

## 제트 펌프의 작동 특성

심윤섭, 위명환, 김연식, 이준  
한국원자력연구소

### 요 약

일반구동 펌프에 제트 펌프를 결합시킨 복합 펌프 체계의 기본 특성 파악을 위하여 일차원 유동 모형을 이용하여 제트 펌프 자체의 기본적인 작동 특성을 분석하고 복합체제에서의 설계인자와 성능인자간의 상관성을 분석하여 제트 펌프의 일반적인 작동조건도를 작성하였고 바람직한 제트 펌프 구동을 위한 지표를 설정하였다.

#### 1. 서론

제트 펌프는 속도가 빠른 유체로부터 정지하였거나 또는 저속의 유체로의 확산에 의한 운동량 전달을 이용하여 유체를 양정 (pumping) 하는 펌프인데 기계적인 회전 펌프의 사용이 부적절한 작동조건에서 산업적으로 이용되고 있으며 원자력 산업 분야에서는 BWR 의 원자로 냉각재 재순환에 사용되고 있다. 또한 제트 펌프의 작동특성에 대하여 Kuidira [1] 는 실험적인 접근을 하여 GE 사의 BWR 재순환 제트 펌프의 작동인자간의 상관성에 대한 연구를 수행하였으며 Liao [2] 는 RELAP 를 이용한 해석적 접근으로 역시 제트 펌프 작동인자간의 상관성에 대한 연구 및 분석 모형에 대한 연구를 수행하였었다. 본 연구는 이러한 기존연구와는 달리 유로내에 장치된 일반 구동 펌프에 제트펌프를 결합시킨 복합체제의 기본특성을 파악하는 것으로서 제트 펌프의 일반적인 작동특성 그리고 복합체제에서의 설계인자와 펌프 성능간의 기본 특성을 일차원모형을 이용하여 분석한다.

#### 2. 해석 모형 및 제트 펌프의 일반적 작동조건도

해석모형은 본연구가 제트 펌프의 기본적인 특성을 분석하는 것임을 고려하여 해석의 편의상 유동의 속도 분포가 균일한 것으로 간주하였으며 그림 1의 각 대상체적 (control volume) 에 운동량 정리를 적용하여 지배식을 설정하였다. 해석 대상 제트 펌프 구조는 동심원관의 형상으로서 안쪽에는 구동흐름이 흐르고 바깥쪽에 양정되는 부흐름이 있는 경우인데 그림 1의 가)는 구동흐름과 유도흐름이 결합된 대상체적을, 나)는 유도흐름의 대상체적, 그리고 다)는 구동흐름의 대상체적을 보이고 있다. 이 그림에서 I 는 운동량흐름량 (momentum flow) 을 의미하며 하첨자 p,s 는 각각 구동흐름과 유도흐름을 의미하며 숫자는 그흐름의 위치를 의미한다.

먼저 그림 1 가)의 대상체적과 다)의 구동흐름 대상체적에 각각 운동량정리 [3] 를 적용하면

다음의 (1),(2) 식이 된다.

$$\Delta P_{1S2}' = \frac{A_p}{A_s} (-I_5' - I_2' + I_6') + \frac{A_p}{A_s} (F_w' - F_S') + \Delta P_{1PS}' \quad (1)$$

$$\Delta P_{1P2}' = -I_1' + I_2' + I_3' + F_S' \quad (2)$$

여기서  $I$  및  $\Delta P_{ij}'$  는 각각 무차원화된 운동량흐름량과 압력차이를 의미하며 아래식 (3),(4)와 같이 정의된다.

$$I_i' \equiv \frac{I_i}{\frac{1}{2} \frac{\rho Q_{1P}^2}{A_P}} = \frac{I_i}{\frac{1}{2} \frac{\rho Q_{1P}^2}{A_P}} \int_{A_i} \rho v_i v_i dA_i \quad (3)$$

$$\Delta P_{ij}' = \frac{P_i - P_j}{\frac{1}{2} \frac{\rho Q_{1P}^2}{A_P}} \quad (4)$$

