



## 폐콘크리트 분말을 혼합한 모르타르 및 자기충전 콘크리트의 유동 및 강도특성

최연왕<sup>1)\*</sup> · 정문영<sup>2)</sup> · 문대중<sup>3)</sup> · 김성수<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>세명대학교 토목공학과 <sup>2)</sup>세명대학교 자원환경공학과 <sup>3)</sup>(주)넥트

## Flowability and Strength Properties of Mortar and Self-Compacting Concrete Mixed with Waste Concrete Powder

Yun-Wang Choi<sup>1)\*</sup>, Moon-Young Jung<sup>2)</sup>, Dae-Joong Moon<sup>3)</sup>, Sung-Su Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Earth Resource & Environmental Geotechnics Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

<sup>3)</sup>NECT Co., Ltd, Jecheon 390-711, Korea

**ABSTRACT** In this study, in order to utilize waste concrete powder(WCP) which is occurred in manufacturing high quality recycled aggregate as an admixture for self-compacting concrete(SCC), the properties of cement paste, mortar, and concrete that were mixed two types of WCP, 928 and 1,360 cm<sup>2</sup>/g of surface area, were analyzed. As a result of experiment, we have found that WCP was a porous material with angle. When WCP was utilized as an admixture for SCC, its flowability and viscosity increased in proportion to the increase of a replacement ratio, and that a replacement ratio of WCP was proper within 15%. The compressive strength at 28 days mixed respectively with WCP2, 15 and 30%, showed about 36 and 28 MPa, and it showed a similar trend with a function suggested in CEB-FIP for the relationship of compressive strength and elastic modulus. According to the results, it is judged that WCP2 can be utilized as an mineral admixture of normal strength SCC.

**Keywords** waste concrete powder, self-compacting concrete, flowability, viscosity, compressive strength

### 1. 서 론

급속한 산업발전과 더불어 건설된 철근콘크리트 구조물들의 노후화, 최근 경제성장 및 국민의 생활수준 향상에 따라 주거 및 주위환경의 개선에 대한 욕구가 증대되어 도심개발 및 노후건축물의 재건축 사업이 급격하게 증가하고 있다. 이러한 콘크리트 구조물의 해체공사 시 소음, 진동, 분진 등은 도심지의 환경문제를 크게 악화시키고 있으며, 막대한 양의 건설폐기물이 발생됨에 따라 점차 사회·경제적인 측면에서 큰 문제점을 낳고 있다. 환경부 통계연감에 따르면 전체 건설폐기물 중 폐콘크리트가 차지하는 비율은 약 64%에 달하고 있으며, 그 발생량은 2003년을 기준으로 하루에 약 92,639톤 정도인 것으로 보고 되고 있다<sup>1)</sup>.

이러한 폐콘크리트 골재를 고품질 재생골재로 제조하면 콘크리트용 천연골재와 대체하여 사용할 수 있으며, 골재의 품귀 및 무분별한 석산의 훼손을 방지하여 자연 생태계를 유지하는데 기여할 수 있을 것이다. 그러나 고

품질 재생골재 생산 시 여러 번의 파쇄과정으로 인하여 폐콘크리트 분말의 발생량이 크게 증가되며, 일반 재생골재 생산에 비해 10~20%정도의 폐콘크리트 분말이 추가적으로 발생할 것으로 예상된다.

이러한 폐콘크리트 분말은 시멘트 원료 및 고유동 콘크리트의 혼화재료로 활용할 수 있는 고부가가치 재료로서 일본의 경우, 고유동 콘크리트의 충전재, 기반개량재 및 환경소재 등으로 재활용된 연구성과 및 적용실적이 보고 되고 있다<sup>2-4)</sup>. 그러나, 국내의 경우 재생골재에 대한 연구 및 적용실적은 상당히 많이 진행되고 있지만 폐콘크리트 분말에 대한 연구 및 활용기술은 찾아보기 어려운 실정이다. 이에 따라, 현재 국내의 폐콘크리트 분말 처리는 전량 단순 매립에 의존하고 있으며, 매립지 확보의 어려움과 2차 환경오염의 원인이 되기 때문에 자원 재활용 및 환경 오염 방지의 관점에서 반드시 재활용할 수 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

한편, 자기충전 콘크리트(Self-Compacting Concrete, 이하 SCC로 약함)는 시공성, 유동성 및 재료분리 저항성을 높여 다짐작업 없이 중력작용에 의해 우수한 충전성을 확보할 수 있는 개념의 콘크리트로 일본 동경대의 Okamura에 의해 제시된 이후 일본에서는 SCC의 실용화를 위한

\*Corresponding author E-mail : crete77@semyung.ac.kr

Received November 7, 2005, Accepted March 17, 2006

©2006 by Korea Concrete Institute

지속적인 연구 및 현장시공이 이루어지고 있다<sup>5,6)</sup>. 그러나, Okamura에 의해 제시된 SCC는 고강도 콘크리트용으로 높은 단위시멘트량이 요구되어 수화열이 커지며, 보통강도 SCC용으로는 사용되지 못하는 단점이 있다. 그러므로, 보통강도용 SCC를 제조하기 위하여 무반응성인 폐콘크리트 분말을 SCC의 점성 확보 및 강도조절용 혼화재료로 활용하게 된다면, 보통강도가 요구되는 일반콘크리트 구조물에 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 자원 재활용 및 수자원 보호를 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 건설폐기물에서 발생되는 폐콘크리트 분말을 SCC용 혼화재료로 사용 가능성 여부를 알아보기 위한 연구의 일환으로 폐콘크리트 분말을 활용한 모르타르의 기초물성 및 폐콘크리트 분말을 혼화재료로 사용한 SCC의 유동성 및 역학적 특성에 대하여 분석 검토하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트 및 폐콘크리트 분말

시멘트는 밀도 3.15 g/cm<sup>3</sup> 및 분말도 3,539 cm<sup>2</sup>/g의 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)를 사용하였으며, 밀도 및 분말도가 다른 2종류의 폐콘크리트 분말(Waste Concrete Powder, 이하 WCP로 약함)을 사용하였다. 여기서, WCP1은 폐콘크리트 파쇄공정시 집진기로 흡입하여 채취한 것으로 밀도 및 분말도가 2.48 g/cm<sup>3</sup> 및 928 cm<sup>2</sup>/g이며, WCP2는 좀더 미립질의 분말을 얻기 위하여 최대의 정제 시간을 두어 채취한 것으로 밀도는 2.49 g/cm<sup>3</sup>이며 분말도는 1,360 cm<sup>2</sup>/g이다. 또한, 2종류 WCP의 화학성분은 모두 동일하며, OPC에 비해 SiO<sub>2</sub> 함량이 높게 나타났다. 이들의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

#### 2.1.2 골재

잔골재는 예천산 강모래(이하 S로 약함) 및 KS L 5100에서 규정하고 있는 주문진산 표준사(이하 SS로 약함)를 사용하였고, 굵은골재는 최대치수 20 mm인 부순골재(이하 G로 약함)를 사용하였으며, 잔골재 및 굵은골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

#### 2.1.3 혼화제

SCC의 유동성 확보 및 공기량 조절을 위하여 국내 H사의 폴리카르본산계 고성능 감수제(이하 SP라 약함) 및

Table 2 Physical properties of aggregates

Items types	Gmax (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	F.M.	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )
G	20	2.71	1.01	7.96	1,611
S	-	2.55	2.07	2.89	1,637

공기 연행제(이하 AE라 약함)를 사용하였다.

