

물-결합재 비와 잔골재-결합재 비에 따른 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 기초특성

The Fundamental Properties of Alkali-Activated Slag Cement (AASC) Mortar with Different Water-Binder Ratios and Fine Aggregate-Binder Ratios

김 태 완^{1)*} 함 형 길²⁾ 이 성 행³⁾ 엄 장 섭⁴⁾
Tae-Wan Kim Hyung-Gil Hahm Seong-Haeng Lee Jang-Sub Eom

Abstract

This study investigates the fundamental properties of the water-binder (W/B) ratio and fine aggregate-binder (F/B) ratio in the alkali-activated slag cement (AASC) mortar. The W/B ratios are 0.35, 0.40, 0.45, and 0.50, respectively. And then the F/B ratios varied between 1.00 and 3.00 at a constant increment of 0.25. The alkali activator was an 2M and 4M NaOH. The measured mechanical properties were compared, flow, compressive strength, absorption, ultra sonic velocity, and dry shrinkage. The flow, compressive strength, absorption, ultra sonic velocity and dry shrinkage decreased with increases W/B ratio. The compressive strength decreases with increase F/B ratio at same W/B ratio. Also, at certain value of F/B ratio significant increase in strength is observed. And S2 (river sand 2) had lower physical properties than S1 (river sand 1) due to the fineness modulus. The results of experiments indicated that the mechanical properties of AASC depended on the W/B ratio and F/B ratio. The optimum range for W/B ratios and F/B ratios of AASC is suggested that the F/B ratios by 1.75~2.50 at each W/B ratios. Moreover, the W/(B+F) ratios between 0.13 and 0.14 had a beneficial effect on the design of AASC mortar.

Keywords : Water-binder (W/B) Ratio, Fine aggregate-binder (F/B) Ratio, Alkali-activated slag cement (AASC), NaOH

1. 서 론

최근 국내외적으로 알칼리 활성화 시멘트 (Alkali Activated Cement; 이하 AAC)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. AAC는 산업부산물인 고로슬래그 (furnace slag), 플라이애시 (fly ash) 등을 이용하여 CO₂의 발생량을 줄이고 에너지의 사용을 감소시키며 폐자원의 재활용이라는 관점에서도 중요 대상이 되어 다양하고 많은 연구결과가 나타나고 있다.

AAC에 대한 연구는 페이스트 (paste), 모르타르 (mortar) 그리고 콘크리트 (concrete) 등의 시험체를 사용하여 그 특성을 연구한다. 그러나 AAC의 특성을 연구하는데 필요한 시험체에 대해 아직까지 일정한 배합 기준이 정해져 있지 않다. 단지 포틀랜드 시멘트를 사용한 시험의 경우 각국의 표

준규정에 따라 압축강도 또는 길이변화 등의 측정에 특정 배합을 명시하고 있다. KS L 5105에서는 시멘트 : 표준사를 1 : 2.45에 혼합수의 양은 사용 시멘트 무게의 48.5%로 규정하고 있고, KS L ISO679는 시멘트 : 표준사를 1 : 3에 물/시멘트 비를 0.5로 규정하고 있다. ASTM C109는 시멘트 : 표준사의 비 1 : 2.75, 물-시멘트 비 0.485로 규정하고 있다.

그러나 AAC 모르타르의 배합은 연구자들마다 각 국가의 시멘트 배합에 관련된 표준규정을 따르기도 하고 각자의 연구에 맞는 다양한 배합을 적용하기도 한다 (Kang et al., 2011; Maochieh and Ran, 2013; O. Burciaga-Diaz et al., 2013; Cahit et al., 2013; Kim et al., 2012). 이는 아직까지 AAC 반응 메커니즘에 대한 연구가 진행되고 있으며, AASC 모르타르 배합에 대한 명확한 기준의 정립되지 않아 다양한 배합이

1) 정희원, 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원, 공학박사, 교신저자
2) 정희원, 부산대학교 토목공학과 교수
3) 정희원, 부산대학교 토목공학과 교수
4) 정희원, 창신대학교 토목공학과 부교수

* Corresponding author : ring2014@naver.com

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

사용되고 있는 것으로 판단된다. 일반적으로 모르타르의 배합은 결합재 (binder), 잔골재 (fine aggregate) 그리고 배합수 (water)의 혼합 비율에 따라 물리적 특성에 영향을 받는다. 따라서 각 재료들의 혼합비가 AAC 모르타르의 특성 연구에 중요한 요인 중 하나라 할 수 있을 것이다. 기존의 AAC를 사용한 콘크리트 및 모르타르에 대한 연구는 물-결합재 비, 잔골재-결합재 비, 잔골재의 크기, 입형, 조립률, 종류 등에 따른 많은 연구결과들이 발표되어 있다 (Kang et al., 2011; Lee et al., 2007; Yang et al., 2009; C. Ruiz-Santaquiteria et al., 2012; Chao et al., 2010; Ferando et al., 2008). 그러나 AAC 연구는 대부분이 활성화재의 종류, 농도, 양생 방법 및 온도, 배합 방법 등에 치중되어 있고 결합재와 배합수 그리고 잔골재의 혼합 비율에 따른 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 이는 AAC에 대한 연구가 기존의 포틀랜드 시멘트에 관한 연구보다 상대적으로 근래에 시작되었고, 아직까지 명확한 반응 메커니즘이 규명되지 않은 이유 때문으로 판단된다. 따라서 AAC의 활용과 그 특성을 파악하기 위해서는 반응 메커니즘의 분석과 더불어 배합에 소요되는 재료들 간의 상관관계에 대한 연구도 함께 병행되어야 할 것으로 판단된다. 최근 일부 연구자들이 AAC에서 W/B 비의 영향에 관한 연구를 수행한 경우도 있었다 (Kang et al., 2011; Yang et al., 2012; C. Ruiz-Santaquiteria et al., 2012, Susan et al. 2011; Benny and George, 2012). 그러나 AASC 또는 AAC에서 잔골재-결합재 또는 물-결합재와 잔골재-결합재의 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구는 고로 슬래그 미분말을 기본으로 하는 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 (Alkali-Activated Slag Cement; AASC) 모르타르의 물-결합재 (W/B) 비와 잔골재-결합재 (Fine aggregate/Binder; 이하 F/B) 비를 통해 AASC 모르타르의 물리적 특성에 대한 기초연구 자료를 제시하고자 하였다.

2. 실험

본 연구는 AASC 모르타르의 배합에 영향을 미치는 요소로 W/B 비와 F/B 비를 통해 물리적 특성에 대해 연구하고자 한다.

