2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 배관내 침적물에 의한 Venturi 측정 유량의 변화에 대한 고찰

# Study on the Effects of the Deposition to the Venturi Flow Measurements

김강훈, 박응준, 박찬오

한전원자력연료㈜
대전광역시 유성구 덕진동 493

## 요약

Venturi를 이용한 유량 측정시 가능한 문제점들을 검토하고 부식물의 침적이나 Fouling 등의 영향에 대해 역학적인 접근을 시도하였다. 유로 내 유동구조의 섭동에 의한 영향을 가시화 하기에는 어려움이 많으므로 기하구조의 변경과 관련된 거시적 변화의 영향을 Venturi 유량식을 근거로 하여 평가하였다.

오차 전파식을 이용하여 상대적 기여도(민감도)를 평가한 결과 방출계수와 Venturi 목 구경에 의한 영향이 다른 항들에 비해 매우 큼을 알 수 있었으며, 이들 변수의 영향을 상세평가 하였다. 상세평가 결과 미세한 침적층이 유량이나 압력 강하량 지시치에 가시적인 영향을 주는 것으로 판명되었다. 한편 유동 단면적의 변화에 따른 방출계수의 변화를 고려할 경우의 유량 및 압력 강하량의 변화 폭을 감소시키는 것으로 확인되었으나, 그 영향은 미미하다.

이러한 현상은 주기 운전 중에 발생하여 주기말로 갈수록 그 정도가 심화될 가능성이 크며 결과적으로 원자로 출력성능에 영향을 줄 수 있다. 따라서 침적층의 거동이나 영향에 대한 적절한 예측모형을 이용하여 입력자료를 보정하거나, 그 영향을 받지 않는 설비를 이용한다면 출력성능의 이상 이탈현상을 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

# Abstract

The review for the various problems on flow measurement with the Venturi and the mechanistic approach to the effects of the erosion product or the fouling deposition on surface have been performed. Since it is hardly to quantify the effect of the agitation of flow structure within pipe due to deposition, the effects of macroscopic variation related to geometric parameters have been evaluated based on the Venturi flow equation.

The error propagation for the Venturi flow equation shows that the errors on the discharge coefficient and the throat diameter are major source of variation/deviation of the measured data. The erosion product or the fouling can lead to variation of those two parameters and the indicated flow rate or pressure drop are to be affected. The variable discharge coefficient model as a function of throat ratio reduces the amount of variation/deviation of flow rate and pressure drop, but its effect is negligible.

The power capability of nuclear power plants may be indicated falsely when the deposition occurs during cycle operation, and can be worse to the later period of the cycle. The severe deviation of power capability can be removed if the input data to power capability are corrected properly with the appropriate prediction model on the behavior of erosion product or fouling. The deposition effect-free device can be alternative to the power capability problems.

## 1. 개 요

Venturi는 Orifice 또는 Flow Nozzle과 같이 Bernoulli의 원리와 연속방정식을 이용하여 체적유량을 측정하는 장치이다. 배관에 흐르는 유동저항으로 발생되는 압력강하량과 체적유량과의 상관 관계가 도출될 수 있으며 그 관계는 각 유량측정 장치의 특성에 따라 달라지게 된다. 그림 1은 세가지 유동측정 장비의 국제표준형태를 보여주고 있다[1]. 일반적으로 Venturi는 그림 2에서와 같이 Orifice 또는 Flow Nozzle에 비해서 작은 수두의 손실(압력강하)을 발생하게 하면서도 정밀한 결과를 측정할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 원자력발전소의 주급수 유량 측정에 널리 사용되고 있다. 주급수 유량은 열평형 법에 의한 원자로 열출력과 일차계통 냉각재 유량 측정에 중요한 변수이다. 그러나 최근 Venturi를 이용한 주급수 유량측정과 관련된 여러 가지 예상하지 않았던 사항들과 심지어 그 효용성까지를 의심하는 의견 등이 보고되고 있다[2,3]. 또한 설치된 Venturi 상수의 재 보정과 관련된 사항이나 배관내의

부식 또는 Fouling 등으로 측정 유량의 편이 가능성이 실질적인 결과와 함께 제기되고 있다[4,5]. 따라서 본 연구에서는 Venturi를 이용한 주급수 유량 측정에서 발생할 수 있는 여러 가지 가능한 문제점들을 검토하고, 주급수 유량의 편이 가능성에 대하여 주급수 유량식 등의 수식을 근거로 하여 역학적인 측면에서 접근하고자 한다.

