

헤드박스 난류발생장치 내의 유체거동에 관한 이론적 및 실험적 분석

윤 혜 정 · 이 학 래
서울대학교 임산공학과

1. 서 론

초지기의 핵심설비인 헤드박스는 펄프섬유 현탁액을 초지기 전 쪽으로 분배하는 기능을 가지며 종이의 구조에 지대한 영향을 미친다. 종이의 구조는 포밍 존의 각종 탈수 인자에 의해서도 영향을 받을 수 있지만, 초지속도가 고속화됨에 따라 헤드박스의 역할은 더욱 중요해지고 있다. 좋은 종이를 얻기 위해서는 헤드박스로부터 사출되기 전 가능한 한 MD 및 CD 방향으로 균일한 분산이 이루어져야 하는데, 이는 헤드박스 내 난류발생장치와 슬라이스 등의 디자인과 유동 조건에 의해 크게 좌우된다.

지료의 균일한 분산과 강도 극대화를 위한 지층 구조의 형성을 위해 다양한 디자인의 헤드박스가 개발되고 있다. 새로운 디자인의 헤드박스 개발은 모델 제작을 통한 실험적인 방법에 의해 행해지지만, 근래에 들어 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 방법이 관심을 모으고 있으며 앞으로는 이러한 이론적 분석이 더욱 많아질 것으로 기대되고 있다. 이론적 분석을 통한 연구는 모델 제작에 소요되는 비용을 감소시킬 수 있으며 실험을 통해 측정하기 어려운 유동 특성을 평가할 수 있는 장점을 지니고 있으나, 여러 가정 하에 진행되기 때문에 실제 상황과 다른 해석 결과를 제공할 가능성도 있다. 이러한 분석의 오류를 방지하기 위해서는 이론적 분석 결과를 실측치와 비교, 검증할 필요가 있다. 또한 이론적인 분석을 통해 최적의 디자인으로 설정된 모델에 대한 실험적 평가는 반드시 이루어져야 한다. 즉, 이론적 분석과 실험적 분석을 통하여 헤드박스의 디자인을 개발하는 것이 가장 적절한 방법으로 판단된다. 헤드박스 설계 시 주로 이용될 수 있는 이론적 방법으로는 FEM 이나 FDM이 있으며, 사출된 젯(jet)에 관해서는 BIM도 적용할 수 있다.

본 연구에서는 이론적 방법을 도입하여 헤드박스의 난류발생장치 내 유동을 해석하였으며, 파일럿으로 제작된 모델을 이용하여 MD와 CD 방향 유속 및 압력 분포를 실험적으로 측정하여 적절한 헤드박스 난류발생장치로의 적합성을 평가하였다. 헤드박스 내 유동의 이론적 해석을 위해서 FVM을 기본 도구로 이용한 상용 코드 "FLUENT v.4.4"를 이용하였고, 속도 및 압력 분포, 유동함수, 난류 에너지와 소산을 등을 평가하였다.

2. 이론적 해석

2.1 지배방정식

유체해석을 위한 지배 방정식으로 비압축성 뉴턴 유체의 유동에 적용하는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 이용하였다 (Eq. 1, 2).

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad [\text{Eq. 2}]$$

난류 유동은 속도와 압력이 시간평균값과 파동 함수로 표현되기 때문에 점성응력 뿐 아니라 레이놀즈 응력에 관하여 해석이 되어야한다. 난류의 경우 완전한 이론적 해법이 아직 밝혀지지 않았기 때문에 일반적으로 완결 모델(closure model)을 사용하고 있다. 본 연구에서는 $\kappa - \epsilon$ model과 R-N-G $\kappa - \epsilon$ model을 채택하여 비교하였다.

