

유동해석에 의한 스팀세척시스템용 슬롯타입 노즐의 최적설계연구 A Study on Optimal Design of Slot-Type Nozzle by Numerical Flow Analysis

***김진대¹, 조지승¹, 박철휴¹, 은순일²

**J. D. Kim¹(jdkim@dmi.re.kr), C. S. Cho¹, C.H.Park¹, S.I.EUN²

¹ 대구기계부품연구원 메카트로닉스부품산업화센터, ² (주)소보텍 기술연구소

Key words : Steam Nozzle, Design Variables, Volume of Fluid, Computational Fluid Dynamics, SST Turbulence model,

1. 서론

21세기는 물류의 시대라 해도 과언이 아닐 만큼 모든 산업부문에서 물류가 차지하는 비중은 상당하다. 국내의 물류대형업체는 물류비용 절감을 위해 물류의 표준화를 추구하며 비용절감과 효율증대를 위해 많은 노력을 해오고 있다. 표준화된 용기는 재사용이 가능한 플라스틱 재질로 대부분 만들어져 있으나 적재물에 따라 많은 이물질이 붙어 재사용시 청결성과 살균성등이 필수적이다. 파렛트 세척기의 세척용은 노즐에서의 분사압력크기, 충돌벽면에서의 압력균일성등에 의해 결정되어진다. 보다 효과적인 세척력과 살균성 확보등을 위해서 열이 포함된 형태인 스팀분사 방식이 많이 사용된다. 본 연구에서는 기존의 플라스틱 파렛트 세척방법인 물세척의 방법에서 탈피하여 소량의 물과 스팀, 열을 동시에 이용할 수 스팀세척노즐의 유동해석을 통한 설계변수들에 대하여 최적화를 수행하여 충돌벽면의 압력제거와 압력균일성을 검증하고 세척효과를 최대화하려고 한다.

2. 유동해석 방법

2.1 스팀노즐 설계변수

Fig. 1은 본 연구의 스팀노즐(Steam Nozzle)의 실제형상을 보여주고 있다. 노즐이 스팀을 분사하는 방향과 세척이 수행되는 플라스틱 파렛트는 수직에서 5도 기울어져 있으며 노즐과 파렛트 사이의 거리는 30mm이다.

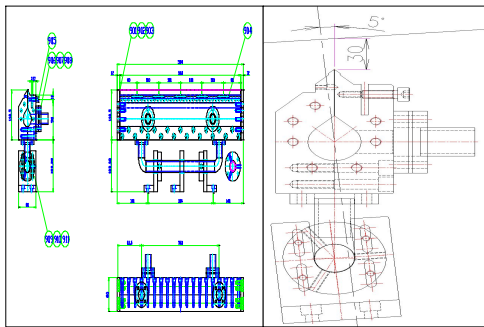


Fig. 1 Shape of Steam Nozzle

스팀노즐의 세척효과와 살균효율을 최대화 하기 위해 분사압력 및 충돌벽면 압력균일성 조건을 탐색하기 위해 두가지의 설계변수를 설정하여주었다. Fig. 2와 같이 첫 번째 설계변수(X1)는 노즐 슬롯(Slot) 틈의 간격유지를 위하여 노즐 중간에 들어가는 칸막이의 폭을 설정하였으며, 두 번째 설계변수(X2)는 노즐 슬롯 틈의 간격을 설정하였다.

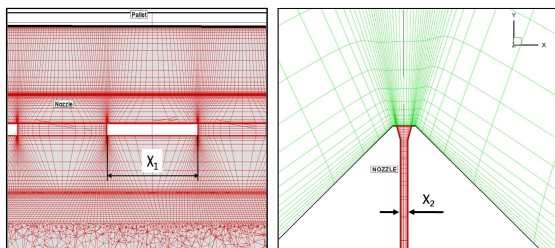


Fig. 2 Design Variables of Steam Nozzle

2.2 VOF(Volume of Fluid) 방법

스팀노즐을 통해서 대기중으로 고온 고압의 스팀이 분출되며, 이 스팀이 노즐의 정면에 위치한 플라스틱 파렛트(Pallet) 벽면을 때리게 되고, 스팀의 운동량(momentum)에 의해 벽면에 고압이 발생하게 된다. 이러한 유동현상을 해석하기 위해서는 공기와 스팀 두 가지 상태의 유체를 동시에 해석할 수 있는 VOF (Volume of Fluid) 방법¹을 사용하였다. VOF 방법은 자유면 혹은 유체와 유체의 경계면을 트래킹(Tracking) 및 로케이팅(Locating) 하기위한 수치적 기법으로, 격자 사이에 위치하는 형상(Shape) 조건 및 상태를 구현하는 오일러 방법(Eulerian Method)이다. VOF 방법은 프랙션(Fraction) 함수 C라 불리는 기법에 기반하고 있는데, 이 함수 C는 유동특성함수의 적분으로 규정된다. 예를 들어 어떤 특정한 공간안에 관심유체가 존재하지 않는다면 C=0이 되며, 관심유체가 꽂차있다면 C=1이 된다. 그리고 그 경계부위에서는 0 < C < 1의 값으로 구현된다. 함수 C는 스칼라 함수이며, 속도를 가지고 관심유체가 움직인다고 하여도 그 상태가 변화하지 않는다. 이러한 방법에 따라 VOF함수 C는 식 (1)과 같은 방정식 형태를 만족하게 된다.^{1,2,3}

