

수치해석을 이용한 화학제주입탱크의 주입시간 특성분석

박병호, 김은기, 김유환, 고용삼
한국원자력연구소

장근선
선문대학교

요 약

원자력발전소 운전시 원자로냉각재는 부식 방지를 위해 적절한 화학물질을 함유하고 있어야 한다. 이러한 원자로냉각재의 수질화학 조절은 유량조절 기능과 화학제주입 기능을 가진 화학 및 체적제어계통의 화학제주입탱크 및 체적제어탱크에 의하여 이루어진다. 본 연구에서는 영광5,6호기에서 화학제주입계통의 연결위치를 충전펌프 후단에서 전단으로 변경하고, 원자로보충수펌프에 의하여 화학제주입을 수행할 경우 요구되는 주입운전시간 특성에 대해 수치해석을 이용하여 분석하였다. 분석은 설계요건에서 요구되는 화학제주입탱크의 용량 및 주입유량을 고정하고 탱크의 구조적형상 변경, disk block 설치 및 주입속도를 변경(입구배관 크기 변경) 하여 각각의 경우에 대하여 시간변화에 대한 탱크 내에서의 유속분포, 농도분포, 평균농도 등을 구하였다. 분석결과 발전소의 빠른 화학제주입운전을 위해서는 탱크 내에 혼합효과를 증대시킬 수 있는 disk block의 설치가 요구됨을 알 수 있었다.

1. 서 론

원자력발전소의 원자로냉각재계통은 냉각재에 존재하는 불순물로 인해 계통의 재질에 심각한 부식을 유발할 수 있다. 따라서, 원자로냉각재는 부식 방지를 위하여 적절한 화학물질을 함유하고 있어야 한다¹⁾. 이러한 원자로냉각재의 수질화학 조절은 화학 및 체적제어계통의 화학제주입계통 및 체적제어탱크에 의해서 수행된다. 그중 화학제주입계통은 원자로냉각재에 존재하여 재질의 부식을 유발하는 용존산소를 제거할 목적으로 원자로냉각재의 평균온도가 저온일 경우(150°F 이하) 하이드라진(N_2H_4)을 주입하고, 전 운전상태에서 원자로냉각재의 pH 조절 목적으로 냉각재에 LiOH를 주입할 때 이용된다.

기존 원자력발전소(영광3,4호기 및 울진3,4호기) 화학제주입계통은 충전펌프 후단에 연결되어 원자로냉각재에 화학제주입시 높은 양정의 왕복동펌프

를 이용한다²⁾. 이러한 주입방식은 화학제주입점 후단의 배관, 기기 및 원자로냉각재펌프의 밀봉계통 등에 높은 농도의 화학제가 직접 접촉하지 않는다는 장점이 있는 반면 별도의 주입펌프를 필요로 하기 때문에 주입펌프 고장시 화학제주입기능이 상실될 가능성이 있으며, 펌프의 구매, 유지 및 보수에 추가 비용이 소요되는 단점이 있다. 따라서, 이와 같은 화학제주입방식의 단점을 개선하기 위해 화학제주입계통의 연결위치를 충전펌프 전단으로 이동하고, 별도의 주입펌프 없이 원자로보충수펌프를 이용하여 화학제를 주입할 수 있도록 설계변경이 검토되고 있다.

본 연구에서는 영광1,2호기 및 다른 웨스팅하우스 형태의 발전소에서 이용하고 있는 화학제주입방식 즉, 연결위치는 충전펌프 전단에 있으며 별도의 주입펌프 없이 원자로보충수펌프에 의한 주입방식을 영광5,6호기에 적용할 경우 화학제주입시 원자

로냉각재 수질화학 요건을 만족시키기 위해 요구되는 주입운전시간 및 주입특성에 대해 수치해석을 이용하여 분석하였다. 본 연구의 목적은 화학제주입계통이 충전펌프 전단에 연결될 경우 빠른 시간 내에 주입운전이 가능한 탱크의 구조적형상을 결정하고, 주입운전에 필요한 시간을 결정하여 화학제주입계통 설계변경시 필요한 설계자료를 도출하는데 있다.

