

2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

방사성 이산화탄소 포집백의
설계인자 도출을 위한 전산해석

The Computational Analysis for Design Factor Derivation
of Radio Carbon Gas Bag

정광국, 지준화, 하상준, 강덕원, 이창섭
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

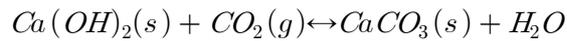
중수로 원전 가동시 주로 발생하는 방사성 이산화탄소를 제거하기 위한 C-14 Scrubber의 효율적 운전을 위해서는 방사성 기체를 포집할 수 있는 기체 포집백의 설계가 매우 중요하다. 본 논문에서는 포집백 내에서의 기체의 유동 및 혼합 상태를 파악하여 최적의 제거효율을 얻기 위한 유동장의 전산해석을 수행하였다. 연구결과, 포집백의 입·출구 간격은 기체 포집백 내부의 재순환영역 등 유동패턴과 관련이 있으며 이산화탄소 제거효율에도 영향을 미치고 있음을 파악할 수 있었다. 또한, 포집백 입·출구 간격은 이산화탄소 잔여농도 및 재순환영역 형성 등의 고찰로써 최적화된 설계인자 도출이 가능하였다. 반면, 입·출구의 직경을 감소시킬 경우 출구로의 흡입효율이 떨어지고 그로 인하여 포집백 내부의 헬륨과 이산화탄소와의 혼합에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Abstract

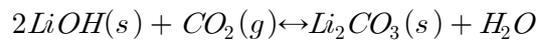
Computational analysis on fluid flow in Helium(He) bag of Carbon dioxide(CO₂) removal system was performed for derivation of design factors. The changes of inlet/outlet interval have influence on CO₂ decay efficiency because of relation with the formed recirculation zone. As inlet/outlet diameter decreases, CO₂ decay efficiency is getting worse. The more effective implementation of Helium bag design is available through computational study on geometric change using specific gravity difference and recirculation zone.

1. 서론

방사성 이산화탄소 제거장치는 크게 이산화탄소 제거장치 본체와 기체포집백의 두 부분으로 구성된다.(Fig. 1, 2 참조). 제거장치 본체에는 이산화탄소를 흡착·제거하는 Scrubber(Fig. 2의 CO₂ SCRUBBER)가 있으며 기체가 이 Scrubber를 통과하게 되면 흡착탑 내에 충전되어 있는 흡착제(LiOH 또는 Ca(OH)₂)와 다음과 같은 화학반응에 의하여 이산화탄소가 기체로부터 분리·제거된다.



또는



위와 같은 반응을 통해 이산화탄소 농도가 낮아진 기체는 순환 펌프(Fig. 2의 PM01 GAS PUMP)에 의해 장치 내를 순환하며 다시 포집백(Fig. 2의 GAS BAG)으로 유입·저장된다. 장치에는 순수 기체와 이산화탄소 함유 기체를 별도로 저장하는 저장백이 없으며 두 기체는 단일 포집백에 혼합되어 있다. 순환이 계속되면서 포집백 내의 기체중 이산화탄소 농도가 점차 낮아져 일정기준 농도 이하로 낮아지면 블로워(Fig. 2의 BL01 BLOWER)가 작동하여 포집백 내의 기체가 외부로 배기된다. 이때 포집백으로 유입되는 기체가 포집백 내에서 혼합이 원활하지 못할 경우, Scrubber를 통과한 방사성 이산화탄소가 충분히 제거되지 않으므로 원하는 농도까지 낮추기 위한 Scrubber의 운전시간이 상대적으로 늘어나게 된다. 본 연구에서는, 중수로 감속재 상층기체(Moderator Cover Gas)에 함유되어 있는 방사성 이산화탄소(¹⁴CO₂)가 포집백 내에서 가장 효과적으로 혼합될 수 있도록 포집백 내에서의 기체 유동장 평가와 최적의 혼합이 이루어 질 수 있는 포집백의 설계인자 도출에 초점을 맞추었다. 본 장치의 기본 설계는 작업자의 피폭보호가 최우선되어야 하며 가능한 짧은 시간 내에 포집기체의 정화가 이루어 지도록 포집백 내에서 순수 기체와 잘 혼합될 수 있는 포집백이 설계·제작되어야 한다.