### 2.2 시멘트 페이스트

SCC의 유동 및 점성에 미치는 분체특성을 파악하기 위한 시멘트 페이스트 시험은 WCP를 물/분체비 0.55, OPC 부피에 대하여 4수준(0, 15, 30 및 45%)으로 혼합한 시멘트 페이스트를 제작하여 시멘트 페이스트를 빙함유체(Bingham fluid)로 가정하여 전단응력과 전단변형을 관계로서 소성점도를 구하여 레올로지 특성을 검토하였다. 또한, 가상수막두께이론<sup>7)</sup>을 통한 가상수막두께 및 시멘트 페이스트의 응결 시험을 실시하여 WCP의 특성을 알아보았다.

#### 2.2.1 소성점도

소성점도 시험은 각각의 WCP를 혼합한 배합에 대하여 실린더형 스피ndl을 사용한 Brookfield 점도계를 이용하여 Fig. 1과 같이 전단속도의 변화에 따른 전단응력의 변화량을 측정하였다. 이때, 전단속도는 Hysteresis loop area의 하강직선의 기울기인 소성점도를 구하기 위하여 100, 80, 60, 50, 30, 20, 12, 및 5 rpm로 회전속도를 변화하여 측정하였으며, 시료와 스피ndl의 접촉면 및 용기 사이즈를 고려한

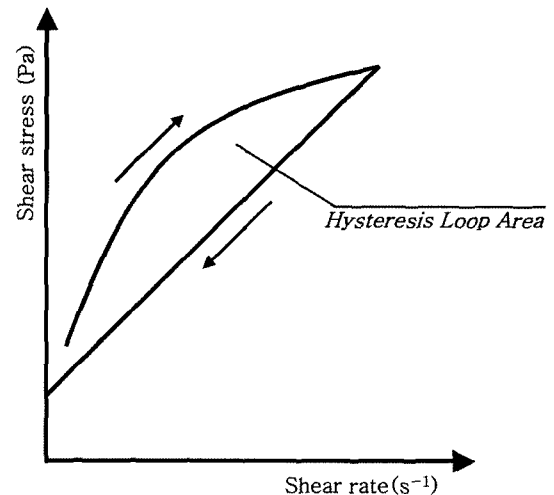


Fig. 1 Hysteresis loop area

Table 1 Chemical component and physical properties of OPC and WCPs

Items types	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Insol. (%)	L.O.I (%)	Surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
OPC	61.40	21.60	6.00	3.40	3.10	2.50	0.21	0.03	3,539	3.15
WCP1	11.82	58.55	10.35	1.52	4.64	0.44	-	7.43	928	2.48
WCP2	11.82	58.55	10.35	1.52	4.64	0.44	-	7.43	1,360	2.49

계수를 적용하여 산출된 전단응력을 직선회귀를 통해 빙함유체(Bingham fluid)로 가정하여 소성점도를 구하였다.<sup>8)</sup>

### 2.2.2 가상수막두께

WCP의 혼합물을 달리한 혼합 분체를 완전 구형으로 가정하여 분체입자를 둘러싸고 있는 가상수막두께를 산정하였다. 분체입자의 가상수막두께 메커니즘은 Fig. 2와 같이 유동성에 미치는 분체입자 주위의 수막두께를 나타내는 것이다. 즉, 페이스트의 유동성 및 점성은 OPC 입자를 단일입경의 완전 구형 입자로 가정시 액체의 점성 및 입자의 밀도와 관계가 있고, 특히 유동성은 1개 입자에 대한 평균 액체량(가상수막)에 반비례하며, 가상수막두께를 산정하기 위해 제한된 식은 식 (1)과 같다.<sup>7)</sup>

$$D = \frac{3}{\alpha\rho} \left( \sqrt[3]{\frac{W}{C}\rho + 1} - 1 \right) \quad (1)$$

여기서,  $D$  = Thickness of pseudo water film ( $\mu\text{m}$ )

$\alpha$  = Surface area ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

$\rho$  = Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### 2.2.3 응결 시험

WCP의 혼합물을 OPC 부피에 대하여 4수준(0, 15, 30 및 45%)으로 변화시켜 제조한 시멘트 페이스트를 KS L 5108에 따라 응결시간을 측정하였다.

## 2.3 모르타르

WCP 혼합 모르타르 시험은 물/분체비 0.55인 OPC 부피에 대하여 2종류의 WCP를 4수준(0, 15, 30 및 45%)으로 혼합하여 플로우, 흡수율 및 압축강도 시험을 실시하였으며, 배합표는 Table 3과 같다.

### 2.3.1 플로우 시험

OPC 부피에 대하여 4수준(0, 15, 30 및 45%)으로 변화시킨 모르타르의 플로우 시험은 KS L 5105에 준하여 실시하였다.

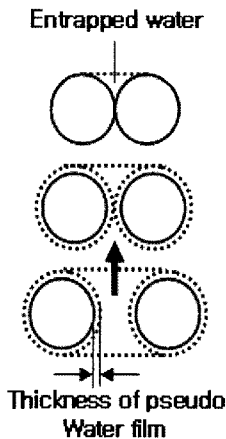


Fig. 2 Fluidity mechanism according to thickness of pseudo water film

Table 3 Mixture proportions of cement mortar

Replacement of WCP(%)	W/P (%)	OPC : WCP : SS(%)
0	55	1.00 : 0.00 : 2.45
15	55	0.85 : 0.15 : 2.45
30	55	0.70 : 0.30 : 2.45
45	55	0.55 : 0.45 : 2.45

### 2.3.2 흡수율 시험

WCP에 대한 모르타르 흡수율 시험은 28일 동안 양생한 시험편을 24시간  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 건조로에서 건조 후 Fig. 3과 같이 시험편의 밑면을 수면에 놓고 경과시간에 따라 모세관 공극을 통하여 흡수되는 수량을 측정하였으며, 흡수속도( $V_s$ )는 식 (2)와 같이 단위면적당 흡수량을 시간의 제곱근으로 나누어 계산하였다.<sup>9)</sup>

$$V_s = \frac{i}{\sqrt{t}} \text{ mm}/\text{min}^{1/2} \quad (2)$$

여기서,  $i$ 는 단위면적당 흡수량으로 ( $i = \frac{\Delta W}{A\rho}$ )로 계산되며,  $t$ 는 경과시간이다. ( $\Delta W$ : 경과시간에 따른 흡수량,  $A$ : 수면과 접촉하는 시험편의 면적,  $\rho$ : 물의 밀도)

### 2.3.3 압축강도 시험

WCP의 혼합물을 변화시켜 제조한 모르타르의 플로우 시험을 실시한 후  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ 의 압축강도용 모르타르 시험편을 제조하였으며,  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 표준양생을 실시하여 재령 3, 7 및 28일에 KS L 5105에 따라 압축강도를 측정하였다.

