

# 石灰石粉을 사용한 超流動 콘크리트의 流動特性에 關한 研究

## The Flowing Properties of the Super Flowing Concrete using Limestone

이 상 수\* 권 영 호\*\* 안 재 현\*\*\* 김 무 한\*\*\*\* 박 칠 림\*\*\*\*\*  
Lee, Sang-Soo Kwon, Yeong-Ho Ahn, Jae-Hyun Kim, Moo-Han Park, Chil-Lim

### ABSTRACT

This study is the experimental results on the flowing properties of the super flowing concrete(SFC) using limestone(LS), which is to develop the SFC in level of ordinary strength. And this study is described with respect to basic concept, confined water ratio( $\beta_p$ ) of binder (cement+limestone) in paste, relationship between volume ratio of water-binder(w/b) and addition ratio of superplasticizer in mortar, flowing velocity and funneling time and compressive strength in concrete to replacement ratio of LS.

The results of this study is improved to flowing properties in fleshly concrete with increasing replacement ratio of LS. The optimal mixing condition of the SFC using LS in level of ordinary strength is proved W/C 55%, LS 40% and W/C 60%, LS 50%.

### 1. 서론

최근, 건설 구조물의 대형화, 고층화됨에 따라 복잡한 부재형상 및 과밀 배근 등으로 인한 콘크리트의 充填不良, 숙련공의 부족으로 인한 콘크리트의 타설 및 다짐작업이 곤란에 따른 施工不良 등으로 콘크리트의 品質低下가 커다란 사회적인 문제로 대두되고 있다.

이러한 콘크리트의 품질 및 구조물의 信賴性을 向上시키기 위한 방안으로 초유동 콘크리트의 開發이 요구되었으며, 건설교통부의 국책과제인 “超流動 콘크리트의 開發 및 實用化 研究”를 시작으로 초유동 콘크리트 개발에 대한 연구가 일부대학 및 기업연구소를 중심으로 활성화되기 시작하였다.<sup>1)</sup>

일반적인 초유동 콘크리트의 製造方法은 크게 분체계와 증점계제로 구분되는데, 분체형의 경우에는 낮은 물/결합재비의 초유동 콘크리트 개발에 사용되는 반면에, 증점계제의 경우에는 물/결합재비가 높은 초유동 콘크리트의 개발에 적용되고 있다.<sup>2)</sup> 지금까지 국내에서 개발·현장적용한 초유동 콘크리트는 대부분 플라이애쉬를 사용한 분체형 콘크리트에 속한다.

본 연구에서는 초유동 콘크리트의 강도범위를 一般強度 범위로 조정하기 위하여 증점계 및 석회석분을 사용한 분체계를 검토하게 되었으며, 국내의 증점계 품질을 고려하여 비수경성 분체인 석회석분을 사용하여 一般強度 범위의 초유동 콘크리트를 개발하여 건설산업의 經濟性 및 品質向上을 圖謀하고자 하였다. 따라서, 분체로 석회석분을 사용한 초유동 콘크리트의 기본성능(구속수비, 변형계수), 모르타르의 면적비 및 속도비, 그리고 콘크리트의 유동성·충전성·재료분리 저항성을 만족하는 최적배합 조건을 도출하여 현장적용의 기본자료로 활용하고자 한다.

\* 정희원, (株)大宇建設技術研究所 主任研究員  
\*\* 정희원, (株)大宇建設技術研究所 前任研究員  
\*\*\* 정희원, (株)大宇建設技術研究所 責任研究員  
\*\*\*\* 정희원, 忠南大學校 建築工學科 教授·工博  
\*\*\*\*\* 정희원, (株)大宇建設技術研究所 所長·工博

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

一般强度 범위의 초유동 콘크리트를 제조하기 위한 시멘트는 D사의 보통 포틀랜드 시멘트(1종)를 사용하였으며, 굵은골재는 비봉석산의 25mm 쇄석, 잔골재는 남양만에서 생산되는 세척사를 각각 사용하였다. 사용골재의 품질시험 결과는 표2.1과 같다. 또한, 고성능 감수제는 J사의 나프탈렌계를 사용하였으며, 석회석분은 G사에서 생산된 것으로 품질시험 결과는 표2.2와 같다.<sup>2)</sup>

