

개질유황을 시멘트 대체 혼화재로 사용하기 위한 모르타르의 품질특성

The Quality Properties of Mortar for Using Hydraulic Modification Sulfur as Admixture for Cement

(Received May 31, 2011 / Revised June 22, 2011/ Accepted June 30, 2011)

김기형¹⁾ 신도철²⁾ 정호진³⁾ 이재남^{4)*} 김병권⁵⁾

¹⁾ 여주대학 토목과 ^{2),3),4)} SGS건설시험연구원 ⁵⁾Sampyo C&E

Ki-Hyung Kim¹⁾ Do-Chul Shin²⁾ Ho-Jin Jung³⁾ Jae-Nam Lee^{4)*} Byiung-Kwon Kim⁵⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Yeosu Institute of Technology, Gyeonggi-Do, 469-705, Korea

^{2),3),4)}SGS Construction Quality Test & Analysis, Gyeonggi-Do, 451-851, Korea

⁵⁾Sampyo C&E, Seoul, 146-1, Korea

Abstract

This study ascertained the possibility of use of sulfur abstracted from waste sulfur as a construction material through modification process and manufacturing high efficiency modification sulfur with superior quality on dispersibility and hydrophilic in normal temperature. Mechanic, behavior and chemical durability of mortar with added modification sulfur. The results of the study are as follows. The fluidity of mortar mixed with modification sulfur and compressive strength decreased as ratio of mixing of them increases. Flexural, tensile and bond strength of the mortar are also improved and shrinkage of it increases. Especially chemical durability of the mortar showed excellent resistance with the increase of ratio of mixing. Therefore this research has confirmed the modification sulfur can be used as a admixture for cement.

키워드 : 폐유황, 개질유황, 유동, 역학, 거동, 화학저항성

Keywords : Waste Sulfur, Modification Sulfur, Flow, Mechanic, Behavior, Chemical Durability

1. 서론

최근 세계적으로 원유정제의 증가 및 탈황 기술의 발달로 인하여 유황 발생량에 대한 수급의 차이가 커지고 있으며, 향후, 발생하는 폐유황의 다량 활용에 대한 대책이 없을 경우 폐기물 처리 및 환경오염으로 인한 경제적 손실이 우려되므로 폐유황의 다량 활용에 대한 대책이 시급한 실정이다.

특히, 국내의 경우 폐유황의 전량이 정유공장의 원유정제 및 분해 과정에서 부산물로 발생되고 있으며, 부산물로 발생한 유황은 각종 비료, 제지, 페인트, 비철공업, 제

강 및 의약품 등 많은 분야에서 필수적인 비금속 광물로 소비되었으나, 2003년부터 약 20만 톤 이상의 잉여 유황이 발생되기 시작하였다. 또한, 2007년부터 유황발생량이 급격하게 증가하여 2009년에는 유황 생산량이 190만 톤으로 세계 10대 유황 생산국이 되었으며¹⁾, 현재 수출량이 총 발생량에 대하여 약 35%를 점유하고 있어 향후, 세계적 추세로 보아 유황 발생량의 점진적인 증가로 수출량의 감소에 따른 잉여유황이 증가 할 것으로 추정된다. 이에 대한 단기적인 대책으로는 폐기물 처리 및 수출량을 증대시키는 방안이 있으나 보다 장기적이고 안정적인 해결방법을 위해서는 폐유황을 재활용하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 특히 모르타르 및 콘크리트용 혼화재로 적용함으로써 대단위의 소비와 값싼 대체 혼화재로 활용 가능할 것

* Corresponding author

E-mail: jaenam.lee@sgs.com

Table 1 Chemical components and physical properties of OPC

Items Types	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Specific gravity	Specific surface area (cm ² /g)
OPC	20.68	5.51	3.10	62.28	3.38	2.56	3.15	3 268

Table 2 Properties of Sulfur and HMS

Items Types	Form	Color	Density (g/cm ³)	Melting point (°C)	Viscosity after melt (cp)
Sulfur	Solid	Yellow	2.07	112.8	20
HMS	Solid	Dark red	1.60	60	60~80

