

로타리 킬른형 소각로 개발을 위한 3차원 난류반응장 수치해석

엄 태인*, 장 동순

충남전문대학, 산업안전과
충남대학교, 환경공학과

요약문

산업폐기물 소각시스템으로 현재 널리 이용되고 있는 대형 로타리 킬른형 소각로를 모델로 선정하여 소각로 설계에 필요한 제반변수에 대한 영향을 슈퍼컴퓨터를 이용하여 분석하였다. 화염억제 작용이 있으며 소각처리시 유독물질을 배출하는 CCl_4 를 폐기물로 주입하는 경우 비평형 난류반응모델을 도입하여 반응장 해석을 한 결과 실험결과와 정성적으로 일치된 결과를 얻을 수 있었다.

1. 서론

폐기물 처리의 기본 방향은 감량화(waste reduction), 재자원화(recycling), 무공해 처리(de-toxification) 등이며, 국내의 매립지 부족 및 에너지 자원의 고갈을 동시에 해결할 수 있는 방안으로 최근 저공해 소각처리 기술이 주목을 받고 있다. 소각처리 방법은 폐기물의 감량화에 있어서 질량뿐만 아니라 용적에서도 10% 이하로 줄일 수 있다는 점과 소각시 발생하는 에너지의 이용이 가능하므로 저공해 소각 기술과 공해물질 제거기술 개발이 이루어질 경우 가장 타당한 폐기물 처리방법이라 할 수 있다.

그러나 폐기물 소각기술은 폐기물의 물리, 화학적 성상이 불균일하고 일반 연료와 달리 다량의 공해물질 성분(S, N, Cl, I, 중금속, 회분 등)을 함유하고 있으므로 부적당한 소각방법에 의한 공해물질의 배출이 심각한 문제를 야기시킬 수 있다. 그러므로 저공해 소각로 시스템 개발을 위해서는 폐기물의 성상에 적합한 소각로 설계 기술과 더불어 폐기물 공급장치, 2차 연소실, 보일러 설비, 공해물질 제거를 위한 세정설비 등의 단위공정 기술 개발과 전체 시스템을 최적 조건에서 제어할 수 있는 운전기술 개발이 동시에 이루어져야 한다.

본 연구에서는 산업용 폐기물 소각로 시스템에서 널리 이용되고 있는 대형로타리 킬른 소각로에서 일어나는 폐기물/보조연료와 공기의 혼합 및 증발 등의 물리적 과정과 열분해, 착화, 소각의 화학반응 과정의 복잡한 소각메카니즘의 해석에 슈퍼컴퓨터를 이용하고자 한다. 로타리 킬른 소각로 설계에 필요한 기본적인 변수는 킬른의 회전속도, 충전율, 버너의 입사각 및 소각용량 등이며, 이들에 대한 고도 공간 해석을 시도함으로써 로타리 킬른 저공해 소각로 설계기술 제고에 이바지 하는 것이 연구의 목적이다. 이를 위하여 미국의 Dow Chemical사의 로타리 킬른(그림 1)을 연구모델로 설정하여 수치해석 방법을 사용하여 3차원 난류 유동장 및 반응장 해석을 하였다^(1,2,3,4).

2. 수학적 모델

3차원 원통극좌표(cylindrical polar coordinate)에서 가스의 평균유동장을 기술하기 위한 운동방정식은 정상상태, 비압축성, 뉴우론유체로 가정하여 유도하였다. 종속변수는 속도성분 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 와 압력 (\bar{p}), enthalpy (\bar{h})와 화학성분의 질량분율($\bar{m}_{CO_2}, \bar{m}_{CH_4}, \bar{m}_{O_2}, \bar{m}_{CO}, \bar{m}_{H_2O}$)이며 이들 종속변수에 대한 일반적인 지배방정식(Navier-Stokes Equation)은 다음식으로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho \bar{u} \bar{\phi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r \bar{v} \bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \bar{w} \bar{\phi}) \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\Gamma_r \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial \theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\Gamma_r \cdot r \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial r}) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma_z \cdot \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z}) + S_0 \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 $\bar{\phi}$ 는 일반적인 종속변수이고 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 는 평균속도이고 Γ_0 와 S_0 는 $\bar{\phi}$ 에 대한 확산계수와 생성항이다. 난류는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 난류전달력항은 Boussinesq가정에 의하여 난류 또는 eddy점성계수 (μ_t)와 평균속도 구배의 곱으로 표시되고, 난류점성계수 μ_t 는 아래와 같이 Prandtl-Kolmogorov관계식으로 부터 얻어진다. 식(1)로 주어지는 일반적인 2차편미분 방정식의 해를 얻기 위해서 검사체적에 기초한 유한차분 방정식 (finite difference method)을 도입하여 선형적인 이산화 방정식 (discretization equation)을 유도하였다. 이 이산화 방정식의 z-, r-방향을 line-by-line TDMA(tridiagonal matrix algorithm)에 의해 해를 구하였으며 e-방향은 시작점과 종점이 같아지므로 이에 적용할 수 있는 "Cyclic TDMA" 방식을 도입하였다.

