

유황개질 바인더를 사용한 유황 콘크리트의 물리적 특성

배성근* · 권성우** · 김세원*** · 차수원****

Bae, Sung Geun*, Gwon, Seong Woo**, Kim, Se Won***, Cha, Soo Won****

Physical Properties of Sulfur Concrete with Modified Sulfur Binder

ABSTRACT

Recently, a huge amount of sulfur has been produced as a byproduct of petroleum refining processes in Korea. Sulfur concrete is made of modified sulfur binder instead of cement paste, which has advantages of reducing CO₂ emission from cement industry as well as utilizing surplus sulfur. Also, sulfur concrete is a sustainable material that can be repetitively recycled. In this study, the physical properties of sulfur concrete are experimentally investigated. From the test results, sulfur concrete showed compressive strengths higher than at least 50MPa. Also, the unit weight, modulus of elasticity and splitting tensile strength of sulfur concrete was similar to that of Portland cement concrete (PCC). The coefficient of thermal expansion of sulfur concrete was a little larger than that of Portland cement concrete and sulfur concrete with mineral filler is helpful to lower the coefficient of thermal expansion. recycled aggregate sulfur concrete resulted in a slight reduction in the compressive strength, but sulfur concrete with recycled aggregate can achieve the high strength characteristics.

Key words : Sulfur concrete, Modified sulfur binder, Recycled aggregate, Mechanical property, Coefficient of thermal expansion

초 록

최근 국내에서는 원유 정제과정에서 많은 양의 부생황이 발생하고 있다. 유황콘크리트는 시멘트 풀을 유황개질 바인더로 대체한 콘크리트로서 시멘트 제조시에 대량으로 발생하는 CO₂의 저감 및 원유 정제산업에서 부생되는 황을 활용할 수 있는 이점이 있다. 또한 유황콘크리트는 반복해서 재활용할 수 있는 친환경적이고 지속가능한 재료이다. 이 연구에서는 개질유황 바인더를 사용한 유황콘크리트의 물리적 특성을 실험을 통하여 검토하였다. 실험 결과, 유황콘크리트는 대체적으로 50~80MPa 이상의 고강도 특성을 보였다. 단위질량, 탄성계수 및 인장강도는 포틀랜드 시멘트 콘크리트(PCC)와 유사하였다. 순환골재를 유황콘크리트에 적용하는 경우 순환골재의 단점을 보완하는 동시에 고강도콘크리트 제조가 가능하다. 유황콘크리트의 열팽창계수는 PCC보다 다소 큰 값으로 나타내고 있으나, 채움재를 혼입하여 일반 콘크리트 수준의 열팽창계수를 보이는 것으로 나타났다.

검색어 : 유황콘크리트, 개질유황 바인더, 순환골재, 역학적 특성, 열팽창계수

1. 서론

국내에서는 매년 막대한 양의 원유를 해외에서 수입하고 있으며, 이를 자동차 및 산업용 에너지원 등으로 사용하기 위해 다양한 석유제품들을 생산하고 있다. 이러한 석유제품의 생산을 위해 정유 플랜트에서는 정제과정을 거치게 되고, 이러한 과정중 대기환경을

* 정희원 · 울산대학교 건설환경공학부 박사과정 (bsg23@ulsan.ac.kr)

** 울산과학기술대학교 도시환경공학부 석박사통합과정 (ksw4430@unist.ac.kr)

*** 울산대학교 친환경건자재사업단 책임연구원 (dmawn30@ulsan.ac.kr)

**** 정희원 · 교신저자 · 울산대학교 건설환경공학부 교수 (Corresponding Author · University of Ulsan · chasw@ulsan.ac.kr)

Received February 20, 2014/ revised March 3, 2014/ accepted March 12, 2014

고려하여 공정별로 탈황과정을 통해 산업부산물의 하나인 황(sulfur)이 발생하고 있다. 2011년을 기준으로 세계 유황 총 생산량은 약 6900만 톤이다. 국내에서는 2009년부터 매년 지속적으로 약 120만 톤의 유황이 생산되고 있으며, 이 중 90%는 원유정제 과정 중 탈황공정에서 발생한다. 국내생산량의 50%정도만 비료 및 황산의 원료로 소비되고 나머지는 저가로 해외에 수출되고 있는 실정이다. 전 세계적으로 정유생산 설비의 증가 및 원유정제 고도화시설 등으로 인해 앞으로 더 많은 양의 유황이 만들어질 것으로 예측되어 부생황에 대한 대량 수요처의 확보와 활용성은 지속적인 증대가 필요하다(Cha et al., 2011).

유황 콘크리트는 기존의 포트랜드 시멘트 콘크리트(Portland Cement Concrete : PCC)의 결합재인 시멘트 풀(cement paste)을 유황개질 바인더로 대체한 콘크리트로 시멘트 제조시 다량 발생하는 CO₂의 저감 및 원유 정제산업에서 부생되는 황을 활용할 수 있는 이점이 있다. 유황 콘크리트의 특징은 PCC에 비해 고강도의 압축강도를 가지며, 내산성 등 화학저항성이 높고, 향균성을 가진다. 그리고 PCC는 28일에 최종강도의 90%정도를 달성하지만 유황 콘크리트는 1일에 최종강도의 70~80%이상을 달성하기 때문에 양생기간이 짧은 이점이 있다. 하지만 130°C이상의 온도에서 개질 유황 바인더가 용융되어 강성을 잃어버린다(Mohamed and Gamal, 2010).