으로 판단된다. 기존에 유황을 시멘트 대체 혼화제로 활용하기 위한 시도는 오래전부터 있었으며, 이를 이용하여 유황 콘크리트를 개발하였으나 취성 및 열팽창계수가 크고 내수성이 낮아 한·냉의 반복 시 내부응력에 의하여 자연 파괴되는 단점이 있기 때문에 보급에는 실패 하였다²⁾. 이후 1970년대 석유소비량의 증가로 회수되는 유황 량이 급증하여 세계 각국에서 유황의 단점을 보완하여 시멘트 대체 혼화제로 활용하기 위한 연구가 재검토되고 있다. 기존 연구들에 의하면 유황 콘크리트는 내산성 및 내약품성이 우수한 특징을 가지고 있다고 보고되어지고 있어 다른 종류의 건설재료의 단점인 부식성 전해질, 염분용액 노출지역 및 화학공장 등의 프리캐스트제품이나 현장 타설용 재료로서 우수한 내구성능을 발휘 할 것으로 판단된다³⁾.

그러나 유황 콘크리트는 혼합시 유황이 액상이 되는 127 ~ 141 °C에서 생산됨으로 충분한 환기와 함께 적절한 보호 대책이 필요하며, 국제안전협회(National Safety Council)에 의해 확립된 취급방법에 따라야만 한다. 또한, 이러한 고온 생산 방식의 경우 개질이 불균질하게 이루어지면 미개질 부분에 의한 자연 파괴의 문제점을 가지고 있어 이를 개선하기 위하여 낮은 온도에서 용해되는 유황의 개발이 이루어지고 있다. 지금까지 유황이 120 °C 이상의 고온에서 용해되는 것과는 달리 최근에 국내에서 50 ~ 60 °C에서 용해되며 물과 혼화성이 좋아 시멘트와 같이 사용할 수 있는 수경성 개질유황재료가 개발되었다.

이에 따라 본 연구에서는 폐유황으로부터 제조한 개질 유황재료를 시멘트 대체 혼화제로 활용하기 위한 기초적인 작용기구, 물성 및 성능평가를 진행하여 건설 구조용 재료로 대체 가능성을 보고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험계획

본 연구의 목표는 개질 유황을 시멘트 대체 혼화제로 사용 가능성 여부를 알아보기 위한 연구의 일환으로 개질 유황의 혼합에 따른 모르타르의 품질 특성을 알아보기 위하여 개질유황을 기준모르타르에 대하여 4수준으로 혼합한 모르타르 배합을 설계 하였으며, 품질특성 평가 방안으로 유동, 역학, 거동 및 내화화성을 측정하여 분석 및 고찰 하였다. 실험 진행 단계는 Fig. 1과 같다.

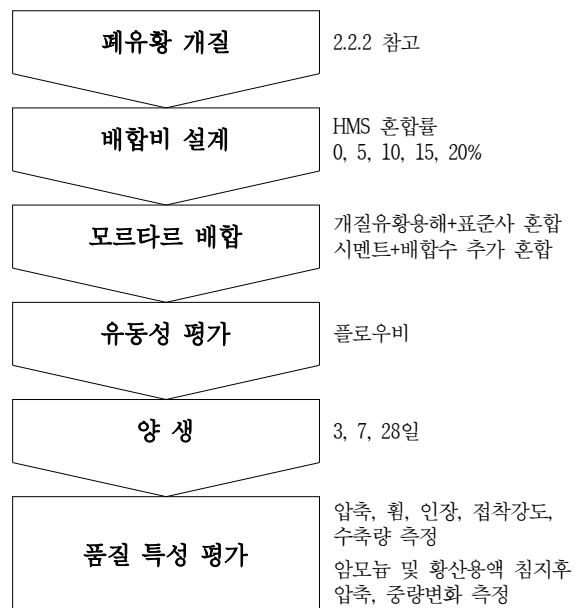


Fig. 1 Flow chart

Table 3 Mixture proportions of mortar with HMS

Items Types	S/C	W/C	Unit mass (kg/cm ³)			
			W	C(OPC)	S	HMS
HMS-0	2.5	0.51	275	510	1 275	-
HMS-5						13.8
HMS-10						27.5
HMS-15						41.3
HMS-20						55.0

