입자분산유체의 충전공정에 대한 직접수치해석

황욱렬, 김월룡*, 김시조**
경남 진주시 가좌동 900 경상대학교 기계항공공학부
*대전시 유성구 장동 84 LG화학 테크센터
**경북 안동시 송천동 388 안동대학교 기계공학부

Direct numerical simulation of mold-filling of particle-filled fluids

Wook Ryol Hwang, Worl-Yong Kim*, See Jo Kim**
School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Gajwa-dong 900, Jinju
LG Chemical Ltd. Tech Center, Jang-dong 84, Daejon
**School of Mechanical Engineering, Andong National University, Songchon-dong 388, Andong

서론

본 연구는 충전공정 중에 입자의 움직임을 이해하고 특히 유동선단(flow front)에서의 입자의 분포 및 입자의 이동현상에 대해 이해하는 것을 목표로 한다. (그림1)

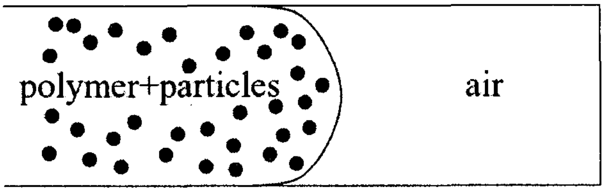

그림1: 입자분산유체의 충전유동

입자가 포함된 충전유동을 수치해석으로 계산할 경우, 특히 입자가 연속적으로 공급되어야 한다면 전통적인 단일유체 충전유동과 매우 큰 차이가 존재한다. 유동 중의 포함된 입자는 유동에 영향을 받기도 하지만, 거꾸로 유동에 영향을 주는 상호작용을 하기 때문이다. 이와 같은 상호작용을 수력학적 상호작용(hydrodynamic interaction)이라고 한다. 입자란 근본적으로 불연속적인(discrete) 물질이라 연속적으로 유동장에 공급되는 상황을 수치해석적으로 구현하기란 매우 어렵다. 그러나, 거꾸로 입자가 유동장에 순간적으로 공급된다면, 순간적인 유동장의 변화가 생기게 되어 물리적으로 잘못된 해를 얻게 될 것이다.
이러한 어려움을 피하기 위하여, 본 연구에서는 일종의 버퍼(buffer) 영역을 수치해석에 사용되는 계산영역에 도입하였다. 그림 2의 왼쪽은 유량 *Q*가 주입되는 게이트를 표시한다. 유체가 공급되는 입구에서부터 어느 정도의 구간은 일정한 속도가 위 벽면과 아래 벽면에 가해지도록 하여 일정속도구간(uniform flow domain)이라 표시되었다. 그 이후에는 일반적인 금형벽면에 가해지는 조건이 가해진다. 이 일정속도구간이 버퍼영역이다. 입자가 없다면, 이 구간의 속도장은 벽면에서 가해지는 속도 *U*로 모두 일정하다. 즉, 내부에 전혀 전단응력이나 신장응력이 작용하지 않는 구간이다. (물론, 실제 금형벽면의 조건이 가해지는 구간에

가까운 영역에서는 약간의 속도변화가 있을 수 있다.)

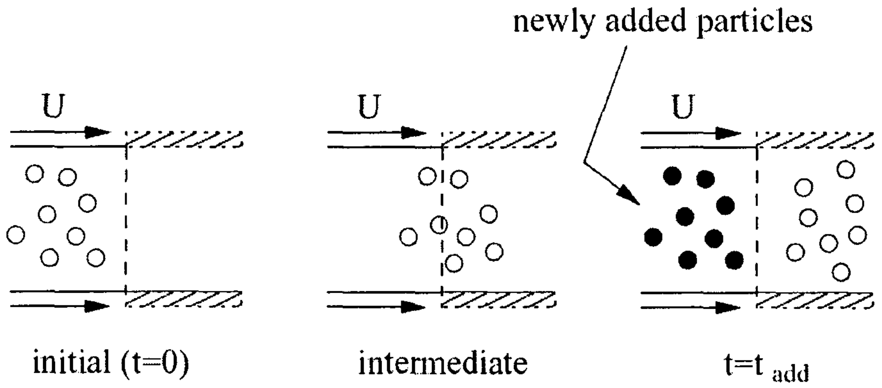

그림 2: 속도장에 급격한 변화없이 연속적인 입자를 첨가하는 방법

속도 U로 정의되는 일정유동(uniform flow)에 입자가 포함되면 입자는 유체와 똑같은 속도로 움직이며 전혀 회전하지 않는다. 이와 같은 일정유동의 성질을 이용하면, 불연속적인 입자를 유동장에 불연속적으로 첨가하면서도 전체적인 속도장에 가해지는 순간적인 충격(불연속성)을 없앨 수 있다.

