

용융황 침투에 의한 콘크리트 구조물의 물성 증진에 관한 연구

김종국·오준택·설용건·김우식

연세대학교 공과대학 화학공학과

(1988년 12월 29일 접수)

Reinforcement of Concrete Structure by Impregnation of Molten Sulfur

J. K. Kim, J. T. Oh, Y. G. Shul and W. S. Kim

Dept. of Chemical Engineering, Yon Sei Univ.

(Received December 29, 1988)

요 약

콘크리트 구조물에 있어서 내구성의 문제점을 보완하기 위해 용융황의 침투 실험을 행하였다. 용융황 침투 후 콘크리트의 물성 증진은 압축강도 및 방수효과를 확인하였으며 침투인자로서 콘크리트내의 수분함량과(0%-8%), 용융황의 침투시간(0-22 hr), 침투온도(130°C, 140°C)를 검토하였다.

부분함침 조건에서 침투율이 2%인 콘크리트 시편(7 cm×7 cm×7 cm)의 압축강도는 1.5 배 정도 증가하였고 완전 함침조건에서 침투율이 12-14%인 몰탈 시편(5 cm×5 cm×5 cm)의 압축강도는 2-3 배 정도 증가하였다.

X-선 회절 결과로부터 용융황의 침투 형태는 α -유황임이 확인되었다. 또한 공극분포 분석 및 SEM 측정 결과로부터 용융황의 균일한 침투를 확인하였다.

ABSTRACT

This study aims to reinforce concrete structure by impregnation of molten sulfur. The improved properties of sulfur impregnated concrete were confirmed by compressive strength test and water proof effect. Following variables were adopted to evaluate impregnation parameters : 1) the effect of water content in concrete structure (0-8%) 2) impregnation time of molten sulfur(0-22 hr) 3) impregnation temperature of molten sulfur(130°C, 140°C).

In partial ponding experiments, the concrete specimen of sulfur impregnated by 2 wt% yields 1.5 times higher value of compressive strength than that of control one(non-impregnated concrete). In complete ponding experiments, the mortar specimen of sulfur impregnated by 12-14 wt% yields 2-3 times higher value of compressive strength than that of control one (non-impregnated mortar).

From the examination of X-ray diffractions, α -sulfur was found in concrete pores. Homogeneous impregnation of molten sulfur into concrete pores was also identified with pore size analysis and micrographs of SEM.

1. 서 론

콘크리트는 도로, 교량, 건축물 등에 핵심적으로 사용되는 재료이나 동결기의 표면풍화, 해풍의 소금기에 의한 부식, 환경변화에 따른 강도 저하등의 원인으로 인해 내구성에 문제점이 있는 바, 최근 콘크리트 구조물의 내구성을 강화하는 여러 방법이 널리 연구되어 왔다^{1,2)}.

그 방법으로는 고분자를 용매에 녹인 용액을 물대신 사용하여 콘크리트를 제조하는 PPCC(Polymer Portland Cement Concrete), 단량체를 직접 물대신 사용하여 콘크리트를 제조하는 PC(Polymer Concrete)가 있으며, 기존 콘크리트 구조물을 보완하는 방법으로는 단량체를 침투시킨 PIC(Polymer Impregnated Concrete), 용융황을 침투시킨 SIC(Sulfur Impregnated Concrete) 등이 알려져 있다^{3,4)}.

PIC 법은 침투단량체가 고가이며 기존 콘크리트 구조물의 건조, 냉각, 콘크리트 내부로 단량체의 침투, 침투 단량체를 중합하는 순차적인 공정단계가 필요하여 많은 시간과 비용을 요구하게 되고 건조시 콘크리트 구조물의 팽창이나 균열의 가능성 및 침투 단량체의 불균일한 중합의 문제점이 제기되고 있다⁴⁾.

이에 반해 SIC 법은 침투제인 황의 가격이 저렴하고 황의 용융 및 침투의 간단한 공정단계 및 용융황의 낮은 점도 등의 장점을 갖고 있어 유용한 콘크리트 보강 방법으로서 주목을 받아왔다⁵⁻⁹⁾.

따라서 본 연구에서는 용융황을 침투시킨 콘크리트의 구조적 보강 가능성을 알아보기 위한 실험을 행하였다.

