

# 곡관의 곡률이 열유동장에 미치는 영향

## The effect of the curvature of pipe on the thermal-flow field

김성준\*      현성호\*\*      홍진기\*\*\*      민인홍\*\*\*\*  
Kim, Sung-Joon      Hyun, Sung-Ho      Hong, Jin-Gi      Min, In-Hong

### Abstract

It is a main object to find out the effect of curvature of pipe on the thermal flow field in copper pipe. The toroidal coordinate system is chosen for this project. 3-D numerical works are done by a commercial code, PHOENICS. The flow and temperature field are simulated and analysed on the view point of variation of pressure and temperature with Dean number. The results show that the strong recirculation phenomena and secondary flow are established and then a lot of pressure drop along main flow direction occurs at the curved portion of pipe and that the temperature variation has a reversed trend of pressure variation along the axis of pipe.

키워드: 파이프, 곡률, 3차원, 수치해석  
Keywords: Pipe, Curvature, 3-D, Numerical analysis

### 1. 서론

우리나라의 경우 국내 경제발전과 더불어 생활수준이 향상되면서 삶의 질과 직접 관련된 쾌적한 난방과 깨끗한 급탕시설에 대한 요구가 크게 늘어가고 있다. 그러나 우리나라는 현재 난방용으로 대부분 노통이나 수관식 열교환기를 이용하고 있다. 열교환기의 효율을 예측하고 성능을 향상 시키기 위해서는 열교환기의 주용부분인 곡관의 성능 해석이 우선되어야 한다.

Patankar와 Spalding[1]이 3차원 층류 포물선 유동에 대한 수치해석을 성공하자 다른 학자들은 곡관 유동 해석에까지 이 방법을 사용하였다. 현재에 많이 사용되고 있는 난류 모델은 2방정식 난류 모델로서

본 연구에서도 채택하고 있는 기본 난류 모델이다. Rowe, M.[2]는 직관 부분 출구에서 관 중심의 유체 압력등을 측정함으로써 곡관 유동을 연구하였다. 관 안의 2차 유동은 완전히 발달된 직관안 유동이 곡관 부분을 지나면서 유체의 원심력과 유동 단면에 형성되는 압력 편차에 의해 만들어지며 곡관의 시작점으로부터 증가하기 시작하여 30° 부근에서 2차 유동의 크기가 최대가 되고 다시 90° 까지는 일정한 비율로 감소하게 된다. 곡관의 유동에 수직해서 생기는 압력 구배가 있을 때 만들어지는 와류는 앞으로의 2차 유동 형태를 예상하는데 유용하게 쓰일 수 있으므로 긴 곡관같은 경우에는 불규칙적으로 증가하는 2차 유동을 제어하기 위해서는 유동을 완전 발달 유동으로 만들거나 압력 구배의 형태를 연구하여야 한다고 하였다.

Spalding, D. B.등[3]은 180° 곡관과 나선형 곡관의 난류 유동을 최근에도 많이 사용되고 있는 2방정식(k-ε equation) 모델을 사용하여 곡관 유동을 연구하

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사  
\*\* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 석사  
\*\*\* (주)삼호보일러, 부장  
\*\*\*\* 강원대학교 대학원 기계공학과, 박사과정 수료

였다. 최근에도 많이 사용되고 있는 수치해석법을 체계적으로 정립하여 사용하였으며 실험치와 수치해석 결과를 비교하여 좀 더 발전된 난류 모델을 제시함으로써 수치해석의 정확성을 높이는 연구를 하였다.

Ito. H.[4]는 관의 비압축성 유동에 관한 최근의 연구 결과를 체계적으로 정리하였고 현재까지의 곡관에 대한 연구를 집대성하여 곡관 연구를 하는 연구자들에게 많은 도움을 주고 있다.

Rhodes. N.등[5]은 로켓 엔진의 설계를 위해 곡관의 유동을 유체 해석 범용 코드인 PHOENICS를 사용하여 2차원 해석을 하였다. 전체 압력 손실과 정압력 변화뿐만 아니라 유동 분기점을 잘 해석하였고 곡관의 안과 바깥쪽벽의 정압력 계수  $C_p$ 를 연구하였다. 곡관의 유동 해석에 있어서 적절한 계산 격자와 난류 모델의 설정이 중요하다는 보고를 하였다.

Nieuwstadt. F. T. M.등[6]은 Large-Eddy Simulation(LES)을 사용하여 곡관안 유동이 완전 발달 난류 유동일 때 곡률 반경이 평균 유동 속도와 난류 상태에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 난류 Reynolds 응력은 곡관에서는 큰 지역에 걸쳐 나타나지만 직관에서는 아주 미세한 지역을 갖는다는 연구를 하였다. Murakami. M.등[7]은 실험을 통하여 곡관은 유동에 2가지의 상반되는 효과를 주는데 한 가지는 곡관 벽에서 발생하는 전단 응력에 의하여 유동이 불안정한 상태를 만든다는 것이고 다른 한가지는 원심력에 의해 유동을 안정된 상태로 만든다는 것이다. 곡관은 일반적으로 난류 경계층의 발달을 억누르고 회전 각속도의 증가와 함께 평균 축속도를 층류 상태의 각속도로 만들며 mixing length의 변화는 Richardson수로 측정할 수 있다는 연구를 하였다.

