

고로슬래그미분말의 치환율 변화에 따른 굳지않은 모르타르의 레올로지 특성 검토

Effect of Blast Furnace Slag on Rheological Properties of Fresh Mortar

임 지 희

이 건 철*

Lim, Ji-Hee

Lee, Gun-Cheol*

*Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation,
Deasowonmyun Daehakro 50, Chungju, 380-702, Korea*

Abstract

Partial replacement of cement with blast furnace slag has many advantages such as the reduction of construction fee, the decrease of hydration heat and the increase of long-term strength. Hence, slag is widely used in practice. This study investigates the effect of slag on the rheological properties of cement paste and mortar. Three different types of slag (BS1, BS2 and BS3) with five different contents (0, 20, 40, 60 and 80 wt.%) were used to replace the cement. Each type of slag has different fineness. Water to binder ratio was 0.5. Test results showed that the partial replacement of BS1 and BS2 decreased flow and increased O-lot flow time, whereas that of BS3 caused an opposite effect, i.e., increased flow and decreased O-lot flow time. It was found that there was a good correlation between the values of yield stress and flow.

Keywords : blast furnace slag powder, replacement ratio, cement mortar, rheology

1. 서 론

최근 고유동, 고강도 콘크리트 등 고성능 콘크리트의 사용이 점차 증가함에 따라 콘크리트의 성능개선을 목적으로 고로슬래그미분말, 플라이애쉬, 실리카흄 등 다양한 혼화제가 사용되고 있다. 특히, 고로슬래그미분말은 원가절감, 수화열절감, 장기강도 증진, 화학저항성 등 우수한 품질을 얻을 수 있으며 일반시멘트에 비해 가격이 저렴하여 향후 그 수요가 더욱 증가할 것으로 예상된다. 무엇보다도 슬래그를 포함한 콘크리트는 슬래그와 시멘트수화물의 2차 반응에

의해 공극구조가 더욱 치밀해지고 수밀성이 크게 증가하므로써 염화물을 비롯한 각종 유해물질의 침투에 대한 저항성이 증가하게 된다[1]. 그러다 보니 지금까지 고로슬래그미분말을 이용한 콘크리트의 연구는 대부분 내구특성 및 역학적 특성을 검증하기 위한 연구가 주로 진행되어져 왔다 [2,3]. 한편, Cho et al.[4] 및 Kim et al.[5]의 고로슬래그미분말을 이용한 콘크리트의 유동성에 관한 연구에서는 고로슬래그미분말의 치환율이 증가할수록 유동성이 증대되는 경향을 확인하였다.

그러나, 이러한 연구결과는 슬럼프 플로 등 기존의 시험 방법을 이용한 공학량의 측정결과로서 정량적 평가의 어려움이 있다. 반면 고성능 콘크리트와 같은 유동성이 비교적 큰 콘크리트의 경우 높은 유동성과 동시에 양호한 분리저항성이 요구되며 보통 콘크리트에 비해 유동성상이 매우 복잡하기 때문에 유동성에 대한 정량적인 평가의 필요성이 지속

Received : June 5, 2014

Revision received : June 13, 2014

Accepted : June 26, 2014

* Corresponding author : Lee, Gun-Cheol

[Tel: 82-43-841-5207, E-mail: glee@ut.ac.kr]