미국에서는 1900년대 초 60%의 모래와 40%의 유황물질을 배합한 콘크리트는 높은 산 저항성과 높은 강도 발현을 밝혔다. 1960년대 이후 많은 기관 및 연구자들에 의해서 본격적으로 유황 콘크리트가 연구되었고, 특히 DCPD (Dicyclopentadiene)와 반응을 통해 개질된 유황바인더에 대한 연구가 진행되었다(ACI 548, 1998; Sheen et al., 2002).

국내에서는 1990년 초 Bae (1992)에 의해서 무시멘트의 유황개질 모르타르 및 콘크리트 24개 배합에 대하여 역학적 특성 및 내구성, 제조방법, 물리화학적 성질 등을 연구하여 큰 초기강도와 40MPa이상의 압축강도, 높은 산저항성을 확인하였다.

2000년 초 윤재환 등이 개질된 유황 모르타르 및 콘크리트의 제조, 물리적 특성, 내구성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 이에 유황 콘크리트에 대한 기본적인 배합방법을 정립하고, PCC와 유황 콘크리트의 물리적 성질을 비교하여 강도의 조기발현성과 탄성계수, 변형능력 및 열팽창계수가 크을 언급하였으며, 동일강도의 PCC와 유황 콘크리트를 제작하여 각종 내구성능을 비교한 결과 유황 콘크리트는 보통콘크리트에 비해 내산성능, 염소이온차단성 및 동결융해저항성이 뛰어난을 밝혔다(Yoon and Heo, 2003; Yoon, 2004; Yoon, 2005; Yoon, 2006).

또한 유황 콘크리트 원심력관 제조를 위한 연구가 Sheen et al. (2004)에 의해 진행되었으며, 원심력관 적용에 적합한 최적

플라이애시 치환율 및 잔골재율을 실험을 통해 정하고 MSC 원심력관을 제조하여 적용가능성을 확인하였다.

이러한 유황 콘크리트는 130°C이상에서 용융되어 강도를 상실하므로 내화성이 요구되는 구조물에는 사용이 어려우나 높은 압축강도, 강도의 조기발현성, 내산성 및 낮은 흡수율과 같은 특징으로 TTP와 같은 해양 구조물, 보차도 경계석, 지중파이프 등 프리캐스트 구조물에 적용이 가능할 것이다.

현재 세계적으로 지속가능한 발전의 기초아래 수용한계 내에서의 성장모색, 자원의 효율적 관리 등 다방면에서 노력이 경주되고 있다. 이에 국내 콘크리트 산업에서도 지속가능한 콘크리트를 구현하기위해 시방서의 개발, LCA (Life Cycle Assessment)의 도입, 저시멘트 콘크리트 개발 등이 제안 및 연구되고 있다(Choi, 2011; Lee et al., 2009). 유황 콘크리트는 구조물의 수명을 다하여 폐기 후 다시 가열하여 사용할 수 있는 모든 재료가 완전 재활용 되는 획기적인 재료로써 친환경적이며 지속가능한 건설재료이다.

본 연구는 유황개질 바인더(modified sulfur binder)를 결합재료로 천연골재를 사용하는 유황 콘크리트의 물리적 특성을 실험을 통하여 검토하였으며, 순환골재의 적용 가능성을 알아보았다. 이를 통하여 향후 유황콘크리트의 구조물 적용시 기초자료로 제시하고자 하였다.

2. 재료

2.1 유황개질 바인더

순수한 황은 부서지기 쉬운 무미·무취의 연노란색 고체로써 전기 전도도가 작고 물에 녹지 않는다. 황은 지구상에 존재하는 원소 중 가장 많은 동소체를 가지고 있는데, 그중 가장 중요한 것은 사방결정 및 단사결정 형태이다. 단사황은 액체상태의 황을 서서히 냉각할 때 얻어지는데 이것은 긴 침상형 결정으로 이루어져 있고, 96~119°C는 안정하지만 실온으로 온도가 내려감에 따라 안정한 사방황으로 서서히 동소변태 한다. 뜨겁게 용융된 황을 찬 물에 붓거나 갑자기 냉각하면 무정형 황 또는 점성황이라고 하는 부드러우며 끈적끈적하고 유연한 비결정성 덩어리가 얻어진다. 사방형과 단사형은 이황화탄소에 잘 녹지만 무정형 황은 잘 녹지 않는다(Cha et al., 2011).

대부분의 유황개질 바인더 합성에 이용되는 방법인 polymerization method는 유황을 소량의 개질제와 용융조건 하에서 반응시킨 것으로, 유황에 첨가제를 반응시켜 140°C 내외의 공정온도하에서 Diels-Alder 반응으로 열가소성 수지의 특성을 지니는 유황개질 바인더를 제조한다. 이렇게 만들어진 유황개질 바인더는 기존 원소 황(Elemental sulfur)과는 달리 황의 결정성장이 억제되고, 연성이 증가되어 기존 골재의 접합물질로 사용되던 시멘트를 대체할 수

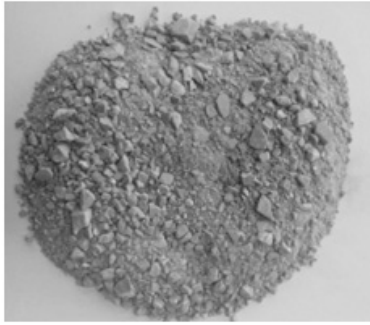


Fig. 1. Modified Sulfur Binder

Table 1. Properties of Modified Sulfur Binder

	Element content (%)			Density (g/cm ³)
	Sulfur (S)	Carbon (C)	Hydrogen (H)	
Modified sulfur binder	94-95	2.3	0.1	1.9
ACI 548	95±1.0	5±.5	.5±.05	1.9±.02

있는 바인더로서 역할이 가능하다(Cha et al., 2011).