## 2.4 콘크리트 실험

SCC의 성능평가를 만족하는 기준배합은 Table 4와 같은 일본토목학회의 “자기충전형 콘크리트의 시험방법(안),<sup>10)</sup> 2등급 성능기준을 선정하였으며, 이러한 기준을 만족시키는 배합의 결정을 위하여 예비배합을 실시하였다.

본 실험에서 혼합한 WCP는 2종류의 WCP중 상대적으로 SCC의 유동성 및 점성을 확보할 수 있는 WCP2를 사용하였으며, SCC의 배합은 Nan-Su의 배합설계법<sup>11,12)</sup>을 수정·보완하여 골재의 느슨한 상태에 대한 밀실한 상태의

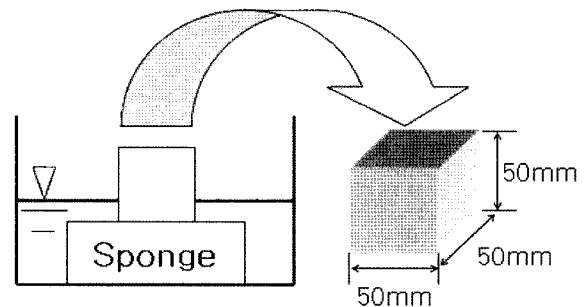


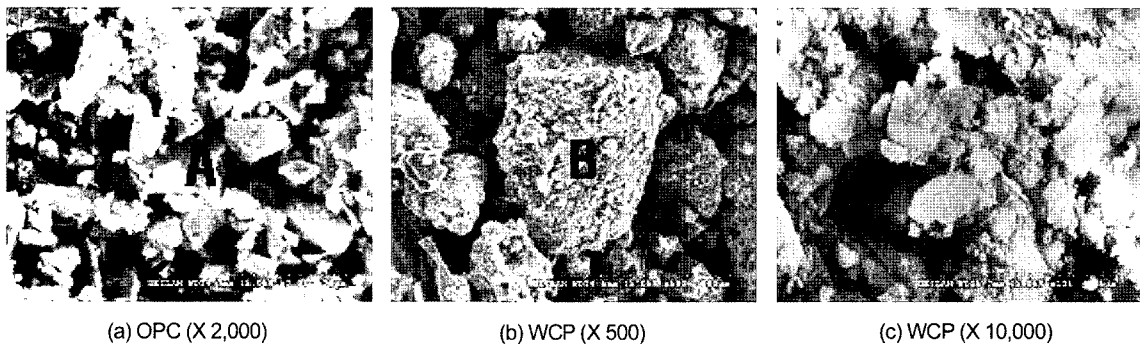
Fig. 3 Sorptivity test

**Table 4** Specification of SCC proposed by JSCE

Rank Items		1	2	3
Construction condition	Minimum gap between reinforcement (mm)	35-60	60-200	≥ = 200
	Amount of reinforcement (kg/m <sup>3</sup> )	≥ = 350	100-350	≤ = 100
Flowability	Slump flow (mm)	600-700	600-700	500-650
Segregation resistance ability	Time required to flow through V-funnel (s)	9-20	7-13	4-11
	Time required to reach 500mm of slump flow (s)	5-20	3-15	3-15
Filling height of U-box test (mm)		≥ = 300	≥ = 300	≥ = 300
Absolute volume of coarse aggregate per unit volume of SCC (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		0.28-0.30	0.30-0.33	0.32-0.35

**Table 5** Mixture proportions of concrete with WCP2

PF	S/a (%)	WCP2/(OPC+WCP2) (%)	W/(OPC+WCP2) (%)	W/C (%)	Unit weight of volume (Kg/m <sup>3</sup> )					SP (OPC×%)
					W	P		S	G	
						OPC	WCP2			
1.14	53	0	38	38	177	465	0	856	800	1.0
1.14	53	15	39	45	177	395	55	856	800	1.1
1.14	53	30	41	54	177	325	110	856	800	1.2
1.14	53	45	42	69	177	256	165	856	800	1.5



**Fig. 4** Particle morphology of OPC and WCPs

단위용적질량의 비에 잔골재율에 따른 가중치를 적용하여 얻어지는 PF값<sup>13)</sup>을 적용하여 실시하였다. WCP2를 사용한 SCC의 배합은 Table 5와 같이 예비배합으로 얻어진 골재채움률(이하 PF로 약함) 1.14, 잔골재율 53%, 물/분체비 0.38인 기준배합을 결정하였으며, WCP2의 혼합률을 OPC에 대하여 부피비 15, 30 및 45%로 변화시켜 실시하였다. 또한, 굳지 않은 SCC의 자기충전성을 평가하기 위하여 Slump-flow, V-funnel 유하시간, Slump-flow 500 mm 도달시간 및 U-box 충전높이 시험을 실시하여 SCC의 자기충전성 평가를 실시하였으며, Φ100×200 mm의 원주형 공시체를 제조하여 경화한 콘크리트의 압축강도, 쪼갬인장강도 및 정탄성계수를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 페콘크리트 분말의 품질특성

WCP의 입자형상을 알아보기 위하여 SEM촬영을 실시하여 OPC 입자와 비교한 것이 Fig. 4이다.

Fig. 4 (b)에서 WCP B의 입자형상은 Fig. 4 (a)의 OPC와

비슷하게 각이 져 있으며, 표면이 거칠함을 알 수 있었다. WCP B부분을 확대촬영(×10,000)한 Fig. 4 (c)의 경우 입자표면은 Ca(OH)<sub>2</sub>와 같은 시멘트 수화생성물들이 부착되어 있는 형상이 보인다. 또한, 이들 수화생성물들에는 미세한 모세관 공극들이 포함되어 있으므로 WCP는 OPC에 비하여 다공성 재료로 판단된다.

Fig. 5는 OPC 및 WCP의 입도분석을 실시하여 입자직경에 대한 누적입자량으로 나타낸 것이다.

Fig. 5의 분석결과 누적입자분포 50%(D<sub>50</sub>)인 median경은 OPC가 14 μm인데 비하여 WCP1 및 WCP2는 176 및 90 μm로 OPC에 비하여 큰 입자로 분포되어 있어 OPC와 비슷한 입도를 얻기 위해서는 불밀 등에 의한 분쇄공정이 필요할 것으로 판단된다.

