

선박 거주구역 화재시뮬레이션을 위한 격자크기와 생성방법에 관한 연구

김별* · 황광일**†

* 한국해양대학교 대학원, ** 한국해양대학교 기계공학부

A Study on Grid Size and Generation Method for Fire Simulations for Ship Accommodation Areas

Byeol Kim* · Kwang-Il Hwang**†

* Graduate school of Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

** Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 선박 거주구역에 화재발생 시 화재시뮬레이션 도구를 이용하여 화재확산행상을 실시간으로 예측하고 상황에 따른 적절한 대응방안을 제시할 수 있다면 화재사고로 인한 인명피해를 최소화시킬 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 오늘날 화재시뮬레이션은 해석대상공간의 크기와 그리드 개수에 따라 해석을 하는데 있어, 매우 장시간을 필요로 하는 현실적 한계가 있다. 이에 이 연구에서는 화재시뮬레이션 시간단축을 목적으로 선박 거주구역 화재시뮬레이션에 적용할 수 있는 격자크기와 생성방법에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과 선박 거주구역에 적용되는 격자크기는 0.25[m] 이내의 값을 사용하는 것이 가장 효율적인 것으로 판단되었다. 또한 single mesh 격자생성방법으로 수행했을 경우와 비교하여, multi mesh 격자생성방법으로 시뮬레이션을 수행하였을 때 가시거리 값은 4.3%, 온도 값은 8.3% 이내에서 유사하고 해석시간은 약 80% 감소하였기 때문에, multi mesh 방법으로 격자를 생성하는 것이 해석시간을 단축하는데 있어 매우 효과적임을 확인하였다.

핵심용어 : 선박화재, 화재시뮬레이션, FDS, 격자크기, 격자생성방법

Abstract : For fires in ship accommodation areas, if it is possible to predict the pattern in which fire will spread and suggest proper counter-measures according to a situation using a fire simulation tool, fire damage may be reduced. However, fire simulations have a practical limit: a significant amount of time is required to analyze the results due to the size of the computational domain and the number of grids. Therefore, in this study, applicable grid size for fire simulations to predict fire patterns in ship accommodation areas was analyzed, and a generation method was conducted to predict fire behavior in real time. As a result, a value within 0.25[m] was judged appropriate as an applicable grid size for ship accommodation areas. Also, in comparison with studies using a single mesh generation method, the visibility value was similar, within 4.3%, as was the temperature value, within 8.3%, when a multi mesh generation method was used, showing a decline of 80% in analysis time. Therefore, it was confirmed that composing a grid using multi mesh was effective for reducing analysis time.

Key Words : Ship fire, Fire simulation, Fire Dynamic Simulator(FDS), Grid size, Grid generation method

1. 서 론

1.1 연구배경

중앙해양안전심판원의 해양사고통계연보(KMST, 2016)와 소방청의 화재장소에 대한 재산피해현황 통계자료(NFA,

2016)에 따르면, 2015년 선박에서 발생한 화재와 폭발사고는 100건으로 2011년 대비 16건 증가하였고, 재산피해 또한 110억 원으로 2011년 10억 원 대비 10배 가까이 증가하였다. 그리고 지난 5년간 선박에서 화재와 폭발사고를 통한 인명피해는 158명으로 총돌 642명, 전복 412명 다음으로 높았다. 통계자료를 통해 볼 수 있듯이, 화재를 비롯하여 선박에서 해양사고가 발생하면 인명피해뿐만 아니라 막대한 재산피해

* First Author : pooh4762@gmail.com, 051-410-5030

† Corresponding Author : hwangki@kmou.ac.kr, 051-410-4368

도 발생한다.

이러한 이유로 최근 해양수산부에서는 연안여객선을 대상으로 해양사고를 예방하고 사고 피해를 저감하고자 2020년부터 우리나라 해상 환경에 특화된 한국형 e-Navigation 서비스를 도입하여 사업을 진행하고 있다. 한국형 e-Navigation에서 제공하는 핵심서비스 중 “선내시스템 원격 모니터링 서비스”에서는 선내 화재, 내항성, 항행안전과 관련된 센서 정보를 실시간으로 모니터링 하여 위험레벨에 따른 대응가이드를 제공하고 사고확산을 방지할 수 있도록 한다(SMART-Navigation, 2017). 화재사고 발생 시 실시간으로 센서정보 모니터링과 더불어 화재가 발생했을 경우의 연기거동이나 화재성상을 실시간으로 예측, 분석할 수 있다면 연기확산이 진행되지 못하도록 방화문을 닫거나 선내 재실자 피난유도 등과 같은 적절한 대처방안을 제시할 수 있어 보다 효과적으로 화재와 폭발사고로 인한 피해를 저감할 수 있을 것으로 예상된다.

