

# 분포정수계 유압관로 모델의 동특성 해석

## Analysis of Dynamic Characteristics of Hydraulic Transmission Lines with Distributed Parameter Model

김도태<sup>1</sup>

Do Tae Kim

Received: 3 Sep. 2018, Revised: 18 Oct. 2018, Accepted: 15 Nov. 2018

**Key Words** : Hydraulic Transmission Lines(유압관로), Frequency Response of Transfer Function(전달함수의 주파수응답), Time Domain Simulation(시간영역 시뮬레이션), Distributed Parameter Model(분포정수모델)

**Abstract:** The paper deals with an approach to time domain simulation for closed end at the downstream of pipe, hydraulic lines terminating into a tank and series lines with change of cross sectional area. Time domain simulation of a fluid power systems containing hydraulic lines is very complex and difficult if the transfer functions consist of hyperbolic Bessel functions which is the case for the distributed parameter dissipative model. In this paper, the magnitudes and phases of the complex transfer functions of hydraulic lines are calculated, and the MATLAB Toolbox is used to formulate a rational polynomial approximation for these transfer functions in the frequency domain. The approximated transfer functions are accurate over a designated frequency range, and used to analyze the time domain response. This approach is usefully to simulate fluid power systems with hydraulic lines without to approximate the frequency dependent viscous friction.

### 기호 설명

$c$  : sonic velocity, m/s

$j$  : imaginary unit( $=\sqrt{-1}$ )

$J_0, J_1$ : Bessel functions of the first kind

$K$ : bulk modulus, Pa

$L$ : pipe length, m

$p$ : pressure, Pa

$P$ : Laplace transform of pressure  $p$

$q$ : flow rate, m<sup>3</sup>/s

$Q$ : Laplace transform of flow rate  $q$

$r$  : radius of pipe, m

$s$ : Laplace operator

$t$ : time, s

$V$ : tank volume, m<sup>3</sup>

$Z_c(s)$ : characteristic impedance

$\Gamma(s)$ : propagation constant

$\nu$ : kinematic viscosity, m<sup>2</sup>/s

$\rho$ : density, kg/m<sup>3</sup>

$\omega$ : frequency, rad/s

### 1. 서론

유압시스템은 유압펌프, 제어밸브와 같은 구성 요소부품이 관로로 연결되어 있고, 그 관 내부를 흐르는 작동유(hydraulic oil)가 신호나 유체동력을 전달한다. 따라서 관로 내부의 작동유 유동에 따른 신호나 동력의 전달특성은 유압시스템이나 유압기기의 정상상태와 과도응답에 큰 영향을 준다.

유압관로의 모델링에서 원관 속을 흐르는 작동유의 거동을 분포정수계로 고려하고, 관 마찰저항을 어느 정도까지 엄밀하게 취급하는가에 따라 동특성 해석의 정확도가 좌우된다.

\* Corresponding author: dtkim@kiu.ac.kr

1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University, Gyeongsan 38428, Korea

Copyright © 2018, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유압관로의 동특성을 비교적 엄밀하게 나타내는 것은 원형 관 내부흐름이 2차원 축대칭 비정상 층류이고, 반지름 방향의 비정상 속도분포를 고려하여 관로의 전파상수(propagation constant)와 특성 임피던스(characteristic impedance)로 표현되는 전달행렬(transfer matrix)이다.<sup>1)2)</sup> 이것은 관 내부 흐름이 층류인 경우, 유압관로의 동특성을 나타내는 정확한 관로 모델이고, 넓은 주파수 영역에서 이론과 실험 결과가 잘 일치한다고 보고되어 있다.<sup>1)6)</sup> 그러나 이 모델은 원형 단면의 관로에서 특징적인 Bessel 함수, 전파상수와 특성 임피던스에 포함된 쌍곡선함수(hyperbolic function)의 복소함수 형태로 나타나기 때문에 주파수 영역에서 실제 계산과 응용에서는 매우 복잡하다. 또한 시간영역에서 과도응답을 구하는 것이 매우 어렵기 때문에 전달행렬의 요소로 표현되는 전달함수를 2차 지연요소의 합으로 근사하는 방법<sup>7)</sup>, MATLAB/SIMULINK를 이용하여 과도응답 특성을 구하는 방법 등이 제안되어 있다.<sup>8)</sup> 또한 배관 압력신호를 이용한 서보밸브의 히스테리시스와 영점오차를 측정하는 방법<sup>9)</sup>, 유도무기 기체 블로우다운 시스템(gas blow down system)에 압력조절밸브와 관로의 특성을 고려한 통합모델에 관한 연구도 제시되어 있다.<sup>10)</sup>

본 논문에서는 분포정수계 유압관로 모델의 전달행렬을 이용하여 관로 끝단의 다양한 경계조건에 대한 전달함수의 주파수 응답 특성을 구하고, 주파수 영역에서 MATLAB *Signal processing Toolbox*에 ‘freqs’와 ‘invfreqs’의 최소제곱 곡선적합 알고리즘(least square curve fit algorithm)으로 전달함수의 근사 유리함수를 구하는 방법을 적용하여, 시간영역에서 유압관로의 과도응답 특성을 조사하였다.

