



공 학 석 사 학 위 논 문

플라잉 타입 소화수 살수장치



부경대학교대학원

기계시스템공학과

조 정 헌

공 학 석 사 학 위 논 문

플라잉 타입 소화수 살수장치

개발에 관한 연구

지도교수 김 영 복



부경대학교대학원

기계시스템공학과

조 정 헌

조정헌의 공학석사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일



- 주 심 공학박사 서진호 (인)
- 위 원 공학박사 지상원 (인)
- 위 원 공학박사 김영복 (인)

목 차

List of Figures iii
List of Tables v
Nomenclature ······ vi
Abstract
제 1 장 서 론
1.1 연구의 배경1
1.2 기존 연구 동향
1.2.1 10년간 화재원인별 통계
1.2.2 초고층 건물의 화재진압을 위한 기술 동향4
1.3 연구목표 및 범위
제 2 장 플라잉 타입 살수장치의 모델링9
2.1 플라잉 타입의 살수장치9
2.2 플라잉 타입의 살수장치 모델링
2.3 살수장치 운동 메커니즘
2.3.1 살수장치 수직 운동 해석
2.3.2 살수장치의 6자유도 운동 모델

설계	4
시스템 표현	24
계	26
및 위치 제어기 설계	27
제어기 설계	31
어기 설계	33

제 4	장 시뮬레이션	35
4.1	살수장치 파라미터	35
4.2	고도 및 위치 제어 성능	39
4.3	6자유도 모션제어 성능	42
4.4	외란을 고려한 6자유도 모션 제어 성능	45
제 5	장 결 론	48

삼고문헌 ······	50
남사의 글	52

List of Figures

Fig.	1-1	Main cause of fire status
Fig.	1-2	Demonstration of 'swarm drones' for fire suppression
Fig.	1-3	EHang 216F Fire Drone4
Fig.	1-4	Demonsteration of 216F Drone4
Fig.	1-5	Example of a gondora in a high-rise building
Fig.	1-6	C-Thru Helmet
Fig.	1-7	C-Thru application 6
Fig.	2-1	Conceptual drawing of flying-type firefighting system with
wate	er jet	actuator ······8
Fig.	2-2	Coordinate frame description of flying type fire fighting system
	•••••	
Fig.	2-3	Schematic drawing of flying type fire fighting system 11
Fig.	3-1	Block diagram of motion control system for flying type for
fire	fight	ting system
Fig.	4-1	Result of simulation for altitude control
Fig.	4-2	Result of simulation for attitude control
Fig.	4-3	Result of nozzle simulation for altitude and attitude control \cdots 37
Fig.	4-4	Result of simulation for position control
Fig.	4-5	Result of simulation for position control
Fig.	4-6	Result of simulation for motion control

Fig. 4-8 Trajactory tracking performance of the flying-type firefighhting system in three dimensional view
Fig. 4-9 Position control response of two control systems
Fig. 4-10 Attitude control response of two motion control systems ····· 42
Fig. 4-11 The mass flow rate of each nozzle
Fig. 4-12 Trajectory tracking performance of the flying type firefighting system with disturbances in three-dimensional view
Fig. 4-13 Position control response of two motion control system in the presence of disturbances with z-direction is $z_d = 0.1t$
Fig. 4-13 Position control response of two motion control system in the presence of disturbances with z-direction is $z_d = 0.1t$
Fig. 4-13 Position control response of two motion control system in the presence of disturbances with z-direction is $z_d = 0.1t$

List of Table

Table.	1-1	Housing types by city size	• 3
Table.	2-1	Pump condition and definition	14
Table.	4-1	Parameter of flying type fire fighting system used in	
simulat	ion		35



Nomenclature

Symbol	Description	Unit
M_{h}	살수장치 헤드부 질량	kg
M_w	헤드부와 호스내의 소화수 포함 호스질량	kg
J	대각행렬	kg∙m2
l	y _b 축과 노즐끝단까지 거리	m
w	x_b 축과 노즐끝단까지 거리	m
h	$x_b y_b$ 평면에서 노즐끝단까지 거리	m
δ	z_b 축과 이루는 각도	deg
ho	물의 밀도	kg/m3
A	호스의 단면적	m2
α	액추에이터 노즐 단면적	m2
κ	보정 계수	-
g	중탁가각도	m/s2
z_b	살구상지 헤느무의 구직망양 보선	_
m_{i}	노즐 소화수의 유체의 질량	kg
v_i	노즐 제어수의 유량	m/s
a_i	i th 번째 액추에이터 노즐의 단면적	m2
d_i	i^{th} 번째 액추에이터 노즐의 직경	m2
$w_{b(*)}$	헤드부 각속도	rad/s
F_{i}	각 노즐로부터 발생하는 추력	kgf
F_{d}	살수장치 헤드부에 작용하는 외란	kgf
$F_{(*)b}$	각 방향으로부터 헤드부에 작용하는 힘	kgf
$F_{i(*)}$	<i>i</i> 번째 노즐에서 발생하는 각 축방향의 힘	kgf
U	액추에이터 노즐을 통과하는 유체 질량유량	m/s
e_X	고도 및 위치 제어 상태오차	_
S_X	고도 및 위치 슬라이딩 평면	—
V_1	고도 및 위치 제어 안정성	_
e_{\varPhi}	자세 제어 상태오차	_
s_{\varPhi}	자세 제어 슬라이딩 평면	_
V_2	자세 제어 안정성	_

A Study on Development of A Flying Type Fire Extinguisher

Jeong-Heon Cho

Department of Mechanical System Engineering, The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

This study presents the system design and modeling problem of a flying type fire extinguishing system. Fire accidents present very hazardous environments, and firefighters are in danger of losing their lives while putting out the fire. Strict safety measures should be considered to guarantee safe working conditions for firefighters, which is not the case every time, as fatalities and casualties are still being recorded. For this reason, a novel fire extinguishing system is proposed to provide more safe firefighting and survivor searches.

In this study, in order to overcome the problems of the current passive suppression strategy, the development of a flying type fire extinguishing system that can extinguish fires nearly by moving to a location as close to the ignition point as possible and directly suppression fire extinguishing water. The fire extinguishing system is a structure that can fly, and it deals with dynamic characteristic analysis, modeling, and motion control system design issues, and evaluates the effectiveness of the proposed system through simulation.

In this study, the fire extinguishing system for fire suppression proposed a system that can be moved by flying through the propulsion of a water jet actuator to the point of fire. In a fire scene where the inside of a fire site is very dangerous, the situation is almost impossible to check, and a lot of unknown risk factors are involved, the fire extinguishing system is the main purpose that put directly into the fire site instead of the firefighter, so that not only the fire suppression work but also the site search work can be performed at the same time. For this purpose, the fire extinguishing system must move precisely to the target point of fire suppression.

The fire extinguishing system is generated from the four water jet actuators, and by appropriately adjusting them, it is possible to secure the motion control performance. In the end, 6DOF motion, including altitude maintenance, is controlled by the thrust generated from the actuator nozzle.

Therefore, the control system design method for 6DOF motion control is introduced, and simulation evaluation is performed considering uncertainty such as disturbance. The effectiveness of the proposed control method and technology is verified through comparative evaluation.

By applying the sliding mode controller, a rather large overshoot occurs in the transient state, but in the steady state, it can be seen that the target value is followed well without error.

Finally, it was confirmed that excellent control performance can be secured by designing the controller based on the model for the fire extinguishing system and applying the appropriate controller considering the system characteristics.

제1장서론

1.1 연구의 배경

산업고도화와 도시화의 가속화에 따라 다중이용시설은 밀집화되고, 주거 공간인 아파트마저도 고층화 되어가는 추세이다. 효율성과 편이성을 개선 하기 위한 노력은 많은 도구를 사용하게 하고, 이는 전기사용의 증가 등 화재발생요인을 증가시키는 역설적인 결과를 가져오기도 한다. 예를들어 산업현장에서 사용되는 스치로품 같은 건축자재는 다루기 쉬워 짧은 공사 기간에도 필요로 하는 공간조성이 가능하게 한다. 역설적으로 화재에는 취 약하여 화재가 발생할 경우 피해정도는 심각하며, 이에 대한 고민은 아직 도 해결되지 못한 상황이다.

또한, 사무공간 뿐만 아니라 거주목적 건축물의 고층화는 재난에 대한 충분한 배려와 방재를 위한 준비가 되어 있지 않은 상태에서 가속화되어가 는 추세이다. 이러한 상황은 결과적으로 재난재해에 관한 문제해결방안을 모색하는데 부담을 가중시키는 결정적이 요인으로 작용한다.

