

### 증기터빈에서의 제어밸브에 관한 특성 고찰

육심균, 서중석, 조창호, 최인규\*  
한국중공업 기술연구원, 전력연구원 발전연구실\*

### Analysis of Control Valve Characteristics in a Steam Turbine

Sim-Kyun Yook, Jung-Surk Sur, Chang-Ho Cho, In-Kyu Choi  
Hanjung R&D Center, KEPRI

Abstract : In this paper, we are going to explain the operation principles of steam control valve, governing equation of compressible and incompressible fluids and flow characteristic according to plug(disc) types. Governer and the relation of main steam pressure to flow and main steam will also be explained.

특징은 신호 변환 및 조작이 용이하고 정확도가 높은 장점이 있다.

#### 1. 서론

발전소 터빈 제어 계통에 있어 증기 밸브는 정상 운전 시 터빈에 유입되는 증기량을 조절하여 터빈 속도를 일정하게 유지하고, 터빈에 과속도 혹은 이상상태가 발생하면 신속히 증기를 차단하여 터빈을 보호하는 기능을 담당하고 있다. 이와 같이 터빈 제어 계통에서 사용되고 있는 밸브는 일반적으로 제어기로부터 받은 신호에 의해 단순히 개폐기능만 하는 차단밸브와 조속제어를 하는 제어밸브로 대별되고 보조적으로 블로우 다운 밸브, 배기 밸브 등과 같은 종류가 있다.

본 논문에서는 터빈 제어 계통에서 사용되고 있는 증기 제어밸브(Steam Control Valve)의 동작원리, 비압축성 및 압축성 유체에 대한 유량관계식, 밸브형태에 따른 유량 특성, 조속장치의 종류 및 방법, 그리고 터빈 주증기 조절밸브 개도가 일정할 경우 주증기 압력과 유량 및 출력과의 관계 등에 대해 소개하고자 한다.

#### 2. 본론

##### 2.1 제어 밸브 동작 원리

터빈 조속장치 중 전기식 조속기는 터빈 회전수에 의하여 속도감지기의 자력이 가감되는 전기적 회로를 이용하는 조속기로서 그림 2-1과 같이 구성되어 있으며, 주파수 변화에 따라 서보밸브의 전기자 전류가 증감되어 제어유에 의해 주증기 조절밸브의 개도를 조정한다. 터빈 회전수에 비례하여 변하는 펄스형 주파수를 정적 주파수와 비교하여 실제 속도와의 차이를 검출, 속도 정정 신호를 만들어 제어유 압력으로 변환시켜 밸브를 조절한다.

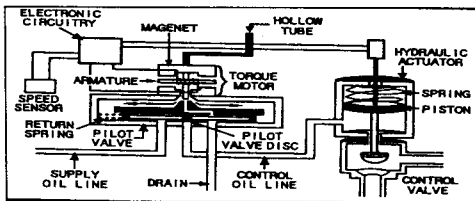


그림 2-1 전기식 조속기 동작원리

전기식 조속기도 속도변화의 전기적 신호가 기계적 신호로 변환된 뒤, 결국 제어유 압력변화에 의한 구동장치의 위치변화로 증기 조절밸브를 조절한다. 이 형식의

##### 2.2 유량산출식

(1) 비압축성 유체(Incompressible fluid)

베르누이(Bernoulli)의 정리는 관속에 흐르는 유체에 대한 에너지 보존 법칙을 적용시킨 것으로 비압축성 유동에서 에너지는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_L \text{-----(1)}$$

여기서, Z: 위치,  $V^2/2g$ : 속도, P/r : 압력,  $h_L$ : 손실 수두항이다. 그림 2-2는 오리피스관 내에서의 유체 유동현상을 보여주고 있으며 유체가 넓은 파이프로서 좁은 밸브나 좁은 유로(Vena contracta)를 통과할 때는 유속은 빨라지며 좁은 유로를 통과한 유체는 다시 속도가 느려지고 압력은 회복된다. 회복되지 않은 압력부분은 마찰에 의한 마찰열(Internal energy)로 바뀐다.

