

Shear Flow 속에 있는 Circular Cylinder 표면의 압력분포 및 경계층 연구

이 상 섭[†]

(원고접수일 : 2003년 3월 11일, 심사완료일 : 2003년 6월 16일)

A study for the pressure distribution and the boundary layer around a circular cylinder in a shear flow

Sang-Sub Lee[†]

Key words : shear flow, circular cylinder, boundary layer

Abstract

In this study, an experiment has been performed to investigate distributions of static pressure around a circular cylinder in a uniform shear flow which is made by a specially designed wind tunnel. From the computation program(BLAYER), various boundary layer value are obtained depending on the shear flow rate. It is basical design data that boundary layer flow phenomenon of nuclear power plant heat exchanger tube surroundings, airfoil, and others flow fields.

1. 서 론

어떤 물체가 유동장의 영향을 받고 있을 때 실제의 공학 문제에서는 그 유동이 전단류(shear flow)인 경우가 많다. 예를 들면 바다, 강, 또는 호수로부터 냉각수를 이용하고 있는 원자력 발전소의 열교환기 주위 유동 현상, 항공기가 이착륙할 때 날개 주위 유동, 공장의 높은 굴뚝 주위에 생기는 경계층 내부의 유체 유동 등이 있다. 특히 원통(circular cylinder) 주위의 유동 현상은 열교환기 설계 등 많은 공학적 문제에 응용되고 있으며, 기초 학문 연구에 좋은 자료로 이용되고 있다. 이

러한 현상을 밝히기 위한 기초적 연구로서 실험실에서 평균속도 구배가 일정한 균일 전단류를 생성시켜서 유체 유동 현상을 관찰하는 것은 그 유동장에 대한 직접적인 근사가 될 뿐 아니라 이론 개발의 첫 단계로서의 의미를 지닌다고 할 수 있다. 또한 원통 형상은 각종 공학적 응용 분야의 기초 요소로서 널리 이용되고 있으므로 원통 주위 압력 분포와 경계층을 연구하는 것은 대단히 중요하다.

Saffman⁽¹⁾은 느린 전단류 내에서 구(sphere)가 받는 양력(lift) 현상을 연구하여 관성효과와 비교하였고 Achenbach⁽²⁾는 $6 \times 10^5 < \text{Re} < 5 \times 10^6$ 범위의 균일 유동에서 원통 주위 부분 압력과 전

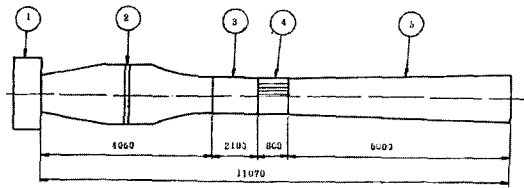
[†] 책임저자(한국전력기술(주) 원자로설계개발단) E-mail : lss2822@hanafos.com, T : 042)365-2822

