

콘크리트 탄성계수 추정의 미시역학적 모델

Micromechanical Models for the Evaluation of Elastic Moduli of Concretes

조호진*

Cho, Ho-Jin

송하원**

Song, Ha-Won

변근주***

Byun, Keun-Joo

Abstract

The prediction of effective properties of heterogeneous material like concrete is of primary importance in design or analysis. This paper is about micromechanics-based evaluation of elastic moduli of concretes considering composite material behavior.

In this study, micromechanics-based schemes for the effective elastic moduli of the lightweight foamed concrete and the normal concrete are proposed based on averaging techniques using a single-layered inclusion model and a multi-phase and multi-layered inclusion model, respectively. For the verification's sake, elastic moduli evaluated in this study are compared with experimental data and results by existing formula.

1. 서 론

콘크리트의 탄성계수는 콘크리트 구조물의 거동을 파악하기 위한 기본적인 계수이다. 그러나 콘크리트는 서로 다른 특성과 함유량을 가진 구성물질로 이루어진 복합재료이므로 이의 탄성계수를 정확히 추정하는 것은 어렵다.

현재까지 탄성계수를 추정하는 몇 가지의 실험식을 ACI, CEB-FIP 및 각국의 시방서 등에서 제안하고 있지만, 대부분 압축강도나 단위중량을 이용한 식들이다. 이러한 방법들을 사용하여 탄성계수를 추정하는 것은 간단하나, 동일한 압축강도를 가지고 있더라도 각기 다른 골재로 이루어진 콘크리트의 경우, 이 콘크리트들의 탄성계수가 실제로 서로 다르지만 이 추정식에 의해서는 동일하게 구해질 수도

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 석사

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

있다. 또, 최근에 여러 특수 목적을 위한 콘크리트의 개발 및 사용이 빈번해짐으로서, 기존의 보통 포틀랜드시멘트 콘크리트에 적용되던 식들을 사용할 수 없는 경우도 많다. 특히 고강도 콘크리트의 경우 탄성계수에 큰 영향을 끼치는 부분인 천이영역이 실리카흙의 사용으로 줄어들게 되므로 탄성계수가 전체적으로 크게 되지만, 기존의 탄성계수 추정식들은 이를 고려하지 못하고 있다. 따라서, 배합비의 변화나 특수한 재료의 사용으로 인하여 콘크리트의 구조가 크게 바뀐 경우에 정확히 탄성계수를 추정할 수 있는 방법이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 경량기포콘크리트와 보통콘크리트를 대상으로 하여, 경량기포콘크리트의 경우 수화시멘트풀과 공극을 기본 구성성분으로, 보통콘크리트의 경우 수화시멘트풀, 골재, 그리고 모르타와 골재의 경계면인 천이영역(interfacial transition zone : ITZ)을 기본 구성

성분으로 하여 구성된 복합재료로 가정하여 각 구성물의 물리적특성과 분포특성, 그리고 체적함유율을 고려하여 경량기포콘크리트와 보통콘크리트의 탄성계수를 추정하는 식을 도출하는데 그 목적이 있다.

2. 균질화를 통한 유효물성계수

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. 즉, 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.

탄성텐서(elasticity tensor) C 와 연성텐서(compliance tensor) D 를 가지는 탄성모재(matrix) M 속에 C 와 D 를 가진 탄성내포물(inclusion) $\Omega^a(a=1, 2, \dots, n)$ 가 내재된 RVE의 경우, RVE의 전체거동을 특징지우는 유효물성을 \bar{C} 와 \bar{D} 라고 표기하면, 균일표면력이 경계조건으로 주어진 경우와 선형변위가 경계조건으로 주어진 각각의 경우에 대하여 RVE의 유효물성은 약간의 수학적인 전개 를 통하여 각각 식(1), 식(2)와 같이 구해진다.⁽¹⁾

$$(\bar{D} - D) : \sigma^0 = \sum_{a=1}^n f_a (D^a - D) : \bar{\sigma}^a \quad (1) \quad (\bar{C} - C) : \varepsilon^0 = \sum_{a=1}^n f_a (C^a - C) : \bar{\varepsilon}^a \quad (2)$$

여기서, f_a 는 Ω_a / V 로서 a 개의 내포물의 체적함유율이고, ':'는 double dot product이다.

