



물 결합재 비에 따른 알칼리 활성화 슬래그 페이스트의 레올로지 특성에 관한 실험적 연구

김병조¹⁾ · 송진규^{2)*} · 송금일¹⁾ · 오명현¹⁾ · 이방연²⁾

¹⁾전남대학교 건축공학과 ²⁾전남대학교 건축학부

Experimental Study on Rheological Properties of Alkali Activated Slag Pastes with Water to Binder Ratio

Byeong-Jo Kim,¹⁾ Jin-Kyu Song,^{2)*} Keum-Il Song,¹⁾ Myeong-Hyeon Oh,¹⁾ and Bang-Yeon Lee²⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

²⁾School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

ABSTRACT Methods such table flow, slump and outflow time have used to be as a main evaluation criteria regards to fluidity of concrete. Since those methods mentioned above have some inaccuracies which are up to its condition of test. Studies that evaluate fluidity applying the rheology has increased its portion in this field. Meanwhile, demands for AAS binder have been increased in accordance with its demand for this market, studies for rheology of AAS binder are little though. Therefore, this paper mainly deals a rheological peculiarity of AAS binder according to its condition of W/B ratio and alkali activators. The fluidity of AAS paste was evaluated with the index of table flow and outflow time. And shear stress following its shear rate was analyzed through rheological test. Rheological parameters were deduced through this rheological test of Bingham model and analyzed its interrelation with fluidity test. As the final outcome, it proposed the interrelation among table flow, yield stress, viscosity and outflow time. In basis of this study, we would like to suggest a reference for mixing AAS mortars and concretes.

Keywords : alkali activated slag paste, rheology, plastic viscosity, yield stress

1. 서 론

콘크리트의 유동학적 메커니즘을 규명하기 위해서는 유동성 데이터의 축적과 이를 기초로 한 해석법에 대한 연구가 필요하다. 콘크리트의 유동성을 평가하기 위해서는 주로 페이스트 및 모르타르의 테이블 플로우, 슬럼프, 유하시간 측정 등의 방법들이 이용된다. 이러한 시험 방법들은 비교적 절차가 단순하고, 비용이 저렴하며, 현장에서 측정이 용이하다는 장점이 있다. 하지만 이런 평가 방법은 측정값만 같다면 서로 다른 배합에서도 같은 물성으로 평가되는 문제점이 발생한다.¹⁾ 또한 시험자의 숙련도 및 시험환경에 따라 시험결과가 다소 달라지기 때문에 시험 조건이 바뀌면 정확한 비교분석이 어렵다. 특히 콘크리트는 배합조건에 따라 물성의 변화가 크고 내부가 균질하지 않기 때문에 유동성을 일정한 모델로 표

현할 수 있는 정량적인 평가방법이 필요하다. 최근 고유동 콘크리트나 수중 불분리 콘크리트와 같이 특수성이 요구되는 재료 개발을 위해 소성점도(Viscosity) 및 항복응력(Yield stress)과 같은 정량적 변수로 표현되는 레올로지(Rheology)를 이용하여 콘크리트의 유동성을 평가하는 연구가 증가하고 있다.

레올로지는 유체의 유동성(Fluidity)과 변형(Deformation)에 기반을 두는 연구 분야로 유동성은 응력, 변형 및 시간과 관계가 깊다. 콘크리트의 레올로지는 반죽 질기(Consistency)와 시공연도(Workability)에 영향을 미치며, 미시구조 뿐만 아니라 역학적 특성과 내구성을 결정짓는 특성이므로 이에 대한 이해가 필요하다. 콘크리트를 연속체로 가정하면 콘크리트의 유동성은 페이스트의 레올로지 특성에 의해 좌우되는데, 페이스트의 레올로지를 Bingham 모델에 적용하여 소성점도와 항복응력의 관계로 정의할 수 있다.²⁾ Bingham 모델은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있는데 여기서 τ 는 전단응력(Pa), τ_0 는 항복응력(Pa), μ 는 소성점도(Pa·s), $\dot{\gamma}$ 는 전단속도(s^{-1})이다.

*Corresponding author E-mail : jgsong@chonnam.ac.kr

Received January 13, 2015, Revised June 29, 2015,

Accepted July 20, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

$$\text{Bingham Model} : \tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

Bingham 모델은 페이스트의 유하시간 및 플로우와 각각 연관성이 있는 소성점도와 항복응력의 2가지 정수(Parameter)에 의해 단순하게 구성되며, 복잡한 페이스트의 유동성을 비교적 간단하게 표현할 수 있기 때문에 대부분의 레올로지 연구에서 사용하고 있다. Yahia는 특수성을 가지는 복잡한 유체에 적용하기 위하여 수정된 Bingham 모델을 제안하였고,^{3,4)} Yen은 굳지 않는 콘크리트의 유동성을 평가하기 위하여 기존의 유동성 평가 항목과 레올로지 시험을 수행하여 레올로지를 이용한 방법의 이점을 제시하였다.⁵⁾ 또한 Bilgil은 굳지 않는 콘크리트의 점성을 측정하여 재료분리를 판단할 수 있는 통계적인 방법을 제시하기도 하였다.⁶⁾

