

사이클론형 석탄가스화기내의 2차원 및 3차원 유동장 해석

이진욱*, 나혜령, 이한구
고등기술연구원 전력에너지연구소

요 약

사이클론형 석탄가스화기내의 2차원 및 3차원 난류 선회유동장을 수치해석 기법을 이용하여 해석하였다. 2차원 해석을 통하여 선회수의 크기에 따른 유동장의 특성을 고찰하였으며, 3차원 유동장 해석결과와의 비교를 통하여 2차원화의 가정에 적절한 개념을 도출하였다. 입구의 크기 및 위치를 적절히 조절하여 반응기 내부에 적절한 유동장을 형성시킬 수 있음을 발견하였다.

1. 서 론

최근 들어 석탄가스화 복합발전 시스템에 대한 중요성의 인식으로 인하여 이에 대한 연구/개발, 특히 독자적인 가스화기의 개발에 많은 노력이 기울여지고 있다. 석탄가스화기는 공정의 특성에 따라 다양한 형상을 지닐 수 있겠으나, 건식석탄공급방식을 채택하고 있는 Shell, Hitach 및 국내의 고등기술연구원 등에서는 원통형 반응기의 측벽에서 다수의 버너가 존재하는 사이클론형 가스화기를 채택하고 있다. 사이클론형 반응기는 석탄가스화기 뿐만 아니라 연소기 및 폐기물소각장치 등 산업계에 널리 이용되고 있는 장치이다. 사이클론형 반응기는 측벽에서 산화제 및 연료가 공급되는 특성상 필연적으로 강한 선회가 수반되며 결과적으로 내부에는 다양하고 복잡한 유동장이 형성될 수 있다. 이러한 산업계의 넓은 응용성 및 반응기 내부에 존재하는 다양한 유동장의 특성에 대한 학문적 관심으로 인하여 많은 연구가 이루어지고 있다[1, 2].

반응기의 상단(또는 하단)에서 연료 및 산화제가 공급되는 일반적인 연소시스템에서는 선회가 존재하는 경우에도 유동장의 특성은 비교적 간단한 편이며, 단일 변수인 선회수의 크기만으로도 대략적인 유동장의 특성을 예측할 수 있다. 그러나 반응기의 측벽에서 연료 및 산화제가 공급되는 사이클론형 반응기내에서는 버너의 위치 및 크기 등에 의하여 측방향 속도 및 재순환 영역의 특성이 훨씬 복잡한 유동이 존재하는 것으로 알려져 있다[3]. 이러한 사이클론형 반응기를 효율적으로 설계하기 위해서는 내부에서 발생하는 복잡한 현상에 대한 이해를 통하여 적절한 유동장의 제어가 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 수치해석적 방법을 이용하여 측벽에 다수의 버너가 존재하는 사이클론형 가스화기에 대한 비반응 유동장을 해석하였다. 가스화기 내부의 유동장의 특성을 결정하는 주요 변수들의 변화에 따른 유동장의 변화를 고찰하였다. 문제를 단순화 시킨 2차원 유동장 해석을 통하여 선회수의 크기에 따라 가스화기 내부의 유동장의 특성을 분류하였다. 2차원 유동장 해석결과를 3차원 유동장 해석결과와의 비교를 통하여 2차원화의 가정에 적절한 개념을 도출하고, 2차원 가정의 타당성을 입증하였다. 비반응 유동장에 대한 해석이지만, 결과는 향후 가스화기의 설계, 특히 버너의 크기 및 위치를 결정하는 판단자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 이론적 고찰