용융황의 침투조건을 살피기 위해 콘크리트와 몰탈 시편을 제조, 침투온도 및 시간에 따른 침투율, 침투깊이를 측정하고 이들로 부터 이론적인 압축강도를 구하고 이를 만능시험기(Instron)로 측정한 실제 압축강도와 비교하여 보았다. 또한 용융황의 침투상태를 관찰함으로써 용융황 침투 콘크리트의 보강 특성을 파악하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편의 제조 및 건조

본 실험에서 포틀랜드 시멘트 콘크리트 시편은 7cm×7cm×7cm, 몰탈시편은 5cm×5cm×5cm 인 정육면체로 각각 제조하였으며 물과 시멘트의 비는 1:2로 하였고 21℃에서 28일간 공기중에 방치하였다. 이러한 양생조건

Table 1. Mixing Ratio of Portland Cement Concrete.

Compressive strength (kg/cm ²)	W/C ratio (%)	Mixing ratio (Wt. ratio)			
		Water	Cement	Sand	Aggregate
180	50	1	2	5	7.5

Table 2. Mixing Ratio of Portland Cement Mortar.

Compressive strength (kg/cm ²)	W/C ratio (%)	Mixing ratio(Wt. ratio)		
		Water	Cement	Sand
260	50	1	2	5

하에서 콘크리트는 압축강도가 180 kg/cm²를 나타냈고, 몰탈의 경우 260 kg/cm²를 나타내었다. 콘크리트의 경우 조골재는 최대크기가 20 mm 이하의 잡석을 사용하였다. 시멘트 콘크리트 시편과 몰탈 시편의 배합비 및 강도를 Table 1 과 Table 2에 나타내었다.

시편의 건조 실험은 115℃, 120℃ 및 130℃에서 각각 행하였다.

2.2. 건조시편에 용융황 침투실험

용융황 침투 실험을 위한 장치를 Fig.1에 나타내었다. 용융조에 황을 넣고 온도가 정상상태임을 확인한 후 시편을 넣어 일정시간동안 함침시켜 용융황의 침투실험을 행하였다. 용융조의 온도는 온도제어기를 통해 ±3℃ 이내로 조절하였으며 균일한 온도 분포를 위해 oil bath를 교환하였다. 또한 Indicator로서 세 개 용융조 내부의 온도를 확인하였을 뿐 아니라 황의 용융시 발생하는 폐가스를 제거하기 위하여 spray scrubber를 사용하였다. 실험방

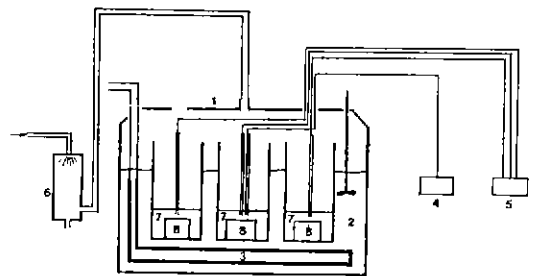


Fig.1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- 1. Melting reactor
- 2. Oil bath
- 3. Heating element
- 4. Controller
- 5. Indicator
- 6. Spray scrubber
- 7. Sulfur
- 8. Specimen

법은 원건건조시편(건조실험 결과로부터 120°C에서 3시간 이상 건조시킨 시편은 질량변화가 없으므로 완전건조상태의 시편으로 간주하였다.) 을 함침온도 130°C와 140°C에서 함침시간에 따른 침투율, 침투깊이를 측정하고 이들로 부터 이론적인 압축강도를 구하고 이를 만능시험기로 측정한 실제 압축강도와 비교하여 보았다.

여기서 침투율은 다음식에 의해 구하였다.

$$\frac{\text{용융황 침투후 시편의 무게(g)} - \text{원건 건조 시편의 무게(g)}}{\text{원건 건조 시편의 무게(g)}} \times 100$$

침투깊이는 시편을 절단하여 그 단면에 물을 적시면 용융황의 침투된 부분과 침투되지 않은 부분이 확연히 구별되어 육안으로 침투깊이를 확인하였다. 이 때 시편 단면상에 용융황의 침투 깊이가 불균일하였기에 용융황 침투후 단면상의 여러부분에 대해 평균을 내어 침투깊이로 하였다. 또한 용융황과 시멘트 구성 성분과의 반응을 알아보기 위해 X-선 회절분석을 행하였으며 용융황의 침투된 시편의 공극크기분포와 균일한 침투를 확인하기 위해 Autosorb-1(Quanta-Chrome)과 SEM 을 사용하였다. 물리 흡착법에 의한 세공구조 측정은 세공구조에 관한 다양한 측면에서의 특성을 알 수 있는 장점이 있다 즉 다공성 고체에 대한 질소 가스의 흡착, 탈착과정을 조사함으로써 세공의 형태를 예측할 뿐 아니라 이렇게 예측된 세공 구조를 가정함으로써 세공의 크기 및 세공크기 분포를 계산할 수 있다.

