

# 국제우주정거장 내부 화재시 연기거동 및 감지특성에 관한 수치 모델링

박설현 · 이주희 · 김연규 · 황철홍\*<sup>†</sup>

한국항공우주연구원 항공우주융합기술연구소 우주과학연구팀, \*대전대학교 소방방재학과

## A Numerical Modeling of Smoke Behavior and Detection for Fire Developed in International Space Station

Seul-Hyun Park · Joo-Hee Lee · Youn-Kyu Kim · Cheol-Hong Hwang\*<sup>†</sup>

Space Science Research Team, Aerospace Convergence Technology Research Laboratory (ACTRL), Korea Aerospace Research Institute (KARI)

\*Dept. of Fire Protection and Disaster Prevention, Deajeon University

(Received October 16, 2012; Reised November 19, 2012; Accepted December 7, 2012)

### 요 약

국제우주정거장에서 화재발생은 승선한 승무원들의 생명과 직접적으로 연관된 사안이므로 선실내부에서 언제든지 발생할 수도 있는 화재의 초기 감지 및 진화는 우주정거장의 운영에 있어서 중요한 기술 중 하나이다. 본 연구에서는 국제우주정거장에서 각종 실험과 연구를 진행하는 가압모듈을 대상으로 환기, 연기거동 및 감지에 관한 수치모델링을 수행하였다. 수치모델링은 NIST에서 개발된 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 사용하였으며, 부력이 작용하지 않는 국제우주정거장 내부의 무중력환경에서 발생한 화재의 연기거동패턴은 지상에서의 현상들과 큰 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 아울러 가압모듈에서 적용되고 있는 환기조건을 고려하여 수행된 연기거동 및 감지특성에 대한 수치 모델링 결과는 향후 무중력환경에 노출될 수 있는 우주선이나 대형우주구조물의 화재검출장비의 설계를 위한 기초적인 자료를 제공함은 물론 승선하게 될 우주인이나 승무원들의 훈련자료로도 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

### ABSTRACT

The onset of fire on the International Space Station (ISS) is a critical problem that can threaten the life of crew members onboard and thus instantaneous fire detection and extinguishment technology has been considered as one of the most important aspects in the ISS operation. In the present study, a numerical analysis was performed to better understanding of the characteristics of smoke behaviors and detection in a pressurized module of the ISS using the NIST Fire Dynamic Simulator (FDS). Numerical results indicate that the smoke flow patterns under zero-gravity condition are clearly different from those under normal gravity condition. In addition, the results obtained from numerical simulations coupled with the PM internal flows are expected to provide basic and useful information in designing the microgravity fire detection devices and establishing in fire response protocol for astronauts or the crew members.

**Keywords :** International Space Station (ISS); Microgravity Fire; Smoke detector; Fire Dynamic Simulator (FDS)

## 1. 서 론

국제우주정거장(International Space Station, ISS)은 무게가 약 450톤, 크기가 대략 108.5 m×88.4 m×43.6 m, 부피는 1,200 m<sup>3</sup> 가량으로 지상 350~450 km 상공에서 90분에 한번씩 지구를 선회하고 있다<sup>(1)</sup>. 지구 상공을 자유낙하 형식으로 선회하고 있는 ISS는 지구의 중력이 작용하지 않은 무중력과 비슷한 마이크로중력이라는 특수한 환경을 제공하고 있다<sup>(2)</sup>. ISS 건설에 참여하고 있는 국가들은 완

공 후 향후 10년 동안 이러한 특수한 환경을 활용하여 지구상에서는 수행하기 힘든 실험을 실시하는 궤도실험실로 활용할 예정이다. ISS에는 각종실험과 연구를 진행할 수 있는 공간으로 총 6개의 가압모듈(Pressurized Module, PM)이 설치되어있다<sup>(1)</sup>. 가압모듈은 절대 진공인 우주환경으로부터 승선한 승무원을 보호하고 지상의 실험실과 같이 동일한 기압, 온도, 습도, 산소농도 등을 유지할 수 있도록 설계되어 있으며, 각국의 가압모듈에서는 마이크로중력을 활용한 다양한 분야에서 실험이 이루어지고 있다. 특

<sup>†</sup>Corresponding Author, E-Mail: chehwang@dju.ac.kr  
TEL: +82-42-280-2529, FAX: +82-42-280-2596

ISSN: 1738-7167  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2012.26.6.051>

히 1997년 2월 러시아의 우주정거장이던 미르호에서 발생한 화재를 계기로 무중력환경에서 발생한 화염에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다<sup>(3,4)</sup>.

