



실리카 폼이 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 강도특성에 미치는 영향

김태완 ^{1)*}

¹⁾부산대학교 생산기술연구소

Influence of Silica Fume on Strength Properties of Alkali-Activated Slag Mortar

Tae-Wan Kim ^{1)*}

¹⁾Research Institute of Industrial Technology (RIIT), Pusan National University, Busan 609-735, Korea

ABSTRACT This paper reports the results of an investigation into the effects of silica fume on strength properties of alkali-activated slag cement (AASC) with water-binder (W/B) ratio and replacement ratio of silica fume content. The W/B ratio varied between 0.50 and 0.60 at a constant increment of 0.05. The silica fume content varied from 0% to 50% by weight of slag. The activators was used sodium hydroxide (NaOH) and the dosage of activator was 3M. The strength development with W/B ratio has been studied at different ages of 1, 3, 7 and 28 days. For mixes of AASC mortars with varying silica fume content, the flow values were lower than the control mixes (without silica fume). The flow value was decrease as the content of silica fume increase. This is because the higher surface areas of silica fume particles increase the water requirement. The analysis of these results indicates that, increasing the silica fume content in AASC mortar also increased the compressive strength. Moreover, the strength decreases with the W/B ratios increases. This is because the particle sizes of silica fume are smaller than slag. The high compressive strength of blended slag-silica fume mortars was due to both the filler effect and the activated reaction of silica fume evidently giving the mortar matrix a denser microstructure, thereby resulting in a significant gain in strength.

Keywords : alkali-activated slag cement (AASC), blast furnace slag, silica fume, strength

1. 서 론

알칼리 활성화 시멘트(alkali-activated cement, 이하 AAC)는 산업부산물을 이용한 환경 친화적 콘크리트 제조에 관심을 가지면서 그 연구 분야가 확대되고 있다. 플라이애쉬(fly ash, 이하 FA)나 고로슬래그(ground granulated blast furnace slag, 이하 SG) 등의 산업부산물을 활용한 연구는 기존의 OPC에 대해 부분 치환한 콘크리트의 사용은 보편화되고 있다. 최근에는 이러한 산업부산물을 활용한 콘크리트의 연구에 있어 플라이애쉬와 고로슬래그와 같이 알루미늄과 실리카 성분을 다량으로 함유한 재료에 알칼리 활성화제를 혼합한 알칼리 활성화 시멘트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 플라이애쉬나 고로슬래그가 함유한 알루미늄과 실리카 성분이 높은 pH(≥ 12)를 갖는 알칼리 활성화제 의해 용해와 합성을 통해 경화되는 기본적인 반응을 전

제로 한다.¹⁾ 최근까지의 연구를 살펴보면 알칼리 활성화제로는 일반적으로 수산화나트륨, 규산나트륨, 수산화칼륨, 탄산나트륨 또는 무기질 재료인 석고, 소석회, 인산부산석고 등이 일반적으로 사용되었다.²⁻⁴⁾ 그러나 FA 및 SG의 성분, 분말도, 활성화제의 농도, 양생온도, 습도, 배합조건 등에 따라 다양한 결과가 나타나기 때문에 아직까지 알칼리 활성화 시멘트의 명확한 반응기재와 배합방법 등이 제시되어 있지 않아 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

특히 다양한 산업부산물을 활용한 알칼리 활성화 시멘트의 제작에서 SG는 제철소에서 발생하는 부산물로서, AAC 연구에 많이 사용되고 있다. 최근에는 FA, SG, 메타카올린(metakaolin) 및 실리카 폼(silica fume, 이하 SF)를 혼합한 다성분계 시멘트 및 AAC에 관한 연구가 이루어졌다.⁵⁻⁹⁾

실리카 폼(SF)은 실리콘, 페로실리콘, 실리콘메탈 생산 산업에서 발생하는 부산물로서, 가스형태로 생성되어 포집된 비정질의 산화물(SiO_2)이다. 무정질 상태의 실리카를 80% 이상 함유하고 있으며 크기는 대부분 $1 \mu\text{m}$ 이하로 매우 미세하면서도 구형의 입자이다. 양질의 실리카 폼을 사용하면 포졸란 반응을 통해 수화초기부터 공극충전효과에 따른 강도증진을 나타내고 콘크리트의 물리적, 역학

*Corresponding author E-mail : ring2014@naver.com

Received November 13, 2012, Revised February 13, 2013,

Accepted March 6, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

적 특성을 개선시킬 수 있다. 또한 실리카 폼은 알칼리 골재반응을 억제하고 화학 저항성을 개선하며, 동결융해 저항성도 우수한 특성을 지닌다.¹⁰⁻¹²⁾ 그러나 실리카 폼은 분말도가 매우 미세하므로 사용량이 많아질 경우 소정의 워커빌리티를 얻기 위해 많은 혼합수와 다량의 혼화제가 필요로 하게 된다. 기존의 콘크리트에서 밝혀진 실리카 폼의 특성¹³⁻¹⁷⁾을 알칼리 활성화 시멘트에도 실리카 폼을 활용하면 몇몇 물리적, 역학적 성질의 개선을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 국내외 연구에서 알칼리 활성화 시멘트에 실리카 폼을 활용한 연구사례가 적어 그 특성에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

따라서 이 연구에서는 고로슬래그를 이용한 알칼리 활성화 시멘트의 특성을 연구하는 기초단계로서, 고로슬래그와 실리카 폼을 혼합한 혼합체의 알칼리 활성화 특성에 대한 기초적인 강도특성을 연구하고자 한다.

2. 실험계획

실리카 폼(SF)과 고로슬래그(SG) 미분말 혼합체의 알칼리 활성화 반응을 통한 강도 특성을 연구하기 위해서 SF의 치환율을 슬래그 중량의 50%까지 5% 단위로 하였다. SF는 높은 분말도로 인해 치환율이 커지면 급격한 유동성 저하가 발생하므로 유동성에 미치는 영향과 이 연구의 목적인 강도 특성을 고려하여 5%의 치환율 단위를 결정하였다. 또한 물-결합재비(W/B)와 고로슬래그의 종류를 다르게 하여 실리카 폼 혼합에 따른 알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 강도 특성을 살펴보고자 하였다.

