한국정밀공학회지 제17권 제1호 (2000년 1월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 17, No. 1, January 2000.

주형제작과정에서의 주물사 거동

최우천*, 신평균**

Sand Behavior in Casting Mold Fabrication

Woo Chun Choi*, Pyung Gyun Shin**

ABSTRACT

Important factors in a casting mold are strength at the mold surface and gas permeability of the mold. This study investigates the effects of pre-pressure and sand particle hardness on gas permeability, with a constraint that the norm of a stiffness array at the mold surface should be higher than a certain value. The constitutive relation is obtained using a hypoplasticity model. This study is firstly attempted to investigate sand behavior in mold fabrication, and will give a theoretical base for fabricating better molds.

Key Words : Mold(주형), Gas Permeability(통기성), Casting Sand(주물사), Sand Particle Hardness(주물사 입자 경도), ABAQUS(아바커스), User Subroutine(사용자 서브루틴).

1. 서론

주조는 가장 오래된 기계제작공정 중의 하나이다. 주물의 품질은 용융 금속이 냉각되는 과정에서 주로 결정된다. 주조에서는 금속의 냉각이 주물의 품질에 큰 영향을 미치므로, 주조에 관련된 연구는 용융 금속이 냉각될 때, 금속의 온도변화, 열변형 등에 대해 주로 이루어졌다. 이에 반해 주형 제작에 대한 연구보고는 거의 없는 편이다.

주형을 제작할 때 모형이 설치된 주형틀에 주물사를 넣고 가압하여 다진다. 주조 현장에서는 주물사 가압 공정에서 가압 조건을 주로 경험에 의해 결정하므로, 제품의 형상이 바뀌면 가압의 최적조건을 찾기 위해 다시 시행착오를 한다.

주형에서 특히 용융 금속과 접하는 주형의 표면이 충분히 강하지 못하면, 유입된 용융 금속에 의해 부스러질 수 있다. 이 경우, 주물의 형상이 원하는 형상에서 벗어나게 되어 불량 제품이 제작된다. 주형 표면이 파손되지 않기 위해서는 주형 표면의 강도가 충분히 커야 하고, 주형 제작에서 강도를 파악할 필요가 있다. 현장에서는 표면의 경도를 측정하여 이 경도값으로 주형의 상태를 파악하고 있다. 주형 표면에서의 경도 최소값이 정해진 설정값 이상이 되도록 만드는 가압 조건을 시행착오 방식으로 찾는다. 그러나 이와 같은 경도시험만으로는 주형 표면에서의 강도를 정확히 알 수 없다.

주형 표면의 강도를 증가시키기 위해 지나치게 다지면, 주형 내의 공극이 줄어들어 주형의 통기성이 나빠진다. 주조에서 통기성이 나쁘면, 주형 공동 내에 존재하는 가스가 외부로 잘 방출되지 못하게 되어, 주물 내부에 기공이 남게 되거나 금속이 주형 공동을 완전히 채우지 못할 수 있다. 이와 같이 주형의 통기성도 매우 중요하므로, 주형을 되도록 덜 다져서 통기성을 최대한 보장할 필요가 있다.

* 고려대학교 기계공학과
** 고려대학교 기계공학과 대학원

따라서 주형 표면의 강도와 주형의 통기성을 적절히 선택해야 한다.

주물사는 알갱이와 점토로 구성되어 있으므로, 가압 과정에서의 주물사 거동은 일반 금속의 거동과 상당히 다르다. 주물사와 같이 입자 재료에서 외부 하중에 따른 거동을 보기 위한 모델은 그다지 많이 연구된 편은 아니다. 정수압 압력에 영향을 받는 물질의 소성변형의 모델 중에서 Drucker-Prager 모델[1]은 플라스틱 알갱이를 주로 대상으로 하므로, 주물사와 다르게 대기압에서 항복강도가 크고, 가공경화가 포함되어 있다. Roscoe 등[2]에 의해 1, 2차 응력 불변량으로 이루어진 모델이 제시되었으나, 3차 응력 불변량을 고려하지 않았기 때문에 실험 결과와의 차이를 설명할 수 없다. 3차 응력 불변량의 영향을 고려한 모델[3,4]도 연구되었다. Dafalias와 Popov[5]에 의해서 처음으로 bounding surface plasticity 이론이 연구되었고, 이 이론을 여러 재료에 적용한 연구[6,7]가 있다. bounding surface plasticity 이론의 변형된 이론인 hypoplastisity 모델이 토목 분야에서 연구되었다. Kolymbas[8]가 비탄성 재료의 거동을 증분형식의 비선형 텐서의 식으로 나타내어 이 이론의 기본적인 틀을 처음으로 제시하였다. 입자 재료의 다양한 거동이 일반적인 hypoplasiticity 개념에 기반을 두어 최근 연구되었다[9]. 이러한 모델들은 일정한 압력이 가해지는 것과 같은 비교적 단순한 조건에 주로 적용되고 있다.

