

내부식성 콘크리트 개발을 위한 기초연구로서 개질유황 혼합 콘크리트의 물성 평가

박 상 순[†] · 나 옥 정

상명대학교 건설시스템 공학과, 충남 천안시 동남구 상명대학교
(2016년 1월 11일 접수, 2016년 2월 22일 수정, 2016년 2월 22일 채택)

Evaluation on the Properties of Modified-sulfur Concrete as a Basic Study for Development of Anti-corrosive Concrete

Sang-Soon Park[†] and Ok-Jung Na

Department of Civil Engineering, Sangmyung University, 31, Sangmyungdae-gil, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 31066, Korea

(Received January 11, 2016; Revised February 22, 2016; Accepted February 22, 2016)

Due to the increased construction of offshore concrete structures and the use of de-icing salts for the purpose of snow removal, the needs for the development of anti-corrosive concrete are increasing. To solve these problems, an evaluation of the mechanical and durability properties for concrete were conducted by mixing modified-sulfur as 0 %, 5 %, 10 %, 15 % cement weight ratio. Both strengths and the properties affecting durability such as water absorption coefficient, chloride ion permeability, accelerated carbonation resistance, rapid freezing and thawing, and chemical resistance were evaluated. All evaluations performed were according to the test specifications associated KS. The results indicate that mixing of modified-sulfur lowered chloride ion permeability and improved chemical resistance.

Keywords : durability, accelerated corrosion test, salt damage, carbonation test, tidal zone

1. 서 론

건설재료 가운데 가장 큰 비중을 차지하고 있는 콘크리트는 내구성이 우수하여 반영구적인 구조물의 축조에 적용되어 왔다. 그러나 콘크리트 구조물이 오랜 기간 동안 공기 중의 이산화탄소 등에 노출되어 콘크리트가 중성화 되거나 최근 기상이변 및 겨울철 폭설로 인해 눈이나 얼음을 녹일 목적으로 도로나 교량에 사용되는 제빙제와 해양 환경에서의 염화물의 침투, 확산에 의하여 내부에 배근된 철근의 부식을 유발함으로써 균열을 발생시키고 내구수명을 저하시키는 문제가 발생하여 이에 대한 대책마련이 요구된다^{1,2)}. 또한, 콘크리트 구조물은 설계수명동안 일정한 성능 이상을 유지해야 하지만, 콘크리트 구조물은 시공되는 순간부터 물리적, 화학적인 외부 환경조건과 콘크리트의 내재적인 조건

에 의해 계속적으로 성능저하를 일으키므로 설계수명기간 동안 구조물의 안전성과 기능성을 확보하기 위해서는 콘크리트 구조물의 성능저하 원인·분석을 통한 내구성능 연구도 함께 이루어져야 한다^{3,4)}. 본 연구에서는 콘크리트의 내부식성능 향상을 위한 방법으로 산업폐기물인 폐유황을 활용하는 방법에 주목하였다⁵⁻⁷⁾. 유황은 주로 황화광물의 선광, 제련과정 중의 부산물로 생산되거나 석유정제중 생산되며 특히, 우리나라에서는 정유공장에서 원유 정유과정에서 부산물로 발생한다. 부산물로 발생된 유황은 산업자재로 판매되어 소비되었으나 근래에 중동지역 국가에서 원유정제를 실시함에 따라 세계적으로 공급과잉이 되고 있다. 이에 따라 2003년경부터 우리나라도 약 20여 만 톤 이상의 잉여 유황이 발생되기 시작하였고 따라서 별도의 활용대책이 없을 경우 폐기물처리를 위한 막대한 비용이 요구될 것으로 추정되므로 폐유황의 활용을 위한 대책 강구가 시급하였다⁸⁻¹⁰⁾. 석유소비량의 증가로 인한 회수되는 유황의 증가로

[†] Corresponding author: parkss87@smu.ac.kr

Table 1. Summaries on test items and standards

Item	Test items	Standard
Evaluation of the Basic Properties	Compressive strength test	KS F 2405
	Flexural strength test	KS F 2408
	Splitting tensile test	KS F 2423
	Watertightness test	KS F 4926
Durability of the Concrete	Chemicals resistant	JSTM C 7401
	Chloride ion coefficient	KS F 2711
	Chloride ion coefficient	NT Build 492
	Rapid freezing and thawing	KS F 2456
	Carbonation resistance	KS F 2584

Table 2. Mix proportion of concrete

Specimens	W/B [%]	S/B [%]	Unit weight[kg/m ³]					Modified sulfur [C×%]
			W	C	S	G	AE [%]	
Plain	45	45	367	165	779	956	1.1	0
CSN5								5
CSN10								10
CSN15								15

Table 3. Physical properties of cement

Specific gravity	Fineness [cm ² /g]	Setting [min]		Soundness [%]	Compressive strength [MPa]		
		Initial	Final		3day	7day	28day
3.15	3,500	220	320	0.1	26.7	41.2	57.6