©2014 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

적으로 요구되어져 왔다[6,7]. 이와 관련하여 Mori et al.[6] 및 Tattersall et al.[7]는 굳지않은 콘크리트의 유동성상을 물리량의 수치로 나타내는 방안에 대한 필요성이 꾸준히 제기되어져 왔으며, Lee et al.[8]은 이러한 문제점을 해결하기 위해 굳지않은 콘크리트의 유동성상을 레올로지적 입장에서 검토·정량화 하고자 하는 연구를 진행하였다. 그러나, 굳지않은 콘크리트의 레올로지적 연구는 고성능 콘크리트의 배합을 중심한 연구결과들이 다수 보고되고 있으나, 고로슬래그미분말의 분말도 크기, 치환율 변화 등이 시멘트 페이스트의 유동성에 미치는 영향에 대한 정량적 연구는 아직 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 고로슬래그미분말의 치환율 및 분말도가 시멘트 페이스트 및 모르타르의 레올로지 성질에 어떠한 영향을 미치는 검토하였으며, 기존의 유동성 평가방법과 유동성 비교를 통해 고로슬래그미분말을 사용하는 콘크리트의 유동성 파악에 있어 하나의 참고자료로 제시하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다. 즉, 실험요인으로 시리즈 I에서는 시멘트 페이스트 유동특성으로 물결합재비(W/B)는 50%의 수준으로 하였고, 고로슬래그미분말의 분말도 종류로는 블레인값이 4 000, 6 000, 9 000 cm^2/g 범위의 3종류를 대상으로 하였으며, 고로슬래그미분말의 치환율은 시멘트 질량대비 0, 20, 40, 60, 80%의 5수준에 대하여 검토하였다.

시리즈 II에서는 모르타르의 유동특성으로 시리즈 I과 같이 W/B 50%수준으로 잔골재를 시멘트 질량의 2배 혼입하는 배합으로 시험을 실시하였으며, 고로슬래그미분말의 분말도 및 치환율은 시리즈 I과 동일한 조건으로 하였다. 실험사항으로는 1/2 슬럼프 플로, 유하시간 및 레올로지 정수의 측정을 실시하였다. 단, 본 실험에서 W/B의 설정범위는 혼화제를 혼입하지 않은 고로슬래그미분말의 영향을 중심으로 검토하기 위하여 일반적인 고성능콘크리트의 W/B보다 다소 큰 범위로 설정하였다.

Table 1. Design of experiment

Experiment factor		Experiment level	
Series I (Cement Paste)	W/B (%)	1	50
	BS type	3	BS1, BS2, BS3
	BS/C (%)	5	0, 20, 40, 60, 80
Series II (Mortar)	W/B (%)	1	50
	BS type	3	BS1, BS2, BS3
	BS/C (%)	5	0, 20, 40, 60, 80
	C : S	2	1 : 2
Test conducted			- 1/2 Slump flow test
			- O-lot flow test
			- Rheometer test

2.2 사용재료

본 연구에서 사용된 재료의 물리·화학적 성질은 Table 3~5와 같다. 즉 시멘트는 KS L 5201의 규정에 준하여 생산된 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 고로슬래그미분말은 KS F 2563에서 정하고 있는 고로슬래그미분말을 사용하였다. 또한, 잔골재는 충북 충주 일원의 강모래를 사용하였다.

Table 2. Mix proportions

Specimen	W/B (%)	Replacement ratio(%)	Unit Weight(kg/m^3)			
			W	C	BS	S
Cement Paste	50	0	170	204	125	0
		20	170	302	68	0
		40	170	226	136	0
		60	170	151	205	0
		80	170	75	273	0
Mortar	50	0	170	204	125	680
		20	170	302	68	669
		40	170	226	136	658
		60	170	151	205	607
		80	170	75	273	636

Table 3. Chemical composition and physical properties of cement

Density (g/cm^3)	Fineness (cm^2/g)	auto clave (%)	Setting time(min)		Compressive strength(MPa)		
			Initial set	Final set	3days	7days	28days
3.15	3 483	0.15	208	351	12.8	22.7	42.8

Table 4. Chemical composition and physical properties of blast furnace slag

Specimen	BS1	BS2	BS3	
Density(g/cm^3)	2.84	2.85	2.85	
Fineness(cm^2/g)	9 450	6 760	4 190	
Flow value ratio(%)	80	89	96	
Chemical composition	MgO	3.5	3.5	3.5
	SO ₃	0.79	0.94	1.02
	lg-loss	1.68	1.09	0.66
	Cl ⁻	0.010	0.010	0.010

Table 5. Chemical composition and physical properties of aggregate

Density (g/cm ³)	absorption ratio (%)	Fineness modulus	Unit Weight (kg/m ³)
2.5	0.9	3.2	1 650

