

# 열교환기내 리브드 튜브의 유동 특성에 관한 수치해석적 연구

전정도\*, 전언찬\*\*, 정희균\*\*\*, 이치우#

## A Study on Numerical Analysis for Flow Characteristics in Ribbed Tube

Jeong-Do Jeon\*, Eon-Chan Jeon\*\*, Hui-Gyun Jeung\*\*\*, Chi-Woo Lee#

(Received 21 July 2011; received in revised form 8 August 2011; accepted 10 August 2011)

### ABSTRACT

A ribbed tube consumes more power to transport the fluid by comparing with flat one. After the tangential velocity component occurs, its contact area with the ribbed tube becomes large and it enables the effective energy transportation. The flow characteristics vary according to the geometry of tube rib. This study aims to investigate the flow characteristics of fluids working at Reynolds numbers of 20,000, 40,000, 60,000 and 80,000 with the air at 15°C in the ribbed test tube high 1mm and wide 8.48mm. As the flow characteristics are included with the states of fully developed hydrodynamical region, axial velocity vector distribution and non-dimensional velocity distribution, they are shown with the physical validity.

**Key Words** : Ribbed Tube(리브드 튜브), Fully Developed Hydrodynamically Region(수력학적 완전발달 영역), Standard K-εmodel(표준 k-ε모델)

## 1. 서 론

### 1.1 서론

거대한 발전설비의 보일러에서 열을 흡수하는 수관이나 아주 작은 마이크로 칩의 냉각을 위해 장착되는 냉각장치에 이르기까지 에너지의 효과적인 수송은 우리에게 매우 중요하다. 그 중에서 튜브의 내부에 리브가 있어서 내부를 지나가는 유체와 튜브 표면과의 접촉면적을 크게 해서 열전달 효율을 높이는 리브드 튜브

(ribbed tube)는 많은 실험과 수치해석의 대상이 되었다.

실험에 의한 연구는 내부에 피토관이나 열선풍속계를 이용해서 유체의 속도를 측정하거나, 온도는 열전대를 이용해서 측정하는 것이 대부분이었다. 특정 위치에 있는 점들에 대한 정보만 제공해 주기 때문에 검사면 또는 검사체적의 모든 영역에 대한 정보를 알려주지는 못했고 실험 시간도 많이 걸렸다.

수치해석에 의한 연구는 리브드 튜브 내부의 형상 때문에 많은 메쉬(mesh)들이 요구되었기에 일정한 주기를 가진 튜브의 특성을 이용해서 periodic boundary condition 조건을 이용해서 해석한 것이 대부분이었다. 적은 수의 메쉬를 이용해서 계산시간도 줄여주는 장점이 있으나 튜브 내부에 어떤 구조물이 설치될 경우 주기성을 확보하지 못해 이 방법을 쓸 수 없는 경우가 많았다.

\* 동아대학교 대학원 기계공학과

# 교신저자 : 경남과학기술대학교 자동차공학과

E-mail : leecw@gntech.ac.kr

\*\* 동아대학교 기계공학과

\*\*\* 성진지오택(주) 기술연구소

## 1.2 연구동향

내부에 핀이나 리브가 설치되어 있는 튜브는 유동의 측면이나 열전달의 측면에서 많은 관심의 대상이었다. Seo<sup>[1]</sup> 등은 내면가공 핀튜브가 평활관에 비해서 열전달은 10~30%, 물질전달은 10~20% 더 높은 효율을 나타내는 것을 실험으로 증명했다. 하지만 내부의 유동정보에 대한 자세한 고찰은 없었다. Kim<sup>[2]</sup> 등은 나선형 핀이 내부에 부착된 관의 형상 최적화에 관한 연구에서 상용 CFD 코드와 유전 알고리즘을 적용해서 핀의 높이와 폭 그리고 형상에 따라서 열 및 유동장에 대해 폭넓게 연구하였다. Park<sup>[3]</sup> 등은 나선 와이어(helical wire)가 설치되어 있는 튜브의 선회유동을 CFD 코드를 이용해서 연구했다. 피치가 10, 20, 30 그리고 40mm인 나선 와이어가 설치된 튜브에 물과 공기를 유동시켜 마찰 계수를 측정했다. Je<sup>[4]</sup>는 공기를 작업유체로 하는 리브드 튜브에서 축방향속도 분포와 마찰계수 및 열전달 특성에 관해 실험을 통한 연구를 했다. 하지만 피토판을 이용한 점 측정 방식이어서 많은 영역에서의 정보를 획득하지 못했고, 센서를 투입하기 위해 만든 작은 구멍들이 영향은 작지만 유동장을 교란시켰을 것은 분명하다.