표2.1 골재의 품질시험 결과

구분	종류	잔골재		굵은골재	
		측정값	품질기준	측정값	품질기준
비중		2.61	2.5이상	2.58	2.5이상
조립율(F.M)		2.85	-	7.01	-
흡수율(%)		0.52	3.0이하	0.53	3.0이하
실적율(%)		64.8	60이상	58.1	57이상
단위중량(kg/m <sup>3</sup> )		1.690	-	1.497	1.250이상

표2.2 석회석분 특성시험 결과

특성	비중	수분(%)	체통과 중량백분율(%)		
			600 $\mu$ m	150 $\mu$ m	75 $\mu$ m
측정값	3.02	0.04	100	90	68
품질규격(JIS A 5008)	2.60 이상	1.0 이하	100	90이상	70이상

### 2.2 배합조건 및 변수

一般强度 범위에서 석회석분을 사용한 초유동 콘크리트의 배합변수의 범위는 표2.3과 같으며, 굵은골재 용적비( $G_v$ ) 및 잔골재 용적비( $S_r$ )는 기존의 연구<sup>3)</sup>에서 최적으로 나타난 범위인 50% 및 47%로 각각 선정하여 석회석분의 치환에 따른 초유동 콘크리트의 특성을 검토하고자 한다.

표2.3 배합조건 및 변수

W/B (%)	W/C (%)	$G_v$ (%)	$S_r$ (%)	Limestone (B×%)	SP제 (B×%)	AE제 (B×%)
30~35	40~50	50	47	30	1.0~1.2	0.04
	50~60			40	0.8~1.2	
	60~70			50	0.6~1.2	

## 3. 석회석분을 사용한 모르타르 특성결과

### 3.1 구속수비 특성

석회석분의 유동특성을 검토하기 위하여 결합재에 대한 구속수비 시험<sup>3)</sup>을 실시하였으며, 각종 혼화재 및 석회석분의 치환율에 따른 구속수비 결과는 그림3.1. 및 그림3.2와 같다.

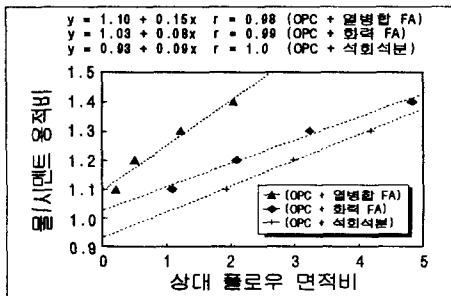


그림3.1 각종 혼화재별 구속수비 특성

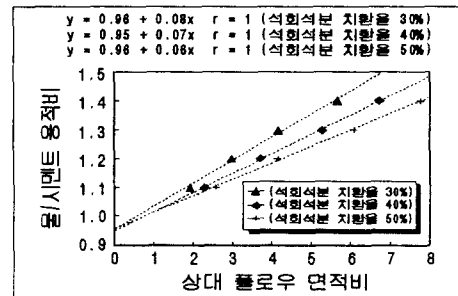


그림3.2 석회석분의 치환율별 구속수비 특성

보통 포틀랜드시멘트에 각종 혼화제별 치환율을 30%로 할 때의 구속수비 시험결과, 열병합 플라이애쉬(1.10) > 화력 플라이애쉬(1.03) > 석회석분(0.96)의 순으로 감소하였다. 이는 석회석분 입자에 흡수되는 구속수량이 적기 때문에, 다른 혼화제보다 유동성에 기여하는 효과가 크게 된다. 따라서, 석회석분을 초유동 콘크리트의 혼화제로 사용하면 유동성 관리에 매우 효율적일 것으로 기대된다.

또한, 석회석분의 치환율에 따른 구속수비는 거의 동일하지만, 변형계수는 치환율이 높을수록 작게 나타났다. 이는 석회석분의 치환율이 증가할수록 유동성 개선에 효과적이라는 의미로 해석된다.

