

원전 1차 계통 분기배관의 난류관통 및 후단밸브에서의 누설을 고려한 열유동 해석

이 선기, 김 태룡
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 논문은 원자력발전소의 안전주입계통을 대상으로 후단 격리밸브에서 주배관인 1차측(RCS측)으로 누설 발생시 난류관통 유동을 고려한 온도분포를 해석적으로 구하였다. 해석결과 분기관 후단에서 주배관 쪽으로 누설이 발생할 때 분기관 내부에서는 주배관에서의 난류관통 유동이 영향을 미치는 부위와 누설유동이 영향을 미치는 부위(대류영역)가 나타나며 두 영역이 만나는 경계에서 큰 온도차가 나타난다. 이 온도 경계층은 배관 하부의 좁은 영역에 길이방향으로 존재하며 후단 격리밸브에서 누설 발생시 누설유동의 변동 및 난류관통유동의 특성에 의해서 변동함으로 열피로 관점에서 가장 취약한 부위로 판단된다.

1. 서론

배관내에서 서로 다른 온도의 유체가 밀도차에 의해서 층이 분리된 채 존재하는 현상을 열성층(thermal stratification) 현상이라 하며, 이 현상에 의한 과도한 열응력은 배관의 건전성을 저해할 수 있다[1]. 해외 원전에서 열성층 현상과 이에 따른 배관 건전성 저해 발생 사례로는 미국 Trojan 발전소 가압기 밀림배관의 이상변형, Farley 2호기 및 Tihange 1호기 안전주입 계통의 차단밸브 전후 배관에서의 결함 발생, 일본 Genkai 1호기 잔열제거계통 차단밸브 전후 배관에서의 결함 발생 등 다수가 있다.

가압기 밀림배관의 경우에는 배관 내부에 열성층 현상이 상존하는 곳이며 열성층에 의한 과도한 굽힘 모멘트가 작용하여 이상변형을 유발하는 것으로서 국내 발전소에서는 영광 3,4호기 이후의 발전소에서는 열성층 영향이 고려되어 설계되었다. 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서는 Bulletin 88-08 및 88-11에서 기존 운전중인 발전소뿐만 아니라 설계중인 원전에 대해서도 주요 배관들을 대상으로 열성층화 현상의 존재 여부 검토 및 평가를 수행하여 배관의 건전성을 확인하고 설계 수명기간중의 건전성 유지방안을 촉구하였으며[2,3] 현재 국내에서는 영광 3,4호기 이전에 설계된 원전의 밀림배관에 대하여 온도 감시 및 열성층 영향 평가를 수행하고 있다[4,5].

한편, 안전주입계통 및 잔열제거계통에서 발생하였던 결함의 원인으로는 후단의 격리밸브에서 저온수의 반복적인 누설로 인하여 열성층 현상의 발생 및 소멸을 유발하며 이로 인한 열피로로 결함이 발생 성장한 것으로 설명되고 있으나 상세한 메카니즘에 대한 해석적인 설명이 부족한 실정이다. 안전주입계통 및 잔열제거계통 등의 분기배관에는 주배관인 냉각재 계통의 유동에 기인한 난류관통(Turbulent Penetration) 유동이 상존하고 있으며 또한 후단 격리밸브에서 누설 발생시에는 난류관통 유동과의 상호 작용으로 내부 유동은 매우 복잡한 유동이 예상된다.

본 논문에서는 원자력발전소의 안전주입계통을 대상으로 후단 격리밸브에서 주배관인 1차측

(RCS측)으로 누설 발생시 난류관통 유동을 고려한 온도분포를 해석적으로 구함으로써 열피로 발생 메카니즘 및 취약부위를 명확히 하였으며 이는 향후 국내 원전 정비작업(예를 들어 ISI 검사 등) 등의 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. 열유동해석

2.1 해석 모델링

난류관통 유동 및 후단 격리밸브에서의 누설 유동을 고려한 분기관 내부의 온도분포를 검토하기 위해 고리 4호기 안전주입계통을 해석 대상으로 선정하여 주계통에 연결된 분기관 내부의 열유동을 계산하였다. 그림 1은 해석 대상 안전주입계통의 개략도를 나타낸다. 안전주입계통은 원자로 냉각재 계통(RCS)의 고온관 및 저온관에 연결된 배관으로써 발전소 정상 운전시에는 체크밸브로 격리되어 있으나 유사시에는 고압 저온의 냉각수가 RCS측으로 유입되도록 설계되어 있다.

