

요소-수용성 유황 혼화제가 콘크리트 압축강도 및 건조수축에 미치는 영향

박재규 · 한상훈* · 홍기남 · 조용인 · Chai Yuzhe

충북대학교 토목공학과

(2016. 4. 6. 접수 / 2016. 7. 14. 수정 / 2016. 9. 22. 채택)

Influence on Compressive Strength and Drying Shrinkage of Concrete with Urea-Water Soluble Sulfur Admixture

Park Jae Kyu · Han Sang Hoon* · Hong Ki Nam · Cho Yong In · Chai Yuzhe

Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

(Received April 6, 2016 / Revised July 14, 2016 / Accepted September 22, 2016)

Abstract : This paper presents an experimental study to investigate mechanical property of concretes according to addition of urea and urea-water soluble sulfur contents. Urea was added at 5~20% replacement by weight of water, and water soluble sulfur was used at 2%, 4% replacement by weight of cement. The setting times, the hydration heat, the compressive strength, and the drying shrinkage, were measured on concretes with single and binary admixtures. From the test result, it was confirmed that the hydration heat of urea-water soluble sulfur was lower than that of normal concrete by 10.1 °C, and the drying shrinkage of urea-water soluble sulfur concrete was more excellent than normal concrete. In the case of urea of 5%, Compressive strength were improved with an increase of water soluble sulfur contents. The urea-water soluble sulfur used in this research can be used as improvement materials for drying shrinkage and compressive strength.

Key Words : compressive strength, drying shrinkage, urea, water-soluble sulfur, concrete

1. 서론

콘크리트의 품질 향상 및 시공 기술의 발달로 인해 구조물은 점점 대형화되고 있는 실정이다. 최근 국내·외 발주되는 대형 구조물에는 원자력 및 기타 발전소, 대형기초, 댐, 도로 등이 있으며, 이러한 구조물은 대부분 부재 단면이 크기 때문에 매스콘크리트(Mass concrete)로 시공되어지고 있다. 매스콘크리트는 많은 양의 콘크리트가 한 번에 투입되기 때문에 시공 후 몇 가지 문제점이 발생된다. 대표적으로 발생하는 문제점은 수화열에 의한 온도 균열과 건조수축에 의한 균열을 예로 들 수 있다¹⁾.

먼저 온도 균열은 경화 중에 콘크리트 내부에서 약 57°C 정도의 수화열이 발생되는데²⁾, 이 때 낮은 외기 온도로 인해 온도 차이가 극심하거나 구조물의 온도가 전체적으로 강하되면 수축 구속에 의한 응력이 발생된다. 이 응력이 타설된 콘크리트의 인장강도를 초과하게

되면 균열이 발생되며, 구조물 전체로 균열의 전이가 지속된다. 건조수축 균열은 시멘트에 결합되어 있던 수분이 증발할 때 체적이 감소되며, 이 때 수축과 구속에 의해 콘크리트 내부에서 인장응력이 발생된다. 이러한 인장응력이 타설된 콘크리트의 인장강도를 초과하게 되면 온도 균열과 마찬가지로 균열이 발생된다³⁾. 이러한 균열 발생은 구조물의 내하력 저하와 콘크리트가 열화되는 문제점을 야기시키며, 콘크리트의 사용 수명을 단축시키는 결과를 초래한다.

온도 및 건조에 의한 수축 균열 발생을 억제하기 위해 시공방법 및 사용재료를 개선해야만 한다. 먼저 시공방법의 경우, 재료를 쿨링(cooling)하거나 타설 온도가 높을 것으로 예상되는 콘크리트 주위에 파이프를 설치하여 쿨링하는 것이 대표적인 방법이다⁴⁾. 재료적 측면의 경우, 배합수량 저감⁵⁾, 수축저감제⁶⁾ 및 에트린자이트⁷⁾에 의한 수축보상, 고로슬래그⁸⁾ 및 플라이애쉬⁹⁾ 등과 같은 미분말의 산업부산물을 사용함으로써 수축

* Corresponding Author : Han Sang Hoon, Tel : +82-43-261-2404, E-mail : shhan@cbnu.ac.kr
Department of Civil Engineering, Chungbuk National University, 1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju 28644, Korea

및 균열을 억제할 수 있다. 균열 억제에 관한 국내·외 동향을 살펴보면 재료적 측면을 개선하는 방법이 주로 연구되고 있다.