본 실험에서는 용융황 침투 전후의 공극 크기분포를 이상의 원리를 응용한 Quanta Chrome 사의 Model 명 AS-1 을 이용 측정하였다.

2.2.1. 침투율에 따른 압축강도 예측 이론식¹⁰⁾

침투율에 따른 압축강도 예측이론식은 M.S.Alam 이 제시하였는바 다음과 같은 가정을 하였다.

첫째, 몰탈 시편 내로의 용융황 침투는 모든면에서 같은 속도로 침투한다.

둘째, 용융황이 침투된 몰탈 부분은 용융황으로 포화된 몰탈과 같은 단위 무게 및 같은 강도를 갖는다.

이들 가정으로부터 M.S.Alam 이 제시한 이론식은 다음과 같다.

$$\sigma = [1 - (1 - \rho)^2] \sigma_s + (1 - \rho)^2 \sigma_c$$

σ : 임의 침투율에서의 몰탈 시편의 압축강도

σ_c : 공 몰탈 시편의 압축강도

σ_s : 용융황으로 포화된 몰탈 시편의 압축강도

ρ : 침투된 길이 대 용융황 침투시 포화되어야 할 총 길이

2.3. 용융황 침투 시편의 방수 실험

몰탈 공시편 및 용융황을 침투시킨 몰탈 시편의 시간에 따른 흡수율을 측정하여 용융황 침투시편의 방수실험을 행하였는바, 이때 흡수율은 아래의 식으로 계산하였다.^{11,12)}

흡수율 (몰탈공시편)

$$= \frac{\text{흡수후 공시편의 무게} - \text{원건 건조 시편의 무게}}{\text{원건 건조 시편의 무게}} \times 100$$

흡수율 (용융황침투몰탈)

$$= \frac{\text{흡수후 용융황 침투시편의 무게} - \text{용융황 침투시편의 건조무게}}{\text{용융황 침투시편의 건조무게}} \times 100$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 시편의 건조

건조온도 115°C, 120°C, 130°C 각각에서 몰탈시편의 사

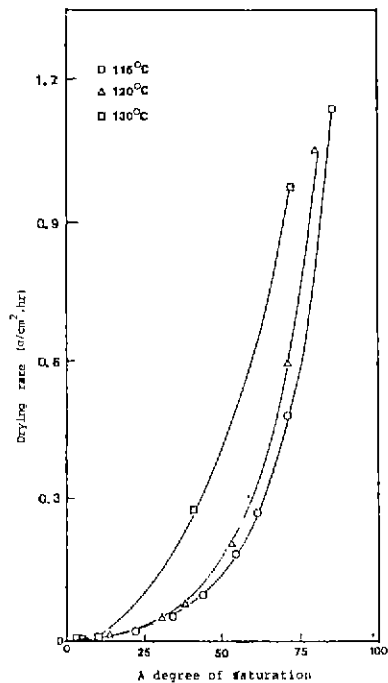


Fig.2. Drying rate vs. a degree of saturation curve

간에 따른 건조실험 결과로부터 건조속도(R)과 포화율(X)의 관계를 Fig.2에 나타내었다. 이 결과 온도가 증가함에 따라 시편의 건조속도는 증가하였으며 각 온도에서 건조속도 R을 Table 3에 나타내었다. 건조속도(R)대 포화율(X)의 실험식은 실험결과 data를 다중회귀법에 의해 구하였다.

여기서 건조속도란 시편의 단면적 단위시간당 증발수분의 양이며 포화도 X는 다음과 같다.

$$\frac{\text{건조시 어느 순간의 수분 함유량}}{\text{완전 포화시 수분 함유량}} \times 100$$

3.2. 용융황 침투시 시편의 수분 함유율 및 온도의 영향

3.2.1. 수분함유율의 영향

수분함유율이 다른 콘크리트 시편은 130°C에서 6시간 동안 부분함침 시킨 후의 용융황 침투율을 Fig.3에 나타내었다.