선진 외국에서는 유황을 새롭게 활용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다^{11,12)}. 순수유황 자체만을 이용한 재료는 취성이 크고 낮은 내수성과 높은 열팽창계수 등의 재료적 결점 뿐 만 아니라 액상으로 녹이기 위해 140 °C 이상 고온 작업이 요구되므로 적용에 한계가 있었다. 미국, 일본 등에서 유황을 개질화(chemical modification)하여 사용하려는 시도가 1980년대부터 본격적으로 이루어져 왔으나 괄목할 만한 저융점화 기술은 성공하지 못하고 있다. 국내에서는 60 °C의 융점을 가진 개질유황이 개발되었으며 혼화제(admixtures)처럼 시멘트와 함께 치환하여 콘크리트에 적용할 수 있어 활용성이 넓어졌다¹³⁻¹⁵⁾.

따라서, 본 연구에서는 콘크리트의 내부식성을 향상시키는 목적으로 최적의 개질유황 혼입 콘크리트를 개발하는 것을 목적으로 우선 최적의 배합비율의 도출과 기본적인 물성의 파악을 위해 개질 처리된 유황을 결합재로 사용해 보통포틀랜드시멘트로 제조한 보통콘크리트와 개질유황 콘크리트로 공시체를 각각 제작하여 콘크리트의 역학적 특

성평가와 화학저항성실험, 촉진탄산화실험, 염소이온투과성실험 및 급속 동결융해실험 등의 각종 내구성 실험을 행하였다.

2. 실험

2.1 실험계획

개질유황 첨가량에 따른 콘크리트의 기초물성평가와 내구성능을 알기 위하여 Table 1과 같은 실험을 수행하였다.

2.2 배합설계

본 실험에서는 개질유황 첨가량에 따른 콘크리트의 기초물성평가와 내구성능을 알아보기 위하여 계획하였다. 시험 변수로는 개질유황의 첨가량(Cement×%로 0 %, 5 %, 10 %, 15 %)가 고려되었다. 시험체명과 콘크리트 배합표는 Table 2와 같다.

Table 4. Physical properties of fine aggregate

Aggregate	Density [g/cm ³]	Water absorption [%]	F.M	Unit weight [kg/m ³]	Weight of passing 0.08 mm (%)
Fine	2.6	1.5	2.5	1597	2.1

Table 5. Physical properties of coarse aggregate

Aggregate	Density [g/cm ³]	Water absorption [%]	F.M	Unit weight [kg/m ³]	G _{max} [mm]
Coarse	2.7	0.9	6.5	1655	20

Table 6. Physical properties of modified sulfur

Shape	Color	Specific gravity	Viscosity [mPa·s]	Degree of polymerization [g/mol]	Melting point [°C]	Sulfur of modified ratio [%]
Solid	Dark brown	2.07	0.02 (Temperature : 85 °C)	300~1,200 (Temperature : 60 °C)	60	98.0

Table 7. Chemical composition of modified sulfur

S	Si	P	Fe	Cu	Zn	Ti
97	0.319	0.101	0.0534	0.0065	0.0117	0.0344

Table 8. Properties of super-plasticizer

Item	Ingredient	Color	Specific gravity	Susceptibility [%]
High efficient AE water reducing agent	Polycarboxylate	Dark brown	1.080	18 ~ 25 %

2.3 실험재료

본 실험에서 사용한 시멘트는 국내 H사에서 제조한 보통 포틀랜드시멘트로서 그 물리적 성질은 Table 3과 같다. 잔 골재는 충남 공주 강모래, 굵은골재는 최대치수 20 mm의 쇄석골재이고 표면건조상태로 사용하였다. 이들의 물리적 성질은 Table 4와 5와 같다.

본 실험에서 사용한 유황은 H사에서 개질 처리된 개질유황으로서 그 물리적 성질은 Table 6과 같고 화학적 구성 성분은 Table 7과 같다.

본 실험에서 사용한 AE감수제는 국내 D사의 고성능AE 감수제를 사용하였으며, 그 특성은 Table 8과 같다.

2.4 실험방법

2.4.1 압축강도

개질유황에 따른 콘크리트 압축강도 시험은 KS F 2405 인 "콘크리트의 압축강도 시험" 방법에 준해 시험하였다.

Ø 100 × 200 mm 크기의 원주형 공시체를 Case별로 3개씩 제작하였으며, 재령(7일, 14일, 28일, 56일)간 22±2.5 °C의 수중양생 후 최대용량 100톤의 압축시험기로 강도를 측정하였다.

2.4.2 휨강도

개질유황에 따른 콘크리트 휨강도 시험은 KS F 2408인 "콘크리트의 휨강도 시험" 방법에 준해 시험하였다. 휨강도 시험에서 100 × 100 × 400 mm 크기의 사각형 공시체로 제작하였다. 공시체를 탈형하여 가로로 눕혀서 베어링 나비의 중앙에 놓고 지간의 3등분점에 상부 재하 장치를 접촉시킨다. 공시체에 일정한 속도로 하중을 가하여 공시체의 휨강도를 측정하였다.

