
경량기포콘크리트 탄성계수의 미시역학적 추정

Micromechanics-based Evaluation of Elastic Modulus of Lightweight Foamed Concrete



조호진*

Cho, Ho-Jin



송하원**

Song, Ha-Won



변근주***

Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

Lightweight foamed concrete by mixing prefoamed foam in cement slurry is a concrete which is lighter than conventional normal concrete. Therefore, lightweight foamed concrete is a composite material where pores are randomly distributed within hydrated cement paste matrix. The objective of this study is to evaluate elastic modulus of the lightweight foamed concrete using the micromechanics-based theory. In this paper, a scheme is proposed by combining the differential scheme and Hansen's modification. The results obtained from the proposed equation show good agreement with experimental results and also show the better predictions than by any other proposed equations.

Key words : lightweight foamed concrete, elastic modulus, micromechanics, modified differential scheme

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수
*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 10월 30일까지 학회로 보내주
시면 1997년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

최근 건설분야에서는 콘크리트의 역할 및 중요성이 재평가되고 있다. 이는 고강도콘크리트 및 고성능 콘크리트, 폴리머침투콘크리트, 섬유보강콘크리트, 경량콘크리트와 같은 신소재의 개발이 성공적으로 진행되어 콘크리트의 성능과 특성이 상당히 개선되었으므로, 콘크리트의 적용분야가 다변화 되어가고 있기 때문이다.

콘크리트는 시멘트와 물의 수화반응으로 경화체를 형성하는 다상(multi-phase)의 복합체로서 단위체 적중량이 크다는 약점을 지니고 있으므로, 이러한 약점을 보완하고 사용목적에 부합하는 물성을 갖는 경량골재콘크리트(lightweight aggregate concrete) 및 경량기포콘크리트(lightweight foamed concrete) 등의 경량콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 경량기포콘크리트란 경량 콘크리트의 한종류로서 시멘트슬러리내에 다량의 기포를 혼합시킨 뒤, 양생·경화하여 동일한 체적의 보통콘크리트보다 가볍게 만든 콘크리트로 정의된다.¹⁾ 국내에서는 그 동안 단열재, 방음재 등의 2차제품 생산에 주로 활용되어 왔으나 근래에는 자중감소의 직접적 효과를 얻을 수 있는 구조용 콘크리트나 해안매립지를 비롯한 연약지반의 개발에 연약지반개량재료로서의 적용이 시도되고 있는 실정이다. 그러나 경량기포콘크리트의 역학적 특성이 규명되어 있지 않기 때문에 설계 및 시공기술도 정립되지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 경량기포콘크리트를 수화시멘트풀(Hydrated cement paste : HCP)과 기포로 이루어진 복합체재료로 가정하고, 구조물의 거동을 파악하기 위한 기본적인 계수인 경량기포콘크리트의 탄성계수를 수화시멘트풀의 탄성계수와 기포의 분포형상, 그리고 각 구성물들의 체적함유율을 고려하여 추정하는 식을 도출하였다.

2. 균질화를 통한 유효물성

콘크리트와 같이 미시적으로 불균질한 재료에 대하여 공학적으로 필요한 정보는 물체를 구성하는 미소요소 각각의 거동이 아니라 거시적인 균질한 재료의 역학적특성이다. 즉, 미시적으로 불균질한 재료를

균질한 재료로 취급해야하고, 이를 위해선 균질화(homogenization)가 필요하다. 이런 균질화는 복합재료를 확률적으로 대표할 수 있는 대표체적요소(representative volume element : RVE)를 구성하는 구성물질의 물리량(응력, 변형률, 에너지등)을 평균화함으로써 이를 수 있는데, 평균화를 통하여 얻어진 균질화된 물체의 특성을 유효물성(effective material properties), 또는 평균물성(average material properties)이라 한다.

2.1 대표체적요소

Fig. 1과 같이 거시적인 연속체내의 한 점은 미시적으로 볼 때 여러 구성물질로 이루어진 복잡한 구조이다.

만약 미시적인 어떤 체적 V의 균질화된 유효물성이 거시적인 연속체내의 한 점을 확률적으로 대표할 수 있다면, 이 해당영역 V는 대표체적요소가 될 수 있다. 확률적으로 대표가 되기 위해선, V내에 충분히 많은 미소요소들을 포함하고 있어야 한다. 즉, 거시요소와 미소요소의 크기를 각각 D와 d라 한다면 $D/d \gg 1$ 의 관계가 성립되어야 한다. 이때 주의할 것은 미소요소의 절대적인 치수는 존재하지 않는다는 것인데, 이 크기는 대상 연속체의 크기나 해석의 목적에 따라 달라지는 상대적인 크기이다. 또, RVE를 구성하는 구성물의 선택도 상대적인 것이 된다. 이는 체계적인 미시구조의 관찰과 실험결과로부터 정해지는데, 대체로 관심의 대상이 되는 특성에 일차적인 영향을 미치는 인자들을 선택하게 된다.

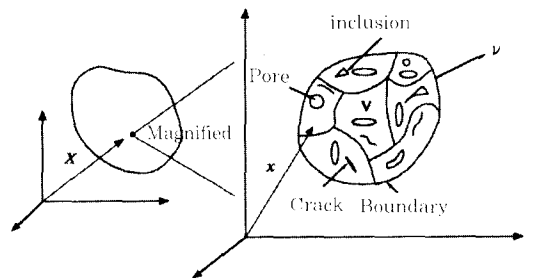


Fig. 1 Representative volume element(RVE)

2.2 유효물성

진술한대로 복합재료의 거시적인 유효물성은

RVE내의 각 미소요소의 물리량을 체적평균하여 이들간의 관계로부터 얻을 수 있다. 탄성계수를 구하기 위해 필요한 유효물성인 유효탄성텐서(effective elastic tensor)와 유효연성텐서(effective compliance tensor)는 RVE내의 각 미시구성물들의 응력텐서(stress tensor)와 변형률텐서(strain tensor)를 체적평균하여 구한 거시응력텐서와 거시변형률텐서의 관계식으로 부터 구할 수 있다.

거시적 물리량인 거시응력텐서와 거시변형률텐서를 각각 $\Sigma(X)$ 와 $\varepsilon(X)$ 라 표기하고 미시적물리량인 미시응력텐서와 미시변형률텐서를 $\sigma(x)$ 와 $\varepsilon(x)$ 로 표기하면 아래의 식(1)이 성립된다. 이때 X 는 연속체내의 거시적인 한점의 위치를 나타내고, x 는 RVE내의 미시적요소의 위치를 나타낸다.

$$\Sigma(X) = \bar{\sigma} = \langle \sigma \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma(x) dV \quad (1 a)$$

$$\varepsilon(X) = \bar{\varepsilon} = \langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon(x) dV \quad (1 b)$$

여기서, $\langle \cdot \rangle$ 와 $\langle \cdot \rangle$ 는 모두 체적평균을 의미한다.

