

## 다공성 골재를 함유한 기포혼합콘크리트의 장기거동 및 내구특성

### Long-Termed Behavior and Durability of Foam-Mixed Concrete Containing Porous Aggregates

김 상 철<sup>1)\*</sup>      이 성 태<sup>2)</sup>  
Kim, Sang Chel      Yi, Seong Tae

#### Abstract

The technology developed for the decrease of applying loads and self-weight of a structure is to improve conventional Foam Cement Banking Method (FCB) by applying mixed slurry of bottom ash, cement and foams. Since the foam-mixed concrete, which is a major material of the Bottom ash-mixed Light weight concrete Banking method (BLB) developed, contains mineral admixture such as cement, the behavior shows time-dependent deformation and deterioration of durability due to environmental exposure. Thus, this study is subject to figure out the characteristics of long-termed behavior and durability of the developed method by carrying out experiments for schemed parameters, which are considered to be factors affecting mainly on concrete's characteristics from mechanical analysis.

As results of tests, it was found that the developed concrete offers higher resistance than conventional foamed concrete in terms of long-termed behaviors associated with drying shrinkage and creep, and durability problems of freeze-thaw and carbonation processes, especially with addition of bottom ash.

**Keywords** : Foam-mixed concrete, Bottom ash, Drying shrinkage, Creep, Freeze-thaw, Carbonation

#### 1. 서론

우리나라는 동절기에 콘크리트가 동결과 융해를 반복하고, 차량과 공장 등에서 배출되는 이산화탄소나 산성 성분의 가스 등으로 인한 탄산화 환경에서는 콘크리트의 열화가 발생하고 구조물의 내구 수명이 저하되게 된다. 이와 같이 구조물의 재료적 성질 또는 물리·화학적 혹은 기후, 환경적 요인에 의하여 장기적으로 콘크리트 구조물의 내구성능 저하현상은 경제적 손실 측면 뿐 만아니라 사회적으로도 큰 관심사가 되고 있다 (KATS, 2007).

본 연구에서의 기포혼합콘크리트는 다공성의 경량골재인 bottom ash와 시멘트를 주재료로 하는 슬러리에 기포제를 혼합 발포시켜서 경량의 성토재료로 제조하고, 이를 대상 구조물에 적용하기 위해 개발한 것이다. 본 재료의

실용 대상인 경량성토공법은 성토 자체의 하중을 가볍게 함으로써 통상적인 성토보다도 원래의 지반에 대한 영향을 줄일 수 있으며, 지반의 처리도 될 수 있는 대로 감소시켜서 성토 축조를 가능하게 하는 것이 특징이라 하겠다 (S. C. Kim, 2011; POSCO E&C, 2007; A. S. Shimatz, 1989). 본 공법은 기존의 사용되었던 기포혼합 인공경량성토공법(Foam Cement Banking Method : FCB)을 개선했으며(CERI, 1993; K. R. Kyurak, 1990), 기존 공법에서의 문제점 보완은 물론이고 석탄 화력발전소에서 발생하는 산업폐기물인 bottom ash를 경량성토의 소재로 사용하는 만큼 친환경적이고 또한, bottom ash의 다공성을 이용함으로써 공법에서 필요로 하는 경량화의 특징을 갖고 있다.

그러나 대상으로 하고 있는 경량성토의 경우도 시멘트

1) 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수, 교신저자  
2) 정회원, 인하공업전문대학교 토목공학과 교수

\* Corresponding author : schkim@hanseo.ac.kr 041-688-0182  
• 본 논문에 대한 토의를 2012년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

를 주성분으로 하고 있기 때문에 시간 의존적 변형이 발생되고, 외기 환경에 노출되므로 내구성능 저하는 필연적으로 발생하게 된다. 따라서 경량성토체의 시간 의존성장기거동과 내구성 문제를 보다 명확하게 규명하기 위해 장기거동과 내구성 관련 실험을 통해 평가하고자 하였다.

본 연구에서는 먼저 기포혼합콘크리트의 소재와 관련한 배합분석을 통해 역학적 특성을 규명하고, 이를 토대로 장기거동과 내구성과 관련한 배합변수를 설정하여 실험을 통해 그들이 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 사용 재료

#### 2.1.1 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201의 규정을 만족하는 국내 S사에서 생산되고 있는 1종 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, Table 1은 사용된 시멘트의 물성값을 나타낸 것이다.

#### 2.1.2 Bottom ash

본 연구에 사용된 bottom ash는 서천화력발전소에서 발생하는 것을 채취하여 사용하였으며, 채취된 bottom ash는 KS F 2526 규정에 따라 입도조정을 한 후 콘크리트 배합에 사용하였다. Table 2는 실험에 사용된 bottom ash의 특성을 나타낸 것이며, 비중은 2.22이고 조립률은

Table 1 Characteristics of cement used

| Specific gravity | Autoclave expansion (%) | Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | Grain size (μm) |             |         |
|------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------|---------|
|                  |                         |                             | Max.            | 80% passing | Average |
| 3.15             | 0.08                    | 3,488                       | 100             | 40          | 21      |
| Setting          |                         | Compressive strength (MPa)  |                 |             |         |
| Initial (min)    | Final (min)             | 1 d                         | 3 d             | 7 d         | 28 d    |
| 231              | 407                     | 9.7                         | 22.4            | 30.8        | 40.4    |

Table 2 Physical and chemical characteristics of bottom ash

| Physical | Specific gravity | Blaine (cm <sup>2</sup> /g)    | Absorption (%)                 |      |      | Soundness (%)     |                  |                  |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|
|          | 2.22             | -                              | 4.76                           |      |      | 7.6               |                  |                  |
| Chemical | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> |
|          | 50.57            | 23.14                          | 13.27                          | 3.15 | 1.12 | 1.37              | 0.64             | 0.84             |

2.12이다.

### 2.1.3 기포제

기포제는 동물성 기포제를 사용하였으며, 기포제의 물성 특성은 Table 3과 같다.

## 2.2 믹싱 방법

믹싱은 기포기의 압축공기로 미리 발포시킨 기포를 모르타르 슬러리에 혼합하는 선기포 방식을 선정하였다. 배합순서는 Fig. 1과 같이 시멘트와 bottom ash를 함께 건비빔을 1분간 행한 후에 배합수를 투입하고 2분간 비빔 후 이미 생성된 기포를 투입하여 1분 동안 믹싱하여 몰드를 제작하였다.

## 2.3 실험계획

기포혼합콘크리트의 장기거동과 내구성 저하를 평가하는 작업에 앞서 선행 작업으로 기포혼합콘크리트의 역학적 특성을 분석하였다(Kim and Ahn, 2009). 이를 토대로 장기거동 및 내구성 평가실험에서는 대상 실험에 따라 각 목적에 적합한 실험범위 및 계획을 설정하였고, 평가하고자 하는 실험변수를 달리하였다. 본 연구에서 적용되는 재료적 범위는 단위체적중량(이하 단위중량)의 경우 0.5~1.5t/m<sup>3</sup>, 기포량은 20~80%의 범위로 하였다.