하지만, 대부분 수축에 의한 균열 저감 재료들은 약 10~25%의 다소 낮은 성능을 보이며³⁾, 재령 초기에 팽창이 크고, 압축강도가 감소되는 문제점을 가지고 있다¹⁰⁾. 내구성 측면 역시 공극 및 기포 간격계수가 커짐에 따라 동결융해에 대한 저항성이 악화되며, 수산화칼슘 소비로 인한 탄산화 증가 등의 문제점이 발생된다. 또한, 대부분의 수축저감제의 경우 가격이 고가이기 때문에 혼입량이 많을 경우 경제성이 떨어지는 단점을 가지고 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 수축저감 효과를 가지는 재료와 강도 보상을 할 수 있는 저비용 혼화재료 개발이 시급히 이루어져야 한다. 경제성이 확보되면서 강도 및 건조수축에 대한 문제점을 해결하기 위해 Han⁷⁾, Hama⁸⁾, Lee⁹⁾ 등의 연구자들은 수축저감제와 고로슬래그, 플라이애쉬 등의 재료를 동시에 두 가지 이상 혼입하여 수축효과 및 강도문제를 해결하였다. 하지만, 고로슬래그 및 플라이 애쉬는 초기강도 및 탄산화에 대한 문제를 가지고 있기 때문에 이를 해결하기 위한 기타 혼화제 혼입이 필요하다.

최근 Cho¹⁾, Jung³⁾, Polat¹¹⁾ 등은 저비용으로 건조수축 효과를 내기 위해 요소(Urea)를 사용하여 역학적 특성을 평가하였다. 요소는 제조 과정에서 다량의 CO₂를 집진시키기 때문에 수축저감 성능 및 환경적 측면에서 우수한 재료로 알려져 있다. 그러나 선행 연구와 마찬가지로 강도 저하에 대한 문제점을 가지고 있어 이를 해결하기 위해서는 강도를 향상시킬 수 있는 혼화제를 추가적으로 사용하여야 한다. 그래서 최근 이러한 강도 감소 문제를 해결하기 위해 Hong¹²⁻¹³⁾ 등은 유황을 NaOH로 개질하였으며, 소량(1~4%)의 유황 혼화제를 첨가하여 압축강도가 약 12%이상 향상되는 결과를 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 건조수축 및 강도 특성을 개선하기 위해 요소와 수용성 상태의 유황을 사용하였으며, 각각 혼화제의 혼입 비율을 변수로 설정하여 콘크리트의 특성을 평가하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 밀도와 비표면적은 각각 3.15 g/cm³, 3,340 cm²/g이며, 화학적 조성은 Table 1에 나타난 것과 같다.

잔골재 및 굵은골재는 국내의 C지역에서 생산되고 있는 부순골재를 사용하였다. 잔골재 및 굵은골재의 밀도는 각각 2.58, 2.69 g/cm³이었으며, 흡수율은 잔골재 0.74%, 굵은골재 0.68%로 골재의 품질 규정을 만족하는 것을 사용하였다. 그 밖에 물리적 특성은 Table 2에 나타내었으며, Fig. 1에 입도분포곡선을 나타내었다.

요소는 공업용 요소를 사용하였다. 요소는 물과 반응하면 탄산과 암모니아 가스를 생성한다. 이 때 암모니아 가스는 기화하면서 냉각효과가 발생되며, 탄산은 시멘트의 수산화칼슘과 반응하여 탄산칼슘과 물을 생성한다³⁾. 요소에 대한 특성은 Table 3에 나타내었다.

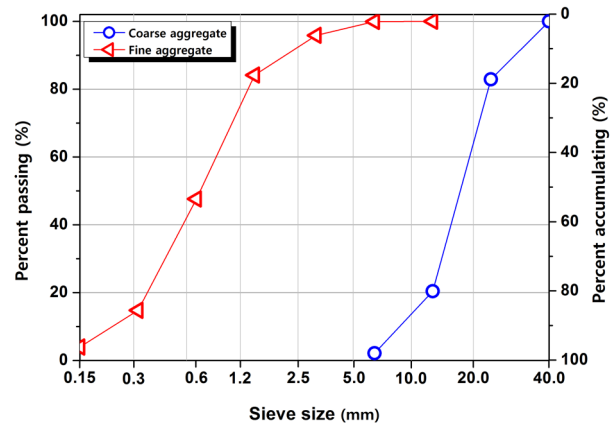


Fig. 1. Grain size distribution of fine and coarse aggregate.

Table 1. Chemical composition of type-I ordinary portland cement

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O
Cement	21.74	5.0	3.17	62.79	2.97	1.67	1.36

Table 2. Physical properties of aggregates.

	Specific gravity (g/cm ³)	Fineness modulus	Water absorption (%)
Fine aggregate	2.58	2.55	0.74
Coarse aggregate	2.69	6.95	0.68

Table 3. Physical properties of urea

Particle form	Specific gravity(g/cm ³)	Specific heat (cal/g °C)	pH	Melting point(°C)	Molecular weight
Sphere	1.335	0.334	8	132.7	60.047

Table 4. Chemical composition of water soluble sulfur¹²⁾

Chemical composition(%)					Loss Ignition
SO ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ZnO	
65.90	28.90	0.01	0.01	0.01	5.17

Table 5. Mix proportions of concrete mixtures.