화재예측 방법에는 실제 화재실험을 통한 방법, 수치해석 도구를 활용한 방법 등이 있다. 실제화재실험은 가장 확실한 방법이지만 선박에서 다양한 시나리오(화재발생장소, 화재크기 등)를 적용하여 실험을 하기에는 시간적, 경제적으로 한계점이 있다. 그리고 수치해석도구를 활용한 경우, 설계자의 주관에 따라 해석대상이 같더라도 결과 값이 달라질 수 있는 단점이 있지만 다양한 케이스를 적용할 수 있고, 경제적, 시간적으로도 실험에 비해 비용이 절감되는 장점을 가진다. 따라서 화재가 발생한 경우의 위험성을 분석하기 위해, 선박뿐만 아니라 육상 건축물에서 화재시물레이션을 활용한 연구가 많이 진행되고 있다.

그러나 화재시물레이션과 관련된 Jang et al.(2008)의 연구에서는 215×18.8×6.3[m³] 크기의 공간에 격자크기가 0.2×0.2×0.2[m³]이고 총 3,233,600개의 격자수를 가질 때 화재시간 50초 해석을 하는 데 10시간 33분 27초가 소요되었고, Petterson(2002)의 연구의 경우 해석공간의 크기가 2.4×7.2×2.4[m³], 해석격자의 크기가 0.1×0.1×0.1[m³]이고 총 41,472개의 격자수를 가질 때 화재시간 3,600초 해석을 하는 데 52시간이 소요되는 등 실시간으로 화재현상을 예측하기는 어려울 것으로 분석하였다. 이렇듯 실시간으로 화재성상을 예측하여 대응하기 위해서는 화재시물레이션의 해석시간을 줄이는 방법에 대한 연구가 필요한 실정이다.

1.2 기존연구고찰

국내외에서 화재예측을 위한 수치해석 도구로 가장 많이 활용되고 있는 도구는 실제 실험 결과 값과 비교하였을 때 5% 이내의 적은 오차율로 높은 신뢰성을 가지는 FDS(Fire

Dynamic Simulator)이다(Wahlqvist and Hees, 2013; Hu et al., 2007). FDS의 경우 격자크기, 열방출율, 연소 특성과 같은 주요 입력변수 중 격자크기가 제일 중요하다. 이 때문에 FDS User guide에서는 아래 식(1)을 이용하여 D^* 즉 화원의 특성 직경을 구하고 $D^*/\delta_{x,y,z}$ 가 4에서 16 사이의 값이 되도록 하여 격자크기를 선정하도록 권장하고 있고 x, y, z방향 격자크기 중 가장 작은 격자크기와 가장 큰 격자크기의 비인 aspect ratio가 2~3 이내로 하도록 제시되어 있다(McGrattan et al., 2014a). 또한 화재시물레이션 시 적정격자크기를 위한 연구가 선행되어 왔다.

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (1)$$

기존에 선행되었던 연구를 살펴보면, Park(2012)의 연구에서는 FDS(Fire Dynamic Simulator)의 적정격자 크기를 선정하기 위하여 20×10×3[m³] 크기의 공간과 44×48×10[m³] 크기의 클린룸을 화재시물레이션 대상공간으로 설정하여 z방향 격자크기를 0.2[m]로 고정하고 x, y방향의 격자크기를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0[m]로 두어 온도와 가시거리 값을 비교한 시물레이션 결과 x, y방향의 적정 격자크기는 0.5[m] 이내로 할 것을 제안하였다. 또한 Kim and Park(2015)은 Park(2012)의 후속연구로 10×10×3[m³]와 20×20×3[m³] 크기의 공간에 1[MW]와 2[MW] 크기의 화재가 발생하였을 경우 종횡비(x, y방향 격자크기/z 방향 격자크기) 1, 2, 3, 4, 5, 6에 대한 열방출율, 온도, 가시거리 그리고 질량유량의합을 비교하여 높은 정확도가 요구되는 구획화재 시물레이션에서는 수직방향 격자크기 0.1~0.2[m] 이하와 종횡비 2 이하의 격자크기를 사용하도록 결론을 도출하였다.

