

보통강도 고유동 콘크리트용 PC계 고성능 감수제를 사용한 시멘트 페이스트의 레올로지 특성 평가

The Rheology of Cement Paste Using Polycarboxylate-Based Superplasticizer for Normal Strength-High Fluidity Concrete

공태웅¹ · 이한승^{2*}

Tae-Woong Kong¹ · Han-Seung Lee^{2*}

(Received August 6, 2021 / Revised August 26, 2021 / Accepted August 26, 2021)

General high fluidity concrete is the area of high strength concrete with a high amount of cement to secure the required fluidity and workability. Since most of the concrete structures currently used have normal strength, there is a limit to the practical expansion and practicality of use. Thus it is necessary to develop normal strength-high fluidity concrete with low binders that can be used not only in general buildings but also in special buildings, and can greatly reduce construction time and save labor costs. This requires to develop and apply the polycarboxylate-based superplasticizer. In this study, PCE was prepared for each combination of starting materials(WR, HB, RT) and the rheological properties of cement paste were analyzed using ringflow cone and a rotary viscometer. As a result, when PCE with a combination of WR 80%, HB 6.5%, and RT 13.5% was applied, the yield stress can be minimized while securing the plastic viscosity at level of the normal strength. In addition, high fluidity due to the high dispersion effect was confirmed.

키워드 : 보통강도, 고유동 콘크리트, 레올로지, PC계 고성능 감수제

Keywords : Normal strength, High fluidity concrete, Rheology, PC-based superplasticizer

1. 서론

최근 건설되고 있는 건축·토목공사의 콘크리트 구조물은 안전성 향상을 위한 과밀배근설계와 예술적 조형미를 위한 복잡한 구조의 건축물에 대한 수요가 증가하고 있다. 그러나 전문인력 부족으로 인한 숙련능력 저하로 인해 콘크리트 타설시 다짐부족으로 거푸집 구석구석을 채우지 못하거나, 과도한 다짐으로 인한 재료분리 현상이 일어나는 등 많은 문제점이 발생되고 있다. 특히 현장 공기단축을 위한 콘크리트 타설속도 증가로 인해 표면 곱보(honeycomb) 및 강도불량 등 콘크리트의 품질저하 요인들의 문제점이 증가하고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 콘크리트의 품질저하 방지 및 시공효율성 개선을 위해 실질적인 대책이 시급한 실정이다(Jeong 2011; Machoka 1993; Okamura 1986).

이에 대한 해결방안으로 초고층 및 대형 구조물을 중심으로 콘크리트 타설시 작업성 개선 및 시공효율을 향상시킨 고유동 콘크리트에 대한 관심과 요구가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다(Choi et al. 2012; Lee 2010; Lee et al. 2004). 고유동 콘크리트는 유동성 및 점성을 발휘하여 자기 충전성을 확보함으로써 타설작업시 숙련성을 크게 요구하지 않아 타설작업 미숙에 따른 콘크리트 품질저하 유발을 감소시킬 수 있으며, 특히 다짐작업 최소화에 따른 인건비 감축, 공사비 절감 및 공기 단축 등의 시공효율성을 높일 수 있다(Shin et al. 1997). 그러나 기존 고유동 콘크리트는 소요의 유동성과 작업성 확보를 위해 대부분 단위시멘트량이 높은 고강도 콘크리트 영역으로써, 현재 사용되고 있는 대부분의 콘크리트 구조물의 요구성능이 보통강도(18~35MPa) 수준임을 감안한다면 현실적인 사용범위확대 및 실용성에 한계가 있었다

* Corresponding author E-mail: ercleehs@hanyang.ac.kr

¹한양대학교 건축시스템공학과 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea)

²한양대학교 건축시스템공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea)

(Han et al, 1997; Ozawa et al, 1992), 고유동 콘크리트의 사용범위를 확대하기 위해 보통강도 영역에서도 유동성과 점성을 발휘할 수 있고 일반건축물 뿐만 아니라 특수건축물에서도 사용가능하며, 타설시간과 인건비 등을 대폭 감축할 수 있는 보통강도 고유동 콘크리트의 개발이 필요한 실정이다(Shadkama et al, 2017; Yamada et al, 2000; Rols et al, 1999), 콘크리트의 구성 구분은 크게 시멘트 페이스트와 골재 부분으로 나눌 수 있으며, 콘크리트의 유동성은 시멘트 페이스트의 유동특성에 크게 좌우되기 때문에 콘크리트의 유동성을 해석하기 위해 시멘트 페이스트의 레올로지를 규명하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구는 결합재량이 낮은 보통강도 고유동 콘크리트의 실용화를 위한 기초 자료로 소성점도를 확보하면서 항복응력은 최소화시킬 수 있으며 동시에 높은 분산효과로 인한 고유동성 확보와 재료분리 및 블리딩 제어가 가능한 보통강도 고유동 콘크리트용 PC계 고성능 감수제를 개발하고 이를 적용한 시멘트 페이스트의 레올로지 특성을 검토하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 굳지 않은 콘크리트의 레올로지

굳지 않은 콘크리트의 유동성상을 레올로지 관점에서 정량적으로 분석하는 것은 콘크리트의 품질관리 및 시공성 예측을 위해서 반드시 필요한 요소임에도 불구하고 아직까지도 명확히 정량화되어 있지는 않다. 그러나 굳지 않은 콘크리트의 레올로지 모델 중 가장 일반적으로 이용되고 있는 빙햄 모델은 소성점도와 항복응력의 파라미터(parameter)로 구성되기 때문에 굳지 않은 콘크리트의 유동성상을 비교적 단순하게 해석할 수 있다. 콘크리트의 레올로지는 컨시스턴시(전단응력과 전단변형속도와와의 관계) 및 호모지니어티(homogeneity)와 관련이 있다. 여기서 컨시스턴시는 단위수량, 시멘트의 종류, 골재의 양과 입도분포, 공기량, 온도 및 혼화재료 등에 영향을 받으며, 호모지니어티는 콘크리트의 재료분리나 마감성에 영향을 미치게 된다. 콘크리트의 레올로지 정수와 워커빌리티와의 관계를 도식화하면 Fig. 1과 같다(Seo 2010). Fig. 2는 고유동 콘크리트에 대한 사용재료 및 배합에 따른 영향인자별 레올로지 특성 변화를 계략적으로 도식화한 것으로 고유동 콘크리트에서 단위수량이 증가하면 소성점도 및 항복응력은 감소한다. 반면 고성능 감수제의 사용량을 증가시켜 단위수량을 감소시키고 슬럼프 플로를 일정하게 유지시키면 소성점도는 증가하지만 항복응력은 일정하게 유지될 수도 있다(Wallevik and Wallevik 2011),