## 2. Venturi 유량식

그림 1의 (c)와 같은 표준 Venturi의 차압을 이용한 유량은 다음식과 같이 나타낼 수 있다[1,6].

$$FWMF \propto d^2 \times \frac{1}{\sqrt{1-(d/D)^4}} \times C_d \times Y \times F_a \times \sqrt{\frac{FWF}{FWSV}} \tag{1}$$

여기서

$FWMF$ = *Flow rate*

$FWF$ = *Venturi pressure drop*

$FWSV$ = *Specific volume*

$d$ = *Throat diameter of theVenturi*

$D$ = *Diameter at the inlet pressure tap*

$C_d$ = *Discharge coefficient*

$Y$ = *Expansion factor ( = 1 for water)*

$F_a$ = *Thermal expansion factor (CA + CB * FWT)*

$FWT$ = *Temperature*

$CA,CB$ = *Constants*

Venturi의 특성을 나타내는 방출계수($C_d$)는 동일한 d/D 값에 대하여 그림 3과 같은 거동을 보이며 여러 가지 d/D 값에 대해서는

$$C_d \approx 0.9858 - 0.196 \times b^{4.5} \tag{2}$$

여기서

$b$ = *d/D (Throat ratio)*

또는 그림 4를 이용하여 근사할 수 있다[1,7].

## 3. Venturi를 이용한 유량측정에 영향을 미치는 인자들

Venturi 차압에 영향을 줄 수 있는 인자들은 다음과 같다[5,7].

- 계기 드리프트 (Drift)
  - 운전 주기중에 차압계의 교정결과 드리프트 발생
- 주급수 배관의 침식
  - 계측 탭 상류 부근의 탄소강 배관은 침식/부식에 노출되어 있음
  - 동압(Dynamic Pressure) 성분의 간섭 가능성
- 계측관의 갈라짐 (Cracking)
  - 고압의 정지 유체의 계측관 진입 가능성
- Venturi 우회
  - 제작 결함으로 인한 배관과 노즐 사이로의 누수 가능성
- 초기 검교정 문제
  - 설계-제작-교정 과정에서의 불일치 가능성
  - 설치과정 또는 설치 후 유효성
- Fouling
  - 경계층 거동 변화
  - 유동 단면적 감소 가능성

위와 같은 여러 인자들 중 유로 내 유동구조의 섭동에 의한 영향을 가시화 하기에는 어려움이 많으므로 Venturi 유량식의 오차 전파식에 나타나 있는 성분에 영향을 주거나 또는 영향을 받을 수 있는 원인에 대해 기하구조의 변경과 관련된 거시적 변화에 대한 상세평가를 제 5절에서 수행하였다.

## 4. 오차전파식

참 값과의 차이를 나타내는 오차는 편이(고정, Fixed)성분과 무작위(정밀, Precision) 성분으로 분류될 수 있다.

$$d_k = h + e_k \tag{3}$$

여기서

$h$ = *fixed bias error*

$\varepsilon_k$ = *random precision error*

무작위 오차는 현상자체의 특성 등을 포함한 수 많은 원인에 의하여 반복된 측정값이 동일하지 않으며, 편이오차는 계측 중 비교적 일정한 크기로 나타나고 대부분의 큰 값을 갖는 성분은 교정과정에서 제거될 수 있다.