3. 콘크리트의 유효탄성텐서

식(1, 2)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 어렵고, 또 구성물의 수가 적더라도 그 구조가 복잡하다면 RVE내의 물리량들이 아주 복잡하게 분포되므로 구성물들의 물리량의 상태를 정확히 알기는 사실상 불가능하다. 따라서 어떤 방법으로든지 구성물의 물리량의 상태를 구하기 위하여 가정이 필요하며, 이러한 가정에 따라서 여러 가지 평균화 기법(averaging methods)이 생기게 된다.

경량기포콘크리트는 수화시멘트풀을 모재(matrix)로하여 기포가 내포물(inclusion)로서 내재되어 있는 외겹내포물이므로 Eshelby의 연구결과를 이용한 평균화기법을 사용하여 유효탄성계수를 추정할 수 있다. 또, 보통콘크리트는 골재의 주변부를 친이영역이 둘러싸고, 이것이 다시 수화시멘트풀에 의하여 둘러싸인 삼중의 내포물이 무한체내에 존재하는 복합재료이므로, 콘크리트의 유효탄성계수를 추정하기 위해선 다중내포물모델이 사용되는데 이는 Eshelby의 연구결과를 일반화시킨 평균화기법을 사용하여 구할 수 있다.

3.1 경량기포콘크리트의 유효탄성텐서

경량기포콘크리트는 무한한 결합체내에 단 하나의 탄성특질을 가지는 내포물만이 내재하는 외겹내포물(single-layered inclusion) 복합체이다. 이러한 복합체는 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.

여기서, 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 되지않는 결과를 산출한다. 따라서 이를 보완할 수 있는 평균화 기법인 미분법(differential scheme : DS)이 사용된다.

DS에 의한 유효탄성텐서 도출방법은 다음의 개념에서 부터 유도되었다. 균질 결합체로만 이루어진 RVE에 작은 체적함유율인 δf 의 내포물이 들어간다면, 이 RVE의 유효탄성텐서 \bar{C}^1 은 DDM을 사용하여 구할 수 있다. 이 추정된 유효탄성텐서를 지닌 새로운 균질결합체 \bar{C}^1 에 다시 δf 만큼의 내포물이 추가된다면, 이 새로운 RVE의 유효탄성텐서 \bar{C}^2 도 DDM을 사용하여 도출이 가능하다. 이러한 과정을 수학적으로 나타내면 RVE의 유효탄성텐서의 미분방정식을 내포물의 체적함유율 f 의 함수로서 유도할 수 있다. 이 미분방정식을 풀면, 임의의 체적함유율 f 에 대한 유효탄성텐서식을 얻게된다.⁽²⁾

결합체의 탄성텐서가 C^I 이고, 이 결합체속에 탄성텐서가 C^I 인 한종류의 내포물 Ω_1 만을 가진 RVE에서, 내포물의 체적함유율은 f 인 경우의 유효탄성텐서에 대한 미분방정식은 식(3)과 같고, 이 미분방정식을 풀기 위한 초기조건은 식(4)와 같다.

$$\frac{d}{df_i} \bar{C}^{DS}(f_i) = \frac{1}{1-f_i} \{C^I - \bar{C}^{DS}(f_i)\} \bar{A}^{DS} : (\bar{A}^{DS} - \bar{S}^{DS})^{-1} \quad (3a)$$

$$\bar{A}^{DS} = (\bar{C}^{DS} - C^\Omega)^{-1} : \bar{C}^{DS} \quad (3b)$$

여기서, \bar{A}^{DS} 는 집중텐서(concentration tensor)이며 적합조건으로부터 식(4b)로 구할 수 있고, \bar{S}^{DS} 는 Eshelby텐서이다.