본 연구에서 다루는 주형의 가압 공정에서는 주물사에 하중이 가해지고, 제품의 형상과 유사한 모형에 주물사가 접하여 유동하므로, 주물사의 거동은 상당히 복잡하고, 압력도 계속 변한다. 본 연구에서는 주형의 통기성을 주형의 품질로 취급하고, 주형 표면에서의 강도를 구속조건으로 하여, 주물사의 물성치와 공정변수가 주형의 품질에 어떻게 영향을 미치는지 연구한다. 해석 프로그램은 ABAQUS를 이용하고, 주물사 모델을 사용자 서브루틴(Umat)으로 작성한다. 이와 같이 주물사의 거동을 파악하여 주형의 품질을 향상시키려는 연구는 처음 이루어진 것으로, 각종 변수의 주형의 품질에 대한 영향을 파악할 수 있게 함으로써, 품질이 우수한 주형을 제작하는데 이론적인 뒷받침 역할을 할 수 있을 것으로 여겨진다.

2. Hypoplasticity 모델

주물사는 알갱이와 점토로 구성되어 있으므로 일반 고체와는 상당히 다른 거동을 보인다. 입자로 구성된 시스템의 거동에 관련된 것으로 hypoplasticity 모델은 토목 분야에서 개발된 것으로 모래 입자의 거동을 잘 예측하는 것으로 알려져 있다. 이 모델에서 구성방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{T}}_s = F(e, \mathbf{D}_s, \mathbf{T}_s) \tag{1}$$

여기서 $\dot{\mathbf{T}}_s$는 응력 증분 텐서, e는 공극률, $\mathbf{T}_s$는 Cauchy 입자 응력 텐서이고, $\mathbf{D}_s$는 stretching 텐서이다. 식 (1)은 두 부분으로 나눌 수 있다.

$$\dot{\mathbf{T}}_s = A(e, \mathbf{T}_s, \mathbf{D}_s) + B(e, \mathbf{T}_s)\|\mathbf{D}_s\| \tag{2}$$

여기서 $\|\mathbf{D}_s\|$는 $\sqrt{\mathrm{tr}\,\mathbf{D}_s^2}$이다. 식 (2)에서의 첫째 항은 $\mathbf{D}_s$에 선형적이고, 둘째 항은 $\mathbf{D}_s$ 에 비선형적이다. 밀도에 대한 입자물질의 기계적인 성질을 분리하기 위해서 식 (2)에서의 함수 A와 B를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A(e, \mathbf{T}_s, \mathbf{D}_s) = (\mathrm{tr}\,\mathbf{T}_s)^m f_e L(\hat{\mathbf{T}}_s, \mathbf{D}_s) \tag{3}$$

$$B(e, \mathbf{T}_s) = (\mathrm{tr}\,\mathbf{T}_s)^m f_e f_d N(\hat{\mathbf{T}}_s) \tag{4}$$

여기서 f_e와 f_d는 밀도영향함수이며, L과 N은 함수이고, $\hat{\mathbf{T}}_s$는 $\hat{\mathbf{T}}_s = \mathbf{T}_s/\mathrm{tr}\,\mathbf{T}_s$로 정의되는 무차원 응력비 텐서이다. 압력상수 $f_b = f_b(\mathrm{tr}\,\mathbf{T}_s)$ 와 $f_s = f_b f_e$ 를 이용하여 식 (2)는 다음과 같은 쓸 수 있다.

$$\dot{\mathbf{T}}_s = f_s[L(\hat{\mathbf{T}}_s, \mathbf{D}_s) + f_d N(\hat{\mathbf{T}}_s)\|\mathbf{D}_s\|] \tag{5}$$

상수 f_d는 다음과 같이 표현된다.

$$f_d=(\frac{e-e_d}{e_c-e_d})^{\alpha} \quad (6)$$

여기서 e_d 는 최소 공극률이고, e_c 는 임계 공극률이며, 상수 α는 양의 값을 갖는 무차원 상수이다. 밀도상수 f_e 는 공극률과 임계 공극률 사이의 관계를 나타낸다.

$$f_e=(\frac{e_c}{e})^{\beta} \quad (7)$$

여기서 상수 β 는 1보다 약간 큰 상수이다.