그러나 육상건축물의 구조적 특성과 달리 선박의 경우 복도의 길이가 길고 천장의 높이가 낮아 수평적으로 연기가 확산되는 구조적 특징을 갖지만 선행 연구 중 선박에 적용할 수 있는 격자크기와 관련된 연구는 찾아볼 수 없다. 그리고 실시간으로 화재성상을 예측하여 대응하기 위해서는 시물레이션 결과값의 정확도를 유지하면서 화재해석시간을 줄이는 격자생성방법에 대한 연구 또한 필요하지만 기존에 선행된 연구에서는 찾을 수 없는 실정이다.

1.3 연구목적과 범위

이에 이 연구에서는 A대학교의 운항실습선을 연구대상으로 선박 거주구역에 맞는 적정 격자크기를 선정하고 해석시간 단축을 위한 격자생성방법을 제시하는 것을 연구목적으로 한다.

선박의 경우 선박마다 구조가 다르고 구역 또한 기관구역, 업무구역, 화물구역 등과 같이 다양하다(Kim and Hwang, 2016). 하지만 재실자들이 주로 거주하고 있는 거주구역의 경우 다른 구역들과 달리 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 복도와 선실로 구성되어 있는 것이 일반적이기 때문에 해석시간단축을 위한 해석영역을 거주구역으로 한정하였다.



Fig. 1. Deck plan of (A) and (B).^{1), 2)}

2. 연구의 범위와 방법

2.1 해석대상선박

이 연구의 수치해석 대상은 해기사 양성을 목적으로 2005년 12월에 건조된 운항실습선으로 Fig. 2와 Table 1에 외관모습과 제원을 나타내었다.

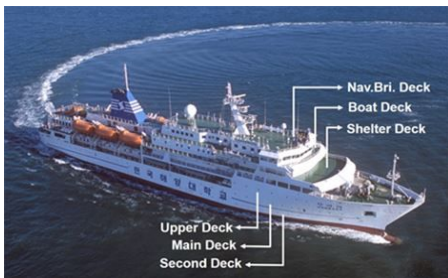


Fig. 2. External appearance of the training ship.

Table 1. Overview of the training ship

Length	117.20 m	Width	17.80 m
Gross Ton	6,686 GT	DLWL	5.9 m
People	Total 246 (Crew 42, Trainee 204)		
Speed	Max.19, Av. 17.5 kts		

1), 2) Captured from <http://www.panstar.co.kr/service/room.php> and <http://www.jejube.com/sub.php?PID=0701&page=4&category=&searchText=&searchType=all&action=Read&idx=10>(accessed October 8, 2017).

2.2 해석방법

이 연구에서는 선박 화재시뮬레이션 시 시간단축을 위한 격자생성방법에 관한 연구를 수행하고자 수치해석 코드로 미국 국립표준연구소(NIST, National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 FDS(Fire Dynamic Simulator, Ver. 6.5.3)를 사용하였고, 전처리 단계에서는 Pyrosim 2014를 이용하였다. FDS는 화원으로부터 발생하는 연기와 열의 유동에 대하여 Navier-Stokes Equation을 기초하여 계산하고, 적용되는 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 이산화탄소방정식이 있으며 연소반응식은 다음과 같다.

1) Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = m_b'''' \quad (2)$$

2) Momentum equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (3)$$

3) Energy equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}'' - \dot{q}_b'' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \epsilon \quad (4)$$

4) Ideal gas equation

$$p = \frac{\rho RT}{W} \quad (5)$$

5) Combustion reaction

$$v_F Fuel + v_O \rightarrow \sum_i v_{p,i} Products \quad (6)$$

FDS에서 적용되는 난류유동 해석모델의 경우 DNS(Direct Numerical Simulation)와 LES(Large Eddy Simulation) 중 선택하여 해석을 진행할 수 있다. DNS기법의 경우, 화재 시 부력으로 인해 발생하는 난류유동을 정확하게 해석할 수 있는 기법이지만, 격자크기가 1 mm 또는 그 이하일 때 적용할 수 있어 작은 층류 화염 등에 국한되어 사용하고 있으며 선박화재와 같이 대규모 화재시뮬레이션에는 비용과 시간적인 측면에서 적합하지 않다. 이러한 이유로 이 연구에서는 격자크기와 해석시간 등을 고려하고, 화재로 인한 화염과 연기 확산 해석에 적합한 LES기법을 적용하여 해석하였다(McGrattan et al., 2014b).