여기서  $Q_{1P}$  는 제트펌프의 입구에서의 구동흐름의 체적유량을 의미한다. 한편 구간  $0 \sim r_p$  인 원통 내부를 흐르는 유량은 유동의 진행에 따라 일어나는 운동량의 확산으로 인하여 구동흐름의 속도가 점차 감소하게 되고 이로 인하여 유량 역시 차츰 감소하게 되는데 그 감소 정도는 초기에 급격하다가 어느 정도의 유동의 진행과 더불어 구동흐름과 유도흐름의 유동이 발달되어 가기 때문에 감소정도가 완화되게 된다. 이러한 특성을 고려하여  $z$  의 변화에 따른 이 원통내부 유량의 유량의 변화를 다음식 (5)와 같이 모형화하였는데 이식에서  $z_0$  와  $a$  는 경계조건으로부터 결정되는 모형상수이다.

$$Q_C(Z) \equiv \int_{r=0}^{r_p} \rho V(Z) (2\pi r) dr = \frac{a}{Z - Z_0} \quad (5)$$

이상의 식으로부터 전자펌프의 특성을 나타내는 다음 식이 유도된다.

$$0 = x^2 \left[ 2 \frac{|V_s|}{V_s} - \frac{1}{1+1/g} \right] + x \left[ \frac{-2}{g+1} \right] + \left[ -1 + \frac{1}{g} - \left( \frac{1}{g} \right)^2 \left( \frac{1}{1+1/g} \right) + y \right] \quad (6)$$

이 식에서  $x = v_s/v_p$ ,  $g = A_s/A_p$  로 정의되며  $y$  는 다음과 같이 정의된다.

$$y \equiv F_S' \left( 1 + \frac{A_P}{A_S} \right) - F_W' \left( \frac{A_P}{A_S} \right) - \Delta P_{1PS}' \quad (7)$$

이 식으로부터 제트펌프의 기하인자와 작동조건간의 관계에 따라서 미지수  $x$  의 성격도 결정되는데 그 관계는 그림 2와 같다. 이그림에서 보면 제트 펌프의 작동조건도가 비교적 복잡하다는 것을 먼저 알 수 있다. 빗금친 부분이 제트펌프의 목적에 부합되는 작동조건지역이 되는데 이 지역은 유도흐름 유로면적과 구동흐름 유로면적간의 비 및 작동조건 인자인  $y$  의 함수이다. 또한 제트 펌프 작동이 이 영역에 들기 위하여는  $y$  가 1 이하의 값이 되는 것이 요구된다. 1 이하가 되기 위하여 필요한 조건을 구하기 위하여  $y$  의 특성을  $A_s = A_p$  인 경우에 대하여 고찰한다. 먼저 구동흐름

과 유도흐름 대상체적 (control volume) 표면에 작용하는 전단응력  $F_s$  및 제트펌프 벽면에 작용하는 전단응력  $F_w$  의 크기는 개략적으로 다음과 같이 표시된다.

$$F_s \sim \tau_w \frac{V_p - V_s}{V_s} \cdot \frac{\Delta r_w}{\Delta r_s} \quad (8)$$

$$F_w \sim \frac{1}{2} \frac{Z_2 - Z_1}{r_s} f x^2 \quad (9)$$

이들로부터

$$\begin{aligned} \Delta F_{sw}' &\equiv F_s' \left(1 + \frac{A_p}{A_s}\right) - F_w' \left(\frac{A_p}{A_s}\right) - \Delta P_{1PS}' \\ &\sim \frac{1}{2} \frac{Z_2 - Z_1}{r_s} f \cdot x^2 \left[2 \left(\frac{1}{x} - 1\right) \frac{\Delta r_w}{\Delta r_s} - 1\right] - \Delta P_{1PS}' \end{aligned} \quad (10)$$