### 3.2 모르타르 유동성과 점성과의 상관성

#### 3.2.1 초유동 콘크리트용 모르타르의 평가방법<sup>5)</sup>

초유동 콘크리트용 모르타르는 요구되는 유동성과 점성을 동시에 만족해야 한다. 일반적으로 모르타르의 유동성은 상대플로우 면적비( $\Gamma_m$ )로, 점성은 상대갈대기 속도비( $R_m$ )로 평가하며, 다음식으로 산정한다.

$$\Gamma_m = \frac{\pi(F_p/2)^2 - \pi(F_0/2)^2}{\pi(F_0/2)^2} = (F_p/F_0)^2 - 1 \quad \text{--- (식3.1)}$$

$$R_m = 10/T_r \quad \text{--- (식3.2)}$$

여기서,  $F_p$ 는 모르타르의 플로우 값(mm),  $F_0$ 는 플로우-콘의 단면직경(100mm)이며,  $T_r$ 은 갈대기시험의 유하시간을 나타낸 것이다. 기존의 연구<sup>4)</sup>에 따르면, 초유동 콘크리트의 자기충전성능을 만족하기 위한 최저값은 잔골재 용적비( $S_r$ ) 40%, 굵은골재 용적비( $G_v$ ) 50%에서 상대플로우 면적비 및 상대갈대기 속도비가 각각 5 및 1의 범위를 제시하고 있다. 따라서, 본 연구에서도 이를 목표값으로 선정하였다.

#### 3.2.2 모르타르 배합의 순서

본 연구에서의 모르타르 배합순서는 그림3.3과 같다. 이러한 모르타르 배합은 플로우 및 갈대기시험을 통해 상대플로우 면적비( $\Gamma_m$ ) 및 상대갈대기 속도비( $R_m$ )가 5 및 1을 중심으로 허용범위, 즉 모르타르의 유동성과 점도가 초유동 콘크리트의 특성을 확보할 수 있는 범위에 있으면 종료하도록 하였다. 만족하지 않을 경우에는 물/결합재 용적비와 고성능 감수제 첨가량을 변화시켜 만족할 때까지 반복시험을 수행하였다.

#### 3.2.3 $\Gamma_m$ 및 $R_m$ 의 수정배합 실험결과

물/결합재 용적비와 고성능 감수제 첨가량이 모르타르의 유동성 및 점성에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 석회석분 및 잔골재를 사용하고, 고성능 감수제(나프탈렌계)를 변화시킨 모르타르의 성능실험 결과는 그림3.4와 같다.

