

프로그램 기반의 시간응답 해석에 의한 고전제어 시스템 이해

민용기* · 위영민**

Understanding for Classical Control System by Analysis of Program-based Time Response

Yong-Ki Min* · Young-Min Wi**

요 약

극점의 위치와 제동비의 변화에 따른 출력응답을 해석하였다. RLC 회로의 시스템 모델링과 출력응답을 단위계 단함수와 정현과 입력에 따라 해석하였다. 프로그램으로 확인한 내용들이 이론을 이해하는데 도움이 되었는지를 설문으로 평가하였다. 조사에서 시스템의 전달함수를 해석하는 능력은 이해도가 높게 나타났다. 또한 매개변수 변화에 따른 출력응답 파형을 이해하는 능력도 높게 나타났다. 시간영역의 출력응답을 계산할 수 있다는 응답이 다소 낮게 나왔으며, 이는 부분분수의 조합이 어려웠던 것으로 분석된다.

ABSTRACT

Output response for prototype system is analyzed according to the pole locations and the damping ratio changes. The system modeling is constructed for RLC-circuit and the output response is analyzed for both a unit-step and a sinusoidal input. The survey is conducted to estimate the understanding ability on the automatic control. A high understanding ability is shown up in analysing the transfer functions of control system. And improvement is manifest in the ability to understand the output response according to the parameter changes. But some difficulty is revealed in acquiring the output responses in time domain.

키워드

Programming, Transfer Function, Time Response, Damping Ratio, Unit-Step Function
프로그래밍, 전달 함수, 시간 응답, 제동비, 단위 계단 함수

1. 서론

고전 제어란 시스템의 출력응답을 전달함수로써 해석하는 것이다. 전달함수는 입력과 출력으로만 시스템의 출력응답을 표현하므로 초기조건이 무시되는 응답

을 얻게 된다[1]. 반면에 현대제어는 출력응답을 상태방정식에 기초하여 해석함으로써 시스템의 상태까지 고려한 제어가 가능하다[2].

자동제어의 해석 과정은 플랜트의 모델링부터 시작하여 제어시스템을 구성하고, 전달함수나 상태방정식

* 광주대학교 전기전자공학부(yongmin@gwangju.ac.kr)

** 교신저자 : 광주대학교 전기전자공학과

• 접수일 : 2016. 08. 18

• 수정완료일 : 2016. 09. 13

• 게재확정일 : 2016. 09. 24

• Received : Aug. 18, 2016, Revised : Sep. 13, 2016, Accepted : Sep. 24, 2016

• Corresponding Author : Young-min, Wi

Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Gwangju University,

Email : ymwi@gwangju.ac.kr

으로 출력응답을 해석하게 되는데 그 과정이 쉽지는 않다[3]. 또한 출력응답을 표현하는 다양한 그림들을 제시하고 있으나 프로그램의 소스 코드를 제공하지 않아 시스템의 해석에 한계가 있다[4-5]. 이러한 이유로 인해 이론적인 내용과 플랜트를 연계시켜 시스템을 구성하고, 이를 해석하는 것이 어려운 실정이다. 그렇기에 자동제어를 수강했다 할지라도 산업현장에서 제어공학의 이론을 적용하는 것에 한계를 갖는다.

본 연구에서는 전달함수를 기초로 하여 시스템 모델링과 출력응답을 정의하고, 프로그래밍 언어를 도입하여 윈도우에 응답파형을 그려본다[6-7]. 극점의 위치에 따른 출력응답을 정의하고, 이를 윈도우에 그려봄으로써 이론과 실체를 연계시켜 해석한다[8-9]. 또한 과도응답의 주요 변수인 제동비를 변화시키면서 출력응답이 어떻게 달라지는지 확인한다. RLC 회로의 모델링과 제어시스템을 구성하고, 단위계단함수와 정현파 입력에 따른 전압과 전류 출력응답을 해석한다. 윈도우에 응답파형을 그려봄으로써 전압과 전류의 위상차를 이해하고, 이를 이론적 배경과 비교하여 해석한다. 학기가 종료되는 시점에 설문조사를 실시하여 프로그램 기반의 자동제어 해석 능력과 이해도를 분석한다.