제2절의 유량식 (1)을 각 변수에 대하여 미분하고 상대오차의 개념으로 표현하면 무작위 성분은

$$\frac{e_{FWMF}}{FWMF} = \left[ \left( 1 \times \frac{e_{C_d}}{C_d} \right)^2 + \left( \frac{2}{1-b^4} \times \frac{e_d}{d} \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} \times \frac{e_D}{D} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \times \frac{e_r}{r} \right)^2 + \left( \frac{1}{2} \times \frac{e_{FWF}}{FWF} \right)^2 + \left( 1 \times \frac{e_{F_a}}{F_a} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{4}$$

여기서

$r = 1/ FWSV$ *(Density)*

와 같이 나타낼 수 있으며, 편이 성분에 대해서도 같은 형식으로 나타낼 수 있다.

식 (4)에서 측정된 차압의 영향에 의한 오차를 제외하고, 각 항의 계수의 크기(민감도)를 기준으로 하여 오차의 기여도를 평가하면 방출계수($C_d$)와 목 구경(d)에 의한 영향이 다른 항들에 비해 매우 큼을 알 수 있다. 이때 유체의 밀도와 재질의 열팽창에 의한 영향은 미미하다[2,6,7]. 따라서 제3절의 여러 가지 인자들 중 부식생성물의 침적이나 Fouling에 의한 영향이 Venturi 측정 유량에 주된 영향을 줄 수 있는 것으로 가정할 수 있다.

한편 벤츄리의 실제 설치과정에서 발생할 수 있는 오차는 제작 후 교정된 결과의 설치 후 유효성 문제로부터 발생하는 오차와 설치요구조건과 관련된 오차가 있다. 첫 번째 오차는 교정이력에 대한 검토와 충분히 조심스러운 설치과정에 의해 적절히 보정되어 전체 불확실도 분석시 포함되나 부적절한 과정에 대한 경우는 계측값의 편이로 남게 된다. 두 번째 오차는 배치상의 어려움으로 그림 5에서와 같은 상류의 직선배관부분의 미확보로 인해 발생되는 오차가 있다[7]. 이러한 교정 또는 설치등과 관련된 오차는 본 분석에 포함시키지 않았다.

## 5. 거시적 변화의 영향 상세 평가

Venturi내 부식생성물의 침적이나 Fouling의 존재가 측정 유량 또는 압력강하에 미치는 영향은 비체적(또는 밀도)이 일정한 경우에 다음과 같은 방법으로 평가할 수 있다.

### 1) 압력 강하량(FWF)이 일정하게 지시되는 경우의 유량의 변화

$$\frac{(FWMF)_{affected}}{(FWMF)_{initial}} = \frac{(d^2 \cdot C_d)_{affected}}{(d^2 \cdot C_d)_{initial}} \times \frac{\sqrt{[1-b^4]_{initial}}}{\sqrt{[1-b^4]_{affected}}} \tag{5}$$

### 2) 유량(FWMF)을 일정하게 하기 위한 압력 강하량의 변화

$$\frac{(FWF)_{affected}}{(FWF)_{initial}} = \frac{(d^2 \cdot C_d)^2_{initial}}{(d^2 \cdot C_d)^2_{affected}} \times \frac{[1-b^4]_{affected}}{[1-b^4]_{initial}} \tag{6}$$

식(5)와 식(6)을 방출계수($C_d$)가 침적이나 Fouling의 영향에 관계없이 초기값과 같다고 가정하여 분석한 결과를 초기 Venturi 목의 반경에 대한 반경의 변화율(dR/R_T)에 대해 나타내어 보면 그림 6과 같다. 이때 침적이나 Fouling의 거동과 관련한 가정은 “배관에만”(Pipe only), “목에만”(T only)을 양쪽 끝단으로 하고, “배관과 목에 같은 두께”(same delta) 또는 “배관에 2배의 두께”(P=2*delta T), “배관과 목에 같은 비율”(same ratio) 또는 “배관에 2배의 비율(Pr=2*Tr)” 등의 경우를 고려하였다. 일정한 방출계수를 가정한 분석에서 Venturi의 목에만 침적이나 Fouling이 발생된 경우에 유량이나 압력 강하량의 변화가 가장 큰 것으로 평가되었고, 동일한 압력강하 조건에서 배관에만 침적이나 Fouling의 영향이 있는 경우에는 오히려 유량이 증가하는 것으로 나타났다. 결과를 살펴보면 초기의 깨끗한 상태의 반경에 대해 1% 정도의 반경변화로도 2%의 유량의 변화를 초래할 수 있고, 1%의 반경변화는 유량이 같을 경우 약 4% 정도의 압력 강하량을 증가키는 것으로 평가되었다.