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 연기입자(주로 soot)는 화재가 진압된 이후에도 5~7분가량 선실에 잔류했던 것으로 확인되었다<sup>(5)</sup>. 이 사건을 계기로 무중력환경에서 화재를 조기에 감지할 수 있는 기술 및 무중력환경의 화재로부터 발생된 연기입자의 선실 내부 이동패턴에 대한 이해의 필요성이 크게 부각되었다. 미르호 화재사건 이후 미국 NASA 유럽연합 ESA와 일본 JAXA의 주도로 건설된 ISS는 운영 중 발생할 지도 모르는 화재에 신속하게 대응하기 위해 광전식(photoelectric) 연기감지기를 가압모듈 내부 및 각종 실험장치 랙을 구비하고 있다. 하지만 무중력환경에서 발생한 화재를 실험적으로 모사하여 연기감지기의 성능을 검증하기란 거의 불가능한 일이다. 따라서 본 논문에서는 ISS의 미국 NASA 가압모듈인, Destiny 모듈 내부 형상을 모델링하고 임의의 화염을 발생시켜 중력장 변화에 따른 연기입자 거동 및 감지에 특성을 수치해석을 통해 고찰해 보았다. 아울러 ISS 내부의 공기유동조건과 거의 동일한 조건을 수치모사 하여 화염을 통해 발생하는 연기입자의 이동 패턴을 살펴보고 이에 따른 연기감지기의 신호검출 특성을 조사해 보았다.

## 2. 수치해석모델

ISS 가압모듈에서 화재발생을 가정하고 연기거동 및 감지에 관한 수치 모사를 수행하기 위해 본 연구에서는 LES의 수행이 가능한 FDS(ver. 5.1.6, SVN 1710)가 사용되었다. LES에서 순간적인 유동변수는 GS(grid scale) 성분( $\tilde{f}$ )과 SGS(subgrid scale) 성분( $f''$ )으로 나뉘어진다. 이때 GS 성분은 Farve 여과( $\tilde{f}=\bar{\rho}f/\bar{\rho}$ )에 의해 결정되며, 'over-bar' 첨자는 공간여과(spatial filter)를 의미한다. 그 결과 낮은 마하수( $Ma < 0.3$ ) 접근법을 이용한 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같은 LES 방정식으로 표현된다<sup>(6)</sup>.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}) = -\nabla \bar{p} - \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}} + \boldsymbol{\tau}^{sgs}) + \bar{\rho} \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{Y}_i \bar{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D}_i \nabla \tilde{Y}_i + \mathbf{J}^{sgs}) + \bar{m}_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{h} \bar{\mathbf{u}}) = \frac{\tilde{D} p_o}{\tilde{D} t}$$

$$+ \nabla \cdot \left( \tilde{k} \nabla \tilde{T} + \sum_i \bar{\rho} \tilde{D}_i \tilde{h}_i \nabla \tilde{Y}_i + \mathbf{q}^{sgs} \right) - \nabla \cdot \bar{\mathbf{q}}_r \quad (4)$$

$$\bar{\rho} = p_o \bar{W} / R \tilde{T} \quad (5)$$

공간 여과과정에서 발생하는  $\boldsymbol{\tau}^{sgs}$ ,  $\mathbf{J}^{sgs}$ 와  $\mathbf{q}^{sgs}$ 는 SGS 성분 효과를 나타내는 응력텐서, 화학종 및 열 유속(flux)을 의미하며, 위 방정식들을 종결(closure)하기 위하여 추가적인 모델이 수행된다. SGS 항들의 모델링을 위해서는 SGS의 특성길이 및 시간규모의 정보가 요구된다. 이를 위해 길이 규모는 격자의 크기, 즉  $\bar{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ 으로 하였으며, 시간 규모는 SGS에서 에너지의 생성과 소멸사이에 평형상태가 존재하다는 가정을 이용하는 original Smagorinsky의 모델<sup>(7)</sup>에 의해 결정되었다. 이때 SGS의 에디 점성계수에 포함되는 상수  $C_s$ 는 0.2로 고정되었다. 지배방정식의 차분을 위하여 공간에 대해서는 유한체적법을 이용한 2차 정확도의 중심 차분법이 사용되었다. 시간적분에는 전체적으로 2차 정확도를 갖는 양해법(explicit) 예측-교정자법이 적용되었다. 또한 열유속( $\bar{\mathbf{q}}_r$ )은 복사열전달 방정식의 유한체적법<sup>(8)</sup>을 통해 고려되었다.