#### 3.2 페이스트 특성

##### 3.2.1 소성점도

WCP 혼합 시멘트 페이스트의 소성점도를 정리한 것이 Fig. 6이다. 소성점도는 전단률과 전단응력과의 선형그래프로 나타낼 때 직선의 기울기를 말하며, WCP의 혼합률

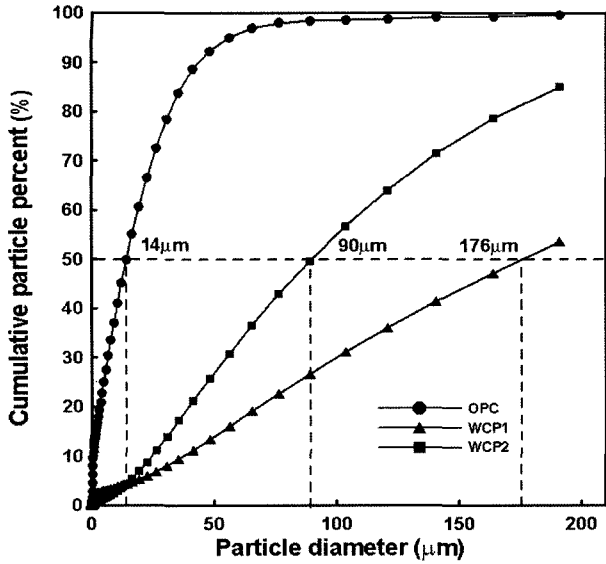


Fig. 5 Particle size analysis of OPC and WCPs

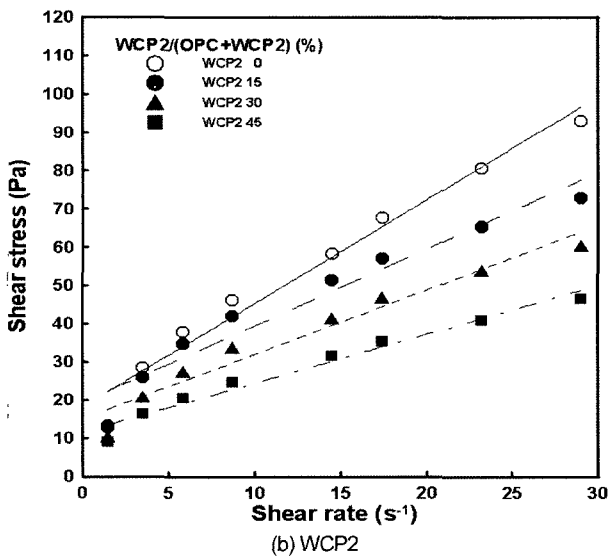
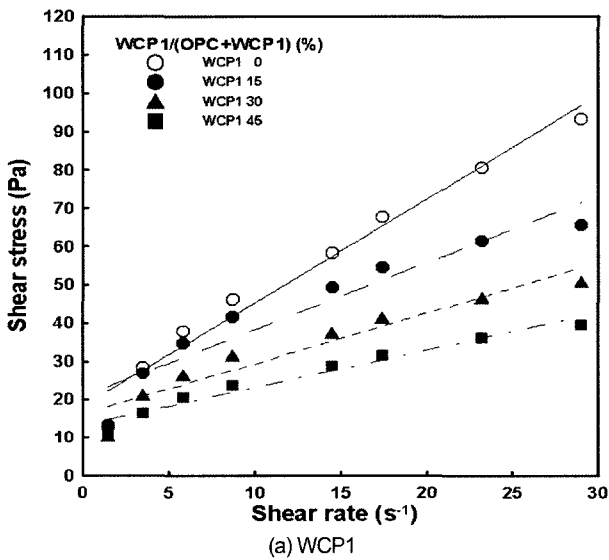


Fig. 6 Relationship between shear rate and shear stress of paste

이 증가함에 따라 소성점도는 OPC만을 사용한 페이스트에 비하여 감소하는 경향을 나타냈다. WCP1을 15 및 45%로 혼합한 경우의 소성점도는 OPC만을 사용한 소성점도와 비교하여 35 및 64%정도 감소하였고, WCP2의 경우 26 및 53%정도 감소하였으며, 그 감소 폭은 WCP1이 WCP2에 비하여 더 크게 나타났다.

이는 WCP1이 WCP2에 비하여 상대적으로 큰 입자들이 분포되어 있기 때문으로 판단되며, WCP를 자기충전 콘크리트에 OPC와 혼합하여 사용할 경우 OPC만을 사용한 경우보다 점성이 감소할 것으로 판단된다.

점성은 SCC 배합에 있어서 매우 중요한 요인으로 점성이 낮을 경우 굵은골재와 모르타르 사이의 재료분리 및 골재 맞물림에 의한 간극폐쇄가 일어나며, 이러한 간극폐쇄는 SCC 배합의 충전성 및 충전속도를 저하시킬 수 있기 때문에 WCP를 SCC용 혼화재료로 사용할 경우 점성 확보를 위한 적절한 혼합률 조정이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2.2 가상수막두께

Fig. 2와 같이 분체 입자의 가상수막두께는 유동하기 전의 최소두께보다 작을 경우에는 입자 사이의 마찰에 의하여 유동이 발생하지 않으며, 유동이 일어난 이후의 가상수막두께의 지나친 증가는 오히려 과잉수에 의하여 재료분리 및 유동성이 감소하게 되므로 SCC의 유동성 및 점성확보를 위한 적절한 가상수막의 형성이 필요하다.

Fig. 7은 WCP혼합시 가상수막두께를 식 (1)에 의하여 정리한 것이며, WCP의 혼합률이 증가함에 따라 가상수막두께가 증가하는 경향을 나타냈다. OPC만을 사용한 경우의 가상수막두께 1.07 μm에 비하여 WCP1 및 WCP2를 15% 혼합한 경우 가상수막두께는 1.92 및 1.88 μm이며, 최대 45% 혼합한 경우 가상수막두께는 OPC를 사용한 것에 비해 2배 이상 크게 나타났다.

따라서, WCP를 혼합한 SCC의 경우 혼합률이 증가함

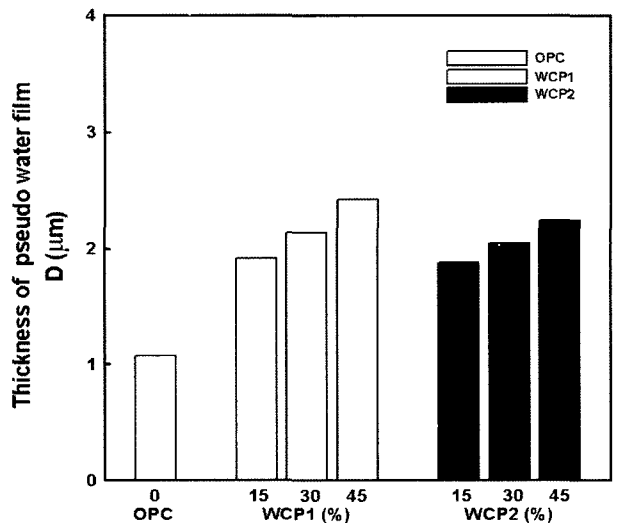


Fig. 7 Relationship between replacement ratio of WCPs and thickness of pseudo water film

에 따라 지나친 가상수막두께의 증가로 과잉수가 발생하여 유동성이 저하될 것으로 판단된다.