그림 2는 해석 대상의 모델을 나타낸다. 해석조건으로는 RCS 주계통에는 유속 15 m/s, 온도 300℃(573° K)의 냉각재가 흐르고 있으며 주배관에 연결된 분기관은 직경 6 inch, 수직방향으로 30 inch와 수평방향으로 30 inch의 길이를 갖고 있으며 후단에는 체크밸브로 격리되어 있다.

해석은 운동방정식에 유체의 온도차에 의한 부력 효과를 도입한 비압축성 점성유체(Boussinesq 유체)를 대상으로 상용 코드인 Fluent Code[6]을 사용하였다.

초기온도 및 밀도가 T_0, ρ_0 인 유체가 $T(y), \rho(y)$ 로 변했다면 밀도차에 의하여 단위 체적당 $(\rho_0 - \rho)g$ 의 부력이 작용하며 이때 $\rho_0 > \rho$ 이면 양(+)의 힘이 작용하며 $\rho_0 < \rho$ 이면 부(-)의 힘이 작용한다. 이때 밀도와 온도의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho = \rho_0 \{1 - \beta(T - T_0)\} \quad (1)$$

여기에서 β 는 체적 팽창율이며 부력은 단위 질량당 힘으로써 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_0 &= \frac{1}{\rho_0} (\rho_0 - \rho)g \\ &= \beta g (T - T_0) \end{aligned} \quad (2)$$

한편, 운동방정식(Navier - Stokes 방정식)을 와도(渦度, ω)와 유동함수(Stream Function, ψ)를 도입하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = \nu \nabla^2 \omega \quad (3)$$

여기에서 와도 ω 및 유동함수 ψ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4)$$

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

식(2)의 F_0 의 미분을 취해서 식(3)의 우변에 추가하면 온도의 효과를 고려한 식(6)의 운동방정식

(와도방정식)이 얻어진다.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) = g\beta \frac{\partial T}{\partial x} + \nu \nabla^2 \omega \quad (6)$$

해석은 상기의 식(6)과 연속방정식으로부터 얻어지는 식(7) 및 열전도방정식 식(8)을 순차적으로 계산한다.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} = \chi \nabla^2 T \quad (8)$$

그림 3은 분기배관 열유동 해석상의 Mesh(95(I)×175(J))를 나타내며 해석은 다음의 5가지 경우를 대상으로 하였다.

- (a) 분기관 후단의 밸브로부터 누설이 없는 경우
- (b) 밸브로부터 온도 40°C(313 °K)의 물이 유량 1.5 gpm(유속 0.025m/s)으로 주배관 측으로 누설이 있는 경우
- (c) 밸브로부터 온도 40°C(313 °K)의 물이 누설유량 3.0 gpm(유속 0.05m/s) 일 경우
- (d) 밸브로부터 온도 40°C(313 °K)의 물이 누설유량 6.0 gpm(유속 0.10m/s) 일 경우
- (e) 밸브로부터 온도 40°C(313 °K)의 물이 누설유량 30.0 gpm(유속 0.50m/s) 일 경우