II. 원형 2차계 시스템

원형 2차계를 갖는 플랜트 모델링과 시스템을 구성하고, 전달함수를 이용해 출력응답을 해석한다[10]. 제안된 시스템에 대한 전달함수의 정의부터 출력응답까지 모든 노트를 수강생에게 제공함으로써 이론적 배경을 이해할 수 있도록 한다.

2.1 출력응답의 해석

원형 2차계 시스템의 해석을 위해 직류전동기 이득을 활용하며, 단위궤환 제어시스템을 그림 1과 같이 구성한다. 그림에서 ζ 는 제동비이며 ω_n 은 고유주파수이다[11].

단위계단함수로 입력을 정의하여 라플라스 영역의 전달함수를 계산하면 다음의 식 (1)과 같다.

$$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1)$$

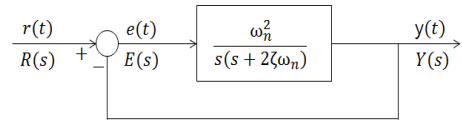


그림 1. 원형 2차계 시스템
Fig. 1 Prototype second-order control system

시간영역의 출력응답을 정현파로 표현하면 다음의 식 (2)와 같다.

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \theta) \quad (2)$$

$$\theta = \cos^{-1}\zeta$$

2.2 극점의 위치에 따른 출력응답

단위계단함수를 입력하고 극점의 위치에 따른 출력응답을 해석하기 위해 그림 2와 같이 시스템을 구성하였다.

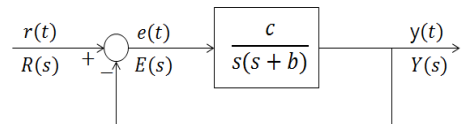


그림 2. 극점의 위치를 해석하는 시스템
Fig. 2 System for analysis of pole location

극점이 라플라스 좌측 평면에서 실근을 갖도록 플랜트 이득을 $b=3, c=2$ 로 정의하고, 출력응답을 계산하면 다음의 식 (3)과 같다.

$$y(t) = 1 - 2e^{-t} + e^{-2t} \quad (3)$$

극점이 라플라스 우측 평면에서 실근을 갖도록 플랜트 이득을 $b=-3, c=2$ 로 정의하고, 출력응답을 계산하면 다음의 식 (4)와 같다.

$$y(t) = 1 - 2e^t + e^{2t} \quad (4)$$

극점이 라플라스 좌측 평면에서 공액복소근을 갖도록 플랜트 이득을 $b=2$, $c=101$ 로 정의하면 제동비는 0.1이 된다. 식 (2)로부터 제동비가 0.1이므로 출력 응답에는 오버슈트가 포함되나, 시간이 경과하면 위계 단함수로 수렴한다.

극점이 라플라스 우측 평면에 존재하기 위해서는 플랜트 이득을 b 에서 $-b$ 로 변경하고, 출력응답을 계산하면 다음의 식 (5)와 같다.

$$y(t) = 1 - \frac{e^{1.005t}}{\sqrt{1-0.1^2}} \times \sin(10.05\sqrt{1-0.1^2}t + \theta) \quad (5)$$

극점이 라플라스 평면의 허수축에 존재하도록 플랜트 이득을 $b=0$, $c=1$ 로 정의하고, 출력응답을 계산하면 다음의 식 (6)과 같다.

$$y(t) = 1 - \frac{e^{jt} + e^{-jt}}{2} = 1 - \cos t \quad (6)$$

극점의 위치에 따른 출력응답을 해석하기 위해 VS-2008 소프트웨어를 이용하였다. 윈도우 영역에 응답파형을 그리고, 표현된 응답파형을 이론과 비교하여 해석한다.

