에너지공학, 제28권 제1호(2019)
*Journal of Energy Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp.10~16(2019)
https://doi.org/10.5855/ENERGY.2019.28.1.010

# 칼슘설포알루미네이트를 활용한 기포콘크리트의 특성평가

**조용광 · 김춘식 · 남성영 · 조성현 · 이형우 · 안지환*†**
**한일시멘트 환경소재팀, 한국지질자원연구원***

(2019년 2월 11일 접수, 2019년 3월 6일 수정, 2019년 3월 13일 채택)

# Characterization of Foamed Concrete Using Calcium sulfaluminate

**Yong-Kwang Cho · Chun-Sik Kim · Seong-Young Nam · Sung-Hyun Cho · Hyoung-Woo Lee · Ji-Whan Ahn*†**
Environment Materials Team, Hanil Cement Co.Ltd., Chungbuk, Korea
*Korea Institute of Geosceinces and Mineral Resources (KIGAM)
(Received 11 February 2019, Revised 6 March 2019, Accepted 13 March 2019)

요 약

본 연구에서는 경량기포콘크리트의 침하안정성 및 경제성을 확보하기 위해 수행되었다. OPC에 fly ash와 Calcium sulfaluminate(CSA)를 일정함량 치환한 배합비를 선정하고 기초물성을 검토하였다. CSA에 의해 조기 ettringite 생성으로 경량기포콘크리트의 플로우가 감소한 것을 확인하였다. 압축강도는 CSA 10%까지 혼입할 경우 경량기포콘크리트의 경화시간 단축으로 인해 초기강도는 증가한 것을 확인하였다. 침하깊이는 CSA를 치환할 경우 응결시간을 단축하여 기포가 소포되는 것을 방지하였기 때문에 침하안정성이 향상되었다.

**주요어 :** 칼슘설포알루미네이트, 기포콘크리트, 비산재, 침하안정성

Abstract - The purposes of this study is to secure subsidence stability and economical efficiency of lightweight foamed concrete. The composition of lightweight foamed concrete was designed for OPC by substituting with constant contents of calcium sulfaluminate and fly ash. It is found that the flow of lightweight foamed concrete decreased with early ettringite formation by CSA. The initial strength increased with the decrease of drying time of lightweight foamed concrete when CSA was substitution to 10%. The settlement deep of foamed concrete improved the settlement stability by replacing CSA, which prevented shortening of the coagulation time and bubble puffing.

**Key words** : calcium sulfaluminate, lightweight foamed concrete, fly ash, subsidence stability

## 1. 서 론

포틀랜드 시멘트는 석회석, 점토, 규석, 산화철 원료 등을 건조한 후 적정비율로 배합하고, 배합된 원료를 킬른(Kiln)에서 1450℃로 소성하여 냉각한 클링커(Clinker)에 적당량의 석고를 첨가하여 분쇄밀(mill)에서 미분쇄하여 제조한다. 따라서 시멘트 산업은 이와 같이 대량의 화석연료와 에너지를 많이 소비하는 대표적인 산업으로 소성시 석회석의 탈탄산 반응과 화석원료의 사용 때문에 온실가스의 주범인 이산화탄소($CO_2$)를 시멘트 1톤당 약 0.8톤을 배출하고 있다.

이는 전 세계적으로는 이산화탄소 전체 배출량의 약 8%를 배출하고, 국내는 약 10%를 배출하는 대표적인 산업이다. 2015년 12월 파리 기후변화협약(COP21)에서 “신 기후 변화 체제”를 발표한 후 시멘트 산업에서도 온실감축 주범인 이산화탄소를 줄

†To whom corresponding should be addressed.
Tel : +82-42-868-3573 E-mail : ahnjw@kigam.re.kr

이기 위한 노력을 진행하고 있다. 유럽은 시멘트산업에서 이산화탄소를 감축하기 위해 Aether Project (Lafage Cement)와 Eco-binder Project(European Commission)진행하고 있고, 일본은 혁신적 시멘트 제조 프로세스 기반기술 개발 등을 진행하고 있다. (1)(2)(3) 이들 프로젝트에서는 기존 시멘트에 사용되는 클링커보다 약 100~200℃ 낮은 온도에서 소성이 가능한 칼슘설포알루미네이트($3CSA{\cdot}3Al_2O_3{\cdot}CaSO_4$, Ye'elimite 또는 CSA) 클링커 및 이를 활용한 BCT(Belite Calciumsulfoaluminate Ternesite), BYF(Belite, Ye'elimite, Ferrite phases), Belite Hauyne계 등 다양한 클링커 개발을 진행하고 있다.