2.2 난류발생장치의 형태 및 컴퓨터 시뮬레이션

스텝 디퓨저 형태인 돌연확대관과 90도로 꺾여진 형태의 난류발생장치에 대한 이론적 해석을 2차원 직교좌표계를 이용하여 실시하였다. 스텝 디퓨저 형태는 헤드박스 난류발생장치에 일반적으로 적용되고 있으며, 90° bent tube는 고농도 헤드박스 내 난류발생장치의 일부로서 채택되고 있다. 상류부와 하류부의 관의 직경 비로 정의되는 확대비를 달리 적용하였다. 돌연확대관의 경우 2, 3 및 4를 취했으며, 90° bent tube는 0.5, 1, 2 및 3을 취하였다. 경계조건으로 유입부의 레이놀즈 수가 각각 1.0×10^5 , 5.0×10^5 , 1.0×10^6 이 되도록 초기속도를 주었으며 벽면에서의 속도는 모두 0으로 설정하였다. 방정식의 컴퓨터 계산은 반내재적으로 처리되었으며, 정규화된 잔차의 합이 1×10^3 이하로 낮아질 때까지 반복 계산하였다.

2.3 결과 및 고찰

돌연확대관 내 확대비에 따른 x-방향 속도 프로파일이 Fig. 1에 제시되어 있다. 돌연확대부에서 유동의 박리가 일어나고 일부 유동은 재순환영역을 형성하였으며, 이후 하류로 진행함에 따라 완전발달된 유동을 나타내었다. 확대비가 2인 경우 확대부 직후 후류가 작은 크기로 발생하지만, 확대비가 증가할수록 스텝 근처에서의 속도는 0에 가까우며 어느 정도 떨어진 지점에서 후류가 발생하고, 재순환영역은 확대되었다. 스텝 이후 벽면에서의 x-방향 속도가 0인 재부착점까지의 거리인 재부착 거리(reattachment length)는 확대비가 증가함에 따라 증가하였으며, 레이놀즈 수에 의한 영향은 그다지 크지 않았다. 이러한 유동의 변화는 유동함수의 분포를 통해서도 확연히 알 수 있었다.

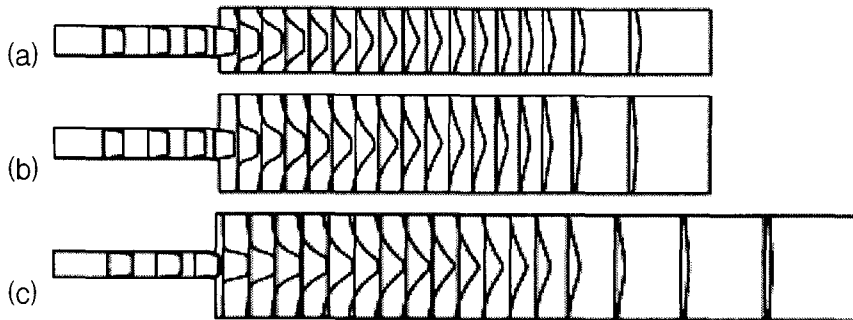


Fig. 1. Velocity profiles of flow ($Re=5 \times 10^5$) in expansion tubes with step expansion ratios of 2 (a), 3 (b), and 4 (c).

난류모델에 따른 유동해석의 차이는 Fig. 2의 재부착 거리로부터 확인할 수 있었다. R-N-G model에 의해 구해진 재부착 거리가 $\kappa-\epsilon$ model에 의해 구해진 것보다 높은 수치를 나타냈다. $\kappa-\epsilon$ model은 R-N-G $\kappa-\epsilon$ model에 비해 난류확산성을 과도하게 예측함으로써 낮은 재부착 거리를 나타내는 것으로 알려져 있다.

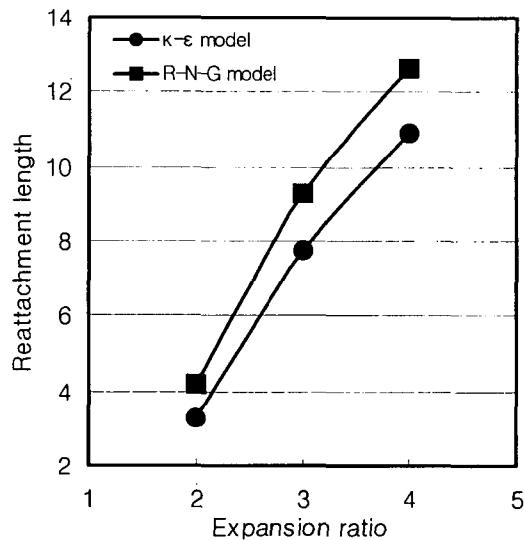


Fig. 2. Reattachment length(L_r) as a function of expansion ratio with turbulence model.

