

고로슬래그 미분말을 대량 사용한 고강도 콘크리트의 조기강도 및 길이변화 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Early Strength and Drying Shrinkage of High Strength Concrete Using High Volumes of Ground Granulated Blast-furnace Slag(GGBS)

양 완 희^{1,4*} 류 동 우² 김 우 재³ 박 동 철⁴ 서 치 호¹
Yang, Wan-Hee^{1,4*} Ryu, Dong-Woo² Kim, Woo-Jae³ Park, Dong-Cheol⁴ Seo, Chee-Ho¹
Department of Architectural Engineering, Konkuk University, Gwangjin-gu, Seoul-si, 143-701, Korea ¹
Department of Architectural Engineering, Daejin University, Pochen-si, Gyeonggi-do, 487-811, Korea ²
Research & Engineering Division R&D CENTER, POSCO E&C, Yeonsu-Gu, Incheon, 406-840, Korea ³
R&D CENTER, Intchem Co., Ltd., Suwon-si, Gyeonggi-do, 443-370, Korea ⁴

Abstract

For high strength concrete of 40~60 MPa, the effects on the early strength and concrete dry shrinkage properties replacing 60~80% of Ordinary Portland Cement with Blast Furnace Slag Powder and using the Alkali Activator (Modified Alkali Sulfate type) are considered in this study. 1% Alkali Activator to the binder, cumulative heat of hydration for 72 hours was increased approximately 45%, indicating that heat of hydration contributes to the early strength of concrete, and the slump flow of concrete decreased slightly by 3.7~6.6%, and the 3- and 7- strength was increased by 8~12%, which that the Alkali Activator (Modified Alkali Sulfate type) is effective for ensuring the early strength when manufacturing High Strength Concrete (60%) of Blast Furnace Slag Powder. Furthermore, the dry shrinkage test, both 40 MPa and 60 MPa specimens had level of length changes in order of BS40 > BS60 > BS60A > BS80A, and the use of the Alkali Activator somewhat improved resistance to dry shrinkage.

Keywords : ground granulated blast-furnace slag(GGBS), alkali activator, high strength concrete, heat of hydration, drying shrinkage

1. 서 론

1.1 연구의 목적

최근 국내 제철산업은 조선과 자동차, 기계 및 건설 분야 등 여러 산업 분야의 다양한 수요에 부응하기 위하여 그 생산량이 증대되고 있는 실정이며, 아울러 그 산업부산물인 고로슬래그의 발생량 또한 꾸준히 증가하고 있다. 또한 지구온난화의 주요 요인이 되는 CO₂ 배출량을 저감하기 위하

여 콘크리트 산업분야에서는 시멘트의 사용을 억제하여 콘크리트를 제조할 수 있는 기술개발을 다양하게 진행하고 있다. 따라서, 고로슬래그 미분말을 대량 대체하여 사용하는 콘크리트 기술은 이러한 온실가스의 배출을 저감하고 산업 부산물을 유효하게 활용할 수 있는 지속가능한 지구환경 보호 기술의 하나로, 향후에도 지속적인 검토와 연구가 요구된다[1].

일반적으로 고로슬래그는 급냉한 형태를 분쇄하여 현재에도 고로슬래그 시멘트나 고로슬래그 미분말로써 콘크리트 제조에 활용되고 있으며, 그 대체량은 콘크리트에 대한 요구성능과 같은 여러 가지 인자를 고려하여 주로 30~50% 범위로 활용되고 있다. 고로슬래그를 콘크리트에 활용할 경우, 소량의 슬럼프를 얻기 위한 단위수량을 저감할 수 있으

Received : February 25, 2013

Revision received : April 1, 2013

Accepted : April 16, 2013

* Corresponding author : Yang, Wan-Hee

[Tel: 82-31-273-0663, E-mail: project@intchem.com]

©2013 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

며, 또한 수화발열량 감소, 수밀성 증대, 장기강도 향상, 알칼리골재반응 억제, 염해 저항성 및 내화학적 등이 향상되는 것으로 알려져 있다. 반면 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 조기강도 발현이 저하되고, 초기 건조수축이 증대되는 문제점이 지적되고 있다[2,3,4].

특히 고로슬래그 미분말에 의한 조기강도의 개선을 위하여 분말도를 4 000 cm²/g 수준에서 6 000 cm²/g 이상으로 향상시키는 방법[5]이 있으나 이러한 경우는 고로슬래그 미분말의 가격이 보통포틀랜드 시멘트의 가격과 유사한 수준으로 증가하여 실무 현장에서는 크게 적용되지 못하는 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 (40~60) MPa급의 고강도 콘크리트를 제조함에 있어서, 보통 포틀랜드 시멘트에 60~80%의 고로슬래그 미분말을 대체하고, 알카리 설페이트계 (Modified Alkali Sulfate type) 자극제(Activator)를 활용하여 조기강도 개선효과 및 콘크리트의 길이변화 특성을 고찰하여, 고강도 콘크리트 제조에 고로슬래그 미분말의 사용 확대를 위한 기초적 자료를 제시하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 콘크리트 배합

수화에 따라 발생하는 열은 반드시 수화반응과 비례한다고 할 수는 없으나, 반응 정도를 확인하는데 중요한 역할을 한다[6]. 따라서, 본 연구에서는 콘크리트 실험에 앞서 알카리 설페이트계 자극제에 의한 고로슬래그 미분말 대량 대체 결합재의 수화특성을 확인하기 위하여 고로슬래그 미분말을 60% 대체하고 알카리 자극제의 혼입 여부에 따른 결합재의 미소 수화열 시험을 실시하였다. 이 때 BS 60A의 경우 알카리 자극제는 결합재의 1.0%를 사용하였다.