## 2. 분포정수계 관로의 수학적 모델

Fig. 1과 같이 관 길이  $L$ 인 원형 단면 관로에서 관 내부 흐름은 층류이고, 유속은 음속보다 비교적 낮으며, 작동유의 압축성과 주파수에 의존하는 비정상 점성저항을 고려한 압력과 유량 사이의 동특성은 식 (1)과 같이 전달행렬로 주어지고, 행렬 요소는 식 (2)와 같다.<sup>1)</sup>

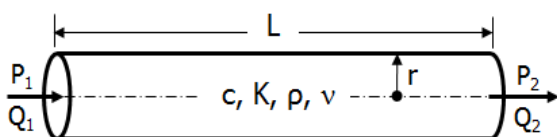


Fig. 1 Schematic of a hydraulic line

$$\begin{bmatrix} P_1(s) \\ Q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} G_{11}(s) &= G_{22}(s) = \cosh \Gamma(s) \\ G_{12}(s) &= Z_c(s) \sinh \Gamma(s) \\ G_{21}(s) &= \sinh \Gamma(s) / Z_c(s) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)에서 하첨자 1, 2는 관로의 상류와 하류를 나타내고,  $P(s), Q(s)$ 는 압력  $p(t)$ , 유량  $q(t)$ 의 라플라스 변환형,  $\Gamma(s)$ 는 관로의 전파상수,  $Z_c(s)$ 는 특성 임피던스이고, 주파수 영역에서 다음 식으로 표현된다.<sup>2)</sup>

$$\Gamma(s) = D_n s \frac{r^2}{\nu} \left( 1 - \frac{2J_1(j\sqrt{sr^2/\nu})}{j\sqrt{sr^2/\nu} J_0(j\sqrt{sr^2/\nu})} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$Z_c(s) = \frac{\rho c}{\pi r^2} \left( 1 - \frac{2J_1(j\sqrt{sr^2/\nu})}{j\sqrt{sr^2/\nu} J_0(j\sqrt{sr^2/\nu})} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

식 (3), (4)에서  $J_0(), J_1()$ 은 제1종 0차, 1차 Bessel 함수, 소산계수(dissipative number,  $D_n = \nu L / cr^2$ )는 관 길이 방향으로 파(wave)의 이동시간과 과도상태 감쇠(transient decay)를 나타내는 시간과의 비로 정의하며, 관 길이에 따른 감쇠(attenuation)와 파의 찌그러짐(distortion)을 나타내고, 주파수응답과 과도응답 특성에서 중요한 역할을 한다.

## 3. 유압관로의 동적응답 특성

유압관로의 동적 응답 특성을 조사하기 위해, 먼저 식 (1)~(4)의 분포정수계 관로모델을 적용하여, 관로 끝단의 경계조건에 따라 전달함수를 유도하고, 주파수 응답 특성을 구한다. 다음에 MATLAB *Signal Processing Toolbox*<sup>11)</sup>에서 아날로그 필터 설계에 사용하는 ‘freqs’, ‘invfreqs’ 함수를 이용하여 주어진 주파수 범위에서 크기(magnitude)와 위상(phase) 데이터에 대응하는 유리함수(rational function) 형태의 근사 전달함수의 차수와 계수들을 결정하여, 시간영역에서 과도응답 특성을 구하였다.

작동유는 밀도  $860 \text{ kg/m}^3$ ,  $40^\circ\text{C}$ 에서 동점도  $46.2 \text{ cSt}$ 인 ISO VG46(Kixx RD HD 46)을 사용하였고, 체적탄성계수(bulk modulus)는  $1.5 \text{ GPa}$ 이다.

3.1 관로 하류단이 폐쇄된 경우

Fig. 2와 같이, 유압관로의 한쪽 끝단이 폐쇄되면 관 하류에서 경계조건은  $Q_2(s)=0$ 로 된다. 전달행렬식 (1)에서 상류 압력  $P_1(s)$  입력에 대한 하류 압력  $P_2(s)$  사이의 전달함수는 식(5)와 같다.