화재는 우리의 일상생활에서 아주 단순한 부주의로부터 기인되는 재난이 다. 화재예방 및 방재를 위해 현재까지 수많은 방법과 기술이 개발되고 적 용되어 있으나 적절하게 대응할 수 있는 수준은 아니다. 특히 건축물의 고 층화, 복잡화 및 지하화 문화는 화재발생에 따른 진압시스템의 효과적 운 용을 더더욱 어렵게 만들고 있다.

방재의 기본원칙은 발생요인을 근원적으로 차단하거나 화재가 발생했을

- 1 -

경우에는 가능한 조기에 진압하는 것이다. 그러나 화재발생은 인지할 수 없는 상황에서 발생하는 것이 대부분이며, 소방원 투입이나 장비를 사용해 야 하는 적극적인 화재진압이 필요한 수준으로 쉽게 진행된다.

화재진압을 위한 가장 일반적인 방법은 소화수나 소화재를 분사하는 것 으로, 소극적인 대응에 지나지 않는 단순히 초기대응수준으로 결국은 소방 원 등 전문적인 방재시스템에 의존할 수밖에 없다. 즉, 화재원인, 발화지점 의 정확한 상황파악이 불가능하고 소방원 투입은 위험하므로 안전거리를 확보한 상태에서 소화수를 분사하는 것이 최선의 대응이라 할 수 있다. 소 화수 분사를 통해 어느 정도 상황이 진정된 후에야 소방원 투입 등의 2차 적인 진압작업이 수행된다.

이러한 과정은 화재수준에 따라 상당한 시간이 소요되어 재해정도를 심 화시키는 결과를 초래한다. 결국, 화재진압은 시간과의 싸움이라 할 수 있 으며, 가능한 수단과 방법을 가리지 않고 조기에 진압하는 것이 최선일 수 밖에 없다.

따라서 본 연구에서는, 현재의 수동적인 진압전략에서의 문제점을 극복 하기 위해, 가능한 발화지점 가까운 위치까지 이동하여 직접적으로 소화수 를 살수하여 조기에 화재를 진압할 수 있는 이동형 살수장치를 개발에 대 해 고찰한다. 살수장치는 비행이 가능한 구조로 이에 관한 동적특성해석, 모델링 및 운동제어시스템 설계문제를 다루고 있으며, 시뮬레이션을 통해 제안하는 시스템의 유효성을 평가한다.

1.2 기존 연구 동향

1.2.1 10년간 화재원인별 통계

지난 10년간 발생한 화재 발화요인을 살펴보면 Fig. 1-1과 같이 건축 및 구조물화재가 약 55.0%를 차지하고 있으며 부주의와 전기적 요인이 가장 많은 발화원인이었다. 이중 발화요인별로 담배꽁초가 30.8%로 가장 많고, 음식물 조리중 16.5%로 다음으로 많이 발생하였다. 장소별로는 주거시설에 서 26.3%로 가장 많은 화재가 발생하였으며 그 다음으로는 산업시설로 13.0%를 차지하였다.

주거시설의 지역별 주택형태 분포는 Table. 1-1과 같이 아파트 45.4%, 단독주택 38.4%, 연립·다세대 16.2% 순으로 분포되어 있다. 도시에 인구가 모이는 도시화가 가속화되고 있고 주택형태로는 아파트의 분포가 증가하고 있다.



Fig. 1-1 Main cause of fire status[1]

	단독주택	연립·다세대	아파트	합계
서울	5.0	3.1	7.8	15.9
광역시	8.7	5.1	14.8	28.6
기타시도	24.8	8.0	22.8	28.6
전국	38.4	16.2	45.4	100.0

Table. 1-1 Housing types by city size[2]

(단위 %)

1.2.2 초고층 건물의 화재진압을 위한 기술 동향

건물의 초고층화, 복합화 등 재난대응 어려움이 지속적으로 증가함에 따 라 인명 및 재산피해를 최소화하고 신속하게 화재진압하기 위한 다양한 기 술들이 시도되고 있다. 다음은 이러한 화재진압 기술 동향과 각 기술의 특 징에 대해 소개한다.

가) 소방드론을 이용한 화재진압

국내에서는 아직 화재진압을 위한 소방드론은 연구중에 있으며 대부분 인명구조, 정찰, 수색 등의 소방활동을 위한 소방드론을 활용하고 있다. 2021년 충남소방본부에서는 Fig. 1-2와 같이 화재진압을 위한 군집드론 비 행 기법 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[3]



Fig. 1-2 Demonstration of 'swarm drones' for fire suppression.[3]





Fig. 1-3 EHang 216F Fire Drone

Fig. 1-4 Demonsteration of 216F Drone

국외 소방드론 해외 개발 현황으로는 Fig. 1-3와 같이 2020년 8월 1일 중국에서 세계 최초의 지능형 소방 드론 출시를 발표했다. EHang의 주력 제품인 "이항216"을 개조한 "이항216F"의 성능은 최대 600m까지 비행할 수 있으며, 한 번에 최대 150L의 소방거품 및 소방폭탄을 탑재할 수 있다. 또한 가시광선 줌 카메라를 이용해 화재 위치를 재빠르게 판단할 수 있으 며 위치를 포착하면 레이저 조준장치를 발사해 창문을 깨트릴 수 있는 기 능도 가지고 있다.[4]

그러나 Fig. 1-4와 같이 화재 근원지 가까이 접근하여 직접적인 진압활 동을 할 수 없으며, 단순히 육상에서 실시하는 소극적인 진압방법을 상공 에서 수행하는 것에 지나지 않는다.

나) 외부 곤도라를 이용한 화재진압

Fig. 1-5는 건축물 외부에 설치된 곤도라를 활용하여 화재진압할 수 있 는 시스템이다. 구조물 및 성능을 보강하고 30층 이상 건물에는 외부에 엘 리베이터형을 의무적으로 설치할 수 있도록 하였다.[4] 이러한 시스템은 예 시에서도 잘 보여 주듯이 기존 건축물과 30층 이하는 기존방식으로 대응가 능하기 때문에 근원적인 해결방법이라 볼 수 없다.



Fig. 1-5 Example of a gondora in a high-rise building

다) C-Thru 헬멧적용을 통한 화재진압

C-Thru 헬멧은 Fig. 1-6과 같이 증강현실시스템이 장착된 헬멧으로 연 기속에서 지형을 비춰주며 희생자를 구출하는 최첨단 소방헬멧이다. 컴퓨 터와 실시간으로 네트워크를 통해 정보를 전송하며, 증강현실시스템과 무 전기능, 산소공급장치까지 장착 가능하도록 개발되었다.

주요기능으로는 헬멧 위쪽에는 밝은 조명과 함께 열감지 카메라 등이 달 려있다. 그리고 물건이 연소될 때 발생하는 소음을 노이즈 캔슬링 해주는 기능도 있다. 현장 책임자는 구조물 안에 들어간 소방원의 헬멧에 달린 카 메라로 현장을 직접 보면서 지휘할 수 있고, 헬멧 내부 스피커로 지시를 받는다.[5]



Fig. 1-6 C-Thru Helmet



Fig. 1-7 C-Thru application

Fig. 1-7과 같이 비주얼 맵 방식을 채택하고 있어 화재 현장의 구조와 장애물을 한 눈에 확인할 수 있으며 보다 신속하게 인명구조 작업을 수행 할 수 있는 것이 특징이다. 그러나 이 또한 소방원이 직접 투입되어야 하 는 근원적인 인명피해 요인을 해소하지 못한다.

라) 소방 로봇

위험한 화재 진압 활동을 지원하기 위해 여러 지상 기반 로봇이 있으나 화재원에 직접 접근하기가 어려운 것으로 입증되었다. 이러한 로봇의 예로 는 크롤러를 사용하여 지상에서 작동하는 로봇[4], 수압으로 움직이는 잔해 를 통과하는 로봇[7], 터널 화재에 적용하기 위해 뱀처럼 기어다니는 로봇 이 있다.[8] 이 로봇은 지면을 가로 질러 이동하며 소방수를 방출할 수 있 다. 그러나 이러한 로봇들은 장애물로 인해 쉽게 갇히고 화재원이 있는 곳 으로 이동할 수 없다. 또한 멀리 떨어진 화재원까지 소방수를 분사할 수 있는데는 어려움이 있다.

1.3 연구목표 및 범위

본 연구에서는 화재가 발생한 근원적인 위치에 신속하게 접근하여 보다 공격적이고 정밀한 소화수 분사로 조기 진화가 가능한 소화수 살수장치를 개발하는데 목표를 두고 있다. 기존 기술은 불명확한 화재발생 주위에서 맹목적으로 물을 쏟아 붓는 방식이라 한다면, 본 연구에서는 개발하고자 하는 살수장치는 화재가 발생한 근원적 위치로 살수장치가 비행하여 이동 하고 접근하여 신속하고 확실하게 진압할 수 있는 장치이다.