본 연구에서 사용된 유황개질 바인더(Fig. 1)는 DCPD로 개질된 것으로 그 성분 및 특징은 Table 1과 같으며, ACI 548(1998)과 비교하면 황의 함유량 및 밀도는 만족하지만 탄소와 수소의 함량이 낮다.

2.2 채움재 및 골재

미국에서는 ACI 548(1998)을 통하여 유황 콘크리트에 대한 기본적인 기준을 마련하였다. 여기에서 유황 콘크리트에 사용되는 골재가 만족하여야 하는 화학적, 물리적 특징 및 최소의 유황개질 바인더를 사용하기 위한 골재의 입도가 제시되어 있다(Table 2). ACI 548(1998)에서는 골재의 일반적인 요구 사항은 PCC와 유사하다고 보고하고 있고, 굵은 골재, 잔골재, 미네랄 충전재를 통합한 각 굵은 골재 최대치수별 표준 입도를 제한한 것이 특징이며, 고온 혼합 및 고온 적층 역청 도로용 혼합물의 표준입도인 ASTM D 3515을 인용하였다.

유황 콘크리트의 채움재(mineral filler)는 최대밀도 및 최소흡수율을 확보하기 위해 필요하며, 석분, 실리카 미분말, 코크스, 카본 블랙, 플라이애시가 사용되어 진다. 채움재는 유황 콘크리트의 점성(위커빌리티)과 블리딩을 제어하고, 균질하게 만들며, 공극을 채움으로 경화수축을 감소시킨다. 75µm이하를 채움재로 간주하고 Mohamed and El Gamal(2010)은 유황 콘크리트 총질량의 5%, ACI 548(1998)은 골재질량의 10%이하를 일반적인 요구량이라 하였다.

콘크리트 표준시방서(KCI, 2009)에서는 굵은 골재 및 잔골재의

Table 2. Dense-graded Aggregate Gradation Limits (ASTM D 3515)

Sieve Size	1in (25mm) Aggregate, percent passing	0.75in (20mm) Aggregate, percent passing	0.5in (12.5mm) Aggregate, percent passing	0.375in (9.5mm) Aggregate, percent passing
1.5in (37.5mm)	100			
1in (25mm)	90-100	100		
0.75in (20mm)		90-100	100	
0.5in (12.5mm)	56-80		90-100	100
0.375in (9.5mm)		56-80		90-100
No. 4 (4.75mm)	29-59	35-65	44-74	55-85
No. 8 (2.38mm)	19-45	23-49	28-58	32-67
No. 50 (300µm)	5-17	5-19	5-21	7-23
No. 200 (75µm)	1-7	2-8	2-10	2-10

Table 3. Properties of Aggregate

	Recycle coarse aggregate	Natural coarse aggregate	Fine aggregate	Regulation
Absolute dry density (g/cm ³)	2.14	2.62	2.56	KS F 2503
Absorption (%)	6.28	0.84	1.41	KS F 2503
Abrasion (%)	21.1	14.6	-	KS F 2508
Absolute volume (%)	57	59	58	KS F 2527
0.08mm sieve passing (%)	0.6	0.2	1.6	KS F 2511
Amount of clay mass (%)	0.15	0.08	0.4	KS F 2512
Stability (%)	4.9	2.4	3.5	KS F 2507

밀도는 2.5g/cm³이상 흡수율 3.0%이하를 요구하고 있으며, 순환콘은골재 역시 동일한 품질을 가져야 한다. 본 실험에서 사용된 골재는 Table 3과 같으며 순환콘은골재는 기준에 비해 비중이 낮고 흡수율이 높은 특징이 있다. 이는 실험에서 사용된 순환콘은골재의 생산과정에서 폐콘크리트의 모르타르를 제거하는 과정이 없기 때문에 순환콘은골재에 포함된 다량의 모르타르와 시멘트 페이스트의 영

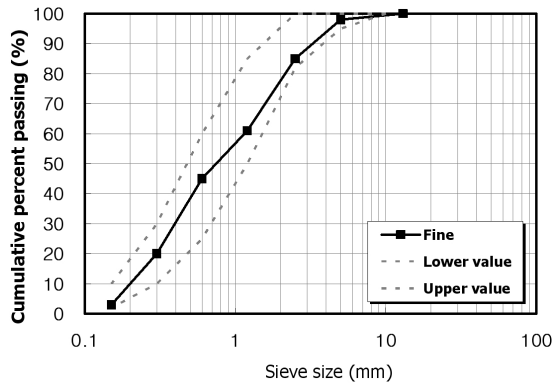


Fig. 2. Particle Size Distribution Curve of Fine Aggregate (KCI)

