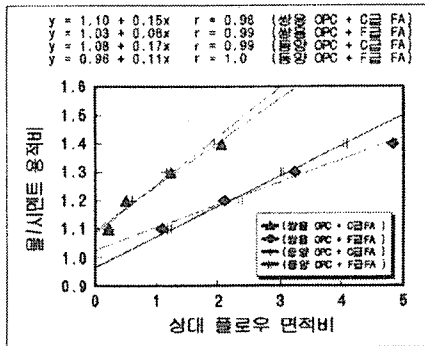


그림 6 결합재의 구속수비 시험결과

한 실험결과는 [표 2] 및 [그림 6]과 같다.

화력발전소의 플라이애쉬(F급)를 30% 치환한 혼합시멘트의 구속수비는 쌍용시멘트의 경우에 1.03, 동양시멘트의 경우에 0.96으로 나타났으며, 열병합발전소의 플라이애쉬(C급)를 30% 치환한 시멘트의 구속수비는 쌍

용시멘트의 경우 1.10, 동양시멘트의 경우 1.08로 나타났다.

또한, 플라이애쉬 30%를 치환한 혼합시멘트 및 순수 포틀랜드 시멘트만의 구속수비를 비교하면 [표 3]과 같다. 순수 시멘트의 구속수비에 비해 플라이애쉬를 치환한 결합재의 구속수비가 감소하는 것으로 나타났다.

즉, 열병합 플라이애쉬의 경우에는 순수 시멘트(1.1~1.11)에 비해 0.2정도가 감소되었으며, 화력 플라이애쉬의 경우에는 0.4~0.8 정도로 감소되었다. 이는 플라이애쉬를 사용할 경우 유동화에 기여하지 못하고 흡수되는 단위수량이 감소된다는 것을 의미한다.

그러나, 변형계수는 플라이애쉬 치환에 따라 매우 증대하는 것으로 나타났는데, 순수 시멘트만 사용한 변형계수는 0.05~0.06인 반면에

표 3 시멘트에 따른 拘束水比

결합재 종류		구분	구속수비 ( $\beta_p$ )	변형계수 ( $E_p$ )
쌍 용 시멘트	열병합 플라이애쉬 30% 치환		1.10	0.15
	화력 플라이애쉬 30% 치환		1.03	0.08
	순수 시멘트		1.11	0.05
동 양 시멘트	열병합 플라이애쉬 30% 치환		1.08	0.17
	화력 플라이애쉬 30% 치환		0.96	0.11
	순수 시멘트		1.10	0.06

화력 플라이애쉬(F급)를 치환한 경우에는 0.03~0.05정도 증가하였으며, 열병합 플라이애쉬(C급)를 치환한 경우에는 0.10~0.11정도로 거의 2배가 증가되었다는 것을 알 수 있다.

여기서, 구속수비가 크다는 것은 流動性에 기여하지 못하고 결합재에 흡수되는 拘束水量이 높다는 것을 의미하며, 變形係數가 크다는 것은 동일한 범위의 플로우를 증가시키는데 필요한 단위수량이 크다는 것을 의미한다. 구속수비는 물/결합재 용적비를 결정하는데 중요하기 때문에 명확한 특성을 시험하여 반영하는 것도 필요하지만 시멘트계 재료의 구속수비를 저감시키는 재료적인 研究開發도 필요한 실정이다.

### 3. 2 물/결합재 용적비 시험결과

초유동 콘크리트의 물/결합재 용적비는 拘束水比에 일정한 상수(水比係數)의 곱으로 다음식에 의해 산정하며, 이에 따른 F급 플라이애쉬를 사용한 초유동 콘크리트의 물/결합

재비에 따른 배합조건은 [표 4]와 같다.

$$W/B = K_p \times \beta_p \quad (\text{식 } 10)$$

표 4 물/결합재비에 따른 배합조건

변수 시험체명	W/B (%)	G <sub>v</sub> (%)	S (%)	Unit Material Content(kg/m <sup>3</sup> )					
				C	F/A	W	S	G	S.P (%)
FA-33-G52	33	52	47	361	155	170	824	764	1.6
FA-35-G52	35			351	150	175			1.3
FA-37-G52	37			341	146	180			0.81
FA-39-G52	39			332	142	185			0.68

### 3. 2. 1 유동특성 시험결과

물/결합재비에 따른 유동특성은 일정한 배합조건에서 물/결합재비를 변화시킨 것으로써 목표 슬럼프 플로우(65±3cm)를 확보하기 위해 고성능 감수제의 첨가량을 조절하였다.