대표체적요소는 거시적인 한점을 대표하므로, 거시적인 연속체상 한점에서의 물리장은 대표체적요소의 경계치(boundary data)가 된다. 만약, RVE의 표면 ∂V 상에 경계치로 균일표면력과 선형변위가 주어진다면, 표면력을 t^0 , 변위를 u^0 로 표기한다면 평형조건과 적합조건, 그리고 발산정리를 이용하여 식(2)와 같이 정리된다. 이때, ν 는 ∂V 의 법선벡터이다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{1}{V} \int_{\partial V} \frac{1}{2} (x \otimes t^0) dS \\ \bar{\varepsilon} &= \frac{1}{V} \int_{\partial V} \frac{1}{2} (\nu \otimes u^0 + u^0 \otimes \nu) dS \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, \otimes 는 dyadic product를 의미한다.

즉, 응력과 변형률의 체적평균치를 RVE의 경계조건으로부터 구할 수 있다.

Fig. 2와 같이 탄성텐서(elasticity tensor) C 와 연성텐서(compliance tensor) D 를 가지는 탄성모재(matrix) M 속에 C^α 와 D^α 를 가진 탄성내포물(inclusion) Ω_α ($\alpha=1, 2, \dots, n$)가 내재된 RVE의 경우, RVE의 전체거동을 특징지우는 유효물성을 \bar{C} 와 \bar{D} 라고 표기하면, 위의 두가지 경계조건에 대하여 RVE의 유효물성을 수학적인 진개를 통하여 정리하면 식(3)과 같이 구해진다.¹⁹⁾

- 균일표면력이 경계치로서 주어진 경우

$$(\bar{D} - D) : \sigma^0 = \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha (D^\alpha - D) : \bar{\sigma}^\alpha \quad (3 a)$$

- 선형변위가 경계치로서 주어진 경우

$$(\bar{C} - C) : \varepsilon^0 = \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha (C^\alpha - C) : \bar{\varepsilon}^\alpha \quad (3 b)$$

여기서, f_α 는 Ω_α/V 로서 α 번째의 내포물의 체적함유율이고, $\cdot : \cdot$ 는 double dot product이다.

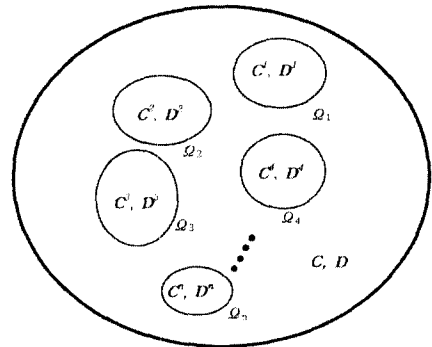


Fig. 2 RVE made of n inclusions

3. 평균화기법을 이용한 유효탄성텐서의 도출

식(3)에서 구한 유효물성은 RVE를 구성하는 모든 구성물의 물리량을 정확히 아는 상태에서 각 물리량의 체적평균화를 통하여 구한 엄밀해(exact solution)이다. 만약 RVE가 여러 구성물들로 이루어진 경우, RVE를 이루는 모든 미시구성물을 전부 고려하기는 힘들고, 또 구성물의 수가 적더라도 그 구조가 복잡하다면 RVE내의 물리량들이 구성물들의 간섭으로 인하여 아주 복잡하게 분포되므로 구성물들의 물리량의 상태를 정확히 알기는 사실상 불가능하다. 따라서 어떤 방법으로든지 구성물의 물리량의 상태를 구하기 위하여 약간의 가정이 필요한데, 이러한 가정에 따라서 여러 가지 평균화 기법(averaging methods)이 생기게 된다.

경량기포콘크리트는 수화시멘트풀을 모재(matrix)로하여 기포가 내포물(inclusion)로서 내재되어 있는 외경내포물이므로 Eshelby의 연구결과를 이용한 평균화기법을 사용하여 탄성계수를 추정할 수 있다.

3.1 Eshelby의 연구

1957년 발표된 Eshelby의 연구는 복합재료의 유효물성을 추정하는데 많은 발전을 가져오게 하였다. 이를 이용한 여러 평균화기법들이 제시되었고, 이들은 복합재료를 등가의 균질체로 가정 한 뒤 이 균질부한체내에 타원형 내포물이 있는 RVE를 사용하여 균질화를 한다는 공통점이 있다.

3.1.1 등가균질체(Equivalent Homogeneous Solid)

RVE내의 물리량들은 내재된 불균질 물질로 인하여 변동이 생기게 되며, Fig. 3과 같이 V내의 영역에 따라 서로 다른 탄성치를 갖고 있다. 이런 대표체적 요소의 유효물성을 구하기 위해서는 RVE내의 모든 곳에서 하나의 탄성치만을 갖는 등가균질체를 가정하여 구하는 것이 훨씬 편리하다. 이때 물질간의 불일치로 인한 탄성치의 차이는 eigenstrain(ϵ^*)이나 eigenstress(σ^*)를 도입하여 보정하게 된다.

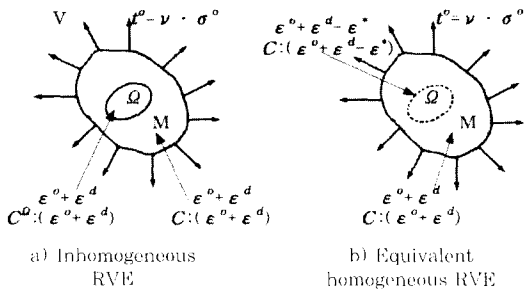


Fig. 3 Inhomogeneous RVE and equivalent homogeneous RVE

Fig. 3과 같이 균일표면력의 경계조건이 ∂V 상에 주어졌다면, eigenstrain은 다음과 같은 조건을 가지고 분포된다.

$$\epsilon^*(x) = \begin{cases} 0 & \text{in } M \\ \epsilon^* & \text{in } \Omega \end{cases} \quad (4)$$

이를 이용하여 등가균질 RVE의 응력과 변형률을 Hooke의 법칙을 사용하여 나타내면 아래 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon(x) &= \epsilon^0 + \epsilon^d(x) \\ \sigma(x) &= C: \{\epsilon(x) - \epsilon^*(x)\} \end{aligned}$$

$$= \begin{cases} C: \{\epsilon^0 + \epsilon^d(x)\} & \text{in } M \\ C: \{\epsilon^0 + \epsilon^d(x) - \epsilon^*(x)\} & \text{in } \Omega \end{cases} \quad (5)$$

위의 식(5)에서 보듯이 eigenstrain을 사용하면 하나의 탄성치로 복합체의 물리량을 표현할 수 있다.