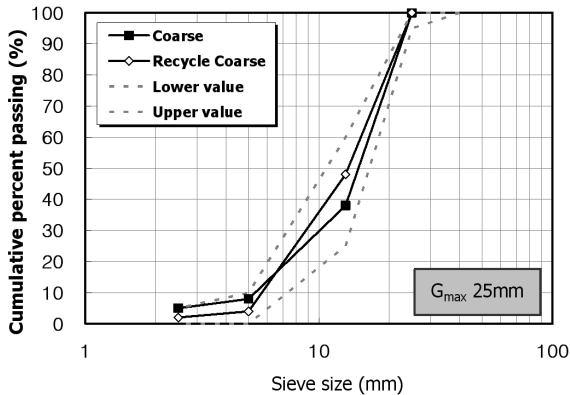
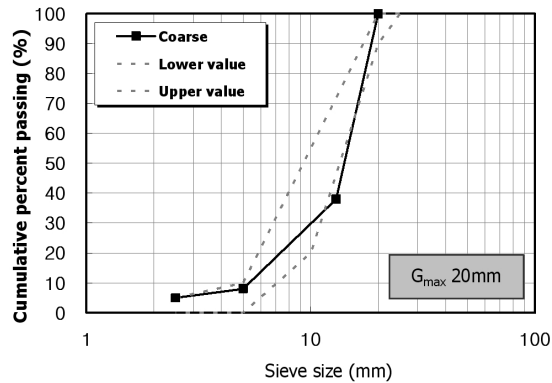
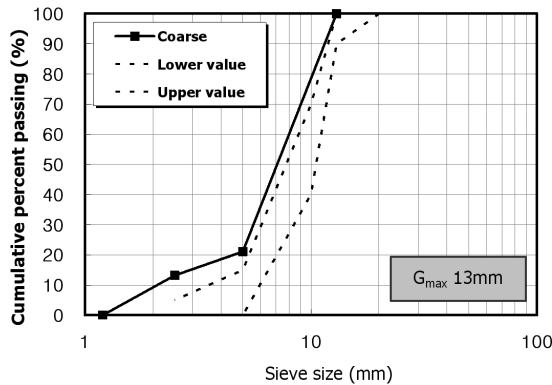


Fig. 3. Particle Size Distribution Curve of Coarse Aggregate (KCI)

향인 것으로 볼 수 있다. 그리고 그 외 안정성 등의 항목은 기준을 만족하였다.

잔골재와 굵은 골재의 입도분포에서 잔골재 및 굵은 골재 최대치수(G_{max})가 25mm인 순환굵은골재 및 쇄석은 표준 입도를 만족한다. G_{max} 가 20mm인 골재는 13mm이상의 골재가 기준보다 많이 함유되어 있으며, G_{max} 가 13mm인 골재는 5mm이하의 잔골재가 기준보다 많이 함유되어 있어 표준 입도를 벗어난다(Figs. 2 and 3).

3. 유황 콘크리트 배합 및 제작

3.1 유황 콘크리트 배합

ACI 548(1998)에 의하면 배합에 관하여 높은 산 및 염 용액의 저항성, 낮은 흡수율, PCC와 동일한 강도, 워커빌리티, 최소 경화수축의 증축을 요구하였다. 또한 각 굵은 골재 최대치수별 유황개질 바인더의 중량비를 제시하였으며(Table 4), PCC와 유사하게 굵은 골재 최대치수가 작아지면 결합재의 중량 요구량이 증가한다.

Sheen et al.(2004)의 결과를 바탕으로 총 7개의 실험배합을 구성하였다. 45%의 잔골재를 기본으로 하여 25mm, 20mm, 13mm의 굵은골재 최대치수(G_{max}) 및 유황개질 바인더와 플라이애시의 비를 변수로 하였다(Table 5). 3번 배합은 유황 콘크리트의 장기 압축강도 경향을 파악하기 위해 3일과 30일간의 양생기간을 두어 비교하였고, 5번 배합은 순환굵은골재를 적용하였다.

Table 4. Range of Cement(Modified Sulfur Binder) Level

Maximum aggregate size in (mm)	Cement (modified sulfur binder) percent by weight
1 (25.4)	12to15
3/4 (19.1)	13to16
1/2 (12.7)	14to17
3/8 (9.5)	16to19

Table 5. Test Variable and Mix Proportions

Type of mix	Coarse aggregate (%)		Fine aggregate (%)		Modified sulfur binder (%)		Fly ash (%)		Gmax (mm)	Type of coarse aggregate
	Vol.	Wt.	Vol.	Wt.	Vol.	Wt.	Vol.	Wt.		
1	36.4	40.2	30.0	32.3	27.6	22.1	6.0	5.4	25	Natural
2	36.4	40.2	30.0	32.3	27.6	22.1	6.0	5.4	13	Natural
3	36.4	40.2	30.0	32.3	27.6	22.1	6.0	5.4	20	Natural
4	36.4	39.8	30.0	32.1	19.3	15.3	14.3	12.8	20	Natural
5	36.4	35.0	30.0	34.6	19.3	15.4	14.3	15.0	25	Recycled
6	36.4	39.7	30.0	31.9	15.2	12.0	18.4	16.4	20	Natural

3.2 유황 콘크리트 공시체 제작

유황바인더는 상온에서 고체이며 130°C이상에서 액체화 되어 유동성을 가진다. 따라서 배합시 유황 콘크리트는 PCC와 달리 모든 재료를 일정온도(130°C)이상 유지하여야한다. 유황 콘크리트 제조를 위해서는 온도를 유지시켜주는 heating jacket이 필요하다 (Fig. 4).

본 연구에서 유황 콘크리트 공시체의 제작은 ACI 548(1998)에 의하여 진행 하였으며 그 순서는 다음과 같다. 먼저 굵은 골재 및 잔골재를 180°C의 오븐에 6시간동안 가열하였고, 130°C이상 가열된 heating jacket이 입혀진 배합기에 넣고 1분간 건비빔을 실시하였다. 이후 유황개질 바인더 및 플라이애시를 투입하여 액체화된 유황개질 바인더로 인하여 유동성을 가지는 유황 콘크리트를 10분간 배합하였다. 미리 가열된 스틸볼드(φ100×200)와 다짐봉을 이용하여 밀실하게 다지면서 공시체를 제작하였으며, 탈형 및 표면 연마는 실내 온도(20~25°C) 및 습도에서 6시간 양생 후 실시하였다 (Fig. 5).