2.1 사용재료

이 연구를 위해 사용한 두 종류(slag 1, slag 2)의 고로슬래그 미분말은 포항의 K사 제품을 사용하였으며, 실리카 폼은 S사의 제품을 사용하였다. 각각의 성분은 XRF 분석을 통해 Table 1에 나타내었다. AASC의 특성에 미치는 슬래그의 성분에는 연구자들마다 다양한 의견들이 있다. 특히, 염기도(basicity)를 계산하는 방식이 널리 통용되고 있는데, 연구자들마다 다양한 염기도를 정의^{18,20)}하고 있다. 이 연구에 쓰인 두 종류의 고로슬래그에 대한 염기도를 국내외 여러 연구 논문을 통해 조사하여 다음과 같은 3개의 식으로 계산해 보았다.

$$K_b = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \quad (1)$$

$$K_b = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \quad (2)$$

$$K_b = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \quad (3)$$

Table 1 The properties of blast furnace slag and silica fume

		Slag 1	Slag 2	Silica fume
Chemical components (%)	SiO ₂	29.67	32.18	94.24
	Al ₂ O ₃	9.90	11.25	0.57
	Fe ₂ O ₃	0.68	0.92	1.33
	CaO	56.03	45.36	0.42
	MgO	1.99	3.60	1.51
	TiO ₂	0.78	0.45	-
	MnO	0.37	0.17	0.19
	SO ₃	-	4.94	-
Physical properties	K ₂ O	0.48	0.63	-
	Ig-loss	0.34	0.48	1.53
	Blain (m ² /kg)	420	420	22000
	Density	2.90	2.86	2.28

두 고로슬래그의 염기도를 계산하면 식 (1)은 1.49와 1.16이고 식 (2)는 1.46과 1.12, 식 (3)은 2.28과 1.87로 모두 1 이상의 염기도 값을 갖는다. 염기도는 3그룹으로 분류하고 있는데,¹⁸⁾ 산성(acid; $K_b < 1$), 중성(neutral; $K_b = 1$) 그리고 염기성(basic; $K_b > 1$)이며 대부분의 연구에서 염기도가 1 이상인 염기성의 고로슬래그를 AASC의 재료로 사용하고 있다. 또한 몇몇 선행 연구자¹⁸⁾들은 AASC의 재료로 사용하는 고로슬래그의 화학성분 비를 몇 가지 정의하고 있는데, CaO/SiO₂는 0.5에서 2.0의 값을, Al₂O₃/SiO₂는 0.1에서 0.6의 범위의 고로슬래그가 해당된다고 하였다. Slag 1과 slag 2의 CaO/SiO₂는 각각 1.88과 1.12이고, Al₂O₃/SiO₂는 0.33과 0.35로 제시된 범위에 속하는 것을 볼 수 있다. 선행 연구자에서 제시된 화학성분 비의 범위나 관계도 아직까지 명확한 AASC의 반응 메커니즘을 설명하고 있지는 않고 있다. 다만, 대체적인 경향을 파악하는데는 제시된 범위가 참고가 될 수 있다고 판단된다.

그러나, 고로슬래그 성분들의 관계나 성분의 차이에 의한 특성은 명확히 밝혀지지 않아, 아직도 많은 연구가 진행 중이다. 이 연구에서는 고로슬래그의 성분이 실리카 폼의 치환에 따른 강도 특성에 미치는 기초적인 영향을 파악하기 위해 두 종류의 고로슬래그 미분말을 선택하였다. 이는 이 연구의 결과를 바탕으로 이어질 후속 연구인 미세구조(micro-structure) 특성 파악에도 활용하기 위함이다. 잔골재는 강모래로 조립률(FM) 2.7, 밀도 0.0026 g/mm³, 흡수율 1.25이다. 배합에 사용된 혼화제는 고성능 감수제로 황색 분말형태로 R사의 제품이다.

2.2 배합 및 시편제작

2.2.1 배합

실험을 위해 W/B는 0.50, 0.55, 0.60의 세 가지로 하고, 실리카 폼의 치환율을 슬래그 중량의 0%에서 50%까지

5% 단위로 하였다. W/B의 결정에서 고로슬래그 미분말의 양은 세 종류의 W/B 모두에서 일정하게 유지하고, 단위수량만을 변화시켜 배합하였다. 이 연구에 사용된 알칼리 활성화제는 S사의 수산화나트륨(sodium hydroxide; NaOH)이고, 활성화제의 농도는 예비실험과 기존의 국내외 연구를 참고하여 3M로 정하였다. 모르타르 배합 전에 배합수에 적정량의 NaOH를 투입하여 3M 농도의 수용액으로 만들어 두고, 재료의 혼합시에 혼합용기에 부어 사용하였다.

각 실험 CASE와 고려요소는 Table 2에 나타내었다. Table 2에서, L은 이 연구에 사용된 두 종류의 슬래그를 의미하며, W는 W/B 비를 나타낸다. 그리고 S는 슬래그를 실리카 폼으로 치환한 비율을 나타내는 것으로, S0는

Table 2 Factors and levels considered

Factor	Level	Index	
L	1	Slag 1	
	2	Slag 2	
W	1	W/B = 0.50	
	2	W/B = 0.55	
	3	W/B = 0.60	
		Slag	Silica fume
S	0 (control)	100	0
	1	95	5
	2	90	10
	3	85	15
	4	80	20
	5	75	25
	6	70	30
	7	65	35
	8	60	40
	9	55	45
	10	50	50

실리카 폼을 치환하지 않은(슬래그 100%) 배합으로 실리카 폼을 치환한 배합과 비교를 위한 컨트롤(control)로 정하였다.