기존 포틀랜드시멘트 제조공정에서 칼슘설포알루미네이트 광물을 제조시 에너지 비용 저감 뿐 아니라 이산화탄소도 약 30% 정도 감축할 수 있으며, 조강성, 속경성, 팽창성등의 특징을 가지고 있기 때문에 기존 포틀랜드 시멘트의 단점을 보완할 수 있다. 하지만, 이러한 칼슘설포알루미네이트를 활용한 다양한 연구를 통한 실제 건축, 토목현장에서 상용화할 수 있는 연구는 부족한 실정이다.

기포콘크리트는 시멘트와 물을 혼합한 시멘트 슬러리에 기포제로 발표시킨 일정량의 폼(Foam)을 혼합하여 무수히 많은 독립기포를 형성시켜 만든 콘크리트이다. 기포콘크리트는 밀도가 낮은 경량재료로서 단열, 방음, 경량 등의 우수한 특징을 가진 건설재료로서 가치와 활용도가 우수하다.(4)

국내에서 기포콘크리트는 공동주택 바닥 난방 공사에서 단열 및 난방 파이프 고정 등의 목적, 노후화되어 폐쇄된 상수관 또는 하수관의 채움재, 싱크홀의 채움재, 각종 성토공사에 사용된다. 기포콘크리트는 제 성능을 발휘하기 위해서 경화되기 전에 기포가 소포되지 않아야 한다. 그러나 양생온도가 낮거나 혼화재료인 플라이애시, 고로슬래그 미분말 등을 사용할 경우 기포콘크리트의 응결시간이 늦어져 내부 기포가 소포되어 Fig. 1과 같이 침하와 균열이 발생되어 제 성능을 발휘하지 못하는 경우가 발생한다.(5)(6)

본 연구에서는 낮은 양생온도 및 혼화재료를 사용한 기포콘크리트의 소포현상 때문에 발생하는 침하 및 균열을 방지하기 위하여 속경성 가진 칼슘설포알루미네이트(이하 CSA)의 사용에 따른 기포콘크리트의 유동성, 침하량, 밀도, 압축강도 등 기초특성을 검토하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2-1. 실험재료

본 연구에서 사용되는 고화용 재료인 시멘트는 Table 1과 같이 KS L 5201(포틀랜드시멘트)의 규정에 만족하는 H사의 1종 포틀랜드시멘트를 사용하였다. 산업부산물인 플라이 애시는 Y지역 화력발전소에서 발생되는 미분탄 플라이 애시를 정제 후 사용하였다. 침하량 저감 및 초기강도 확보를 위해 사용된 CSA는 산업부산물을 활용하여 실험실에서 제조한 것을 사용하였다. 플라이애시와 CSA의 화학

a) Light weight filling work b) Flooring work

**Fig. 1.** Settlement crack of light weight foamed concrete

**Table 1.** Physical properties of cement

| Density ($g/cm^3$) | Blaine ($cm^2/g$) | Setting time(min) | | Compressive strength(MPa) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Initial | Final | 3day | 7day | 28day |
| 3.15 | 3,450 | 230 | 345 | 25.1 | 42.5 | 59.8 |

**Table 2.** Chemical compositions of CSA and fly ash

| | Chemical composition (%) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $SO_3$ | $K_2O$ | $Na_2O$ |
| CSA | 8.91 | 30.30 | 1.83 | 40.60 | 1.53 | 12.60 | 0.35 | 1.53 |
| fly ash | 57.8 | 21.8 | 7.5 | 6.3 | 1.5 | 1.8 | - | - |