한편 건설업계의 ‘지속가능한 발전’에 대한 대안으로 시멘트를 사용하지 않는 알칼리 활성화 슬래그(AAS) 결합재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데, AAS 콘크리트의 유동특성 또한 많은 연구가 필요하다. AAS 결합재는 시멘트 원료인 클링커를 전혀 사용하지 않아 제조 공정에서 탄소배출량을 현저하게 줄일 수 있고, 산업 폐기물을 효과적으로 처리할 수 있기 때문에 OPC의 대체 재료로 활용될 수 있다.⁷⁻⁹⁾ 일반적으로 AAS 결합재의 물리적인 성능은 활성화제의 종류와 첨가량에 따라 OPC 수준을 만족하거나 상회하며, 내화학적 및 초기강도발현이 높다.¹⁰⁾ 하지만 AAS 결합재는 일반적으로 OPC에 비해 높은 점도를 나타내고, 적용되는 활성화제의 종류에 따라 유동 특성의 차이가 발생하므로 전반적인 AAS 결합재의 유동성에 대한 검증이 필요하다. 하지만 국내·외적으로 레올로지를 적용하여 AAS 결합재의 유동 특성을 평가한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 이 연구의 목표는 알칼리 활성화제 조합 및 물/결합재 비가 알칼리 활성화 슬래그(AAS) 페이스트의 유동

성에 미치는 영향을 분석하고, 정량적인 지표를 제시하는 것이다. 이를 위해 모르타르 시험에서 선정된 3가지 유형의 활성화제 조합 및 7 수준의 물/결합재 비를 변수로 하여 총 21개 페이스트 배합과 OPC 페이스트 7배합에 대한 테이블 플로우 및 유하시험을 실시하고, 레오미터를 이용하여 전단속도(Shear rate) 변화에 따른 전단 응력(Shear stress)을 측정 후, 산출된 데이터를 바탕으로 AAS 결합재의 레올로지 특성을 분석하였다.

2. AAS 결합재 선정

2.1 알칼리 활성화제 반응성 검토

현재까지 AAS 결합재의 알칼리 활성화 메커니즘은 확실히 규명되지는 않았지만, 산화규소 및 산화알루미늄을 함유하고 있는 하소 물질은 효과적인 원재료로 사용될 수 있고, 가성 알칼리와 비규산계 약산염 또는 규산염계는 효과적인 활성화제로 알려져 있다.¹¹⁾ 이 연구에서는 1차적으로 예비시험 및 문헌조사에서 압축강도가 발현된 이력이 있는 활성화제의 반응성을 검토하였다. 활성화제를 결합재 대비 7% 첨가하여 3, 7, 28일 재령에서 압축강도를 평가하였고 결과는 Table 1과 같다.

시험 결과 가성 알칼리 계열을 활성화제로 첨가한 AAS 모르타르는 모두 강도가 발현되었고, 그 외에는 규산염계의 규산나트륨을 제외하고 굳지 않았다. 이를 기준으로 가성 알칼리 계열의 수산화나트륨, 수산화칼슘과 규산염계의 규산나트륨을 기본 활성화제로 선정하였다.

2.2 결합재 조합 선정

알칼리 활성화제 반응여부 시험에서 선정된 수산화나트륨, 수산화칼슘 및 규산나트륨을 기본 활성화제로 하

Table 1 Compressive strength of AAS mortars with alkali activators

Materials		Compressive strength (MPa)			
Source material	Alkali Activators	3 Days	7 Days	28 Days	
Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS)	Caustic Alkalies	NaOH	10.4	13.7	16.2
		Ca(OH) ₂	5.5	11.5	14.3
		Ba(OH) ₂	4.0	4.5	5.7
	Non-silicate Weak acid salts	Na ₂ SO ₄	-	-	-
		Na ₂ CO ₃	-	-	-
		CaCO ₃	-	-	-
		K ₂ CO ₃	-	-	-
		NaF	1.0	3.1	10.7
	Silicates	Na ₂ SiO ₃	11.4	14.0	17.8
		K ₂ SiO ₃	-	-	-
	Non-silicate Strong acid salts	Ca ₂ SO ₄	-	0.5	1.1
		K ₂ SO ₄	-	-	-

고, 비규산계 약산염인 탄산나트륨과 비규산계 강산염인 황산나트륨을 보조 활성화제로 선정하였다. 보조 활성화제는 결합체의 강도발현에 직접적으로 기여하지는 않지만 기본 활성화제와 조합을 통해 페이스트의 물성을 향상시키는 역할을 하며, 선행연구 결과에 따라 선정하였다.^{12,13)} 선정된 활성화제를 조합한 모르타르의 역학적 성능을 평가하고 활성화제 첨가량에 따른 경제성 여부를 판단하였다. 그 결과 수산화나트륨과 탄산나트륨, 수산화칼슘과 황산나트륨 조합 및 규산나트륨 단독 배합을 최종적으로 선정하였으며 결합체의 상세는 Table 2와 같다.

3. 재료 및 실험방법

3.1 재료

3.1.1 원재료

이 연구에 사용된 원재료는 KS L 5201 (포틀랜드 시멘트)의 규정에 준하여 생산되는 국내 S사의 1종(보통 포틀랜드 시멘트) 시멘트와 KS F 2563 (콘크리트용 고로슬래그 미분말)의 규정에 준하여 생산되는 G사의 고로슬래그 3종(분말도 4,204 cm²/g)이며 성분비는 Table 3과 같다.

