

## 가변 용량형 액셀 피스톤 펌프를 위한 사판각 제어기

안중갑<sup>1</sup> · 소명옥<sup>†</sup>

(Received March 28, 2017 ; Revised May 23, 2017 ; Accepted September 6, 2017)

### Angle controller for swash plate of a variable displacement axial piston pump

Jong-Kap Ahn<sup>1</sup> · Myoung-Ok So<sup>†</sup>

**요약:** 펌프는 유압시스템에서 기계에너지를 유압에너지로 변환시켜주는 주요한 요소이다. 많은 종류의 펌프들 중 액셀 피스톤 펌프는 높은 효율과 제어의 편의성 때문에 유체동력산업에서 폭넓게 사용되고 있다. 최근 선박에서는 전자제어 엔진이 개발되면서 기존의 연료분사장치와 배기밸브작동을 위한 기계적인 시스템이 사라지고 산업에서 널리 이용되고 있는 유압제어시스템에 의해 이들을 작동시키는 시스템이 개발되어 사용되고 있다. 본 논문에서는 선박 전자제어엔진용 유압시스템의 압력형성기기인 사판식 가변용량형 액셀 피스톤 펌프의 유량을 조절하는 사판의 위치(각)제어를 위해 두개의 P제어기를 갖는 캐스케이드 제어시스템을 설계하고자 한다. 이때, ISE 성능지수를 목적함수로 갖는 실수코딩유전알고리즘에 제어기의 설계 사양으로 주어지는 제약조건을 고려하여 제어기의 파라미터를 추정한다. 제어시스템의 성능평가는 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 이루어진다.

**주제어:** 유압시스템, 가변용량 액셀 피스톤 펌프, 유전알고리즘, 제약조건, 성능지수

**Abstract:** A pump is a principal component in a hydraulic system that converts mechanical energy into hydraulic energy. Among the several types of pumps, the axial piston pump has wide applications in the fluid power industry because of its high efficiency and ease of control. Recently, a variable displacement axial piston pump with swash plate was adopted into hydraulic power systems for application as fuel injection boosting pump and exhaust gas valve actuator of the electronically controlled 2-st low speed main engine in marine applications. In this study, a cascade control system with two P controllers for swash plate angle control of variable displacement axial piston pump was designed. Most often, such plants are already controlled by conventional PID controllers with satisfactory results. To determine the two P parameters, Real-coded genetic algorithms (RCGA) will be applied with ISE criteria including constraints related to the design specification of control systems. The dynamic performance of the designed control system determined via computer simulation is presented.

**Keywords:** Hydraulic system, Variable displacement axial piston pump, Genetic algorithms, Constraints, Performance criteria

#### Nomenclature

$M_D$	:	overshoot
$t_r$	:	rising time
$t_s$	:	2% settling time
$e_{ss}$	:	steady state error

#### 1. 서론

최근 선박에서는 전자제어엔진이 개발되면서 기존의 연료분사장치와 배기밸브작동을 위한 기계적인 시스템이 사라지고 산업에서 널리 이용되고 있는 유압제어시스템에 의해 이들을 작동시키는 시스템이 개발되어 사용되고 있다[1].

일반적인 유압서보 시스템에서 유압펌프는 유압유를 토출하는 방식에 따라 기어펌프, 베인펌프 그리고 피스톤 펌

프로 크게 구별할 수 있으며 이 중 피스톤 펌프는 효율이 높고, 넓은 영역의 압력, 온도 그리고 점도에서 사용할 수 있으며 펌프제어가 용이하다. 사판식 가변 용량형 액셀 피스톤 펌프는 전자 제어밸브를 이용하여 사판각을 변화시켜 부하의 요구에 따라 필요로 하는 유량만을 공급하는 시스템으로서 여러 가지 부하에 대처할 수 있다.

본 논문에서는 현재 선박용 전자제어엔진에 적용되어 엔진의 운전 부하에 따라 펌프의 압력과 유량을 조절하는 사판식 가변 용량형 액셀 피스톤 펌프를 위한 제어시스템 중 사판의 위치(각)를 조정하는 제어시스템을 설계하고자 한다.

Hyun[2]은 내부제어시스템으로 PD제어시스템을 제안하였고, Jung[3]은 비례솔레노이드밸브의 제어를 위해 PI제어

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3258-6221>): Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: smo@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4248

<sup>1</sup> SEAWARD Ship Management, E-mail: JongKap.Ahn@seaward.kr, Tel: 051-714-0369

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.