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla C = 0 \quad (1)$$

2.2 경계조건 및 시험조건

공기의 상태는 비압축성 이상 기체 조건을 사용하였으며, 이 조건은 공기의 온도 및 압력의 변화가 그리 크지 않으므로 상당히 현실적인 조건이다. 스팀의 경우는 압력이 극심하게 변화하며 (10atm-0atm) 온도도 비교적 크게 변화하므로 (393K-300K) 밀도를 상수값으로 가정하는 비압축성 유체로 가정하기에 무리가 있으므로 압축성 이상기체로 가정하여 계산을 수행하였다. 유동장 해석을 위한 지배방정식으로는 기본적인 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식에 이상(2-phase)유동 해석을 위한 VOF 모델과 난류 점성의 계산을 위한 2방정식 SST 난류 모델을 추가적으로 적용하여주었다. 이러한 유동해석을 위한 솔버(Solver)의 조건은 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Test Conditions and Solver Conditions

Materials	Air	Incompressible-ideal gas
	Steam	Ideal gas
Computation	Formulation	Implicit
	Time	Steady state
	Materials	2-phase flow (air, steam), VOF model (Volume of Fluid)
	Viscous	SST turbulence model

노즐의 입구로 들어오는 입구조건(Inlet) 조건과 파렛트를 거쳐서 외부로 빠져나가는 경계 조건은 Table 2와 같이 주었다. 입구조건을 설정을 위하여 압력과 온도값을 실제 작동조건과 유사한 값으로 설정하였으며, 출구조건(Outlet)은 300K, 0atm의 일반적인 외기조건을 적용하였다. 파렛트 및 노즐 내부의 벽면조건은 점착(No-Slip) 단열(Adiabatic) 조건을 주었으며, 이 조건은 점성 유동해석 문제에서 일반적으로 적용하여주는 조건이다.

Table 2 Boundary Conditions

Inlet	Material	Steam (ideal gas condition)
	Pressure	10 atm ($\approx 10\text{kgf/cm}^2$, gage pressure)
	Temperature	393 K ($\approx 120^\circ\text{C}$)
Outlet	Materials	Air and steam
	Backflow Pressure	0 atm (gage pressure)
	Backflow temperature	300 K ($\approx 27^\circ\text{C}$)
Wall	No-slip adiabatic wall condition	

해석을 위해서 Fig 3과 같이 스팀과 공기가 존재하는 유동장에 격자를 생성하였으며, 정밀한 해석의 수행을 위하여 유동장이 극심하게 변화하는 노즐의 출구부분과 파렛트의 벽면에 격자를 밀집시켜주었다. 생성되어진 격자(Node)의 수는 약 136만개 이다.

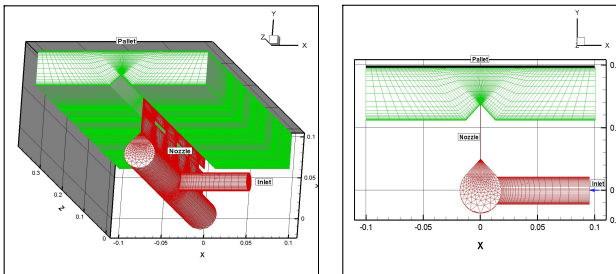


Fig. 3 Grid System(1.36 million nodes)

3. 유동장 해석 결과

Fig 4는 노즐 슬롯의 방향을 따라 자른 단면상에서의 압력분포를 보여주고 있다. 스팀 챔버(Chamber) 내부에서 정체되어 고압의 상태로 존재하던 스팀은 노즐을 통과하면서 압력이 감소하게 되고 노즐 팁(Tip)을 거쳐서 외부로 분출되는 순간 대기압의 상태가 된다. 이때 노즐 내부 칸막이 사이의 부위 (b)에서는 압력이 크게 강화되며 노즐 팁을 떠날 때 스팀의 유동속도가 증가하게 되지만 칸막이가 있는 부위 (a)에서는 노즐팁을 빠져오는 유동이 상당히 줄어들게 될 것임을 볼수 있다. 이러한 현상은 Fig. 5의 Y방향 속도분포에서도 잘 살펴볼 수 있다.