So. R. M. C.등[8]은 곡관에서의 완전 발달 난류 유동의 특성을 알기 위해 실험을 수행하여 곡관의 곡률 반경의 증가는 벽층에서 아주 큰 전단 응력을 발생시키고 관 안 유동을 매우 불안정한 상태로 만든다는 것을 발견하였고 난류 응력은 관 중심에서 크게 증가하여 관 전체에 걸쳐 일정하게 분포한다고 하였다.

Anwer. M.등[9]은 곡관 유동의 2차 셀에서의 선회류와 곡률 반경의 영향을 연구하였다. 관 주위에 발달된 2차 경계층이 난류이기 때문에 2차 유동은 유동 방향의 압력차를 극복할 수 있고 안쪽 벽주위에서 발생한 박리점은 나타나지 않으며 곡관 유동의 2차 유동은 원심력과 압력의 불균형 그리고 난류 응력과 이

것들의 차에 의해 유도되어진다고 하였다. Lai. Y. G. 등[10]은 곡관의 회복성을 연구하기 위하여 Hot-Wire 기술을 사용하여 곡관 유동을 연구하였다. 2차 유동은 곡률반경에 의해 생성되고 압력장은 2차 유동을 제어한다고 하였다.

Berger. S. A.등[11]은 곡관에서의 유동에 관하여 알려진 것을 차원적으로 재검토하여 정리하였다. 2차 유동은 벽경계층에서 상대적으로 정체된 유체를 유동 시키는데 이것은 주유동의 원심 압력차가 주된 원인이라 하였고 전체적인 곡관 유동의 연구를 체계적으로 정립하였다. Yao. L. S.등[12]은 원심력과 부력의 영향을 받는 곡관의 완전 발달 유동 상태에서의 열전달을 연구하였다. 관은 일정한 상수의 온도로 계속 가열 된다고 가정하고 수평관과 수직관의 두가지 경우의 해석을 통해 Dean수와 Reynolds수, 그리고 Rayleigh수의 생성항에서 일정한 비례식을 갖는다고 하였다. Prusa. J.등[13]은 완전 발달 유동을 가지는 수평 가열 곡관을 수치적으로 연구하였다. 일정한 온도로 가열된 관에서 유동 현상과 열전달의 정확한 해석은 2차 유동과 부력의 관계를 적절히 밝힘으로서 가능하다고 하였고 관 안의 유동 현상은 원심력 조절, 부력과 원심력의 적절한 조화 그리고 부력을 조절하는 3가지 기본적인 방법으로 해석이 가능하다고 하였다.

본 연구는 열교환기에서 사용되는 곡관안 유체 유동과 열전달 현상을 해석하여 열교환기용 곡관의 곡률 반경이 열유동장에 미치는 영향을 분석하는데 그 연구 목적이 있다.

## 2. 지배 방정식

원형 곡관의 곡률 반경이  $R$ 이고 반지름이  $a$ 라 하자. 이러한 관은 Fig. 1에서처럼 토로이달(toroidal) 좌표계[11]로서 쉽게 나타낼 수 있다.  $\gamma$ 는 관의 단면 중심에서 부터의 거리,  $\theta$ 는 관 중심과 반지름 벡터와의 각, 그리고  $\phi$ 는 관의 입구에서부터 측정 단면과의 각을 나타낸다. 그리고  $\gamma$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  방향의 유동은 각각  $U$ ,  $V$ ,  $W$ 로 나타낸다.

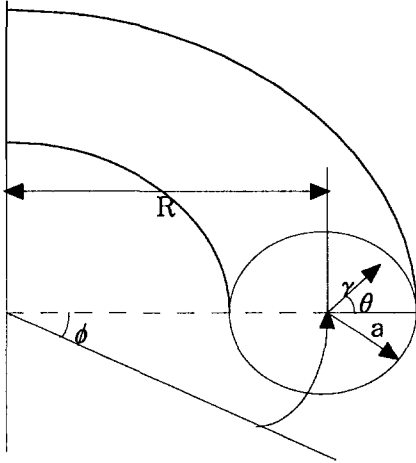


Fig. 1 Toroidal coordinate system

연속방정식

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial(\gamma U)}{\partial \gamma} + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial V}{\partial \theta} + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial W}{\partial \phi} + \frac{V \sin \phi - U \cos \phi}{R - \gamma \cos \phi} = 0$$

운동량방정식

$\gamma$  방향의 운동량 방정식은,

$$\rho \left( U \frac{\partial U}{\partial \gamma} + V \frac{\partial V}{\gamma \partial \theta} - \frac{V^2}{\gamma} + \frac{\partial U}{R \partial \phi} - \frac{W^2}{R} \cos \theta \right) = -\frac{\partial p}{\partial \gamma} + \frac{\partial \tau_{\gamma\gamma}}{\partial \gamma} + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \tau_{\gamma\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{\gamma} + \frac{1}{\gamma} \tau_{\gamma\gamma} - \frac{\tau_{\phi\phi}}{R} \cos \theta + \frac{\tau_{\gamma\gamma}}{R} \cos \theta - \frac{\tau_{\gamma\theta}}{R} \sin \theta,$$

$\theta$  방향의 운동량 방정식은,

$$\rho \left( U \frac{\partial V}{\partial \gamma} + V \frac{\partial V}{\gamma \partial \theta} + \frac{UV}{\gamma} + W \frac{\partial V}{R \partial \phi} + \frac{W^2}{R} \sin \theta \right) = -\frac{\partial p}{\gamma \partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\gamma\theta}}{\partial \gamma} + \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\gamma \partial \theta} + \frac{2}{\gamma} \tau_{\gamma\theta} + \frac{\gamma}{R^2} \tau_{\theta\phi} \sin \theta + \frac{\tau_{\gamma\theta}}{R} \cos \theta - \frac{\tau_{\theta\theta}}{R} \sin \theta$$