단력의 분포를 연구하였다. Roshko⁽³⁾는 $10^5 < \text{Rec} < 10^7$ 에서 실린더 주위 유동은 Re 수에 큰 관계가 있고 박리점은 아임계 유동(subcritical flow)보다 훨씬 뒤에서 생성됨을 규명하였다. Batham⁽⁴⁾은 임계 Re 수에서 원통 주위의 요동 압력 구배는 난류에 의하여 지배됨을, Robertson⁽⁵⁾은 $6 \times 10^{-4} < \text{Res} < 0.7$ 의 경우에 대한 원통 주위를 지나는 비압축성 점성유체의 2차원 유동에 여러 가지 각속도를 적용한 실험에서 각속도가 "0"인 경우에는 선화 wake가 원통 양편에서 발생하고 유동함수(stream function)이 "0"인 속도 포텐셜이 $\pm 30^\circ$ 에서 생긴다는 사실을 알았다. 그러나 수치 해석적 방법으로 Kossack & Acrivos⁽⁶⁾는 $0.047 < \text{Res} < 70$ 에서의 해석결과는 실험 결과와는 매우 다름이 밝혀져서 수치해석의 한계성을 보였다. Chen⁽⁷⁾은 전단류에서 vortex shedding에 관한 연구로서 shear parameter인 전단률이 0.57에서 중심속도 U_c 의 변화는 임계 Re 수 $\text{Rec} < 10^3$ 에서 실험 결과를 토대로 Roshko와 같은 결과인 $\text{St} = 0.212(1 - 21.2/\text{Rec})$ 을 만족함을 밝혔고, Maull과 Young⁽⁸⁾은 bluff body에서 vortex cell이 발생한다고 하였다. Rooney & Pitzer⁽⁹⁾는 임계 Re 수(Critical Reynold Number)에서 압력 및 vortex shedding이 균일 유동의 경우와 다른 점에 대해서 실험하였다. Eckerle & Langstein⁽¹¹⁾은 유동가시화 및 원통 표면 정압을 측정하여 속도 및 압력을 측정하였다. 균일 유속에서 원통 주위 박리현상은 Re 수를 매개 변수로 하여 층류적 성질로 박리되는 아임계 유동(subcritical flow), 박리 기포가 생기는 임계 유동(critical flow), 층류에서 난류 경계층까지 직접적인 천이가 정체점으로부터 임계거리까지 관찰되는 초임계 유동(supercritical flow)로 분류한다. 이상에서 살펴본 바와 같이 균일 유동내 실린더 주위 유동에 대한 이론 및 실험결과는 비교적 많이 연구되었으나 전단류 내에서의 실험은 많이 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 균일 전단류를 발생시키는 풍동에 원통을 설치하여 전단률의 변화에 따른 원통 표면의 압력분포 현상을 연구하고 수치해석에 의해서 원통 표면의 경계층을 연구 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

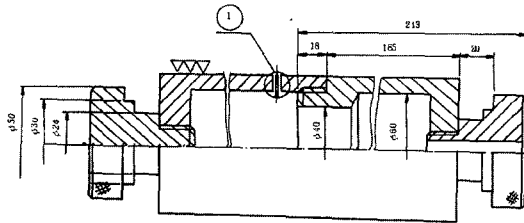
2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 풍동은 동력 감소와 시험부(test section) 크기를 조절하기 쉬운 개방형(open type) 풍동이며 Fig. 1은 그 개략도이다. 풍동에서 발생하는 최대 평균속도는 33 m/s이고 오차 범위는 $\pm 2\%$ 이다. 풍동의 형상비(contraction ratio)는 8.35:1이고 시험부의 크기는 450mm × 450mm × 600mm 이며 풍동의 덕트(duct) 벽에 의한 열전달 효과로 경계층 두께의 증가에 의한 압력변화인 dp/dx 의 생성을 막기 위하여 $0.5^\circ \sim 1.0^\circ$ 의 변화를 주었다. 풍동의 속도는 변속 장치를 사용해서 중심속도 U_c 의 조절이 가능하다. 송풍기는 원심형 팬(fan)으로 용량이 400 m³/min이며 광각 디퓨저(diffuser)는 유동 박리를 막기 위해서 3장의 스크린을 160mm 간격으로 설치하였다. 1,300mm × 1,300mm의 setting chamber에는 알루미늄으로된 별집 구조 cell의 직경이 10mm 이하로 장치하고 폭은 10mm 이상이 되게 설치했다. 전단류 발생기로부터 생성된 유동이 균일 유동(homogeneous flow)이 되기 위해서는 유동의 전체 크기(integral scale)가 풍동의 시험부에 비해 매우 작아야 하므로 시험부를 10등분하여 각 채널(두께 2mm인 알루미늄판)을 만들었다. 각 채널에 깃 모양의 판을 설치해서 이를 각도 별로 조정하여 균일한 전단류를 생성했다. 원통을 풍동 내부에 설치할 때에 원통의 직경과 풍동 높이의 비(d_c/H)는 $d_c/H \leq 0.15$ 일 때 일반적인 한계조건이며, 수치계산에서는 $d_c/H = 1/6$ 에서도 좋은 결과를 보여준다. 본 실험에 사용된 원통의 개략도는 Fig. 2와 같으며 $d_c/H = 0.148$ 로 제작하였다. 정압 측정 구멍(static pressure tap)은 측정 장치들의 상호영향 문제 때문에 한개 만을 원통 표면에 1mm 크기로 만들었다. 원통은 표면 조도(roughness)가 $6\mu\text{m}$ 을 갖고 크기는 지름이 67.5mm, 길이가 450mm인 두랄루민으로 만들었다.