포집백은 Fig. 1.에서 보듯이, 아랫부분은 평면이고 윗부분은 반구형인 원통의 구조를 갖고 있다. 아래 평면 부분에는 기체가 출입하는 배관이 연결되어 있으며 원통 내 특별한 내부구조는 없다. 포집백의 부피가 일정할 경우, 포집백의 설계 변수로는 직경 대 높이비, 반구형 지붕의 반구 직경, 기체 인입·인출 배관의 직경과 배관간 거리 등을 생각해 볼 수 있으나, 본 연구에서는 이들 설계 변수 중 기체의 혼합에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 생각되는 배관의 직경과 배관간 거리만을 설계 변수로 고려하였다.

본 연구에서 사용한 방법론인 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD라 함)은 실험적 검증을 요구하는 모델의 숫자를 감소시켜 줌으로써 연구비용과 시간을 절약해 줄 수 있으며 조건변화에 따른 신뢰성 있는 역학적 거동 파악을 가능하게 해준다.

전산유체역학의 지속적이고 진보적인 기술발달에 힘입어 공학적 설계의 초기단계와 개선 단계 및 문제예측·진단에 많은 응용을 해오고 있다. 본 연구를 위하여 CFD Solver로써 Fluent V6.0을 이용하였으며 기하학적 형상 및 격자구성(Discretization)을 위하여 Gambit V2.0을 사용하였다. 특히 또는 제작사양과 관련된 구체적인 기하학적 형상수치 및 세부 운전조건 등은 논문 내용에서 제외시켰다.



Fig. 1. 방사성이산화탄소 제거장치(좌)와 기체 포집백(우)

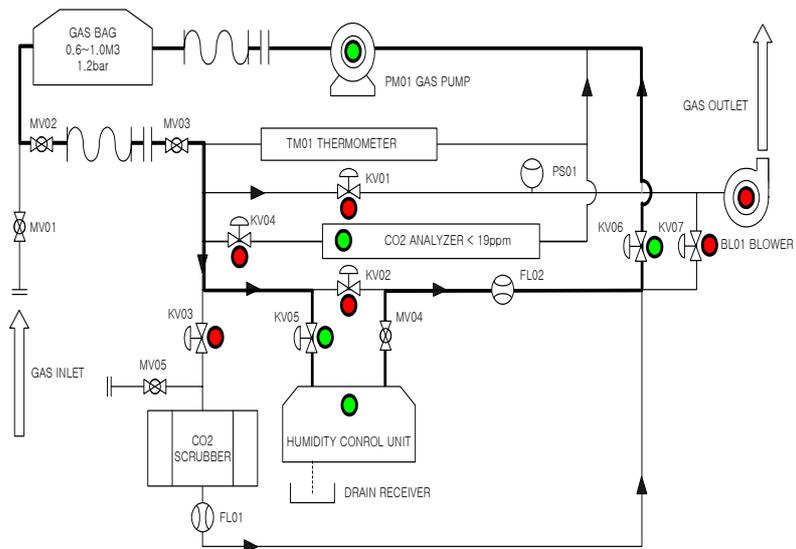


Fig. 2. 기체 포집·제거 시스템의 유체흐름도

2. 본론

2.1 기하학적 구조

본 전산해석의 대상은 전력연구원에서 개발한 방사성 이산화탄소 제거장치의 구성요소 중 하나인 포집백 하우스징내의 유동장이며 이해를 돕기 위하여 전산영역(Computational Domain)에서 3차원으로 구성한 외부형상을 Fig. 3에 나타내었다.