90° bent tube 내 난류에너지의 분포는 Fig. 3에 제시된 바와 같았다. 난류에너지는 유동 박리로부터 형성되는 전단층을 따라 급격히 발생하며, 확대비가 작은 경우에는 bent tube의 내부 코너에 집중되지만 확대비가 증가함에 따라 난류에너지의 분포가 하류쪽으로 이동하여 넓게 분포하였다. 이는 관이 확대되면서 유동의 박리가 크게 발생하기 때문으로 생각된다.

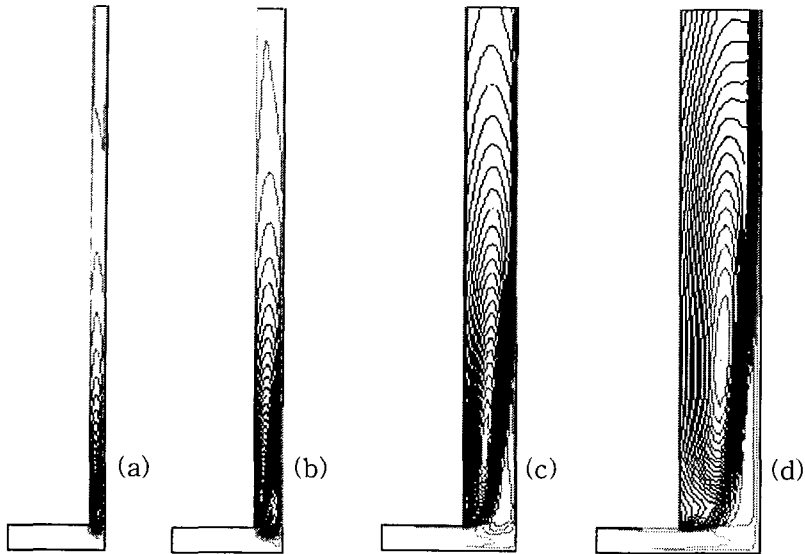


Fig. 3. Turbulence energy contour of the flow with $Re = 5.0 \times 10^5$ in 90° bent tubes
((a), 0.5; (b), 1.0; (c), 2.0; (d), 3.0).

3. 실험적 계측

3.1 헤드박스 모델 제작 및 유동 평가

본 실험을 위해 탱크, 원심펌프, 디스트리뷰터, 헤드박스로 구성된 실험용 파일럿 헤드박스를 제작하였으며, MD 및 CD 방향의 유속과 압력을 측정하기 위해 피토판과 이송장치를 설치하였다. 피토판의 데이터는 압력계를 통해 컴퓨터로 입력되도록 하였으며, 이송장치는 속도와 방향제어가 가능하도록 하였다. CD 방향으로 2.5 mm 마다 압력을 측정하여 세 가지 헤드박스 모델의 유동 특성을 평가하였다. 이중 두가지 모델(type A, type B)은 일반적으로 채택된 스텝 디퓨저 형태로 관 단면적의 확대와 단면모양의 변화를 통해 난류를 발생시킬 수 있는 타입이었으며, 다른 하나(type C)는 고농도 초지에 이용될 수 있는 형태였다. 재순환밸브의 개폐율에 따른 유체의 유속과 압력이 평가되었으며, 염료 투입을 통해 헤드박스 내 유동을 가시화하였다.

