

수치해석을 이용한 액체용 Ejector 성능진단 기법

김범신* · 장석원** · 정훈***

Diagnosis of Liquid Ejector Performance with Numerical Analysis

Bum-Shin Kim, Suck-Won Jang, Hoon Jung

Key Words: Liquid Ejector(액체용 이젝터), Diagnosis of performance(성능진단기법), Numerical Analysis(수치해석), Performance Degradation(성능저하), Operating Condition(운전조건), Center-drive Jet Pump(중심 분류형 제트 펌프)

Abstract

Liquid ejector is widely used for power plant water pump, marine pump and transportation of solid materials. It has high working confidence and simple configuration. However, It is not easy to know performance degradation of ejectors in field. When the geometry of ejector is complicate, the diagnosis of faults is required more skillful method without disassemble. This paper gives numerical method to predict cause of 45 ° slurry suction ejector performance degradation.

기호설명

A : 면적(m²)
 d : 직경(m)
 g : 중력가속도(m/s)
 h_f : 손실수두(m)
 k : 손실계수
 M : 유량비
 N : 압력비
 P : 정압(N/m²)
 R : 면적비
 Q : 유량(m³/s)
 V : 속도(m/s)

아래첨자
 j : 제트
 s : 흡입(suction)
 e : 출구
 i : 입구
 t : 목부

그리스문자

θ : 각도(degree)
 η : 효율(%)

* 한전 전력연구원
 ** 한전 전력연구원
 *** 한전 전력연구원

1. 서론

액체용 이젝터(liquid ejector)는 기름, 물 등의 액체를 구동유체로 하며 구조가 간단하고 운전 신뢰성이 높을 뿐 아니라 고형물과 액체의 혼합 상태의 슬러리(slurries)이송도 가능하다. 또한 동력원과 분리되어 있기 때문에 설치에 있어서 제약도 적다. 이와 같은 장점으로 인하여 액체용 이젝터는 선박용 및 발전용, 화학용 설비의 구성 장치로 이용되어지고 있다.

이젝터의 종류는 구동유체(primary fluid)인 고압유체의 분사위치에 따라 분사노즐이 이젝터의 중심부에 위치한 중심 분류형 이젝터(center-drive ejector)와 구동유체가 외주에 있고 흡입유체가 중심부에 있는 환형 이젝터(annular-drive ejector)가

있다. Fig. 1은 중심 분류형 이젝터와 환형 이젝터의 장치구성을 나타내었다.

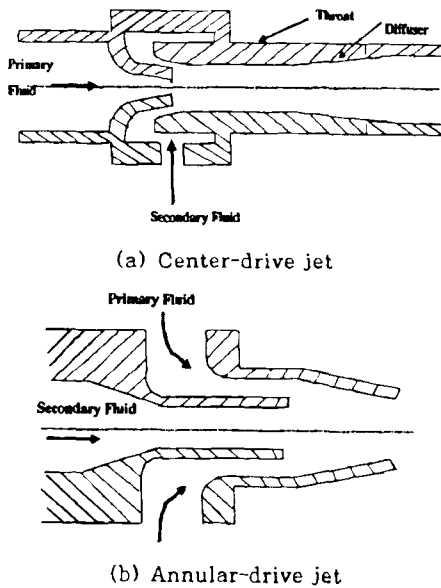


Fig. 1 Configuration of center-drive jet and annular-drive jet

환형 이젝터는 보통 입자가 큰 고형물의 이송에 적합하고 중심 분류형 이젝터의 경우 작은 입자의 고형물이나 슬러리에 적합한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 발전설비에 슬러리나 오, 폐수 등을 이송하는 장치로 중심 분류형 이젝터가 널리 쓰이고 있으며 흡입유체(secondary fluid)의 흡입형상에 따라 여러 가지 종류로 나뉘어 진다. 본 논문에서는 이 중 보일러의 오, 폐수 이송장치로 널리 사용 중인 중심분류형 이젝터를 연구 대상으로 하며 특히 제작이 간단하고 양호한 이차측 유체 흡입면적을 보유하는 45° 이차측 흡입관을 갖는 이젝터의 성능특성을 고찰하여 현장에서 일어날 수 있는 이젝터의 성능저하를 예측 분석하고자 한다.