2.3 실험방법

본 연구의 시멘트 페이스트의 실험항목별 방법은 Figure 1과 같다. 즉, 시멘트 페이스트의 혼합은 KS L 5109에 규정된 모르타르의 믹서를 이용하여 실시하였다. 또한, 유동성 평가방법으로 1/2 슬럼프 플로시험은 KS F 2476의 시험방법에 의거하여 퍼짐량을 측정하였으며, O-lot 플로 시간은 KS F 2432 방법에 의거하여 100 ml마다 플로 시간을 측정하였다. 레올로지정수의 측정은 Brookfield사의 R/S Solids 타입의 레오미터를 사용하였고, 스피너들은 가로×세로 30×60 mm의 베인스핀들을 사용하였으며, 레올로지 정수를 측정하기 위한 전단변형 속도는 0.1~10/s 범위로 설정하였다.

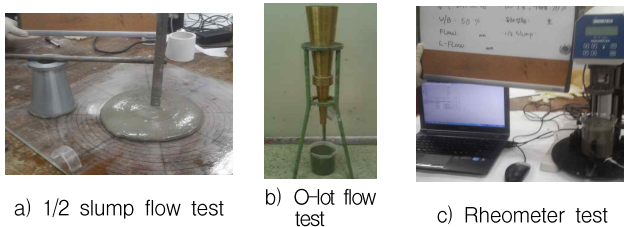


Figure 1. Photo of experimental tests

3. 실험결과 및 분석

3.1 플로 특성

Figure 2는 고로슬래그미분말 치환율에 따른 시멘트 페이스트 및 모르타르의 1/2슬럼프 플로를 나타낸 것이다. 시멘트페이스트의 경우 BS1(9 450cm³/g)은 치환율이 증가할수록 플로는 점점 감소하는 것으로 나타났으며 치환율이 20%이상에서는 더욱 현저한 감소를 나타내었고, BS2(6 760cm³/g) 치환율의 증가에 따라 증가, 감소를 반복하며 전반적으로는 유사한 경향을 나타내었다. 반면, BS3(4 190cm³/g)는 BS1, BS2와는 다르게 치환율의 증가에 따라 플로그가 점점 증가하는 경향을 나타내었으며, 치환율 20% 이상에서는 급격한 유동성 증가 경향을 나타내고 있다. 기존의 문헌

[9]에서는 고로슬래그미분말의 치환율이 증가할수록 유동성이 증가하는 것으로 알려져 있으며, BS3의 경우 기존의 문헌[5] 및 연구결과와 동일한 경향을 나타내었다. 이는 슬래그 입자 표면의 산화피막에 의한 코팅효과로 미분말이 물을 구속하지 못하는 효과 즉, 응집력 저하에 의한 결과로 판단된다. 그러나, 분말도가 극단적으로 증가하면 비표면적의 증가로 단입자의 흡착에 필요한 수량의 감소로 유동성이 현저히 감소하는 것으로 사료된다.

모르타르의 플로특성은 BS1, BS2의 경우 치환율 증가에 따라 감소하였으며, BS3의 경우 페이스트 상태와 달리 치환율의 증가에 따라 동등 또는 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 잔골재 혼입에 의한 영향으로써 고체입자 포함에 따른 마찰력에 의한 것으로 분석되며, 모르타르의 유동성은 고로슬래그미분말의 영향보다는 잔골재의 입도, 입형 또는 체적 등의 영향이 더욱 지배적 일 수 있음을 시사하고 있다.

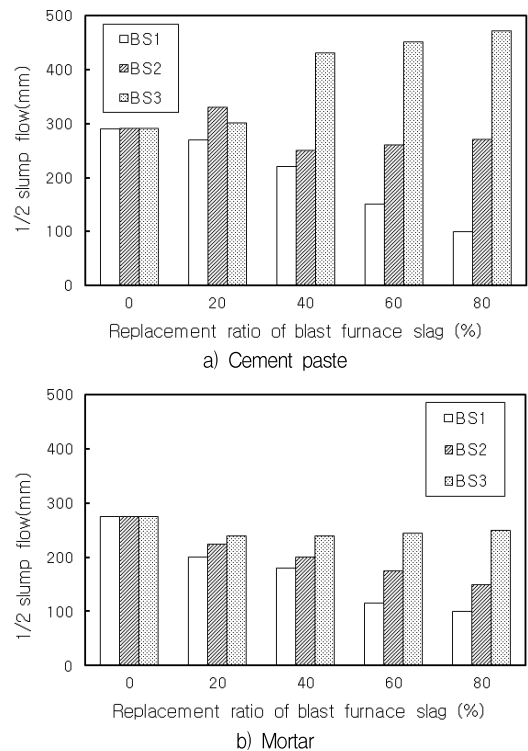


Figure 2. 1/2 slump flow according to the replacement ratio of blast furnace slag