Fig. 4. Mixing Equipment

4. 실험 결과

4.1 골재입도 분석

PCC에서 골재는 다양한 크기의 입자가 알맞게 혼합되어 있고 골재가 밀실 하여야 골재사이의 공극이 줄어들어 결합체의 필요량이 줄어든다. 유황 콘크리트 또한 밀실한 구조로 골재가 구성되어야 유황의 사용량을 최소로 할 수 있다. ACI 548(1998)에서는 Table 2와 같이 유황 콘크리트에 사용되는 골재의 표준 입도를 명시하였고, 이에 따라 실험에 사용된 골재를 분석하였다.

일반콘크리트와 다르게 채움재(플라이애시)가 골재에 포함되기 때문에 채움재의 함량에 따라 표준 입도를 벗어날 수 있다. 플라이애시가 전체질량의 5.4%인 1, 2, 3배합의 골재는 표준 입도를 만족하였으며, 국내기준에 만족하지 못한 G_{max} 13mm 골재도 잔골재와 플라이애시를 통합한 ACI 표준 입도에 만족하였다. 플라이애시의 함량이 전체질량의 10%이상인 4, 5, 6배합의 골재는 표준 입도를 벗어난다. 플라이애시 함량을 조절하고 국내의 표준 입도를 따른다면 ACI 548(1998)의 표준 입도는 만족할 수 있을 것이다(Fig. 6).

4.2 역학적 특성

압축강도 시험은 KS F 2405에 의해 실시하였고, 쪼갬인장강도는 KS F 2423에 의하여 실시하였으며(Fig. 7), 2개의 공시체를 평균한 유황 콘크리트의 역학적 특성은 Table 6과 같다.

4.2.1 압축강도

유황 콘크리트의 압축강도 시험결과에 따르면 20mm의 G_{max} 를 가지는 배합 3, 4, 6중 4는 80MPa이상의 압축강도를 가지며 3, 6은 80MPa이하의 압축강도를 가진다. 이것은 유황개질 바인더와 플라이애시의 함유 비율 때문인 것으로 생각되며, 유황개질 바인더와 플라이애시가 일정한 비율이 확보되어야 높은 압축강도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. Table 4에서와 같이 G_{max} 가 20mm일 경우 ACI 548(1998)에서 제시한 유황개질 바인더의 중량비는

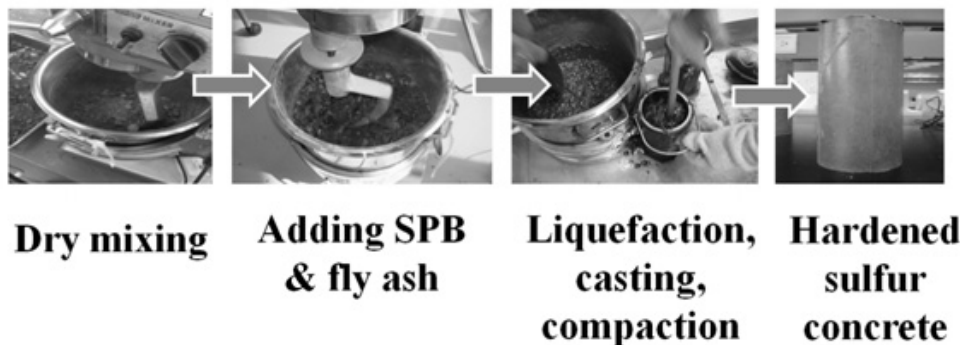


Fig. 5. Fabrication Procedures for Test Specimens

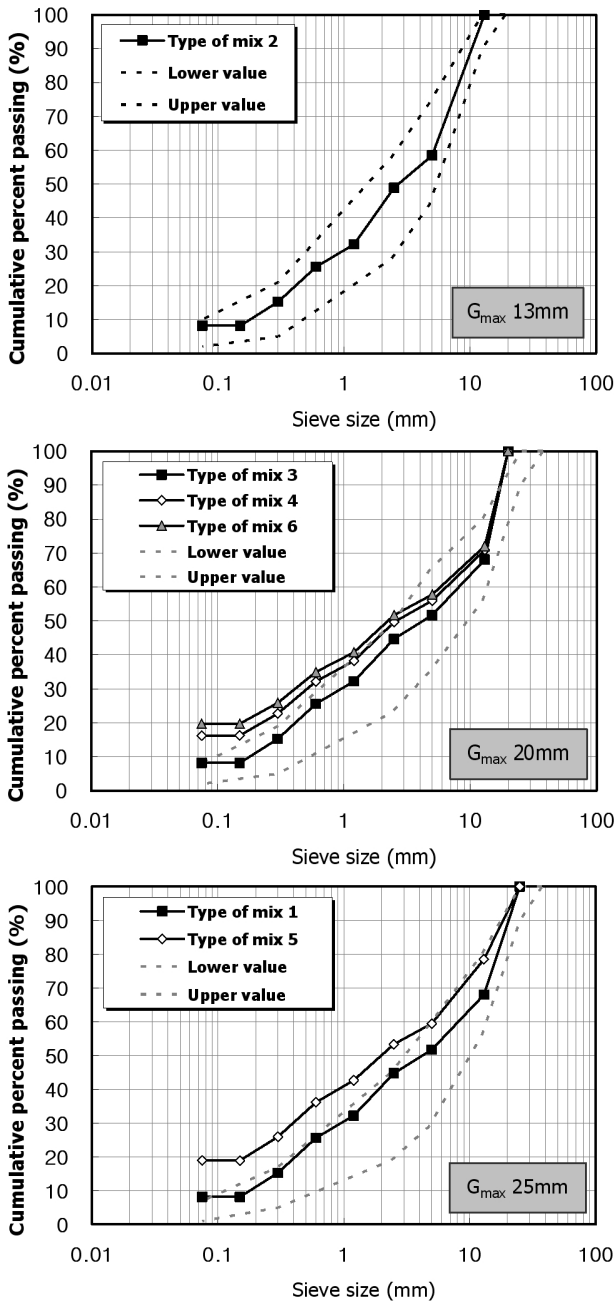


Fig. 6. Particle Size Distribution Curve of Aggregate for Sulfur Concrete (ACI)