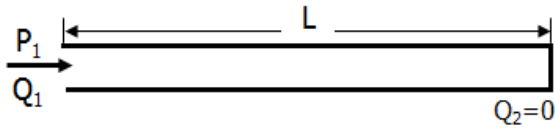


Fig. 2 Closed end at the downstream of pipe

$$H_1(s) = \frac{P_2(s)}{P_1(s)} = \frac{1}{\cosh \Gamma(s)} \quad (5)$$

Fig. 3은 Fig. 2에서 관 지름 10 mm, 관 길이 15 m ( $\epsilon_L=1$ )를 기준으로 하여, 길이가 7.5 m ( $\epsilon_L=0.5$ ), 22.5m( $\epsilon_L=1.5$ )에 대한 주파수 응답 특성을 나타낸다. 관 길이가 증가함에 따라 이득(gain)과 공진주파수가 낮아진다.  $\epsilon_L=1$ 에서, 주파수에 의존하는 비정상점성 저항을 고려한 관로의 1차 공진 주파수는 약 127 rad/s이고, 이것은 작동유의 점성 저항을 고려하지 않았을 때의 공진 주파수 138 rad/s 보다 낮아지고,  $\epsilon_L=0.5$ ,  $\epsilon_L=1.5$ 인 경우도 같은 결과를 보이는 것을 확인하였다.

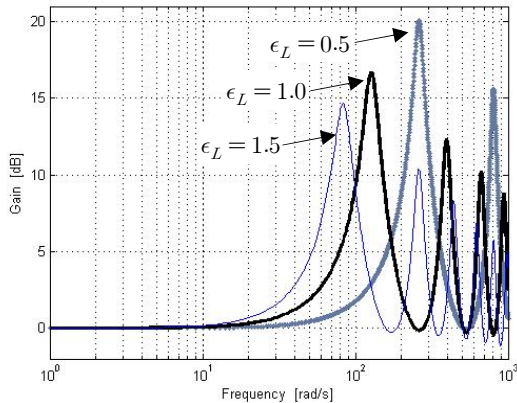


Fig. 3 Comparison of frequency response of varying line length

전달함수  $H_1(s)$ 를 유리함수로 정확하게 근사시키기 위해 필요한 근사 전달함수  $\tilde{H}_1(s)$ 의 차수(order)는 원하는 주파수 범위에 걸쳐 전달함수  $H_1(s)$  주파수 응답의 크기와 위상에 따라 결정된다.

Fig. 4는 관 지름 10 mm, 관 길이 15 m인 경우, 식 (5)의 전달함수에 대한 주파수 응답의 크기와 위상

계산 값 및 MATLAB의 ‘freqs’와 ‘invfreqs’ 함수를 사용하여 6차 근사 전달함수를 구하여 주파수 특성을 비교한 것이다. Fig. 4에서 보듯이 전달함수와 근사 전달함수의 이득과 위상특성이 주파수 100 rad/s 이상에서 큰 차이를 보이며, 근사 전달함수가 부적합함을 알 수 있다. 전달함수  $H_1(s)$ 의 주파수 특성에서 보면, 근사 전달함수는 최소한 2차지연요소로 근사할 필요가 있고, 계산된 주파수 범위에서는 최소한 4개의 2차지연요소의 모드(mode)가 나타나기 때문에 근사 전달함수의 차수는 8차 이상으로 선정하는 것이 적절함을 알 수 있다. 또한 관 길이가 변하면, 근사 전달함수의 차수는 달라지고, 관이 길어질수록 전달함수의 차수를 높여야 한다.

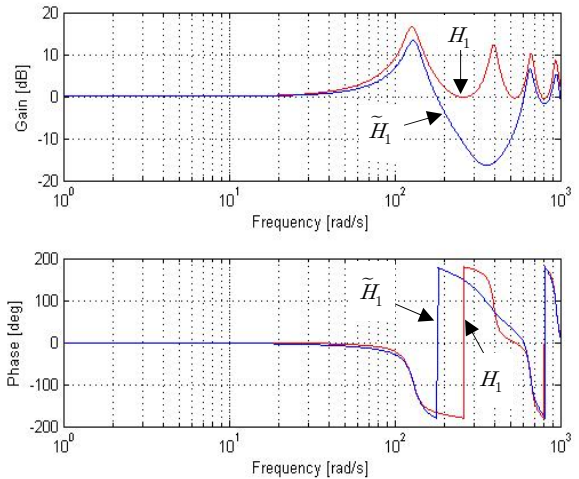


Fig. 4 Comparison of frequency response for  $H_1(s)$  and  $\tilde{H}_1(s)$  with 6th order