미소수화열 측정을 위한 시험 계획은 Table 1과 같다.

Table 1. Composition of heat of hydration test

| Types | Binder | | | W/B (%) |
|--------|---------|--------|-------|---------|
| | OPC (%) | BS (%) | A (%) | |
| BS 60 | 40 | 60 | - | 50 |
| BS 60A | 40 | 60 | 1.0 | |

OPC : Ordinary Portland Cement
 BS : Blast furnace Slag powder
 A : Alkali activator(Modified Alkali Sulfate type)

또한, 콘크리트 실험의 주요 인자 및 수준은 Table 2와 같다. 콘크리트 배합은 Table 3 및 Table 4에 나타난 바와 같이 40 MPa과 60 MPa급의 고강도 콘크리트를 대상으로 하였으며, 1차 실험을 통해 고강도 콘크리트의 강도특성을 확인하고 2차 실험에서는 단위결합재량을 최적화하여 실험을 진행하였다. 또한 2차 실험에서는 콘크리트 길이변화 시험을 실시하여 고강도 콘크리트 영역에서 고로슬래그 미분말의 혼입을 증가에 따른 길이변화 특성을 확인하고자 하였다.

이 때 알카리 자극제를 사용하는 경우에는 경제성 등을 고려하여 전체 결합재량 대비 1.0%를 사용하였으며, 폴리 카르본산계 고성능 감수제(Polycarboxylate-based superplasticizer)는 40 MPa 콘크리트의 경우 1.0%, 60 MPa 콘크리트의 경우 1.2%를 사용하였다.

Table 2. Factors and levels of experiment

| Factors | Levels |
|----------------------------|---|
| Strength(MPa) | 40, 60 |
| BS replacement(Binder %) | 40, 60, 80 |
| Alkali activator(Binder %) | 0, 1.0 |
| Measurement items | Slump flow / Air contents Compressive strength(1/3/7/28/56 days) Drying shrinkage(60days) |

Table 3. Mix proportions of experiment(1st)

| Types | W/B (%) | S/a (%) | Water | Unit weight (kg/m ³) | | | | A (B×%) | Ad (B×%) |
|--------|---------|---------|-------|----------------------------------|-----|-----|-----|---------|----------|
| | | | | Binder | | S | G | | |
| | | | | OPC | BS | | | | |
| 40 MPa | BS 40 | 32.5 | 162 | 299 | 199 | 795 | 906 | - | 1.0 |
| | BS 60A | | | 199 | 299 | 792 | 903 | 1.0 | |
| | BS 80A | | | 100 | 398 | 789 | 900 | 1.0 | |
| 60 MPa | BS 40 | 45.0 | 162 | 360 | 240 | 722 | 892 | - | 1.2 |
| | BS 60A | | | 240 | 360 | 719 | 888 | 1.0 | |
| | BS 80A | | | 120 | 480 | 716 | 884 | 1.0 | |

Table 4. Mix proportions of experiment(2nd)

| Types | W/B (%) | S/a (%) | Water | Unit weight (kg/m ³) | | | | A (B×%) | Ad (B×%) |
|--------|---------|---------|-------|----------------------------------|-----|-----|-----|---------|----------|
| | | | | Binder | | S | G | | |
| | | | | OPC | BS | | | | |
| 40 MPa | BS 40 | 34.5 | 165 | 287 | 191 | 797 | 906 | - | 1.0 |
| | BS 60 | | | 191 | 287 | 794 | 902 | - | |
| | BS 60A | | | 191 | 287 | 794 | 902 | 1.0 | |
| | BS 80A | | | 96 | 382 | 791 | 899 | 1.0 | |
| 60 MPa | BS 40 | 45.0 | 165 | 341 | 228 | 728 | 897 | - | 1.2 |
| | BS 60 | | | 228 | 341 | 725 | 893 | - | |
| | BS 60A | | | 228 | 341 | 725 | 893 | 1.0 | |
| | BS 80A | | | 114 | 455 | 722 | 889 | 1.0 | |

단위결합재량은 1차 실험의 강도특성 결과를 바탕으로 40 MPa 배합에서 498 kg/m³, 60 MPa 배합에서 600 kg/m³으로 하였던 것을, 2차 실험에서는 40 MPa 배합에서 478 kg/m³, 60 MPa 배합에서 569 kg/m³로 조정하였으며, 단위수량은 현장에서 충분한 작업성을 확보하고자 1차 실험에서 162 kg/m³이었던 것을 2차 실험에서는 165 kg/m³으로 다소 증가시켜 실험을 실시하였다.

2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 재료의 특성은 Table 5와 6에 나타낸 바와 같이 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(밀도 3.15 g/cm³, 분말도 3 419 cm²/g), 고로슬래그 미분말은 3종(밀도 2.92 g/cm³, 분말도 4 432 cm²/g)을 사용하였다. 굵은 골재는 최대치수 25 mm인 부순 자갈을 사용하였으며, 잔골재는 바다모래를 사용하였다. 알카리 자극제는 Table 7과 같이 알카리 설페이트계(Modified alkali sulfate type) 재료를 사용하였으며, 혼화제는 밀도 1.11, 고품분함량 23%의 PC계 고성능 감수제(Polycarboxylate-based superplasticizer)를 사용하였다.