3.1.2 Eshelby tensor

Eshelby는 그의 연구에서 균질체내에 타원형 불균질물이 있는 경우, 작용하중하에서 이 물체의 내부 및 경계면 근처의 응력장을 구할 수 있는 편리한 모형을 제시하였는데, 그 결과로 변동되는 물리량인 σ^d 와 ϵ^d 를 균질화에 필요한 eigenstress와 eigenstrain으로 나타낼 수 있게 하는 tensor를 구하였다.¹⁾

Eshelby가 결론을 유도하기 위하여 사용한 가정은 다음과 같다.

- i) 모든 구성물질은 균질하고 선형탄성체이며, 결합체는 무한체이다.
- ii) 내포물의 형상은 타원형이다.

Eshelby는 이러한 가정으로 부터 다음의 결론을 유도하였다.

- i) 균질화를 위한 eigenstrain ϵ^* 는 Ω 내에서 균일하다.
- ii) 따라서 내포물로 인하여 변동되는 물리량도 Ω 내에서 균일하다. 그러므로 식(6 a) 같이 변동되는 변형률을 표시할 수 있다.

$$\epsilon^d = S^{\Omega}: \epsilon^* \quad (6 a)$$

윗식의 S^{Ω} 이 Eshelby tensor이며 아래의 특성을 갖는다.

- i) $S_{ijkl}^{\Omega}, S_{jikl}^{\Omega}, S_{inlk}^{\Omega}$, 그러나 $S_{ijkl}^{\Omega} \neq S_{klij}^{\Omega}$
- ii) Eshelby tensor는 내포물의 재료특성에 영향을 받지않고, 단지 내포물의 형상과 주변 결합재의 재료특성에 영향을 받게된다. 만약 주변 결합재가 등방성이라면 이 텐서는 결합재의 포아송비와 내포물의 형상으로부터 구할 수 있다.

같은 방법으로 변동되는 응력도 식(6 b)와 같이 Eshelby tensor T^{Ω} 으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma^d = T^{\Omega}: \sigma^* \quad (6 b)$$

3.1.3 Eshelby해

균질화를 위하여 사용된 eigenstress와 eigenstrain은 '균질화 이전의 물리량과 균질화 이후의 물리량은 같다'라는 적합조건으로부터 정의되고, 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma(x) &= C^\Omega : \{\varepsilon^0 + \varepsilon^d(x)\} \\ &= C : \{\varepsilon^0 + \varepsilon^d(x) - \varepsilon^*(x)\} \\ \varepsilon(x) &= D^\Omega : \{\sigma^0 + \sigma^d(x)\} \\ &= D^\Omega : \{\sigma^0 + \sigma^d(x) - \sigma^*(x)\} \end{aligned} \quad \text{in } \Omega \quad (7 \text{ a, b})$$

Ω 내의 물리량은 아래 식(8 a, b)과 같이 임의의 텐서를 사용하여 eigen치의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon^* + \varepsilon^d(x) &= A^\Omega : \varepsilon^*(x) \\ \sigma^* + \sigma^d(x) &= B^\Omega : \sigma^*(x) \end{aligned} \quad \text{in } \Omega \quad (8 \text{ a, b})$$

식(8 a, b)의 A^Ω 과 B^Ω 은 집중텐서(concentration tensor)라 하며, 적합조건식(7)로부터 식(9 a, b)와 같은 관계가 성립된다.

$$\begin{aligned} A^\Omega &= (C - C^\Omega)^{-1} : C \\ B^\Omega &= (D - D^\Omega)^{-1} : D \end{aligned} \quad \text{in } \Omega \quad (9 \text{ a, b})$$

만약 V 가 무한하고, 타원형 내포물이 내재된 경우, Eshelby tensor를 이용하여 eigenstrain과 eigenstress를 거시변형률과 거시응력으로 나타낼 수 있다. 뒷 식(8 a, b)에 식(6)을 대입하면 아래 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon^* &= (A^\Omega - S^\Omega)^{-1} : \varepsilon^0 \\ \sigma^* &= (B^\Omega - T^\Omega)^{-1} : \sigma^0 \end{aligned} \quad \text{in } \Omega \quad (10 \text{ a, b})$$

이상의 결과를 종합하면 Ω 내부의 물리량을 거시적 물리량으로 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \varepsilon^\Omega &= \varepsilon^* + \varepsilon^d = A^\Omega : (A^\Omega - S^\Omega)^{-1} : \varepsilon^0 \\ \sigma^\Omega &= \sigma^* + \sigma^d = B^\Omega : (B^\Omega - T^\Omega)^{-1} : \sigma^0 \end{aligned} \quad (11 \text{ a, b})$$

식(11)은 Eshelby의 가정을 만족하는 모든 복합체에 대하여 Ω 내부의 물리량을 정확히 구할 것이다. 여기서, 일반적인 복합체의 엄밀한 유효탄성텐서식(3)에 위의 Eshelby tensor와 적합조건으로부터 얻은 식(11)을 대입하여 타원형 내포물이 무한결합재내에 내재된 복합체의 유효탄성텐서를 구하는 엄밀식을 식(12)와 같이 유도할 수 있다

$$\bar{C} = C + \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha (C^\alpha - C) : A^\alpha : (A^\alpha - S^\alpha)^{-1} \quad (12 \text{ a, b})$$

$$\bar{D} = D + \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha (D^\alpha - D) : B^\alpha : (B^\alpha - T^\alpha)^{-1}$$

여기서, A^α 와 B^α 는 n 개의 내포물이 함유된 결합재내의 α 번째 내포물의 집중텐서이다.

3.2 평균화기법에 의한 유효탄성텐서

경량기포콘크리트는 무한한 결합재내에 단 하나의 탄성특질을 가지는 내포물만이 내재하는 외겹내포물(single-layered inclusion) 복합체이다. 이러한 복합체는 단 하나의 eigenstrain만이 존재한다. 따라서 유효탄성텐서는 Eshelby의 연구결과를 바탕으로한 평균화기법들인 dilute distribution method (DDM), self-consistent method(SCM), 미분법(differential scheme : DS) 등을 이용하여 추정할 수 있다.⁶⁾

3.2.1 DDM에 의한 유효탄성텐서

DDM은 내포물의 체적함유율이 비교적 작아서 내포물간이나 내포물과 결합재간의 상호작용을 무시할 수 있는 복합물체의 RVE를 균질화 할 때 사용된다. 따라서 고립된 한개의 내포물이 결합재의 탄성텐서를 갖는 무한체 안에 있는 것으로 가정하여 이의 유효탄성텐서를 계산하게 된다. 만약 결합재의 특성을 첨가 M 으로 표기하고, 내포물의 경우 α 로 표기한다면 DDM에 의한 유효탄성텐서는 식(12)의 C 를 C^M , D 를 D^M 으로 바꾸고, 내포물에서의 집중텐서를 식(9)에서 구해 식(12)에 대입하여 정리하면 식(13)과 같게 된다.