- ① Blower
- ② Wide angle diffuser & Setting Chamber & Contraction
- ③ Buoyancy effect ④ Shear flow generator
- ⑤ Test section

Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel



- ① static pressure tap (1mm)

Fig. 2 A front view of circular cylinder

2.2 측정장치 및 측정방법

입력 pulse를 계단 파형으로 고쳐서 구동되는 step-motor는 속도 제어가 광범위하고 높은 정밀도로 회전 및 정지, 그리고 방향 변환이 되며 feedback 장치가 없이도 정확한 제어가 가능하다. pulse당 1.8° 회전하는 2상 표준형 step-motor (PH299)와 IBM-PC를 연결해서 SPD 4209 driver로 피토관(pitot tube)이 장치된 step-motor를 작동한다. Step-motor의 작동은 BASIC 프로그램으로 제어하였으며, 이때 step motor의 회전 속도는 0.8 sec/rev.을 나타내었다. 풍동에서 발생하는 균일 전단류의 속도를 정확히 측정하기 위해서 IBM-PC와 연결된 step-motor에 피토관이 일정한 간격을 전진, 일정한 시간동안 정지하게 한다. 동시에 피토관을 micro-manometer에 연결하고 풍동의 각지점, 즉 유동의 방향과 풍동 높이의 비가 전단류 발생기를 기준으로 $x/H=1\sim 10$ 인 지점과 $z/H=0.28, 0.5, 0.72$ 인 지점의 평균속도(mean velocity)를 측정하였다. 또한 전단류 발생기로 전단류를 바꿔

가며 위의 방법으로 평균 속도 분포를 측정한다. 전단류 발생기를 이용하여 풍동내 중심선 속도와 전단류를 측정한다. 원통에 정압 측정 구멍을 뚫고, 원통 주위 압력을 측정하기 위해서 최고 199.0 mmH₂O까지 압력을 측정할 수 있는 micro-manometer에 연결한 후, 본 풍동에서 가장 선형적인 전단류가 발생하는 $x/H=7$ 지점에 원통을 설치하였다. 원통을 $\phi=0^\circ$ (정체점)으로부터 $\phi=360^\circ$ 까지 5° 간격으로 원통의 원주 방향으로 회전하면서 정압(static pressure)을 측정하였다. 그리고 전단류 발생기로 중심선 속도를 일정하게 하고 전단류를 변화하면서 원통압력 분포를 측정하였다. 또한 풍동 내부에 smoke generator로 연기를 분사시켜 원통 주위 유동 현상을 살펴 보았다.

3. 수치계산 Program

본 연구의 실험적 결과치를 비교 분석하기 위해 수치 모델과 비교하였다. 수치계산에 사용된 computer program인 BLAYER(COSMIC LEW-11097)는 임의 압력구배의 2차원 압축성, 또는 비압축성 층류 및 난류 경계층 방정식(two dimensional compressible or incompressible laminar and turbulent boundary layer equation)을 적분 방법에 의하여 해를 구하는 프로그램이다. 원통의 기하학적 형상, 실험에서 얻은 압력분포, 원통의 전체 유동 조건 등의 입력에 의해서 원통 표면 주위 경계층의 발달 과정과 박리 현상 등을 구할 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 균일 전단류

Owen & Zienkiewicz⁽¹⁰⁾은 균일 전단류를 실험실에서 처음 만들었는데 이는 간격이 다르게 특별한 bar를 풍동에 설치해서 이론적인 계산으로 $0.1 \leq y/H \leq 0.95$ 범위에서 선형적인 속도분포를 얻었다. Fig. 3는 풍동의 $x/H=3, 5, 7, 9$ $z/H=0.5$ 지점에서 평균속도 분포로 일정한 전단

류에서 속도 분포의 횡적 균일성이 원통을 설치한 $x/H=7$ 에서 가장 좋음을 나타낸다.

사용한 수치 계산으로 다음과 같이 전단률의 변화에 따른 경계층 값을 얻었다.