본 연구에서는 워트제트식 액추에이터로 살수장치 비행운동을 제어하는 살수장치의 운동모델을 제시한다. 이를 기반으로 6자유도 운동제어를 위한 제어계를 설계하고 시뮬레이션을 통해 제안하는 살수장치의 유효성을 검증 한다.

제 2 장 플라잉 타입 살수장치의 모델링

2.1 플라잉 타입의 살수장치

본 연구에서 제안하는 화재진압용 살수장치는, 화재발생지점까지 원격조 정으로 이동이 가능한 시스템이다. 화재발생지점은 상태를 직접 파악할 수 없는 위험한 상황이므로, 살수장치 자체를 화재현장에 투입하여 관찰과 화 재진압작업을 동시에 수행할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 우선 살수장 치 개념도를 Fig. 2-1과 같이 나타내었고 주요장치는 다음과 같다.

- 소화수 및 제어수(조종수) 공급호스
 - 소화수 분사노즐 및 분사방향조절장치
 Propeller
 Nozzle for firefighting water
 Control Valve
 Control Valve
 Wire

Nozzle for motion control water

Fig. 2-1 Conceptual drawing of flying-type firefighting system with water jet actuator

- 프로펠러타입 액추에이터 및 조종장치

- 워트제트타입 액추에이터 및 조종장치
- 자이로센서, 열적외선센서 및 카메라 등
- 내열장치 및 보호장치

먼저 액추에이터 시스템에 대해 설명한다. 액추에이터는 크게 두가지로, 프로펠러타입과 워터제트타입이 도입된다. 프로펠러타입은 화재현장의 상 황에 따라 그 사용여부가 우선 결정된다. 기본적으로는 워트제트타입 액추 에이터로 조종수를 분사하고 이에 따른 반발력으로 살수장치의 비행운동을 제어하게 된다. 살수장치 비행고도가 높아 조종수 분사에 의해 운동제어력 획득이 불가능할 경우에는 프로펠러 구동을 통해 이동하고, 화재발생지점 근방에서는 워트제트방식으로 전환한다. 화재현장의 고온 및 고열조건을 고려한다면 프로펠러회전을 위한 구동력은 전동방식이 아니라 조종수 및 소화수를 이용한 워터펌프 구동방식이 바람직할 것이다.

2.2 플라잉 타입의 살수장치 모델링

살수장치는 4개의 워트제트타입 액추에이터로부터 운동이 제어된다. 화 재진압을 위해서는 필요위치로 정확하게 이동해야 한다. 4개의 액추에이터 로부터 분사되는 조절수를 적절하게 조절함으로써 바람직한 이동성능을 확 보할 수 있다. 고도유지를 기본으로, 평면이동 및 회전운동제어가 가능하도 록 조종수 분사방향을 적절하게 선정해야 한다. 운용상의 효율성을 고려한 다면 시스템구조의 단순화가 필요하며 조종수 노즐은 고정식으로 구성하였 다. 운동제어를 위한 적절한 각도, 적정 분사량, 최적 노즐스펙 등은 시뮬 레이션을 통한 평가·분석을 통해 구하도록 한다.



Fig. 2-2 Coordinate frame description of flying type fire fighting system

살수장치의 6자유도 운동방정식 모델링을 위해 Fig. 2-2와 같이 지구고 정좌표계(e-frame, $o_n x_n y_n z_n$)와 물체 고정좌표계(b-frame, $o_n x_n y_n z_n$)을 도 입하여 각 좌표계에 대해 식 (2-1)과 같이 운동상태를 표현할 수 있다.

$$X = \begin{bmatrix} x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi \end{bmatrix}^T, \qquad \dot{X}_b = \begin{bmatrix} \dot{x}_b \ \dot{y}_b \ \dot{z}_b \ \omega_{xb} \ \omega_{yb} \ \omega_{zb} \end{bmatrix}^T$$
(2-1)
$$\dot{X} = \begin{bmatrix} R_X \ 0_{3\times3} \\ 0_{3\times3} \ R_X \end{bmatrix} \dot{X}_b$$

각 좌표계에서 정의되는 운동상태 표현은 변환행렬 식 (2-2)를 통해 표 현할 수 있다.

$$R_{X} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta\cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi\cos\psi\sin\theta\cos\phi + \sin\psi\sin\phi\\ \sin\psi\cos\theta\sin\phi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi\sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\phi\\ -\sin\theta\cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix}$$
(2-2)
$$R_{W} = \begin{bmatrix} 1\sin\phi\sin\theta\cos\phi\tan\theta\\ 0&\cos\phi & -\sin\phi\\ 0&\frac{\sin\phi}{\cos\theta}&\frac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{bmatrix}$$

살수장치 개략도는 Fig. 2-3에 나타내었으며, 워터제트방식 액추에이터 노즐 4개가 x_b 축과 수직방향이면서 z_b 축과 각도 δ를 이루고 있다. F_i , (i=1,...,4)는 노즐로부터 분사되는 구동유체로 인해 발생하는 추력, g는 중력가속도, M_h 는 헤드부 질량, ω와 l는 각각 x_b 축과 y_b 축으로부터 노즐 끝단까지 거리, h는 $x_b y_b$ 평면에서 노즐 끝단까지 거리, δ 는 z_b 축과 이루는 각도를 나타낸다.



Fig. 2-3 Schematic drawing of flying type fire fighting system

2.3 살수장치 운동 메커니즘

2.3.1 살수장치 수직 운동 해석

우선은 Fig. 2-3과 같이 수직 모션, 즉 z_b 방향의 모션에 대한 운동방정 식은 식 (2-3)과 같이 정의된다.

$$\ddot{Mz_b} = F_z - Mg - F_d$$

(2-3)

여기서, z_b 는 살수장치 헤드부의 수직방향 모션이고, M_h 는 헤드부의 질량, M_w 은 헤드부와 호스내의 소화수를 포함함 호스질량, A는 호스 단 면적, k는 수정 계수, g는 중력 가속도, F_d 는 외란이다. $M = M_h + M_w$ 이며 $M_w = k\rho Az$ 이므로 $M = M_h + M_w = M_h + k\rho Az$ 로 정리된다.

또한 $F_z = \sum m_i (v_i \cos \delta - z)$ 에서 m_i 는 노즐 소화수의 질량, v_i 는 노즐 제어수의 유량이다. 즉, 헤드부 힘은 각 노즐의 힘의 합과 같으며 각 노즐의 힘 = 질량 × (속도 × 노즐의 분사각 - z 의 위치 속도) 와 같다.

 $\dot{m}_i = \rho a_i v_i$ 에서 $a_i \in i^{th}$ 번째의 액추에이터 노즐의 단면적. $d_i \in i^{th}$ 액추에이터 노즐의 직경, 살수장치 헤드부가 z_{\max} 상태에서 $\dot{z} = 0$ 이 면, $v_1 = v_2 = v_3 = v_4 \Delta v$ 이다. 따라서 호스의 물의 속도를 식 (2-4)와 같이 정의된다.

$$v_i \cos \delta \sum \dot{m}_i - Mg = 0 \tag{2-4}$$

여기서 식 (2-3)에서 $\dot{Mz_b}$ 는 0 이고, F_d 는 영향이 없다는 조건일 때, $F_z = Mg$ 가 될 수 있다. 따라서 각 노즐의 물의 속도를 구하기 위한 식 을 아래와 같이 전개할 수 있다.

$$v_i \cos \delta \sum \dot{m}_i - (M_h + k\rho Az)g = 0$$
(2-5)

여기서
$$\sum \dot{m}_i = \rho v \sum a_i$$
 이므로
 $\sum \dot{m}_i = \sqrt{\frac{1}{\cos\delta} (M_h + k\rho A z_{\max}) \gamma \sum a_i}$ (2-6)
식 (2-6)에 따르면, $\gamma = \rho g$ 이므로 아래와 같이 전개할 수 있다.
 $v = \sqrt{\frac{(M_h + k\rho A z_{\max})g}{\rho \cos\delta \sum a_i}}$ (2-7)

주 파이프에서 물의 속도에 대한 연속 방정식을 식 (2-8)과 같이 정의할 수 있다. ρAv = m 이므로

$$V = \frac{\rho \nu \sum a_i + \dot{m}_{load}}{\rho A} \tag{2-8}$$

펌프 입구에서 노즐 출구까지의 에너지 방정식은 식 (2-9)와 같이 정의 할 수 있다.

$$h_p = \frac{\nu^2}{2g} + z_{\max} + h_l \tag{2-9}$$

식 (2-9)를 통해 손실 수두를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$h_{l} = f \frac{L}{d} \frac{V^{2}}{2g} = \frac{64}{Re} \frac{k_{L} z_{\max}}{\sqrt{\frac{4A}{\pi}}} \frac{V^{2}}{2g} (K_{L} e \forall \forall \exists n \uparrow) \qquad (2-10)$$

지금까지 정의한 내용에 따라 펌프 조건은 Table. 2-1과 같이 정의할 수
있다.