3.1.2 알칼리 활성화제

실험에 사용된 알칼리 활성화제는 가성 알칼리 계열인 수산화칼슘과 수산화나트륨, 규산염 계열의 규산나트륨이

Table 2 Selected combination of AAS binder

Mix	Materials		
	GGBS (%)	Alkali Activators (%)	
G1	90%	Ca(OH) ₂ 7%	Na ₂ SO ₄ 3%
G2	90%	Na ₂ SiO ₃ 10%	
G3	93%	NaOH 3%	Na ₂ CO ₃ 4%

Table 3 Chemical composition of the source material (% by mass)

Source material	Composition (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
OPC	20.0	7.0	65.0	2.7	2.6	0.5	0.2	-	2.0
GGBS	31.57	13.58	43.26	0.38	4.86	0.18	0.41	0.04	4.53

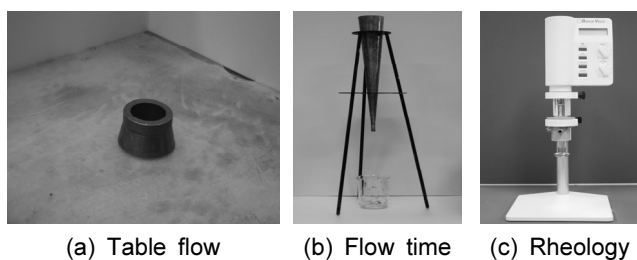


Fig. 1 Tests of pastes

사용되었다. 또한 비규산계 약산염인 탄산나트륨과 비규산계 강산염인 황산나트륨을 보조 활성화제로 적용하였으며, 5종류의 활성화제는 모두 분말형을 사용하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 AAS 페이스트의 혼합

AAS 페이스트의 혼합은 KS L 5109 (수경성 시멘트 페이스트 및 모르타르의 기계적 혼합 방법)에 규정된 모르타르 믹서를 이용하여 실시하였다. 먼저, 고로슬래그와 활성화제를 투입하여 60초간 140 rpm으로 혼합하고 물을 투입하여 30초간 혼합한 후, 285 rpm으로 3분 혼합한 뒤 유동특성을 측정하였다.

3.2.2 테이블 플로우 시험

AAS 페이스트의 유동성을 평가하기 위하여 KS L 5111 (시멘트 시험용 플로우 테이블)에 따라 테이블 플로우 시험을 수행하였다. 여기서 레올로지 시험과 상관관계를 분석하기 위하여 테이블을 타격하지 않고 페이스트의 플로우를 측정하였다. 테이블 플로우 교차되는 두 점의 직경을 측정하였다. 시험의 정확도를 높이기 위하여 개체마다 각각 3회 실시하고 그 평균을 최종 값으로 기록하였다.

3.2.3 유하시험

AAS 페이스트의 점도를 평가하기 위하여 KS F 2432 (주입 모르타르의 컨시스턴스 시험방법)에 따라 페이스트의 유하시간을 측정하였다. 구간에 따른 유하시간을 비교하기 위하여 각 배합별로 페이스트 500 ml를 유출시켜 100 ml 단위로 유하시간을 확인하였다. 깔때기의 유출구에 비커를 두어 100 ml 단위를 구분하였고, 정확도를 높이기 위해 총 3회 시험을 실시하여 평균을 도출하였다.

3.2.4 레올로지 시험

AAS 페이스트의 레올로지 특성을 측정하기 위하여 각 배합에 대하여 전단속도에 따른 전단응력을 레오미터로 측정하였으며, 테이블 플로우 및 유하시험 결과와의 상관관계를 분석하였다. 레올로지 시험에서는 원뿔-평판(Cone

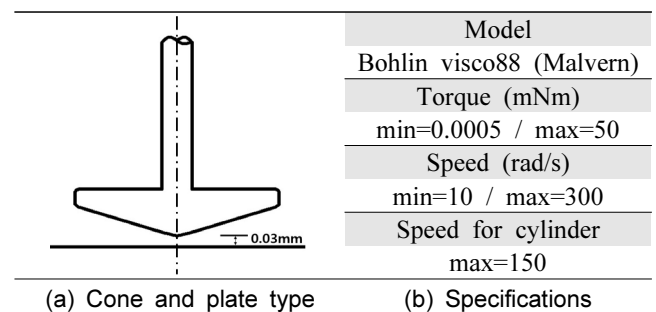


Fig. 2 Spindle and Specifications of rheometer

and plate type)회전축을 사용하였고, 시편과 레오미터의 간격(gap size)은 0.03 mm로 설정하였다. 회전축 및 레오미터의 사양은 Fig. 2와 같다.

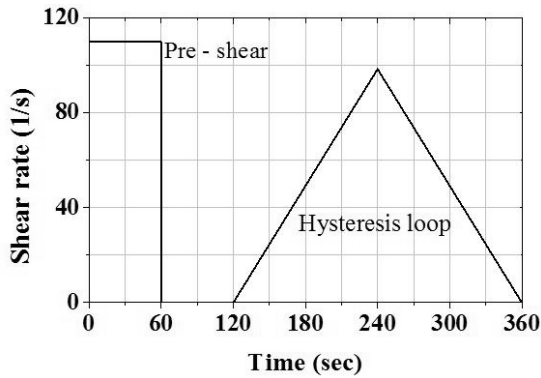


Fig. 3 Rheological protocol of pastes

Table 4 Test variables of pastes

Mix	Composition of binder (% by mass)		W/B (%)
	Source material	Alkali activators	
OP-42	OPC 100%	-	42
OP-45			45
OP-48			48
OP-51			51
OP-54			54
OP-57			57
OP-60			60
G1-42	GGBS 90%	Calcium Hydroxide 7% Sodium Sulfate 3%	42
G1-45			45
G1-48			48
G1-51			51
G1-54			54
G1-57			57
G1-60			60
G2-42	GGBS 90%	Sodium Silicate 10%	42
G2-45			45
G2-48			48
G2-51			51
G2-54			54
G2-57			57
G2-60			60
G3-42	GGBS 93%	Sodium Hydroxide 3% Sodium Carbonate 4%	42
G3-45			45
G3-48			48
G3-51			51
G3-54			54
G3-57			57
G3-60			60

레올로지 시험 시 페이스트의 응집된 부분을 제거하고 시료를 균질하게 만들기 위하여 110 s⁻¹의 전단속도로 60 초 동안 작동하였다.¹⁴⁾ 이후에 레오미터를 60초 동안 정지시키고 240초에 걸쳐 0에서 98.4 s⁻¹, 98.4 s⁻¹에서 0까지 지속적으로 증감시켜 측정하였다. 레올로지 시험 계획은 Fig. 3과 같다.