Variable	W/B (%)	S/a (%)	Slump (mm)	Air (%)	Weight per unit volume (kg/m ³)						AE (g/m ³)
					W	C	S	G	U	SF	
R45-CON	45	44	150±20	4.5±1.5	193.0	429	695.7	932.6	0	0	214.5
R45-U5					185.8		694.6	931.2	9.7	0	
R45-U10					178.5		693.6	929.9	19.3	0	
R45-U15					171.3		692.5	928.5	29.0	0	
R45-U20					164.0		691.5	927.2	38.6	0	
R45-SF2					184.4		695.7	932.6	0.0	8.6	
R45-SF4					175.8		695.7	932.6	0.0	17.2	
R45-U5SF2					177.2		694.6	931.2	9.7	8.6	
R45-U5SF4					168.6		694.6	931.2	9.7	17.2	
R45-U10SF2					169.9		693.6	929.9	19.3	8.6	
R45-U10SF4					161.4		693.6	929.9	19.3	17.2	
R45-U15SF2					162.7		692.5	928.5	29.0	8.6	
R45-U15SF4					154.1		692.5	928.5	29.0	17.2	
R45-U20SF2					155.5		691.5	927.2	38.6	8.6	
R45-U20SF4					146.9		691.5	927.2	38.6	17.2	

※ W : Water, C : Cement, S/a : Fine aggregate percentage, S : Sand, G : Gravel, U : Urea, SF : Water-soluble sulfur, AE : Air-entraining

※ R45 - U5 - SF2

- ① R45 : Water-cement 45%
- ② U5 : 5% added urea
- ③ SF2 : 2% added water-soluble sulfur

수용성 유황은 NaOH를 사용하여 발열반응을 통해 수용액 상태로 제조된 것을 사용하였다. 수용성 유황은 주로 SO₃와 Na₂O로 구성되어 있으며, pH는 14의 강알칼리성을 띤다¹²⁾. 수용성 유황의 자세한 화학적 조성은 Table 4와 같다.

공기연행제는 국내 D사에서 제조된 제품을 사용하였으며, 콘크리트 배합시 AE 공기연행제 원액을 물에 1:1로 희석하여 사용하였다.

2.2 배합방법

요소 및 수용성 유황을 활용한 콘크리트의 배합설계를 Table 5에 나타내었다. 총 15개의 배합을 실험 변수로 고려하였으며, 요소는 단위수량의 5, 10, 15, 20%, 수용성 유황은 2, 4%를 혼입하여 배합하였다.

물-시멘트비(W/C)는 45%로 설정하였으며, 굳지않은 콘크리트의 목표슬럼프 및 공기량은 각각 150±20 mm, 4.5±1.5%이다.

콘크리트 비빔은 우선 표면건조 포화상태의 잔골재 및 굵은골재를 계량한 후 배합기에 투입하여 45초 동안 건비빔을 실시한다. 그리고 시멘트를 투입하여 30초 동안 비빔하였다. 그 다음 사전에 준비한 배합수에 요소를 투입한 후 요소가 완전히 녹은 후에 수용성 유황(8.6, 17.2 kg)과 AE제(214.5 g)를 혼입량에 맞게 투입

하였다. 마지막으로 시멘트와 골재에 배합수를 투입한 후 1분 30초 정도 비빔을 실시하였다. 제조된 콘크리트는 실험체 크기에 맞게 타설한 후 20초 동안 진동다짐기를 사용하여 타설하였으며, 24시간 양생후 탈형하여 수중 양생을 실시하였다.

2.3 실험방법

요소와 수용성 유황이 혼입된 콘크리트의 응결 시간을 분석하기 위해 관입저항 실험을 KS F 2436에 준하여 수행하였다.

수화온도는 300 × 300 × 300 mm의 단열박스에 콘크리트 타설후 측정하였으며, 외기로부터의 온도 손실을 최소화 하였다. 수화온도 측정은 콘크리트에 매립된 온도계이저를 7일간 10분 간격으로 측정하였다. Fig. 2

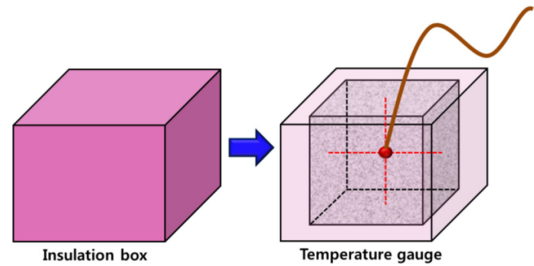


Fig. 2. Insulated box.

는 수화온도 측정방법을 나타내고 있다.

압축강도 실험은 KS F 2405의 기준에 준하여 수행하였으며, Ø100 × 200 mm의 원형 공시체를 사용하였다. 압축강도는 재령 7, 14, 21, 28일에 측정되었으며, 각각 3개의 평균 값을 사용하였다. 실험은 200t 용량의 UTM을 사용하여 진행되었다.