완전건조상태의 시편이 가장 우수한 용융황 침투율을 나타내었고 수분함유율의 증가에 따라 용융황 침투율이 직선적으로 감소하였다. 완전건조시킨 시편의 용융황 침투율은 1.6%로서 수분함유율이 8%인 시편의 용융황 침투율 0.8%보다 약 2배정도 침투율이 향상하였다.

이후의 용융황 침투실험에 사용한 모든 시편은 최대 침투율을 갖는 완전 건조 상태에서 실험하였다.

Table 3. Experimental Equation of Drying Rate vs. A Degree of Saturation.

Drying temperature	Experimental equation	Application range
115°C	$R = 3.567 \times 10^{-7} \exp(0.060 X)$	$0 < X < 100$
120°C	$R = 2.619 \times 10^{-6} \exp(0.0627 X)$	$0 < X < 100$
130°C	$R = 4.36910^{-5} \exp(0.083 X)$	$0 < X < 100$

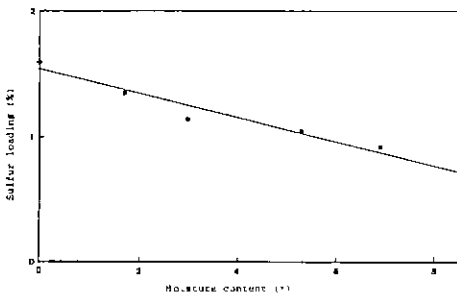


Fig.3. Effect of moisture content on sulfur loading.

3.2.2. 침투온도의 영향

침투온도는 고체황으로 부터 용융황이 형성되어 유동성을 갖는 온도인 120°C이상으로 하였다.

콘크리트 시편은 용융황에 한면만 함침시키고 몰탈 시편은 용융황에 완전함침 시켰다.

Fig.4에 온도에 따른 용융황의 점도변화를 나타내었다. 본 실험에서 행한 침투온도 130°C와 140°C에서 용융황의 점도는 각각 11.2cP와 9.4cP를 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 점도가 감소 하였는바, 이것이 용융황의 침투율 및 침투깊이에 미치는 영향을 각각 Fig.5와 Fig.6에 나타내었다. 같은 침투율에서 온도가 높을수록 침투깊이가 증가하였다.

예로서 완전함침 몰탈의 경우 함침시간이 6시간일때 온도가 130°C에서 140°C로 증가함에 따라 용융황 침투율이 8.2%에서 9.8%까지 증가하였고 같은 함침시간에 침투깊이는 온도가 130°C에서 140°C로 증가함에 따라 0.7 cm에

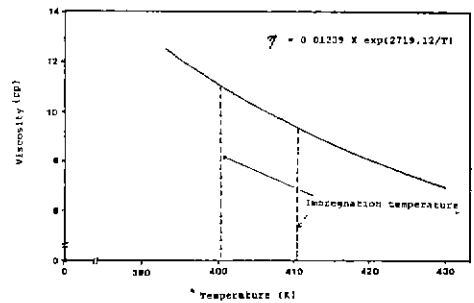


Fig.4. Temperature dependence of molten sulfur viscosity.

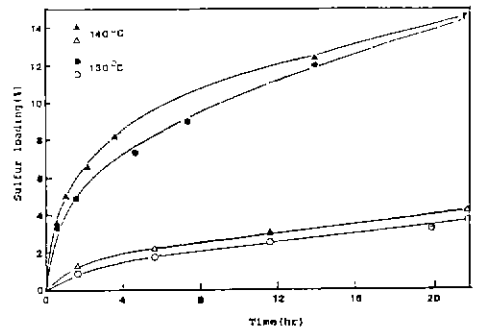


Fig 5. Sulfur loading vs. impregnation time in mortar specimen by complete ponding(●, ▲)and in concrete specimen by partial ponding(○, △) at two impregnation temperatures (130°C, 140°C).

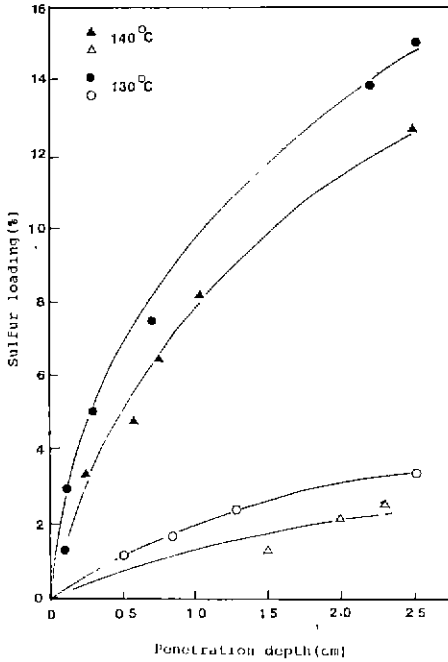


Fig. 6. Sulfur loading vs. penetration depth in mortar specimen by complete ponding(▲, ●) and in concrete specimen by partial ponding(△, ○) at two impregnation temperatures(130°C, 140°C).