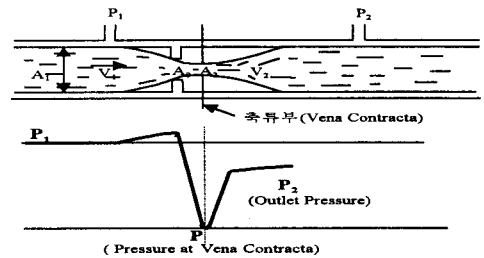


그림 2-2 오리피스관 내에서의 유체 유동

그림 2-2에서  $A_1, A_0, A_2$ 를 관입구, 오리피스, 수축부 면적이며,  $P_{VC}$ 를 오리피스 상류측 압력으로 두고 이때에 유속을  $V_1, V_2$ 라 하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_{VC}}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \text{-----(2)}$$

유체의 마찰을 무시할 때 오리피스 상류측과 수축부 사이에는 다음과 같은 베르누이식이 성립한다. 관내에 흐르는 유체의 용적량을  $q$ 라 하면 식(3)과 같다.

$$q = \frac{A_2 \sqrt{2g(P_1 - P_{VC})}}{\sqrt{\gamma \left[ 1 - \left( \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \text{-----(3)}$$

식(3)은 이론적인 유량 계산식이 되나 실제적으로

유체는 수축부의 면적이 오리피스 면적보다 작고 마찰로 인하여 속도도 늦어진다. 여기서 수축계수(c)와 밸브압력회복계수(F<sub>L</sub>) 등을 고려하여 재 정리하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \frac{cFA_0}{F_L} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta P} \quad (4)$$

여기서 밸브용량계수, 레이놀즈수, 배관수정계수 등을 고려하여 유량을 나타내면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = 0.856 C_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{G}}, C_v = 1.168 q \cdot \sqrt{\frac{G}{\Delta P}} \quad (5)$$

## (2) 압축성 유체(Compressible Fluid)

### 가) 팽창계수(Y)

액체는 비압축성 유체인데 반하여 기체, 증기는 압축성 유체이며 압력이 낮아지면 분자간의 간격이 커져 체적이 팽창한다. 이것은 밸브에서 입구측 면적보다 수축부의 면적이 작아 유속은 빨라지고 압력은 떨어지며 비중량이 작아져 결과적으로 팽창하게 되는데 이 때문에 액체의 유량계산식을 그대로 사용할 수 없으며 이를 보정하기 위해서는 액체식에 기체의 팽창계수(Y)와 압축계수(Z)를 보정하지 않으면 안된다.

### 나) 압축계수(Z)

완전 가스상태일 때의 공기, 질소, 산소 등의 압축계수(Z)를 1로 할 때, 실제 기체는 압축계수(Z)가 기체에 따라서 0.5~1.5 범위내에 있다. 공기에 대한 표준상태일 때의 기체 비중과 분자량 등을 고려하면

$$q = N_4 \cdot F_P \cdot C_v \cdot P \cdot Y \sqrt{x \cdot \frac{R}{M \cdot T_1 \cdot Z}} \quad (6)$$

과 같다. 여기서, T<sub>1</sub> : 밸브 입구측에서 기체의 온도(K), N<sub>4</sub> : 상수, M : 기체 분자량, x : 차압비(무차원)

## 2.3 밸브형태에 따른 유량 특성

밸브는 그 형태에 따라서 유체의 저항이 다르므로 흐르는 유체의 유동특성도 다르다. 밸브 형태는 크게 Gate, Globe, Ball, Butterfly, Diaphragm, Check, Digital Valve 등으로 구분할 수 있으며 각각의 사용 용도 및 조건에 따라 장단점이 있다. Globe밸브는 유체의 양을 조절하는 대표적인 밸브로서 Seat나 Disc의 손상을 최소화하고 유량을 미세하게 조절할 수 있으며 고온 고압의 유체 제어 밸브로 널리 이용되고 있다.

밸브내에 유량을 개폐하거나 조절하는 역할을 하는 것을 Globe 밸브에서는 플러그(plug)라 한다.

### 1) 유량 특성(Flow Characteristic)

밸브의 유량(유출)특성은 밸브의 개도(%)에 따라 변화하는 유량의 변화 곡선을 의미하며, 고유유량특성(Inherent Flow Characteristic)과 유효(설치)유량특성으로 구분할 수 있다. 대표적인 특성곡선으로는 그림 2-3에서 알 수 있듯이 세가지가 있다. 이러한 유량특성은 일반적으로 밸브의 종류에 따라 고유의 특성을 가지고 있으며, 유체를 조절하는 plug(disc), orifice, cage의 모양에 따라 서로 다르다. 그래서, 유량특성을 밸브특성 또는 C<sub>v</sub>특성이라고도 부른다.