### 3.2.3 응결 특성

WCP의 혼합비에 따른 시멘트 페이스트의 응결시간을 정리한 것이 Fig. 8이다.

WCP를 혼합한 시멘트 페이스트의 응결시간은 OPC만을 사용한 시멘트 페이스트와 비교하여 초결시간은 비슷하였으나, 종결시간은 WCP의 혼합률이 증가함에 따라 비례적으로 지연되었으며, 45% 혼합한 경우 종결시간은 WCP1 및 WCP2 모두 2시간 이상 지연되었다. 이는 OPC만을 사용한 페이스트에 비하여 WCP의 혼합률이 증가할수록 OPC의 초기 수화반응을 촉진시키는 C<sub>3</sub>A 및 C<sub>3</sub>S 성분이 감소하여 종결시간이 지연된 것으로 판단되며, WCP 분말도에 따른 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

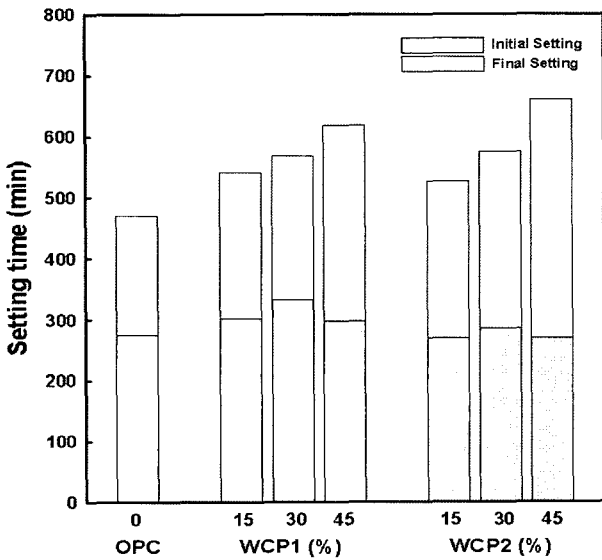


Fig. 8 Setting time of Paste with WCP1 and WCP2

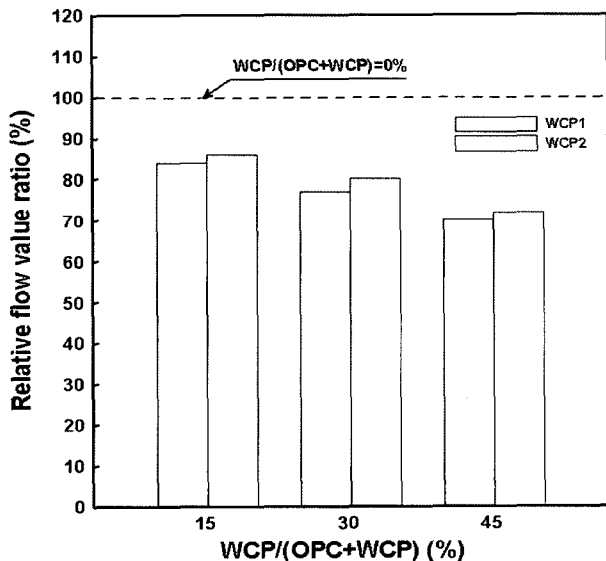


Fig. 9 Flow of mortar with WCP1 and WCP2

## 3.3 모르타르 특성

### 3.3.1 유동 특성

WCP를 OPC 중량에 대하여 0, 15, 30 및 45%로 혼합하여 제조한 모르타르 플로우 값을 정리한 것이 Fig. 9이다. Fig. 9의 결과 WCP를 혼합함에 따라 모르타르의 플로우 값이 OPC만을 사용한 기준 모르타르에 비하여 감소하는 경향을 알 수 있다. WCP1 및 WCP2를 15% 혼합한 경우 플로우 값은 기준 모르타르에 비하여 16 및 14% 정도 감소하였으며, 45% 혼합한 경우 플로우 값은 기준 모르타르에 비하여 30 및 28%정도 감소하였다. 이러한 원인은 WCP1 및 WCP2를 혼합함에 따라 가상수막두께가 OPC만을 사용한 기준 모르타르에 비하여 2배 이상 증가하여 유동에 필요한 혼합수가 과잉수로 빠져나왔기 때문으로 판단되며, WCP1에 비하여 분말도가 큰 WCP2의 플로우 감소 폭이 다소 적게 나타났다.

### 3.3.2 흡수 특성

WCP를 혼합한 모르타르의 재령 28일 시험편에 대하여 경과시간에 따른 모세관 흡수량을 WCP의 혼합비에 따라 흡수속도로 정리한 것이 Fig. 10이다. Fig. 10의 결과 OPC만을 사용한 기준 모르타르는 0.009 mm/min<sup>1/2</sup>의 흡수속도를 나타내었고, WCP를 혼합함에 따라 흡수속도는 점차 증가하여 WCP2를 45% 혼합한 경우 모르타르의 흡수속도는 약 0.020 mm/min<sup>1/2</sup>로 기준 모르타르에 비하여 약 2배 정도 크게 나타났다. 이는 동일한 배합으로 WCP를 혼합할 경우 WCP와 접촉하던 혼합수가 미세공극이 많은 다공성 재료인 WCP에 흡수되어 내부공극을 형성하였으며<sup>14)</sup>, WCP의 혼합률이 증가할수록 더 많은 내부공극의 형성으로 흡수속도가 커진 것으로 판단된다.

