

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.5.337>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

다이캐스팅 보의 등가 기공결함을 고려한 강도평가

박 문 식*†

* 한남대학교 기계공학과

Strength Estimation of Die Cast Beams Considering Equivalent Porous Defects

Moon Shik Park*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hannam Univ.

(Received February 15, 2016 ; Revised November 11, 2016 ; Accepted December 28, 2016)

Key Words: Die Casting(다이캐스팅), Porosity(기공률), Mori-Tanaka Method(모리-타나카 법), Plastic Hinge(소성 힌지), Three Point Bent Beam(삼점 굽힘 보), Finite Element Method(유한요소법)

초록: 각종 기공과 같은 결함을 허용하는 다이캐스팅 부품의 강도를 현장 수준에서 평가할 수 있는 이론적 방법을 제안한다. 결함을 갖는 부재의 탄성시험을 통해 강성도를 구하고 이를 결함이 없는 이론적 강성도와 비교함으로써 등가 기공률을 산출한다. 등가 기공률 식은 Eshelby의 함유이론으로부터 유도하였다. 산출된 등가 기공률은 Mori-Tanaka 법을 이용하여 기공결함을 포함하는 재료의 응력-변형률 선도를 그리기 위하여 사용된다. 본 연구에서는 Hollomon 변형경화 모델을 사용하였다. 이 응력-변형률 선도를 이용하면 균일분포의 기공결함을 갖는 다이캐스팅 부재의 강도를 평가할 수 있게 된다. 등가 기공률을 고려한 하나의 이론해로서 직사각형 단면의 다이캐스팅 보에 대한 삼점 굽힘의 탄소성 강도를 소성 힌지의 방법으로 유도하였다.

Abstract: As a shop practice, a strength estimation method for die cast parts is suggested, in which various defects such as pores can be allowed. The equivalent porosity is evaluated by combining the stiffness data from a simple elastic test at the part level during the shop practice and the theoretical stiffness data, which are defect free. A porosity equation is derived from Eshelby's inclusion theory. Then, using the Mori-Tanaka method, the porosity value is used to draw a stress-strain curve for the porous material. In this paper, the Hollomon equation is used to capture the strain hardening effect. This stress-strain curve can be used to estimate the strength of a die cast part with porous defects. An elastoplastic theoretical solution is derived for the three-point bending of a die cast beam by using the plastic hinge method as a reference solution for a part with porous defects.

1. 서 론

알루미늄 합금을 이용하는 다이캐스팅 부품에 대한 수요가 가파르게 증가하고 있다. 이는 성형성과 기계적 성질을 개선한 합금의 개발이 이루어지면서⁽¹⁾ 부품의 일체화 그리고 준정형(near net-shape) 대량 생산에 의한 원가절감 및 에너지 절감을 위한 경량화에 대한 요구에 부응하기 때문이라 할 수 있다. 표면이 우수한 경금속 다이

캐스팅은 구조재로서 뿐만이 아니라 가전제품과 같은 각종 소비재 케이스나 장식대 등의 응용에서도 증가하고 있다. 알루미늄은 리사이클성이 매우 우수한 재료이기 때문에 친환경적이라 할 수 있다.⁽²⁾

구조재로서의 다이캐스팅의 단점은 주조공정에 필연적으로 수반되는 각종 결함들을 포함할 수밖에 없다는 점이다. 결함에는 표면결함, 내부결함, 치수불량이 있으며 내부결함에는 산화물(oxide)과 슬러지(sludge) 같은 계재물(inclusion), 가스에 의한 기공(gaseous pores) 및 수축공(shrinkage pores)

† Corresponding Author, ms.park@hannam.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

등이 있다. 결함의 정도 및 분포는 주형과 게이팅 설계 및 주입방법, 그리고 공정 조건에 따라 다양하게 변화한다. 이러한 결함들은 부재들의 기계적 성질을 떨어트린다.^(3,4)

이러한 다양한 결함들의 정도와 분포 때문에 일반적으로 복합 형상을 하고 있는 다이캐스팅 부재에 대한 강도의 평가는 매우 제한적일 수밖에 없다. 예를 들어 칠(chill)과 라이저(riser)에서 가까울수록 (게이트로부터 먼 곳일수록) 그리고 후속부 일수록 결함의 존재 확률이 높지만 그것을 정확히 규명하여 강도를 평가하기에는 장비와 비용이 과다하게 요구된다. 최근에는 수 마이크로에서부터 수 백 마이크로에 달하는 기공들의 크기와 형태 및 분포에 관한 고찰이 다양하게 연구되고 있다.⁽⁵⁻¹⁰⁾