(10)식의  $x$  는 유도흐름속도의 구동흐름속도에 대한 비이므로  $x$  는 1이상이 될 수 없으며 또한 제트 펌프의 사용목적상 0 이상의 값이 되어야 한다. 따라서 (10)식 우변의 첫째항 크기의 범위는 크게 변하지 않음에 비하여 두번째항은 구동흐름의 입구압력조건을 어떻게하여 작동시키느냐에 따라 크게 변할 수가 있다. 따라서 제트 펌프가 바람직한 작동하게 하기 위하여는 우변의 두번째항을 작게 만드는 것이 필요하다. 즉, 구동흐름의 압력수두를 속도수두로 변화시켜 작동하는 것이 필요하고 그렇지 않을 경우는 오히려 제트 펌프에서 역류가 발생하게 됨을 식 (10) 및 그림 2로부터 알 수 있다.

지배식을 완성시키기 위하여는 (6)의  $F_w'$  및  $F_s'$  에 대한 표현식이 필요하다. 이들은 각각의 정의로부터 출발하여 앞에서 설명한 구동흐름에서 유도흐름으로의 유량의 이동 그리고 이로인한 유속의 변화 및 압력손실과 전단응력간의 균형조건등으로부터 각각 (11),(12)와 같이 유도된다.

$$F_w' \equiv \frac{F_w}{\frac{1}{2} \frac{\rho Q_{1P}^2}{A_p}} = \frac{1}{2} f \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{r_s} \cdot \frac{A_p}{A_s} \cdot \left[ \frac{V_t}{V_p} - 2(1+x) \frac{\ln(V_p/V_t)}{V_p/V_t - 1} + (1+x)^2 \right] \quad (11)$$

$$F_s' \equiv \frac{F_s}{\frac{1}{2} \frac{\rho Q_{1P}^2}{A_p}} = \frac{1}{2} f \frac{Z_2 - Z_1}{r_p} \left[ \left(1 + \frac{A_p}{A_s}\right) \frac{V_t}{V_p} - \frac{A_p}{A_s} (1+x) \frac{\ln(V_p/V_t)}{V_p/V_t - 1} \right] + \left(\frac{r_p}{r_s}\right)^2 F_w' \quad (12)$$

### 3. 일반구동펌프와 결합된 체제의 특성

(9),(10)식과 (6)식으로 기술되는 지배식 체제를 전산화하였는데 이를 일반구동 펌프와 제트펌프가 결합된 복합체제에 적용하기전에 압축공기에 의하여 작동하는 제트 펌프에 대한 실험 조건에 적용하여 본 연구의 전산 프로그램 예측치와 비교를 수행하였다. 그림 3은 측정치 [4] 와의 본 연구의 전산프로그램에 의한 해석치를 비교한 것인데 서로 유사한 값을 보여주고 있다. 여기서 유의할 점은 여기서 인용한 실험치의 측정 오차에 대한 정보가 없는 가운데에 이 비교가 이루어졌다는 점이다. 그러나 이 비교로부터 본 연구에서 개발한 모형을 본 연구 목적인 제트 펌프의 기본

적인 특성 분석에 사용하는 데에 대한 타당성이 확인될 수 있다.

