

국제 우주정거장의 가압모듈에서 연기거동 및 감지에 관한 수치 모델링

박설현, 이주희, 김연규, 황철홍*
한국항공우주연구원 항공우주융합기술연구소
*대전대학교 소방방재학과

A Numerical Modeling of Smoke Behavior and Detection in a Pressurized Module(PM) of the International Space Station(ISS)

Seul-Hyun Park, Joo-Hee Lee, Youn-Kyu Kim, Cheol-Hong Hwang *
Aerospace Convergence Technology Research Laboratory (ACTRL)
Korea Aerospace Research Institute (KARI),
*Dept. of Fire Protection and Disaster Prevention, Deajeon University

요 약

최근 국제우주정거장에서 화재안전에 관한 중요성의 인식으로 화재의 감지/소화의 메커니즘을 구체적으로 이해하기 위한 다양한 연구들이 시도되고 있다. 본 연구에서는 국제우주정거장에서 각종 실험과 연구를 진행하는 가압모듈을 대상으로 환기, 연기거동 및 감지에 관한 수치모델링을 수행하였다. 수치모델링은 NIST에서 개발된 FDS (Fire Dynamic Simulator)가 사용되었다. 국제우주정거장 내부는 마이크로중력환경으로 부력이 존재하지 않아 화재 발생 시 화염 및 연기거동은 지상에서의 현상들과 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 현재 가압모듈에서 적용되고 있는 환기조건의 변화에 따른 연기거동 및 감지특성에 대한 연구는 향후 국내의 국제 우주정거장 실험 참여를 위한 기초적인 정보를 제공할 것으로 기대된다.

1. 서 론

국제우주정거장(International Space Station, ISS)은 무게가 약 450톤, 크기가 108.5m × 88.4m × 43.6m, 부피는 1,200m³으로 지상 350~450km 상공에서 90분에 한번씩 지구를 선회하고 있다.¹⁾ 국제우주정거장 건설에 참여하고 있는 국가들은 완공 후 향후 10년 동안 특수한 환경(마이크로중력; Microgravity, μ G, 거의 무중력 근접한 상태)을 활용하여 지구 상에서는 수행하기 힘든 실험을 실시하는 궤도실험실로 활용할 예정이다. ISS에는 각종 실험과 연구를 진행할 수 있는 공간으로 총 6개의 가압모듈(Pressurized Module, PM)이 설치되어있다.¹⁾ PM은 절대진공인 우주환경으로부터 승선한 승무원을 보호하고 지상의 실험실과 동일한 기압, 온도, 습도, 산소농도 등을 유지할 수 있도록 설계되어 있으며 μ G를 활용하여 여러 가지 분야에서 실험이 이루어지고 있다. 특히 1997년 2월 러시아의 우주정거

장이던 미르(Mir)호에서 발생한 화재를 계기로 무중력 환경에서 발생한 화재에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 미르호에서 발생한 화재는 화학반응을 이용하여 산소를 발생시키는 산소발생장치의 균열로 인한 산소의 유출과 화학반응과정에서 발생한 높은 반응열이 서로 결합하여 발생된 것으로 보고되고 있다. 미르호에서 발생한 화재는 약 90초간 지속되었고 화재로 인해 발생된 연기(주로 soot)는 화재가 진압된 이후에도 5~7분가량 선실에 잔류했던 것으로 확인되었다. 이 사건을 계기로 무중력 환경에서 화재를 조기에 감지할 수 있는 기술의 필요성이 크게 부각되었다. 따라서 본 논문에서는 ISS의 미국모듈인, Destiny모듈의 형상을 모델링하고 중력장의 변화에 따른 연기거동 및 감지에 특성을 환기유동조건과 연계하여 수치모델링을 수행하였다.

