

AMESim을 이용한 수냉식 냉각장치의 유량제어밸브 동특성에 따른 온도제어 특성 연구

김상운*† · 허재훈* · 윤기철** · 고은희***

A Study on the Temperature Control according to the Flow Control Valve Characteristics for Liquid Cooling Unit using AMESim

Sangwoon Kim*†, Jaehun Heo*, Kichul Yoon**, Eunhee Ko***

Key Words : Liquid Cooled Cooling System(수냉식 냉각장치), Temperature Control Optimization(온도제어 최적화), Flow Control Valve(유량제어밸브), 1D Simulation, AMESim(아메심), Realtime Analysis(실시간 기반 분석)

ABSTRACT

The liquid-cooled cooling system supplies coolant at an appropriate temperature to the heat source, and the temperature of the coolant is controlled by adjusting the flow rate to the heat exchanger for externally supplied cold water using a valve. In this study, a 1D simulation model is implemented using AMESim to analyze the performance and characteristics of the cooling system, considering external factors that may affect such liquid-cooled systems. This model is utilized to propose an optimization method for the control variables of the flow control valve, aiming to minimize valve actuation while maintaining temperature control performance.

1. 서 론

최근 전장의 위협체 다변화 및 고도화에 따라, 이를 조기에 탐지하고, 방어하기 위한 다양한 레이더에 대한 연구가 진행되고 있다. 위협체를 원거리에서 빠르게 탐지하기 위한 레이더의 고성능화 및 소형화로 부품의 열유속은 급격하게 증가하고 있어 열적 안전성을 보장하기 위한 열관리 난이도는 이전보다 더 어려워지고, 열관리를 위한 보다 많은 노력과 연구가 필요하게 되었다.

현재 고출력 레이더의 안정적인 운용과 열관리를 위한 냉각방식으로 수냉식 냉각시스템이 주로 사용되고 있는데, 냉각시스템에서 냉각장치는 레이더에 냉각액을 공급하고, 온도를 제어하는 핵심적인 장비 중 하나가 된다.⁽¹⁾ 냉각장치는 레이더 운용 시 노출되는 다양한 환경과 운용 모드에서 안

정적인 냉각성능을 보장할 수 있어야 한다. 일반적으로 냉각장치의 열부하에 해당되는 안테나와 냉각장치가 동시에 개발되는 경우가 많은데, 시스템 통합 시 문제점에 대한 식별 및 디버깅, 냉각장치 동작 파라미터 최적화 등이 개발 과정의 마지막 단계인 운용시험에 가서야 이루어지는 경우가 많다. 물론, 이를 최소화하기 위하여 냉각장치 개발과정에서 열부하 모사 장치와 같은 시험장비를 활용하지만, 대형 냉각장치의 경우 전력량, 시험비용, 실시간 열부하 및 운영 환경 모사 한계 등이 있어 냉각용량, 소모전력량 평가 등 일부 성능을 평가하는데 제한적으로 활용되는 실정이다.

이를 보완하기 위해 냉각장치 개발간 다양한 운용 시나리오와 환경에 따른 실시간 냉각장치 운전 특성을 평가하고, 동작 파라미터를 최적화하기 위한 1D 기반 시뮬레이터 필요성이 증가하고 있다. 기존의 냉각장치 시뮬레이션은 주로

* 한화시스템(Hanwha Systems)

** 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

*** 엠피에스이(주)(MPSE)

† 교신저자, E-mail : swstc.kim@hanwha.com

정격 동작, 최대 성능 분석, 이와 관련된 성능 파라미터 최적화를 위해 활용되어 왔다.⁽²⁾

본 연구에서는 시스템 통합 및 운용 시험 단계의 디버깅 최소화 및 운용모드에 따른 파라미터 최적화를 목적으로 설계 단계에서 냉각장치의 최적의 동작점을 예측하고, 냉각장치의 운용성을 극대화하기 위한 구성품 제어 변수의 최적화를 목적으로 모델링 및 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 통해 열원부의 열적 안정성 및 온도제어 특성은 물론, 냉각장치 동작간 유량제어밸브의 동작 빈도를 최소화하여 냉각장치 가용성 및 신뢰성을 개선할 수 있는 방안을 도출하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 연구대상

연구대상 장비는 Fig. 1과 같이 별도의 냉동사이클 없이 열교환기에서 외부에서 직접 공급되는 냉각수와 냉각액 간의 열교환을 통해 냉각액의 온도를 조절하는 냉각방식이다. 외부에서 공급되는 냉각수로는 물이 사용되고, 저온에서 레이터가 운용하지 않는 조건에서도 결빙에 의한 냉각계통의

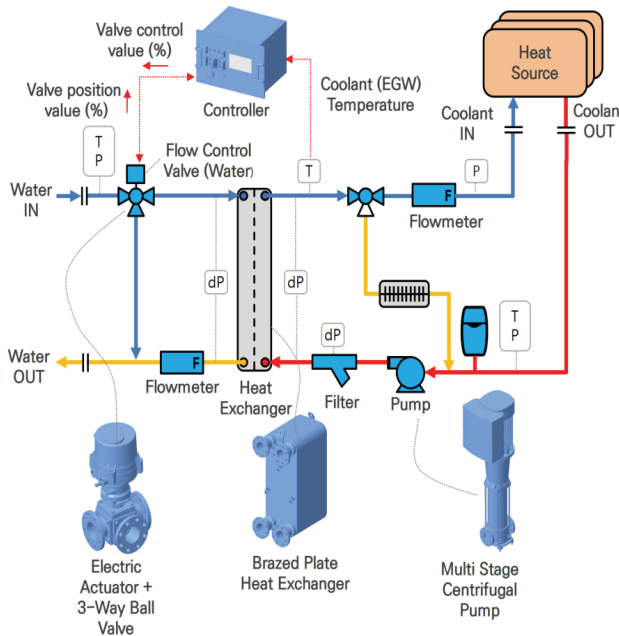


Fig. 1 수냉식 열교환 냉각장치 구성 및 냉각액 온도제어

Table 1 Thermal properties of cooling fluid(20° C, 1atm)

Cooling Fluid	Density (kg/m ³)	Dynamic Viscosity (mPa · s)	Cp (J/kg.K)	Thermal Conductivity (W/m.K)
EGW50%	1056.	3.865	3287	0.4257
Water	997.6	0.888	4182.72	0.62

동파가 발생하지 않도록 냉각액은 물과 에틸렌글리콜이 50:50 혼합된 용액이 사용된다. Table 1은 냉각액의 열 물 성치를 나타낸 것이다.