이 외에도 많은 연구자들이 실험과 수치해석의 방법으로 연구를 했지만 튜브 내부의 유동장에 대한 깊은 고찰은 부족했다.

## 1.3 연구목적

본 연구에서는 15℃의 공기를 작업유체로 선정해서 상용 CFD 코드를 이용해 튜브의 내부 유동장을 연구할 것이다. 난류 영역의 Re 수 20,000, 40,000, 60,000 그리고 80,000 모두 네 가지를 선정해서 각각의 속도에 따른 유동 특성도 비교할 것이다.

# 2. 수치해석

## 2.1 모델링

Fig. 1은 리브드 튜브의 내부 공간을 모델링 한 것이다. 본 연구에서 사용한 모델은 길이 1m에 내부의 지름이 50mm의 튜브이다. 리브는 높이 1mm, 폭

8.48mm 그리고 리브 앵글이 30°로 12개가 설치되어 있다. 그림에서처럼 12개의 리브가 설치되어 있기 때문에 골과 산 한 쌍은 30°를 차지한다.

튜브의 지름은 리브에 의한 골과 산의 평균값을 사용했으며 평균지름은 49mm이다.

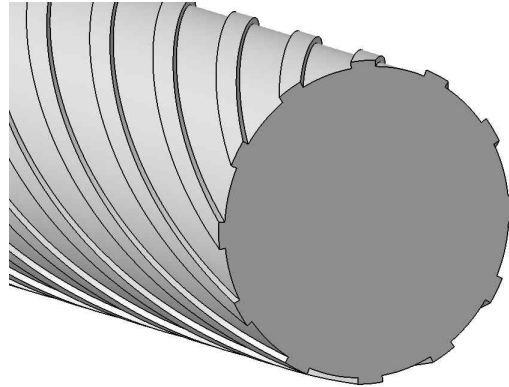


Fig. 1 Geometry of a ribbed tube

## 2.2 메쉬

Fig. 2의 (a)와 (b)는 테스트 튜브의 입구에 사각형의 메쉬가 들어가 있는 것을 보여주고 있다. 리브에 의해 생긴 요철이 잘 나타나 있으며 튜브의 벽 근처에서는 경계층이 형성되기 때문에 의도된 조밀한 메쉬를 넣었으며 튜브의 중심에는 벽 근처보다 큰 메쉬가 있는 것을 볼 수 있는데 이는 메쉬의 크기를 튜브의 벽 근처에서 가장 작은 0.2 크기의 메쉬를 1.1배의 비율로 최대 2.5까지 크게 만들면서 중심 쪽으로 오게 해서 메쉬의 양을 줄였기 때문이다. 입구 단면에 들어간 사각형 메쉬의 수는 총 7966개이다. Fig. 2의 (b)는 리브로 인해 생긴 산과 골에서의 경계층을 나타낸 메쉬를 보여주고 있다.

튜브의 벽에서의 가장 작은 크기가 0.1이며 1.2배의 비율로 4개의 경계층을 만들었다. 주기를 가진 형상의 경우 일부분을 그려서 주기 조건(periodic condition)을 이용해서 해석할 경우 메쉬의 밀도를 높이면서 계산량을 줄일 수 있다. 하지만 해석하고자 하는 영역의 특정 부분에 장애물이 위치할 경우 주기 조건을 쓸 수 없다. 앞으로 내부에 특정 구조물을 설치해서 해석할 것을 대비해 튜브의 모든 영역을 다 해석하였다.