현장에서 오, 폐수 등의 이송은 Fig. 2와 같은 장치구성을 통해 이루어진다. 고압수 펌프를 통해 가압된 이차측 유체가 이젝터 내부의 고압수 노즐을 통과하며 고속의 제트흐름으로 변화하여 이차측 유체를 흡입하고, 이젝터 내부의 디퓨저를 통해 일정압력으로 송압된 후 별도의 저장장치로 오, 폐수를 이송한다. 이때 이젝터의 운전상

태를 감시하기 위해 이젝터 전·후단에 압력계를 설치한다. 정확한 이젝터의 성능감시를 위해서는 유량계가 필요하나 이송하는 액체에 포함된 고형물의 영향으로 적절한 이젝터를 설치하기 어렵기 때문에 유량계 설치는 곤란하다. 그러나 구동유체와 이젝터 출구의 혼합유체의 유량을 계측하지 않고 현장의 압력계만으로 이젝터의 운전상태를 예측하는 것은 복잡한 수식을 풀어 이젝터의 유량을 계산해야 하기 때문에 현장에서 즉각적으로 이젝터의 운전상태를 진단하는데 문제가 있다.

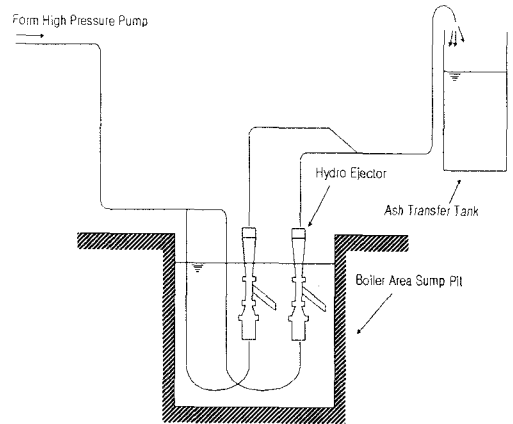


Fig. 2 Boiler Area Sump Ejector System

본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하기 위하여 현장의 압력계에 의한 운전자료를 이용하여 PC를 통해 간단히 이젝터의 성능을 예측할 수 있는 전산프로그램을 개발하고 이를 이용하여 현장에서 이젝터 성능의 변화가 발생했을 때 적절한 정비대책을 세울 수 있는 방법을 제시하고 한다.

2. 작동원리 및 이론해석

2.1 작동원리

이젝터의 작동원리는 Fig. 2에서와 같이 고압의 구동유체가 노즐을 통과하면서 고속의 제트흐름(jet flow)을 만들어주며 이차측 유체와 목(Throat)에서 합류한다. 목에서 합류된 구동유체와 이차측 유체는 노즐을 통과하면서 얻어진 구동유체의 운동량을 이차측 유체의 정압상승으로 변환시키며 디퓨저를 통해 이젝터 외부로 배출된다.

일반적으로 연구된 바에 의하면 노즐을 통과한 구동유체의 운동에너지가 이차측 유체의 압력에

너지로 변화되는 효율은 30% 이내로 알려져 있다.

2.2 이론해석

Fig. 3은 이젝터 내부의 유동현상 이해를 위해 유동구역별로 이젝터를 나타내었다.

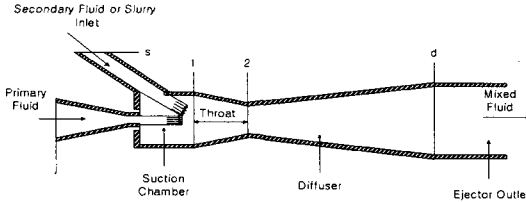


Fig. 3 Schematic diagram of liquid ejector

고압수 분무노즐을 통과한 제트흐름이 흡입실을 고속상태로 통과하며 목(Throat)에서 이차측 유체 흡입관을 통해 유입된 이차측 유체와 혼합된다. 혼합과정에서 제트흐름의 운동량이 압력으로 전환되어 목 출구에서 혼합수의 압력을 상승시키고, 이후 디퓨저를 통하여 별도의 저장장치로 이송된다. 이때 목에서 운동량에 관한 관계식을 다음과 같이 적용할 수 있다.

$$\rho Q_s V_s \cos\theta + \rho Q_j V_j + P_1 A_1 = \rho(Q_s + Q_j)V_2 + P_2 A_2 + \rho g A_2 h_m \quad (1)$$

