

## 이상류에서의 펌프특성 연구

김 주 철, 김 상 녕

경희대학교

### 요약

국내 원자력발전소의 참조격인 영광 3·4호기의 RCP를 1/10으로 축소한 모델펌프를 설계·제작하여 상온, 대기압에서 단상류 펌프특성과 포화상태 근방에서 공동현상 시발 과냉각온도( $\Delta T_{sub}$ ) 실험을 수행하였다. 단상류 특성은 RCP와 유사하였고, 공동현상 시발  $\Delta T_{sub}$ 는 0~5°C였으며, 압력에 따라 민감하였다. 공동현상의 무차원 변수는  $Ca = \frac{v_l h_{fg} \Delta T_{sub}}{v_g (\pi ND)^2 T}$ 로 정의 된다.

단상류 펌프특성과 이상류 펌프특성간의 상관관계인 수두손실비  $H^* \equiv \phi_{2ph} - \phi_{2s} / \phi_{2ph} - \phi_{2s}$ 를 기포율( $\alpha$ )과 유량계수( $\phi$ )의 함수로 나타낼 수 있을 것이다.

### 1. 서론

가압경수형 원자력발전소에 사용되는 펌프는 통상 단상류(액체)에서만 작동하도록 설계되어 있으며 따라서 제작회사로부터 제공된 정보는 단상류에서의 특성만이 주어진다. 하지만 발전소 수명기간 동안 원자로는 과도상태나 소규모 냉각재 상실사고(SBLOCA)와 같은 비정상적인 상태에 놓일 가능성이 있다. 이러한 경우 냉각재 계통을 비롯한 각 계통은 단상류(액체)가 아닌 포화상태 근방이나 이상류(액체-기체)가 될 수 있다. 이렇게 계통이 비정상적인 포화상태 근방이나 이상류 상태에 놓이게 되면 펌프작동을 중지해야 하나 원자로 계통의 안전상 부득이한 경우(예로 TMI 사고나 1984년 12월 국내의 월성 원자력발전소의 중수 누출사고시 이상류상태에서 냉각재 펌프 운전 강행)에는 이상류에서도 펌프를 작동시키게 된다. 이때 펌프는 단상류와는 판이한 특성을 갖는다. 포화상태 근방에서는  $\Delta T_{sub}$ 가 줄게됨에 따라 펌프 양정이 계속적으로 떨어진다. 특히 기포율이 일정치 이상이면 펌프의 양정(수두)은 급강하하고 공동현상이 일어난다. 이러한 이유로 안전성 측면에서 원자로 냉각재펌프 운전과 관련하여 캐비테이션 가능성과 이상류 운전시 펌프의 양정에 관한 정보가 필요하다. 이러한 정보는 사고시 냉각재 량, 냉각재펌프의 운전영역 결정 및 운전시 가능 수두를 미리 예측할 수 있으므로 원자로를 보호하는 조치를 취하는데 유용한 정보를 제공할 수 있게 된다. 한편 단상류에서의 펌프특성은 이론적으로 어느정도 예측이 가능하나 이상류에서는 거의 불가능하므로 이상류에서의 펌프특성 규명을 위한 실험이 필요하게 된다. 따라서 실험을 통해서 단상류 펌프특성과 이상류 펌프특성간의 상관관계를 무차원수로 정하고 이를 이용

하여 단상류 특성이 주어진 펌프의 이상류 특성을 유도해 낼 수 있다. 또한 비정상적인 상태에서 계통 운전시 펌프 양정 특성으로 부터 계통내의 상태파악(특히 기포율 :  $\alpha$ )도 가능하여 사고 대처 능력도 향상 시킬 수 있다.

## 2. 실험

본 연구는 영광 3·4호기에 사용되는 실제 냉각재 펌프를 상사성이 성립되도록 1/10 크기로 축소 제작한 모델펌프로 구성된 실험장치를 사용하여 고온 고압(100kPa~ 600kPa, 포화온도)에서 물과 증기를 사용하여 단상류에서의 펌프 특성과 이상류에서의 펌프 특성간의 관계식을 수두손실 비로 정의하여 이를 무차원변수인 유량계수와 기포율의 함수로 나타내고자 한다.