Table. 2-1 Pump condition and definition

Desired specification			
Pump pressure	$P_p = \mu \rho g h_p, \ \mu > 1$		
Mass flow rate	$\dot{m}_p \ge \rho \nu \sum a_i + \dot{m}_{load}$		
Pump power	$W_p = rac{1}{ ho} \dot{m}_p P_p$		

· 살수장치의 수직 운동의 z_{\max} 에 대한 유효성 검증은 식 (2-11)과 같이 정의될 수 있다.

$$\dot{z}_{\max} = \frac{\dot{m}_p}{\rho \sum a_i} \cos \delta - \frac{M_h g}{\dot{m}_p}$$
(2-11)

2.3.2 살수장치의 6자유도 운동 모델

살수장치의 6자유도 모델링을 위한 고려사항으로 병진 운동 및 회전운동 에 대한 해석이 필요하며, 살수장치의 6자유도 병진 운동 및 회전 운동의 해석 방정식은 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$M\frac{d\boldsymbol{v}_{b}}{dt_{E}} = M\left(\frac{d\boldsymbol{v}_{b}}{dt_{b}} + \boldsymbol{\omega}_{b} + \boldsymbol{v}_{b}\right) = \boldsymbol{F}$$

$$J\frac{d\boldsymbol{\omega}_{b}}{dt_{E}} = J\frac{d\boldsymbol{\omega}_{b}}{dt_{b}} + \boldsymbol{\omega}_{b} + \boldsymbol{J}\boldsymbol{\omega}_{b} = \boldsymbol{\tau}$$
(2-12)
(2-13)

여기서, $M = M_h + M_w = M_h + k\rho A z_n$ 이며, M_h 는 살수장치 헤드 부 질량, M_w 는 헤드부와 호스내의 소화수를 포함한 호스 질량을 나타내 고, ρ는 물의 밀도, A는 호스 단면적, k는 보정 계수이다. 이때 식 (2-12) 와 식 (2-13)는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\dot{Mx_b} = F_{x_b} - \omega_{by} \dot{z_b} + \omega_{bz} \dot{y_b}$$
(2-14)

$$\begin{split} \dot{My_b} &= F_{y_b} - \omega_{bz} \dot{x}_b + \omega_{bx} \dot{z}_b \\ \dot{Mz_b} &= F_{z_b} - \omega_{bx} \dot{y}_b + \omega_{by} \dot{x}_b \end{split}$$

 $w_{b(*)}$ 는 물체고정좌표계에서 표현되는 헤드부 각속도를 나타낸다. 그리고 J 가 대각행렬이라고 하면

$$J_{xx}\dot{\omega}_{bx} = \tau_{x_b} - (J_{zz} - J_{yy})\omega_{by}\omega_{bz}$$

$$J_{yy}\dot{\omega}_{by} = \tau_{y_b} - (J_{xx} - J_{zz})\omega_{bz}\omega_{bx}$$

$$J_{zz}\dot{\omega}_{bz} = \tau_{z_b} - (J_{yy} - J_{xx})\omega_{bx}\omega_{by}$$
(2-15)

로 정의할 수 있고, 식 (2-14)에서 각 방향으로부터 헤드부에 작용하는 힘 벡터 $F_{(*)b}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} F_{xb} \\ F_{yb} \\ F_{zb} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{4} \begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{iz} \end{bmatrix} + MgR_X^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} + F_d$$

$$= \begin{bmatrix} \sin\delta(-F_1 - F_2 + F_3 + F_4) \\ \cos\delta\sum F_i \end{bmatrix} + Mg \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta\sin\phi \\ -\cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} + F_d$$
(2-16)

여기서 $F_{i(*)}$ 는 i번째 노즐에서 발생하는 각 축방향의 힘, F_d 는 헤드부 에 작용하는 미지 외란벡터, g는 중력가속도를 나타낸다. 이와 같은 방법 으로 식 (2-15)의 토크벡터 $au_{(*)b}$ 에 대한 식은 아래와 같이 정의할 수 있

$$\begin{bmatrix} \tau_{xb} \\ \tau_{yb} \\ \tau_{zb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (wcos\delta - hsin\delta)(F_1 + F_2 - F_3 - F_4) \\ lcos\delta(-F_1 + F_2 + F_3 - F_4) \\ lsin\delta(-F_1 + F_2 - F_3 + F_4) \end{bmatrix} + \tau_d$$
(2-17)

워터제트방식 액추에이터의 추력 $F_i(i=1,....4)$ 에 대하여 다음과 같이 사상(mapping)한다.

$$u_{1} = F_{1} + F_{2} + F_{3} + F_{4}$$

$$u_{2} = F_{1} + F_{2} - F_{3} - F_{4}$$

$$u_{3} = -F_{1} + F_{2} + F_{3} - F_{4}$$

$$u_{4} = F_{1} - F_{2} + F_{3} - F_{4}$$
(2-18)

여기서 각 사상 u_1 은 추력, u_2 는 축 y_b 에 대한 롤(roll) 운동, u_3 는 축 x_b 에 대한 피치(pitch) 운동, u_4 는 요 운동에 관여한다.

그러나 워터제트방식 액추에이터는 소화수를 고압, 고속으로 분사하여 추력을 확보하므로 운동모텔에 구동유체 흐름을 고려하여 다시 표현할 수 있다. 이에 따라 헤드부에 작용하는 힘은 식 (2-16)은 다음과 같이 전개된 다.

$$\begin{bmatrix} F_{xb} \\ F_{yb} \\ F_{zb} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{4} \begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{iz} \end{bmatrix} + MgR_X^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} + F_d$$
(2-19)

$$= \begin{bmatrix} 0\\ \frac{1}{\rho a} \sin\delta(-\dot{m}_1^2 - \dot{m}_2^2 + \dot{m}_3^2 + \dot{m}_4^2) - \dot{y}_b \sum \dot{m}_i\\ \frac{1}{\rho a} \cos\delta \sum \dot{m}_i^2 - \dot{z}_b \sum \dot{m}_i \end{bmatrix} + Mg \begin{bmatrix} \sin\theta\\ -\cos\theta\sin\phi\\ -\cos\theta\sin\phi\\ -\cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} + F_d$$

여기서, α 는 워터제트방식 액추에이터 노즐의 단면적, $\dot{m}_i(i=1,...,4)$ 는 각 노즐을 통과하는 유체의 질량유량을 나타낸다. 이때 토크벡터 식 (2-17)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} \tau_{xb} \\ \tau_{yb} \\ \tau_{zb} \end{bmatrix} = \frac{1}{\rho a} \begin{bmatrix} (w\cos\delta - h\sin\delta)(\dot{m}_{1}^{2} + \dot{m}_{2}^{2} - \dot{m}_{3}^{2} - \dot{m}_{4}^{2}) \\ l\cos\delta(-\dot{m}_{1}^{2} + \dot{m}_{2}^{2} + \dot{m}_{3}^{2} - \dot{m}_{4}^{2}) \\ l\sin\delta(-\dot{m}_{1}^{2} + \dot{m}_{2}^{2} - \dot{m}_{3}^{2} + \dot{m}_{4}^{2}) \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} -\omega_{xb}(h+w)\sum\dot{m}_{i} \\ -\omega_{yb}l^{2}\sum\dot{m}_{i} \\ -\omega_{yb}l^{2}\sum\dot{m}_{i} \\ \omega_{zb}l^{2}(-\dot{m}_{1}^{2} + \dot{m}_{2}^{2} + \dot{m}_{3}^{2} - \dot{m}_{4}^{2}) \end{bmatrix} + \tau$$

$$(2-20)$$

워터제트 액추에이터 노즐을 통과하는 유체의 질량유량을 다음과 같이 사상한다.

$$U_{1} = \sum \dot{m}_{i}^{2} - g \frac{M_{h}\rho a}{\cos \delta}$$

$$U_{2} = \dot{m}_{1}^{2} + \dot{m}_{2}^{2} - \dot{m}_{3}^{2} - \dot{m}_{4}^{2}$$

$$U_{3} = -\dot{m}_{1}^{2} + \dot{m}_{2}^{2} + \dot{m}_{3}^{2} - \dot{m}_{4}^{2}$$

$$U_{4} = -\dot{m}_{1}^{2} + \dot{m}_{2}^{2} - \dot{m}_{3}^{2} + \dot{m}_{4}^{2}$$
(2-21)

각 좌표계에서 정의되는 살수장치 운동상태를 식 (2-1)과 같이 정의하고 변환행렬 식 (2-2)를 이용하면 두 좌표계의 관계는 식 (2-22)로 표현된다. 따라서 시스템 운동방정식은 식 (2-23)과 같이 정리된다.