2.4.3 쪼갬인장강도

개질유황에 따른 콘크리트 쪼갬인장강도 시험은 KS F

2423인 "콘크리트 쪼갬 인장 강도 시험" 방법에 준해 시험하였다. 공시체를 시험기 가압판 위에 편심하지 않도록 설치한다. 하중재하는 공시체에 충격을 가하지 않도록 똑같은 속도로 하중을 가하며 공시체가 파괴될 때 공시체가 쪼개진 면에서의 길이를 2개소 이상에서 0.1 mm까지 측정하여 그 평균을 공시체 길이로 하고, 쪼갬인장강도를 측정하였다.

2.4.4 물흡수계수

개질유황에 따른 콘크리트 물흡수계수는 KS F 2609 "건축 재료의 물 흡수 계수 측정" 방법에 준해 시험하였다. 물흡수는 외부로 부터의 압력 작용 없이 모세관 현상과 흡습 현상에 의해 재료 안에 물이 함습되는 현상을 말한다. 본 실험에서는 공시체의 측면을 예폭시나 파라핀으로 방수처리하고 약 20 °C 물에 2 ~ 10 mm 정도의 깊이로 담근다. 물에 담그기 전과 물에 담근 후 일정시간간격으로 공시체의 무게를 측정한다.

2.4.5 염소이온침투저항성실험(KS F 2711)

염소이온침투저항성 시험은 KS F 2711 "전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투 저항성 시험" 방법에 준해 시험하였다. 염화물이온 침투저항성 시험 전기장의 양극성을 활용하여 염소이온(Cl⁻)이 콘크리트에 침투 시 발생하는 저항을 통하여 콘크리트의 차염성능 및 내부 조직의 밀실한 정도를 상대적으로 평가하는 시험이다. 본 실험은 ∅ 100 × 50 mm의 원주형 공시체를 재령 28일간 수중양생 하였으며, Fig. 1과 같이 시편을 시험셀에 장착한 후 전원은 60 V의 직류를 ±0.1 V 정도로 안정적으로 공급하며, 전류의 측정은 기지의 저항체를 회로에 연결하여 전압을 측정하였다. 확산셀에 들어가는 전해질 용액은 Applied Voltage Cell의 (-)전극에 3.0 %의 NaCl 용액을 채우고 (+) 전극에는 0.3N의 NaOH 용액을 채운다.

측정은 30분 간격으로 6시간 동안 저항 양단에 걸리는

Table 8. Chloride ion penetrability based on charge passed

Total passed charge (coulombs)	Chloride ion penetrability
> 4000	High
2000 ~ 4000	Moderate
1000 ~ 2000	Low
100 ~ 1000	Very low
< 100	Negligible

전압을 측정하고 이를 전류로 환산한 후 식(1)을 이용하여 회로를 통과한 총 전하량을 산정한다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

여기서, Q는 회로를 통과한 전하량(Coulombs), I_n는 실험 시작 후 n분이 경과하였을 때의 전류(Amperes)이다.

위의 식으로부터 계산된 총 통과전하량을 근거로 Table 8에 제시된 범위구간과 비교하여 염소이온에 대한 침투저항성을 판단한다.

2.4.6 염소이온침투저항성실험(NT Build 492)

염소이온침투저항성 시험은 NT Build 492 시험방법에 준해 시험하였다. 염화물 확산계수 산정을 위한 염화물 침투시험으로 ∅ 100 × 50 mm의 원주형 공시체를 재령 28일간 수중양생 하여, 염분침투를 촉진하기 위해 3시간 진공처리를 실시하였다. 진공상태가 유지된 상태에서 포화 Ca(OH)₂ 수용액을 주입한 후 대기압 상태에서 18±2 시간동안 침지하는 전처리 과정을 거쳤다. 0.3N의 NaOH수용액을 양극으로 10 %의 NaCl 수용액을 음극으로 하여 초기 30V 전압을 가했을 때의 초기 전류 값을 기초로 하여 가압 전압 및 시험시간이 결정되며, 본 연구에서는 50V, 24시간으로 실시하였다. 염화물 침투깊이는 시험이 종료된 후 시험편을 할렬하여 절단면에 0.1M의 질산은(AgNO₃) 용액



Fig.1. Photos of rapid chloride penetration test to determine chloride penetrability of concrete by KS F 2711.

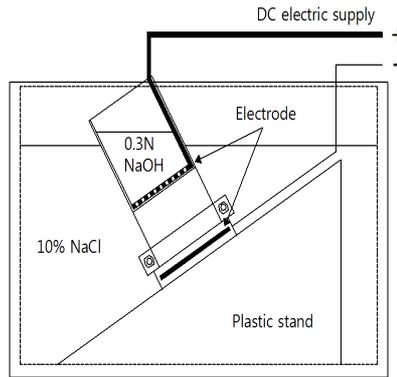


Fig. 2. Photos of rapid chloride penetration test to determine diffusion coefficient of concrete by NT Build 492.



Fig. 3. Photos of carbonation resistance test of concrete with modified sulfur.