13~16%이고, 배합 4의 유황개질 바인더의 중량비와 유사하므로 적절한 배합이며, 배합 3, 6은 유황개질 바인더의 비율이 낮거나 높은 것으로 생각된다. 본 연구결과 골재량이 중량비의 70%정도이고 G_{max} 20mm가 적용된 유황 콘크리트 최적 유황개질 바인더의 혼입량은 중량비의 15~20%인 것으로 판단된다(Fig. 8).

유황개질 바인더와 플라이애시의 혼입량이 동일하고, G_{max} 가 25, 13, 20mm인 1, 2, 3중 G_{max} 가 20mm인 배합 3이 76MPa으로

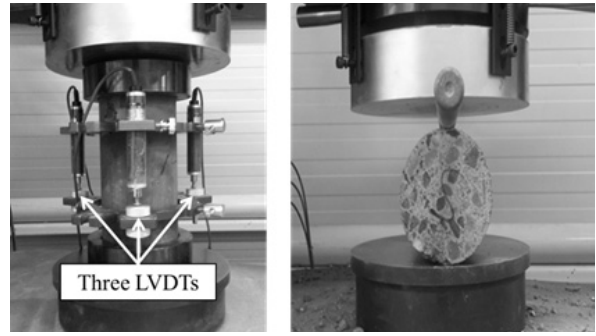


Fig. 7. Compression and Splitting Tensile Tests

Table 6. Test Result

Type of mix	Unit weight (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	Splitting tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Strain at max. stress	Curing age (day)
1	2406	50	-	-	-	3
2	2430	53	-	34.2	0.0052	3
3	2451	70	-	39.4	0.0024	30
3	2444	76	5.4	41.0	0.0035	3
4	2454	83	6.1	43.1	0.0031	3
5	2359	82	4.3	42.8	0.0027	3
6	2438	72	4.5	40.1	0.0024	3

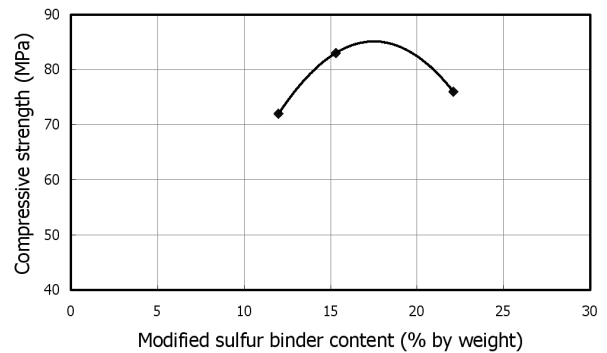


Fig. 8. Relation between Compressive Strength and Modified Sulfur Binder Content

높은 압축강도를 보인다. 이것은 고강도 PCC에서와 같이 유황 콘크리트인 경우에도 고강도 콘크리트를 제조하기 위하여 G_{max} 가 20mm가 가장 적절한 골재치수인 것으로 판단된다. 또한 Table 4에서 제시한 유황개질 바인더의 중량비가 실험배합의 유황개질 바인더 중량비 22.1%와 가장 근접한 G_{max} 가 13mm인 배합 2가 53MPa의 낮은 압축강도를 보인 것은 공시체 제작시 결함 등이 포함된 결과인 것으로 생각된다.

배합 3의 결과에 의하면 유황 콘크리트의 재령에 따른 압축강도

변화는 없는 것으로 판단되며, 압축강도의 차이는 일반적인 콘크리트 공시체를 제작할 때 발생하는 편차로 생각된다.

굵은 골재가 각각 천연골재 및 순환골재를 사용하고 G_{max} 가 동일한 배합 1과 5의 압축강도 차이는 골재종류보다는 유황개질 바인더와 채움재의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 배합 4, 5는 천연골재 및 순환굵은골재가 사용된 배합이고 유황개질 바인더와 채움재의 함유량이 유사하며 압축강도는 고강도를 보이고 있다. 이는 최근 관심이 고조되고 있는 지속가능한 콘크리트 기술 측면에서 중요한 결과라고 생각된다. 일반적으로 순환골재를 사용하는 경우 콘크리트 역학적 특성이 취약해지므로 그 사용이 제한되어 왔으나 결합재로 유황 개질 바인더를 사용한다면 이러한 단점을 보완함과 동시에 고강도 순환골재 콘크리트를 제조하는데 이용될 수 있다고 판단된다.

4.2.2 단위질량

PCC와 유황 콘크리트의 단위질량은 2300~2500kg/m³으로 유사하다. PCC와 동일하게 굵은, 잔골재가 70% 이상이며 유황과 채움재의 비중의 합과 시멘트와 물의 비중의 합이 유사하기 때문인 것으로 생각된다.