특히 포화온도 근방에서의 펌프특성을 밝히고자 한다. 이는 실제 원자력 발전소에서 과도시에 잔열제거 목적으로 포화상태 근방( $\Delta T_{\text{sub}} \approx 0$ )에서 냉각재펌프 운전이 불가피할 경우 있으며 이때는 펌프내의 공동현상으로 펌프특성이 단상류보다는 이상류 특성을 갖기 때문이다.

### 2.1 단상류 실험

펌프의 수차(Impeller) 입구와 출구사이의 검사체적에 뉴턴역학을 적용하여 외부(펌프)로부터 유동유체에 주어지는 일률(Power)을 유량 및 펌프의 고유 변수들로 표시할 수가 있다. 단위 질량당 펌프의 수차가 유동유체에 주는 에너지, 즉 단위 유량당 펌프가 해준 일률은

$$\frac{W}{m} = g_c(h_{02} - h_{01}) = U_2 c_{\theta 2} - U_1 c_{\theta 1} \quad (1)$$

만일 펌프 입구에서  $c_{\theta 1} = 0$ , 즉, 선회(Swirl)가 없다면

식 (1)은  $g_c \Delta h_0 = U_2 c_{\theta 2}$  이 되며, 속도 삼각도 (Fig. 1)로부터 다음과 같음을 알수 있다.

$$c_{\theta 2} = U_2 - c_{m2} \tan \beta_2 \quad (2)$$

여기서  $\beta_2$ 는 Fig. 1에서 보듯이 수차의 끝에서 유체의

수차와의 상대각이며, 이 각도는 수차 깃의 기하학적인 각  $\beta_1'$ 와  $\delta$ 만큼의 차이가 있다. 편차각( $\delta$ )은 실제 유동유체

의 종류, 유동현상, 펌프의 기하학적 구조등과 관련된 변수의 함수들이다. 이  $\delta$  값을 알기 위한 Slip factor( $\mu$ )를 정의하면

$$\mu = \frac{c_{\theta 2}}{c_{\theta 2}'} = \frac{U_2 - c_{m2} \tan \beta_2}{U_2 - c_{m2} \tan \beta_2'} \quad (3)$$

이며, 본 실험에서 사용한 Busemann 관계식은

$$\mu = \frac{A - B\phi_2 \tan \beta_2'}{1 - \phi_2 \tan \beta_2'} \quad (A = 0.77, B = 1) \quad (4)$$

이차원 대수 나선형 수차 깃에 매우 유효하다고 알려져 있다. 모델펌프는 정확히 이차원 대수 나선형 수차 깃을 갖고 있지 않으나, 대수 나선형에 상당히 근접하고 대수 나선형의 이탈로 인한 오차가 크지 않으므로 이 경우에 적용 가능하다고 가정하였다.

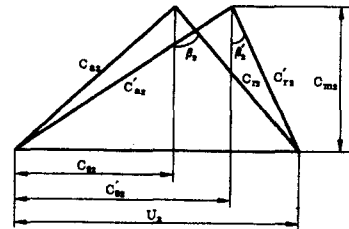


Fig. 1 Velocity diagram for rotor outlet.

윗 식들과의 상관관계식에서 이론적 수두계수는

$\Psi_{\text{spk}} = 0.77 - \phi_2 \tan \beta_2'$  로 얻을 수 있으며, 모델펌프의  $\beta_2' = 62^\circ$  이므로

$$\Psi_{\text{spk}} = 0.77 - 1.8807 \phi_2 \quad (5)$$

이다. 식 (5)은 본 실험에서 Busemann식이 맞다고 가정하였을때 구할 수 있는 이론적인 수두계수( $\Psi$ )와 유량계수( $\phi$ )와의 관계식으로 펌프의 단상류에서의 기본 이론식이다.

