2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

유동배플이 중간열교환기 셀측 열수력성능에 미치는 영향조사

The examination of the effects of the flow baffle on the thermal hydraulic performance of IHX shell side

김의광, 심윤섭, 김성오
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150
백병준
전북대학교 기계공학부
전북 전주 덕진구 덕진동 1 가 664-14

요 약

Baffle간격, Baffle cut, Baffle Flow Hole의 유로면적 등의 변화에 대한 열유체적 성능특성을 ASTEEPL, 2DHX 전산코드를 이용하여 분석하였다. 기준 설계자료를 기준으로 조사하였을 경우 소듐 열교환기 shell측 구조가 전체 열전달량에 미치는 영향은 크지 않으나, 압력손실측면에서는 Baffle간격을 줄이는 것이 Flow hole 직경을 줄이는 것보다 유리하다. 반경방향 전열관간의 온도균일화 정도는 Baffle간격을 줄일 경우 온도편차가 줄어들고, Baffle개수가 13개 이상에서는 약 6 ℃ 정도로 일정하다. Baffle flow hole을 줄일 경우 온도편차는 감소하고 flow hole을 완전히 막을 경우 약 2 ℃ 정도까지 줄일 수 있다.

Abstract

The effects of the flow baffle on the thermal hydraulic performance of IHX shell side has been examined using ASTEEPL, 2DHX code for the variation of baffle distance, baffle cut and baffle flow hole design data. When KALIMER design data were selected as a base for the study, a shell baffle structures does not influence on a total heat transfer rate and it is better to reduce baffle distance rather than baffle flow hole size from the view of pressure loss in the IHX. Radial thermal imbalance between tubes was reduced to 6 °C when the number of baffle is beyond 13. And thermal imbalance decreased also when flow hole size decreases. If flow hole clogs perfectly, thermal imbalance can be reduced up to 2 °C

1. 서 론

칼리머 액체금속로의 열전달계통은 1 차계통의 방사성 소듐으로부터 중간계통의 비방사성 소듐을 분리하는 방벽으로 중간열교환기(IHX, Intermediate Heat Exchanger)를 채택하고 있다. 중간열교환기는 수직, 역방향 유동, 셀-튜브형 열교환기로서 1 기당 98.75 MWt 의 설계열출력을 담당하며 4 대가 운전된다. 열교환기내 튜브의 갯수는 1702 개이고, 중간계통의 소듐은 튜브내를 수직 윗방향으로 흐르며, 아래방향 유동의 셀측 소듐에 의해 가열된다. 운전온도는 1 차측의 입구는 530 °C, 출구측은 385 °C 이고, 중간계통은 340 °C 에서 511 °C 로 가열된다.

중간열교환기는 열출력과 1, 2 차 각계통의 압력손실 제한 조건을 만족시키도록 설계되고, 또한 기계 구조적 건전성을 확보하기 위한 전열 튜브사이의 온도균일화가 필수적이다. 온도의 균일화를 위해 중간열교환기 내부에는 도넛(donut)형 배플이 설치되어 유동혼합을 촉진시키고 이로서 튜브간의 열적 불균일성을 완화시킬 수 있도록 하고 있다. 이 보고서는 기수행 연구시에 결정된 IHX 의 설계작업결과를 기준으로 Shell 측 유동장에 가장 큰 영향을 미치는 shell 측 구조물인 Baffle 의 설계인자에 대한 parameter study 를 통하여 향후 IHX 설계시에 바람직한 방향을 제시하기 위함이다. 본 논문에서는 Baffle 의 설계인자, 즉 Baffle 간격, Baffle cut, Baffle Flow Hole 의 유로면적 등의 변화에 대한 열유체적 성능특성을 ASTEEPL, 2DHX 전산코드를 이용하여 해석하고 분석결과를 기술한다.

설계인자계산 범위로는 Baffle 개수는 3 개에서 19 개까지, Baffle cut 은 0.142, 0.238, 0.322, 0.416 으로 변화시켰고, Baffle Flow Hole 의 직경은 현재 설계자료값인 8.8 mm 을 기준으로 0 ~ 11mm 로 증감시켰다.

이 논문은 먼저 계산에 사용한 설계프로그램을 소개하고, 다음으로 칼리머 중간열교환기 설계값를 기준으로 한 열유체적 해석결과를 논의한 후, 마지막으로 결론에 대해 기술하기로 한다.

2. 설계전산코드 ASTEEPL 과 2DHX

현재 IHX 설계용 성능해석 전산체제는 2 가지 해석 기능의 코드로 구성되어 있는데 첫번째는 ASTEEPL로서 이는 IHX의 압력손실 및 shell 측의 여러가지 흐름의 각각의 크기를 계산하며, 두번째인 2DHX는 ASTEEPL의 계산결과를 입력으로 IHX의 전열량을 계산한다.