Table 5. Physical properties of raw materials

| Materials | Density (g/cm ³) | Blaine (cm ² /g) | Absorption (%) |
|------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------|
| OPC | 3.15 | 3 419 | - |
| BS | 2.92 | 4 432 | - |
| Coarse aggregate | 2.61 | - | 0.68 |
| Fine aggregate | 2.59 | - | 0.78 |

Table 6. Chemical component of OPC and BS(%)

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Ig.loss |
|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|---------|
| OPC | 22.0 | 5.27 | 3.44 | 63.4 | 2.13 | 1.96 | 0.79 |
| BS | 32.7 | 13.2 | 0.41 | 44.1 | 6.23 | 1.49 | 0.88 |

Table 7. Properties of alkali activator

| Appearance | Density (g/cm ³) | Apparent density (g/cm ³) | Chemical component (%) | |
|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------|
| Light gray inorganic Powder | 2.75±0.05 | 1.25±0.1 | CaO | 12~25 |
| | | | Al ₂ O ₃ | 3~11 |
| | | | Na ₂ O | 22~35 |
| | | | K ₂ O | < 5 |
| | | | SO ₃ | 38~56 |

2.3 시험체 제작 및 시험방법

알카리 설페이트계 자극제를 사용한 고로슬래그 미분말

대량 대체 결합재의 수화특성을 확인하기 위한 페이스트의 미소수화열 시험은 배합별로 결합재를 20 g씩 제작한 후 물 결합재비를 50%로 하여 시료를 제작하였으며 본 실험에 사용한 미소수화열 분석기기는 Tokyo-Riko사의 Multi-Purpose Conduction Calorimeter를 이용하여 측정하였다.

굳지 않은 콘크리트의 특성은 KS F 2594 「굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 플로 시험방법」과 KS F 2421 「압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법」에 의해 시험을 실시하였으며, 경화 콘크리트의 시험방법으로 압축강도 시험은 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준해 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주 공시체를 제작하여 계획된 재령까지 수중양생(20 ± 2 °C)을 실시한 후 재령 1, 3, 7, 28, 56일에서 측정하였다.

길이변화 시험은 $100 \times 100 \times 400$ mm의 각주 시험체를 제작하고 Figure 1과 같이 60 mm 부착형 스트레인게이지를 사용하여 온도 20 ± 2 °C, 상대습도 $60 \pm 5\%$ 의 항온항습실에서 60일간 연속 측정하였다.



Figure 1. Drying shrinkage test

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미소수화열

Figure 2, 3는 고로슬래그 미분말을 60% 대체한 상태에서 알카리 자극제의 사용에 따른 결합재의 미소수화열 결과를 나타내었다. Figure 2는 수화후 1시간 이전의 초기상태이며, Figure 3은 72시간까지의 수화열 시험 결과이다.

포틀랜드 시멘트의 초기 수화 단계를 구분하면, ①초기(initial period), ②유도기(induction period), ③가속기(acceleration period), ④감속기(deceleration period), ⑤확산기(diffusion period)로 구분[7]할 수 있으며, Jawed 등[8]에 의하면 초기의 수화열 피크는 일반적으로

알카리 설페이트(Alkali sulfate)와 알루미늄에이트(Aluminate)의 급격한 용해와 규산3칼슘(C₃S)과 에트링자이트(Ettringite)의 초기 수화에 의한 것으로 알려져 있다.

이에 따라 본 실험 결과에서도 고로슬래그 미분말의 대체율이 60%인 경우에서도 전반적인 수화열 곡선의 경향은 포틀랜드 시멘트와 유사한 경향을 나타내었으나, 가속기의 피크가 완만하여 감속기와의 구분이 명확하지 않은 특징이 있었다. 이는 포틀랜드 시멘트의 함량이 비교적 적고 고로슬래그 미분말의 반응이 포틀랜드 시멘트처럼 초기에 활발하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

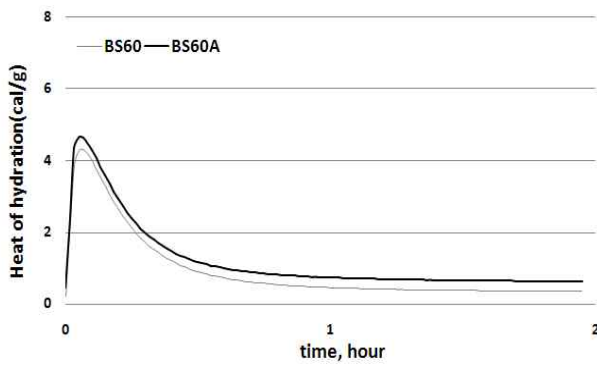


Figure 2. Heat of hydration of control specimens(2 hour)

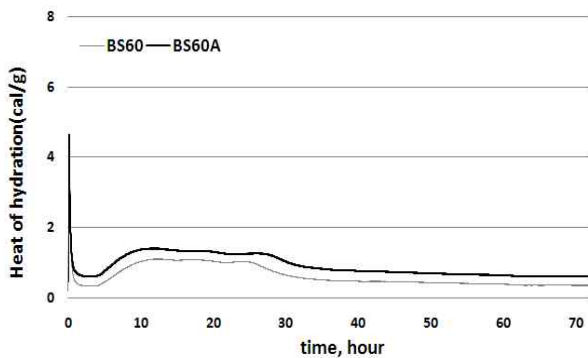


Figure 3. Heat of hydration of control specimens(72 hour)