수치해석기법

본 연구에서 다루는 입자분산 유체의 충전공정문제를 풀 수 있는 수치해석법은 (i) 입자와 유체의 수력학적 상호작용과 (ii) 유체와 공기의 경계면이 이루는 자유표면유동인 유동선단을 효과적으로 다룰 수 있는 기법이어야 한다.
이러한 관점에서 본 연구에서는 다음의 방법을 사용하였다.

- DLM(distributed Lagrangian multipliers) 법을 변형한 입자/유체의 수치해석기법 [1]
- VOF(Volume-of-Fluid) 기법 중 유사농도법(pseudo-concentration method)을 이용한 자유표면해석 [2]
- TDV-RK3 기법을 이용한 효율적인 시간적분법(time-stepping method) [3]

이 중 DLM기법을 변형한 본 연구자의 기법은 앞서 많이 설명되었기에 여기서는 더이상 설명하지 않겠다. 자유표면해석에 사용된 유사농도법은 Haagh 와 van den Vosse에 의해 개발된 방법으로, 충전유동해석에 가장 많이 사용되는 기법이다. 유체와 공기라는 서로 완전히 다른 물질을 농도 φ 값에 따라 분리하여, φ 값이 0이면 공기라고 하고, φ 값이 1이면 충전유체라고 정의한다. 이렇게 하면, 유체영역과 공기영역의 속도와 압력은 같은 변수를 이용하여 표현할 수 있고, 재격자화(remeshing)가 필요하지 않아 계산영역을 정규격자(regular mesh)를 이용하여 이산화할 수 있다. 이는 입자와 유체의 수력학적 상호작용을 고려할 때 사용되는 DLM기법을 변형한 본 연구의 수치해석법과 매우 잘 어울릴 수 있다.
유사농도법은 다음과 같은 농도 φ에 대한 물질전달의 식을 풀게 된다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = 0.$$

위 식을 풀기 위해서는 유동에 의한 물질전달항(convection term)을 효과적으로 처리하는 기법과 효율적인 시간적분법의 적용이 요구된다. 먼저 물질전달항의 처

리는 적분형태로 사용된 DG(discontinuous Galerkin)법을 사용하였다. DG법은 많이 사용되는 SUPG(streamline upwind Petrov Galerkin)법에 비해 연속적이지 않은 물질전달(여기서는 유체 내에 입자의 분산됨)에 안정한 해를 줄 수 있다. DG법을 효율적인 시간적분을 이용해 풀기 위해 2차 정확성을 갖는 Adams-Bashforth 법과 3차 정확성을 갖는 TVD-RK3법을 모두 시험해 보았으며, TVD-RK3법의 훨씬 안정한 해를 보여주었기에 TVD-RK3법을 본 연구에서 사용하였다.

계산결과

그림 첫번째 테스트 문제는 버퍼존에 반지름 0.025인 25개의 입자를 t=2마다 첨가하여 충전유동을 푼 것이다. 최종단계서의 입자의 수는 125개이다. 계산영역은 $(L, H)=(10, 1)$이며 $U=1$이다. 제품의 두께가 1mm라면, 입자의 지름은 50μm에 해당한다. 유체와 공기의 점도비는 0.001을 사용하였다. 그림 3에는 초기조건에서부터 t=1.25마다 충전과정을 보였다.