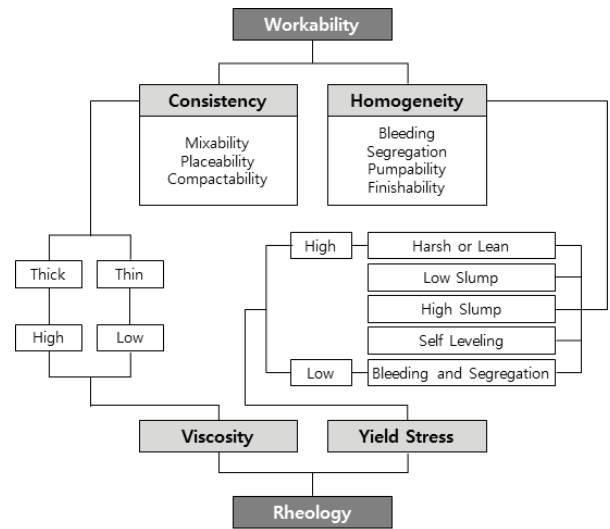


Fig. 1. The relationship between rheology and workability in concrete

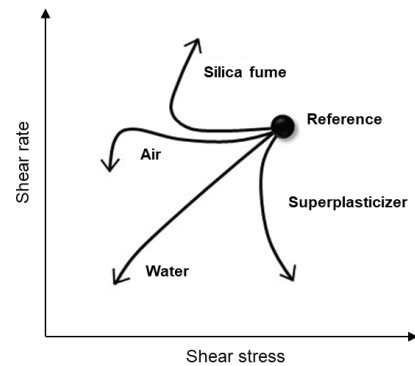


Fig. 2. The characteristics of rheology by affecting factors

2.2 빙햄 모델

빙햄 모델(Bingham model)은 소성점도와 항복응력과 같은 레올로지 정수에 의해 단순하게 구성되며, 복잡한 페이스트의 유동성을 비교적 간단하게 표현할 수 있기 때문에 대부분의 레올로지 연구에서 사용하고 있다.

점도와 같이 전단응력이 소정의 값을 넘었을 때에 전단변형속도가 발생하여 그 이후에는 직선적인 관계가 성립되는 것을 비뉴턴 유동이라 한다. 이러한 비뉴턴 유동은 점성체 및 소성체가 합쳐진 모델로서 대표적인 것이 빙햄 모델이며, 유동을 일으키기 위해 필요한 최소전단응력(항복응력)을 필요로 하는 경우를 소성 유동(Bingham flow)이라 한다. 콘크리트를 비롯하여 시멘트계 혼합물의 유동은 일반적으로 비뉴턴 유동과 유사하다. 이 모델은 점소성

유동을 대상으로 하기 때문에 응력 및 변형속도로서는 Fig. 3과 같이 전단응력과 전단변형속도의 관계로 표현될 수 있다. 이처럼 전단응력과 전단변형속도와와의 관계를 레올로지 분야에서는 컨시스턴시 곡선(consistency curve)이라고 한다.

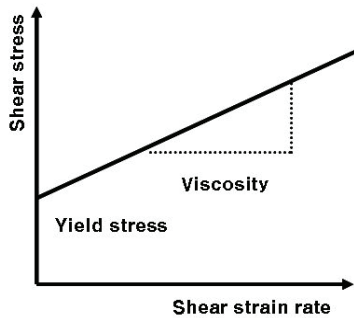


Fig. 3. Bingham model

빙행 모델의 특징은 응력의 크기에 따라 변형하는 영역과 변형하지 않는 영역이 존재하게 되며, 이 한계의 응력을 항복응력(τ_y)라고 한다. 항복응력이 작은 응력에서는 유동을 하지 않기 때문에 항복응력은 ‘0’이 된다. 또한 그 이상의 응력이 작용하게 되면 유동을 계속되는데 항복응력 이상의 응력이 작용하는 영역에서는 점성체와 같이 응력의 증가와 함께 변형속도가 증가하는 거동을 나타내며, 이러한 비례계수를 소성점도(η)라고 한다. 이를 정리하면 식 (1)과 같다.

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서, τ 는 전단응력(Pa), τ_y 는 항복응력(Pa), η 는 소성점도(Pa·s) 및 $\dot{\gamma}$ 는 전단변형속도(s^{-1})이다.

3. 실험 개요

3.1 실험인자 및 수준

기존의 결합재량이 낮은 수준에서 콘크리트의 고유동화를 실현하기 위해 적합한 PC계 고성능 감수제(이하 PCE)에 대한 연구는 슬럼프, 슬럼프 플로, 유하시간 등 물리적 특성만을 측정된 정성적인 평가가 대부분이다. 그러나 굳지 않은 콘크리트의 유동특성은 기존의 유동성 시험만으로는 그 성능을 파악하기에는 한계가 있기 때문에 보다 정량적인 평가가 요구되며, 이에 따라 레올로지 정수를 역학모델로 표현하고 빙행 모델로 해석하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다.

본 연구는 보통강도 고유동 콘크리트에 적합한 PCE를 개발하기 위한 단계로 보통강도 수준의 결합재를 사용한 콘크리트에 고유동성을 부여하기 위해 MPEG계 polycarboxylate ether를 출발원료로 하여 기존 콘크리트에서 일반적으로 사용하는 PC계 고성능 감수제와는 차별화된 소성점도를 확보하면서 항복응력을 최소화시킬 수 있는 새로운 개념의 PCE를 개발하고자 하였다. 우선 선행연구에서 출발원료의 종류를 Water reduction polycarboxylate ether(이하 WR), Hybrid polycarboxylate ether(이하 HB) 및 Retention poly-carboxylate ether(이하 RT)로 구분하고 각각의 출발원료 조합에 따른 PCE를 제조한 후, 이를 시멘트 페이스트에 적용하여 유동 및 레올로지 특성에 대하여 평가하여 보통강도 고유동 콘크리트에 적합한 출발원료를 선정하였다.

선행연구에서 선정된 MPEG계 polycarboxylate ether 출발원료의 세부조합에 대한 성능을 평가하기 위해 수량이 고정되어 있을 때 출발원료의 세부조합에 따른 유동성, 컨시스턴시의 변화를 중점적으로 볼 수 있는 ‘단위수량 고정 배합’을 평가하였고, 출발원료 세부조합에 따른 감수율 변화와 경시변화를 중점적으로 볼 수 있는 ‘슬럼프 플로 고정 배합’으로 레올로지 특성을 검토하였다. Table 1은 실험을 위한 출발원료(WR, HB, RT)의 인자별 세부조합을 나타내었다.

Table 1. Experimental details

No.	PCE of combinations(%)		
	WR	HB	RT
A1	50	0	50.0
A2		16.5	33.5
A3		33.5	16.5
A4		50.0	0
B1	65	0	35.0
B2		11.5	23.5
B3		23.5	11.5
B4		35.0	0
C1	80	0	20.0
C2		6.5	13.5
C3		13.5	6.5
C4		20.0	0

3.2 실험 재료

3.2.1 시멘트

본 연구에서는 KS L 5201 “포틀랜드 시멘트”를 만족하는 밀도 $3.15g/cm^3$, 비표면적 $3,590cm^2/g$ 의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다.