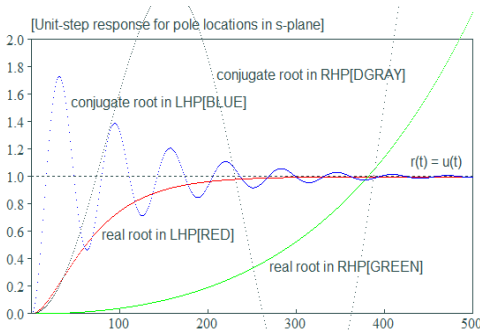


그림 3. 극점 위치에 따른 단위계단응답
Fig. 3 Unit-step response for pole location

그림 3에서 극점의 위치 변화에 따른 응답파형을 표현하였다. 극점이 라플라스 좌측 평면에 존재하는 응답파형은 단위계단함수로 수렴하나, 우측 평면에 존재하면 발산하는 것을 확인할 수 있다.

2.3 제동비 변화에 따른 출력응답

원형 2차계 시스템의 제동비로만 출력응답을 해석하기 위해 고유주파수를 $\omega_n=1$ 로 정의하고, 그림 4와 같이 시스템을 구성한다.

제동비가 $0 < \zeta < 1$ 인 출력응답은 원형 2차계 시스템의 식 (2)로 정의하였다. 그러나 그 범위를 벗어나게 되면 $\sqrt{1-\zeta^2}$ 에 의해 해석이 달라진다.

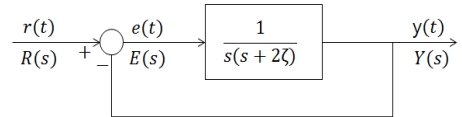


그림 4. 제동비의 변화를 해석하는 시스템
Fig. 4 System for analysis of damping ratio

제동비가 $\zeta=0$ 이면 고유주파수로만 출력응답이 결정된다. 따라서 식 (2)로부터 위상차를 고려한 출력응답을 계산하면 다음의 식 (7)과 같다.

$$y(t) = 1 - \cos t \quad (7)$$

제동비가 $\zeta=1$ 이면 식 (2)의 분모가 0이 되어 출력응답을 계산할 수 없다. 따라서 제한된 시스템의 전달함수를 새롭게 정의하고, 출력응답을 계산하면 다음의 식 (8)과 같다.

$$y(t) = 1 - te^{-t} - e^{-t} = 1 - e^{-t}(1+t) \quad (8)$$

제동비가 $\zeta > 1$ 인 경우의 출력응답을 해석한다. 극점이 라플라스 좌측 평면에서 실수로 존재하도록 특성방정식을 정의하면 다음의 식 (9)와 같다.

$$Y(s) = \frac{K_0}{s} + \frac{K_\alpha}{(s+\zeta)^2 - (\sqrt{\zeta^2-1})^2} \quad (9)$$

$$K_0 = 1, K_\alpha = -s - 2\zeta$$

출력응답을 계산하면 다음의 식 (10)과 같다.

$$y(t) = 1 - e^{-\zeta t} \cosh(\sqrt{\zeta^2-1}t) + e^{-\zeta t} \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2-1}} \sinh(\sqrt{\zeta^2-1}t) \quad (10)$$

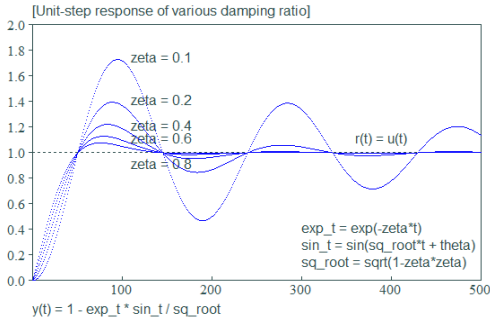


그림 5. 제동비 $0 < \zeta < 1$ 구간의 단위계단응답
Fig. 5 Step-response for damping ratio $0 < \zeta < 1$

식 (10)과 같이 제동비가 $\zeta > 1$ 인 시스템의 특성은 극점이 라플라스 좌측 평면의 실수축에서만 존재하므로 오버슈트가 발생하지 않는다.