## 2.2 이상류 실험

이상류에서는 기체와 액체를 두개의 유체로 간주하고, 단상류 이론에서 얻은 수두계수와 유량계수의 관계식이 유동유체의 성질에는 무관하므로 펌프의 수차에 대한 실제의 상대각은 단상류에서와 같고, 단지 속도만 다르다고 가정한다. 이상류에서 이론적인 수두계수는 다음과 같다.

$$\Psi_{\text{spk}} = 0.77 - 1.8807 \left[ (1-x) \frac{(1-\beta)}{(1-\alpha)} \phi_* + \frac{\beta}{\alpha} x \right] \phi_* \quad (6)$$

여기서, 기포율(Void fraction)  $\alpha$ 는 이론적(Drift Flux Model)으로 구하고, 체적율(Volumetric Quality)  $\beta$ 는 실험에서 액체와 기체의 유량 측정으로 계산된다.

본 실험에서 동일한 유량계수에서 단상류와 이상류에서의 수두손실 비로 펌프의 효율을 나타내는 무차원 변수 수두손실비 (Head Loss Ratio)  $H^*$ 를 정의하면 다음과 같다.

$$H^* = \frac{\Psi_{\text{spk}} - \Psi_{\text{sp}}}{\Psi_{\text{spk}} - \Psi_{\text{sp}}} \quad (7)$$

이와 같이 모델펌프의 단상류와 이상류에서의 펌프 특성이 실험을 통하여 밝혀지면 이들의 관계식을 이용하여 단상류에서의 펌프의 특성이 알려진 실제 냉각재 펌프의 이상류에서의 여러 특성을 예측할 수 있다.

## 2.3 Cavitation(공동) 실험

펌프에서 공동현상에 관한 무차원수인 공동수(Cavitation Number)는  $C_a = \frac{p - p_v}{\rho U^2}$  로 정의되며  $P$ 는 계통의 압력,  $P_v$ 는 유체온도에 해당하는 증기압,  $\rho$ 는 유체의 밀도, 펌프내의 유속  $U = \pi ND$ 로 나타낼 수 있다.  $N$ 은 펌프의 회전수이며  $D$ 는 펌프 수차의 직경을 나타낸다. 한편 포화상태 근방에서의 포화압력과 포화온도의 관계는 Clapeyron-Clausius 관계식을 이용하면 구할 수 있다.

$$\frac{dP}{dT} \approx \frac{P}{RT^2} h_{fg} \quad (8)$$

윗식을 변수분리하여 압력은  $P_v$ 에서부터  $P$ 까지, 온도는  $T_v$ 에서부터  $T$ 까지 적분하면

$\int_{P_v}^P \frac{dP}{P} = \int_{T_v}^T \frac{h_{fg}}{RT^2} dT$ 이다. 여기서  $P$ 는 계통의 압력이며  $T$ 는  $P$ 에 해당하는 포화온도이고  $T_v$ 는 유체온도이고  $P_v$ 는  $T_v$ 에 해당하는 포화압력이다.  $\Delta T$ 는  $T - T_v$ 로 정의되며 포화온도 부근의 값들로 크지 않으므로  $h_{fg}$ 는 거의 상수로 취급한다.

$P \approx P_v, \quad T \approx T_v, \quad P - P_v = \Delta P, \quad T - T_v = \Delta T_{\text{sat}}$  로 놓으면

$$\Delta P = P \cdot \frac{h_{fg} \Delta T_{sub}}{RT^2} = \frac{\rho_g h_{fg} \Delta T_{sub}}{T} \quad (9)$$

이다. 따라서 다음과 같은 최종결과를 얻을 수 있다.

$$C_a = \frac{\Delta P}{\rho U^2} = \frac{\rho_g h_{fg} \Delta T_{sub}}{\rho_l U^2 T} = \frac{v_l h_{fg} \Delta T_{sub}}{v_g U^2 T} \quad (10)$$