2.2 해석결과

먼저 분기관 후단의 밸브로부터 누설이 없는 경우의 해석결과를 그림 4에 등온선으로 표현하였으며 등온선 간격은 10° K이다. 해석은 초기에 저온(20°C)의 물이 배관 전체에 채워진 상태에서 주배관에서 온도 300°C(573° K)의 물이 유속 15m/s로 흐르는 경우이다. 그림 4(a)는 초기조건에서 0.7초 경과후의 온도분포를 나타낸다. 분기관에는 난류관통의 영향으로 주배관의 고온의 유체가 유입되어 온도의 상승이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이 때의 유선분포(그림 4(b))에서는 난류관통 유동이 분기관 수평부위까지 미치고 있음을 알 수 있다. 그림 4(c)는 초기조건에서 1.5초 경과후의 결과로써 분기배관 수평부위에 난류관통 유동이 영향을 미치는 부위와 유체의 온도차에 기인한 대류유동이 영향을 미치는 부위가 뚜렷이 나타나고 있다. 이것은 주배관의 고온의 유체가 난류관통으로 분기배관에 유입되어 분기관 내부 유체의 온도 상승이 이루어지며 그 영역 또한 시간의 경과와 더불어 하류로 확대되어 가나, 분기관의 수평부위에서는 유체의 온도차에 의한 밀도 영향이 난류관통 유동보다 강하여 고온의 유체는 배관 상부로 향하는 대류유동 영역이 나타나는 것이다. 시간의 경과에 따라 난류관통 및 대류의 영향으로 분기관의 온도는 점차 상승하여(예 그림 4(d) t=4초 후) 9초 후(그림 4(e))에는 평균화되는 것을 알 수 있다.

그림 5에는 초기조건으로 주배관 및 분기관 전체에 고온(573° K)의 물이 채워진 상태에서 분기관 후단 격리밸브로부터 누설유속 0.025 m/s(누설유량 약 1.5gpm에 해당)로 누설될 때의 온도분포를 나타낸다. 이 경우, 분기관 수평부위에는 후단 격리밸브에서의 저온수의 누설로 인하여 고온의 물은 배관 상부에 저온의 물은 배관 하부에 존재하는 열성층 현상이 나타나고 있다. 또한 분기관 수평부위에는 상기에서 기술한 밸브에서의 누설유동이 영향을 미치는 대류영역과 주배관 측의 난류관통 유동이 영향을 미치는 부위의 경계(그림에서 A로 표시한 부분, 향후 이 경계층 부위는

그림에서 A로 표시함)가 확연히 나타나고 있으며 이 부위에서는 배관 길이방향의 좁은 영역에 온도분포가 조밀하게 분포하고 있다.

그림 6, 7, 8에는 후단 격리밸브에서 누설유속 0.05 m/s, 0.10 m/s, 0.50 m/s(약 3.0gpm, 6.0gpm, 30.0gpm에 해당)로 누설될 때의 온도분포를 나타낸다. 누설유속의 증가에 따라 난류관통이 영향을 미치는 부위와 누설유동이 영향을 미치는 부위의 경계가 주배관 쪽으로 이동하고 있으며 분기관 수평부위의 열성층 영향은 완화되는 경향이 있다. 그러나 분기관 수직배관은 오히려 배관 반경방향으로 온도차가 확대되는 것이 특징이다.

이상의 결과로부터 분기관 후단 격리밸브에서 누설이 발생할 시 주배관 유동에 기인한 난류관통 유동과 후단 누설유동이 영향을 미치는 부위(대류영역부위)의 경계가 확연히 나타나며 이 부위에서는 좁은 영역에 온도분포가 조밀하게 분포하고 있다.

2.3 분기관 길이 변화에 따른 영향

분기관 길이 변화에 따른 상기의 난류관통 영향 부위와 대류영향 부위의 경계 위치 변화를 조사하기 위하여 분기관 길이를 변화시켜 내부 열유동 해석을 수행하였다. 초기조건은 밸브 후단에서의 누설이 없는 경우로써 저온(20°C)의 물이 배관 전체에 채워진 상태에서 주배관에서 온도 300°C(573° K)의 물이 유속 15m/s로 흐르는 경우 및 분기관 후단에서 누설 유속 0.05m/s로 누설되는 경우를 대상으로 하였다. 분기관 길이 변화는 그림 2에 나타낸 해석모델에서 분기관 수직부분이 20inch 긴 경우(그림 9)와 분기관 수직부분은 그림 2의 경우보다 10inch 짧고 수평부분은 10inch 긴 경우(그림 10)이다.