Table 3 Characteristics of foaming agent

| Color       | Viscosity      | pH  | Sulfate   | Freezing | Solid | Specific gravity | Others   |
|-------------|----------------|-----|-----------|----------|-------|------------------|--|
| Black brown | 27~50cps (20℃) | 7.1 | 0.01~0.1% | -18℃     | 37.8% | 1.18             | Non-inflammable<br>Non-combustible<br>Stench and Gas |

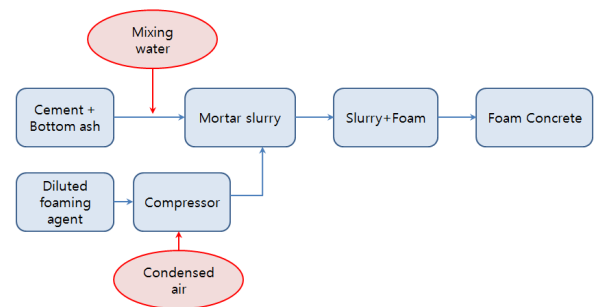


Fig. 1 Mixing procedure

### 2.3.1 선행 기포혼합콘크리트의 역학적 특성 분석 및 결과

기포혼합콘크리트의 물적 특성 평가를 위해 단위시멘트량 320, 380, 460, 520 kg/m<sup>3</sup>에 대해 목표로 하는 단위중량의 범위 0.5~1.5t/m<sup>3</sup> 내에서 시멘트 대비 잔골재 질량비를 나타내는 잔골재비(S/C)를 변경하여 실험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 같이 적용한 단위시멘트량 별로 잔골재비와 단위중량과는 서로 선형관계가 있음을 알 수 있다. 또한, 기포혼합콘크리트의 압축강도와 단위중량과의 상관관계를 구하여 본 결과, Fig. 3에 나타난 바와 같으며 다음과 같이 1차 함수의 관계식으로 표현할

수 있었다.

$$\sigma_{28} = \alpha \gamma_t + \beta \text{ (MPa)} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{28}$ 은 28일 압축강도를 나타내며,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 잔골재비에 따라 결정되는 상수이며 다음과 같이 잔골재비로써 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{15.41}{1.74 - (S/C)} \quad (2)$$

$$\beta = -2.92e^{1.88(S/C)} \quad (3)$$

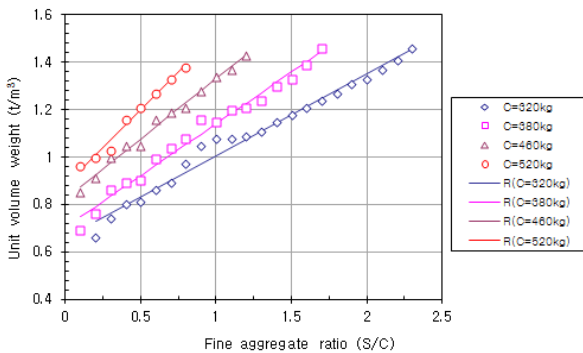


Fig. 2 Fine aggregate ratios vs. unit volume weights

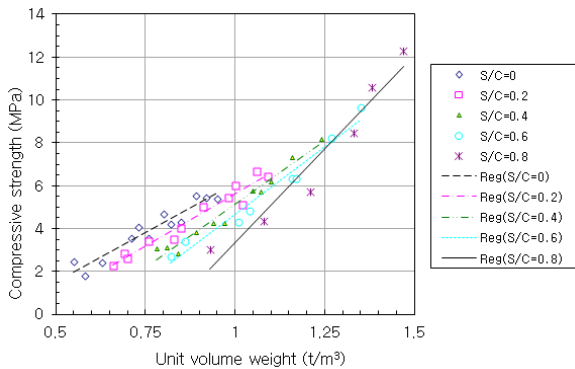


Fig. 3 Unit volume weights vs. compressive strengths at 28 days

### 2.3.2 장기거동 시험

#### (1) 크리프 시험

크리프 시험은 일정한 하중이 가해진 상태에서 시간이 경과함에 따라 발생하는 변형의 크기를 측정하는 시험으로, 본 연구에서는 다음과 같은 4종류의 단위중량 0.7, 1.0, 1.2, 1.4t/m<sup>3</sup>에 대해 크리프 시험을 수행하는 것으로 계획하였다.(Table 4 참조)

#### (2) 건조수축 시험

건조수축은 시멘트, 골재의 종류와 사용량, 배합 및 양생조건, 부재의 크기에 따라 다르게 나타나며, 온도 및 습도 등의 외기조건에도 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 시멘트의 사용량(320, 380, 460, 520kg/m<sup>3</sup>)과 단위중량(0.8, 1.0, 1.2, 1.4t/m<sup>3</sup>)을 기본 실험변수로 선정하고, 이를 제작하는데 소요되는 잔골재비(S/C)와 물-시멘트비(W/C)를 결정하여 Table 5와 같은 배합표를 구성하였다.

### 2.3.3 내구성 시험

#### (1) 동결융해 시험

일반콘크리트의 경우는 내부에 AE제를 사용한 연행공

Table 4 Mix design proportions for creep test

| Cement (kg/m <sup>3</sup> ) | S/C | W/C (%) | Foaming group(kg) |                | Unit weight (t/m <sup>3</sup> ) | Void (%) | Flow (mm) | Compressive strength at 28 days (MPa) |
|-----------------------------|-----|---------|-------------------|----------------|---------------------------------|----------|-----------|---------------------------------------|
|                             |     |         | Foaming agent     | Diluting water |                                 |          |           |                                       |
| 380                         | 0.1 | 54      | 0.669             | 18.300         | 0.69                            | 67.0     | 195       | 3.60                                  |
|                             | 0.6 | 62      | 0.593             | 15.223         | 0.99                            | 53.5     | 201       | 4.57                                  |
|                             | 1.1 | 69      | 0.562             | 15.412         | 1.20                            | 42.5     | 206       | 5.49                                  |
|                             | 1.6 | 75      | 0.477             | 13.072         | 1.39                            | 32.0     | 190       | 6.93                                  |