2.1 재료 (materials)

본 연구에 사용된 고로슬래그 미분말은 포항의 K사 제품을 사용하였으며, 성분은 XRF 분석을 통해 Table 1에 나타

내었다.

잔골재는 강모래 (river sand)를 사용하였고, 본 연구에서는 두 종류의 강모래를 사용하였다. 두 종류의 강모래는 동일 장소에서 채취한 것으로 강모래2 (river sand 2; S2)는 강모래1 (river sand 1; S1)의 체가름 결과를 바탕으로 입도를 조정하여 조립률만 달리 한 것이다. S1은 조립률 (FM) 2.65, 밀도 0.0026 g/mm³, 흡수율 0.86이고 S2는 조립률 (FM)이 3.12이다. 두 종류의 잔골재에 대한 입도분포곡선은 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 S2는 입도 조정 후 표준입도 (KS F 2526)를 벗어난 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에 사용된 알칼리 활성화재는 수산화나트륨 (NaOH)으로 국내외 AASC 연구에서 많이 사용되고 있는 활성화재 중 하나이다. 본 연구에 사용된 제품은 국내 S사의 고순도 (extra pure)시약이다.

Table 1 Chemical and physical properties of blast furnace slag

	Slag	
	Chemical components (%)	
	SiO ₂	29.67
	Al ₂ O ₃	9.90
	Fe ₂ O ₃	0.68
	CaO	56.03
	MgO	1.99
	TiO ₂	0.78
	MnO	0.37
	Ig-loss	0.34
Physical properties		
	Blain (m ² /kg)	420
	Density (g/mm ³)	0.0029

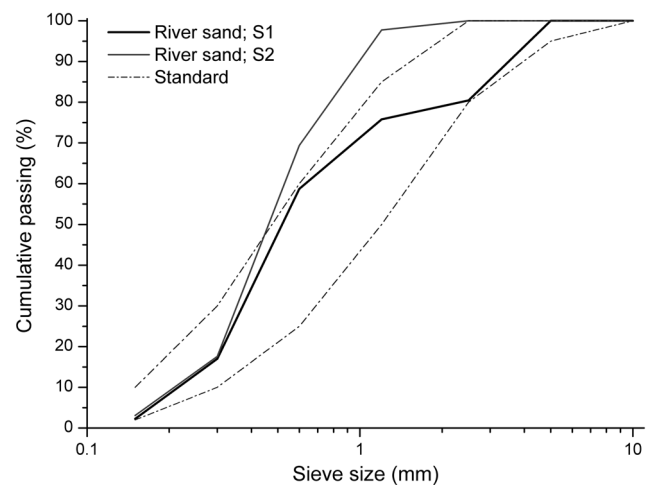


Fig. 1 Sieve Test

2.2 배합 (mix properties)

본 연구에서 수행된 AASC 모르타르의 배합은 국내외 선행연구를 참고하여 W/B 비는 0.35, 0.40, 0.45, 그리고 0.50의 네 종류로 하였고, F/B 비는 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50, 2.75 그리고 3.00의 아홉 가지로 분류하였다. 모든 배합은 고로슬래그 미분말의 중량을 일정하게 유지하고 W/B 비에 따라 배합수를, 그리고 F/B 비에 따라 잔골재의 양을 증감시키는 것으로 하였다. 그리고 알칼리 활성화제의 농도는 예비실험을 수행하여 본 연구에 사용된 고로슬래그와 활성화제인 NaOH의 강도 특성과 배합의 비교 및 기존의 연구결과 등을 참고하여 2M과 4M의 두 종류로 하였다.

본 연구의 실험요인을 Table 2에 나타내었다.

모르타르 시험체의 제작은 중량비로 각각의 W/B 비와 F/B 비에 따라 계량하여 비빔한 다음 50×50×50mm 몰드에 타설하고, 상대습도 60±5%, 23±2℃ 항온항습기에 넣고 1일 (24h) 후 몰드를 탈형한 뒤 측정일까지 수증 양생하였다. 건조수축은 40×40×160mm 몰드를 사용하여 KS F 2424에 따라 측정하였고, 초음파 측정을 위해 100×100×400mm 시험체를 제작하여 동일 양생방법으로 양생하고, 측정 재령에서 초음파 속도를 측정하였다.

Table 2 Factors and levels considered

Factor	Level	Index
F/B ratio (Binder : Fine Aggregate)		
F	1	1.00
	2	1.25
	3	1.50
	4	1.75
	5	2.00
	6	2.25
	7	2.50
	8	2.75
	9	3.00
W/B ratio		
W	1	0.35
	2	0.40
	3	0.45
	4	0.50
Dosage of Activator (Mole)		
D	1	2
	2	4
Fine aggregate Type (River sand)		
S	1	River sand 1
	2	River sand 2

2.3 실험 방법 (experimental program)

본 연구는 W/B 비와 F/B 비에 따른 AASC의 물리적 기초 특성에 관한 연구로 다음과 같은 실험을 수행하여 그 특성을 파악하고자 하였다. 모르타르 배합의 초기특성으로는 플로우 (KS L 5111)를 측정하였다. 압축강도 시험은 KS L 5105의 기준에 따라 재령 3, 7, 28일에서 공시체 3개씩 실험한 후 평균값을 사용하였고, 흡수율 시험은 KS F 2518 “석재의 흡수율 및 비중 시험방법”을 따라 시험하였다. 본 연구에 사용한 KS F 2518 흡수율 측정 방법은 다른 방법에 비해 시험 방법이 간단하고 흡수율을 계산하는 공식도 직관적으로 쉽게 알 수 있어서 시편간의 상대적인 흡수율을 비교분석하는 본 연구의 범위에서는 충분할 것으로 판단하여 선택하였다. 건조수축은 KS F 2424 “모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험방법”에 따라 수행하였고, 초음파 시험은 100×100×400mm 시험체의 양 끝에서 수신자와 발신자를 이용하여 측정하고, 수신자와 발신자를 바꾸어 다시 측정한 값의 평균을 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

AASC 모르타르의 물리적 특성에 영향을 미치는 배합 요인에 대한 연구를 위해 플로우, 압축강도, 흡수율, 초음파 속도 그리고 건조수축을 측정하였다.