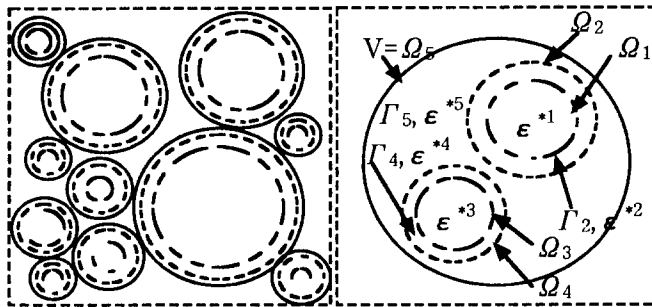
$$\bar{C}^{DS}(f) = C^M(f) \quad (4)$$

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

3.2 보통콘크리트의 유효탄성텐서

보통콘크리트는 일반적으로 수화시멘트풀(HCP)과 골재로 이루어진 이상(二相)의 물질로서 인식되어 왔다. 그러나 최근에는 골재와 HCP 사이의 천이영역(interfacial transition zone : ITZ)이 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향이 크다는 것이 많은 관찰을 통하여 알려짐으로서 HCP, 골재, 그리고 천이영역으로 구성된 삼상(三相)의 물질로 고려되고 있다. 특히 천이영역은 HCP에 비하여 공극이 많은 구조를 가지므로 탄성계수에 미치는 영향은 매우 크다고 할 수 있다.

천이영역을 고려한 콘크리트는 다중의 복합체이므로 환형영역이 연속적으로 배치된 RVE를 가지고, 각 환형영역마다 다른 eigenstrain를 가지게 된다. 따라서 각 영역에서의 변동되는 변형률의 양은 Eshelby의 연구결과를 일반화시킴으로서 표시할 수 있고, 적합조건으로부터 각 영역에서의 eigenstrain을 구할 수 있다. 따라서 콘크리트의 유효탄성텐서는 그림 1과 같은 이원삼중내포물모델의 RVE로부터 구할 수 있다.



a) 실제 복합체의 미시구조 b) 이원삼중내포물 모델의 RVE

그림 1 이원삼중내포물 모델의 RVE

무한체에 ϵ^∞ 가 작용하는 경우, α 가 1, 3인 경우는 원형영역이고, 2, 4, 5인 경우는 환형영역인 것을 감안하여 다음 식(5)의 적합조건을 적용한다.

$$C^\alpha : (\epsilon^\infty + \langle \epsilon^d \rangle_\alpha) = C : (\epsilon^\infty + \langle \epsilon^d \rangle_\alpha - \bar{\epsilon}^{*d}) \quad \text{for } \alpha = 1, \dots, n \quad (5)$$

먼저 각 영역의 체적함유율을 아래와 같이 정의한다.

$$f_\alpha = \frac{\Omega_\alpha}{V} \quad (\alpha=1\sim 5), \quad f_{\Gamma\alpha} = \frac{\Gamma_\alpha}{V} \quad (\alpha=2,4,5) \quad (6)$$

각 원형영역의 변동되는 변형률의 평균값은 일반화된 Eshelby의 결과로부터 아래의 식들로 정리될 수 있다.