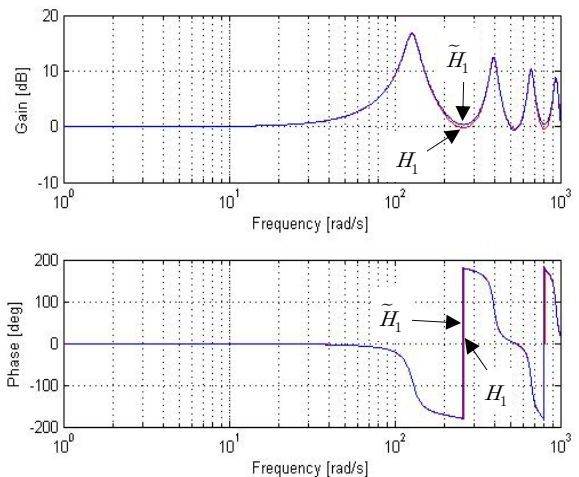


Fig. 5 Comparison of frequency response for  $H_1(s)$  and  $\tilde{H}_1(s)$  with 8th order

Fig. 5는 관 길이 15 m ( $\epsilon_L=1$ )인 경우, 식 (6)과 같이 8차 유리함수 형태의 근사전달함수를 구하여, 전달함수  $H_1(s)$ 와 근사 전달함수  $\tilde{H}_1(s)$ 의 주파수 응답 특성을 비교한 것이다. 이득과 위상 특성이 주파수 1,000 rad/s까지 잘 일치함을 볼 수 있다.

$$\tilde{H}_1(s) \approx \frac{56.31s^7 + \dots + 7.286 \times 10^{17}s + 9.868 \times 10^{20}}{s^8 + 177.9s^7 + \dots + 1.969 \times 10^{18}s + 1.006 \times 10^{21}} \quad (6)$$

식 (5)로 표시된 분포정수계 관로모델의 전달함수에 대한 시간영역의 과도응답을 직접 구하는 것은 매우 복잡하고, 실제 응용에서 사용하기 어렵다.

본 연구에서는 식 (5)의 전달함수  $H_1(s)$  특성을 잘 나타내는 근사 전달함수  $\tilde{H}_1(s)$ 인 식 (6)을 사용하여 시간영역에서 과도응답을 구하였다.

Fig. 6은 관 길이 변화에 따른 과도응답 특성이며, 상류에 스텝 압력 입력에 대한 하류의 압력응답 특성을 나타낸다.  $\epsilon_L=1$ 인 경우에 하류 압력파형에서 보듯이 피크 시간(peak time) 0.032초에서 피크 진폭은 1.9, 백분율 오버슈트는 90.4%이고, 상승시간은 0.00168초이다. 상류에 스텝입력이 가해지면 하류에는 약 0.11초 후에 압력파가 전달되며, 주파수에 의존하는 비정상 점성저항의 영향으로 시간이 증가함에 따라 압력파의 진폭이 감소하여 0.33초 정도에서 정착시간(settling time)에 도달하는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 보듯이 관 길이가 짧아질수록 피크시간, 상승시간 값이 작아지며,  $\epsilon_L=0.5$ 에서 정착시간이 0.265초이고,  $\epsilon_L=1$ 보다도 짧아진다. 관 길이는 압력파의 전달특성과 과도응답 특성에 영향을 주며, 관 길이가 길어지면 유압시스템의 해석에 관로의 영향을 고려하여야 함을 알 수 있다.

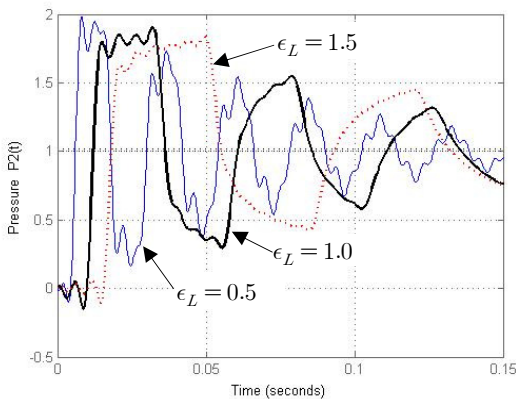


Fig. 6 Comparison of pressure wave forms of varying the line length

### 3.2 관로 하류단에 용량요소가 있는 경우

Fig. 7과 같이 직선 관로 하류단에 일정한 체적  $V$ 을 가진 용량(capacitance) 요소가 연결되어 있는 경우, 용량요소의 탄성 효과는 작동유의 압축성에 비교하여 무시할 수 있고, 관로 하류 압력  $p_2(t)$ 과 탱크 내부압력  $p_t(t)$ 이 같다고 가정하면, 유량  $q_2(t)$ 는 식 (7)과 같다.

$$q_2(t) = \frac{V}{K} \frac{dp_t(t)}{dt} \quad (7)$$

식 (7)을 라플라스 변환하면, 다음과 같다.