2.3 해석환경

이 연구에서는 해석시간단축을 위하여 CPU가 20개이고 RAM 용량이 128GB인 고성능 워크스테이션을 사용하여 계산하였으며 하드웨어와 소프트웨어의 상세사항은 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Table 2. Computing environment

Classification	Criteria
Processors	Intel Xeon E5-2650v3 2.3 2133 10C 1st and 2nd CPU
Memory	128 GB (16 GB×8)
Operating system	Windows 7 Professional (64 Bit)
Simulation software	FDS (Fire Dynamic Simulator) 6.5.3

2.4 화재위험성 평가기준

운항실습선의 화재위험평가를 위하여, IMO(International Maritime Organization)의 지침인 MSC.1/Circ.1552, ‘Amendments to the Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety’에서 제시하고 있는 가시거리, 온도 값을 기준값으로 하였고, 각 상세사항은 Table 3에 요약하여 나타내었다(IMO, 2016).

Table 3. Life safety performance criteria

Classification	Criteria
Minimum visibility	10 m; 5 m in spaces ≤100 m ²
Maximum air temperature	60°C
Maximum radiant heat flux	2.5 kW/m ²
Maximum CO Concentration	1200 ppm (instantaneous exposure)
	500 ppm (for 20 min cumulative exposure times)

2.5 해석조건

수치해석 공간과 조건은 Fig. 3과 Table 4에 나타내었으며, 아래에 요약하여 설명하였다.

첫째, 운항실습선의 총 6개의 데크 중 거주구역이 가장 많이 밀집되어 있는 Main deck를 수치해석 대상으로 설정하여 모델링 하였다. Main deck의 복도의 길이는 64.5[m]이고, 폭은 17.8[m]이며 천장의 높이는 2[m]이다. 그리고 환기부족 화재로 인하여 정확성의 문제가 생기지 않도록(Park, 2016) Main deck의 계단이 위치하는 곳에 각각 개방된 공간을 두었다. 개방된 공간의 크기는 합은 44[m²]이다.

둘째, 화재발생위치는 Main deck의 승무원실이고, 피난활동이 가장 어려운 취침시간에 화재가 발생한 것으로 가정하여, 계단을 제외한 모든 선실 문은 모두 닫혀있는 것으로 설정하였다.

셋째, 화원의 크기는 가로, 세로 모두 1[m]로 설정하고, 화원의 규모는 Ultra-fast 화재성장곡선에 따라 열방출율은 1[MW]의 Propane이 연소하는 것으로 가정하였고 계산시간은 300초로 설정하였다.

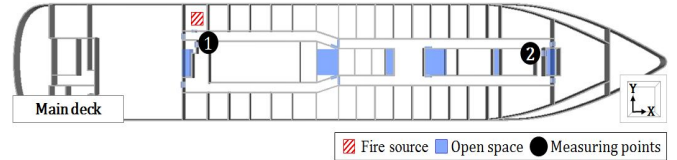


Fig. 3. Computational domain and measuring point.

Table 4. Input variables for numerical analysis

Classification	Input variables
Total opening area [m ²]	44
Heat release rate [MW]	1
Fire area [m ²]	1×1
Reaction	Propane
Time slot	Midnight
Simulation time [s]	0~300