3.2.2 MPEG계 Polycarboxylate Ether

MPEG는 Methoxy Polyethylene Glycol의 약자로, VPEG (Alkylallylether Polyethylene Glycol)과 함께 고성능 콘크리트에 사용되는 대표적 polycarboxylate ether의 계열 중 하나이다. MPEG는 에틸렌 옥사이드(ethylene oxide)와 메탄올(methanol)의 부가중합체(addition polymer)로 생성한다. 일반적인 화학식은 $CH_3O-(CH_2-CH_2-O)_n-H$ 로 표시되며, 수용성이지만 고체 MPEG는 분자량이 증가함에 따라 용해도가 감소하여 수용성도 감소하는 것이 특징이다. 특히 MPEG는 VPEG에 비해 높은 감수력과 점성증진 및 강도향상 효과가 우수하여 국내 콘크리트용 혼화제의 출발 원료로 사용되는 대표적인 물질로 Fig. 4는 PEG와 MPEG의 화학 구조를 나타낸 것이며, Fig. 5는 MPEG계 Polycarboxylate Ether의 일반적인 화학구조를 나타낸 것이다. Table 2에는 각 출발원료의 외관 및 기능적 특징을 요약하였다.

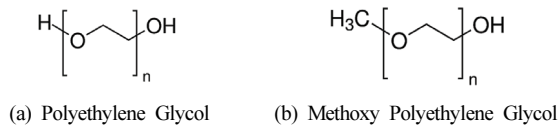


Fig. 4. Structure of PEG and MPEG

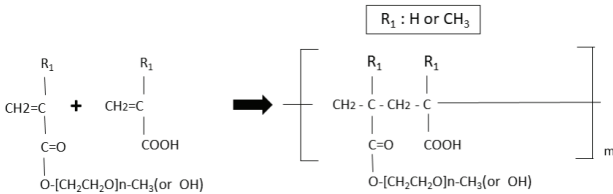


Fig. 5. Structure of polycarboxylate ether

Table 2. Properties of PC-based raw materials

Types		Appearances	Description
Water reduction type	WR	Light yellow liquid	- Excellent water reduction by powerful dispersing effect - High flowable concrete
Hybrid type	HB	Yellowish brown liquid	- High water reduction and long slump retention - Good for blending cement(F/A, Slag) - Higher compressive strength at early age and 28 days - High workability without bleeding or segregation
Retention type	RT	Faint light yellow	- Excellent water reduction and long slump retention

※ All samples are polycarboxylate sodium salts and made by soild(25%)

3.3 실험 방법

3.3.1 유동특성 평가

시멘트 페이스트의 혼합은 KS L 5109에서 규정된 모르타르 믹서를 사용하여 건비빔 30초 후 가수(加水)하고 저속에서 30초, 고속에서 150초 간 혼합하였다. 유동성 평가를 위해 Fig. 6과 같은 링플로우콘과 유리판을 사용하여 낙하시험 없이 흐름이 멈췄을 때 버니어캘리퍼스를 사용하여 페이스트의 가로와 세로의 직경을 측정 후 평균값으로 평가하였다.

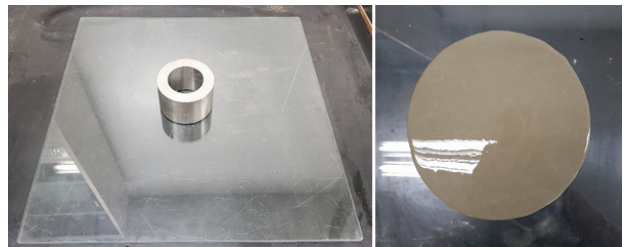


Fig. 6. Test of fluidity for cement paste

3.3.2 레올로지 평가

고유동 콘크리트의 레올로지 평가방법으로는 회전형 점도계, 전단박스형 점도시험, 구인상 점도계 시험 등이 있으나 본 연구에서는 Fig. 7과 같은 회전형점도계(Brookfield DV-III)를 사용하였으며, 스피들 SC4-29를 적용하여 측정하였다. 또한 시료의 온도를 일정한 조건으로 맞추기 위해 워터배스(water bath)를 이용하여 $20 \pm 1^\circ C$ 의 조건으로 유지하였다. 전단변형속도는 단계별로 0.125, 0.25, 0.625, 1.25, 2.5, 5, 12.5, $25s^{-1}$ 와 같이 변화시켜 토크를 측정하였으며, 빙햄 모델을 적용하여 컨시스턴시 곡선을 도출하고 선형회귀분석하여 소성점도와 항복응력을 산출하였다.



Fig. 7. Test of rheology of cement paste

4. 실험 결과

MPEG계 polycarboxylate ether 출발원료인 WR, HB 및 RT의 세부조합에 대해서 시간경과(최초, 90분경시)에 따른 유동특성(슬럼프 플로) 및 레올로지 특성을 평가하였으며, 이에 대한 결과값은 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Results of combinations with WR, HB and RT

		Flow (mm)		Plastic viscosity (Pa · s)		Yield stress (Pa)		Reduced water (g)
		Initial	90min	Initial	90min	Initial	90min	
Fixed unit water	A1	151	232	2.41	1.57	9.03	3.51	-
	A2	167	217	2.19	1.58	6.91	4.43	-
	A3	175	211	2.06	1.67	6.25	5.12	-
	A4	190	207	1.99	1.71	5.78	5.55	-
	B1	188	229	2.00	1.46	5.52	3.18	-
	B2	191	216	1.98	1.57	6.01	4.68	-
	B3	196	202	1.93	1.75	5.49	5.16	-
	B4	212	210	1.78	1.71	4.63	5.03	-
	C1	223	229	1.79	1.54	3.64	3.64	-
	C2	216	214	1.88	1.68	4.44	4.79	-
	C3	215	211	1.86	1.71	4.40	5.07	-
	C4	217	209	1.84	1.75	4.49	5.55	-
Fixed slump flow	A1	221	269	1.54	1.06	4.68	0.57	0.0
	A2	225	260	1.59	1.13	4.35	1.22	0.0
	A3	225	245	1.59	1.25	3.83	1.75	0.0
	A4	226	237	1.50	1.22	4.65	2.86	-2.5
	B1	224	251	1.76	1.25	4.17	2.87	-2.5
	B2	225	243	1.65	1.33	4.24	2.82	-2.5
	B3	227	229	1.75	1.60	5.28	3.64	-4.0
	B4	227	225	1.84	1.63	4.45	3.49	-5.0
	C1	227	239	1.62	1.65	3.17	2.89	-5.0
	C2	228	229	1.86	1.82	3.66	3.81	-6.0
	C3	228	221	1.84	1.76	4.03	4.93	-10.0
	C4	229	217	1.89	1.75	4.61	5.43	-13.0

4.1 유동 특성

선정된 출발원료의 세부조합에 따른 유동특성은 Fig. 8에 나타내었다.