시험결과, 물/결합재비가 감소할수록 목표 슬럼프 플로우를 만족하기 위한 고성능 감수제의 첨가량은 증대하는 것으로 나타났다. 또한, 공기량은 AE제의 첨가량을 결합재의 0.04%로 동일하게 첨가하였을 때, 물/결합재비가 감소할 수록 감소하는 것으로 나타났다.

물/결합재비에 따른 유동속도는 [그림 7]에 나타난 바와 같다.

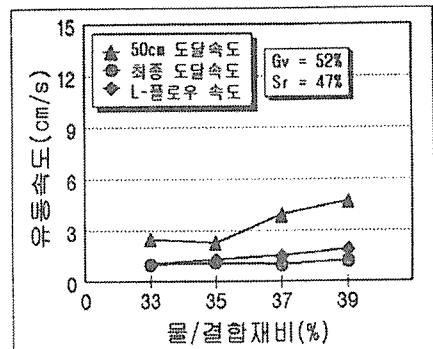


그림 7 물/결합재비에 따른 유동속도



실험결과, 물/결합재비가 증대할수록 50cm 도달 플로우 속도 및 L형 플로우 속도는 증대하는 것으로 나타났다. 이는 물/결합재비가 증대할수록 동일한 유동성에서 점도가 감소하기 때문에 초기 변형량이 증대되는 것으로 사료된다.

그러나, 최종 유동속도를 보면 물/결합재비에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 특히, L형 플로우 속도를 대상으로 Bingham의 유체이론을 해석해보면, 콘크리트의 전단응력을 동일하다고 가정할 때 물/결합재비가 감소할수록 점도가 증가하는 것을 알 수 있다.

물/결합재비에 따른 깔대기 유하시간은 [그림 8]과 같다.

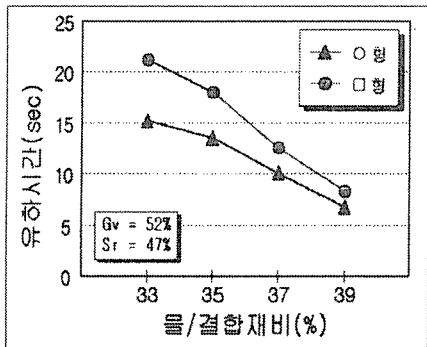


그림 8 물/결합재비에 따른 유하시간

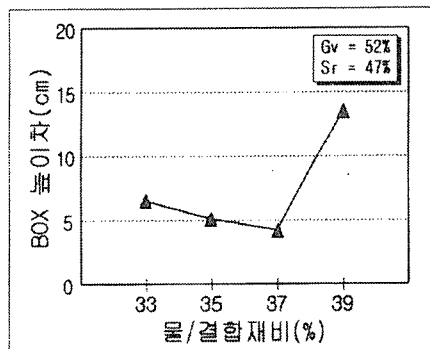


그림 9 물/결합재비에 따른 간극통과성

○형 및 □형 깔대기에 따라 약간의 차이는 있으나, 물/결합재비가 증대할수록 유하시간이 낮게 나타났다. 이는 유동성이 우수할수록 유하시간이 감소되는 것으로 해석되지만, 점성이 지나치게 낮을 경우에는 굵은골재의 마찰 및 맞물림에 의해 막힘현상이 발생하게 된다.

또한, 점성 측면에서 물/결합재비가 낮을수록 점성이 증대되기 때문에, 위치에너지가 운동에너지 및 마찰에너지로 소비될 때 마찰에너지와 전단저항이 증대되어 상대적인 운동에너지가 감소하게 된다. 따라서, 점성이 증대할수록 유하시간은 증대하는 것을 알 수 있다.