그리고  $\phi$  방향의 운동량 방정식은,

$$\rho \left( U \frac{\partial W}{\partial \gamma} + V \frac{\partial W}{\gamma \partial \theta} + W \frac{\partial W}{R \partial \phi} + \frac{W}{R} (U \cos \theta - V \sin \theta) \right) = -\frac{\partial p}{R \partial \phi} + \frac{\partial \tau_{\phi\gamma}}{\partial \gamma} + \frac{\tau_{\phi\gamma}}{R} \cos \theta + \frac{\partial \tau_{\phi\theta}}{\gamma \partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\phi}}{R} \sin \theta + \frac{\tau_{\phi\gamma}}{\gamma}.$$

여기서 U, V, W는 속도를 나타내는 것이고 아래에 나와있는  $\gamma, \theta$ 와  $\phi$ 는 Fig. 1의 좌표방향을 참조한다.  $\rho$ 는 유체의 밀도이고 P는 압력이다.  $\tau$ 는 난류 응력을 나타내고 속도항과 점성항을 나타내는 곳

에 쓰일 것이다.

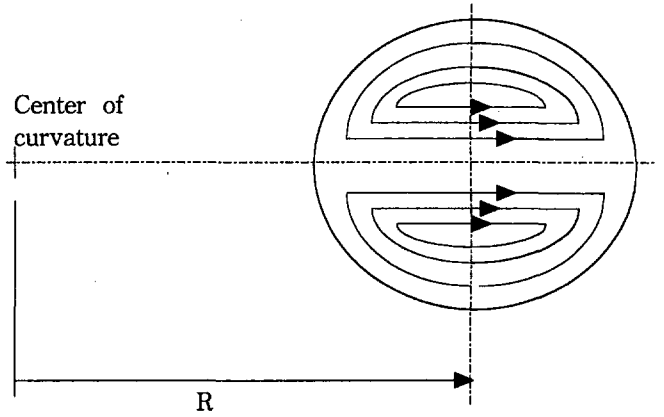


Fig. 2 Secondary flow pattern.

에너지방정식

$$U \frac{\partial T}{\partial \gamma} + \frac{V}{\gamma} \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{W}{R - \gamma \cos \phi} \frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{k}{\gamma(R - \gamma \cos \phi)} \left\{ \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[ \gamma(R - \gamma \cos \phi) \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right] + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{(R - \gamma \cos \phi)}{\gamma} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right] \right\}$$

난류 모델

본 연구에서 쓰인 수치해석 코드인 PHOENICS<sup>[14]</sup>에서는 기본적인 난류모델로 Chen-Kim 2방정식 난류 모델을 채택하고 있다.

$$\rho \left( U \frac{\partial k}{\partial \gamma} + \frac{V}{\gamma} \frac{\partial k}{\partial \theta} + \frac{W}{R} \frac{\partial k}{\partial \phi} \right) = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \gamma \frac{\partial k}{\partial \theta} \right) + \frac{\mu_t}{R \sigma_k} \left( \frac{\partial k}{\partial \gamma} \cos \theta - \frac{\partial k}{\gamma \partial \theta} \sin \theta \right) + \frac{\partial}{\gamma^2 \partial \theta} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial \theta} \right) + G - \rho \epsilon, \rho \left( U \frac{\partial \epsilon}{\partial \gamma} + \frac{V}{\gamma} \frac{\partial \epsilon}{\partial \theta} + W \frac{\partial \epsilon}{R \partial \phi} \right) = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \gamma \frac{\partial \epsilon}{\partial \theta} \right) + \frac{\mu_t}{R \sigma_k} \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial \gamma} \cos \theta - \frac{\partial \epsilon}{\gamma \partial \theta} \sin \theta \right) + \frac{\partial}{\gamma^2 \partial \theta} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial \theta} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}.$$

이 모델은 다섯 개의 실험 상수를 가지고 있는데 그 값이 Table. 1에 소개되어 있다.

Table. 1 Empirical constants for turbulence model

$C_\mu$	0.09
$C_1$	1.44
$C_2$	1.92
$\sigma_k$	1.00
$\sigma_\epsilon$	1.314

### 3. 열유동 해석

#### 3.1 곡관 해석 조건

보일러의 용량이 1,000,000Kcal/hr일 때 열교환기에 쓰이는 관은 일반적으로 안지름이  $\phi 20$ 인 동관이며 관의 개수는 100개정도이다. 이 경우의 수치해석 조건을 Table. 2에 나타내었다.

Table. 2 Conditions of numerical analysis

Material	No. of pipe	Inside diameter of pipe	Inlet velocity	Inlet temperature	Reynolds number
copper	100	$\phi 20$	0.442m/s	60℃	18,649

#### 3. 2 수치해석결과 및 토론

곡관의 큰 특징중 하나인 2차 유동은 곡률에 의한 원심력에 의해 영향을 받는다. 원심력이 유동의 주요 방향으로 작용하여 축 속도의 형태가 비틀러지고 속도가 바깥쪽으로 나가려고 하므로 직관의 유동이 2차원 유동인 반면 곡관의 유동은 3차원 유동이다. 이러한 2차 유동의 크기와 형태는 아래와 같이 정의되어 있는 Dean수에 의해 결정되어 진다.

$$De = \left(\frac{a}{R}\right)^{0.5} \cdot Re_D$$

여기서 a는 관의 반경, R은 곡률 반경, 그리고  $Re_D$ 는 관의 지름에 대한 레이놀즈수이다.