Table 5 Mix design proportions for drying shrinkage test

| Cement (kg/m <sup>3</sup> ) | S/C | W/C(%) | Foaming group(kg) |                | Unit weight (t/m <sup>3</sup> ) | Void (%) | Flow (mm) | Compressive strength at 28 days (MPa) |
|-----------------------------|-----|--------|-------------------|----------------|---------------------------------|----------|-----------|---------------------------------------|
|                             |     |        | Foaming agent     | Diluting water |                                 |          |           |                                       |
| 320                         | 0.4 | 61     | 0.563             | 15.411         | 0.80                            | 64.0     | 203       | 3.27                                  |
|                             | 0.9 | 69     | 0.499             | 13.670         | 1.05                            | 54.0     | 210       | 3.91                                  |
|                             | 1.6 | 77     | 0.481             | 13.184         | 1.21                            | 42.0     | 188       | 3.76                                  |
|                             | 2.2 | 90     | 0.432             | 11.962         | 1.41                            | 29.5     | 201       | 6.21                                  |
| 380                         | 0.2 | 55     | 0.638             | 17.480         | 0.76                            | 63.0     | 192       | 3.42                                  |
|                             | 0.6 | 62     | 0.593             | 15.223         | 0.99                            | 53.5     | 201       | 4.57                                  |
|                             | 1.1 | 69     | 0.562             | 15.412         | 1.20                            | 42.5     | 206       | 5.49                                  |
|                             | 1.6 | 75     | 0.477             | 13.072         | 1.39                            | 32.0     | 190       | 6.93                                  |
| 460                         | 0.1 | 53     | 0.662             | 18.421         | 0.85                            | 59.0     | 201       | 5.17                                  |
|                             | 0.3 | 57     | 0.626             | 17.149         | 1.00                            | 53.0     | 220       | 6.42                                  |
|                             | 0.8 | 63     | 0.589             | 16.118         | 1.21                            | 40.0     | 209       | 7.13                                  |
|                             | 1.1 | 64     | 0.486             | 13.321         | 1.37                            | 33.0     | 198       | 9.52                                  |
| 520                         | 0.2 | 55     | 0.665             | 18.220         | 1.00                            | 50.5     | 219       | 6.03                                  |
|                             | 0.5 | 58     | 0.607             | 16.640         | 1.21                            | 42.5     | 232       | 9.32                                  |
|                             | 0.8 | 60     | 0.541             | 14.810         | 1.38                            | 33.0     | 211       | 9.64                                  |

Table 6 Mix design proportions for freeze-thaw test

| Cement (kg/m <sup>3</sup> ) | S/C | W/C(%) | Foaming group(kg) |                | Unit weight (t/m <sup>3</sup> ) | Void (%) | Flow (mm) | Compressive strength at 28 days (MPa) |
|-----------------------------|-----|--------|-------------------|----------------|---------------------------------|----------|-----------|---------------------------------------|
|                             |     |        | Foaming agent     | Diluting water |                                 |          |           |                                       |
| 320                         | 0.4 | 61     | 0.563             | 15.411         | 0.80                            | 64.0     | 203       | 3.27                                  |
|                             | 0.9 | 69     | 0.499             | 13.670         | 1.05                            | 54.0     | 210       | 3.91                                  |
|                             | 2.2 | 90     | 0.432             | 11.962         | 1.41                            | 29.5     | 201       | 6.21                                  |
| 380                         | 0.2 | 55     | 0.638             | 17.480         | 0.76                            | 63.0     | 192       | 3.42                                  |
|                             | 0.6 | 62     | 0.593             | 15.223         | 0.99                            | 53.5     | 201       | 4.57                                  |
|                             | 1.1 | 69     | 0.562             | 15.412         | 1.20                            | 42.5     | 206       | 5.49                                  |
|                             | 1.6 | 75     | 0.477             | 13.072         | 1.39                            | 32.0     | 190       | 6.93                                  |
| 460                         | 0.1 | 53     | 0.662             | 18.421         | 0.85                            | 59.0     | 201       | 5.17                                  |
|                             | 0.3 | 57     | 0.626             | 17.149         | 1.00                            | 53.0     | 220       | 6.42                                  |
|                             | 0.8 | 63     | 0.589             | 16.118         | 1.21                            | 40.0     | 209       | 7.13                                  |
| 520                         | 0.2 | 55     | 0.665             | 18.220         | 1.00                            | 50.5     | 219       | 6.03                                  |
|                             | 0.5 | 58     | 0.607             | 16.640         | 1.21                            | 42.5     | 232       | 9.32                                  |
|                             | 0.8 | 60     | 0.541             | 14.810         | 1.38                            | 33.0     | 211       | 9.64                                  |

기의 완충작용으로 동결융해에 대한 저항성을 향상시킬 수 있다. 그러나 본 기포혼합콘크리트의 경우는 내부에 기포가 포함되어 있지만 단순히 구조물의 경량화를 목적으로 갇힌 공기이기 때문에 동결융해저항성에는 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다. 이미 문헌상에서도 알려진 바와 같이 강도가 높을수록 동결융해저항성이 높을 것으로 기대되므로 (Lightweight Concrete Committee, 2006; D. I. Jang et al., 1998) 시멘트의 사용량과 강도를 변수로 하여 저항성을 평가하고자 하였다. 앞서 연구에서 압축강도와 단위중량과는 서로 상관관계가 있는 것으로 나

타났으며, 따라서 Table 6의 배합에 대해 실험을 수행하는 것으로 계획하였다.

(2) 탄산화 촉진 시험

일반적으로 탄산화는 시멘트의 종류, 무기혼화재나 화학혼화제의 사용여부와 종류, 물-시멘트비, 탄산가스의 농도, 습도, 온도, 시공의 양호여부 등 여러 인자들에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (KATS, 2007). 따라서 본 연구에서는 시멘트의 사용량과 bottom ash의 혼입량 (잔골재비), 물-시멘트비를 주요 실험변수로 하여 Table

Table 7 Mix design proportions for accelerated carbonation test

| Cement (kg/m <sup>3</sup> ) | S/C | W/C(%) | Foaming group(kg) |                | Unit weight (t/m <sup>3</sup> ) | Void (%) | Flow (mm) | Compressive strength at 28 days (MPa) |
|-----------------------------|-----|--------|-------------------|----------------|---------------------------------|----------|-----------|---------------------------------------|
|                             |     |        | Foaming agent     | Diluting water |                                 |          |           |                                       |
| 320                         | 0.2 | 55     | 0.589             | 16.128         | 0.66                            | 69.0     | 182       | 2.25                                  |
| 380                         | 0.1 | 54     | 0.669             | 18.300         | 0.69                            | 67.0     | 195       | 3.60                                  |
|                             | 0.2 | 55     | 0.638             | 17.480         | 0.76                            | 63.0     | 192       | 3.42                                  |
|                             | 0.5 | 59     | 0.584             | 15.990         | 0.90                            | 57.0     | 194       | 3.95                                  |
|                             | 1.0 | 68     | 0.547             | 14.987         | 1.15                            | 44.0     | 228       | 5.04                                  |
|                             | 1.2 | 69     | 0.547             | 14.987         | 1.21                            | 41.5     | 191       | 5.23                                  |
| 460                         | 0.3 | 57     | 0.626             | 17.149         | 1.00                            | 53.0     | 220       | 6.42                                  |
| 520                         | 0.2 | 55     | 0.665             | 18.220         | 1.00                            | 50.5     | 219       | 6.03                                  |

7과 같이 실험인자를 구성하였다.