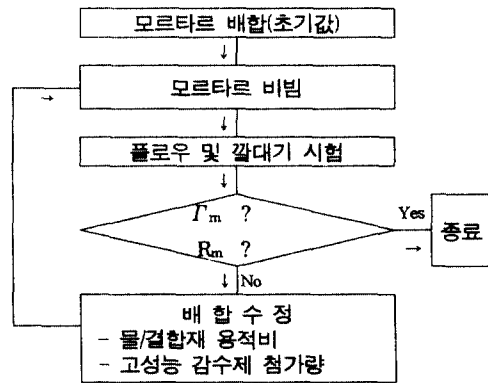


그림3.3 모르타르 배합순서

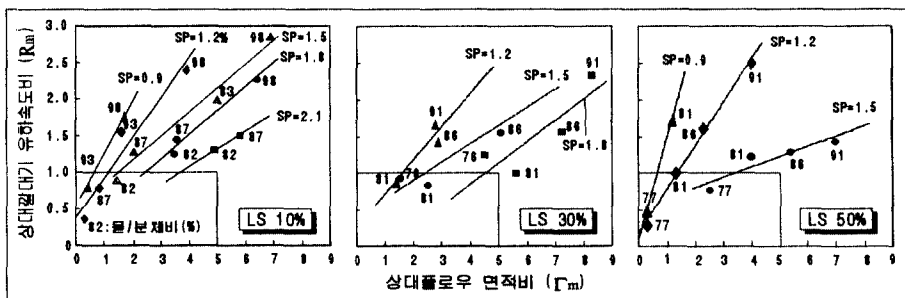


그림3.4 물/결합재 용적비 및 고성능 감수제 첨가량에 따른 유동성과 점성과의 관계

실험결과, 고성능 감수제 첨가량을 증가시키면 동일 플로우 면적비에 대해 깔대기 유하속도가 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 직선의 기울기도 전반적으로 고성능 감수제 첨가량이 증가할수록 낮아지고 있다. 또한, 석회석분의 치환율이 증가함에 따라 목표값( $\Gamma_m=5$ ,  $R_m=1$ )을 만족하는 고성능 감수제의 첨가량은 감소하기 때문에, 석회석분에 의한 유동성 증대효과는 매우 큰 것으로 사료된다.

한편, 모르타르의 점성을 확보하기 위해 물/결합재 용적비를 가능한 낮추고 고성능 감수제 첨가량으로 목표값을 만족하도록 유도하는 것이 바람직하다. 이러한 접근방안은 향후에도 계속 연구되어 물/결합재 용적비와 고성능 감수제 첨가량의 변화로 유동성과 점성을 정량화하도록 해야 할 것이다.

#### 4. 석회석분을 사용한 초유동 콘크리트의 특성결과

##### 4.1 석회석분의 치환율에 따른 유동특성

###### 4.1.1 유동속도에 미치는 영향

석회석분을 사용한 초유동 콘크리트의 流動特性을 검토하기 위하여 슬럼프 플로우 및 L형 플로우 시험을 실시하였으며, 실험결과는 그림4.1.과 같다.

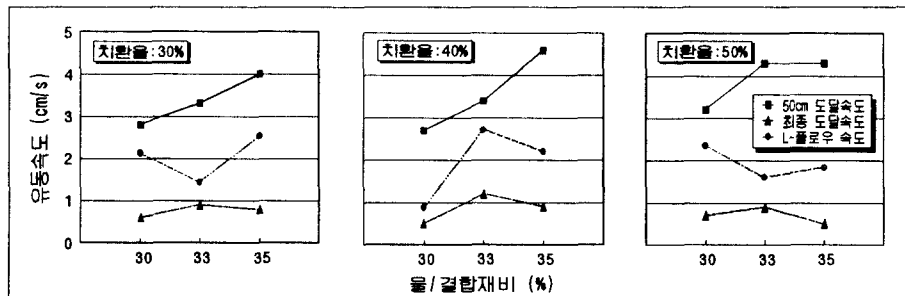


그림4.1 석회석분의 치환율에 따른 유동속도

유동특성 결과, 석회석분의 치환율에 관계없이 물/결합재비가 증대할수록 50cm 도달속도는 증대하였는데, 이는 물/결합재비의 증대에 따라 동일한 유동성에서 점도가 감소하기 때문에 초기 변형량이 증대된 것으로 사료된다. 그러나 최종 유동속도는 물/결합재비에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서, 초유동 콘크리트의 유동성과 점성은 50cm 도달속도로 평가하는 방안이 합리적이다.

또한, 동일한 물/결합재비에서 석회석분의 치환율이 증대할수록 유동속도는 다소 증대하였는데, 이는 페이스트 상태에서 석회석분을 사용한 결합재의 구속수비와 변형계수의 변화에 따른 것으로 상대적으로 변형계수가 감소되고 유동성이 증대되는 경향을 보이고 있다.

###### 4.1.2 유하시간에 미치는 영향

깔대기 유하시간은 초유동 콘크리트의 점성을 평가할 수 있는 시험으로, 석회석분을 사용한 초유동 콘크리트의 겔보기 점성을 검토하기 위하여 유하시간을 측정하였으며, 결과는 그림4.2.와 같다.

실험결과, 깔대기 유하시간은 물/결합재비 또는 석회석분의 치환율에 관계없이 대부분 목표 유하시간( $10 \pm 5$ 초)을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 석회석분의 치환율이 30~40%인 범위에서는 물/결합재비가 증가할수록 유하시간이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 물/결합재비가 증가할수록 상대적으로 점성이 감소될 뿐만 아니라, 위치에너지가 운동에너지 및 마찰에너지로 소비되는 메카니즘에서 마찰저항 및 전단저항이 감소되어 상대적인 운동에너지가 증가되었기 때문으로 사료된다.