3.2 O-lot 플로 시간

Figure 3, 4는 고로슬래그미분말 치환율에 따른 시멘트 페이스트 및 모르타르의 O-lot 플로 시간을 나타낸 것으로 시료 100ml당 플로 시간으로 나타낸 것이다. 시멘트 페이스

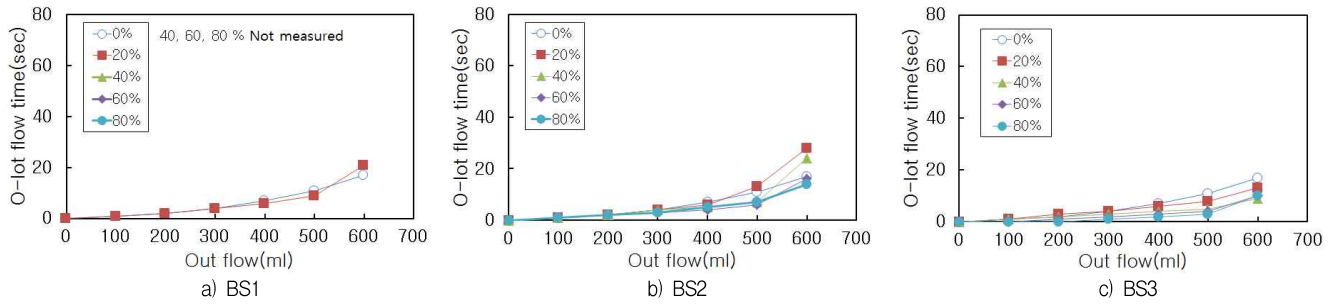


Figure 3. O-lot flow time of cement paste with blast furnace slag

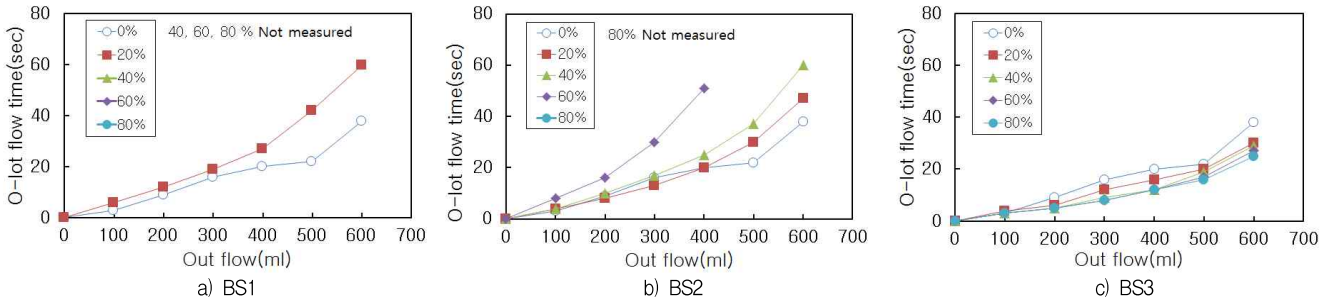


Figure 4. O-lot flow time of mortar with blast furnace slag

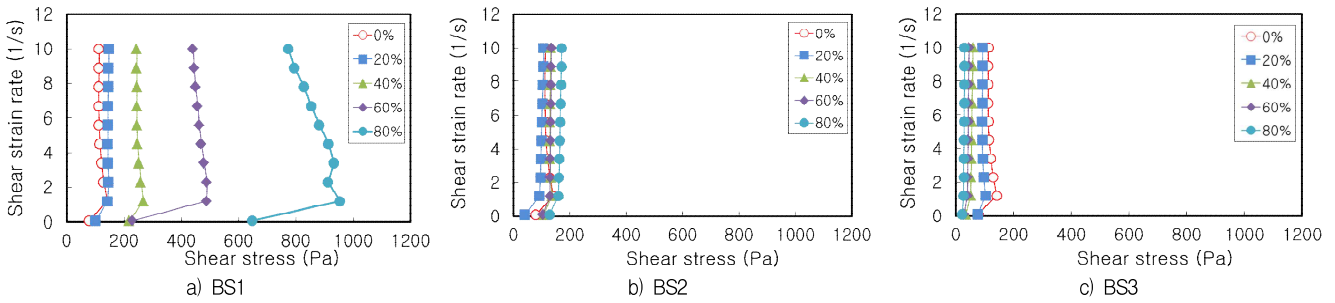


Figure 5. Consistency curve of cement paste with blast furnace slag

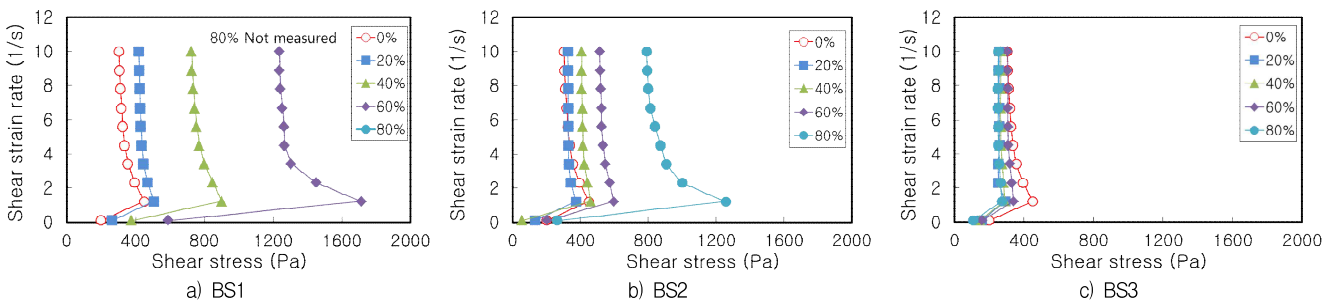


Figure 6. Consistency curve of mortar according to the replacement ratio of blast furnace slag

트는 전반적으로 분말도가 작을수록 O-lot 플로 시간은 짧아지는 것으로 나타났다. BS1의 경우 치환율 40, 60, 80%에서는 유출구의 막힘현상으로 측정이 불가능 하였으며, BS1 및 BS2는 치환율이 증가할수록 O-lot 플로 시간이