살수장치가 특정 지점에서 적절히 안정된 상태로 유지되거나 운동속도가 충분히 느리다면 $\phi \approx 0$, $\theta \approx 0$ 으로 둘 수 있다. 이것으로부터 식 (2-22)와 식 (2-23)은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.



또한, ψ가 매우 느린 속도로 변한다고 가정하면 식 (2-24)와 식 (2-25) 를 다음의 식 (2-26) ~ (2-28)과 같이 간단히 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} \cos\psi - \sin\psi \ 0 \ 0 \ 0 \\ \sin\psi \ \cos\psi \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 & 0 & 1 \ 0 \ 0 \\ 0 & 0 & 0 \ 1 \ 0 \\ 0 & 0 & 0 \ 0 \ 1 \\ 0 & 0 & 0 \ 0 \ 0 \end{bmatrix} X_b \end{aligned} (2-26) \\ Y &= \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi - \sin\psi \ 0 \ 0 \\ \sin\psi \ \cos\psi \ 0 \ 0 \\ 0 & 0 & 1 \ 0 \\ 0 & 0 & 0 \ 1 \end{bmatrix} Y_B \end{aligned} (2-27) \\ \dot{X}_B &= \begin{bmatrix} \dot{X}_b \\ \ddot{X}_b \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X_b \\ \dot{X}_b \end{bmatrix} + B_u U + B_w w \end{aligned} (2-28) \\ Y_B &= C \begin{bmatrix} X_b \\ \dot{X}_b \end{bmatrix} \end{aligned}$$

제 3 장 제어기 설계

본 연구에서 제안하는 화재진압용 살수장치는 화재발생 지점까지 워터제 트방식 액추에이터의 추진력을 통해 비행하여 이동이 가능한 시스템이다. 화재현장 내부는 매우 위험하고 상황이 거의 확인 불가능하며 수많은 미지 의 위험요소가 수반된 화재현장에 소방원을 직접 투입하는 것은 인명손실 위험성을 감수해야 하는 것이다. 따라서 소방원 대신 살수장치를 화재현장 에 직접 투입시켜 화재 진압작업뿐만 아니라 현장 탐색 작업을 동시에 수 행할 수 있도록 하는 것이 주된 목적이다.

이를 위해 살수장치는 화재진압 목표지점에 정확하게 이동해야한다. 살 수장치의 추력은 4개의 워터제트방식 액추에이터로부터 발생되고, 이를 적 절하게 조절함으로써 운동제어성능을 확보할 수 있게 된다. 결국, 액추에이 터 노즐로부터 발생하는 추력으로 고도 유지를 포함한 6자유도 운동이 제 어된다.

그래서, 본 장에서는 6자유도 운동제어를 위한 제어계 설계법을 소개하 고, 외란등의 불확실성을 고려한 시뮬레이션 평가를 수행한다. 비교평가를 통해 제안하는 제어기법과 기술의 유효성을 검증한다.

3.1 제어대상 시스템 표현

각 좌표계에서 정의되는 살수장치 운동상태를 $X = [x y z \phi \theta \psi]^T$, $\dot{X}_b = \begin{bmatrix} \dot{x}_b y_b z_b \omega_{xb} \omega_{yb} \omega_{zb} \end{bmatrix}^T z$ 정의하면 두 좌표계에 대한 운동상태는 식 (3-1) 으로 표현할 수 있으며, 시스템 운동방정식은 식 (3-2)과 같다.

$$\begin{vmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\theta}$$

$$\begin{split} d_{\phi} &= -\frac{1}{J_{xx}} w_{xb} (h+w) \sum \dot{m}_{i} + \frac{1}{J_{xx}} (-(J_{zz} - J_{yy}) w_{by} w_{bz} + \tau_{dx}) \\ d_{\theta} &= -\frac{1}{J_{yy}} w_{yb} l^{2} \sum \dot{m}_{i} + \frac{1}{J_{yy}} (-(J_{xx} - J_{zz}) w_{bx} w_{bz} + \tau_{dy}) \\ d_{\psi} &= -\frac{1}{J_{zz}} w_{zb} l^{2} (-\dot{m}_{1} + \dot{m}_{2} + \dot{m}_{3} - \dot{m}_{4}) \\ &+ \frac{1}{J_{zz}} (-(J_{yy} - J_{xx}) w_{bx} w_{by} + \tau_{dz}) \end{split}$$

여기서, 파라미터 변동 및 바람, 헤드부와 연결된 호스 등에 의한 불확실 한 외란 $(F_{d(*)}, \tau_{d(*)})$ 으로 고려한다.

3.2 제어기 설계

살수장치는 4개의 워터제트 방식 액추에이터를 이용해 추진력을 확보하 게 되는, 구동특성상 구동유체가 반대로 흐르게 하더라도 음의 방향을 갖 도록 할 수 없다. 따라서 각 노즐을 통과하는 질량 유량은 0 ≤ \dot{m}_i ≤ $\dot{m}_{\rm max}$ 이라고 한다면, 제어력 함수 식 (2-21)는 다음과 같은 부 등식으로 나타내어 진다.

$$-g\frac{M_{h}\rho a}{\cos\delta} \leq U_{1} \leq 4\dot{m}_{\max}^{2} - g\frac{M_{h}\rho a}{\cos\delta}$$

$$-2\dot{m}_{\max}^{2} \leq U_{2} \leq 2\dot{m}_{\max}^{2}$$

$$-2\dot{m}_{\max}^{2} \leq U_{3} \leq 2\dot{m}_{\max}^{2}$$

$$(3-3)$$

$$-2\dot{m}^2_{
m max} \leq U_4 \leq 2\dot{m}^2_{
m max}$$

식 (3-3) 각 요소가 4개 노즐로 방출되는 질량유량의 조합인 것을 고려 할 때, 종운동과 횡운동은 롤(roll)과 피치(pitch)운동에 서로 영향을 미치기 때문에 underactuated system 이며 제어입력간 연성임을 알 수 있다. 그러 나, 수직방향 운동과 요(yaw)운동은 제어입력간 연성 없이 U_1 과 U_4 만을 이용하여 구동할 수 있다.

제어계 설계를 위하여 다음을 가정함.

- $M \approx M_h$
- 식 (3-3)의 포화는 동시에 발생하지 않음
- $\dot{R}_X \approx R_X$

위 사항을 고려하여 슬라이딩 모드 제어기법에 따른 고도 및 위치제어 기, 자세제어기를 설계한다.

3.2.1 고도 및 위치 제어기 설계

지구고정좌표계에서 표현되는 살수장치 헤드부의 위치를 $X_n = \begin{bmatrix} x_n y_n z_n \end{bmatrix}^T$ 으로 두고, 상태오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e_{X} = X_{nd} + R_{X} \begin{bmatrix} 0 \\ J_{xx} \sin \delta \\ M_{h} (w \cos \delta - h \sin \delta) \end{bmatrix} \int_{0}^{t} w_{bxd}(t) dt - X_{n}$$

$$-R_{X} \begin{bmatrix} 0 \\ J_{xx} \sin \delta \\ M_{h} (w \cos \delta - h \sin \delta) \end{bmatrix} \int_{0}^{t} w_{bx}(t) dt \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$(3-4)$$

여기서
$$w_{bxd}$$
는 w_{bx} 의 기준값이다. $w_{bxd} = 0$ 으로 두면,

$$e_{X} = X_{nd} - X_{n} - R_{X} \begin{bmatrix} 0 \\ J_{xx} \sin \delta \\ \hline M_{h} (w \cos \delta - h \sin \delta) \\ 0 \end{bmatrix}$$
(3-5)

식 (3-5)의 시간도함수는 다음과 같다.