또한 운동 방정식 ($\bar{\phi} = \bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$)에서 야기되는 압력과 속도의 문제는 SIMPLER (Semi-Implicit Methods for Pressure-linked Equations Revised) 알고리즘을 이용하였고, 격자점 사이에서 임의의 함수값 보정은 Power Law Scheme 에 의하여 실행하였다⁽⁴⁾.

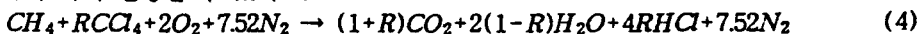
본 연구에서 소각로내의 난류반응 현상을 예측하기 위한 모델의 선택은 CH_4/CCl_4 /공기 혼합기의 난류반응이 일반 연소반응과 상당히 다른 양상을 나타내고 있기 때문에 매우 중요한 것이다. 특히 CCl_4 는 할로겐 화합물이므로 이 물질 소각에는 난류반응의 비평형 영향 때문에 일반적인 연소 반응모델을 직접사용 하기는 매우 곤란하다. 그러나 현재까지 할로겐 화합물의 비평형 연소 반응모델이 개발되어 있지 않으므로 Jang, D.S와 Acharya가 CCl_4 분해에 적용한 수정 Fast Chemistry모델을 사용하였다. 이 난류반응 모델의 기본은 CCl_4 가 분해될때 CH_4 와 비슷한 반응기구로 분해된다는 전제하에 이루어진 것이다. CH_4/CCl_4 /공기 혼합기에서 CH_4 의 반응속도(RR_{CH_4})는 Magnussen과 Hjertager가 제안한 Eddy Break-up 모델에 의해 아래식과 같이 주어진다.

$$RR_{CH_4} = \text{minimum of } \left| \bar{\rho} A \bar{m}_{fu} \frac{\epsilon}{k}, \bar{\rho} A \bar{m}_{ox} \left(\frac{\epsilon}{Sk} \right), \bar{\rho} A' \frac{\bar{m}_{pr}}{1+S} \frac{\epsilon}{k} \right| \quad (2)$$

위 식에서 S는 연료의 단위 질량당 완전연소에 필요한 산화제의 질량이고, A와 A'는 Lockwood et al.가 제시한 경험적 상수이다^(4,5). 또한 식(2)에서 사용한 CH_4/CCl_4 /공기 혼합기에서 CH_4 의 반응속도를 계산하기 위해 사용한 화학종의 질량분율은 다음식으로 부터 계산하였다.

$$\begin{aligned} \bar{m}_{fu} &= \bar{m}_{CH_4} & : & & \bar{m}_{ox} &= \bar{m}_{O_2} \\ \bar{m}_{pr} &= \bar{m}_{CO_2} + \bar{m}_{H_2O} + \bar{m}_{HCl} \end{aligned} \quad (3)$$

식(2)에서 주어진 CH_4 의 반응속도는 일반적으로 순수 CH_4 /공기 혼합기, 즉 CCl_4/CH_4 몰비인 R=0인 경우보다 다소 적을 것으로 예상된다. 이것은 CCl_4 와 HCl 화합물이 존재하므로 질량분율이 줄어지기 때문이다. 일단 CH_4 의 반응속도가 얻어지면 CCl_4 의 분해속도, RR_{CCl_4} 는 아래의 이론적인 반응의 표현식에 의해 결정될 수 있다⁽⁴⁾.