$$\langle \epsilon^d \rangle_1 = S^1 : \bar{\epsilon}^{*1} + \frac{1}{1-f_1} (S^V - S^1) : \left\{ f_3 \bar{\epsilon}^{*3} + \sum_{\alpha=2,4,5} f_{\Gamma\alpha} \bar{\epsilon}^{*\alpha} \right\} \quad (7)$$

$$\langle \epsilon^d \rangle_2 = S^2 : \left\{ \frac{f_1}{f_2} \bar{\epsilon}^{*1} + \frac{f_{\Gamma 2}}{f_2} \bar{\epsilon}^{*2} \right\} + \frac{1}{1-f_2} (S^V - S^2) : \left\{ f_3 \bar{\epsilon}^{*3} + \sum_{\beta=4,5} f_{\Gamma\beta} \bar{\epsilon}^{*\beta} \right\} \quad (8)$$

$$\langle \epsilon^d \rangle_5 = S^V : \left\{ \sum_{\alpha=1,3} f_{\Gamma\alpha} \bar{\epsilon}^{*\alpha} + \sum_{\alpha=2,4} f_{\Gamma\alpha} \bar{\epsilon}^{*\alpha} + (1 - \sum_{\alpha=1,3} f_\alpha - \sum_{\alpha=2,4} f_{\Gamma\alpha}) \bar{\epsilon}^{*5} \right\} \quad (9)$$

여기서, $\langle \epsilon^d \rangle_3$, $\langle \epsilon^d \rangle_4$ 는 $\langle \epsilon^d \rangle_1$, $\langle \epsilon^d \rangle_2$ 와 같은 관계이므로 쉽게 구할 수 있다.

환형영역의 경우 식(10)로부터 변동되는 변형률의 평균값을 구할 수 있다.

$$\langle \epsilon^d \rangle_{\alpha'} = \frac{1}{f_\alpha - f_{\alpha-1}} (f_\alpha \langle \epsilon^d \rangle_\alpha - f_{\alpha-1} \langle \epsilon^d \rangle_{\alpha-1}) \quad (10)$$

적합조건을 사용하면, 아주 복잡한 5개의 텐서 연립방정식을 얻게 된다. 그러나 모든 내포물이 구형인 경우, Eshelby tensor(S)가 같아지므로 어렵지 않게 각 영역의 평균 eigenstrain을 구할 수 있다. 따라서 이원삼중내포물모델에 의한 유효탄성텐서 \bar{C}^{2T} 는 아래 식(11)와 같다.⁽³⁾

$$\bar{C}^{2T} = C : \{ I^{(4s)} + (S - I^{(4s)}) : A \} : \{ I^{(4s)} + S : A \}^{-1} \quad (11)$$

$$A = \sum_{\alpha=1,3} f_\alpha (A^\alpha - S)^{-1} + \sum_{\alpha=2,4,5} f_{\Gamma\alpha} (A^\alpha - S)^{-1}, \quad A^\alpha = (C - C^\alpha)^{-1} : C \quad (12)$$

이때, 무한체의 탄성특질을 어떻게 가정하느냐에 따라서 DDM(dilute distribution method)적인 접근방식과 SCM(self-consistent method)적인 접근방식으로 나눌 수 있다. DDM적인 접근방식은 비교적 내포물의 체적함유율이 작은 경우에 적용되며, SCM적인 접근방식은 내포물의 체적함유율이 큰 경우에 일반적으로 사용된다. 본 논문에서는 콘크리트는 내포물인 골재의 체적함유율이 큰 편이므로 SCM적인 접근방식을 사용한다.

4. 탄성계수 추정식의 도출

탄성텐서는 체적탄성텐서(K)와 전단탄성텐서(G)로 나타낼 수 있다. 여기에 식(13)과 같이 기본등방성텐서를 도입하면 텐서량인 유효탄성텐서를 스칼라량인 유효체적탄성계수와 유효전단탄성계수로 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$E^1 = \frac{1}{3}I^{(2)} \otimes I^{(2)} = \frac{1}{3}I^{(4)}, \quad E^2 = -\frac{1}{3}I^{(4)} + I^{(4s)} \quad (13)$$

$$\bar{C} = 3\bar{K}E^1 + 2\bar{\mu}E^2 \quad (14)$$

이때, $I^{(4)}$ 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 tensor도 아래와 같이 기본등방성텐서를 이용하여 표기할 수 있다.