**Table 3.** Quality standerd of foamed concrete for cast-in-site(KS F 4039)

| Grade | Apparent Density ($g/cm^3$) | Slurry Density ($g/cm^3$) | Flow (mm) | Settlement depth (mm) | Comperessive strength(MPa) | | Themal conductivity W/(m·k) | Drying shrinkage (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 7day | 28day | | |
| 0.5 | 0.40more 0.50under | 0.52 more | 180 more | 10 under | 0.9 more | 1.4 more | 0.160 under | 0.40 under |

**Table 4.** Mixing proportions of lightweight foamed concrete

| No | Grade | W/B(%) | wt(%) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | OPC | CSA | F/A | SUM |
| C-P | 0.5 | 55 | 100 | - | - | 100 |
| C-1 | | | 90 | - | 10 | 100 |
| C-2 | | | 85 | 5 | 10 | 100 |
| C-3 | | | 80 | 10 | 10 | 100 |
| C-4 | | | 70 | 20 | 10 | 100 |

성분은 Table 2와 같다.

기포제는 계면활성 작용에 의해 물리적으로 기포를 도입하는 것으로써 공기량은 최고 85%까지 생성할 수 있다. 기포제 종류로는 크게 계면활성계(식물성)기포제와 가수분해 단백질계(동물성)기포제로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 동물성기포제 대비 친환경적인 식물성 기포제(pH 8.39)를 사용하였다.

## 2-2. 연구계획 및 실험방법

본 연구는 기포콘크리트의 조기강도 발현, 침하깊이 감소를 확보하기 위해 기존 시멘트에 플라이애시와 CSA를 일정 함량 치환한 배합비를 선정하고 기초물성을 검토하였다. 또한 Table 3과 같이 KS F 4039(현장 타설용 기포콘크리트)중에서 현장에서 가장 많이 사용하고 있는 0.5 Tyoe 기포콘크리트의 품질을 만족할 수 있도록 하였다.(7) 배합설계는 기포콘크리트의 CSA의 적정함량을 확인하기 위해 Table 4와 같이 설계하여 실험을 진행하였다.

실험방법으로는 기포콘크리트의 페이스트를 제조하기 위해 배합수 50wt%를 첨가하여 저속에서 약 3분간 혼합하여 제조하였다. 이후 제조된 페이스트에 선 발포된 기포를 넣고 믹서를 이용하여 1분 30초간 혼합하였다. 0.5품 기포콘크리트를 제조하기 위해 단위중량을 측정하면서 기포제와 페이스트 비중을 조절하였다. 기포콘크리트 압축강도를 측정하기 위해 실린더 몰드(Ø100×200mm)로 공시체를 제조하였다. 제작된 시험체는 양생온도 10±2℃, 습도 60±5%의 양생챔버에서 3일간 양생 후 탈형하였다. 탈형 후 시험체는 포화습기 상태를 만들어 소요재령까지 양생온도 10±2℃에서 양생하였다.

## 2-3. 분석방법

기포콘크리트의 플로우는 KS F 4039 (현장 타설용 기포콘크리트)기준에 의거하여 Ø80×80 mm 크

기의 평판과 체적 400ml 아크릴 원통을 사용하여 측정하였다. 이때, 아크릴원통을 세운 후 채취된 슬러리를 상부까지 붓고 남은 윗부분은 수평하게 제거하였다. 이후 원통을 살며시 들어 올려 슬러리가 퍼진 방향을 측정하여 플로우를 확인하였다. 겉보기밀도, 압축강도는 KS F 2459(기포콘크리트의 겉보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축강도 시험방법)에 의거하여 진행하였다. 침하깊이 측정을 위해 투명아크릴용기(Ø75×500mm)에 시료를 수평하게 상부 끝까지 채우고 건조된 후 상부 침하깊이를 mm 단위로 측정하였다.