#### 3.2.1 곡률 반경과 속도 벡터

관 전체의 안쪽 벽, 바깥쪽 벽에서의 최저와 최대 속도 그리고 중심에서의 속도 변화를 Fig. 3, 4, 5, 6과 7에 나타내었다. x축은 유동 방향 거리이고 y축은 속도를 나타낸다. x축의 유동 방향 거리에서 0° 전까지가 입구에서 곡관 입구부, 0° ~ 180° 까지가 곡관부 그리고 180° 에서 20까지가 곡관부에서 출구까지를 나타내는 것이다. 여기서 S는 축방향 거리를 나타내고 D는 관의 지름, W(m/s)는 관안 유체의 속도를 나타내는 것이다. Fig. 3에서는 R/a = 1.5일 때의 속도 분포를 보여 주고 있다. 안쪽 벽에서의 최저 속도 분포는 곡관부의 입구에서 속도가 급격히 증가하여 관 전체에서 제일 높은 속도를 보이고 있다. 또한 곡관부가 끝나기 전에 재순환 지역이 생기는 최저

속도를 보이고 있어 안쪽 벽의 최저 속도 분포는 매우 변화가 심한 것을 볼 수 있다. 하지만 바깥쪽 벽에서의 최대 속도 분포는 안쪽 벽에서의 최저 속도 분포와 상반된 결과를 보이고 있다. 곡관부가 시작되는 곳에서 속도가 급격히 떨어지고 곡관부가 끝나기 전에 급격히 상승하여 출구 쪽에서는 안쪽 벽의 최저 속도 분포 형태와 거의 비슷한 속도 분포 형태를 보이고 있다. 관의 중심에서의 속도 분포는 급격한 변화를 보이지는 않지만 역시 곡관부가 끝나기 전에 최고 속도를 나타내다가 곡관부가 끝나는 곳에서 최저 속도를 나타내고 있다. Fig. 4는 R/a = 2일 때의 속도 분포이다. Fig. 3과 전체적인 형태에서 큰 차이는 보이지 않는다. 안쪽 벽에서의 속도 분포에서 R/a = 1.5일 때는 재순환 지역이 138° 에서 생성하여 S/D가 0.8일 때 소멸하고 R/a = 2에서는 150° 에서 생성되어 소멸하는 것을 볼 수 있다. 최대 속도와 최저 속도의 차이가 R/a = 1.5일 때와 비교하여 좀 작아졌다는 것을 볼 수 있다. Fig. 5, 6, 7은 R/a = 3, 4, 5일 때의 속도 분포이다. 앞에서의 속도 분포와 비교해서 전체적인 형태는 크게 변하지 않았다. 하지만 안쪽 벽에서 재순환 지역이 더 이상 생기지 않는다는 것을 볼 수 있다. 또한 R/a = 1.5, 2에서는 최저 속도가 곡관부가 끝나기 전에 생기지만 여기서는 곡관부가 끝나는 점에서 생기고 있다. 그리고 전체적인 속도 차가 점점 작아지는 것을 보여주고 있다.