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

시멘트는 비중 3.15의 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement : OPC)를 사용 하였으며, 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

2.2.2 개질유황

개질유황(Hydraulic Modification Sulfur : HMS)은 유황을 녹여 Dicyclopentadiene(DCPD)와 반응시킨 뒤 개질을 위한 아민계 화합물을 반응하여 제조하였다^{4,5)}. 이러한 개질처리를 통해 120 °C 이상의 고온에서 용해되는 유황이 50~60 °C에서 용해 가능한 상태로 개질되었으며, 물과 혼화성이 좋아 시멘트와 같이 사용할 수 있는 개질유황재료가 개발되었다. 이렇게 개발된 개질유황을 본 연구에 사용하였으며, 유황 및 개질유황의 기본적인 특성은 Table 2와 같고 상온에서 고체 상태인 개질유황의 사진은 Fig. 2와 같다.



Fig. 2 Modified sulfur in the solid state

2.2.3 잔골재

KS L 5100에서 규정하고 있는 밀도가 2.60 g/cm³인 주문진산 표준사를 사용하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 모르타르 배합설계

모르타르의 배합은 물-시멘트 비 및 시멘트에 대한 잔골재의 혼합률을 동일하게 하였으며, 시멘트 질량에 대하여 HMS를 4수준(5, 10, 15 및 20 %)으로 설계하였다. 모르타르시험 배합표는 Table 3과 같다.

2.3.2 모르타르 플로우 시험

HMS를 시멘트 질량에 대하여 4수준으로 변화시켜 제조한 모르타르의 유동성능은 KS L 5105에 따라 플로우 테이블 위의 성형틀에 경화전 모르타르를 채워 넣고 성형틀을 제거한 상태에서 15초 동안 1.27 cm 높이로 25회 낙하시켜 모르타르의 Consistency를 측정 하였다.

2.3.3 모르타르 압축 및 휨강도 시험

HMS의 혼합률을 변화시켜 제조한 모르타르를 40mm×40mm×160 mm인 각주형 공시체로 제작하여 23±2°C에서 표준 양생을 실시한 후 재령 3, 7 및 28일에 KS L ISO 679에 따라 압축 및 휨강도를 측정하였다.

2.3.4 모르타르 인장강도 시험

HMS의 혼합률을 변화시켜 제조한 모르타르를 Peanut형 공시체로 제작하여 20±2 °C에서 표준 양생을 실시한 후 재령 28일에 KS L 5104에 따라 인장강도를 측정하였다. 인장강도 시험기 및 공시체는 Fig. 3과 같다.

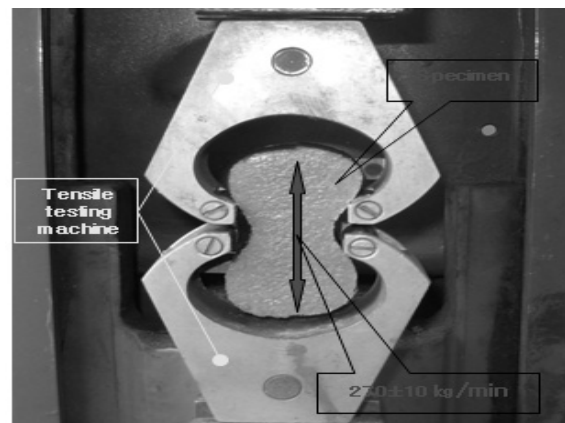


Fig. 3 Tensile testing machine and Specimen

2.3.5 모르타르 접착강도 시험

KS F 2403에 따라 시험용 밀판(설계강도 50 ± 5 MPa)을 제작 하였으며, 시험용 밀판 표면에 HMS의 혼합률을 변화 시켜 제조한 모르타르를 타설 한 후 20 ± 2 °C에서 표준양 생을 실시하여 재령 28일에 KS F 2762에 따라 접착강도를 측정하였다.