3.1 플로우 (flow)

W/B 비와 F/B 비의 변화에 따른 유동특성은 플로우 값을 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보면, 활성화제의 농도에 관계없이 W/B 비가 증가하면 유동성은 증가하고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 특성은 일반적인 포틀랜드 시멘트를 사용한 모르타르에서도 나타나는 W/B 비의 증가에 따른 특성과 유사함을 알 수 있다. 또한 동일 W/B 비에서 각각의 F/B 비가 증가할수록 유동성이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 잔골재 (F)양이 증가함에 따라 상대적으로 모르타르내의 페이스트 (paste)양을 감소시키고, 이렇게 감소된 페이스트는 잔골재와의 부착력을 감소시키고, 증가된 잔골재들 사이의 마찰을 증가시켜 유동성을 감소시키는 것으로 판단된다. 동일 W/B 비와 F/B 비에서 유동특성을 비교하면 S2가 S1에 비해 상대적으로 유동성이 증가하였는데, 이는 S2의 조립률이 S1의 조립률보다 큰 영향을 준 것으로 판

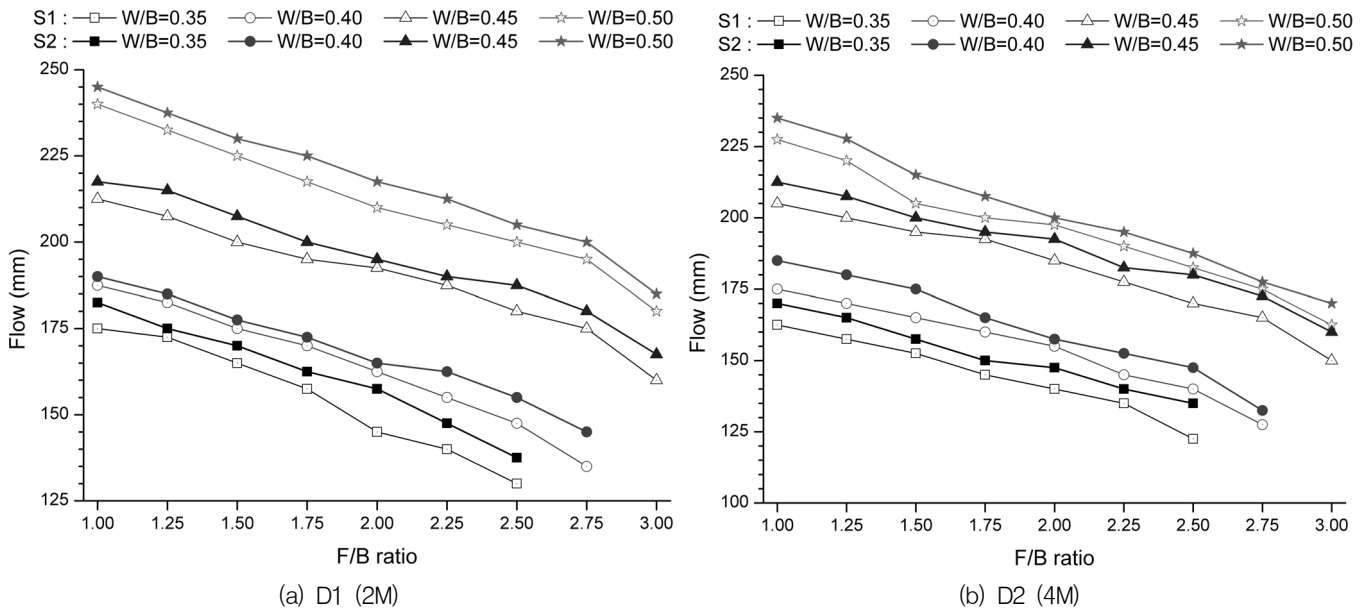


Fig. 2 Flow test

단된다.

두 잔골재 (S1과 S2) 모두 W/B 비가 0.35일 때 F/B 비가 0.27인 경우와 3.00인 경우, W/B 비가 0.40일 때 F/B 비가 3.00인 경우는 잔골재양과 비교하여 상대적으로 적은 배합수로 인해 비빔이 되지 않았다.

3.2 압축강도 (compressive strength)

Fig. 3은 W/B 비와 F/B 비에 따른 압축강도 특성을 나타내고 있다. 압축강도를 측정된 3, 7 그리고 28일 재령에서 W/B 비가 증가할수록 강도는 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 기존의 포틀랜드 시멘트를 사용한 모르타르에서도 나타나는 경향으로 AASC에서도 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 또한 동일 W/B 비에서 F/B 비가 1.0에서 3.0으로 증가함에 따라 압축강도는 대체로 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 각각의 W/B 비와 F/B 비에 따른 압축강도 값의 차이가 크지 않았는데, 이는 본 연구에서 고려된 W/B 비는 0.05 단위이고 F/B 비는 0.25 단위로 세분화되어 각각의 비 (ratio) 사이에 배합수 (W) 또는 잔골재양 (F)의 차이가 작아 상대적으로 압축강도 값의 차이가 적게 발생한 것으로 판단된다.

각 W/B 비에 대한 압축강도에서 F/B=1.0에서의 강도가 큰 것은 잔골재의 양이 적고, 다른 배합들 보다 치밀한 조직을 형성할 수 있는 페이스트의 양이 상대적으로 증가하였기 때문으로 판단된다. 그러나 잔골재양이 점차 증가할수록 압

축강도가 감소하는 경향이 지속되다가 특정 F/B 비에서 압축강도가 증가하는 특이점이 존재하는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 특이점은 각각의 W/B 비에 대하여, 모든 측정재령, 두 종류의 활성화제 농도 (D1, D2) 및 잔골재의 종류 (S1, S2)에 따른 압축강도 그래프에서 모두 확인 할 수 있었다. 이러한 특이점의 존재는 AASC 모르타르의 강도에 영향을 주는 요인으로 기존의 국내외 연구에서 연구되어온 활성화제의 종류, 농도, 슬래그의 물성, 분말도, 양생방법, 양생온도 등의 여러 요소와 함께 잔골재와 결합재의 양적관계도 고려되어야 할 요소로 생각할 수 있다. 또한 AASC의 강도에 영향을 미치는 적정 잔골재의 양 또는 잔골재의 비가 특정 값이나 범위로 존재할 것으로 판단된다.

활성화제의 농도에 따른 강도 특성은 AASC의 일반적인 경향을 나타내고 있었다. 즉, 동일 W/B 비와 F/B 비에서 활성화제의 농도가 2M (D1)에서 4M (D2)로 증가하면 강도도 증가하고 있었다. 이러한 결과는 기존의 AAC 또는 AASC 연구결과들 (Lee et al., 2007; Susan et al., 2011; C. Ruiz-Santaquiteria et al., 2012)과 유사한 것으로, 활성화제의 농도가 증가하면 고로슬래그 미분말의 활성화 반응이 증가하고 그에 따라 반응 생성물의 생성이 촉진되고 구조가 치밀해지는 특성을 가지기 때문으로 판단된다.