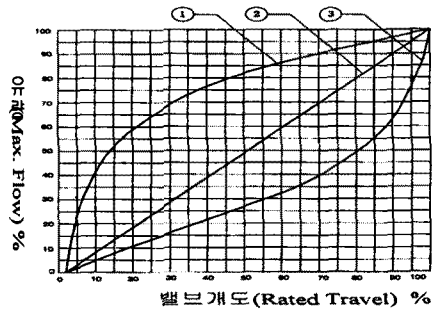


그림 2-3 밸브 고유 유량 특성 곡선

### 2) 밸브유량특성 곡선의 수학적 표현

제어밸브의 크기를 결정하는 설계식은 식(7)과 같이 밸브의 개도(x)와 밸브의 용량(크기)를 나타내는 상수인 C<sub>v</sub>에 의해 유량(q)을 구할수 있도록 되어있다.

$$q = C_v \cdot f(x) \sqrt{\frac{\Delta P}{G}} \quad (7)$$

여기서, f(x) : 밸브의 유량특성  
 밸브 크기의 결정은 밸브의 유량특성과 관계가 있으며 주로 사용되는 세가지 유량특성(그림 2-3참조)은 밸브 전·후의 압력이 일정할 때, 다음과 같이 표현된다.

- ① Quick Opening(빠른 열림) :  $f(x) = \sqrt{x}$
- ② Linear(선형) :  $f(x) = x$
- ③ Equal Percentage(등비율) :  $f(x) = R^{(x-1)}$

여기서 R은 최대제어유량/최소제어유량으로 밸브의 유출범위(Rangeability)에 대한 고유상수이다.

### 3) Plug(Disc) 형태에 따른 유량 특성

① Quick Opening(빠른 열림) : 처음 열릴때는 유량 변화가 심하고 끝부분에서는 거의 변하지 않는 형태로 밸브포트 구경의 1/4만 열려도 완전개방된 것으로 유량이 흐른다. 그리고 밸브를 통과하는 최대유량을 급속히 얻고자 할 때 사용되며 교축 손실이 매우 작으므로 터빈의 유량 제어용 제어밸브로 많이 사용되고 있다. 그리고 전제로 부터 처음 25% 개도에 이르는 동안 밸브를 통과하는 유량이 선형적으로 변하는 곳에 사용한다.

② Linear(선형) : 유량이 밸브 개도에 비례적으로 증가하는 특성으로 주로 액체 수위제어 혹은 일정한 변화를 요하는 곳에 사용된다. 밸브의 압력강하가 계통 압력 강하의 약 40%이상인 경우나 프로세스상의 압력강하가 부분변동시에도 불변인 경우 등 수위제어에 적합하다.

③ Equal Percentage(등비율) : 유량의 변화가 바로 변화직전의 플러그 위치에서의 유량에 지수적으로 비례하여 변하는 특성으로 밸브개도에 대한 기울기 즉,  $df(x)/f(x) \propto \Delta x$ 의 관계를 가지어 밸브 개도의 변화에 따라 유량이 일정한 %(Percentage)로 증가한다.

## 2.4 조속장치의 종류 및 조속 방법

### 1) 조속장치의 기능 및 종류

터빈은 부하 또는 증기상태(압력, 온도)의 변화에 따라 회전속도가 계속 바뀌므로 일정 회전속도를 유지시키고 급격한 부하 변동 및 정지로 인한 터빈 과속을 방지하고 일시에 계통으로부터 분리시키도록 제어하는 기능을 수행하는 장치를 조속장치라 한다. 그리고 조속장치의 종류에는 기계식 조속기(Mechanical Hydraulic Control), 유압식 조속기(Oil Hydraulic Control), 전기식 조속기(Electro Hydraulic Control) 등이 있다.

2) 조속방법 (Governing Method)

터빈 회전속도를 일정하게 유지하는 조속방법에는 증기를 교속하여 압력을 조절하는 교속 조속법과 증기유량을 조절하는 노즐 조속법이 있다.

가) 교속 조속법(Throttle Governing Method)

주증기 정지밸브를 모두 열고 주증기 조절밸브를 교속 밸브로 사용하여 터빈에 유입되는 증기량과 압력을 변화시켜 속도조절을 행하는 방법이다.

나) 노즐 조속법(Nozzle Governing Method)

노즐 조속법은 유량 조속법이라고도 하며 순수 충동단에 주로 사용된다.