2.3.6 모르타르 길이변화 시험

HMS의 혼합률을 변화시켜 제조한 모르타르를 게이지 플러그가 삽입된 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160$ mm인 각주형 공시체로 제작하여 7일간 20 ± 2 °C에서 표준 양생을 실시한 후 온 도 20 ± 2 °C 및 습도 $60 \pm 5\%$ 의 습기함에 옮긴 것을 시점 으로 재령 1, 4, 8, 12 및 16주에 KS F 2424에 따라 건조 수축에 의한 길이변화를 측정하였다.

2.3.7 모르타르 화학저항성 시험

KS L 5105에 따라 시편을 제작하여 28일간 20 ± 2 °C에서 표준 양생을 실시 한 후 1급 시약을 사용하여 약액 침 지용 10% 암모늄용액 및 5% 황산용액을 제조하였으며, ASTM C 579에 따라 화학저항성능을 평가하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

(1) 모르타르 유동 특성

HMS를 OPC 질량에 대하여 외할로 0, 5, 10, 15 및 20% 혼합하여 제조한 모르타르의 플로우비를 정리한 것이 Fig. 4이다. Fig. 4의 결과 HMS를 혼합함에 따라 모르타르의 플로우비가 OPC만을 사용한 기준 모르타르에 비하여 감소하는 경향을 알 수 있다. HMS를 5, 10 및 15% 혼합한 경우 플로우비는 기준 모르타르에 비하여 약 30% 감소하였으며, HMS를 20% 혼합한 경우 약 70% 감소하였다. 이러한 원인은 점도가 높은 용융상태의 HMS를 혼합함에 따라 HMS가 coating된 골재의 계면과 시멘트간의 접착력이 증가하기 때문인 것으로 판단되며, HMS를 20% 혼합한 경우 유동성이 크게 감소한 것으로 보아 골재의 동일한 비 표면적에 대한 HMS의 coating량은 유동성능을 크게 저하시키는 임계점이 있는 것으로 판단된다.

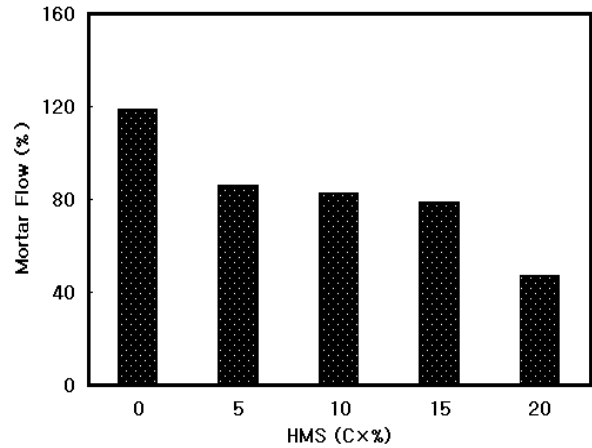


Fig. 4 Flow ratio with replacement ratio of HMS

(2) 모르타르 역학 특성

HMS를 혼합한 모르타르의 재령 3, 7 및 28일 압축강도 값을 정리한 것이 Fig. 5이다. Fig. 5의 결과 HMS를 5~15% 혼합한 재령 3 및 7일 압축강도는 기준 모르타르와 비교하여 5% 이내의 차이를 나타내었으며, HMS를 20% 혼합한 경우 재령 3 및 7일에서 각각 17 및 11% 감소하였다. 또한, HMS의 혼합률이 증가함에 따라 재령 28일 압축강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 특히 HMS를 20% 혼합한 모르타르의 재령 28일 압축강도는 기준 모르타르와 비교하여 76%로 크게 감소하였다. 이러한 원인은 상온에서 비결정 고무 상태인 HMS가 혼합 과정에서 filling 및 coating되어 OPC가 경화한 후에도 동일한 상태로 존재하기 때문이며, HMS를 15%이상 혼합하는 것은 OPC의 수화를 지연시켜 강도발현에 악영향을 주는 것으로 판단된다.