Table 8. Result of heat of hydration

| Type | 1st Peak | | 2nd Peak | |
|--------|------------|---------------------------|-------------|---------------------------|
| | Time (min) | Heat of Hydration (cal/g) | Time (hour) | Heat of Hydration (cal/g) |
| BS 60 | 4.0 | 4.29 | 11.42 | 1.09 |
| BS 60A | 3.0 | 4.64 | 11.33 | 1.41 |

알카리 자극제를 활용한 BS60A의 경우는 알카리 자극제

를 사용하지 않은 BS60의 경우보다 전반적으로 수화열이 높은 수준으로 확인되었으며, 특히 초기(initial period)에 해당하는 1차의 수화열 피크보다도 가속기에 해당하는 2차 수화열 피크가 상대적으로 좀 더 상승한 것으로 나타났다. 또한, 가속기와 감속기 구간 동안 지속적으로 수화열 피크가 상승한 것으로 나타나, 이러한 반응 특성이 초기 강도 성능의 향상에 기여한 것으로 판단된다. 한편, Table 8과 같이 1차, 2차 수화열 피크에 도달하는 시간은 각각 유사한 수준으로 확인되어, 알카리 설페이트계 자극제를 활용하는 경우 고로슬래그 미분말을 대량 사용한 결합재의 반응이 급격히 촉진되는 것은 아닌 것으로 나타났다.

Figure 4는 Figure 3의 수화열량을 누적하여 나타낸 것으로, 알카리 자극제를 사용한 BS60A가 지속적으로 높은 수준의 누적 발열량을 나타내어 72시간에서는 BS60 대비 약 45%가 향상된 것으로 나타났다. 이러한 발열량의 차이는 압축강도 시험 결과에서도 더 높은 수준의 압축강도 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

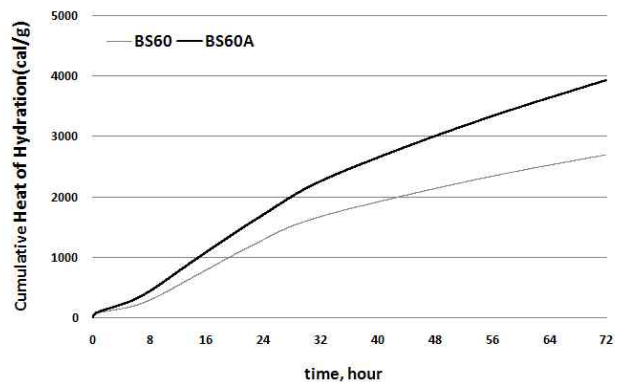


Figure 4 Cumulative heat of hydration of control specimens(72 hour)

3.2 굳지 않은 콘크리트의 특성

Table 9. Properties of fresh concrete(1st)

| Types | Slump Flow(mm) | Air Contents(%) |
|---|----------------|-----------------|
| 40 MPa | | |
| BS 40 | 605 | 3.8 |
| (Unit Binder = 498 kg/m ³ , Unit Water = 162 kg/m ³) | | |
| BS 60A | 605 | 4.0 |
| BS 80A | 605 | 5.0 |
| 60 MPa | | |
| BS 40 | 620 | 3.7 |
| (Unit Binder = 600 kg/m ³ , Unit Water = 162 kg/m ³) | | |
| BS 60A | 560 | 3.4 |
| BS 80A | 640 | 3.1 |

Table 10. Properties of fresh concrete(2nd)

| Types | | Slump Flow(mm) | Air Contents(%) |
|---|--------|----------------|-----------------|
| 40 MPa (Unit Binder = 478 kg/m ³ , Unit Water = 165 kg/m ³) | BS 40 | 595 | 3.8 |
| | BS 60 | 685 | 4.8 |
| | BS 60A | 640 | 4.6 |
| | BS 80A | 640 | 4.5 |
| 60 MPa (Unit Binder = 569 kg/m ³ , Unit Water = 165 kg/m ³) | BS 40 | 610 | 3.3 |
| | BS 60 | 670 | 3.0 |
| | BS 60A | 645 | 2.8 |
| | BS 80A | 685 | 2.2 |

고로슬래그 미분말을 대량 사용한 콘크리트의 슬럼프 플로우 시험 결과와 공기량 시험결과를 Table 9, 10에 나타내었다.

슬럼프 플로우 시험결과, 고로슬래그 미분말의 사용량이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 반면 알카리 자극제의 사용에 따라 소폭 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 알카리 자극제의 사용에 따라 결합재의 수화반응이 활성화되기 때문에 유동성은 다소 감소하는 결과를 나타내는 것으로 판단되는데, 알카리 자극제의 사용에 따른 슬럼프 플로우의 감소는 3.7~6.6% 범위로 미미한 수준이었다.

공기량 시험 결과에서는 40 MPa급 콘크리트의 경우 3.8~5.0%의 결과를 나타내었고, 60 MPa급 콘크리트의 경우에는 2.2~3.7%의 결과를 나타내었는데, 의미있는 수준의 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다.

3.3 압축강도

Figure 5과 6, Table 11은 고로슬래그 미분말의 혼입에 따른 40 MPa과 60 MPa급 콘크리트의 압축강도 시험 결과이다.

먼저 40 MPa급에서는 BS60A가 BS40에 비하여 3일 강도는 약 7.7% 낮았으나, 7일부터 28일까지는 유사한 수준의 강도 결과를 나타내었다. 그러나 BS80A는 BS40이나 BS60A와 비교하여 3일부터 28일까지 모든 재령에서 강도 성능이 다소 낮은 것으로 확인되었다.