먼저 분기관 수직부분이 긴 경우를 보면(그림 9(a)(b)) 시간의 경과에 따라 주배관의 난류관통 유동 영향으로 분기관의 온도가 상승하며 수평배관 부위에서는 난류관통 영향 부위와 대류 영향 부위로 구분되는 경계가 나타난다. 이 경계의 주배관에서부터의 거리는 그림 4의 해석 결과보다 길어져 분기관 직경(d)의 약 10배(10d)에 해당된다. 이것은 고온의 유체가 저온의 유체내에 유입될 때 온도차 즉 밀도차에 의하여 유기 되는 상승유동과 난류관통 유동과의 상호작용에 의해서 수직배관에서 상승유동이 강화되기 때문이다.

분기관의 수직배관 길이를 짧게 하고 수평배관 길이를 길게 한 해석결과(그림 10(a)(b))에서는 상기의 온도 경계층의 주배관으로부터의 길이는 짧아지고 있다(분기관 직경의 약 5배(5d)).

또한 그림 9(c) 및 10(c)는 후단에서 누설이 있는 경우로써 상기에서 기술하였던 온도 경계층은 약간 주배관 쪽으로 이동하는 경향이 있으나 큰 차이는 나타나지 않고 있다.

한편, 그림에는 나타내지 않았지만 주배관의 유동 유속이 10m/s, 7m/s, 5m/s로 변화시켰을 때에는 주배관의 유속이 작아짐에 따라 상기에서 기술하였던 난류관통의 영향 부위는 작아지며 즉 온도 경계층은 주배관 쪽으로 이동하는 경향이 나타나고 있다.

2.4 외국 사고사례에 대한 고찰(열피로 균열 관점)

서두에서 기술한 바와 같이 열성층 현상에 의하여 배관에 결함이 발생한 사례로써는 Farley 2호기, Tihange 1호기 안전주입계통 배관 용접부 결함, 일본 Genkai 1호기 잔열제거계통 배관 용접부 결함 등이며 이는 계통에 설치된 격리밸브로부터 저온의 물이 고온의 주배관 측으로 누설이 발생하여 배관 내에는 저온의 물은 배관 하부에 고온의 물은 배관 상부에 존재하는 열성층 현상이 발생하며 두 유체의 경계(온도 경계층) 변동(Thermal Striping)에 의하여 결함이 발생하였다(High Cycle Thermal Fatigue)는 것이 일반적인 설명이다. 그러나 명확한 메카니즘에 대해서는 설명이 부족한 면이 있었다.

본 해석의 결과에 의하면 후단에 밸브로 격리된 분기관에서 주배관 쪽으로 누설이 발생할 때

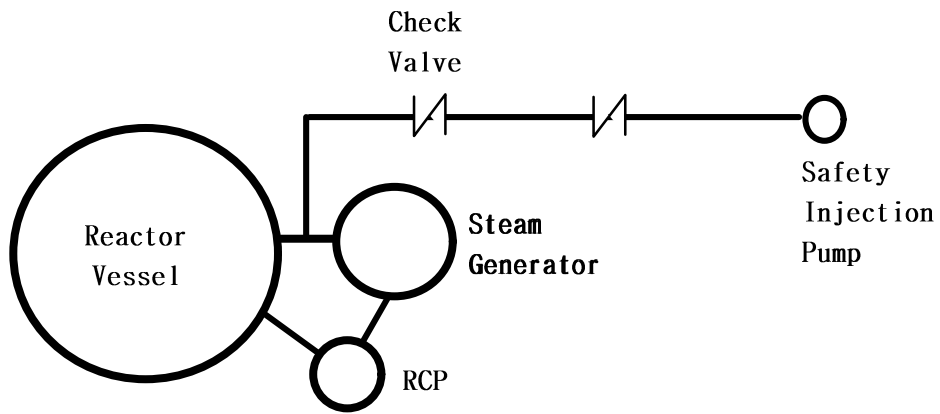
분기관 내부에서는 주배관에서의 난류관통 유동이 영향을 미치는 부위와 누설유동이 영향을 미치는 부위(대류영역)가 나타나며 두 영역이 만나는 경계에서 큰 온도차가 나타난다. 이 온도 경계층은 배관 방향으로 분포하고 있으며 누설유동의 변동 및 난류관통유동의 특성에 의해서 변동하게 되어 열피로를 유발하는 것으로 판단된다. 이것은 서두의 외국 사고사례에서 결함이 발생한 부위가 본 해석의 난류관통 유동과 누설유동 영향으로 분기관 하부에 나타나는 큰 온도 경계층 부위와 잘 일치하고 있다.