한편 식(2)에서와 같이 방출계수는 β의 함수이므로 오차 전파식은

$$\frac{e_{FWMF}}{FWMF} = \left[ \left( \frac{2}{1-b^4} \times \frac{e_d}{d} \cdot \left\langle 1 - 0.196 \times b^{4.5} \times \frac{4.5}{2} \times \frac{\left(1-b^4\right)}{C_d} \right\rangle \right)^2 + \left( \frac{2b^4}{1-b^4} \times \frac{e_D}{D} \cdot \left\langle 1 + 0.196 \times b^{0.5} \times \frac{4.5}{2} \times \frac{\left(1-b^4\right)}{C_d} \right\rangle \right)^2 + \Lambda \right]^{1/2} \qquad (7)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 식 (7)을 이용하여 침적 및 Fouling 등이 방출계수에 미치는 영향을 고려한 결과는 그림 7과 같다. 침적 등의 위치와 정도에 따른 유량과 압력강하량의 변화량의 거동은 그림 6의 일정한 방출계수를 가정한 분석 결과에 비해 각각의 경우에 대한 변화의 차이가 작게 나타났고 유량 또는 압력 강하량의 변화의 폭이 작아지는 것으로 평가되었으나, 그 차이는 미미하였다.

이상과 같은 결과로부터 Venturi의 목을 포함한 배관 내 부식물의 침적이나 Fouling에 의한 유동 단면적의 변화가 유량이나 압력 강하량의 변화에 미치는 영향을 확인하였다. 이러한 현상은 설치 또는 교정과 관련된 오차성분과 함께 유량과 압력 강하량과의 상관관계에 영향을 주어 유량 지시값의 편이를 발생시켜 열평형법에 의해 결정되는 원자로 열출력이나 일차계통 냉각재 유량의 결정에 직접적인 영향을 주어 출력성능을 제한할 수 있다.

## 6. 결론 및 제안

Venturi를 이용한 유량 측정에서 발생할 수 있는 문제점 중에서 부식물의 침적 및 Fouling 등 거시적 변화와 관련된 사항들을 유량식을 기준으로 하여 평가하였다.

오차 전파식을 이용하여 상대적 기여도(민감도)를 평가한 결과 방출계수와 Venturi 목 구경에 의한 영향이 다른 항들에 비해 매우 큼을 알 수 있었으며, 이들 변수의 영향을 상세평가 하였다. 상세평가 결과, 미세한 침적층이 유량이나 압력 강하량 지시치에 가시적인 영향을 주는 것으로 판명되었다. 한편 유동 단면적의 변화에 따른 방출계수의 변화의 영향은 무시 할 만한 것으로 확인되었다.

이러한 현상은 주기 운전 중에 발생하여 주기말로 갈수록 그 정도가 심화될 가능성이 크며, 결과적으로 원자로 출력성능에 영향을 줄 수 있다. 편이된 입력으로 평가된 출력성능 자료는 설계에서 예상된 자료에서 벗어난 거동을 보이게 된다. 따라

서 침적층의 거동이나 영향에 대한 적절한 예측모형을 이용하여 입력자료를 보정하거나, 그 영향을 받지 않는 설비[5,8]를 이용한다면 출력성능의 이상 이탈현상을 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

## 7. 참고문헌

[1] White, F.M, “Fluid Mechanics, 2 nd e/d,” McGRAW-HILL, 1986.

