

수용성 유황 첨가 콘크리트의 역학 특성 및 탄산화 저항성

홍기남[†] · 지세영 · 박재규 · 정규산 · 한상훈

충북대학교 토목공학과

(2014. 4. 9. 접수 / 2014. 7. 16. 채택)

Mechanical Properties and Carbonation Resistance of Water-Soluble Sulfur Concrete

Ki Nam Hong[†] · Se Young Ji · Jae Kyu Park · Kyu San Jung · Sang Hoon Han

Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

(Received April 9, 2014 / Accepted July 16, 2014)

Abstract : In this study, two types of water-soluble sulfur, LSA and LSB, were developed and the influence of the water-soluble sulfur on the mechanical properties and durability of concrete were experimentally evaluated. In order to evaluate mechanical properties and carbonation resistance of concrete with water-soluble sulfur, compressive strength test, flexural strength test, bonding strength test, and carbonation resistance test were performed. Compressive strength of only concrete with 1% LSA was increased while that of concrete with LSB was proportionally increased with the higher LSB dosage. On the other hand, flexural strength of concrete with LSA and LSB was increased by 12-41% and 36-74%, respectively. Carbonation resistance of concrete with water-soluble sulfur were increased by 25-66%. As a result, it should be noted that the water-soluble sulfur can not only solve the demerit of sulfur concrete but also offer the durability of sulfur concrete.

Key Words : water-soluble sulfur, compressive strength, flexural strengths, carbonation resistance

1. 서론

과거 건설되었던 콘크리트 구조물은 시대적, 환경적 요인으로 인해 현재 열화가 급속하게 진행되고 있다. 열화는 염해, 중성화, 화학적 침식, 동해, 건조수축 등이 주요 원인으로 철근부식, 압축강도 및 탄성계수 저하, 콘크리트 단면 감소 등을 야기한다. 각 국가마다 기후와 환경적인 영향으로 열화의 피해규모에는 차이가 있지만 콘크리트의 열화방지 방안은 전 세계적으로 공통적인 관심사로 부각되고 있다.

콘크리트의 성능 개선을 위한 기존 연구들은 산업 부산물 및 혼화재료를 콘크리트에 혼입하여 역학특성 및 내구성이 일반콘크리트와 유사하거나, 뛰어난 콘크리트를 얻을 수 있었다^{1)~3)}.

이러한 산업 부산물을 사용해 성능이 개선된 콘크리트는 도로포장, 기반, 노반, 토공에서 사용성을 평가하였으며, 또한 지하구조물 및 PC 구조물에서도 사용성을 평가되었다^{4)~9)}. 산업 부산물 중에 하나인 유황은

현재 전 세계적으로 과잉 공급되고 있으며, 그 양은 2011년도 까지 약 600~1200백만 톤이 발생되었다¹⁰⁾. 석유 및 가스 업계에서 발생하는 유황은 저장설비가 부족한 실정이며, 대부분이 현장에 적치되거나 녹여서 저장된다. 하지만 정유공장 및 가스처리 공장에서 생산되는 유황을 처리할 저장 용량은 미흡한 실정이다.

최근에는 과잉 공급되는 유황을 처리하기 위해 비료, 화학제품(황산), 안료, 살충제, 고무 경화, 농업분야에 유황이 사용되고 있다¹¹⁾. 하지만 현재 생산량은 소비량을 초과하고 있으며, 소비량은 증가하지 않고 있으나 생산량은 계속 증가하는 추세이다. 유황의 새로운 소비처 확보 방안으로 건설재료로서 잉여 유황을 사용하기 위한 연구가 진행되고 있으며 다양한 연구결과가 발표되었다. 최근에는 120°C 이상의 유황 용융점을 60~80°C까지 낮추고 포틀랜드 시멘트와 함께 사용하여 안정성 및 시공성을 증진시킨 개질유황 콘크리트가 개발되었다. 개질유황 콘크리트를 도로 및 하수관거, 인공어초 등에 적용된 연구결과가 발표되었으며,

[†] Corresponding Author : Ki-nam Hong, Tel : +82-43-261-2378, E-mail: hong@cbnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungbuk National University, 52, Naesudong-ro, Heungdeok-gu, Cheongju, Chungbuk 361-763

콘크리트의 내구성 개선을 목적으로 현장에 적용되고 있으나 이 역시 현장에서 용용시켜 사용해야 하는 번거로움과 별도의 장비 사용으로 인한 시공성의 문제점을 가지고 있다¹²⁾⁻¹⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 기존 개질유황의 문제점을 개선하기 위해서 개발된 수용성 유황을 첨가한 콘크리트의 역학적 특성 및 탄산화 저항성을 평가하고자 한다.