2.1.2 시편제작

모르타르 시편의 제작은 중량비로 고로슬래그 미분말 : 잔골재를 1:2.0으로 하고, 단위수량은 세 종류의 W/B에 따라 고로슬래그 미분말의 중량에 대해 0.50, 0.55, 0.60으로 하여 일정시간 비빔한 다음 50×50×50 mm 몰드에 타설하고 상대습도 55±5%, 23±2℃의 항온항습기에 넣은 뒤 1일(24h) 후 몰드를 제거하고 측정일까지 수증 양생하였다. 전자주사현미경(scanning electron microscopy; 이하 SEM; HITACHI-S4700) 관찰을 위한 이미지는 압축강도 측정 후 파쇄된 시편을 아세톤에 24h 침지시킨 다음, 24h 건조 후 관찰하였다.

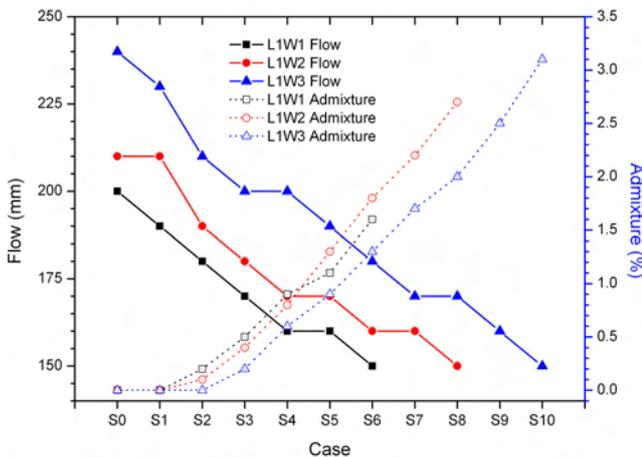
3. 결과 및 고찰

세 종류의 W/B와 두 종류의 고로슬래그 및 실리카 폼의 치환율에 따른 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 강도 특성을 살펴보았다. 강도 특성을 알아보기 위해 플로우와 압축강도 그리고 SEM 관찰을 하였다.

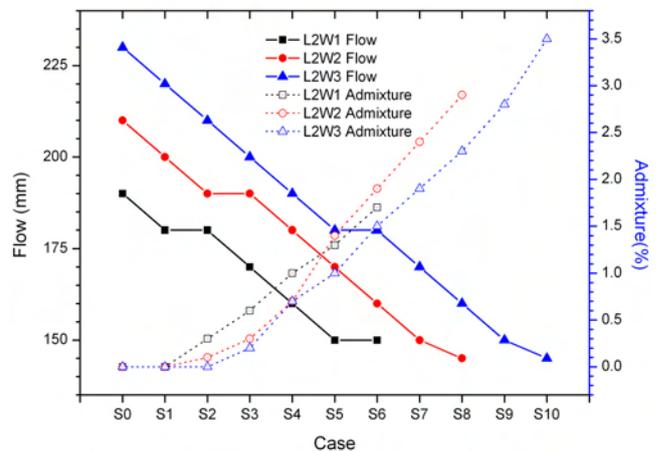
3.1 플로우

실리카 폼을 치환한 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 유동특성을 알아보기 위해 플로우 실험을 하였으며 그 결과는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 실선은 오른쪽의 플로우 값, 점선은 왼쪽의 고성능 감수제(admixture) 첨가량을 나타내었다. 고성능 감수제의 첨가량은 예비실험을 통해 모르타르의 유동성이 작업의 난이도와 몰드의 성형성 등을 고려하여 120±10 mm 이상의 값을 갖도록 적정 고성능 감수제를 혼합하였다.

유동성 측정 결과, 실리카 폼의 치환은 알칼리 활성화



(a) L1 (slag 1)



(b) L2 (slag 2)

Fig. 1 The results of flow test

슬래그 모르타의 유동성을 저하시키는 것으로 나타났다. 특히 실리카 폼의 치환율이 증가할수록 실선으로 나타낸 유동성은 급격히 감소하고 있음을 확인할 수 있었다. 실리카 폼의 치환율 증가에 따른 유동성을 확보하기 위해 고성능 감수제를 투입하였지만, 실리카 폼 치환율이 높아지면 점선으로 나타낸 고성능 감수제의 투입량이 증가하여도 유동성의 개선효과는 미미하였고 오히려 점성이 증가하여 모르타의 다짐작업과 성형 작업 등이 어려워졌다. 일반적으로 고성능 감수제의 첨가량이 증가하면 유동성은 개선되지만, 실리카 폼의 치환율이 증가하는 이 연구의 경우에는 실리카 폼의 높은 분말도가 유동성의 증가보다는 점성의 증가에 영향을 미쳐 플로우 향상을 저해하는 것으로 판단된다.

두 종류의 고로슬래그(L1, L2) 모두 W1(W/B=0.50)의 경우, 실리카 폼 치환율이 30%(S6)이상은 비빔을 할 수 없었고, W2(W/B=0.55)는 40%(S8)까지, W3(W/B)는 50%(S10)의 치환범위에 대한 비빔이 가능하였다.

이러한 결과는 기존의 시멘트(OPC)와 실리카 폼의 연구와 실리카 폼을 포함한 다성분계 선형 연구에서도 언급한 바와 같이 실리카 폼의 높은 분말도로 인한 단위수량 부족 때문으로 판단된다.

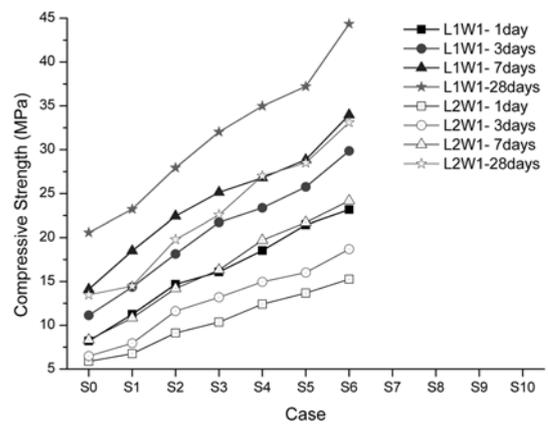
3.2 압축강도

각각의 측정 재령에서 실리카 폼 치환율과 물-결합재 비(W/B)에 따른 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 압축강도 측정 결과를 나타낸 것이 Fig. 2이다.