2. 계산모델 및 지배방정식

화학제주입계통 설계시 주입탱크의 용량은 원자로냉각재에서 재질의 부식을 일으키는 용존산소물 제거할 목적으로 이용되는 하이드라진과 원자로냉각재의 pH 조절을 위해 이용되는 LiOH의 1회 주입량에 의하여 결정된다. 영광5,6호기의 경우 하이드라진 주입에 요구되는 주입탱크의 용량이 LiOH 주입을 위해 요구되는 탱크 용량에 비해 크기 때문에 하이드라진주입을 기준으로 탱크 용량이 결정되며, 계산된 탱크의 최소용량은 11 gallons이다. 또한, 화학제주입 유량은 LiOH 주입량에 의해 결정되었다. 화학제주입시 사용되는 LiOH는 강염기성으로 재질의 부식을 일으키는 특성이 있기 때문에 LiOH로 인한 부식으로부터 화학제주입점 후단의 배관 및 기기를 보호하기 위하여 Li 농도를 최소화시켜야 하며, 이를 위하여 기기제작자는 Li 최대농도를 600 ppm으로 제한하고 있다. 이와 같은 설계제한요건을 만족하는 최대 주입유량은 2 gpm이다.

본 연구에서 이와 같은 설계요건을 근거로 화학제주입탱크를 그림1과 같이 수직원통형이며 원자로보충수가 위에서 유입되고 회석된 화학제는 아래로 유출되는 경우로 선택하여 화학제주입시 주입탱크 내의 시간에 대한 화학제 농도변화를 분석하였다. 이 분석에서는 주입탱크 내에서의 유동현상이 중심축을 지나는 평면에 대해 대칭이므로 탱크 단면적의 반쪽만을 계산영역으로 선정하였다 따라서, 해석모델의 유동장은 원주방향의 속도를 무시하고 중력효과를 고려하여 중심축을 지나는 평면에 대해 대칭인 2차원 (축방향 및 반경방향) 유동장이며, 계산영역은 원주방향의 단위길이($\theta=1$)에 대해 중심축과 탱크 벽면이 경계가 된다.

해석은 초기상태($t < 0$)에서 탱크내의 유동은 정지되어 있고, 초기 Li 농도를 1로 가정하여 시간 $t=0$

에서 입구로부터 농도가 다른 유체(원자로보충수)가 일정한 유속(U_i) 및 농도(C_i)로 유입(step change)할 때의 시간변화에 대한 탱크내의 속도분포, 농도분포 및 평균농도를 구하였다. 즉, 축방향 속도(U) 및 반경방향 속도(V), 시간변화에 대한 농도분포 및 평균농도 변화를 구하였다.

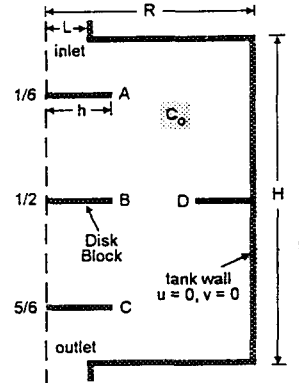


그림1. 화학제주입탱크의 수치계산영역 모델

지배방정식은 다음과 같은 가정들을 적용함으로써 단순화하였다.

- (1) 유동장은 2차원 층류 비정상유동이다.
- (2) 탱크내 유체의 온도는 일정하다.
- (3) 탱크내 유체의 모든 물성치는 일정하며 비압축성(incompressible)이다.
- (4) 탱크내 유체 상호간의 화학반응은 일어나지 않는다.

이와 같은 가정을 적용하여 유동장 모델의 지배방정식을 원주좌표계(cylindrical coordinate system)로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{연속방정식 : } \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV) = 0 \quad (1)$$

축방향 운동량방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (U^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rUV) \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu}{\rho} r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{g}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

반경방향 운동량방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (UV) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV^2) \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial V}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu}{\rho} r \frac{\partial V}{\partial r} \right) - \frac{2\mu}{\rho} \frac{V}{r^2} \quad (3)$$

농도 방정식 :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (UC) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rVC) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu}{\rho} r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

지배방정식 (1), (2), (3) 및 (4)에 대한 일반 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho U \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho V \phi) = \\ & \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r}) + S_{\phi} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, ϕ 는 일반형태의 종속변수로 U, V 및 C를 나타내며 Γ_{ϕ} 및 S_{ϕ} 는 각각의 종속변수에 해당되는 확산계수 및 생성(source)항이다. 표1에 일반방정식에 대한 일반변수 ϕ , Γ_{ϕ} 및 S_{ϕ} 를 나타내었으며, 표2에 초기조건 및 경계조건을 나타내었다.