2. 유황 콘크리트

Fig. 1에 일반 콘크리트와 유황 콘크리트의 배합을 비교하여 나타내었다. 일반 콘크리트(Portland Cement Concrete, 이하 PCC)는 골재, 배합수, 그리고 바인더 역할을 하는 시멘트로 구성된다. 유황 콘크리트(Sulfur Concrete, 이하 SC)는 Fig. 1(b)에 나타난 것과 같이 필러, 골재, 그리고 유황으로 구성된다. SC는 고열에서 용융된 유황을 가열된 골재 및 필러에 혼합하여 제조된다. SC에서는 유황이 결합재 역할을 하기 때문에 시멘트와 물이 사용되지 않는다. SC는 압축강도, 휨강도, 동결융해 저항성, 내산성, 내화화성이 PCC와 비교하여 매우 탁월하다. 그러나 SC는 많은 장점에도 불구하고 높은 공사비와 많은 시공제약으로 인해 매우 제한적으로 사용되고 있다.

최근 국내에서는 SC의 문제점을 개선한 개질유황 콘크리트(Modified Sulfur Cement Concrete, 이하 MSCC)가 개발되어 사용되고 있다. MSCC는 유황과 Pyridine을 중합반응시켜 제조된 개질유황과 배합수, 골재, 그리고 시멘트로 구성된다. MSCC에서는 PCC에서와 같이 시멘트가 바인더 역할을 한다. MSCC에서 개질유황은 골재를 코팅하여 콘크리트의 동결융해 저항성 및 내화화성을 개선하는 역할을 한다. 그러나 MSCC 제조 공정에도 개질유황을 용용하는 공정이 포함되어 있기 때문에 현장 타설에 많은 어려움이 있다.

SC와 MSCC의 단점을 개선하기 위하여 개발된 수용

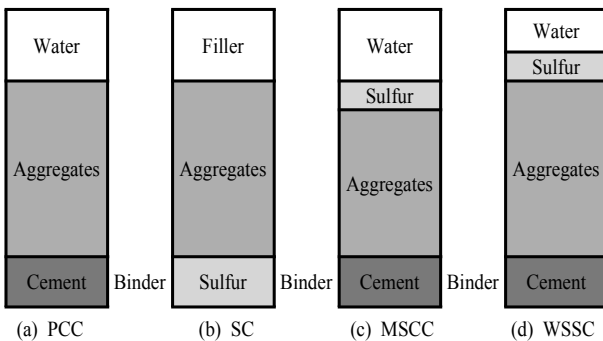


Fig. 1. Composition of PCC, SC, MSCC, WSSC.

성 유황 콘크리트(Water-Soluble Sulfur Concrete, 이하 WSSC)는 골재, 시멘트, 배합수, 그리고 수용성 유황으로 구성된다. WSSC에서는 MSCC와 동일하게 시멘트가 바인더 역할을 한다. WSSC에 혼화재료로 첨가된 수용성 유황은 콘크리트의 역학적 특성과 내구성을 개선하는 역할을 담당한다. WSSC는 SC와 MSCC 제조 공정에 포함되어 있는 유황 용융공정이 포함되어 있지 않기 때문에 PCC와 동일한 방법으로 시공될 수 있다는 것이 특징이다.

3. 사용재료 및 시험계획

3.1. 사용 재료

본 연구에서는 가성소다와 생석회를 이용하여 2가지 종류의 수용성 유황을 제조하였다. 가성소다를 이용하여 제조된 수용성 유황은 LSA, 생석회를 이용하여 제조된 수용성 유황은 LSB로 명명하였다. Table 1과 2에 XRF시험을 통해 얻어진 LSA와 LSB의 화학조성을 나타내었다. LSA와 LSB의 유황함량은 각각 70.4%, 38.7%로 LSA가 LSB에 비해 2배의 유황을 함유하고 있음을 표를 통해서 확인할 수 있다.