### 3.3.3 압축강도 특성

분말도가 다른 2종류의 WCP의 혼합비에 따른 압축강

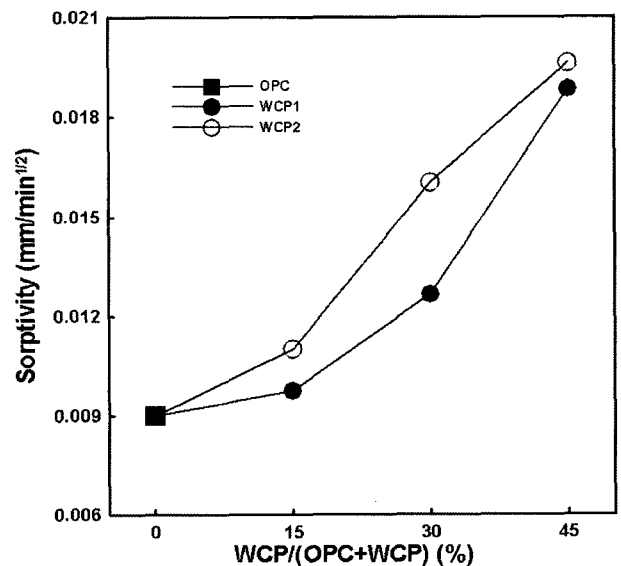


Fig. 10 Sorptivity of mortar with WCP1 and WCP2

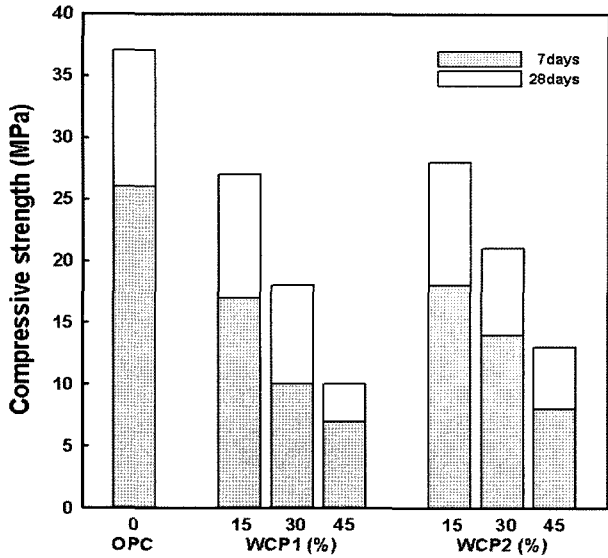


Fig. 11 Compressive strength of mortar with WCP1 and WCP2

도를 정리한 것이 Fig. 11이다. OPC만을 사용한 기준 모르타르의 재령 28일 압축강도는 37MPa정도를 나타내었고, WCP1을 30 및 45%로 혼합한 재령 28일 압축강도는 18 및 10MPa를 나타냈으며, WCP2를 혼합한 경우 21 및 13MPa로 WCP1 및 WCP2의 혼합률이 증가함에 따라 재령 28일 압축강도는 감소하는 경향을 나타냈다. 또한, WCP2를 15, 30 및 45%로 혼합한 모르타르가 WCP1을 혼합한 재령 28일 압축강도에 비하여 크게 나타난 것으로 보아, WCP 분말도가 압축강도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 3.4 자기충전 콘크리트의 자기충전성 평가

WCP1 및 WCP2를 혼합한 시멘트 페이스트의 소성점도, 가상수막두께 및 모르타르의 제반특성들을 검토한 결

과 유동성, 점성 및 압축강도 확보가 유리한 WCP2를 SCC용 혼화재료로 적용하였다.

Fig. 12 및 13은 WCP2 혼합 SCC의 Slump-flow, Slump-flow 500 mm 도달시간 및 U-box 충전높이와의 관계를 정리한 것이다.

Fig. 12의 결과 WCP2의 혼합률이 15%씩 증가함에 따라 Slump-flow는 비례적으로 감소하였고, WCP2를 15% 혼합한 경우 목표성능기준을 만족하였지만, WCP2를 30 및 45%로 혼합한 경우에는 목표성능기준을 만족하지 못하였다. 특히, WCP2를 45% 혼합한 경우 Slump-flow는 OPC만을 사용한 것에 비교하여 약 9.6%정도 감소하였다.

또한, OPC만을 사용한 Slump-flow 500 mm 도달시간 6.35초에 비하여 WCP2를 혼합할 경우 Slump-flow 500 mm 도달시간은 증가하는 경향을 나타내었지만, 45%를 혼합한 경우를 제외한 15 및 30% 혼합할 경우 목표성능기준을 만족하였다.

Fig. 13의 결과 U-box 충전높이는 WCP2를 15 및 30% 혼합할 경우 목표성능기준을 만족하였으나, 45%를 혼합한 경우에는 목표성능기준을 만족하지 못하였다. 또한, V-funnel 유하시간의 경우 WCP2를 15% 혼합한 경우 목표성능기준을 만족하였으며, 30 및 45%를 혼합한 경우에는 막힘현상이 나타났다. 즉, WCP2를 혼합함에 따라 WCP2 자체의 다공질 특성으로 혼합수 및 고성능감수체를 흡수하며, 시멘트 페이스트의 가상수막두께 증가 및 소성점도의 감소로 인하여 SCC의 유동성 및 점성이 감소한 것으로 판단된다.

이상의 WCP2 혼합 SCC의 유동성, 재료분리저항성 및 충전성을 검토한 결과, WCP2의 혼합률이 증가할수록 유동성 및 점성은 감소하였다. WCP2를 15% 혼합한 경우 SCC의 목표성능기준을 만족하였으며, 30 및 45%를 혼합한 경우 대부분의 목표성능기준을 만족하지 못하였다. 따라서, WCP2를 SCC용 혼화재료로 활용할 경우 15%이내

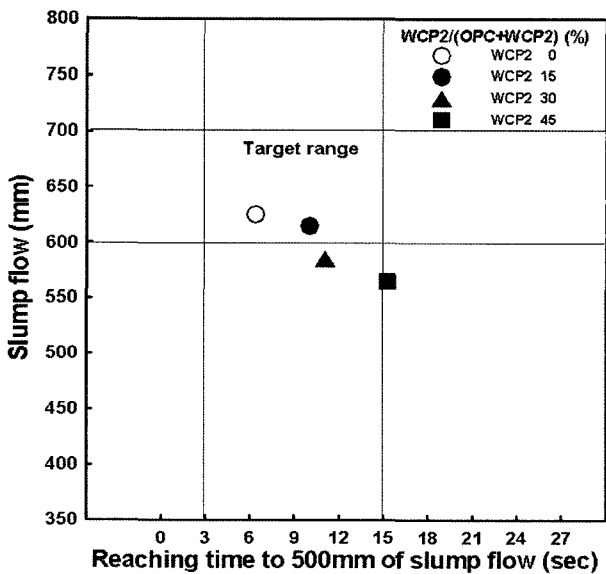


Fig. 12 Relationship between slump flow and reaching time to 500 mm slump-flow of SCC with WCP2

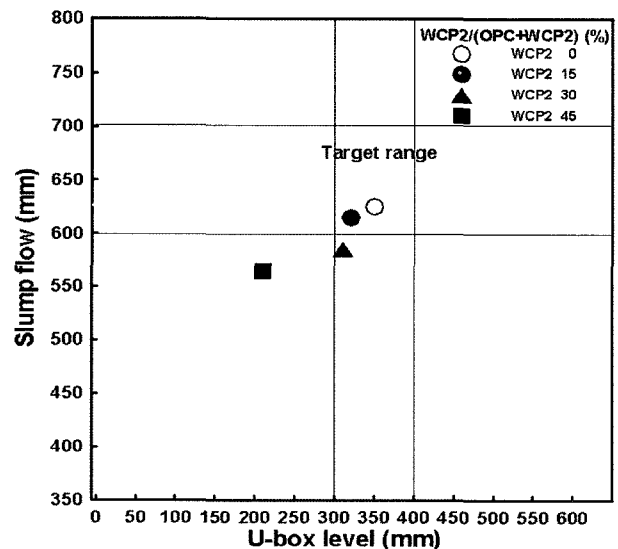


Fig. 13 Relationship between slump flow and U-box of SCC with WCP2

가 적절할 것으로 판단되며, 15%이상을 SCC용 혼화재료로 활용하기 위해서는 WCP2 혼합에 따른 유동성 및 점성의 감소를 해결하기 위한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

