

# 경량기포콘크리트의 개발과 역학적 특성에 관한 연구

## Development of Lightweight Foamed Concrete Using Polymer Foam Agent and its Mechanical Properties

변근주\*                      박상순\*\*                      송하원\*\*  
Byun, Keun Joo              Park, Sang Soon              Song, Ha Won

---

### Abstract

Lightweight foamed concrete is a concrete which is lighter than normal concrete by mixing prefoamed foam in cement slurry. The objectives of this study are to develop prefoamed optimal lightweight foamed concrete using polymer foam agent and to obtain its mechanical characteristics experimentally. This paper presents extensive test data on young's modulus, poisson's ratio, stress-strain curve, the characteristics of strength of the foamed concrete and also presents the mechanical characteristics of the foamed concrete according to foam sizes.

---

### 1. 서 론

일반적으로 콘크리트를 경량화시키는 방법은 경량골재를 사용하는 경우와 기포를 혼합시키는 경우로 나눌수 있는데, 단위체적중량  $1.2t/m^3$ 이하의 저단위중량을 달성하기 위해서는 기포의 혼합이 보다 효과적이다.<sup>1),2)</sup> 경량콘크리트에 대한 연구는 선진 각국에서는 이미 상당한 수준의 성과가 있어서 단열 및 방음 등의 간접 효과를 위한 비구조용 콘크리트로서의 이용뿐만 아니라 공극 충전용, 연약지반 보강용 및 급경사지에서의 연직성토, 구조물 배면의 토압경감 등의 경량성토재료<sup>3),4),5)</sup>로서 활용의 폭을 넓혀 나가고 있으나 국내에서는 배합설계에 대한 표준화 및 시방화가 미비하며 제조 기술도 표준화 되어 있지 않고, 역학적특성에 대한 연구도 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고분자기포제를 이용하여 플로우값이 180mm 이상으로 시공에 필요한 유동성과 단위체적중량  $0.5t/m^3$ 정도에서 압축강도가  $30kg/cm^2$  이상으로 구조용 콘크리트로 사용될 수 있는 최적의 경량기포콘크리트를 개발하고 그

---

\* 정회권, 연세대학교 토목공학과 교수  
\*\* 정회권, 연세대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 정회권, 연세대학교 토목공학과 조교수

역학적 특성을 규명하는데 연구의 목적을 둔다.

## 2. 실 험

### 2.1 사용재료

- 1) 기포제 : 폴리아크릴레이드 계통의 고분자기포제를 사용 (비중 1.12~1.2, PH 7)
- 2) 스티로폴 : W사 제품인 스티로폴을 사용 (비중 0.029, 공극률 40%)
- 3) 잔골재 : 충남금강하류의 금강사를 잔골재로 사용 (조립률 2.36, 비중 2.6)
- 4) 시멘트 : S사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용 (비중 3.15, 분말도 3200cm<sup>2</sup>/gr)
- 5) 혼화재 : 실리카흙과 플라이애쉬를 사용 (실리카흙 비중 2.2, 플라이애쉬 비중 2.15)

### 2.2 실험방법

본 실험에서는 굳지 않은 콘크리트의 단위중량이 0.5~1.0t/m<sup>3</sup>이 되도록 물시멘트비, 단위시멘트량, 혼화재치환율, 스티로폴치환율, 잔골재혼합율을 배합변수로하여 최적의 배합변수를 도출하였다. 기포는 선기포방식을 이용하여 희석수와 기포제를 50:1로 섞어서 발포기에 넣고 5kg/cm<sup>2</sup>의 압축공기로 압송하여 제조된다. 혼합은 용량 250 l 인 강제식 믹시기를 이용하였으며 기포가 소포되는 것을 최소화하기 위하여 진동다짐만을 실시했고 양생은 시편 제작 후 최소 48시간이상 양생실에서 상온양생을 실시한 후 탈형하여 28일까지 20±2℃의 항온수조에서 수중양생을 실시하였다. 굳지않은 상태에서는 단위체적중량, 공기량, 플로우값을 측정하였고 굳은 상태에서는 압축강도, 활렬인장강도, 휨강도시험 등을 통하여 강도특성과 응력-변형률관계, 탄성계수, 포아송비를 구하였고 image 분석을 통해 기포 크기 및 분포를 측정하였다.