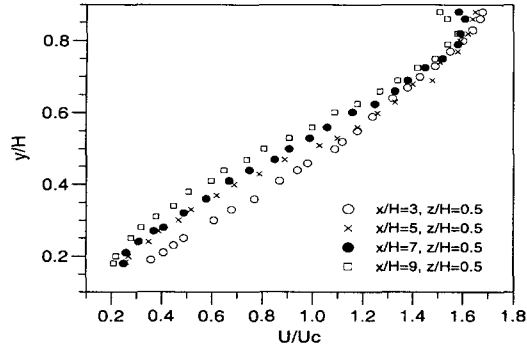


Fig. 3 Velocity Profile in Wind Tunnel

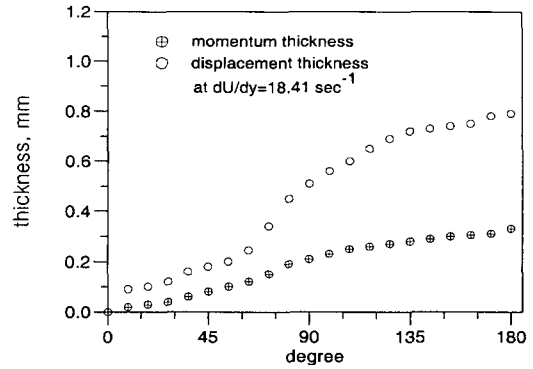


Fig. 5 Displacement & Momentum thickness along circular cylinder surface

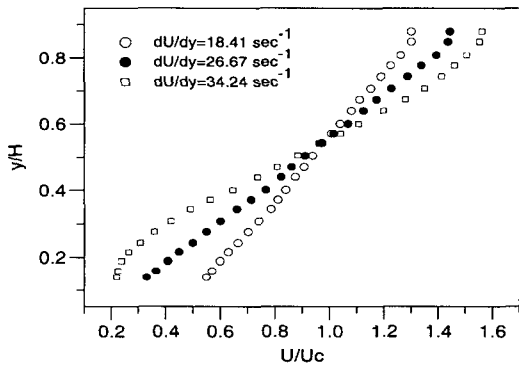


Fig. 4 Comparison with total mean velocity profile

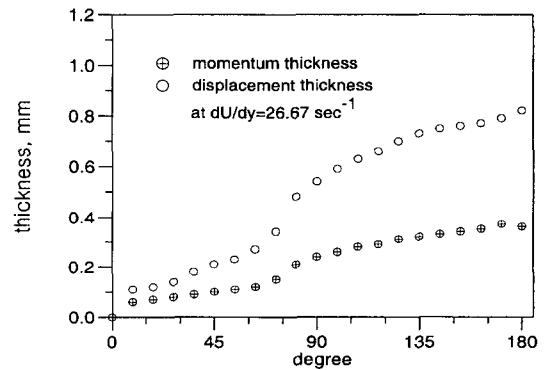


Fig. 6 Displacement & Momentum thickness along circular cylinder surface

Fig. 4는 전단률이 증가함에 따른 속도분포 기울기 변화를 보여준다. 또 전단률이 클수록 풍동의 시험부 위와 아래 부분은 덕트 벽에 의한 경계층의 영향을 더 받고 있음을 알 수 있다. 실험에서 얻은 속도 분포가 $0.15 \leq y/H \leq 0.87$ 범위에선 다른 논문의 균일 전단률의 영역과 상당히 밀접하다. 풍동 내부에 설치한 원통의 직경이 67.5mm, 즉 $d_c/H=0.148$ 이므로 충분히 전단률 내에 있다고 할 수 있다.

4.2 원통 주위 경계층

유체의 점성 영향으로 균일 전단률에 잠겨있는 원통 주위에는 급격한 속도 구배로 인해 생기는 경계층이 발달하게 된다. 상용코드인 BLAYER를

Fig. 5는 전단률이 $dU/dy=18.41$ [sec⁻¹] 경우 원통 표면에서의 변위두께(displacement thickness) 및 모멘텀 두께(momentum thickness)를 나타낸다. 변위 두께의 갑작스런 증가가 일어나는 80° 부근서 층류 박리가 일어남을 예측할 수 있고 이때 원통 표면의 경계층 내에선 층류 속도 구배를 가진다. Fig. 6은 전단률이 $dU/dy=26.67$ [sec⁻¹] 경우의 원통 표면에서의 변위 두께 및 모멘텀 두께를 나타낸다. 층류 박리가 일어난 후 원통 표면의 경계층 내에서는 층류 속도 구배를 보인다. 또한 Fig. 7은 전단률이 $dU/dy=34.24$ [sec⁻¹] 경우 원통 표면에서의 변

위 두께 및 모멘텀 두께를 나타낸다. 90° 부근에서 천이가 일어나므로 박리점이 원통 후면으로 이동하는 것을 알 수 있고 원통 표면의 경계층에서는 층류 속도 구배를 보인다.