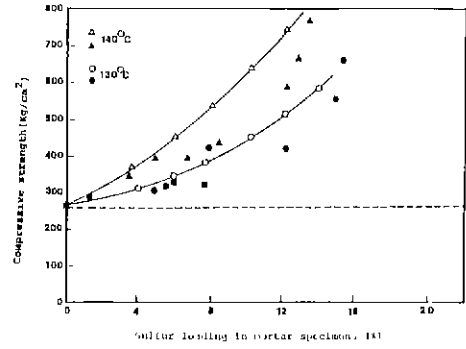


Fig. 7. Theoretical(○, △) and empirical(●, ▲) compressive strength vs. sulfur loading in mortar specimen by complete ponding at two impregnation temperatures(130°C, 140°C)

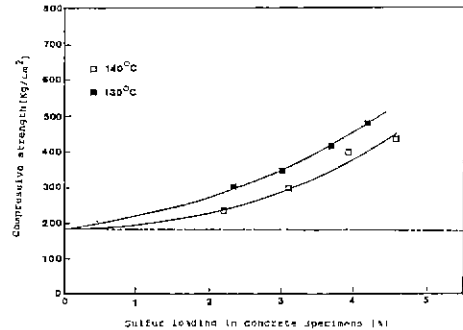


Fig. 8. Empirical compressive strength vs. sulfur loading in concrete specimen by partial ponding (■, □) at two impregnation temperatures (130°C, 140°C).

서 1.5 cm 로 증가하였다

즉 이 결과는 온도가 증가함에 따라 침투율이 증가할 뿐 아니라 같은 침투율에서도 침투깊이가 증가한다는 것이다.

용융황 침투 콘크리트 및 몰탈의 침투율에 따른 압축강도를 이론식으로 예측한 결과와 실제 실험에 의한 결과를 비교하여 Fig. 7, Fig. 8 에 나타내었다.

점선은 몰탈 공시편의 압축강도이며 이점쇄선은 콘크리트 공시편의 압축 강도를 나타낸다. 완전함침 몰탈의 경우 온도가 증가함에 따라 침투깊이가 증가함으로써 압축강도가 증진되었다.

Fig. 7에서 12-13%의 침투율을 가진 완전함침 몰탈 시편의 경우 몰탈 공시편의 압축강도에 비해 130°C에서는 2 배정도, 140°C에서는 3 배정도로 증진되었다. 실제 실험에 의한 압축강도가 이론적으로 예측한 압축강도와 비교해 차이가 나는것은 침투율에 따른 압축강도 예측 이론식을 유도할 때의 두가지 가정, 시편의 건조 및 용융황 침투시 열처리 과정에서 cement paste와 aggregate의 각기 다른 열팽창도에 의한 crack 생성등에 의한 것으로 생각될

수 있다.

Fig. 8의 콘크리트 경우는 130°C에서의 압축강도가 140°C의 압축강도보다 약간 높게 나타났는바, 이는 몰탈 시편의 경우에 비해 aggregate의 양이 많은 관계로 열처리 과정에서의 micro crack 생성에 의한 영향이 큰것으로 사료된다.

보통 hydrated cement paste는 $11 \times 10^{-6} - 21 \times 10^{-6}$ per°C, aggregate의 열팽창 계수는 $5 \times 10^{-6} - 13 \times 10^{-6}$ per°C를 나타낸다.

aggregate와 hydrated cement paste의 열팽창 계수가 5.5×10^{-6} per°C 이상 다를 때 콘크리트의 내구성에 영향을 미치게 되는데 시편의 건조 및 용융황 침투를 위한 열처리 과정이 concrete의 구성성분간 각기 다른 열 팽창도에 의해 micro crack을 유발했다고 추정된다¹⁴⁾.