그러므로 CCl_4 의 반응속도, RR_{CCl_4} 는 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$RR_{CCl_4} = RR_{CH_4}(R) \frac{M_{CCl_4}}{M_{CH_4}} \quad (5)$$

위의 식(5)에서 M은 분자량이며 S는 아래식과 같다.

$$S = \frac{2M_{O_2} + 2RM_{O_2}}{M_{CH_4} + RM_C} \quad (6)$$

식(4)에서 CCl_4/CH_4 몰비인 R 값을 증가시키면 화학종 질량분을 $\overline{m_{CH_4}}$ 와 $\overline{m_{O_2}}$ 가 감소하게 되어 결과적으로 반응속도가 줄어들게 되어 연소반응이 억제된다. 그러나 이모델에서는 화학속도론적인 현상은 직접적으로 관여하지 못하고 있다.

3. 결과 및 토론

본 연구에서 산업용 폐기물 저공해 소각로 개발을 위한 모델로 이용한 Dow Chemical사의 로타리 킬른 소각로에 대하여 비반응 난류유동장과 난류반응장에 대해 슈퍼컴퓨터를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 그 결과 비반응 유동장해석에서는 킬른 입구의 상, 하 두버너의 분사각(injection angle)이 고행 폐기물 상단에서 화염안정화와 고행폐기물 소각에서 필요로 하는 다량의 열에너지를 공급하는데 매우 중요한 역할을 하는 재순환영역의 변화와 또한 별도의 선회공기를 주입하였 경우 킬른내의 유동에 큰 변화를 확인하였다.

난류반응장 수치해석에서는 평형난류 반응모델인 Fast Chemistry 모델(수정 eddy break-up model)과 비평형 난류반응모델을 도입하여 폐기물량인 CCl_4/CH_4 몰비를 변화시켰을 경우의 유동장 및 연소생성물의 농도분포와 온도의 변화를 관찰하므로써 폐기물 처리량을 최적화 하여 저공해 소각로 개발에 이용할 수 있는 자료를 획득하였다.

아래 그림은 비평형 난류반응모델(model 2)을 이용하여 킬른입구 상부버너에서 CH_4/CCl_4 /공기 혼합기가 20 m/sec, 80 ° C로 주입되고 하부버너에서는 CH_4 /공기 혼합기가 10 m/sec, 80 ° C로 주입되고 킬른의 회전속도는 2 rpm, 고행폐기물의 충전율이 10 %, 중력항 고려, 고행 폐기물에서 발생하는 휘발 및 유출량은 무시하고, CCl_4/CH_4 몰비가 0.18 인에서 난류반응장을 해석한 결과이다.

그림 2는 킬른 단면에서의 속도분포를 나타내고 있으며, 비반응 상태 유동과 다소 다른 유동 양상을 나타내고 있다. 즉 빠른 연소속도에 의해 유속이 매우 복잡하고 속도값도 훨씬 더 크며 흡수유동이 축방향으로 2 m까지 길게 일어나며 단면에서 반시계방향으로 선회유동의 강도도 크게 증가하였다. 그러나 고행폐기물 상단의 선회속도는 약 6.5 m에서부터 약화되는 양상을 보여주고 있다.

그림 3은 축방향의 속도인 w 의 등속도선을 나타낸 그림으로서 전체 재순환영역의 크기는 평형 난류반응 모델(model 1)과 유사하나 재순환영역의 길이가 킬른 입구에서 4 m까지로 축소됨을 알 수 있다.

그림 4는 폐기물로 주입한 CCl_4 의 농도를 킬른의 단면에 나타낸 것으로서 CCl_4 의 농도가 킬른입구로부터 약 6.5 m인 지점에 도달하여 CCl_4 가 거의 소각된 것을 확인할 수 있다. 킬른의 출구 근처에서는 CCl_4 의 농도가 킬른 상부에서 15 - 20 ppm까지 나타나고 있으며 단면의 수직방향으로 심한 농도성층화 현상을 확인할 수 있다. 이것은 Cundy그룹이 대형 로타리 킬른 소각로에서 소각실험시 측정된 현상과 동일하다⁽⁴⁾. 물론 이들의 실험에서는 1 - 18 ppm사이의 농도분포를 나타내고 있지만 이것은 로타리 킬른 주위로 다량의 공기가 유입될 수 있기 때문에 다소의 차이가 있을 수 있다. 이와같이 농도의 심한 성층화 현상은 소각로 설계시 매우 중요한 설계요인으로서 심한 농도성층화 현상을 방지하여야 한다. 이러한 농도 성층화 현상이 킬른내에서 해결되지 못하면 후연소실에서 완전 소각이 가능하도록 설계되어야 하므로 그 규모가 커질 우려가 있다.

