유체용기의 병진이송제어 시뮬레이션

Translational Motion Control Simulation of Container Filled with Liquid

*김기홍, 홍태협, #임성수, 김창녕
*Kihong Kim, Taehyub Hong, #Sungsoo Rhim(ssrhim@khu.ac.kr), Changnyung Kim
경희대학교 대학원 기계공학과

Key words : Adaptive Command Shaping, Sloshing Suppression, Free-Surface, Computational Fluid dynamics, Time-delay

1. 서론

최근 로봇기술의 발전과 사회적 수요로 인해 산업현장에서만 볼 수 있었던 로봇들이 인간생활 환경 속으로 들어와 인간과 같이 공존 하면서 삶의 질 향상을 위해 활용되기 시작했다. 그러나 현재 실용화된 로봇 조작(manipulation) 서비스는, 고형 물체를 주 대상으로 하고 있다. 로봇의 조작 기능 다양화와 실용적 생활 지원을 고려할 때, 서비스 로봇이 일정 용기에 담긴 물, 커피, 주스와 같은 유체를 이송하는 기능을 갖도록 하는 것은 매우 유용한 일이 될 것이다.

로봇의 유체 이송조작 문제는 '용기에 담긴 유체가 흘러넘치지 않도록 유지하면 목적지로 가능한 빠른 시간 내에 이동하는 것'으로 정형화될 수 있다. 효율적인 유체이송 조작 기법 개발을 위해서는 우선 용기 안에 담긴 유체의 동적 거동 특성에 대한 연구가 필요하다.

유체의 이송조작에 대한 연구는 이미 제련소와 같은 곳에서 액체 상태의 철을 이송하는 작업에 대해 이루어져 왔다 [1][3]. 이 연구에서는 실제 유체를 진자모델로 가정하고, 진자모델에 대한 '기울임 조작' 제어에 대한 연구를 수행하였다. 유체유동 모델 연구와 용기 안에 담기 유체의 출렁임 억제를 위한 제어에 관한 연구가 행하여져 왔다 [1][2].

본 논문에서는 유체유동 해석 프로그램을 이용하여 유체의 동적 거동 특성을 파악한 후에, 이송 시 유체의 출렁임을 최소화할 수 있는 이송궤적 명령을 새로이 형성하기 위해 적응형 명령성형 필터를 이용한다. 유체용기를 병진 이송하는 경우에 대하여 조작 기능이 어떻게 향상되는지를 수치해석적으로 검증하고자 한다.

2. 모델링

성형된 명령을 이용한 이송 조작 제어방법의 유효성을 검증하기 위하여 유체유동 해석 프로그램 CFD-2006을 이용하여 유체유동을 해석하였다. 유체의 모델링은 Fig.1에서 보는 바와 같이 주위에서 흔히 볼 수 있는 컵의 크기를 참조하여 $0.07m \times 0.07m \times 0.07m (W \times D \times H)$ 크기의 정육면체 용기로 모델링하였다. 용기 안에는 정지상태에서 $0.03m$의 높이를 갖는 물이 들어 있고, CFD 프로그램을 이용하여 유체를 총 20,213개로 격자화하여 3차원으로 모델링하였다. 격자화된 모델의 각 node에 대하여 연속방정식(1)과 Navies-Stokes 방정식(2)이 적용된 CFD프로그램을 이용하여 용기 안의 유체의 움직임을 수치적으로 계산하였다. 시뮬레이션 시 적분 시간간격은 0.0025초로 하였고, 중력가속도 g의 방향과 병진이송 가속도의 방향 a은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다.

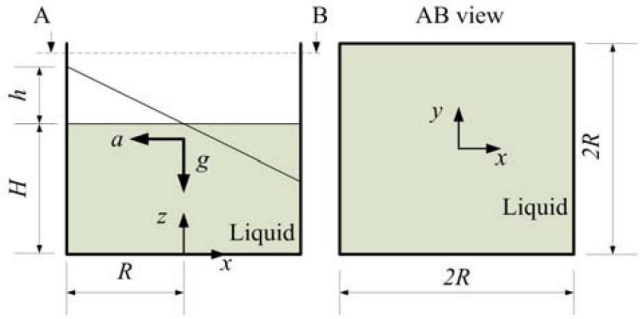

fig.1 유체용기와 용기 안에 든 유체

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad \text{----------(1)}$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\tau_{ij}) - \rho g \hat{j} - \rho g \hat{i}$$

$$\text{----------(2)}$$

$$\tau_{ij} = \mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \quad \text{----------(3)}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} F) = 0 \quad \text{----------(4)}$$

3. 적응형 명령성형 필터

명령성형필터는 시스템의 명령입력값을 성형한다. 이 필터는 FIR필터(Finite Impulse response)이고, 이 필터의 파라미터는 잔류진동을 억제하고자 하는 대상 시스템의 탄성모드의 공진주파수와 감쇠비에 의해 결정된다.