WSSC 제작에 사용된 시멘트는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트이다. Table 3에 사용 시멘트의 물리적 특성을 나타내었다. 배합에 사용된 감수제는 국내 K사의 고성능 감수제이며 Table 4에 그 특성을 나타내었다. 콘크리트 배합의 잔골재는 비중 2.60, 조립률 2.99, 흡수율 2.90%의 경북 문경지역 강모래가 사용되었다. 굵은골재는 굵은골재 최대치수 20 mm, 비중 2.63, 조립률 7.03, 흡수율 1.01%의 충북 옥천지역에서 생산되는 쇄석이 사용되었다.

Table 1. XRF test result of LSA

Formula	H ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	CaO (%)
Concentration	11.9	70.37	17.4	0.181	0.117

Table 2. XRF test result of LSB

Formula	H ₂ O (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)	P ₂ O ₅ (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)
Concentration	50.8	38.72	10.17	0.143	0.077	0.0137

Table 3. Physical characteristics of cement

Setting time		Blaine (cm ² /g)	Specific gravity	Stability (mm)
Initial (m)	Final (h:m)			
221	05:03	3,390	3.15	0.5

Table 4. Properties of Super plasticizer

Color	Phase	Specific gravity	pH
Dark Brown	Liquid	1.06±0.05	5.5

3.2. 시험 계획

본 연구에서는 수용성 유황의 콘크리트에 대한 영향을 평가하기 위해 총 7개 배합이 설계되었다. 시험변수로 수용성 유황의 종류(LSA, LSB)와 첨가량(1%, 3%, 5%)이 고려되었다. 수용성 유황의 첨가량은 시멘트 중량에 대한 중량비이다. 모든 배합에서 목표슬럼프, W/C비, 잔골재율은 각각 14±2 cm, 40%, 45%로 동일하게 설정하였다. Table 5에 각 배합의 배합설계를 나타내었다. 모든 배합의 W/C가 40%로 동일하지만 단위수량이 배합에 따라 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 수용성 유황에 함유된 수량이 높기 때문에 배합설계에서 수용성 유황의 첨가량을 수량으로 고려했기 때문이다.

WSSC의 성능을 평가하기 위해 굳지 않은 콘크리트 특성, 역학 특성, 그리고 내구성을 검토하였다. 굳지 않은 콘크리트 특성으로는 슬럼프와 공기량이 검토되었다. 역학 특성을 평가하기 위해 압축강도, 휨강도, 접착강도 시험이 실시되었다. 그리고 WSSC의 내구성 평가를 위해 탄산화 저항성 시험이 실시되었다. 각 시험 항목은 Table 6에 나타난 기준에 따라 실시되었다. 압축강도 시험은 $\phi 100 \times 200$ mm 크기의 원주형 공시체를 이용하였으며, 휨강도 및 탄산화 저항성 시험은 $100 \times 100 \times 400$ mm 크기의 시편을 사용하였다. 접착강도 시험은 일반콘크리트로 제작된 $300 \times 300 \times 50$ mm 크기의 밀판에 WSSC를 타설한 시편에 대해 실시되었다.

Table 5. Mixing design of concrete

Mixture	Unit weight(kg/m ³)					Water-soluble sulfur (C X%)
	W	C	S	G	AD	
R40-CON	185.0	462	737	917	1.02	0
R40-LSA1	180.4					1
R40-LSA3	171.1					3
R40-LSA5	161.9					5
R40-LSB1	180.4					1
R40-LSB3	171.1					3
R40-LSB5	161.9					5

※ R40 -LSA 1

① ② ③

① R40: Water-Cement 40%

② LSA and LSB: Water-soluble sulfur type

③ Water-soluble sulfur weight ratio: 1=1%, 3=3%, 5=5%

Table 6. Test items and standards

Properties	Test items	Test standard
Fresh concrete properties	Slump test	KS F 2402
	Air content	KS F 2409
Mechanical properties	Compressive strength	KS F 2405
	Flexural strength test	KS F 2408
	Bond strength	KS F 2762
Durability	Accelerated carbonation	KS F 2584