ASTEEPL(Analysis of Shell-and-Tube Heat Exchanger Pressure Loss)은 다시 해석대상의 shell내부 구성에 따라 ASTEEPL-H와 ASTEEPL-D로 된다. ASTEEPL–H는 기존

의 관통형(shell-and-tube type) 열교환기와 같이 반달형 baffle을 사용하는 구조의 열교환기를 대상으로 하고 있고, ASTEEPL-D는 98년 3월의 KALIMER IHX 설계[3.2]과 같이 도너츠 형태의 환형 배플(baffle)을 사용하는 구조의 열교환기를 대상으로 하고 있다. -D는 -H 코드중에 baffle의 차이점으로 인한 부분을 변경한 것으로서 기본적인 해석모형의 틀은 두 코드가 모두 같다. 즉, 두 코드 모두 다 유로망 해석 기법[3.4]을 기본 해석모형으로 사용하고 있다.

2DHX는 일차원 지배식을 바탕으로 하여 IHX내의 2차원 열전달 현상을 묘사하는 구조로 되어 있어 수직 및 반경방향의 튜브측 및 shell측 온도분포 특성을 파악할 수 있고, 계산결과로부터 전열관의 온도분포를 구할 수 있다. 열교환기의 구체적인 형태를 고려하지 않고 단지 흐름간의 차이만을 고려하기에 반달형과 도너츠형 배플을 사용하는 열교환기 모두를 다 해석하는 데에 사용할 수 있다.

그림 1, 2 는 2DHX 의 적용에 앞서 격자수 영향이 현실적으로 없어지는 노드격자수를 결정하기위한 계산결과이다. 그림 1 은 반경방향으로 노드수를 증가시켰을 경우 전열관의 전체평균온도와 길이가중치평균 최대전열관온도에 대한 결과로 약 30 개의 노드수가 적절할 것으로 보여진다. 그림 2 는 높이방향의 노드수가 약 60 개 이상에서는 큰 변화가 없는 것으로 보여지고, 이 경우 baffle 수가 9 개인 경우이므로 baffle 과 baffle 사이(즉 NZseg)는 6 개의 노드수가 필요하다. 이로부터 분석에 격자수는 가로방향으로는 30 개, 세로방향으로는 60 개(baffle 수가 9 개인 경우)를 사용하였다.

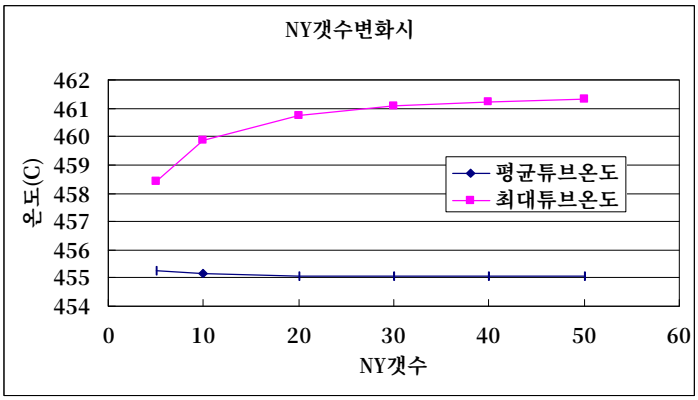

그림1 NY갯수 변화시 온도변화

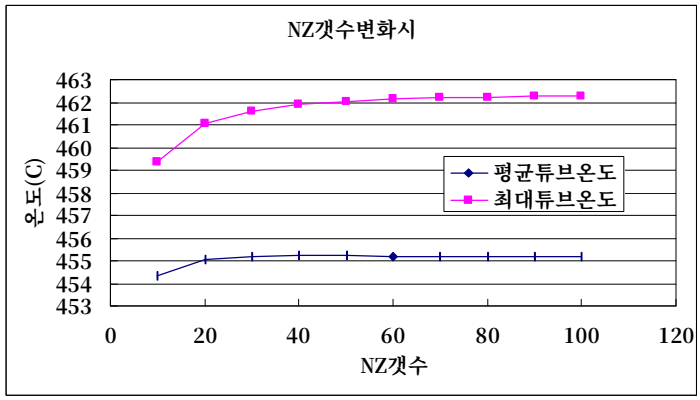

그림2 NZ갯수 변화시 온도변화

3. Baffle 형태에 따른 성능특성 분석

성능분석을 위한 기준설계는 기수행된 연구로 결정된 칼리머 IHX 의 설계작업결과이며, 이를 바탕으로 다음 세가지 성능관점을 중심으로 기술하고자 한다.

- 주어진 제원에서 최대 전열량
- 주어진 제원에서 최소의 압력손실
- 동일 전열량조건에서 최소의 열응력

IHX 의 열응력은 각 전열관사이, 전열관과 shell 사이, 연결부위사이 등에서 발생하는 열팽창의 차이에 의하며, 칼리머 IHX 에서 전열관과 shell 사이의 열팽창은 floating head 설계로 이를 완화시키고 있다. 직관형 전열관의 온도차이는 전열관의 팽창차이로 인해 Tube sheet 에 압축 혹은 인장과 같은 힘을 가할 뿐 아니라, 전열관의 좌굴(buckling)을 발생시킬 수 있다. 여기서는 좌굴현상을 일으키는 전열관의 전체평균온도와 최대온도를 갖는 전열관사이의 온도편차의 경향을 파악하고자 한다.