3. 결론

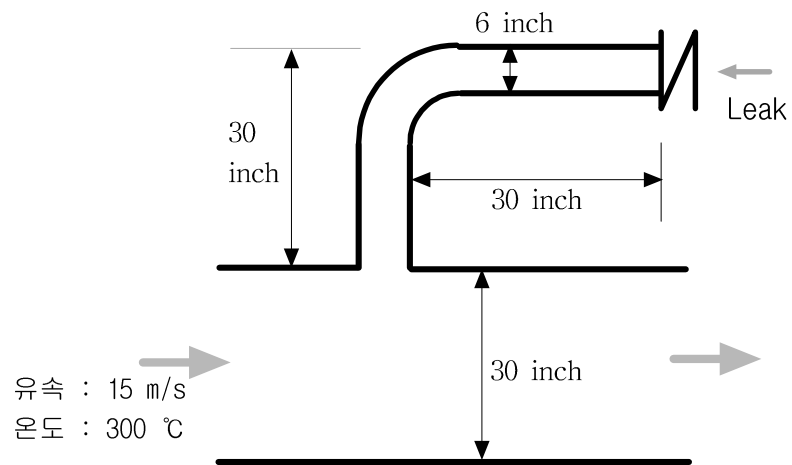
원자력발전소의 안전주입계통을 대상으로 후단 격리밸브에서 주배관인 1차측(RCS측)으로 누설 발생시 난류관통 유동을 고려한 온도분포를 해석적으로 구하였다. 해석결과 분기관 후단에서 주배관 쪽으로 누설이 발생할 때 분기관 내부에서는 주배관에서의 난류관통 유동이 영향을 미치는 부위와 누설유동이 영향을 미치는 부위(대류영역)가 나타나며 두 영역이 만나는 경계에서 큰 온도차가 나타난다. 이 온도 경계층은 배관 하부의 좁은 영역에 길이방향으로 존재하며 후단 격리밸브에서 누설 발생시 누설유동의 변동 및 난류관통유동의 특성에 의해서 변동하게되어 열피로 관점에서 가장 취약한 부위로 판단된다.

참 고 문 헌

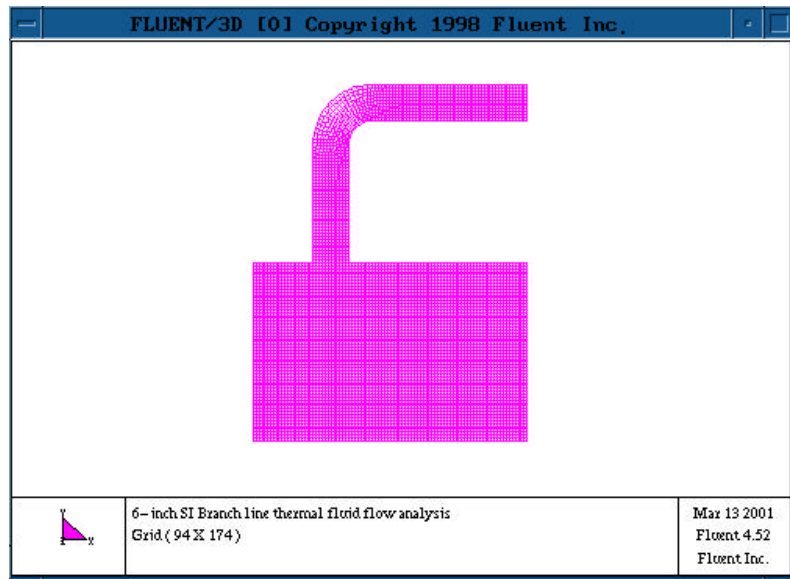
- [1]EPRI TR-103581, "Thermal Stratification, Cycling, and Striping(TASCS)", 1994.
- [2]NRC Bulletin 88-08, "Thermal stress in piping connected to reactor coolant system", 1988.
- [3]NRC Bulletin 88-11, "Pressurizer surge line thermal stratification", 1988.
- [4]한국전력공사 전력연구원, "가압경수로 배관 열성층 영향 분석 연구", 최종보고서, 1997. 11.
- [5]한국전력공사 전력연구원, "고리1호기 가압기 밀림관 열성층 영향 평가 및 주증기 주급수 배관 건전성 평가", 중간보고서, 2000. 6.
- [6]Fluent Ver. 4.5, Fluent Incorporated, Cavendish Court Lebanon, 1998.