S2를 사용한 경우 압축강도는 S1에 비해 각 재령에서 3~10% 감소한 것으로 나타났다. 이는 잔골재 S2와 S1의 입자 크기 차이에 따른 것으로 판단된다. S2 잔골재는 S1 잔골재에 비해 상대적으로 큰 입자가 포함되어 있고, 이는 조립률을 통

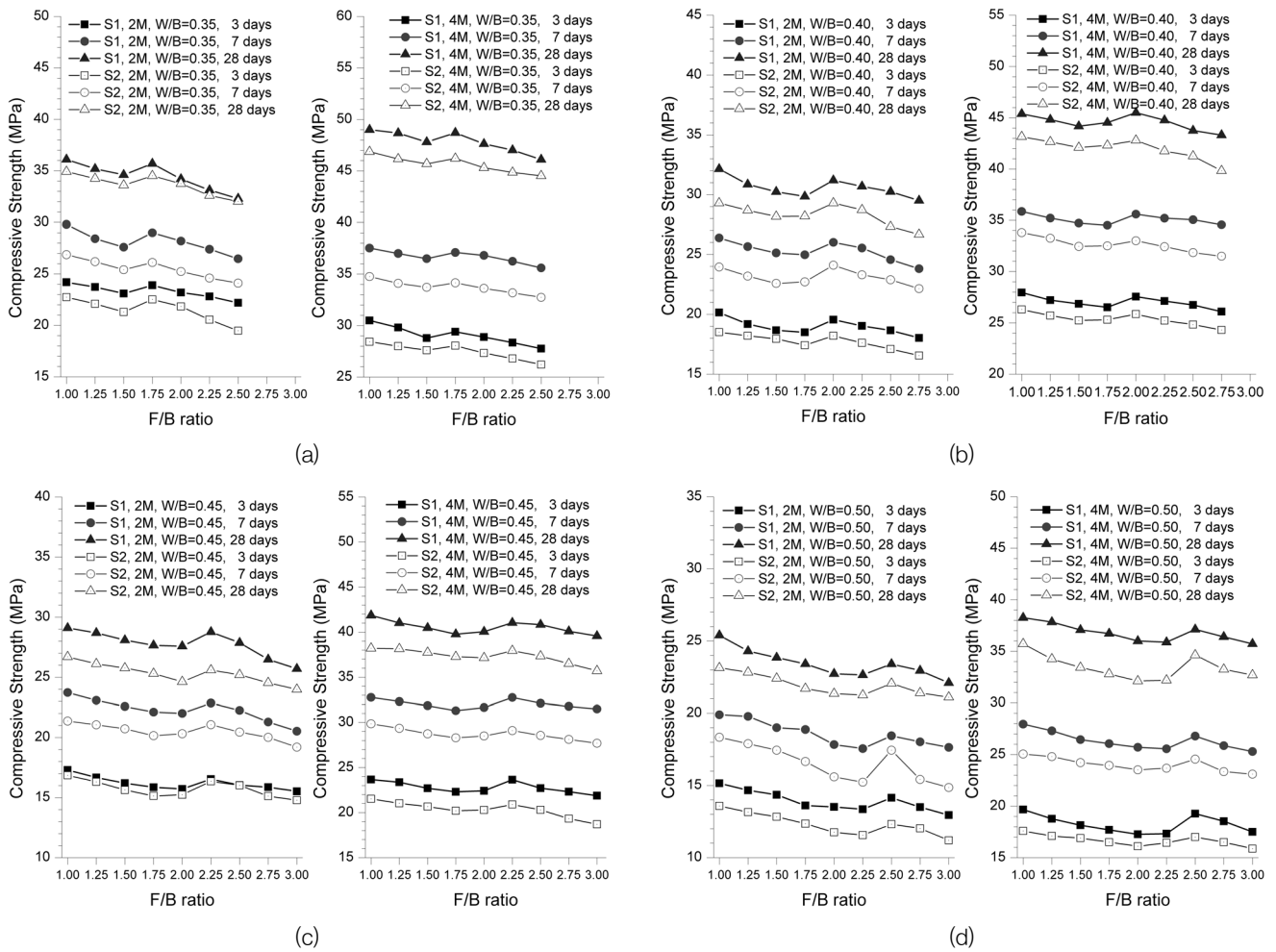


Fig. 3 Compressive strength

해 확인 할 수 있었다. 입자가 큰 잔골재를 사용하거나, 입자가 큰 잔골재양이 증가하면 강도가 감소하는데, 이는 입자가 클수록 골재사이의 미세공극의 양이 증가하고, 골재와 골재 사이의 맞물림 작용 (interlock)이 감소하고, 페이스트와 골재 경계면 사이의 부착력 감소 등으로 시험체의 강도가 감소하는 것으로 판단된다.

Table 3은 Fig. 3에 나타난 압축강도 결과 중에서, 높은 강도 (higher strength)가 발생하는 F/B 비의 값을 요약한 것이다. 여기서 높은 강도 (higher strength)는 동일 W/B 비에서 F/B=1.0일 때의 강도를 제외하고 F/B 비가 증가함에 따라 감소하던 강도가 갑자기 증가하는 특이점에서의 강도를 높은 강도 (higher strength)라고 하였다.

높은 강도가 발생된 F/B 비의 값은 잔골재의 종류 (S1, S2)와 활성화제의 농도 (D1, D2)에 관계없이 W/B 비가 0.35일 때 F/B 비는 1.75, W/B 비가 0.40일 때 F/B 비는 2.00, W/B 비가 0.45일 때 F/B 비는 2.25, W/B 비가 0.50일 때는 F/B

Table 3 Summarized W/B and F/B ratio

Dosage	Type of Fine aggregate	W/B ratio	F/B ratio (at higher strength)
D1	S1	0.35	1.75
		0.40	2.00
		0.45	2.25
		0.50	2.50
		0.35	1.75
D2	S2	0.35	1.75
		0.40	2.00
		0.45	2.25
		0.50	2.50
		0.35	1.75

비가 2.50일 때 높은 압축강도가 측정되었다. 이러한 높은 강도가 측정된 F/B 비는 측정재령 동안 같은 F/B 비에서 높은 강도가 나타났다. 예를 들어 SID1의 W/B=0.35의 경우 (Fig. 3(a)) 재령 3일 때는 F/B=1.75에서 높은 강도가 측정되었고, 재령 7일과 28일 때도 F/B=1.75에서 높은 강도가 측정되었다. 특히 W/B=0.50일 때 (Fig. 3(d)) 높은 강도는 F/B 비가 2.5일 때 나타났는데 이는 Yang et al. (2009)의 연구결과 중 슬래그를 사용한 AAC 모르타르의 강도 결과와 동일한 경향을 나타내고 있음을 보여 주었다. 또한 Ferbado Pacheco-Torgal et al. (2007)와 Benny Joseph and George Mathew (2012) 등의 연구에서 나타난 바와 같이 골재의 양 또는 비가 강도특성에 영향을 미치며, 강도가 증가하는 특정 잔골재 비 또는 양이 존재하는 것을 언급하였다. 이는 본 연구에서 나타난 강도특성과 유사한 결과를 갖는 것으로, 잔골재의 양 또는 비에 따라 강도가 증가하는 특이점이 존재할 것으로 판단할 수 있다.