3차 응력불변량, θ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\cos(3\theta)=-\sqrt{6}\frac{\mathrm{tr}(\widehat{\mathbf{T}_s^{*3}})}{\sqrt{\mathrm{tr}(\widehat{\mathbf{T}_s^{*2}})}} \quad (8)$$

평균 압력이 증가함에 따라서 최대 공극률 e_i 는 주어진 압력 p_s 에 대해 공극률 e 의 상한값이다. 많은 실험에 의해 그 관계식은 다음과 같이 구해졌다.

$$\frac{e_i}{e_{i_0}}=\frac{e_d}{e_{d_0}}=\frac{e_c}{e_{c_0}}=\exp\left[-\left(\frac{3p_s}{h_s}\right)^n\right] \quad (9)$$

여기서 하첨자 0는 압력이 0일 때를 나타내고, h_s 는 입자경도이다. hypoplasticity 모델에 대한 보다 자세한 사항은 참고문헌[8,9]에 나타나 있다.

주형 내의 주물사는 가압에 의해 다져진다. 그리고 용융 금속의 유입과 유동에 의해 응력이 주형 표면에 가해진다. 주형 표면에 최종적으로 가해지는 응력이 어느 이상으로 크면 주형이 부스러질 수 있다. 주형 표면에 가해질 응력이 주로 압축과 전단 응력일 것으로 예상할 수 있으나, 정확하게 응력의 종류와 크기를 예측할 수 없다. 이는 주물의 크기, 형상, 주입방법 등 여러 인자에 따라 변하기 때문이다.

현장에서는 주형 표면에서의 강도를 파악하기 위해 경도시험을 하고 있다. 경도시험에서 압흔기에 의해 압축응력과 전단응력이 주형 표면에 가해진다. 이렇게 경도시험에서 구한 주형 표면에서의 경도값만으로는 주형 표면이 주조 시 이에 가해지는 응력에 충분히 저항할 수 있을지 알 수 없다. 이는 경도 시험에서 압흔기에 의해 가해지는 응력이 용융 금속에 의해 주형에 가해질 응력과 다르기 때문이다.

주형 제작에서 중요한 점은 주형 표면이 어떤 응력이 가해질 때 부스러지는지를 판단하는 것으로 여겨진다. 이를 위하여 본 연구에서는 주물사 강성행렬의 노옴(norm)을 사용한다. 강성행렬 K의 노옴은 다음 식으로 정의된다.

$$\mathrm{norm}=\sqrt{\mathrm{tr}\ \mathbf{K}^2} \quad (10)$$

주형 표면에서 강성행렬의 노옴이 충분히 크다면 용융 금속에 의해 응력이 가해질 때 주형이 파손되지 않을 것이다. 가압 과정 해석에서는 가압을 단계적으로 수행하며, 해석에서 매 가압 단계마다 램을 제거하고 주형 표면에서 강성행렬의 노옴의 최소값이 설정값 이하이면 램을 제거하기 이전의 상태를 입력으로 하여 가압을 계속하고, 그 이상이 되면 가압 과정을 종료하는 것으로 하였다. 해석에서는 램을 제거한 후에 비로소 강성행렬의 노옴값을 구할 수 있으므로, 노옴값의 최소값과 설정값을 비교하여 가압공정의 계속 수행 여부를 판단한다. 설정값은 제품에 따라서 적절하게 선택한다. 본 해석에서 이와 같은 가압과정 종료 조건을 구속조건으로 선택하였다.

3. 해석결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 hypoplasticity 모델을 사용하여 구성한 해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 실험결과[10]와 비교하였다. 여기서의 실험결과는 원통 용기에 모래를 채우고, 반경방향으로는 일정한 압력을 가하며, 축방향으로 응력을 변화시켰을 때 편차응력과 축방향의 변형률의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 해석과 실험결과 사이에는 다소 차이가 있으나, 해석결과가 경향을 어느 정도 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이는 실험에 사용된 모래의 물성치를 정확히 알 수 없었기 때문에 주로 발생한 것으로 여겨진다.