특성 분석이 수행된 일반구동 펌프와 제트 펌프가 결합된 체제는 그림 4와 같이 큰 배관속에 전자펌프가 있고 전펌프로 부터 나오는 구동유체가 전자펌프 출구에 설치되어 있는 노즐을 거쳐서 제트펌프 구간으로 방출되는 체제이다. 일반구동 펌프 출구에 있는 노즐 면적의 조절로 제트 펌프입구의 압력 및 속도에 대한 제어가 이루어지며 작동 유체는 소듐이다. 그림 4의 1점은 일반구동 펌프의 출구 즉, 제트 펌프의 입구를 의미한다. 이 분석에서 사용한 일반구동 펌프의 특성은 유량이 0.726m<sup>3</sup>/sec, 펌프 발달 수두 (head) 가 0.79MPa 이며 외경은 0.96m 이다. 제트 펌프 입구의 압력제어의 현실성여부를 보기 위하여 일반구동펌프에서 발달되는 수두 전부를 속도 수두로 바꿀 경우에 요구되는 일반구동 펌프 노즐 출구직경 및 노즐 출구속도를 계산하면 각각 0.147m와 42.7m/초가 되어 비교적 속도가 빠르기는 하나 일반구동펌프에 제트 펌프가 추가되는 복합체제와 제트펌프가 없는 체제의 상대적 기본특성 검토 측면에서는 충분히 의미가 있는 값이다. 또한 제트 펌프의 사용여부에 따른 전체적인 성능의 변화를 정량화 하기 위하여 제트 펌프 유무에 따른 양정력 (pumping power) 의 비로서 식(13)과 같이 제트펌프사용 효율계수를 정의하였다.

$$effpuf = \frac{Q_{tot}^{wo}(h_3 - h_0)^{wo}}{Q_{tot}^{wi}(h_3 - h_0)^{wi}} \quad | \quad \text{동일구동펌프조건} \quad (13)$$

이 식에서 상첨자 wo 는 제트펌프가 없는 경우를 그리고 wi 는 제트 펌프가 있는 경우를 의미하며 하첨자 tot 는 전체를 의미한다. 또한 제트펌프의 입구압력 제어정도를 표시하는 인자 C 를 일반구동 펌프 전단압력 P<sub>0</sub> 의 제트 펌프 입구 압력 P<sub>ip</sub> 에 대한 비로 인자 C 를 정의하였는데 C=1 이면 일반구동 펌프에서 발달되는 양정수두가 전부다 속도수두로 바뀌어 제트펌프로 분출되는 경우가 되며 C=0 이면 극단적인 가상의 경우로서 일반구동 펌프 전단의 유체가 갖고 있었던 압력 수두까지를 모두다 속도 수두로 바꾸는 즉, 제트 펌프의 입구압력이 0이 되는 경우이다. 이로부터 일반구동펌프 양정수두 Dh<sub>pp</sub> 와 C는 (14)식과 같은 관계가 된다.

$$\frac{h_0 - CP_0}{Dh_{PP}} = \frac{P_0}{Dh_{PP}}(1 - C) = \frac{0.1}{0.79}(1 - C) = 0.127(1 - C) \quad (14)$$

이 식에서 h 는 수두를 의미한다. 구체적인 분석 결과 중 그림 5와 그림 6은 제트 펌프의 구동흐름 유로면적과 유도흐름 유로면적의 비의 변화에 따른 제트 펌프 특성의 변화를 보이고 있는데 그림 5는 C=0 의 극단적인 가상 경우에 대하여 그리고 그림 6은 C=1 인 경우에 대한 것이다. 이 그림에서 DH'30 은 제트 펌프 입구의 구동흐름 속도 수두로 무차원화된 그림 4의 3점과 0점간의 총수두 차이를 표시하는 데 일반구동펌프가 0점과 3점사이에 위치하여 유체의 수두를 제공하기 때문에 이 값이 그림에서 양의 값이 된다. 또한 V<sub>fp</sub> 는 구동흐름의 체적 유량을, 그리고 V<sub>ft</sub> 는 구동흐름과 유도흐름의 총 체적 유량을 의미한다. 이 두 그림 결과는 먼저 정성적으로 서로 동일하다는 것을 알 수 있다. 제트 펌프 사용으로 유량이 일반구동 펌프유량의 1.5~2 배로 증가할 수 있지만 복합펌프 체제의 양정력 (pumping power) 은 제트 펌프 사용으로 인하여 오히려 감소하게 된다. 또한 펌프되는 유량이 최대가 되는 구동흐름과 유도흐름의 면적비가 존재하는데 이는 제트 펌프의 입구압력에 따라 달라지는 것을 알 수 있다.