여기서 A_1 은 목 입구 단면적, p_1 은 이차측 유체와 제트가 혼합하기 전 목 입구압력, p_2 는 목에서 제트흐름과 이차측 유체가 혼합 후 압력이고 Q_s 은 이차측 유체의 유량, V_1 은 이차측 유체의 속도, Q_j 는 제트흐름의 유량, V_j 는 제트흐름의 속도, V_2 는 혼합수의 속도이다. $\cos\theta$ 는 이차측 유체 흡입관과 제트흐름이 이루는 각도의 코사인값이고 g 는 중력가속도 h_m 은 목에서 혼합과정에서 발생하는 손실이다. 혼합과정에서 발생하는 손실은 손실계수(Loss of Coefficient)를 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_m = \frac{V^2}{2g} k_m \quad (2)$$

한편 노즐을 통과하는 고압수 흐름은 그림 3에서 단면 1과 단면 j 사이의 관계에 의해 정의되며 베르누이 방정식을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_j}{\rho g} + \frac{V_j^2}{2g} = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + h_n \quad (3)$$

여기서 h_n 은

$$h_n = \frac{V^2}{2g} k_n \quad (4)$$

와 같으며 손실계수 k_n 은 노즐의 수축각도에 따른 실험결과에 의해 결정된다. 그리고 슬러리 흐름에 대해서는 단면 1과 단면 s 사이의 관계에 의하며

$$\frac{P_s}{\rho g} + \frac{V_s^2}{2g} = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + h_p \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있으며 이때 흡입 파이프에서 손실수두는 다음과 같은 Hagen의 식에 의한다.

$$h_p = \frac{\Delta p}{\rho g} \approx \frac{1}{\rho g} 0.241 L \rho^{3/4} \mu^{1/4} d_s^{-4.75} Q_s^{1.75} \quad (6)$$

목을 통과한 혼합수는 디퓨저를 통해 이젝터 출구로 빠져나가며 이때 출구흐름은 단면 2와 단면 d 사이의 관계에 의하며

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{P_d}{\rho g} + \frac{V_d^2}{2g} + h_d \quad (7)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 h_d 는 디퓨저를 통과하는 흐름의 손실수두이고 손실계수 k_d 는

$$k_d = 1 - \frac{d_2^4}{d_d^4} - C_p \quad (8)$$

$$C_p = \frac{P_d - P_2}{\frac{1}{2} \rho V_2^2} \quad (9)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

이젝터의 효율계산식은 다음과 같다.

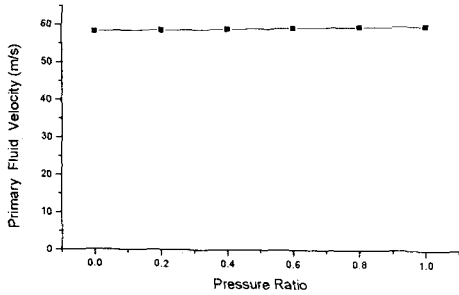
$$\eta = \frac{Q_s (P_d - P_s)}{Q_j (P_j - P_d)} \quad (10)$$

3. 수치모사

3.1 모사방법

(1)식에서 (10)식까지 고찰하면 이젝터 입구와 출구의 압력, 노즐의 형상, 이젝터 내부 디퓨저의 형상 그리고 이차측 유체 흡입구의 형상자료를 입력자료로 하여 (1)식에서 (10)식까지 연립하여 하나의 방정식을 구성할 수 있다. 이때 변수는 이젝터 목 입구압력 P_1 으로 유일하다. 그러나 실제 노즐의 유량을 결정하는 (3)식에서 P_1 과 이차측 유체의 유량을 결정하는 (5)식에서 P_1 은 같지 않을 수 있다. 상태 1에서 제트흐름과 이차측 유체흐름이 혼합을 시작하지만 이때 제트흐름의 압력과 이차측 흐름의 압력은 일치하지 않을 수 있기 때문이다. 상태 1을 물리적으로 고찰하

면 제트흐름의 고속으로 인한 이젝터 목 입구압력이 이차측 유체 입구압력보다 낮아져서 이차측 유체의 흐름이 형성된다. 따라서 상태 1에서 제트흐름의 압력은 이차측 유체의 압력보다 낮음을 예측할 수 있다. Fig. 4는 상태 1에서 제트흐름의 압력변화에 대한 제트흐름 속도변화를 나타내었다.