4.3 압력 분포

Fig. 8은 전단률의 증가에 따른 압력계수 분포를 원통의 주위각에 대해서 5° 간격으로 나타낸다. 균일 유동에서는 압력 분포를 $Re=3 \times 10^5$ 까지 층류 박리가 일어나는 아임계 유동, $3 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ 사이에서 박리 기포가 생기는 임계 유동, 그리고 더 이상 박리 기포 현상이 관찰되지 않는 $Re > 1.5 \times 10^6$ 의 초임계 유동으로 구분한다. 또한 전단률이 증가함에 따라 압력계수의 최대값 위치가 뒤로 이동함을 알 수 있고, 원통 상, 하면 유속의 차이로 인한 상, 하면에서의 압력 차이를 나타낸다. 압력분포 비교에서 전단률과 균일 유동에서 실험 결과와 포텐셜 유동과의 차이는 유체 점성에 의한 경계층과 후류(wake)의 발생에 기인한다고 할 수 있고 원통 표면에서의 압력 분포가 Re 수가 클수록 포텐셜 유동 압력 분포 이론에 가까워진다. $Re_s = 6.9 \times 10^4$ 정도의 균일 유동이라면 $\phi = 72^\circ \sim 78^\circ$ 사이에서 층류 박리가 일어나지만 전단률이 증가할수록 박리가 원통 후면으로 이동하는 것으로 보아 박리가 Re 수에 의해서만 결정되지 않음을 알 수 있다.

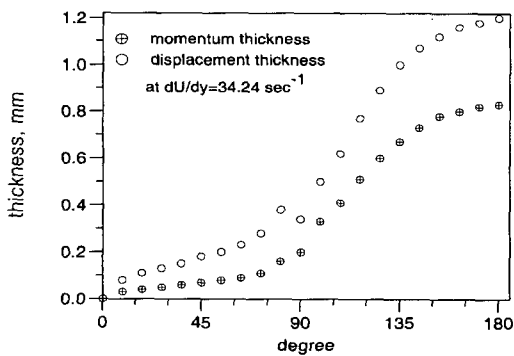


Fig. 7 Displacement & Momentum thickness along circular cylinder surface

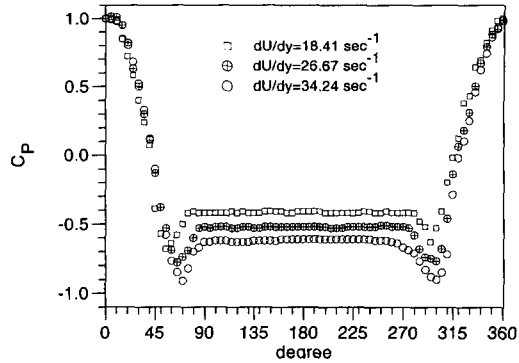


Fig. 8 Comparison with total pressure distribution

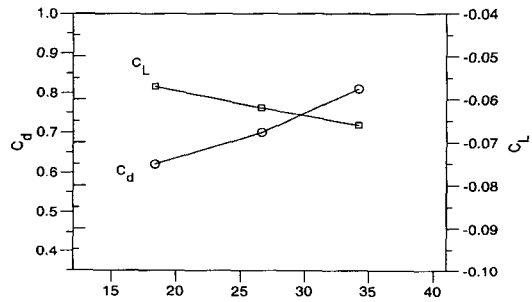


Fig. 9 Drag and Lift Coefficient

4.4 항력, 양력 계수

본 실험에서는 원통주위 유동이 균일 전단률이기므로 Fig. 9에서 보듯이 항력계수(drag coefficient, $C_d = D / (1/2 \rho U_\infty^2 A)$)가 $0.7 < C_d < 0.9$ 정도의 크기를 가지고 있다. 또한 속도 구배의 기울기를 가진 전단률에 의해 항력계수는 전단률이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 양력 계수(lift coefficient, $C_l = L / (1/2 \rho V^2 A)$)는 전단률이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있는데, 이는 유체 유동이 평균 유동 방향에 오른쪽 각에서 실린더에 상당한 힘이 미치는 magnus effect보다 정체점에 미치는 영향이 큼을 보여준다.