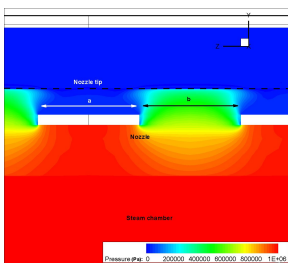


Fig. 4 Pressure Contours at the cross section(x=0)

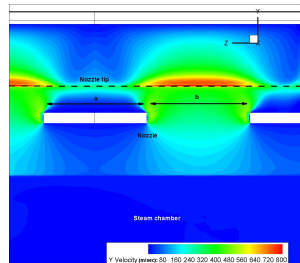
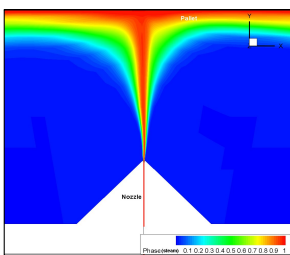
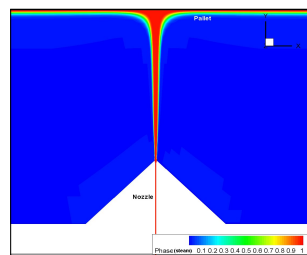


Fig. 5 Y-Direction Velocity Contours at the cross section (x=0)



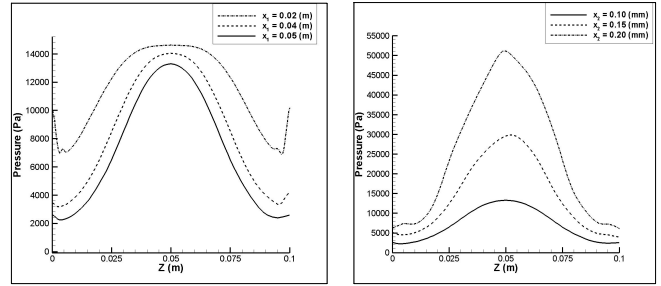
a) 칸막이가 있는 부위 (Z=0.10)



b) 칸막이가 없는 부위 (Z=0.05)

Fig. 6 Steam Phase Contours at the cross section

Fig. 6은 노즐 슬롯(Slot)에 수직인 평면으로 자른 단면에서 스팀압력분포를 보여주는데 노즐 내부의 칸막이가 있는 부위의 경우인 (a)에서는 주위로 퍼져있는 스팀의 분포가 나타나고, 칸막이가 없는 부위인 (b)의 경우는 중심에 집중되어 있음을 확인할수 있었다.



(a) X1 Conditions (X2=0.001m)

(b) X2 Conditions (X1=0.05m)

Fig. 7 Design Variables Result

Fig. 7의 (a)는 설계변수 X1의 변화에 따른 파렛트벽면에서의 압력분포에 해석결과를 나타내는데 X1이 줄어들수록 전체적인 압력이 점차 높아지고 있으며, 특히 압력이 낮았던 부위가 더욱 큰 비율로 증가하고 있음을 알 수 있다. (b)는 설계변수 X2의 변화에 따른 압력분포 해석결과인데 X2가 증가할수록 전체적인 압력이 점차 높아지고 있음을 잘 살펴볼 수 있다. 그러나 압력의 최대치의 증가에 비하여 최저치는 그다지 크게 증가하고 있지는 못하여, 균일한 압력분포를 얻는 데에는 효과적이지 않음을 확인하였다.

4. 결론

파렛트세척 시스템에서 스팀이 노즐을 통과하게 될 때에는 노즐 슬롯면적과 통과하는 유량이 거의 같은 비율로 비례하는 관계를 가지게 된다. 설계변수 X2를 증가시킨다는 것은 노즐의 출구 면적을 증가시킨다는 것과 동일한 얘기이며, 이 경우 파렛트 벽면에 작용하는 평균 압력을 높리게 되는 효과가 있음을 확인하였다. 압력분포의 균일성을 좋게하기 위해서는 노즐의 중간에 설치되는 칸막이의 조정이 필요하며, 이 칸막이의 크기(X1)를 줄여줌으로서 균일한 압력분포를 얻을 수 있었다. 하지만 긴 슬롯을 가지고 있는 노즐의 구조적인 안정성과 제작 가능성을 고려하여 적당한 정도의 크기를 유지하여야만 할 것이다.

이러한 해석결과들을 바탕으로 실제로 스팀노즐을 제작할 시에는 외부 스팀공급장치의 성능을 확실하게 파악한 후 그 한계에 따른 최대의 노즐출구면적을 결정하고, 구조적인 안정성과 제작 가능성을 고려한 최소의 중간 칸막이를 가지는 스팀노즐을 설계하여야만 한다.

후기

본 연구는 2009년 성서추진단 맞춤형특성화사업 공동기술개발과제의 지원으로 수행하였습니다.

참고문헌

- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries," Journal of Computational Physics, 1981.
- "Fluent 6.3 User Guide," Fluent Inc. 2006
- "Fluent Tutorial Guide," Fluent Inc. 2006
- White, F.M., "Fluid Mechanics," Mc Graw Hill, 2008
- Anderson, J.D., "Modern Compressible Flow: 3rd edition," Mc Graw Hill, 2004