다) 조합 조속법(Combined Governing Method)

이 방식은 기동시 터빈의 열응력을 경감시키고, 기동 시간을 단축시켜 주며, 부하 변동에 따라 발생하는 터빈 축의 열응력 발생이 감소하므로 부하가 빈번하게 변동하고 기동 및 정지 횟수가 많은 급속 기동용 터빈에 적합하다.

라) 전주분사 기동장치(Full Arc Admission, FA)

기동 및 터빈 롤링(Rolling)시 주증기 조절밸브를 전개(Full Open)하고 주증기 정지밸브 내부의 바이패스 밸브로 증기량을 조절하는 방식이 있다. 이 방식은 터빈을 일정하게 가열하고 온도변화를 감소시켜 국부적인 열응력 발생을 최소화시킨다.

마) 부분분사 방식(Partial Arc Admission, PA)

터빈이 일정 출력 이상 되면 주증기 정지밸브를 전부 열고 주증기 조절밸브로 증기량을 조절하는 운전방식이다. 터빈 부하에 따라 주증기 조절밸브의 열리는 개수를 조절하여 터빈에 증기를 부분적으로 유입시킨다.

2.5 터빈에서의 유량특성

일반적으로 유량과 압력과의 관계식은 식(7)과 같이 표현되나 터빈의 주증기 조절밸브 개도가 일정할 경우 주증기 압력과 출력과의 관계를 살펴보자. 터빈은 여러 개의 단으로 구성되어 있지만 증기 압력의 변동에 의해 성능이 변하는 단은 고압 첫 단과 저압의 마지막 단이며, 주증기 조절 밸브개도 일정할 경우 주증기 압력과 터빈에 들어가는 증기 유량과의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다. 즉, 일반적으로 터빈은 노즐의 연속으로 생각할 수 있기 때문에 이에 따라 터빈을 지나는 증기의 양은 노즐을 지나는 유체의 속도에 대한 식, 에너지 보존 법칙으로부터 아래식과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{C_v} e(\rho dV) + \int e(\rho V \cdot dA)$$

이것에 의해 유도된 노즐을 통과한 유체의 속도( $V_2$ )는  $V_2 = \sqrt{2(H_1 - H_2)}$  이 되며 이상기체(Perfect Gas)의 엔탈피 식,  $H = C_p T$ 와 등 엔트로피 팽창(Isentropic expansion) 방정식  $pv^k = C$ , 그리고 이상기체 방정식,  $pv = RT$ 로부터  $V_2$ 를 구하면 식 (8)과 같다.

$$V_2 = \sqrt{2ghC_p \sqrt{T_1(1 - (T_1/T_2))}} \\ = \sqrt{2ghC_p \sqrt{T_1(1 - \gamma^{(k-1)/k})}} \quad \text{-----(8)}$$

여기서  $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{k-1/k}$  및 정압비를 비열비의 관계식으로 전개하면 유량 Q는 식(9)와 같다.

$$Q = A \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{v_1} \sqrt{\gamma^{2k} - \gamma^{(k+1)/k}}} \quad \text{-----(9)}$$

노즐을 지나는 유량은 입구측의 압력  $P_1$ 에 비해하고 온도  $T_1$ 의 제곱근에 반비례한다. 또  $(\gamma^{2/k} - \gamma^{(k+1)/k})^{0.5}$

에도 비례관계에 있지만 만약 압력비가 일정하게 유지된다면 상수항이 되므로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Q = AK \sqrt{\frac{P_1}{T}} \quad \text{-----(10)}$$

여기서 노즐의 면적이 문제되지만 일단 유량이 결정되면 면적은 거의 영향을 끼치지 못하므로 유체의 온도가 일정하다면 압력  $P_1$ 은 유량 Q에 정비례한다. 즉,

$$Q = K_1 \sqrt{\frac{P_1}{T}} = K_2 \sqrt{\frac{P_1}{v_1}} \quad \text{-----(11)}$$

식(11)과 같다. 앞서 언급했듯이 터빈은 노즐의 연속으로 볼 수 있기 때문에 다음 그림 2-4와 같이 간단한 시스템으로 나타낼 수 있다. 이것은 단단계 터빈으로 각 단계 1~5에서의 압력은 통과하는 증기의 양과 다음 단계 오리피스 면적에 따라 달라진다. 증기의 온도가 일정하다고 가정할 경우, 각 단계에서의 압력은 일단 첫 단계에서 유량(혹은 압력)이 결정되면 그에 대해 유일하게 결정되므로 각 오리피스 사이에서의 압력비는 일정하다고 볼 수 있다. 따라서 식(11)을 그대로 적용할 수 있게 된다.