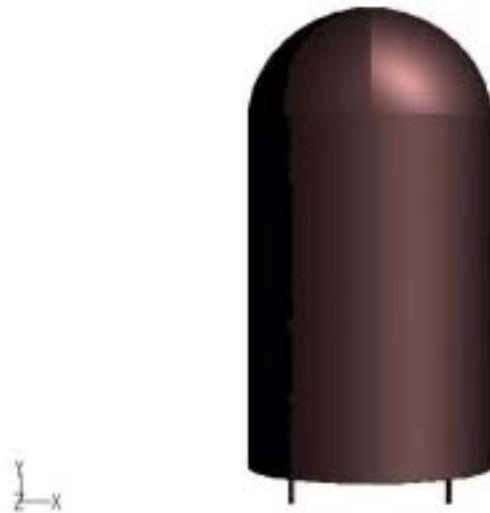


Fig. 3. Feature of Gas Bag in Computational Domain

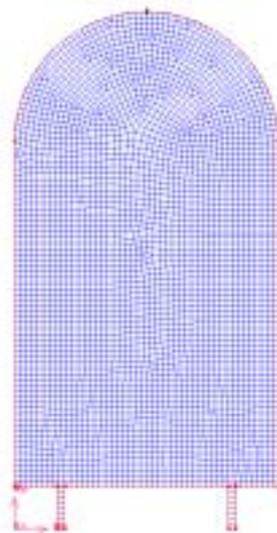


Fig. 4. Result of Mesh Generation

컴퓨터 하드웨어의 제한적 조건을 고려하여 Fig. 3과 같은 3차원 형상을 대칭축을 포함하는 x-y평면으로 잘라 그 단면(2차원)에서의 유동을 고려하였으며, 이렇게 단순화된 2차원 내부형상을 잘게 쪼개어 세포(Cell)들을 분포시키는 작업을 수행하였다. 또한 Skewness를 감소시키기 위하여 비정렬 격자계(Unstructured Coordinate)를 사용하여 그 결과 약 3,700개의 2차원 격자(Mesh)를 구성하였으며 이를 Fig. 4에 나타내었다.

2.2 모델링

장치의 작동 초기, 포집백 내부에는 2종의 기체 즉, 헬륨과 이산화탄소가 존재하며 출구를 통해 흡입된 헬륨과 이산화탄소는 방사성 이산화탄소 제거장치를 통과하면서 이산화탄소가 제거된 순수 헬륨만이 입구를 통해서 포집백으로 인입된다. 운전초기부터 이산화탄소가 완전히 제거되기까지 시간(t)에 따른 기체농도가 연속적으로 변화하므로 2종기체(two species gas)의 비정상상태(unsteady state) 해석을 실시하였으며 포집백 내부 및 입출구를 검사체적으로 설정하였다. 기체유동임을 감안하여 비점성(inviscid) 및 비압축성(incompressible) 유동을, 검사체적내의 작은 레이놀즈수를 고려하여 층류유동(laminar flow)을 가정하였다. 본 전산해석을 위하여 적용된 주요 모델들을 다음의 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Applied Model for Computational Analysis

Parameters	Applied Model
Transient	Unsteady
Viscosity	Inviscid
Compressibility	Incompressible
Fluid	Mixture Gas of Two Species (He and CO ₂)
Flow	Laminar
Dimension	2D (x and y)

2.3 조건설정

운전압력 및 온도는 각각 대기압 및 상온으로 가정하였으며 전산 해석시 조건변경에 따른 해석결과의 판별력을 높이기 위하여 운전초기(t=0sec/sec) 포집백 내부에는 부피 비율로서 이산화탄소 50% 및 헬륨 50%를 가정하였다. 포집백 입출구 조건은 방사성 이산화탄소 제거장치에 실제 적용된 펌프의 운전조건(127 liter/min)을 가동을 100%로 가정하였다. 본 연구에서는 포집백의 입출구 및 배관직경을 변경시켜 가면서 포집백내 유동 및

이산화탄소 제거의 특성변화를 파악하고 이를 이용하여 포집백 형상 최적설계를 위한 방향을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 변경 및 적용한 조건들을 다음의 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Geometry Variables for Case Study

Case	Inlet & Outlet (mm)	
	Interval	Diameter
Case P11	294.6	25.4
Case P12	294.6	12.7
Case P21	394.6	25.4
Case P22	394.6	12.7
Case P31	494.6	25.4
Case P32	494.6	12.7
Case P41	594.6	25.4
Case P42	594.6	12.7
Case P51	694.6	25.4
Case P52	694.6	12.7
Case P61	794.6	25.4
Case P62	794.6	12.7

여기서, 입출구 간격(Interval)은 입구 및 출구의 원점간의 축대칭 거리로써 294.6mm부터 794.6mm까지 100mm씩 증가시켰으며 입출구 직경(Diameter)은 입구 및 출구 배관의 내경으로써 25.4mm와 12.7mm 등 2가지 경우를 수행하였다.