$$\dot{e}_{x} = \dot{X}_{nd} - \dot{X}_{n} - R_{x} \begin{bmatrix} 0 \\ J_{xx} \sin \delta \\ \hline M_{h} (w \cos \delta - h \sin \delta) w_{xb} \\ 0 \end{bmatrix}$$
(3-6)
$$= \dot{X}_{nd} - R_{x} \begin{bmatrix} \dot{x}_{b} \\ J_{xx} \sin \delta \\ \hline M_{h} (w \cos \delta - h \sin \delta) w_{xb} \\ \dot{z}_{b} \end{bmatrix}$$

슬라이딩 평면을 다음과 같이 정의한다.
$$S_{x} = \dot{e}_{x} + n_{z1}e_{z} + n_{z2} \int_{0}^{t} e_{z}(t) dt$$
(3-7)

식 (3-7)의 시간도함수는 다음과 같다.

$$\dot{s}_{X} = \ddot{e}_{x} + n_{z1}\dot{e}_{z} + n_{z2}e_{2} \tag{3-8}$$

$$\begin{split} &= \ddot{X}_{nd} - R_X \left[\ddot{y}_b - \frac{J_{xx} \sin \delta}{M_h (w \cos \delta - h \sin \delta)} \dot{\omega}_{xb} \right] + n_{z1} \dot{e}_z + n_{z2} e_z \\ &= \ddot{X}_{nd} + n_{z1} \dot{e}_z + n_{z2} e_z - R_X \left[\begin{array}{c} 0 \\ g \sin \theta \\ -g \cos \theta \sin \phi \\ \frac{\cos \delta}{M \rho a} U_1 \end{array} \right] - R_X \left[\begin{array}{c} 0 \\ d_x \\ d_y \phi + U_2 \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{M_h} \right) \\ d_z - g \left(\cos \theta \cos \phi - \frac{M_h}{M} \right) \right] \end{split}$$

슬라이딩 모드 제어기법에 따른 제어입력을 식 (3-9)으로 정의한다.

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} gsin\theta \\ -gcos\thetasin\phi \\ \frac{\cos\delta}{M\rho a} U_1 \end{bmatrix} = R_x^{-1}(n_{z1}\dot{e}_z + n_{z2}e_z + K_X f(s_X))$$
(3-9)
$$\Leftrightarrow \begin{cases} \theta_d = \arcsin\frac{u_x}{g} \\ \phi_d = \arcsin\left(\frac{u_y}{-gcos\theta}\right) \\ U_1 = \frac{M_h\rho a}{\cos\delta} u_z \end{cases}$$

여기서
$$f(s_X) = \begin{bmatrix} s_{Xx} \\ s_{Y_y} \\ sign(s_{Xz}) \end{bmatrix}^T$$
이며 θ_d 와 ϕ_d 는 연속함수로 가정한다.
$$U_2 \frac{\sin\delta}{\rho a} \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{M_h} \right)$$
는 매우 작고, 계측 불가능하므로 입력외란으로 둔다.

안정성해석을 위해 다음 리아푸노프(Lyanpunov) 함수를 도입한다.

$$V_1 = \frac{1}{2} S_X^T S_X \tag{3-10}$$

식 (3-10)의 시간도함수는

$$\begin{split} \dot{V}_{1} &= S_{X}^{T} \dot{S}_{X} \end{split}$$
(3-11)
$$&= S_{X}^{T} \Biggl[\ddot{X}_{d} - K_{X} f(S_{X}) - R_{X} \Biggl[\begin{matrix} d_{x} \\ d_{y\phi} + U_{2} \frac{\sin \delta}{\rho a} \Bigl(\frac{1}{M} - \frac{1}{M_{h}} \Bigr) \Biggr] \Biggr] \\ &= S_{Xz} (-K_{Xz} sign(S_{Xz}) + D_{z}) \\ &+ S_{Xz} (-K_{Xx} S_{Xx} + D_{x}) \\ &+ S_{Xy} (-K_{Xy} sign(S_{Xy}) + D_{y\phi}) \\ &= -|S_{Xz}| (K_{Xz} - D_{z} sign(S_{Xz})) \\ &- S_{Xx}^{2} (K_{Xx} - \frac{D_{x}}{S_{Xx}}) - S_{Xy}^{2} (K_{Xy} - \frac{D_{y\phi}}{S_{Xy}}) \\ &\leq 0 \ 27 \ \lambda \end{vmatrix}, \end{split}$$

여기서,

$$D = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{X}_{nd} - R_X \begin{bmatrix} d_x \\ d_y + U_2 \frac{\sin \delta}{\rho a} \left(\frac{1}{M_h} - \frac{1}{M} \right) \\ d_z - g \left(\cos \theta \cos \phi - \frac{M_h}{M} \right) \end{bmatrix} \end{pmatrix}$$
(3-12)

결국 \dot{V}_1 는 다음 두 동시에 조건을 만족시킬 경우 negative definite이다.

$$\begin{cases} K_{Xz} > \max(D_z) \\ S_{Xx} > \frac{D_x}{K_{Xx}} \\ S_{Xy} > \frac{D_y}{K_{Xy}} \end{cases}$$
(3-13)

 S_{Xx} 는 식 (3-13)가 만족될 경우 항상 0에 수렴하나, 여기서 S_{Xx} 와 S_{Xy} 는

 각 슬라이딩 평면이 정의된 범위에 있어야 한다. 따라서, 결국 궁극적 균일

 유계성(uniformly ultimate boundedness)을 보장한다.

살수장치 헤드부의 오일러 각도를 $Φ = [φθψ]^T$ 으로 두고, 상태오차를 식 (3-14)으로 정의하고 이에 대한 시간도함수는 식 (3-15)으로 계산된다.

$$e_{\Phi} = \Phi_d - \Phi = \begin{bmatrix} \phi_d \\ \theta_d \\ \varphi_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \phi \\ \theta_d \\ \varphi \end{bmatrix}$$
(3-14)
$$\dot{e}_{\Phi} = \dot{\Phi}_d - \dot{\Phi} = \dot{\Phi}_d - R_W \omega_b$$
(3-15)

슬라이딩 평면을 식 (3-16)로 정의하고 이에 대한 시간도함수는 식 (3-17)로 계산된다.

$$s_{\phi} = \dot{e}_{\phi} + n_{\phi} e_{\phi} \tag{3-16}$$

$$\dot{s}_{\phi} = \ddot{e}_{\phi} + n_{\phi}\dot{e}_{\phi} \tag{3-17}$$

$$\dot{s}_{\varPhi} = \ddot{\varPhi}_d - R_W \dot{\omega}_b + n_{\varPhi} \dot{e}_{\varPhi}$$

$$\dot{s}_{\Phi} = \ddot{\varPhi}_{d} + n_{\Phi}\dot{e}_{\Phi} - R_{W} \begin{bmatrix} \frac{wcos\delta - hsin\delta}{J_{xx}\rho a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{lcos\delta}{J_{yy}\rho a} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{lsin\delta}{J_{zz}\rho a} \end{bmatrix}$$

슬라이딩 모드 제어기법에 따른 제어입력을 식 (3-18)으로 정의한다.

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \rho a \begin{bmatrix} \frac{J_{xx}}{w\cos\delta - h\sin\delta} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{J_{yy}}{l\cos\delta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{J_{zz}}{l\sin\delta} \end{bmatrix} R_W^{-1}(n_{\phi}\dot{e}_{\phi} + K_{\phi}sign(s_{\phi}))$$
(3-18)

 $sign(s_{\phi}) = diag[sign(s_{\phi_1})sign(s_{\phi_2})sign(s_{\phi_3})]^T$ 이며, 안정성해석을 위하여 다음 리아프노프 함수를 도입한다.

$$V_2 = \frac{1}{2} S_{\Phi}^T S_{\Phi} \tag{3-19}$$

식 (3-19)의 시간도함수는 다음과 같다.

$$\dot{V}_{2} = S_{\Phi}^{T} \dot{S}_{\Phi}$$

$$= S_{\Phi}^{T} \left(-K_{\Phi} sign(S_{\Phi}) + \ddot{\Phi}_{d} - R_{W} \begin{bmatrix} d_{\phi} \\ d_{\theta} \\ d_{\varphi} \end{bmatrix} \right)$$

$$(3-20)$$

여기서, K_{Φ} 의 대각성분이 $\ddot{\Phi}_{d} - R_{W} \begin{bmatrix} d_{\phi} \\ d_{\theta} \\ d_{\varphi} \end{bmatrix}$ 의 상계(upper-bound) 보다 큰

값을 갖도록 함으로써 시스템의 안정성은 확보된다.

고도 및 위치제어기와 자세제어기를 반영한 살수장치 제어시스템의 블록 선도를 Fig. 3-1에 나타내었다.