본 연구에 적용된 가스화기는 원통형 형상을 지니며, 가스화기의 측벽에서 기체가 유입된다. 그림 1(a)는 본 연구에 적용된 원통형 용기를 수치해석을 위하여 다수의 제어체적(control volume)으로 분할한 모습이며(전체의 1/4만 표시), 그림 1(b)는 2차원 해석시 적용되는 한 단면을 나타낸다. 2차원 해석의 경우 매우 작은 틈새에서 유입되는 유동장의 특성상, 제어체적 크기의 급격한 변화를 막기위하여 입구 주변에 극도로 밀집시킨 격자계를 생성하여 해석에 이용하였다. 이와 같은 원통형 용기내부의 유동장 및 난류특성을 지배하는 방정식을 텐서(tensor) 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\Gamma_\phi}{\sigma_\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi$$

위 식에서 ϕ 는 해석하고자 하는 종속변수로서 각 축방향의 속도성분(U, V, W), 난류운동에너지(k) 및 난류운동에너지의 소멸율(ϵ)을 나타낸다. ρ 는 기체의 밀도, Γ_ϕ 와 σ_ϕ 는 각 종속변수에 대한 등가확산계수 및 난류프란틀수(turbulent Prandtl number)를 각각 나타낸다.

난류유동의 예측을 위하여 일반적으로 수렴성이 좋고 해석결과의 정확성이 비교적 뛰어난 표준 k- ϵ 모델이 많이 이용되고 있다. 그러나 표준 k- ϵ 모델은 등방성 가정을 기초로 하였기 때문에 유선의 곡률이 심한 경우, 특히 선회가 존재하는 경우에는 유동의 근본적인 비등방성 특성으로 인하여 해석결과의 신뢰도가 부족한 것으로 알려져 있다. 표준 k- ϵ 모델을 보완하여 재순환 및 선회유동에 적용하기 위한 많은 모델들이 제시되고 있으며, 선회 유동의 경우에는 리차드슨수(Richardson number) 보정법이 여러가지 제시되었다. 본 연구에서는 상업용 열유체해석 프로그램인 PHOENICS를 이용하여 해석을 수행하였으며, PHOENICS에서 제공되는 표준 k- ϵ 모델에 난류운동에너지소멸율 방정식의 소멸항의 리차드슨수 보정법을 부프로그램으로 첨가하고 선회속도 방정식에서의 난류프란틀수를 축 및 반경 방향의 값과 달리하여 비등방성을 부여하는 방법을 적용하였다[1, 4]. 즉,

$$C_{\epsilon 2}^* = C_{\epsilon 2}(1 - C_3 R_i), \quad R_i = \frac{k^2}{\epsilon^2} \frac{v_\theta}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(rv_\theta)$$

$$\mu_{axial, radial} = \mu_{eff}, \quad \mu_{swirl} = \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{swirl}}$$

여기서 C_3 및 σ_{swirl} 은 각 유동장에 대하여 최적화되어야 하는 경험상수로서, 본 연구에서는 0.01과 2.5를 이용하였다.

사이클론형 반응기의 측벽에는 하나 또는 다수의 입구(버너)가 존재한다. 이러한 실제 현상을 2차원화하기 위해서는 필연적으로 측벽에 원주방향으로 가는 틈새(slit)가 존재하는 것으로 가정할 수 밖에 없다. 이 경우에 선회수, 질량유속 및 입구에서의 각 속도성분의 비에 대한 상사를 만족시켜주기 위하여 입구(틈새)의 크기 및 유입속도를 다음과 같은 간단한 질량보존 관계식을 이용하여 결정하였다.

$$n\pi r^2 V_{feeding} = 2\pi RL_{slit} V_{r,in}$$

$$V_{r,in} = V_{feeding} \cos \theta, \quad V_{\theta,in} = V_{feeding} \sin \theta,$$

여기서 n , r 및 V_{feeding} 은 기체유입구(버너)의 수, 반경 및 유입속도이며, R 은 가스화기의 반경, L_{slit} 은 2차원화 가정시 이용되는 등가 틈새길이, θ 는 분사각도를 각각 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