2.4 계산결과 및 고찰

2.4.1 입출구 간격변화에 따른 이산화탄소 제거효율

Table 2의 P11, P21, P31, P41, P51 및 P61과 같이 동일한 입출구 직경(25.4mm)에 대하여 6가지 포집백 입출구 간격(Interval) 변화에 따른 Case Study를 수행하였다. 각 Case별로 기하학적 형상외의 경계조건 및 초기조건은 모두 동일하게 설정하였으며 시간 경과에 따른 포집백 내부의 이산화탄소 최고농도 변화를 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 경과시간(sec) 및 이산화탄소 부피분율(Vol. %)은 초기조건으로 설정한

이산화탄소 농도(Vol. %)와 정상상태로 가정한 시간(sec)으로 각각 표준화(Normalization)하였다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 포집백 내부 이산화탄소의 농도변화는 운전초기부터 시간경과에 따라 지수적으로 저감되는 경향을 보이고 있다. Case 31, 41, 51 및 61의 경우 유사한 농도분포를 보이고 있으나 Case P11과 P21의 경우 상대적으로 불안정적인 저감패턴을 확인할 수 있다.

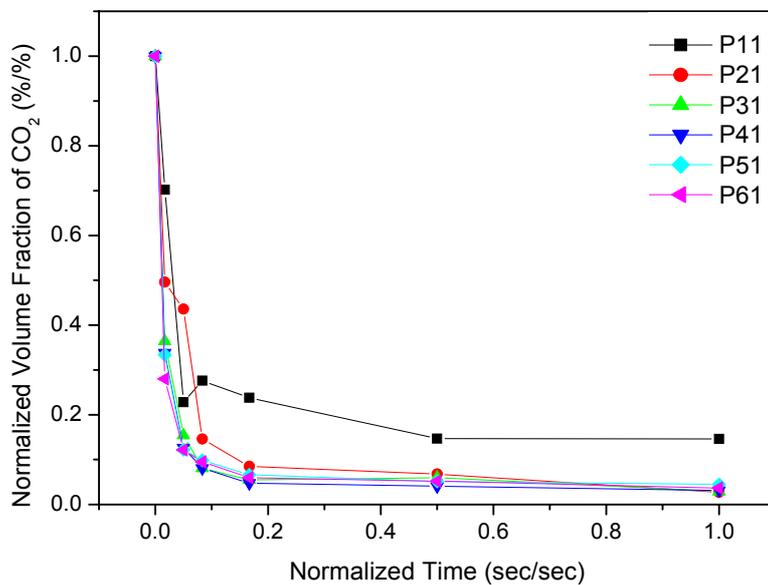


Fig 5. Change of CO₂ Volume Fraction by Time

Case P11(Fig. 6) 즉, 입출구 간격이 294.6mm로써 상대적으로 좁은 경우, 포집백 내부에 여러 개의 유사한 크기의 재순환영역이 형성되고 있으며 특히 입구에서 토출된 기체가 출구쪽으로 바로 흡입되는 유선이 형성되고 있으므로 이산화탄소 제거효율을 저하시키는 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다. 반면, Case P11을 제외한 모든 Case에서는 1개의 지배적인 재순환 영역이 포집백 중심에 위치하고 있으며 입출구 주변에 미소 재순환 영역만이 존재함을 알 수 있다. 즉, 입출구 간격이 증가함에 따라 입구에서 출구쪽으로 향하려는 경향은 없어지고 포집백 벽면을 따라 유선이 형성되며 입출구 주변의 미소 재순환 영역이 점차 작아지다가 Case P61(Fig. 11)에서는 결국 사라지는 것을 알 수 있다.