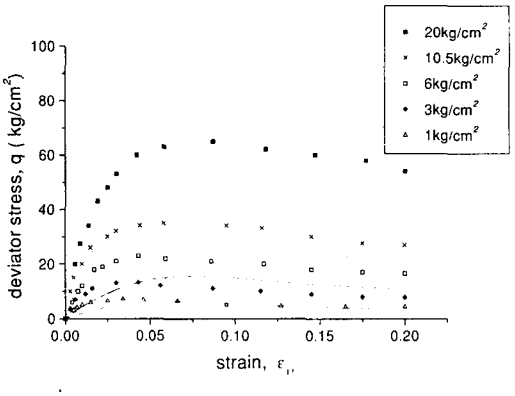


Fig. 1 Comparison between experimental[10] and numerical results.

통기성은 주형 내에 존재하는 혹은 발생한 가스가 얼마나 외부로 잘 배출되는가를 나타낸다. 통기성은 주형의 내부를 2 기압으로 일정하게 유지하고, 외부는 대기압으로 하여, 주형을 통과하는 공기의 유량으로 나타내었다. 공기의 유량은 FLUENT 상용프로그램을 이용하여 구하였다.

여러 변수가 주형의 통기성에 미치는 영향을 파악하기 위해, Fig. 2에 나타난 단순한 축대칭 모양의 주형을 대상으로 하여 해석하였다. 이 주형은 가상적인 것으로 제품의 형상이 달라지는 경우에는, 본 연구에서 개발한 동일한 방법을 이용하면 된다. Fig. 2(b)에는 주형표면을 따라서 설정된 절점 번호가 나타나 있다.

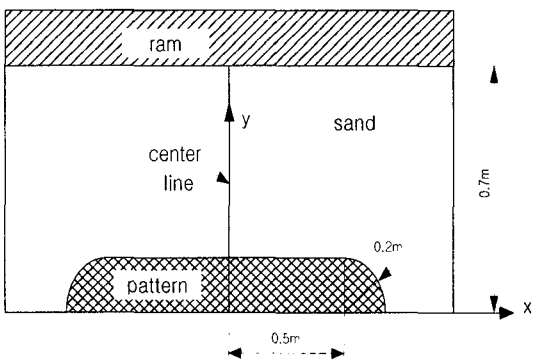
주형의 통기성에 영향을 주는 변수는 많으나, 본 연구에서는 다음의 2 가지 변수만을 선정하여 통기성에 미치는 영향을 고찰하였다.

- 예압(pre-pressure) : 주형 틀에 주물사를 채울 때, 충진 속도에 따라 초기에 주물사에 가해진 예압이 달라진다. 예압은 게이지 압력으로 나타낸다.
- 주물사 입자의 경도(sand particle hardness) : 주물사의 물성치에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 주물사 입자의 경도만을 고려하였다. 주물사 종류에 따라 경도가 달라진다.

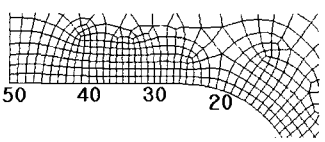
주형은 주물과 같은 형상의 모형을 주형틀 내에 두고, 주물사를 일정한 높이로 채우며, 상부에서 가압 램이 주물사를 가압하여 제작하는 것으로 하였다. 주물과 주형은 축대칭형이므로 단면의 반을 해석의 대상으로 삼았다. 이에 대한 경계조건은 다음과 같다.

- 중심축: 대칭축으로, 주물사의 x 방향으로의 변위가 없다.
- 윗면: 주물사가 가압램에 접하는 부분으로, y 방향의 변위는 램의 y 변위와 동일하다.
- 아랫면: 주물사가 모형면과 용기 바닥면과 접하는 부분으로, 두 면의 직각방향으로의 변위가 없다. 평행한 방향으로는 마찰이 존재한다 (모형과의 마찰계수 = 0.4, 바닥면과의 마찰계수=0.3).
- 옆면: 주물사가 용기 벽면과 접하는 부분으로 x 방향(벽면의 직각방향)으로 변위가 없고, 평행한 방향으로 마찰이 존재한다 (마찰계수 = 0.3).