기를 제안하였으며, Lee[4]와 Son[5]은 강인제어기를 설계하였다. 모두 만족할 한 성능을 보이고 있지만, Hyun은 비례밸브(Proportional valve)의 위치제어를 제외한 사판각의 각도 제어만을 고려하였으며, Jung, Lee, Son [3]-[5]은 제어기 성능에 대한 정량적인 조건 및 평가가 부족하였다. 또한, 이들 모두 포화기에 대한 고려를 하지 않았다. 이를 보완하기 위해 본 논문에서는 산업현장에서 일반적으로 사용되는 PID 제어기의 P 제어만을 채택하여 캐스케이드 형태의 제어시스템을 고려하였다. 이는 선박용 전자제어엔진의 운전 부하에 따른 펌프 토출량 제어시스템을 설계하기 위한 내부 제어시스템으로써 최소한의 제어기 구성만으로 성능을 확보하기 위한 것이다. 두 개의 제어기 파라미터들은 오버슈트와 정상상태오차가 없도록 제어기 설계사양이 제약조건으로 추가된 실수코딩유전알고리즘(Real-Coded Genetic Algorithms)에 의해 동시에 탐색된다. 이 때 제어시스템에서는 비례밸브와 사판의 기구적인 한계를 포화기로서 고려한다. 최적화된 제어기 파라미터들은 ISE 성능지수에 의해 목적함수가 최소가 되도록 하며, 설계된 제어시스템은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하고자 한다.

## 2. 사판각 구동시스템의 모델링

Figure 1은 산업용 사판식 가변 용량형 액셀 피스톤 펌프의 일레이다[6]. 펌프의 사판각 구동시스템은 제어밸브와 실린더 및 스프링으로 구성된 위치 제어시스템과 동일하게 취급할 수 있고, 사판각 제어는 펌프의 구동기 속도가 일정하다는 가정하에 유량제어기능을 갖는다[7].

사판각 제어실린더의 압력제어를 위한 제어밸브로는 직동형 압력제어밸브가 많이 사용되고 제어밸브 내부에 압력변환기, 피드백 구조의 비례제어기와 구동용 앰프가 내장되어 있어 출력압력을 전자식으로 제어할 수 있다[5]-[7].

Figure 2는 M사에서 적용되고 있는 시스템의 일례로써 Figure 2 (a)는 El-driven start-up pumps (Starts-up/back-up for combined hydraulic power supply)에 사용되는 일반적인 on-off 방향 제어 밸브가 장착된 유압회로도이며, Figure 2 (b)는 Gear-driven pumps에 사용되는 일반적인 비례 제어 밸브가 장착된 유압회로도이다[8]. 여기에는 사판의 위치를 피드백하는 센서가 추가되고, 유압시스템의 안정화를 위해서 로직밸브가 추가된 것을 볼 수 있다.

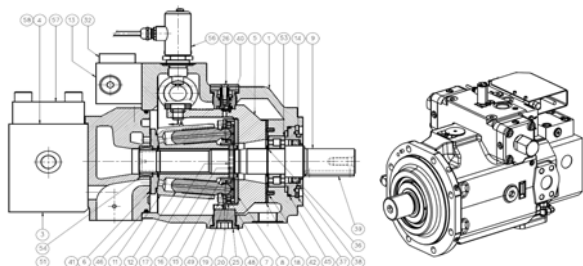


Figure 1: A variable displacement axial piston pump with swash plate

Table 1: Parts name of variable displacement axial piston pump with swash plate

Item	Part name	Item	Part name
①	Housing	⑲	Adjust bolt-2
②	Stopper	⑳	Nut
③	Logic block	㉑	Tube assembly
④	Valve block	㉒	Sub plate
⑤	Swash plate	㉓	Snap ring
⑥	Valve plate	㉔	Snap ring
⑦	Shoe plate	㉕	Snap ring
⑧	Wearing plate	㉖	Oil seal
⑨	Shaft	㉗	Key
⑩	Control piston	㉘	Pin
⑪	Cylinder block	㉙	Pin
⑫	Piston Assembly	㉚	Spring pin
⑬	Valve block	㉛	O-ring
⑭	Oil seal cover	㉜	O-ring
⑮	Ball guide	㉝	O-ring
⑯	Shim	㉞	O-ring
⑰	Disk spring	㉟	R-ring
⑱	Sliding plate	㊱	ED-ring
⑲	Push plate-1	㊲	Socket bolt
⑳	Push plate-2	㊳	Socket bolt
㉑	Cover	㊴	Socket bolt
㉒	Adjust bolt-1	㊵	Socket bolt
㉓	Lock nut-1	㊶	Needle bearing
㉔	Lock nut-2	㊷	Rolling bearing
㉕	Swash plate pin	㊸	Plug
㉖	Mechanical indicator assembly		
㉗	Adjusting device valve		
㉘	Swash plate pin	㉟	Logic cover
㉙	Joint plate	㊹	Logic