두 종류의 잔골재 (S1, S2)에서 높은 강도가 나타나는 F/B 비가 동일한 것은 본 연구에 사용된 두 종류의 잔골재가 조립률만 다르고 나머지 특성이 거의 동일한 것도 원인중 하나일 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 사용된 두 종류의 잔골재만으로는 조립률의 특성을 고려한 결과를 도출하기엔 다소 부족한 것으로 판단된다. 다만, 본 연구결과를 바탕으로 조립률을 좀 더 세분화하여 실험한다면 AAC의 최적 배합에 관한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 측정된 높은 강도들은 각 재령에서 서로 다른 잔골재의 종류와 활성화제의 농도에 따라 F/B 비가 1.00일 때의 강도와 비교하여 82.0~100.3% 범위의 값을 가진다.

현재까지 알려진 AAC 또는 AAC 모르타르에 대한 선행 연구를 살펴보면 대부분의 기존연구에 사용된 모르타르 배합의 F/B 비는 1.75에서 2.75사이의 범위가 가장 많은 것으로 나타났다. F/B 비가 1.00인 배합은 상대적으로 적은 잔골재 양으로 경제성이 감소되어 실제 건설재료의 배합으로 사용하기에는 다소 어려움이 있다고 생각된다. 따라서 건설구조물에 적용가능한 AAC의 배합을 고려하기 위해 F/B 비가 1.00인 경우와 비교 (control)하여 나머지 배합의 상대적인 특성을 분석하고자 하였다.

지금까지의 압축강도 결과에서 나타난 바와 같이 대체로 잔골재의 양과 배합수의 증가는 강도를 감소시키는 것으로 나타났다. 기존의 AAC에 대한 골재와 페이스트 간의 특성에 관한 연구 (Lee and Deventde, 2004; Brough and Atkinson, 2000)에서도 언급한 바와 같이 골재의 입자 크기가 증가하

거나, 골재의 양이 많아지면 AAC 페이스트와 골재간의 부착력이 감소하고, 경계면에 기포 증가 등으로 강도 특성에 영향을 미치는 것으로 언급하고 있다. 따라서 F/B 가 증가함에 따라 강도가 감소하는 본 연구 결과도 유사한 경향을 보여주고 있다. 그러나 F/B 비가 증가함에 따라 감소하던 압축강도가 특정 F/B 비에서는 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 특이점의 존재는 앞서 언급한 경계면 특성과 페이스트 양의 감소 이외에 배합수-결합재-잔골재 간에 강도에 영향을 미치는 상관관계가 존재 할 것으로 판단된다. 최근까지 알려진 대부분의 기존연구는 이러한 잔골재, 결합재 그리고 배합수 등의 배합요소에 대한 상관관계의 분석이나 영향요인에 대한 고려가 깊이 다루어져 있지 않고 있는 것으로 판단된다.

Table 4는 W/B 비와 F/B 비에 따른 압축강도 특성 분석을 위해 W/(B+F) 비를 계산한 것이다. W/(B+F) 비는 배합수가 주로 결합재인 고로슬래그 미분말의 활성화 반응에 사용되고, 일부는 잔골재의 표면수로, 그리고 잔골재에 흡수되는 미소한 수량까지 고려하여 배합수-결합재-잔골재의 상관관계를 수식으로 나타내어 그 영향관계를 알아보고자 하였다. 각 W/B 비에서 F/B 비가 증가함에 따라 감소하던 압축강도가 증가하는 특이점을 표시하면 W/(B+F) 비의 값이 0.13~0.14에서 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 W/B 비와 F/W 비를 고려한 본 연구의 결과를 통해 배합수-결합재-잔골재 관계인 W/(B+F) 비를 사용하여 배합설계 시 적정 범위를 추정할 수 있을 것으로 판단한다.

이러한 상관관계는 잔골재 간의 맞물림 작용 (interlocking), 잔골재와 페이스트 간의 물리적 부착력 (bond strength), 잔골재와 페이스트의 치밀화 (densification) 그리고 알칼리로 활성화된 페이스트와 골재 표면의 화학적 부착력 등이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 4 W/(B+F) ratio

F/B \ W/B	0.35	0.40	0.45	0.50
1.00	0.18	0.20	0.23	0.25
1.25	0.16	0.18	0.20	0.22
1.50	0.14	0.16	0.18	0.20
1.75	0.13	0.15	0.16	0.18
2.00	0.12	0.13	0.15	0.17
2.25	0.11	0.12	0.14	0.15
2.50	0.10	0.11	0.13	0.14
2.75	0.09	0.11	0.12	0.13
3.00	0.09	0.10	0.11	0.13

3.3 흡수율 (absorption)과 초음파 속도 (ultra-sonic pulse velocity)

흡수율은 KS F 2518에 제시된 다음의 식으로 측정하였다.

$$\text{흡수율}(\%) = \frac{B - A}{A} \times 100$$

여기에서, A : 건조 공시체의 질량 (g)

B : 침수 후 공시체의 질량 (g)

측정값은 시험체 3개의 측정값의 평균이며, 재령 28일 시험체를 사용하였다. Fig. 4는 흡수율 시험 결과이다. W/B 비가 낮을수록 흡수율도 낮게 나타났고 F/B 비가 증가할수록 흡수율은 증가하는 경향을 나타냈다. W/B 비가 감소하고 F/B 비 감소할수록 시험체 조직의 치밀화와 높은 W/B 비와 비교하여 상대적으로 적은 시험체 조직내의 공극크기와 양 등이 감소하여 흡수율을 감소시키는 것으로 판단된다. 압축 강도 결과에서 나타난 높은 강도가 측정되는 F/B 비에서 흡수율이 대체적으로 감소하는 경향을 보이고 있었다. 그러나 F/B 비가 3.0에 가까워질수록 많은 잔골재의 양과 상대적으로 적은 페이스트의 양, 그리고 그에 따른 유동성의 저하로 인한 배합과 다짐시 공기의 혼입, 다짐 불량 등으로 치밀한 시험체의 제작이 어려워진 것으로 판단된다.