주형 제작의 종료 조건은 강성행렬 노옴의 최소값이 0.5 GPa 이상이 되는 조건으로 하였다. 설정값은 제품의 형상 및 크기, 금속 종류, 주형, 탕도계 등에 의존하는 값으로 제품마다 적절한 값을 선정한다.



(a) mold shape

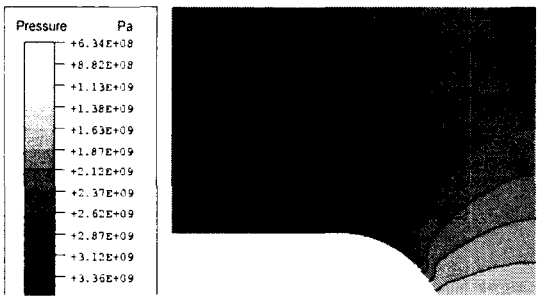


(b) Node number along the mold surface

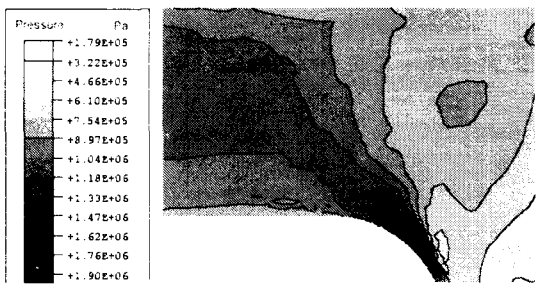
Fig. 2 Mold shape for analysis.

Fig. 3에는 가압 후(램제거 전)와 램을 제거할 때 주형에서의 압력분포가 나타나 있다. 램을 제거한 후의 압력이 램을 제거하기 전의 압력에 비해 수 천배 정도 감소함을 볼 수 있다. 이와 같이 압력이 다르게 나타난 것은 알갱이로 구성된 시스템의 전형적인 특성이다. 이 그림에서 압력은 중심부에서 최대가 되고, 아랫면과 접하는 곳에서 최소가 됨을 볼 수 있다. 이것은 중심부가 다른 부분보다 상대적으로 많이 가압되기 때문이다.

Fig. 4는 제작된 주형에서 주형공동 내에 2 기압을 가하고, 외부를 대기압으로 하였을 때, 주형 내에서의 공기압력의 분포와 공기 속도장을 보여준다. 이 그림에서는 주형 벽면 부근에서 공기의 유동속도가 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 이 부분에서 유량이 크다는 것을 의미한다. 물론 주형의 형상이나 크기가 달라지면 이에 따라 압력분포와 속도장이 달라진다.

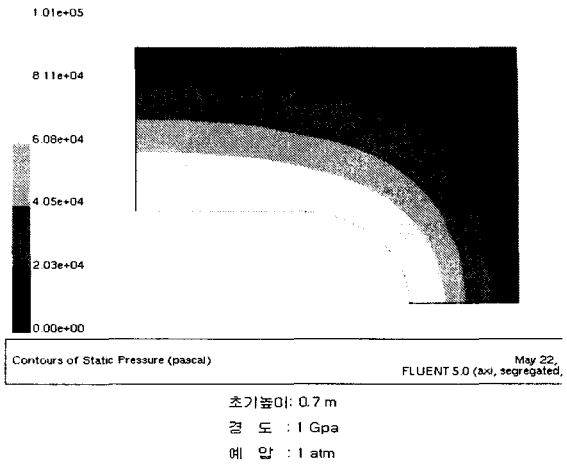


(a) After pressing

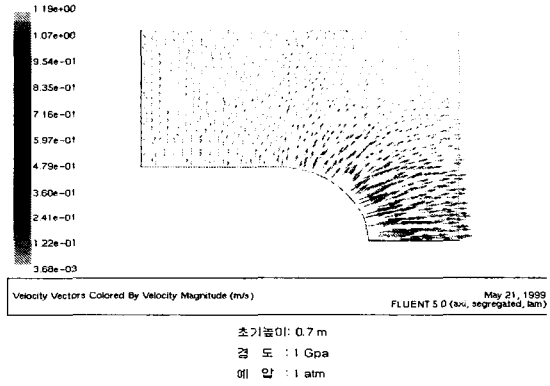


(b) After removing a ram

Fig. 3 Pressure distribution in a mold.