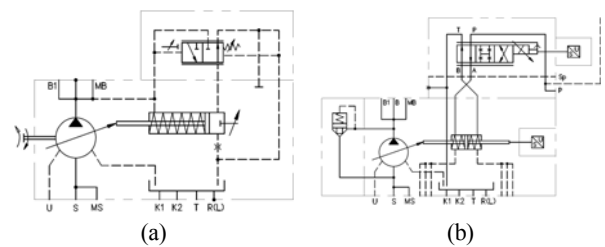


Figure 2: Hydraulic circuit of a variable displacement axial piston pump with swash plate

사판 그룹은 사판, 슈 플레이트, 사판 서포트, 틸팅부시, 틸팅 핀, 제어실린더 등으로 구성된다. 사판은 슈 접동면의 반대측에 형성된 원통상의 부분이 사판 서포트에 지지된다. 그리고 레귤레이터에 의해 제어된 유압력이 제어실린더에 공급됨으로서 제어실린더가 좌우로 움직이고, 여기에 조립된 틸팅 핀에 의해, 사판은 경사각을 변화시킨다[9].

제어기로부터 전기신호를 받아 제어실린더의 유압력을 조절하는 작동밸브는 식 (1)과 같이 근사적인 1차 시스템으로 쓸 수 있다.

$$Q_v(s) = \frac{K_a}{1 + \tau_s s} U(s) \quad (1)$$

여기서  $U(s)$ 와  $Q_v(s)$ 는 각각 제어기와 제어밸브의 출력이며,  $K_a$ 와  $\tau_s$ 는 각각 제어밸브의 이득과 시정수를 의미한다.

이렇게 공급된 유압력에 의해 좌우로 움직이는 제어실린더와 사판은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 이러한 조합은 적분기 역할을 한다[2].

$$\Phi(s) = \frac{1}{A_c s} Q_v(s) \quad (2)$$

여기서  $\Phi(s)$ 는 서보피스톤의 출력으로써 사판의 최종적인 경사각이다.  $A_c$ 는 사판각 제어실린더의 단면적이다.

제어대상의 전체 전달함수는 식 (3)과 같이 근사방정식으로 나타낼 수 있고,

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{K_a}{A_c \tau_s s^2 + A_c s} \quad (3)$$

블록선도로 표시하면 Figure 3과 같다.

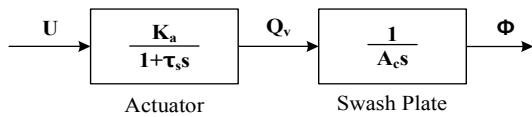


Figure 3: Block diagram of swash plate system

### 3. 실수코딩유전알고리즘

사판각 제어시스템의 만족할 만한 제어 성능을 얻을 수 있도록 최적의 제어 파라미터를 얻기 위해 본 논문에서 사용되는 유전알고리즘은(Genetic Algorithms : GAs)은 1975년 J. H. Holland교수에 의해 처음 소개되었다. 이후, Goldberg가 광범위하게 전파했으며, De Jong이 잠재적인 여러 탐색 방향과 GAs의 성능에 영향을 미치는 동정 인자들의 영향력들을 요약하였다. GAs가 기존의 탐색법과 다른 점은 파라미터 자체를 사용하기 보다는 이를 기호로 표현한다는 것과 하나의 해를 다루기보다는 해 집단을 취급한다는 점이다. 그리고 연산자들이 확률에 기초하여 동작되므로, 얻어지는 결과는 결정적이기 보다는 확률적이라는 특징도 가진다. 다양한 최적화 문제를 해결하기 위하여 여러 종류의 GAs가 발표되었으나, 초기 해 집단의 생성, 집단내 개체들의 적합도 평가, 기본 연산자의 사용과 같은 기본적인 메카니즘은 서로 유사하다[10]. GAs의 탐색 과정은 크게 집단의 초기화, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이의 5단계로 구분된다.

본 논문에서는 변수(표현형)와 유전자(유전자형)간에 일대일 일치로 프로그래밍이 간편해지고 이진 코딩 유전알고리즘(Binary-Coded Genetic Algorithms : BCGAs)에서 요구되는 부호화, 복호화 프로세스가 필요 없게 되어 탐색속도를 높일 수 있는 실수코딩 염색체를 다루는 RCGA를 사용하기로 한다.

집단의 초기화에서는 탐색 공간상의 점들을 표현하는 방법이 결정되면 주어진 문제의 해가 될 가능성이 있는 개체들이 유전연산자를 통해 모의진화가 수행될 초기 개체 집단으로 형성된다.