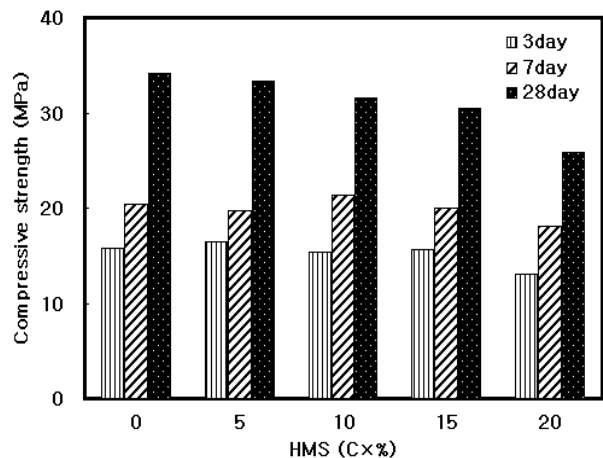


Fig. 5 Compressive strength with replacement ratio of HMS

HMS를 혼합한 모르타르의 재령 28일 휨강도 값을 정리한 것이 Fig. 6이다. Fig. 6의 결과 HMS를 5% 혼합한 모르타르의 휨강도는 기준 모르타르와 유사하게 나타났으며, HMS를 10 및 15% 혼합한 경우 기준 모르타르와 비교하여 각각 3~9% 증가하는 것으로 나타났다. 또한, HMS를 20% 혼합한 모르타르의 재령 28일 휨강도는 기준 모르타르와 동등한 수준으로 나타났다. HMS의 혼합률 변화에 따른 모르타르의 기계적인 특성을 알아보기 위하여 재령 28일 휨/압축강도 비를 정리한 것이 Fig. 7이다. Fig. 7의 결과 HMS를 5% 혼합한 모르타르의 휨/압축강도 비는 기준 모르타르와 동등하게 나타났으며, HMS를 10~20% 범위로 혼합한 경우 휨/압축강도 비는 기준 모르타르 보다 높게 나타났다. 이러한 결과로 HMS의 혼합이 압축강도는 저하시키나 10~15% 범위로 혼합할 경우 취성을 완화시켜 휨강도를 개선시키는 것으로 판단된다.

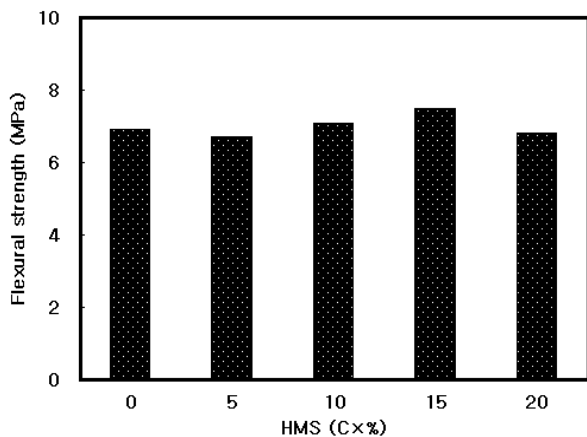


Fig. 6 Flexural strength at 28 days with replacement ratio of HMS

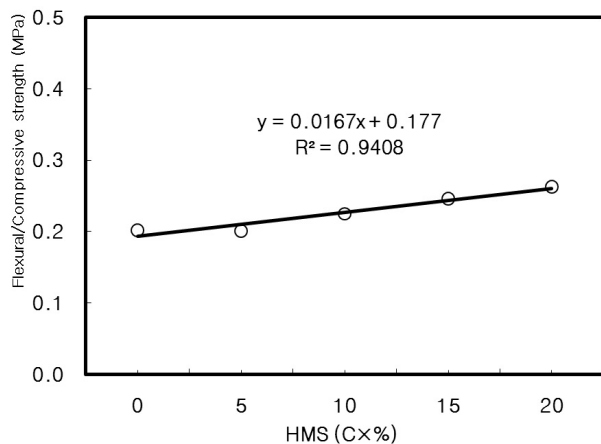


Fig. 7 Flexural/Compressive strength ratio at 28 days with replacement ratio of HMS

HMS를 혼합한 모르타르의 재령 28일 인장 및 접착강도를 정리한 것이 Fig. 8이다. Fig. 8의 결과 HMS를 5, 10, 15 및 20% 혼합한 모르타르의 인장강도는 기준 모르타르와 비교하여 각각 48, 74, 70 및 48% 증가하는 것으로 나타났다, 접착강도는 HMS를 5, 10 및 15% 혼합하였을 경우 약 25%의 증가를 보였으나 20% 혼합시 10% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 배합 과정에서 점착성이 우수한 HMS가 골재에 coating된 후 시멘트 페이스트가 골재와 혼합되어 골재와 시멘트페이스트가 접촉하는 천이대 영역에서 결합력을 향상시킨 결과로 판단되며, 5~15% 범위로 혼합하는 것이 기 타설 콘크리트와의 접착성능을 개선시키는 것으로 나타났다.