Figure 1은 ISS 선실내부의 화재 수치모사 모델링에 사용된 미국 NASA의 Destiny 모듈 외부 및 내부의 모습이다. Destiny 모듈은 각각 외부 길이가 8.8 m, 직경이 4.4 m이며 총질량이 26,771 kg이다<sup>(9)</sup>. 다른 가압모듈과 마찬가지로 Destiny 모듈 내부에도 공기의 정화 및 온습도 유지를 위해 Environmental Control and Life Support System (ECLSS)이 갖추어져 있다<sup>(10)</sup>. 오른쪽과 왼쪽 천장 측면에 설치된 6개의 디퓨저를 통해 신선한 공기를 공급하고 바닥 오른쪽과 왼쪽 측면에 설치된 회수부(return register)를 통해 공기를 회수하는 과정을 통해 온·습도 조정은 물론 공기를 정화시키며 재순환 과정을 통해 모듈 내 강제 환기 유속(~100 cm/s)을 발생시키는 것으로 알려져 있다<sup>(3,10)</sup>. 또한 모듈의 해치 하단부에는 Inter-module Ventilation (IMV) 디퓨저가 설치되어 있어 ISS 가압모듈간의 환기 정도를 도울 수 있도록 설계되어 있다.

Figure 2는 앞서 언급한 사항들을 고려하여 Destiny 모듈 내부를 FDS를 이용하여 모델링한 모습이다. 디퓨저, 회수부, 해치, IMV 디퓨저의 해당 유량은 작동환경을 고려하여 참고문헌<sup>(10,11)</sup>을 바탕으로 설정하였으며 자세한 내용은 Table 1에 정리되어 있다. 모듈 내부의 계산영역 크기는

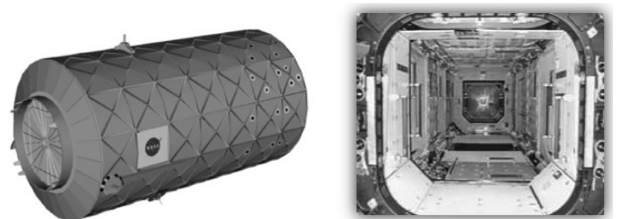
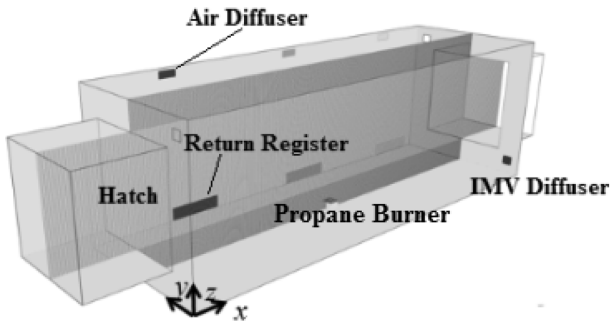


Figure 1. External (right) and internal (left) view of NASA Density Module of the ISS<sup>(9)</sup>.



**Figure 2.** FDS computational model for predicting smoke behavior in case of fire for NASA Density module of the ISS.

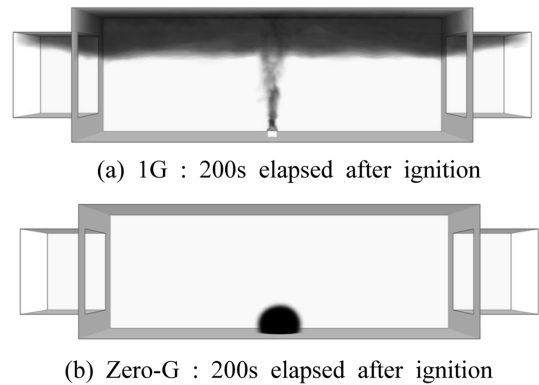
**Table 1.** Summary of Boundary Condition for Each Ventilation Type

Ventilation type (location)	Quantity	Boundary condition	
		Type (Area)	Flow rate (m <sup>3</sup> /s)
Air diffuser (Left upper side on x-z plane)	3	Inlet (0.024 m <sup>2</sup> )	0.024
Air diffuser (Right upper side on x-z plane)	3	Inlet (0.024 m <sup>2</sup> )	0.024
Hatch (Both side ends on y-z plane)	2	Pressure outlet (1.96 m <sup>2</sup> )	0.057
Return register (Left lower side on x-z plane)	3	Outlet (0.133 m <sup>2</sup> )	0.024
Return register (Left lower side on x-z plane)	3	Outlet (0.133 m <sup>2</sup> )	0.024
IMV diffuser (Both side ends below hatch)	2	Inlet (0.014 m <sup>2</sup> )	0.057