물/결합재비에 따른 BOX 간극통과성 시험결과는 [그림 9]에서 보듯이 물/결합재비가 39인 것을 제외하면 대부분 유사한 값을 나타내었다.

### 3.2.2 강도특성 실험결과

[그림 10]은 물/결합재비에 따른 재령별 강도특성을 나타낸 것이다.

실험결과, 초기재령(3, 7, 28일) 강도는 물/결합재비 39%를 제외하고 대부분 물/결합재비에 관계없이 일정한 범위의 값을 나타내고 있다.

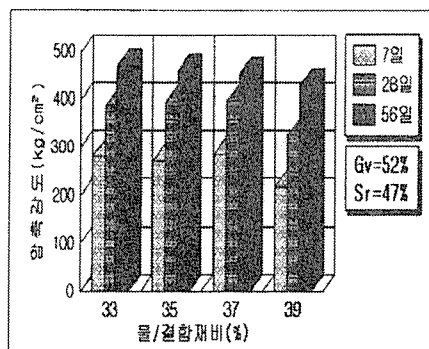


그림 10 물/결합재비에 따른 강도특성

이러한 결과는 물/시멘트비 이론과 차이가 있는 것으로 사료되며, 향후 강도와 점도와의 관계 및 강도와 결합재와의 관계로 해석하는 방안을 연구할 필요가 있을 것으로 평가된다.

### 3.2.3 물/결합재비 실험결론

초유동 콘크리트에서 물/결합재비는 일반 콘크리트에 비해 강도영향이 적은 것으로 나타났다. 이는 초유동 콘크리트의 배합설계법이 流動性 · 充填性 · 材料分離 抵抗性 등과 같은 특성에 관한 것이기 때문이며, 재료의 재분배에 따른 영향도 있었을 것으로 판단된다. 설계기준강도 350kg/cm<sup>2</sup> 정도인 F급 플라이애쉬를 사용한 초유동 콘크리트의 물/결합재비는 37±2% 범위가 가장 바람직할 것으로 사료된다.

## 3. 3 잔골재 용적비 시험결과

플라이애쉬를 사용한 이성분계 초유동 콘크리트의 잔골재 용적비에 따른 영향을 검토하기 위한 배합조건은 [표 5]와 같다.

동일한 배합조건에서 잔골재 용적비를 43~53%범위에서 6단계로 나누었으며, 이는 콘크리트의 모르타르에서 잔골재가 차지하는 용적을 변화시킨 것이다.

표 5 잔골재 용적비에 따른 배합조건

구분 시험체명	W/B (%)	G <sub>v</sub> (%)	S (%)	Unit Material Content(kg/m <sup>3</sup> )					
				C	F/A	W	S	G	S.P (%)
FA-37-S43	37	52	43	367	157	194	764	764	0.85
FA-37-S45			45	354	152	187	789		0.78
FA-37-S47			47	341	146	180	824		0.75
FA-37-S49			49	329	141	173	860		0.78
FA-37-S51			51	316	135	167	893		0.77
FA-37-S53			53	303	130	160	930		0.83

실험결과, 목표 슬럼프 플로우(65±3cm)를 만족하기 위한 고성능 감수제의 첨가량은 잔골재 용적비의 영향을 많이 받지 않았다. 또한 결합재량의 0.04%로 첨가한 AE제의 함량과 공기량은 거의 유사한 값을 보였다.

### 3.3.1 유동특성 실험결과

잔골재 용적비에 따른 슬럼프 플로우 및 L형 플로우의 유동속도는 [그림 11]과 같다.

잔골재 용적비에 따른 슬럼프 플로우의 유동속도를 보면, 50cm에 도달하는 유동속도는 최종 유동속도 및 L형 플로우의 유동속도에 비해 매우 빠르다는 것을 알 수 있다. 이는 초기의 자중에 의한 변형성이 점성에 비해 크기 때문으로 사료된다. 또한, 50cm 도달속도는 잔골재 용적비가 낮을수록 증대하는 것으로 나타났는데, 이는 잔골재 용적비가 낮을수록 결합재가 증대되고 상대적으로 점성이 증대되어 굽은입자의 변형저항성이 감소되었기 때문이다.