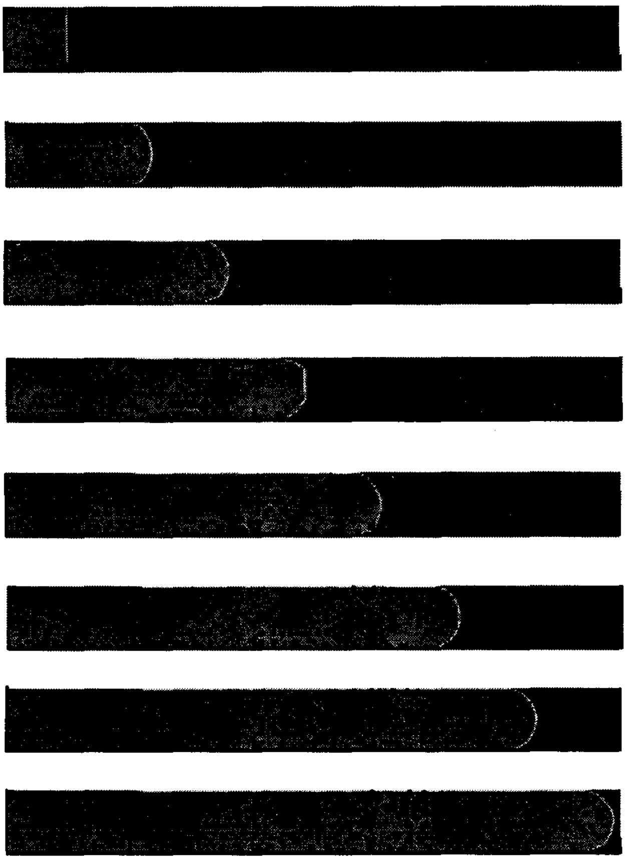

그림 3: 매 2초마다 25개의 입자를 첨가하여 수행한 계산결과: 위에서 부터 t=0, 1.25, 2.5, 3.75, 5, 6.25, 7.5, 8.75.

그림 4에는 그림 3에서의 마지막 그림인 t=8.75에서의 교란된 속도장을 도시한

다. 여기서 교란된 속도장이란 x 방향의 속도성분에서 x방향으로의 평균충전속도를 뺀 속도와 y 방향의 속도성분을 이용하여 도시한 것으로 분수유동의 효과를 보여 줄 때 일반적으로 사용하는 속도장이다.

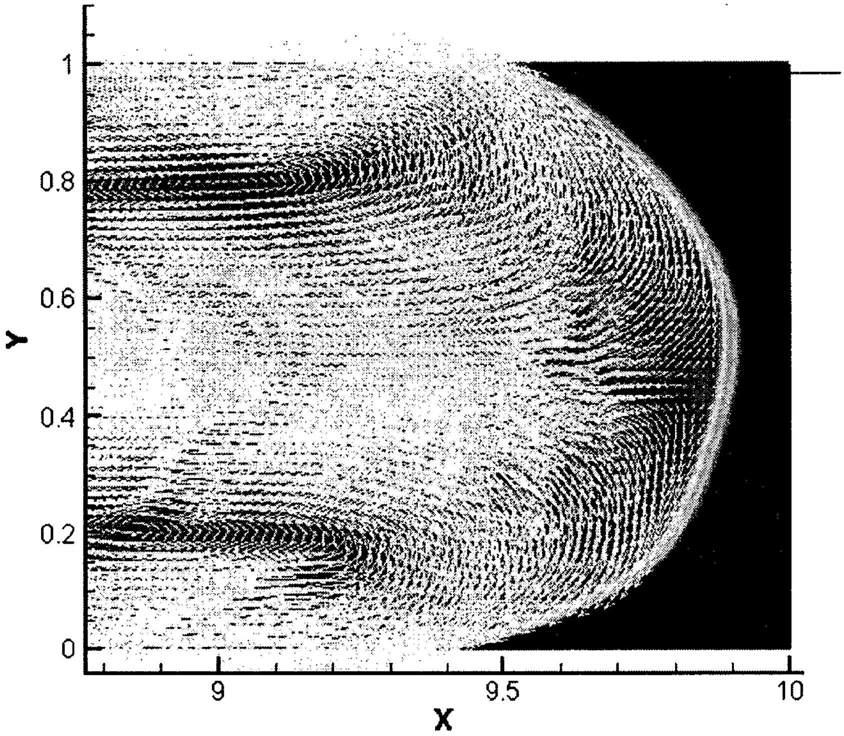

그림 4: 입자의 첨가에 의한 분수유동의 변화

결론

유사영역법에 바탕을 둔 DLM/VOF/DG/TVD-RK3 유한요소해석을 통해 입자충전 유체의 충전공정해석을 성공적으로 수행하였다.

감사의 글

본 연구는 LG화학(테크센터)의 지원으로 가능하게 되었고, 이에 감사드립니다.

1. W.R. Hwang, M.A. Hulsen, H.E.H. Meijer, *J. Comput. Phys.*, **194** (2004) 742-772.
2. G.A.A.V. Haagh, F.N. van de Vosse, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **28** (1998) 1355-1369.
3. C.W. Shu, S. Osher, *J. Comput. Phys.*, **77** (1988) 439-434.