3.3 실험계획

물/결합재 비율에 따른 페이스트의 유동특성을 분석하기 위하여 활성화제의 조합 및 물/결합재 비를 변수로 선정하였다. 고로슬래그 및 활성화제 조합에 의해 결합재를 G1, G2, G3의 3가지로 선정하고, OPC 페이스트를 추가하여 유동특성을 비교하였다. 각각의 결합재 유형에 대해 물/결합재 비를 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60%의 7수준으로 정하였다. 총 28종류의 배합에 대해 테이블 플로우, 유하시간 및 레올로지 특성을 평가하였고, 변수와 배합상세는 Table 4와 같다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 테이블 플로우

Fig. 4는 결합재 유형 및 물/결합재 비율에 따라 테이블 플로우를 나타낸 그래프이다. OPC 페이스트의 테이블 플로우는 170~325 mm로 측정되었고, 물/결합재 비에 따라 테이블 플로우도 비례하여 증가하였다.

G1 페이스트의 테이블 플로우는 물/결합재 비율에 따라 110~215 mm의 범위에 나타났다. G1-42 배합의 플로우 값은 110 mm로 측정되었는데, 이는 플로우 콘 내부직경과 같은 수치로 페이스트의 변화는 0 mm이다. G1 페이스트의 플로우 값은 일정한 비율로 증가하다 G1-54 배합에서 증가폭이 다소 줄어들는데, 이 부분은 실험 편차에 의한 것으로 판단된다.

G2 페이스트의 플로우 값은 OPC 페이스트에 비해서는 다소 작게 나타났으나 3가지 AAS 결합재 유형 중에서는 가장 큰 값을 보였고, 물/결합재 비에 따라 163~308

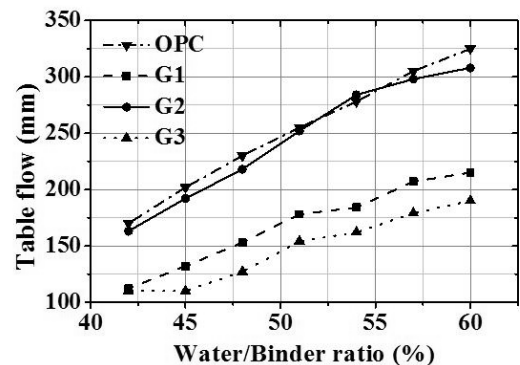


Fig. 4 Table flow of pastes

mm 범위의 값을 나타냈다. G2 페이스트의 플로우 값은 물/결합재 비에 따라 지속적으로 증가하지만 G2-54 이후로 그 증가폭이 줄어든다. 이는 물/결합재 비가 증가함에 따라 레올로지 정수인 항복응력의 감소폭이 작아지는 것과 관련이 있으며, 물/결합재 비에 따른 플로우 값의 증가폭은 60% 이후에도 감소할 것으로 판단된다.

G3 페이스트의 플로우 값은 3 종류의 결합재 중 가장 작게 나타났으며, 물/결합재 비가 증가함에 따라 110~190 mm의 값을 보였다. G3-42, 45 배합에서 플로우 값이 110 mm 측정되어 페이스트의 변화가 없었다. G3 페이스트의 플로우 값은 25 mm 정도 낮게 측정되었다.

AAS 페이스트의 플로우 값은 전체적으로 물/결합재 비에 따라 증가하지만, 그 증가폭은 감소하게 된다. 물/결합재 비가 60% 이상인 배합에서는 항복응력이 감소함에 따라 그 증가폭이 더욱 작아질 것으로 판단된다.

4.2 유하시간

Table 5는 결합재 유형 및 물/결합재 비에 따른 AAS 페이스트의 유하시간 측정 결과를 나타낸 것이다. OPC 페이스트의 유하시간은 모든 배합에서 500 ml 전량 유출되었다. OPC 페이스트의 유하시간을 100 ml 단위로 살펴보면, 유출되는 페이스트 양이 증가할수록 유하시간의 간격은 커지는 것으로 나타났으며 이러한 경향은 모든 배합에서 확인되었다.

G1 페이스트의 유하시험 결과, G1-42와 G1-45 배합에서 페이스트가 전혀 유출되지 않아 유하시간 측정이 불가능하였다. 반면에 G1-48부터 G1-60까지 배합에서는 페이스트가 전량 유출되었다. G2 페이스트의 유하 경향은 OPC 페이스트와 비슷하였으나 유하되는 시간은 다소 증가하였고, 모든 배합에서 500 ml 전량이 유출되었다. G2-42와 G2-45 페이스트는 유출되는 양이 증가함에 따라 유하시간의 간격도 커졌지만, G2-48부터 G2-60 페이스트는 유출되는 양에 따른 유하시간의 증가폭은 거의 일정하게 나타났다. 이러한 현상은 물/결합재 비가 증가함에 따라 소성점도의 감소폭은 작아지기 때문이며, 실험 편차가 어느 정도 작용한 것으로 판단된다.