## 3. 최적 경량기포콘크리트의 개발

### 3.1 배합인자에 관한 실험적 분석

- 1) 물시멘트비에 따른 압축강도 특성  
실험결과 스티로폴과 기포의 체적비(B:F)가 5:5인 경우에는 물시멘트비가 0.4일 때, B:F가 0:10, 10:0 인 경우에는 물시멘트비가 0.5일 때 강도발현이 가장 높다.
- 2) 단위시멘트량에 따른 압축강도 특성  
기포에 대한 스티로폴의 치환비율이 50% 이상인 경우는 단위시멘트량을 460kg 이하로 하고, 50% 이하인 경우에 단위시멘트량은 450~520kg이 최적임을 알 수 있다.
- 3) 혼화재 치환율에 따른 압축강도특성  
스티로폴을 치환하지 않은 경량기포콘크리트의 최적 실리카흙의 시멘트치환율은 20%이며, 스티로폴을 치환한 경우에는 5%가 최적치환율이다.
- 4) 스티로폴 치환율에 따른 압축강도특성  
그림 1에서와 같이 B:F가 3:7일 때 강도가 가장 향상됨을 알 수 있다. .
- 5) 잔골재 혼합율에 따른 압축강도특성  
강도향상을 위해서는 잔골재를 혼합하지 않는 것이 유리함을 알 수 있다.

6) 기포율(P)과 압축강도( $\sigma_{ck}/\sigma_o$ )와의 관계

기포율에 따른 압축강도실험결과를 회귀분석하면 식 1 또는 식 2와 같다.

$$\sigma_{ck} = \sigma_o (1-P)^4 \quad (1) \quad \sigma_{ck} = \sigma_o e^{-6P} \quad (2)$$

7) 유동성

본 실험의 기본배합에서는 180mm를 기본값으로 정하였는데 플로우값 180mm는 재료분리 없이 500m정도의 펌프압송이 가능하며 타설시에는 충분한 유동성을 확보할 수 있기 때문이다.<sup>1)</sup> 스티로폼을 혼합하지 않은 기포콘크리트의 경우에는 물시멘트비가 0.45이상일때, 스티로폼을 혼합한 기포콘크리트의 경우에는 물시멘트비 0.5이상일 때 180mm 이상의 플로우값을 나타내었다.

3.2 타연구결과와의 비교

본 연구에서 개발된 경량기포콘크리트는 그림 2에서와 같이 단위체적중량이 0.38~0.64t/m<sup>3</sup>인 범위에서 기존 경량기포콘크리트보다 압축강도가 높으며, 최고 47kg/cm<sup>2</sup>의 압축강도를 갖고 있어 기존의 선기포 방식의 경량기포콘크리트에 비해 약 1.5배이상 압축강도특성이 우수한 것으로 나타났다.