$$Q_2(s) = \frac{V}{K} s P_t(s) \quad (8)$$

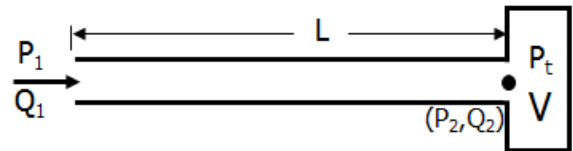


Fig. 7 Hydraulic line terminating into a capacitance element

식 (1), (2)와 식 (8)에서 관로의 하류단에 용량요소가 부착된 경우, 상류 압력 입력에 대한 하류의 용량요소 내부 압력과의 전달함수  $H_2(s)$ 를 구하면, 식 (9)와 같다.

$$H_2(s) = \frac{P_t(s)}{P_1(s)} = \frac{1}{\cosh \Gamma(s) + \frac{Vs}{K} Z_c(s) \sinh \Gamma(s)} \quad (9)$$

식 (9)에서 용량요소의 체적  $V=0$ 이면, 관로 하류단이 폐쇄된 경우의 전달함수인 식 (5)와 같아진다. 관로에 용량요소가 부착되면, 관 길이와 지름에서 구한 관로의 체적과 용량요소의 체적  $V$ 에 따라 전달함수에 영향을 미치게 된다.

Fig. 8은 Fig. 2와 같이 관 지름 10 mm, 길이 15 m ( $\epsilon_V=1.0$ )를 기준으로 하여,  $\epsilon_V=0.5$ 는 용량요소의 체적( $V=58.9 \times 10^{-5} \text{m}^3$ )이 관로의 체적보다 작은 경우,  $\epsilon_V=1.5$ 는 용량요소 체적( $V=176.7 \times 10^{-5} \text{m}^3$ )이 관로의 체적보다 큰 경우에 주파수 응답 특성을 비교한 것이다. 관로의 체적보다 용량요소의 체적이 커지면, 관로의 공진 주파수가 낮아지고 이득도 감소한다.

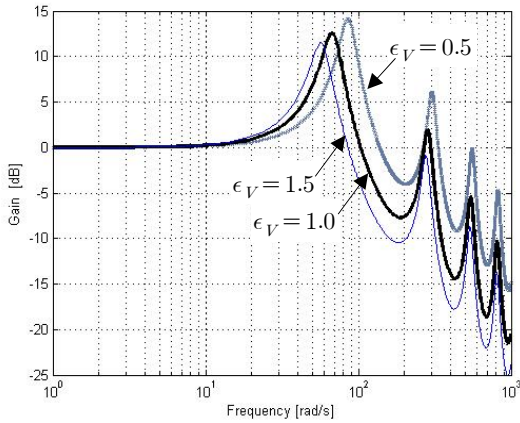


Fig. 8 Comparison of frequency response of varying the volumes of capacitance element

이 결과로부터 유압회로에 축압기나 맥동저감용 소음기 등을 설치할 때는 관로와 용량요소의 동특성을 고려하여 시스템을 설계할 필요가 있다. 용량요소의 체적이 관로의 체적보다 작아지면, 공진 주파수도 높아지고, 이득도 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 9는 관로의 체적과 용량요소 체적이 같은 경우( $\epsilon_V=1.0$ )에 식 (9)의 전달함수에서 계산한 주파수 특성 값을 바탕으로 하여, 3.1에서와 같이 근사 전달함수  $\tilde{H}_2(s)$ 를 식 (10)과 같이 구하여, 주파수 특성을 비교한 것이다. 주파수가 1,000 rad/s까지 근사 전달함수  $\tilde{H}_2(s)$ 의 이득과 위상이 전달함수  $H_2(s)$ 와 잘 일치함을 볼 수 있다.

$$\tilde{H}_2(s) \approx \frac{8.71s^7 + \dots + 8.477 \times 10^{16}s + 7.466 \times 10^{19}}{s^8 + 164.4s^7 + \dots + 3.465 \times 10^{17}s + 7.33 \times 10^{19}} \quad (10)$$