G3 페이스트는 G1과 G2 배합에 비해 유출되는 시간이 길게 나타났고, 7수준의 물/결합재 배합 중 G3-54, G3-57, G3-60 페이스트에서 500 ml 모두 유출되는 것으로 확인되었다. G3-42와 G3-45 배합에서는 페이스트가 전혀 유출되지 않았고 G3-48 페이스트는 200 ml 이후, G3-51 배합에서는 300 ml 이후에서 유하가 중지되었다. G1 배합의 경우, 48% 이상의 물/결합재 비를 갖는 페이스트는 유하 중간에 정지하지 않고 전부 유출되었으나 G3 페이스트는 배합 이후 빠르게 유동성이 손실되면서 유하가 중지되었다. 이는 수분과 빠르게 반응하여 페이스트를 급결시키는 수산화나트륨의 특성에 의한 것으로 판단된다.

AAS 페이스트의 유하시험 결과, 전체적으로 물/결합

Table 5 Outflow time of pastes

Mix	W/C (%)	Time (sec)				
		Outflow (ml)				
		100	200	300	400	500
OP-42	42	8.79	14.6	24.9	37.3	61.0
OP-45	45	3.2	5.24	7.96	10.7	16.3
OP-48	48	2.4	3.32	4.72	6.00	8.45
OP-51	51	1.2	1.85	2.57	3.64	5.02
OP-54	54	1.0	1.69	2.22	3.16	4.74
OP-57	57	0.9	1.34	1.87	2.45	3.82
OP-60	60	0.7	1.12	1.69	2.10	3.50
G1-42	42	-	-	-	-	-
G1-45	45	-	-	-	-	-
G1-48	48	6.37	12.7	21.3	30.6	46.6
G1-51	51	3.11	6.62	10.3	18.0	34.5
G1-54	54	2	3.43	4.78	6.6	9.1
G1-57	57	1.7	3.16	4.73	6.43	8.33
G1-60	60	1.38	2.31	3.03	3.93	5.14
G2-42	42	9.23	17.6	30.8	47.5	80.6
G2-45	45	3.05	5.33	8.12	13.4	22.9
G2-48	48	2.8	5.36	7.97	11.6	15.7
G2-51	51	1.5	2.54	3.41	4.87	6.71
G2-54	54	1	2.08	3.04	4.28	5.68
G2-57	57	1	1.68	2.44	3.25	4.4
G2-60	60	0.7	1.42	2.17	3.06	4.18
G3-42	42	-	-	-	-	-
G3-45	45	-	-	-	-	-
G3-48	48	10.1	23.	-	-	-
G3-51	51	4.1	8.15	15.4	-	-
G3-54	54	4.4	6.98	11.1	18.2	31.5
G3-57	57	2.3	3.7	5.46	7.94	12.6
G3-60	60	1.77	2.85	4.09	5.7	8.13

재 비에 따라 유하시간이 단축되었으며 유출량이 증가할수록 100 ml 당 유하시간의 간격은 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 AAS 페이스트 유출 경향은 물/결합재 비에 따라 소성점도가 감소하고 페이스트의 유출량에 따른 페이스트의 자중 변화가 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

4.3 레올로지 특성

Fig. 5는 레올로지 시험 결과로서 결합재 유형 및 물/결합재 비에 따른 전단속도-전단응력 관계를 나타내고 있다. OPC, G1, G2, G3 페이스트의 전단응력은 물/결합재 비에 따라 감소하였으며, 전단속도에 따라 증가하는 경향을 나타냈다. 4 종류의 결합재 모두 전단속도-전단응