60 MPa급에서는 BS60A가 BS40에 비하여 3일, 7일, 14일 모두 우수한 결과를 나타내었으며, 다만 28일 강도는 다소 낮은 것으로 확인되었다. BS80A의 경우, 3일 강도는 BS40보다 4.8% 높게 나타났으나, 7일부터 28일까지는 6.7

~17.7% 낮게 나타났다. 특히 재령 14일이나 28일에서 상대적으로 강도증진이 크지 않았다.

따라서, 알카리 설페이트계 자극제를 이용할 경우 고로슬래그 미분말을 60% 수준으로 대체할 경우 고로슬래그 미분말을 40% 수준으로 대체하는 경우와 유사한 수준의 강도 성능을 확보할 수 있으나, 80% 수준으로 대체하는 경우에는 강도 저하 현상이 크게 완화되지 못하였다. 이는 시멘트의 사용량이 적었으므로 고로슬래그의 반응성을 향상시킬 Ca(OH)₂의 생성이 상대적으로 부족했으며, 사용한 알카리 설페이트계 자극제의 양이 이를 상쇄할만큼 충분치 못했기 때문인 것으로 생각된다. 또한 알카리 설페이트계 자극제는 3이나 7일 강도와 같은 초기 재령에서 비교적 효과가 큰 것으로 나타내는데, 고로슬래그는 포틀랜드 시멘트에 비해 특히 재령 초기의 반응성이 낮으므로, 3.1절과 같이 알카리 설페이트계 자극제가 재령초기 고로슬래그의 반응성 향상에 기여한 것으로 판단된다.

Table 11. Compressive strength of concrete(1st)

| Types | Compressive strength(MPa) | | | | |
|--------|---------------------------|------|------|------|------|
| | 3d | 7d | 14d | 28d | |
| 40 MPa | BS 40 | 32.4 | 45.6 | 64.3 | 68.6 |
| | BS 60A | 29.9 | 46.2 | 64.3 | 65.9 |
| | BS 80A | 27.3 | 39.2 | 50.1 | 52.6 |
| 60 MPa | BS 40 | 37.2 | 53.4 | 72.4 | 77.8 |
| | BS 60A | 41.3 | 59.9 | 73.6 | 75.2 |
| | BS 80A | 39.0 | 49.8 | 62.8 | 64.0 |

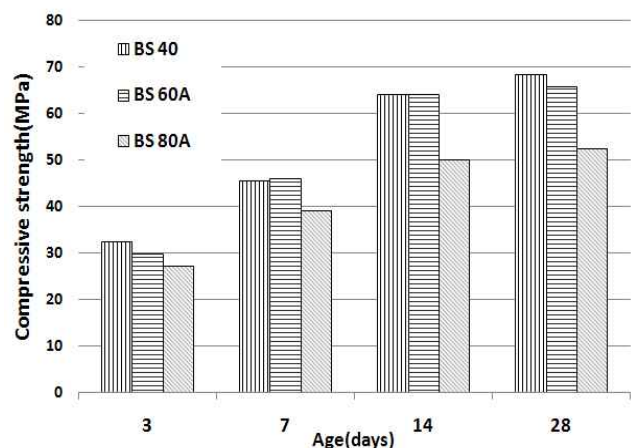


Figure 5. Result of compressive strength(1st-40 MPa)

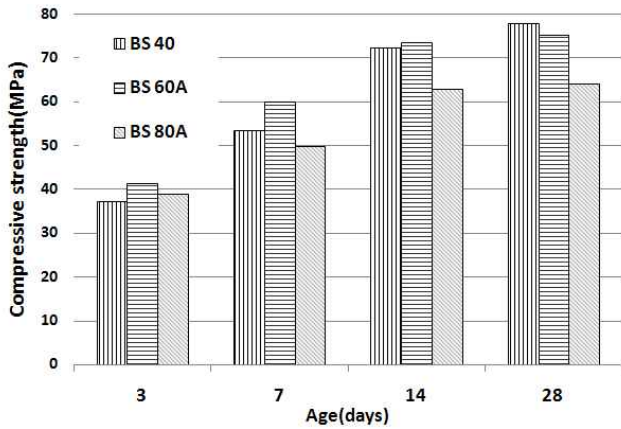


Figure 6. Result of compressive strength(1st-60 MPa)

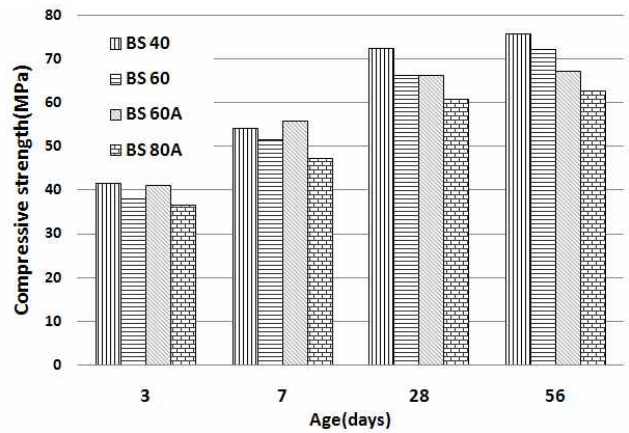


Figure 8. Result of compressive strength(2nd-60 MPa)

이상과 같이 BS40 및 BS60A가 전반적으로 배합강도를 상회하는 충분한 강도 성능을 나타내어 2차 콘크리트 실험에서는 단위결합재량과 단위수량을 조정하여 재차 실험을 실시하였다. 이에 대한 결과는 Figure 7과 8, Table 12와 같다.