적합도 평가는 식 (4)와 같은 최대화 형태를 사용한다.

$$f(s) = -F(\chi) - F_{\min} \quad (4)$$

여기서  $f(s)$ 는 적합도 함수,  $F(\chi)$ 는 목적함수,  $F_{\min}$ 은  $f(s) \geq 0$ 을 보장하는 상수이다.

본 논문에서 다루는 RCGA는 재생산, 교배, 돌연변이 연산자를 기본적인 유전 연산자로 채용하고 있다. 여기서 재생산은 구배와 유사한 재생산(Gradient-like reproduction), 교배는 수정단순교배(Modified simple crossover), 돌연변이는 동적 돌연변이(Dynamic mutation)를 채택하였다. 그리고 탐색성능을 높이기 위해 선형 스케일링(Linear scaling)을 사용하였고, 이전 세대의 최적 개체를 생존시키기 위한 엘리티즘(Elitism)전략을 사용하였다[11].

### 4. 제어 시스템 설계 및 제어기 동조

사판에 의해 액셀 피스톤 펌프의 용량을 변화시켜 펌프의 토출량을 제어하기 위한 전체 제어 시스템은 Figure 4와 같이 내부에 사판각 제어 시스템을 포함하는 이중루프제어기, 즉 캐스케이드 제어 형태의 시스템으로 구성할 수 있다[12]. 이는 토출 압력만을 이용하는 단일루프제어기와 사판각을 보조변수로 피드백하는 제어기가 현실적으로 의미가 있기 때문이다. 그 외의 변수들을 이용하는 것은 측정에 문제가 있거나 상대적으로 높은 센서 가격에 의해 실용성이 떨어진다[2]. 이러한 캐스케이드 형태의 펌프 토출량 제어시스템 중, Figure 5와 같이 본 논문에서는 내부에 포함된 사판각(또는 위치) 제어 시스템만을 다루고자 한다.

#### 4.1 사판각 제어 시스템

PID 제어기는 구조가 간단하면서도 안정성이 높고 또 안티와인드업, 수동/자동 무충돌 전환(Bumpless transfer) 등의 부가기능과의 결합이 용이하기 때문에 아직도 산업현장에서는 폭넓게 이용되고 있으므로 본 논문에서도 이를 이용한다[13]. 사판각 제어 시스템은 사판각을 제어하기 위한 P 제어기, 비례밸브를 제어하기 위한 P 제어기를 Figure 6과 같이 구성하여 사판의 각도를 제어할 수 있다[12].

#### 4.2 RCGA를 이용한 사판각 제어기 동조

Figure 6은 RCGA를 이용하여 캐스케이드 P 제어기를 최적 동조하는 블록선도로서 RCGA는 제어기의 파라미터  $K_{ps}$ 와  $K_{pA}$ 를 최적으로 동조하게 된다.

P 제어기 동조 시에 발생하는 다변수 최적화 문제를 풀기 위해 사용되는 RCGA는 실수코딩을 채용함으로써 RCGA의 염색체(Chromosome)는 P 제어기 두 개의 파라미