	Prototype Pump	Model Pump	
회전수(rpm)	1190	1750	
직경(m)	0.94	0.094	
$h_{fg}$ (kJ/Kg)	965.7(P=15.5Mpa,T=344.9℃)	100kPa,T=99.63℃	2258.0
		300kPa,T=133.55℃	2163.8
		600kPa,T=158.85℃	2086.3
$v_g$ (m <sup>3</sup> /kg)	$9.807 \times 10^{-3}$	100kPa	1.694
		300kPa	0.606
		600kPa	0.316
$v_l$ (m <sup>3</sup> /kg)	$1.648 \times 10^{-3}$	100kPa	$1.043 \times 10^{-3}$
		300kPa	$1.074 \times 10^{-3}$
		600kPa	$1.1 \times 10^{-3}$
Cavitation Number $\left( \frac{v_l h_{fg} \Delta T_{sub}}{v_g U^2 T} = \frac{v_l h_{fg} \Delta T_{sub}}{v_g (\pi ND)^2 T} \right)$	0.140 $\Delta T_{sub}$	100 kPa	0.188 $\Delta T_{sub}$
		300 kPa	0.387 $\Delta T_{sub}$
		600 kPa	0.616 $\Delta T_{sub}$

Table 1 Cavitation Number 비교.

한편 펌프 입구와 펌프 내부 최저압과의 차이는 계통의 압력과 최저압차에서 계통 압력과 펌프 입구 압력차를 감한 값이다. 즉,  $\Delta P_{reg} = \Delta P_T - \Delta P_{sys}$  이다 또한 실험에서는  $\Delta P_T$ 에 해당하는  $\Delta T_{sub}$ 를 측정하게 되므로  $\Delta P_{reg}$ 에 필요한  $(\Delta T_{sub})_{reg} = (\Delta T_{sub})_{total} - (\Delta T_{sub})_{avail}$  이어야 한다.

### 3. 실험방법 및 실험장치

#### 3.1 실험방법

##### 1) 단상류 실험

실험에서 측정하고자 하는 주요 변수는 유량과 모델펌프의 양단간의 압력차( $\Delta P$ )이다. 유량을 최고  $5.67 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s에서 최저 0 m<sup>3</sup>/s까지 유량조절밸브를 조절하면서 그때의 펌프 양단에서 압력차를 측정하였다.

##### 2) Cavitation(공동) 실험

준 포화상태에서 원자로 냉각재 펌프의 거동을 보기 위해서는 펌프의 유동계수( $\phi$ )를 원자로 냉각재 펌프의 단상류 정격값에 해당하는 값과 일치시키고 단지 실험장치 압력에 따라  $\Delta T_{sub}$ 를 변화시켜서 펌프의 양정을 측정한다. 이때 양정의  $\Delta T_{sub}$ 를 알아내므로 캐비테이션을 일으키는  $\Delta T_{sub}$ 를 알아낼 수 있다. 또한 이때의 양정을 측정한다.

본 연구에서는 압력을 100kPa, 300kPa, 600kPa로 변화시키면서 캐비테이션을 일으키는  $\Delta T_{sub}$ 와 이때의 양정을 측정하였다.

##### 3) 이상류 실험

실험에서 기포율의 특성은 어려움이 많으므로 펌프의 흡입 직전의 물과 증기의 유량을 측정하여 두 유량에 의한 이상류의 기포율을 계산하고 이를 체적율과 기포율의 관계를 인용하여 유량(건도:  $x$ )이 알려진 유동으로부터 구하는 관계식인 드리프트 플럭스 모델로 구한다.

본 연구에서 이상류 펌프특성 실험은 증기 주입의 문제로 차후로 미루었다.

### 3.2 실험장치

원자력 발전소의 비정상 상태인 이상류 상태에서 원자로 냉각재 펌프의 작동 예측을 위한 실험 장치를 설계 제작하였다. 실험 장치는 원자로(원통형탱크), 모델펌프, 배관, 보조 및 계측기기 등으로 구성되어 있다(Fig. 2). 원자로는 포화상태의 액체와 기체를 공급하는 역할을 하며 액체와 기체는 별도의 배관을 따라 유량계를 통과후 다시 합쳐져서 펌프로 들어간 후 다시 원자로로 돌아오게 된다.