시멘트 페이스트의 단위수량을 동일하게 적용한 경우, WR 비율이 50%에서 80%로 증가함에 따라 최초 슬럼프 플로는 크게 증가하였는데(평균 171mm→218mm), 이는 감수성능이 우수한 WR의 특성상 WR 비율이 최초 슬럼프 플로에 절대적인 영향을 미쳤던 것으로 판단된다. 또한 90분 후의 경시변화율은 감소하였는데(-26.9%→0.9%), 이는 슬럼프 플로가 높은(상대적으로 단위수량이 많은) 경우 경시변화가 적은 일반적인 시멘트 페이스트의 특성에 기인한 것으로 판단된다. WR 비율별로 HB 비율에 따른 최초 슬럼프 플로 변화를 추세선의 기울기로 비교하면 WR 50%일

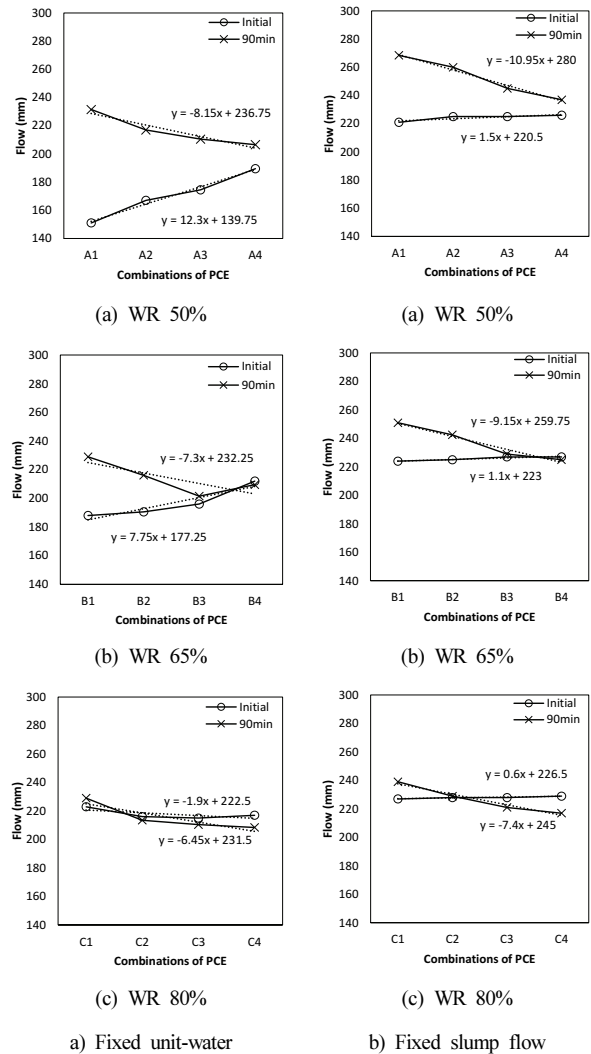


Fig. 8. Slump flow of cement paste with PCE

경우는 +12.30, WR 65%일 경우는 +7.75, WR 80%일 경우는 -1.90으로 나타났으며, 90분 경시 후의 슬럼프 플로 변화를 추세선의 기울기로 비교하면 WR 50%일 경우는 -8.15, WR 65%일 경우는 -7.30, WR 80%일 경우는 -6.45로 WR 비율이 증가함에 따른 HB 비율이 경시변화에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다. 또한 HB 비율이 증가함에 따라 WR 50% 및 WR 65%의 최초 슬럼프 플로는 증가하였으나(151mm→190mm, 188mm→212mm) WR 80%의 초기 슬럼프 플로는 약간 감소하는 경향을 나타냈으며(223mm→217mm), 90분 경시 후의 슬럼프 플로는 전부 감소하는 경향을 나타냈는데(232mm→207mm, 229mm→210mm, 229mm→209mm), 이는 상대적으로 RT 비율의 감소로 슬럼프 플로 유지력이 감소했기 때문으로 판단된다.

슬럼프 플로를 고정하여 시멘트 페이스트의 최초 슬럼프 플로를 220±10mm 수준으로 적용한 경우, WR 비율이 50%에서 80%로 증가함에 따라 최초 슬럼프 플로는 유사하였으나(평균 224~228mm) 90분 후의 경시변화율은 감소하는 경향(-12.7%→-0.7%)을 나타내었다. WR 비율이 증가함에 따른 단위수량의 감소가 시멘트 페이스트의 경시변화에 영향을 주었기 때문으로 판단된다. WR 비율별로 HB 비율에 따른 최초 슬럼프 플로 변화를 추세선의 기울기로 비교하면 WR 50%일 경우는 +1.50, WR 65%일 경우는 +1.10, WR 80%일 경우는 +0.60으로 약간 증가하는 경향을 나타냈으며, 90분 경시 후의 슬럼프 플로 변화를 추세선의 기울기로 비교하면 WR 50%일 경우는 -10.95, WR 65%일 경우는 -9.15, WR 80%일 경우는 -7.40으로 WR 비율이 증가함에 따른 HB의 상대적인 비율 감소로 경시변화에 약간 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 HB 비율이 증가함에 따라 WR 비율별로 최초 슬럼프 플로는 약간 감소하는 경향을 나타냈으며(211mm→223mm, 225mm→212mm, 221mm→221mm), 90분 경시 후의 슬럼프 플로는 전부 감소하는 경향을 나타냈는데(269mm→237mm, 251mm→225mm, 239mm→180mm), 이는 동일한 단위수량을 적용한 경우와 마찬가지로 RT 비율의 상대적인 감소로 슬럼프 플로 유지력이 감소했기 때문으로 판단된다.