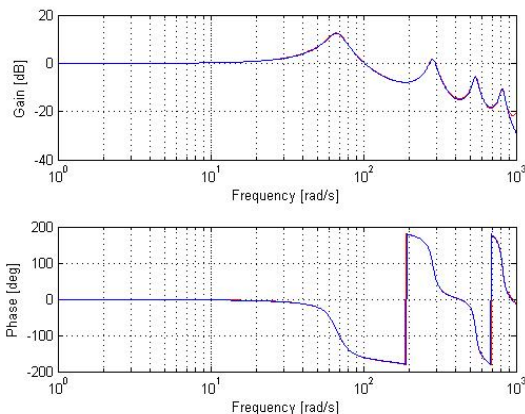


Fig. 9 Comparison of frequency response for  $H_2(s)$  and  $\tilde{H}_2(s)$

Fig. 10은 Fig. 8의  $\epsilon_V=0.5$ ,  $\epsilon_V=1.0$ ,  $\epsilon_V=1.5$ 에 대한 근사 전달함수를 구하여, 상류에 스텝 압력 입력을 인가하였을 때, 용량요소 내부의 압력파형을 나타낸다. Fig. 10에서 보듯이 용량요소의 체적은 피크 시간과 진폭, 백분율 오버슈트, 상승시간 등 과도응답 특성에 큰 영향을 주며, 용량요소의 체적이 증가함에 따라 피크 진폭이 줄어지고, 피크시간 등 응답성이 저하됨을 알 수 있다. Fig. 6의 관 길이 15m ( $\epsilon_L=1$ )에서 용량요소가 없는 경우와 관로의 체적과 같은 용량요소를 갖는  $\epsilon_V=1.0$ 의 압력파형을 비교해 보면,  $\epsilon_V=1.0$ 에서 피크 시간 0.044초, 피크 진폭은 1.79, 백분율 오버슈트 79.5%, 상승시간 0.09초로 용량요소의 부착으로 응답 지연과 진폭 감쇠효과가 크게 나타나며, 진폭과 응답성에 큰 차이를 보이며, 용량요소의 영향을 쉽게 파악할 수 있다.

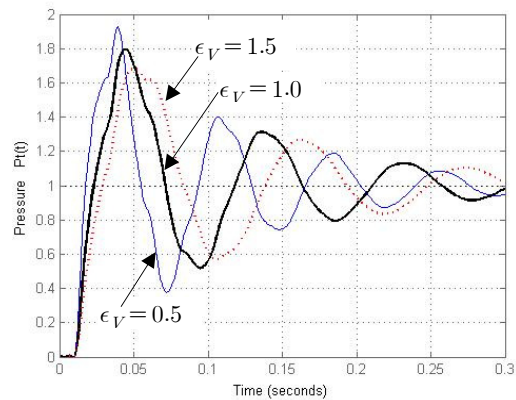


Fig. 10 Comparison of pressure wave forms of varying the volumes of capacitance element

### 3.3 관 지름이 다른 이경관로계의 경우

이경관로계는 지름이 다른 두 직선관로를 모델링한 것이며, 두 관로의 연결부인 급축소부의 영향은 고려하지 않았다.<sup>6)</sup>

Fig. 11에서 반지름  $r_1$ , 관 길이  $L_1$ 과 반지름  $r_2$ , 길이  $L_2$ 의 연결부에서 압력과 유량 및 이경관로의 하류에서 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{m1}(s) &= P_{m2}(s) \\ P_{m2}(s) &= Q_{m2}(s) \\ Q_3(s) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

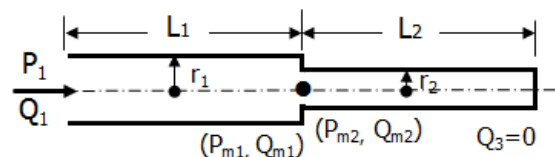


Fig. 11 Series lines with change of cross sectional area

식 (1)의 전달행렬을 관 길이  $L_1$ 과  $L_2$ 에 각각 적용하고, 식 (11)의 경계조건을 고려하여, 입구 압력  $P_1(s)$ 에 대한 출구 압력  $P_3(s)$  사이의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$H_3(s) = \frac{P_3(s)}{P_1(s)} = \frac{1}{G_a(s) + G_b(s)} \quad (12)$$

$$G_a(s) = \cosh \Gamma_1(s) \cdot \cosh \Gamma_2(s) \quad (13)$$

$$G_b(s) = \frac{Z_{c_1}(s)}{Z_{c_2}(s)} \sinh \Gamma_1(s) \cdot \sinh \Gamma_2(s)$$

식 (13)에서, 관로의 전파상수와 특성임피던스  $\Gamma_1(s), Z_{c_1}(s)$ 는 반지름  $r_1$ 과 관 길이  $L_1$ ,  $\Gamma_2(s), Z_{c_2}(s)$ 는 반지름  $r_2$ 와 관 길이  $L_2$ 를 나타낸다.

Fig. 12는 Fig. 11에서  $L_1 = L_2 = 7.5$  m이고, 반지름 비( $\epsilon_r = r_2/r_1$ )에 따른 주파수 응답특성을 나타낸다. 반지름  $r_1 = 0.005$  m를 기준으로 하여, 반지름 비  $\epsilon_r = 1.0$ 인 경우는 관 지름이 같은 Fig. 2와 같고, 반지름 비 0.5는 급축소관, 반지름 비 1.5는 급확대관 형상이 된다. 반지름 비가 증가함에 따라 관로의 공진 주파수와 피크 값도 낮아지고, 이득(gain)도 낮아지는 경향을 보인다. 또한 반지름 비의 감소에 따라 이득곡선의 형상도 달라진다.