(a) Distribution of air pressure

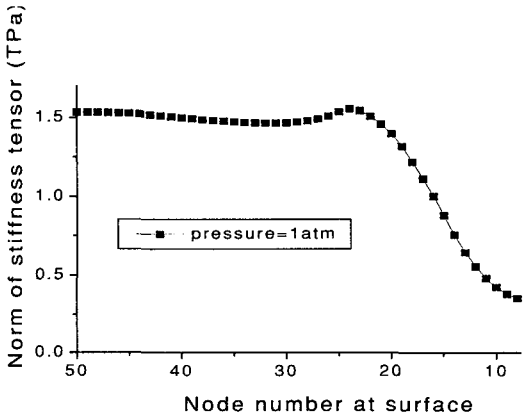


(b) Velocity field

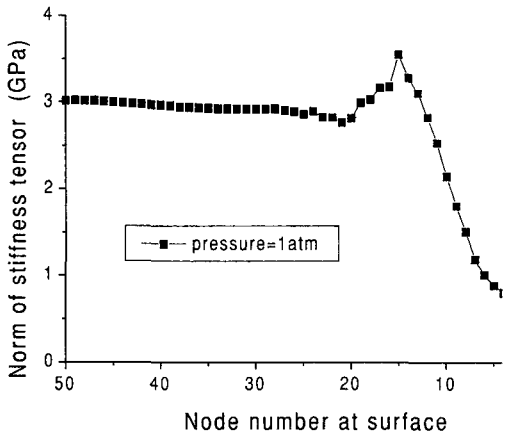
Fig. 4 Air pressure distribution and velocity field in a fabricated mold.

Fig. 5는 모형과 접하는 주형 표면에서 강성행렬의 노옴 분포를 보여준다. 이 그림에서 x축은 주형 표면을 따라서 설정된 절점 번호이다. 이 주형 표면은 추후 용융 금속에 접하는 면이 되고, 앞서 설명한 바와 같이 이 주형 표면이 취약하면 용융 금속이 가하는 응력에 의해 부스러질 수 있다. 이 그림을 보면, 램제거 후의 노옴은 가압 후의 노옴에 비해 약 500 배 감소한 것을 알 수 있다. 노옴의 분포는 중심선으로부터 3 GPa 정도로 유지되다가 곡면이 시작되는 곳에서 가장 큰 값을 갖고, 곡면이 끝나는 부분에서 최소값을 갖는 것으로 나타났다. 절점 번호 15 부근에서 최대의 노옴이 되는 것

은 이 부분이 램 제거시 다른 부분에 비해 상대적으로 덜 변형되어 노옴이 비교적 큰 것으로 여겨진다. 또한 해석 대상의 주형에 대해서는 모형의 곡면이 끝나는 부분이 취약부인 것을 알 수 있다. 이와 같은 노옴의 분포는 주형형상에 따라 변하는 것으로, 제품의 형상이 바뀌면 달라진다. 이 부분은 Fig. 3에서도 가장 낮은 압력을 갖고 있음을 볼 수 있다.



(a) after pressing



(b) After removing a ram

Fig. 5 Distribution of a norm of the stiffness array in a mold.

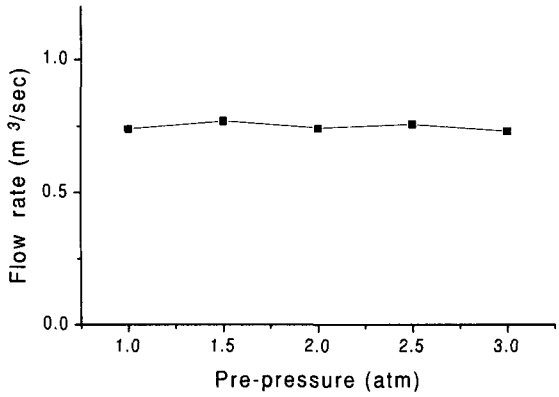


Fig. 6 Effect of pre-pressure on gas permeability.

Fig. 6에는 예압이 주형의 통기성에 미치는 영향이 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 예압의 변화는 유량(통기성)에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 예압은 앞서 설명한 바와 같이, 초기에 주형틀 내에 주물사를 충진하는 속도에 의존한다. 이러한 충진 속도는 충진 시간에만 영향을 주고, 주형의 품질에는 큰 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 주물사 입자 경도의 변화가 통기성에 미치는 영향을 해석적으로 구한 것이다. 이 그림은 주물사 입자의 경도가 커질수록 통기성이 향상되고 있음을 보여준다. 이것은 경도가 높은 주물사 입자일수록 가압 시 변형이 적어서 공극률의 변화가 크지 않기 때문인 것으로 여겨진다.