거시변형률 ε^* 가 경계조건으로 주어진 경우의 유효탄성텐서는 식(9 a)와 식(12 a)로부터 식(13 a)와 같이 얻을 수 있다.

$$\bar{C}^{DDM} = C^M : \left\{ I^{(4s)} - \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha (A^\alpha - S^\alpha)^{-1} \right\} \quad \dots\dots(13 \text{ a})$$

또, 거시응력 σ^* 가 주어진 경우, 식(9 b)를 식(12 b)에 대입한 뒤, 식(11 a, b)의 관계로부터 유도된 식(13 b)로부터 식(13 c)와 같은 유효탄성텐서식을 얻는다.

$$(B^\Omega - T^\Omega)^{-1} = (A^\alpha - S^\alpha)^{-1} \quad (13 \text{ b})$$

$$\bar{D}^{DDM} = \left\{ I^{(4s)} + \sum_{\alpha=1}^n f_\alpha (A^\alpha - S^\alpha)^{-1} \right\} D^M \quad (13 \text{ c})$$

여기서, $I_{ijkl}^{(4s)}$ 는 4th-order symmetric unit tensor이고, $I_{ijkl}^{(4s)} = \frac{1}{2}(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{kj})$ 이다.

일반적인 복합재료의 거동에서 위의 두가지 경우는 각기 다른 하중조건에서 유도된 경우이므로 $C^{*i} \neq (D^{*s})^i$ 이다. 즉, 위의 두 결과는 서로의 역이 될 필요는 없다. 만약 모든 내포물의 형상이 같고 결합재의 특성이 균일하다면 식(13)은 거시변형률 ϵ^0 와 거시응력 σ^0 가 경계조건으로 주어진 경우 각각에 식(14)와 같이 간단히 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{C}^{DDE} &= C^M : \{I^{(4s)} - f_i(A^i - S^i)^{-1}\} \\ \bar{D}^{DDE} &= \{I^{(4s)} + f_i(A^i - S^i)^{-1}\} : D^M \end{aligned} \quad (14 \text{ a, b})$$

여기서, 첨자 I 는 내포물을 표시하는 것이고, f_i 는 내포물의 체적 함유율이다. 즉

$$f_i = \sum_{a=1}^n f_a$$

3.2.2 SCM에 의한 유효탄성텐서

SCM은 내포물간의 상호작용을 어느 정도 고려하여 복합재료의 유효탄성텐서를 구하는 방법이다. DDM의 경우 무한체의 탄성텐서를 결합재의 탄성텐서로 가정하고 균질화를 시켰지만, SCM은 결합재의 탄성텐서 대신 아직 정해지지 않은 유효탄성텐서를 무한체의 탄성텐서로 사용한다. 따라서 RVE는 유효탄성텐서를 가지는 무한체내에 존재하는 고립내포물의 거동으로 근사화되어 이에 대하여 균질화를 실시하게 된다.

이 방법은 그 이름에서 보여지듯이 ϵ^0 가 주어진 경우와 σ^0 가 주어진 경우가 같은 결과를 산출한다. 즉, $C^{*i} = (D^{*s})^i$ 이 된다. 따라서 거시변형률 ϵ^0 가 주어진 경우에 대해서만 수식을 전개하여도 된다. 먼저 식(11)에서 구한 내포물의 물리량과 식(9)에서 구한 집중텐서는 무한결합재의 탄성텐서가 유효탄성텐서이므로 식(15)처럼 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}^\Omega &= \bar{A}^\Omega : (\bar{A}^\Omega - \bar{S}^\Omega)^{-1} : \epsilon^0 \\ \bar{A}^\Omega &= (\bar{C} - C^\Omega)^{-1} : \bar{C} \end{aligned} \quad (15 \text{ a, b})$$

이로부터 RVE의 유효탄성텐서는 식(16)과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \bar{C}^{SCM} = C^M + \\ & \sum_{a=1}^n f_a (C^a - C^M) : \bar{A}^a : (A^a - S^a)^{-1} \end{aligned} \quad (16)$$

만약 모든 내포물이 동일한 형태와 탄성텐서를 갖는다면, 식(16)은 식(17)과 같이 정리된다.

$$\bar{C} = C^M + f_i (C^i - C^M) : \bar{A}^i : (\bar{A}^i - \bar{S}^i)^{-1} \quad (17)$$

3.2.3 미분법에 의한 유효탄성텐서

전술한 두가지 평균화기법은 내포물의 체적함유율이 작은 경우에만 적용이 가능하다. DDM은 구성물질간의 상호작용을 고려하지 않고, SCM은 비록 어느 정도의 상호작용을 고려하지만 그 방법이 완전하지 않으므로 한계를 가지게 된다. 실제로 기포가 내재된 복합재료의 경우 별로 크지 않은 체적함유율에서 유효탄성텐서가 '0'이 되거나 기포의 체적함유율이 100%인 경우에도 유효탄성텐서가 '0'이 되지 않는 결과를 산출하며, 균열 등을 고려하지 못한다. 따라서 이를 보완할 수 있는 평균화 기법이 미분법(differential scheme : DS)이다.

DS에 의한 유효탄성텐서 도출방법은 다음의 개념에서 부터 유도되었다. 먼저 균질 결합재료만 이루어진 RVE를 가정한다. 만약 작은 체적함유율인 δf 의 내포물이 들어간다면, 이 새로운 RVE의 유효탄성텐서 \bar{C}^1 은 DDM을 사용하여 구할 수 있다. 이 추정된 유효탄성텐서를 지닌 새로운 균질결합재 \bar{C}^1 에 다시 δf 만큼의 내포물이 추가된다면, 이새로운 RVE의 유효탄성텐서 \bar{C}^2 도 DDM을 사용하여 도출이 가능하다. 이러한 과정을 수학적으로 나타내면 RVE의 유효탄성텐서의 미분방정식을 내포물의 체적함유율 δf 의 함수로서 유도할 수 있다. 이 미분방정식을 풀면, 임의의 체적함유율 δf 에 대한 유효탄성텐서식을 얻게된다. 이 방법에 의한 유효탄성텐서는 두가지 하중조건에 대하여 서로의 역이 되는 탄성텐서와 연성텐서를 구하게 된다.