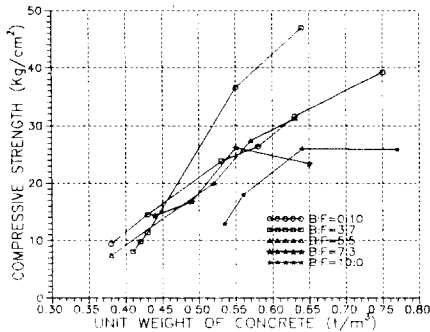


그림 1 스티로폼 치환율에 따른 압축강도 변화

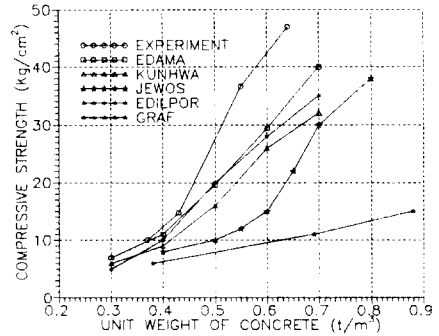


그림 2 타연구결과와의 비교

4. 경량기포콘크리트의 역학적 특성

4.1 압축강도

1) 단위체적중량과 압축강도와의 관계

물시멘트비(W/C)가 0.5이고 모래시멘트비(S/C)가 0인 경량기포콘크리트 시편의 단위체적중량과 압축강도와의 관계는 그림 3과 같다. 실험결과를 회귀 분석한 단위체적중량 ( $\gamma_{con}$ )과 압축강도 ( $\sigma_{ck}$ )의 관계는 식 3과 같다.

$$\sigma_{ck} = 1.5 e^{37.5\gamma_{con}} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3)$$

2) 재령에 따른 압축강도 특성

경량기포콘크리트의 7일 강도와 28일 강도를 비교하면 단위체적중량의 증가에 따라 압축강도의 증가비율이 높아지며 평균적으로는 28일강도가 7일강도의 1.7배 정도이다. 그림 4는 스티로폼을 치환하

지 않은 경량기포콘크리트의 7일 압축강도( $\sigma_7$ )와 28일 압축강도( $\sigma_{28}$ ) 관계를 나타내었고, 회귀분석으로부터 7일 압축강도( $\sigma_7$ )와 28일 압축강도( $\sigma_{28}$ ) 관계는 다음식과 같다.

$$\sigma_{28} = 1.27 \sigma_7 + 2.57 \quad (\text{kg/cm}^2)$$

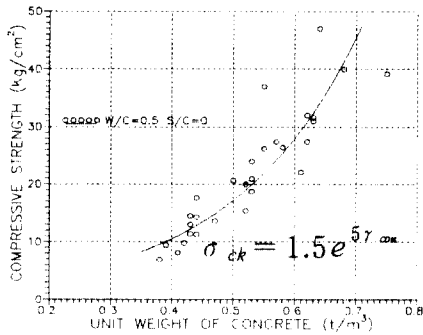


그림 3 단위체적중량과 압축강도와의 관계

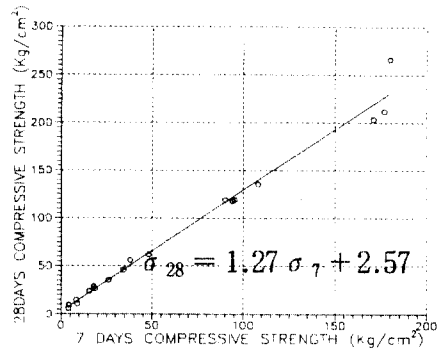


그림 4 7일압축강도와 28일압축강도관계

#### 4.2 응력-변형률 관계 및 탄성계수와 포아송비

본 연구에서는 일축압축시험으로부터 응력-변형률관계곡선을 도출하였으며, 그림 5는 기포율이 0.61인 경우의 경량기포콘크리트의 응력-변형률 관계곡선으로  $\epsilon_1$ 은 종방향변형률이고  $\epsilon_2$ 는 횡방향변형률이다. 경량기포콘크리트의 할선탄성계수를 일반화된 공식으로 제시하기 위하여 응력-변형률곡선의 원점과 극한강도의 50%인 응력에서의 점을 연결한 직선기울기를 할선탄성계수값으로 정의하여 3개 시편의 평균값을 구하였다. 보통콘크리트의 탄성계수는  $20 \sim 30 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$  범위인데 비해 경량기포콘크리트의 탄성계수는  $0.3 \sim 3 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$  범위로 보통콘크리트 탄성계수의 1~15%정도이다. 그림 6은 경량기포콘크리트의 탄성계수를 단위체적중량과 압축강도와의 식으로 표현하기 위하여 탄성계수를  $\gamma_{con}^{1.5} \times \sqrt{\sigma_{ck}}$ 의 함수관계로 나타낸 것으로 회귀분석 결과 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$E = 6326 \gamma_{con}^{1.5} \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (5)$$