본 연구에서는 제품을 생산하는 현장에서 시편이 아니라 부재 수준에서 간단한 탄성범위 내에서의 하중-변위 시험을 수행하고 무결(defect free) 이론해와 비교를 통해 결함에 의한 강성도 저하를 등가의 기공률(porosity)로 구하고 이를 이용하여 부재의 강도를 평가할 수 있는 이론적 방법을 제안한다. 그렇게 함으로서 고가의 장비에 의한 결함측정 단계 없이도 현장에서 구비된 상용의 삼점 굽힘 시험기 같은 장비만으로도 부재별, 로트별 강도평가가 가능하게 된다. 단, 부재 내의 결함이 균일하게 분포하며 상대적으로 큰 수축공과 같은 결함은 없다고 가정한다.

제안하는 방법의 대략은 다음과 같다. 부재의 등가 기공률은 미지이다. 먼저 기공률을 고려한 재료의 탄성계수는 금속 기지재와 함유입자의 복합체에 대한 Eshelby의⁽¹¹⁾ 함유이론(inclusion theory) 또는 Mori-Tanaka 법에서⁽¹²⁾ 함유입자를 기공으로 치환하여 이론적으로 유도한다. 마찬가지로 기공률과 항복응력 및 인장강도의 관계식도 유도한다.

이 기공률과 탄성계수의 관계식을 이용하면 삼점 굽힘 시험 등을 통하여 측정된 부재의 하중-변위 선도를 무결 이론해에 의한 하중-변위 선도와 비교를 통해 역으로 미지의 등가 기공률을 구할 수 있게 된다. 여기서 무결 이론해는 보 이론 및 소성헌지 개념에 의해 구하거나 유효요소해석법에 의해 구할 수 있다.

한편 결함이 없는 합금의 응력-변형률 선도는 이미 알고 있으므로 기공률을 고려한 탄성계수와

항복응력, 인장강도를 구하면 새로운 등가 기공률을 고려한 응력-변형률 선도를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 이 선도를 지수방정식의 하나인 Hollomon 경화모델을 사용한다. 새로운 응력-변형률 선도를 이용하면 등가 기공률을 고려한 부재의 강도를 평가할 수 있다.

2. 본 론

2.1 기공률의 산출

마이크로 입자를 함유하고 있는 연속체에 대한 평균장 이론(mean field theory)은⁽¹³⁾ Eshelby의 함유이론을 바탕으로 하여 여러 가지 복합체의 역학적 해석에 광범위하게 사용되고 있고 Mori-Tanaka 법이라고도 불린다. 여기서는 Weng의⁽¹⁴⁾ 정식화를 활용하여 함유입자를 기공으로 대체하는 방법으로 기공률과 탄성계수의 관계식을 유도하고자 한다.

균일하게 분포되어 있는 기공들을 가정하고 체적 기공률을 p 라 할 때 기공률을 고려한 재료의 체적탄성계수(κ_*) 및 전단탄성계수(μ_*)는 다음과 같다.

$$\frac{\kappa_*}{\kappa_1} = 1 + \frac{p(\kappa_2 - \kappa_1)}{(1-p)\alpha_1(\kappa_2 - \kappa_1) + \kappa_1} \quad (1a)$$

$$\frac{\mu_*}{\mu_1} = 1 + \frac{p(\mu_2 - \mu_1)}{(1-p)\beta_1(\mu_2 - \mu_1) + \mu_1} \quad (1b)$$

여기서 하첨자 '1'은 기지인 금속재료를 의미하고 '2'는 함유입자 즉, 기공을 의미한다. 또한 식 (1)에서 α_1 및 β_1 는 다음과 같은 Eshelby 상수이다.^(13,14)

$$\alpha_1 = \frac{(1+\nu_1)}{3(1-\nu_1)} \quad \beta_1 = \frac{2(4-5\nu_1)}{15(1-\nu_1)} \quad (2a,2b)$$

식 (2)에서 포와송의 비가 $\nu_1 = 0.2 \sim 0.4$ 일 때, 식 (1)에서 기공에 대한 극한의 값 $\kappa_2 = 0$ 와 $\mu_2 = 0$ 을 대입하면, 기공을 포함하는 재료의 탄성계수 E_* 는 다음과 같이 구해진다.

$$E_* = \frac{9\kappa_*\mu_*}{3\kappa_* + \mu_*} = \frac{1-p}{1+p} E_1 \quad (3)$$

즉, 기공률은 다음과 같다.