## 3. 결과 및 토론

### 3.1. 기포콘크리트의 플로우

기포콘크리트의 플로우는 경량기포 슬러리의 이송 및 타설 장소에서의 수평작업과 관련이 있는 항목으로 현장에서의 시공성 및 마무리 정도를 나타내는 척도로 활용되고 있다. 플로우의 경우 현장에서 시공하기 적합한 플로우로 KS F 4039(현장 타설용 기포콘크리트)의 플로우 기준에 의거하여 180mm 이상을 요구하고 있다. 일반적으로 기포콘크리트의 플로우는 단위결합재량과 기포율, 그리고 결합재 구성 원료의 특성에 영향을 받는다. 각 배합별 기포콘크리트의 플로우의 결과는 Fig 2에 나타내었다. 모든 배합이 KS 기준인 180mm 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

시멘트 100%를 사용한 배합은 245mm로 가장 큰 플로우 값을 나타내었고, CSA 20%를 치환한 경우 185mm로 가장 작은 값을 나타내었다. 따라서 CSA의 치환량이 증가할수록 플로우는 감소하는 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 CSA를 치환하면 ettringite가 조기에 생성되고, ettringite(화학식 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) 생성시 다수의 물 분자가 필요하게 된다.(7),(8) 따라서 CSA함량이 증가할 경우 ettringite를 생성하기 위해 다수의 수분을 흡수하게 되고 이로 인해 플로우가 감소한 것으로 판단된다.

### 3.2. 기포콘크리트의 압축강도 및 겉보기 밀도

일반적으로 KS F4039 (현장 타설용 기포콘크리트)기준에 의거하여 기포콘크리트의 품질관리를 위해 압축강도는 7일, 28일 강도 측정을 원칙으로 한다. 하지만 본 연구에서는 초기강도의 특성을 확인하기 위해 3, 7, 28일 압축강도를 측정하였다. 기포콘크리트의 압축강도는 단위결합재량 및 결합재 구성요소 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는다고 보고되고 있다.(8)

Fig 3은 기포콘크리트의 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. 압축강도 측정결과 재령 7일에서 시멘트 100% 사용한 배합은 0.8MPa, 플라이애시 10%만 치환한 경우는 0.75MPa로 KS F 4039(현장 타설용 기포콘크리트)에서 제시하고 있는 0.9MPa를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 CSA 5% 치환된 배합은 재령 7일에서 0.95MPa, CSA 10% 치환 배합은 1.259MPa로 KS F 4039(현장 타설용 기포콘크리트)에서 제시하고 있는 0.9MPa를 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시멘트의 수화반응으로 생성된 수산화칼슘과 CSA의 성분 중에 $Al_2O_3$와 수분이 반응하여 생성된 $Al(OH)_3$에 의해 Ca-Al-$H_2$계 수화물을 생성시켜 시멘트 100%대비 경화시간이 단축되어 생긴 결과로 판단된다.