표 1 칼리머 IHX 의 설계값

외부 Shell 내경 [m]	1.0065
내부 shell 직경 [m]	0.35
Baffle 개수	9
전열관외경 [m]	0.0127
전열관 두께 [m]	0.0008
전열관개수	1702
P/D	1.6
Flow hole 직경 [m]	0.0088
Flow hole 개수	전열관개수의 2

	배
Outer Baffle 내경 [m]	0.578
Inner Baffle 직경 [m]	0.895
전열관 길이 [m]	6
압력손실 [Kpa]	24.77
전열량 [MW]	101.85
Shell 측 유량 [Kg/s]	535.35
전열관측 유량 [Kg/s]	450.88

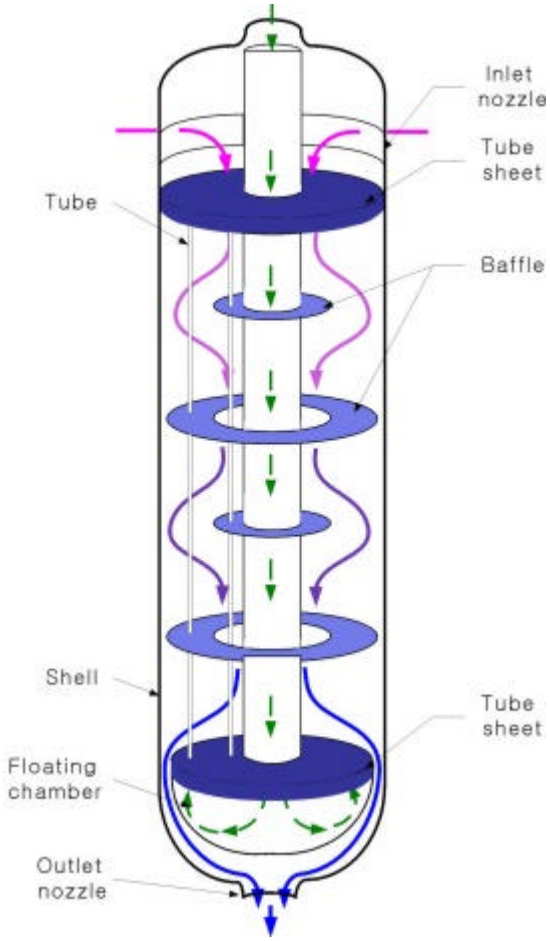

그림 3 중간열교환기 형상

4. Baffle 간격의 영향

Flow Baffle은 IHX 입구에서 유입된 소듐을 shell내 전열관의 진행방향에 대하여 Cross flow를 유발시켜 shell내 소듐의 혼합이 잘 이루어지도록 하고 따라서 shell 내 전열관의 온도분포를 균일하게 하는 효과가 있다. 그러나 그 수가 많게 되면 IHX 전체 압력손실값이 커진다. 칼리머 IHX의 Baffle은 Outer baffle과 inner baffle를 교대로 설치하여 cross flow가 연속적으로 이루어지도록 하고, IHX 입구와 출구쪽에는 Outer baffle이 설치되어 있다. 아래 그림은 현재의 칼리머 설계에서 baffle 개수를 3개에서 19개까지 증가시켰을 때의 결과이다. 이 경우 baffle간 거리대비 shell간 거리의 비는 약 4.5 ~ 0.9사이이다.

그림4은 Baffle 갯수 변화시 압력손실값의 변화에 대한 것으로 여기서 중간구간 압력손실은 중간부분 Baffle 사이의 압력손실을 뜻한다. 그림에서 전체압력손실은 Baffle 개수가 많을수록 증가하며, 현재의 설계값은 24.8 Kpa (Baffle개수 9개)이나 설계허용값이 38 Kpa 인 것과 노즐출구의 형상을 달리하여 수 Kpa의 압력손실을 줄일 수 있는 점을 감안하면 Baffle개수 는 15개까지도 가능하다. 중간구간의 압력손실은 Baffle 개수가 9개일 때 약 1.94 KPa 이고, 이를 기준으로 감소하다가 다시 증가한다.

그림5는 횡류, 평행류, 우회류성분을 나타낸 그림으로, 전반적으로 횡류성분은 약 35%, 평행류성분은 약 60%, 우회류는 약 5%의 구성비를 가지며, Baffle 개수가 많을수록 횡류성분이 점차 감소함을 볼 수 있는데 이것은 Baffle개수가 많아질수록 Baffle사이를 통과하는 횡류의 유속이 빨라지고, 따라서 횡류에 대한 유동저항이 커지기 때문이다. 여기서 평행류성분은 Baffle을 통과하는 유량과 창지역을 통과하는 유량중 Baffle과 shell 사이를 우회하는 유량을 제외한 나머지를 합한 유량을 뜻한다.