4.2.3 탄성계수 및 인장강도

유황 콘크리트는 압축강도에 비례하여 인장강도 및 탄성계수가 증가하므로 PCC와 동일한 양상을 보이고 있다.

PCC의 고강도 범위에 속하는 압축강도를 가진 유황 콘크리트의

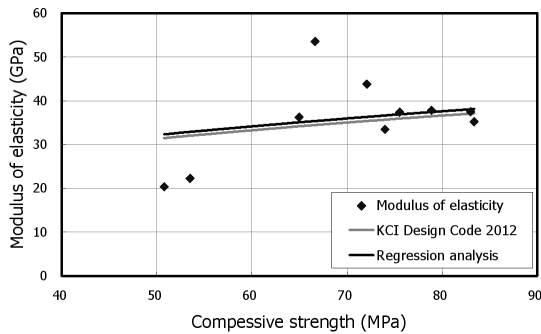


Fig. 9. Relation between Modulus of Elasticity and Compressive Strength

최대응력시 변형률은 0.0025~0.0052이며 고강도 PCC의 최대응력시 변형률과 유사하다. 국내의 설계기준에서는 압축강도를 기반으로 탄성계수를 추정하고 있으며, 압축강도에 비례하여 증가한다. 콘크리트구조기준(KCI, 2012)에서는 Eq. (1)과 같이 압축강도의 함수로 탄성계수를 추정하고 있으며, 탄성계수 추정식 Eq. (1)을 기반으로 유황 콘크리트 실험값을 Eq. (3)과 같이 회귀분석하였고, 동일 압축강도 수준의 PCC와 탄성계수가 유사하다(Fig. 9).

PCC (콘크리트구조기준 2012 and ACI 363)

$$E = 8500 \sqrt[3]{f_{cu}} \tag{1}$$

$$f_{ct} = 0.59 \sqrt{f_c} \tag{2}$$

유황 콘크리트 (회귀분석)

$$E = 8730 \sqrt[3]{f_{cu}} \tag{3}$$

유황 콘크리트의 인장강도는 압축강도기준 6.2~7.3%의 수준으로 ACI 363(2010)의 고강도 PCC의 인장강도 추정식인 Eq. (2)의 추정 수준인 6.5~7.0%와 유사하다.

5. 유황 콘크리트의 열팽창계수

열팽창은 내외부의 조건에 의해 온도차가 발생하는 모든 구조물에서 중요한 요소이다. 콘크리트구조물이 열팽창을 허용하지 않거나 또는 비균등한 팽창에 의한 온도응력을 허용하지 못하면 파괴에 이를 수 있다. 또한 결합재와 골재 사이에 일어날 수 있는 비균등성 팽창은 높은 내부응력을 일으킬 수 있다(Mindess et al., 2003).

유황 콘크리트 역시 온도가 변화하는 조건에 노출될 수 있으며, 열팽창계수의 검토는 구조물의 설계 측면에서 매우 중요하다. 유황 콘크리트의 열팽창계수 특성을 알아보기 위해 4장의 결과를 바탕으로 최대강도를 도출하는 G_{max} 와 개질유황 바인더의 혼입량을 반영하여 Table 7과 같이 배합설계를 하였고, 사용된 골재의 특성은 Table 8과 같다.

일반골재에 유황개질 바인더, 채움재인 플라이애시를 혼입한

Table 7. Test Variable and Mix Proportions - for Coefficient of Thermal Expansion

Type of mix	Coarse aggregate (%)		Fine aggregate (%)		Modified sulfur binder (%)		Fly ash (%)		G_{max} (mm)	Type of coarse aggregate	-
	Vol.	Wt.	Vol.	Wt.	Vol.	Wt.	Vol.	Wt.			
S	36.4	40.5	30.0	32.5	33.6	26.9	0.0	0.0	20	Natural	
F	36.4	39.6	30.0	31.8	19.1	15.0	14.5	13.6	20	Natural	
R	36.4	34.6	30.0	34.3	17.7	15.0	15.9	16.1	20	Recycled	

Table 8. Properties of Aggregate - for Coefficient of Thermal Expansion

	Recycle coarse aggregate	Natural coarse aggregate	Fine aggregate	Regulation
Absolute dry density (g/cm ³)	2.14	2.64	2.57	KS F 2503
Absorption (%)	6.28	0.86	1.36	KS F 2503
Abrasion (%)	21.1	14.4	-	KS F 2508
Absolute volume (%)	57	59	57	KS F 2527
0.08mm sieve passing (%)	0.6	0.4	1.8	KS F 2511
Amount of clay mass (%)	0.15	0.09	-	KS F 2512
Stability (%)	4.9	2.8	3.4	KS F 2507

Table 9. Test Result - for Coefficient of Thermal Expansion

Type of mix	Unit weight (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	Splitting tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)	Strain at max. stress
S	2389	63.3	3.6	29.1	0.0033
F	2447	88.0	6.6	40.4	0.0025
R	2302	76.6	4.4	32.5	0.0030

Table 10. Coefficient of Thermal Expansion

Type of mix	Coefficient of thermal expansion
S	17.2×10 ⁻⁶ /°C
F	13.8×10 ⁻⁶ /°C
R	14.8×10 ⁻⁶ /°C

F배합이 가장 큰 압축강도를 보였다. 동일 배합에 순환굵은골재를 사용한 R배합은 F보다 11.4MPa만큼 낮은 압축강도를 보였으며 순환굵은골재를 사용시 압축강도가 다소 저감됨을 알 수 있다. S배합은 채움재인 플라이애시를 혼입하지 않은 경우이며 F배합보다 24.7MPa, R에 비해 13.3MPa만큼 압축강도가 낮다. 유황 콘크리트의 강도는 골재의 특성 보다는 채움재의 유무에 따라 콘크리트의 강도가 좌우될 가능성이 높음을 확인하였고 채움재의 함유, 순환굵은골재 적용에 상관없이 유황 콘크리트의 역학적 특성은 PCC와 유사하다(Table 9).