그림 7은 일반구동 펌프의 발달 수두 Dh<sub>pp'</sub> 변화에 따른 성능인자간의 변화 상관성을 분석한 것인데 As/A<sub>p</sub> 가 1 및 2인 경우이다. 그림에서 부호 “:” 다음의 숫자는 As/A<sub>p</sub> 의 값을 표시하며 일반구동펌프 수두는 앞 그림의 DH'30 과 같이 제트펌프 입구의 구동흐름 속도 수두로 무차

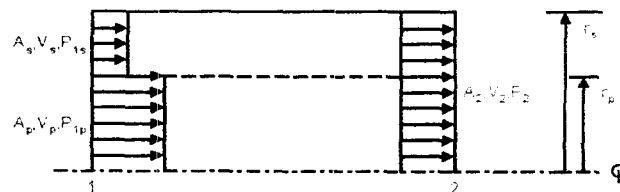
원화된 값이다. 이 그림에서 무차원 발달수두의 증가에 따라 여러 성능 지수가 감소하는데 이는 구동펌프의 발달수두의 값이 0.79MPa로 고정되어 있으므로 수평 좌표축인 무차원 발달 수두의 증가는 제트 펌프 구동흐름의 속도 즉, 제트 펌프의 구동 유체의 속도가 감소하게 되어 구동흐름과 유도흐름간의 운동량전달 정도가 감소하게 되기 때문이다.

#### 4. 결론

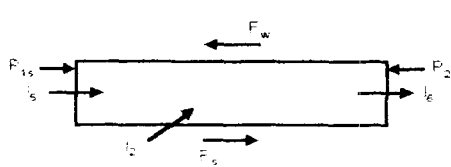
제트 펌프를 일반구동 펌프와 결합시켜 사용하는 경우의 작동 기본특성을 일차원 모형을 사용하여 분석하였으며 이 결과 나타난 주요한 사항은 다음과 같다. 1) 제트 펌프의 일반적인 작동조건도가 작성되었으며 2) 바람직스러운 작동영역이 조건도에서 단순하게 정의되지 않으므로 제트 펌프의 원활한 작동을 위하여는 제트 펌프의 기하 형태와 작동조건에 대한 세심한 검토가 요구된다. 3) 제트 펌프는 일반적으로 제트 펌프입구에서 구동유체인 구동흐름과 유도흐름간의 압력 수두차이를 구동흐름의 속도수두 이하로 낮추어 가동시키는 것이 필요하다

#### [참고문헌]

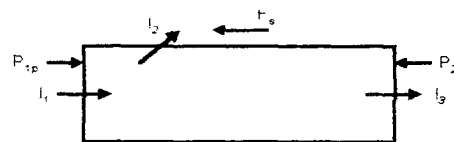
1. Kudirka,A.A.,Gluntz,D.M.,"Development of Jet Pumps for Boiling Water Reactor Recirculation Systems", Tans. ASME,J. Eng. for Power, pp7-12, January 1974
2. Liao, L.Y., "Study and Application of Boiling Water Reactor Jet Pump Characteristics", Nucl. Eng. and Design, 132 pp339-350, 1992
3. Sabersky,R.H.외 2인, "Fluid Flow: A First Course in Fluid Mechanics", Macmillian Co., U.S.A., 1971
4. Goggin,P., Morba,M., Hamilton,M.,"Ejector Experiment"(학부생 유체역학 실험보고서), Univ. of Michigan, U.S.A., 1980



가) 주흐름과 부흐름 전체의 대상체적



나) 부흐름의 대상체적



나) 주흐름의 대상체적

그림 1 운동량 정리가 적용되는 대상체적 (control volume)