냉각장치는 냉각액 공급을 위한 원심펌프, 냉각액과 냉각수의 열교환을 위한 판형 열교환기, 냉각액 온도제어를 위한 냉각수 유량제어 밸브 등으로 구성된다. 냉각액 배관 계통은 밀폐형 순환 구조로 시스템 내 적절한 양압 상태를 유지하고 냉각액 온도변화에 대한 부피 팽창 및 수축을 보상하기 위한 팽창탱크가 적용되어 있다.

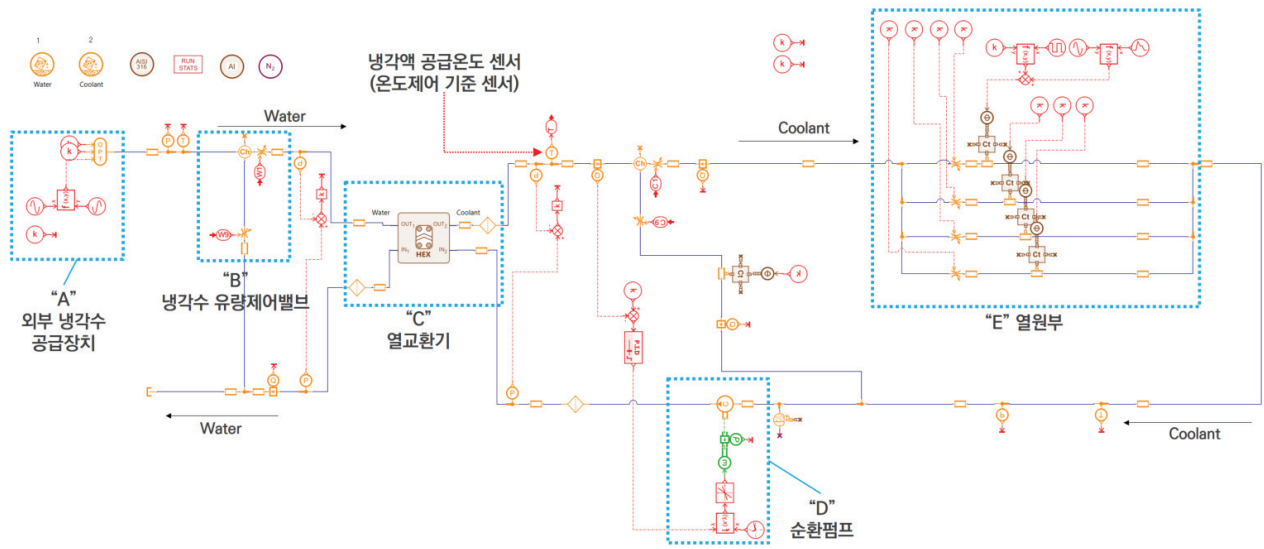
냉각액 온도는 열교환기 Cold side로 공급되는 냉각수 유량을 조절하는 유량제어 밸브의 개도 제어를 통해 조절된다. 유량제어 밸브는 3-way 볼 밸브와 개도를 조절하기 위한 구동 액추에이터로 구성되며, 밸브 개도는 열원부로 공급되는 냉각액 온도 값을 측정하여 측정된 온도 값을 바탕으로 냉각장치 제어기의 구동 명령에 따라 조절된다.

2.2 AMESim 모델링

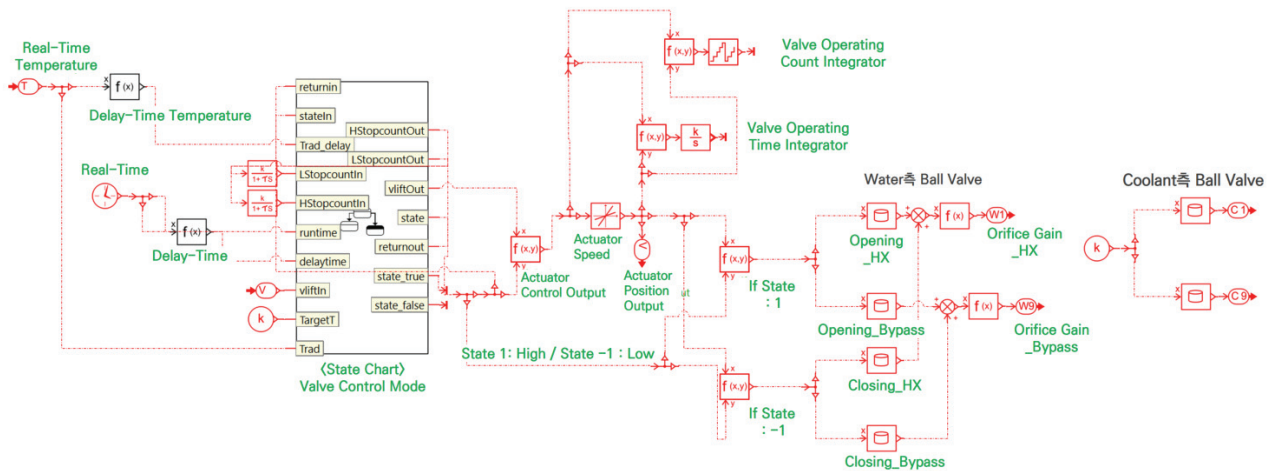
본 연구에서는 실제 제작된 냉각시스템의 구성요소, 운용 조건, 제어 로직 및 제약 조건을 모델링하기 위하여 AMESIM을 이용하였다.

냉각장치의 주요 구성품은 실험값과 데이터 시트 값을 이용하여 입출력을 비교함으로써 구성품 모델의 유효성을 검증하였으며, 검증된 구성품 모델을 바탕으로 배관, 제어기를 포함한 Full scale 시스템 모델링을 Fig. 2과 같이 구성하였다. Fig. 2(a)의 “A”영역은 외부 냉각수 공급 장치 모델로 공급 유량 및 압력, 온도와 같은 냉각수 공급 조건을 모사할 수 있도록 하였다. “B”는 냉각수 유량제어밸브 모델인데 본 장치에 사용된 3-Way 볼 밸브의 경우 밸브 유량계수 등으로 밸브 개도별 유량 특성에 대한 상관관계를 명확히 정의하기 어렵다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 만약, 실제품의 개도 특성 데이터가 없다면 볼 밸브의 형상 모델링 및 CFD를 이용하여 개도별 유량값을 예측해서 사용하는 방법을 사용할 수 밖에 없으나, 본 연구에서는 기 개발된 냉각장치의 실험을 통해 확보된 밸브 유량 데이터를 사용하였다.