또한, 동일 물/결합재비에서 석회석분의 치환율이 증대할수록 유하시간은 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 석회석분이 유동성에는 기여하지만 점성확보에는 큰 효과가 없다는 것을 의미한다. 따라서,

최적 치환율을 선정할 때는 유동성 및 점성을 함께 고려해야 할 것이다.

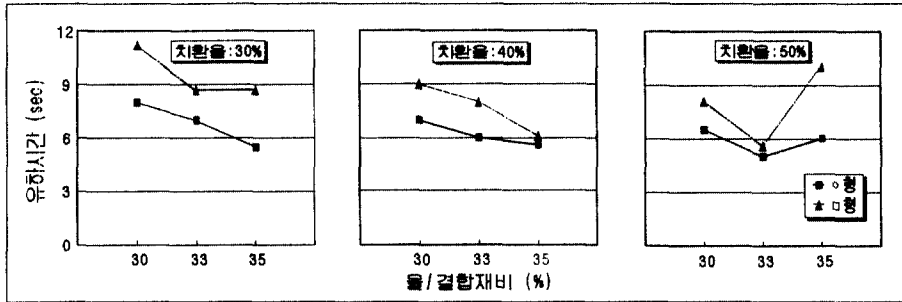


그림4.2 석회석분의 치환율에 따른 유동시간

#### 4.1.3 간극통과성에 미치는 영향

석회석분을 사용한 초유동 콘크리트의 充填性能을 검토하기 위하여 형상별 간극통과성 시험을 실시하였으며, 실험결과는 그림4.3.과 같다.

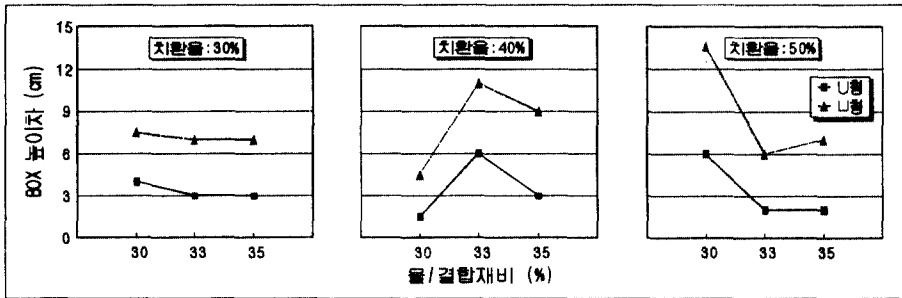


그림4.3 석회석분의 치환율에 따른 BOX 높이차

실험결과, 석회석분의 치환율 및 물/결합재비에 따른 간극통과성 높이차는 매우 상이하게 나타났는데, 이는 플라이애쉬를 결합재로 사용한 기존의 연구결과<sup>3)</sup>와도 큰 차이를 보였다. 즉, 동일한 굵은골재 용적비( $G_v=50\%$ )에서 석회석분의 치환율이 점성보다는 유동성에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 사료된다. 따라서, 점성을 확보할 수 있는 최적 치환율이 필요하다.

#### 4.2 석회석분을 사용한 초유동 콘크리트의 강도특성

석회석분을 사용한 초유동 콘크리트의 유동특성은 물/결합재비 개념으로 평가하였지만, 강도특성은 석회석분이 비수경성 분체로 강도발현에 기여하지 않기 때문에, 물/시멘트비 개념으로 평가하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서도 이러한 개념으로 석회석분의 강도특성을 평가하고자 하였으며, 물/시멘트비 및 석회석분의 치환율에 따른 초유동 콘크리트의 강도특성은 그림4.4.와 같다.