경량기포콘크리트의 탄성범위내에서  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 의 비로부터 구한 경량기포콘크리트의 포아송비( $\nu$ )는

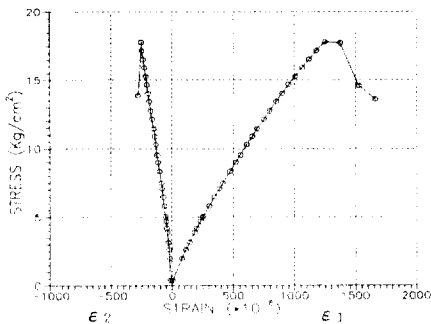


그림 5 응력-변형률 관계곡선 (기포율 0.61)

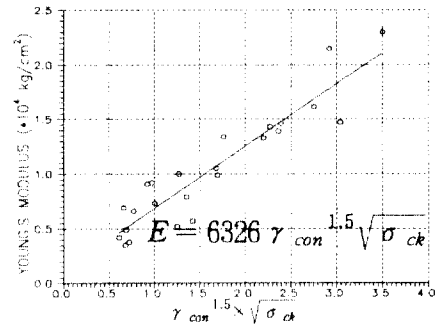


그림 6  $\gamma_{con}^{1.5} \times \sqrt{\sigma_{ck}}$ 와 탄성계수 관계

0.15~0.25 범위였다. 실험결과 경량기포콘크리트의 포아송비와 단위체적중량, 압축강도와는 특별한 관계는 없었고 평균 포아송비는 0.2이다.

### 4.3 활렬인장강도

본 실험에서는 물시멘트비가 0.5인 10×20cm 원통형시편을 이용하여 KSF 2423 (콘크리트의 인장강도 시험방법)에 근거하여 활렬인장강도 시험을 수행했다. 경량기포콘크리트의 단위체적중량이 0.38~0.75t/m<sup>3</sup> 범위인 경우 활렬인장강도는 1.4~8.1kg/cm<sup>2</sup>이고, 그림 7은 압축강도와 활렬인장강도의 관계를 나타낸 것으로 보통콘크리트의 경우 압축강도에 대한 활렬인장강도의 비가 0.08~0.11 정도이지만 경량기포콘크리트의 경우 압축강도에 대한 활렬인장강도의 비가 0.2~0.4로서 상대적으로 보통콘크리트에 비해 높은 것으로 나타났다. 그림 7에 나타난 압축강도와 활렬인장강도 ( $\sigma_t$ )와의 회귀분석관계식은 식 6과 같다.

$$\sigma_t = 0.46 \sigma_{ck}^{1.54} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (6)$$

### 4.4 휨강도

본 연구에서는 물시멘트비가 0.5인 4×4×16cm인 보시편을 이용하여 KSF 2407 (콘크리트의 휨강도 시험방법)에 근거하여 3등분재하법으로 휨강도실험을 실시하였다. 경량기포콘크리트의 휨강도는 단위체적중량에 따라 3~14kg/cm<sup>2</sup>의 범위에 있고, 보통콘크리트의 압축강도에 대한 휨강도비는 0.14~0.2 정도이지만 경량기포콘크리트는 0.3~0.6으로 보통 콘크리트보다 압축강도에 대한 휨강도의 비가 높은 특성을 가지고 있다. 그림 8은 압축강도와 휨강도의 상관관계를 도시한 것이다. 그림 8에 나타난 경량기포콘크리트의 압축강도와 휨강도 ( $\sigma_b$ )와의 회귀분석관계식은 식 7과 같다.

$$\sigma_b = 1.74\sqrt{\sigma_{ck}} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (7)$$