Fig. 5는 초음파 속도를 측정된 결과이다. 초음파 속도의

특성도 W/B 비가 증가하고 F/B 비가 증가할수록 초음파 속도가 감소하는 경향을 나타냈다. 초음파 속도의 결과를 보면, 압축강도에서 높은 강도가 나타난 특정 F/B 비에서 초음파 속도가 증가한 것을 볼 수 있었다. 이는 잔골재의 종류와 활성화제의 농도와 관계없이 나타나고 있었다.

흡수율과 초음파 속도만으로는 시험체 내부의 조직구조 및 특성을 분석하는 것은 다소 어려움이 있지만, 대략적인 경향을 파악하고자 하였다. 흡수율과 초음파 속도의 결과를 통해서 AAC 모르타르 배합에 있어서 W/B 비에 따른 F/B 비의 영향을 평가하여 시험체 조직의 치밀화와 골재와 페이스트 간의 결합력에 영향을 주는 범위가 존재 할 것으로 생각할 수 있다. 또한 기존의 AAC 또는 AAC의 연구결과를 통해 확인된 바와 같이, 활성화제의 농도를 증가시키는 것은 고로슬래그 미분말의 활성화 반응을 촉진시키고 반응생성물의 생성 속도와 양에 긍정적인 영향을 미쳐 상대적으로 조직의 치밀화를 유도하는 것으로 판단된다.

3.4 건조수축 (dry shrinkage)

건조수축의 측정은 본 연구에서 고려된 배합의 수와 W/B 비와 F/B 비에 따른 AAC의 기초 특성에 대한 연구로써 한정된 범위를 고려하여 182일 동안 측정된 최종 건조수축을 Fig. 6에 나타내었다. 건조수축은 동일한 F/B 비의 조건에서 각각의 W/B 비에 따른 건조수축을 비교하면, W/B 비가 증가할수록 건조수축도 증가하는 경향을 나타내었다. F/B 비가

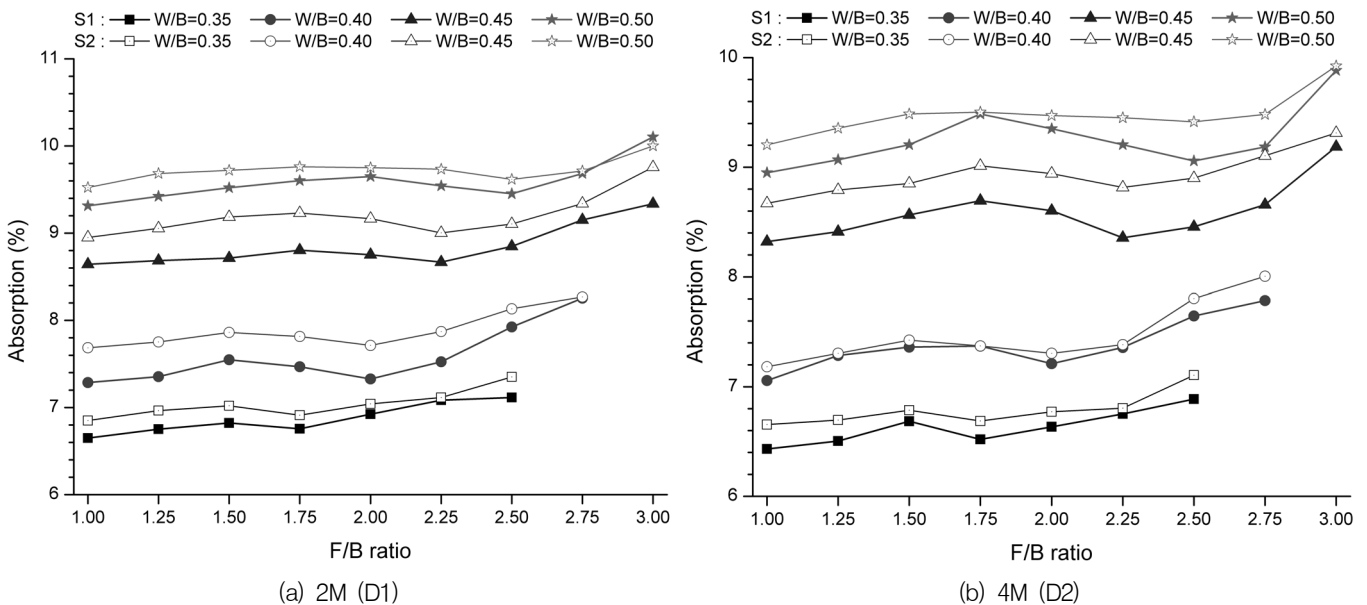


Fig. 4 Absorption

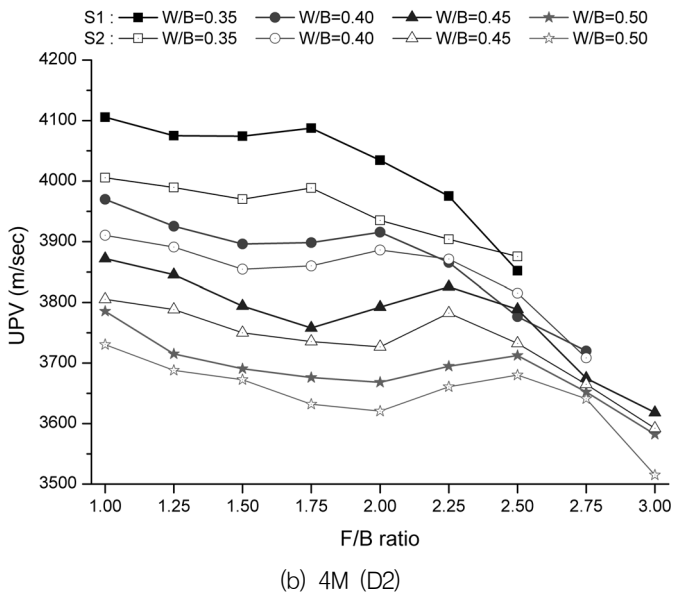
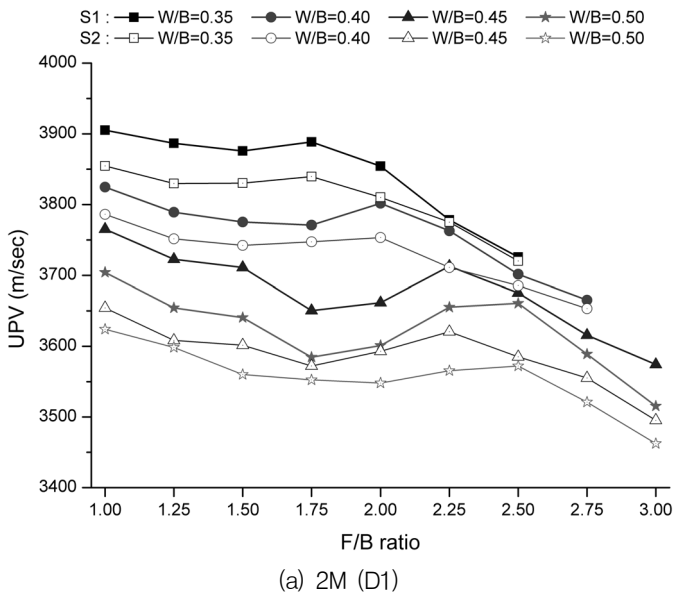