결합재의 탄성텐서가 C 이고, 이 결합재속에 탄성텐서가 C^i 인 한종류의 내포물만을 가진 RVE에서, 내포물 Ω 의 체적함유율은 f_i 이고, 이 RVE의 유효탄성텐서는 f_i 의 함수로 가정하자. 유효탄성텐서의 엄밀식(3)으로 부터 아래의 식(18)을 얻는다.

$$\{\bar{C}^{DS}(f_i) - C\} : \epsilon^0 = f_i (C^i - C) : \bar{\epsilon}^{DS} \quad (18)$$

윗 식을 보면, 체적함유율 f_i 의 미소증가에 대한 내포물의 평균변형률 $\bar{\epsilon}^{DS}$ 의 변화를 구함으로써 유효탄성텐서 \bar{C}^{DS} 의 변화를 알 수 있다. 유효탄성텐서

에 대한 미분방정식을 얻기 위해선 아래의 순서를 따른다.

i) 먼저, 체적이 각각 V_M 과 V_I 인 결합재(M)와 내포물(\mathcal{Q}_I)로 이루어진 RVE의 유효탄성 텐서를 $\bar{C}^{DS}(f_I)$ 이라 하자.

ii) 위의 RVE를 탄성텐서가 $\bar{C}^{DS}(f_I)$ 인 균일 결합재 M' 로 가정하자. 이때 균질물의 체적은 $(V_M + V_I)$ 이 된다.

iii) 위의 균질물에 체적이 δV_I 이고 탄성텐서가 C^I 인 미소내포물 $\delta \mathcal{Q}_I$ 을 더하고, 이 새로운 RVE의 유효탄성텐서는 DDM을 사용하여 구할 수 있다.

내포물의 미소증가에 따른 유효탄성텐서의 변화는 iii)의 과정에서 구한 유효탄성텐서에서 i)의 유효탄성텐서를 빼면 된다. 즉,

$$d\bar{C}^{DS}(f_I) = \bar{C}^{DS}(f_I + \delta f_I) - \bar{C}^{DS}(f_I)$$

여기서,

$$f_I = \frac{V_I}{V_M + V_I}, \quad f_I + \delta f_I = \frac{V_I + \delta V_I}{V_M + V_I + \delta V_I} \quad (19 \text{ a, b})$$

식(19 a)의 오른쪽항과 식(18)의 왼쪽항을 비교할 때, 유효탄성텐서의 변화량은 결합재 M' 에 미소내포물 $\delta \mathcal{Q}_I$ 이 있는 RVE의 유효탄성텐서를 DDM으로 구함으로써 얻을 수 있다. 즉,

$$\left\{ \bar{C}^{DS}(f_I + \delta f_I) - \bar{C}^{DS}(f_I) \right\} : \epsilon^o = \delta f_I \left\{ C^I - \bar{C}^{DS}(f_I) \right\} : \bar{\epsilon}^{DS} \quad (20 \text{ a})$$

여기서,

$$\left\{ \begin{array}{l} \cdot \bar{\epsilon}^{DS} = \bar{A}^{DS} : (\bar{A}^{DS} - \bar{S}^{DS})^{-1} : \epsilon^o \\ \cdot \bar{A}^{DS} = \left\{ \bar{C}^{DS}(f_I) - C^I \right\}^{-1} : \bar{C}^{DS}(f_I) \\ \cdot \delta f_I = \frac{\delta f_I}{1 - f_I} \end{array} \right. \quad (20 \text{ b-d})$$

식(19)와 (20)으로부터 유효탄성텐서의 변화량은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$d\bar{C}^{DS}(f_I) = \frac{\delta f_I}{1 - f_I} \left\{ C^I - \bar{C}^{DS}(f_I) \right\} : \bar{A}^{DS} : (\bar{A}^{DS} - \bar{S}^{DS})^{-1} \quad (21)$$

식(21)으로부터 유효탄성텐서에 대한 미분방정식을 완성시키면 식(22)와 같다.

$$\frac{d}{df_I} \bar{C}^{DS}(f_I) = \frac{1}{1 - f_I} \left\{ C^I - \bar{C}^{DS}(f_I) \right\} : \bar{A}^{DS} : (\bar{A}^{DS} - \bar{S}^{DS})^{-1} \quad (22)$$

이 미분방정식을 풀기위한 초기조건은 식 (23)과

같다.

$$\bar{C}^{DS}(f) = C^M(f) \quad (23)$$

여기서, f 는 임의의 내포물 함유량이고, $C^M(f)$ 는 임의의 내포물 함유량에 대하여 실험에 의해 알고 있는 유효탄성텐서치이다.

4. 경량기포콘크리트 탄성계수의 추정식 도출

경량기포콘크리트는 내포물이 없이(실제로는 기포가 내포물) 기포와 HCP만으로 이루어진 복합재료이므로 전장에서 제시된 모델인 DDM, SCM, DS 같은 외접내포물에 대한 식을 사용하여 각 기법을 사용하여 구한 유효탄성텐서로부터 경량기포콘크리트의 탄성계수 추정식을 수식화 한다.

일반적으로 평균화된 체적탄성계수 \bar{K} 와 전단탄성계수 $\bar{\mu}$ 를 사용하는 것이 수식화에 편리하다. 또한 기본등방성텐서 E^I, E^2 를 식(24)와 같이 정의하고, 체적탄성계수와 전단탄성계수를 이용하면 탄성텐서는 아래 식(25)와 같이 정리되고, 스칼라의 연산이 가능하다.¹⁰⁾

$$E^I = \frac{1}{3} I^{(2)} \otimes I^{(2)} = \frac{1}{3} I^{(4)} \quad (24 \text{ a})$$

$$E^2 = -\frac{1}{3} I^{(4)} + I^{(4s)} \quad (24 \text{ b})$$

$$\bar{C} = 3\bar{K}E^I + 2\bar{\mu}E^2 \quad (25)$$

이때, I^n 는 4th-order unit tensor이다. 즉, $I_{ijkl}^{(4)} = \delta_{ij}\delta_{kl}$ 가 된다.