## 2.4 실험방법 및 측정

### 2.4.1 건조수축 시험

각 시험배합별 100×100×400mm 크기의 표준공시체를 3개씩 제작하여 재령 7일까지 20℃에서 수중양생을 실시한 후, 온도 20±1℃, 상대습도 60±5% 조건의 항온항습실에 존치하면서 현미경이 부착된 콤팩터터를 이용하여 각 측정 재령별 길이변화율을 측정하여 건조수축량을 평가하는 방법을 사용하였다.

### 2.4.2 크리프 시험

φ100×200mm의 원통형 공시체를 10개 제작하여 2개는 압축강도시험에 사용하고 6개는 하중을 재하하여 변형을 측정하며, 나머지 2개의 공시체는 하중이외의 원인으로 일어나는 변형을 조사하기 위하여 재하하지 않고 그대로 두었다. 크리프 시험용 공시체 6개는 각 공시체의 양단을 커팅한 후 각 시험기기에 3개씩 쌓고 편심하중의 발생여부와 변형이 균일하게 발생되는지 확인하기 위하여 최종 강도의 5% 정도의 선행하중을 가하여 각 공시체 주변의 변형변화를 조사한 후 하중을 제거하고 공시체 쌓

기를 조정하였다. 공시체는 습윤양생이 끝난 후 시험이 끝날 때까지 온도 20±2℃, 상대습도 50±4%의 상태를 유지하였으며, 시험측정기간 동안 수분의 증발을 막기 위하여 공시체 표면은 방습 랩으로 씌웠다. 게이지는 축방향 변형을 측정하기 위하여 다이얼 게이지를 설치하고 또한, 스트레인 게이지를 공시체 표면의 부착하여 이들 값의 차이를 확인하였다.

### 2.4.3 동결융해 시험

본 동결융해시험에서는 KS와 ASTM의 규정을 기준으로 하여 100×100×400mm의 각주를 사용하여 28일간 25℃ 수중양생을 한 후 동결융해 실험을 수행하였다.

동결융해시험 이후의 손상은 일정한 주기로 동탄성계수를 측정하여 판단하는데, 동탄성계수는 초음파속도법, 공명진동수측정법으로 판정하지만 본 실험에서는 초음파속도법에 의하여 동탄성계수를 산정하였다. 시험은 300주기를 원칙으로 수행하였으며, 규정에 따라 상대 동탄성계수가 60% 이하인 경우는 시험을 종료하였다.

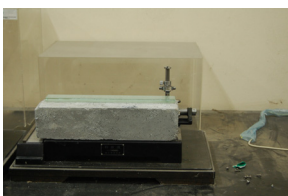


Photo 1 Protractor

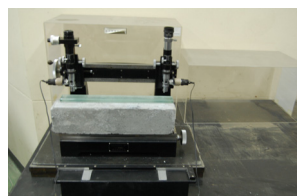


Photo 2 Measurement of length using comparator



Photo 3 Protractor

#### 2.4.4 탄산화 시험

100×100×400mm의 각주형 공시체를 동일조건외 시험에 대해 3개 이상 준비하였으며, KS F 2403(시험실에서 콘크리트의 압축 및 휨강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법)에 따라 제작하였다. 제작된 공시체는 콘크리트가 경화할 때까지 수평인 장소에 놓고 표면부는 습포로 덮어 공시체의 수분증발을 방지하도록 하였다. 몰드의 탈형은 콘크리트 투입이 끝나고 나서 24시간이 경과한 후에 실시하였다.

Table 8의 시험조건에 따라 제작한 공시체를 습윤상태에서 4주간 양생한 후 탄산화 실험용기 내에 집어넣고 공시체 주위에 탄산가스를 주입한 후 각 3, 7, 14, 28일 동안 거치시킨 다음, 소정의 일수에 꺼내어 공시체를 파단하여 탄산화 깊이를 측정하였다. 측정은 공시체의 측정면에서 콘크리트의 파편 및 분말 등을 제거하고, 1% 페놀프탈레인 용액을 분무한 후 콘크리트의 표면으로부터 적색부까지의 거리를 mm 단위로 측정하였으며 총 5회 실시하였다.

### 3. 실험결과와 고찰

#### 3.1 건조수축

Fig. 4는 bottom ash 혼입에 따른 건조수축변형률을



Photo 4 Specimens for freeze-thaw test

단위시멘트량별로 나타낸 것이다. 그림 상에 나타난 바와 같이 잔골재비(S/C) 즉, bottom ash의 혼입량이 증가할수록 단위부피당 차지하는 기포의 양이 감소하므로 건조수축변형률은 감소함을 알 수 있다. 그러나 그 효과는 일정량 이상의 bottom ash를 혼입하면 건조수축변형률의 감소효과가 크지 않다는 것을 확인할 수 있다. 실질적으로 bottom ash를 골재로 사용한 콘크리트는 일반 골재를 사용한 콘크리트에 비해 bottom ash 표면에 기공을 함유하고 있어 건조수축이 클 것으로 예상되지만, bottom ash 내부가 충분히 프리웨팅되어 골재안의 물을 콘크리트 안으로 서서히 방출하므로 일반 골재를 사용한 콘크리트와 거의 유사한 건조수축이 발생하는 것으로 알려져 있다(J. P. Won et al., 2002; S. J. Choi et al., 2003).

본 연구에서의 기포혼합콘크리트는 bottom ash를 사용하지 않은 기포콘크리트에 비해 오히려 내부의 공극을 골재가 채워주는 안정적 역할을 하기 때문에 일반 경량기포콘크리트에 비해 낮은 건조수축변형률을 보였다.