8.54 m×2.13 m×2.13 m(xyz)이며, 총 2,566,400개의 격자(최소격자크기: 0.9 cm, 최대격자크기: 2.5 cm)를 사용하여 계산하였다. 또한 모듈 중앙부에는 면적이 0.023 m<sup>2</sup>이고 57.6 kW/m<sup>2</sup>의 열유속을 방출하는 프로판 버너를 화원으로 설정하여 화재를 수치적으로 모사하였고 적절한 연기입자(soot) 발생률(8.47 mg/s) 값을 사용함으로써 모듈내의 순환 공기유동과 상호작용으로 나타나는 연기입자의 거동특성을 모델링하였다.

### 3. 수치해석결과 및 검토

Figure 3은 Destiny 모듈내부에 임의로 설정된 화원으로

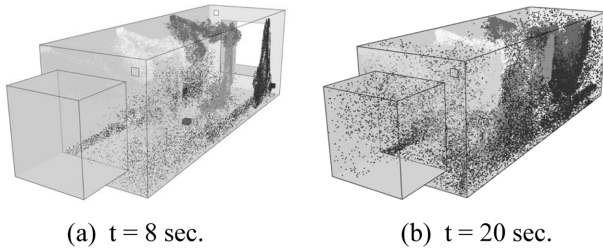


**Figure 3.** Flow pattern of smoke produced from the burner under 1G and zero-G conditions without forced ventilation flow.

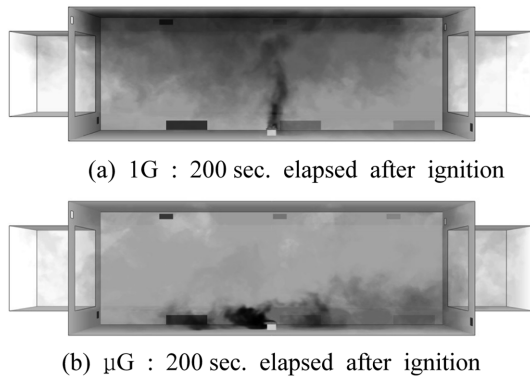
부터 시작된 화재에 의해 확산되는 연기입자의 유동방식을 중력장환경(1G) 및 무중력환경(zero-G)에서 각각 계산한 결과이다. 중력장환경에서는 지구상에서 관찰할 수 있는 일반 화재의 경우와 마찬가지로 발생한 연기는 화염의 온도차에 의해 발생된 부력으로 인해 형성된 유동을 따라 천정 쪽으로 이동하지만, 무중력환경에서는 부력에 의한 유동은 무시되고 상대적으로 지상에서는 무시할 만한 Stefan, diffusophoretic, thermophoretic flux에 의한 유동이 반경방향으로 두드러지게 나타남에 따라 연기가 반구형상으로 확산되는 것을 관찰할 수 있다. 결국 무중력환경에서는 부력에 의한 유동효과가 사라지고 수치해석결과에서 보여진바와 같이 연기입자는 지상에서와는 다른 형태로 이동하게 되므로 연기감지기의 위치도 지상에서와는 다르게 설정되어야 한다.

Figure 3b에서 볼 수 있는 바와 같이 무중력환경에서는 화원 주위의 반경방향으로 작은 유동만이 생성되고 이로 인해 화염에서 발생한 연기입자가 화원 근처에 적체되어 머무르게 된다. 따라서 연기입자의 여부로 화재 발생여부를 감지하는 연기감지기의 기능이 매우 제한적일 것이다. 이런 측면을 고려해 보면 온습도, CO 및 공기 정화를 위해 모듈 내부를 순환하는 공기유동은 화원부근에 적체되어 있는 연기입자를 이동시킬 수 있는 수단이 될 수 있으므로 승선에 있는 우주인이 육안으로 화재를 조기에 인지하거나 연기감지기를 통해 화재를 검출하는데 도움을 줄 것이다.