Fig. 5 UPV

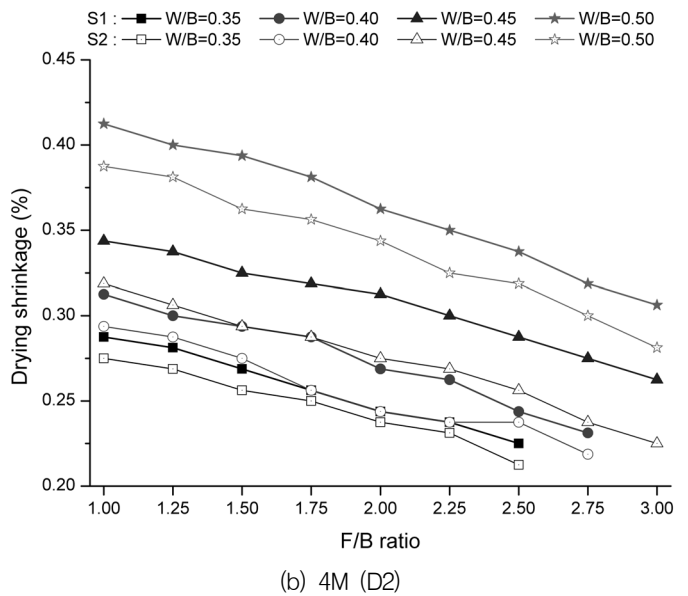
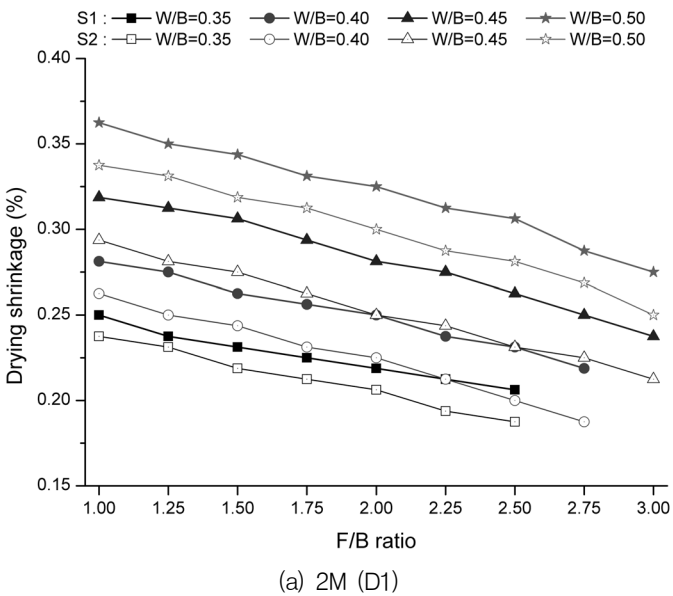


Fig. 6 Dry Shrinkage

1.00~2.50의 범위일 때 W/B=0.50의 건조수축은 W/B=0.35일 때 보다 40.9~50%까지 증가하는 것으로 나타났다. F/B 비가 2.75의 경우는 W/B=0.50일 때가 W/B=0.40인 경우보다 건조수축이 31.4~43.3% 크게 나타났고, F/B 비가 3.00인 경우는 W/B=0.50일 때의 건조수축이 W/B=0.45일 때보다 15.7~25% 정도 크게 나타났다. S1의 잔골재를 사용한 경우보다 S2의 잔골재를 사용한 경우가 동일한 W/B 비와 F/B 비에서의 건조수축을 비교할 때 건조수축을 감소시키는 효과가 있음을 알 수 있었다.

또한 동일 W/B 비에서도 F/B 비가 증가할수록 건조수축은 감소하는 것을 알 수 있었다. 각각의 W/B 비에서 배합 가능한 최대의 F/B 비와 F/B=1.00일 때를 비교하면 건조수축은 약 21.2~29.5% 감소하는 것으로 나타났다. 이 결과에서 나타난 바와 같이 AASC의 건조수축에 대한 영향은 W/B 비와 F/B 비가 함께 작용하는 것으로 생각된다. 그러나 AASC의 건조수축 특성 및 영향요소에 대한 연구는 아직까지 명확하게 밝혀진 것은 없다 (Antonio et al., 2008; Frank and Sanjayan, 2000; Atis et al., 2009). 다만, 본 연구에서 고려된 잔골재

의 입자 크기도 건조수축에 영향을 주는 요인으로 AASC의 배합설계가 고려되어야 할 중요 인자로 판단된다. AASC는 활성화제 농도에 따라 골재와 페이스트 경계면의 특성이 달라지므로 잔골재 입자와 페이스트 간의 물리적인 결합관계 뿐만 아니라 화학적 결합관계에 대한 특성 연구가 후속된다면 좀 더 명확하게 배합설계의 영향인자에 대한 분석을 할 수 있을 것으로 생각한다.