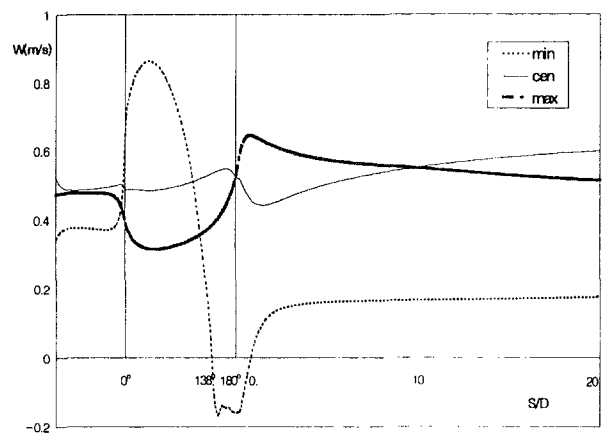


Fig. 3 Variation of velocity for R/a = 1.5

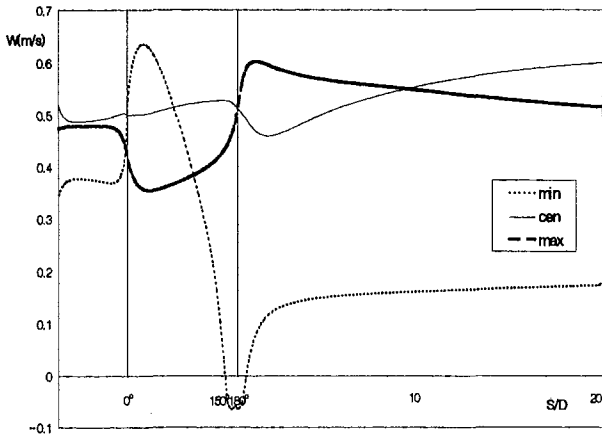


Fig. 4 Variation of velocity for R/a = 2

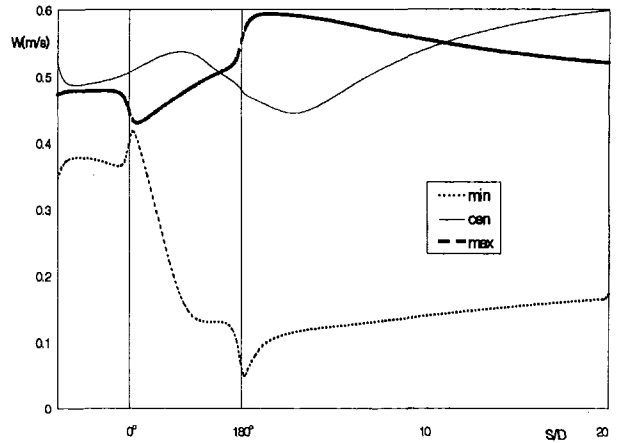


Fig. 7 Variation of velocity for R/a = 5

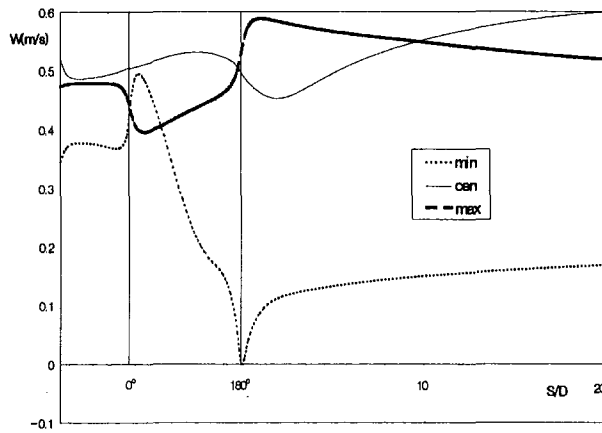


Fig. 5 Variation of velocity for R/a = 3

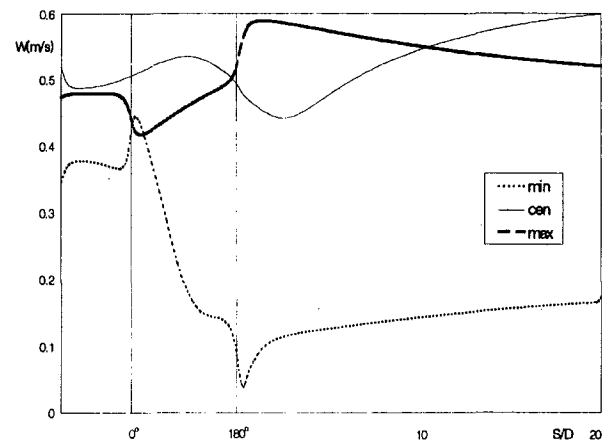


Fig. 6 Variation of velocity for R/a = 4

### 3.2.2 곡관 반경과 압력 분포

관 전체의 안쪽 벽, 바깥쪽 벽에서의 최저와 최대 속도점 그리고 중심에서의 압력 계수( $C_p$ )의 변화를 Fig. 8, 9, 10, 11 그리고 12에 나타내었다. x축은 유동 방향 거리이고 y축은 아래<sup>[7]</sup>와 같은  $C_p$ 를 나타낸다.

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho W_0^2}$$

여기서  $C_p$ ,  $P_0$ ,  $\rho$ , 그리고  $W_0$  는 각각 압력 계수, 출구 압력(대기압), 유체의 밀도, 유체의 관 입구 평균 속도를 의미한다.

x축의 유동 방향 거리에서  $0^\circ$  전까지가 입구에서 곡관 입구부,  $0^\circ \sim 180^\circ$  까지 곡관부 그리고  $180^\circ$  에서 20까지가 곡관부에서 출구까지를 나타내는 것이다. 여기서 S는 축방향 거리를 나타내고 D는 관의 지름을 나타내는 것이다. Fig. 8은  $R/a = 1.5$ 일 때의  $C_p$  분포이다. 입구 쪽에서부터 출구 쪽으로  $C_p$ 가 떨어지는 분포를 보이고 있다. 안쪽 벽과 바깥쪽 벽에서는 곡관부에서 제일 변화가 심한 것으로 나타나고 있다. 안쪽 벽에서는 곡관부 입구에서부터  $C_p$ 가 급격히 떨어져 곡관부  $60^\circ$  에서 최저점을 나타내고 대기압보다 낮은 진공압력 상태이다. 또한 바깥쪽벽에서도 곡관부 입구쪽에서 상승하여 약간 일정한 분포를 보이다가 다시 곡관부 출구쪽에서 하강하여 안쪽벽의  $C_p$ 와 일치해 보이고 있다. 여기서는 곡관부  $C_p$ 값의 변화폭이 5이상이므로  $R/a = 1.5$ 에서는 압력 변화가 매우 심하다는 것을 알 수 있다. Fig. 9는  $R/a = 2$ 일 때의  $C_p$ 분포이다. 전체적인  $C_p$ 분포 형태는 Fig. 4-6과 거의 일치하고 있다.  $C_p$ 의 최저값이  $60^\circ$  에서 생

기고 변화폭도  $R/a = 1.5$  일 때 보다 작아졌다. 하지만  $R/a = 1.5$  일 때와 마찬가지로 대기압보다 낮은 진공압력 상태에 있다. Fig. 10, 11, 12에서의  $C_p$  분포 형태는 크게 차이를 보이고 있지 않다.  $C_p$ 의 최고값과 최저값의 변화폭이 입구와 출구의  $C_p$  값으로 결정되므로  $C_p$ 의 변화폭은  $R/a = 3, 4, 5$  일 때 모두 같다.