4. 시험 결과

4.1. 슬럼프 및 공기량

Table 7에 수용성 유황의 종류 및 첨가량에 따른 슬럼프 및 공기량 시험 결과를 나타내었다. 기준 배합 R40-CON의 슬럼프는 16 cm로 목표 슬럼프 14±2 cm를 만족하였다. LSA를 1%, 3%, 5% 첨가한 배합의 슬럼프는 각각 12 cm, 11 cm, 12 cm 이었다. LSA 첨가량 증가로 인한 슬럼프의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. LSB를 1%, 3%, 5% 첨가한 배합의 슬럼프도 각각 12 cm, 13 cm, 12 cm로 첨가량 증가에 따른 슬럼프 변화는 거의 관찰되지 않았다. 한편, LSA와 LSB를 첨가한 콘크리트의 슬럼프는 모두 평균 12 cm로 기준배합보다 4 cm 감소하였다. 이는 배합과정에서 수용성 유황의 첨가량만큼 배합수량을 감소시킨 것이 원인이라고 판단된다. 하지만 거의 모든 배합의 슬럼프가 14±2 cm의 목표 슬럼프를 만족하는 것으로 나타나 작업성에는 큰 문제가 없는 것으로 판단되었다.

공기량은 LSB를 1% 첨가한 배합의 1.6%를 제외하고 대부분 배합에서 1% 이하의 값을 나타내었다. 일반적으로 AE제를 사용하지 않은 콘크리트의 공기량은 1% 내외의 값을 나타낸다. 수용성 유황콘크리트의 공기량도 약 1%로 나타나 수용성 유황의 첨가가 공기량에 주는 영향은 매우 미미함을 확인할 수 있었다.

Table 7. Results of slump and air content

Mixture	Water-soluble sulfur (C*%)	Slump (cm)	Air (%)
R40-CON	0	16	0.7
R40-LSA1	1	12	1.0
R40-LSA3	3	11	0.9
R40-LSA5	5	12	1.0
R40-LSB1	1	12	1.6
R40-LSB3	3	13	0.8
R40-LSB5	5	12	0.9

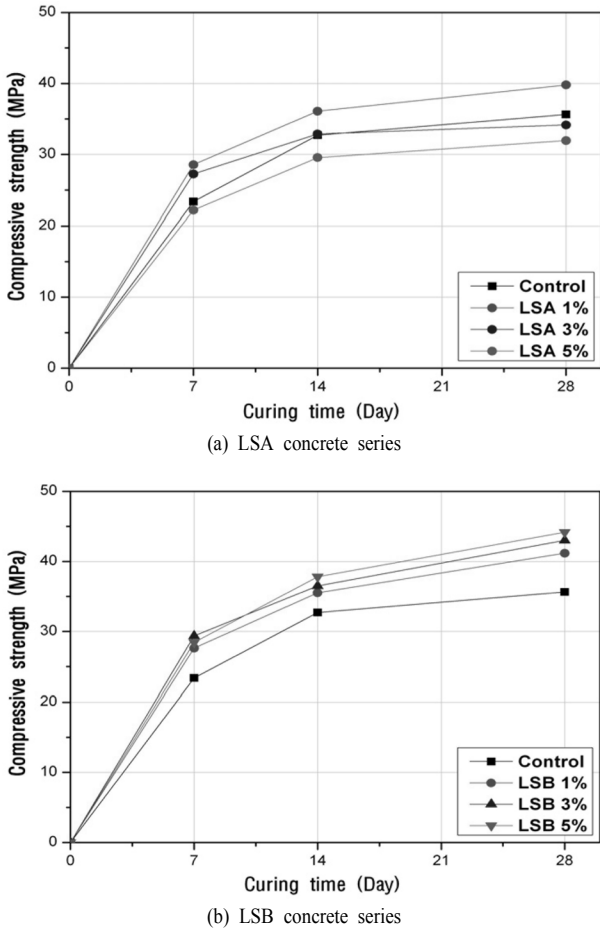


Fig. 2. Comparison of compressive strengths.

4.2 압축강도

Fig. 2에 재령에 따른 각 배합의 압축강도 변화를 나타내었다. 압축강도는 재령 7일, 14일, 28일에 실시되었다. Fig. 2(a)는 LSA 첨가량에 따른 콘크리트 압축강도의 변화를 보여준다. LSA 첨가량이 증가할수록 콘크리트 압축강도는 재령에 관계없이 감소하는 경향을 나타내었다. 기준 콘크리트 28일 압축강도에 대한 LSA 1%, 3%, 5%를 첨가한 콘크리트의 압축강도 비는 각각 1.12, 0.96, 0.90으로 나타났다. LSA를 1% 첨가한 콘크리트만이 기준 콘크리트보다 12% 높은 강도를 발현하였고, 3%와 5%를 첨가한 콘크리트는 기준 콘크리트보다 각각 4%, 10% 낮은 압축강도를 나타내었다.