Table 4. Shear rate and shear stress of PCE

Shear rate(s ⁻¹)		0.125	0.25	0.625	1.25	2.5	5.0	12.5	25.0	
Shear stress (Pa)	A1	Initial	20	30	45	65	105	155	275	405
		90min	0	5	10	20	35	65	145	265
	A2	Initial	10	30	45	65	100	155	280	415
		90min	5	5	15	25	50	80	165	285
	A3	Initial	10	20	40	60	95	150	270	410
		90min	0	10	20	35	60	95	195	315
	A4	Initial	15	25	45	65	100	170	265	395
		90min	10	20	35	45	70	105	200	320
	B1	Initial	15	25	40	65	105	160	300	455
		90min	10	15	30	45	75	115	205	325
	B2	Initial	15	25	40	65	105	155	285	430
		90min	10	15	30	45	75	120	215	345
	B3	Initial	20	35	55	80	125	160	310	465
		90min	15	25	45	55	90	140	255	420
	B4	Initial	10	25	45	70	110	175	315	475
		90min	5	20	40	55	95	145	270	420
	C1	Initial	5	15	35	55	90	140	265	415
		90min	5	15	35	50	85	135	265	420
	C2	Initial	5	25	45	70	110	155	325	475
		90min	10	25	45	60	95	145	305	465
C3	Initial	5	25	45	70	110	155	305	475	
	90min	15	30	50	75	115	170	310	460	
C4	Initial	10	25	50	75	115	175	320	490	
	90min	25	35	55	80	120	170	310	465	

4.2 컨시스턴시 곡선

컨시스턴시 곡선(consistency curve)은 회전형점도계를 이용하여 측정하며 전단변형속도(shear rate)에 따른 전단응력(shear stress)으로 나타낼 수 있다. Table 4는 전단변형속도에 따른 전단응력의 결과값을 나타낸 것이며, Fig. 9 및 Fig 10은 출발원료의 세부조합에 대한 시멘트 페이스트의 컨시스턴시 곡선을 나타낸 것이다.

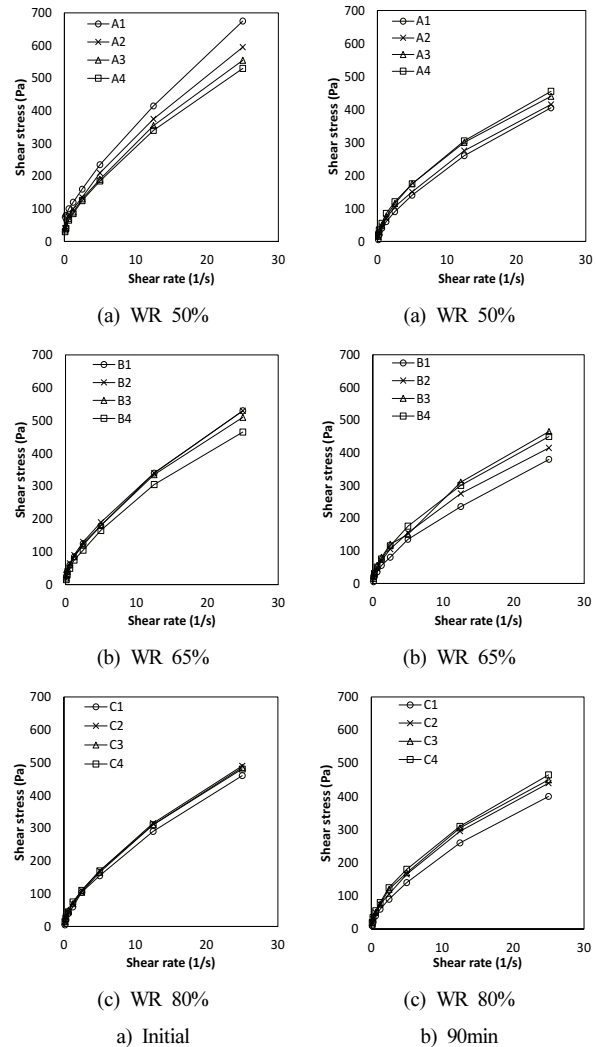


Fig. 9. Consistency curve of cement paste with PCE(Fixed unit-water)

단위수량을 고정한 경우, 최초에는 WR 50%가 전반적으로 높은 전단응력을 나타냈으며, WR 비율이 증가할수록 전단응력이 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 WR 비율이 증가함에 따라 HB 및 RT의 비율이 전단응력에 미치는 영향은 반대의 경향을 나타내었다. 90분 후는 WR 비율에 따라 전단응력의 차이가 크지 않았으나,

WR 비율에 상관없이 HB 및 RT의 비율에 따른 유사한 전단응력의 경향성을 나타내었다.

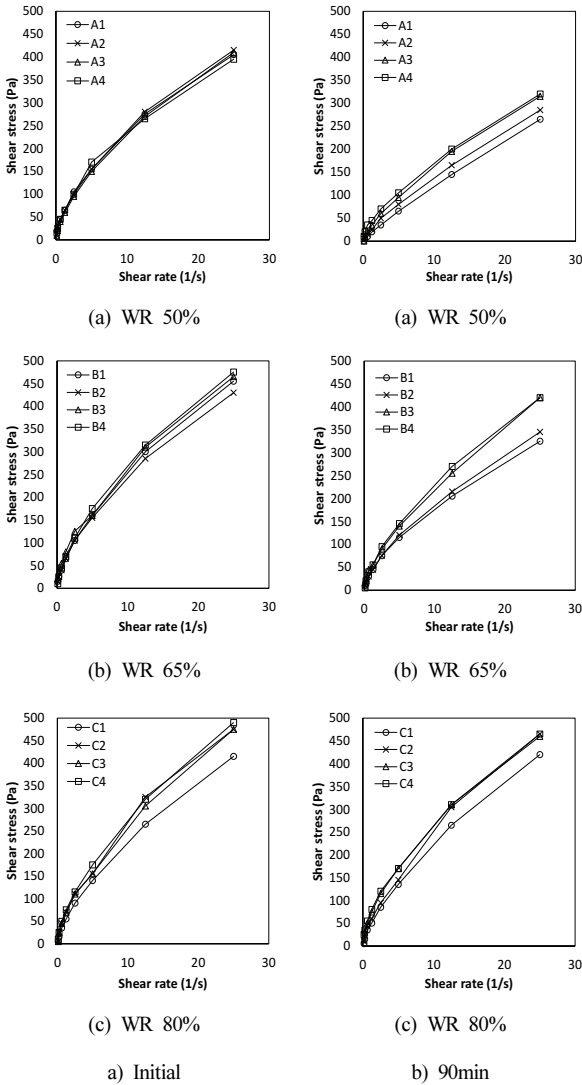


Fig. 10. Consistency curve of cement paste with PCE(Fixed slump flow)

투입되는 단위수량에 변화를 주어 시멘트 페이스트의 최초 슬럼프 플로를 $220 \pm 10\text{mm}$ 수준으로 적용한 경우, 최초에는 WR 80%가 전반적으로 높은 전단응력을 나타냈으며, WR 비율이 증가할수록 전단응력이 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 WR 비율이 증가함에 따른 HB 및 RT의 비율은 전단응력에 뚜렷한 영향을 미치지 않았다. 90분 후도 최초와 유사하게 WR 80%가 전반적으로 높은 전단응력을 나타냈으며, WR 비율이 증가할수록 전단응력이 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 WR 비율에 상관없이 HB 및 RT의 비율에 따른 유사한 전단응력의 경향성을 나타내었다.

4.3 레올로지 정수

MPEG계 Polycarboxylate Ether 출발원료의 세부조합에 따른 컨시스턴시 곡선을 빙행 모델로 가정하여 소성점도 및 항복응력을 도출하였다.