그림 5는 연소 생성물의 몰농도를 킬른단면의 서로다른 반경에서 킬른의 길이에 따른 농도변화를 나타낸 것으로서 이 그림은 액상폐기물이 주입되는 킬른의 상부버너가 위치한 지점에서 버너의 반경안쪽, 버너중심의 위치에서 킬른 길이에 따른 CCl_4 (ppm), CH_4 (%), O_2 (%), CO_2 (%)의 몰농도 변화를 나타낸 그림이다. 이 그림에 나타난 바와같이 버너가 위치한 반경의 안쪽에서 CCl_4 는 킬른입구로

부터 약 5 m위치에서 거의 소각되나 버너 중심의 위치에서는 상당한 거리동안 유지됨을 알 수 있다. 이것은 앞의 그림에서 설명한 바와같이 5 m이후인 위치에서 부터 상부버너의 확산이 이루어지기 때문이다. 또한 CH_4 나 CO_2 의 몰농도로 보아 상부버너의 주화염은 킬른입구에 약 4 m인 위치까지 활발한 형상을 나타내고 있다.

4. 결론

산업용 폐기물 소각로 설계에 필요한 3차원 난류유동장 컴퓨터 프로그램을 개발하고 이를 Dow Chemical사의 대형로타리 킬른을 대상으로 수치모사를 수행한 결과 편심버너를 가진 로타리 킬른 유동장에 대한 특성을 파악하였다. 특히 버너의 위치와 버너에서 분출되는 가스 속도를 효과적으로 조정함으로써 유동기체의 재순환 영역을 고품폐기물영역에 위치하게 함으로써 고품폐기물 소각시에 요구되는 다량의 열에너지를 유동가열에 의해 얻을 수 있고, 회전하는 킬른에 의해 발생하는 비산재량을 효과적으로 감소시킬 수 있는 가능성을 발견하였다.

본 연구에서 폐기물로 선정된 CCl_4 에 포함된 염소성분이나 브롬(Br) 등 할로겐 화합물이 포함된 경우에는 난류 반응에서 낮은 연소반응열과 화염억제 작용 등 비평형 효과가 중요하기 때문에 평형 반응 모델인 eddy break-up 모델을 수정한 난류 반응모델(model 1)과 화염전파의 열적이론에서 나타난 연소 속도와 반응을 사이의 상관관계에 기초하여 연소속도의 실험적 자료를 이용한 비평형 난류 반응모델(model 2)을 이용하여 CCl_4/CH_4 몰비 변화, 선회젯트 공기 주입 및 중력 가속도의 영향을 두 모델에 적용하여 다음과 같은 수치해석 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 난류 반응장 해석에서는 평형모델인 model 1과 비평형모델인 model 2를 이용하여 CCl_4/CH_4 의 몰비인 R의 변화에 대한 CCl_4 의 소각 특성을 파악한 결과 model 2가 염소성분에 의한 화염억제 작용을 적절히 분석하였다.

(2) model 2를 이용하여 로타리 킬른 소각의 난류 반응장을 해석한 결과 대형 로타리 킬른 소각로의 실험에서 측정되었던 킬른 출구 단면에서 농도 성층화 현상⁽⁶⁾을 정성적으로 규명할 수 있었다.

본 연구에서 이용한 대형 로타리 킬른 소각로의 실험자료는 회전하는 킬른과 소각시 유출되는 유독가스 등의 영향으로 킬른의 출구 단면에서 제한적으로 이루어진 결과만을 이용하였으므로 향후 보다 충분한 실험값을 보충하여 일반적인 산업용 폐기물 소각시에 적용할 수 비평형 난류반응 모델에 대한 향후 지속적인 연구가 요망된다.

참 고 문 헌

1. 엄 태인, 장 동순, 채 재우, Acharya, S., " 로타리 킬른 소각로 고도설계를 위한 연구 I : 3차원 로타리 킬른 유동장 수치모사 ", 한국폐기물학회지, Vol.9, No.2 pp.9-21 (1992).
2. 엄 태인, 장 동순, 채 재우, " 로타리 킬른 소각로 고도설계를 위한 연구 II : Dow Chemical 소각로 운전변수 심층분석 ", 한국폐기물학회지, Vol.10, No.1 pp.9-23 (1993).
3. 엄 태인, 장 동순, 채 재우, " 로타리 킬른 소각로 고도 설계를 위한 연구 III : 3차원 CCl_4/CH_4 기상난류 반응모델 ", 에너지공학, Vol.1, No.2, (1993).
4. 엄태인, "로타리 킬른 소각로 고도설계를 위한 3차원 난류반응 종합 컴퓨터 프로그램 개발", 인하대학교, 기계공학과 박사학위논문 (1993.8)
5. Lockwood, F.C., Salooja, A.P. and Syed, S.A., " A Prediction Method for Coal - Fired Furnaces", Combustion & Flame, Vol. 38 P.1(1980)
6. Cundy, V.A., Lester, T.W., Sterling, A.M., Montestruc, A.N., Morse, J.S. and Acharya, S., " Rotary Kiln Incineration III. Andepth Study - Kiln Exit / Afterburner/Stack Train and Kiln Exit Pattern Factor Measurements During Liquid CCl_4 Processing ", JAPCA Vol.39, No.7 pp.994-952, (1989).