증가하는 것으로 나타났다. 반면 BS3의 경우 치환율이 증가할수록 O-lot 플로 시간이 빨라지는 것으로 나타났다. 이는 앞서에서와 같이 BS1 및 BS2는 치환율이 증가할수록 미세 고로슬래그미분말 입자의 증가로 인해 입자간 공극이 작아

저 입자간의 결합력이 증대로 점성이 증가하였기 때문이라 사료된다. 반면 BS3은 고로슬래그미분말의 매끄러운 표면 상태에 의해 입자간의 응집력의 감소와 BS3의 작은 분말도에 의해 치환율이 증가할수록 상대적인 비표면적의 감소에 의해 점성이 감소하였기 때문으로 사료된다. 모르타르의 경우 모든 O-lot 플로 시간이 시멘트 페이스트에 비해 모르타르의 잔골재의 혼입에 따라 유하시간이 현저히 증가 하는 것을 알 수 있다. 이는 앞서와 같이 잔골재 혼입에 의해 입자간의 내부마찰력의 증가에 따른 점성의 증가에 의한 것으로 사료된다.

3.3 컨시스턴시 곡선

Figure 5, 6의 컨시스턴시 곡선은 레오미터 점도계를 이용하여 측정하며 전단속도에 따른 전단응력으로 표시된다. Figure 5는 고로슬래그미분말 치환율에 따른 시멘트 페이스트의 컨시스턴시 곡선을 Figure 6은 모르타르의 컨시스턴시 곡선을 나타낸 것으로 (a)는 BS1을 (b)는 BS2를, (c)는 BS3의 컨시스턴시 곡선을 각각 나타낸 것이다.