3.2 결과 및 고찰

재순환밸브의 개구비가 증가할수록 유속과 압력은 감소하였으며, 개구비가 0.1-0.5로 변화될 때 가장 큰 감소를 나타냈다. 또한 슬라이스의 하류로 이동할수록 관면적의 감소로 인해 속도는 증가하였다. 압력의 CD 프로파일은 매우 균일하였으나, 속도의 경우 난류발생장치의 벽면의 영향이 나타났다. 난류발생장치의 모델에 따른 CD 방향 유속 분포는 Fig. 4에 제시하였다. 대체로 슬라이스쪽으로 이동할수록 안정된 유동이 얻어졌으며, 90° 로 꺾인 관

의 경우 난류발생장치 직후 매우 불안정하며 분산된 유속 분포를 나타내었다. 즉 이러한 모델은 큰 와류를 형성할 수는 있지만, 젯의 안정성이 부족하여 종이의 품질 저하를 유발할 것으로 판단되었다. 따라서, 난류발생장치 이후 유동을 안정화시킬 수 있는 설비를 갖추는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

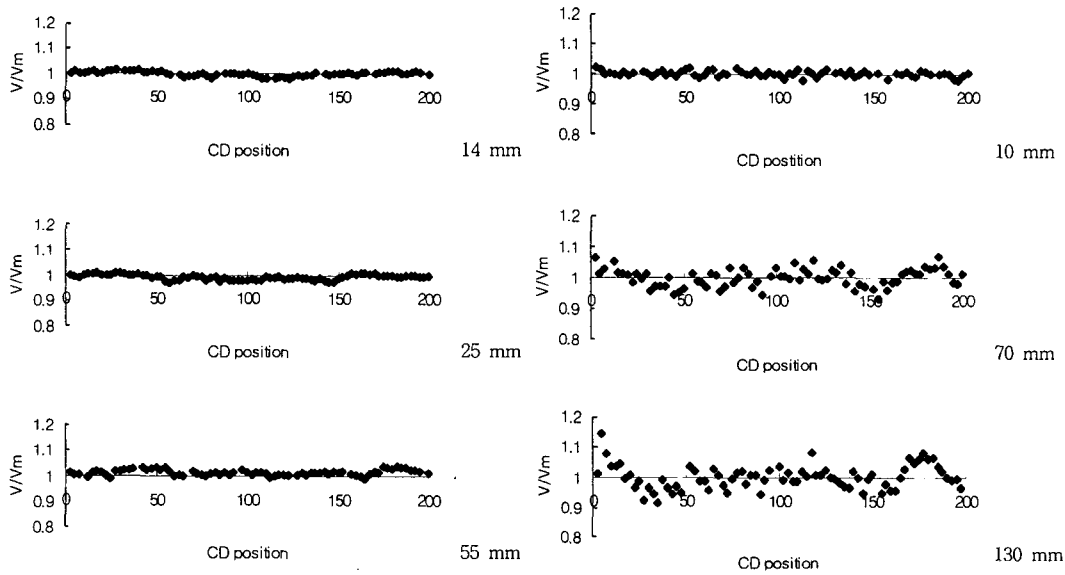


Fig. 4. CD profile of the normalized velocity at three locations from slice of type A(left) and type C(right) headboxes (fractional opening of return valve = 0.1).

4. 결론

균일한 지합 형성을 위한 핵심설비인 헤드박스의 난류발생장치 내 유동을 평가하기 위해 몇가지 모델을 제작하여 실험적으로 평가하였으며, 상용코드를 이용하여 이론적으로 해석하였다. 관의 확대 혹은 유동 방향 변화는 유동박리를 발생시키며 와류를 형성하는 것으로 나타났다. 또 확대비가 클수록 형성된 와류의 크기는 증가하였다. 난류 에너지는 스텝 이후 박리층 혹은 bent tube의 내부 코너에 특히 집중하여 발생하였다. 이러한 유동 특성에 대한 레이놀즈 수의 영향은 조사된 범위에서는 크지 않았다. 파일럿 헤드박스를 이용하여 실험적으로 평가한 결과 유량에 따라 유속이 변화되었다. 유동방향을 크게 변화시킬 경우 불안정한 유동이 형성되므로 균일한 지료의 사출을 위해서는 충분한 와류 뿐 아니라 안정성을 부여할 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다고 판단되었다.