그러나, 최종 슬럼프 플로우의 속도 및 L형 플로우 속도는 잔골재 용적비의 영향이 크지 않는 것으로 나타났다.

[그림 12]는 잔골재 용적비에 따른 깔대기 유하시간을 나타낸 것이다.

실험결과, 본 연구에서 깔대기 유하시간을 10±5초로 규정하고 있기 때문에, 잔골재 용

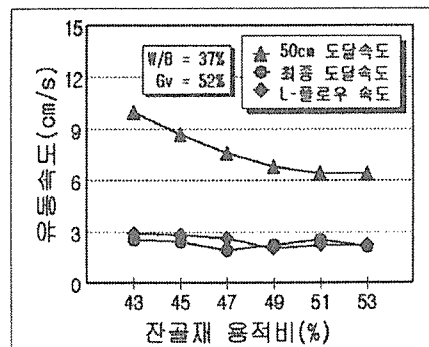


그림 11 잔골재 용적비에 따른 유동속도

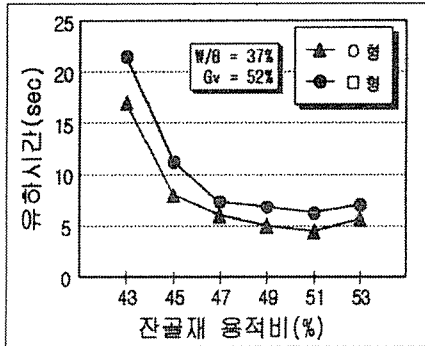


그림 12 잔골재 용적비에 따른 유하시간

적비가 43%인 시험체를 제외하면 대부분의 경우가 만족한다.

그러나, 일반적인 경향을 보면, 잔골재 용적비가 감소할수록 유하시간이 증대하는데, 이는 점성의 증대로 인한 마찰력과 입자간의 전단저항의 증대로 사료된다. 또한 ○형 깔대기에 비해 □형이 약간 증대하는 것으로 나타났으며, 이는 형상에 의한 마찰저항의 차이로 사료된다.

[그림 13]은 잔골재 용적비에 따른 간극통과성의 특성을 나타낸 것이다.

일반적으로 BOX 간극통과성은 굵은골재 용적비의 영향을 가장 많이 받는 것으로 알려져 있다. 본 실험의 결과를 보면, 잔골재 용적비 47%를 변곡점으로 하여 간극통과성 높이차가

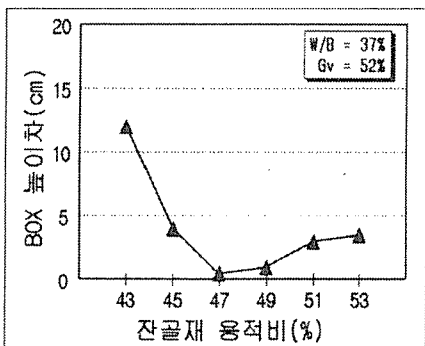


그림 13 잔골재 용적비에 따른 간극통과성

점차 증대하는 것으로 나타났는데, 이는 골재 입자간의 거리 외에 입자간의 모르타르 또는 페이스트 粘性 및 流動性的의 영향에 따라 마찰 및 접촉에 의한 저항이 발생하기 때문이다.

### 3.3.2 강도특성 실험결과

잔골재 용적비에 따른 재령별 강도특성은 별로 크지 않았지만, 대체로 잔골재 용적비가 낮을수록 강도가 약간 증대하는 것으로 나타났다.

물론, 잔골재 용적비가 낮을수록 모르타르 체적에서 차지하는 결합재의 용적이 증대하기 때문에 강도발현에 영향을 미친 것으로 사료된다.