그림 5는 제동비가 $0 < \zeta < 1$ 인 경우의 출력응답을 표현한 것이다. 그림에서 제동비가 작아지면 마찰력이 줄어들며, 이는 지수감쇠를 갖는 정현파의 영향이 크다는 것을 의미한다. 또한 고유주파수가 고정되어 있기에 출력응답이 동일한 주파수로 진동하는 것을 확인할 수 있다.

III. RLC 회로의 출력응답 해석

전달함수를 이용하여 RLC 회로의 출력응답을 해석하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 응답파형의 결과를 분석한다.

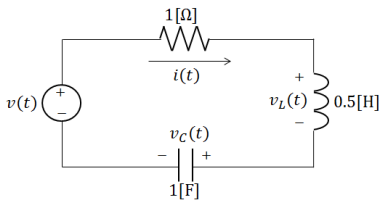


그림 6. RLC 직렬회로
Fig. 6 RLC serial circuit

$v(t)$ 에는 단위계단함수나 정현파가 입력되도록 정의함으로써 직류와 교류를 표현하였다. 출력은 전류 $i(t)$, 커패시턴스 전압 $v_C(t)$ 그리고 인덕턴스 전압 $v_L(t)$ 로 설정하였다.

3.1 전류의 출력응답

커패시턴스 전압을 제한시켜 전류의 출력응답을 계산하는 시스템을 구성하면 그림 7과 같이 된다.

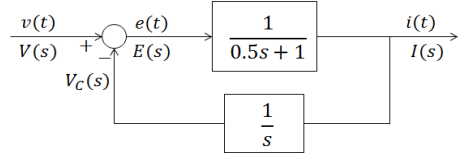


그림 7. 전류를 해석하는 시스템
Fig. 7 System for analysis of current

3.1.1 단위계단함수를 인가한 경우

전류를 출력으로 하는 전달함수를 정의하고, 출력응답을 계산하면 다음의 식 (11)과 같다.

$$I(s) = \frac{2}{(s+1)^2 + 2} \tag{11}$$

시간영역의 출력응답은 다음의 식 (12)와 같다.

$$i(t) = 2e^{-t} \sin t \tag{12}$$

직류 입력에 따른 출력응답 전류는 0으로 수렴하게 되는데, 이는 커패시턴스가 개방되어 전류가 흐를 수 없는 것과 같다.

3.1.2 정현파를 인가한 경우

입력이 정현파이므로 부분분수로 전개한 출력응답 전류는 다음의 식 (13)과 같다.

$$I(s) = \frac{As+B}{s^2+1} + \frac{Cs+D}{s^2+2s+2} \tag{13}$$

방정식의 계수는 다음의 식 (14)와 같다.

$$A = \frac{2}{5}, B = \frac{4}{5}, C = \frac{-2}{5}, D = \frac{-8}{5} \tag{14}$$

위상차를 갖는 시간영역의 전류를 계산하면 다음의 식 (15)와 같다.

$$i(t) = 0.89\sin(t+\theta_1) - 1.26e^{-t}\sin(t+\theta_2) \tag{15}$$

$$\theta_1 = 26.57^\circ, \theta_2 = 18.26^\circ$$

전류 출력응답은 시간이 경과함에 따라 θ_1 의 위상차를 갖는 정현파가 된다. 전압과 전류의 위상차는 전류가 26.57° 만큼 앞서며, 이는 커패시턴스가 인덕턴스보다 용량이 커서 발생하는 현상이다.