선회가 수반되고 레이놀즈수(Reynolds number)가 충분히 큰 유동장에서의 유동 특성은 일반적으로 선회수의 크기에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서와 같이 측벽에서 기체가 유입하는 경우에 난류요동항 및 압력항을 무시하고, 축방향으로 균일속도 및 유입된 기체의 각운동량 보존 가정을 적용하면 선회수는 다음과 같이 정의된다. 즉,

$$S_N = \frac{R}{2L_{\text{slit}}} \left(\frac{V_\theta}{V_r} \right)_{in}$$

본 연구에서는 (R/L_{slit}) 또는 (V_θ/V_r) 을 변화시켜 가면서 선회수 S_N 의 변화에 따른 유동장의 변화를 고찰하였다.

그림 2는 2차원 유동장에 대한 해석결과로서, 이 경우 $(R/L_{\text{slit}})=15$ 로 고정하고 (V_θ/V_r) 을 변화시켜 가면서 해석을 수행한 결과이다. 기체의 유입구는 석탄가스화기 전체 높이의 약 6/1에 위치하는 것으로 가정하였다. 격자가 극도로 밀집된 입구 주변에서 관찰의 편의를 도모하기 위하여 입구를 기준으로 하부방향으로는 2R, 상부방향으로는 4R의 영역까지 제한하여 속도벡터를 도시하였다. 그림2(a)는 선회가 존재하지 않는 경우에 대한 해석결과이다. 유입된 기체의 대부분이 중심축 방향으로 진행한 후 가스화기의 출구가 위치한 상단부로 진행하며, 일부분은 하단부로 진행하게 되는 비교적 단순한 유동장을 형성하게 된다. 결과적으로 입구의 상하영역에 급팽창에 의한 재순환 영역이 형성됨을 보여주고 있다. 그림 2(b)는 선회가 비교적 약한 경우에 대한 해석결과로서 선회의 효과가 미약하게 나타나는 모습을 보여주고 있다. 중심축 방향으로 진행하던 기체는 선회에 의한 원심력으로 인하여 점차적으로 측벽방향으로 치우치는 경향을 나타내고 있다. 결과로서 입구의 상하에 위치한 재순환 영역은 크기가 줄어들고, 하부로 향한 기체중 일부는 중심축을 따라 다시 상부로 진행하게 된다. 그림 3(c)는 선회가 상당히 강한 경우의 해석결과로서 입구 상하의 재순환영역은 더욱 줄어들게 되고, 중심축 부근에는 적절한 크기로 발달된 재순환 영역이 형성된다. 이러한 중심축 부근의 재순환영역은 반응유동장의 경우에는 화염안정화에 도움이 되는 영역이므로, 그림 2(a) 및 2(b)의 경우에 비하여 연료의 반응에 바람직한 유동장이 형성됨을 관찰할 수 있다. 그림 3(d)는 선회가 아주 강한 경우의 유동장을 나타내고 있다. 선회의 효과가 너무 강하여, 대부분의 유동이 중심축 쪽으로 진행하지 못하고 측벽 근처에서 상향 또는 하향 유동을 일으키는 결과를 가져오고, 중심축 부근에서는 상부에서부터 입구영역 이하까지 침투하는 유동장이 형성됨을 보여주고 있다. 석탄가스화기의 경우에는, 이러한 유동장하에서는 미분탄의 반응이 벽면근처에 집중되고 미분탄입자가 반응을 완료하지 못한 상태에서 벽면을 따라 흐르는 슬래에 합쳐버리는 현상이 발생할 수 있으므로 바람직하지 않을 것으로 판단된다. 이와 같이 선회수의 변화에 따라 유동장을 크게 4가지로 분류할 수 있음을 관찰하였다. 가스화기의 이상적인 운전을 위해서는 버너의 크기 및 위치를 적절히 설정하여 그림 2(c)와 같은 유동장을 형성시켜주는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그림 3(a)는 측벽에 4개의 버너가 존재하는 석탄가스화기에 대한 3차원 해석결과로서, 버너가 위치한 단면에서의 축방향 및 반경반향 속도성분 벡터를 나타내고 있다. 선회수가 아주 크기 때문에 유입기체가 측벽방향으로 향하는 경향이 강하고