유황 콘크리트의 열팽창계수는 일반콘크리트에 비해 다소 크다 (Table 10). 콘크리트의 열팽창계수는 부피의 70%이상인 골재의 열팽창계수에 의해 좌우된다. 일반골재의 열팽창계수는 8~13×10⁻⁶/°C의 범위에 있으며, 시멘트 풀의 열팽창계수는 18~20×10⁻⁶/°C 이므

로 시멘트 풀과 일반골재와의 복합체인 PCC는 10×10⁻⁶/°C 정도 이다(Mindess et al., 2003). 유황의 열팽창계수는 74×10⁻⁶/°C (Vroom, 1998)으로 시멘트 풀에 비해 큰 값을 가지고 있으며, 일반골재와 혼합되어 콘크리트로 제작시 PCC보다 큰 열팽창계수를 가질 수 있음을 알 수 있다. F, R의 경우 유황개질 바인더의 일부를 플라이애시로 치환하여 유황의 함유량이 낮아짐으로 인해 S배합에 비해 열팽창계수가 작아지며, 채움재를 사용한 배합의 경우 열팽창계수를 낮추는 방법으로 사용될 수 있을 것이다.

6. 결론

이 연구에서는 유황개질 바인더를 결합제로 사용하는 유황 콘크리트의 물리적 특성을 실험을 통하여 검토하였다. 이 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 유황개질 바인더를 사용한 유황 콘크리트는 50MPa 이상의 고강도를 얻을 수 있었고, 유황 콘크리트의 강도는 유황개질 바인더와 채움재의 비가 가장 중요한 것으로 생각된다.
- (2) 유황 콘크리트의 단위질량은 PCC와 유사하고, 유황 콘크리트의 탄성계수 회귀식은 콘크리트구조기준의 탄성계수식과 유사하며, 인장강도 회귀식은 ACI 363에서 제시한 식과 유사한 수준이다.
- (3) 순환골재를 사용한 콘크리트의 취약한 역학적 특성을 유황개질 바인더가 보완할 수 있고 이와 동시에 고강도 순환골재 콘크리트를 제조하는데 이용될 수 있다고 판단된다.
- (4) 유황 콘크리트의 열팽창계수는 13.8~17.2×10⁻⁶/°C으로 PCC보다 다소 큰 값을 가지고 있으나, 채움재를 사용한 배합의 경우 열팽창계수를 낮추는 방법으로 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 2013년도 산업통상자원부의 지역연고산업육성사업 (RIS) “부생(유)황을 활용한 친환경 건설자재산업 육성사업”의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

ACI Committe 363 (2010). *State-of-the-art report on high-strength concrete*, America Concrete Institute, Detroit.
 ACI Committe 548 (1998). *Guide for mixing and placing sulfur concrete in construction*, America Concrete Institute, Detroit.
 Bae, S. H. (1992). “Characteristics of sulfur mortar and concrete.” *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 4, No 1, pp. 58-61

- (in Korean).
- Cha, S. W., Kim, K. S. and Park, H. S. (2011). "Manufacture of modified sulfur polymer binder and characteristics of sulfur concrete." *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 6, pp. 40-42 (in Korean).
- Choi, D. W. (2011). "Suggestions for sustainable development of concrete industry." *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, pp. 12-14 (in Korean).
- KCI (2009). *Standard concrete construction specification*, Korea Concrete Institute, Seoul (in Korean).
- KCI (2012). *Concrete structure design code*, Korea Concrete Institute, Seoul (in Korean).
- Lee, H. S., Shin, S. W. and Tae, S. H. (2009). "The development status and the future research trend of sustainable concrete." *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 2, pp. 34-40 (in Korean).
- Mindess, S., Young, J. F. and Darwin, D. (2003). *Concrete*, Pearson Education, London.
- Mohamed, A. M. O. and El Gamal, M. (2010). *Sulfur concrete for the construction industry: A Sustainable Development Approach*, J. Ross Publishing, Inc, USA, 2010.
- Sheen, D. H., Joo, C. W., Choi, J. Y. and Choi, J. C. (2004). "Preparation of modified sulfur concrete pipe using centrifugal force." *Proceeding of 2004 Annual Conference*, KSCE, pp. 513-520 (in Korean).
- Sheen, D. H., Kang, S. H., Roh, J. H. and Ryu, Y. S. (2002). "Properties and usages of sulfur concrete as construction material." *Korean Society of Civil Engineers Magazine*, Vol. 50, No. 6, pp. 39-45 (in Korean).
- Vroom, A. H. (1998). "Sulfur concrete goes global." *Concrete International*, Vol. 20, No. 1, pp. 68-71.
- Yoon, J. H. (2004). "An experimental study on the manufacturing of sulfur concrete." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 20, No. 9, pp. 143-148 (in Korean).
- Yoon, J. H. (2005). "An experimental study on physical properties of sulfur concrete." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 21, No. 11, pp. 143-150 (in Korean).
- Yoon, J. H. (2006). "An experimental study on durability of sulfur concrete." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 22, No. 6, pp. 95-102 (in Korean).
- Yoon, J. H. and Heo, H. S. (2003). "An experimental study on the manufacturing of sulfur mortar." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 19, No. 11, pp. 93-99 (in Korean).