Fig. 2(b)에는 LSB 첨가량에 따른 콘크리트 압축강도 변화를 나타내었다. LSB를 첨가한 콘크리트의 압축강도는 첨가량이 증가할수록 높은 압축강도를 발현하였다. 기준 콘크리트의 재령 28일 압축강도에 대한 LSB 1%, 3%, 5%를 첨가한 콘크리트의 압축강도 비는 각각 1.16, 1.21, 1.24로 나타났다. LSB를 첨가한 모든 콘크리트가 기준 콘크리트보다 최소 16%이상 큰 압축

강도를 나타내었다. 이는 LSB에 수화반응에 기여하는 CaO과 Ca(OH)₂ 성분 이 다량 함유되어 있기 때문인 것으로 사료된다.

이상의 압축강도 시험결과로부터 LSA는 첨가량 이 증가할수록 압축강도가 감소하는 반면에 LSB는 첨가량이 증가할수록 압축강도도 비례적으로 크게 발현됨 이 확인되었다.

4.3 휨강도

수용성 유황을 첨가한 콘크리트의 휨강도 시험을 재령 28일에 실시하였다. Fig. 3에 유황의 종류 및 첨가량에 따른 휨강도 변화를 나타내었다. LSA를 첨가한 콘크리트의 휨강도는 기준 콘크리트 휨강도와 비교하여 크게 증가함을 Fig. 3(a)은 나타내고 있다. 기준 콘크리트에 대한 LSA 1%, 3%, 5%를 첨가한 콘크리트의 휨강도 비는 각각 1.35, 1.41, 1.40으로 나타났다. LSA를 첨가한 콘크리트의 휨강도 증가율 범위는 35~41% 이었다. LSA 콘크리트의 휨강도 증가는 압축강도와 휨강도가 비례한다는 기존 이론과 상이한 결과이다. 이는

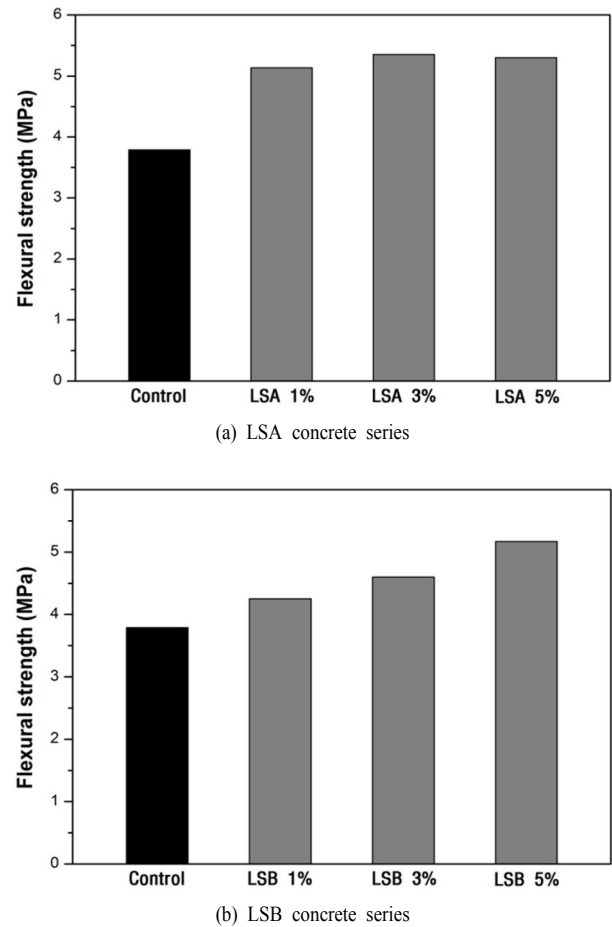


Fig. 3. Comparison of flexural strengths (28-day age).

LSA가 콘크리트 인장강도 발현에 가장 중용한 영향을 미치는 골재와 시멘트 풀 사이 계면의 균열저항성을 향상시키기 때문인 것으로 판단된다. LSA 첨가 콘크리트의 휨강도는 첨가량에 비례하여 증가하지 않고 첨가량 3%에서 최대값을 나타내었다.