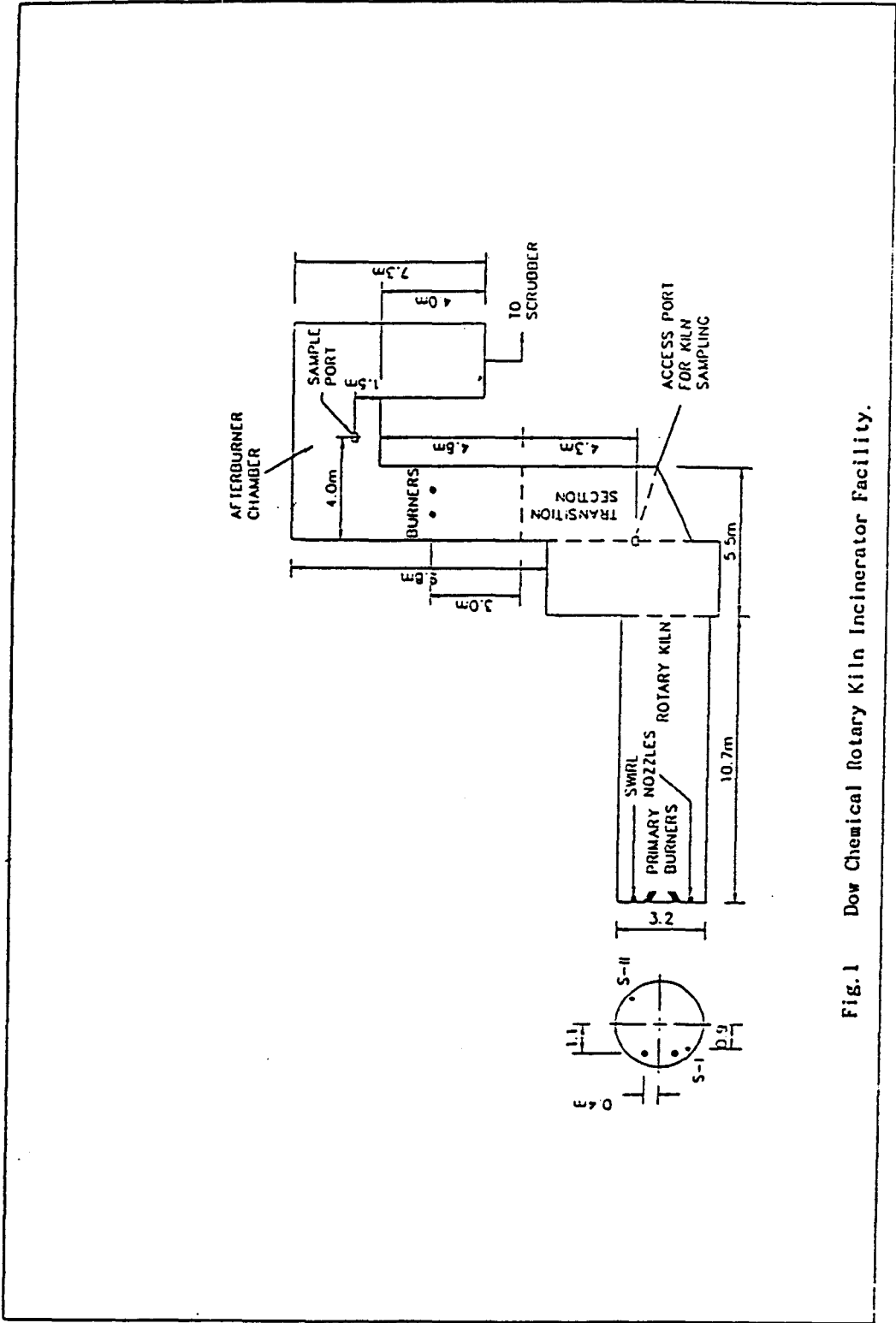


Fig. 1 Dow Chemical rotary Kiln Incinerator Facility.