Fig. 3(a)는 3-Way 볼 밸브가 실 장비에 장착된 형상이고, (b)는 실험을 통해 확보된 개도별 유량 데이터이며 센서의 정밀도를 고려한 측정 불확도는 측정치의 ±5%이다. 볼 밸브의 개폐 방향에 따라 개도별 유량의 히스테리시스 특성이 존재하는 것을 알 수 있으며, 이는 시스템 응답의 정확한 해석을 위해 반드시 반영되어야 하는 부분이라 할 수 있다.⁽⁵⁾ 이를 모사하기 위하여 열교환기 라인과 바이패스 라인에 적용된 볼 밸브 모델은 가변 오리피스 모델 요소를 사용하고⁽⁶⁾, Fig. 4에 도시된 같이 오리피스 Table Map을 이용하여 히스테리시스 특성을 구현함으로써, 실제 개도 응답을 반영하여 개도 제어가 온도제어 특성에 미치는 영향을 정량



(a) 냉각계통 모델



(b) 유량제어밸브 제어기 모델

Fig. 2 AMESim Full Scale Model

적으로 분석하기 위한 기반을 마련하였다.

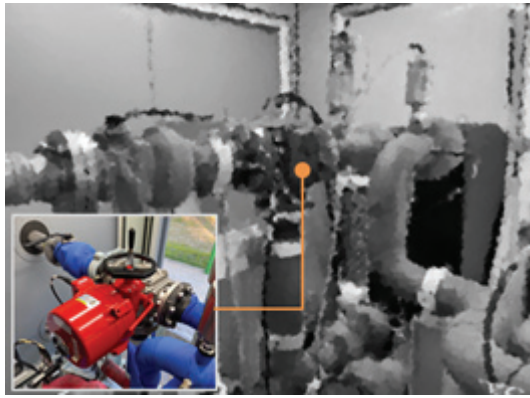
Fig. 2(a)의 “C”는 냉각액과 냉각수간의 열교환을 위한 판형 브레이징 열교환기를 모델링한 부분이다. 열교환기 압력 및 열교환 특성은 실제 시험을 통한 측정 데이터와 제조사에서 제공하는 엔지니어링 프로그램을 통해 데이터를 확보하여 열교환기에 대한 형상정보 및 주요 파라미터를 입력하였다. 열교환기 유체 유로 내 압력강하를 모사하기 위하여 여과기(필터) 모델 요소를 병렬 적용하였다.

Fig. 2(a)의 “D”는 열원부 냉각에 요구되는 냉각액 유량 공급을 위한 펌프를 모델링한 것이다. 펌프는 인버터 방식의 다단형 원심펌프로, 펌프 특성 모사를 위해 Fig. 5의 제조사에서 제공하는 펌프의 회전수(출력)에 대한 유량-압력 특성 데이터를 활용하였다. 냉각장치 운용 개념에 따라 펌프는 정상 상태에서는 정속 회전을 하며 펌프 초기 구동시 유량의 단계적 증가를 구현하기 위해 PID 제어기 모델을 적용하였다.

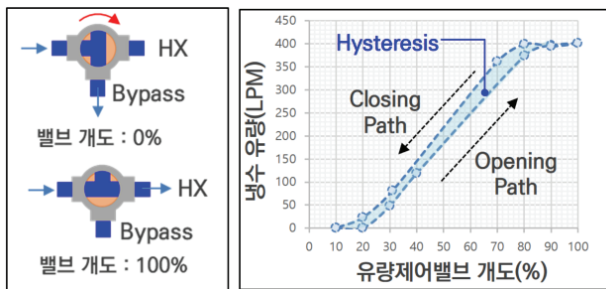
Fig. 2(a)의 “E”는 열원부를 모델링한 것인데, 실제 구조는 높은 열유속을 가지는 소자가 여러 개 배열되어 복잡한 열전달 구조를 가지고 있으나,⁽⁷⁾ 냉각장치 측면에서는 열원부를 냉각액의 온도에 영향을 주는 총 부하 열량을 가진 Bulk Model로 간략히 모델링하였다.

상세히 기술하면, 열원부 내부의 열전달 특성 및 열적 안정성은 CFD 해석을 통해 별도로 분석하였으며, 이를 통해 열원부의 열용량과 열전달 경로가 냉각액의 온도제어 응답성에 미치는 영향을 증가적으로 모델링에 반영하였다.

열원부의 열부하 프로파일 종류 및 형태는 냉각장치 시험 및 운용시 사용되는 동작모드를 고려하여 Constant, Piecewise와 같은 다양한 프로파일로 디자인 하였으며, 열부하 프로파일의 형태별 온도제어 특성을 비교하기 위하여 열부하 전체의 누적 인가량은 동일한 조건으로 하였다.



(a) 수냉식 냉각장치 및 유량제어밸브 적용부



(b) 유량제어밸브 개도별 유량데이터

Fig. 3 실험을 통한 유량제어밸브 개도별 유량데이터 획득

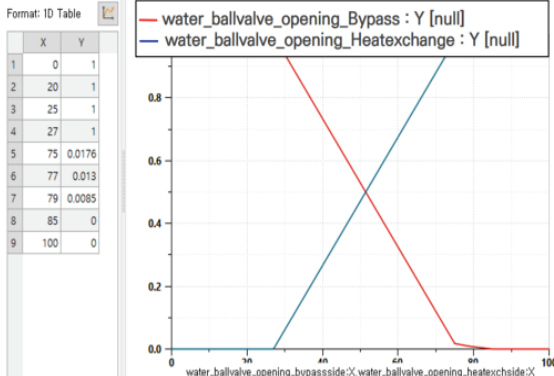
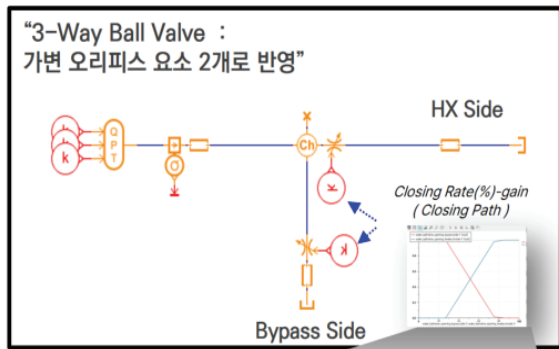


Fig. 4 유량제어밸브 시험데이터 AMESim 모델 반영

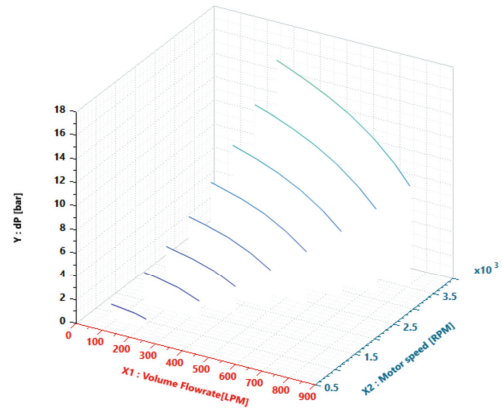
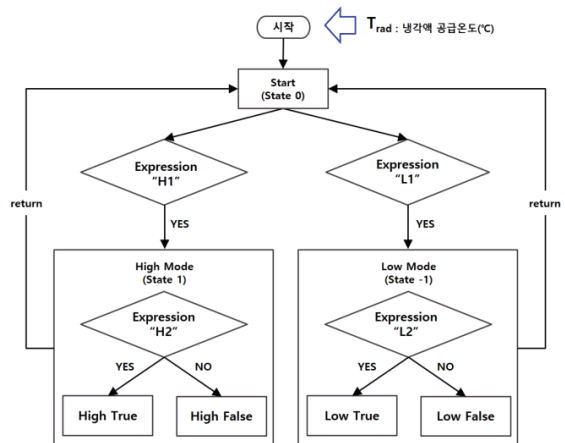