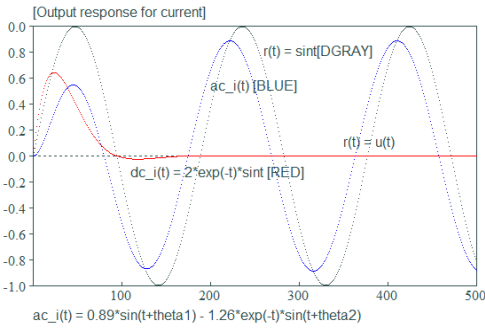


그림 8. 전류의 출력응답
Fig. 8 Output response of current

그림 8은 단위계단함수와 정현파를 인가하여 전류의 출력응답을 표현한 것이다. 직류는 커패시턴스가 개방되어 전류가 흐르지 않으나, 교류는 θ_1 만큼의 위상차가 있는 정현파가 된다. 다만 인과관계에 의해 $t=0$ 에서는 위상차가 존재하지 않는다.

3.2 커패시턴스 전압의 출력응답

커패시턴스 전압을 출력응답으로 해석하기 위해 플랜트 이득을 정의하고, 이를 제어시스템으로 구성하면 그림 9와 같이 된다.

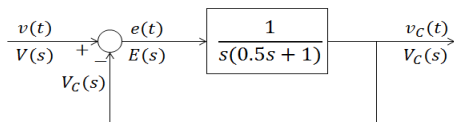


그림 9. 커패시턴스 전압을 해석하는 시스템
Fig. 9 System for analysis of capacitance voltage

3.2.1 단위계단함수를 인가한 경우

전달함수에 의한 커패시턴스 전압을 계산하면 다음의 식 (16)과 같다.

$$v_c(t) = 1 - 1.41e^{-t}\sin(t + \theta) \quad (16)$$

커패시턴스에 축적되는 전압은 입력인 단위계단함

수로 수렴한다. 이는 변위전류가 존재하지 않으므로 전류가 0이 되며, 그에 따라 모든 에너지가 커패시턴스에 축적되는 것이다.

3.2.2 정현파를 인가한 경우

커패시턴스는 전압의 위상이 전류보다 90° 뒤진다. 전류와 커패시턴스 전압을 비교하여 위상차를 계산한 출력응답은 다음의 식 (17)과 같다.

$$v_c(t) = 0.89\sin(t + \theta_1) + 0.89e^{-t}\sin(t + \theta_2) \quad (17)$$

커패시턴스 전압과 정현파 입력과의 위상차를 계산하면 커패시턴스 전압이 63.63° 가 뒤진다.

그림 10에서는 단위계단함수와 정현파를 인가하여 커패시턴스 전압을 표현하였다. 직류에서는 입력이 커패시턴스에 축적되나, 교류를 인가한 경우에는 커패시턴스 전압이 63.63° 만큼 뒤지는 것을 확인할 수 있다.

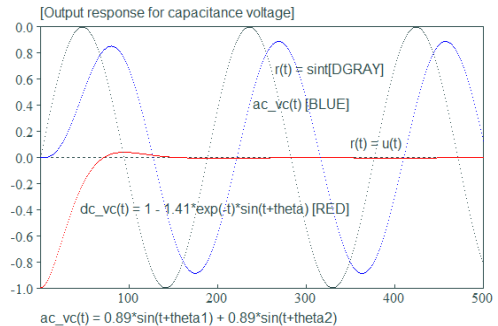


그림 10. 커패시턴스 전압의 출력응답
Fig. 10 Output response of capacitance voltage

3.3 인덕턴스 전압의 출력응답

인덕턴스 전압을 출력응답으로 해석하기 위해 플랜트 이득을 정의하고, 인덕턴스 전압을 케환시킨 시스템을 구성하면 그림 11과 같다.

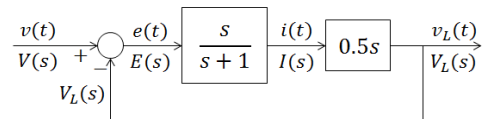


그림 11. 인덕턴스 전압을 해석하는 시스템
Fig. 11 System for analysis of inductance voltage

3.3.1 단위계단함수를 인가한 경우

지수함수와 정현파가 조합된 형태로 시간영역의 인덕턴스 전압을 계산하면 다음의 식 (18)과 같다.

$$v_L(t) = e^{-t} \cos t - e^{-t} \sin t \quad (18)$$

인가전압이 직류인 경우에는 전류 변화가 없어 전압강하를 발생하지 않으며, 식 (18)에서도 0으로 수렴함을 확인할 수 있다.