Fig. 3-1 Block diagram of motion control system for flying type for fire fighting system

3.2.3 PID제어기 설계

살수장치 모션제어를 위한 제어계 성능평가를 위하여 고전적인 제어기법 중 하나인 PID제어기법을 도입하고, 시뮬레이션 결과를 통해 그 유효성을 비교 평가 한다. 먼저, 이를 위하여 시스템 상태오차를 다음과 같이 다시 정의한다.

$$\begin{bmatrix} e_{xb} \\ e_{y\phi b} \\ e_{zb} \end{bmatrix} = R_X^{-1} e_X = R_X^{-1} (X_{nd} - X) + \begin{bmatrix} 0 \\ J_{xx} \sin \delta \\ \hline M_h (w \cos \delta - h \sin \delta) \\ 0 \end{bmatrix}^t \omega_{xb}(t) dt$$
(3-21)

$$e_{\Phi} = \begin{bmatrix} e_{\phi} \\ e_{\theta} \\ e_{\psi} \end{bmatrix} = \Phi_d - \Phi \tag{3-22}$$

식 (3-21)와 식 (3-22)에 따라 PID제어기로부터 얻어지는 제어입력신호 는 다음과 같이 계산된다.

$$u_{j} = K_{pj}e_{j} + K_{ij}\int_{0}^{t} e_{j}(t)dt + K_{dj}\frac{N_{j}}{1 + N_{j}\int_{0}^{t} e_{j}(t)dt}, (j = 1,...,6)$$
(3-23)

여기서, 제어입력 $u_j \in \{\theta_d, \phi_d, U_1, U_2, U_3, U_4\}$, 상태오차 $e_j \in \{e_{xb}, e_{y\phi b}, e_{zb}, e_{\phi}, e_{\theta}, e_{\varphi}\}$ 와 같이 정의된다. PID제어기 이득은 SMC법 칙을 이용하여 최저값을 도출하였다. $K_{pj} = \frac{1}{4k_j(k_{cj} + k_{0j})^2}$ (3-24) $K_{ij} = \frac{K_{pj}}{4(k_{cj} + k_{0j})}$

여기서, k_j 는 확산이득(process gain), k_{0j} 시간 지연이다. $k_j \in \left\{g, -g, \frac{\cos\delta}{M_h}, \frac{w\cos\delta - h\sin\delta}{J_{xx}}, \frac{l\cos\delta}{J_{yy}}, \frac{l\sin\delta}{J_{zz}}\right\}$ 는 각각 u_j 성분에 대응하는 값이다. k_{cj} 는 제어기 설계 변수이며, 균형있는 제어성능과 강인성을 갖출 수 있도록 설정해야 한다.

제 4 장 시뮬레이션

본 장에서는 본 연구에서 제안하는 시뮬레이션에 대하여 설명한다.

4.1에서는 고도 및 자세제어 성능을 평가하였으며, 시뮬레이션에 적용된 살수장치 파라미터는 제작 진행중인 파일롯 모델 치수 및 사양을 고려하여 예상치를 설정하였다. 4.2에서는 위치제어 성능을 평가하고, 4.3에서는 6자 유도 모션제어 성능을 평가하고, 그리고 4.4에서는 외란을 고려한 6자유도 모션 제어 성능을 평가하였다.

4.1 고도 및 자세 제어 성능

살수장치 운동모델의 유효성평가 및 향후 파일롯모델 제작을 위해서는 펌프용량 등 장치에 대한 세부사양을 결정해야 한다. 3장에서 구한 수식 모델을 기반으로 운동제어 목표를 설정하고 다양한 시뮬레이션을 수행한 다.

본 연구에서는 기본적인 운동특성을 분석하는 것이 목적이므로, 고도 및 자세제어를 위해 고전적인 제어기법 중 하나인 PID제어기법을 도입한다. 먼저 이를 위하여 시스템 상태오차를 식 (3-21) ~ (3-23)을 적용한다. 시뮬 레이션에 사용된 살수장치 파라미터는 설계 및 제작 진행중인 파일롯 모델 규모를 고려하여 예상치를 설정하였다. 그런 후 설정값을 기준으로 적절히 조절해 가면서, 기대수준의 성능값을 얻을 때까지 시뮬레이션을 수행하였 다. 이때 사용한 물리파라미터는 Table. 4-1에 정리하였다.

Parameter	Value	Unit
M_h	2	kg
J	diag(0.0071, 0.0085, 0.0133)	kg·m ²
l	0.5	m
w	0.4	m
h	0.1	m
δ	45	deg
ρ	1000	kg/m ³
A	4.91x10 ⁻⁴	m^2
α	7.85x10 ⁻⁵	m^2
ĸ	1.5	-

Table. 4-1 Parameter of flying type fire fighting system used in simulation

살수장치 헤드부 고도제어 시뮬레이션을 위해 고도 3[m]에서 20[sec] 간 격으로 2[m] 하강과 상승을 반복하고, 정면을 기준으로 ±45[deg] 요 운동 하도록 기준값(목표값)을 설정하였다. 이에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 4-1 ~ Fig. 4-3에 나타내었다. Fig. 4-1는 헤드부의 헤드부의 (x_n , y_n) 고 도 운동 결과를 나타내고, Fig. 4-2는 롤 운동, 피치운동, 요 운동 응답을 각각 나타낸다. 그리고 Fig. 4-3은 액추에어터 노즐로 방출되는 구동유체 의 질량유량을 나타낸다. Fig. 4-1와 Fig. 4-2에 따르면, 초기시간에 헤드 부가 기준고도로 급격히 이동하였다가 과도상태를 지나 기준고도에 안정적 으로 정착하는 것을 알 수 있다.



Fig. 4-1 Result of simulation for altitude control(x, y, z)



Fig. 4-2 Result of simulation for attitude control(roll, pitch, yaw)



Fig. 4-3 Result of nozzle simulation for attitude control

과도상태에서 기준값을 초과하는 오버슈트 현상이 발생하나 정상상태에 서는 오차없이 기준값을 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 일단 기준값에 도달한 이후에는 어느정도의 고도 설정값이 변하더라도 과도상태에서 큰 오버슈트가 발생하지 않고 안정적인 위치제어특성을 얻을 수 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 4-3에 나타낸 질량유량 특성에서는 고도 설정값이 변하는 위치에서 그 값이 급격하게 변하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 살수장치 헤드부 기준경로를 운용환경에 맞춰 적절한 속도를 나타내는 연속함수로 고려한다 면 아무런 문제가 되지 않는다. 그러나 극단적인 설정값 변화구간 외에는 1.3[kg/s] 이하 수준이고, 이것으로부터 체적유량으로 환산하여 펌프 요구 사양을 결정한다.

4.2 위치 제어 성능

살수장치 위치제어 성능평가를 위하여 정지된 상태에서 2m상승후 사각 형을 이루며 2m 이동하고 원위치로 복귀하도록 기준값을 정의하였다.

이에 따른 시뮬레이션 결과를 Fig. 4-4 ~ Fig. 4-6에 나타내었다. 그림에 서 붉은색 점선은 PID 제어기 결과이며, 파란색 실선은 SMC 제어기 결과 이다. 먼저 Fig. 4-4는 상승해서 사각형의 설정경로를 추종하는 과정을 나 타내고 있다. 이때 PID의 경우에는 출발점에서 상승하는 순간부터 과도한 오버슈트 현상이 발생함과 동시에 슬라이딩 모드 제어기의 경우에 비해 큰 경로 추종오차도 발생한다는 것을 확인할 수 있다.



Fig. 4-4 Result of simulation for position control



Fig. 4-6 Result of simulation for motion control(roll, pitch, yaw, z)



Fig. 4-7 Result of nozzle simulation for position control

Fig. 4-5는 살수장치 헤드부의 자세, Fig. 4-6은 롤, 피치, 요 운동 및 고 도제어성능을 나타낸다. Fig. 4-4의 경로추종성능 평가결과와 유사한 결과 를 나타내고 있다. 슬라이딩 모드 제어기를 적용한 경우에는 과도상태에서 다소 큰 오버슈트가 발생하나 정상상태에서는 오차없이 목표값을 잘 추종 하고 있다는 것을 알 수 있다. 이에 반해 PID 제어기를 적용한 경우에는 정상상태에서도 진동형태의 지속되고 목표값에 이르기까지 상당한 시간이 소요된다는 것을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 4-7은 각각의 워터제트 액추에이터 노즐로부터의 질량유량, 즉 제어력을 나타내고 있다. 결론적으로 살수장치 시스템에 대한 모델을 기반으로 제어기를 설계하고, 시스템 특성을 고려한 적절한 제어기 적용을 통해 우수한 제어성능을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.