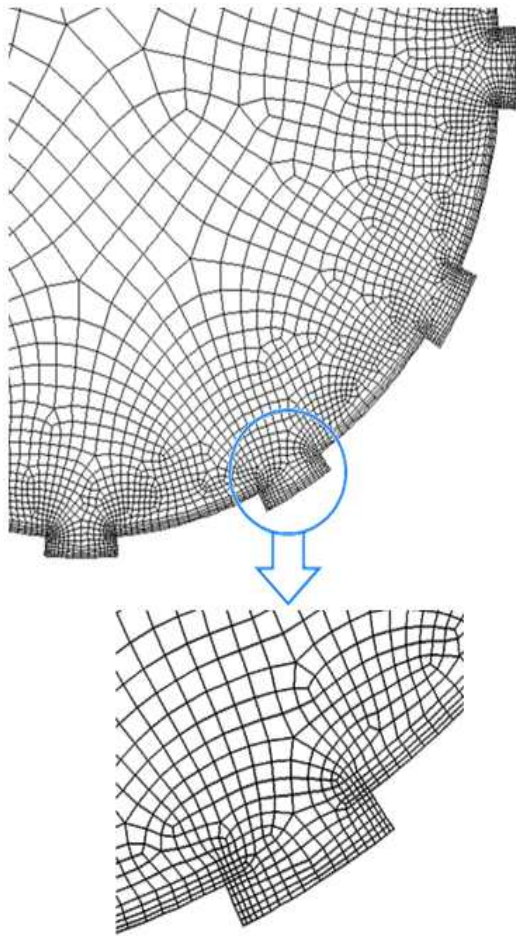
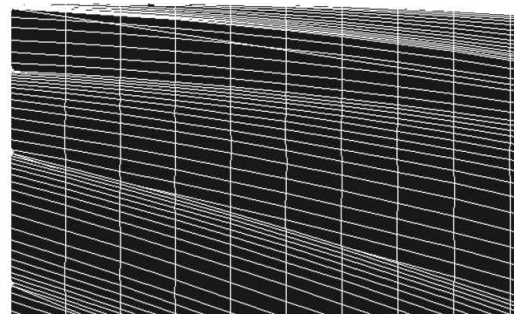
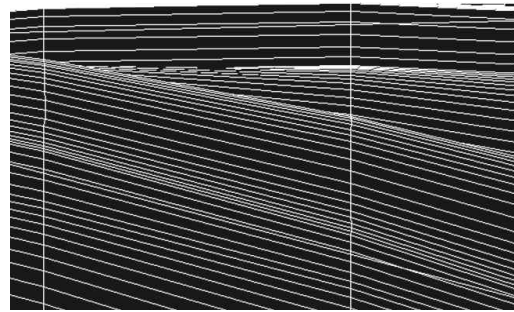


Fig. 2 Mesh of the cross section of the ribbed test tube, (a) General view (b) Detail view

Fig. 3은 테스트 튜브 입구와 출구의 메쉬를 보여 주고 있다. 테스트 튜브의 길이 방향으로 모두 430개의 메쉬가 들어갔다. 약 2.325mm 당 1개의 메쉬가 들어간 것이다. 그러나 테스트 튜브 입구에서부터 시작해서 출구로 작업유체가 지나가면서 완전히 발달된 영역으로 되기까지 유동의 형태가 복잡하다. 때문에 1.004의 비율로 테스트 튜브의 입구 쪽에는 조밀한 메쉬가 들어가고 출구 쪽으로는 메쉬의 간격이 크게 들어가게 했다. Fig. 3에서 볼 때 입구와 출구만 볼 경우 너무 급격하게 차이가 나지만 1,000mm의 거리를 430개의 간격으로 서서히 커지는 것이기 때문에 해석에는 크게 무리가 가지 않는다.



(a) entrance region



(b) exit region

Fig. 3 Mesh size for the entrance and exit regions

언급한 바와 같이 한 단면에 사각형의 메쉬가 7,966개가 들어갔고 이 단면이 430개의 층을 이루기 때문에 이번 해석에서 사용된 총 볼륨 메쉬의 수는 3,425,380개이다.

### 2.3 수치해석

본 해석에서는 2 equation 난류모델 중 standard k-ε 모델을 선택했으며 식은 아래와 같다. 여기서 k는 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)이며 ε은 난류 소산율(turbulent dissipation rate)을 말한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

여기서  $\mu_t$ 는 난류점성이며  $k$ 와  $\epsilon$ 의 조합인 다음의 식을 따른다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

여기서  $C_\mu$ 는 상수이다.