3.3.2 정현파를 인가한 경우

위상차를 갖는 인덕턴스 전압을 계산하면 다음의 식 (19)와 같다.

$$v_L(t) = 0.45 \cos(t + \theta_1) - 0.89 e^{-t} \cos(t + \theta_2) \quad (19)$$

$$\theta_1 = 26.57^\circ, \theta_2 = 63.43^\circ$$

인덕턴스 전압은 시간이 경과함에 따라 위상차 θ_1 만큼 갖는 여현파가 된다. 따라서 인덕턴스 전압의 위상은 정현파에 θ_1 이 더해진 것과 같으므로 입력보다 116.57° 앞선 위상을 갖게 된다.

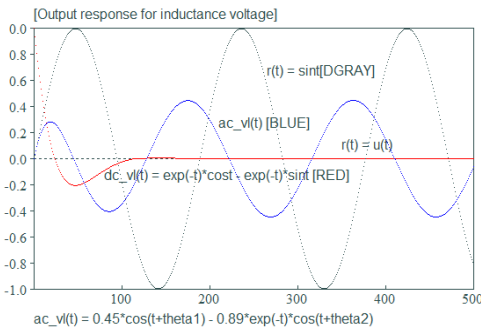


그림 12. 인덕턴스 전압의 출력응답
Fig. 12 Output response of inductance voltage

인덕턴스 전압의 응답과형을 보면 직류에서는 전류의 변화가 없으므로 0이 된다. 그러나 교류에서는 인덕턴스 전압이 입력보다 116.57° 만큼 빠른 위상을 표현하고 있다.

IV. 고전제어 시스템의 이해도 분석

자동제어는 거의 이론 중심으로 시스템 해석이 이루어지기 때문에 학업성취도에 따라 이해도가 다를 수 있다. 본 논문에서는 이론적 배경을 노트로 제공하고, 시스템의 시간응답을 프로그램으로 구현하여 해석하였다.

프로그램 기반의 시간응답 해석이 제어공학의 이해도에 얼마나 영향을 주었나를 평가하는 설문조사를 실시하였다. 설문조사 대상은 전기전자공학과 4학년으로서 자동제어 교과목을 수강한 학생들이며, 남학생 12명과 여학생 2명 등 14명이 설문문에 답하였다. 설문조사 이전의 자동제어에 대한 지식수준은 이론적인 이해보다는 자격증 공부에 따른 개념정립 정도였다. 설문문의 분석을 위해 학기초 제어공학의 주요 용어를 알고 있는지와 프로그램의 코딩 능력을 조사하였다. 그리고 학기말에 프로그램 구현 능력과 자동제어의 주요 내용에 대한 이해도를 조사하였다.

Q1 : 프로그램 코딩 능력을 답하시오.

- ① 제어문을 이용해 프로그램을 코딩할 수 있다.
- ② 함수를 이용해 프로그램을 코딩할 수 있다.
- ③ 포인터를 이용해 프로그램을 코딩할 수 있다.
- ④ 함수의 포인터를 활용할 수 있다.

2번 문항부터는 객관식 5점 만점 척도로 설문조사를 진행하였다. 학기초에는 Q3부터 Q7까지를 용어 중심으로 조사하였으며, 학기말에 전체적인 설문문에 대해 조사를 진행하였다.

Q2 : 프로그램 코딩 능력의 향상

Q3 : 라플라스 변환의 이해

Q4 : 입출력 전달함수의 이해.

Q5 : 극점의 위치에 따른 출력응답의 해석

Q6 : 제동비 변화에 따른 출력응답의 해석

Q7 : 회로의 모델링과 전압 전류의 특성

Q8 : 제어공학의 이해도 향상

프로그램의 코딩 능력을 조사한 Q1의 응답 결과를 그림 13에 표현하였다.