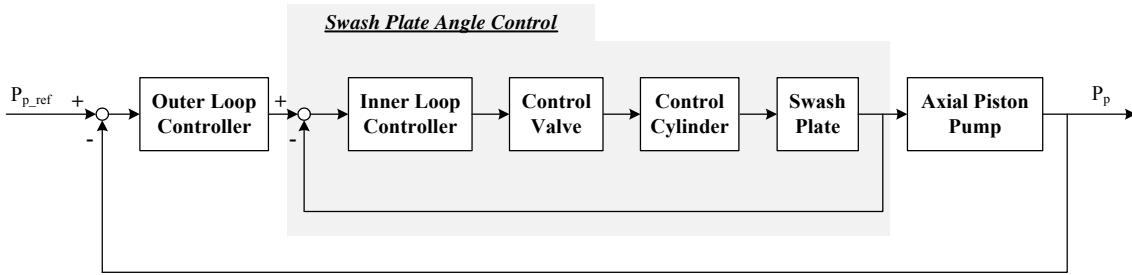


Figure 4: Pressure control systems for a variable displacement axial piston pump

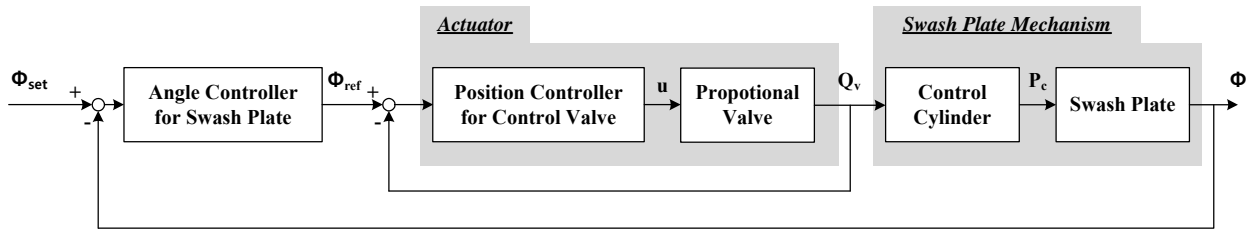


Figure 5: Angle control systems for swash plate

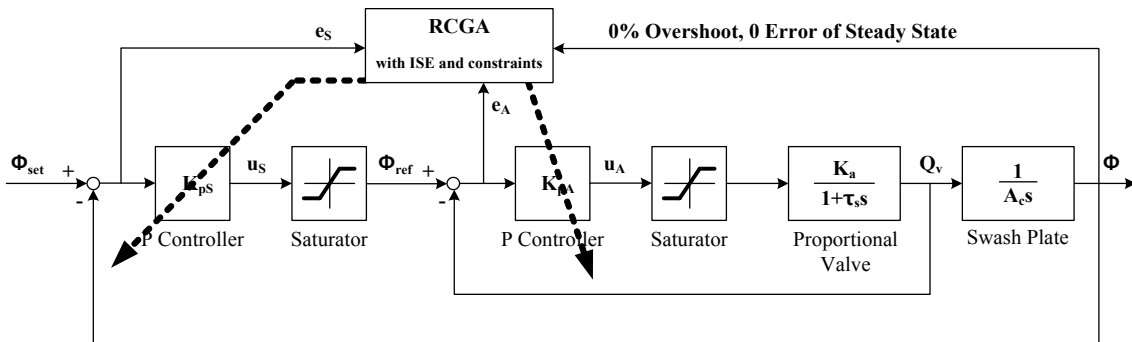


Figure 6: Parameters optimization of controller

터를 유전자로 가지게 된다. 한편, 집단 내 염색체들의 성능이 좋고 나쁨은 적합도 평가를 통해 계량되며, 적합도는 성능지수(목적함수)로부터 계산되어진다. 본 논문에서는 제어환경에 따라 적절히 선택해서 사용할 수 있도록 식 (5)의 제곱오차적분(ISE) 성능지수를 고려한다. ISE는 일반적으로 해석이 용이하여 최적 제어기 설계 등에 자주 이용되나 오차가 클 때는 큰 벌점을, 작을 때는 작은 벌점을 주는 결과를 초래해 최적해 부근에서 계수의 변화에 둔감하다.

$$ISE : J(\psi) = \int_0^{t_f} e^2(\psi, t) dt \quad (5)$$

여기서  $\psi = [K_{pS}, K_{pA}]^T \in \mathbb{R}^2$ 는 P 제어기 파라미터로 구성되는 벡터이고,  $e$ 는 설정치와 출력간의 오차이며,  $t_f$ 는 이후의 적분값이 무시될 수 있도록 충분히 큰 시간이다.

사판각의 설정치 변경시 발생될 가능성이 있는 오버슈트에 의해 불규칙적인 유체의 압력이 유압시스템 내에 전달되는 것을 피하기 위해 오버슈트(Overshoot)가 발생되지 않도록 이를 제어기의 설계사양으로 고려하고 RCGA의 제약조건으로 사용하여 제어기의 파라미터를 탐색할 것이다. 본 논문에서는 RCGA가 제약조건을 처리하는 방법 중 고정 벌

점전략을 사용하였다. 흔히 제약조건을 가지는 최적화 문제들의 해공간은 적합한 영역과 부적합한 영역으로 구성된다. 만약 알고리즘이 부적합한 영역을 탐색하게 될 때 벌점을 부과하고 이 벌점을 평가함수 계산에 반영하면 제약조건이 따르는 최적화 문제를 제약조건이 없는 문제로 변환할 수 있다. 이렇게 제약조건을 고려함으로써 제어기 설계 문제는 복잡한 제약성 최적화 문제로 귀착되는데 그 해를 구하기 위해 유전알고리즘을 이용한다. 유전알고리즘이 제어기의 파라미터를 찾는 과정에서 집단내의 잠재적인 해들이 제약조건을 위반(부적합한 영역을 탐색)할 때를 처리하기 위해 벌점전략을 채용하고, 그 위반 정도에 따라 벌점을 추가하도록 벌점함수  $P(\xi)$ 를 식 (6)과 같이 정의하였다[14].

$$F(\xi) = J(\xi) + P(\xi) \quad (6)$$

$$\text{단, } P(\xi) = \begin{cases} 0 & , \xi \text{가 적합한 해일 경우} \\ \sum_{j=1}^J w_j g_j^2 & , \xi \text{가 부적합한 해일 경우} \end{cases}$$

여기서  $w_j$ 는 각 제약조건에 대응되는 벌점상수로서 설계자에 의해 적절하게 선정되는 변수이며  $J(\xi)$ 는  $\xi$ 에 종속되

는 목적함수 값이다. 이렇게 함으로써 제약성 최적화 문제는 시스템의 방정식을 만족하면서  $F(\xi)$ 를 최소로 하는 비 제약성 최적화 문제로 변환된다.