건조수축 길이변화 실험은 KS F 2424의 기준에 준하여 수행하였다. 실험체는 100 × 100 × 400 mm의 크기로 제작되었으며, 콘크리트 타설 후 10분 간격으로 91일 동안 길이변화량을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

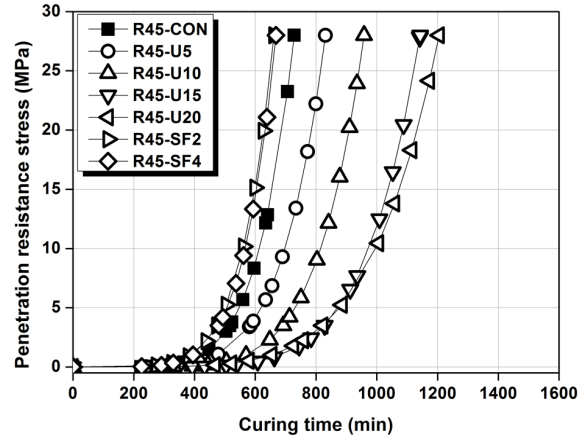
본 연구에서는 관입저항력, 수화온도, 압축강도, 건조수축에 대한 실험을 수행하였으며 콘크리트 경화 특성에 대한 요소 및 수용성 유황의 영향을 평가하였다.

3.1 응결특성

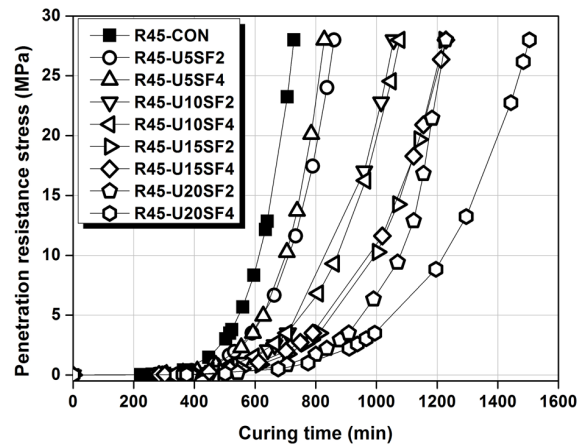
Fig. 3은 요소 및 수용성 유황을 혼입한 콘크리트의 응결특성을 나타내고 있다.

Fig. 3(a)는 요소와 수용성 유황을 각각 독립적으로 혼입하였을 경우 나타나는 콘크리트의 응결특성을 보여주고 있다. 요소만 사용하였을 경우 혼입량이 5~20%로 증가할수록 초결 및 종결이 지연되었으며, 수용성 유황을 2, 4% 혼입하였을 경우 응결특성이 빨라지는 것을 확인하였다. 요소만 혼입하였을 때 초결은 혼입량에 따라 각각 584, 692, 828, 822분으로 나타났으며, 종결은 831, 958, 1143, 1205분으로 측정되었다. 기준 실험체와 비교하였을 때 초결은 68~306분의 차이를 보였으며, 종결은 103~477분으로 약 8시간 정도 지연되는 것을 확인하였다. 수용성 유황만 혼입된 콘크리트의 초결은 혼입량에 따라 각각 473, 480분으로 나타났으며, 종결은 661, 668분으로 측정되었다. 수용성 유황과 기준 실험체를 비교하였을 때 초결은 약 36~43분, 종결은 60~67분 정도 빨라지는 것을 확인하였다.

Fig. 3(b)는 요소와 수용성 유황을 복합적으로 혼입하였을 때 나타나는 콘크리트의 응결특성을 나타내고 있다. 요소와 수용성 유황을 혼입한 콘크리트의 응결특성은 요소만 사용하였을 때와 마찬가지로 기준 실험체보다 지연되는 것으로 나타났다. 각각 요소 혼입량에 따른 수용성 유황의 영향을 비교하였을 때 요소만 혼입한 R45-U5와 R45-U5SF2, SF4의 초결 및 종결이 다소 빨라지거나 유사한 응결특성을 나타내었다. 하지만, 요소 혼입량이 10% 이상 혼입된 R45-U10SF2부터 R45-U20SF4까지는 요소만 혼입되었을 때보다 응결특



(a) Concretes adding urea or water soluble sulfur



(b) Concretes adding urea and water soluble sulfur

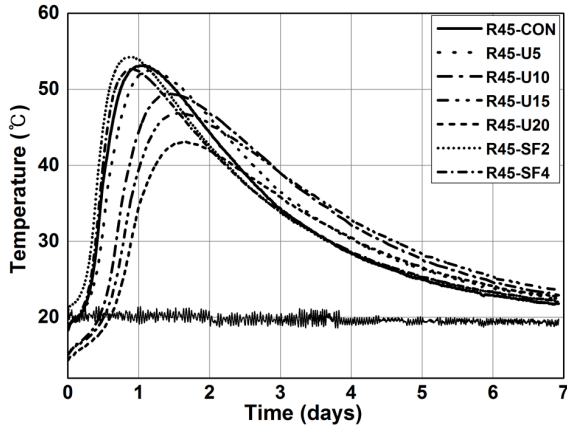
Fig. 3. Results for setting time test.