2. 수치해석모델 및 결과

ISS PM에서 화재발생을 가정하여 연기거동 및 감지에 관한 수치모델링을 수행하기 위해 NIST에서 개발된 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 사용하였으며, 미국의 ISS PM인 Density 모듈 내부형상을 참고문헌^{2),3)}을 바탕으로 재구성하였다 (그림 1). Density 모듈 내부에는 공기의 정화 및 온습도 유지를 위해 Environmental Control and Life Support System (ECLSS)이 갖추어져 있다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 가압모듈의 오른쪽(그림에서는 보이지 않음)과 왼쪽 천장 측면에 설치된 6개의 Air diffuser를 통해 공기를 공급하고 바닥 오른쪽(그림에서는 보이지 않음)과 왼쪽 측면에 설치된 Return register를 통해 공기를 회수하여 온·습도 조정 및 정화과정을 거쳐 재순환 시키며 이 과정을 통해 부수적으로 모듈내 강제 환기유동을 발생시킨다. 또한 모듈의 양측 벽면(해치)에는 Inter-module Ventilation(IMV)포트가 설치되어 있어 모듈간의 환기를 도울 수 있도록 설계되어 있다. 수치모델링을 위해 기술된 Density 모듈내부의 작동환경을 고려하고 참고문헌^{2),3)}을 바탕으로 경계조건 설정하였으며 그 내용은 표 1에 요약되어있다.

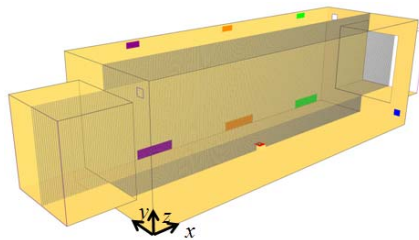


그림 1. Destiny모듈의 내부형상

표 1. Density모듈 작동환경 경계조건

명칭	수량	조건	유량 (m ³ /s)	명칭	수량	조건	유량 (m ³ /s)
Air diffuser (왼쪽천장)	3	Inlet	0.024	Return register (왼쪽 바닥)	3	Outlet	0.024
Air diffuser (오른쪽천장)	3	Inlet	0.024	Return register (왼쪽 바닥)	3	Outlet	0.024
Hatch	2	Pressure outlet	0.057	IMV diffuser (바닥면양쪽)	2	Inlet	0.057

그림 2는 Destiny 모듈내부의 환기과정을 통해 발생하는 공기의 순환모습을 표 1에 주어진 경계조건을 바탕으로 계산한 결과이다. 그림에서 보이는 바와 같이 유동 초기에는 Air diffuser에 주어진 속 벡터 크기에 의해 시계방향의 환기유동이 발생하고(그림 2.a) 시간이 지날수록 강한 IMV포트 유속으로 인해 모듈 내부에 전체적으로 빠르고 고른 환기가 이루어지게 된다. 일반적으로 PM내부에 유속이 존재하는 경우 화염은 (유속이 존재하지 않은 경우에 비해) 연료의 표면에 가까이 형성되기 때문에 연료로의 열전도를 증가시킬 수 있어 화염전파 및 화염온도를 상승시켜 더 많은 연기(soot)을 발생시킬 수 있다.

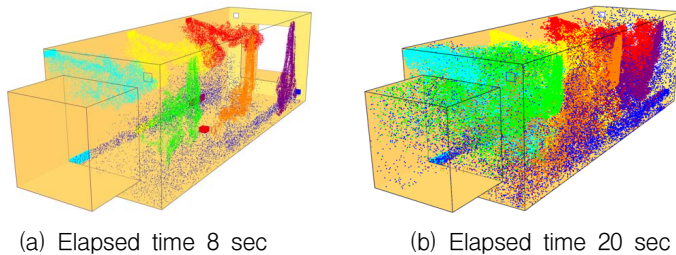


그림 2. Destiny모듈의 환기유동 계산결과

환기조건에 따른 연기거동 및 감지특성을 개략적으로 알아보기 위해 모듈 중앙부에 면적이 0.023 m^2 이고 57.6 kW/m^2 의 열유속을 방출하는 프로판 버너를 화원으로 설정하고 임의의 soot 발생률(8.47 mg/s)을 부여함으로써 화재시 발생하는 연기를 모델링하였다. 그림 3은 주어진 환기조건에서 중력의 유무만을 변화시켜 발생된 연기(soot)의 거동 특성을 도시한 결과이다. 중력장에서는 화염이 발달함에 따라 부수적으로 커지는 부력의 영향으로 인해 (모듈내의 존재하는 환기유동에도 불구하고) 발생된 연기의 상당수가 천정 방향으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 반면 무중력환경에서는 온도차에 의한 부력의 영향이 사라져서 발생된 연기의 상당수는 버너 주위 바닥면에 적체되어 있으며 이동특성은 강한 유속을 발생시키는 IMV포트에 큰 영향을 받는다.