Table 12. Compressive strength of concrete(2nd)

| Types | Compressive strength(MPa) | | | | |
|--------|---------------------------|------|------|------|------|
| | 3d | 7d | 28d | 56d | |
| 40 MPa | BS 40 | 32.2 | 46.0 | 62.3 | 66.6 |
| | BS 60 | 27.9 | 39.2 | 55.1 | 56.9 |
| | BS 60A | 31.3 | 44.0 | 54.1 | 57.3 |
| | BS 80A | 30.0 | 37.0 | 43.5 | 45.7 |
| 60 MPa | BS 40 | 41.7 | 54.2 | 72.7 | 76.0 |
| | BS 60 | 38.1 | 51.7 | 66.3 | 72.4 |
| | BS 60A | 41.2 | 55.9 | 66.4 | 67.4 |
| | BS 80A | 36.8 | 47.5 | 61.0 | 62.9 |

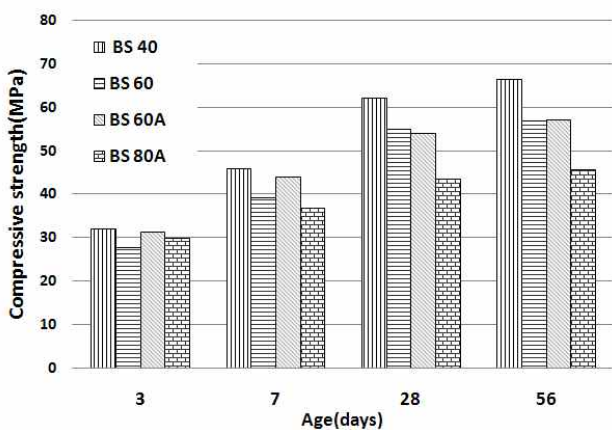


Figure 7. Result of compressive strength(2nd-40 MPa)

40 MPa급 실험 결과에서는 BS60A가 초기에서는 BS40 과 유사한 강도 성능을 나타내었으나, 28일이나 56일 재령에서는 BS40보다 다소 낮았다. BS60과 BS60A를 비교할 때는 BS60A가 초기재령에서 비교적 우수하였으나, 28일에서는 유사한 수준의 결과를 나타내었다. 한편 BS80A는 3일에서는 다른 시험체와 유사하였으나, 7일부터 56일까지는 전반적으로 낮은 결과를 나타내었다. 또한, BS40이 28일, 56일에서도 꾸준히 강도가 증가하는 경향을 나타낸 반면 BS80A는 28일부터 강도 증진이 크지 않았다.

60 MPa급 실험 결과에서는 BS60A가 7일까지는 BS40 과 유사하거나 오히려 우수하였으나, 28일이나 56일 재령에서는 역시 BS40에 미치지 못하였다. 또한, BS60과 BS60A를 비교할 때는 BS60A가 초기재령에서 비교적 우수한 결과를 나타내었으나, 28일에서는 유사한 수준이었다. 한편 BS80A는 28까지 양호한 강도 증진을 나타내었으나, 56일에서는 강도 증진이 크지 않았으며, 전반적으로 다른 시험체보다 낮은 수준의 결과를 나타내었다.

이상과 같이 고로슬래그 미분말을 80%로 대량 대체한 BS80A의 경우 계획된 배합강도는 다소 상회하였으나, 40% 대체한 BS40보다 강도성능이 전반적으로 낮았으며, 60% 대체한 BS60A 경우에는 알카리 설페이트계 자극제의 사용에 따라 초기강도는 BS40과 유사한 수준으로 확보할 수 있었고, 단위결합재량이 충분한 1차 실험결과에서는 오히려 BS40을 초과하는 강도성능을 나타내기도 하였다.

따라서, 고로슬래그 미분말을 60% 수준으로 대량 대체하여 고강도 콘크리트를 제조할 때 초기재령의 강도 확보에 알카리 설페이트계 자극제의 활용이 효과적인 것으로 판단된다.

3.4 길이변화

Figure 9, 10은 고강도 콘크리트에서 고로슬래그 미분말의 대체율에 따른 콘크리트의 길이변화율을 시험체 제작 초기부터 60일간 연속 측정된 결과를 나타낸 것이다.

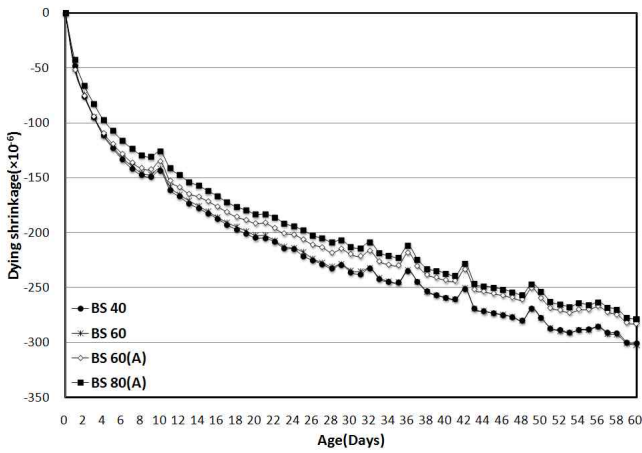


Figure 9. Result of dry shrinkage(2nd-40 MPa)