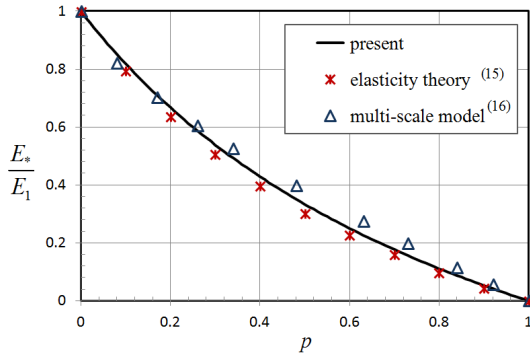


Fig. 1 Equivalent porosity versus elastic modulus by the proposed method ($\nu_1 = 0.3$)

$$p = \frac{1 - E_*/E_1}{1 + E_*/E_1} \quad (4)$$

식 (4)에 의하면 부재의 탄성실험에서 측정된 탄성계수 E_* 와 기공이 없는 원재료의 탄성계수 E_1 을 이용하여 미지의 기공률을 구할 수 있게 된다.

여기서 식 (3) 및 (4)는 본 논문의 가장 중요한 내용인데 이에 대한 검증이 필요하다. 기공률을 고려한 탄성 또는 소성의 이론은 지금도 여러 연구자들에 의해서 다양하게 발표되고 있다. 기공률을 고려한 탄성계수는 최근에 탄성론에 기초한 Federico⁽¹⁵⁾나 Kwon and Park⁽¹⁶⁾의 멀티스케일 모델링에 의한 방법에서도 비슷하게 구해졌다. 본 논문에서 제안한 것과 두 이론의 결과를 Fig. 1에 비교하여 수록하였다. 본 논문의 이론이 탄성론에 의한 결과와 멀티스케일 모델링에 의한 결과의 중간 정도의 결과를 줄을 알 수 있다. 따라서 식 (3) 및 (4)는 매우 유용함을 알 수 있다.

부재에 대한 탄성시험의 하중-변위 곡선에서의 강성도($k = P/w$)를 이용하면 식 (4)는 다음과 같다.

$$p = \frac{1 - k_*/k_1}{1 + k_*/k_1} \quad (5)$$

여기서 k_1 은 기공이 없는 부재에 대한 이론해로부터 얻어지고, k_* 는 다이캐스팅 생산품의 탄성 하중-변위 시험으로부터 얻어진다.

2.2 기공률을 고려한 응력-변형률 선도

기공이 없는 무결재료의 항복응력과 인장강도,

연신율은 알고 있으므로, 기공률을 고려한 항복응력과 인장강도, 연신율을 구한다면 기공재료에 대한 응력-변형률 선도를 산출할 수 있다. 여기서 Weng⁽¹⁴⁾의 정식화를 이용하여 항복응력을 구한다. 기공을 함유하고 있는 재료가 항복하기 시작하는 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_{y*}}{\sigma_{y1}} = \frac{\beta_1(\mu_2 - \mu_1) + \mu_1}{[p + (1 - p)\beta_1](\mu_2 - \mu_1) + \mu_1} \quad (6)$$

식 (6)은 기공에 대한 값 $\mu_2 = 0$ 을 대입하면

$$\frac{\sigma_{y*}}{\sigma_{y1}} = 1 - p \quad (7)$$

와 같이 간단해진다. 즉 기공률을 고려한 항복응력 σ_{y*} 은 혼합물의 법칙(rule of mixture)을 따를 수 있다. 따라서 항복응력은 함유입자로 간주된 기공과 모재로 간주된 기지재료와의 상호작용이 없는 것으로 해석된다. 식 (6)은 가공경화를 겪는 재료에 대해서도 적용되는 식이므로^(13,14) 동일한 해석을 기공률을 고려한 인장강도 값 σ_{u*} 와 연신율 ϵ_{u*} 에도 적용할 수 있다.

$$\frac{\sigma_{u*}}{\sigma_{u1}} = \frac{\epsilon_{u*}}{\epsilon_{u1}} = 1 - p \quad (8)$$

무결재료이거나 기공재료이거나 응력-변형률 선도는 각각의 항복응력, 인장강도, 연신율을 이용하여 커브피팅에 의하여 구할 수 있다. 여기서는 탄성 및 변형경화 소성을 나타낼 수 있는 다음의 Hollomon 방정식을 이용한다.