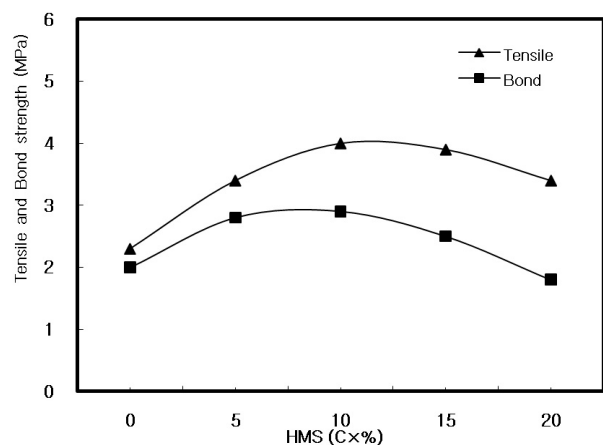


Fig. 8 Tensile and bonding strength at 28 days with replacement ratio of HMS

HMS를 혼합한 모르타르의 역학적 시험 결과가 HMS의 혼합률 변화에 따른 영향을 분석하기 위하여 유의수준 5%로 하여 일원분산분석을 실시한 결과에 대하여 정리한 것이 Table 4이다. Table 4의 결과 압축강도에 대한 HMS 혼합의 영향은 유의확률 0.6%로 “HMS 혼합이 압축강도에 영향을 미친다.”는 대립가설에 대한 지지도가 99% 이상 이므로 HMS 혼합률의 변화와 함께 압축강도에 큰 영향을 미치는 것으로 판정되었으며, 휨강도의 경우 유의확률이 42%로 높게 나타났으나 유의수준보다 높으므로 HMS 혼합률의 변화와 함께 휨강도에 영향을 미치는 정도는 작은 것으로 판정되었다. 또한, 인장 및 접착강도에 대한 HMS 혼합의 영향은 유의확률 10 및 6%로 HMS 혼합률의 변화와 함께 인장 및 접착강도에 영향을 미치지 않는 것으로 판정되었다. 이러한 결과로 HMS를 혼합한 모르타르의 경우 혼합률 변화가 압축강도에 영향을 미치며, 인장 및 접착강도의 경우 개선효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4 Tests results of the analysis of variance

Types \ Items	Source	DF	Sum of Squares	Mean of Squares	F Value	P Value
Compressive Strength	HMS/(OPC+HMS) ratio	1	1 115.1	1 115.1	30.5	0.006
	Error	8	292.5	36.6	-	-
	Corrected Total	9	1 407.6	-	-	-
Flexural Strength	HMS/(OPC+HMS) ratio	1	22.5	22.5	0.7	0.42
	Error	8	250.4	31.3	-	-
	Corrected Total	9	272.9	-	-	-
Tensile Strength	HMS/(OPC+HMS) ratio	1	108.9	108.9	3.5	0.10
	Error	8	251.8	31.5	-	-
	Corrected Total	9	360.7	-	-	-
Bonding Strength	HMS/(OPC+HMS) ratio	1	144.4	144.4	4.6	0.06
	Error	8	250.9	31.4	-	-
	Corrected Total	9	395.3	-	-	-

(4) 모르타르 수축 특성

HMS를 혼합한 모르타르의 재령별 건조수축에 의한 길이변화율을 정리한 것이 Fig. 9이다. Fig. 9의 결과 HMS를 5% 혼합하였을 경우 수축량은 기준 모르타르와 유사하게 나타났으나 HMS를 10, 15 및 20% 혼합한 경우 수축량이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 기존 연구에 의하면 유향은 고화과정 및 결정전이시 체적이 감소하며, 경화 수축시 OPC보다 큰 수축이 나타난다고 보고되어지고 있다⁶⁾. 따라서 이러한 결과는 혼합된 HMS가 결정전이 후 상온에서 경화시 자체적인 수축을 동반한 결과로 판단된다.