Fig. 3(b)에 LSB를 첨가한 콘크리트의 휨강도 시험 결과를 나타내었다. LSB를 첨가한 콘크리트의 휨강도는 첨가량에 비례하여 증가하는 것을 Fig. 3(b)를 통해 확인할 수 있다. 기준 콘크리트에 대한 LSB 1%, 3%, 5%를 첨가한 콘크리트의 휨강도 비는 각각 1.12, 1.21, 1.36으로 나타났다. LSB 첨가량이 2% 증가함에 따라 약 10%의 휨강도가 비례적으로 증가하였다. 5%의 LSB 첨가 콘크리트는 LSA 첨가 콘크리트와 거의 유사한 휨강도를 발현하였다. LSB를 첨가한 콘크리트의 휨강도 증가율 범위는 12~36% 이었다.

이상의 실험결과로부터 LSA 및 LSB 모두 콘크리트의 휨강도 증진에 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 LSA가 LSB보다 휨강도 증진에는 우수한 성능을 발휘하는 것으로 나타났다.

4.4 접착강도

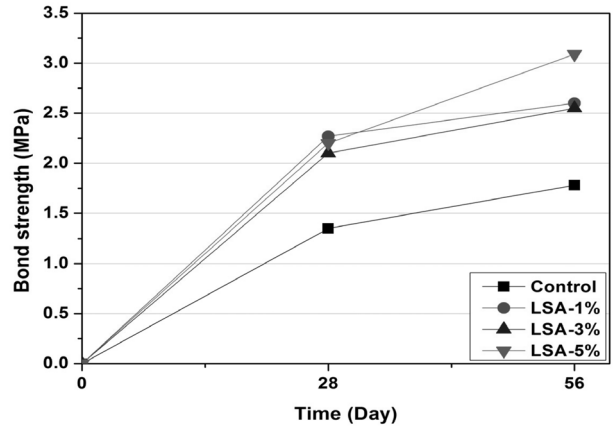
Fig. 4는 수용성 유황의 종류 및 첨가량에 따른 접착강도 시험 결과를 보이고 있다. 접착강도 시험은 재령 28과 56일에 실시되었다. LSA를 첨가한 콘크리트의 접착강도는 기준 콘크리트에 비해 재령 28일에 최소 55.6%에서 최대 63.0%까지 증가하였으며, 재령 56일에 최소 43.3%에서 최대 73.6%까지 증가하였다. 재령 28일에는 LSA 첨가량에 따른 접착강도의 차이는 크지 않았으나, 재령 56일에는 5% 첨가 콘크리트의 접착강도가 3.09 MPa로 가장 크게 발현되었다.

LSB를 첨가한 콘크리트의 재령 28일 접착강도는 첨가율이 증가할수록 증진되었다. 기준 콘크리트의 재령 28일 접착강도에 대한 LSB 1%, 3%, 5%를 첨가한 콘크리트의 접착강도 비는 1.36, 1.51, 1.74 이었다. 한편 재령 56일의 LSB 접착강도는 거의 유사한 값을 나타내었다. 기준 콘크리트의 재령 56일 접착강도에 대한 LSB 1%, 3%, 5%를 첨가한 콘크리트의 접착강도 비는 1.49, 1.49, 1.52이었다.

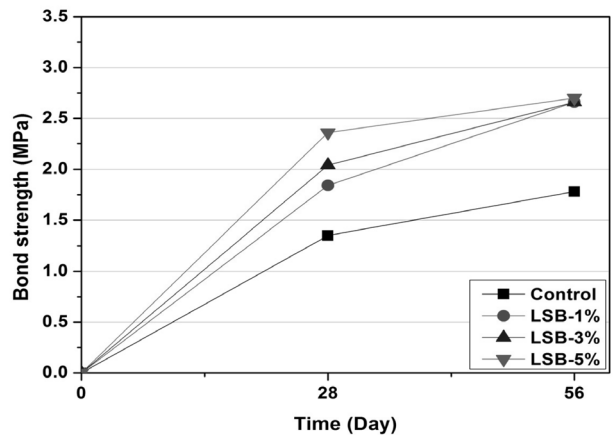
이상의 결과로부터 수용성 유황 LSA와 LSB 모두 콘크리트의 접착강도를 향상시키는데 매우 우수한 성능을 발휘함을 확인할 수 있었다.