Fig. 4. Photos of rapid freezing and thawing test. (a) Test chamber, (b) Measuring dynamic elastic modulus of specimen

을 분무하였을 때 은회색으로 변색된 부위를 측정하였다.

2.4.7 촉진탄산화 실험

촉진탄산화 시험은 KS F 2584 "콘크리트의 촉진탄산화 시험" 방법에 준해 시험하였다. 이 실험은 재령 초기에 강알칼리성인 콘크리트 시편을 높은 농도의 이산화탄소 환경에

노출시켜 콘크리트 내부의 pH 감소에 의한 탄산화 정도를 검토하여 내구적 저항을 평가하는 시험이다. 본 실험에서는 $10 \times 10 \times 10$ mm의 사각형 공시체를 대상으로 상대습도 60 ± 5 %, 온도 20 ± 2 °C 및 농도 5 %의 CO₂ 가스 환경으로 고정된 탄산화 시험기에 30일 동안 촉진 노출시켰다. 이후 축방향으로 할렬(割裂)하여 파단면에 1 % 페놀프탈레인 용액을 분무하였으며, CO₂ 가스에 노출된 표면에서부터 붉은색으로 변색된 부분을 측정하여 각 3개소에 대한 평균값으로 탄산화 깊이를 측정하였다.

2.4.8 급속 동결융해시험

급속 동결융해 시험은 KS F 2456 "급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험"으로 수중 급속 동결융해 시험방법(A법)에 준하여 실시하였다. $100 \times 100 \times 400$ mm 크기의 사각형 공시체를 Case별로 3개씩 제작하였으며, 재령 14일 간 수중양생 후 시험을 수행하였다. 콘크리트 공시체의 중심온도가 동결시 -18 ± 2 °C, 융해시 $+4 \pm 2$ °C가 되도록 하였으며, 1cycle은 4시간이 소요되도록 하였다. Fig. 4와 같이 매 30cycle 간격으로 중량과 1차 공명진동수(Hz)를 측정하였으며, 일본 M사의 공명진동에 의한 콘크리트 동탄성계수 측정 장비를 이용하였다.

2.4.9 화학저항성시험

콘크리트의 화학저항성 시험방법은 JSTM C 7401 "콘크리트의 용액침지에 의한 내약품성 시험" 방법에 준해 시험하였다. 내부식성이 요구되는 대표적인 구조물로 콘크리트 하수암거는 밀폐된 공간에서 생활하수와 산업체 오폐수에 의한 화학작용을 받는 열악한 환경에 위치해 있기 때문에 내구성 평가를 위해서는 내화학성능의 평가가 필수적인 요소이다. 본 실험에서는 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 대상으로 화학저항성시험을 수행하였다. 재령 28일간 수중양생 후 5% - Sulfuric Acid(H₂SO₄)용액에 공시체를 소정기간 침지시킨 후 소정의 재령에서 외관관찰, 질량 변화율로 화학저항성을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도

개질유황 첨가에 따른 압축강도는 Fig. 5와 같다. 개질유황 첨가가 증가함에 따라 압강도의 강도증진이 나타나지 않은 것으로 확인되었다. 재령 3일에서의 압축강도 CSN5는 Plain과 비교하여 5 %, CSN10는 13 %, CSN15는 34 %로 감소하는 것으로 나타났다. 재령 7일에서의 CSN5는 Plain과 비교하여 5 %, CSN10는 13 %, CSN15는 29 %로 감소하는 것으로 나타났으며, 재령 28일에서의 CSN5는 Plain과 비교하여 8 %, CSN10는 17 %, CSN15는 28 %로

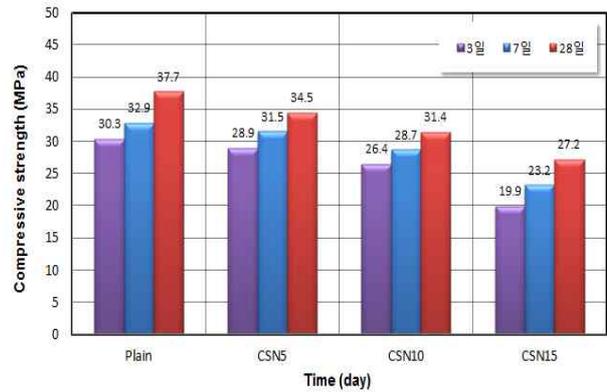


Fig. 5. Compressive strength versus mixing proportion of modified sulfur with curing time.

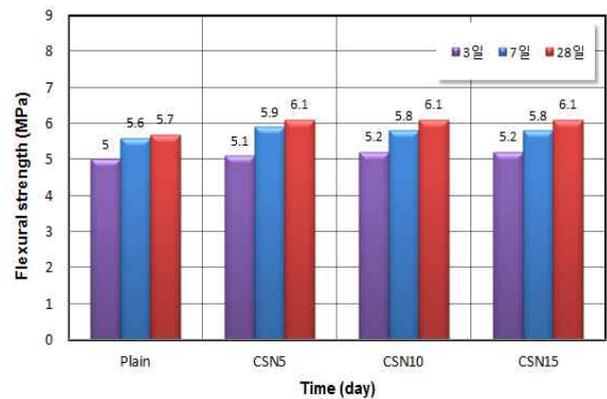


Fig. 6. Flexural strength versus mixing proportion of modified sulfur with curing time.