3.2.3. 용융황 침투 몰탈의 구조관찰

포틀란트 시멘트의 화학조성을 Table 4에 나타내었다. Fig. 9에서 (a)는 몰탈에 130°C에서 용융황을 침투시킨 시편, (b)는 포틀란트 시멘트에 모래를 혼합, 수화시킨 몰탈이며, (c)는 포틀란트 시멘트의 X-선 회절도이다. 본 실험에서 사용한 포틀란트 시멘트의 X-선 회절도(c)

Table 4. Chemical Composition of Portland Cement.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O K ₂ O	Ig. Loss	Insol. res.
21.0	5.4	3.5	62.4	3.0	2.3	1.3	1.0	0.2

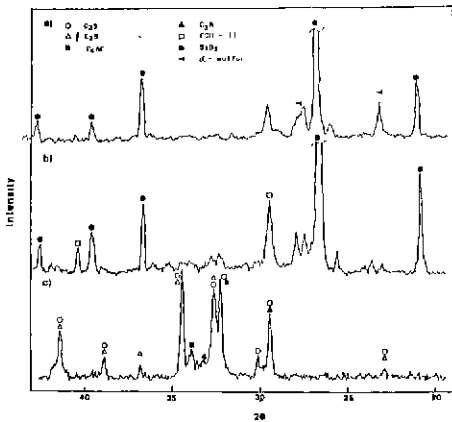


Fig. 9. XRD patterns of mortar impregnated by molten sulfur(a), mortar(b), portland cement(c).

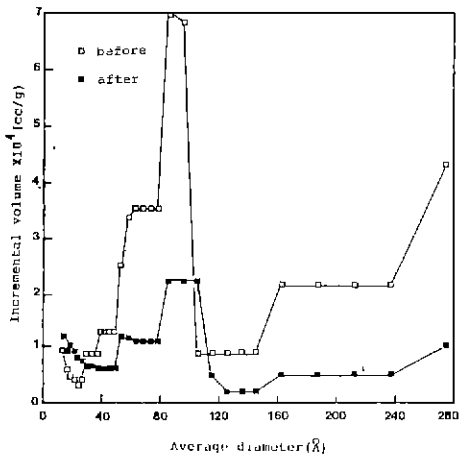


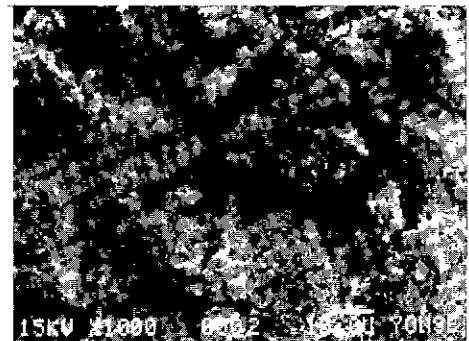
Fig. 10. Pore size distribution of mortar samples before sulfur impregnation(□) after sulfur impregnation(■) at 130°C.

에 구성 광물인 C₃S, β-C₂S, C₄AF, C₃A의 포틀란트 시멘트구성광물의 확인을 하였으며 몰탈의 경우(b)는 골재에서 오는 실리카의 피이크가 강하게 나와 포틀란트 시멘트의 복합 피이크가 상대적으로 줄어들었고 몰탈에 용융황을 침투시킨 후 (a)에는 실리카 피이크외에 α-sulfur의 피이크가 나타남이 확인되었다.

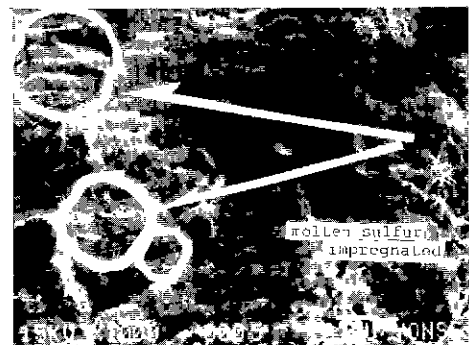
또한 몰탈(b)에서 CSH-II[Calcium Silicate hydrate (II)]로 확인된 피이크가 용융황이 침투된 몰탈(a)에서 그 강도가 줄어들었는바, 이는 침투된 용융황이 CSH-II 수화물을 덮은 경우로 사료된다.

몰탈의 용융황 침투 전후의 공극분포의 변화와 침투상태를 확인하기 위해 Autosorb-1(Quanta-Chrome)과 SEM을 사용하여 관찰하였다.