전반적으로 BS1, BS2의 경우 치환율이 증가할수록 전단 속도에 따른 전단응력이 증가하는 경향을 보이고 있으며 BS2는 BS1에 비해 상대적으로 미비한 것으로 나타났다. 시멘트 페이스트와 모르타르 모두 BS1에서 치환율 80%일 때 측정이 불가능 하였고 치환율 60%일때 전단응력의 역구배 현상이 나타나고 있으며, BS2의 모르타르에서 치환율 80%에서도 이런 현상이 일어나고 있다. 이는 회전점도계를 사용하는 레올로지 시험에서 나타나는 현상으로 고체와 액체가 혼합되어 있는 재료에서 주로 발생되며 고체와 액체가 혼합된 서스펜션 상태의 고체의 밀도가 높은 경우 발생 할 수 있는 것으로 보고되고 있다[8]. 반면 BS3의 경우 치환율이 증가함에 따라 전단응력이 감소하고 플레인에 비해 작을 값을 나타내고 있으며, BS1과 BS2에서 나타났던 전단응력의 역구배 현상도 발생하지 않았다.

이러한 경향으로 볼 때 고로슬래그미분말 종류에 따라 시멘트 페이스트와 모르타르 모두 BS1과 BS2는 치환율 증가할수록 점성의 증대에 의해 전단응력이 증가하며 BS3은 치환율이 증가할수록 점성의 감소로 전단응력이 감소하는 것으로 분석된다.

3.4 레올로지 정수

Figure 7은 시멘트 페이스트의 회전점도계에 의해 얻어

진 데이터를 빙엄모델(Bingham model)로 가정할 경우 얻어지는 레올로지 정수를 고로슬래그미분말의 치환율에 따라 그래프로 나타낸 것으로 Figure (a)는 고로슬래그미분말의 치환율에 따른 항복치를 Figure (b)는 소성점도를 각각 나타낸 것이다.

BS1의 경우 치환율이 증가할수록 항복치가 증가하는 경향을 나타내었으며, 치환율 20% 이상에서는 곡선적인 증가 경향을 나타내고 있다. BS2의 경우 치환율 증가에 따른 변화가 거의 없으며, BS3의 경우 치환율이 증가할수록 미비하게 감소하는 경향을 나타내었다. 소성점도는 BS1의 경우 치환율 60%이상에서 음의 정수를 나타내고 있으나, BS2, BS3은 전체적으로 볼 때 그 값의 변화가 미비한 것으로 나타나, 평균적으로 볼 때 고로슬래그미분말의 치환율 변화에 따른 소성점도의 변화는 미비한 것으로 나타났다.

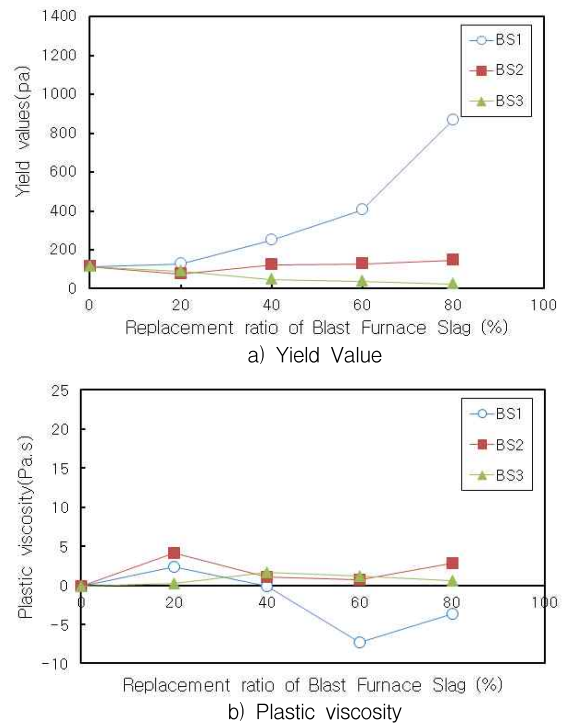


Figure 7. Rheological constants of cement paste

Figure 8은 Figure 7과 동일한 방법으로 모르타르의 레올리 정수를 나타낸 것이다. BS1의 경우 치환율이 증가할수록 항복치가 급격히 증가하는 경향을 나타내었으며, 치환율 80%의 경우 컨시스턴시 곡선의 측정불가로 레올로지 정수의 산정이 불가능하였다. 또한, BS1 및 BS2의 증가경