[2] Ahn, S.H., et. al, “Several problems in Reactor Coolant System Flow Rate Measurement,” J. KNS vol. 30, 592-608.

[3] Cheong, J.S., et. al., “Improvement of the RCS Flow Measurement for Korean Standard Nuclear Plants,” Proc. KNS 2001 Spring Conference.

[4] KEPCO Fax, “Crossflow 관련 Letter,” 2000.6.1.

[5] Gurevich, Y., et. al., “Plant Performance Improvement through Accurate Feedwater Flow Measurement with the Crossflow Ultrasonic Flowmeter,” Proc. 2000 KAIF Conference.

[6] “Measurement Uncertainty – Instruments and Apparatus,” ANSI/ASME PTC 19.1-1985 Part 1, 1990.

[7] Benedict, R.P., “Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements, 2 nd e/d,” JOHN WILEY & SONS, 1977.

[8] Augenstein, Don & Regan, Jenny, “The Basis for a 1% Power Increase : LEFM3 Technology,” ICONE-8575.

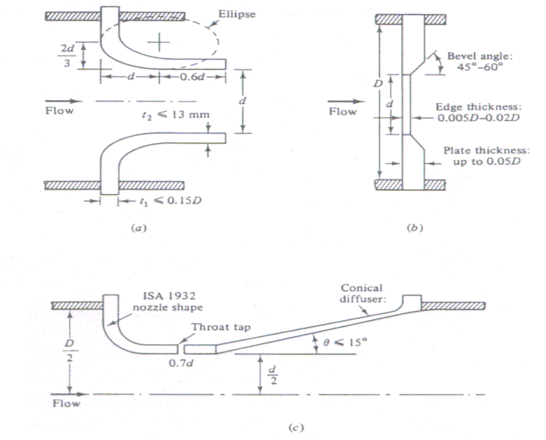

그림 1 Bernoulli의 원리를 이용한 유량계의 국제표준 형태

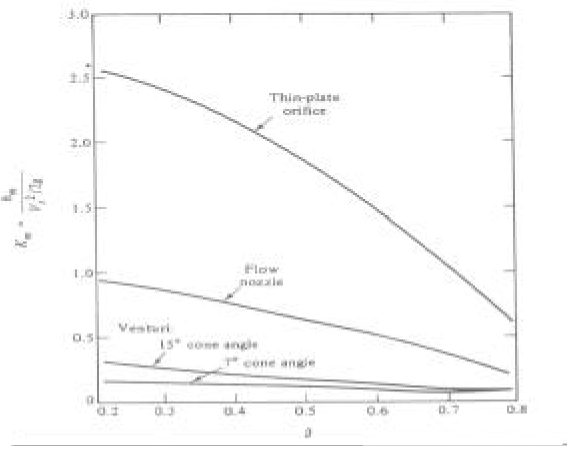

그림 2 Bernoulli의 원리를 이용한 유량계의 수두손실

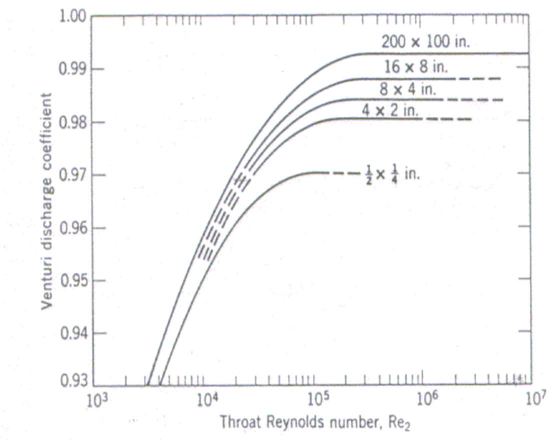

그림 3 배관의 직경에 따른 표준 Venturi 방출계수 (β=0.5)