Fig. 5 냉각액 펌프 특성데이터에 대한 AMESim 모델 반영

Fig. 2(b)는 냉각수 유량제어 밸브 제어로직을 Statechart 기능과 제어 모델요소를 활용하여 구현한 것이며, (8) Fig. 6(a)은 냉각수 유량제어 밸브의 제어로직을 Flow Chart로 나타낸 것이다. 유량제어 밸브의 제어로직은 냉각액 온도제어간 실제 응답 특성을 반영하기 위해 비례제어 및 추세제어 방식을 적용하였고, 제어 모드를 세분화하여 각 모드별로 유량제어밸브의 개도 제어값을 산출하기 위한 제어 관계식에 각각 다르게 적용되었다.

Fig. 6(b)는 각 제어모드의 진입 조건에 대한 조건문이며, Fig. 6(c)는 제어모드별 개도 제어값에 대한 관계식이다. 현재 온도가 설정 온도보다 높거나 낮으면 High 모드와 Low 모드로 진입하게 되고, 현재 온도의 이전 온도에 대한 증감 추세에 따라 True 모드와 False 모드로 진입하여 밸브의 개도를 조절할 수 있도록 하였다.

냉각수 유량제어밸브 제어 과정은 제어 갱신주기에 대한 시간 지연 형태로 제어되며, 갱신주기 내에서는 밸브 제어값과 온도값이 시간 지연으로 고정된다.



(a) 냉각수 유량제어밸브 제어로직 Flow Chart

Name	Valve Control Output	Note
High True	$V_{out} = \min(\max(V_{in} + \min((T_{rad} - T_{target}) * GainP + (T_{rad} - T_{rad_delay}) * GainD), D10), 30, 70)$	
High False	$V_{out} = \min(\max(V_{in} + (T_{rad} - T_{target}) * GainP - (T_{rad_delay} - T_{rad}) * GainD), A30, A70)$	
Low True	$V_{out} = \min(\max(V_{in} - \min((T_{target} - T_{rad}) * GainP + (T_{rad_delay} - T_{rad}) * GainD), D10), A30, A70)$	
Low False	$V_{out} = \min(\max(V_{in} - (T_{target} - T_{rad}) * GainP + (T_{rad_delay} - T_{rad}) * GainD), A30, A70)$	

※ A30, A70 : 구동각도 제한값, / D10 : Max Duty 제한값

(c) 유량제어밸브 개도제어값 관계식

Name	Control Mode Expression	Note
H1	$T_{rad} > (T_{target} + f_{high})$ and $Time_{delay} > runtime - 0.01$	
H2	$T_{rad} < T_{rad_delay}$ or $T_{rad} < (T_{target} + 2)$ or $H_{stopcount} > 5$	
L1	$T_{rad} < (T_{target} - f_{low})$ and $Time_{delay} > runtime - 0.01$	
L2	$T_{rad} < T_{rad_delay}$ or $T_{rad} < (T_{target} - 2)$ or $L_{stopcount} > 5$	

※ $Time_{delay} > runtime - 0.01$: 지연제어 주기가 이벤트 실행

(b) 제어모드별 진입조건

Fig. 6 냉각수 유량제어밸브 제어로직

이러한 시간 지연 제어 방식은 시스템 반응속도가 다소 느려진다는 단점이 있으나, 배관 내의 유체 체적과 열부하를 비롯한 전체 시스템의 열용량 수준을 고려하였을 때 적절한 방식으로 판단된다.

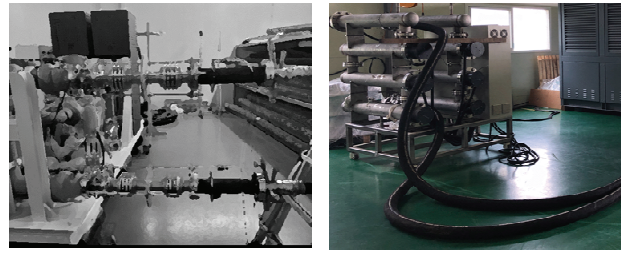
또한, 제어 지연시간에 맞춰 밸브의 제어값이 갱신되며, 갱신 주기간 밸브 제어값의 변동량에 대한 제한치를 부여하였다. 밸브의 물리적 구동 범위에도 제어로직을 통해 최소 최대 범위에 대한 제한치를 설정하였다. 냉각수 유량제어밸브의 모델링 과정에서 설명한 바와 같이, 불밸브의 기하학적 형상에 의해서 실제 밸브의 개도와 유량간의 관계는 선형적이지 않기 때문에 밸브 개도 변동량과 구동 범위를 온도 제어에 필수적인 범위 내로 제한함으로써, 밸브 구동 Travel량 최소화를 통한 동작 빈도를 감소시킬 수 있다.

이러한 모델링 방식은 단순한 시뮬레이션 결과 도출에 그치지 않고, 실제 냉각시스템이 가지는 열 관성, 밸브 지연 응답, 구동 히스테리시스 등의 동적 특성이 제어 성능에 미치는 영향을 정량적이고 구조적으로 분석할 수 있는 기반을 제공한다. 특히, 밸브 개도 응답시간, 히스테리시스 범위, 제어주기 등이 온도 응답 특성에 미치는 민감도를 분석함으로써, 향후 제어기 설계 최적화 및 시스템 신뢰성 평가에 유효한 설계인자 도출근거를 제공할 수 있다.

2.3 AMESim Simulation 결과

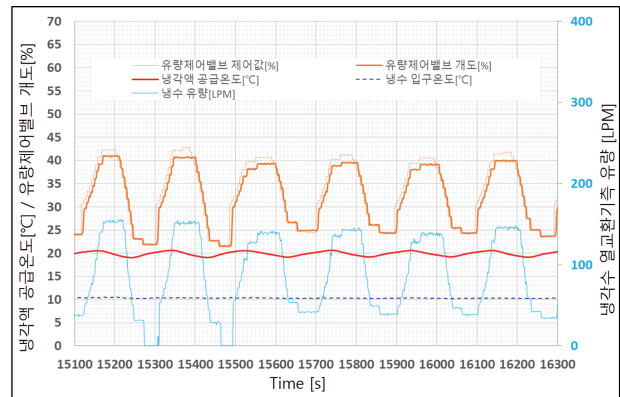
2.3.1 1D Simulation 모델 검증

1D Simulation Model의 예비 검증을 위해 정상 상태에 대해 확보된 실제 시험 결과와 비교하였다. Fig. 7는 실제 냉각장치에 대한 성능시험을 위한 시험 구성을 보여준다.