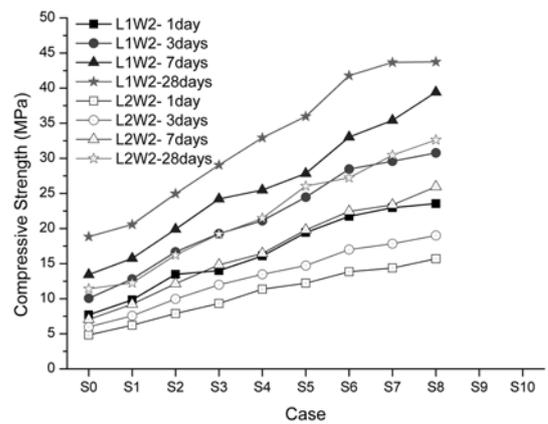
두 종류의 슬래그(L1, L2) 모두 물-결합재 비(W/B)에 관계없이 실리카 폼의 치환율이 증가할수록 강도가 증가하고 있음을 알 수 있었다. 이 연구에 사용된 두 슬래그의 성분 차이가 S0의 압축강도 차이를 유발하는 요인 중 하나일 것으로 판단된다. AAC에서 슬래그 성분에 따른 강도 특성에 관한 연구는 아직까지 진행 중인 부분으로 이 연구에서도 두 슬래그의 성분 차이가 강도 특성에 미치는 영향을 판단하기에는 다소 부족하며 후속 연구를 통해 보완되어야 할 부분으로 생각한다. 다만, 슬래그의 성분에 관계없이 실리카 폼의 치환율이 증가할수록 강도 증가 효과가 있음을 알 수 있었다.

이러한 결과는 해외의 선행연구^{7,8,19)}에서 언급된 것과 같이, 유동성이 확보되는 실리카 폼 치환율 범위 안에서는 실리카 폼의 치환율이 증가할수록 실리카 폼의 풍부한 Si 성분이 CSH(calcium silicate hydrate) 생성에 일정 부분 역할에 기여하고, 실리카 폼의 높은 분말도에 의한 공극 충전효과도 강도 증진에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 그러나 실리카 폼의 높은 치환율은 배합시 점성이 증가하여 치밀한 조직의 형성이 어려워지고, 배합시 기포의 형성에 따른 공극의 증가가 강도 향상에 부정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

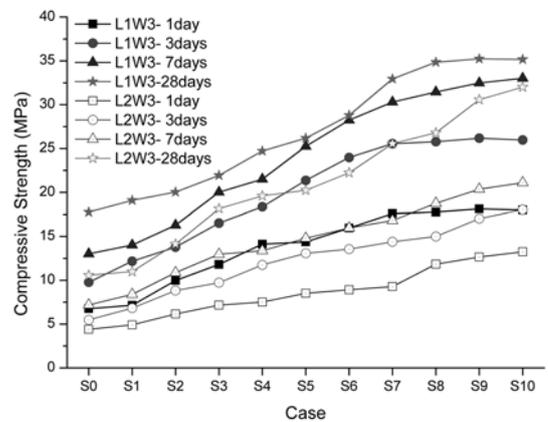
두 종류의 고로슬래그 미분말에 대한 각 재령별 강도



(a) W1 (W/B=0.50)



(b) W2 (W/B=0.55)



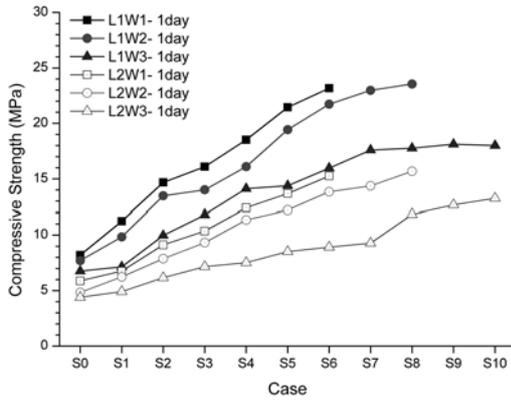
(c) W3 (W/B=0.60)

Fig. 2 The compressive strength with W/B ratio.

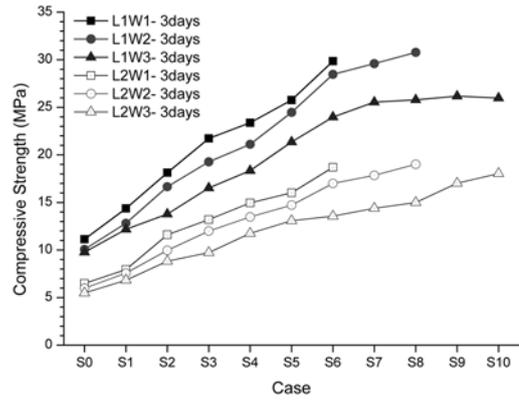
특성을 나타낸 것은 Fig. 3이다.

W/B에 따른 강도 특성에서는 모든 재령(1, 3, 7, 28일)에서 물-결합재 비(W/B)가 낮은(W1=0.50)경우에 압축강도가 크게 나타났다. 이는 결합재(binder)의 양을 일정하게 유지하고 단위수량(W)만 증가시킨 물-결합재비(W/B)의 영향으로 판단된다.