5. 결 론

균일 전단률에서 원통주위 유동현상을 실험과 수치해석 방법에 의해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 원통 표면의 압력분포는 전단률이 증가 할 수록 원통 상면($\phi=0^\circ\sim 180^\circ$)이 원통 하면($\phi=0^\circ\sim -180^\circ$)에서 보다 크게 나타난다.

둘째, BLAYER에 의해서 원통 주위 유동의 중요한 경계층 값을 얻음으로서 전단률이 증가하면 박리점이 원통 뒤쪽으로 옮겨감을 알 수 있다.

셋째, 원통표면의 경계층에서 전단률이 증가하면 속도 분포는 박리 후 난류 속도 구배를 보이고 변위 두께와 모멘텀 두께도 증가한다.

넷째, 전단률이 증가하면 항력계수는 증가하고 양력계수는 감소하는 경향을 보인다.

참고문헌

- [1] Saffman, P.G., "The Lift on a small sphere in a slow shear flow" J. of Fluid Mech., Vol. 22, pp. 385-392, 1965.
- [2] Achenbach, E., "Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to $Re=5\times 10^6$ " J. of Fluid Mech., Vol. 34, pp. 625-633, 1968.
- [3] Roshko, A., "Experiments in the flow past a circular cylinder at very high Reynold" J. of Fluid Mech., Vol. 10, pp. 345-352, 1961.
- [4] Batham, J. P., "Pressure distribution on circular at critical Reynold number" J. of Fluid Mech., Vol. 57, pp. 209-216.
- [5] Robertson, C.R. & Acrivos, A., "Low Reynolds numbers shear flow past rotating circular cylinder, part 1: Momentum homogeneous turbulent shear flow" J. of Fluid Mech., Vol. 81, pp. 657-665, 1977.
- [6] Kossack & Acribos, C.A., "Steady simple shear flow past a circular cylinder at moderate Reynold number: Numerical solution" J. of Fluid Mech., Vol. 66, pp. 353-360, 1973.
- [7] Chen, C.F., "Vortex shedding from circular cylinder in a shear flow" AIAA, Vol. 7, pp. 211-217, 1969.
- [8] Maul & Young, R.A., "Vortex shedding from bluff bodies in a shear flow" J. of Fluid Mech., Vol.60, pp. 401-406, 1973.
- [9] Rooney, & Pltzer, "Pressure and vortex shedding patterns around low aspect ratio cylinder in a sheard flow at transitional Reynolds number" J. of Fluid Eng., Vol. 103, pp. 88-95, 1981
- [10] Owen, P.R. & Zienkiewicz, H.K. "The production of uniform shear flow in wind tunnel" J. of Fluid Mech., Vol. 2, pp. 521-527, 1957.
- [11] W. A. Eckerle & L. S. Langstein, "Horseshoe vortex formation around a circular cylinder" J. of Turbomachinery, Vol. 109, pp. 278-285, 1987.
- [12] Schlichting, H., "Boundary layer theory", 8th ed. McGraw-Hill press, 2000.
- [13] White, F.M., "Viscous Fluid flow", McGraw-Hill press, 1998.

저 자 소 개



이상섭 (李祥燮)

1963년 11월 24일, 1986년 2월 충남대학교 공과대학 기계설계공학과 졸(공학사). 1988년 2월 충남대학교 대학원 기계공학과 졸(공학 석사). 2003년 8월 충남대학교 대학원 기계설계공학과 졸(공학 박사). 1992년 2월 한국원자력연구소 입소. ~1996년 12월 한국원자력연구소 원전설계본부 선임연구원. 1997년 1월~현재 한국전력기술(주) 원자로설계개발단 유체계통설계처