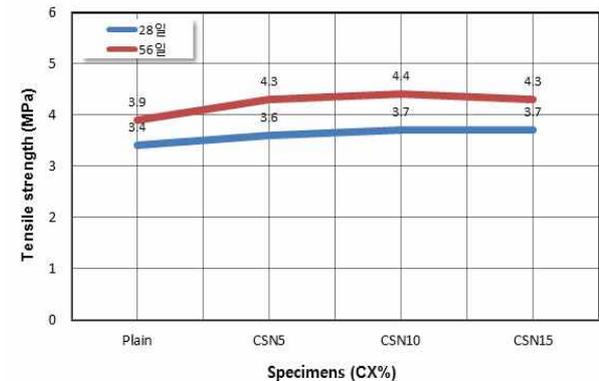


Fig. 7. Splitting tensile strength versus mixing proportion of modified sulfur with curing time.

감소하는 것으로 나타났다.

3.2 휨강도

개질유황 첨가에 따른 휨강도는 Fig. 6와 같다. 개질유황 첨가가 증가함에 따라 장기재령으로 갈수록 휨강도 증진이 되는 것으로 확인되었다. 재령 7일에서의 휨강도 CSN5는

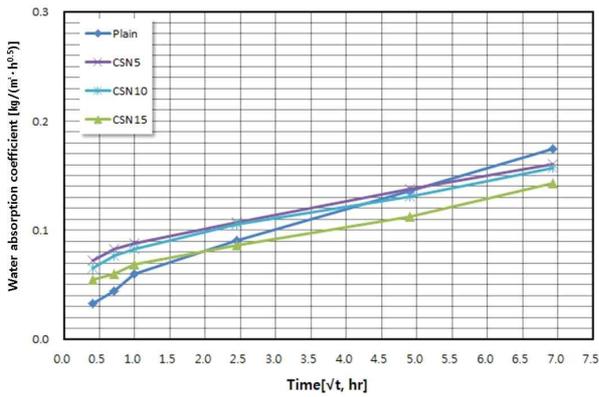


Fig. 8. Water absorption coefficient of specimens with curing time.

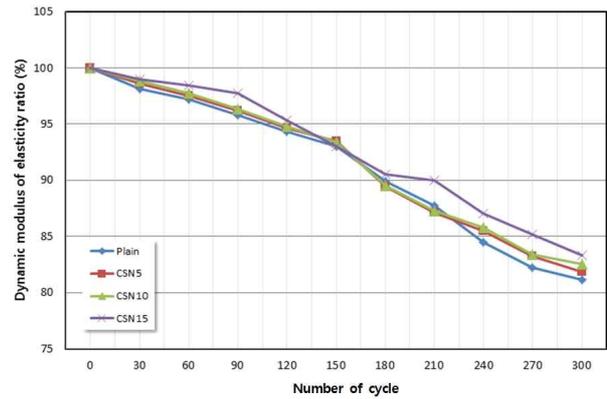


Fig. 11. Relative dynamic modulus of elasticity with number of cycle.

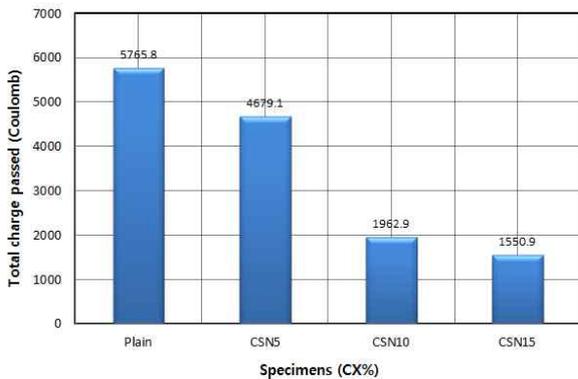


Fig. 9. Total charge passed with mix proportion (KS F 2711).

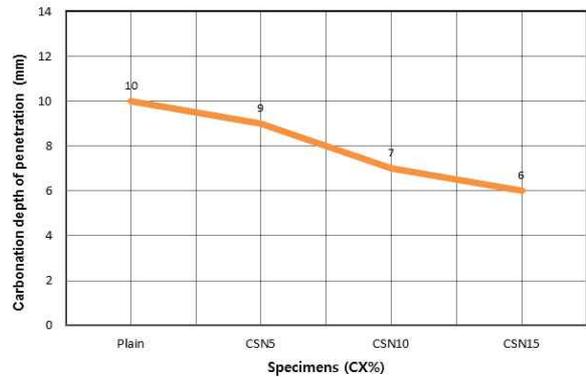


Fig. 12. Carbonation depth of penetration with mix proportion.