그리고 모델 상수(model constants)  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$  그리고  $\sigma_\epsilon$ 의 값은 다음과 같다.

$$C_{1\epsilon}=1.44, C_{2\epsilon}=1.92, C_\mu=0.09,$$

$$\sigma_k(\text{TKE Prandtl Number})=1,$$

$$\sigma_\epsilon(\text{TDR Prandtl Number})=1.3$$

입구는 속도 입구(velocity inlet)를 사용했으며 출구는 압력 출구(pressure outlet)를 사용했다. 압력출구에서의 압력은 대기압으로 두었으며 게이지 압으로는 0이 된다. 15°C 공기의 물리량<sup>[5]</sup>은  $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ , 점성계수  $\mu=1.802 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ , 동점성계수  $\nu=1.407 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 이다. 이를 바탕으로 Re 수를 결정했으며 각 Re 수에 대한 입구에서의 속도는 Table 1과 같다.

**Table 1 Re and velocity at the entrance**

| Re     | $V_{\text{inlet}}$ (m/s) |
|--------|--------------------------|
| 20,000 | 6.00                     |
| 40,000 | 12.00                    |
| 60,000 | 18.00                    |
| 80,000 | 24.00                    |

수렴에 대한 판단에 있어서 continuity는  $10^{-6}$ , x, y 그리고 z momentum은  $10^{-3}$  이하로 떨어질 때를 수렴으로 판단했다.

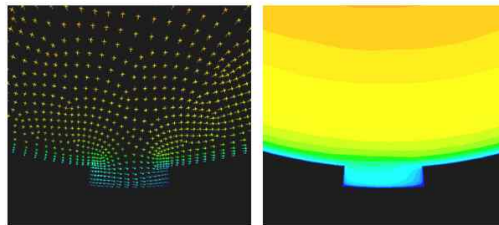
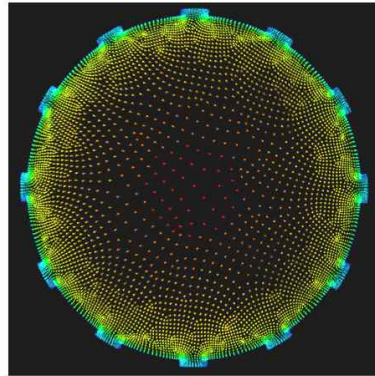
### 3. 수치해석 결과

네 가지의 Re 수에 대응하는 속도들을 가지고 다음과 같은 결과를 얻었다.

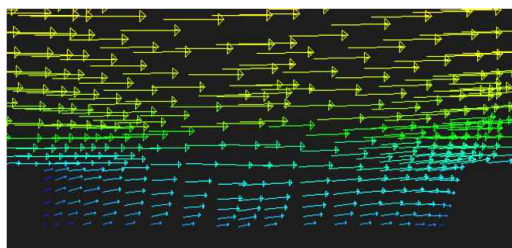
#### 3.1 속도벡터 분포

Fig. 4는 rev=3 단면에서의 축방향의 속도벡터 분

포를 나타내고 있다. 아래쪽의 두 그림은 단면의 하부를 확대하고, 그 부분을 등고선으로 나타낸 것이다. 테스트 튜브의 벽 근처는 속도가 느리고, 튜브의 중심 부분은 속도가 빠른 전형적인 난류유동의 형태를 보여준다. 리브에 의해 생성된 골은 속도가 비교적 느리며 리브의 모서리 안쪽은 가장 느린 속도분포를 보였다. 그리고 테스트 튜브의 벽 근처로 갈수록 리브의 결 방향으로 속도벡터의 구배가 발생된 것을 볼 수 있는데 이는 리브에 의해 선회유동이 발생했음을 알 수 있다.