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon, & \sigma \leq \sigma_y \\ K\epsilon^n, & \sigma > \sigma_y \end{cases} \quad (9)$$

여기서 K 와 n 은 커브피팅에 의하여 구하는 재료 상수이다.

Si-Cu계 알루미늄 중에서 다이캐스팅 산업응용이 많은 A383.0⁽¹⁾ 합금을 예로 들어본다. 이 재료는 ALDC 12종(KS D 6006)과 매우 흡사하다. 먼저 기공결함이 전혀 없는 재료의 물성치는 Fig. 2에 표시하였는데 탄성계수가 71 GPa, 항복응력이 150 Mpa, 인장강도 및 연신율은 각각 321 Mpa, 0.034이다. 이 값들을 이용하면 식 (9)에 피팅하여

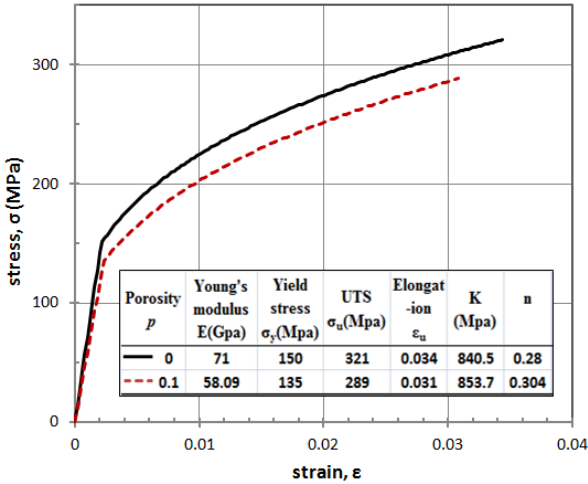


Fig. 2 Construction of stress-strain curves for A383 aluminum: solid line for defect free material, dashed line for porosity of $p=0.1$

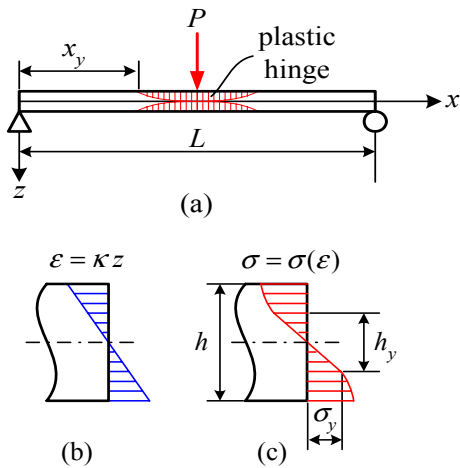


Fig. 3 Three point bending problem (a) plastic hinge concept; (b) strain distribution; (c) stress distribution

$K=840.5$ Mpa 및 $n=0.280$ 을 얻는다. 이제 기공률 $p=0.1$ 을 고려하면 식 (3)에 의해 탄성계수는 58.09 GPa, 식 (7)과 (8)에 의해 항복응력은 135 Mpa, 인장강도 및 연신률은 각각 289 Mpa, 0.031이다. 이 값들을 식 (9)에 피팅하여 $K=853.7$ Mpa 및 $n=0.304$ 를 얻고 응력-변형률 선도를 Fig. 2의 점선과 같이 얻을 수 있다. 여기서 응력과 변형률은 모두 진응력, 진변형률로 표시하였다.