4. 결 론

본 연구에서는 주형의 통기성을 주형의 품질로 택하였고, 단순한 형상의 주형에 대해서 예압과 주물사 입자 경도가 통기성에 미치는 영향을 고려하였다. 주물사 시스템의 구성방정식은 hypoplasticity 모델을 이용하여 구하였다. 주형이 충분한 강도를 갖도록 하기 위해서 주형 표면에서의 강성행렬의 노옴값이 설정값 이상이 될 때까지로 가압하는 것을 구속조건으로 택하였다. 본 연구는 주형제작에서의 주형의 품질에 대한 연구로는 처음 이루어진 것으로, 이 분야에 이론적인 뒷받침을 할 것으로 여겨진다. 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

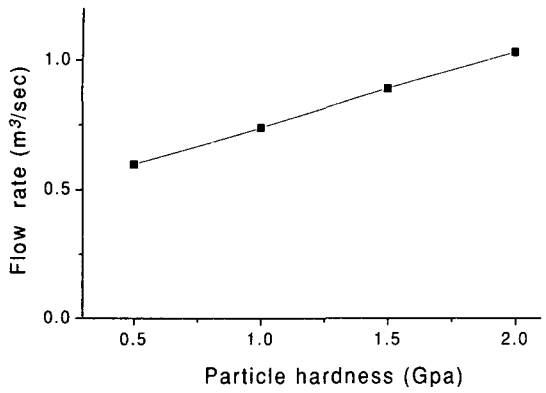


Fig. 7 Effect of sand particle hardness on mold permeability.

- 주형제작에서 가압 과정의 종료를 판단하는 기준은 주물사 강성행렬의 노옴의 최소값이 어떤 설정값 이상이 되도록 하는 것이 바람직하다.
- 주형의 통기성은 주형 내외에 일정한 압력을 가하고, 이에 따라 발생하는 공기의 유량으로 나타낸다.
- 가압한 후와 램을 제거한 후를 비교하면, 주형에서의 압력은 수천 배, 노옴은 수백 배 감소한다.
- 고려한 영역의 예압이 통기성에 미치는 영향은 크지 않다.
- 주물사 입자의 경도가 커짐에 따라 주형의 통기성이 향상된다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비 (ME96-2-05)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. D. C. Drucker, and W. Prager, "Soil mechanics and plastic analysis or limit design," Quarterly of Applied Mathematics, vol. 10, pp. 157-165, 1952.
2. K. H. Roscoe, and J. B. Burland, "On the generalized stress-strain behavior of wet clay," Engineering plasticity, Cambridge Univ. Press, pp. 535-609, 1968.
3. J. H. Argyris et. al, "Recent development in the finite element analysis of pressure container reactor vessel," Nuclear Engineering and Design, Vol. 28, pp. 42-75, 1974.
4. Y. F. Dafalias, and L. R. Herrmann, "Bounding surface plasticity. II application to isotropic cohesive soils," Journal of Engineering Mechanics, Vol. 112, pp. 1263-1290, 1986.
5. Y. F. Dafalias, and E. Popov, "A model of non-linearly hardening materials for complex loading," Acta Mech., 21(3), 173-192, 1975.
6. Y. F. Dafalias, and L. R. Herrmann, "Bounding surface plasticity: II. application to isotropic cohesive soils," J. Engrg. Mech., ASCE, 112(12), 1263-1291, 1985.
7. M. McVay, and Y. Taesiri, "Cyclic behavior of pavement base materials," J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 111(1), 399-416, 1985.
8. D. Kolymbas and E. Bauer, "Soft oedometer-a new testing device and its application for the calibration of hypoplastic constitutive laws," Geotechnical Testing Journal, GT-JODJ, Vol. 16, No. 2, pp. 263-270. 1993.
9. E. Bauer and W. Wu, "A hypoplastic model for granular soils under cyclic loading," Proc. of the Int. Workshop on Modern Approaches to Plasticity, Elsevier, pp. 247-258, 1993.
10. J. P. Bardet, "A bounding surface model for sands," J. of Engrg. Mech., ASCE, 112(11), pp. 1198-1217, 1986.