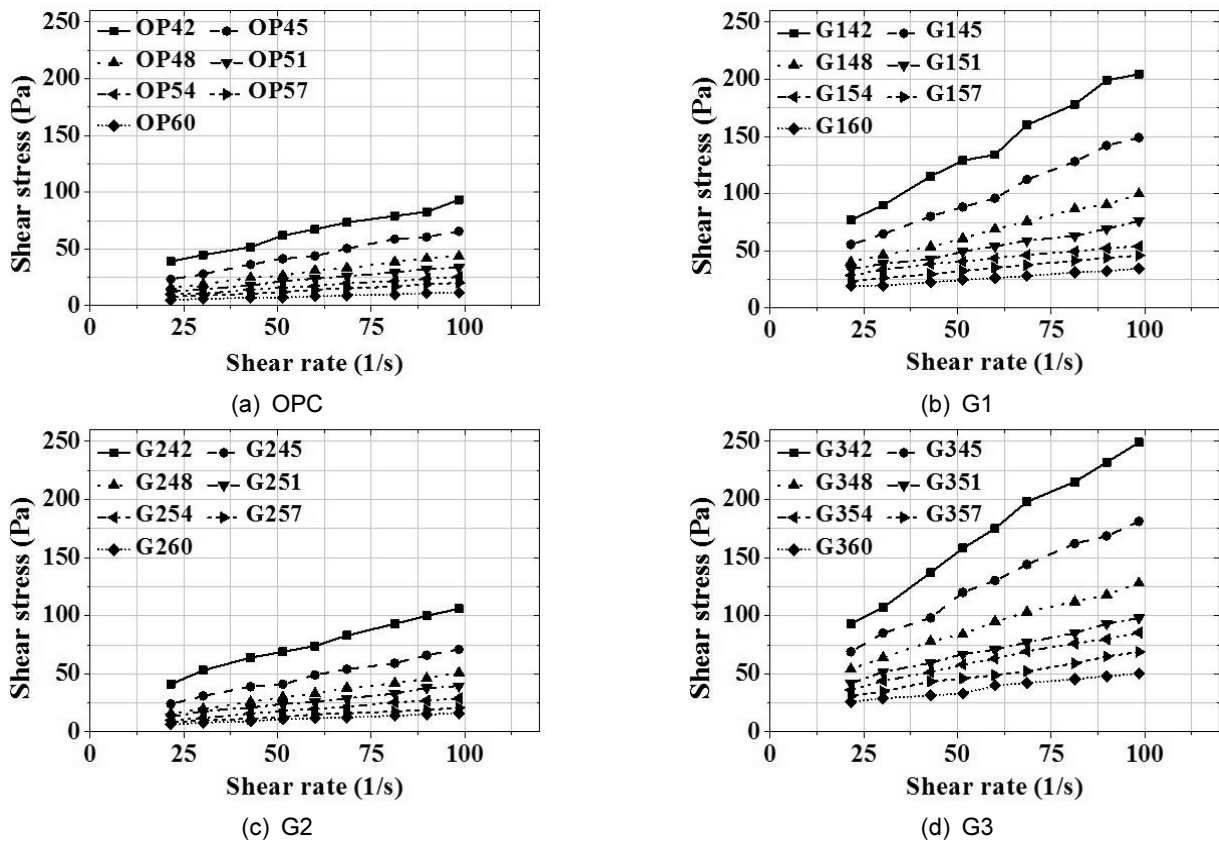


Fig. 5 Correlation between shear rate and stress

Table 6 Rheological parameters of pastes

Test	Mix	W/B (%)						
		42	45	48	51	54	57	60
Viscosity (Pa·s)	OPC	0.681	0.552	0.370	0.288	0.203	0.161	0.083
	G1	1.70	1.21	0.750	0.538	0.389	0.363	0.263
	G2	0.797	0.576	0.429	0.322	0.230	0.157	0.121
	G3	1.98	1.42	0.945	0.670	0.610	0.462	0.306
Yield stress (Pa)	OPC	24.5	12.2	8.44	6.3	5.19	4.13	3.29
	G1	40.6	27.4	23.1	21.1	18.7	12.4	9.96
	G2	26.1	13.3	7.00	6.42	5.50	4.72	4.08
	G3	48.6	40.7	34.0	29.9	24.5	21.2	19.65

력 관계가 선형에 가깝게 분포하여 Bingham 모델을 적용하기 적합하였다.

OPC 페이스트의 전단응력은 5~93 Pa의 값을 보였으며 실험된 결합재 중 가장 낮게 나타났다. G1 페이스트의 전단응력은 최소 19 Pa에서 최대 204 Pa의 수준으로 나타났다으며, 물/결합재 비에 따른 전단응력의 상승폭은 증가하는 것으로 확인되었다. G2 페이스트는 G1 페이스트에 비해 전반적으로 낮은 수준의 전단응력을 보였으며, 최저 6.7 Pa에서 최대 106 Pa 범위를 보였다. G3 페이스트는 4가지 유형의 배합 중에 가장 높은 전단응력 수치를 보였고, 26 Pa에서 250 Pa 수준으로 나타났다. G3 페이스트는 4종류의 배합 중 전단응력의 최소 수치가 가장 높

게 나타났지만, 전단응력의 전체 범위는 가장 넓게 분포하였다.

Table 6은 레올로지 시험을 통해 획득한 전단응력-전단속도 그래프를 Bingham 모델로 가정할 경우 얻을 수 있는 레올로지 정수를 나타낸 것이다. 전단속도-전단응력 그래프에서 기울기로 표현되는 소성점도와 전단응력 축의 절편으로 나타나는 항복응력을 물/결합재 비 및 결합재 유형에 따라 분류하였다.

OPC 페이스트의 소성점도는 최소 0.08에서 0.68 수준이었으며 물/결합재 비에 따른 감소폭이 줄어드는 것으로 나타났다. AAS 페이스트의 소성점도는 0.1~2.0 Pa·s 범위에서 나타났으며 물/결합재 비에 따라 감소하였지만,

감소폭은 줄어드는 경향을 보였다. G1 페이스트의 소성점도는 0.26~1.70 Pa·s로 나타났고, G1-57 배합부터 물/결합재 비에 따라 감소폭이 작아져 G1-57 이후에 500 ml 유출시간이 확연히 단축되는 G1 배합의 유하시험 결과와 유사한 것으로 나타났다. G2 페이스트의 소성점도는 0.12 Pa·s에서 0.80 Pa·s 수준으로 측정되었고, G2-42 배합을 제외하고는 0.6 Pa·s 이하의 낮은 점도를 나타냈다. G2 배합의 유하시험 결과 80.63 sec를 나타낸 G2-42 를 제외하고는 23 sec 이하로 측정되어 소성점도와 비슷한 경향을 보였다. G3 페이스트는 0.3 Pa·s에서 2.0 Pa·s 수준의 점도를 나타냈다. G3 페이스트는 유하시험 시에 G3-48과 G3-51 페이스트가 유출 도중 중지되었는데, 전반적으로 점도가 가장 높고, 물/결합재 비에 따른 소성점도의 감소폭도 다른 배합에 비해 크게 나타났다. 실험된 페이스트의 소성점도는 일반적으로 알려진 바와 같이 유하시간과 유사한 경향으로 측정되었다.

페이스트의 항복응력은 OPC가 3.29~24.5 Pa, G1 배합이 9.96~40.6 Pa, G2 배합이 4.08~26.1 Pa, G3는 19.6~48.6 Pa으로 각각 측정되었다. 항복응력은 일반적으로 플로우 값과 비슷한 경향을 보이는데, 실험 편차로 추정되는 부분을 제외하고는 이 실험에서도 항복응력과 테이블 플로우 값은 유사한 경향을 나타냈다.