표2의 벽면경계조건에서 $\frac{\partial C}{\partial N} = 0$ 은 벽면의 수직 방향으로의 농도구배가 0임을 의미한다.

표 1. 일반방정식에 대한 일반변수 ϕ , Γ_{ϕ} 및 S_{ϕ} 의 정의

Conserved Property	ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
Mass	1	0	0
x-Momentum	U	μ	$g - \frac{\partial P}{\partial x}$
r-Momentum	V	μ	$-2\mu \frac{V}{r^2} - \frac{\partial P}{\partial r}$
Concentration	C	ρD_{AB}	0

표 2. 초기조건 및 경계조건

	U (m/s)	V (m/s)	C	
초기조건	0	0	C_0	
경계조건	입구배관	U_i	0	
	대칭면	$\frac{\partial U}{\partial r} = 0$	0	
	출구배관	$\frac{\partial U}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial C}{\partial x} = 0$
	Disk Block	0	0	0
	벽면	0	0	$\frac{\partial C}{\partial N} = 0$

3. 수치해석방법

지배방정식에 대한 해는 수직으로 교차하는

격자구조로 구성된 제어체적에 대해 유한차분법을 이용하여 구하였으며, 압력항과 연속방정식과의 연결(link)은 SIMPLER (Semi-Implicit Method for Pressure Linked-Equations Revised) 알고리즘을 이용하여 수행하였다³⁾. 수치계산의 수렴성 및 정확성을 확보하기 위해 격자점은 농도변화 및 속도변화가 급격할 것으로 예상되는 입구경계면, 대칭면, 출구경계면, 탱크벽경계면 및 disk block (disk block 있는 경우) 근처에서는 상대적으로 조밀한 격자점을 배열하였으며 이웃한 격자점의 간격은 1.3배가 넘지 않도록 하였다. 격자수는 축방향 및 반경방향으로 50×30으로 하였으며, 계산은 2시간 주입운전을 가정하여 수행하였다. 시간간격은 초기에는 짧은 간격($\Delta t=1$ 초)으로 하고 점차적으로 비례 확대하여 수행하였으며, 수렴판정은 모든 시간단계(time step)별 반복계산(iteration)에서 모든 변수(U, V, C)의 오차가 10^{-6} 이하일 때 수렴값으로 간주하였다. 계산초기에는 각 시간단계에서 50회 정도의 반복계산으로 수렴이 되었으나 시간이 경과할수록 계산단계별 수렴속도도 빨라져 속도장이 정상상태에 도달한 후에는 7-8회의 반복계산으로 수렴해를 얻을 수 있었다. 속도장의 경우 정상상태 도달 시간은 disk block의 유무, 시간간격 및 하향이완인자(under relaxation factor)에 따라 차이가 있으나 disk block이 있는 경우 3시간 정도의 계산(pentium 90)이 요구되었고, disk block이 없는 경우 2시간 정도의 계산이 요구되었다. 수렴성을 고려하여 속도와 압력의 경우 0.3 - 0.5, 농도의 경우 0.7 - 1.0의 하향이완인자를 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

원자로보충수에 의한 화학제주입방식은 일반적 으로 식(6)과 같이 표현되는 주입 및 방출(feed & bleed)에 대한 이론식을 이용하여 시간변화에 대한 농도변화를 분석할 수 있다.

$$C = C_{IN} + (C_0 - C_{IN}) \exp\left(-\frac{W_{IN}}{W_{TANK}} t\right) \quad (6)$$

여기서, t : 시간

C_{IN} : 주입되는 유체의 농도

C_0 : 탱크내 유체의 초기 농도

W_{IN} : 주입되는 유체의 중량

W_{TANK} : 탱크내 유체의 중량

이와 같은 이론식은 각 시간간격에 대해 혼합율을 100%로 하기 때문에 유체속도가 느린 실제 유동장 내의 농도변화와는 차이가 있다.