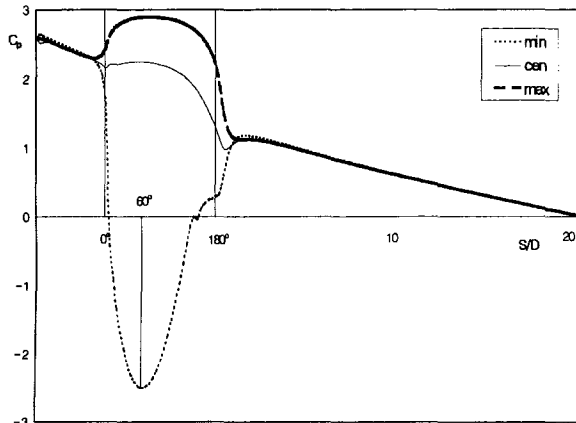


Fig. 8 Variation of pressure loss for  $R/a = 1.5$

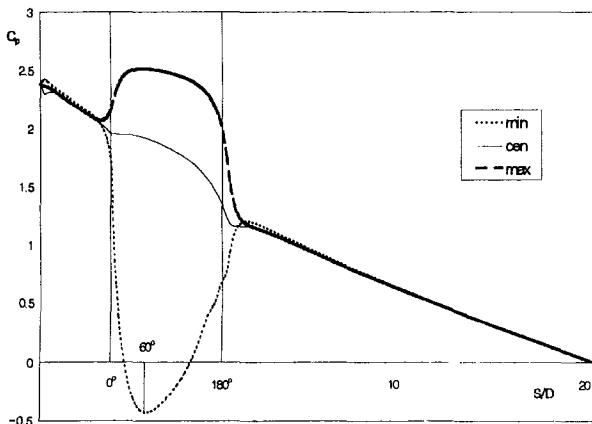


Fig. 9 Variation of pressure loss for  $R/a = 2$

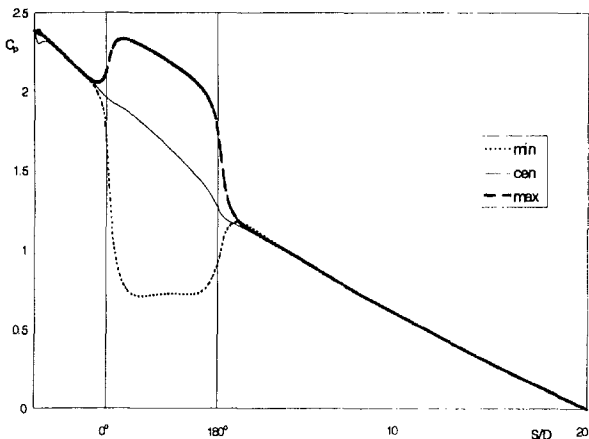


Fig. 10 Variation of pressure loss for  $R/a = 3$

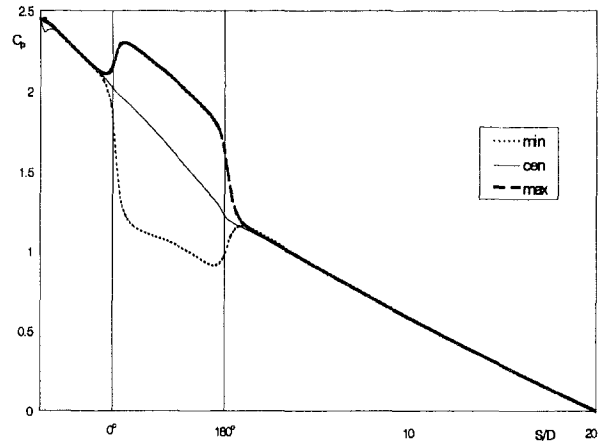


Fig. 11 Variation of pressure loss for  $R/a = 4$

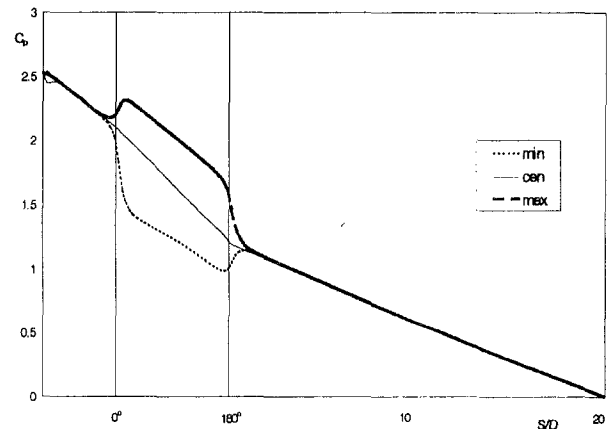


Fig. 12 Variation of pressure loss for  $R/a = 5$

### 3.2.3 곡관 반경과 온도 분포

관 전체의 안쪽 벽, 바깥쪽 벽, 그리고 중심에서의 온도 변화를 Fig. 13, 14, 15, 16 그리고 17에 나타내었다. x축은 유동 방향 거리이고 y축은 온도를 나타낸다. x축의 유동 방향 거리에서  $0^\circ$  전까지가 입구에서 곡관 입구부,  $0^\circ \sim 180^\circ$  까지가 곡관부 그리고  $180^\circ$  에서 20까지가 곡관부에서 출구까지를 나타내는 것이다. 여기서 S는 축방향 거리를 나타내고 D는 관의 지름,  $T_{em}(^\circ C)$ 는 관안 유체의 온도를 나타내는 것이다. Fig. 13은  $R/a = 1.5$  일 때의 온도 분포이다. 안쪽 벽에서의 온도가 가장 높게 측정 되고 있다. 재순환 지역이 생기는  $138^\circ$  에서 온도 변화가 심하게 나타난다. 중심에서의 온도 분포는 완만한 상승을 나타내고 있다. Fig. 14는  $R/a = 2$  일 때의 온도 분포이다. 안쪽 벽에서는  $R/a = 1.5$  일 때 보다 더 심한 변화를 보이고 있다. 재순환 지역은  $150^\circ$  에서부터 생