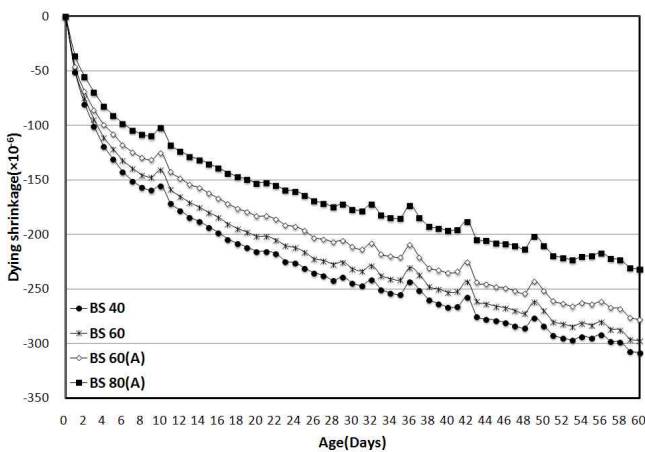


Figure 10. Result of dry shrinkage(2nd-60 MPa)

고강도 콘크리트의 길이변화 시험 결과, 40 MPa와 60 MPa 시험체 모두 BS40 > BS60 > BS60A > BS80A의 순으로 길이변화가 큰 것으로 나타났고, 40 MPa급의 콘크리트의 경우 시험체에 따라 $280\sim300\times 10^{-6}$ 수준의 변화가 있었으며, 60 MPa급의 콘크리트의 경우 $230\sim310\times 10^{-6}$ 의 결과를 나타내어 전반적으로 40 MPa급 콘크리트의 길이변화가 60 MPa급 콘크리트보다 다소 큰 것으로 나타났다.

알카리 활성화 슬래그 시멘트 콘크리트(Alkali Activated

Slag Cement Concrete)의 건조수축에 대한 실험을 진행한 Colling과 Sanjayan[9]에 의하면 sodium hydroxide (NaOH)와 sodium carbonate(Na_2CO_3)를 이용한 알카리 활성화 슬래그 시멘트 콘크리트가 56일에 약 450×10^{-6} 수준의 건조수축이 일어났으며, Douglas 등[10]은 규산 소다 (sodium silicate)를 이용하여 알카리 활성화 슬래그 시멘트 콘크리트의 건조수축 실험을 진행한 결과 재령 56일에서 $500\sim670\times 10^{-6}$ 의 결과를 나타내었는데, 본 실험에서는 고로슬래그 미분말뿐만 아니라 보통 포틀랜드 시멘트를 20~60%까지 함께 사용하였고 40~60 MPa급의 고강도 콘크리트를 대상으로 실험을 진행하였으므로 재령 초기의 강도 성능이 비교적 우수하여 수축변형에 대한 저항이 기존의 연구 결과보다 우수했던 것으로 판단된다. 또한, Douglas 등[10]에 의한 실험결과에서는 재령 112일의 길이변화율이 재령 56일에 비하여 약 20% 내외가 증가되며, 재령 224일의 경우 재령 56일에 비하여 약 50% 내외가 증가된다고 보고하고 있는데, 이를 고려하여도 본 실험결과는 일본건축학회 JASS 5에서 정의한 내구성 확보를 위한 수축균열 저감목표치인 800×10^{-6} 이하의 값을 충분히 만족할 것으로 판단된다.[5]

한편 고로슬래그 미분말을 대량 사용한 BS80A나 BS60A 등은 고로슬래그 미분말이 시멘트보다 다소 분말도가 높고, Alkali Activator에 의한 수화 활성화가 일어났으므로 그 미세공극이 충전되는 효과가 있었으며, 반대로 시멘트량의 감소에 따라 CSH 수화물에 물리적으로 흡착된 수분의 손실 [11]이 상대적으로 적었기 때문에 BS40과 같은 고로슬래그 미분말의 사용량이 적은 시험체보다 길이변화율이 작게 나타난 것으로 판단된다. 특히 본 실험에서와 같이 단위결합 재량은 풍부하고 상대적으로 단위수량이 작은 고강도 콘크리트의 영역에서는 후자의 원인이 비교적 크게 작용한 것으로 판단된다.

알카리 자극제의 사용에 따라 BS60과 BS60A를 비교할 경우 BS60A의 경우가 길이변화가 다소 적은 것으로 나타났는데, 이는 길이변화가 비교적 크게 일어나는 초기 재령에서 3.1절에서와 같이 알카리 자극제의 사용에 따라 수화반응이 좀더 활발히 일어났고, 이에 따라 3.3절과 같이 콘크리트의 압축강도가 개선된 효과에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, Bakharev 등[12]은 석고(Gypsum)와 같은 수축저감제가 알카리 활성화 슬래그 시멘트 콘크리트에서 건조수축 저감에 효과적임을 보고하고 있는데, 이는 설페이트

(sulfate)에 의해 팽창성 물질인 에트링자이트($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$)가 생성된 것에 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용한 알카리 설페이트계 자극제는 설페이트 성분을 다량 포함하고 있으므로 이러한 기존의 연구 결과와 부합되는 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

4. 결 론

40~60 MPa급의 고강도 콘크리트를 제조함에 있어서, 보통 포틀랜드 시멘트의 60~80%를 고로슬래그 미분말로 대체하고, 알카리 설페이트계(Modified Alkali Sulfate type) 자극제(Activator)를 활용하여 조기강도 개선효과 및 콘크리트의 길이변화 특성을 고찰한 결과는 다음과 같다.