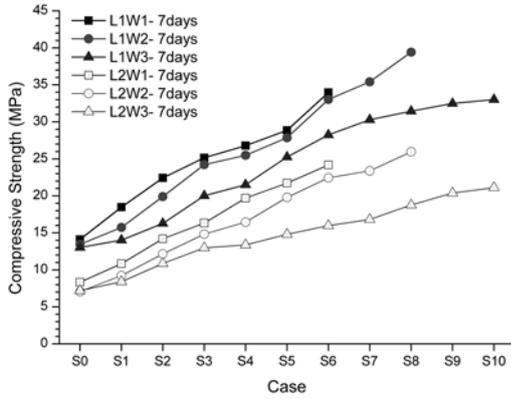
Fig. 4은 28일 압축강도를 기준으로 실리카 폼을 치환하지 않은 S0(control)와의 상대 강도를 비교한 것이다. L1(slag 1)의 경우 W1(W/B=0.50)은 S6(SF 치환율 30%),



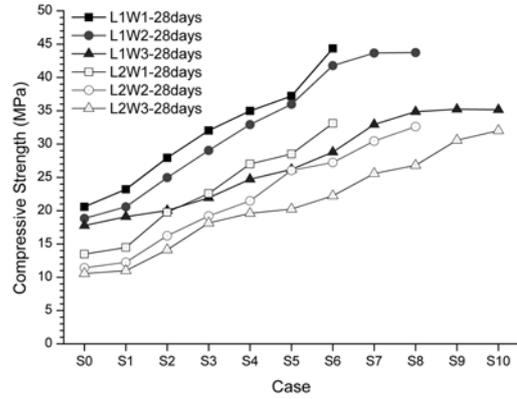
(a) 1 day



(b) 3 days



(c) 7 days



(d) 28 days

Fig. 3 The compressive strength with curing age

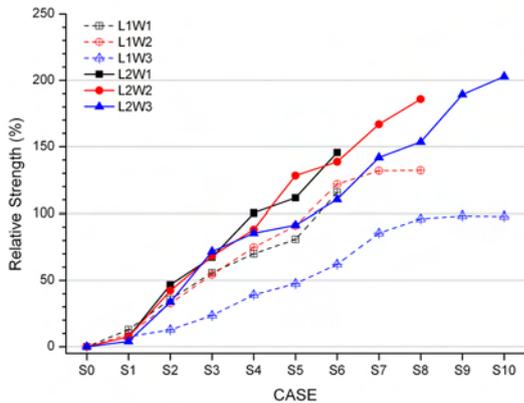


Fig. 4 Relative strength at 28 days

W2(W/B=0.55)는 S6(SF 치환율 30%), W3(W/B=0.60)은 S10(SF 치환율 50%)일 때 S0의 2배(상대강도 100%이상)에 이르렀다. L2(slag 2)의 경우 W1(W/B=0.50)은 S4(SF 치환율 20%), W2(W/B=0.55)는 S5(SF 치환율 25%), W3(W/B=0.55)은 S6(SF 치환율 30%)일 때 S0의 2배(상대강도 100% 이상)에 이르렀다. 또한 L1W2와 L2W3의 경우 실리카 폼 치환율에 최대에 가까워지면서 시험체 압축강도의 증가율이 둔화되는 것을 보여주고 있다. 이는 압축강도 부분에서 설명한 배

합시 점성의 증가와 그에 따른 치밀한 조직 형성의 어려움 및 배합시 기포의 혼입 등에 따른 영향으로 판단된다.

고로슬래그 미분말의 종류에 따른 압축강도의 비교에서는 L1이 L2 보다 동일 재령과 동일 실리카 폼 치환율에서 더 높은 압축강도가 나타났다. 상대강도의 비교에서는 L2의 상대강도 증가량이 L1의 상대강도 증가량보다 큰 것으로 나타났다. 압축강도 결과에서 실리카 폼을 치환하지 않은 AAC(S0)의 강도와 실리카 폼을 치환한 AAC의 상대강도 증가량의 차이는 두 종류의 고로슬래그 미분말의 성분 차이 때문으로 추정된다. 아직까지 AAC의 반응에 영향을 미치는 고로슬래그의 성분에 대한 연구가 진행중이지만, 이 연구에 사용된 두 슬래그의 성분차이가 초기 압축강도의 차이 및 재령에 따른 상대강도 증가율에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이러한 고로슬래그의 성분 차이에 의한 강도 특성의 영향을 검토하기 위해 Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 이 연구에 사용된 두 슬래그(L1, L2)에 대한 성분비를 실리카 폼의 치환율에 따라 나타낸 것이다. 여기서 a는 SiO_2/CaO 비이고, b는 KS F 2563에 정의된 고로슬래그 미분말의 염기도(basicity coefficient, $(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$)를 나타낸다.

염기도는 고로슬래그의 반응성과 관계있으며, 이는 강도특성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹⁷⁾ 이 연구

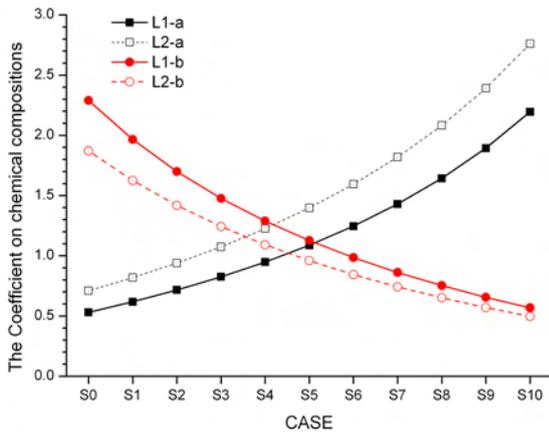


Fig. 5 The coefficient on chemical compositions

에 사용된 두 고로슬래그 미분말에 대해 살펴보면, L1이 L2보다 높은 염기도를 가지고 있는데 이러한 염기도 차이가 활성화 반응에 의한 초기강도의 차이를 유발하는 요인 중 하나일 것으로 판단된다. 실리카 폼의 치환율이 증가할수록 두 고로슬래그 미분말의 염기도도 감소하고 있었다. 그리고 실리카 폼의 치환율이 증가함에 따라 두 슬래그간의 염기도 차이도 감소하고 있지만, 두 슬래그의 동일 재령에서의 압축강도는 그 차이가 줄어들지는 않았다. 또한 SiO_2/CaO 비의 변화를 통해 실리카 폼의 치환율에 따른 강도증가율의 차이를 살펴보면 L2 슬래그의 SiO_2/CaO 비의 증가율이 L1과 비교하여 큰 값을 나타내고 있다. 이는 실리카폼을 치환한 알칼리 활성화 고로슬래그 모르타르의 초기강도 발현 특성은 염기도와, 실리카 폼의 치환율에 따른 강도증가율의 차이는 SiO_2/CaO 비의 차이로 추론할 수 있다. 실리카 폼 치환율이 증가할수록 고로슬래그 혼합분체 내의 SiO_2 의 양은 증가한다. 그러나 증가된 SiO_2 가 혼합분체 내의 CaO 와 결합하여 반