2.3 보 사각 단면의 모멘트-곡률 응답함수

하나의 이론해로서 사각형 단면의 보를 삼점 굽힘 시험하는 경우를 상정하고 본 이론을 적용해 본다. 삼점 굽힘 보 시험에서 보의 강도평가

를 할 때, 보의 일부 항복을 허용하는 경우 하중-변위 거동에 대한 기준해를 이론적으로 구한다면 본 논문에서 제안하는 방법의 기준이 될 수 있다. 일반적으로 문헌에서 강소성 재료 또는 선형경화 재료 모델에 대한 이론해는 제시되어 있으나⁽¹⁷⁾ 식 (9)의 Hollomon 모델에 대한 이론해는 없다. 여기서는 Fig. 3의 폭이 b 이고 두께가 h 인 사각 단면을 갖는 길이 L 의 보에 대한 삼점 굽힘의 이론해를 구하고자 한다. 일반적으로 보가 하중의 작용점인 중앙에서 소성힌지가 형성되므로 보통 소성힌지 방법이라고도 불린다.

먼저 보의 단면은 직사각형이므로 보 휨의 중립축은 도심이 된다. 단면은 평면으로 유지되며 전단변형은 무시하는 공학적 보 이론을 가정한다. 또한 재료의 인장거동과 압축거동은 대칭인 것으로 가정한다. 삼점 굽힘의 거동을 구하기 위해서는 먼저 굽힘 모멘트-곡률의 관계 즉, 응답함수를 알아야 한다. 식 (9)를 이용하면 굽힘 모멘트는,

$$M = \int_A z\sigma(\epsilon)dA \tag{10}$$

$$= 2b \int_0^{h_y/2} z(E\epsilon)dz + 2b \int_{h_y/2}^{h/2} z(K\epsilon^n)dz$$

이다. 여기서 A , z 는 각각 보의 단면적 및 두께방향의 좌표 값을 나타내고 굽힘변형률은 $\epsilon = \kappa z$ 이며 κ 는 보의 중립축의 곡률을, h_y 는 Fig. 2(c)에서 단면의 응력이 항복응력이 되는 위치의 두께를 의미한다. 식 (10)의 첫 번째 항은 단면의 탄성변형 면적에 의한 것을, 두 번째 항은 단면의 소성변형 면적에 의한 것을 나타내며 각각 M_0 , M_1 라 하면 다음과 같이 구해진다.

$$M_0 = \frac{bh_y^3}{12} E\kappa = \frac{bh_y^3}{6h} E\epsilon_s \tag{11a}$$

$$M_1 = \frac{bh^2K}{2(2+n)} \left\{ \epsilon_s^n - \left(\frac{h_y}{h} \right)^2 \epsilon_y^n \right\} \tag{11b}$$

여기서 ϵ_y , ϵ_s 은 각각 단면 두께 h_y 및 h 에서의 변형률 즉 항복점 변형률($\epsilon_y = \sigma_y/E$) 및 표면 변형률($\epsilon_s = \kappa h/2$)이다. 식 (11a)로부터 단면에서 항복이 시작되는 굽힘 모멘트 $M_y = bh^2\sigma_y/6$ 를 얻

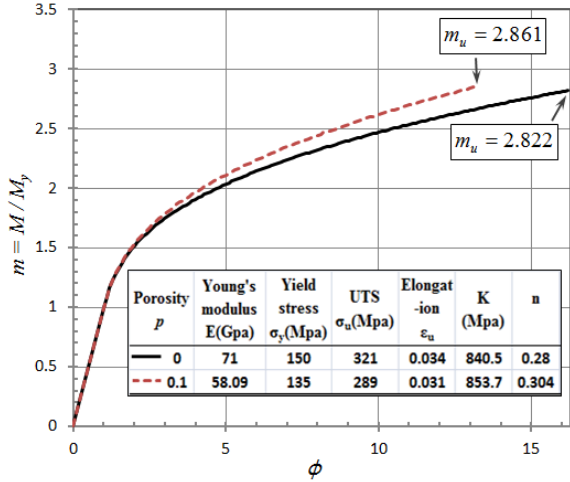


Fig. 4 Non-dimensional $m - \phi$ curves for rectangular A383 aluminum beam cross section

을 수 있으며 무차원 수 $m = M/M_y$ 와 $\phi = h/h_y = \epsilon_s/\epsilon_y = \kappa/\kappa_y$ 를 도입하면 식 (11a), (11b)는

$$m = \begin{cases} \phi, & \phi \leq 1 \\ \left(\frac{1}{\phi}\right)^2 + \frac{3}{2+n} \left\{ \phi^n - \left(\frac{1}{\phi}\right)^2 \right\}, & \phi > 1 \end{cases} \quad (12)$$