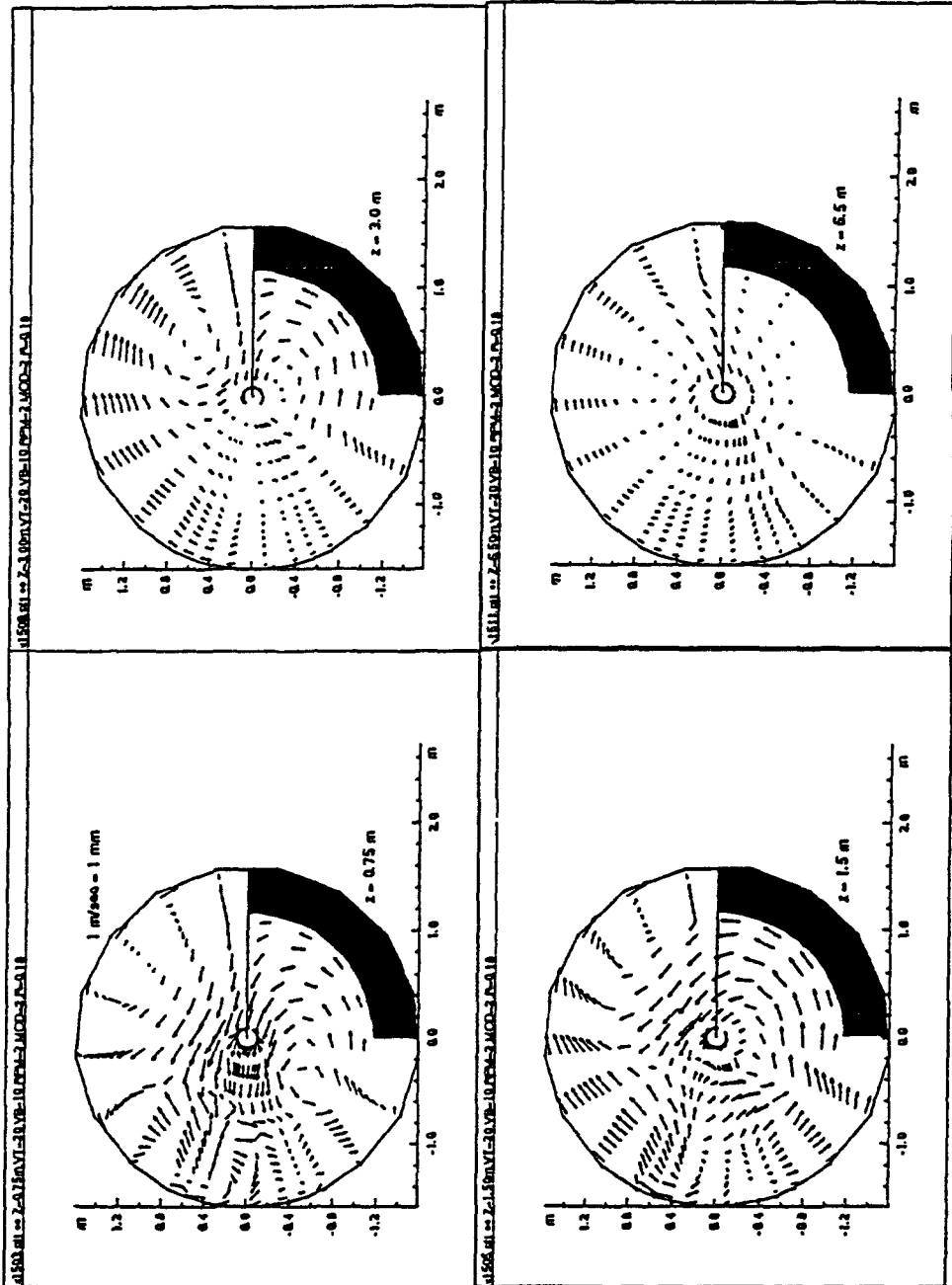


Fig. 2 θ -r Plane u-v Vector Plots of the model 2 for $R=0.18$ at a Number of Axial Locations $z=0.75, 1.50, 3.0, 6.5 \text{ m}$.