### 3.3.3 잔골재 용적비 실험결론

잔골재 용적비가 감소하면 점성은 증대하지만, 유동성이 확보되지 않는 경우도 많다. 또한, 유동성이 높을 경우에는 재료분리 저항성이 감소되고 간극통과성 및 콘크리트의 균일성에 영향을 미친다. 따라서, 이러한 특성을 확보하기 위해서는 잔골재 용적비를 47±2%에서 잔골재의 종류 및 사용하는 플라이 애쉬에 따른 시험배합을 실시하는 것이 바람직하다.

## 3. 4 굵은골재 용적비 실험결과

초유동 콘크리트의 굵은골재 용적비에 따른 배합조건은 [표 6]과 같다.

굵은골재 용적비가 증대하면 골재입자의 간극이 좁아지기 때문에 유동할 때 입자간의 접촉 및 마찰빈도가 증대하며, 간극통과성, 충전성에 나쁜 영향을 미친다. 따라서, 배합설계에 있어서 골재의 실적율을 고려해야 하며, 본 연구에 사용된 굵은골재의 실적율은 58.6%이다.

표 6 굵은골재 용적비에 따른 배합조건

구분 시험체명	W/B (%)	G <sub>v</sub> (%)	S (%)	Unit Material Content(kg/m <sup>3</sup> )					
				C	F/A	W	S	G	S.P (%)
FA-37-G49	37	49	47	350	150	185	845	720	0.98
FA-37-G51		51		344	148	182	831	749	0.76
FA-37-G53		53		339	145	179	818	779	1.00
FA-37-G54		54		336	144	177	811	794	0.77
FA-37-G55		55		333	143	176	804	808	0.90

### 3.4.1 유동특성 실험결과

굵은골재 용적비에 따른 유동속도는 [그림 14]와 같다. 굵은골재 용적비가 증가할수록 슬럼프 플로우 50cm에 도달하는 유동속도는 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 동일한 배합조건에서 굵은골재 용적비가 증가할수록 초기변형에 따른 골재입자간의 접촉과 마찰에 의한 변형저항성이 감소되기 때문이다. 그러나, 슬럼프 플로우 최종도달 속도 및 L형 플로우 유동속도는 유사한 것으로 나타났다.

[그림 15]는 굵은골재 용적비에 따른 깔대기 유하시간을 나타낸 것이며, [그림 16]은 Box 간극통과성 실험결과를 나타낸 것이다.

일반적으로 깔대기 유하시간은 동일한 굵은골재 용적비에서 유동성이 높은 콘크리트

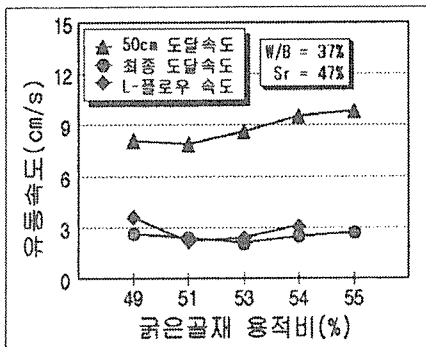


그림 14 굵은골재 용적비에 따른 유동속도

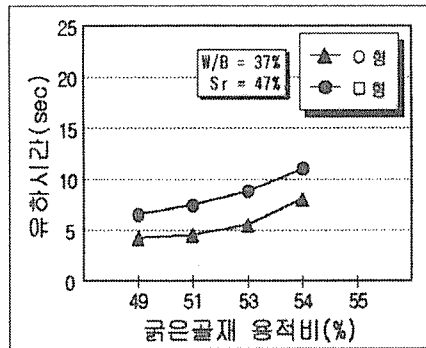


그림 15 굵은골재 용적비에 따른 유하시간

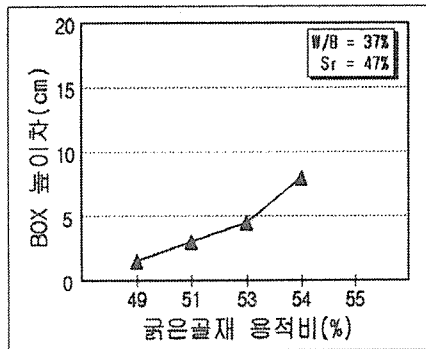


그림 16 굵은골재 용적비에 따른 간극통과성

일수록 감소되며, 점성이 큰 콘크리트일수록 증가하는 경향이 있다.