와 같이 표시된다. 식 (12)에서 단면의 항복이 시작되는 점은 $m_y = \phi_y = 1$ 이며 표면에서 재료의 연신율에 도달하는 점은 $\phi_u = \epsilon_u/\epsilon_y$ 와 $m_u = m(\phi_u)$ 이다. 이를 Fig. 2의 A383.0 재료에 적용해 보면 기공이 없는 경우 $\phi_u = 16.28$ 및 $m_u = 2.822$ 이며 10% 기공에 대해서는 $\phi_u = 13.34$ 및 $m_u = 2.861$ 이 된다. 식 (12)는 Fig. 4에 표시하였고 이것은 다이캐스팅 보의 탄소성 하중-변형 거동을 구하는데 필요한 모멘트-곡률 응답함수가 된다. 여기서 $\kappa = \phi\kappa_y = 2\phi\epsilon_y/h$ 이다.

한편, 탄성-강소성의 재료의 경우 식 (9)에서 $K = \sigma_y$, $n = 0$ 이므로 식 (12)는 다음과 같다.⁽¹⁷⁾

$$m = \begin{cases} \phi, & \phi \leq 1 \\ \frac{3}{2} - \left(\frac{1}{\phi}\right)^2, & \phi > 1 \end{cases} \quad (13)$$

2.4 삼점 굽힘 보의 하중-변위 및 소성힌지

Fig. 3(a)와 같은 삼점굽힘 보의 하중-변위 거동은 식 (12)의 모멘트-곡률 관계식에서 $\kappa = \kappa(m)$

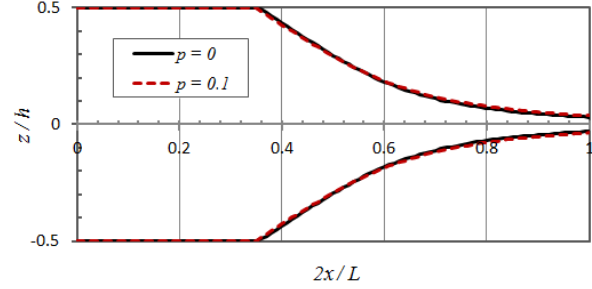


Fig. 5 Formation of plastic hinge for rectangular A383 aluminum beam cross section

을 구하고 보 이론에서 $d^2w/dx^2 = \kappa$ 으로 부터 처짐량을 구함으로써 얻어진다.

$$w = \iint_x \kappa(m) dx dx \quad (13)$$

여기서 굽힘 모멘트는 $m(x) = \bar{m}(2x/L)$ 이며 굽힘 모멘트 \bar{m} 는 보의 중앙 점에서의 굽힘 모멘트 값 $\bar{m} = PL/(4M_y)$ 이다. 식 (13)의 적분은 최대 굽힘 모멘트가 보 단면의 항복 모멘트를 초과할 경우 ($\bar{m} > 1$ or $PL/4 > M_y$)에는 Fig. 3(a)에서 나타난 바와 같이 구간 $0 \leq x < x_y$ 에서는 탄성 응답함수를, 구간 $x_y \leq x \leq L/2$ 에서는 탄소성 응답함수를 이용한다. 한편 보의 단면에서 항복이 시작되는 위치는 $h_y = h/\phi(m)$ 으로부터 얻을 수 있으므로 소성힌지의 형상을 구할 수 있다.

이제 Fig. 2의 A383.0 재료에 적용해 보면 $\bar{m} = m_u$ 일 경우 $x_y = (1/m_u)(L/2)$ 이 되며 소성힌지의 형상은 Fig. 5와 같이 구해지고 보의 중앙 점에서의 하중-변위 곡선은 Fig. 6과 같이 구해진다. Fig. 5에서 소성힌지가 시작되는 위치는 기공이 없는 경우와 10% 기공이 있는 경우 큰 차이가 없으며 대략 $x_y = 0.35(L/2)$ 이다. 여기서 보의 중앙 점에서의 극한 모멘트 $m_u = 2.8$ 에 해당하는 하중은 $P_u = 2.8(4M_y/L)$ 이며 이 때 처짐은 $w_u = 0.0017(L^2/h)$ 이다. 한편 Fig. 6(a)에서 $m = 1$ 일 때는 A383.0 재료에 대한 탄성 보의 처짐량인 $w = (\epsilon_y/6)(L^2/h)$ 과 같게 된다.