Fig. 5는 재령 56일이 경과한 후의 단위시멘트량에 따른 건조수축변형률을 도시한 것이다. 앞서 잔골재비의 영향과 같이 단위시멘트량이 클수록 단위부피당 차지하는 고품분의 양이 증가하며 그에 따라 수축할 수 있는 기포의 양이 감소하기 때문에 건조수축변형률이 감소하였다. 그러나 일반콘크리트의 건조수축변형률이  $500\sim700\times 10^{-6}$ 인



Photo 5 Accelerated carbonation test

Table 8 Testing conditions for accelerated carbonation test

| Size (mm)   | Curing conditions |            |        |                   | Environmental conditions |        |                               | Testing periods (weeks) |
|-------------|-------------------|------------|--------|-------------------|--------------------------|--------|-------------------------------|-------------------------|
|             | Curing            |            | Drying |                   | T (°C)                   | RH (%) | CO <sub>2</sub> intensity (%) |                         |
|             | Days              | Condition  | Days   | Condition         |                          |        |                               |                         |
| 100×100×400 | (2)+26            | 20± 2°C 수증 | 28     | 20± 2°C<br>60± 5% | 20± 2                    | 60± 5  | 5.0± 0.2                      | 0.5,1,2,4               |



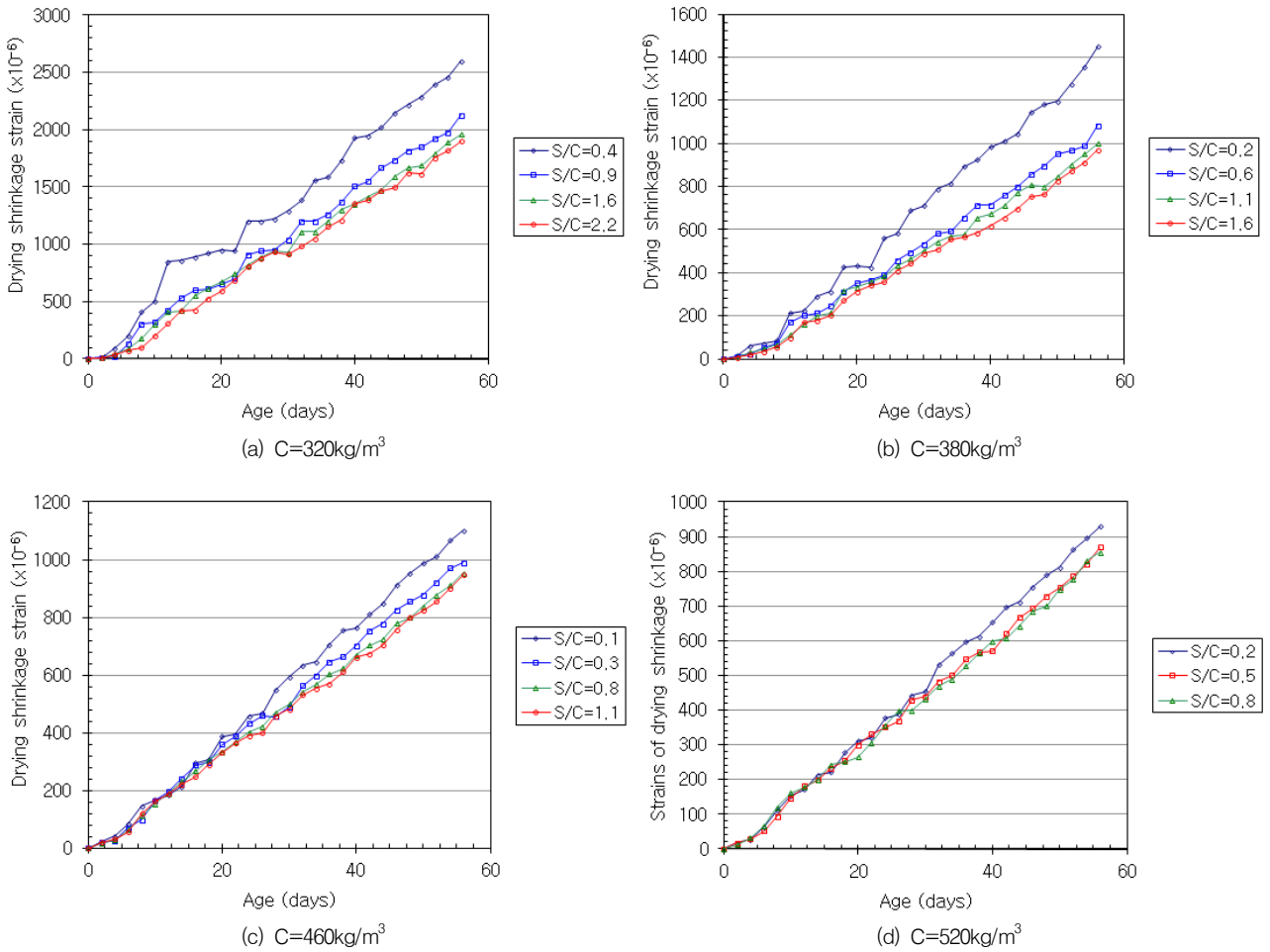


Fig. 4 Drying shrinkage strain associated with fine aggregate ratio

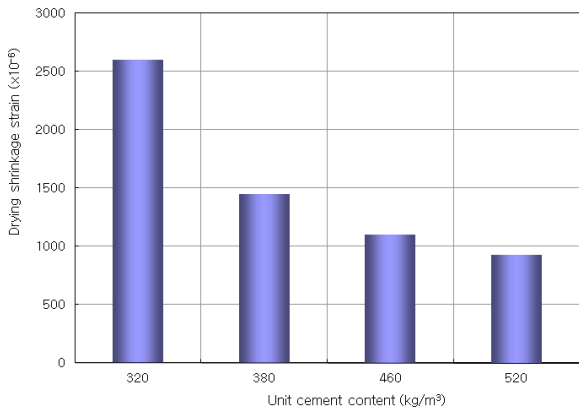


Fig. 5 Drying shrinkage strain vs. unit cement content

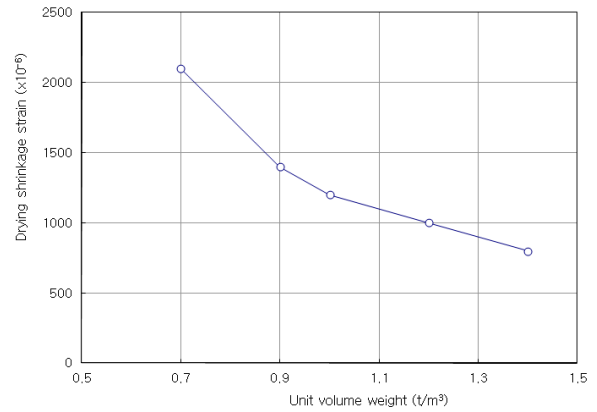


Fig. 6 Drying shrinkage strain vs. unit volume weight

점을 감안하면 최대 2~3배에 가까운 건조수축이 발생하고 있어 일반콘크리트에 비해 내구성이 낮다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 단위중량대비 건조수축변형률을 나타낸 것으

로 단위중량은 잔골재비와 밀접한 관계가 있으며 단위중량이 증가할수록 건조수축이 감소되는 경향을 보이고 있다. 따라서 건조수축을 저감시키기 위해서는 잔골재 대체재인 bottom ash의 사용이 효과적이라는 것을 알 수 있다.