여기서 압력비는 $r = \frac{P_s - P_j}{P_s}$ 로서 P_s 는 상태 1에서 이차측 유체의 압력이고 P_j 는 상태 1에서 제트흐름의 압력이다. 압력비가 '0'일 때는 상태 1에서 이차측 유체흐름의 압력과 제트흐름의 압력이 동일할 때 이고, 압력비가 '1'일 때는 제트흐름의 압력이 절대압력 '0'일 때를 의미한다. 제트흐름의 압력은 물리적으로 '0'압력 이하로 내려갈 수 없다. Fig. 4는 압력비가 0에서 1까지 변화할 때 제트흐름의 유량변화가 거의 없음을 나타낸다. 따라서 상태 1에서 제트흐름 측의 압력과 이차측 흐름의 압력은 동일하다고 가정할 수 있다.

(1)식에서 (13)식의 연립방정식은 수치적 방법 중 Newton-Raphson 방법과 Fixed Point 방법을 사용하면 효과적으로 계산이 가능하다. Fig. 5는 수치계산 프로그램의 계산흐름도 이다.

3.2 모사결과 및 비교

45° 이차측 유체흡입관을 갖는 오펜수 처리용 이젝터는 현재 현장에서 사용중이며 그에 대한 상세한 제원은 다음과 같다.

- Type : Hydraulically Powered, Vertical
- Quantity : 2 For Unit
- Size : 80 mm × 100 mm
- Maximum Solid Size : 75 mm
- Flow Rate
 - Nozzle Water : 143.1 m³/hr
 - Slurry : 181.7 m³/hr

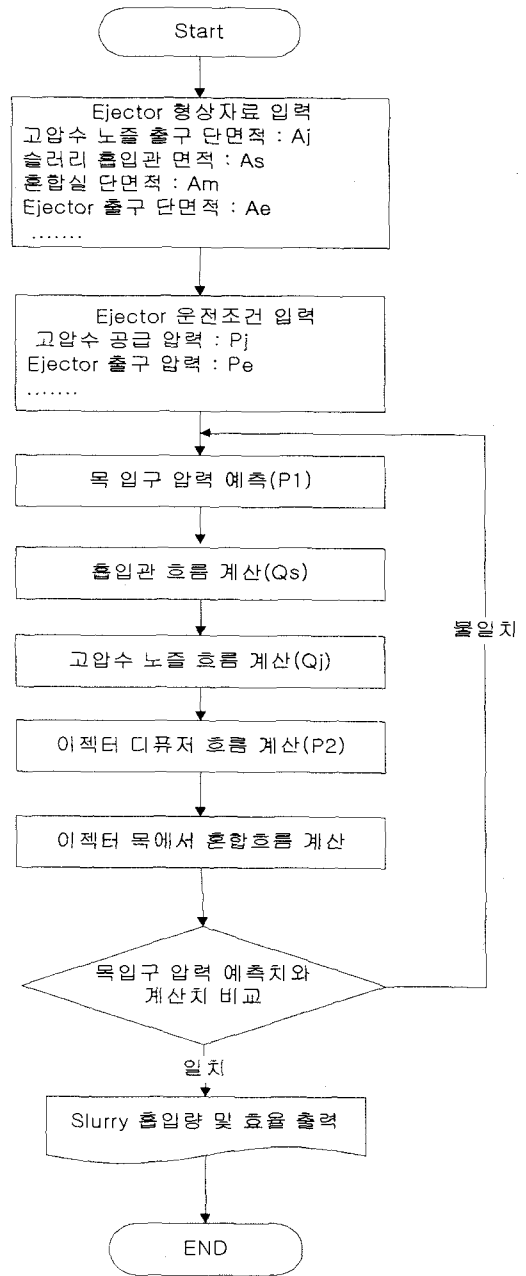


Fig. 5 Program flow chart

현장에 운전 중인 이젝터는 고압수 입구와 이젝터 출구 측에 각 1개씩 압력계가 설치되어 있다. 정상 운전 중 압력과 이를 입력자료로 계산된 고압수 및 이차측 유체의 유량과 설계유량을 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 고압수 유량은 설계치와 2.8%, 이차측 슬러리 유량은 1.6% 그리고 효율은 1% 오차

항목	설계치	계산치	비고
고압수 유량(m ³ /hr)	143.1	139.07	측정치 140
슬러리 유량(m ³ /hr)	181.7	178.68	
효율(%)	28.6	28.9	

Table 1 Comparison of calculated flow and design flow

를 나타내고 있다. 그리고 고압수 측에 정밀한 초음파 유량계를 이용하여 유량은 측정된 결과 시간당 140 톤의 유량을 계측하였으며 이는 오히려 설계치보다 계산치에 근접함을 나타내었다.