4.3 6자유도 모션제어 성능

6자유도 모션제어 성능평가를 위하여 다음 기준 경로를 고려하였다.



Fig. 4-8 Trajactory tracking performance of the flying-type fire fighting system in three dimensional view



Fig. 4-9 Position control response of two control systems. The red dotted line is PID control; the solid blue line is SMC; the black dashed reference



Fig. 4-10 Attitude control response of two motion control systems. The red dotted line is PID control; the solid blue is SMC; the reference trajectory of the yaw motion is $\varphi_d = -0.05t$.



4.4 외란을 고려한 6자유도 모션 제어 성능

외란을 고려한 6자유도 모션제어 성능평가를 위해 기준경로는 동일하게 두고, 다음 외란을 고려하였다.



Fig. 4-12 Trajectory tracking performance of the flying type firefighting system with disturbances in three-dimensional view.



Fig. 4-13 Position control response of two motion control system in the presence of disturbances. The red dotted is PID control; the solid blue line is SMC; the black dashed reference trajectory line along the z-direction is



Fig. 4-14 Position control response of two motion control system in the presence of disturbances. The red dotted is PID control; the solid blue line is SMC; the reference trajectory line along the z-direction is $\varphi_d = -0.05t$.



제5장결론

본 연구에서는 신속한 화재진압을 통해 재산 및 인명손실 위험성을 최소 화 할 수 있는 새로운 화재진압용 살수장치를 제안하였다. 살수장치는 비 행이 가능한 구조이며 원격제어를 통해 위험하고 불확실한 환경에서도 화 재진압이 가능한 시스템이다. 신속하게 이동하여 화재를 조기에 진압하기 위해서는 살수장치의 효과적인 운동제어시스템구축이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 워터제트방식 액추에이터를 가진 이동형 살수장치의 수식모델 과 물리특성을 파악하고 모델링을 수행하였다. 이를 기반으로 제어기를 설 계하고 시뮬레이션을 통해 제안하는 시스템의 유효성을 검증하였다.

살수장치의 규모 등 파일롯 모델의 물리적 특성을 적절하게 고려하였으 며, 이로부터 도출된 물리파라미터를 기반으로 모델링과 제어기를 설계하 였다. 이를 통해 소화수 공급용 펌프규격 등, 파일롯 모델을 구성하는 주 요장치의 규격을 결정하였다. 또한 PID 및 슬라이딩 모드 제어기를 각각 설계하고 비교평가를 수행하였다.

향후에는 이 결과를 토대로 향후 파일롯 모델의 제작 및 실험을 통해 제 안한 능동형 살수장치의 유효성을 보다 구체적으로 검증할 계획이다. 또한 고온의 환경에서 임무수행이 가능한 내열성 및 외부환경에 대한 강인성을 갖출 수 있도록 연구진행될 계획이다.

마지막으로 이러한 새로운 살수장치 시스템의 운용전략으로는 소방드론 고도화와 연동될 수 있는 융합시스템을 구성하여 화재재난 대응 효과를 극 대화할 필요가 있다.

즉, 화재 조기진압을 위해서는 가능한 신속하게 화재발생지점까지 접근 할 수 있어야 한다. 뿐 만 아니라, 살수기능 외, 소방재 투하, 상황 및 생존 자 탐색 등의 모니터링시스템 개발은 제반 방재시스템과의 효율적인 연계 시스템 구축을 가능하게 할 것이며, 결과적으로 재난에 따른 피해를 극소 화 할 수 있을 것으로 기대된다.



참고문헌

- [1] https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=156&tblId=DT_15601N_ 001&conn_path=I2, 2021.10.27.
- [2] ttps://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=156&tblId=TX_15601_A004
 &conn_path=I2, 2021.10.27.
- [3] https://www.yna.co.kr/view/AKR20210909075300063, 2021.9.9.
- [4] S. J. Hong, "A Study on Efficience Implementation of Fire Drones in Fire Supperssion and Life-Savings", Kyonggi University, pp. 29 - 31, 2020
- [5] M. S. Kim, "The study of extinguishing and pervention for fires on high buildings", Kyunggi University, pp. 66, 2012.
- [6] http://www.techholic.co.kr/news/articleView.html?idxno=16185#rs, 2014.4.30.
- [7] C. H. Sung, M. H. Son, M. K. Choi and J. H. Kim, "Development of Small Unmanned Groud Vehicle Platform", Korea Automotive Technology Institute, pp. 118, 2020.
- [8] Hisato Ando, Yuichi Ambe, Tomoka Yamaguchi, Yu Yamauchi, Masashi Konyo and Kenjiro Tadakuma, "Fire extinguishment using a 4m long flying-hose-type robot with multiple water-jet nozzles", Advanced Robotics, pp. 703, 2020.
- [9] https://www.joongang.co.kr/article/3846888#home, 1999.12.1
- [10] S. J. Oh, "The Method of Force of Fire in High-rise Building by NFPA 550 Guide to the Fire Safety Concepts Tree", Woosuk University, 2021.

- [11] C. H. Kim, "Performance on Water Jet Nozzle Position Control Type Automatic Fire Extinguishing System with Flame Detector", Kongju National University, 2014.
- [12] W. Y. Yoo, "A study on the active noise control system using state space equation, Chonnam National University", 2014.
- [13] T. Y. Choi, "A Study on the Fire Suppression of & Evacuation High-Rise buildings Considering the Characteristics of Fire Risk", Seoul Citizen University, 2014.
- [14] J. S. Han, "A Study on Industrial Mixer Choice of Impeller Type by Concentration Measurement Method, PIV and CFD", Korea Maritime University, 2007.
- [15] 석광호, 송전선로 점검을 위한 복도체 주행로봇에 관한 연구 : 시뮬레이션 및 프로토타입 구현, 한국기술교육대학교 박사논문, 2015년.
- [16] 이병석, 4-회전익 비행체의 모델링 및 제어기 설계에 관한 연구, 서울 시립대학교 석사논문, 2009년.
- [17] 김동원, 고압 워터 분무 제트에 관한 연구, 안동대학교 석사논문, 2014년.
- [18] 김원평, 함정용 소형 워터제트 개발에 관한 연구, 한국해양대학교 석사 논문, 2010년.
- [19] 고광현, 공리적접근워터제트산박추진장치, 연세대학교 석사논문, 2002년.
- [20] 이임장, 김성동, 이동혁, 제어시스템에서의 시뮬레이션 기법과 로봇공 학에의 응용, 한국과학기술원, 2006년.
- [21] 정동길, 박진서, 이종희, 손성한, 유도무기의 비행시험 결과 예측 및 분 석을 위한 현장 영상 기반 시뮬레이션 기법 연구, 한국시뮬레이션학회, 2019년.

감사의 글

직장생활과 석사과정을 병행하였던 2년반 동안의 학위과정을 마무리 하 며, 이 한편의 논문이 나오기까지 도와주신 모든 분들게 감사의 글을 올립 니다. 먼저 지도 교수님이신 김영복 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 교수 님으로서, 학자로서, 인생의 선배님으로서, 다양한 모습으로서 많은 가르침 과 지도해주심에 큰 감사를 드립니다. 교수님께서 가르쳐 주신 연구의 기 본자세와 열정을 늘 가슴에 품으며 저에게 주어진 업무와 자리에서 자랑스 런 교수님의 제자가 될 수 있도록 꾸준히 정진하겠습니다. 교수님과 함께 연구하고 고민하고, 학회 참가 등의 함께했던 시간은 제 인생의 행운이며 가장 행복한 시간 중의 하나로 기억될 것입니다. 거듭 감사 드립니다. 그리 고 바쁘신 와중에도 논문심사와 지도에 신경 써 주신 서진호 교수님, 지상 원 교수님께 감사를 드립니다.

지난 2년 6개월간 학업간 어려운 여건속에서도 함께 했던 MCL 연구실 의 모든 선배님과 후배님들에게 감사를 전합니다. 부족한 저를 자상하게 챙겨주신 이동훈 박사님, 틴, 티엔님께도 감사를 드리며 함께한 시간과 추 억이 행복했습니다.

코로나로 대면할 기회가 많이 없었지만 학과를 함께한 연구실의 많은 분 들과의 너무 행복하고 즐거운 추억을 함께 할 수 있어 기뻤습니다. 함께 티타임을 나누며 공유했던 MCL 연구실의 모든 분들 모두 고맙습니다.

마지막으로 부족한 남편이지만 늘 믿고 따라주며, 인내하고 이해하며 또 격려해 주고 응원하여 준 든든한 나의 아내에게 깊은 감사의 마음과 영원 한 사랑을 전합니다.

2021년 12월

조 정 헌