시스템의 변수의 불확실성이 있는 시스템에서 적응형 필터 $C(z,n)$는 아래와 같은 형태를 갖는다.

$$C(z) = c_1 + c_2 z^{-\Delta} + c_3 z^{-2\Delta} \quad \text{----------(5)}$$

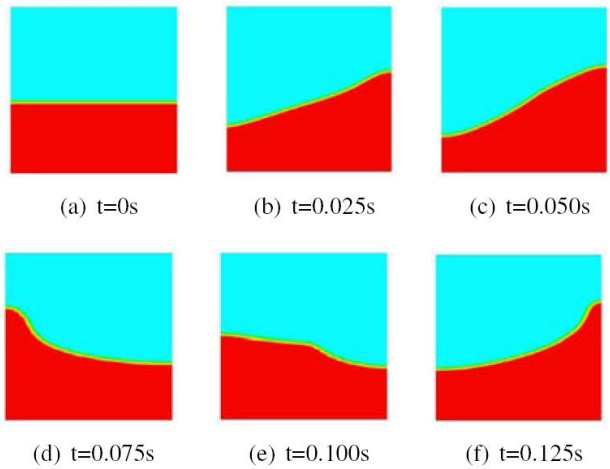

fig.2 병진이동시 유체 자유표면 거동 (수치해석결과)

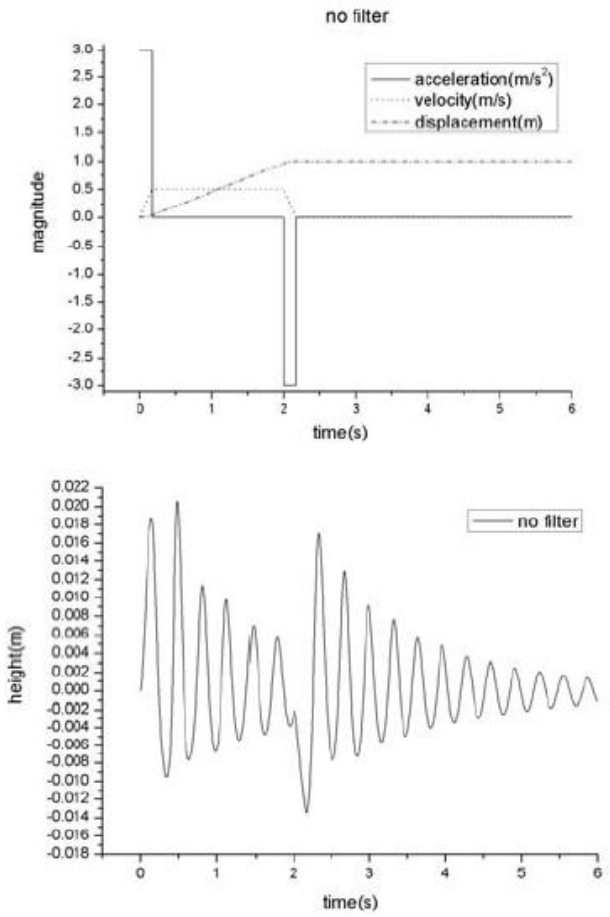

fig.3 이송 명령 궤적(上)과 벽면에서의 유체의 높이(下)