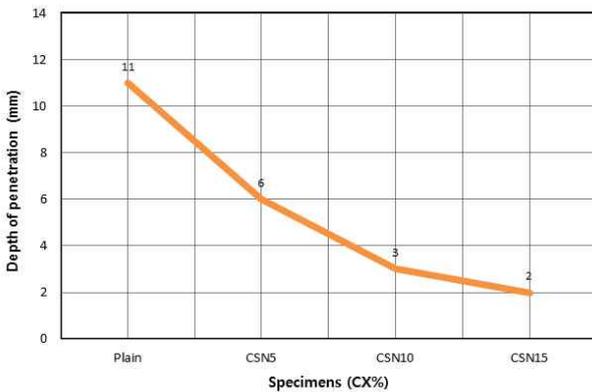


Fig. 10. Depth of penetration with mix proportion (NT Build 492).

Plain과 비교하여 2 %, CSN10는 4 %, CSN15는 4 %로 증가하였다. 재령 28일에서의 CSN5는 Plain과 비교하여 5 %, CSN10는 4 %, CSN15는 4 %로 증가하였다. 재령 56일에서의 CSN5는 Plain과 비교하여 7 %, CSN10는 7 %, CSN15는 5 %로 증가하는 것으로 나타났다. 장기재령으로 갈수록 CSN10은 Plain에 비해 높은 휨강도를 나타내었다.

3.3 쪼갬인장강도

개질유황 첨가에 따른 쪼갬인장강도는 Fig. 7과 같다. 개질유황 첨가가 증가함에 따라 장기재령으로 갈수록 인장강도가 증진이 되는 것으로 확인되었다. 개질유황 첨가한 시험체들이 Plain보다 0.5 %씩 증가하는 것으로 나타났다. 장기재령으로 갈수록 쪼갬인장강도가 증가하는 것으로 나타났다.

3.4 물흡수계수

개질유황 첨가에 따른 물흡수계수는 Fig. 8과 같다. 개질유황 첨가가 증가할수록 시험체의 물흡수량은 감소되는 것으로 확인되었다. 초기에 Plain이 낮은 물흡수량을 나타냈지만, 시간이 흐를수록 Plain은 가장 높은 흡수량을 나타냈다. 7시간 이후의 각 시험체별 물흡수계수비를 살펴보면 CSN5는 0.16, CSN10은 0.15, CSN15는 0.14로 나타났다. Plain의 물흡수계수비는 0.17로 나타났다.

3.5 염소이온침투저항성(KS F 2711)

개질유황 첨가에 따른 염소이온 침투저항성은 Fig. 9와 같다. 개질유황 첨가가 증가할수록 내염해성이 우수하다는

Table 9. Relative dynamic modulus of elasticity with the number of freezing and thawing cycle

Specimens	Relative dynamic modulus of elasticity[%]									
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Plain	98.1	97.2	95.8	94.3	93.0	89.9	87.7	84.5	82.2	81.1
CSN5	98.6	97.5	96.2	94.6	93.5	89.4	87.1	95.5	83.2	81.8
CSN10	98.8	97.7	96.3	94.8	93.4	89.5	87.3	85.8	83.4	82.5
CSN15	99.0	98.4	97.7	95.3	93.0	90.5	90.0	87.0	85.2	83.3

것으로 확인되었다. Plain과 CSN5는 염소이온 침투성이 매우 높게 나타났다. CSN10과 CSN15의 염소이온 침투성은 낮게 나타났다.

3.6 염소이온침투저항성(NT Build 492)

개질유황 첨가에 따른 염소이온 침투저항성은 Fig. 10과 같다. 개질유황 첨가가 증가할수록 염화물이온침투 저항성이 우수하다는 것으로 확인되었다. 염화물 침투깊이를 측정 한 결과, Plain은 11mm, CSN5는 6mm, CSN10는 3mm, CSN15는 2mm로 측정되었다.

3.7 동결융해저항성

개질유황 첨가에 따른 동결융해 사이클에 대한 상대 동탄성계수는 Table 9와 Fig. 11과 같다. 첫 30cycle에서 평균 2 %의 상대 동탄성계수가 하락하였다. 300cycle 후 시험체 들은 평균 8 %의 상대 동탄성계수가 하락하였다. 300cycle 까지 시험을 한 결과, 개질유황 첨가가 동결융해시험에서 약간의 상대 동탄성계수 차이가 있었다. 상대 동탄성계수가 비슷한 경향을 보였다.

3.8 축진탄산화

개질유황 첨가에 따른 축진탄산화는 Fig. 12와 같다. 개질유황 첨가가 증가할수록 탄산화침투 저항성이 우수하다는 것으로 확인되었다. 탄산화 침투깊이를 측정한 결과, Plain는 10 mm, CSN5는 9 mm, CSN10는 7 mm, CSN15는 6 mm로 측정되었다.