성이 약 1~5시간 정도 지연되는 것으로 나타났다. 실험결과를 통해 요소 혼입량이 5%까지는 수용성 유황과의 영향이 나타나지만, 요소를 10%이상 혼입시 수용성 유황보다 요소의 영향이 더욱더 크게 나타난 것을 확인하였다.

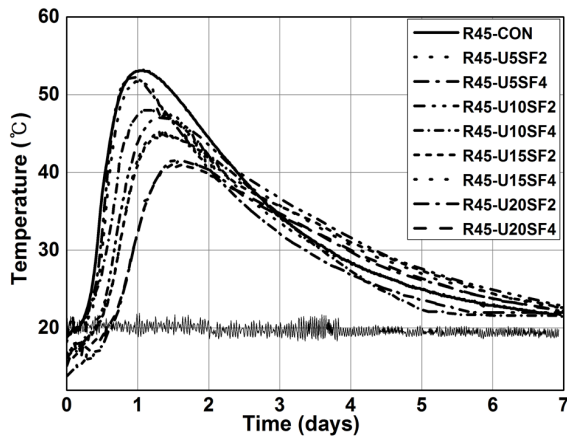
3.2 수화온도

Fig. 4는 요소 및 수용성 유황을 혼입한 콘크리트의 수화온도 측정결과를 나타내고 있다.

Fig. 4(a)는 요소와 수용성 유황을 각각 독립적으로 혼입한 콘크리트의 수화온도 측정결과를 나타내고 있다. 먼저 요소만 혼입한 콘크리트 R45-U5, U10, U15, U20의 초기온도는 각각 18.7, 15.1, 15.1, 14.4℃로 나타났으며, 최대온도는 각각 52.6, 49.4, 46.9, 43.1℃로 나타났다. 이 때의, 최대온도 도달시간은 28~39시간으로 혼입량에 따라 증가되는 현상을 보였으며, 기준 실험체인 R45-CON보다 최대온도 및 도달시간은 각각 최대



(a) Concrete adding urea or water soluble sulfur



(b) Concretes adding urea and water soluble sulfur

Fig. 4. Results of hydration heat measurements.

10.1°C와 13시간의 큰 차이를 나타내었다. 또한, 온도 상승구간의 기울기 역시 차이를 보였다. 이는 요소가 콘크리트 배합수와 반응시 암모니아에 의한 냉각 효과로 인해 온도 및 도달시간이 감소된 것으로 판단된다. 수용성 유황을 혼입한 R45-SF2, SF4 콘크리트의 초기 온도 및 최대온도는 유황 혼입율에 따라 각각 21.0, 18.3°C와 54.3, 52.7°C를 나타내었다. 최대온도 도달시간은 혼입률에 따라 각각 21, 22시간으로 기준 실험체와 비교하였을 때 4~5시간 정도의 빠른 온도 상승시간을 나타내었다.

Fig. 4(b)는 요소와 수용성 유황을 복합적으로 혼입한 콘크리트의 수화온도에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 복합 혼입한 콘크리트의 최대온도는 R45-U5SF2부터 R45-U20SF4까지 혼입율에 따라 각각 51.1, 51.9, 47.1, 48.8, 45.2, 45.3, 41.8, 41.3°C로 나타났으며, 최대 온도 도달시간은 각각 23, 22, 31, 30, 31, 33, 36, 35 시간으로 나타났다. R45-U5SF2, SF4의 경우 최대온도는 감소하였지만, 도달시간은 빨라지는 경향을 보였다. 그

밖에 요소 혼입량이 10% 이상이며 수용성 유황의 혼입이 증가한 실험체의 경우 최대온도는 감소하며, 도달시간은 증가하는 경향을 나타내었다. 수용성 유황 혼입에 따른 복합 배합의 온도 차이는 약 1°C 내외로 발생되었으며, 도달시간 역시 대부분 1시간 내외로 각각 유사한 경향을 나타내었다.

R45-CON과 요소와 수용성 유황이 혼입된 실험체를 비교하였을 때 R45-U5SF2, U5SF4는 수용성 유황의 수화촉진으로 인해 온도 감소가 미비하였지만, 요소 혼입량이 10% 때부터는 요소에 의한 냉각 효과가 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

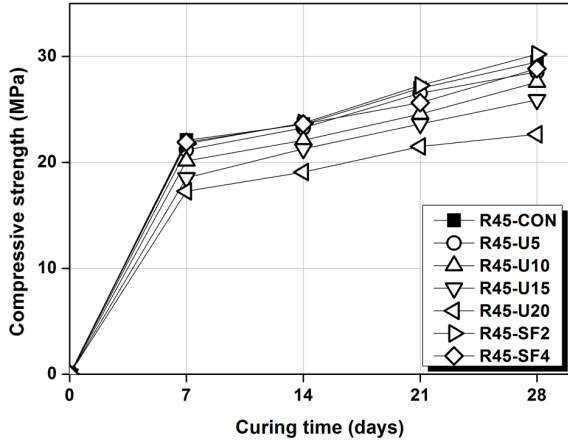
3.3 압축강도

Fig. 5는 요소 및 수용성 유황을 혼입한 콘크리트의 압축강도 실험결과를 나타내고 있다.