몰탈의 침투전후의 공극크기 분포를 Fig.10에 나타내었다. 본 실험의 숙성조건에 따른 몰탈은 70 Å-100 Å의 micro pore와 200 Å이상의 macropore로 형성되어 있었으며 130°C에서 용융황을 침투시킨후의 공극크기분포는 극세공(30 Å미만)을 제외하고는 공극이 줄어들었음을 보



(a) Concrete control specimen

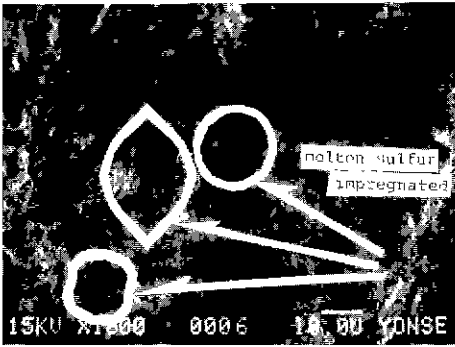


(b) Sulfur impregnated concrete

Fig.11. SEM photographs of concrete control specimen (a), sulfur impregnation concrete (b) at 130°C.



(a) Mortar control specimen



(b) Sulfur impregnation mortar

Fig.12. SEM photographs of mortar control specimen (a), sulfur impregnation mortar (b) at 130°C.

여주고 있다. 따라서 이 조건에서는 30 Å 이하의 극세공의 침투는 불가능함을 알 수 있었다. 용융황 침투 전후의 콘크리트와 몰탈 시편의 SEM 측정결과를 Fig.11 과 Fig.12 에 각각 나타내었다.

본 SEM 사진은 130°C에서 용융황을 침투 시킨후 콘크리트와 몰탈 시편의 침투된 부분만을 절단하여 측정하였다. 용융황 침투후의 시편을 관찰해 보면 용융황 침투전의 시편에서는 없었던 빗살무늬 모양이 공극을 메꾼 형태로 나타나고 있으며 이는 침투 용융황의 고유형태임이 확인되었다.

3.3. 황 침투 시편의 방수 효과

용융황을 침투시킨 몰탈 시편의 온도 및 용융황의 침투에 따른 방수효과 실험결과는 Fig.13와 Fig.14에 나타내었다.

Fig.13은 용융황이 거의 같게 침투된 시편의 온도변화에 따른 방수효과로서 몰탈 공시편의 경우 1시간 정도만에 거의 물로서 포화되었으나 용융황이 침투후 거의 같은 침투율에서 침투온도가 증가함에 따라 50시간 후에도 총

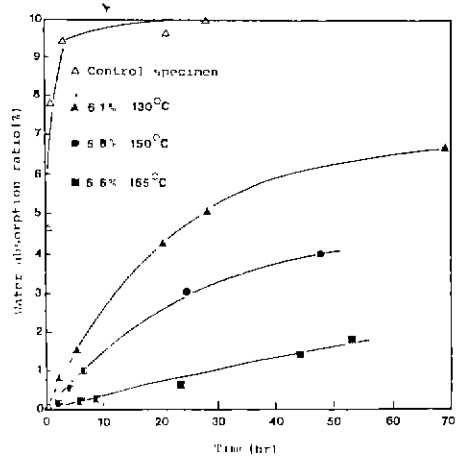


Fig.13. Effect of impregnation temp. on water proof for mortar specimens.

*130°C에서 6.6%의 용융황을 침투시킨 시편을 꺼내어 다시 165°C로 유지된 용융조에서 1시간 동안 열처리한 시편

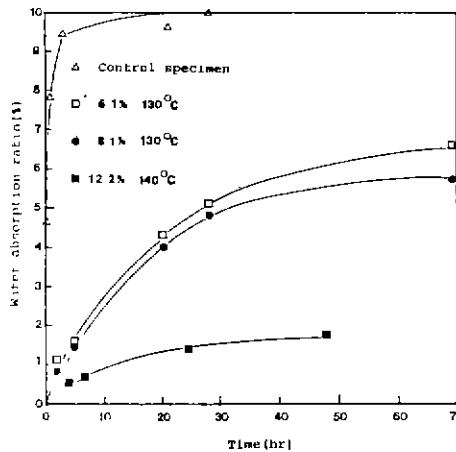


Fig.14. Effect of sulfur loading on water proof for mortar specimens.