4.4 유동성 시험과 테이블 플로우의 상관관계

Fig. 6(a)는 AAS 페이스트의 각 구간별 유하시간과 소성점도와의 상관관계를 나타낸 것이다. 유하시간은 간극을 통과하는 항복응력의 영향을 무시할 수는 없지만, 일반적으로 소성점도와의 연관성이 높게 나타난다. 유하시험에서 페이스트가 전혀 유출되지 않은 G1-42, G1-45, G3-42, G3-45 배합은 분석에서 제외하였다. 100 ml 단위 구간별 관계식과 결정계수 R²은 식 (2)~(6)과 같다. 여기서 η는 소성점도이고, T₀는 유하시간이다. 관계 곡선은 유출량이 증가함에 따라 완만해지는 경향을 나타냈다.

$$100 \text{ ml} : \eta = 0.256 T_0^{0.566} \quad R^2 = 0.93 \quad (2)$$

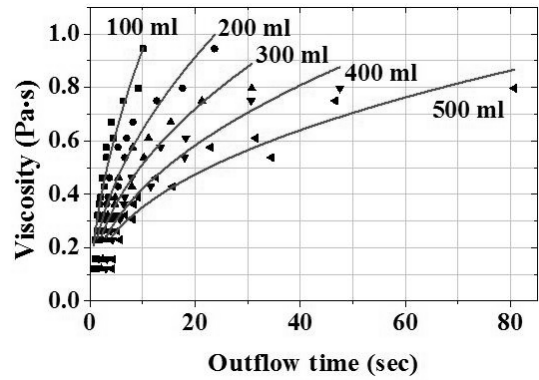
$$200 \text{ ml} : \eta = 0.198 T_0^{0.510} \quad R^2 = 0.91 \quad (3)$$

$$300 \text{ ml} : \eta = 0.166 T_0^{0.490} \quad R^2 = 0.89 \quad (4)$$

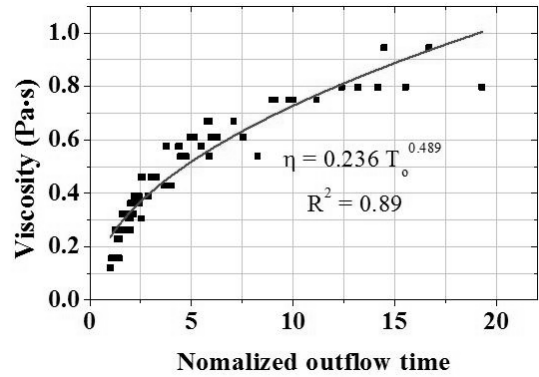
$$400 \text{ ml} : \eta = 0.142 T_0^{0.471} \quad R^2 = 0.90 \quad (5)$$

$$500 \text{ ml} : \eta = 0.130 T_0^{0.432} \quad R^2 = 0.90 \quad (6)$$

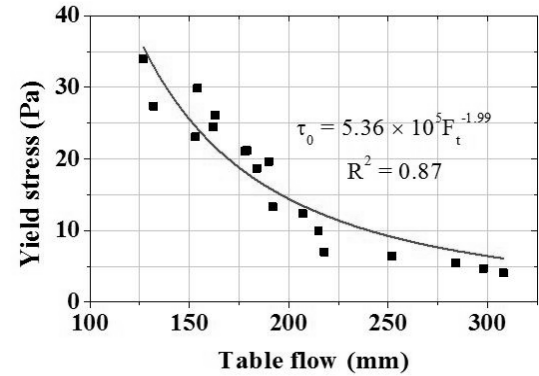
페이스트의 유하량에 따라 발생하는 차이를 보완하기 위하여 각 구간별로 최소 시간을 1로 설정하여 정규화(normalization) 하였다. 정규화한 데이터를 적용하여 소성



(a) Outflow time - Viscosity



(b) Normalized Outflow time - Viscosity



(c) Table flow - Yield stress

Fig. 6 Correlation between Flow value and rheological parameters

점도와의 관계를 회귀 분석하였고, 식 (7)을 도출하였다. 결정계수 R²은 0.89이며, Fig. 6(b)와 같이 분포하였다. 여기서 소성점도가 0에 가까워질 때 유하시간도 0에 가까워지는 것으로 가정하고 원점을 지나는 함수(Power-law function) 형태로 곡선적합(Curve fitting) 하였다.

$$\eta = 0.236 T_0^{0.489} \quad (7)$$

Fig. 5(c)는 AAS 페이스트의 테이블 플로우와 항복응력과의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 이 때 테이블 플로우 값이 플로우 콘의 규격과 같은 G1-42, G3-42, G3-45 배합은 분석에서 제외하였다. 플로우 값은 정적평형상태

에서의 퍼짐량을 측정하므로 레올로지 정수의 항복응력과 유사한 경향을 보이는 것이 일반적이다. 각 배합에 대하여 테이블 플로우와 항복응력간의 상관관계를 회귀 분석하여 관계식을 도출하였으며 식 (8)과 같다. 여기서 τ_0 는 항복응력이며 F_t 테이블 플로우이다. 결정계수 R^2 은 0.87로 확인되었다.

$$\tau_0 = 5.36 \times 10^5 F_t^{-1.99} \quad (8)$$

유하시간과 소성점도, 플로우와 항복응력의 상관관계는 각각 0.89, 0.87로 높게 나타났다. 따라서 AAS 페이스트의 유하시간 및 테이블 플로우 측정을 통하여 레올로지 특성을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 다소 적은 개체 수에 따라 추가검증이 필요할 것으로 보인다.