$$S = s_1E^1 + s_2E^2, \quad s_1 = \frac{1+\nu}{3(1+\nu)}, \quad s_2 = \frac{2(4-5\nu)}{15(1-\nu)} \quad (15)$$

4.1 경량기포콘크리트의 유효탄성계수

이상에서 구한 식(3a)의 유효탄성텐서식에 내포물의 탄성텐서로 '0'을 대입하여 정리하면 식(16a)와 같은 유효탄성텐서의 미분방정식을 얻게 된다. 이때, 이 미분방정식을 풀기위한 초기조건은 식(16b)와 같다.

$$\frac{d}{df}\bar{C}^{DS}(f) = -\frac{1}{1-f}\bar{C}^{DS}(f):(\bar{A}^{DS} - \bar{S}^{DS})^{-1} \quad (16a)$$

$$\bar{C}^{DS}(f) = \bar{C}^M(f) = 3K^M(f)E^1 + 2\mu^M(f)E^2 \quad (16b)$$

식(16a)에 집중텐서식(3b)와 Eshelby tensor를 대입하고 단위등방성텐서를 사용하여 정리하면, 다음 식(17)과 같은 미분방정식을 얻는다.

$$\frac{d}{df}\bar{K}^{DS} = -\frac{1}{1-f}\bar{K}^{DS}(1-\bar{s}_1^{DS})^{-1}, \quad \frac{d}{df}\bar{\mu}^{DS} = -\frac{1}{1-f}\bar{\mu}^{DS}(1-\bar{s}_2^{DS})^{-1} \quad (17)$$

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

이때 \bar{s}^{DS} 는 식(15)의 ν 대신 $\bar{\nu}^{DS}$ 를 대입하여 구하여 지고 $\bar{\nu}^{DS}$ 는 식(18)과 같다. 따라서, 유효탄성계수(effective Young's modulus)는 미분방정식으로 부터 구한 유효체적탄성계수와 유효전단탄성계수를 사용하여 다음 식(19)로서 구할 수 있다.

$$\bar{\nu}^{DS} = \frac{3\bar{K}^{DS} - 2\bar{\mu}^{DS}}{2(3\bar{K}^{DS} + \bar{\mu}^{DS})} \quad (18) \quad \bar{E}^{DS} = \frac{9\bar{K}^{DS}\bar{\mu}^{DS}}{3\bar{K}^{DS} + \bar{\mu}^{DS}} \quad (19)$$

4.2 보통콘크리트의 유효탄성계수

이원이중내포물모델을 사용하여 SCM적으로 접근하는 경우 $C = \bar{C}$ 이여야 하므로 식(11)을 만족시키기 위해서 $\bar{A} = 0$ 이여야 한다. 따라서 아래와 같은 연립방정식이 성립된다.

$$f_1 \left\{ \frac{\bar{K}}{\bar{K} - K^1} - \bar{s}_1 \right\}^{-1} + f_2 \left\{ \frac{\bar{K}}{\bar{K} - K^2} - \bar{s}_1 \right\}^{-1} + f_M \left\{ \frac{\bar{K}}{\bar{K} - K^M} - \bar{s}_1 \right\}^{-1} + f_r \left\{ \frac{\bar{K}}{\bar{K} - K^r} - \bar{s}_1 \right\}^{-1} = 0 \quad (20a)$$

$$f_1 \left\{ \frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu} - \mu^1} - \bar{s}_2 \right\}^{-1} + f_2 \left\{ \frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu} - \mu^2} - \bar{s}_2 \right\}^{-1} + f_M \left\{ \frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu} - \mu^M} - \bar{s}_2 \right\}^{-1} + f_r \left\{ \frac{\bar{\mu}}{\bar{\mu} - \mu^r} - \bar{s}_2 \right\}^{-1} = 0 \quad (20b)$$

여기서, f_M 은 결합재의 체적함유율(f_{r_3})이고, f_r 은 환형영역인 천이영역의 체적함유율($f_{r_2} + f_{r_4}$)이 된다.