4.3.1 소성점도

출발원료의 세부조합에 따른 소성점도는 Fig. 11에 나타내었다. 시멘트 페이스트의 단위수량을 동일하게 적용한 경우, WR 비율이 50%에서 80%로 증가함에 따라 최초 소성점도는 감소하는 경향을 나타냈으나, 90분 후는 큰 차이가 없었다. 동일한 WR 비율 범위에서 HB 비율이 증가할수록(RT 비율이 감소할수록) 최초 소성점도는 감소(WR 50%, WR 65%) 또는 약간 증가(WR 80%)하는

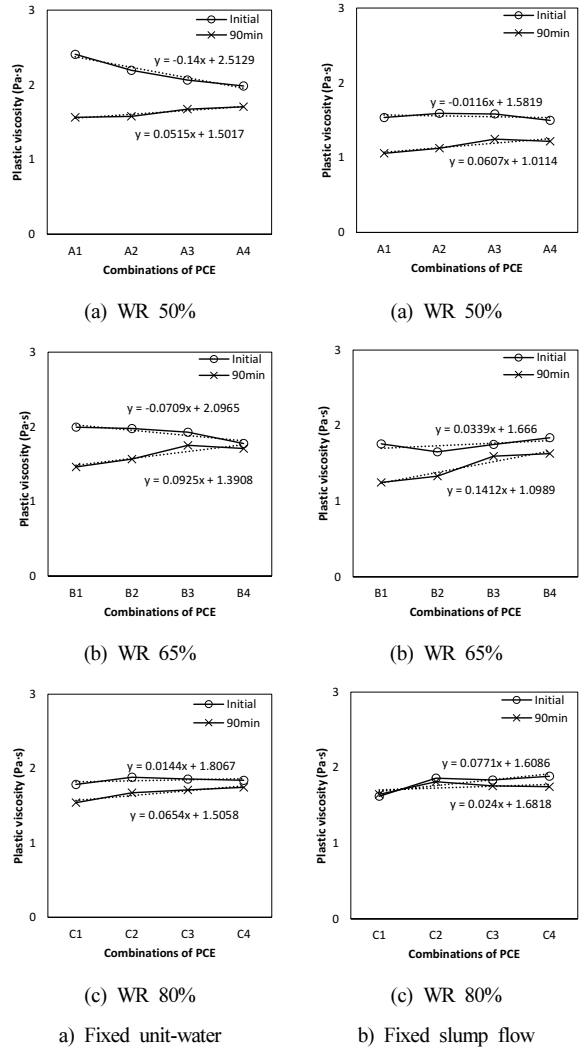


Fig. 11. Plastic viscosity of cement paste with PCE

경향을 나타냈으나, 90분 경시 후는 전반적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 최초 소성점도 변화를 추세선의 기울기로 비교하면 WR 50% -0.140, WR 65% -0.071, WR 80% +0.014로 WR 비율이 증가할수록 기울기는 증가하는 경향을 나타내었다. 90분 경시 후는 WR 50% +0.051, WR 65% +0.092, WR 80% +0.065로 WR 비율이 증가할수록 기울기는 약간 증가하는 경향을 나타내었다.

투입되는 단위수량에 변화를 주어 시멘트 페이스트의 최초 슬럼프 플로를 220±10mm 수준으로 적용한 경우, WR 비율이 50%에서 80%로 증가함에 따라 최초 및 90분 후의 소성점도는 증가하는 경향을 나타내었다. 동일한 WR 비율 범위에서 HB 비율이 증가할수록(RT 비율이 감소할수록) 최초 소성점도는 약간 감소(WR 50%) 또는 증가(WR 65%, WR 80%)하는 경향을 나타냈으나, 90분 경시 후는 전반적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 최초 소성점도 변화를 추세선의 기울기로 비교하면 WR 50% -0.011, WR 65% +0.033, WR 80% +0.077로 증가하는 경향을 나타냈으며, 90분 경시 후는 WR 50% +0.060, WR 65% +0.141, WR 80% +0.024로 WR 65%의 경우가 HB와 RT 비율의 영향을 가장 많이 받은 것으로 나타났다.

4.3.2 항복응력

출발원료의 세부조합에 따른 항복응력은 Fig.12에 나타내었다.

시멘트 페이스트의 단위수량을 동일하게 적용한 경우, WR 비율이 50%에서 80%로 증가함에 따라 최초 항복응력은 감소하는 경향을 나타냈으나, 90분 후는 큰 차이가 없었다. 동일한 WR 비율 범위에서 HB 비율이 증가할수록(RT 비율이 감소할수록) 최초 항복응력은 감소(WR 50%, WR 65%) 또는 약간 증가(WR 80%)하는 경향을 나타냈으나, 90분 경시 후는 전반적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 최초 항복응력 변화를 추세선의 기울기로 비교하면 WR 50% -1.042, WR 65% -0.319, WR 80% +0.252로 WR 비율이 증가할수록 기울기는 증가하는 경향을 나타내었다. 90분 경시 후는 WR 50% +0.683, WR 65% +0.604, WR 80% +0.601로 WR 비율에 따른 기울기의 표준편차가 0.046으로 매우 작았다.

투입되는 단위수량에 변화를 주어 시멘트 페이스트의 최초 슬럼프 플로를 220±10mm 수준으로 적용한 경우, WR 비율이 50%에서 80%로 증가함에 따라 최초 항복응력은 큰 차이를 나타내지 않았으나, 90분 후는 증가하는 경향을 나타내었다. 동일한 WR 비율 범위에서 HB 비율이 증가할수록(RT 비율이 감소할수록) 최초 소성점도는 약간 감소(WR 50%) 또는 약간 증가(WR 65%, WR 80%)하는 경향을 나타냈으나, 90분 경시 후는 전반적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 최초 항복응력 변화를 추세선의 기울