Figure 4는 Table 1에 제시되어있는 경계조건을 이용하여 모듈내부의 순환유동을 계산한 결과이다. 다만 실제 Destiny 모듈의 디퓨저와 회수부는 Figure 2에서 보이는 것과 달리 양측 벽면(x-z plane)과 45° 각도로 설치되어 있으나 FDS의 사각형 격자의 한계로 인해 Figure 2 상에는 양측벽면에 부착되어 있는 상태로 모델링이 이루어져 있다. 따라서 실제 Destiny 모듈 내부의 공기순환 유동과 유사한 패턴을 형성시키기 위해 수치 계산상에서는 백터성



**Figure 4.** Forced ventilation flow pattern in the Destiny module (t indicates the time elapsed after the numerical simulation begins).

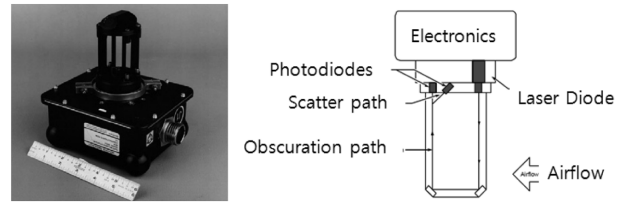


**Figure 5.** Flow pattern of smoke produced from the burner under 1G and μG conditions with forced ventilation flow.

분의 값으로 주어진 유량값을 경계조건으로 입력하였다.

Figure 4에서 보이는 바와 같이 유동 초기에는 디퓨저에 주어진 유량으로 인해 시계방향의 환기유동이 발생하고 (Figure 4a) 시간이 지날수록 강한 IMV포트 유속으로 인해 모듈 내부에 전체적으로 빠르고 고른 환기가 이루어지게 된다. Figure 5는 주어진 환기 조건을 고려하여 프로판 버너의 화염에서 생성된 연기입자의 거동특성을 도시한 결과이다.

중력장환경에서는 모듈내에 존재하는 환기유동에도 불구하고 화염이 발달함에 따라 부수적으로 커지는 부력의 영향으로 인해 발생한 연기입자의 상당수가 여전히 천정 방향으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 반면 무중력환경에서는 발생한 연기입자의 상당수는 여전히 버너 주위 바닥면에 적체되어 있지만 디퓨저에 비해 상대적으로 많은 유량을 공급하는 IMV포트에 의해 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 하지만 Figure 5에 도시된 결과는 FDS 모델의 한계로 인해 외부유동과 화염간의 상호작용을 고려하지 않고 일정한 연기입자 생성율을 적용하여 계산된 결과이므로 실제 현상과는 다를 수 있음을 감안하여야 한다. 특히 무중력환경에서는 화염의 발달에 따라 수반되는 유동의 영향을 받지 않기 때문에 화염 주위로 공급되는 공기는 연료층으로 산소공급 및 연료와 산소의 혼합을 원활히 하여 연소를 촉진 시킬 수 있다. 본 연구에서처럼 화원이 확산화염(diffusion flame)인 경우 화염면은 이론 당량비가 1인



**Figure 6.** Photograph and schematic diagram of the smoke detector installed onboard the Destiny module<sup>(12)</sup>.

지점 근처에서 형성됨을 감안해 볼 때 무중력환경에서 외부유동에 의해 연료주위에 산화제 양이 극부적으로 증가하게 되면(산화제 방향으로의) 연료화산량이 상대적으로 적어도 화염면 형성조건을 만족할 수 있으므로 화염면은 연료층에 더 가까이 형성될 수 있다. 연료층 가까이에 화염면이 형성되면 화염면에서 연료의 열전도가 증가하게 되고 이는 다시 soot 생성 메카니즘에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

앞서 언급한 것 같이 Destiny 모듈에는 화재 신호를 조기에 검출하고 화재 검출기의 작동으로 인한 전력소모를 최소화하기 위해 광전식 연기감지기가 설치되어 있다. Figure 6은 Destiny 모듈 내부에 설치된 연기감지기의 실제 모습을 담은 사진과 개략도이다. 광원(laser diode)에서 발생된 빛의 세기를 2개의 수광부(photodiode)를 이용하여 모니터링하고 연기입자에 의해 변화하는 빛의 세기를 검출하여 화재발생 신호를 주는 방식이다. 다만 먼지 등과 같은 다른 입자에 의해서 발생할 수 있는 오작동을 줄이기 위하여 수광부의 센서표면과 직각방향으로 들어오는 빛의 세기와 30° 각도로 산란되는 빛의 세기를 동시에 검출하여 상호간의 비를 이용하여 화재알람 신호를 송출하게 된다. Destiny 모듈에 설치되어 있는 광전식 연기감지기는 러시아측 가압모듈을 제외한 거의 모든 ISS 모듈에 장착되어 있으며 최소 0.3 μm 크기의 입자의 검출이 가능하며 1 μm 이상의 입자의 검출에 최적화되어 있는 것으로 보고되고 있다<sup>(12)</sup>.