내포물의 형상을 구형으로 가정하고, 등방성 결합재의 포아송비를 ν 라고 두면 Eshelby tensors는 아래와 같다.

$$S = s_1 E^I + s_2 E^2 \quad (26 \text{ a})$$

여기서,

$$s_1 = \frac{1 + \nu}{3(1 + \nu)}, \quad s_2 = \frac{2(4 - 5\nu)}{15(1 - \nu)} \quad (26 \text{ b})$$

4.1 DDM에 의한 탄성계수 추정식

내포물의 종류가 하나 뿐이므로, 두가지 하중조건에 의한 탄성텐서는 식(14 a, b)와 같다. 식(9)의 집중텐서와 Eshelby tensor식 (26)을 식(14)에 대입하고, 내포물의 체적탄성계수와 전단탄성계수에 '0'

을 대입하면 DDM기법에 의한 유효탄성텐서는 식 (27)과 식(28)로서 구할 수 있다.

즉, 거시변형률 ϵ^i 가 주어진 경우의 유효탄성텐서 \bar{C}^{DDF} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\bar{C}^{DDF} &= 3\bar{K}^{DDF} E^1 + 2\bar{\mu}^{DDF} E^1 \\ &= 3K^M \{1 - f(1 - s_1)^{-1}\} E^1 \\ &\quad + 2\mu^M \{1 - f(1 - s_2)^{-1}\} E^2\end{aligned}\quad (27)$$

여기서, K^M, μ^M : 결합재의 탄성치
 s_1, s_2 : Eshelby tensor의 계수

또한, 거시변형률 σ^i 가 주어진 경우의 유효연성텐서 $\bar{C}^{DD\Sigma}$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\bar{C}^{DD\Sigma} &= \frac{1}{3\bar{K}^{DD\Sigma}} E^1 + \frac{1}{2\bar{\mu}^{DD\Sigma}} E^1 \\ &= \frac{1}{3K^M} \{1 + f(1 - s_1)^{-1}\} E^1 \\ &\quad + \frac{1}{2\mu^M} \{1 + f(1 - s_2)^{-1}\} E^2\end{aligned}\quad (28)$$

(27)과 식(28)로 부터, 유효체적탄성계수와 유효 전단탄성계수를 구할 수 있고, 최종적으로 콘크리트의 유효탄성계수(effective Young's modulus)는 식(29)에 유효체적탄성계수와 유효전단탄성계수를 대입함으로써 얻을 수 있다.

$$\bar{E} = \frac{9\bar{K}\bar{\mu}}{3\bar{K} + \bar{\mu}}\quad (29)$$

4.2 SCM에 의한 탄성계수 추정식

SCM에 의한 추정식은 DDM의 경우와 마찬가지로 식(17)에 식(9)의 집중텐서와 Eshelby tensor 식(26)을 대입함으로써 얻을 수 있다. 이때도 내포물의 탄성텐서는 모두 '0'이다. SCM에 의한 유효탄성텐서는 식(30)과 같다.

$$\begin{aligned}\bar{C}^{SCM} &= 3\bar{K}^{SCM} E^1 + 2\bar{\mu}^{SCM} E^1 \\ &= 3K^M \{1 - f(1 - \bar{s}_1^{SCM})^{-1}\} E^1 \\ &\quad + 2\mu^M \{1 - f(1 - \bar{s}_2^{SCM})^{-1}\} E^2\end{aligned}\quad (30)$$

이때, \bar{s}_1^{SCM} 과 \bar{s}_2^{SCM} 는 식(29 b)의 ν 대신에 $\bar{\nu}^{SCM}$ 를 대입하면 되고, $\bar{\nu}^{SCM}$ 은 다음 식(31)로 부터 유효탄성텐서의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\bar{\nu}^{SCM} = \frac{3\bar{K} - 2\bar{\mu}}{2(3\bar{K} + \bar{\mu})}\quad (31)$$

이상의 식으로 부터, 유효체적탄성계수와 유효전단탄성계수를 구하여 식(29)에 대입하면 SCM에 의한 콘크리트의 탄성계수를 추정할 수 있다.

4.3 미분법에 의한 탄성계수 추정식

미분법에 의한 탄성계수 추정식은 식(22)에 내포물의 탄성텐서로 '0'을 대입하면, 다음 식(32)와 같은 유효탄성텐서에 대한 미분방정식을 얻게 된다.

$$\frac{d}{df} \bar{C}^{DS}(f) = -\frac{1}{1-f} \bar{C}^{DS}(f); (\bar{A}^{DS} - \bar{S}^{DS})^{-1}\quad (32)$$

이 미분방정식을 풀기 위한 초기조건은 다음 식 (33)과 같다.

$$\begin{aligned}\bar{C}^{DS}(f) &= \bar{C}^M(f) \\ &= 3K^M(f) E^1 + 2\mu^M(f) E^2\end{aligned}\quad (33)$$

식(32)에 집중텐서와 Eshelby tensor를 대입하고 정리하면, 다음 식(34)과 같은 미분방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\frac{d}{df} \bar{K}^{DS} &= -\frac{1}{1-f} \bar{K}^{DS} (1 - \bar{s}_1^{DS})^{-1} \\ \frac{d}{df} \bar{\mu}^{DS} &= -\frac{1}{1-f} \bar{\mu}^{DS} (1 - \bar{s}_2^{DS})^{-1}\end{aligned}\quad (34)$$

$$\bar{K}^{DS}(f) = K^M(f), \bar{\mu}^{DS}(f) = \mu^M(f)$$

이때 \bar{s}^{DS} 는 SCM의 경우와 마찬가지로 식 (26 b)의 ν 대신 $\bar{\nu}^{DS}$ 를 대입하여 구하고 $\bar{\nu}^{DS}$ 는 식(31)로써 얻을 수 있다.

4.4 추정결과의 비교

경량기포콘크리트의 탄성계수를 DDM, SCM, DS 등의 평균화기법을 사용하여 식 (27), (28), (30), (34)와 같이 도출하였다. 먼저 각 기법에 의해 구한 유효탄성계수의 경량기포콘크리트의 기포율에 따른 경향성을 보기 위하여 유효탄성계수를 결합재의 탄성계수로 나누어서 정규화시켜 표시하면 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서 보면 DDE와 SCM의 경우 기포율이 0.5인 경우에 탄성계수가 '0'이 되었고, DDΣ의 경우 기포율이 100%인 경우에도 탄성계수가 '0'이 되지 않는 부적절한 결과들을 산출하였다. 즉, DDM과 SCM은 기포율이 50% 이상인 경량기포콘크리트의

탄성계수 추정에는 적용할 수 없고, DS만이 사용가능한 평균화기법임을 보여준다.