그림6는 Baffle 갯수 변화시 전열량의 변화에 대한 것으로 전반적으로는 증가하는 경향을 보이고, Baffle개수 9를 이후에는 증가기울기가 완만해짐을 볼 수 있다. 설계요구전열량인 98.75 MW를 기준할 때 Baffle개수 9와 Baffle개수 19의 전열량은 약 3.1%에서 4.6%로 약 1.5%의 여유도가 증가하지만 그 양은 미미하다고 할 수 있다.

그림7은 shell내부 중간지점에서 횡류성분, 평행류성분의 합성 열전달계수에 대한 것이다.

그림8은 Baffle 갯수 변화시 전열관 전체평균온도와 최대전열관온도와 차이를 나타낸 것으로 baffle개수가 증가함에 따라 온도편차가 감소하여 baffle개수가 13 이상에서는 거의 약 6 °C 정도로 일정하다. 따라서 baffle개수가 적을 경우에는 개수를 증가하면 온도 균일화에 도움이 되지만 일정 개수 이상에서는 더 이상 도

움이 되지 않음을 볼 수 있다.

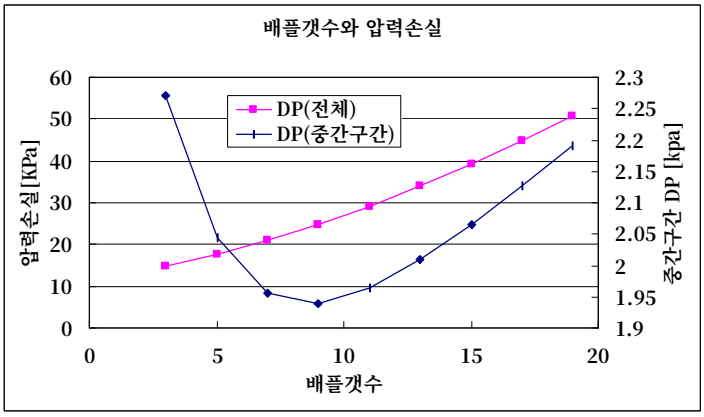

그림4 Baffle 개수 변화시 압력손실

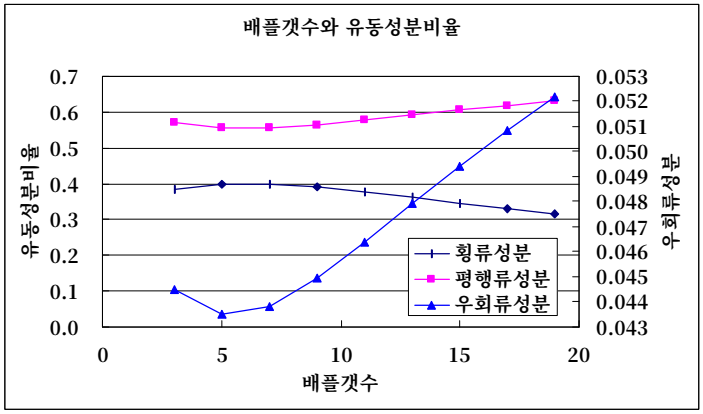

그림5 Baffle 갯수 변화시 유동성분비율

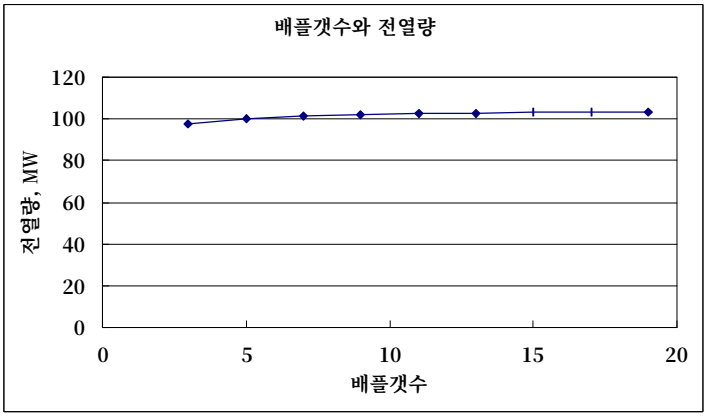

그림6 Baffle 갯수 변화시 전열량

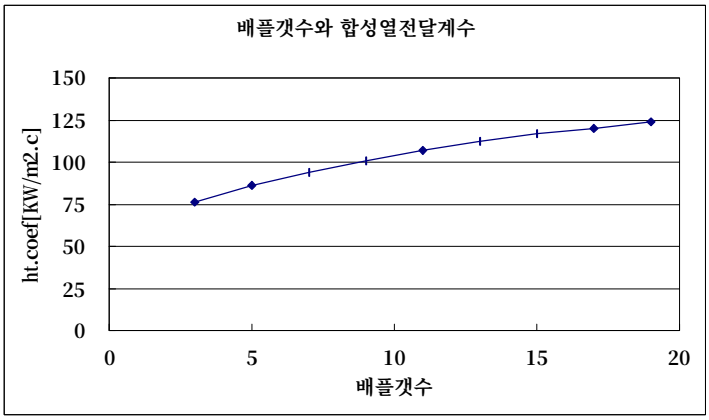

그림7 Baffle 갯수 변화시 합성 열전달계수

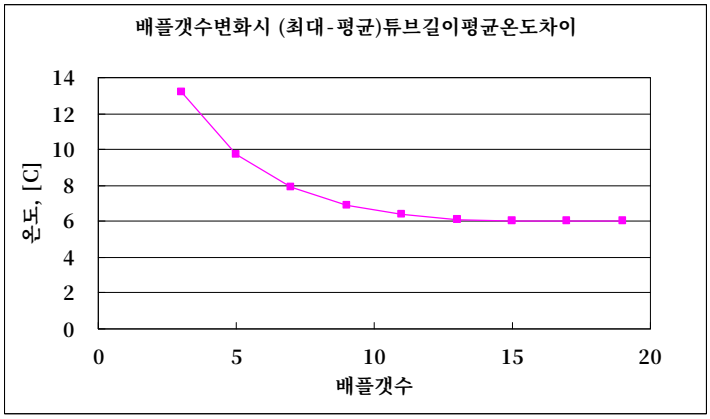

그림8 Baffle갯수변화시 전열관 평균온도와 최대온도와의 차이

5. Baffle Cut의 영향

Baffle절단율은 Baffle의 간격에 비해 너무 좁으면 창지역에서의 압력손실이 너무 커져 전체적으로 보아 압력손실의 분포가 비효유적이 되고, 너무 넓으면 전열관 번들내로 유체가 제대로 유동하지 않아 Baffle 뿌리근처의 유속을 떨어뜨려 열전달에 악영향을 미친다.
Baffle절단율은 shell단면적과 창지역면적의 비율로 shell 단면적을 양분하는 지점(직경=0.7535 m)을 기준으로 top창지역과 bottom창지역의 면적이 동일하도록 할 때 Outer baffle과 Inner baffle의 내외경은 아래 표와 같다.

표2 Baffle절단율과 Outer baffle 과 Inner baffle의 내외경

Baffle절단율	Outer baffle 내경	Inner baffle 외경
0.142	0.4989	0.9416
0.238 (설계치)	0.578	0.895
0.322	0.6396	0.8523
0.416	0.702	0.8017