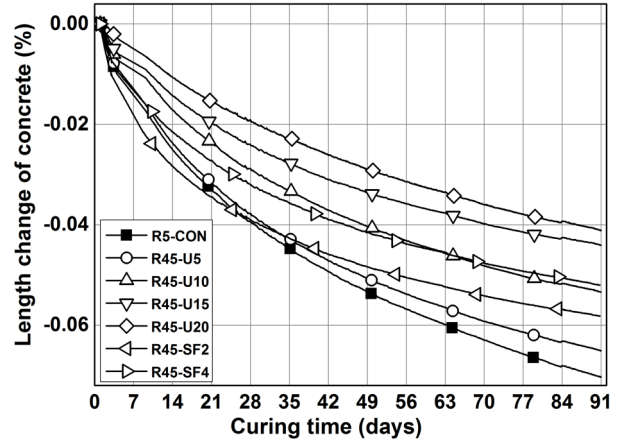
Fig. 5(a)는 요소와 수용성 유황을 각각 독립적으로 혼입한 콘크리트의 압축강도를 나타내고 있다. 기존 연구들은 요소나 수축저감제를 혼입시 콘크리트의 수축저감 효과는 우수하였지만, 콘크리트의 압축강도가 감소하는 문제점을 지적하였다^{1-2,8-10}. 본 연구의 결과에서도 요소 혼입율이 5%씩 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 나타내었으며, 요소 혼입량이 최대인 20% 혼입시 압축강도는 재령 28일에서 R45-CON (29.47 MPa)보다 최대 약 7 MPa가 감소하였다. 수용성 유황을 혼입한 R45-SF2와 R45-SF4는 재령 28일에서 각각 30.2, 28.9 MPa를 나타내었으며, R45-CON과 비교하였을 때 유사한 강도발현을 보였다.

Fig. 5(b)는 요소와 수용성 유황을 복합적으로 혼입한 콘크리트의 압축강도에 대한 실험결과를 나타내고 있다. R45-U5SF2와 R45-U5SF4는 재령 7일부터 28일까지 R45-CON보다 향상된 압축강도 발현을 나타내었으며, 약 3 MPa 정도 증가하는 것으로 나타났다. 하지만, 요소 혼입율이 10% 이상이며, 수용성 유황 혼입율이 증가할 경우 독립적으로 혼화제를 혼입하였을 때 보다 전반적으로 강도가 약 2~4 MPa 정도 감소하는 경향을 나타내었다.

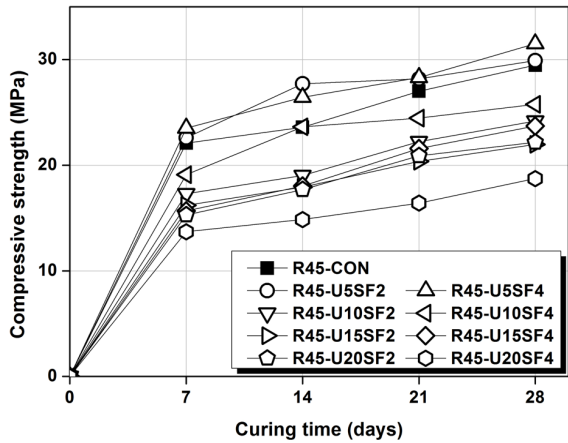
R45-SF2와 SF4, R45-U5SF2와 U5SF4의 압축강도가 증가된 원인은 수용성 유황의 주성분인 SO₃의 높은 함량으로 인해 고황산염 수화물인 에트린자이트가 생성되었기 때문이다¹²). 에트린자이트의 수화물 생성은 재령 초기인 7일의 압축강도를 향상시킬 수 있으며, 재령 28일까지 강도가 증진될 수 있다. 하지만, 재령 초기에 활성화된 강도 특성은 장기강도를 오히려 감소시킬 수 있기 때문에 추후 실험을 통해 장기강도에 대한 확인이 요구되는 바이다.