### 3.2 크리프

크리프 시험은 시간에 따른 하중과 압축변형률 간의 관계를 측정하는 실험으로, 일반콘크리트에 있어 크리프의 발생정도는 작용응력에 비례하며 이 비례관계의 범위는 공시체에 압축력이 가해질 때 미세균열이 발생하는 시점인 응력/강도비가 0.4~0.6 정도로 알려져 있다 (ACI 209R-92, 2008). 따라서 ASTM C 512 크리프 시험방법에서도 작용하중에 대한 크리프의 비례한도를 재하시점에서의 응력/강도비가 0.4일 때를 기준으로 하고 있다. 그러나 기포콘크리트에 관한 크리프 시험규준이 없는 관계로 ASTM C 512를 근거로 하여 일부 강도가 낮은 공시체를 제외하고는 적용 응력비를 28일 압축강도의 0.4의 범위로 설정하였다. Table 9는 각 잔골재비에 따른 28일 경과한 공시체의 압축강도, 탄성계수 및 적용한 응력비를 나타낸 것이다.

잔골재비별 Table 9에 나타난 조건으로 28일이 경과한 공시체에 대해 지속적인 하중을 재하하여 변형률을 측정하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. 전체적인 변형결과는 초기 재하재령에서 변형률이 급격하게 증가하는 양상을 보이다 점차적으로 완만하게 증가하는 것을 알 수 있

Table 9 Material characteristics and applied loads (C=380kg/m<sup>3</sup>)

| Fine aggregate ratio (S/C) | Compressive strength at 28 days (f <sub>28</sub> ), MPa | Elastic modulus (E) MPa | Applied stress (f) MPa | Ratio of stress to strength |
|----------------------------|---|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 0.1                        | 3.60  | 2.78 × 10 <sup>3</sup>  | 1.08                   | 0.3                         |
| 0.6                        | 4.57  | 3.48 × 10 <sup>3</sup>  | 1.37                   | 0.3                         |
| 1.1                        | 5.49  | 4.14 × 10 <sup>3</sup>  | 2.20                   | 0.4                         |
| 1.6                        | 6.93  | 5.15 × 10 <sup>3</sup>  | 2.77                   | 0.4                         |

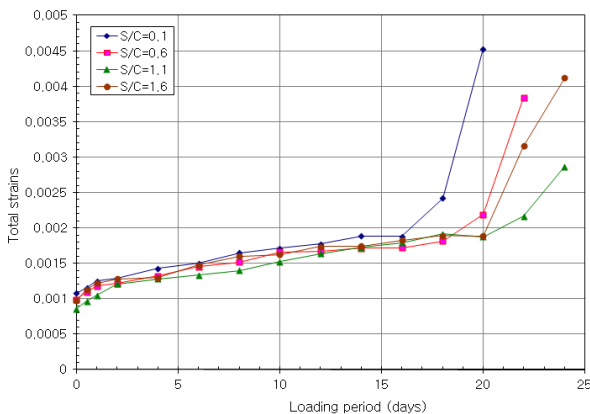


Fig. 7 Total strains corresponding to loading days (C=380kg/m<sup>3</sup>, Concrete curing ages=28 days)

다. 그러나 잔골재비에 따라 다르지만 재하일수 18~20일이 경과한 후에는 급격하게 변형률이 증가하였다. 이에 대한 원인으로 기포혼합콘크리트는 일반콘크리트에 비해 건조수축변형률이 매우 크기 때문에 재하에 따른 탄성변형률과 크리프변형률의 합산이 콘크리트의 극한변형률을 초과하게 되어 균열발생에 따른 변형에 기인한 것으로 판단된다. 예를 들어 S/C=0.6인 경우 재하일수 18일 (콘크리트 재령 46일)에서의 건조수축변형률은  $854 \times 10^{-6}$ 으로 총변형률  $1813 \times 10^{-6}$ 에 대해 47%를 차지하고 있고 그 값이 상당히 큰 만큼 소량의 하중이 작용하여도 콘크리트의 파괴가 발생하게 된다. 이와 같은 현상은 S/C=0.1의 경우 응력/강도비를 0.4로 적용하였을 때 재하일수 10일 이내에 콘크리트가 파괴되어 측정이 불가능하였다는 사실로도 확인된 바 있다.

Fig. 7에서의 총 변형률로는 크리프 변형 결과를 파악하기 곤란하며 특히, 잔골재비의 효과를 분석하기 어려운 점이 있다. 이는 각 잔골재비에 따라 배합비가 다르며 또한 각기 적용한 응력값이 서로 다르기 때문에 절대적 크기의 크리프 발생량을 비교할 수가 없게 된다. 따라서 이들 시험값에서 하중 재하에 따른 순간변형률(탄성변형률)과 건조수축변형률을 소거한 크리프변형률을 구하고 이 값을 재하한 하중에 따른 응력값으로 나누어 비크리프(specific creep)를 구하거나 크리프변형률을 하중 재하시 순간적으로 발생하는 변형률(instantaneous strain)로 나누어 계산하는 크리프계수(creep coefficient)를 적용하는 방법을 고려할 수 있다.

재하 일수에 따른 각 잔골재비 비크리프를 실험값과 함께 회귀분석한 데이터를 Fig. 8에 도시하였다. 그림에서

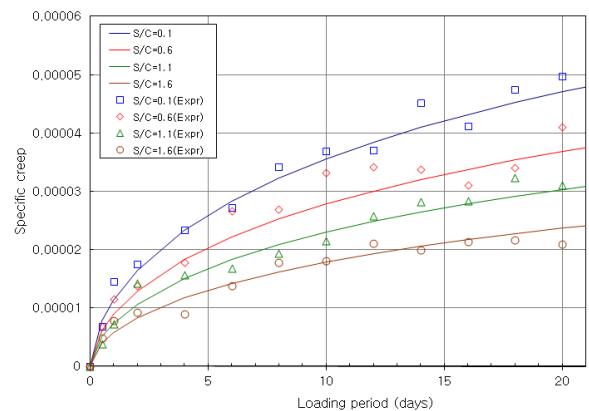


Fig. 8 Specific creep vs. loading days associated with fine aggregate ratio (C=380kg/m<sup>3</sup>, Concrete curing ages=28 days)



나타난 바와 같이 잔골재비가 증가할수록 비크리프는 감소되고 있으며, 이는 크리프를 감소시키기 위해 bottom ash의 혼입이 효과적이라는 것을 나타낸다.

### 3.3 동결융해

기포혼합콘크리트는 투수성이 낮기 때문에 내부 공극에 다량의 수분을 함유하고 있으며 또한, 겨울철의 다습한 공기가 외부로 투과하다 외기의 온도가 영하로 낮아지게 되면 결빙하고 결빙과 해빙을 반복하게 되면 이로 인해 열화현상이 발생하게 된다. 특히, 기포혼합콘크리트는 일반콘크리트에 비해 강성이 낮기 때문에 동결융해에 대한 저항성이 매우 낮을 것으로 판단된다. 이에 대한 평가로서 급속 동결융해저항성 시험을 수행하였으며, 그 결과는 Table 10 및 Fig. 9와 같다.