아래 그림은 현재의 칼리머 설계에서 Baffle절단율을 변화시켰을 때의 결과이다. 그림9은 Baffle절단율 변화시 압력손실값의 변화에 대한 것으로 전체압력손실은 Baffle절단율이 클수록 감소한다. 이는 baffle면적이 감소하면서 baffle에 의한 유동저항이 줄어들기 때문이다.
그림10은 각 유로성분을 나타낸 그림으로, 횡류성분은 Baffle절단율이 클수록 증가함을 볼 수 있는데, 이는 창지역의 면적이 증가하면서 창지역으로 향하는 횡류의 성분이 많아지기 때문이다.

그림11에서 보면 Baffle절단율 증가에 따른 전체 열전량에는 변화가 미미한데 이에 대해서 세부적으로 검토하면 다음과 같다. Baffle절단율이 커짐에 따라 그림10에 제시된 바와 같이 횡류와 평행류의 비율이 크게 달라지고 이는 다시 그림12에 보여진 바와 같이 다시 2DHX에서 열전달계수에 변화가 생기게 된다. 그런데도 전체 열전달량에는 큰 변화가 없는 것으로 결과가 나온 것은 이는 이 작동조건에서는 전체 열전달에 열전달계수 변화에 따른 민감도보다는 열교환기내 고온(shell측)과 저온(tube측) 유체간의 온도배치에 따른 민감성이 훨씬 크기 때문인 것으로 여겨진다. 이는 그림5와 6의 경우를 봐도 알 수 있다. 즉 그림5에서 보면 칸막이 갯수 증가에 따라 열교환 성능이 더 높은 횡류비율은 감소하고, 성능이 떨어지는 평행류 성분은 증가하지만, 그림5에서 전체 열전달량은 오히려 증가하고 있다. 이는 칸막이 개수변화에 따른 고온과 저온 유체간의 온도배치가 달라지기 때문이다. 그러나 Baffle절단율이 클 경우에의 2DHX 분석결과의 적용에는 추가적인 고려가 필요한 것으로 여겨진다. 즉, Baffle절단율이 커지면 Baffle 뿌리 지역에와류(recirculation)이 발생할 수 있고, 이는 열전달에 큰 변화를 야기시킬 수 있다. 그러나 본 해석에 사용된 2DHX에서는 이러한 와류의 존재 가능성을 해석모형에서 고려하고 있지 않기에 Baffle절단율에 따른 열유동장의 변화가 제대로 반영되 않을 수 있다. 와류의 발생은 열전달 관점에서 긍정적인 점과 부정적인 점 모두를 갖게 된다. 긍정적인 점은 와류로 인해 열전달계수가 증가하게 되는 것이고, 부정적인 점은 유체의 혼합율이 떨어진다는 점이다. 이러한 긍정부정적인 점의 종합적인 영향은 작동조건에 따라 달라질 수 있는 것이기에 Baffle절단율이 큰 경우에 대한 신뢰성있는 분석결과가 필요한 경우에는 와류특성 분석기능이 있는 FLOW3D와 같은 세밀코드로 와류에 대한 영향을 정량적으로 분석한 후 2DHX적용 또는 보정여부를 결정하는 것이 필요할 것으로 여겨진다. 그림12는 shell내부 중간지점에서 횡류성분, 평행류성분의 합성 열전달계수에 대한 것이다. 그림13은 전열관 전체평균온도와 최대전열관온도와 차이를 나타낸 것이다.