4.1 탱크내 block이 없는 경우에 대한 고찰

본 연구에서는 첫 번째 계산경우로 화학제주입 탱크의 전체 용량은 일정하고, 탱크내 disk block은 없으며 탱크높이/직경의 비가 1, 2 그리고 3인 경우를 선택하여 주입하고자 하는 화학제의 탱크내 평균농도를 기준으로 시간변화에 대한 화학제주입 운전특성을 분석하였다. 입구속도는 주입유량은 일정하기 때문에 주입속도 변화에 대한 탱크 내에서의 화학제 혼합특성을 분석하기 위해 유량이 일정한 상태에서 입구배관의 크기가 1인치인 경우와 1/2인치인 경우를 고려하여 입구속도를 변화시켜 분석하였다.

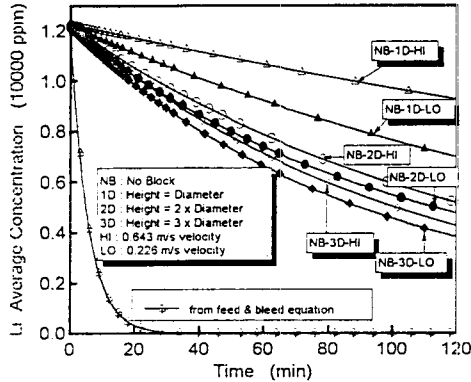


그림 2. 시간변화에 대한 탱크의 구조적형상, 주입속도 및 Li 평균농도 변화 비교

그림2는 구조적형상 및 주입속도($U_i=0.226$ m/s & 0.643 m/s)가 다른 각각의 경우에 대하여 주입하고자 하는 화학제(Li)의 탱크내 평균농도가 2시간 동안 변화하는 경향을 나타낸다. 그림2에서 보여주는 것처럼 disk block이 없는 6가지 계산의 모든 경우 주입하고자 하는 화학제의 초기농도(12333 ppm)를 1로 가정할 때 주입운전 2시간 후에도 탱크 내에는 30% 이상의 화학제가 남아 있으며, 주입 및 방출식(6)에 의해 도시된 시간에 대한 농도 변화와 많은 차이를 보이고 있다. 이와 같이 화학제주입탱크 내에 disk block이 없는 경우 원자로냉각제의 빠른 화학조건 조절에 많은 문제점이 예상된다.

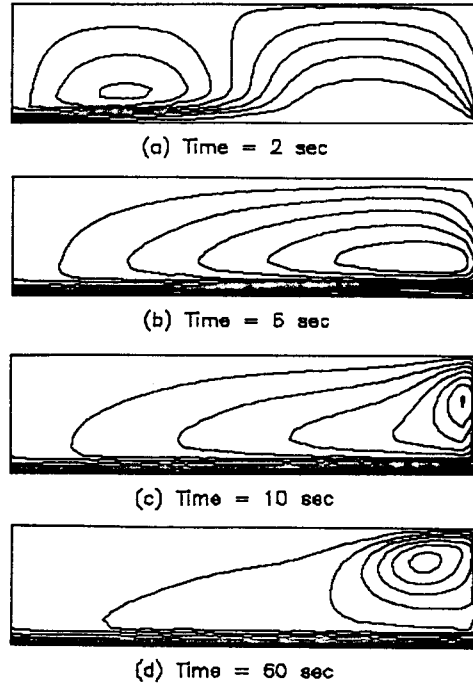


그림 3. $H=2D$, $U_i=0.226$ m/s, disk block이 없는 경우 시간변화에 대한 유선군

그림3은 탱크높이/직경 비가 2:1이고, disk block은 없으며 입구속도는 0.226 m/s인 경우를 선택하여 시간변화에 대한 유선군(streamlines)을 나타낸다. 그림3-(d)는 속도장이 평형상태(steady state)인 유선군을 나타내며, 탱크내 disk block이 없는 모든 경우 속도장에 대한 평형상태 유선군의 형태는 유사하였으며, 탱크높이/직경 비가 작고 속도가 빠를수록 평형상태에 도달하는 시간은 길었다. 표3에 각각의 경우에 대한 속도장의 평형상태 도달 시간을 도표화하였다.