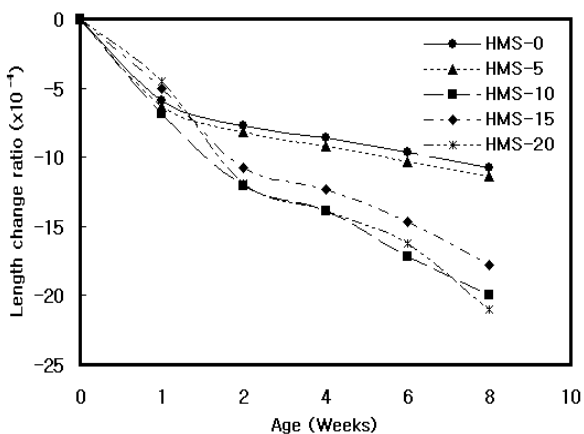


Fig. 9 Length change by drying shrinkage ratio with replacement ratio of HMS

(5) 모르타르 내화학 저항 특성

HMS를 혼합한 모르타르의 강염기 및 강산성 환경에 대한 저항성을 알아보기 위하여 HMS 혼합률을 변화시킨 모르타르 시편을 제작하여 표준양생을 실시한 것과 10% 암모늄 및 5% 황산용액에 침지시킨 모르타르의 질량변화율 및 압축강도를 정리한 것이 Fig. 10 및 11이다. Fig. 10의 결과 침지재령이 경과함에 따라 질량감소가 급격하게 나타나고 있으며, HMS 혼합률이 증가함에 따라 질량감소율은 작아지는 것으로 나타났다. Fig. 11의 결과 10% 암모늄용액에 12주간 침지시킨 시편의 압축강도는 기준 모르타르의 경우 침지 전과 비교하여 약 8% 감소하였으며, HMS 혼합률이 증가함에 따라 침지 전·후 압축강도의 차이는 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 10% 암모늄용액 및 5% 황산용액에 침지 전·후 시편의 사진은 Table 5와 같다. 침지 전·후 시편을 육안으로 관찰한 결과 10% 암모늄용액에서는 침지 전·후 외관상태의 차이는 나타나지 않았으나 5% 황산용액에서는 HMS 혼합률이 증가함에 따라 표면 결손이 적은 것으로 나타났다. 이러한 결과 HMS가 암모늄 및 황산용액 침식 환경에 대하여 우수한 저항 성능을 가지고 있으며, 황산의 경우 HMS가 SO₄²⁻이온의 침투를 저하시켜 ettringite의 재생성에 의한 팽창압이 감소된 결과로 판단된다.

Table 5 Condition of Mortar due to types of mix through the immersion test(Immersion for 12 weeks)

Items Types	Before the immersion test (10% ammonium)	After the immersion test (10% ammonium)	Before the immersion test (5% sulfuric acid)	After the immersion test (5% sulfuric acid)
HMS-0				
HMS-5				
HMS-10				
HMS-15				
HMS-20				

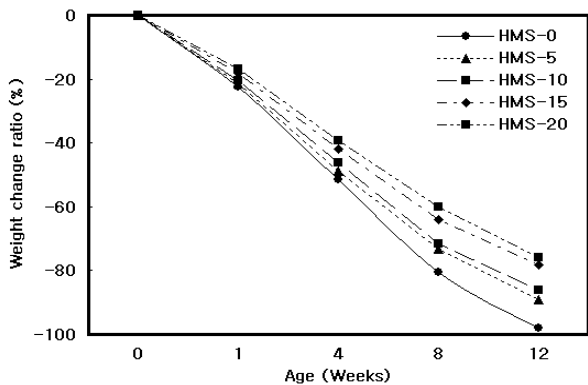


Fig. 10 Weight change with replacement ratio of HMS(5% sulfuric acid immersion test)