포화 수분의 양(건조시편 무게의 9-12%)의 60-10%정도의 부분 포화만을 나타내는 우수한 방수효과를 나타내었다. 이는 침투온도가 증가함에 따라 황의 점도가 작아져 같은 침투율에서도 균일한 침투의 영향으로 몰탈의 기공이 줄어들어 결과로 사르된다. 특히 130°C에서 6.6%의 용융황을 침투시킨 시편을 꺼내어 다시 165°C로 유지된 용융조에서 1시간동안 열처리한 시편은 매우 우수한 방수효과를 나타내 이 온도에서 중합이 일어났을 가능성이 시사되었다.

Fig.14는 용융황 침투율에 따른 방수효과로 침투율이 증가함에 따라 방수효과가 향상되는 것을 보여주고 있다.

140°C에서 용융황을 12.2% 침투시킨 시편의 방수효과가 130°C에서 용융황침투율에 따른 두 곡선의 방수효과에 비해 현저히 향상되는것은 온도증진이 용융황의 점도 감소로 인한 침투깊이 증가 및 균일한 침투에 영향을 미친다는 것을 반증해 주고 있다.

4. 결 론

콘크리트의 용융황 침투 실험으로 부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 콘크리트 시편의 황 침투율은 건조도가 증가함에 따라 증가하였으며 같은 침투율일지라도 침투온도가 증가함에 따라 용융황의 침투깊이 및 침투 균일성이 증진되었다.

2) 용융황 침투에 의해 압축강도의 증가가 확인되었으며 12-13% 정도의 용융황 침투율을 가진 몰탈 시편의 경우 침투온도가 증가함에 따라 2-3 배 정도의 압축강도 증진을 나타내었다.

3) Autosorb1(Quanta-Chrome)에 의한 몰탈의 공극 크기 분포로 부터 본 실험의 숙성조건에서 만들어진 시편은 70Å-100Å범위의 공극이 가장 많으며 용융황 침투후 극세공(30Å미만)을 제외한 거의 전 범위의 공극이 줄어들었음을 알 수 있었다.

REFERENCES

1. W.F. Chen, E.D. Jorgensen, "Polymer-Impregnated Concrete as a Structural Material", *Mag. of Concrete Res.*, **26-86**, p.16, (1974).
2. C. Vipulanandan, N. Dharmaragan, "Flexural Behavior of Polyester Polymer Concrete", *Cement and Concrete Res.*, **17**, p.216, (1986).
3. C.P. Denis, D.C. Philip, "Effect of Moisture Content and Drying Method on the Penetration of Monomers into Concrete", *J. ACI.*, **73-35**, p. 447, (1976).
4. G.G. Litvan, R.F. Feldman, "Durability of Cement and Glass Impregnated with Sulfur and Polymethyl Methacrylate", *Cement and Concrete Res.*, **12**, p. 649, (1982).
5. R.F. Feldman, J.J. Beaudoin, "Some Factors Affecting Durability of Sulfur-Impregnated Porous Bodies", *Cement and Concrete Res.*, **8**, p, 273, (1978).
6. V.M. Malhotra, G. Carette, "Long-Term Strength and Durability of Sulfur-Infiltrated Concrete", 58-21, p.367, Mineral Science Laboratories Report, (1978).
7. S.P. Shah, A.E. Naarman, "Investigation of Concrete Impregnated with Sulfur at Atmospheric Pressure", Mineral Science Laboratories Report, 58-22. p. 399, (1978).
8. M.S. Alam, R.S. Juruf, "Factors Influencing the Modulus of Rupture of Sulfur-Infiltrated Concrete", *Cement and Concrete Res.*, **13**, p. 161, (1983).
9. P.K. Mehta, S.S. Chen, "Studies on Improving Moisture Resistance of Sulfur-Infiltrated Mortars", *Cement and Concrete Res.*, **9**, p. 189, (1979).
10. M.S. Alam, R.S. Juruf, "Prediction of Compressive Strength of SIC for Variable Sulfur Loading", *Cement and Concrete Res.*, **13**, p. 451, (1983).
11. J.R. Lusty, G. Courval, "Chemical Investigation on the Leaching of Sulfur from Sulfur Infiltrated Concrete", *Cement and Concrete Res.*, **13**, p. 233, (1983).
12. R.H. Mills, "Mass Transfer of Water Vapor through Concrete", *Cement and Concrete Res.*, **15**, p. 174, (1985).
13. A.M. Neville, "Properties of Concrete", Pitman Publishing INC., (1981).
14. Kirk, Othmer, ed., *Encyclopedia of Chemical Technology*, Wiley Interscience, New York, (1982).