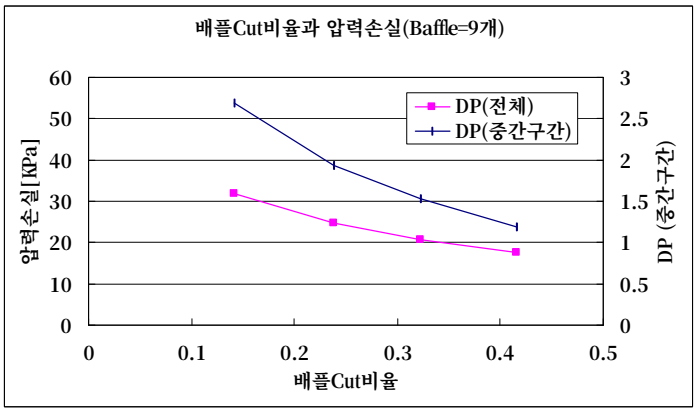

그림9 Baffle절단율 변화시 압력손실

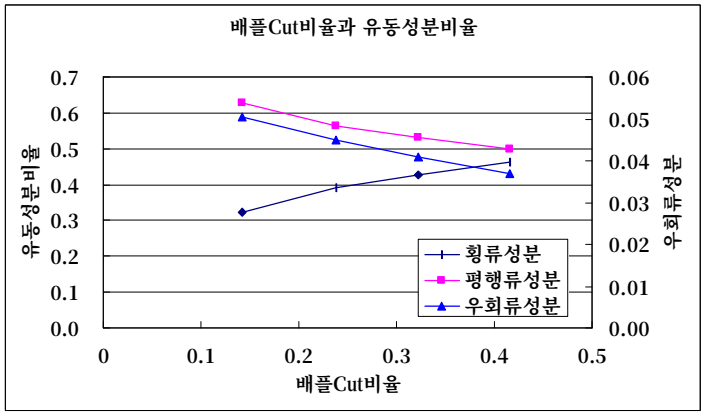

그림10 Baffle절단율 변화시 유동성분비율

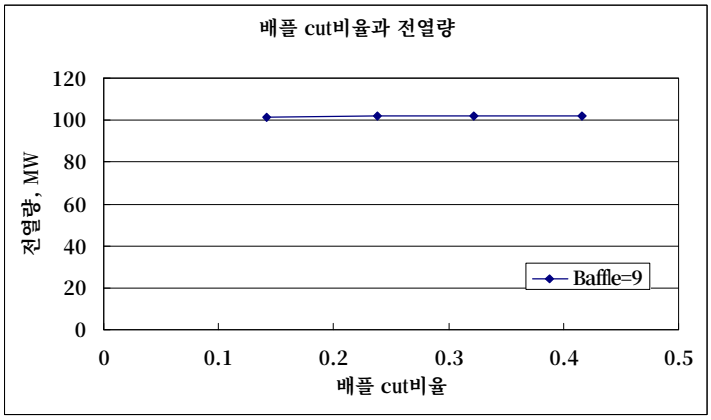

그림11 Baffle절단율 변화시 전열량

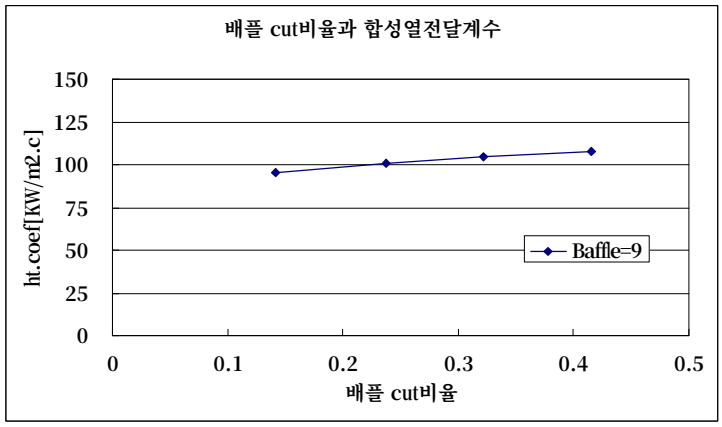

그림12 Baffle절단율 변화시 합성 열전달계수

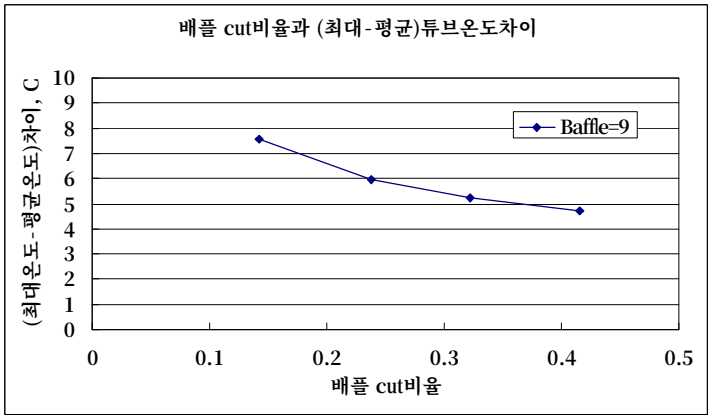

그림13 Baffle절단율 변화시 전열관 평균온도와 최대온도와의 차이

6. Baffle Flow Hole 의 영향

Baffle flow hole 크기의 영향은 현재 설계자료인 직경=0.0088 m을 기준으로 직경을 증감시켜 그 변화를 조사하였다.

그림14은 flow hole 크기의 변화시 압력손실값의 변화에 대한 것으로 전체압력손실은 flow hole 크기가 작을수록 증가한다. 이는 flow hole 면적이 감소하면서 이로인한 유동저항이 증가하기 때문이다.

그림15은 각 유로성분을 나타낸 그림으로, 횡류성분은 flow hole 면적이 감소할수록 증가함을 볼 수 있는데, 이는 Baffle지역의 유동저항이 증가하면서 창지역으로 향하는 횡류의 성분이 많아지기 때문이다.
그림16는 flow hole 직경변화시 전열량의 변화에 대한 것으로 flow hole 직경이 감소할수록 완만하게 증가하는 경향을 보인다.
그림17는 shell내부 중간지점에서 횡류성분, 평행류성분의 합성 열전달계수에 대한 것이다. 그림18은 전열관 전체평균온도와 최대전열관온도와 차이를 나타낸 것으로 flow hole직경을 작게 할 경우 횡류의 증가로 인하여 소듐의 혼합이 매우 잘 이루어져 약 2 ℃ 까지의 온도편차도 가능함을 알 수 있다.