화재로 발생한 연기입자 신호검출을 위해 FDS에서는 연기감지기 기능을 제공하며 실제 위에서 언급된 방법과 유사한 방식으로 알람신호를 생성시킨다. 계산된 유동장의 정보와 연기입자 생성율에 기반하여 각각의 계산 격자안 연기입자 질량분율(mass fraction, g/m<sup>3</sup>)을 예측하고, 사용자가 정의한 단위 연기입자 질량당 광소멸계수(Specific light extinction coefficient, k<sub>m</sub>, m<sup>2</sup>/g)와 연계하여 광투과율을 식(6)으로 계산하게 된다<sup>(13)</sup>.

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-k_m \rho Y_s L) \tag{6}$$

식(6)에서 I/I<sub>0</sub>는 광투과율을 의미하며 ρY<sub>s</sub>는 연기질량분율 L은 광원의 경로거리(path length)를 각각 의미한다. 식(6)의 광투과율은 실제로는 시간에 따라 변화하므로 식

(7)과 같이 단위길이당 광소멸퍼센트(percent obscuration per meter, %/m)를 시간의 함수로 표현할 수 있다<sup>(13,14)</sup>.

$$OPM = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100 = \{1 - \exp(-k_m \rho Y_s(t))\} \times 100 \quad (7)$$

본 연구에서는 연기감지기 내부의 OPM값이 3.28 %/m에 도달하였을 경우 FDS상에서 알람신호를 생성하도록 설정하였다. 식(7)에서 연기감지기의 반응시간과 상관관계가 있는  $\rho Y_s(t)$ 는 감지기 내부형상 및 유동에 의해 영향을 받게 되므로 본 연구에서는 Cleary가 제시한 경험식(식8)을 바탕으로(감지기의 형상이나 내부유동에 의해 발생할 수 있는) 반응지연을 고려하였다<sup>(13,14)</sup>.

$$t_e = \alpha_e U^{\beta_e}; t_c = \alpha_c U^{\beta_c}$$

$$\Delta t = t_e + t_c \quad (8)$$

식(8)에서  $t_e$ 는 연기입자의 감지기 유입시간,  $t_c$ 는 연기입자의 detector 내부 혼합시간,  $\Delta t$ 는 감지기의 반응지연시간을 의미하며,  $U$ 는 연기입자의 이동속도이다. 또한  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 연기입자의 유입 및 혼합을 고려하기 위해 경험적으로 결정되는 상수이다. 본 연구에서 고려된 연기감지기는 Figure 6에서 볼 수 있는 것처럼 지상에 설치된 것과는 달리 감지부의 대부분 개방되어 있기 때문에  $t_e$ 는 무시하였으며  $\alpha_e$ 와  $\beta_e$ 를 각각 0.5와 -0.1로 설정하여 계산하였다<sup>(11)</sup>. 식(7)과 (8)를 LES모델에 적용하기 위해서는 관련 지배 방정식의 수정이 필요하며 이에 관한 자세한 사항은 FDS 참고문헌<sup>(13,14)</sup>에 잘 정리되어 있다.

Figure 7은 FDS의 연기감지기 기능을 사용하여 ISS 내부에서 화재 발생시 최초 연기의 검출시간을 개략적으로 파악해 보기위하여 Destiny 모듈의 x-y 평면을 6등분하여 각각의 섹션에 2열씩 12개의 감지기를 등분배하여 설정한 모습이다. 다만 Figure 3과 5의 계산결과와의 연기 유동패턴을 고려하여 중력장계산의 경우 모든 감지기를 천장에 설치하였고 무중력계산의 경우에는 바닥면에 설치하였다.

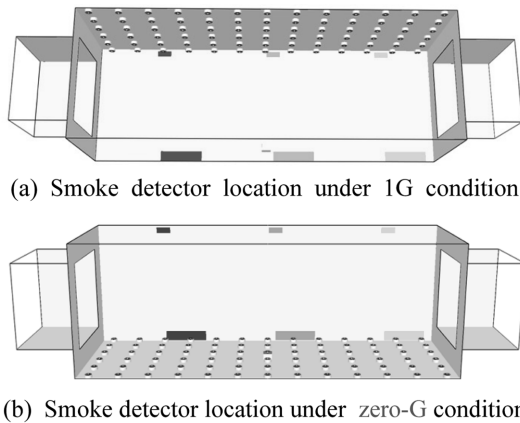


Figure 7. Illustration for the location of detector installed for smoke detect simulation.