마찬가지로 유효탄성계수(effective Young's modulus)는 식(20)의 연립방정식으로 부터 구한 유효체적탄성계수와 유효전단탄성계수를 식(19)에 대입하여 구할 수 있다.

5. 추정결과의 비교분석

이상에서 구한 경량기포콘크리트와 보통콘크리트의 탄성계수 추정식에 실제의 수치를 대입하여 결과를 산출하고, 이를 실험결과 및 타연구의 제안식과 비교하였다.

5.1 경량기포콘크리트

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

$$E_{actual} = kE_{calculate} \quad (21)$$

이때, Hansen은 k 값을 결합재의 체적함유율($1-f$)와 같다고 가정하였다. 본 연구에서도 Hansen의 연구결과를 이용하여 미분법에 의한 탄성계수 추정식(DS)에 k 값을 곱하여 수정한 수정추정식(DS-2)을 도출하였다.

본 연구의 결과를 기존의 실험결과⁽⁵⁾와 비교하였고, 비교적 정확성을 인정받는 Hansen의 추정결과⁽⁶⁾ 및 Counto의 추정결과⁽⁷⁾와도 비교하였다. 표 1은 추정식에 대입될 각 구성성분의 탄성치이다.

표 1 경량기포콘크리트 구성성분의 실험적 탄성특성

(Unit : MPa)

Constituents	Properties	Poisson's Ratio (ν)	Young's Modulus(E)	Bulk Modulus(K)	Shear Modulus(μ)
HCP		0.2	10486.0	5825.6	4369.17
Pore		0	0	0	0

표 1의 값들을 추정식에 대입하여 나온 결과값을 실험값과 비교하여 표 2에서 나타내었다. 실험값과 비교할 때 DS에 의한 추정결과는 전체적으로 2배이상 실험결과와 차이를 보였다. 그러나 미시역학의 미분법에 Hansen의 수정기법을 도입한 DS-2에 의한 추정결과는 최고 9%, 평균 4%정도의 차이

만을 보였다. 이상에서 보듯이 경량기포콘크리트의 탄성계수는 기포의 연결정도에 크게 영향을 받게 되고, 이것은 기포의 연결정도를 고려한 수정 미분법에 의하여 추정이 가능함을 알 수 있다. 또, DS-2에 의한 추정결과는 Counto나 Hansen의 추정식에 의한 추정결과 보다 훨씬 더 정확하게 결과를 예측하였다.

표 2 각 추정식의 의한 경량기포콘크리트의 탄성계수 추정값 비교

(Unit : MPa)

Pore Ratio	Methods	Experiment	This Study		Counto	Hansen	
			DS	DS-2		A	B*
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

5.2 보통콘크리트

보통콘크리트의 탄성계수를 이원이중내포물모델을 사용하여 추정한 결과를 Anson과 Newman의 실험결과⁽⁴⁰⁾ 및 Counto의 추정결과, 그리고 Hansen의 추정결과와 비교하였다. 표 3은 대입될 각 구성성분의 탄성특성이고, 표 4는 각 결과를 비교한 것이다.

여기서 천이영역의 탄성특성은 Anson과 Newman이 당시에 실험할 때는 ITZ의 개념이 없었으므로 이를 현대의 이론으로 추정하여 사용한다. 본 연구에서는 ITZ의 강성도를 결합재의 30%로 가정하여 사용하고, 체적함유율은 골재들의 체적함유율의 30%로 가정하였다.⁽⁴³⁾

이상의 결과를 보면, 본연구의 추정결과와 Counto 및 Hansen의 결과가 모두 평균 2~3%정도 실

표 3 이원삼중 내포물 모델에 대입될 각 구성성분의 실험적 탄성특성

(Unit : GPa)