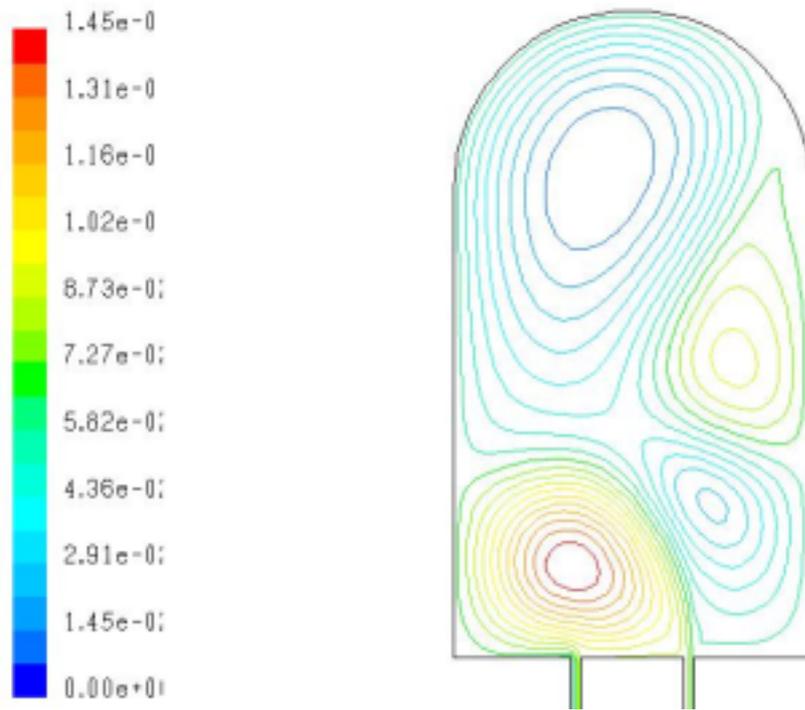


Fig. 6. 입 · 출구 간격변화에 따른 유동장 해석결과 Case P11

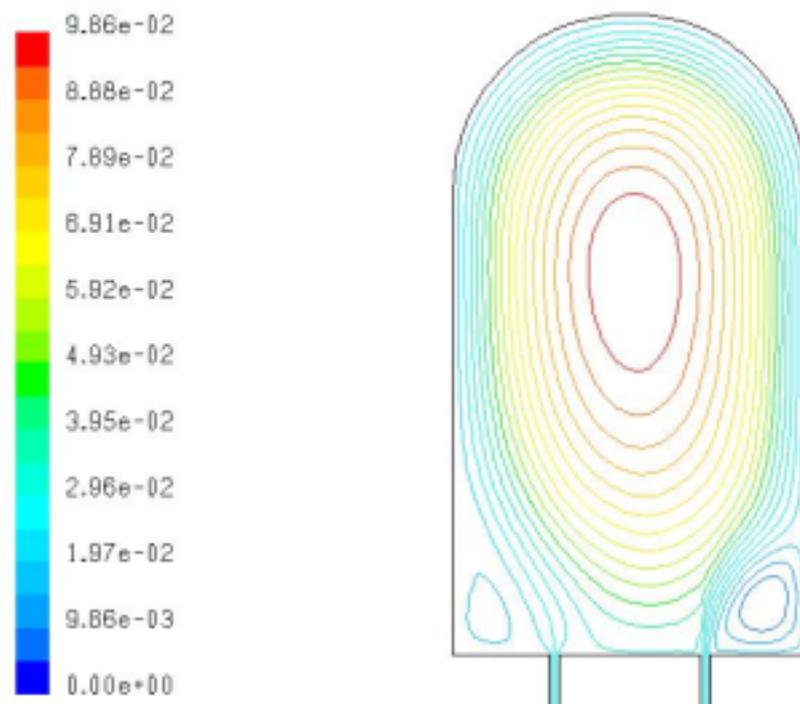


Fig. 7. 입 · 출구 간격변화에 따른 유동장 해석결과 Case P21

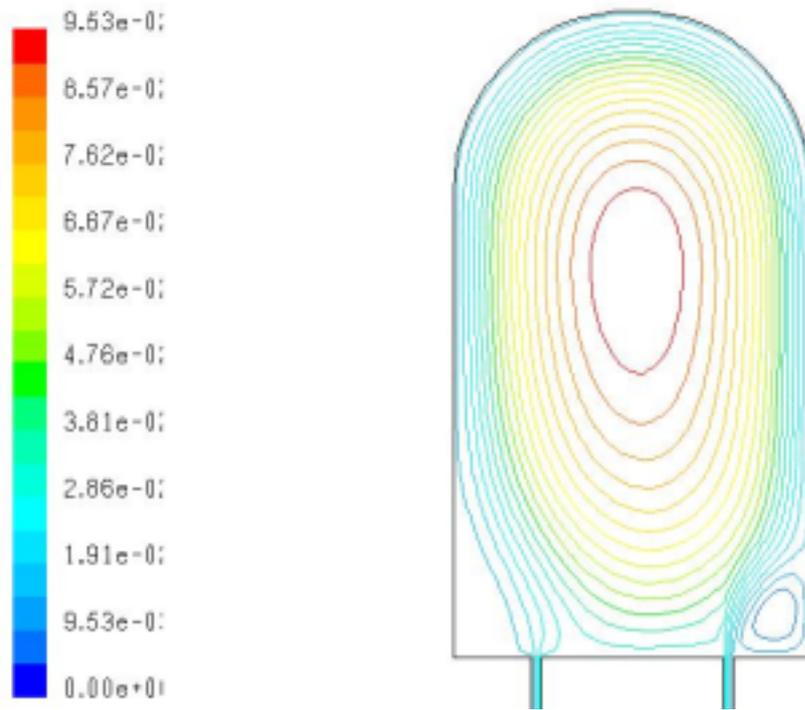


Fig. 8. 입 · 출구 간격변화에 따른 유동장 해석결과 Case P31

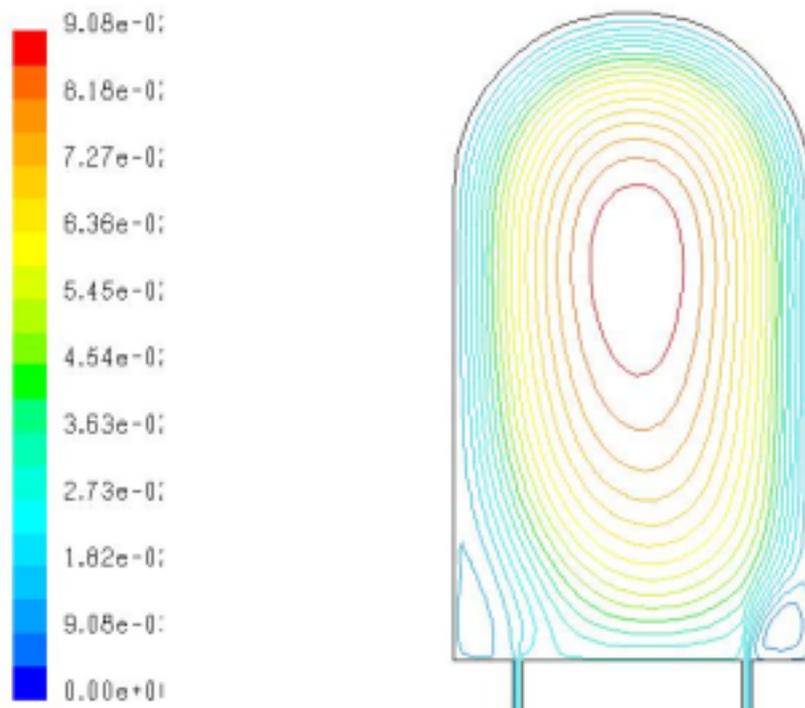


Fig. 9. 입 · 출구 간격변화에 따른 유동장 해석결과 Case P41

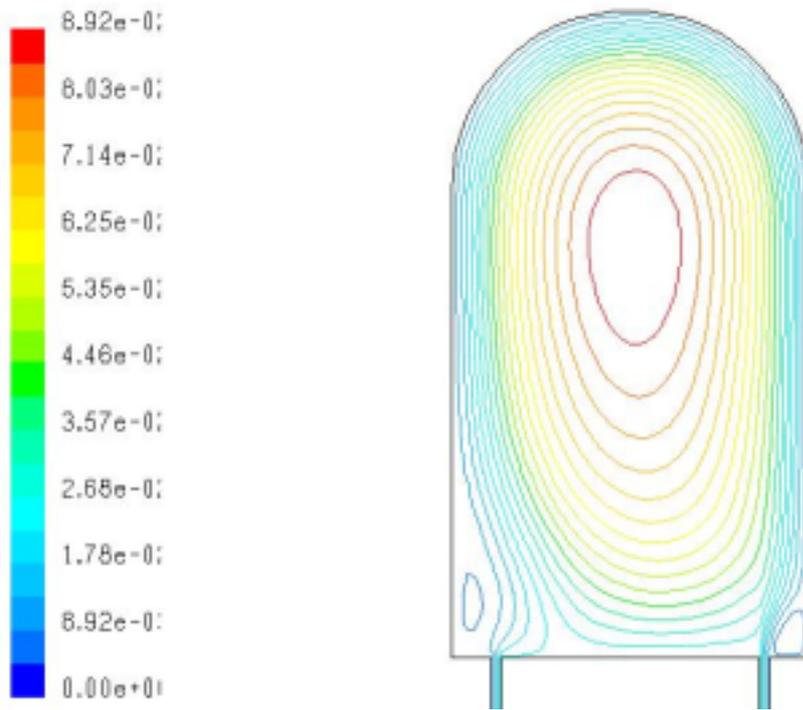


Fig. 10. 입 · 출구 간격변화에 따른 유동장 해석결과 Case P51

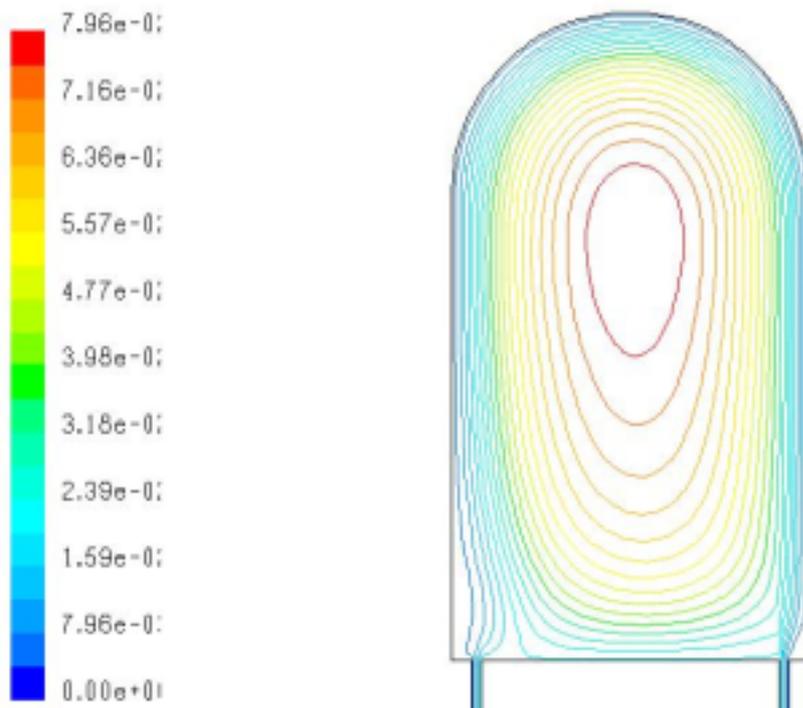


Fig. 11. 입 · 출구 간격변화에 따른 유동장 해석결과 Case P61