#### 1) 모델펌프

영광 3·4호기에 사용된 냉각재펌프를 1/10의 크기로 축소하여 상사성이 성립되도록 설계·제작하였다. 모델펌프의 수차(Impeller)는 6개의 깃으로, 디퓨저(Diffuser)는 10개의 깃으로 이루어졌으며 이들의 금속재질은 작동유체(물)에 의한 부식을 방지하기 위해 SSC13재질을 사용하였다. 또한 고온, 고압(600kPa, 포화온도)에서 운전되므로 밀봉부위(Sealing) 부분의 과열방지를 위해 외부에 Water jacker을 설치하여 냉각시키도록 했다. ( Fig. 3, Table 1).

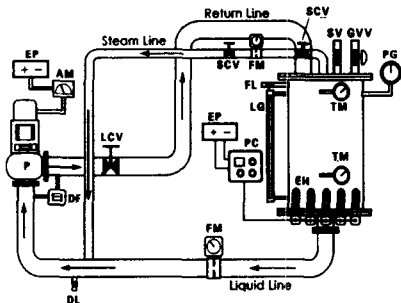


Fig. 2 Schematic diagram of the test loop.

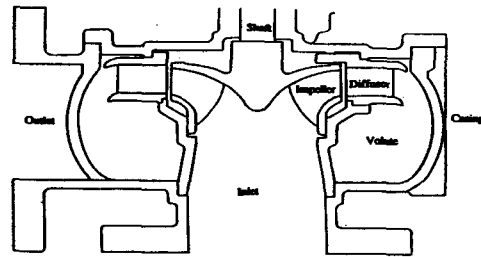


Fig. 3 Schematic diagram of the model pump.

Table 1 Specification of Y.G.N #3 &4 RCP and Model pump.

	RCP(Y.G.N # 3& 4)	Model pump
Type	Vertical, Single stage	Vertical, Single stage
Design head (m)	105.156	2.27
Design speed (rpm)	1190	1750
Design flow (m <sup>3</sup> /s)	5.3879	0.0079
Outdiameter of imperller (cm)	93.98	9.4
Diameter of pump inlet & outlet (cm)	76.2	7.62
Power (kW)	6330.5	0.75
Operating temperature (°C)	296.1	158.85
Operatting Pressure (MPa)	15.6	0.6
Manufacture	KSB (Germany)	Handol (Korea)

## 2) 원자로(급수저장탱크)

실험장치에서 원자로 역할을 수행하는 탱크는 펌프에 포화 상태의 유체를 공급하고 펌프를 통과한 유체(물)을 회수하는 역할을 하며 지름이 50cm이고 높이는 100cm인 단순 원통형 수조이다. 탱크하부에는 펌프로 가는 출구와 열량조절용 가열기가 설치되어 있으며 상부에는 펌프에서 돌아온 유체가 들어오는 입구, 포화증기가 나가는 출구, 불응축 기체 및 압력조절 방출구, 안전밸브 등이 설치되어 있다. 또한 측면에는 온도 측정용 열전쌍 2개(액체, 기체 온도측정), 수위계, 급수 배관 등이 설치, 연결되어 있다.

## 3) 계측기 및 보조기기

단상류 및 이상류에서 펌프의 수두(입구와 출구에서의 압력차)를 측정하기 위해 펌프의 차압측정용으로 설계된 OMEA사의 차압계(0~200PSID)와 디지털 지시계를 설치하였으며, 원자로에서 나온 액체와 기체의 유량을 측정을 위해 고온고압용 액체유량계( $8.33 \times 10^{-4} \sim 0.1 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{s}$ )와 증기유량계( $7.86 \times 10^{-5} \sim 6.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )를 액체관 증기관에 설치하였다. 또한 유량조절을 위해 모델펌프 토출부와 증기관에 고압용 게이트 밸브를 장착하였으며, 원자로의 액체와 증기의 온도와 압력 측정을 위해 원자로 상부와 하부에 0~300℃ 범위의 열전쌍형 온도계와 하부에 0~200PSI 범위의 압력계를 장착하였다.