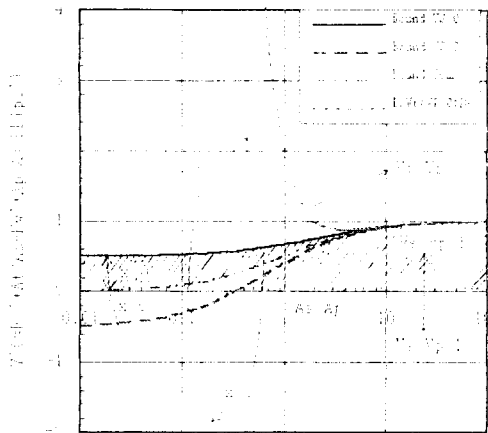


그림 2 제트펌프의 작동조건도

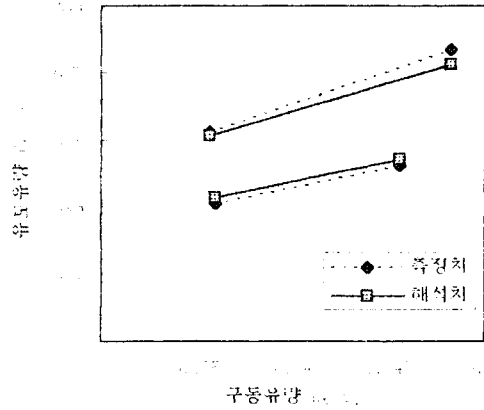


그림 3 압축공기에 의하여 구동되는 제트펌프 유량의 측정값과 계산값의 비교

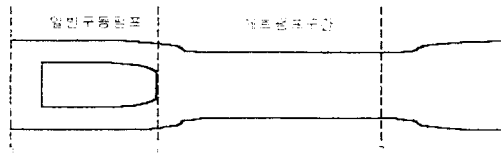


그림 4 일반구동펌프와 제트펌프의 복합체계

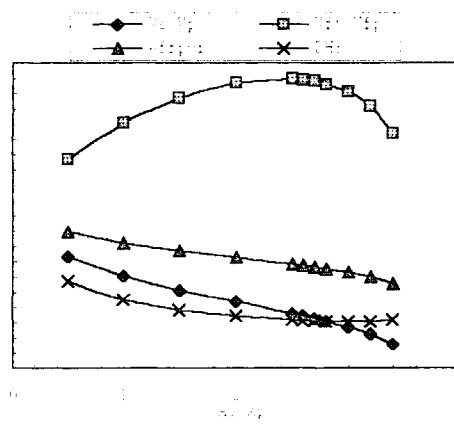


그림 5 구동흐름과 유도흐름 유로면적비와 성능인자 비교

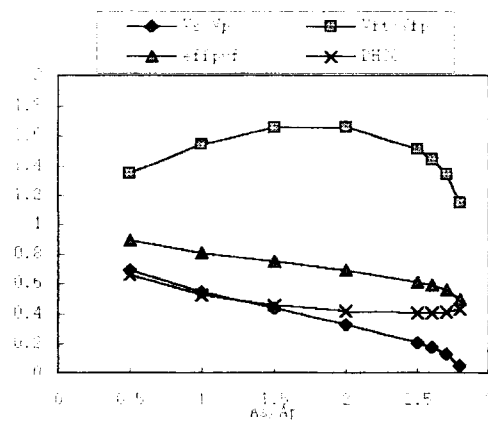


그림 6 구동흐름과 유도흐름 유로면적비와 성능인자 비교

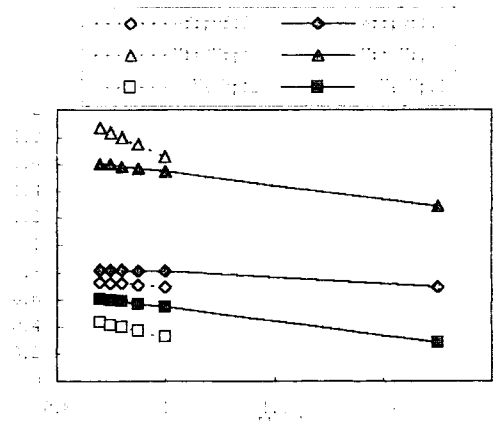


그림 7 구동펌프의 무차원화된 발달수두와 복합체제의 펌프 성능인자