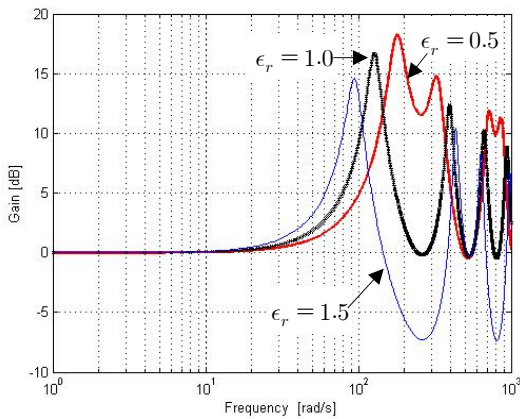


Fig. 12 Comparison of frequency response of varying the ratio of radius

Fig. 13는 3.1에서와 같이, 반지름 비에 따른 각각의 전달함수에 대한 근사 전달함수를 구하여, 상류에 스텝 압력을 입력하였을 때 출구에서 압력 파형  $p_3(t)$ 을 나타낸다. 반지름 비가 같은 경우( $\epsilon_r = 1$ )는 Fig. 6의  $\epsilon_L = 1$ 의 결과와 일치한다.  $\epsilon_r = 0.5$ 과  $\epsilon_r = 1$ 의 압력 파형을 비교해 보면, 축소관에서는 피크 시간, 피크 진폭, 백분율 오버슈트 등 과도응답이 빠르

고, 정착시간도 0.182초로 약 1.8배 정도 빨리 정상상태에 도달한다. 이것은 축소관의 반지름이 감소함에 따라 주파수에 의존하는 비정상 점성저항의 영향이 상대적으로 크게 작용하기 때문이며, Fig. 13에서 보듯이 두 번째 피크 진폭이 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다.  $\epsilon_r = 1$ 과  $\epsilon_r = 1.5$ 의 압력파형에서 보면, 피크시간, 피크 진폭, 백분율 오버슈트는 거의 같지만, 확대관의 상승시간이 1.58배 정도 늦어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 Fig. 11과 같이 급축소관( $\epsilon_r = 0.5$ )에서 관 길이의 비( $\epsilon_L = L_2/L_1$ )에 따른 과도응답 특성을 나타낸다.  $\epsilon_L = 1$ 은  $L_1 = L_2 = 7.5$  m이며, 축소관의 길이 변화에 따라 피크시간은 0.02초로 거의 같지만 백분율 오버슈트와 상승시간은 차이를 보인다. 특히 정착시간은  $\epsilon_L = 0.5$ 에서 0.25초,  $\epsilon_L = 1.5$ 에서 0.15초로 축소관이 길어질수록 짧아지며, 급축소관의 길이 변화에 따른 진폭을 비교해 보면, 두 번째 피크 진폭이 아주 작아지는 경향을 보이며, 축소관에서 점성의 영향이 지배적으로 작용하는 것을 알 수 있다.

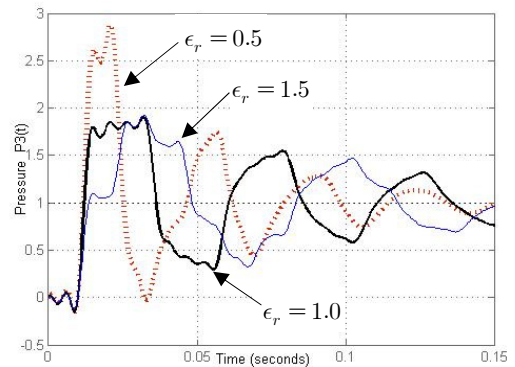


Fig. 13 Comparison of pressure wave forms of varying the ratio of the radius

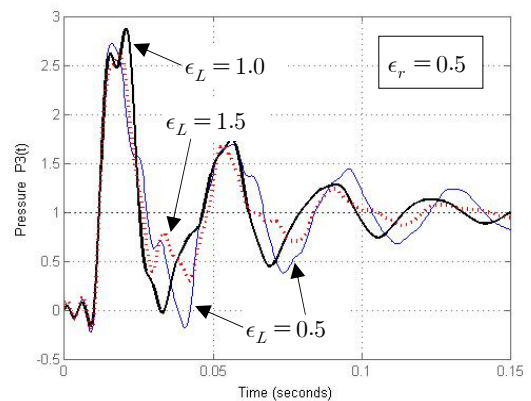


Fig. 14 Comparison of pressure wave forms of varying the line length for  $\epsilon_r = 0.5$

Fig. 15는 Fig. 10에서 반지름  $r_1 = 0.005\text{ m}$ 에서 반지름  $r_2 = 0.0075\text{ m}$ 로 급확대관( $\epsilon_r = 1.5$ )인 경우에 확대관의 길이 변화에 따른 압력파형을 나타낸다. 확대관의 길이변화에 따라 피크시간은 0.032초, 상승시간은 0.026초로 거의 같으며, 백분율 오버슈트에서 약간 차이를 보인다. 정착시간도 0.37초 정도로 거의 일정하게 나타났다. 이것은 관 길이 15m를 일정하게 유지하면서 관 길이의 비를 변화시킨 경우이며, 관 길이 비가 가장 큰 경우( $\epsilon_L = 1.5$ )에도  $L_1 = 6\text{ m}$ ,  $L_2 = 9\text{ m}$ 이므로 상대적으로 관 길이 변화의 영향이 작은 것으로 판단된다.