입구의 하부까지 역류가 생성되는 그림 2(d)와 같은 유동장이 생성됨을 관찰할 수 있다. 그림 3(b)는 그림 3(a)의 조건을 등가 틸새의 가정을 통하여 2차원화한 경우의 해석결과로서 입구근처를 제외한 대부분의 영역에서 전반적으로 3(a)와 유사한 결과를 보여주고 있다. 이와 같이 3차원 해석 및 2차원화 해석의 결과의 유사성으로부터 등가 틸새길이의 가정에 의한 2차원화 모델링이 타당성을 지님을 알 수 있다.

그림 4(a)는 그림 3(b)의 입구 근처에 대한 상세도를 나타내고 있다. 그림 4(b)는 동일한 질량유입에 대한 반응유동장의 특성을 고찰하기 위하여, 온도효과를 보정하여 해석을 시도한 경우의 결과를 나타내고 있다. 그림 4(a)의 경우에는 선회가 너무 강하여 중심축 부근에서 입구의 하부까지 침투하는 유동장이 형성되고 있으며, 그림 4(b)는 선회의 강도가 적당히 강하여 입구의 약간 하류쪽에 중앙 재순환 영역이 형성되어 반응유동장에 적절한 유동특성을 나타내고 있다.

이와 같은 해석결과를 종합하여 볼 때, 입구(버너)의 크기 및 위치를 적절히 조절함으로써 반응유동장에 적절한 유동장을 형성시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

선회를 수반하는 석탄가스화기내의 2차원 및 3차원 유동장을 수치해석 방법에 의하여 예측하였다. 선회의 강도에 따라 유동장은 크게 4가지의 형태로 분류될 수 있음을 발견하였으며, 3차원 물리적 현상을 등가 틸새 가정에 의한 2차원 해석결과가 타당성을 지님을 관찰할 수 있었다. 또한 버너의 크기 및 위치를 적절히 조절함으로써 석탄가스화기내에 적절한 반응유동장을 형성시킬 수 있을 것으로 판단되는 결과를 도출하였다.

후 기

본 논문은 통상산업부 에너지지원기술개발지원센터에서 지원하고 전력연구원에서 주관하는 “석탄가스화 복합발전 기반기술 개발” 과제의 지원을 받아 수행된 것으로서, 이에 센터 및 전력연구원 관계자들에게 감사드립니다. 또한 선회유동의 기본개념과 적절한 모델선정에 관하여 훌륭한 조언을 해주신 한국과학기술원 기계공학과 정명균 교수님께도 감사를 표하는 바입니다.

참 고 문 헌

1. A. K. Gupta, D. G. Lilley & N. Syred, "Swirl Flows", Abacus Press, 1984
2. 이진욱, 윤용승, "석탄가스화기내의 기체-고체 이상유동장에 대한 수치해석 연구", 한국에너지공학회지, 제4권 제3호, pp. 331-337, 1995
3. D. G. Sloan, P. J. Smith & L. D. Douglas, "Modeling of Swirl in Turbulent Flow Systems", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 12, pp. 163-250, 1986
4. F. Boysan & J. Swithenbanl, Report HIC 360, Dept. of Chemical Engineering and Fuel Technology, Sheffield University, Sep., 1980