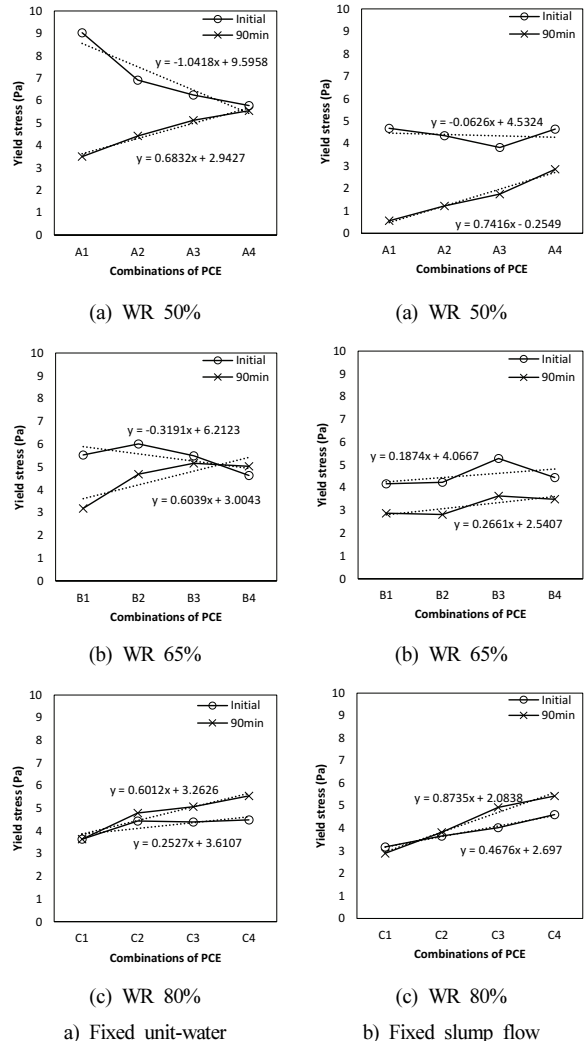


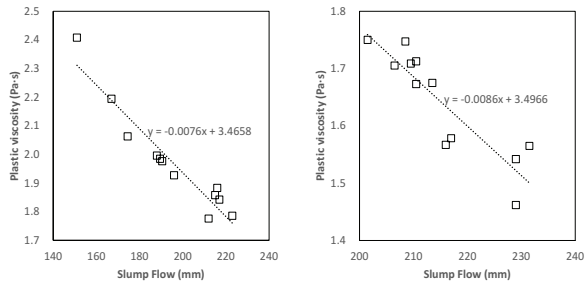
Fig. 12. Yield stress of cement paste with PCE

기로 비교하면 WR 50% -0.063, WR 65% +0.187, WR 80% +0.468로 나타났으며, 90분 경시 후는 WR 50% +0.742, WR 65% +0.266, WR 80% +0.873으로 WR 비율에 따라 증가하는 경향을 나타내지는 않았다.

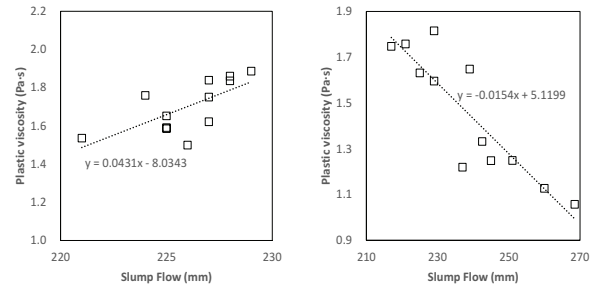
전반적으로 WR, HB 및 RT의 조합과 상관없이 소성점도가 증가하면 항복응력도 증가하고, 소성점도가 감소하면 항복응력도 감소하는 반비례관계를 나타내었다.

4.4 슬럼프 플로와 레올로지 정수의 상관관계

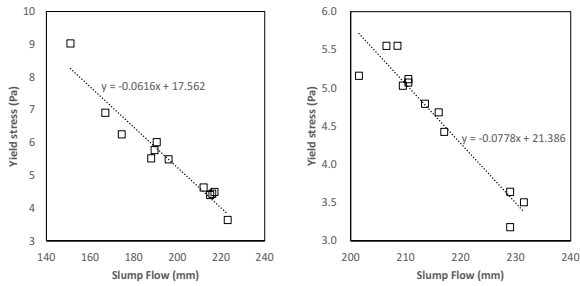
시멘트 페이스트 실험을 통하여 얻은 결과로 슬럼프 플로-소성점도, 슬럼프 플로-항복응력 및 소성점도-항복응력에 대한 상관관계(상관계수)를 분석하였으며 결과는 Fig. 13 및 Fig. 14에 나타내었다. 단위 수량이 고정되었을 경우 시멘트 페이스트의 슬럼프



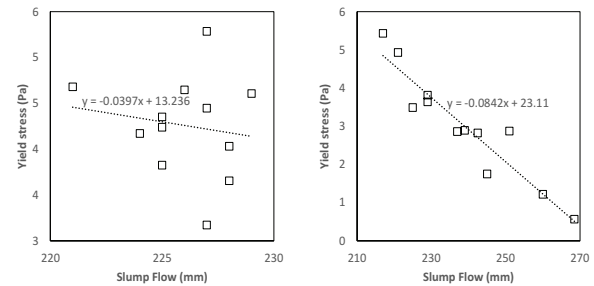
(a) Initial (b) 90min
a) Slump flow - Plastic viscosity



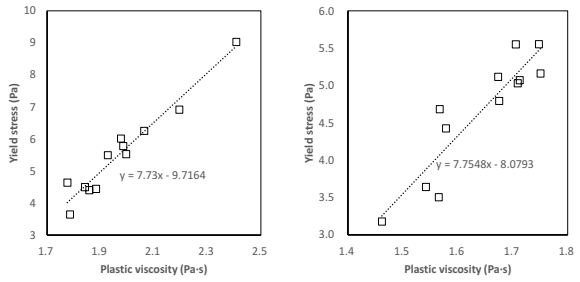
(a) Initial (b) 90min
a) Slump flow - Plastic viscosity



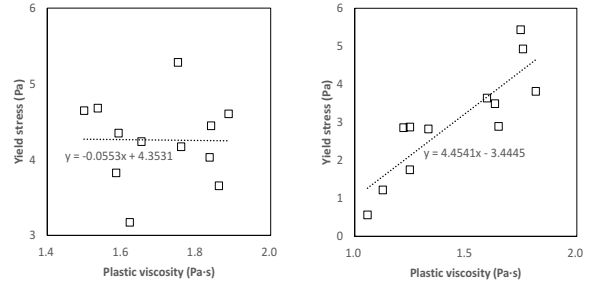
(a) Initial (b) 90min
b) Slump flow - Yield stress



(a) Initial (b) 90min
b) Slump flow - Yield stress



(a) Initial (b) 90min
c) Yield stress - Plastic viscosity



(a) Initial (b) 90min
c) Yield stress - Plastic viscosity

Fig. 13. Correlation analysis with slump flow and rheology (Fixed unit-water)

Fig. 14. Correlation analysis with slump flow and rheology (Fixed slump flow)

플로가 증가함에 따라 전반적으로 소성점도 및 항복응력은 감소하는 반비례 경향의 매우 높은 음의 상관관계(최초 상관계수 -0.955, -0.967 / 90분 후 상관계수 -0.895, -0.911)를 나타내었다. 또한 소성점도와 항복응력과의 관계를 보면, 소성점도가 증가하면 항복응력도 증가하고 소성점도가 감소하면 항복응력도 감소하는 매우 높은 양의 상관관계(최초 상관계수 +0.971 / 90분 후 상관계수 +0.948)를 나타내었다.