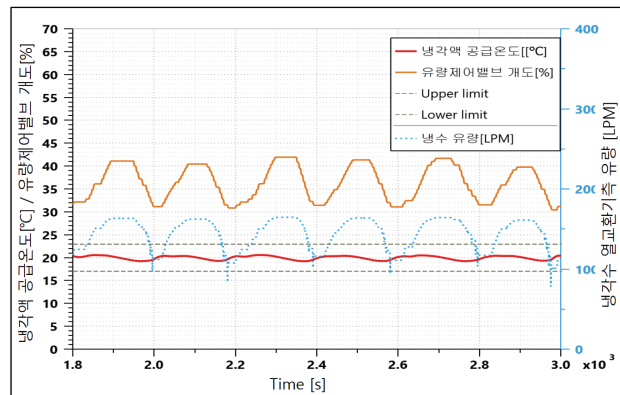


(a) 냉수공급설비 냉수 연동 (b) 열부하모사기 냉각액 연동

Fig. 7 냉각장치 실제 시험 구성



(a) 냉각장치 실제 시험 데이터



(b) 1D Simulation 결과 데이터

Fig. 8 냉각장치 실제 시험결과와 1D Simulation 결과 비교

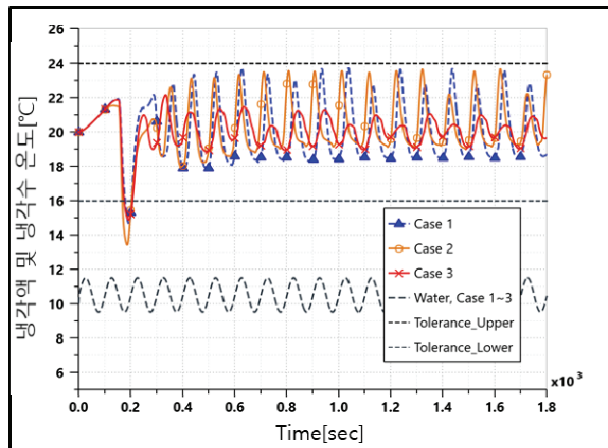
Fig. 7(a)와 같이 냉각수 연동을 모사하기 위해 냉수 공급설비를 사용하여 냉각장치와 연동하였고, Fig. 7(b)와 같이 열원부의 열부하를 모사하기 위해 배관 투입형 가열기가 적용된 열부하모사기를 사용하여 연동하였다. 다만, 시험 결과와의 비교를 위해 열원부의 열용량과 연동배관 길이 및 관경 등은 실제 시험 구성에 맞게 일부 조정하여 1D Simulation Model에 반영하여 분석을 수행하였다.

Fig. 8은 냉각장치의 실제 시험결과로부터 1D 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. Fig. 8(a)의 시험결과와 Fig. 8(b)의 1D Simulation의 결과가 밸브의 최대 개도와 최대

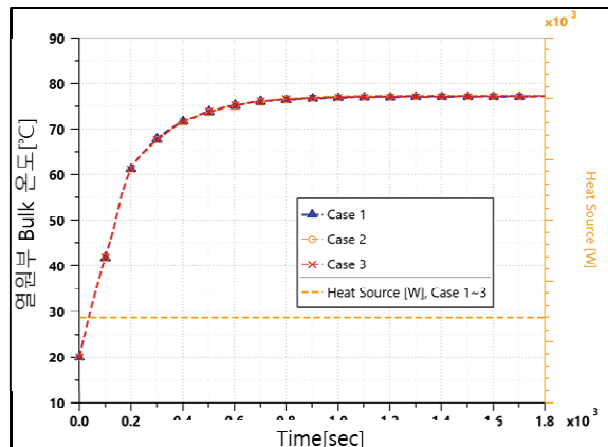
개도 반복 주기 등에 있어 상호 유사성을 확인할 수 있으며, 이로부터 수냉식 냉각장치에 대한 1D Simulation Model은 실제 냉각장치의 특성을 잘 모사한다고 평가할 수 있다.

Table 2 유량제어밸브 구동조건 최적화 Case Study

구분	Case #1	Case #2	Case #3
밸브 구동범위	0~100%	30~70%	
밸브 구동 Max Duty	-	최대 10%	
제어 지연시간	5sec		15sec
비례제어 민감도 (Gain P)	1		
추세제어 민감도 (Gain D)	0		



(a) 냉각액 및 냉각수 온도 변화



(b) 열원부의 온도 변화

Fig. 9 냉각액/냉각수 및 열원부의 온도 변화(Case #1~3)

2.3.2 유량제어밸브의 밸브 구동조건 최적화

Table 2는 밸브 구동 범위 및 제어 지연시간에 따른 냉각액 온도제어 특성을 분석하고, 최적화된 동작 조건을 찾기 위한 Case study 조건 세 가지를 나타낸 것이다. Case #1은 유량 제어 밸브의 밸브 구동범위를 전체 개도구간(0~100%)으로 설정하였고, 제어 지연시간은 5sec로 설정하였다. Case #2는 밸브 구동범위를 최소 30%에서 최대 70%로 범위로 제한하고, 제어값 갱신주기 내 최대 변동량을 10%로 제한한 경우이며, 이에 대한 냉각액 온도제어 특성과 밸브 동작빈도에 대한 영향성을 확인할 수 있다.

Case #3는 Case #2 구동조건에서 제어 지연시간을 5초에서 15초로 조정된 경우이며, 제어 지연 시간에 대한 냉각액 온도 제어 특성과 밸브 동작빈도에 대한 영향성을 확인할 수 있다.

Case study는 2.2절에 기술된 AMESim Model을 사용하였으며, 외기 및 배관 내 초기 냉각액 온도는 20°C로 설정하고, 밸브의 초기 위치값은 0으로 설정하였다. 분석 구간은 최초 동작 시작에서 안정화에 필요한 시간을 고려하여 0~3,000sec까지로 물리적 시간을 설정하였다.