그러나, 잔골재 용적비 및 물/결합재비가 동일한 조건에서는 굵은골재 용적비가 증가하면, 골재입자의 간극이 좁아지기 때문에 깔대기 유하시간 및 간극통과성 시험에서 골재입자의 충돌·접촉빈도가 증대되고 에너지 소비가 증대하게 된다.

실험결과, 굵은골재 용적비가 증가할수록 골재입자의 맞물림작용으로 깔대기 유하시간 및 간극통과성 높이차가 증대하였다. 본 연구에서 제시한 초유동 콘크리트의 품질관리 범위를 고려하여 볼 때, 깔대기 유하시간(10±5초), 간극통과성 높이차(5cm이하)를 만족하는 굵은골재 용적비를 선정하는 것이 바람직하다.

### 3.4.2 골재 체가름 실험결과

슬럼프 플로우에서 직경 40cm를 중심으로 內외의 시료를 채취하고, BOX 간극통과성 시험의 양단에서 채취한 시료를 통해 골재 체가름 시험을 실시하였으며, 결과는 [표 7]과 같다.

표 7 굵은골재 용적비에 따른 체가름

구분 시험체명	WB (%)	G (%)	S (%)	S/a (%)	골재체가름(%)	
					Slump Flow	BoX 통과성
FA-37-G49	37	49	47	54.1	1.3	4.0
FA-37-G51		51		52.7	2.7	4.6
FA-37-G53		53		51.3	3.0	7.0
FA-37-G54		54		50.6	3.5	9.3
FA-37-G55		55		50.0	-	-

골재 체가름시험은 슬럼프 플로우의 경우에는 3.5%이하로 나타났으며, BOX 간극 통과성 시험의 경우에는 4.0~9.3%의 범위를 나타내었다. 초유동 콘크리트의 체가름시험 결과를 평가하기 위해서는 허용편차 한계를 고려해야 한다. 일반 콘크리트의 운반차 성능을 평가하기 위한 굵은골재의 허용차는 5%로 규정되어 있다. 따라서, 향후 여러가지 시험을 수행하여 골재 체가름시험의 허용오차를 정하는 것이 바람직할 것으로 사료되며, 본 연구에서는 5%이하로 제안하는 바이다.

실험결과, 굵은골재 용적비가 증가할수록 골재 체가름 시험의 편차는 증가하는 것으로 나타났다. 물론, 유동성을 주로 평가하는 슬럼프 플로우에서는 큰 영향이 없으나, 간극통과성을 평가하는 Box 간극통과성 시험결과는 굵은골재 용적비의 영향이 큰 것으로 나타났다.

### 3.4.3 강도특성 실험결과

[그림 17]은 굵은골재 용적비에 따른 재령

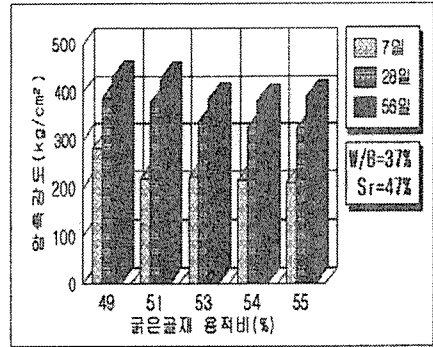


그림 17 굵은골재 용적비에 따른 강도특성

별 강도특성을 나타낸 것이다.

굵은골재 용적비에 따른 강도발현은 뚜렷한 경향은 아니지만, 굵은골재 용적비가 작을수록 우수한 것으로 나타났다. 그러나, 이에 따른 강도저하의 우려는 불식되었지만, 크리프 및 건조수축 현상과 함께 고려해야 할 것으로 판단된다. 굵은골재 용적비가 51%이하인 경우에는 28일 및 56일 재령강도가 우수하였다.