**Fig. 4 Velocity vector distribution at the cross section (rev=3) and Re No. 80,000**



**Fig. 5 Axial velocity vector distribution around the cross section (rev=3) and Re No. 80,000**

Fig. 5는 Fig. 4의 단면 전후를 측면에서 본 것이다. 테스트 튜브의 벽 근처는 속도벡터의 크기가 아주 작고, 중심으로 갈수록 속도벡터의 길이가 점점 길어짐을 관찰할 수 있으며 물리적으로 타당한 결과이다. 리브 각이 30°로서 아주 완만하게 리브가 나 있어서 리브에 의해 생긴 골의 구석부분에 보텍스(vortex)는 나타나지 않았다.

### 3.2 축방향 속도 분포

Fig. 6는 테스트 튜브 내부공간을 지나는 공기의 속도분포를 나타낸다. 좌측이 입구, 우측이 출구이며, 옅은 색 일수록 속도가 낮고, 진한 색 일수록 속도가 빠르다. 입구역역 이후 속도분포가 완전히 발달하여 속도 분포가 변하지 않는 구간인 수력학적 완전발달 영역(hydrodynamically fully developed region)<sup>[5]</sup>에 도달하는 것은 Re 수가 낮을수록 빨리 도달하고 Re 수가 클수록 늦게 도달한다는 것을 알 수 있으며 이는 물리적으로 타당한 결과이다.

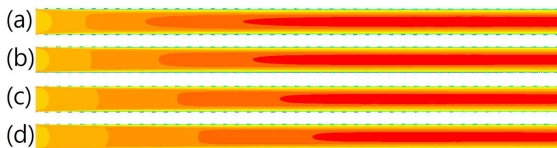


Fig. 6 Axial velocity distribution at Re No. 20,000 (a), 40,000 (b), 60,000 (c), and 80,000 (d)

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 Re 수 20,000과 80,000에서의 무차원 속도분포를 나타낸 것이다.  $r$ 은 테스트 튜브의 각 위치에서 중심까지의 거리를 나타낸다. 위쪽을 +, 아래쪽을 -로 잡았다.  $R$ 은 테스트 튜브의 반지름이며  $r/R$  값은 -1에서 +1까지의 값을 가지게 된다.  $U$ 는 테스트 튜브 각 위치에서의 축방향 속도를 나타내며  $\bar{U}$ 는 평균속도를 나타낸다.  $U/\bar{U}$ 로서 무차원속도를 정의해서 그림에 나타내었다. 그리고  $rev$ 는 회전수를 뜻한다. 그 값이 1이면 360° 회전을 뜻하고 0.5이면 180° 회전을 뜻한다. 일반적으로 튜브에서 국부의 속도분포를 나타낼 때는  $x/D$ 와 같이 축방향 길이  $x$ 에 대한 지름  $D$ 의 배수를 쓰는 것이 일반적이다. 그러나 리브드 튜브의 경우 산과 골 때문에 지름의 배수를 쓰게 되면 끝단의 값을 표현하는 것이 어렵기 때문에 골 부분이 90° 씩 회전하면

서 진행 했을 때의 속도분포를 추출하려고 회전수를 쓰게 되었다.

두 그림에서  $rev=0$ 에 해당하는 부분은 그냥 세로 선으로 되어 있는데 이는 CFD 코드를 해석할 때 입구에서는 항상 그 면에 수직으로 균일하게 들어가기 때문이다. 보통 실험의 경우 입구 쪽에서 균일한 속도분포를 얻기 위해서 디퓨저를 장착한다. Fig. 8이 Fig. 7에 비해서 더 폭넓은 속도분포를 보이는데 이는 Fig. 6의 그림을 설명한 것과 같이 완전히 발달된 속도 분포가 높은 Re 수에서는 더 늦게 나타나기 때문이다.