한편 RCGA의 제어변수로 집단의 크기는 30, 재생산 계수를 1.7로 사용하는 구배와 유사한 재생산, 교배확률이 95%인 수정 단순교배, 돌연변이 확률이 20%인 동적돌연변이를 선택하였으며, 스케일링 윈도우 기법과 엘리트전략을 사용하였다. 별점상수는  $1e+10$ 을 적용하였다.

### 5. 모의실험 및 검토

모의실험을 위한 제어대상의 파라미터는 Table 2와 같고 [2], 식 (3)의 전달함수는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

Table 2: Parameters of controlled system

parameter	value	unit
$A_c$	5.7430e-4	m <sup>2</sup>
$\tau_s$	0.02	sec
$K_a$	0.0343	

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{0.0343}{5.7430e^{-4}s(0.02s+1)} \quad (7)$$

#### 5.1 RCGA에 의한 제어기 파라미터 동조

제어대상의 단위계단입력에 대한 응답을 기준으로 Figure 7은 RCGA가 파라미터를 찾아가는 일례를 보인 것이다. 이 때 작동기인 제어밸브의 포화와 사판의 포화를 고려하여 파라미터 동조를 수행하였다. 약 25세대 전 후로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그리고 얻어지는 파라미터들의 정밀도는 초기집단의 선택에 따라 달라질 수 있어 독립된 씨드(Seed)로 생성된 초기집단으로 30회 이상 모의실험을 실시하고 그 결과를 평균하였다. 성능지수와 제약조건에 의해 동조된 결과는 Table 3과 같다.

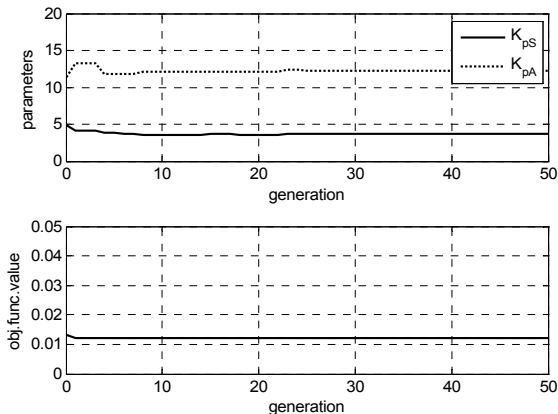


Figure 7: RCGA-based evolutionary tuning for cascade P controller

Table 3: Estimated parameters by RCGA

	Average	Standard Deviation
$K_{pS}$	3.6762	0.0037740
$K_{pA}$	12.2692	0.0094256

#### 5.2 설정치 추종 모의실험

Figure 8과 Figure 9는 RCGA에서 제약조건에 고려에 따라 탐색된 파라미터를 이용하여 단위계단 입력에 대한 설정치 추종 성능을 모의실험을 통해 비교한 것이다.

Figure 8은 사판이 0°에서 1°로 변경될 때의 설정치 추종 성능을 보여주고 있다. 이 때 제어기의 출력은 사판의 물리적인 포화각인 [-18° 18°]를 고려한 것이다. 제약조건이 고려되어 탐색된 파라미터는 설정치 변경에 대해서 오버슈트가 없고, 정상 상태 편차 없이 설정치를 추종하고 있다.

Table 4는 제어성능을 정량적으로 계산한 결과이다.

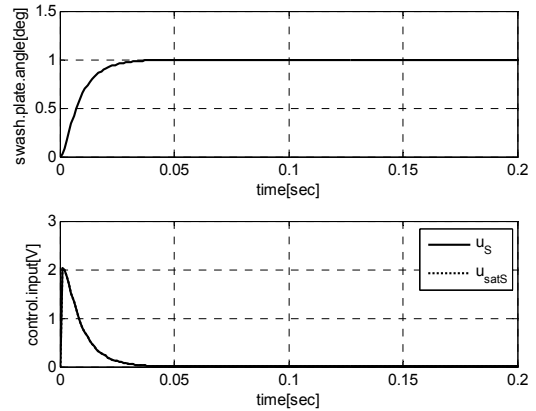


Figure 8: Set-point tracking responses when angle of swash plate is step-wisely increased from 0° to 1°