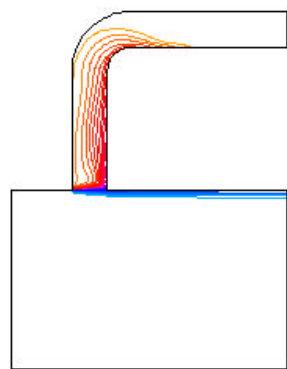
<그림 1> 안전주입계통 개략도



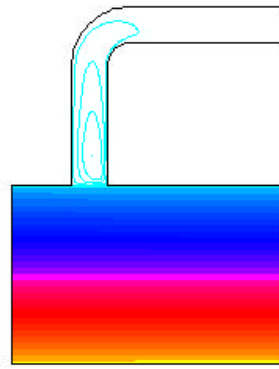
<그림 2> 열유동 해석 모델



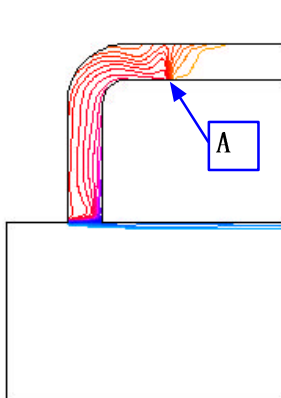
<그림 3> 열유동 해석 Mesh



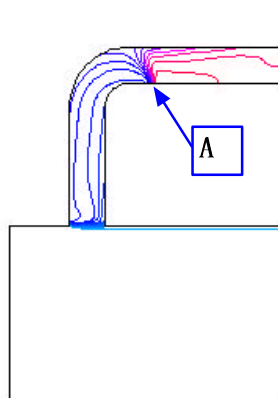
(a) t=0.7 sec



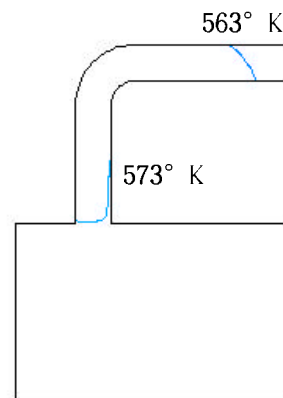
(b) 유선분포(t=0.7 sec)



(c) t=1.5 sec

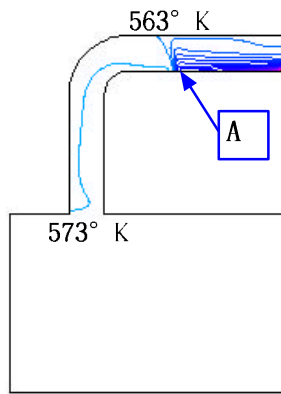


(d) t=4.0 sec

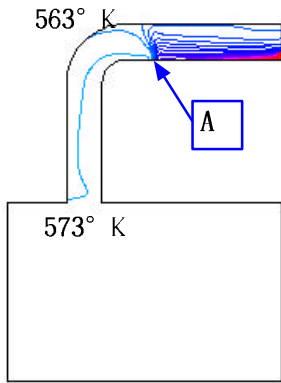


(e) t=9.0 sec

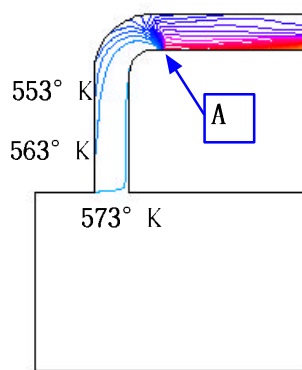
<그림 4> 분기관 온도분포 해석 결과(누설이 없는 경우)