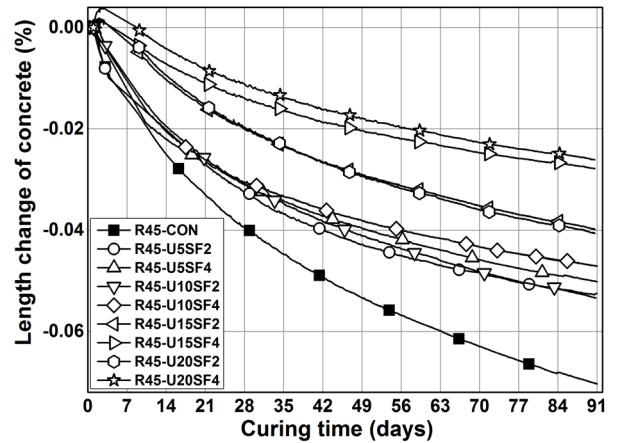
(a) Concrete adding urea or water soluble sulfur



(a) Concrete adding urea or water soluble sulfur



(b) Concretes adding urea and water soluble sulfur



(b) Concretes adding urea and water soluble sulfur

Fig. 5. Results of compressive strength test.

Fig. 6. Results of length change test.

3.4 건조수축 길이변화

Fig. 6은 요소 및 수용성 유황을 혼입한 콘크리트의 건조수축 길이변화에 대한 실험결과를 나타내고 있다.

Fig. 6(a)는 요소와 수용성 유황을 각각 독립적으로 혼입한 콘크리트의 건조수축 길이변화율에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. R45-CON의 경우 재령 초기에 건조수축이 급격히 발생하였으며, 길이변화율은 0.07%로 나타났다. 요소를 혼입한 콘크리트의 경우 길이변화율은 R45U5<R45U10<R45U15<R45U20 순으로 나타났으며, 요소를 혼입한 재령 91일의 길이변화율은 각각 0.065, 0.053, 0.044, 0.041%로 나타났다. R45-CON과 요소를 혼입한 콘크리트의 길이변화율을 비교하였을 때 0.005~0.029%의 차이를 보였다. 수용성 유황만 혼입한 콘크리트의 길이변화율은 R45-SF2, SF4 모두 R45-CON보다 감소되었으며, 길이변화율은 각각 0.058, 0.052%를 나타내었다. 수용성 유황만 혼입한 실험체는 요소 혼입량이 5, 10%일 때의 길이변화율과 유사한 경

향을 보였으며, 실험을 통해 수용성 유황 역시 건조수축 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 6(b)는 요소와 수용성 유황을 각각 복합적으로 혼입한 콘크리트의 건조수축 길이변화율에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. R45-CON보다 모두 길이변화율이 감소하였다. 특히, 수용성 유황의 혼입량이 클수록 길이변화율이 더욱더 감소되었다. R45-U15SF2부터 R45-U20SF4까지 재령 초기에 팽창이 발생하였으며, 그 이후 완만한 길이변화율의 기울기를 보였다. 하지만, R45-U5SF2부터 R45-U10SF4까지는 다소 급격한 길이 변화율의 기울기를 보였으며, 특히 R45-U5SF2가 급격하게 길이변화가 진행되는 것을 확인하였다. 그러나 재령 7일 이후부터는 기준 시험체인 R45-CON보다 수축이 적게 발생하기 시작하였으며, 재령 91일에서 최소 0.017%이상의 차이를 보였다.

전반적으로 요소와 수용성 유황을 동시에 혼입한 실험체에 대해서 건조수축 저감 효과가 우수한 것으로

나타났다. 이는 요소의 2차 반응으로 통해 생성되는 팽창 효과와 수용성 유황 혼입시 나타나는 에트린자이트에 의한 팽창에 기인한 것으로 판단된다. 하지만, 기존 선행 연구에서도 제시하였던 것처럼 과다 팽창으로 인한 초기의 팽창균열이 발생될 수 있으므로 배합시 혼입량의 조정이 요구된다.

4. 결론

본 연구에서는 요소 및 수용성 유황이 혼입된 콘크리트의 관입저항력, 수화온도, 압축강도, 건조수축 길이변화에 미치는 영향을 평가하였으며, 실험결과 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 관입저항 실험결과 요소만 혼입한 경우 응결이 최대 8시간 정도 지연되는 것으로 나타났으며, 요소와 수용성 유황을 동시에 혼입한 경우 요소 혼입율이 5% 일 때, 일반 콘크리트와 유사하거나 다소 빨라지는 응결특성을 보였다. 하지만, 요소 혼입율이 10% 이상인 경우 수용성 유황보다는 요소에 의한 영향으로 인해 응결특성이 지연되는 결과를 나타내었다.

2) 수화온도 실험결과 요소의 혼입률이 5%씩 증가할수록 기준 실험체보다 최고온도는 0.4~10.1℃ 정도 크게 감소하며, 요소의 1차 반응에 의한 냉각효과가 뚜렷하게 나타난 것을 확인하였다. 요소와 수용성 유황을 동시에 혼입한 실험체의 경우 역시 혼입율이 5%씩 증가할수록 수화온도가 감소되었으며, 응결특성과 마찬가지로 혼입률 10% 이상부터 수화온도 감소효과가 뚜렷하게 나타나는 결과를 보였다.