4.5 탄산화 저항성

Fig. 5에 수용성 유황의 종류 및 첨가량에 따른 이산화탄소의 침투 깊이 변화를 나타내었다. 이산화탄소



(a) LSA concrete series

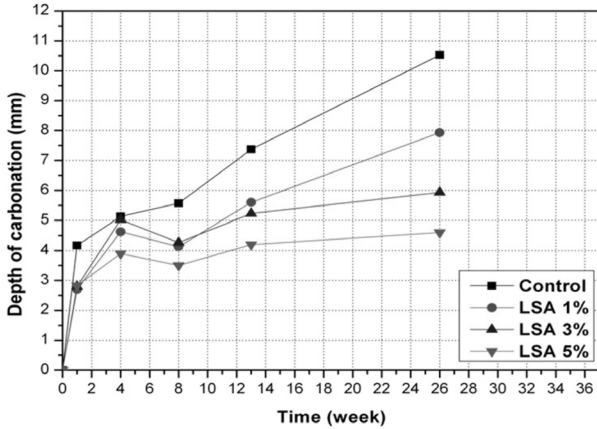


(b) LSB concrete series

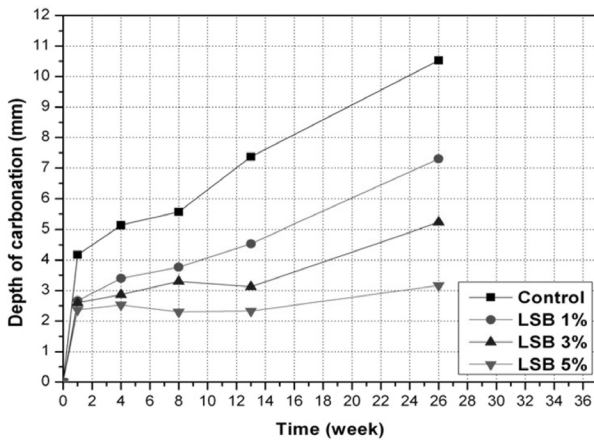
Fig. 4. Comparison of bond strengths.

침투 깊이 시험은 1주, 4주, 8주, 13주, 26주에 총 5회 실시되었다. LSA를 1%, 3%, 5% 첨가한 콘크리트의 26주 후의 중성화 깊이는 각각 7.9 mm, 5.9 mm, 4.6 mm로 나타났다. LSA 첨가량이 증가할수록 중성화 깊이가 비례적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 탄산화 시험 26주 후의 기준 콘크리트의 중성화 깊이에 대한 LSA 1%, 3%, 5%를 첨가한 콘크리트의 중성화 깊이 비는 각각 0.75, 0.56, 0.43이었다. LSA 5% 첨가 콘크리트의 중성화 깊이가 기준 콘크리트의 43%로 가장 작게 나타났다.

LSB를 1%, 3%, 5% 첨가한 콘크리트의 26주 후의 중성화 깊이는 각각 7.3 mm, 5.23 mm, 3.2 mm로 나타났다. LSB 첨가 콘크리트도 LSA 첨가 콘크리트와 같이 첨가량이 증가할수록 비례적으로 중성화 깊이가 감소하는 경향을 나타내었다. 탄산화 시험 26주 후의 기준 콘크리트의 중성화 깊이에 대한 LSB 1%, 3%, 5%를 첨가한 콘크리트의 중성화 깊이 비는 각각 0.69, 0.50, 0.30이었다. LSB 5% 첨가 콘크리트의 중성화 깊이가



(a) LSA concrete series



(b) LSB concrete series

Fig. 5. Comparison of carbonation depths.

기준 콘크리트의 0.30으로 가장 작게 나타났다.

탄산화 저항성이 가장 우수한 LSA와 LSB 5% 첨가 콘크리트의 탄산화 깊이는 각각 4.6 mm, 3.2 mm로 LSB 첨가 콘크리트가 LSA 첨가 콘크리트보다 우수한 탄산화 저항성을 나타냄을 확인할 수 있었다. 이는 LSB에 다량 함유된 CaO에 의해 탄산화에 가장 큰 영향을 미치는 Ca(OH)₂가 추가 생성되어 나타난 현상으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 가성소다(NaOH)를 이용해 제조한 수용성 유황(LSA)과 생석회(CaO)를 이용해 제조한 수용성 유황(LSB)을 첨가한 콘크리트의 역학적 특성과 내구성을 평가하였다. 이상의 연구를 통해 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) LSA 수용성 유황의 첨가는 콘크리트의 압축강도

를 다소 감소시키는 것으로 나타난 반면, LSB 수용성 유황은 압축강도를 최대 24%까지 증진시키는 것으로 나타났다.