응성 물질을 만드는 것은 정량적인 관계가 존재할 것으로 판단된다. 이 연구의 한정된 결과만으로는 염기도와 SiO_2/CaO 비로 실리카 폼 치환율에 다른 강도 특성을 모두 설명하기에 부족한 부분이 있다. AAC 연구자들은 다양한 염기도를 정의하고, 또는 특정 성분과의 관계를 수식화하여 AAC의 메커니즘을 설명하려는 시도는 많지만, 아직까지는 명확한 성분과 AAC 메커니즘과의 관계를 나타내는 것은 어려움이 있다고 알려져 있다. 이 연구의 강도특성에 대한 영향인자 고려 요인으로 추가적인 미세연구를 통해 혼합분체내의 다른 성분과 알칼리 활성화제의 농도, 혼합수의 양 등도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통해 실리카 폼의 치환은 알칼리 활성화 고로슬래그 모르타르의 강도 증가에 효과적이지만, 고로슬래그 미분말의 성분에 따른 초기강도와 실리카 폼 치환에 따른 강도증가율에는 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서 추후 연구를 통해 고로슬래그를 구성하는 각 성분들의 차이에 따른 AAC의 특성에 대한 고찰이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3.3 SEM 관찰

28일 반응 생성물의 관찰을 위해 SEM을 이용하여 Fig. 6에 그 일부를 나타내었다. 실험 시편의 개수가 많고, 실리카 폼의 치환율이 5%씩 단계적으로 증가하면서 인접한 치환율 단계의 시험체에 대한 SEM 이미지들의 차이가 미미하여 실리카 폼을 치환하지 않은 S0와 치환율이 높은 시험체 중 반응생성물 또는 내부구조를 명확히 볼 수 있는 일부 시편을 선정하여 나타내었다.

실리카 폼을 치환한 시험체의 SEM 관측 결과, 실리카 폼을 치환하지 않은 시험체의 경우(Fig. 6(a)-(f))에는 판상의 반응물질들을 관찰할 수 있었다. 실리카 폼 치환율

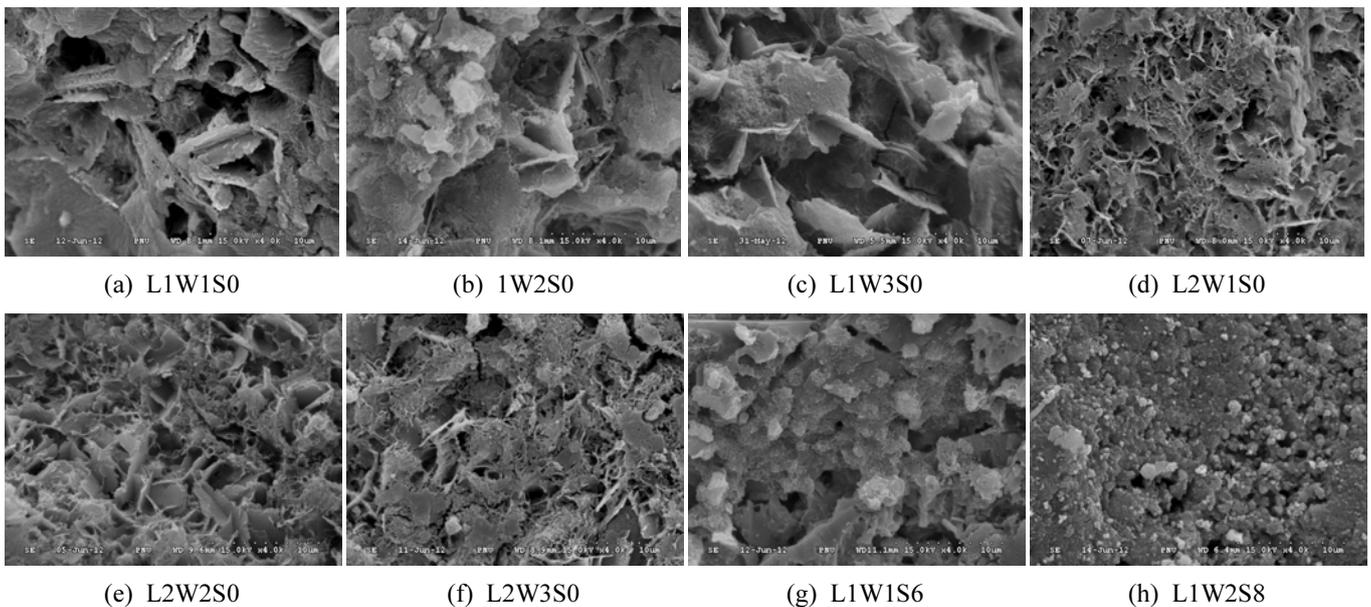


Fig. 6 SEM images (continued)