Fig. 6~11의 모든 경우에 형성된 재순환영역은 출구측으로 향하는 유선에 혼합되지 않음으로써 완벽한 이산화탄소 제거에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서, 이산화탄소 제거에 적합한 입출구 간격을 찾기 위해서는 이산화탄소의 농도뿐만 아니라 중심부의 재순환영역 또한 최소화되어야 한다. (포집백 내부 부피와 체적유량으로부터 계산된 이론적 무차원 체류시간은 약 0.16sec/sec로서 이론적으로 가능한 정상상태 도달시간으로 가정함.) Fig. 5.에서 이론적 정상상태 도달시간이후에 이산화탄소가 가장 낮은 수치를 보인 경우는 P41 이었으며 Fig. 9.에서 중심부의 재순환영역 또한 상대적으로 작으므로 두 가지 사항을 모두 고려하였을 때 이산화탄소 제거에 가장 적합한 입출구 간격은 P41 임을 알 수 있다. 이상의 Case Study를 통하여 입출구 간격은 포집백 내부의 재순환영역 등 유동패턴과 관련이 있으며 이산화탄소 제거효율에도 영향을 미치고 있음을 파악할 수 있었다. 또한 포집백 입출구 간격은 이산화탄소 잔여농도 및 재순환영역 형성 등의 고찰로써 최적화된 설계인자 도출이 가능하다.

2.4.2 입·출구 배관직경 변화에 따른 이산화탄소 제거효율

Table 5에는 입·출구 배관의 직경 변화(25.4mm에서 12.7mm)에 따른 이산화탄소 제거효율의 변화를 나타내었다. 배관직경 변화시 포집백 바닥면적에 대비한 입출구 면적비율이 0.003에서 0.0007로 감소됨으로써 출구에서의 흡입효율이 상당히 떨어질 것을 예측하여 P21, P31 및 P41 등 대표적인 경우에 대해서 Case Study를 수행하였다. 각 Case별로 기하학적 형상외의 경계조건 및 초기조건은 모두 동일하게 설정하였으며 시간경과에 따른 포집백 내부의 이산화탄소 최고농도 변화를 관찰하였다. 경과시간(sec) 및 이산화탄소 부피분율(Vol. %)은 초기조건으로 설정한 이산화탄소 농도(Vol. %)와 정상상태로 가정된 시간(sec)으로 각각 표준화(Normalization)하였다.