# 4. 결과 및 토의

## 4.1 결과

### 1) 단상류 펌프특성

모델펌프를 사용한 상온, 대기압에서 단상류 실험을 수행하여 Fig. 4와 같은 단상류 특성곡선을 얻었다. 모델펌프에선은 일반 원심펌프에서와 같이 유량계수가 증가할수록 수두계수는 감소하는 것으로 나타났다. 최대유량(약 0.0057m<sup>3</sup>/s)에서 유동계수는 0.127이고 수두계수는 약 0.366임을 알 수 있었고, 유동계수가 0일 때 수두계수는 0.47정도로 계산되었다. Fig. 4의 펌프특성 곡선에서 보듯이 Busemann의 이론식은 유량계수 증가에 따라 수두계수가 직선으로 감소한데 반해 모델펌프의 실험값은 유량계수가 0.052까지는 일정한 값 0.46정도를 유지하다가 유량계수 증가에 따라 서서히 감소함을 나타낸다.

### 2) Cavitation(공동현상) 실험

과냉각 정도가 포화온도 접근하여 공동현상이 발생하면 양정이 급격히 떨어지게 된다. 이때의 온도와 양정을 측정하여 계통의 압력에 해당하는 포화온도와 실제 유체의 온도차를  $\Delta T_{sub}$ 라고 정의한다. 이  $\Delta T_{sub}$ 를 측정하여 실제 발전소의 값으로 환산하면 실제 발전소의 온도가 얼마까지는 공동현상 없이 운전 가능영역이 도출되며 만약 공동현상이 발생시 펌프수두가 얼마나 나올 수 있는지가 결정된다. 따라서 냉각재의 순환 량도 구할 수 있다. 이러한 실험 결과를 Fig. 5로 나타내었다. 실험에서 압력 100kPa, 300kPa, 600kPa에서의 공동현상이 일어나기 시작하는 과냉각 온도는 포화온도와 각각 8, 4.5, 1.8℃이었으며, 이때의 수두계수는 100kPa에서 유량계수가 0.0053일 때 0.377에서 0.335까지, 300kPa에서 유량계수가 0.0056일 때 0.329에서 0.274까지,

600kPa에서 유량계수가 0.0056일 때 수두계수는 0.319에서 0.253까지 떨어진다.

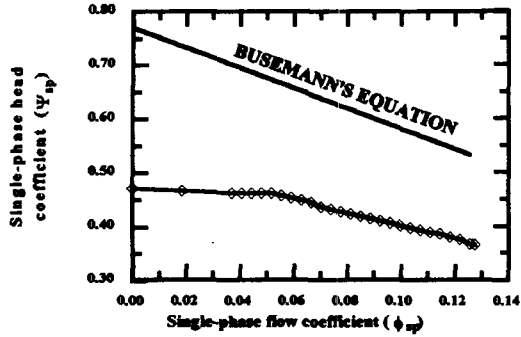


Fig. 4 Single phase pump performance theoretical(Busemann's equation) and experimental performance.

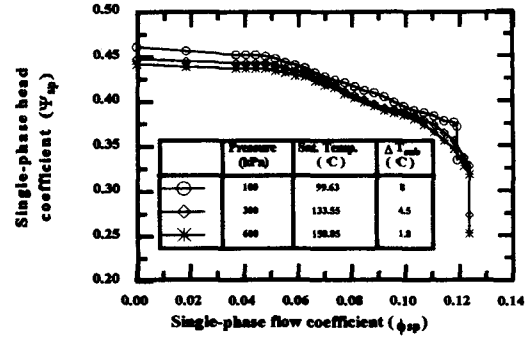


Fig. 5 The pump characteristics near the saturated temperature.