지만 온도 변화는  $162^\circ$  에서 온도가 제일 높아졌다가 다시 하강하는 형태를 보여준다. Fig. 15, 16, 17에서의 온도 변화 분포는 크게 차이를 보이고 있지 않다.  $R/a = 1.5$ , 2일 때는 급격한 온도 상승이 곡관부에서 생겼지만  $R/a = 3, 4, 5$ 에서는 곡관 출구부에서 아주 작은 온도 상승을 보이고 있다. 지금까지  $R/a = 1.5, 2, 3, 4, 5$ 일 때의 곡관에 대한 온도 상승 효과를 보면 다음과 같다. 모든  $R/a$ 에서 중심선의 온도 분포를 보면 비교적 완만한 온도 상승을 보여주고 있는 반면 벽쪽의 온도 분포는 그 변화가 매우 심함을 볼 수 있다. 곡관 입구에서 곡관의 임의의 부분까지는 바깥쪽 벽의 온도 분포가 안쪽 벽보다 높고 이 부분을 지나서는 온도 분포가 반대로 나타나게 되는데 적게는  $10^\circ\text{C}$ 에서 많게는  $20^\circ\text{C}$ 까지 차이를 보이고 있다. 이는 Fig. 3, 4, 5, 6 그리고 7의 속도 분포 곡선에서 볼 수 있듯이 속도가 느린 곳에서는 온도가 높고 반대로 속도가 높은 곳에서는 온도가 낮다는 것을 보여준다.

Fig. 8에서 보여 지는 것과 같이  $R/a = 1.5$ 에서 곡관부의 안쪽 벽과 바깥쪽 벽의 속도 차이가 가장 크게 나타나고 있고  $R/a$ 가 증가할수록 속도 차이가 줄어들어 온도 차이가 크게 나타나지 않는 것이다. 그리고 벽쪽 유체 온도의 상승이 하류 직관  $S/D = 5$ 를 지나면서 거의 일정한 분포를 보이고 있는데 이것은 관안 유체가 곡관부에 의해 받았던 영향이 이 부분을 지나면서 회복기를 거치기 때문이다. Fig. 13, 14, 15, 16 그리고 17를 비교해 보면 곡률 반경이 커지면서 곡관부의 입구에서 생기는 안쪽벽 부분의 온도와 바깥쪽 벽의 온도의 차이가 점차 줄어들고 있다.