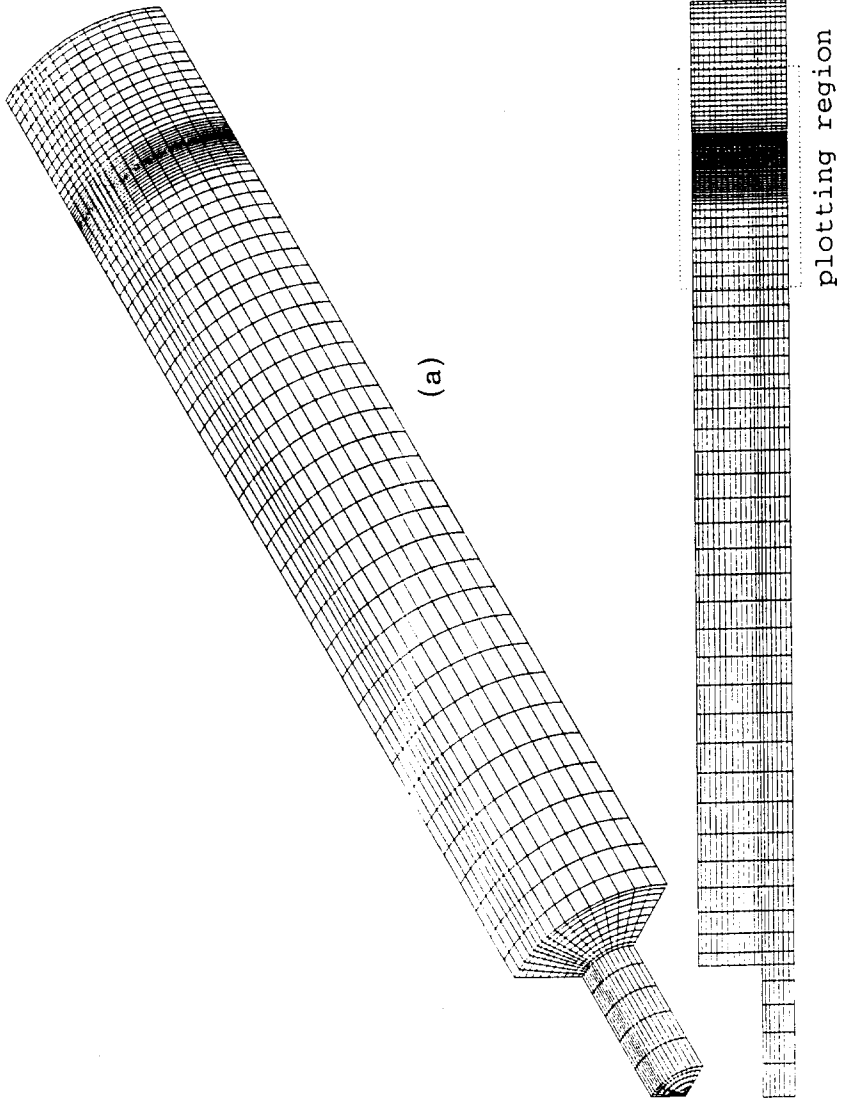
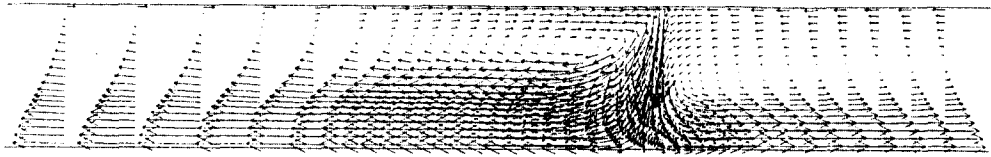
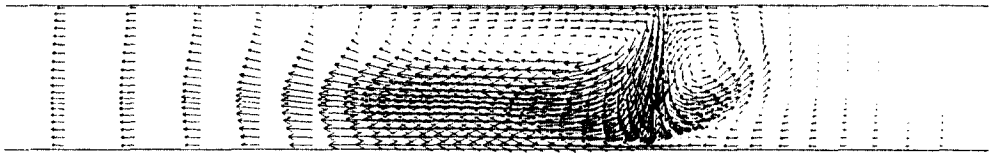


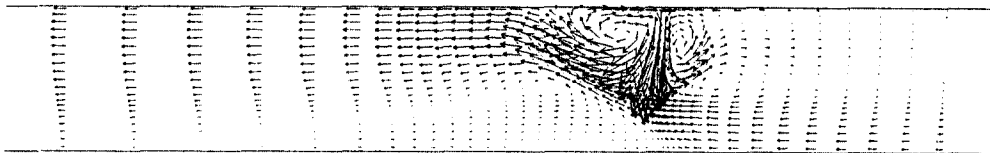
Figure 1 Grid net used for (a) three dimensional and
(b) two dimensional analyses.