5. 비교분석

이상에서 도출된 경량기포콘크리트의 탄성계수 추

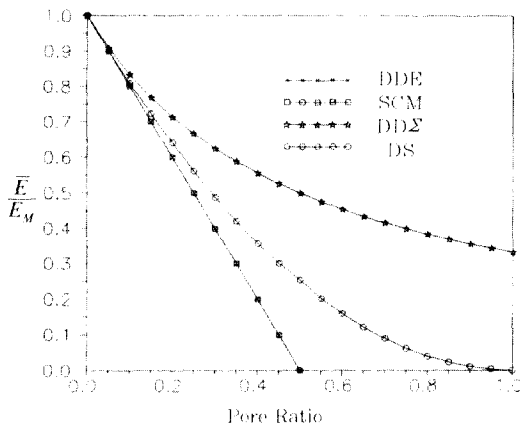


Fig. 4 Normalized effective elastic modulus w.r.t pore ratio

정식에 실제의 수치를 대입하여 실험자료 및 기존의 추정식 결과와 비교하여 추정식의 타당성을 검증하고자 한다. 비교를 위해 경량기포콘크리트의 실험결과²⁾를 이용하였고, 타연구의 추정식은 비교적 그 정확성을 인정받은 Counto 및 Hansen의 추정식을 사용하였다.^{3),4)}

5.1 수정기법의 도입

위에서 탄성계수 추정식을 도출하기 위하여 사용된 각 평균화기법은 결합재내에 타원형의 독립내포물이 존재하는 RVE를 대상으로 하였다. 그러나 Fig. 5에서 보듯이 실제로는 기포율이 높아지면서 경량기포콘크리트내의 기포들이 서로 연결되므로 추정식은 실제보다 탄성계수를 크게 추정하게 된다. 따라서 Hansen은 기포율의 증가로 인하여 기포가 결합되면서 전체 복합재료의 탄성계수가 줄어드는 것을 기포의 결합정도에 비례한다고 보고, 아래와 같은 상수 k 를 도입하여 탄성계수를 보정하였다.

$$E_{actual} = kE_{calculated} \quad (35)$$

이때, Hansen은 k 값을 결합재의 체적함유율

$(1-f)$ 와 같다고 가정하고, 실험값과 비교하여 이 가정이 잘 맞음을 보였다. 본 연구에서도 Hansen의 연구결과를 이용하여 DS에 의한 탄성계수 추정식에 k 값을 곱하여 수정한 수정추정식(DS-2)을 도출하였다.

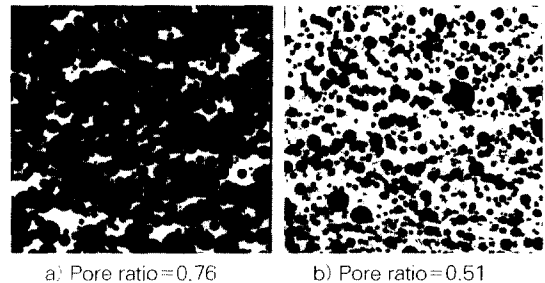


Fig. 5 Section of lightweight foamed concrete w.r.t pore ratio

5.2 실험결과와의 비교

경량기포콘크리트의 실험결과²⁾로부터 얻어진 경량기포콘크리트를 이루는 각 구성성분의 탄성치는 다음 Table 1과 같다. 여기서 HCP의 탄성치는 기포율 f 가 0.3인 경우의 실험치이고, 이를 초기조건으로 하여 식(34)의 미분방정식을 풀어서 유효탄성계수를 추정하였다.

Table 1 Elastic properties of constituents of lightweight foamed concrete (Unit : MPa)

Properties Constituents	Poisson Ratio	Young's Modulus	Bulk Modulus	Shear Modulus
HCP	0.2	10486.0	5825.6	4389.17
Pore	0	0	0	0

DS 기법을 수정없이 적용한 것과, Hansen의 연구결과를 이용하여 DS기법을 수정하여 적용한 것을 각각 구하면 Fig. 6과 같고, 이를 표로 정리하면 Table 2와 같다.

추정결과를 실험값과 비교할 때 DS에 의한 추정 결과는 전체적으로 2배이상 실험결과와 차이를 보였다. 그러나 DS-2에 의한 추정결과는 최고 9%, 평균 4%정도의 차이만을 보였다. 이상에서 보듯이 경량기포콘크리트의 탄성계수는 기포의 연결정도에 크게 영향을 받게되고, 이것은 기포의 연결정도를 고려한 수정 미분법(DS-2)에 의하여 추정이 가능함을 알 수 있다.

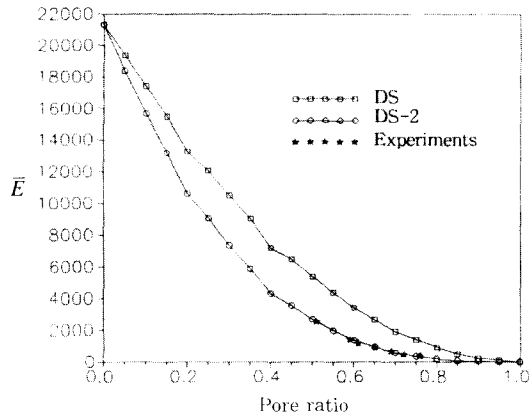


Fig. 6 Comparison of estimated results by DS and DS-2 with experimental results

Table 2 Comparison of estimated elastic moduli of light-weight foamed concrete (Unit : MPa)

Methods	Experiment	DS	DS-2
Pore ratio 0.51	2521.1	5160	2530
0.59	1407.0	3560	1460
0.61	1169.4	3280	1280
0.65	912.3	2660	930
0.69	665.6	2100	650
0.72	462.9	1680	470
0.76	365.5	1415	340

5.3 타 연구결과와의 비교

본 연구결과를 검증하기 위해 기존의 타 연구결과와 비교한다. 여기서 비교의 대상이 된 타 연구의 추정식은 비교적 그 정확성을 인정받은 Counto 및 Hansen의 추정식을 사용한다.

Counto 및 Hansen에 의하여 제시된 추정식은 각각 다음 식(36), (37)과 같다. 다만 Hansen의 추정식에서 내포물이 기포인 경우에 기포가 연속적인 것과 연속적이지 않은 것을 나누어서 고려하였는데, 연속적이지 않은 경우는 식(37)을 그냥 사용하지만, 연속적인 경우 이를 고려할 수 있는 상수인 k 를 하여 식(35)와 같이 계산하였다. 일반적으로 이 상수는 앞 절에서 밝힌대로 결합재의 체적함유율에 비례하므로, 기포가 연속적인 경우의 추정식인 식(37)의 오른쪽항에 결합재의 체적함유율(V_1)을 한번더 곱하여서 탄성계수를 추정하게 된다.