향은 곡선적인 증가 경향을 보이는 반면, BS3의 경우 치환율이 증가할수록 미비하게 감소하는 경향을 나타내었다. 소성점도의 경우 치환율 증가에 따른 뚜렷한 증가 경향은 보이지 않는 것으로 나타났다. 소성점도의 경우 0~15Pa·s의 범위를 나타내고 있으며 항복치와 달리 2종의 경우 가장 높은 소성점도를 나타내고 있으며 1종 및 2종의 경우 다소 낮은 소성점도를 나타내었다.

고로슬래그미분말의 치환율에 따라 레올로지 정수를 도출해본 결과 고로슬래그미분말의 가정 및 컨시스턴시 곡선의 전단변형속도의 적용범위에 따라 달라질 수 있는 값으로 컨시스턴시 곡선이 역구배의 경향을 나타내는 경우 가정하는 모델의 재검토나 컨시스턴시의 근사범위의 검토 등이 필요한 것으로 사료된다.

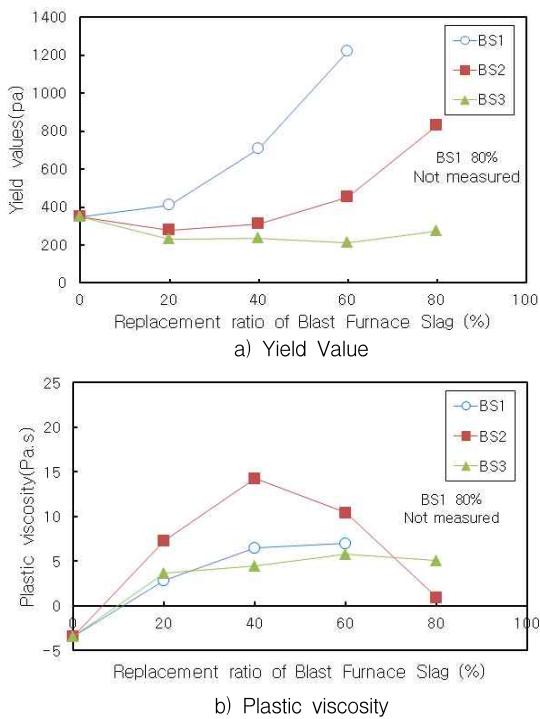


Figure 8. Rheological constants of mortar

4. 결론

본 연구는 기존의 플로시험 장비 및 레올로지 측정 장비를 이용하여 고로슬래그미분말을 치환 사용한 시멘트페이스트 및 모르타르의 레올로지 특성을 고로슬래그미분말의 분말도 종류 및 치환율별로 검토하였는데, 그 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고로슬래그미분말의 분말도 종류 및 치환율 변화에 따른 플로 특성은 시멘트페이스트의 경우 BS1은 치환율이 증가할수록 플로가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 반면, BS3는 슬래그미분말 입자간의 응집력 저하로 BS1, BS2와는 다르게 치환율의 증가에 따라 플로가 점점 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 모르타르의 플로 특성은 고체입자 포함에 따른 입자간 마찰력 증가로 BS1, BS2의 경우 치환율 증가에 따라 감소하였고, BS3의 경우 페이스트 상태와 달리 치환율의 증가에 따라 동등 또는 약간 감소하는 경향을 나타내었다.
- 2) O-lot 플로 시간의 경우 플로시험과 유사한 경향으로 플로가 작은 BS1 및 BS2는 치환율이 증가할수록 플로 시간이 늦어지는 것으로 나타났으며, 비교적 플로가 BS3의 경우 치환율이 증가할수록 유하시간이 빨라지는 것으로 나타났다. 모르타르의 경우 모든 O-lot 플로 시간이 시멘트 페이스트에 비해 잔골재의 혼입에 따른 내부마찰력 증가로 현저히 늦어지는 것으로 나타났다.
- 3) 레올로지 시험에 의한 컨시스턴시 곡선의 경향은 BS1, BS2로 치환한 시멘트페이스트 및 모르타르는 치환율이 증가할수록 전단속도에 따른 전단응력이 증대하였으며, BS3은 치환율이 증가함에 따라 전단응력이 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 시멘트 페이스트의 경우 항복치는 고로슬래그미분말의 치환율이 증가할수록 BS1은 증가하는 경향을 BS2 및 BS3는 유사 또는 미소하게 감소하는 경향을 나타내었다. 한편, 모르타르의 경우는 BS1, BS2 모두 치환율 증가에 따라 항복치가 곡선적인 증가 경향을 나타내었으며, BS3의 경우는 시멘트 페이스트와 유사한 경향으로 약간 감소하는 것으로 나타났다. 고로슬래그미분말의 치환율 증가에 따른 소성점도는 분말도 종류에 관계없이 거의 0 Pa·s 전후의 범위로 나타났고, 모르타르의 경우 시멘트 페이스트보다는 약간 큰 값을 나타내고 있으나 15 Pa·s 이내로 명확한 증가 경향은 나타나지 않았다.

요약

본 연구에서는 고로슬래그미분말의 분말도 종류 및 치환

율이 시멘트 페이스트 및 모르타르에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 그 결과는 다음과 같다. 전반적으로 BS1 및 BS2의 경우 치환율이 증가함에 따라 항복치도 증가하는 경향을 보였다. 반면, BS 3의 경우 치환율이 증가함에 따라 전단응력이 감소하며 항복치도 감소하는 경향을 나타 내었다. 위 실험 결과를 참조하여 고로슬래그미분말을 사용한 현장배합 설계 시 유동성 파악의 기초적 자료로 참고할 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 고로슬래그미분말, 분말도, 치환율, 시멘트 모르타르, 레올로지