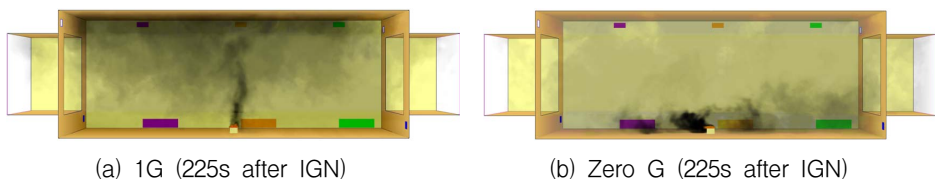


그림 3. 중력 조건에 따른 연기유동 특성

그림 4는 FDS의 화재검출기(Smoke detector) 기능을 활용하여 서로 다른 위치에 설치된 검출기의 최초 화재검출시간을 도시한 그래프이다. 화재검출모델로는 Cleary가 제시한 광전식 화재검출기 모델을 사용하였고 ISS의 환경을 고려하여 해당 변수를 조정하였다.²⁾ 화재검출기는 모듈의 Z-X 평면을 6등분하여 각각의 섹션에 12개의 검출기를 등분배 하였으며 그림 3의 연기유동패턴을 고려하여 중력장계산의 경우 천장에 설치하였고 무중력장

계산의 경우에는 바닥면에 설치하였다. 중력장에서는 환기유동의 유무와 관계없이 모듈 중앙부의 최초 화재검출시간은 비슷하였으나 환기유동이 존재하는 경우(그림 4b)에는 모듈의 양쪽면(해치쪽)의 화재검출시간이 오히려 길어지는 것 알 수 있다. 하지만 무중력장에서는 환기유동이 없는 경우 버너주변을 제외하고는 화재검출이 이루어지지 않았으나(그림 4에 도시되지 않음) 환기유동이 존재함으로써 화재검출능력이 전반적으로 향상됨을 알 수 있었다(그림 4c).

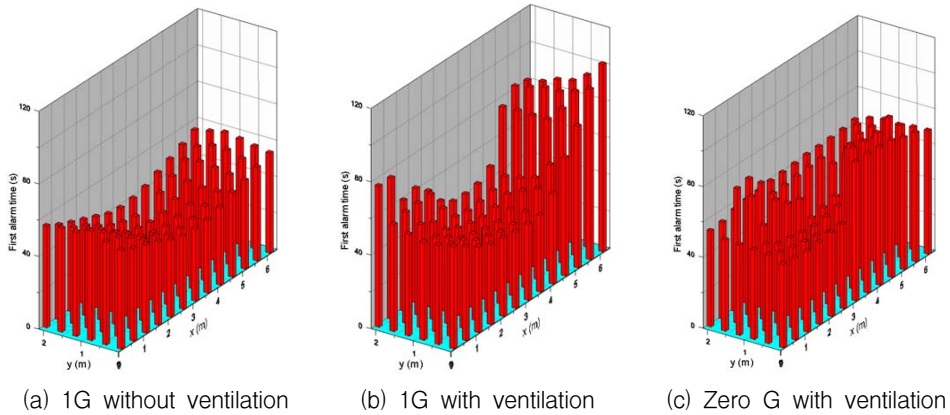


그림 4. 중력 및 무중력장에서 환기유동 조건에 따른 최초 화재검출시간

3. 맺음말

본 연구에서는 ISS의 미국모듈인 Destiny모듈을 대상으로 중력장의 변화에 따른 연기 거동 및 감지특성을 환기유동조건과 연계하여 수치모델링을 수행하였다. 무중력환경에서 발생하는 화재의 연기거동 특성은 부력이 사라짐으로써 중력환경에서와는 확연하게 다를 수 있었고, 무중력환경에서는 화재검출특성도 환기유동의 패턴에 의해 큰 영향을 받는다는 것을 개략적으로 알 수 있었다.

참고문헌

1. 이주희, 김연규, 최기혁 (2005), 유인 우주실험 기술동향, 항공우주산업기술동향 3권 2호 pp.79-91
2. Brooker, J.E., Urban, D.L., Ruff, G.A., ISS Destiny Laboratory Smoke Detection Model (2007), SAE paper 2007-01-3076,
3. NASA (1998), TM-98-206956, Living Together in Space: The Design and Operation of the Life Support Systems on the ISS.