표3. 구조적형상 및 주입속도 변화에 대한 속도장 평형상태 도달시간(주입운전시간 기준)

U_i , m/s	높이/직경	평형상태도달시간(sec)
0.226	1	30-40
	2	20-30
	3	10-20
0.643	1	80-90
	2	50-60
	3	30-40

그림3의 유선군에서 알 수 있듯이 탱크내 disk block이 없는 경우 대부분의 유체는 중심선을 따라 통과하고 극히 일부의 유량이 탱크 내에서 순환하기 때문에 혼합효과가 매우 나쁜 것으로 나타났다.

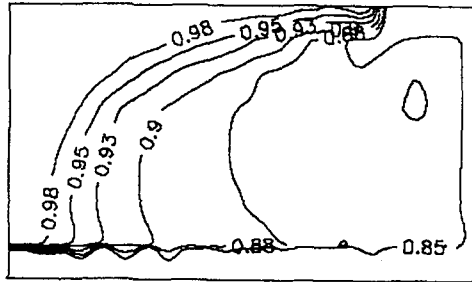


그림 4. $H=2D$, $U_i=0.226$ m/s, disk block 없는 경우 주입운전 10분 후 동농도분포

그림4는 탱크높이/직경 비는 2 : 1이고, disk block은 없으며 입구속도가 0.226 m/s인 경우를 임의 선택하여 화학제주입운전 10분 후의 탱크내 Li 동농도분포(concentration isocontours)를 나타낸 그림이다. 이 그림에 나타난바와 같이 10분 동안 주입운전 후에도 입구경계면 부분에는 초기농도의 화학제가 그대로 존재하며, 10% 정도의 화학제만 주입되었음을 보여주고 있다. 이 결과로부터 주입시간을 단축하여 운전의 용이함과 원자로냉각재의 빠른 수질화학 조절을 위하여 화학제주입탱크 내부에 disk block의 설치가 요구됨을 알 수 있다.

4.2 탱크내 block이 있는 경우에 대한 고찰

본 연구에서는 disk block이 있는 탱크의 구조적형상을 설치공간 및 모양 등을 고려하여 높이/직경 비가 2 : 1인 경우를 선택하여 주입하고자 하는 화학제의 탱크내 평균농도를 기준으로 시간변화에 대한 주입운전 특성을 분석하였다. Disk block의 설치 위치는 입구로부터 탱크 길이대비 1/6, 1/2 및 5/6 지점(그림 1의 A, B 및 C)이며, block의 반경방향 길이는 탱크 반경의 1/3이다. 이 경우 계산에서의 주입속도는 같은 구조적형상에서 보다 양호한 혼합효과를 나타낸 0.226 m/s로 선택하였다. 또한, disk block이 그림 1의 A, C 및 D 세 곳에 위치하는 경우에 대하여도 분석하였다. 그림5는 각각의 disk block 위치 대해 시간변화에 대한 탱크

내에서의 Li 평균농도 변화를 나타낸 그림이다.

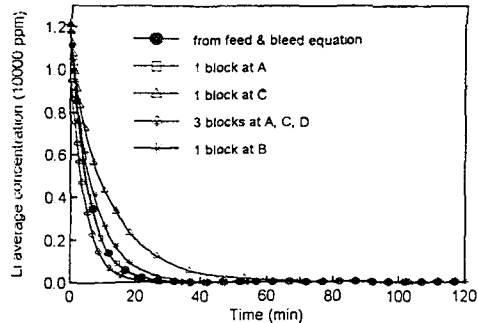


그림 5. $H=2D$, $U_i=0.226$ m/s인 경우 시간변화에 대한 disk block 위치와 Li 평균농도 변화

그림5에서 알 수 있듯이 disk block의 위치가 입구로부터 가까울 수록, disk block 수가 많을 수록 혼합효과가 높은 것으로 나타났다. Disk block이 세 개인 경우는 주입 및 방출식(6)에 의해 도시된 농도분포보다 빠른 주입 특성을 나타내지만 혼합효과를 고려할 때 disk block 설치 수에 비해 개선효과는 그다지 크지 않았다. 따라서, disk block의 위치가 입구로부터 1/6인 경우가 주입 및 방출식에 의한 곡선과 거의 동일한 곡선을 가지며, 탱크 제작시등 전체적인 설계측면에서 볼 때 타당한 것으로 판단된다.