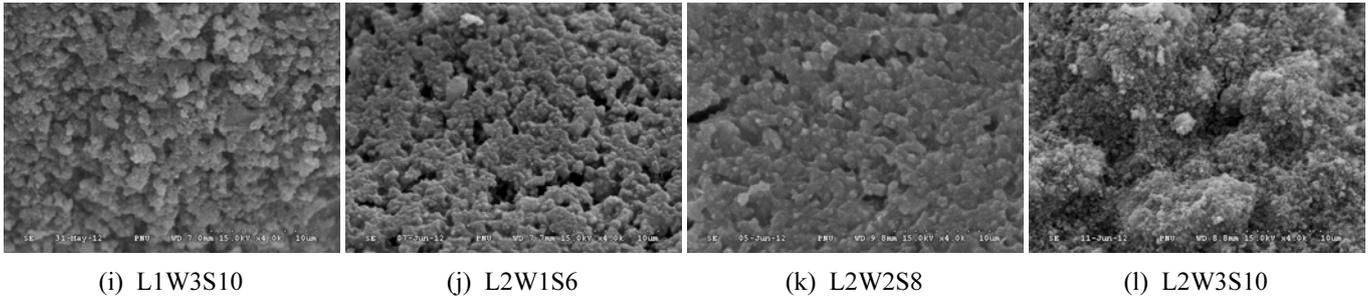


Fig. 6 SEM images

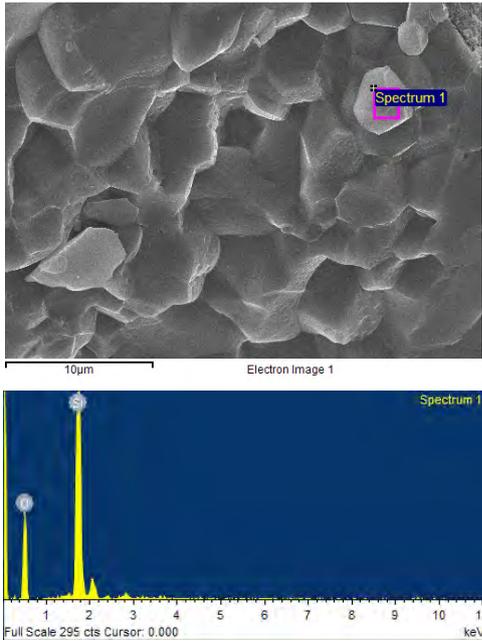


Fig. 7 EDS analysis image (L1W3S10)

이 높은 시험체에서는 부분적으로 활성화된 고로 슬래그 미분말 입자와 실리카 폼 입자들이 반응 생성물의 표면에 넓게 요철형상으로 분포되어 있는 것을 볼 수 있었다 (Fig 6(g)-(l)). 실리카 폼의 치환은 고로슬래그의 활성화 반응에 의해 생성된 CSH와 aluminosilicate gel에 의해 형성된 조직에 실리카 폼의 공극충전 효과와 실리카 폼의 풍부한 Si 성분에 의한 반응생성물의 형성에 일정 부분 효과가 있다고 판단된다. 이러한 결과는 W. Wonhkeo et al.,⁷⁾ T. Nochaiya et al.,⁸⁾ 그리고 S. A. Barbhuiya et al.¹⁹⁾ 등이 수행한 연구에서도 언급된 특성과 유사한 경향을 나타내는 것으로 생각된다.

그러나 실리카 폼의 치환율이 높은 경우 모르타르의 점성 증가로 인해 다짐 등이 원활하게 이루어지지 않아 일부 미반응 실리카 폼이 묻혀져 있는 곳이 관찰되기도 하였다(Fig. 7). 따라서 충분한 실리카 폼의 효과를 얻기 위해서는 유동성 확보가 우선되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

알칼리 활성화 슬래그의 W/B와 고로슬래그의 종류 및

실리카 폼 치환율에 따른 강도 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 실험 결과를 통해 실리카 폼의 치환율이 증가하면 유동성이 급격히 저하되고, 적정 유동성의 확보를 위해 고성능 감수제의 사용량이 증가하게 된다. 그러나 과도한 고성능 감수제의 사용으로도 일정 수준 이상의 유동성 확보는 어려우며 점성의 증가로 치밀한 조직을 형성하는 데 어려움이 있었다. 이러한 현상은 실리카 폼 치환율이 높아질 경우 시험체의 강도에도 일정 부분 영향을 주는 것으로 판단된다.
- 2) 이 연구에서 사용한 두 종류의 고로슬래그 미분말의 종류에 관계없이 실리카 폼의 치환은 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 강도를 증가시키는 것을 알 수 있었다. 이는 실리카 폼의 높은 분말도에 의한 공극충전효과와 알칼리 활성화에 의한 실리카 폼의 Si 성분이 고로슬래그의 활성화 과정에서 발생하는 반응생성물의 형성에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그러나 고로슬래그 미분말의 종류에 따른 초기강도와 실리카 폼 치환율에 따른 강도증가율 차이의 원인은 고로슬래그 미분말의 성분에 따른 것으로 생각되며, 추후 연구가 필요한 부분이라 판단된다.
- 3) 실리카 폼의 치환율에 따른 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 강도 특성에서, 강도 향상에 영향을 미치는 실리카 폼 치환율의 특정 범위는 찾을 수 없었고, 오히려 실리카 폼의 치환율이 증가할수록 강도가 증가하는 경향을 나타냈다. 따라서 충분한 유동성을 확보 할 수 있는 혼화제 또는 배합방법을 개발하여 더 높은 실리카 폼 치환율에서의 강도 특성에 대한 검토도 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- 4) 기존에 수행된 시멘트 또는 다성분계 분체 실험에서 실리카 폼을 사용한 국내외 선행연구 결과에서 보여진 것과 유사한, 실리카 폼의 치환율이 증가하면 유동성의 감소와 일정 수준의 강도 증가가 이루어지는 결과를 알칼리 활성화 슬래그 시멘트에서도 확인 할 수 있었다. 이는 실리카 폼이 알칼리 활성화 슬래그 시멘트의 강도 향상에도 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

실리카 폼은 알칼리 활성화 시멘트에 충분히 사용 가

능할 것으로 판단된다. 그러나 적정 수준의 실리카 폼 치환율과 그에 따른 유동성 확보를 위한 혼화제의 사용이나 배합방법 등이 뒷받침 되어야 할 것으로 판단된다.