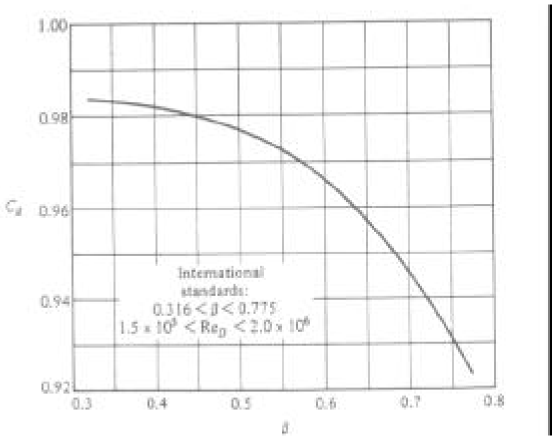

그림 4 β에 따른 표준 Venturi 방출계수

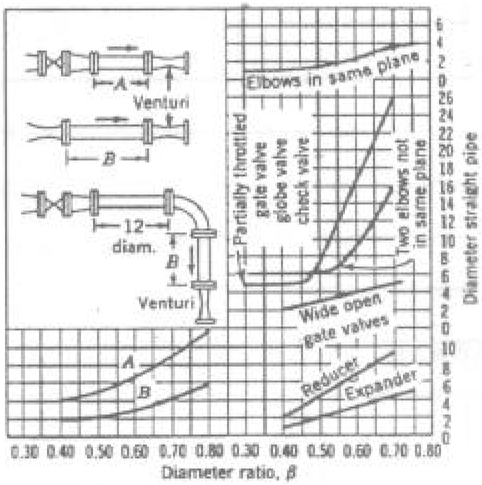

그림 5 Venturi 유량계의 상류배관 요구조건