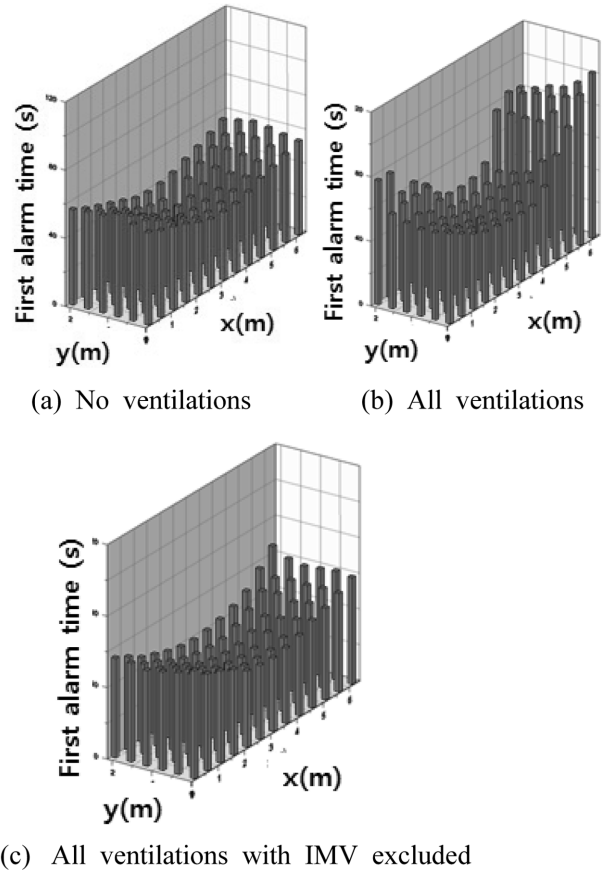
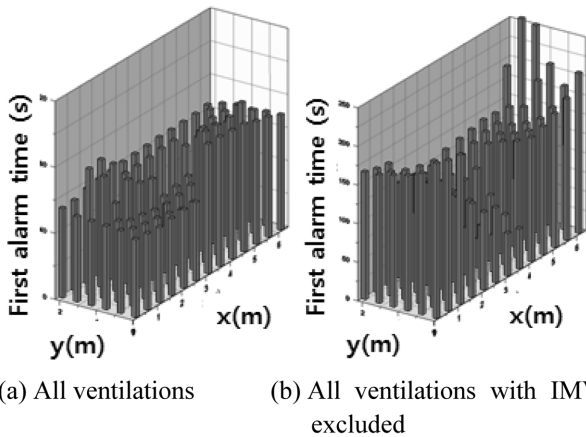


Figure 8. Calculated first alarm time of the smoke detector exposed to the fire under 1G condition.

중력장환경에서는 환기유동의 유무와 관계없이 모듈 중앙부의 연기검출시간은 60초 이내로 비슷하였다. 하지만 모든 환기유동이 함께 고려된 경우(Figure 8b)에는 모듈의 양쪽면(해치쪽)의 화재검출시간이 환기유동을 고려하지 않은 조건(Figure 8a)에 비해 오히려 길어지는 것 알 수 있다. 이는 상대적으로 강한 IMV 유동이 해치벽면에 부딪혀 벽면 반대쪽으로 부수적인 유동을 생성되기 때문이다. 하지만 IMV 유동만을 제외시켜 연기검출시간을 계산한 경우(Figure 8c)는 모듈 내부의 유동을 고려하지 않은 경우와 거의 유사한 검출패턴을 보이고 있다. 결국 중력장환경에서 발생한 화재의 경우 화염의 발달과 더불어 발생하는 부력에 의한 유동이 연기입자의 이동에 지배적인 영향이 미치게 되고 IMV 유동은 연기입자검출에 도움이 되지 않는 것을 알 수 있다.