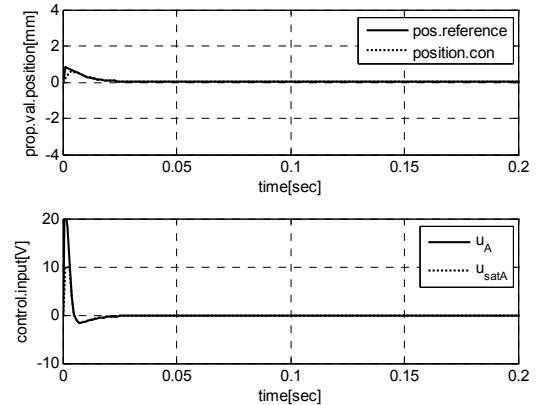


Figure 9: Set-point tracking responses when position of proportional control valve is step-wisely increased from 0° to 1°

Table 4: Set-point angle tracking performances when angle of swash plate is step-wisely increased from 0° to 1°

$M_p$	$t_r$	$t_s$	$e_{ss}$
0	0.0170	0.0310	0

Figure 9는 사판각 제어기의 출력이 비례제어밸브의 설정치로써 비례제어밸브를 제어하는 것을 보여주고 있다. 이 때 제어기의 출력은 비례제어밸브의 물리적인 포화 위치인 [-4mm 4mm]에 해당되는 전압신호인 [-10V 10V]를 고려한 것이다.

M사는 자사의 선박 추진용 대형 저속 전자제어 디젤엔진에 적용되는 유압시스템의 경우, 0.2초 이내에 10%에서 90%까지 펌프 유량의 변화가 가능하도록 규정하고 있다[8]. 본 논문에서 고려되고 있는 유압펌프의 사판각은 Figure 10과 Figure 11과 같이 사판이 0°에서 최대각인 18°로 변경될 때 약 0.035초 이내에 90%까지 도달하고, 오버슈트가 없는 것을 확인할 수 있다. Table 5는 제어성능을 정량적으로 계산한 결과이다.

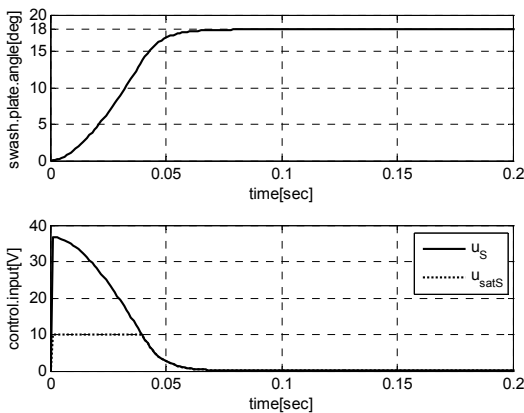


Figure 10: Set-point tracking responses when angle of swash plate is step-wisely increased from 0° to 18°

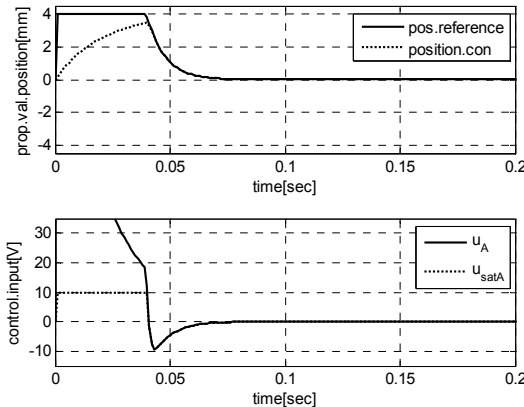


Figure 11: Set-point tracking responses when position of proportional control valve is step-wisely increased from 0° to 18°

Table 5: Set-point angle tracking performances when angle of swash plate is step-wisely increased from 0° to 18°

$M_p$	$t_r$	$t_s$	$e_{ss}$
0	0.0350	0.0810	0

실제 제어 환경에서는 신호계측 시 항상 센서로부터 잡음이 유입될 가능성이 있으므로 제어기 설계 시 이 점을 유의

할 필요가 있다. Figure 12은 잡음에 대한 영향을 알아보기 위해 두 개의 센서에 정규잡음  $N(0, 0.05)$ 이 유입되는 것으로 가정하고 설정치를 변경하면서 모의실험을 진행한 결과이다. 잡음이 있음에도 불구하고 설정치 부근에서 만족스러운 성능을 보여주고 있다. Figure 13는 제어입력의 1~2초 사이를 확대한 것이다. 제한된 범위 내에서 진동하고 있다.