CSA가 20% 치환된 배합은 재령 7일에 0.3MPa로

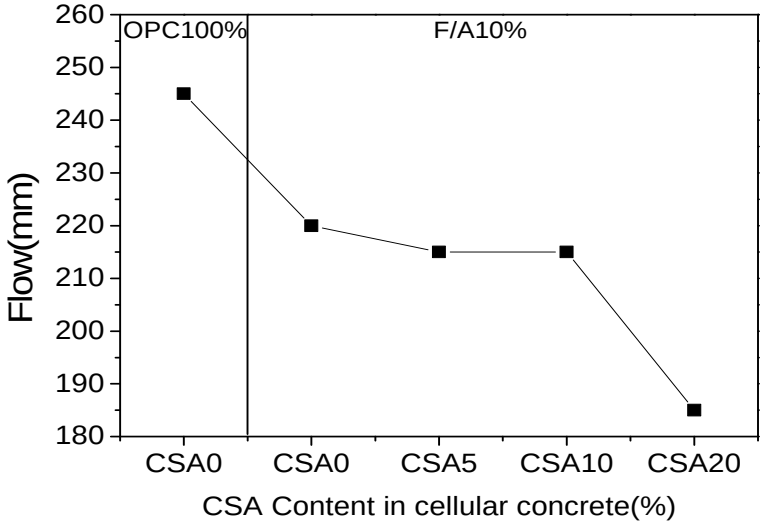


**Fig. 2.** Flow of lightweight foamed concrete

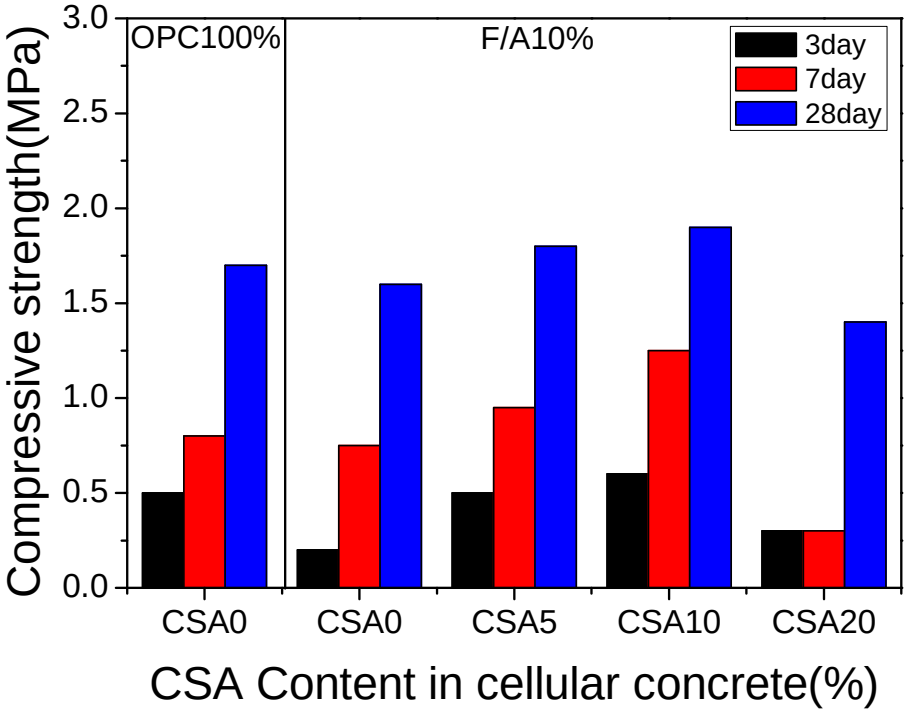


**Fig. 3.** Compressive strength of lightweight foamed concrete

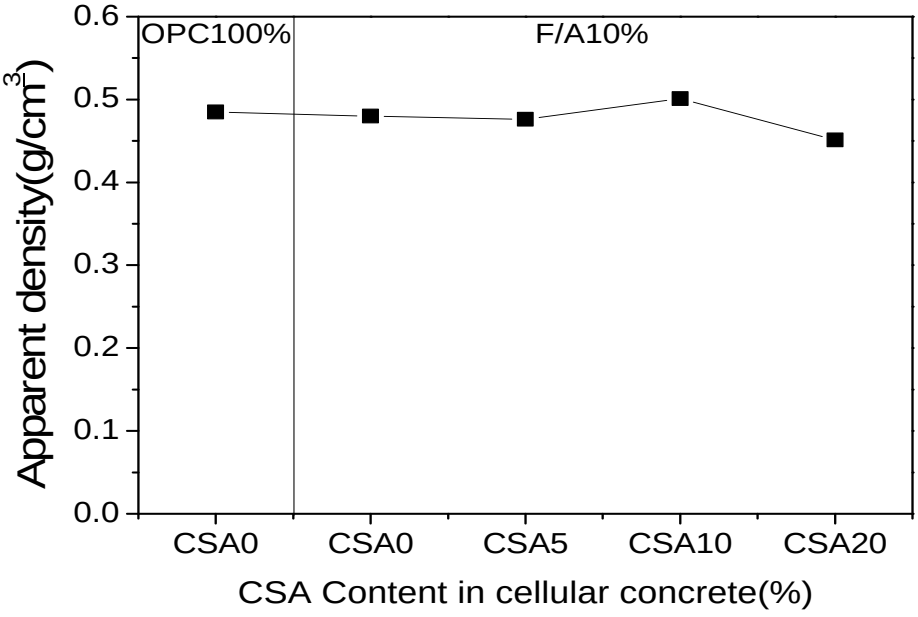


**Fig. 4.** Apparent density of lightweight foamed concrete

압축강도가 크게 감소한 것으로 나타났다. CSA의 과다 사용에 따른 다량의 ettringite 생성으로 기포콘크리트 시험체 내부의 수분을 가져감으로써 시멘트와 반응에 필요한 수분이 부족하였기 때문으로 판단된다. 따라서 압축강도 측정결과 CSA를 10%까지 치환하는 것이 적정할 것으로 판단된다.