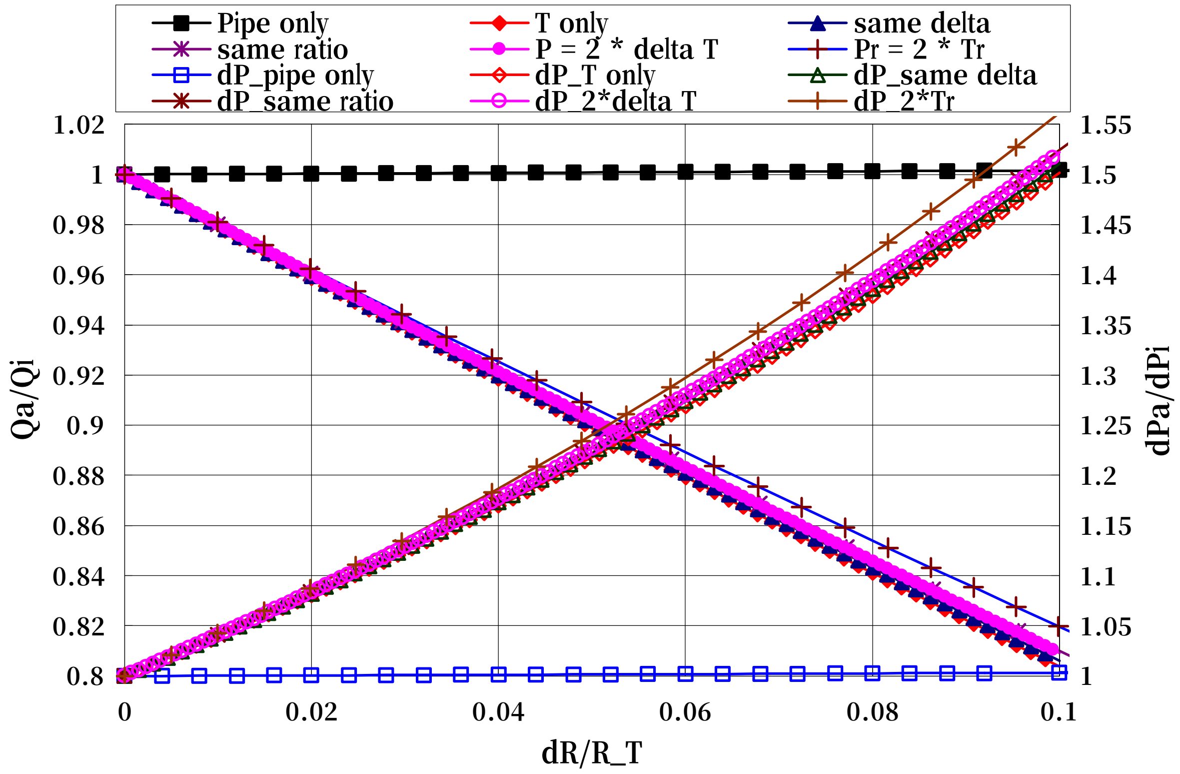

그림 6 거시적 영향에 의한 유량 및 압력강하량 변화 ($C_d$ = 일정)

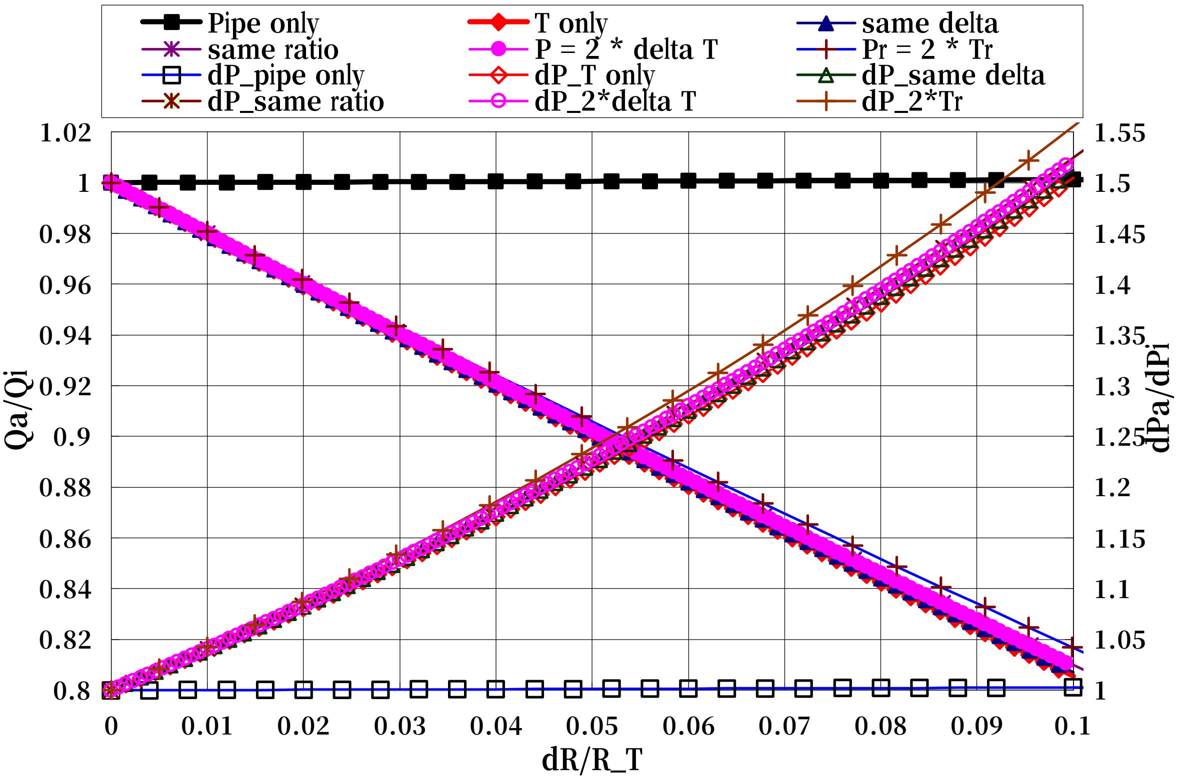

그림 7 거시적 영향에 의한 유량 및 압력강하량 변화 ($C_d = fn(\beta)$)