### 3.5 자기충전 콘크리트의 역학적 특성 평가

#### 3.5.1 압축강도

WCP2 혼합 SCC의 압축강도를 정리한 것이 Fig. 14이다. Fig. 14의 결과 WCP2를 혼합하지 않은 SCC의 재령 3, 7 및 28일 압축강도는 27, 35 및 40 MPa를 나타내었으며, WCP2의 혼합률이 증가함에 따라 압축강도는 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. WCP2를 15% 혼합한 SCC의 재령 28일 압축강도는 OPC만을 사용한 것에 비하여 약 10%정도의 강도감소가 있었으며, 45%를 혼합한 경우는 약 45%정도의 강도감소를 나타내었다. 이러한 결과를 통하여 WCP2중의 미수화 OPC에 의한 2차 수화반응이 나타나고 있지 않아 WCP2는 무반응성 분체임을 확인할 수 있었다.

따라서, WCP2의 혼합률이 증가함에 따라 비례적으로 압축강도가 감소하는 현상을 이용하여 WCP2를 SCC의 강도조절용 혼화재료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 3.5.2 쪼갠장강도 및 정탄성계수

WCP2 혼합 SCC의 재령 28일 압축강도와 쪼갠장강도 및 정탄성계수와와의 관계를 정리한 것이 각각 Fig. 15 및 16이다. Fig. 15의 결과 압축강도가 커짐에 따라 쪼갠장강도가 비례적으로 증가하였으며, WCP2의 혼합률이 15, 30 및 45%로 증가함에 따라 비례적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

CEB-FIP Model Code에서 제시한 함수와 비교하면 WCP2를 혼합한 경우 쪼갠장강도는 다소 크게 나타났으며, 압축강도와 쪼갠장강도( $f_t/f_c$ )의 비는 9.3~10.6의 범

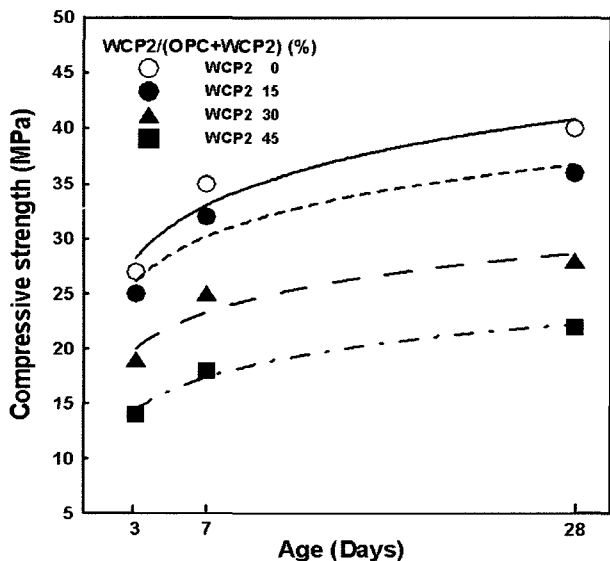


Fig. 14 Compressive strength of SCC with WCP2

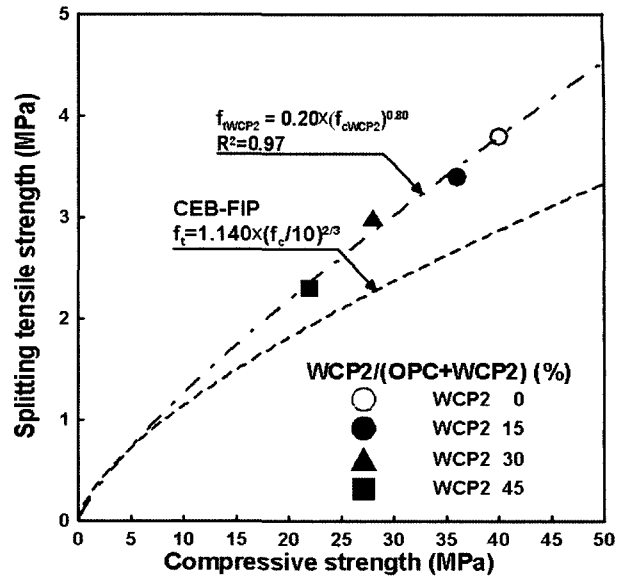


Fig. 15 Relationship of compressive strength and splitting tensile strength of SCC with WCP2

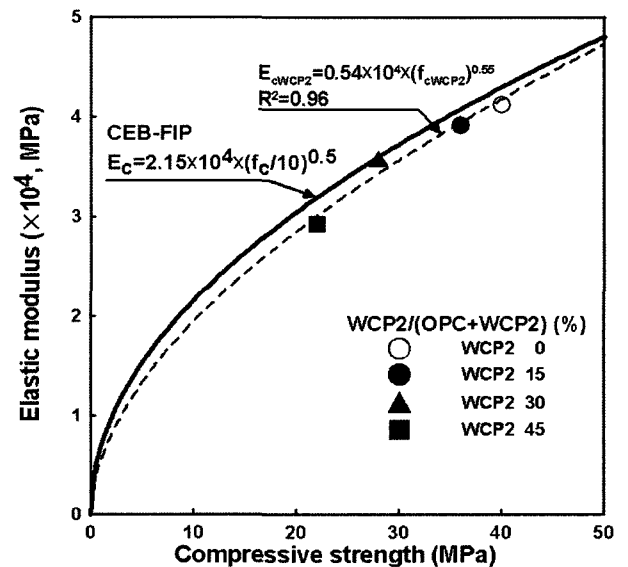


Fig. 16 Relationship of compressive strength and elastic modulus of SCC with WCP2

위로 나타났다.

또한, Fig. 16의 결과 WCP2의 혼합률이 15, 30 및 45%로 증가함에 따라 압축강도 및 정탄성계수도 비례적으로 감소하였으며, 45%를 혼합한 경우 WCP2를 혼합하지 않은 SCC에 비하여 약 29%정도 감소하였다. 그러나, 압축강도와 정탄성계수의 관계에는 CEB-FIP Model Code에서 제시한 함수와 매우 유사한 경향을 나타내었다.