### 3.4.4 굵은골재 용적비 실험결론

콘크리트 전체에서 굵은골재가 차지하는 용적은 流動性·充墳性·材料分離 抵抗性 등과 같은 초유동 콘크리트의 요구성능을 만족하는 범위에서 가능한 한 높은 값을 선정하는 것이 바람직하다. 또한, 타설초기의 유동속도는 굵은골재 용적비가 증가할수록 감소하기 때문에 타설속도 등과 함께 고려해야 한다.

따라서, 화력발전소 플라이애쉬를 사용한 초유동 콘크리트의 굵은골재 용적비는 유동속도, 유하시간 및 간극통과성·강도발현 등을 고려하여 51±1% 범위에서 최적배합을 제안한다.

## 4. 결 론

본 연구는 초유동 콘크리트의 배합설계에 대한 새로운 개념을 도입하고, 이에 따른 배

합시험을 통해 그 결과를 합리적으로 평가하기 위해 실시되었다. 물론, 초유동 콘크리트의 배합설계법에 따라 현장적용을 수행하면서 현장의 배합변수 및 품질관리가 수월하다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 배합설계 개념을 보급하기 위한 기준 및 S/W개발이 필요하며, 현재, 개발된 프로그램을 통해 초유동 콘크리트의 배합설계를 실시한 결과는 [표 8]과 같다.

표 8 초유동 콘크리트의 배합설계표

No. FA-37-G51		Date : 1996.10.2		Place : DICT					
Step 1									
Air	4%	G <sub>1</sub>	58.2	G <sub>2</sub>	51	S <sub>1</sub>	47	β <sub>p</sub>	0.99
K <sub>v</sub>	1.045	C <sub>1</sub>	3.15	S <sub>2</sub>	2.62	G <sub>3</sub>	2.76	FAg	2.21
FA	30%	S.P	1.2%	배합량	1m <sup>3</sup>				
Step 2									
용적	W	C	FA	S	G	Air	S.P	C+FA	Total
l/m <sup>3</sup>	181.9	109.2	66.7	317.3	284.9	40		175.9	1000
Step 3									
중량	W	C	FA	S	G	Air	S.P	C+FA	T0tal
kg/m <sup>3</sup>	181.9	343.9	147.4	831.3	786.5	40	5.40	491.2	7694.6
□W/B(V)=103.5%, □W/B(G)=37% □S/a=52.7%									

초유동 콘크리트의 배합설계를 할 때, 사용자는 Step 1의 조건만 입력하면 Step 2 및 Step 3이 자동적으로 산정된다. 따라서, 배합설계 및 품질관리를 쉽게 실시할 수 있다.

본 연구는 초유동 콘크리트의 配合設計 단계를 새로운 방법으로 접근한 것이며, 수행결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

① 초유동 콘크리트의 배합설계는 구속수비, 변형계수 및 잔골재 용적비, 굵은골재 용적비 등과 같은 새로운 개념으로 접근해야 하며, 이를 통해 현장배합 및 품질관리를 할 수 있는 기본개념을 도입해야 한다.

② 국내에서 생산되는 보통 포틀랜드 시멘

트는 제조회사에 관계없이 구속수비가 1.10~1.11로 매우 높은 편이다. 따라서, 초유동 콘크리트에 범용적으로 사용할 수 있는 고분말 시멘트의 개발이 필요하며, 구속수비를 낮추는 노력이 필요하다.

③ 울산 열병합발전소 및 보령 화력발전소의 플라이애쉬를 시멘트의 중량비로 30% 치환한 혼합시멘트의 구속수비는 0.96~1.10으로 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 낮다. 그러나, 초유동 콘크리트의 유동성을 확보하기 위해서는 더 감소시킬 수 있는 방안이 필요하다.

④ F급 플라이애쉬를 사용한 초유동 콘크리트의 최적 잔골재 용적비는 47±2%, 굵은골재 용적비는 51±1% 범위가 가장 바람직하다.