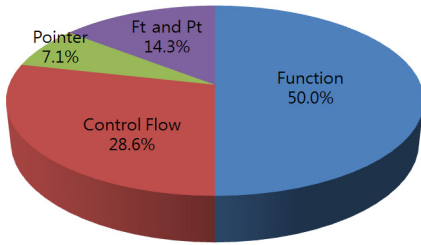


그림 13. 프로그램의 코딩 능력
Fig. 13 Ability for program coding

코딩 능력에서는 함수를 활용할 수 있다는 응답이 높게 나왔다. 이는 프로그램을 해석하고, 간단한 알고리즘이 들어가는 프로그램은 코딩이 가능한 정도라고 분석된다.

Q2부터 Q8까지 설문조사 결과를 표2에 정리하였다. 설문에서 이해도 향상 여부를 묻는 Q2와 Q8은 학기초에는 조사가 무의미하므로 0이 되었다.

표1. 설문 결과
Table 1. Survey result

	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
beginning of the term	0.0	4.3	3.5	3.5	3.5	1.4	0.0
close of the term	4.1	3.7	4.4	3.9	4.0	3.8	4.0

설문 Q3이 학기초에 높은 이유는 공업수학의 수강 비율이 높았다는 의미이며, 자동제어와 연계시켜 전달함수를 정의할 수 있다는 것과는 다르다. 전체적으로는 응답 결과가 향상된 것으로 조사되었다.

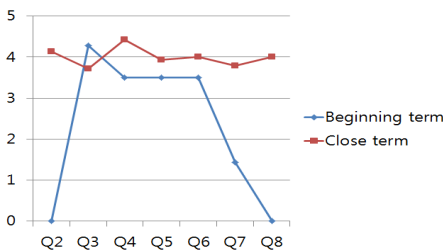


그림 14. 설문 결과의 비교
Fig. 14 Comparison of survey result

설문조사에서 전달함수를 이해할 수 있다는 응답이 4.43으로 가장 높게 나왔다. 이는 시스템 해석에 대한

이론적 자료를 제공하고, 매개변수나 제동비 변화에 따른 응답과형을 직접 표현해 봄으로써 이론과 실재가 조합된 결과로 분석된다. 다음으로 자동제어의 수장으로 프로그램 코딩 능력이 향상되었다는 응답이 4.14로 나왔다. 이는 시스템의 시간응답을 표현하기 위해 프로그래밍 함수는 물론, 포인터까지 활용하여 소스 프로그램을 코딩한 결과로 분석된다. 제동비의 응답이 4.0을 초과한 이유는 매개변수 변화에 따라 출력응답이 변화되는 것을 직접 확인한 결과로 분석된다. 다만 수학적 이론이 더 요구되는 설문은 상대적으로 평가가 낮게 나왔다. 프로그램을 활용해 응답과형을 직접 그려봄으로써 자동제어의 이해도가 높아졌는가를 주요한 요소로써 평가하였으며, 응답 결과는 4.0이 나왔다. 이는 프로그램을 도입한 자동제어의 해석이 긍정적으로 전달된 것이라 분석된다.

V. 결론 및 제언

본 논문에서는 시스템 모델링과 전달함수를 정의하고, 시간영역의 출력응답을 프로그램으로 구현하였다. 자동제어의 이해도를 평가하는 설문조사를 실시해 다음의 결론을 얻었다.

첫째, 플랜트 모델링부터 출력응답까지를 노트로 제공해 이론적인 어려움을 완화하고, 프로그램을 이용해 시스템의 시간응답을 해석하였다.

둘째, 극점 변화에 따른 출력응답을 해석하는 시스템을 구성하였으며, 라플라스 좌측 평면만이 안정하다는 것을 확인하였다.

셋째, 제동비에 따른 출력응답을 확인하는 시스템을 구성하였으며, $0 < \zeta < 1$ 구간에서 오버슈트를 가졌다. $\zeta > 1$ 에서는 오버슈트가 없이 입력을 수렴하였으며, 0에서는 무한진동을 확인하였다.