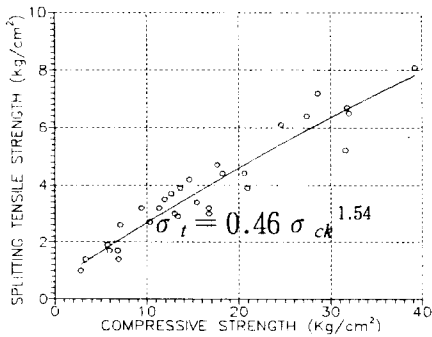


그림 7 압축강도와 활렬인장강도와의 관계

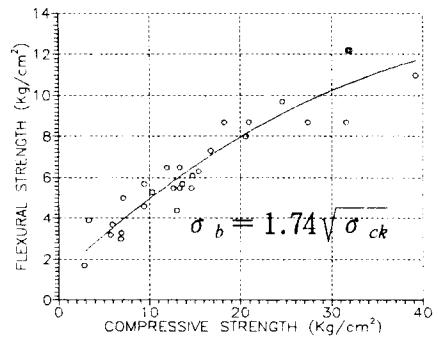


그림 8 압축강도와 휨강도와의 관계

### 4.5 경량기포콘크리트의 기포분석

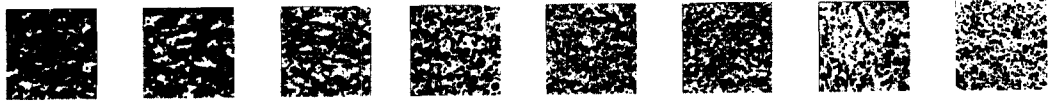
경량기포콘크리트의 기포크기가 강도증가에 영향을 미친다고 경험적으로 알려져 있으나, 일반적으로 경량기포콘크리트의 강도특성은 모재(matrix)가 된 시멘트 페이스트부분의 강도와 기포량의 관계로 연구되어지고 있다. 보통 기포는 기포크기가 큰 거시기포와 작은 미시기포로 구성되며, 거시기

포 분포는 image분석을 통해 측정하고 미시기포 분포는 수은 주입방법에 의해 측정된다.6).7).8) 본 연구에서는 기포율이 0.76, 0.72, 0.69, 0.65, 0.61, 0.59, 0.58, 0.51이고, 스티로폼을 혼합하지 않은 단면적이 10×10cm인 8개 시편의 중심부를 절단면마하여 image분석을 실시하여 경량기포콘크리트 거시기포의 평균크기와 분포를 측정하였다. 평균기포크기는 250~460 $\mu$ m 범위에 존재하였다. 표 1은 분석결과를 나타낸 것이다.

표 1 기포율과 평균기포크기

구분 시편	기포율	평균기포 크기( $\mu$ m)	단위체적중량 ( $t/m^3$ )	압축강도 ( $kg/cm^2$ )	구분 시편	기포율	평균기포 크기( $\mu$ m)	단위체적중량 ( $t/m^3$ )	압축강도 ( $kg/cm^2$ )
1	0.76	454	0.37	6.9	5	0.61	311	0.53	23.9
2	0.72	436	0.39	9.4	6	0.59	285	0.58	26.4
3	0.69	428	0.43	14.5	7	0.58	263	0.63	31.6
4	0.65	342	0.52	15.4	8	0.51	256	0.75	39.2

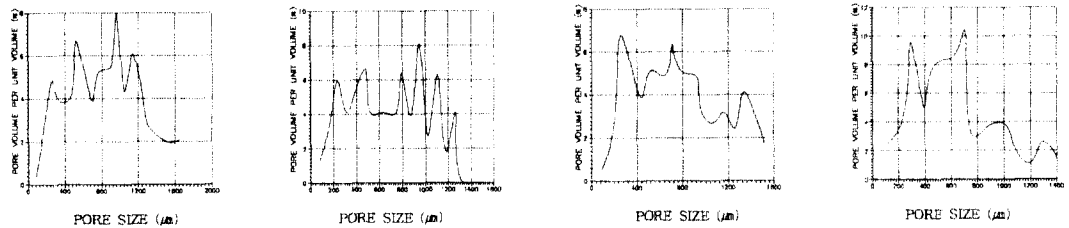
그림 9는 기포율에 따른 경량기포콘크리트의 단면형상을 스캐닝한 그림이다.