여기서, Counto의 제안식은 식(36)와 같다.

$$E = \left[\frac{1 - \sqrt{V_2}}{E_1} + \frac{1}{\left\{ \frac{1 - \sqrt{V_2}}{\sqrt{V_2}} \right\} E_1 + E_2} \right]^{-1} \quad (36)$$

또한, Hansen의 제안식 다음 식(37)과 같다.

$$\frac{E}{1 - 2\nu} = \frac{E_1}{1 - 2\nu} \quad (37)$$

$$\left[\frac{(1 - V_2) \frac{E_1}{1 - 2\nu_1} + \left\{ \frac{1 + \nu_1}{2(1 - 2\nu_1)} + V_2 \right\} \frac{E_2}{1 - 2\nu_2}}{\left\{ 1 + \frac{1 + \nu_1}{2(1 - 2\nu_1)} V_2 \right\} \frac{E_1}{1 - 2\nu_1} + \frac{1 + \nu_1}{2(1 - 2\nu_1)} (1 - V_2) \frac{E_2}{1 - 2\nu_2}} \right]$$

여기서,

V_1, V_2 : 결합재와 내포물의 체적함유율

ν_1, ν_2 : 결합재와 내포물의 포아송비

E, ν : 복합체의 탄성계수와 포아송비

본 연구의 추정식과 다른 연구자에 의한 추정식에 Table 1의 수치를 대입하여 실험결과와 함께 정리하면 Table 3과 같다. 여기서 Hansen의 A방법은 기포가 연속적이지 않은 경우의 식을 사용한 것이고, B방법은 기포가 연속적인 경우의 식을 사용한 것이다.

추정결과를 보면 DS에 의한 추정식이 Counto의 추정식이나 Hansen의 A방법에 의한 추정식 보다 훨씬 더 정확하게 결과를 예측하였다. 다만, 기포율이 증가할수록 기포가 서로 결합하면서 연속적인 기포를 형성하므로, 결합재내에 원형의 기포가 독립적으로 존재하는 것으로 모델링한 DS의 추정결과는 실제와 비교적 큰 차이를 보였다. 기포의 연속됨을 고려한 Hansen의 B방법이 DS보다 더 나은 결과를 산출하였지만 여전히 실험결과치와는 큰 차이를 보였다. 한편 미시역학적인 DS기법에 Hansen의 연구결과를 집목한 수정미분법(DS-2)을 사용하여 추정한 결과는 실험치와 최고 10%, 평균 4% 정도의 오

Table 3 Comparison of estimated results using various estimation method (Unit : MPa)

Methods	Experiment	This Study		Counto	Hansen	
		DS	DS-2		A	B
Pore ratio 0.51	2521.7	5160	2530	7654.2	6915.2	3388.4
0.59	1407.0	3560	1460	6012.4	5495.0	2253.0
0.61	1169.4	3280	1280	5629.1	5162.1	2013.2
0.65	912.3	2660	930	4893.9	4520.3	1582.1
0.69	665.6	2100	650	4199.3	3908.9	1211.8
0.72	462.9	1680	470	3703.9	2469.1	971.3
0.76	365.5	1415	340	3076.2	2905.9	697.4

차만을 보이는 정확한 결과를 산출하였다.

6. 결론

미시역학을 이용하여 경량기포콘크리트의 탄성계수의 추정치에 관한 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 수화시멘트풀과 기포로 구성된 경량기포콘크리트의 탄성계수 추정식을 미분법과 Hansen의 수정기법을 적용하여 제안하였다.

2. 경량기포콘크리트에 대한 본 연구의 탄성 계수 추정치를 실험치와 비교한 결과 미분법을 수정없이 적용한 경우 2배이상 차이를 보였지만, 기포의 연결을 고려하여 수정미분법으로 추정한 결과는 실제와 최고 10% 정도, 평균 4% 정도의 오차만을 보였다.

3. 동일한 조건하에서, 본 연구의 결과를 실험결과 및 타연구의 결과와 비교분석한 결과, 본 연구에서도 출한 탄성계수 추정식이 상당한 신뢰성이 입증되었으므로, 본 논문에서 제안된 추정식은 경량기포콘크리트의 탄성계수 추정치에 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Watson, K. L., Eden, N. B. and Farrant, J. R., "The Effect of Admixture on the Relationship between Compressive Strength and Density of Autoclaved Aerated Concrete made from Slate

Powder and Portland Cement", *Silicates Industrials*, Vol. 43, 1978, pp. 57 ~ 64.
2. Short, A. and Kinniburgh, W., *Lightweight Concrete*, 3rd Ed., Applied Science Publishers Ltd., London, 1978, pp. 1 ~ 14.
3. Nemat-Nasser, S. and Hori, M., *Elastic Solids with Microdefects*, in *Micromechanics and Inhomogeneity - The Mura's 65th Anniversary Volume*, New York, 1990, pp. 297 ~ 320.
4. Eshelby, J. D., "The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion and Related Problems", *Proc. of Roy. Soc. London*, Vol. A241, 1957, pp. 376 ~ 396.
5. Nemat-Nasser, S. and Hori, M., *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*, North-Holland, 1993, pp. 19 ~ 35.
6. 유동우, 조호진, 송하원, 변근주, "콘크리트 탄성계수의 미시역학적 추정", 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제 7 권 2호, 1995, pp. 345 ~ 349.
7. 박상순, 송하원, 변근주 "고분자기포재를 이용한 경량기포 콘크리트의 역학적 특성(II)", 콘크리트학회지 제9권 1호, 1997, pp. 173 ~ 181.
8. Counto, U. J., "The Effect of Elastic Modulus of the Aggregate on the Elastic Modulus, Creep and Creep Recovery of Concrete", *Mag. of Conc. Res.*, Vol. 16, No. 48, 1964, pp. 129 ~ 138.
9. Hansen, T. C., "Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar, and Cement Paste", *J. of ACI*, Vol. 62, No. 2, 1965, pp. 193 ~ 215.

요 약

경량기포콘크리트란 시멘트슬러리 속에 미리 생성된 기포를 혼합시켜 양생시킴으로써 동일한 체적의 보통콘크리트보다 가볍게 만든 콘크리트를 의미한다. 따라서 경량기포콘크리트는 시멘트풀 결합재내에 기포가 무작위로 분포된 복합재료이다. 본 연구의 목적은 이러한 경량기포콘크리트의 탄성계수 추정식을 미시역학적 이론을 바탕으로 추정하는데 있다. 이를 위해 본 논문에서는 미시역학적인 미분법에 Hansen의 수정기법을 적용한 수정미분법을 사용하여 경량기포콘크리트의 탄성계수 추정식을 제안하였다. 제안된 추정식을 사용하여 얻어진 결과는 실험결과와 잘 일치하였고 기존의 어떤 추정식보다도 우수한 결과를 보였다.

(접수일자 : 1997. 4. 9)