슬럼프 고정의 경우 최초에는 특별한 상관관계를 나타내지 않았으나 90분 후는 시멘트와 PCE가 반응하여 단위수량이 고정되

었을 경우와 유사하게 슬럼프 플로, 소성점도 및 항복응력의 상관관계(상관계수 -0.886, -0.941, +0.864)가 높게 나타났다.

5. 결론

보통강도 고유동 콘크리트에 사용하기 위한 목적으로 MPEG계 polycarboxylate ether 출발원료를 세부조합으로 설정하여 PC계 고성능 감수제를 제조하였으며, 시멘트 페이스트에 적용하여 이에 대한 레올로지 특성을 평가한 결과는 다음과 같다.

1. 슬럼프 플로는 단위수량 고정인 경우 WROI 증가할수록 최초 값이 크게 증가하였는데 이는 WROI 증가할수록 감수능력이 증가하기 때문에 판단되며 WR 비율이 증가함에 따른 HB 비율이 경시변화에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다. 슬럼프 고정인 경우 최초 값은 비슷했지만 90분 경시후의 값은 모두 감소하는 경향이 나타났다.
2. 전단응력은 단위수량 고정인 경우 WR 50%가 전반적으로 높은 값을 나타냈으며, WR 비율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 슬럼프 고정인 경우 WR비율이 증가할수록 증가하는 경향이 나타났다.
3. 소성점도 및 항복응력은 단위수량 고정인 경우, WR 비율이 증가함에 따라 최초 값은 감소하는 경향을 나타냈으나, 90분 후는 큰 차이가 없었다. 슬럼프 고정인 경우 WR 비율이 증가함에 따라 소성점도는 최초 및 90분 후의 값은 증가하는 경향을 나타냈으며, 항복응력의 경우 최초 값은 감소하는 경향을 나타냈으나 90분 후는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.
4. 슬럼프 플로와 소성점도, 슬럼프 플로와 항복응력 간의 상관성을 분석한 결과 서로 매우 높은 상관관계를 나타내었다.
5. PCE의 초기 슬럼프 플로와 감수력 및 유지성능 등 종합적인 결과를 보면 C2 조합(WR 80%, HB 6.5% RT 13.5%)을 적용한 경우, 초기에 높은 유동성 및 경시 후 낮은 경시변화에 따른 유지성능이 가장 우수하게 나타났으며, 경시변화와 상관없이 상대적으로 높은 소성점도와 낮은 항복응력을 확보할 수 있어 보통강도 고유동 콘크리트에 가장 적합한 PCE로 판단된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2020년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No.2015R1A 5A1037548) 임을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

References

Choi, S.W., Jo, H.T., Ryu, D.H., Kim, G.Y. (2012). An experimental study on the influence of the qualities of ordinary portland cement on the flow ability of high flow concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **24(1)**, 37–44 [in Korean].

Jeong, J.G. (2011). A Study on the Development and Application of Normal Strength–High Fluidity Concrete using Powdered Mixing System, Master’s Thesis, Semyung University.

Han, S.D., Kwon, J.H., Choi, S.K., Lim, B.H., Yoon, J.H. (1997). An experimental study on the manufacturing and application of high–workable and normal–strength concrete, Journal of the Architectural Institute of Korea, **17(1)**, 699–701 [in Korean].

Lee, K.S. (2010). Effects of Mixing Parameters on the Flowing Behavior in High Flowing Concrete, Master’s Thesis, Kyungpook National University.

Lee, P.S., Kwon, K.J., Kim, S.M. (2004). The comparative experimental study of short and long–term behavior of the blended high–fluidity cement concrete and existing nuclear power plant structural concrete, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **8(4)**, 195–202 [in Korean].

Machoka, C.S. (1993). Report of superfluid concrete research committee(I), Japan Concrete Institute, **31(3)**, 79–82 [in Japanese].

Okamura, H. (1986). Expectations for New Concrete Materials, Cement Concrete, 475 [in Japanese].

Ozawa, K., Maekawa, K., Okamura, H. (1992). Development of the high performance concrete, Journal of the Faculty of Engineering, Tokyo University, Series B, **41(3)**, 381–439.

Rols, S., Ambroise, J., Péra, J. (1999). Effects of different viscosity agents on the properties of self–leveling concrete, Cement and Concrete Research, **29(2)**, 261–266.

Seo, I. (2010). Study on the Evaluation of Pumpability and Fluidity of Concrete using Rheological Parameters, Master’s Thesis, Hanyang University.

Shadkama, H.R., Dadsetan, S., Tadayon, M., Sanchez, L.F.M., Zakeria, J.A. (2017). An investigation of the effects of limestone powder and viscosity modifying agent in durability related parameters of self–consolidating concrete(SCC), Construction and Building Materials, **156(15)**, 152–160.

Shin, H.C., Park, Y.S., Cho, S.H., Choi, H.Y., Kim, G.Y., Kim, M.H. (1997). A study on the evaluation method of fluidity of high flowing concrete, Journal of the Architectural Institute of Korea Conference, **17(1)**, 707–709 [in Korean].

Wallevik, O., Wallevik, J. (2011). Rheology as a tool in concrete science: the use of rheographs and workability boxes, Cement and Concrete Research, **41(12)** 1279–1288.

Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., Matushisa, M. (2000). Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate–type superplasticizer, Cement and Concrete

보통강도 고유동 콘크리트용 PC계 고성능 감수제를 사용한 시멘트 페이스트의 레올로지 특성 평가

기존 고유동 콘크리트는 소요의 유동성과 작업성 확보를 위해 대부분 단위시멘트량이 높은 고강도 콘크리트 영역으로써, 현재 사용되고 있는 대부분의 콘크리트 구조물이 보통강도(18~35MPa) 수준임을 감안한다면 현실적인 사용범위확대 및 실용성에 한계가 있었다. 고유동 콘크리트의 사용범위를 확대하기 위해 보통강도 수준에서도 유동성과 점성을 발휘할 수 있고 일반건축물 뿐만 아니라 특수건축물에서도 사용가능하며, 타설시간과 인건비를 대폭 감축할 수 있는 보통강도 고유동 콘크리트의 개발이 필요한 실정이다. 보통강도 고유동 콘크리트의 개발은 유동성 및 점성을 발휘하여 자기 충전성을 확보함으로써 다짐작업 최소화 에 따른 인건비 감축, 공사비 절감, 공기 단축 등의 시공효율성 뿐만 아니라 공사품질을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 출발원료(WR, HB, RT)의 조합별로 PCE를 제조하고 링플로콘과 회전형 점도계를 사용하여 시멘트 페이스트의 레올로지 특성을 분석하였다. 실험결과 WR 80%, HB 6.5% RT 13.5%를 조합한 PCE를 적용할 경우, 결합재량이 낮은 보통강도 고유동 콘크리트에서 소성점도를 확보하면서 항복응력은 최소화시킬 수 있으며 동시에 높은 분산효과로 인한 고유동성의 확보가능성을 확인할 수 있었다.