Fig. 9은 외부 냉각수 공급온도가 10.5±1°C로 안정적으로 제어되고, 열부하가 일정한 경우의 Case #1~#3에 대한 냉각액 및 열원부의 온도 제어 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 9(a)의 Case #1의 결과로부터 600sec 이후에는 냉각액 공급온도의 변동 패턴이 일정해지고, 냉각액 공급온도의 제어 성능 또한 목표 성능(20°C±4°C) 내에서 유지되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(a)의 Case #2, Case #3의 냉각액 온도 추이에 대한 결과로부터는 냉각액의 온도제어 성능은 목표성능(20°C±4°C)을 충족하는 것을 확인할 수 있다. 오히려 제어 지연시간을 5초에서 15초로 조정된 Case #3의 경우에 냉각액 공급온도의 변동폭이 ±2°C수준으로 감소하여 Case #1/#2보다 제어 성능 및 안정성이 향상되었다.

Fig. 9(b)로부터 열원부의 Bulk Temperature는 Case #1~3 모두 온도 상승율과 안정화 진입시점이 거의 동일한 것을 확인할 수 있는데, 이는 열부하의 열용량이 상대적으로 커서 냉각액 온도의 변동폭에 대해 둔감하기 때문이며, 600sec 이후에는 열적으로 안정화된 온도 범위 내에서 유지되는 안정화 구간에 진입하였다고 할 수 있다.

Fig. 10은 냉각액의 온도제어를 위한 유량제어밸브의 개도 변화 추이를 도시한 것인데, Case #1에서 변동폭이 가장 크고, Case #2에서는 밸브의 구동범위와 구동 Duty를 제한함으로써 개도 변동폭이 감소하였으며, Case #3의 안정화 구간에서는 개도 변동폭이 45~65% 범위에 존재하여 가장 작아진 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 유량제어밸브의 누적 구동빈도와 누적 구동시간을 도시한 결과이다. Case #1의 경우 유량제어밸브는 가장 높은 구동 빈도(262회)를 갖으며, 누적 구동시간(2,085s)도 전체 시간(3,000s) 대비 70%로 가장 높은 가동률로 동작

되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Case #2의 경우에는 유량 제어밸브 개도 변동폭의 감소로 인해 누적 구동시간(1,504s)이 감소되어 밸브의 가동율이 50%로 감소된 것을 확인할 수 있다. Case #3의 경우 유량제어밸브의 구동빈도는 160회로

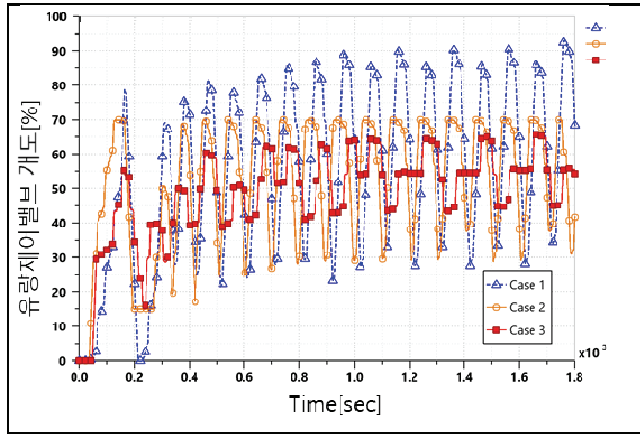


Fig. 10 유량제어밸브의 개도 변화(Case #1~#3)

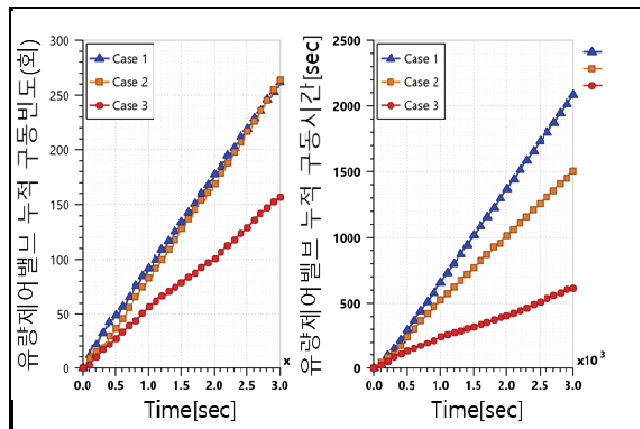


Fig. 11 유량제어밸브의 누적 구동빈도(좌) 및 누적 구동시간(우) (Case #1~#3)

Table 3 외부 변동요인에 대한 민감도 최적화 Case Study

구분	Case #3	Case #4	Case #5	Case #6
유량제어밸브 구동조건	Case #3			
열부하 프로파일	Constant (000kW)	Piecewise (000~000kW)		
냉각수 공급온도	Nearly Constant (기준치 ±1℃)	Fluctuated (기준치±5℃)		
비례제어 민감도 (Gain P)	1	1	3	0.1
추세제어 민감도 (Gain D)	0	0	5	10

Case #1의 구동빈도 대비 61%로 감소되었다. 또한, 누적 구동시간(615s)은 전체 시간 대비 20%로 가동율이 Case #1/ #2 대비하여 큰 폭으로 감소되었다.

따라서 당초 목표한 냉각액 온도제어 성능을 충족 가능하면서 Case #1(최초 제어방식) 대비 효율적인 구동조건이 된다. 다만, Case #3의 경우, 일부 구간에서 누적 구동빈도 및 구동시간의 선형성이 왜곡되어 보이는 현상이 관찰된다. 이러한 현상은 제어 지연시간의 증가에 따라 즉각적이고 선형적인 응답이 제한되어 나타나는 밸브 개도 제어 로직 특성에 기인한 필연적 현상으로 판단된다.

2.3.3 열부하 형태 및 냉각수 공급상태 변동에 대한 유량 제어밸브의 민감도 최적화

앞서 분석한 과정은 외부 조건인 열부하, 냉각수의 변동을 고려하지 않은 분석조건이다. 실제 운용환경에서는 열원부의 열부하는 운용모드에 따라 실시간으로 변동되며, 외부로부터 공급받는 냉각수의 공급조건 또한 냉각수 공급장치의 동작 및 환경에 따라 변동이 발생할 수 있다. 이러한 조건에서도 냉각시스템의 응답성과 밸브의 구동 특성이 적절한지 검토하고, 최적화된 동작조건을 도출하기 위하여 밸브 민감도에 관련된 Gain값 조정에 따른 시뮬레이션을 수행하였다.⁽⁹⁾ Table 3은 4가지 경우(Case #3~#6)의 Case study 조건을 나타낸 것이다. 유량제어밸브의 구동조건은 앞서 수행한 도출한 개선된 조건(Case #3)을 공통적으로 적용하였으며, 열부하 및 냉각수 온도의 변동 영향성을 검토하기 위해 Case #4에는 Case #3과 동일한 Gain 값을 적용하여 Case #3과 비교하였다.