References

1. Yang, K. H. and Song, J. G., "The Properties and Applications of Alkali-Activated Concrete with No Cement," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 2, 2007, pp. 42-48.
2. Park, C. W., Sim, J. S., Kang, T. S., and Park, S. E., "Environmental Assessment of Shotcrete Using Recycled Industrial By-Products (Fly Ash) and Silica Fume," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 3C, 2010, pp. 159-165.
3. Min, J. W., "The Statistical Hypothesis Verification to Influence of Addition of Metakaolin and Silica Fume on Compressive Strength and Chloride Ion Penetration of High Strength Concrete," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 15, No. 1, 2011, pp. 215-225.
4. Jeon, J. K., Moon, H. Y., Ann, K. Y., Kim, H. S., and Kim, Y. B., "Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag, Pulverized Fuel Ash, Silica Fume on Sulfuric Acid Corrosion Resistance of Cement Matrix," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 18, No. 2E, 2006, pp. 97-102.
5. Park, C. B., Kim, H. S., Jeon, J. Y., Kim, E. K., and Ryu, D. H., "Properties of Ternary or Quaternary High Strength Concrete Using Silica Fume & Meta Kaolin," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 3, 2008, pp. 307-315.
6. Choi, P. G., Shim, D. S., and Lee, B. H., "Characteristics of Ternary Blended Cement Concrete Using Fly Ash and Silica Fume for Post-Tensioned Concrete Pavement Application," *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 3, 2009, pp. 41-47.
7. Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., and Chaipanich, A., "Compressive Strength and Drying Shrinkage of Fly Ash-Bottom Ash-Silica Fume Multi-Blended Cement Mortars," *Materials & Design*, Vol. 36, 2012, pp. 655-662. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.043>)
8. Nochaiya, T., Wongkeo, W., and Chaipanich, A., "Utilization of Fly Ash with Silica Fume and Properties of Portland Cement-Fly Ash-Silica Fume Concrete," *Fuel*, Vol. 89, Issue 3, 2010, pp. 768-774. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.003>)
9. Thomas, M. D. A., Shehata, M. H., Shashiprakash, S. G., Hopkins, D. S., and Cail, K., "Use of Ternary Cementitious

- Systems Containing Silica Fume and Fly Ash in Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, Issue 8, 1999, pp. 1207-1214. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00096-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00096-4))
10. Lee, S. T., "Microstructural Investigation on the Deterioration of Silica Fume Blended Cement Matrix Under Magnesium Sulfate Attack," *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 12, No. 6, 2008, pp. 55-62.
11. Kim, C. G., Takashi Miura, and Kang, W. H., "Effectiveness of Silica Fume on Alkali-Silica Reaction in the Presence of Sodium Chloride and Sea Water," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 10, No. 5, 1998, pp. 129-137.
12. Guneyisi, E., Gesoglu, M., Karaoglu, S., and Mermerdas, K., "Strength, Permeability and Shrinkage Cracking of Silica Fume and Metakaolin Concretes," *Construction and Building Materials*, Vol. 34, 2012, pp. 120-130.
13. Kim, H. T., "The Characteristics and Application of Silica Fume and Silica Fume Concrete," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 3, No. 3, 1991, pp. 23-30.
14. Mazloom, M., Ramezani-pour, A. A., and Brooks, J. J., "Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-Strength Concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, Issue 4, 2004, pp. 347-357. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00017-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00017-9))
15. Park, S. B. and Yoon, E. S., "Experimental Study on the Mechanical Properties of Silica Fume and Fly Ash Cement Composites," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 6, No. 5, 1994, pp. 158-170.
16. Lee, S. T. and Lee, S. H., "Mechanical Properties and Durability of Cement Concrete Incorporating Silica Fume," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 47, No. 5, 2010, pp. 412-418.
17. Song, K. I., Lee, B. Y., Hong, G. H., Gong, M. H., and Song, J. K., "Effects of Basicity on the Carbonation Characteristics of Alkali-Activated Slag Mortar," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 5, 2012, pp. 577-584. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.5.577>)
18. Law, D. W., Adam, A. A., Molyneaus, T. K., and Patnaikuni, I., "Durability Assessment of Alkali Activated Slag (AAS) Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 45, 2012, pp. 1425-1437.
19. Barbhuiya, S. A., Gbagbo, J. K., Russell, M. I., and Basheer, P. A. M., "Properties of Fly Ash Concrete Modified with Hydrated Lime and Silica Fume," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 2009, pp. 3233-3239. (doi: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527.012.9842.1>)
20. Shi, C., Krivenko, P. V., and Roy, D. M., *Alkali-Activated Cements and Concrete*, Taylor & Francis, 2006, pp. 30-42.

요약 이 연구는 물-결합재(W/B) 비에 따른 실리카 폼이 알칼리 활성화 슬래그 시멘트(AASC)에 미치는 유동성과 강도 특성에 대한 연구이다. W/B비는 0.50에서 0.60까지 0.05 단위로 일정하게 변화시켰다. 실리카 폼은 고로슬래그 중량의 0%에서 50%까지 치환시켰다. 활성화제는 수산화나트륨(NaOH)를 사용하였고, 농도는 3M로 하였다. W/B 비에 따른 강도는 1, 3, 7 그리고 28일을 측정하였다. 유동성 측정 결과는 실리카 폼의 치환율이 증가할수록 감소하였다. 압축강도는 실리카 폼의 치환율이 증가할수록 증가하였다. 또한 W/B 비가 증가할수록 모든 재령에서 강도는 감소하였다. 실리카 폼은 W/B 비와 실리카 폼의 치환율에 따라서 활성화 반응을 증대시켜 강도를 증가시키는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 알칼리 활성화 슬래그 시멘트(AASC), 고로슬래그, 실리카 폼, 강도