References

1. Cement [Things-to-remember for the addition of blast furnace slag powder in concrete]. Seoul(Korea), Korea Cement Association; 2003,161 vol, Korean.
2. Lee SS, Song HY. An experimental study on the durability and mechanical properties of high performance concrete using blast furnace slag powder. Journal of the Architectural Institute of Korea. 2007 Nov;18(1):21-8.
3. Yang WH, Ryu DW, Kim WJ, Park DC, Seo CH. An experimental study on early strength and drying shrinkage of high strength concrete using high volumes of ground granulated blast-furnace slag(GGBS). The Korea Institute of Building Construction, 2013; 13(4):391-9.
4. Cho BS, Nam JS, Lee EB, Back YK, Kim GY, Kim MH. An experimental study on the fluidity and engineering properties of concrete using ground granulated blast furnace slag. Proceedings of the Korea Concrete Institute, 2006;18(1):473-6.
5. Kim HT. An experimental study on the flowing and strength properties of high performance concrete using blast furnace slag.[master's thesis],[Daejeon]: Hanbat National University; 2007: 64 p.
6. Mori H, Tanaka Y, Tanigawa Y. Experimental study on shear deformational behavior of fresh concrete, Journal of structural and construction engineering,1991 Sep; 427:1-10.
7. G. H. Tattersall, P. F. G. Banfill. The rheology of fresh concrete, 1st ed. London: Pitman books limited; c1983. Chapter 1, The importance of workability; p.1-9.
8. Lee GC, Jo BY, Oh DW. A study on rheological properties and rational fluidity evaluation of cementitious matrices for high strength concrete. Journal of the Architectural Institute of Korea. 2012 Jan;28(1):117-24.
9. Korea Concrete Institute. Concrete admixture. 1st ed. Seoul(Korea): Kimundang; c1997. Chapter 3, Mineral admixture; p.159-85.
10. Song JT, You CD, Byun SH. Effect of blast furnace slag fineness on the rheological properties of cement pastes. Journal of the Korea Ceramic Society. 2007; 44(2)103-9.