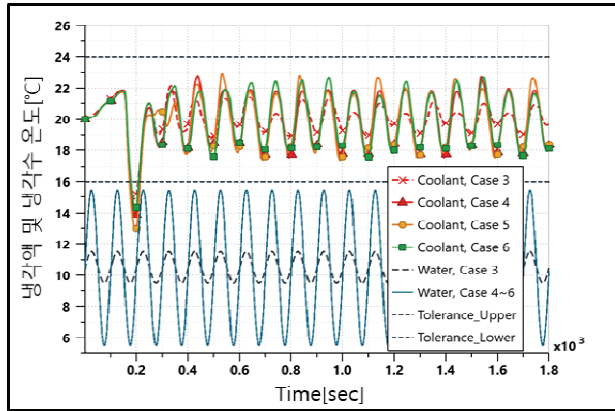
Case #5와 Case #6은 열부하 및 냉각수 공급조건 변동 환경 하에서 유량제어밸브의 비례제어 민감도(Gain P)와 추세제어 민감도(Gain D)를 최적화하기 위해 Gain값을 달리하여 적용한 경우이다.

Fig. 12(a)는 Table 3의 Case에 대한 냉각액의 온도제어 추이와 실제 적용된 Sine 형태의 냉각수(Water) 공급온도 변동 프로파일을 함께 도시한 것이며, 냉각수의 변동 주기는 100sec로 설정하였다.

Fig. 12(b)는 열원부 Bulk Temperature의 온도변화 추이를 나타낸 결과이며, Piecewise 형태의 열부하 프로파일(Heat Source)을 우측 수직축에 함께 도시하였고, 열부하 프로파일의 변동 주기는 60sec이다.

Fig. 12(a)의 냉각액 공급온도 추이는 열부하와 냉각수의 변동 환경으로 인해 냉각액 공급온도의 변동폭이 Case #3보다 Case #4~#6에서 더 크게 나타났으나, Case #4~#6 조건에서도 냉각액 공급온도는 온도제어 범위 내에서 유지되어 목표성능을 충족하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12(b)로부터 열부하 소스의 Bulk Temperature는 Case #3~6 모두 온도 상승율과 안정화 진입시점이 거의



(a) 냉각액/냉각수 및 냉각수 온도 변화

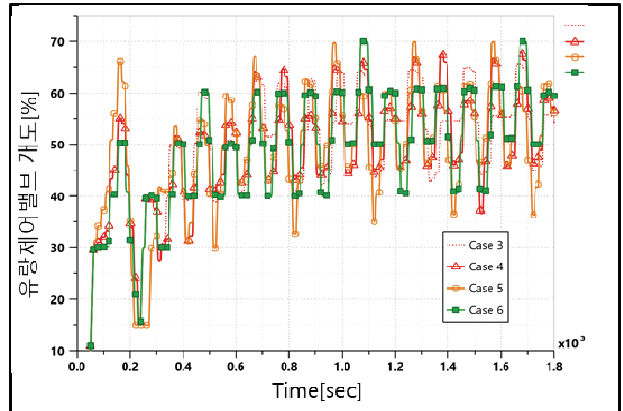
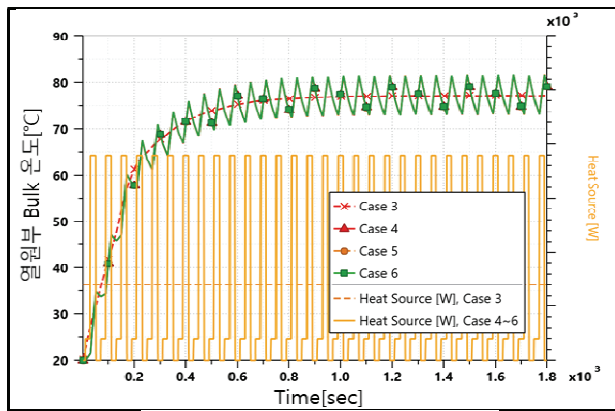


Fig. 13 유량제어밸브의 개도 변화(Case #3~#6)



(b) 열원부의 온도 변화

Fig. 12 냉각액 및 열부하 소스의 온도 변화(Case #3~6)

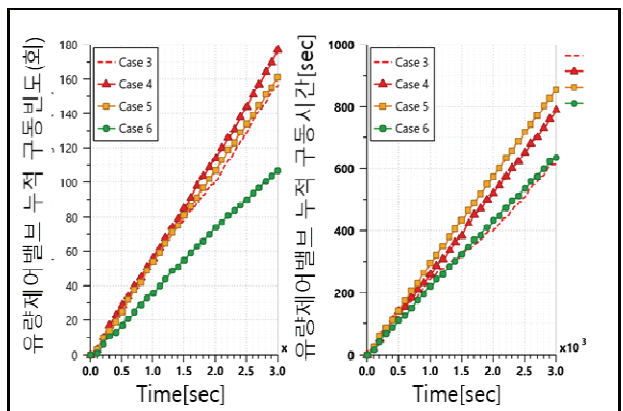


Fig. 14 유량제어밸브의 누적 구동빈도(좌) 및 누적 구동시간(우) (Case #3~#6)

동일한 것을 확인할 수 있으나, Case #4~#6의 경우에는 열부하에 대한 변동 프로파일이 적용되어 Case #3과 전반적인 추이는 유사하지만, 변동주기에 대한 지엽적인 패턴이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 앞서 수행한 최적화 과정을 통해 도출한 유량제어밸브의 구동조건(개도 범위, 제어 주기 등)은 Table 3에 정의된 외부 요인 변동 환경에 대해서도 양호한 제어 특성을 가진다고 할 수 있다.

Fig. 13은 각각의 Case에 대한 유량제어밸브의 개도 변화를 나타낸 것인데, Case #3과 Case #4의 유량제어밸브의 개도 변화 추이를 비교하면 Case #4에서는 열부하와 냉각수 공급온도의 극심한 변동에 대응하기 위해 유량제어밸브의 구동빈도 및 구동범위가 Case #3 대비 증가하여 밸브의 개도 변동폭은 38%~68% 범위 내의 패턴형태로 나타났다.

이는 Case #3과 Case #4의 열부하 소스의 Bulk Temperature의 전반적인 증가 추세는 유사하지만, 본 모델에 반영된 냉각수의 변동주기에 따라 주기성이 나타나므로 열부하 프로파일 보다는 주로 냉각수 공급조건 변동에 주로 기인한 것으로 판단할 수 있다. Case #5의 경우는 유량제어밸브의 개도 변동폭이 35%~70% 범위 내의 패턴 형태로 나타났다. 그에 따라 Case #4 대비 구동량은 증가하였으며, 이는 추세제어를 위한

Gain값(GainD)을 적용하였으나, 비례제어 Gain값(Gain P)의 증가로 인한 영향이 더 크게 작용했기 때문이다.