실험결과, 석회석분의 치환율 및 물/시멘트비가 증대할수록 압축강도는 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 물/시멘트비 변화에 따른 강도발현도 뚜렷한 경향을 보였다. 또한, 물/시멘트비 및 석회석분 치환율이 증가할수록 장기재령의 강도발현이 둔화되는 현상을 보이고 있는데, 이는 비수경성 분체인 석회석분의 함량이 증대함에 따라 상대적으로 수경성 물질인 단위시멘트량이 감소하였기 때문이다.

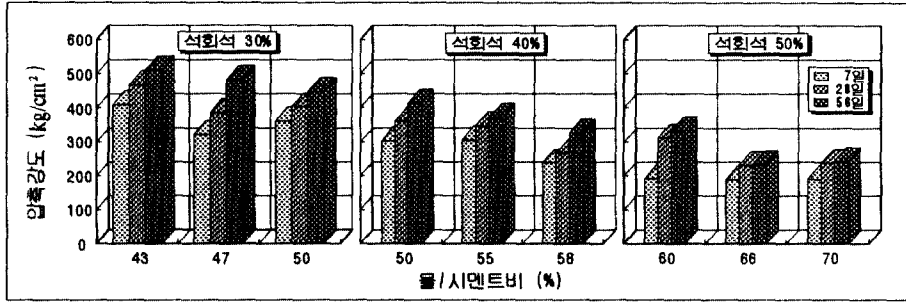


그림4.4 석회석분의 치환율에 따른 강도특성

따라서, 유동특성 및 강도특성을 고려하여 석회석분을 사용한 설계기준강도 210kg/cm<sup>2</sup>이상의 초유동 콘크리트에 대한 최적배합비는 석회석분의 치환율 40%, 물/시멘트비 55% 및 석회석분의 치환율 50%, 물/시멘트비 60%의 두가지 경우가 가장 적합한 것으로 나타났다. 향후에는 석회석분을 사용한 초유동 콘크리트에 대한 건조수축 및 크리프, 동결융해와 같은 장기거동, 알칼리-골재반응, 그리고 현장에서의 제조·운반·타설·양생 등과 같은 품질관리에 대한 연구도 이루어져야 할 것이다.

## 5. 결론

초유동 콘크리트의 일반강도화를 목표로 석회석분을 사용한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

### (1) 구속수비 영향

석회석분은 다른 결합재보다 구속수비가 낮을 뿐만 아니라 치환율이 증가할수록 변형계수가 감소하기 때문에 초유동 콘크리트의 유동성 개선효과가 매우 큰 것으로 나타났다.

### (2) 모르타르 상태의 유동성과 점성

모르타르 상태의 유동성 및 점성은 플로우 면적비 및 유하시간 속도비로 평가하는 것이 바람직하며, 석회석분의 사용에 따라 고성능 감수제의 첨가량과 물/결합재 용적비로 정량적인 評價가 가능하였다.

### (3) 초유동 콘크리트의 유동특성

석회석분을 사용한 초유동 콘크리트의 유동속도 및 유하시간은 대부분 목표성능을 만족하였지만, 간극통과성은 상이한 결과를 나타내고 있기 때문에 석회석분의 치환율 및 물/시멘트비 선정에 유의해야 한다.

### (4) 초유동 콘크리트의 강도특성

석회석분을 사용한 초유동 콘크리트의 강도특성은 석회석분의 치환율에 따라 다르지만, 40~50%정도를 사용하여 설계기준강도 210kg/cm<sup>2</sup>이상의 일반강도 수준을 확보할 수 있었다.

## ■ 참고문헌

- 1) 박칠림, 권영호, 이상수, 김동석, 김진근., “超流動 콘크리트의 現場施工”, 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집 제8권1호, 1996.5, pp.402~407
- 2) 日本建築學會., “高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説”, 1997
- 3) 박칠림, 안재현, 권영호, 이상수., “超流動 콘크리트의 配合設計에 關한 研究”, 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집 제8권2호, 1996.11, pp.283~289
- 4) 岡村 甫., “ハイパフォーマンスコンクリート”, 1992
- 5) 大内 雅博, 土谷 正., “自己充填コンクリート用モルタルの配合修正システム”, 日本コンクリート工學年次論文報告集, Vol.18, No.1, 1996