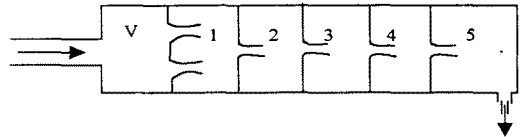


그림 2-4 터빈의 간단한 모델

이것을 기초로 유량 Q와 각 단계에서의 압력을 그래프로 나타내면 그림 2-5와 같다.

터빈에서 증기가 갖고 있는 에너지가 터빈으로 전달되며 이때 전달된 에너지를 알려면 터빈에 들어가는 증기의 엔탈피를 알아야 한다. 엔탈피는 온도와 압력을 알면 증기표로부터 알아낼 수 있는데 2차 과열기의 출구에서의 온도와 압력은 일정하므로 엔탈피도 일정하다.

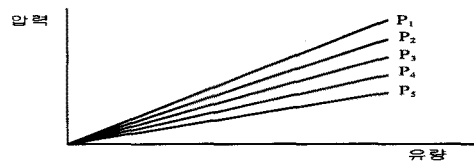


그림 2-5 유량에 대한 각 단계 압력

따라서 유량만 알면 터빈에 전달된 에너지를 알 수 있게 된다. 터빈으로 들어가는 유량은 조속기 밸브로 조절하므로 효과적으로 유량제어를 하기 위해 밸브 면적 A와 유량 Q의 관계를 알아야 한다. 조속기 밸브는 노즐의 형태와 유사한 모양을 하고 있으므로 노즐식 식 (9)를 이용하여 관계식을 구한다. 이상에서는 터빈에 추기가 없는 경우에 대한 고려이지만 실제 추기가 존재하므로 추기에 대한 고려를 하여야 한다. 추기가 존재하는 경우 다음 단계에서의 유량은 적어지므로 압력이 추기가 없을 때 보다 낮아진다. 그리고 추기의 양은  $P_1$ 이 클수록 많아짐을 알 수 있다. 주증기 조절밸브 개도가 일정할 경우 주증기 압력과 터빈에 들어가는 증기 유량간의 관계식은 식(9)식으로 표현할 수 있다. 그리고 터빈 중간 단에서 압력비( $P_2/P_1$ )가 거의 일정하므로  $\gamma$ 와 노즐 면적의 변동을 무시하면

$Q = C_v \times \text{const} \frac{P_1}{\sqrt{v_1}}$  으로 나타낼 수 있으며, 여기서 이상기체 방정식  $p v = RT$  (압력 \* 비체적 = 기체상수 \* 온도)를

$$Q = \text{const} \times P_1 \text{-----} (11)$$

적용하여 풀면 식(11)과 같다. 그리고 터빈 주증기 밸브가 일정하고 복수기 진공도가 일정하다고 가정하면 터빈의 출력 MW는 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$MW = Q \times \frac{1}{\text{HeatRate}} \text{-----} (12)$$

증기유량은 입구증기 압력과 직선적인 비례관계가 있으므로 출력은 주증기 압력과 비례하는 관계를 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

### 3. 결론

터빈 제어 계통에 있어서 증기 밸브의 주요기능은 터빈에 유입되는 증기량을 조절하는 기능과 이상상태 발생시 증기를 신속히 차단하는 기능을 들 수 있다. 터빈 운전에 있어 정확한 밸브의 동작이 이루어져야 터빈제어가 가능하므로 밸브에 대한 폭 넓은 분석 및 특성 파악은 매우 주요한 항목이라 할 수 있다.

본 고에서는 증기터빈에서 증기밸브의 동작원리 및 실제 발전소에서 터빈 제어용으로 가장 많이 사용되고 있는 Quick Open 타입 특징 등에 대해 간략히 알아 보았다. 그리고 터빈의 주증기 조절 밸브의 개도가 일정할 경우 주증기 압력과 유량, 출력과의 관계 등에 대해 간략히 소개하였다.

#### [참고문헌]

1. E. Benjamin Wyle "Fluid Mechanics"
2. Sonntag, Richard Edwin " Thermodynamics Classical & Statistical"
3. A. W. Ordys, A.W.Pike "Modeling and Simulation of Power Generation Plant"
4. Neles-Jamesbury "Control Valve Handbook"
5. 한국전력공사 "보일러 계수 추정에 의한 최적 보일러 제어기 개발"
6. 한국전력공사 " 터빈 운전 실무", 1998