결과에서 나타난 바와 같이, AE제가 혼입한 일반강도 콘크리트의 내구성 지수가 60~90의 범위인 점에 비하면 위의 실험결과는 상당히 낮은 내구성 지수를 보이며, 이는 동결융해에 대해 매우 취약하다는 것을 의미한다. Fig. 9에서 보면, 시멘트의 사용량이 클수록 강도가 향상되어 동결융해에 대한 저항성이 증진되며, 잔골재비가 클수록 동결융해저항성이 향상되었다. 특히, 단위시멘트량이 작은 기포혼합콘크리트에서는 잔골재비에 따라 저항성이 지속적으로 향상되고 있어 그 효과가 크다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과에 비추어 bottom ash의 혼입은 기포혼합콘크리트의 동결융해 저항성 향상에 다소 효과적이

Table 10 Testing results of freeze-thaw

| Unit amount of cement C(kg/m <sup>3</sup> ) | Fine aggregate ratio (S/C) | Number of cycles | Relative dynamic modulus of elasticity (%) | Durability factor (DF) |
|---|----------------------------|------------------|--|------------------------|
| 320   | 0.4                        | 48               | 61.25                                      | 9.8                    |
|   | 0.9                        | 48               | 76.88                                      | 12.3                   |
|   | 2.2                        | 90               | 72.67                                      | 21.8                   |
| 380   | 0.2                        | 48               | 70.01                                      | 11.2                   |
|   | 0.6                        | 90               | 52.67                                      | 15.8                   |
|   | 1.1                        | 90               | 65.10                                      | 19.5                   |
| 460   | 1.6                        | 90               | 74.68                                      | 22.4                   |
|   | 0.1                        | 90               | 38.34                                      | 11.5                   |
|   | 0.3                        | 90               | 79.35                                      | 23.8                   |
| 520   | 0.8                        | 114              | 66.84                                      | 25.4                   |
|   | 0.2                        | 90               | 69.0                                       | 20.7                   |
|   | 0.5                        | 114              | 73.42                                      | 27.9                   |
|   | 0.8                        | 114              | 74.74                                      | 28.4                   |

라는 것을 확인할 수 있다.

### 3.4 탄산화

본 연구에서 다공성의 bottom ash를 사용하였고 강도가 일반콘크리트에 비해 낮기 때문에 탄산화 속도는 일반콘크리트에 비해 낮을 것으로 예상하였지만, 잔골재비에 따른 탄산화 깊이를 도시한 Fig. 10에 나타난 바와 같이 일반콘크리트에 비해 탄산화깊이가 그리 크지 않음을 알 수 있다. 다공질 골재의 사용과 콘크리트 내부의 기포 포함은 다공성으로 인해 수분이나 탄산가스의 확산이 용이하므로 탄산화 속도가 빨라지지만, 본 배합에 적용한 물-시멘트비는 60~70%로써 매우 높은 단위수량은 오히려

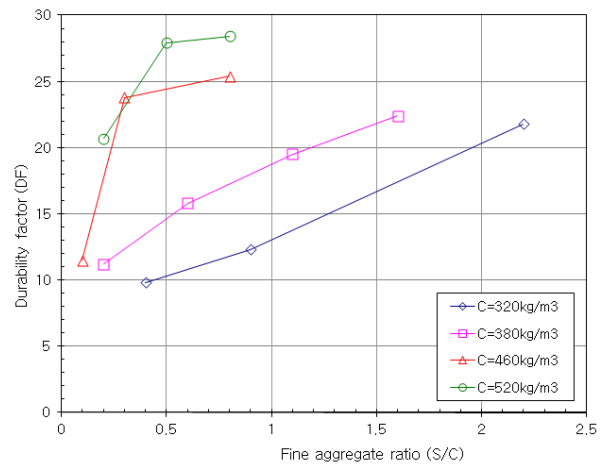


Fig. 9 Durability factor associated with fine aggregate ratio and unit cement content

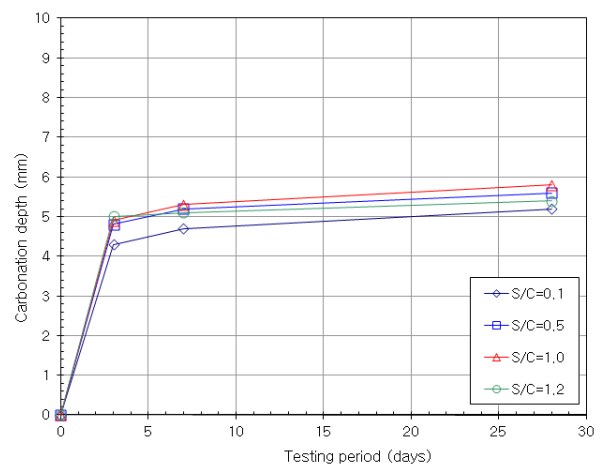


Fig. 10 Carbonation depth corresponding to fine aggregate ratio (C=380kg/m<sup>3</sup>)

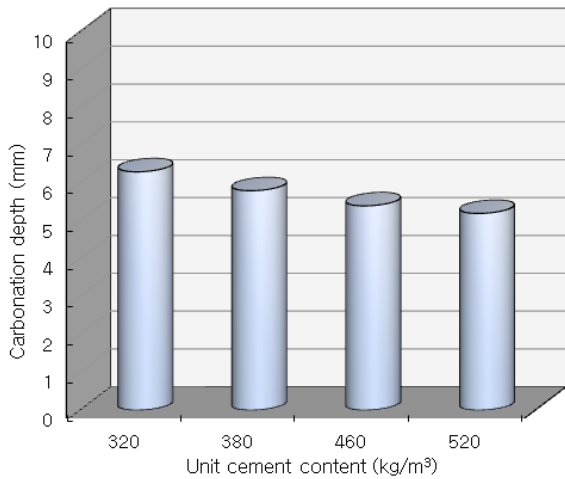


Fig. 11 Carbonation depth vs. unit cement content (S/C=0.2)

결정표면에 두꺼운 수층을 형성하여 CO<sub>2</sub> 가스의 확산속도를 저해하고, 또 불연속적인 내부의 기포 존재와 수분의 채움이 탄산가스의 확산을 방해하기 때문인 것으로 판단된다. 이는 S. S. Nakamura(1994)의 연구에서도 적정량의 수분이 존재할 때만이 촉매로 작용하여 탄산화의 속도를 증진시킨다는 연구결과와 부합된다. 그림의 결과에서와 같이 잔골재비의 영향은 크지 않게 나타나고 있으며, 이는 기포혼합콘크리트가 갖고 있는 많은 공극과 bottom ash의 영향보다는 탄산화를 촉진시키는 단위수량의 양에 의존하며, 탄산가스가 CaO와 반응하여 CaCO<sub>3</sub>를 생성시킴에 따라 기포혼합콘크리트 내부의 기공 일부를 채우면서 치밀하게 되어 탄산화의 확산을 저해하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 11에서의 단위시멘트량의 효과에 있어서도 탄산화 깊이에 미치는 영향은 매우 미비하다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