4. 결론

고로 슬래그 미분말을 이용한 알칼리 활성화 시멘트 (AASC)의 W/B 비와 F/B 비에 따른 물리적 기초 특성에 대한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서 고려된 유동성, 압축강도, 흡수율, 초음파 속도, 그리고 건조수축 모두 W/B 비가 증가하면 감소하는 것으로 나타났다. 또한 유동성, 초음파 속도와 건조수축은 F/B 비가 증가하면 감소하는 경향을 보이고 있으나, 흡수율은 F/B 비가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 F/B 비가 증가함에 따라 상대적으로 감소한 배합수량에 의해 비빔이 되지 않는 경우도 발생하였다.
- (2) 압축강도는 본 연구에서 측정된 특성 중 F/B 비에 따른 경향이 다른 측정요인들과 확연한 차이를 보여주었다. 특히 동일 W/B 비에서 F/B 비가 증가할수록 감소하던 압축강도는 특정 F/B 비에서 강도가 증가하는 특이점이 발생하는 것을 확인하였다. 요약하면 W/B=0.35 일 때 F/B=1.75, W/B=0.40일 때는 F/B=2.0, W/B=0.45 일 때 F/B=2.25, 그리고 W/B=0.50일 때는 F/B=2.50로 나타났다. 이는 배합수-결합제-잔골재 사이에 강도 향상에 영향을 주는 양적인 상관관계가 존재하는 것으로 판단된다.
- (3) 잔골재의 특성 중 조립률에 따른 두 종류의 잔골재를 통한 실험결과 건조수축을 감소시키는 데는 조립률이 큰 S2가 효과적이지만, 건조수축을 제외한 나머지 측정부분에서는 S1이 상대적으로 더 향상된 물리적 특성을 보였다.
- (4) AASC 모르타르의 W/B 비와 F/B 비에 따른 연구결과, 기초적 특성에 영향을 주는 W/B 비와 F/B 비가 존재하는 것으로 판단할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 AASC의 배합을 선정할 때 W/(B+F) 비를 활

용하여 0.13~0.14 범위에서 시험체를 제작한다면 기본적인 물리적 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 AASC 또는 AAC의 연구에서 모르타르 배합시 W/B 비와 함께 F/B 비를 고려한 물리적 특성에 관한 기초 연구자료를 제시하고자 하였다.

References

1. Atis, C. D., Bilim, C., Celik, O., Karahan, O., "Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 2009, pp.548-555.
2. Bernal, S. A., Mejia de Gutierrez, R., Pedraza, A. L., Provis, J. L., Rodriguez, E. D., Delvasto, S., "Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, 2011, pp.1-8.
3. Bilim, C., Karahan, O., Atis, C. D., Ilkentapar, S., "Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing conditions", *Materials and Design*, Vol. 44, 2013, pp.540-547.
4. Burciaga-Diaz, O., Diaz-Guillen, M. R., Fuentes, A. F., Escalante-Garcia, J. I., "Mortars of alkali-activated blast furnace slag with high aggregate : binder ratios", *Construction and Building Materials*, Vol. 44, 2013, pp.607-614.
5. Chi, M., Huang, R., "Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars", *Construction and Building Materials*, Vol. 40, 2013, pp.291-298.
6. Collins, F., Sanjayan, J. G., "Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp.1401-1406.
7. Han, C. G., Shin, B. C., Kim, G. C., Lee, S. T., "Influence of Grading and Grade Shape in Aggregate on the Strength and Absorption of Cement Mortar Products", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 12, No. 1, 2000, pp.45-51 (in Korean).
8. Joseph, B., Mathew, G., "Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete", *Sharif University of Technology*, Vol. 19, 2012, pp.1188-1194.
9. Kang, S. T., Ryu, G. S., Koh, K. T., Lee, J. H., "Optimum Mix Design of Alkali-Activated Cement Mortar Using Bottom Ash as Binder", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 4, 2011, pp.487-494 (in Korean).
10. Kim, T. W., Park, H. J., Seo, K. Y., "Influence of Blended Activators on the Physical Properties of Alkali-activated Slag Mortar", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 16, 2012, pp.26-33 (in Korean).
11. Lee, W. K. W., J. van Deventer, J. S., "The interface between natural siliceous aggregates and geopolymers", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp.195-206.
12. Lee, Y. J., Jee, N. Y., Kim, J. H., "The Experimental Study for Application of Alkali Activated Slag Concrete", *Journal*

- of the Architectural Institute of Korea, Vol. 23, No. 2, 2007, pp.99-106 (in Korean).
13. Li, C., Sun, H., Li, L., "A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements", Cement and Concrete Research, Vol. 40, 2010, pp.1341-1349.
 14. Neto, A. A. M, Cjncotto, M. A., Repette, W., "Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement", Cement and Concrete Research, Vol. 38, 2008, pp.565-574.
 15. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S., "Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanism and hydration products", Construction and Building Materials, Vol. 22, 2008, pp.1305-1314.
 16. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S., "Investigations about the effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders", Cement and Concrete Research, Vol. 37, 2007, pp.933-941.
 17. Ruiz-Santaquiteria, C., Skibsted, J., Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., "Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of aluminosilicates", Cement and Concrete Research, Vol. 42, 2012, pp.1242-1251.
 18. Yang, K. H., Cho, A. R., Song, J. K., "Effect of water-binder ratio on the mechanical properties of calcium hydroxide-based alkali-activated slag concrete", Construction and Building Materials, Vol. 29, 2012, pp.504-511.
 19. Yang, K. H., Song, J. K., Lee, K. S., Ashraf F. Ashour, "Flow and Compressive Strength of Alkali-Activated Mortars", ACI Materials Journal, Vol. 106, 2009, pp.50-57.

Received : 03/13/2013
 Revised : 06/25/2013
 Accepted : 07/12/2013

요 지

본 연구는 물-결합재 비 (W/B)와 잔골재-결합재 비 (F/B)에 따른 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 (AASC)의 기초 특성에 관한 연구이다. W/B 비는 0.35, 0.40, 0.45, 그리고 0.50를 선정하였다. 그리고 F/B 비는 1.00에서 3.00까지 0.25 크기로 고려하였다. 알칼리 활성화제는 2M과 4M의 NaOH를 사용하였다. 실험은 플로우, 흡수율, 압축강도, 초음파 속도 그리고 건조수축을 측정하여 비교하였다. 플로우, 압축강도, 흡수율, 초음파 속도 그리고 건조수축 모두 W/B 비가 증가하면 감소하였다. 압축강도는 동일 W/B 비에서 F/B 비가 증가할수록 감소하였다. 또한 특정 F/B 비에서 강도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 S2 (river sand 2)는 S1 (river sand 1)보다 낮은 물리적 특성을 나타냈는데, 이는 조립률 때문으로 판단된다. 본 실험의 결과 AASC의 공학적 특성은 W/B 비와 F/B 비가 영향을 주는 것으로 판단된다. 최적의 F/B 비는 각 W/B 비에 대해 1.75~2.50 인 것으로 생각된다. 또한 W/(B+F) 비가 0.13과 0.14 사이일 때 AASC 모르타르의 배합설계가 효과적인 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 물-결합재 비 (W/B), 잔골재-결합재 비 (F/B), 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 (AASC), NaOH