#### 4. 2 토의

Fig. 4에서 보듯이 실험결과 Busemann의 이론식은 정제 수두계수가 0.77 정도이나 실제 모델 펌프의 정제수두 값은 0.47정도이다. 또한 전반적으로 이론식보다 낮은 값을 갖음을 알수 있는데 이는 모델펌프가 1/10로 축소되었고 임펠러 직경이 10cm정도로 작아서 가공시 마무리 작업이 곤란하여 내부 일부분이 주물 상태로 남아 있어 이들이 펌프효율에 영향을 미쳤으리라 판단된다. 하지만 일정 유동계수까지는 수두계수가 일정한 값을 갖는 것은 냉각제 펌프의 특성을 잘 나타내 주고 있으므로 이를 이용한 이상류 실험의 정당성은 충분하다.

### 5. 결론 및 권고사항

#### 5.1 결론

영광 3·4호기 원자력 발전소의 냉각제 펌프를 1/10로 축소한 단상류 및 이상류 펌프 특성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1. 모델펌프의 펌프특성 실험은 만족할 만한 결과를 얻었다.
2. 유량계수가 0.1 근방의 단상류 펌프 특성곡선에서 수두계수는 이론식의 67% 정도였다.
3. 포화상태 부근에서의 펌프 거동은 공동현상이 일어나기 전까지는 단상류 거동과 거의 일치한다.
4.  $\Delta T_{sub}$ 는 계통 압력이 증가함에 따라 감소함을 보이고 있다.
5. 유량계수(유량)의 변화가 공동에 영향을 미치며 어느 유량계수를 지나면 공동현상으로 수두계수가 급락한다.
6. 공동이 발생하면 수두계수는 70%로 급락하여 유량이 더욱 증가하면 더욱 감소하여 20%~15%까지 떨어진다.
7. 이상류 펌프 특성(특히 공동현상)은 압력에 따라 민감하다.

## 5.2 권고사항

이상류 펌프특성 실험 결과 다음의 권고 사항이 도출되었다.

1. 실제 발전소 냉각재 펌프와 관련한 유용한 정보를 얻기 위해서는 보다 정밀하고 고압의 실험이 필요하다.
2. 실험시 기체 유입을 위해서는 냉각펌프만으로는 수두가 충분치 않으므로 별도의 기체 송풍기가 필요하다.

## 6. 참고문헌

1. Dixon, S.L., 1978 "Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery." Pergamon Press, pp.188-208
2. Stepanoff, A.J., 1975 "Centrifugal and Axial Flow Pumps." John Wiley and Sons. Inc. pp.161-181
3. Sheperd. 1956. "Principles of Turbomachinery." Macmillan Publishing Co., pp.223-275
4. Manzano- Ruiz, Juan J. 1984 "Experimental Study of Two-Phase, Two-Component Flow in Centrifugal Pumps." Nuclear Science and Engineering. 88. pp.275-286
5. C.Y. Baek. 1982 "Use of Centrifugal Pump Performance Information to Characterize a Two-Phase Flow." M.S Thesis in Mechanical Engineering. M.I.T.
6. Runstadler, P.W and Dolan, F.X., 1980 "Two-Phase Flow Pump Data for a Scale Model NSSS Pump." Polyphase Flow in Turbomachinery, A.S.M.E winter meeting. San Francisco, pp.65-78
7. Patal, B.R. and Runstadler, P.W. 1980 "Investigation into the Two-Phase Flow Behavior of Centrifugal Pumps." A.S.M.E winter meeting San Francisco, pp.79-100
8. Collier, J.G., 1972 "Convective Boiling and Condensation." McGraw-Hill, London pp.70-779.  
R.T.Lahey, Jr., F.J.Moody., 1984 "The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor." American Nuclear Society, pp.201-211
10. James, H.Rust., 1979 "Nuclear Power Plant Engineering." Harason Publishing Company, pp.173-186
11. Robert P. Benedict., 1977 "Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurement." John Wiley and Sons., Ins., pp.423-452