여기서 고찰할 수 있는 것은 무결재료와 기공결함 재료가 서로 다른 응력-변형률(Fig. 2) 거동과 모멘트-곡률(Fig. 4) 응답을 가지고 있음에도 불구하고 Fig. 5와 Fig. 6(a)를 통해 보였듯이 거

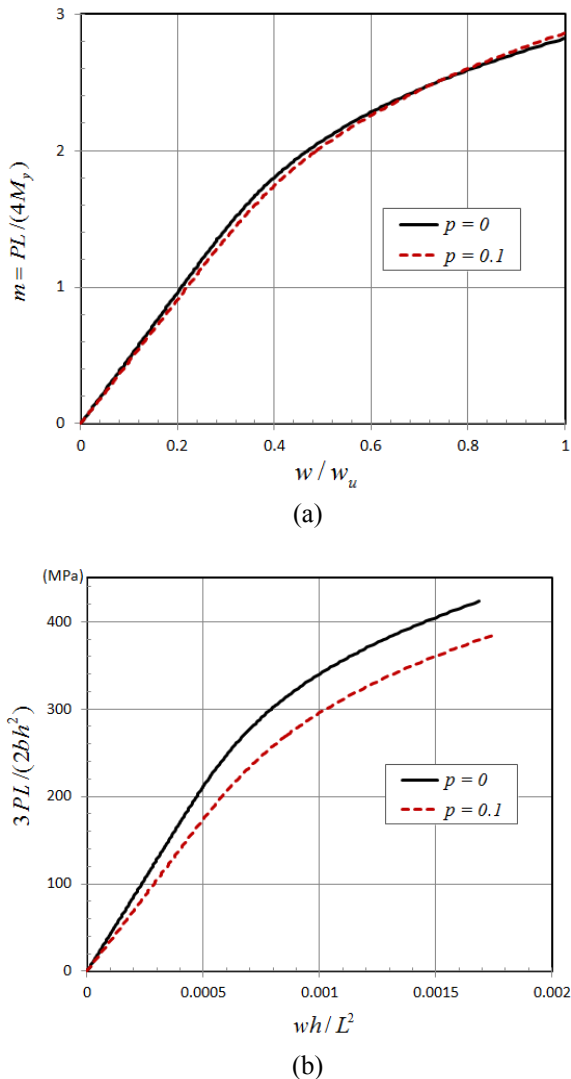


Fig. 6 Load-deflection curves for rectangular A383 aluminum beam cross section: (a) non-dimensional (b) dimensional

의 동일한 무차원 특성을 보인다는 점이다. 따라서 삼점굽힘 보에서 동일한 치수의 보에 대하여 실용적인 차원에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{P_{u*}}{P_{u1}} = \frac{m_{u*}}{m_{u1}} = \frac{w_{u*}}{w_{u1}} = 1 \tag{14a}$$

$$P_u = m_u \frac{4M_y}{L} \tag{14b}$$

여기서 하첨자 ‘1’은 무결재료를, ‘*’는 기공결함 재료를 의미한다. 식 (14)의 m_u 는 식 (12)로부터, w_u 는 Fig. 6(a)로부터 얻는다.

3. 결 론

균일 분포를 가정한 미지의 기공결함을 포함하고 있는 다이캐스팅 보를 현장에서 해당 제품을 가지고 간단한 탄성시험만으로 등가기공률 산출하고 그 등가기공률을 이용하여 소성변형을 포함하는 강도를 예측하는 방법은 본 연구의 결과를 이용하여 다음과 같이 요약된다.

Step-1. 시제품 또는 해당 로트에 대한 다이캐스팅 제품을 간단한 삼점 굽힘 보 시험에 의하여 탄성범위에서 강성도 k_* 를 구한다.

Step-2. 무결재료를 적용하되 제품과 동일한 형상을 갖는 이론 모델 또는 유한요소 모델을 만들고 시험과 동일한 조건으로 탄성해석을 시행해 무결 다이캐스팅 제품에 대한 강성도 k_1 을 구한다.

Step-3. 식 (5)에 의해 등가 기공률 p 를 구한다.

Step-4. 식 (7)과 (8)을 이용하여 기공재료에 대한 응력-변형률 곡선 식 (9)를 구한다.