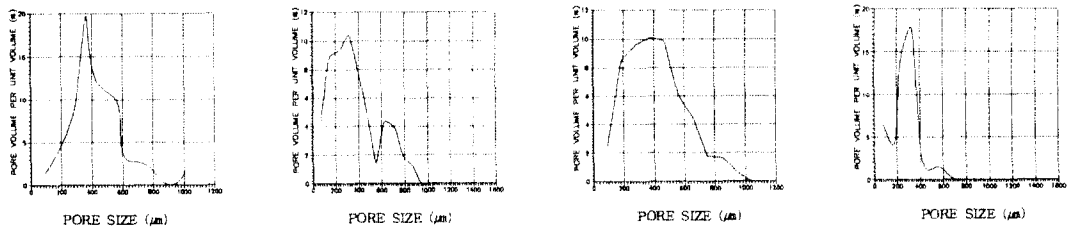
(a) 기포율 0.76 (b) 기포율 0.72 (c) 기포율 0.69 (d) 기포율 0.65 (e) 기포율 0.61 (f) 기포율 0.59 (g) 기포율 0.58 (h) 기포율 0.51

그림 9 경량기포콘크리트의 기포율에 따른 단면형상

그림 10은 image분석을 통해 측정한 각 시편의 기포율에 따른 기포분포를 나타낸 것이다.



(a)기포율 0.76일때의 기포분포 (b)기포율 0.72일때의 기포분포 (c)기포율 0.69일때의 기포분포 (d)기포율 0.65일때의 기포분포



(e)기포율 0.61일때의 기포분포 (f)기포율 0.59일때의 기포분포 (g)기포율 0.58일때의 기포분포 (h)기포율 0.51일때의 기포분포

그림 10 기포율에 따른 기포분포

그림 11은 평균기포크기 250~460 $\mu\text{m}$  범위에서 실험과 이에 따른 회귀분석으로 구한 평균기포크기 ( $D$ )와 압축강도와의 관계를 나타낸다. 그림 11에 실선으로 나타낸 것처럼 실험결과를 회귀분석하면 식 8과 같다. 그림 12는 실험에서 얻어진 기포율과 평균기포크기와의 관계를 나타낸 것으로 기포율이 증가할수록 평균기포크기도 증가함을 알 수 있다. 회귀분석하면 식 9를 얻는다.

$$\sigma_{ck} = 243e^{-0.01D} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (8)$$