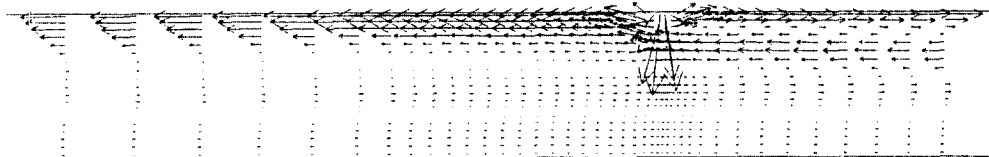
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 2 Vector plots of two dimensional analysis. $R/L_{silt}=15$ and
(a) $S_N=0.0$, (b) $S_N=0.75$, (c) $S_N=3.75$, (d) $S_N=30.0$

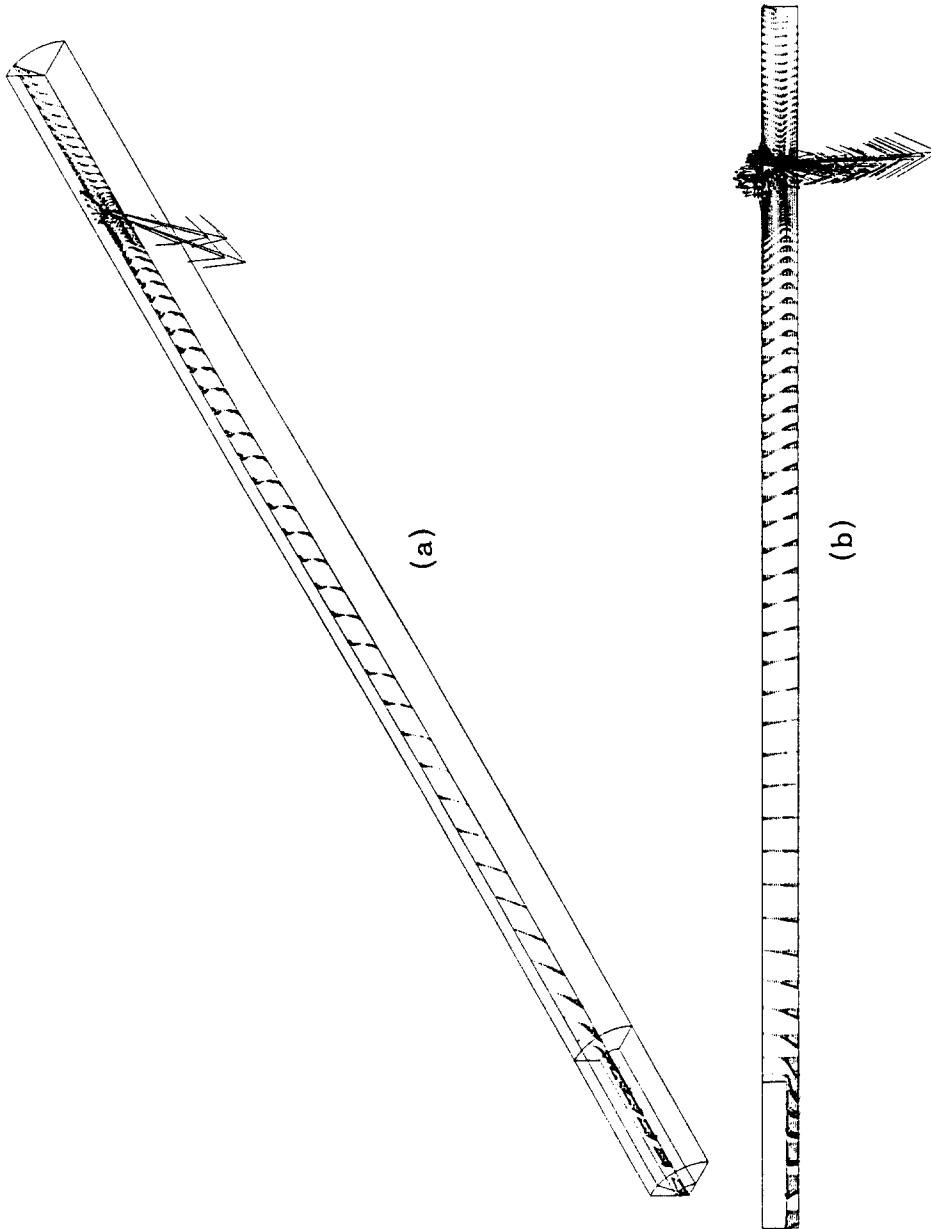