- 1) 고로슬래그 미분말을 보통포틀랜드 시멘트 대비 60%를 대체하고 알카리 설페이트계 자극제의 사용 여부에 따른 미소수화열 시험 결과, 알카리 자극제를 결합재 대비 1%를 사용한 경우 누적 발열량이 72시간에 약 45% 향상된 것으로 나타나, 이러한 수화발열량의 차이가 콘크리트의 초기의 강도 성능 향상에 기여하는 것으로 판단된다.
- 2) 굳지 않은 콘크리트 시험 결과는 고로슬래그 미분말의 사용량이 증가할수록 슬럼프 플로우가 다소 증가하다가 알카리 자극제의 사용에 따라 다소 감소하는 경향을 나타내었으며, 공기량 시험 결과는 뚜렷한 경향이 없었다.
- 3) 고로슬래그 미분말을 60%를 대체하는 경우에는 알카리 설페이트계 자극제의 사용에 따라 초기강도는 고로슬래그 미분말을 40% 대체하는 경우와 유사한 수준으로 확보할 수 있었고, 알카리 자극제를 사용하지 않은 경우와 비교할 경우 3일과 7일 강도가 8~12% 향상되는 것으로 나타났다. 따라서 고로슬래그 미분말을 60% 수준으로 대량 대체하여 고강도 콘크리트를 제조할 때 초기재령의 강도 확보에 알카리 설페이트계 자극제의 활용이 효과적인 것으로 판단된다.
- 4) 길이변화 시험 결과는, 40 MPa와 60 MPa 시험체 모두 BS40 > BS60 > BS60A > BS80A의 순으로 길이변화가 큰 것으로 나타났고, 알카리 자극제의 사용에 따라 길이변화가 다소 작은 것으로 나타났는데, 이는 길이변화가 비교적 크게 일어나는 초기 재령에서 알카

리 자극제의 사용에 따라 콘크리트의 압축강도가 개선된 효과와 알카리 자극제의 설페이트 성분에 의해 수축이 다소 저감되는 효과에 기인한 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 40 MPa 및 60 MPa급의 고강도 콘크리트를 제조함에 있어서, 보통 포틀랜드 시멘트에 대해 60~80%를 고로슬래그 미분말로 대체하고, 알카리 설페이트계(Modified Alkali Sulfate type) 자극제(Activator)를 활용하여 조기강도 개선효과 및 콘크리트의 길이변화 특성을 고찰하였다. 이에 따라 알카리 자극제를 결합재 대비 1%를 사용한 결과, 미소수화열은 72시간의 누적 발열량이 약 45%가 향상되어 초기의 강도 성능 향상에 기여하는 것으로 판단되며, 콘크리트의 유동성은 다소 감소하였으나, 3일과 7일 강도는 8~12% 향상되어 고로슬래그 미분말을 60% 수준으로 대체하여 고강도 콘크리트를 제조할 때 초기재령의 강도 확보에 알카리 설페이트계 자극제의 활용이 효과적인 것으로 나타났다. 또한 길이변화 시험 결과는, 40 MPa와 60 MPa 시험체 모두 BS40 > BS60 > BS60A > BS80A의 순으로 길이변화가 큰 것으로 나타났고, 알카리 자극제의 사용에 따라 길이변화가 다소 개선되는 것으로 나타났다.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 알카리 자극제, 고강도 콘크리트, 미소 수화열, 길이변화

Acknowledgement

This subject is supported by Korea Ministry of Environment as "The Eco-technopia 21 project" (405-111-006)

References

1. Roy DM, Alkali-activated cements: Opportunities and challenges, Cement and Concrete Research, 1999 Feb;29(2):249-54.
2. ACI Committee 206, Ground granulated blast-furnace slag as cementations constituent in concrete, ACI Materials Journal, 2009;No.84-M34:327-42.
3. Hester D, McNally C, Richardson MG, Study of influence of

-
- slag alkali level on the alkali–silica reactivity of slag concrete. *Construction and Building Materials*, 2005 Nov;19(9):661–5.
4. Leng F, Feng N, Lu X. An experiment study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 2000 Jun;30:989–92.
 5. Ryu DW, Kim WJ, Yang WH, Park DC. An Experimental Study on the Carbonation and Drying Shrinkage of Concrete Using High Volumes of Ground Granulated Blast–furnace Slag. Korea Institute of building Construction, 2012 Aug;12(4):393–400.
 6. Park CB. Properties of high volume mineral admixture concrete with kind of inorganic activators [dissertation]. [Seoul (Korea)]: Konkuk University; 2012. 132 p.
 7. Shi C, Day RL. A calorimetric study of early hydration of alkali–slag cements. *Cement and Concrete Research*, 1995 Aug;25(6):1333–46.
 8. Bensted J, Barnes P, editors. *Structure and Performance of Cements*, 2nd ed. London and New York: Taylor & Francis; 2002. Chapter 3, Hydration of Portland Cement; p. 57–139.
 9. Collins FG, Sanjayan JG. Strength and shrinkage properties of alkali–activated slag concrete containing porous coarse aggregate. *Cement and Concrete Research*, 1999 Apr;29(4):607–10.
 10. Douglas E, Bilodeau A, Malhotra VM. Properties and durability of alkali–activated slag concrete. *ACI Materials Journal*, 1992 Sep;89(5):509–16.
 11. Mehta PK, Monteiro PJM. *CONCRETE Microstructure, Properties, and Materials*, 3rd ed. New York: The McGraw–Hill Companies; 2006. Chapter 4, Dimensional Stability; p. 85–120.
 12. Bakharev T, Sanjayan JG, Cheng YB. Effect of admixtures on properties of alkali–activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 2000 Sep;30(9):1367–74.