3. 적정 격자크기 선정을 위한 수치해석

3.1 선박 거주구역의 격자크기에 따른 시나리오

선박 거주구역의 적정 격자크기를 선정하기 위해서, 격자 방식은 Fig. 4와 같이 바닥면적 70×20[m²], 높이 4[m] 크기에 격자생성방식은 single mesh로 적용하였다. 여기서, single mesh는 하나의 수치해석대상에 공간을 구획하지 않고, 동일한 크기의 격자로 구성된 것을 의미한다. 그리고 시뮬레이션을 수행하기에 앞서, 선행연구를 참고하여 화원의 무차원 특성직경에 대한 미소격자 길이가 4에서 16 사이 값이 되도록 격자크기의 범위를 설정하였다. 열방출율이 1[MW]일 때, 적정 격자크기를 계산하면 $0.150[m] \leq \delta_{x,y,z} \leq 0.602[m]$ 로 산출되었다. 이에 따라 x, y, z방향의 격자크기는 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5[m]로 동일한 값을 적용한 정방형 격자로, 격자크기에 따라 시나리오를 구성하였다. 이때 종횡비 또한 x, y, z 방향의 격자크기가 동일하기 때문에 FDS User guide에서 제시하고 있는 2~3 이내 값에 만족한다. Table 5에 격자크기에 따른 시나리오와 전체격자 수를 나타내었다.

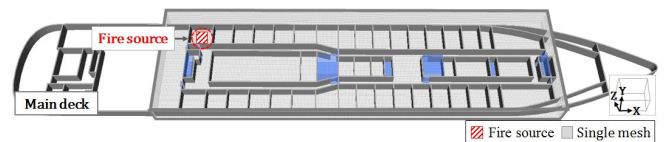


Fig. 4. Mesh geometry of Main deck (single mesh).

Table 5. Setting scenario by grid size (single mesh)

Scenario	Grid size ($\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$, m ³)	Total number of grid	Grid resolution (D^*/Δ)
single_0.15	0.15×0.15×0.15	1,749,600	16
single_0.2	0.2×0.2×0.2	700,000	12
single_0.25	0.25×0.25×0.25	358,400	10
single_0.3	0.3×0.3×0.3	151,200	8
single_0.4	0.4×0.4×0.4	87,500	6
single_0.5	0.5×0.5×0.5	44,800	5

3.2 적정 격자크기 선정을 위한 수치해석 결과

선행연구에서 제시하고 있는 격자크기의 범위를 선박에도 적용할 수 있는지를 검토하기 위하여, 앞서 언급한 시나리오에 따라 수치해석을 수행하였다. 격자독립성을 평가하기 위하여 격자해상도에 따른 화재발생 시의 최대발열량을 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 격자해상도는 화원의 특성직경 (D^*)에 대한 미소격자의 길이이다. 그리고 추가적으로 Fig. 3에 표시한 화원과 가장 가까운 피난계단의 입구인 ①번 위치와 가장 멀리 위치하고 있는 피난계단 입구인 ②번 위치에서의 가시거리, 온도 값을 아래에 정리하여 나타내었다.

3.2.1 격자독립성

Fig. 5에 격자해상도에 따른 화재발생 시의 최대발열량을 나타내었다. 격자해상도가 8 이하 일 때($D^*/\Delta=5, 6, 8$), 16일 때와 비교하여 13.6%, 22%, 5.7% 낮게 예측되고, 격자해상도가 12, 10일 경우 각각 0.3%, 2.2% 차이가 발생하였다. 최대발열량 값을 통해 볼 때, 격자해상도가 10 이상 일 경우 화원으로부터 화염전파 시, 열방출을 값의 영향으로 인해 상대적으로 온도가 높게 예측될 것으로 분석되었다.

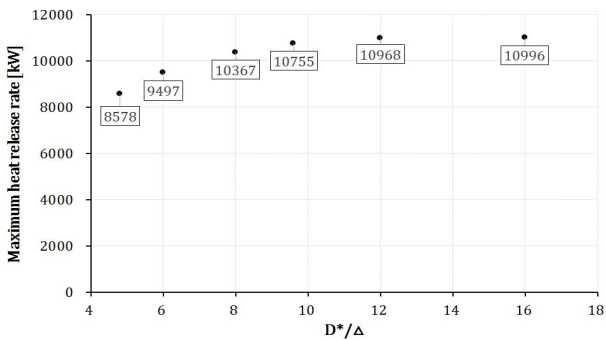


Fig. 5. Maximum heat release rate at the different grid resolution.

3.2.2 가시거리

Fig. 6과 Fig. 7은 ①번 ②번 위치에서의 가시거리 값이다.