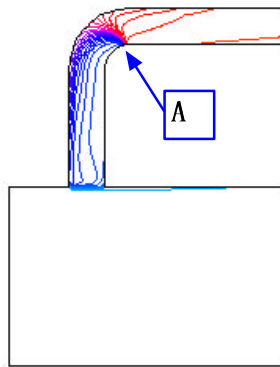
<그림 5> 분기관 온도분포 해석 결과(누설유속 0.025 m/s 경우)



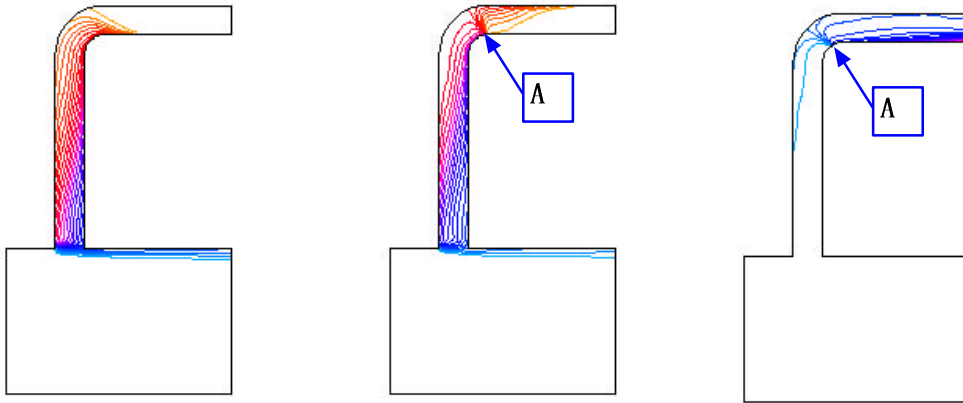
<그림 6> 분기관 온도분포 해석 결과(누설유속 0.05 m/s 경우)



<그림 7> 분기관 온도분포 해석 결과(누설유속 0.10 m/s 경우)

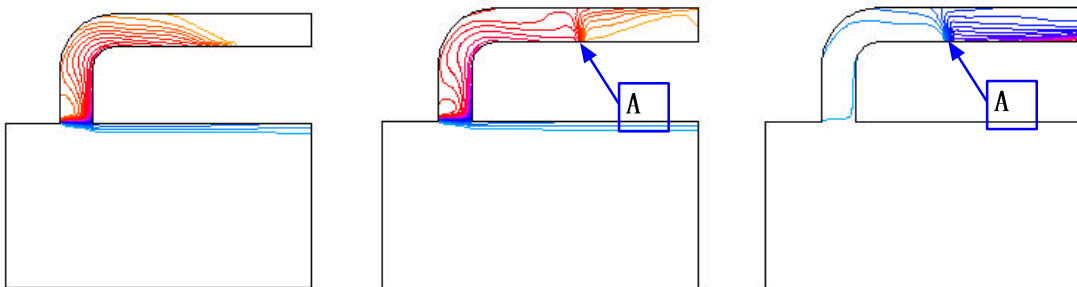


<그림 8> 분기관 온도분포 해석 결과(누설유속 0.50 m/s 경우)



(a) t=1.0 sec(누설 없는 경우) (b) t=1.5 sec(누설 없는 경우) (c) 누설유속 0.05 m/s

<그림 9> 분기관 길이 변화시 온도분포 해석 결과



(a) t=1.0 sec(누설 없는 경우) (b) t=1.5 sec(누설 없는 경우) (c) 누설유속 0.05 m/s

<그림 10> 분기관 길이 변화시 온도분포 해석 결과