Table 3. 입출구 직경변화에 따른 이산화탄소 부피 분율의 변화 (1.0 sec/sec에서의 이산화탄소 최고농도)

Case	P21	P22	P31	P32	P41	P42
CO ₂ (%/%)	0.027	0.1626	0.029	0.1874	0.0312	0.208

Table 5.에서와 같이 입출구 직경을 1/2로 감소시켰을 경우 포집백 내부의 이산화탄소 농도가 오히려 증가됨을 알 수 있는데 P21에서 P22로 변화한 경우는 6배 증가하였으며 나머지 경우도 각각 6.5배, 6.7배씩 증가한 것을 볼 수 있다. 입·출구 면적을 감소시킬 경우 출구로의 흡입효율이 떨어지고 그로 인하여 포집백 내부의 헬륨과 이산화탄소와의 혼합에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3. 결론

방사성 이산화탄소 제거장치의 운전시간 단축을 위해서는 이산화탄소를 효과적으로 배출할 수 있는 포집백 설계인자 최적화가 필요하며 이를 위하여 전산해석적인 연구를 수행하였다. 물리적 유동현상을 재현하는 범위에서 3차원 형상을 2차원 평면에서 단순화시켜 모델링하였으며 설계인자들 중에서 포집백의 입·출구 간격과 배관직경 변화에 따른 Case Study를 수행하였다. 입·출구 간격(Interval)은 입구 및 출구의 원점간의 축대칭 거리로써 294.6mm부터 794.6mm까지 100mm씩 증가시켜 6가지 경우에 대하여, 입·출구 직경(Diameter)은 입구 및 출구 배관의 내경으로써 25.4mm와 12.7mm 등 2가지 경우에 대하여 수행하였다.

동일한 배관직경(25.4mm)에 대해서 수행된 6가지 입·출구 간격변화의 Case Study를 수행한 결과, 입·출구 간격이 가장 작은 경우, 입구에서 토출된 기체가 출구측으로 향하려는 경향을 보임으로 인하여 불안정적인 유동패턴과 재순환영역 그리고 높은 이산화탄소 농도를 보였다. 입출구 간격이 커질수록 안정적인 유동패턴을 보여주었으며 특히 이론적 정상상태 도달시간 이후에 이산화탄소가 가장 낮은 수치를 보인 경우는 Case P41 (입·출구 간격 : 594.6mm)로써 비교적 작은 재순환영역을 보였다.

동일한 입·출구 간격에 대하여 입·출구 배관직경 변화(25.4mm에서 12.7mm)에 따른 이산화탄소 제거효율의 변화를 살펴 본 결과, 배관직경 변화시 포집백 바닥면적에 대비한 입출구 면적비율이 0.003에서 0.0007로 감소됨으로써 출구에서의 흡입효율이 상당히 떨어지는 것으로 나타났다. 입출구 직경을 1/2로 감소시켰을 경우 포집백 내부의 이산화탄소 농도가 6배에서 6.7배까지 증가한 것을 볼 수 있었다.

이상의 연구를 통하여 현재 기체포집백 형상외에 입출구 배관요소의 설계를 변경함으로써 이산화탄소 제거효율을 높일 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 포집백 하단의 재순환영역을 제거시키기 위하여 하단부위의 직각부분에 곡면(fillet)을 적용하는 것이 효과적일 것으로 판단되며, 내부유체가 비중의 차이가 있는 2가지 유체이므로 비중 및 중력효과를 이용하여 입구를 포집백 상단에 배치시키는 등 포집백 형상요소 변경을 통하여 방사성 이산화탄소 제거장치의 제거효율을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

- [1] I.G.Currie, Fundamental Mechanics of Fluids, 1993
- [2] Frank M. White, Viscous Fluid Flow, 1991
- [3] Fluent Inc., Fluent User's Guide, 2002
- [4] G. R. Doshi and T. M. Krishnamoorthy, Bull. Rad. Prot.15(2), 1992
- [5] ICRP-14, 'The Management of Carbon-14 in Canadian Nuclear Facilities', Advisory Committee on Radiological Protection, 1995
- [6] M. J. Kabat, 'Monitoring and Removal of Gaseous Carbon-14 Species', 15th DOE Nuclear Air Cleaning Conference', 1978
- [7] Technical Report, TR.95ZJ14.J1998.11, 'The Development of Monitoring Techniques of Radio Carbon from Heavy Water Reactor', 1998