Case #6의 경우에는 Case #5의 결과를 토대로 비례제어 민감도(GainP)를 낮추고 추세제어 민감도(GainD)를 상향 조정하였다. 안정화 구간에서 최대 개도는 간헐적으로 70% 일 때가 있으나, 유량제어밸브 개도 변동폭은 대체적으로 40%~60% 범위 내에 존재하며, Case #5 대비 감소된 것을 확인할 수 있다.

또한, Fig 14에 나타난 유량제어밸브의 누적 구동빈도 및 구동시간에 대하여 비교하면 Case #4의 누적 구동빈도와 누적 구동시간은 각각 177회, 788sec였으나, Case #6은 107회, 636sec이며, Case #4 대비 각각 60%, 81%로 감소되어 유량제어밸브의 불필요한 동작이 최소화되었다. 이를 통해 외부 요인 변동에 대해서 유량제어밸브의 제어로직상의 비례 제어와 추세제어 민감도 조정을 통한 최적화가 효과적임을 알 수 있다.

AMESim 1D Simulation을 통해 유량제어밸브의 최적화를 통한 가동율 최소화 방안 도출결과를 Fig. 15에 Case별로 차트로 도시하였다. 외부 변동을 고려하지 않은 정격조건에서 밸브 구동조건 최적화를 통해서 가동율을 최소화 하였고,

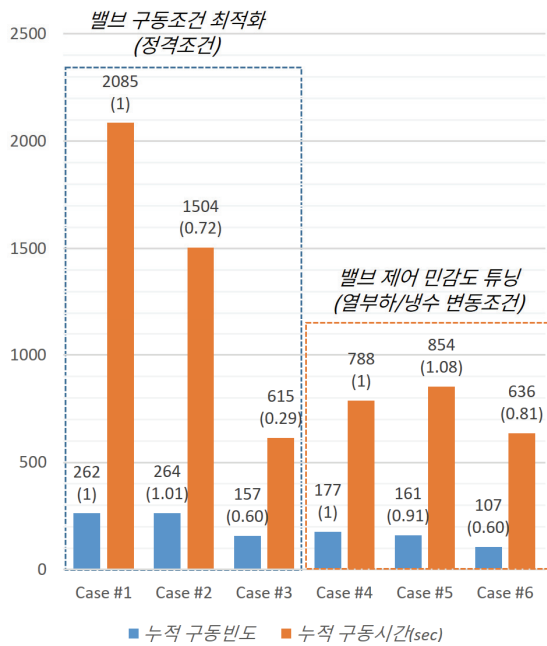


Fig. 15 유량제어밸브 최적화 결과 (Case #1~#6)

외부 변동이 극심한 환경에서도 민감도 튜닝을 통해 밸브 가동율을 효과적으로 감소시킬 수 있는 것을 확인하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 고출력 레이더시스템의 수냉식 냉각시스템에 대한 동적 거동 분석을 위해 AMESim 1D 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다.

1D Simulation Model은 실제 냉각시스템의 구조와 구성품의 동작 조건, 제어 변수 등을 기반으로 설계하였으며, 전체적인 냉각시스템에 대한 실제 세부 작동 조건이 적용되었다. 이를 통하여 설계/분석 단계에서 내부 및 외부 조건에 따른 냉각수 유량제어밸브의 제어방식 및 제어변수를 최적화하고 냉각성능을 예측할 수 있으며, 최종 시험 및 운용 단계에서의 시행착오와 디버깅 기간을 감소시킬 수 있다.

본 연구에서는 냉각액 온도제어에 대한 최적화 과정에 냉각수 유량제어밸브의 동작 빈도와 누적 동작시간 최소화에 중점을 두고 최적화에 대한 접근방식을 제시하였으며, 이를 통해 도출된 결과는 냉각장치의 냉각액의 온도제어 범위 설정, 열부하의 평균 인가량 및 외부 변동요인과 그 변동폭 및 최적화 중점 고려사항에 달라질 수 있다.

또한, 유량제어밸브 뿐 아니라 냉각시스템을 구성하고 있는 여러 구성품(펌프, 열교환기 등)의 성능 및 동작 특성 예측에도 다양하게 활용할 수 있다. 이러한 다양한 구성요소에 대하여 1D Simulation을 통해 냉각장치의 운용성을 극대화할 수 있는 방안을 도출할 수 있으며, 부품의 동작 빈도 예측을 통한 MTBF 등과 관련된 ILS 요소 분석을 위한 기초 자료로도 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

또한, 실제 운용환경에서 발생할 수 있는 급격한 열부하 변화, 예기치 않은 시스템 장애 등 다양한 비정상 작동 상황에서의 냉각장치의 온도제어 안정성에 대한 영향성을 평가하는 데에도 활용할 수 있다.

본 연구에서 구축된 냉각시스템 1D Simulation Model은 앞으로 다양한 플랫폼 환경의 수냉식 열교환 냉각시스템 개발에 진화적으로 활용할 예정이다.

References

- (1) AGRAWAL, Ashok K., et al. Active phased array antenna development for modern shipboard radar systems. Johns Hopkins APL technical digest, 2001, 22.4: 600-613.
- (2) KIM, Jae Yeon, et al. Enhancement of electric vehicle air-conditioning system with dual condensers. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121459.
- (3) CHERN, Ming-Jyh; WANG, Chin-Cheng; MA, Chen-Hsuan. Performance test and flow visualization of ball valve. Experimental thermal and fluid science, 2007, 31.6: 505-512.
- (4) KANG, Hyo-Lim; PARK, Hyung-Joon; HAN, Seung-Ho. Investigation of the flow characteristics for cylinder-in-ball valve due to a change in the opening rate. Applied Sciences, 2022, 12.18: 8930.
- (5) Hou, Y., Wu, H., & Li, Z. (2020, June). Internal Flow Field Analysis of Three-way Regulating Valve Based on CFD Technology. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 526, No. 1, p. 012171). IOP Publishing.
- (6) JEONG, C. S.; YANG, S. Y. A Study on Flow Rate Characteristic and Dynamic Performance on Diaphragm Solenoid Valve. Journal of Drive and Control, 2013, 10.3: 27-33.
- (7) CHELLI, Lapo; CARCASCI, Carlo. Modelling and analysis of a liquid-cooled system for thermal management application of an electronic equipment. In: E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020, p. 10008.
- (8) DONG, Zhangzhi, et al. Modeling simulation and temperature control on thermal characteristics of airborne liquid cooling system. IEEE Access, 2020, 8: 113112-113120.
- (9) HITT, Zeynep Yilmazer, et al. Heat transfer system and feedback temperature controller design for safety process operation of phosphorous acid potassium salts production. International Advanced Researches and Engineering Journal, 2022, 6.2: 113-122.
- (10) AMESim Thermal Management Training, MPSE, 2023.