3.9 화학저항성실험

개질유황 첨가에 대한 화학저항성은 Fig. 9와 Fig. 5과 같다. 개질유황 첨가가 증가할수록 시험체는 황산에 대한 저항성이 우수한 것으로 확인되었다. 황산 5 % 용액에 시험체를 침지시켜 시험체의 중량을 측정한 결과, 1주가 지난 뒤부터 시험체들의 중량차이가 있는 것으로 나타났다. 재령 56일에서 Plain이 100 % 중량감소라고 하였을 때, CSN5의 경우 Plain과 비교하여 84 %, CSN10는 79 %, CSN15는 31 %으로 중량이 감소하는 것으로 나타났다.

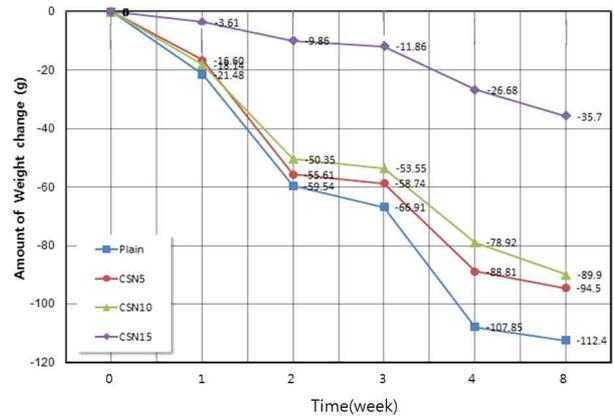


Fig. 13. Amount of weight change with curing time age.

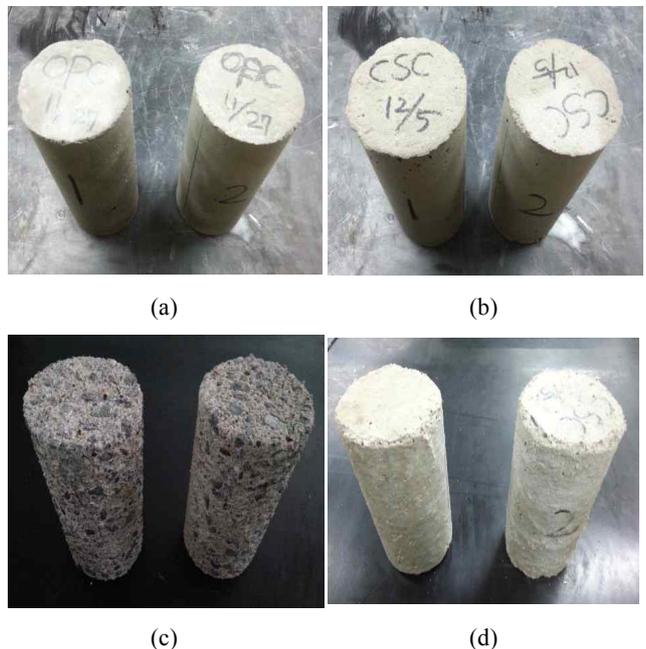


Fig. 14. Chemical resistance of (a) Plain cured for 7 days, (b) CSN cured for 7 days, (c) Plain cured for 28 days, (d) CSN cured for 28 days.

3.10 종합고찰

개질유황 첨가비율이 증가할수록 압축강도는 다소 감소하는 반면, 인장강도와 쪼갬인장강도는 5,10 %까지 증가한 후 15 %에서는 10 %와 거의 동일한 것으로 나타났다. 전체적으로 강도증진 효과는 크지 않은 것으로 나타났으며, 특히 압축강도가 저하된다는 측면에서 개질유황이 결합재로서의 화학적 결합을 증진시켜 주는 역할보다는 골재와 시멘트 페이스트간의 천이영역에 존재하는 다수의 미세공극을 충전(充填)하는 충전재로서의 역할이 더 크다고 판단된다. 이러한 부분은 SEM, MIP, XRD와 같은 미시적인 분석을 통해 향후 보다 명확하게 규명할 필요가 있다고 판단된다. 수밀성을 평가하는 물흡수계수는 개질유황 첨가비율 증가에 따라 감소되어 개질유황의 콘크리트 미세공극 충전효과를 확인할 수 있었다. 이러한 개질유황의 미세공극 충전에 따른 수밀성 향상효과는 염화물이온 침투저항성의 증가, 탄산화 침투깊이의 감소, 내산성의 증가, 동결융해 저항성 증가 결과를 통해서도 확인할 수 있다. 특히, 개질유황의 첨가가 부식 열화인자인 염화물이온침투 저항성 증가에 매우 효과적이었다. 개질유황 10 % 혼합시 약 66 % 정도 통과전하량을 저하시키며, 침투깊이도 73 % 정도 감소시켜 내부식성 재료로서의 가능성을 확인하였다. 내산성도 우수했으며 개질유황 15 % 혼합시에는 8주 후 중량감소비율을 69 % 감소시키는 것으로 나타났다.