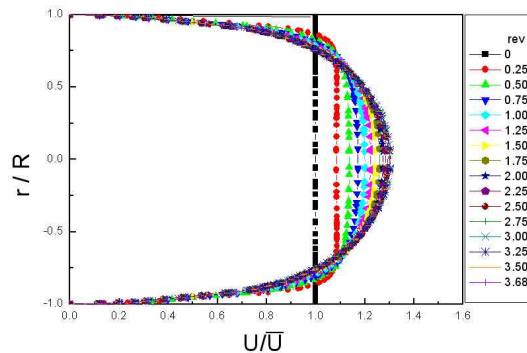


Fig. 7 Non-dimensional axial velocity distribution at Re = 20,000

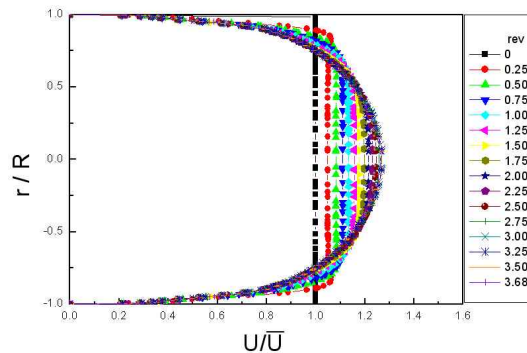


Fig. 8 Non-dimensional axial velocity distribution at Re = 80,000

Fig. 9는  $rev=3$ 에서, 거리로 환산하면 입구에서부터 약 816.2mm 떨어진 곳이며, 네 가지 Re 수에서의 무차원 속도분포를 나타내고 있다. Re 수가 커질수록 포물선의 폭이 점점 넓어지는 경향을 볼 수 있다<sup>[6]</sup>.

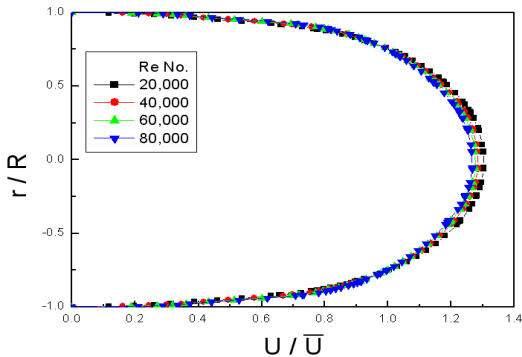


Fig. 9 Non-dimensional axial velocity distribution at rev=3 and Re = 20,000, 40,000, 60,000 and 80,000

#### 4. 결론

평균지름 49mm의 리브드 튜브에 15℃ 공기를 작업유체로 해서 Re 수 20,000, 40,000, 60,000 그리고 80,000에서의 유동에 관한 해석을 통해서 다음의 결론을 얻었다.

1. Re 수가 작을수록 수력학적 완전발달 영역에 빨리 도달하며 클수록 늦게 도달하는데, 이는 물리적으로 타당한 결과이다.
2. Re 수가 클수록 수력학적 완전발달 영역에 도달하기까지 폭넓은 속도분포를 나타낸다.
3. 리브에 의한 영향으로 테스트 튜브 근처에서는 선회유동이 나타났다.
4. 낮고 완만한 리브 각 때문에 리브에 의해 생긴 골 부분에서 보텍스는 나타나지 않았다.

본 연구에서는 작업유체의 유동특성에 대한 연구로 공기를 작업유체로 한정했으며 다른 유체에 대한 연구와 열전달 그리고 테스트 튜브 중앙에 장애물이 있는 경우 등에 대한 연구는 앞으로의 연구과제로 남긴다.

#### 참고문헌

1. Seol, W. S., Kwon, O. K., Moon, C. G., Jeong, Y. U. and Yoon, J. I., "Characteristics of Heat and Mass Transfer on Inner Ribbed Notched Fin Tube

- Absorber", The Korea Society of Marine Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 86-93, 2000.
2. Kim, Y. H., and Ha, O. N., Lee, J. H. and Park, K. W., "Shape optimization of internally finned tube with helix angle", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 500-511, 2007.
3. Park, Y. S. and Chang, S. H., "Swirl flow analysis in a helical wire inserted tube using CFD code", Nuclear Engineering and Design, Vol. 240, Issue 10, pp. 3405-3412, 2010.
4. Je, K. H., "An Experimental Study on Heat Transfer Characteristics in a Ribbed Tube", M.S. thesis, Kyungnam University, 2000.
5. Yunus A. Cengel and John M. Cimbala, "Fluid Mechanics : Fundamentals and applications", McGraw-Hill higher Education, pp. 305-308, 769-803, 842, 2005.
6. Kim, B. H. and Jung, D. S., "Flow Analysis for the Sludge Pneumatic Dehydrator with Cyclone Type", The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 4, pp. 1-6, 2009.