성토자체의 자중경감과 토압 저감을 목적으로 개발한 경량성토공법의 시간의존성 거동과 내구성 문제를 평가하기 위해 경량성토재의 주 소재인 기포혼합콘크리트에 대해 장기거동 시험과 내구성 시험을 수행하였으며, 시험결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 건조수축변형률은 단위시멘트량과 bottom ash의 혼입량(잔골재비)이 클수록 고풍분의 증가에 따른 수축할 수 있는 기포의 양이 감소하기 때문에 감소

하였으며 단위체적증량과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 그러나 그 크기는 일반 경량기포콘크리트에 비해 작지만 일반콘크리트에 비해서는 매우 높은 수준이다.

- (2) 장기재하에 따른 전체 변형률의 양상은 초기에 완만한 기울기를 보이다 높은 건조수축변형률로 인한 내부 균열 발생으로 급격히 변형률이 상승되는 현상을 보이고 있어 뒤채움재나 성토재 이외의 구조용 부재로서는 사용상의 제한이 있음을 알 수 있다. 또한, bottom ash의 혼입률이 증가할수록 크립 변형률은 감소하였다.
- (3) 동결융해에 대한 저항성은 단위시멘트량과 잔골재비가 클수록 향상되며, 단위시멘트량이 작을수록 동결융해저항성에 대한 bottom ash의 효과가 크게 나타났다.
- (4) 높은 단위수량 사용에 따른 결정표면의 두꺼운 수층 형성과 탄산가스와의 반응에서 발생한 생성물이 내부 기공을 채워 오히려 내부조직이 치밀하게 됨에 따라 탄산화 깊이는 크지 않게 나타났으며, 잔골재비와 단위시멘트량에 따른 저항성 향상효과도 높지 않았다.

#### 감사의 글

이 논문은 포스코건설 연구과제 MG-000-DC500 학술 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. A. S. Shimatz, "Prospect of EPS Construction Methods", Soil and Foundation (Japan), vol. 37, No. 12, 1989, pp.7-10.
2. ACI 209R-92, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures", ACI Manual of Concrete Practice, 2008.
3. C. W. Lovell, T. C. Ke, W. H. Huang and J. E. Lovell. "Bottom Ash as Highway Material", Presented at the 70th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., 1991.
4. Civil Engineering Research Institute (CERI), Ministry of Construction Japanese Government, Manual for EPS Biz Cement-Soil Method, Japanese Civil Engineering Research Center, Hybrid Soil Research Committee, 1993.
5. D. I. Jang, W. K. Chai, K. H. Cho, K. I. Kim and Y. H. Song, "Property Evaluation of the Freeze-Thawing for Lightweight Concrete with Development of Structural Lightweight Aggregates", Proceedings of the Korea

- Concrete Institute (Spring), 1998, pp.129-136.
6. Dong Ah Research Institute, A Study on the Development of Lightweight Foamed Concrete, Korea Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 1997.
  7. J. H. Oh and S. W. Oh, "Current State of Using Coal Ashes in Korea", Journal of the Resources Recycling (Korea), vol. 8, No. 1, 1999, pp.60-65.
  8. J. P. Won, Y. S. Lee and J. J. Lee, "Durability Characteristics and Environmental Assessment of Controlled Low-Strength Materials Using Bottom Ash", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 14, No. 2, 2002, pp.223-230.
  9. K. R. Kyurak, "Characteristics of EPS Embankment and the Applications", Foundation (Japan), vol. 18, No. 12, 1990, pp.2-5.
  10. Korea Highway Corporation, A Study on EPS Construction Method, 1994 Research Paper, 1994.
  11. Korean Agency for Technology and Standards(KATS), A Study on the Standardization for Durability Assessment of Concrete, Korea Ministry of Commerce, Industry and Energy, 2007.
  12. Lightweight Concrete Committee, A Fundamental Study on the Fabrication and Construction of High Performance-Lightweight Concrete, Korea Concrete Institute, 2006.
  13. POSCO E&C, A Study on the Application of BLB Method Using Bottom Ash, Korea, 2007.
  14. S. C. Kim, "Behavior of Soft Ground throughout Mock-up Test Using Low Self Weight Banking Method", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, vol. 15, No. 6, 2011, pp.85-91.
  15. S. C. Kim and S. K. Ahn, "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, 2009, pp.283-290.
  16. S. J. Choi, Y. Jeong, B. J. Oh and M. H. Kim, "An Experimental Study on the Engineering Properties of Concrete According to W/C and Replacement Ratio of Bottom Ash", Journal of the Korea Concrete Institute, vol. 15, No. 6, 2003, pp.840-847.
  17. S. S. Nakamura, "Evaluation for the Carbonation Mechanism of Concrete", The 48th International Seminar of Cement Technology, 1994, pp.644-649.

Received : 09/13/2012

Revised : 10/17/2012

Accepted : 10/19/2012

## 요 지

하중을 받는 대상체체의 하중경감과 구조물의 경량화를 위해 본 연구에서 개발한 공법은 기존의 인공경량성토공법을 개선한 공법으로써 다공성의 경량골재인 bottom ash와 시멘트를 주재료로 하는 슬러리에 기포제를 혼합 발포시켜 경량의 성토재료를 제조하고 이를 대상 구조물에 적용하는 기술이다. 이 공법의 소재인 기포혼합콘크리트의 경우도 시멘트를 주성분으로 하고 있기 때문에 시간 의존적 변형이 발생되고, 외기 환경에 노출되므로 내구성능 저하는 필연적으로 발생하게 된다. 따라서 적용한 경량성토체의 시간 의존성 장기거동과 내구성 문제를 보다 명확하게 규명할 필요가 있다고 판단된다. 본 연구에서는 선행 작업으로 콘크리트의 배합인자별 역학적 특성 분석을 토대로 영향을 미치는 주요 인자를 도출하였으며, 이를 토대로 장기거동과 내구성 실험에 필요한 배합변수를 설정하여 그들의 미치는 영향을 분석을 통해 평가하였다.

연구결과, 개발된 기포혼합콘크리트는 건조수축변형률이나 크리프 등의 장기거동과 동결융해 및 탄산화의 내구성 측면에 있어 기존의 경량기포콘크리트에 비해 우수한 효과를 보였으며 특히, bottom ash의 혼입이 저항성 향상에 매우 효과적인 것으로 나타났다.

**핵심 용어** : 기포혼합콘크리트, 바텀애시, 건조수축, 크리프, 동결융해, 탄산화