Step-5. 기공결함을 고려한 다이캐스팅 보에 대한 소성을 포함하는 강도의 평가는 Step-4에서 구한 응력-변형률 선도를 이론적 모델 또는 유한요소 모델에 적용하여 탄소성 비선형해석을 수행함으로써 얻어진다. 여기서 하나의 기준해로서 직사각형 단면보에 대해서는 이론해로 얻어진 식 (14) 및 Fig. 6(a)에 의해 구해진다.

본 연구에서는 직사각형 단면 보에 대하여 소성한지의 이론해를 구하였으나 동일한 절차에 의하여 다른 형상의 단면에 대해서도 이론해를 구할 수 있을 것이다. 등가 기공률의 산출에서는 마이크로 크기의 구형의 기공들이 균등한 분포를 가지고 있음을 가정한 것이므로 다른 크기나 모양, 군집양상 등에 대해서는 향후 연구가 필요하다. 무엇보다 실험에 의하여 본 논문의 이론을 살펴보는 것이 향후에 연구되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한남대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌음.

참고문헌 (References)

(1) NADCA, 2015, NADCA Product Specification Standards for Die Castings, North American Die

- Casting Association, Illinois, pp. 3-1~3-46.
- (2) IAI, 2009, *Global Aluminium Recycling: A Cornerstone of Sustainable Development*, International Aluminium Institute, London, pp. 1~36.
- (3) Kaufman, J. G. and Rooy, E. L., 2004, *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications*, ASM International, Ohio, pp. 39~54.
- (4) Totten, G. E., Funatani, K. and Xie, L., 2004, *Handbook of Metallurgical Process Design*, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 368~370.
- (5) Major, J., 1998, "Porosity Control and Fatigue Behavior in A356-T61 Aluminum Alloy," *Transactions-American Foundrymens Society*, pp. 901~906.
- (6) Avalle, M., Belingardi, G., Cavatorta, M. P. and Doglione, R., 2002, "Casting Defects and Fatigue Strength of a Die Cast Aluminium Alloy: a Comparison Between Standard Specimens and Production Components," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, No. 1, pp. 1~9.
- (7) Kuwazuru, O., Murata, Y., Hangai, Y., Utsunomiya, T., Kitahara, S. and Yoshikawa, N., 2008, "X-ray CT Inspection for Porosities and its Effect on Fatigue of Die Cast Aluminium Alloy," *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 2, No. 9, pp. 1220~1231.
- (8) Zhao, H. D., Wang, F., Li, Y. Y. and Xia, W., 2009, "Experimental and Numerical Analysis of Gas Entrapment Defects in Plate ADC12 Die Castings," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 9, pp. 4537~4542.
- (9) Irfan, M. A., Schwam, D., Karve, A. and Ryder, R., 2012, "Porosity Reduction and Mechanical Properties Improvement in Die Cast Engine Blocks," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 535, pp. 108~114.
- (10) Aziz Ahamed, A. K. M. and Kato, H., 2014, "Influence of Casting Defects on Tensile Properties of ADC12 Aluminum Alloy Die-Castings," *Materials Transactions*, Vol. 49, No. 7, pp. 1621~1628.
- (11) Eshelby, J. D., 1957, "The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion and Related Problems," *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 241, No. 1226, pp. 376~396.
- (12) Mori, T. and Tanaka, K., 1973, "Average Stress in the Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions," *Acta Metallurgica*, Vol. 21, pp. 571~574.
- (13) Park, M. S., 2014, "An Enhanced Mean Field Material Model Incorporating Dislocation Strengthening for Particle Reinforced Metal Matrix Composites," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 7, pp. 2587~2594.
- (14) Weng, G., 1990, "The Overall Elastoplastic Stress-strain Relations of Dual-phase Metals," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 38, No. 3, pp. 419~441.
- (15) Federico, S., 2010, "On the Linear Elasticity of Porous Materials," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 52, No. 2, pp. 175~182.
- (16) Kwon, Y. and Park, M. S., 2013, "Versatile Micromechanics Model for Multiscale Analysis of Composite Structures," *Applied Composite Materials*, Vol. 20, pp. 673~692.
- (17) Yu, T. X. and Zhang, L. C., 1996, *Plastic Bending: Theory and Applications*, World Scientific Publishing Co., Singapore, pp. 7~50.