그림6에는 disk block이 그림1의 A지점에 있는 경우를 임의 선택하여 시간에 따라 변화하는 유선군을 나타냈으며, 그림7은 이 경우 주입운전 10분 후 탱크내 Li 동농도분포를 나타내었다. 같은 운전 시간에서 disk block이 없는 경우(그림4)의 탱크내 농도분포와 비교할 때 disk block이 있는 경우 전체적으로 균등한 농도분포를 보여주고 있으며, 80% 정도의 화학제가 주입되었음을 알 수 있었다 (disk block이 없는 경우 10% 정도 주입됨).

5. 결론

본 연구에서는 원자로냉각재에 화학제주입을 위하여 이용되는 화학제주입계통의 연결위치를 영광 5,6호기의 경우 충전펌프 후단에서 전단으로 변경하고 원자로보충수에 의한 주입방식을 적용하여 구조적형상 및 주입속도 변화에 대한 화학제주입운전

특성을 수치해석을 이용하여 분석하였다.

분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 1) 설계요건에서 요구되는 화학재주입탱크 용량 및 주입 유량이 결정된 상태에서 원자로냉각재의 빠른 화학조건 조절을 위하여 탱크 내에 disk block 설치가 요구됨을 알 수 있었다. 2) 탱크의 구조적형상은 탱크 높이/직경 비가 2인 경우이고, disk block 설치 및 크기는 입구로부터 탱크 길이대비 1/6 지점에 탱크 반경의 1/3인 1개의 disk block이 설치될 경우가 최적의 화학재주입탱크임을 알 수 있었다.

기호설명

C	species concentration
C_i	concentration of injection fluid
D	chemical addition tank diameter
D_{AB}	diffusivity
g	gravitational acceleration
H	chemical addition tank height
h	disk block height
L	inlet and outlet pipe radius
P	pressure
r	radial coordinate
R	chemical addition tank radius
S	source term
Sc	Schmidt number ($Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}}$)
t	time
u,v	components of the fluctuation velocity vector
U,V	components of mean velocity vector
U_i	velocity of injection fluid
x	axial coordinate
Γ	diffusion coefficient
μ	kinetic viscosity
ρ	fluid, density
ϕ	general variable

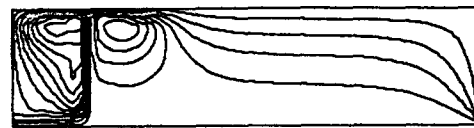
참고문헌

1. Chemistry Design Guide for UCN3&4, N0291-FS-CG110, KAERI, 1993

2. Design Requirements for Chemical and Volume Control System Components for UCN3&4, N0291-FS-DR410-C, KAERI, 1993
 3. Patankar, S. V., 1980, "Numerical heat transfer and fluid flow", McGraw-Hill



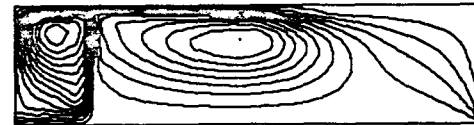
(a) Time = 2 sec



(b) Time = 10 sec



(c) Time = 30 sec



(d) Time = 60 sec

그림 6. $H=2D$, $U_i=0.226$ m/s, disk block이 입구로부터 1/6 지점에 있는 경우 시간 변화에 대한 유선군

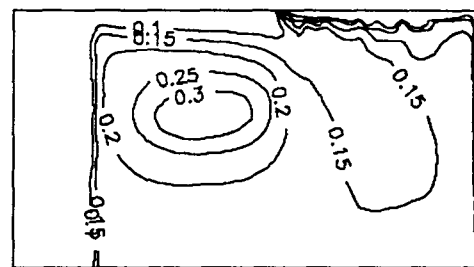


그림 7. $H=2D$, $U_i=0.226$ m/s, disk block이 입구로부터 1/6지점에 있는 경우 운전 10분 후 동농도분포