3) 압축강도 실험결과 요소만 혼입한 경우 혼입률 증가에 따라 강도가 감소되었지만, 요소 5%와 수용성 유황 2, 4%를 동시에 혼입할 경우 기준 실험체와 유사한 압축강도를 보였다. 하지만, 요소 혼입률 10% 이상의 경우 강도 발현 특성이 다소 감소되었는데 이는 재료적으로 잔골재율을 낮추면 강도가 개선될 수 있기 때문에 추후 잔골재율을 변수로 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다.

4) 건조수축 실험결과 요소 및 수용성 유황을 각각 독립적으로 혼입한 실험체의 길이변화율은 일반 콘크리트보다 감소하였으며, 복합적으로 혼입한 실험체 역시 24-64%이상의 높은 수축 저감율을 나타내었다.

5) 압축강도 및 건조수축을 개선하기 위해 요소 및 수용성 유황을 혼입한 콘크리트의 실험결과 10% 이상 요소를 첨가할 경우 건조수축만 개선되는 것으로 나타났으며, 요소 혼입률이 5%인 경우와 수용성 유황 혼입

률이 2, 4% 인 실험체에서 압축강도 및 건조수축이 개선되는 경향을 나타내었다. 따라서 압축강도 향상 및 건조수축 저감을 위한 최적 배합비는 요소 혼입률 5%, 수용성 유황 2%로 도출되었다.

6) 실험결과를 통해 요소 및 수용성 유황을 혼입한 콘크리트는 수화온도 및 건조수축에 대한 보상을 받을 수 있기 때문에 매스콘크리트 구조물에 적용할 경우 수축 및 온도에 대한 균열 문제를 해결할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글: 이 논문은 2014년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음 (This work was supported by the research grant of the Chung-buk National University in 2014)

References

- 1) Y. B. Kim, H. B. Cho, H. Y. Kim, W. C. Jun, H. G. Park and L. Chung, "A Study on Quality Characteristics of Urea Mixing Concrete Considered with Thermal Stress and Drying Shrinkage", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 31, No. 7, pp. 67-74, 2015.
- 2) D. I. Baek and M. S. Kim, "Application of Heat Pipe for Hydration Heat Control of Mass Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, Issue 2, pp. 157-164, 2008.
- 3) W. I. Choi, H. Y. Kim, B. S. Lee, Y. D. Lee and S. J. Jung, "A Study on Properties of Crack-reducing Concrete Containing Urea", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 29, No. 1, pp. 75-82, 2013.
- 4) J. D. Jaung, H. D. Cho and S. W. Park, "Properties of Hydration Heat of High-strength Concrete and Reduction Strategy for Heat Production", *Korea Institute of Building Construction*, Vol. 12, No. 2, pp. 203-210, 2012.
- 5) Y. S. Hwang, M. C. Han and C. G. Han, "Properties of Drying Shrinkage of Concrete with Unit Water and Contents of Shrinkage Reducing Admixtures", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 20, No. 6, pp. 75-82, 2004.
- 6) J. P. Park and Y. W. Jung, "Fundamental Properties on the Development of High Performance Shrinkage Reducing Agent for Concrete", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, Issue 6, pp. 4298-4307, 2015.
- 7) C. G. Han, M. C. Han, S. H. Song and S. Yoon, "Drying Shrinkage of Concrete Combining Expansive Additives and

- Shrinkage Reducing Agent”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 18, No. 3, pp. 397-404, 2006.
- 8) W. Y. Zhang, Y. K. Hama and S. H. Na, “Drying Shrinkage and Microstructure Characteristics of Mortar Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag and Shrinkage Reducing Admixture”, Construction and Building Materials, Vol. 93, pp. 267-77, 2015.
 - 9) K. H. Min, D. G. Lee and Y. W. Jeong, “Drying Shrinkage Behaviors of Concrete with Powder Type Shrinkage Reducing Agent and Fly Ash”, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 16, No. 5, pp. 3535-41, 2015.
 - 10) C. G. Han, S. W. Kim, K. T. Koh and Z. L. Pei, “Properties on the Shrinkage of High Performance Concrete using Expansive Additive and Shrinkage Reducing Agent”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 15, No.6, pp. 785-93, 2003.
 - 11) R. Demirboğa, F. Karagöl, R. Polat and M. A. Kaygusuz, “The Effects of Urea on Strength Gaining of Fresh Concrete under the Cold Weather Conditions”, Construction and Building Materials, Vol. 64, pp. 114-120, 2014.
 - 12) K. N. Hong, J. K. Park, K. S. Jung, S. H. Han and J. H. Kim, “Durability of Alkali-activated Blast Furnace Slag Concrete Chloride Ions Diffusion”, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 30, No. 4, pp. 120-7, 2015.
 - 13) K. N. Hong, S. Y. Ji, J. K. Park, K. S. Jung and S. H. Han, “Mechanical Properties and Carbonation Resistance of Water-soluble Sulfur Concrete”, Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 29, No. 4, pp. 103-9, 2014.