①번 위치의 경우 화원과 가장 근접한 계단의 입구로, Fig. 5 그래프에서도 볼 수 있듯이 격자크기와 상관없이 화재발생 후 화재위험성 평가기준인 10[m]에 도달하는 시간의 경우 격자크기가 0.15[m]인 경우 28초, 0.2[m]인 경우 27초, 0.25[m]인 경우 24초, 0.3[m]인 경우 23초, 0.4[m]인 경우 26초, 0.5[m]인 경우 27초로 최소 도달시간과 최대 도달시간의 차이가 약 16.6%인 것을 확인할 수 있었다.

하지만 화원이 있는 곳에서 약 60[m] 떨어진 ②번 위치 피난계단에서의 가시거리 값을 확인하면 Fig. 7 그래프에서도 볼 수 있듯이 시나리오 single_0.15, single_0.2 그리고 single_0.25인 경우 가시거리변화가 큰 차이가 없고, 유효피난시간 또한 92초, 94초, 101초로 도달하는 시간의 차이 또한 10% 이내로 유사하다고 볼 수 있다. 그러나 시나리오 single_0.3와 single_0.4의 경우 ②번 위치까지 연기가 확산되었다고 볼 수 없으며 시나리오 single_0.5의 경우도 연기가 확산되어 가시거리가 저하되지만 130초에 도달하여 single_0.15와 비교 했을 때 도달하는 시간의 경우 약 41% 정도 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 앞서 격자독립성에서 볼 수 있듯이, 격자해상도가 5~8일 경우 화재발달을 예측하는데 격자의 독립성을 확보하지 못한 결과로 볼 수 있다.

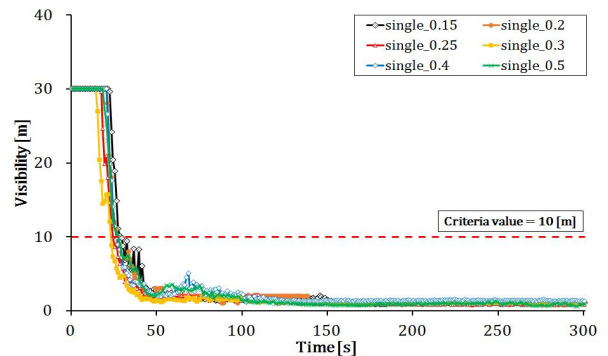


Fig. 6. Visibility value at the point ①.

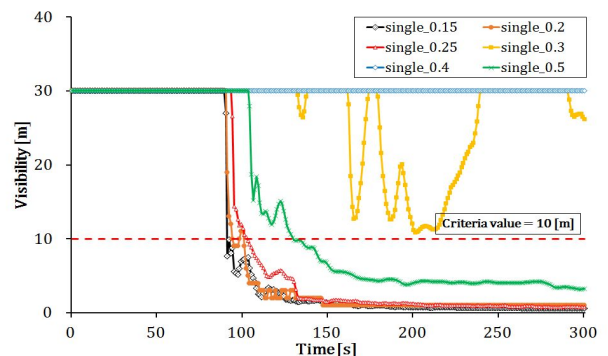


Fig. 7. Visibility value at the point ②.

3.2.3 온도

Fig. 8은 ①번 위치에서의 온도 값으로 발화 후 100초까지는 격자크기와 상관없이 비슷한 경향으로 온도가 상승하다가 100초 이후 격자크기가 커짐에 따라 화재모델의 정확성이 떨어져 시나리오 single_0.15, single_0.2 그리고 single_0.25와 비교했을 때 시나리오 single_0.3, single_0.4 그리고 single_0.5의 온도가 낮게 예측됨을 확인할 수 있다.

그리고 ②번 위치에서의 온도 값인 Fig. 9 또한 ②번 위치에서의 온도 값과 마찬가지로 발화 후 150초가 지난 뒤 x, y, z방향의 격자크기가 0.15[m], 0.2[m], 0.25[m]인 시나리오 single_0.15, single_0.2 그리고 single_0.25에 대하여 x, y, z방향의 격자크기가 0.3[m], 0.4[m], 0.5[m]인 경우 온도 값이 약 66% 낮게 예측됨을 볼 수 있다.