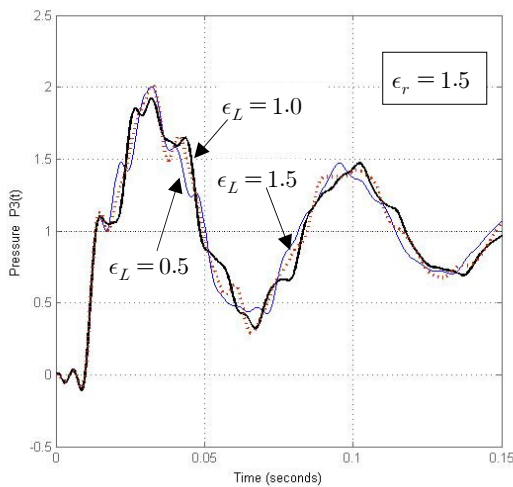


Fig. 15 Comparison of pressure wave forms of varying the line length for  $\epsilon_r = 1.5$

### 5. 결론

분포정수계 유압관로의 경계조건에 따른 전달함수의 주파수 응답 특성에서 구한 유리함수 형태의 근사전달함수는 2차지연요소로 근사할 필요가 있고, 유리함수의 차수와 계수는 원하는 주파수 범위에 걸쳐 전달함수의 주파수 응답의 크기와 위상에 따라 결정된다.

관로 하류단에 용량요소가 있는 경우, 용량요소의 체적은 피크 시간과 진폭, 백분율 오버슈트, 상승시간 등 과도응답 특성에 큰 영향을 주며, 용량요소의 체적이 증가함에 따라 응답 지연과 진폭 감쇠효과가 크게 나타난다.

이경관로에서 축소관인 경우, 반지름이 같은 경우와 비교하여 압력파형의 과도응답이 빠르고, 주파수에 의존하는 비정상 점성저항의 영향으로 정착시간도 빨라지지만 확대관인 경우는 상승시간이 늦어진다.

### References

- 1) A. F. D'souza and R. Oldenburger, "Dynamic Response of Fluid Lines", Journal of Basic Engineering, Vol.86, No.3, pp.589-598, 1964.
- 2) F. T. Brown, "The Transient Response of Fluid Lines", Journal of Basic Engineering, Vol.84, No.4, pp.547-553, 1962.
- 3) R. E. Goodson and R. G. Leonare, "A Survey of Modeling Techniques for Fluid Line Transients", Journal of Basic Engineering, Vol.94, No.2, pp.474-482, 1972.
- 4) J. S. Stecki and D. C. Davis, "Fluid Transmission Lines-distributed parameter models, Part 1 : a review of the state of the art", Journal of Power and Energy, Vol.200, No.4, pp.215-228, 1986.
- 5) J. S. Stecki and D. C. Davis, "Fluid Transmission Lines-distributed parameter models, Part 2: comparison of models," Journal of Power and Energy, Vol.200, No.4, pp.229-236, 1986.
- 6) D. T. Kim, "Frequency Response Characteristics of Automotive Hydraulic Pipelines," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.15, No.6, pp.177-182, 2007.
- 7) W. C. Yang and W. E. Tobler, "Dissipative Modal Approximation of Fluid Transmission Lines Using Linear Friction Model", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.113, No.1, pp.152-162, 1991.
- 8) J. Buhs and T. Wiens, "Modelling Dynamic Response of Hydraulic Fluid within Tapered Transmission Lines," The 15th Scandinavian International Conference on Fluid Power, pp.197-204, 2017.
- 9) S. D. Kim, B. J. Joo and S. N. Yun, "An Experimental Study on Static Characteristics of Servo Valves using Transmission Line Pressures", Journal of Drive and Control, Vol.13, No.2, pp.42-50, 2016.
- 10) Y. W. Park, "A Study on Modeling of the Pneumatic Part in a Gas Blow-Down System Including Pressure Regulator and Pipe-Line Characteristics", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.3, pp.32-39, 2017.
- 11) Signal Processing Toolbox User's Guide, The MathWorks, Inc, Massachusetts, pp.2/63-2/66, pp.2/73-2/76, 1992.