개질유황의 첨가비율에 따른 강도 및 내구성능 평가 결과를 종합하면, 개질유황의 첨가에 따른 강도증진 효과는 크지 않다. 압축강도는 다소 감소하며, 휨과 쪼갬인장강도는 다소 증가하나 증가폭이 크지 않다. 이러한 원인은 개질유황이 결합재보다는 콘크리트내의 골재와 시멘트페이스트 계면에 존재하는 미세공극을 채워주는 충전재로서만 작용하기 때문인 것으로 판단되나 이 부분은 재료의 미시분석을 통해 보다 명확하게 규명할 필요가 있다. 반면, 물흡수계수, 탄산화저항성, 동결융해저항성은 개질유황 첨가비율에 따라 향상된다. 특히, 10 % 이상 개질유황 혼합 시 철근의 대표적 부식인자인 염화물의 침투저항성능은 크게 향상되며 15 % 이상 혼합 시 내산성도 크게 향상된다.

4. 결론

내부식성 콘크리트의 개발을 위한 기초연구로서 개질유황 첨가에 따른 콘크리트의 역학적 특성과 내구성능을 알아보기 위해 기초물성평가와 내구성평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개질유황첨가 콘크리트인 CSN가 개질유황 무첨가인 Plain보다 높은 휨강도와 쪼갬인장강도를 나타내었으

며, CSN10이 가장 높은 휨강도 및 쪼갬인장강도를 나타내었다. 반면 압축강도에서는 증진효과가 없이 오히려 첨가비율이 증가할수록 강도가 감소하는 경향을 보였다. 화학적 결합보다는 물리적 충전효과가 큰 것이 원인으로 판단되며 이 부분은 향후 미시분석을 통해 보다 명확한 규명이 요구된다. 휨강도와 쪼갬인장강도에서는 개질유황의 첨가가 초기재령에서 장기재령으로 갈수록 강도증진에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

- 2) 물흡수계수결과, 개질유황 첨가에 따라 물의 흡수에 대한 저항성이 높아지며 개질유황이 증가할수록 흡수저항성이 향상되었다. CSN5, CSN10, CSN15는 Plain에 비해 6 %, 12 %, 18 %로 물흡수량이 감소하였다. 수밀성 및 방수성에 유효한 효과가 있음이 확인되었다.
- 3) 염소이온침투저항성결과, 개질유황 첨가가 증가할수록 내염해성에 대한 염소이온 침투저항성이 우수하였다. KS F 2711 시험에서는 CSN10과 CSN15는 Plain보다 확연히 낮은 염소이온 침투성을 나타내었으며, NT Build 492 시험에서도 개질유황 첨가가 증가할수록 낮은 염화물 침투깊이로 나타났다. 동결융해저항성은 Plain과 CSN과 약간의 상대동탄성계수 차이가 있었지만, 300cycle까지 시험체들은 평균 8 %의 비슷한 상대동탄성계수로 하락하였다.
- 4) 촉진탄산화시험결과 개질유황 첨가비율이 증가할수록 탄산화침투에 대한 저항성이 우수하였으며, 화학저항성결과, 촉진탄산화와 비슷한 경향으로 내황산염에 대한 저항성이 우수하였다. 중량변화에 큰 차이를 보였으며, 외관으로 보기에도 확연히 확인할 수 있었다.
- 5) 본 연구의 실험결과를 종합하면, 개질유황 첨가는 개질유황 무첨가보다 역학적 특성 및 내염해성 및 내화확성을 포함한 내구성능에 대해 뛰어난 우수성을 보여주어 내부식성 콘크리트로서의 개발가능성을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 상명대 교내연구비 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. D. W. Ryu, W. J. Kim, W. H. Yang, J. H. You, J. W. Ko, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **12**, 315 (2012).
2. H. J. Hwang, *Ms. Thesis*, p. 25, Donggeui University (2010).
3. J. I. Park, *Ms. Thesis*, p. 45, Andong National University (2008).
4. J. I. Park, S. H. Bae, G. M. Lee, J. D. Ha, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, **11**, 145 (2011).
5. S. E. Kim, *Ms. Thesis*, p. 120, Chungbuk National University

- (2013).
6. D. J. Kim, *Ms. Thesis*, p. 17, University of Suwon (2002).
 7. J. Go, *Ms. Thesis*, p. 44, Chungbuk National University (2013).
 8. C. G. Jo, *Ms. Thesis*, p. 31, Changwon National University (2003).
 9. H. J. Jung, J. N. Lee, J. H. Um, M. S. Coe, *J. Rec. Const. Resources.*, **12**, 33 (2012).
 10. J. H. Yun, *J. Arch. Ins. of Kor.*, **20**, 143 (2004).
 11. J. H. Yun, *J. Arch. Ins. of Kor.*, **22**, 95 (2004).
 12. C. K. Park, Study On The Hydraulic Sulfur Modified Cement Concrete, KITEC Technology Report 201001 (2011).
 13. S. T. Lee, *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, **12**, 19 (2008).
 14. J. C. Kim, H. S. Kim, *J. Rec. Const. Resources.*, **11**, 49 (2011).
 15. J. C. Kim, H. S. Kim, T. H. An, S. U. Han, *J. Rec. Const. Resources.*, **10**, 79 (2010).