Constituents	Properties	Poisson's Ratio(ν)	Young's Modulus(E)	Bulk Modulus(K)	Shear Modulus(μ)
M : HCP		0.22	12	7.143	4.918
1 : Fine Agg.		0.21	80	45.977	33.058
2 : Coarse Agg.		0.23	69	42.593	28.049
I : ITZ		0.22	3.6	2.143	1.475

표 4 각 추정식에 의한 보통콘크리트의 탄성계수 추정값 비교

(Unit : GPa)

Mixes	Methods	Experiment	This Study	Counto	Hansen
1		34.90	34.30	32.67	33.72
2		34.20	35.95	34.56	35.78
3		35.40	36.96	35.41	36.69
4		36.20	37.40	35.99	37.30
5		38.60	38.80	37.49	38.87
6		39.60	40.32	39.07	40.50

험결과와 차이가 있었다. 결과적으로 보면 세 추정식 모두 비교적 정확하게 탄성계수를 예측한다고 볼 수 있다. 그러나 Hansen과 Counto의 추정식은 천이영역을 고려하지 않았으므로, 천이영역의 변화에 따른 탄성계수의 변화 등을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 천이영역이 감소되어 강성이 증진되는 고강도콘크리트의 탄성계수 추정에는 본 연구의 추정식적용이 보다 합리적임을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 복합재료 거동을 고려한 콘크리트의 탄성계수를 미시역학적으로 추정하는 연구로서, 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트를 이루는 구성성분의 체적함유율, 탄성특성, 구성재료 사이의 상호작용을 고려 하여 탄성계수를 미시역학적으로 추정하는 식들을 도출하였다. 경량기포콘크리트의 경우 외접내포물모델에 의한 미분법을 수정하여 탄성계수 추정식을 유도하였고, 보통콘크리트의 경우 천이영역을 고려한 이원삼중 내포물 모델을 새롭게 개발하여 탄성계수 추정식을 도출하였다.
- 2) 경량기포콘크리트에 대한 본 연구의 탄성계수 추정치는 기포의 연결을 고려하는 경우에 실험결과와 비교할때 평균 4%정도의 오차만을 보였다. 이러한 결과는 기존의 추정식에 비하여 매우 뛰어난 추정결과이다.
- 3) 보통콘크리트에 대한 본 연구의 탄성계수 추정치는 천이영역을 고려한 이원삼중내포물 모델을 사용하여 상호작용을 고려한 경우 실험결과와 평균 3% 정도의 오차를 보였다. 이러한 결과는 기존의 추정식과 비슷한 정도의 정확성을 보인것이지만, 기존의 식들이 콘크리트의 구성성분중 천이영역을 고려하지 않은 반면 본 연구의 추정식은 천이영역을 모델 링하여 구한것이므로 혼화재료의 첨가나 배합의 변화로 인하여 콘크리트의 구조가 보통콘 크리트와 크게 차이가 나는 경우에도 탄성계수의 추정에 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. 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.
2. Nemat-Nasser, S. and Hori, M., Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials, North-Holland, 1993, pp. 19-35.
3. 조호진, "복합재료 거동을 고려한 콘크리트 탄성계수의 미시역학적 추정", 연세대학교 석사논문, 1997, pp. 42~60, pp. 12-18.
4. 유동우, 조호진, 송하원, 변근주, "콘크리트 탄성계수의 미시역학적 추정", 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제 7권 2호, 1995, pp.345-349.
5. 박상순, "고분자기포체를 이용한 경량기포콘크리트의 개발과 역학적 특성", 연세대학교 석사논문, 1996.
6. 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.
7. 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.
8. Anson, M. and Newman, K., "The Effect of Mix Proportions and Method of Testing on Poisson's Ratio for Mortars and Concretes", Mag. of Conc. Res., Vol. 18, No. 56, 1966, pp. 115-130.