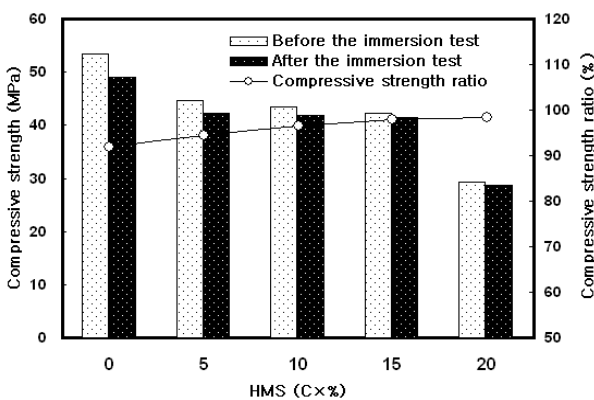


Fig. 11 Compressive strength ratio after the immersion test ammonium with replacement ratio of HMS

4. 결 론

폐유황으로부터 제조한 개질유황재료를 시멘트 대체 혼화재로 활용 가능성 여부를 알아보기 위한 연구의 일환으로 개질유황의 품질특성 및 혼화재료로 사용한 모르타르의 기초적 특성에 대하여 분석 및 검토한 결과는 다음과 같다.

1) 개질유황을 혼합한 모르타르의 유동성은 혼합률이 증가함에 따라 감소하였으며, 15% 이내로 혼합하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

2) 개질유황을 혼합한 모르타르의 압축강도는 혼합률 20%를 제외하고는 기준 모르타르와 동등한 수준을 나타내었으며, 휨강도는 혼합률 10~15% 범위로 혼합할 경우 개선되는 것으로 나타났다.

3) 개질유황을 혼합한 모르타르의 인장 및 접착강도는 혼합률 15%까지는 기준 모르타르와 비교하여 증가하였으며, 혼합률 10%에서 가장 높게 나타나 최적 혼합률이 존재하는 것을 알 수 있다.

4) 개질유황을 혼합한 모르타르의 수축량은 혼합률 5%의 경우 기준 모르타르와 동등한 수준을 나타내었으며, 혼합률이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타나 균열지수에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

5) 개질유황을 혼합한 모르타르의 내화특성은 혼합률이 증가함에 따라 우수한 저항성능을 나타냈으며, 건설재료로

활용시 동일한 조건에서 화학적 내구성능을 향상시킬 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 한국생산기술연구원의 산업연계형 기술지원 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Korea Mineral Resources Information Service, 자원정보, 2011
- 2) 배수호, 유황 모르타 및 콘크리트의 특성, 한국콘크리트학회지, 제4권, 1호, pp. 58 ~ 61, 1992
- 3) 신동현 외 3인, 유황 콘크리트의 물성 및 적용사례, 대한토목학회 논문집, 제50권, 제6호, pp. 39 ~ 45, 2002
- 4) 한국생산기술연구원, 기능성 개질유황시멘트콘크리트 실용화 연구, 2011
- 5) 유승건 외 4인, 개질 유황 고분자가 혼입된 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 특성, Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology, Vol.20, No.4, pp. 192 ~ 196, 2010
- 6) 윤재환 외 2인, 유황콘크리트, 한국콘크리트학회지, 제15권, 5호, pp. 46 ~ 51, 2003

개질유황을 시멘트 대체 혼화재로 사용하기 위한 모르타르의 품질특성

폐유황으로부터 제조한 개질유황재료를 시멘트 대체 혼화재로 활용 가능성 여부를 알아보기 위한 연구의 일환으로 개질유황의 품질특성 및 혼화재료로 사용한 모르타르의 기초적 특성에 대하여 분석 및 검토한 결과 개질유황을 혼합한 모르타르의 유동성은 혼합률이 증가함에 따라 감소하였으며, 압축강도는 저하되었다. 또한, 개질유황을 15% 이내로 혼합한 모르타르의 휨, 인장 및 접착강도는 개선되었으며, 수축량은 증가하였다. 특히 내화학적성은 혼합률이 증가함에 따라 우수한 저항성능이 나타났다. 따라서 본 연구에서는 개질유황을 시멘트 대체 혼화재로 활용 가능성을 확인할 수 있었다.