2) 두 종류의 수용성 유황을 첨가한 콘크리트의 휨강도 및 접착강도는 모두 일반 콘크리트와 비교하여 크게 증가하였다. 특히, 두 수용성 유황 모두 5% 첨가가 콘크리트의 역학 특성을 가장 효과적으로 개선하는 것으로 나타났다.

3) 수용성 유황을 첨가한 콘크리트의 탄산화 저항성은 첨가량에 비례하여 개선되었다. 특히 LSB 5% 첨가 콘크리트의 중성화 깊이는 일반 콘크리트 중성화 깊이의 약 30% 정도로 탄산화 저항성이 매우 우수하게 나타났다.

4) LSB를 첨가한 콘크리트의 역학 특성과 탄산화 저항성이 LSA보다 우수하였다. 모든 시험결과를 종합적으로 평가할 때 LSB 5% 첨가가 콘크리트 배합에 가장 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글 : 이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음 (This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2012).

References

- 1) F. Sandrolini and A. Saccani, "The Effect of Polymer Addition on the Electrical Behavior of Ordinary and Pulverized Fly Ash Modified Cement Mortars" *Materiaux et Constructions*, Vol. 30, pp. 412-417, 1997.
- 2) A. Ajdukiewicz and A. Kliszczewicz, "Influence of Recycled Aggregates on Mechanical Properties of HS/HPC", *Cement Concrete Composites*, Vol. 24, No. 2, pp. 269-279, 2002.
- 3) K. K. Sagoe-Crentsil, T. Brown and A. H. Taylor, "Performance of Concrete Made with Commercially Produced Coarse Recycled Concrete Aggregate", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 5, pp. 707-712, 2001.
- 4) M. C. M. Nunes, M. G. Bridges and A. R. Dawson, "Assessment of Secondary Materials for Pavement Construction: Technical and Environmental Aspects", *Waste Management*, Vol. 16, No. 1, pp. 87-96, 1996.
- 5) S. E. Zoorob and L. B. Suparna, "Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt)", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, No. 4, pp. 233-242, 2000.

- 6) H. Motz and J. Geiseler, "Products of Steel Slags an Opportunity to Save Natural Resources", Waste Management, Vol. 21, No. 3, pp. 285-293, 2001.
- 7) H. A. V. Slood, D. S. Kosson and O. Hjelm, "Characteristics, Treatment and Utilization of Residues from Municipal Waste Incineration", Waste Management, Vol. 21, No. 8, pp. 753-765, 2001.
- 8) A. Edinlier, G. Baykal and K. Dengili, "Determination of Static and Dynamic Behavior of Recycled Materials for Highways", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 42, No. 3, pp. 223-237, 2004.
- 9) R. Forteza, M. Far, C. Segui and V. Cerda, "Characterization of Bottom Ash in Municipal Solid Waste Incinerators for its use in Road Base", Waste Management, Vol. 24, No. 9, pp. 899-909, 2004.
- 10) The Sulphur Institute, Sulphur in Review, <http://www.sulphurinstitute.org/publications/index.cfm>
- 11) A. M. O. Mohamed and M. M. E. Gamal, "Sulfur Concrete for the Construction Industry: A Sustainable Development Approach", J. Ross Publishing, 2010.
- 12) D. H. Sheen, C. W. Joo, J. Y. Choi, J. and C. Choi, "Preparation of Modified Sulfur Pipe using Centrifugal Force", Kempe Software Capital Enterprises, Vol. 2004, No. 10, pp. 513-520, 2004.
- 13) C. H. Hong, S. P. Ryu, S. B. Park, S. C. Kim and K. H. Kim, "An Experimental Study on the Application of Sulfur Concrete to Artificial Fishing Reefs", Kempe Software Capital Enterprises, Vol. 2006, No. 10, pp. 2193- 2196, 2006.
- 14) C. H. Hong, S. C. Kim, D. Y. Jung and Y. G. Lee, "Development of Environment-friendly Artificial Fishing Reefs using Sulfur Concrete", Kempe Software Capital Enterprises, Vol. 2007, No. 10, pp. 3623-3626, 2007.
- 15) J. Ko, "Evaluation of Mechanical Properties and Durability for Modified Sulfur Cement Concrete", Master's Thesis, Chungbuk National University, 2013.