Figure 3 Vector plots of (a) three dimensional and (b) two dimensional analyses. $R/L_{silt}=150$ and $S_N=31.5$

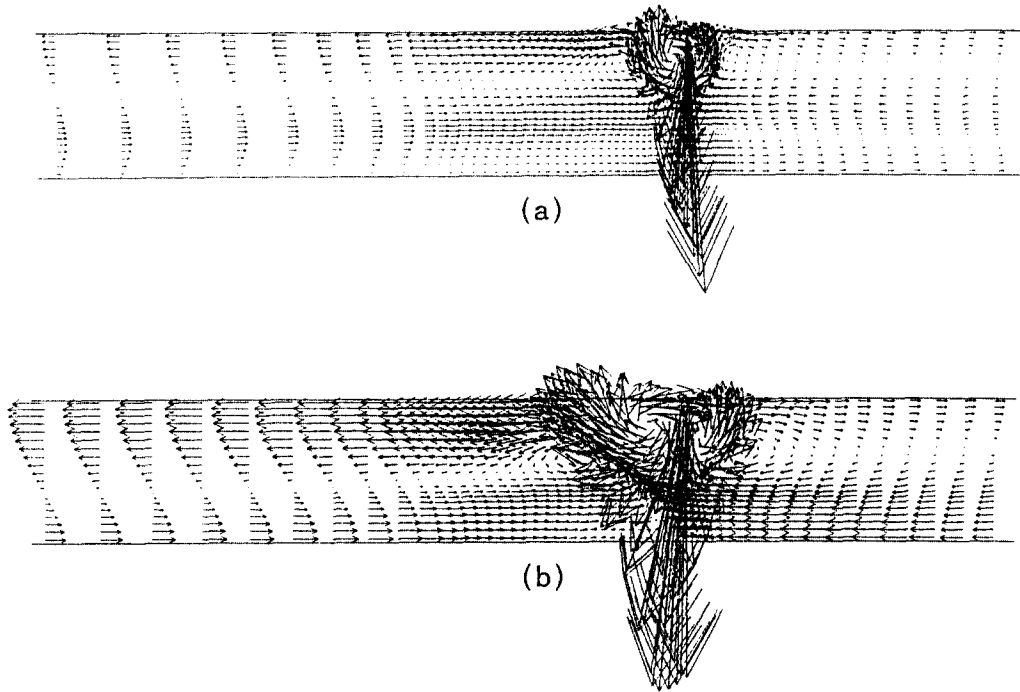


Figure 4 Vector plots of two dimensional analysis. Conditions are,
(a) $R/L_{silt}=150$, $S_N=31.5$ and (b) $R/L_{silt}=27$, $S_N=5.63$