기포콘크리트의 겉보기 밀도는 단열성과 반비례하므로 단열성을 평가하는 기준이 되기도 하지만 그 밖에 물리적 특성과도 관계있는 것으로 보고되고 있다.(9) 겉보기 밀도 측정결과는 Fig 4에 나타내었다. 0.5품 기포콘크리트의 경우 KS F4039 (현장 타설용 기포콘크리트)의 0.40~0.50 g/cm$^3$ 의기준치를

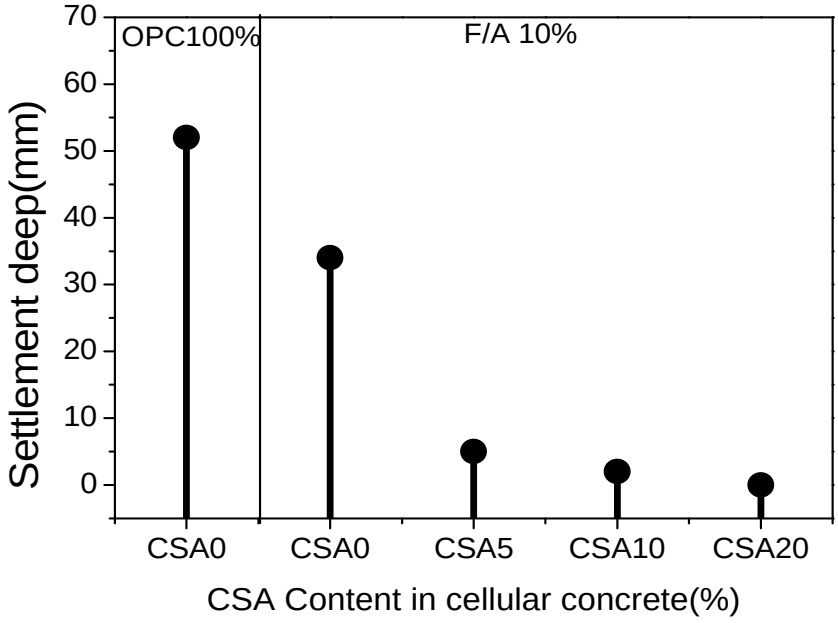


**Fig. 5.** Settlement deep of lightweight foamed concrete

만족해야 한다. 측정결과 모든 배합이 0.5품 에 해당기준에 만족하는 결과를 확인하였다.