넷째, RLC 회로의 시스템 모델링과 전류, 커패시턴스 및 인덕턴스 전압을 출력응답으로 해석하였다. 전류는 직류에서 0으로 수렴하였으나 교류에서는 전압보다 25.67° 만큼 위상이 앞선다. 커패시턴스 전압은 직류에서는 단위계단함수로 수렴하였으며, 교류에서는 정현파보다 63.63° 가 뒤진다. 인덕턴스 전압은 커패시턴스와 반대로 직류에서는 0이 되며, 교류에서 입력과보다 116.57° 앞선다. 다만 인과관계에 의해 $t=0$ 에서는 전

압과 전류의 위상차가 없다는 것을 확인하였다.

다섯째, 제어공학의 이해도를 평가하는 설문조사를 실시하였다. 프로그램 능력에서는 간단한 알고리즘을 이용한 코딩이 가능한 것으로 조사되었다. 전달함수의 이해도가 가장 높게 평가된 것은 이론과 응답과형의 실습이 조합된 결과로 분석된다. 프로그램 코딩 능력의 향상이 긍정적으로 평가된 것은 함수와 포인터까지 활용할 수 있도록 프로그램을 구현한 결과로 분석된다. 자동제어의 이해도를 묻는 질문은 4.0으로 평가되었으며, 이는 이해하기 어려웠던 이론적 배경들을 직접 코딩한 응답과형과 비교해 봄으로써 이해도가 증대되었다고 분석된다.

고전 제어 측면에서 시스템 모델링과 전달함수를 정의하고, 프로그램으로 시간응답을 확인하였다. 향후의 주제는 윈도우 모드에서 동작하는 프로그램의 코딩이 필요하다. 또한 시스템 모델링부터 출력응답까지를 시간영역에서 해석하는 상태방정식을 정의하고, 이를 프로그램으로 구현하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2016년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

References

[1] H. Yang, D. Kim, J. Park, T. Song, G. Jeong and W. Hur, *Automatic Control Systems*, Seoul, Cheongmoongak, 2010.
 [2] Y. Choi, *Modern Control Engineering*. Seoul, Hongrung Publishing, 2012.
 [3] K. Park, Y. Kim, K. Kim, and K. Ban, "Design and Implementation of Cloud-based Sensor Data Management System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 6, 2010, pp. 672-677.
 [4] S. Han, Y. Lee, B. Gwon, O. Gwon, and W. Gwon, *Control Engineering*. Seoul, Hanbit Academy, 2013.
 [5] S. Kim, *Control Engineering*. Seoul, Hanbit Academy, 2014.
 [6] W. Kim, *Practical C Programming*. Seoul, EHAN media, 2008.

[7] J. Cheon, *C Programming*, Seoul, EHAN media, 2012.
 [8] K. Park, Y. Kim, and N. Ryu. "Language Education System with Structured Programming," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 5, 2010, pp. 459-464.
 [9] Y. Lim and S. Bae, "A Study on Development of the Meteorological Data Preprocessing Program for Air Pollution Modeling," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 1, 2015, pp. 47-53.
 [10] J. Park, G. Lee, J. Lee, J. Jeong, and Y. Joo, *Control Systems Engineering*. Seoul, Hongrung Publishing, 2010.
 [11] B. KUO. *Automatic Control Systems*. Englewood Cliffs, PRENTICE HALL, 1991.

저자 소개



민용기(Yong-Ki Min)

1982년 전남대학교 제어계측공학과 졸업(공학사)
 1986년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1992년 전남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
 1992년~현재 광주대학교 전기전자공학과 교수
 ※ 관심분야 : 디지털제어



위영민(Young-Min Wi)

2005년 중앙대학교 전자전기공학과 졸업(공학사)
 2009년 고려대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(공학석사)

2013년 고려대학교 대학원 전기전자전파공학과 졸업(공학박사)
 2014년~현재 광주대학교 전기전자공학과 조교수
 ※ 관심분야 : 스마트그리드 요소기술 개발