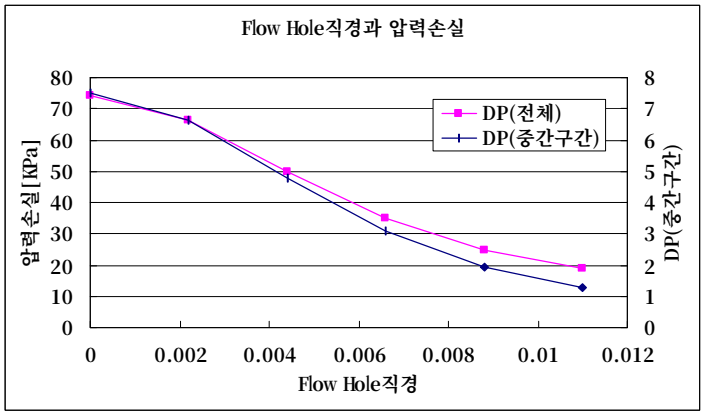

그림14 flow hole 직경변화시 압력손실

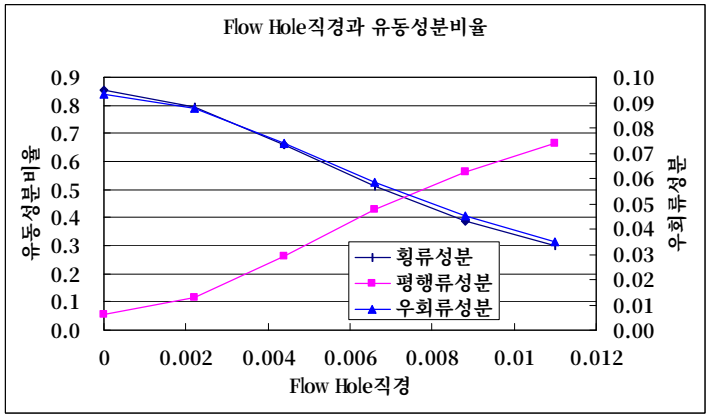

그림15 flow hole 직경변화시 유동성분비율

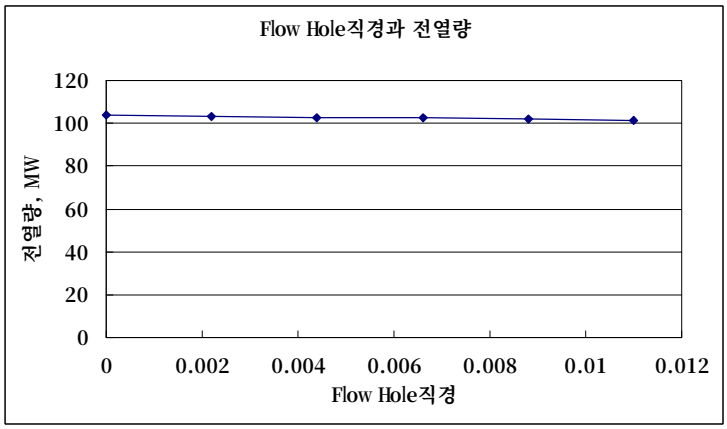

그림16 flow hole 직경변화시 전열량

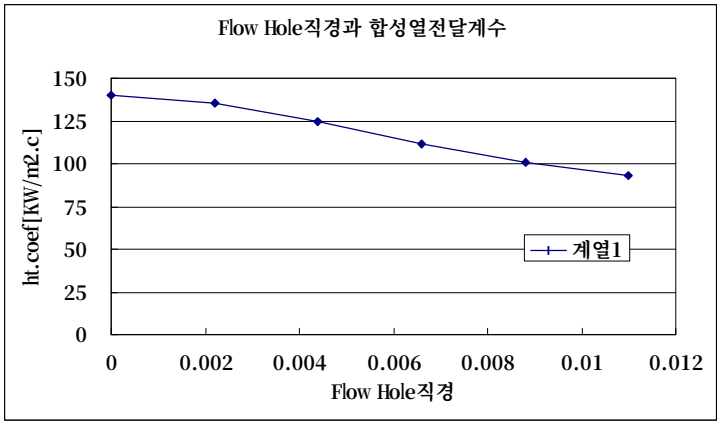

그림17 flow hole 직경변화시 합성 열전달계수

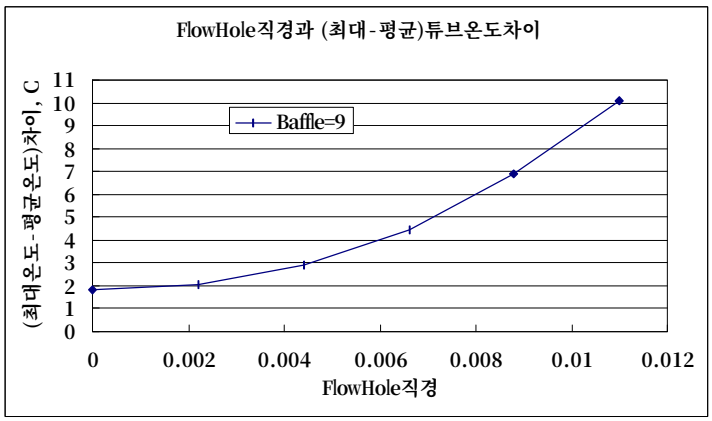

그림18 flow hole 직경변화시 전열관 평균온도와 최대온도와의 차이

3 결론

Baffle간격, Baffle cut, Baffle Flow Hole의 유로면적 등의 변화에 대한 열유체적 성능특성을 ASTEEPL, 2DHX 전산코드를 이용하여 분석하였다.

기준 설계자료를 기준으로 조사하였을 경우 소듐 열교환기 shell 측 구조가 전체 열전달량에 미치는 영향은 크지 않으나, 압력손실측면에서는 Baffle 간격을 줄이는 것이 Flow hole 직경을 줄이는 것보다 유리하다.

반경방향 전열관간의 온도균일화 정도는 Baffle 간격을 줄일 경우 온도편차가 줄어들고, Baffle 개수가 13 개 이상에서는 약 6 °C 정도로 일정하다. Baffle flow hole 을 줄일 경우 온도편차는 감소하고 flow hole 을 완전히 막을 경우 약 2 °C 정도까지 줄일 수 있다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구계획의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 심윤섭, code ASTEEPL-D 사용설명서, KALIMER/FS200-CM-02/2000

[2] 심윤섭, KALIMER IHX 크기 및 내부의 개념적 설계, KALIMER/FS200-ER-01/1998

[3] 심윤섭, IHX 해석코드 ASTEEPL 과 2DHX 의 경사류해석모형 개선을 위한 현 모형의 평가, KALIMER/FS200-AR-01/1999

[4] J.W.Palen and J.Tabor,"Solution of Shell Side Flow Pressure Drop and Heat Transfer by Stream Analysis Method", CEP Symposium Series 65, No.92, pp.53-63, 1969

[5] 반태곤 외 3 명, "유동해석에의한 단상용 원통다관형 열교환기 열설계코드의 개발", 한국에너지공학회지 제 10 권 제 4 호, 2001 년 11 월