Figure 9는 무중력환경에서 연기의 검출시간을 계산한 결과를 도시한 그래프이다. 무중력환경에서는 Figure 3b의 결과로부터 쉽게 유추할 수 있는 것처럼 환기유동이 없는 경우 버너주변을 제외하고는 연기검출이 이루어지지 않았다. 하지만 환기유동이 존재함으로써 연기 검출능력이 전반적으로 향상되었다. 다만 Figure 9b에서 볼 수 있는 것처럼 무중력환경에서는 중력장환경에서와는 달리 환기유동시



**Figure 9.** Calculated first alarm time of the smoke detector exposed to the fire under zero-G condition.

IMV 유동을 고려하지 않으면 연기검출 성능이 급격히 저하됨을 알 수 있다. 무중력환경에서 IMV 유동이 존재하는 경우 대다수의 detector는 60초 내외로 알람신호를 주는 반면 IMV 유동이 없는 경우는 연기의 검출시간이 상당수 detector에서 120초 이상으로 늘어나게 되고 위치에 따라 최대 250초를 상회하는 것으로 나타났다. 이는 화염의 발달에 따라 부수적으로 부력이 발생하는 중력장환경과는 달리 부력이 존재하지 않은 무중력환경에서는 시계방향으로 순환하는 유동에 비해 바닥면 가까이에서 상대적으로 강하게 작용하는 IMV 유동을 따라 다수의 연기입자가 detector 쪽으로 운동하기 때문으로 판단된다.

#### 4. 맺음말

본 연구에서는 ISS의 미국 가압모듈인 Destiny 모듈을 대상으로 중력장의 변화에 따른 연기거동 및 감지특성을 환기유동조건과 연계하여 수치모델링을 수행하였다. 무중력환경에서 발생하는 화재의 연기거동 특성은 부력이 사라짐으로써 중력장환경과는 확연하게 다를 수 있었고, 이에 따라 연기검출기의 위치도 지상과는 달리 바닥면 쪽에 설치되어야 효율적으로 작동할 수 있음을 유추해 볼 수 있었다. 중력장환경에서 모듈내부의 순환유동은 연기검출시간에 큰 영향을 주지 않았고 오히려 주어진 IMV 유동은 해치 양벽면 근처에서 연기신호 검출 지연을 유발하였다. 반면 무중력환경에서는 연기신호 검출에 있어서 환기유동이 중요한 역할을 하게 되며 특히 시계방향의 환기유동보다 상대적으로 강한 IMV 유동이 전체적인 연기검출시간 단축에 중요한 요소임을 알 수 있었다. 실제 무중력환경에서 연기감지기의 위치 선정 및 연기검출시간은 화원의 위치, 크기, 내부 유동 등에 의해서 달라질 수 있기 때문에 보다 이러한 요소들을 고려한 계산이 필요하지만 본 연구를 통해 제시된 결과들은 무중력환경에 노출될 수 있는 우주선이나 대형우주구조물의 화재검출장비의 설계

에 있어 기초적인 자료의 제공은 물론 승선하게될 우주인이나 승무원들의 훈련자료로 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. J. H. Lee and K. H. Choi, "Space Laboratory-Pressurized Modules of the International Space Station", *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 1, No. 1, pp. 109-116 (2003).
2. J. H. Lee, Y. K. Kim and K. H. Choi, "Overview of Manned Space Experiment", *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 3, No. 2, pp. 79-71 (2005).
3. P. D. Ronney, "Understanding Combustion Process through Microgravity Research", *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 27, pp. 2455-2506 (1998).
4. R. Friedman, "Fire Safety in Spacecraft", *Fire and Materials*, Vol. 20, pp. 235-243 (1996).
5. <http://spaceflight.nasa.gov/history/shuttle-mir/history/h-f-linenger-fire.htm>
6. S. Y. Mun and C. H. Hwang, "Performance Evaluation of FDS for Predicting the Unsteady Fire Characteristics in a Semi-Closed ISO 9705 Room", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 21-28 (2012).
7. J. Smagorinsky, "General Circulation Experiments with the Primitive Equations", *Monthly Weather Rev.*, Vol. 91, No. 3, pp. 99-164 (1963).
8. G. D. Raithby and E. H. Chui, "A Finite-Volume Method for Predicting Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 112, No. 2, pp. 415-423 (1990).
9. ISS User's Guide Release 2.0.
10. NASA, "Living Together in Space: The Design and Operation of the Life Support Systems on the ISS", TM-98-206956 (1998).
11. J. E. Brooker, D. L. Urban and G. A. Ruff, "ISS Destiny Laboratory Smoke Detection Model", SAE paper 2007-01-3076 (2007).
12. D. L. Urban, G. A. Ruff, T. Cleary, J. Yang, G. Molholland and Z. Yuan, "Detection of Smoke from Microgravity Fire", SAE paper 2005-01-2930 (2005).
13. K. McGrattan, H. Baum, R. Rehm, W. Mell, R. McDermott, S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator (version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model", NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards Technology (2010)
14. K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator (version 5) User's Guide", NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standards Technology (2010)