⑤ 설계기준강도 350kg/cm<sup>2</sup>인 초유동 콘크리트의 물/결합재비는 37±2%정도가 적합하다.

⑥ 초유동 콘크리트의 配合設計는 제안한 식에 따라 실시하며, 결합재를 사용할 경우에는 시멘트 및 혼화재의 치환식을 사용하면 변수에 따라 재료의 再分配가 이루어 질 수 있다.

⑦ 초유동 콘크리트의 품질성능은 슬럼프 플로우(65±3cm), 깔대기 유하시간(10±5초), Box 간극통과성 높이차(5cm이하) 등으로 하며, 골재 체가름 시험의 편차한계는 5% 이하로 한다.

## 참고문헌

- (1) 岡村 甫., “新しいコンクリート材料への期待”, セメント・コンクリート, No.475, 1986.9
- (2) 朴 沘林, 權寧鎬, 李相洙., “超流動 콘크리트의 現場適用 및 實用化 研究”, 대한건축학회, 논문집 제 12권 3호, 1996.3, pp.127~134

- (3) 朴 沘林, 權寧鎬., “高性能 콘크리트 開發 및 實用化 研究”, 한국콘크리트학회, 논문집 제 7권 5호, 1995.10. pp.42~50.
- (4) JCI-C35., “超流動 콘크리트에 關材する シンポジウム”, 論文報告集, 日本 콘크리트 工學協會, 1994.5
- (5) 尹在煥 外., “고로시멘트를 사용한 高流動 콘크리트의 製造에 關한 實驗的 研究”, 한국콘크리트학회, 가을학술발표 논문집 제 6권 2호, 1994.11, pp.65~70
- (6) 金武漢, 金圭庸 外., “高流動 콘크리트의 流動特性 및 工學的 特性에 미치는 시멘트 페이스트 및 골재용적과의 關係에 關한 實驗的 研究”, 한국콘크리트학회, 가을학술발표 논문집 제 8권 2호, 1996.11, pp.301~307
- (7) 韓千求, 潘好鎔, 朴相俊 外., “流動化 콘크리트의 現場適用에 關한 實驗的 研究”, 한국콘크리트학회, 가을학술발표 논문집 제 8권 2호, 1996.11, pp.271~275
- (8) 金和中 外., “超流動 콘크리트의 開發에 關한 基礎的 研究”, 한국콘크리트학회, 봄 학술발표 논문집 제 7권 1호, 1995.5 (제1보 : 모르터에 대한 레오로지시험, pp.42~47, 제2보 : Fresh 콘크리트의 성능평가, pp.48~53)
- (9) 崔光一, 姜敏昊 外., “高流動 시멘트를 사용한 高性能 콘크리트 특성에 關한 研究”, 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집, 제 8권 2호, 1996.11, pp.290~294
- (10) 朴 沘林, 安宰鉉, 權寧鎬, 李相洙., “超流動 콘크리트의 配合設計에 關한 研究”, 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집, 제 8권 2호, 1996.11, pp.283~289
- (11) 藤原浩已, 下山善秀 外., “高流動 콘크리트의 充填性에 關する 基礎的 研究”, 콘크리트 工學年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.27~32, 1992.6
- (12) 名和豊春, 江口仁, 大久保正弘., “高流動 콘크리트의 配合と流動性에 關する 考察”, 콘크리트 工學年次論文報告書, Vol.14, No.1, pp.369~374, 1992.6
- (13) 岡村 甫, 小澤一雅., “締固め不要への排戰 콘크리트 工事의 近代化를 めざして”, 세멘트 콘크리트, No.546, pp.2~9, 1992.8
- (14) 多田和樹, 末岡英二, 佐野清史., “增粘劑을 用いた省力化施工 콘크리트의 基本特性에 關하여”, 土木學會 第48回年次學術講演梗概集, 第5部, pp.136~137, 1993.9
- (15) 河井徹, 武川芳., “低發熱セメント을 用いた高流動 콘크리트의 諸性質에 關する 實驗的 研究”, 土木學會論文集, No.462, V18, pp.111~120, 1993.3