5. 결 론

이 논문은 AAS 결합재의 유동성을 정량적으로 평가하기 위하여 레올로지 특성을 분석하고 테이블 플로우, 유하시간 측정결과와 상관관계를 도출하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 테이블 플로우 시험 결과 전체적으로 물/결합재 비가 증가할수록 플로우 값이 크게 나타나며, 증가폭은 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 유하시간 측정결과 수산화칼슘 기반 페이스트인 G1-42, G1-45 및 수산화나트륨 기반 G3-42, G3-45 페이스트는 전혀 유출되지 않았다. G3 페이스트는 G1과 달리 유하 도중 끊기는 경향을 보였으며, OPC 페이스트는 전량 유출되고 유하시간도 가장 짧은 것으로 나타났다.
- 3) 4종류 페이스트의 소성점도 및 항복응력을 도출하였고, 테이블 플로우 및 유하시험 결과와의 상관관계를 분석하였다. 페이스트의 유하 경향은 유출량에 따라 차이를 나타내므로 유하시간 데이터를 정규화하여 분석하였다. 유하시간-소성점도 및 플로우-항복응력의 관계는 결정계수 0.89, 0.87로 각각 나타났다.
- 4) 플로우, 유하시험 결과로 레올로지 특성을 예측할 수 있는 관계식을 제시하였고, AAS 결합재를 모르타르 및 콘크리트에 사용하기 위한 기초자료로 적용될 수 있을 것으로 사료된다

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 15-RDRP-B076564-02)에 의해 수행되었습니다.

1. Chiara F. Ferraris., Karthik H. Obia., and Russell Hill., "The Influence of Mineral admixtures on The Rheology of Cement paste and Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, 2001, pp.245-255.
2. Howard A. Barnes., "A Handbook of Elementary Rheology", *Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, University of Wales, 2000, pp.5-50.
3. Yahia, A. and Khayat, K. H., "Analytical Models for Estimating yield stress of High-performance Pseudoplastic Grout", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, 2001, pp.731-738.
4. Papo, A., "Rheological models for Cement pastes", *Materials and Structures*, Vol.21, 1988, pp.41-46.
5. Yen, T., Tang, C., Chang, C., and Chen, K., "Flow Behaviour of High Strength High-performance Concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol.21, No.5-6, 1999, pp.413-424.
6. Bilgil, A., Ozturk, B., and Bilgil, H., "A numerical approach to determine viscosity-dependent segregation in Fresh Concrete", *Applied Mathematics and Computation*, Vol.162, No.1, 2005, pp.225-241.
7. Song, J. K., Yang, K. H., Kim, G. W., and Kim, B. J., "Properties of Sodium Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS) Mortars", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol.26, No.6, 2010, pp.61-68.
8. Yang, K. H., Sim, J. I., Lee, S., and Hwang, H. J., "Workability, Compressive strength and Fire Resistance Characteristics of Cementless Alkali-Activated Lightweight Mortars", *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol.25, No.8, 2009, pp.151-158.
9. Yang, K. H., Oh, S. J., and Song, J. K., "Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag-Based Concrete Using Lightweight Aggregates", *Journal of Korea concrete Institute*, Vol.20, No.3, 2008, pp.405-412.
10. Krivenko, P. V., "Alkaline Cements and Concretes", *Paper Presented at the First International Conference on Alkaline Cements and Concrete*, Kiev, Ukraine, 1994, pp.121-129.
11. Shi, C., Krivenko, P. V., and Roy, D., "Alkali - Activated Cements and Concretes", *Taylor & Francis*, 2006, pp.6-29.
12. Kim, K. W., Kim, B. J., Yang, K. H., and Song, J. K., "Strength Development of Blended Sodium Alkali-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS) Mortar", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.2, 2012, pp.137-145.
13. Song, K. I., Shin, G. S., Gong, M. H., and Song, J. K., "Basic Research of Self Compacting Concrete Using Alkali-Activated Slag Binder", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol.25, No.6, 2013, pp.657-665.
14. Nathan, T., Liberato, F., and Surendra, P., "Identifying Viscosity of Cement Paste from Mini-Slump-Flow Test", *ACI Materials Journal*, Vol.105, No.6, 2008, pp.558-566.

요약 콘크리트의 유동성을 평가하기 위해서는 주로 테이블 플로우, 슬럼프 및 유하시간 측정 등의 방법이 이용된다. 하지만 이러한 방법은 시험 조건이 바뀌면 정확한 비교분석이 어렵기 때문에 정량적 변수로 표현되는 레올로지를 이용하여 콘크리트의 유동성을 평가하는 연구가 증가하고 있다. 한편, 시장의 요구에 따라 AAS 결합재에 대한 수요는 증가하고 있으나, AAS 결합재의 레올로지에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 이 논문에서는 물/결합재 비와 알칼리 활성화제 유형에 따른 AAS 페이스트의 레올로지 특성을 분석하고자 한다. 테이블 플로우와 유하시간을 측정하여 AAS 페이스트의 유동성을 평가하였고, 레올로지 시험을 통해 전단속도에 따른 전단응력을 분석하였다. 레올로지 시험결과를 Bingham model로 가정하여 레올로지 정수를 도출하고 유동성 평가 시험과의 상관관계를 분석하였다. 결과적으로, 테이블 플로우와 항복응력, 유하시간과 소성점도와의 관계식을 제시하였다. 연구결과를 기반으로, AAS 모르타르 및 콘크리트를 제작하는데 참고자료로 제시하고자 한다.

핵심용어 : AAS 페이스트, 레올로지, 소성점도, 항복응력