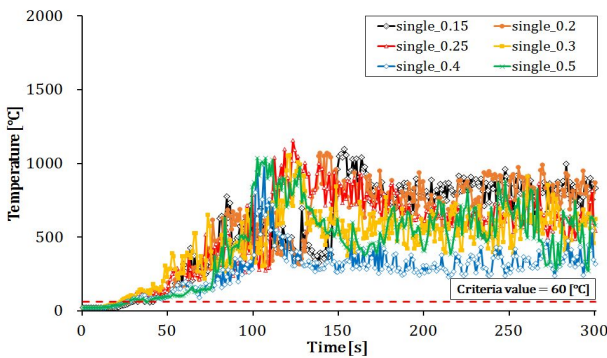


Fig. 8. Temperature value at the point ①.

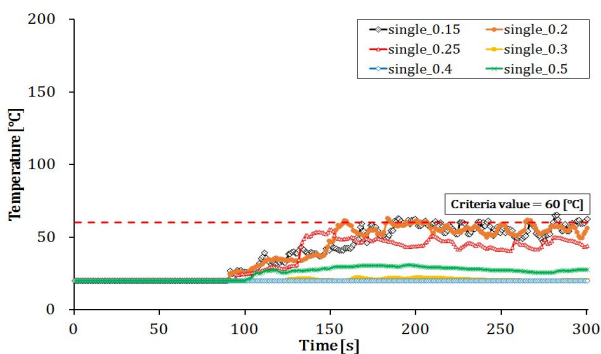


Fig. 9. Temperature value at the point ②.

3.2.4 수치해석 소요시간

격자크기에 따른 수치해석 소요시간을 Table 6에 비교해 보았다. 시나리오 single_0.5의 경우 시나리오 single_0.15에 비해 소요시간은 98% 감소하지만 정확성이 매우 낮았다. 하지만 single_0.25의 경우 해석시간이 83% 감소하였을 뿐만 아니라 ①번 위치에서 가시거리와 온도 값이 인명안전기준에

도달하는 시간 또한 시나리오 single_0.15 비교했을 때 각각 약 15%, 17% 이내로 유사하여 선박 거주구역의 경우는 x, y, z방향의 격자크기가 0.25[m]가 적절한 격자로 분석되었다.

Table 6. Computation time

Scenario	Total number of grid	Computation time
single_0.15	1,749,600	58 hrs 28 mins 20 secs
single_0.2	700,000	17 hrs 16 mins 50 secs
single_0.25	358,400	09 hrs 43 mins 00 secs
single_0.3	151,200	03 hrs 04 mins 30 secs
single_0.4	87,500	01 hrs 27 mins 01 secs
single_0.5	44,800	49 mins 08 secs

4. 격자생성 방식에 따른 수치해석

4.1 격자생성 방식에 따른 시나리오

선박 거주구역의 수치해석 결과 비교를 통해, 적정 격자 크기를 선정하였지만 격자크기가 0.25[m]일 경우에도 300초 화재해석을 하는 경우에 여전히 9시간 43분이라는 장시간이 소요됨에 따라 화재해석을 하는데 소요되는 시간을 줄이기 위하여 격자생성 방식을 달리하여 수치해석을 수행하였다. 이 연구에서는 격자생성 방법 중 수치해석 공간이 클 경우 계산시간의 효율을 위하여 수치해석 대상공간을 수직 또는 수평으로 나누어(Zoning) 여러 개의 개별 격자공간으로 구획하는 multi mesh방법을 적용하였다(Hwang et al., 2008). 이때 개별 격자공간에서의 격자의 크기는 single mesh와 다르게, 격자크기를 동일하게 구성하지 않아도 된다. 선박 거주구역 공간을 나누기에 앞서, 선박의 경우 주수직구역이라는 개념으로 선내 침수나 화재 시 피해확산을 저감시키기 위해 수직으로 공간을 분할하도록 규정되어 있는데, SOLAS 규정에 의하면 선체를 40[m] 이하의 간격으로 분할하여 구역을 나누도록 하고 있다(SOLAS, 1980). 이를 고려하여 multi mesh로 격자 구성 시 화재가 발생한 선실에는 거주구역 적정 격자 크기인 0.25[m] 크기로 격자를 구성하고 그 이외 연기가 확산되는 복도구역을 주수직구역 규정을 참고하여 공간을 0[m], 20[m], 40[m]로 수직적으로 분할하는 시나리오를 구성하였다. Fig. 10을 통해 격자가 생성된 모습을 볼 수 있으며, x, y방향의 격자크기만 달리한 이유는 가시거리를 비롯하여 온도 값을 측정하기 위해서 측정점을 z방향에 두기 때문에 z방향 격자크기는 0.25[m]로 고정하였다.