## 4. 결 론

- 1) 페콘크리트 분말은 페콘크리트에 포함되어 있는 골재의 영향으로 시멘트에 비해 SiO<sub>2</sub> 함량이 높으며, 입자 형상은 시멘트와 비슷한 각진 형상을 나타내었다. 페콘크리트 분말의 입자표면은 시멘트 수화 생



성물 등의 부착에 의해 거칠었으며, 미세공극이 많은 다공성 구조를 나타내었다. 또한, 누적입자분포 50%(D<sub>50</sub>)인 median경은 시멘트가 14 μm, WCP1 및 WCP2는 각각 176 및 90 μm,로 나타났다.

- 2) 폐콘크리트 분말의 혼합률이 증가할수록 소성점도는 감소하여 WCP1 및 WCP2를 45% 혼합한 경우 시멘트만 사용한 것에 비하여 각각 64 및 53%정도 감소하였으며, 가상수막두께는 2배 이상 증가하였다. 또한, 시멘트 페이스트의 종결시간은 폐콘크리트 분말의 혼합률이 증가함에 따라 시멘트만을 사용한 시멘트 페이스트에 비하여 최대 2시간 이상 지연되었다.
- 3) 폐콘크리트 분말 혼합 모르타르의 플로우 값은 폐콘크리트 분말의 혼합률이 증가할수록 감소하였으며, 폐콘크리트 분말을 45% 혼합한 경우 모르타르의 흡수속도는 약 0.020 mm/mm<sup>1/2</sup>로 기준 모르타르에 비하여 약 2배 정도 크게 나타났다. 또한, 압축강도는 폐콘크리트 분말의 혼합률이 증가할수록 비례적으로 감소하였으며, WCP1 및 WCP2를 45% 혼합한 경우 기준 모르타르에 비하여 각각 약 73 및 65%정도 감소하였다.
- 4) 폐콘크리트 분말(WCP2)을 자기충전 콘크리트에 15% 이상 혼합하게 되면 슬럼프 플로우가 감소하고, U-box 충전높이차가 감소하여 성능기준을 만족하지 못하였다. 즉, 자기충전 콘크리트의 목표성능기준을 만족하기 위한 폐콘크리트 분말의 혼합률은 15%이내 가 적절할 것으로 판단되었다.
- 5) 폐콘크리트 분말(WCP2)을 15% 혼합한 자기충전 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 약 36 MPa을 발현하였으며, 폐콘크리트 분말을 30% 혼합할 경우 약 28 MPa의 보통강도를 발현하였다. 폐콘크리트 분말 혼합 자기충전 콘크리트의 압축강도와 쪼갬인장강도 (f<sub>c</sub>/f<sub>t</sub>)의 비는 9.3~10.6의 범위이며, 압축강도와 정탄성계수의 관계에는 CEB-FIP 에서 제시한 함수와 유사한 경향을 나타내었다.

이상의 결과들을 검토한 결과, WCP2를 SCC에 적용할 경우 동일한 유동성 및 점성확보를 위해서는 폐콘크리트 분말의 혼합률은 15% 이하, H사의 폴리카르본산계 고성능감수제의 사용량은 1.1% 정도로 사용하는 것이 적절할 것으로 판단되며, 보통강도용 SCC의 점성확보 및 강도조절용 혼화재료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년도 건설교통부 건설핵심기술연구개발 사업인 고성능/다기능 콘크리트의 핵심 및 활용기술 개발에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. 환경부, 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 폐기물통계, 환경부, 2004.
2. 飯田一彦, 佐伯龍彦, 長瀧重義, “セメントをめたコンクリートのリサイクル,” 콘크리트工學論文集, 第11卷, 第3號, 2000. 9, pp.139~144.
3. 中野錦一, “セメント製造はおける省エネの工夫と廃棄物の利用,” 콘크리트工學, Vol.34, No.10, 1996. 10, pp.82~87.
4. 横山 滋, “セメント原料への利用”, 콘크리트工學, Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.49~52.
5. Okamura, H., *Self-compacting high performance concrete*, Social System Institute, Tokyo, 1999.
6. Okamura, H., Maekawa, K., and Ozawa, K., “*High performance concrete*,” Gihoudou Pub., Tokyo, 1998.
7. 宮野和樹, 梶田佳寛, 中村成春, “セメントペーストのレオロジー特性に及ぼす調合要因の影響,” 콘크리트工學年次論文集, 日本ンクリート工學協會, vol.22, No.2, 2000, pp.355~361.
8. 吳相均, 高流動콘크리트의 레オロジー評價および流動設計, 東京大學, 1999.
9. Hall, C., “Water sorptivity of mortars and concretes : a review,” *Magazine of Concrete Research*, 1989. 6, 41, No.147, pp.51~61.
10. *Japan Society of Civil Engineers(JSCE)*, 高流動 콘크리트—施工指針, JSLE, 2000.
11. Nan, S., Miao, B., “A new method for the mixdesign of medium strength flowing concrete with low cement content,” *Cement and Concrete Composite*, Vol. 25, Issue 2, 2003, pp.215~222.
12. Nan S., Hsu, K. C., and Chai, H. W., “A simple mix design method for self-compacting concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol.31, Issue 12, 2001, pp.1799~1807.
13. 최연왕, 정문영, 정지승, 문대중, 안성일, “골재 채움율과 잔골재 용적비를 고려한 자기충전형 콘크리트의 최적배합”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회논문집, 한국콘크리트학회, 고려대학교, Vol.14, No.2, 2002, pp.549~554.
14. 문대중, 정문영, 최연왕, “폐콘크리트 분말 사용 모르타르의 역학적 특성”, 한국지구시스템공학회지, 2003, Vol.40, No.6 pp.438~445.

---

**요 약** 본 연구는 폐콘크리트를 파쇄하여 고품질 재생골재로 제조시 발생되는 폐콘크리트 분말(WCP)을 자기충전 콘크리트(SCC)용 혼화재료로 활용하기 위하여 분말도가 928 및 1,360 cm<sup>2</sup>/g인 2종류의 폐콘크리트 분말(WCP)을 혼합한 시멘트 페이스트, 모르타르 및 콘크리트의 특성들을 분석하였다. 실험결과 폐콘크리트 분말은 각진 형태의 다공성 재료로 자기충전 콘크리트(SCC)용 혼화재료로 활용할 경우 유동성 및 점성은 혼합물이 증가함에 따라 비례적으로 감소하였으며, 자기충전 콘크리트(SCC)의 목표성능기준을 만족하는 혼합률은 15%이내가 적절할 것으로 판단되었다. 폐콘크리트 분말(WCP2)을 15 및 30% 혼합한 재령 28일 압축강도는 약 36 및 28 MPa를 나타내었으며, 압축강도와 정탄성계수의 관계에는 CEB-FIP 에서 제시한 함수와 유사한 경향을 나타내었다. 이상의 실험결과, 보통강도용 자기충전 콘크리트(SCC)의 혼화재료로 폐콘크리트 분말(WCP2)을 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** 폐콘크리트 분말, 자기충전 콘크리트, 유동성, 점성, 압축강도