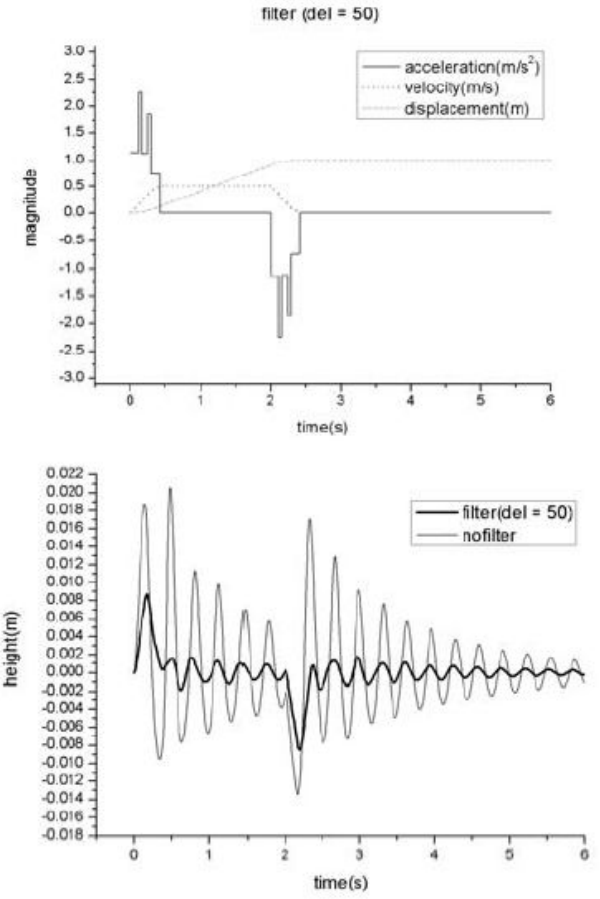

fig.4 이송명령 궤적(上)과 벽면에서의 유체의 높이(下)

여기서 $\triangle = T_d / T_s$, T_d 값은 임의로 선택되고, 필터의 계수 c_1, c_2, c_3는 적응형 알고리즘에 의해 학습된다[3].

4. 병진이송 시뮬레이션 결과

병진이송제어 명령입력으로 사다리꼴 속도 프로파일을 이용하였고, 이러한 명령에 대해 용기 안에 담긴 유체의 움직임(Fig. 1에 보인 자유수면 출렁임 높이 *h*)을 CFD-ACE를 이용하여 해석하였다 (Fig.2). 사다리꼴 속도 입력을 주 었을 경우 Fig.3에서 볼 수 있듯이 가속구간과 감속구간에서 물의 출렁임이 있어서 용기벽면의 유체의 높이는 담긴 유체의 높이보다 약 두 배의 높이가 된다. 등속구간이나 정지구간에서도 잔류진동이 있어서 추가적 이송명령이 들어오는 경우 출렁임 높이가 확대될 가능성이 있다.

반면 적응형 명령성형필터를 이용하여, △ 값을 50ms으로 정한 후 필터를 학습하고, 학습한 필터를 이용하여 명령을 성형 하였을 경우, 목표지점까지의 이동시간이 필터를 사용하지 않았을 경우보다 0.3sec정도 더 소요 되었지만 가속구간이나 감속구간에서의 유체의 높이는 이전에 비하여 절반이하로 줄이게 되었고, 등속구간, 정지구간에서의 잔류진동 또한 2mm 이내로 상당히 감소하였다.

5. 결론

본 논문에서는 용기에 담긴 유체의 병진 이송 조작기능을 향상하기 위한 조작법을 제안한다. 유체거동을 정밀하게 모델링하기 위해 상용 유체유동 해석 프로그램을 사용하여 용기 내 유체유동을 해석하였고, 유체 유동의 동적거동과 감쇠현상을 고찰한 후 적응형 명령성형 필터를 적용하였다. 시뮬레이션 결과에서 보는 바와 같이 유체가 담긴 용기의 병진이송 시 명령성형필터를 이용하여 유체의 출렁임을 획기적으로 감소시킬 수 있었다. 유체의 거동은 용기의 기하학적 특성과 용기 내 유체의 동적 특성에 따라 변화하게 되는데, 향후 다양한 유체이송 상황에 대한 일반적 조작기능 향상법에 대한 연구가 수행될 예정이다.

참고문헌

1. Ken'itch Yano, kazuhiko Terashima,"Robust Liquid Container Transfer Control for Complete Sloshing Suppression," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 9, No. 3, pp.483-493, May 2001.
2. Ken'itch Yano, Shimpei Higashikawa, kazuhiko Terashima,"Motion control of liquid container cnsidering an inclined transfer path," *Control Engineering Practice*, Vol. 10, pp. 465-472, 2002.
3. S. Rhim and W.J. Book, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 9 (2004) ,p 619