3.3 모사프로그램을 이용한 진단사례

○ 개요

발전용 오페수 이송장치로 사용되는 이젝터 4기 중 3기에 성능저하 현상이 발생 동일한 양의 오페수 이송에 정상적인 운전시 보다 3배 정도의 시간이 더 소모되었다. 지속적으로 생성되는 오페수량 보다 이송량이 적을 경우 발전설비 운전 에 지장을 초래하게 되어 이젝터 성능저하의 원인과 정비대책을 위해 모사프로그램을 사용하였다.

○ 현상

성능이 저하된 이젝터는 설치 시부터 정상운전 중인 이젝터에 비해 오페수 이송능력이 떨어지는 상태였고 오페수 생성량이 증가함에 따라 문제가 심각성이 드러났다. 설치 이후부터 고압수 운전 압력이 두 차례에 걸쳐 바뀌었으며 성능회복을 위해 배관에 설치된 유량제어용 오리피스도 제거되었다. 이젝터의 고압수 입구압력은 정상 운전 중인 이젝터와 동일하고 출구압력은 1/2 정도로 낮았다.

○ 수치모사

모사결과 동일한 고압수 압력과 설계자료를 이용하여 계산을 수행하면 이젝터 효율은 한계값 30%를 초과하게된다. 계측기는 점검결과 정상이었으므로 이젝터 고압수 노즐의 설계자료에 이상이 있다고 판단하고 노즐출구의 직경을 변화시키며 수치모사를 수행하였다. 대략 단면적이 50% 정도 감소된 상태에서 동일한 운전압력을 만족시킬 수 있었다. Fig.6은 단면적 50% 내외에서 이차측 유체와 일차측 고압수 유량비 계산결과이

다. 이때 이차측 유량은 설계상태의 1/3 정도로 폐수 이송시간이 3배정도 더 소모되는 것과 일치함을 발견할 수 있었다.

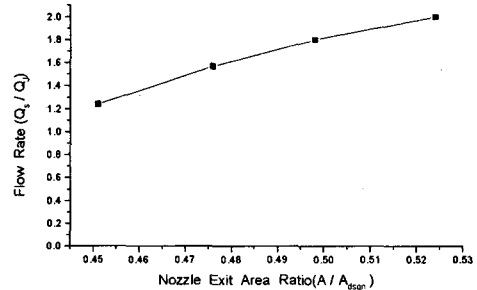


Fig. 6 Flow rate vs. Nozzle exit area ratio

4. 결 론

발전설비 오페수 이송에 사용되는 45° 이차측 유체 흡입관을 갖는 액체용 이젝터의 성능을 모사하는 프로그램을 작성하여 이젝터의 정상 및 비정상 운전상태를 예측하고자 하였다.

- 정상운전상태에서 이젝터 입구 및 출구의 압력계만을 이용하여 고압수 및 이차측 유량을 계산한 결과 설계치에 근접하였으며 고압수 유량은 측정치와 거의 일치하였다.
- 비정상 운전상태에 대해 동일한 방법으로 계산을 수행한 결과 노즐출구 직경을 감소시켜서 운전압력을 만족시키는 유량을 계산하였고 현장의 고장현상과 일치하였다.
- 액체용 이젝터의 수치적방법을 이용한 성능진단결과를 토대로 현장에 적용 성능이 저하된 이젝터의 성능을 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

- (1) Frank M. White, 1986 "Fluid Mechanics", McGRAW-HILL pp287~pp371
- (2) 김경근, 김명환, 홍석균, 고상길, 1988 "액체용 이젝터 성능에 관한 CAD와 실험결과와의 비교", 대한기계학회논문집 제 12권
- (3) 권오봉, 오병화, 이천근, 1998 "고형물 이송용 환형 제트펌프의 특성" 대한기계학회 추계학술대회논문집 pp882~888
- (4) Curtis F. Gerald, Patrick O. Wheatley, 1994, "Applied Numerical Analysis", Addison-Wesley