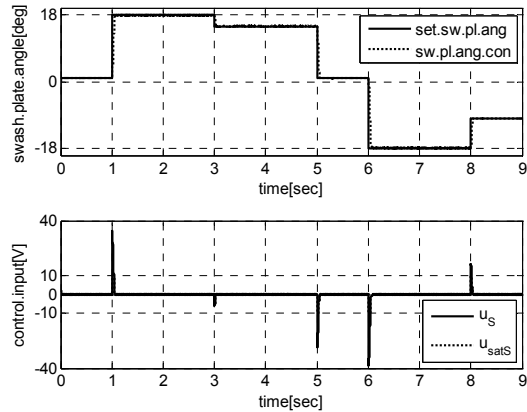


Figure 12: Set-point tracking responses with noise  $N(0, 0.05)$  when angle of swash plate is step-wisely increased or decreased

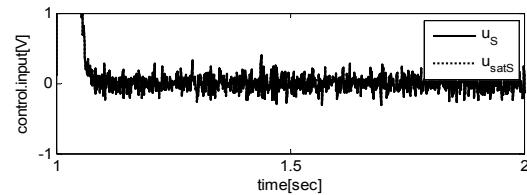


Figure 13: Expanded figure between 1sec and 2sec for control input of Figure 12

## 6. 결론

가변 용량형 액셀 피스톤 펌프의 사판각을 제어하기 위해 캐스케이드 제어 형태로 두 개의 P 제어기를 사용하였다. 하나의 P 제어기는 사판각 설정치에 대한 오차로부터 비례제어밸브의 위치를 설정하기 위해 사용되었고, 다른 하나는 비례제어밸브의 위치를 제어하기 위해 사용되었다. 설계된 제어시스템의 제어기 파라미터들은 RCGA에 의해 탐색되었으며, 이때 성능지수로는 사판각의 오차와 비례제어밸브의 위치오차를 최소화시키기 위해 ISE가 사용되었다. 또한, 설계사양으로는 오버슈트가 발생되지 않도록 고려되었으며 이는 RCGA의 제약조건으로 사용되었다. 이렇게 추종된 제어기 파라미터들은 모의실험을 통해 오버슈트 없이 빠른 시간 안에 설정치를 추종하는 것을 알 수 있었다. 센서신호에 잡음이 있음에도 불구하고 설정치 부근에서 만족스러운 성능을 보여주었다.

향후 연구과제로는 가변 용량형 액셀 피스톤 펌프의 압력제어 또는 유량제어를 위한 제어시스템을 설계하고 검토하고자 한다.

## References

- [1] MAN Diesel & Turbo, MAN B&W K98ME7-TII Project Guide, Copenhagen, Denmark: MAN, 2010
- [2] J. H. Hyun, Electro-hydraulic Control of a Variable Displacement Axial Piston Pump, Ph.D. Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea, 1999 (in Korean).
- [3] G. H. Jung, "Design of position controller for proportional solenoid valve using system identification," Journal of Drive and Control, vol. 7, no. 4, pp. 23-31, 2010 (in Korean).
- [4] J. C. Lee, "Robust control of efficient hydraulic servo systems with servo-pump," National FLUID POWER Association, The Expo and Technical Conference for Electrohydraulic and Electropneumatic Motion Control Technology, 94-2\_3, March 1994.
- [5] J. H. Son, Modeling and Robust Controller Design of Swash Plate for Swash Plate Type Variable Displacement Axial Piston Pump, M.S Dissertation, Pusan National University, Korea, 2007 (in Korean).
- [6] L-A4VSO 500 HS4E/30L-PZH25N00/SO-36-283, <http://www.boschrexroth.com>, Accessed March 24, 2017.
- [7] N. D. Manring, Hydraulic Control Systems, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [8] MAN Diesel & Turbo, Gear Driven HPS Specification, Copenhagen, Denmark: MAN, 2013
- [9] Y. J. Cho, D. H. Jang, and J. H. Kwon, "Review on ISO standards for the performance test of hydraulic pumps," Journal of Drive and Control, vol. 7, no. 3, pp. 7-12, 2010 (in Korean).
- [10] G. G. Jin and J. S. Ha "Genetic algorithms as optimisation tools and their applications," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 21, no. 2, pp. 108-116, 1997 (in Korean).
- [11] J. K. Ahn, Y. H. Lee, G. G. Jin, and M. O. So, "System identification by real-coded genetic algorithm," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 31, no. 5, pp. 599-605, 2007 (in Korean).
- [12] RE 30 021/03.97, <http://www.biem.co.kr/rexroth/RE30021.PDF>, Accessed March 24, 2017.
- [13] K. J. Åström, and T. Hägglund, PID Controllers: Theory, Design and Tuning, NC, USA: ISA Press, 1995.
- [14] J. K. Ahn, Y. H. Lee, and M. O. So, "Control of unstable systems concerned with the performance indexes and constraints," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 5, pp. 785-790, 2008 (in Korean).