### 3.3. 기포콘크리트의 침하깊이 분석

기포콘크리트의 침하깊이는 경제성 및 품질안정성에도 영향이 있다. 일반적으로 소성침하가 발생할 경우 균열의 원인으로도 보고되고 있다. 기포콘크리트의 침하의 원인은 시공시 배합수량 과다 및 침출수 과다로 인한 양생불량 등의 영향을 받기도 하지만 일반적으로 응결지연에 따른 기포의 소포현상에 의해 침하가 발생된다.(10) 따라서 기포콘크리트의 침하 깊이의 중요성은 여러 연구 자료에서도 확인할 수 있다.(11),(12) Fig 5는 양생온도 10℃에서 기포콘크리트의 침하깊이 측정한 것이다. 시멘트 100% 사용한 배합은 침하깊이가 52mm, F/A 10%만 치환한 경우는 34mm로 KS F4039(현장 타설용 기포콘크리트)에서 제시하고 있는 10mm이하에 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 반면 CSA를 5% 치환한 경우에는 5mm의 침하깊이가 발생하였으며, CSA를 10% 치환한 경우는 2mm, CSA를 20% 치환한 경우에는 침하가 발생되지 않은 것을 나타났다. 이는 CSA를 치환함에 따라 조기에 ettringite를 형성시켜 기포콘크리트의 응결시간을 단축하여 기포가 소포되는 것을 방지하였기 때문으로 판단된다. 따라서 CSA사용이 낮은 양생온도에서 기포콘크리트의 침하방지에 효과적일 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 낮은 양생온도 및 혼화재료를 사용한 기포콘크리트의 소포현상 때문에 발생하는 침하 및 균열을 방지하기 위하여 속경성 가진 칼슘설포알루미네이트(이하 CSA)의 사용에 따른 기포콘크리트의 유동성, 침하량, 밀도, 압축강도 등 기초특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CSA 치환이 증가할수록 플로우는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 CSA사용이 ettringite를 조기에 생성시키기 때문에 다수의 수분을 흡수하게 되어 플로우가 감소하는 것으로 판단된다.
2. 압축강도는 CSA 10%까지 치환한 경우 양생온도 10℃에서도 KS F 4039(현장 타설용 기포콘크리트) 압축강도 기준인 7일 0.9MPa를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 CSA를 사용하지 않은 시멘트 100% 사용한 배합과 플라이애시 10%만 치환한 배합은 양생온도 10℃에서 KS F 4039에서 제시하는 압축강도 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.
3. 침하깊이는 CSA를 치환할 경우 감소하는 것으로 나타났다. CSA를 사용한 배합은 양생온도 10℃에서도 KS F 4039(현장 타설용 기포콘크리트) 제시하고 있는 10mm이하를 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 CSA를 사용하지 않은 시멘트 100% 사용한 배합과 플라이애시 10%만 치환한 배합은 KS F 4039에서 제시하고 있는 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

4. 종합적으로 판단하면 기포콘크리트에 CSA 10%까지 치환할 경우 조기에 ettringite를 형성시켜 응결시간을 단축하기 때문에 10℃ 낮은 양생온도에서도 기포의 소포에 의한 침하방지가 가능하다. 또한 안정된 기포를 형성하기 때문에 압축강도도 우수한 것으로 나타났다.

## Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20141010101880).

## References

1. The European Cement Association, Innovation in the cement, 2017.
2. E. Gartner, 2017, What are BYF cements, and how do they differ from CSA cements?, The Future of Cement 200 years after Louis Vicat, pp6-8.
3. 産業構造審議会産業技術環境分科会, 2017, 革新的セメント製造プロセス基盤技術開発事後評価報告書(案).
4. Lee, S.H., 2002, Effect of Foaming Agent on the Continuous Voids in Lightweight Cellular Concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 14, No.5, pp742-749.
5. Kim, H.S., Lee, S.H., Sun, J.S., Kim, J.M., 2016, A Physical Properties of Lightweight Foamed Concrete According to Lightweight Aggregate Types and Foaming agent Types, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 28, No.4, pp435-444.
6. M.Roderick Jones., 2013 Behaniour of PC/CSA/FA Blends in Foamed Concrete,World of Coal Ash Conference, pp 22-25.
7. KS F 4039 Foamed concrete for cast-in-site
8. Palglia, C., Wombacher, F., Bohni, H., 2001, The Influence of Alkali-free and Alkaline Shoterete Accelerators within Cement systems-I. Characterization of the Setting Behavior, Cement & Concrete Research, Vol. 31, No.2, pp913~918.
9. Kim, S. C., Ahn, S. K., 2009, Mix Design and Characteristics of Compressive Strengths for Foam Concrete Associated with the Application of Bottom ash, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 21, No.3, pp283-290.
10. Kim, S. C., Ahn, S. K., 2009, Mix Design and Characteristics of Compressive Strengths for Foam Concrete Associated with the Application of Bottom ash, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 21, No.3, pp283-290.
11. Han S.Y., Han, M.C., 2017, Properties and Mock-up Test of Lightweight Foamed Concrete Based on Blast Furnace Slag by Reducing Admixture, J. Korea Inst. Constr Vol. 17, No.6, pp507-515.
12. Lee, K.H., Yang, K.H., 2015, Effect of fiber addition for improving the properties of lightweight foamed concrete, J.Korea Inst. Build, Const, Vol. 15, No.4, pp383-389.