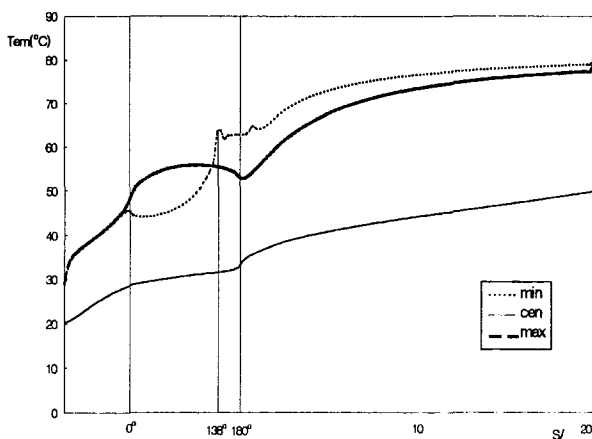


Fig. 13 Variation of temperature for  $R/a = 1.5$

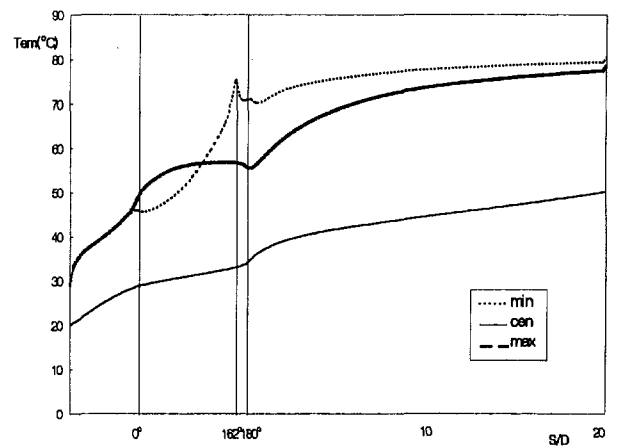


Fig. 14 Variation of temperature for  $R/a = 2$

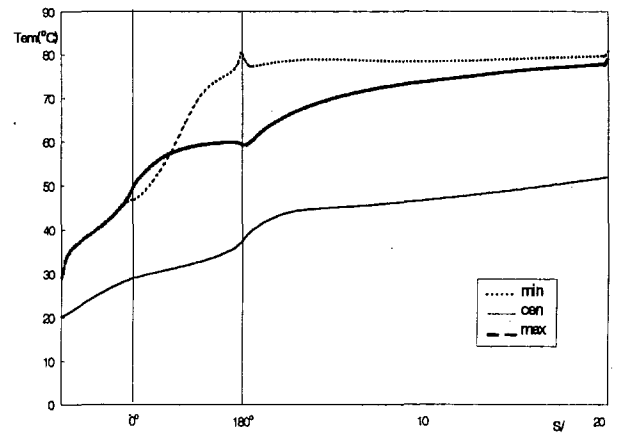


Fig. 15 Variation of temperature for  $R/a = 3$

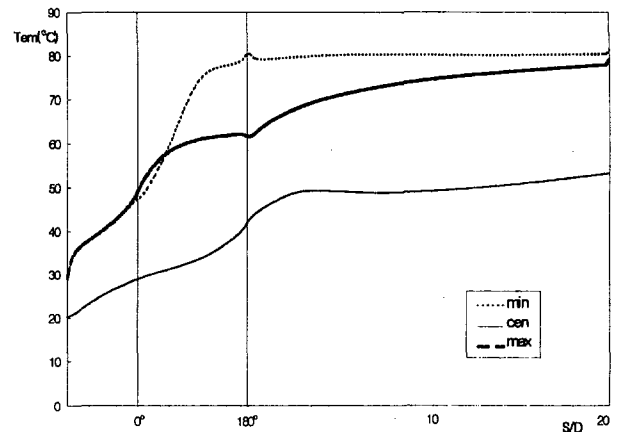


Fig. 16 Variation of temperature for  $R/a = 4$

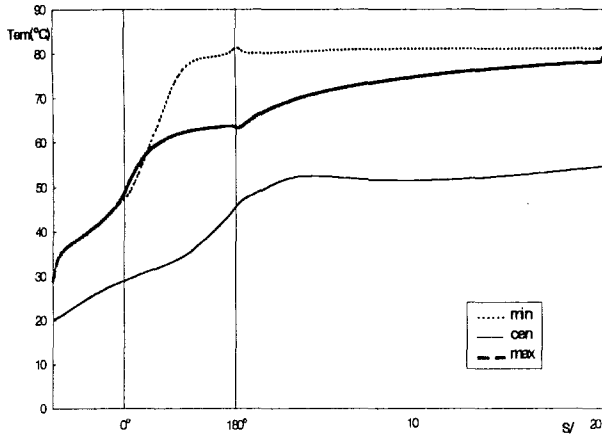


Fig. 17 Variation of temperature for R/a = 5

#### 4. 결론

보일러의 용량 1,000,000Kcal/hr을 기준으로 안지름이  $\phi 20$ 이고 두께가 1mm인 동관을 대상으로 응용코드인 PHOENICS로 열유동현상을 수치해석하였다.

곡관의 곡률 반경과 관의 반지름 비를 증가 시키면서 속도, 압력 및 온도 해석결과를 살펴본 결과 곡률 반경이 작아질수록 곡관부에서 발생하는 2차 유동과 재순환 유동 지역이 크게 나타났다. 압력해석에서는 곡률 반경이 작아짐에 따라 곡관부의 하단부에서 저압부분이 생겨 관 설계에서 치명적인 손상을 줄 수 있는 캐비테이션이 발생할 가능성이 있었다.

#### 참고 문헌

[1] Patankar, S. V, Spalding, D. B: A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15, pp. 1787-1806, 1972

[2] M. Rowe : Measurements and computations of flow in pipe bends. *J. Fluid Mech*, vol. 43, part 4, pp. 771-783, 1970

[3] S. V. Patankar, V. S. Pratap and D. B. Spalding. : Prediction of turbulent flow in curved pipes. *J. Fluid Mech*. vol. 67. pp. 583-595, 1975

[4] Hidesato ITO : Flow in Curved Pipes. *J. JSME*, Vol. 30, No. 262, pp. 543-552, 1987

[5] W. A. Mahaffey, T. Mukerjee, N. Rhodes and N. C. Costes : Phoenics Verification Exercise Simulating the Flow in the Rockwell Axisymmetric 180 Turn around Duct (TAD) Flow Rig. *J. PHOENICS*, Vol. 2,

pp. 343-367, 1989

[6] B. J. Boersma and F. T. M. Nieuwstadt : Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow in a Curved Pipe. *J. Fluid Engineering*, Vol. 118, pp. 248-254, 1996

[7] K. Kikuyama, M. Murakami and K. Nishibori : development of Three-Dimensional Turbulent Boundary Layer in an Axially Rotating Pipe. *J. Fluid Engineering*, Vol. 105, pp. 154-160, 1983

[8] M. Anwre and R. M. C. So : Rotation effects on a fully-developed turbulent pipe flow. *J. Experiments in Fluids*, Vol.8, pp. 33-40, 1989

[9] M. Anwer and R. M. C. So: Swirling turbulent flow through a curved pipe. *J. Experiments in Fluids*, Vol.14, pp. 85-96, 1989

[10] M. Anwer, R. M. C. So and Y. G. Lai : Perturbation by and recovery from bend curvature of a fully developed turbulent pipe flow. *Physics of Fluids A*, Vol. 1, pp. 1387-1397, 1989

[11] S. A. Berger, L. Talbot and L. S. Yao : Flow in Curved Pipes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 15, pp. 461-512, 1983

[12] L. S. Yao and S. A. Berger : Flow in Heated Curved Pipes. *J. Fluid Mech*, Vol. 88, part2, pp. 339-354, 1978

[13] J. Prusa and L. S. Yao : Numerical Solution for Fully Developed Flow in Heated Curved Tubes, Vol. 123, pp. 503-522, 1982

[14] Spalding, D. B : PHOENICS Manual. Cham. vol. 1, 2, 3, 4, 1996