$$D = 663P^2 - 113P \quad (\mu\text{m}) \quad (9)$$

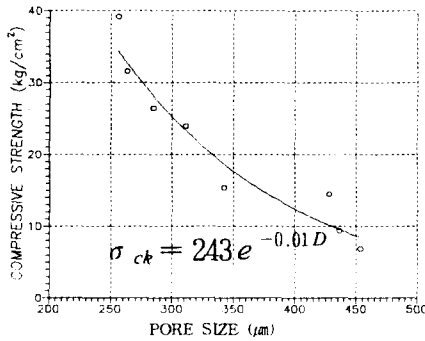


그림 11 평균기포크기와 압축강도와의 관계

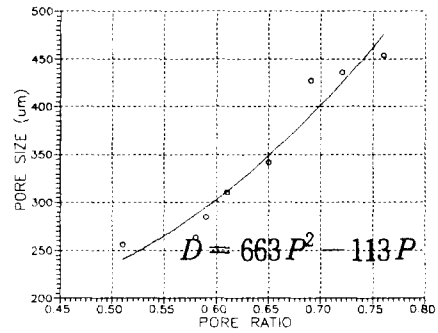


그림 12 기포율과 평균기포크기와의 관계

## 5. 결 론

이상의 경량기포콘크리트의 개발과 역학적특성에 관한 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존 선기포방식의 경량기포콘크리트 보다 1.5배 이상의 압축강도를 갖으며 플로우값이 180mm 이상으로 시공에 필요한 유동성을 보유한 경량기포콘크리트를 개발하였다. 개발된 경량기포콘크리트는 단위체적중량 0.55t/m<sup>3</sup>에서 압축강도 36.6kg/cm<sup>2</sup>, 단위체적중량 0.64t/m<sup>3</sup>에서 압축강도 47kg/cm<sup>2</sup>을 갖는다.
- 2) 배합인자의 강도특성과 유동성에 관한 실험적 분석을 통하여 개발된 경량기포콘크리트(플로우값 180mm, 단위중량0.5t/m<sup>3</sup>, 압축강도 30kg/cm<sup>2</sup>)를 얻기 위한 최적의 배합비는 물시멘트비 0.5, 단위 시멘트량 520kg, 스티로폴과 기포의 체적비 3 : 7, 실리카흙 치환율 5%임을 밝혔다.
- 3) 개발된 경량기포콘크리트는 활렬인장강도가 압축강도의 0.2~0.4인 범위이고, 휨강도는 압축강도의 0.3~0.6인 범위로서 보통콘크리트보다 강도특성이 우수함을 밝히고, 설계에 활용할 수 있도록 활렬인장강도-압축강도, 휨강도-압축강도 사이의 실험식을 제시하였다.
- 4) 경량기포콘크리트의 탄성계수는 (0.3~3) × 104kg/cm<sup>2</sup> 범위로 보통콘크리트 탄성계수의 1~15% 정도이며 압축강도, 단위체적중량을 함수로 하는 탄성계수 추정식을 제안하였다. 경량기포콘크리트의 포아송비는 0.15~0.25의 범위이고, 보통콘크리트와 유사한 값을 구명하였다.
- 5) 개발된 경량기포콘크리트는 평균기포크기 250~460 $\mu\text{m}$  범위의 기포크기를 가지며 압축강도는 평균기포크기의 영향을 받는 것으로 나타났고, 기포율이 증가할수록 평균기포크기도 증가함을 밝혔으며, 평균기포크기와 압축강도와의 상관관계, 기포율과 평균기포크기와의 상관관계를 실험식으로 제시하였다.

● 참고 문헌 ●

1. Short, A. and Kinniburgh, W., Lightweight Concrete, 3rd Ed., Applied Science Publishers Ltd., London, 1978, pp. 1-14.
2. Neville, A. M., Properties of Concrete, Pitman, 3rd Ed., pp. 605-629.
3. 三島信雄, 長尾和之, “氣泡セメント盛土工法(FCB工法)の研究”, 日本土木學會誌, Vol. 79, No. 1, 1994, pp. 18-19.
4. 山田純男, 白井朗, “發泡ビーズ混合輕量盛土工法”, 特集輕量盛土工法, 1994, pp. 22-27.
5. 森範行, 佐勝常雄, 桑原正彦, 草刈太一, “氣泡混合補強土工法”, 特集輕量盛土工法, 1994, pp. 28-36.
6. 山田哲夫, “招輕量コンクリート開發”, セメント・コンクリート, No. 577, 1995, pp. 32-36.
7. 藤原活巳, 下山善秀, 田中敏嗣, “輕量氣泡コンクリートの高強度化に關する研究”, 第44會セメント技術大會講演集, 1990, pp. 446-451.
8. 三島信雄, 長尾和之, 福岡一幸, “氣泡混合輕量土を用いた東名高速道路の擴幅工事”, 土木技術, 49卷, 8, 1994, pp. 76-79.