Multi mesh 방법으로 격자를 구성했을 때, Table 7에서도 볼 수 있듯이 single_0.25와 비교하면 그리드 개수가 multi_0 m의 경우 82%, multi_20 m의 경우 72%, multi_40 m의 경우 61% 감소하였다.

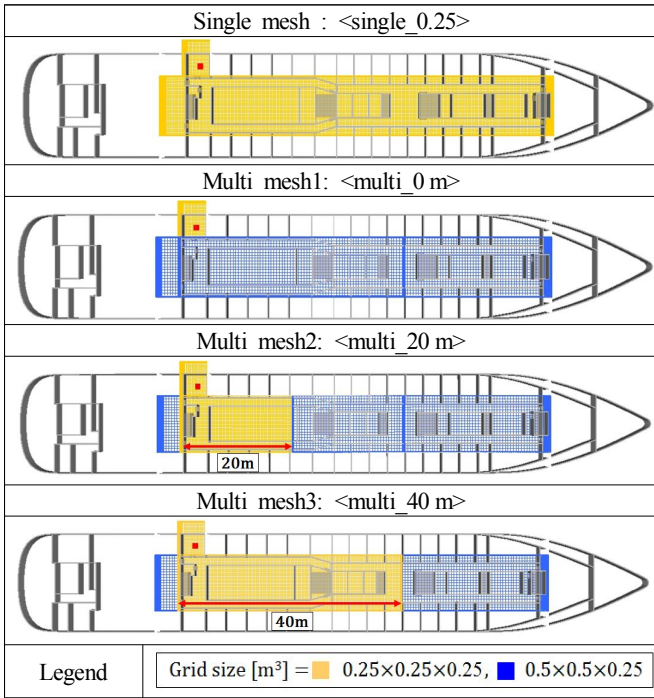


Fig. 10. Mesh geometry of main deck (single and multi mesh).

Table 7. Setting scenario by grid size (single and multi mesh)

Scenario		Total number of grid
Single mesh	single_0.25	358,400
	multi_0 m	63,200
Multi mesh	multi_20 m	101,600
	multi_40 m	140,000

4.2 격자생성 방식에 따른 결과비교

4.2.1 가시거리

격자생성 방식에 따라 Fig. 3에 표시한 ①번과 ②번 위치에서의 가시거리 값을 비교하여 보았다. 그래프 Fig. 11에서 제시된 것과 같이 ①번 위치의 경우 격자생성방식이 다르더라도 화재위험성 평가기준 값인 10[m]에 도달하는 시간의 차이가 single mesh일 경우와 multi mesh일 경우 5% 이내로 매우 유사한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 ②번 위치의 경우 Fig. 12에서 확인할 수 있듯이 single_0.15인 경우 103초, multi_0 m인 경우 121초, multi_20 m인 경우 117초 그리고 multi_40 m인 경우 112초로 다른 시나리오와 비교하였을 때 시나리오 multi_40 m일 때 약 9%, multi_20 m일 때 약 14% 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다. Table 8에 각 시나리오와 위치 별 가시거리 기준값 도달시간과 single_0.25와 비교하였을 때의 결과값 차이를 백분율로 나타내었다.

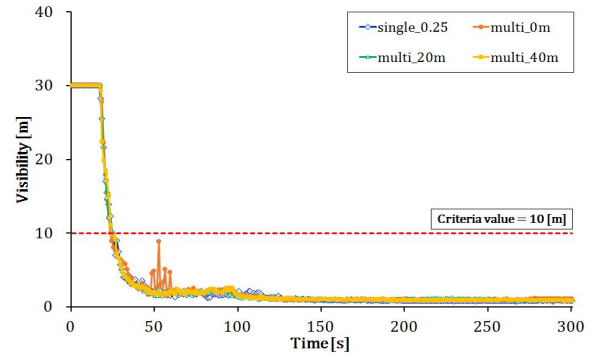


Fig. 11. Visibility value at the point ①.

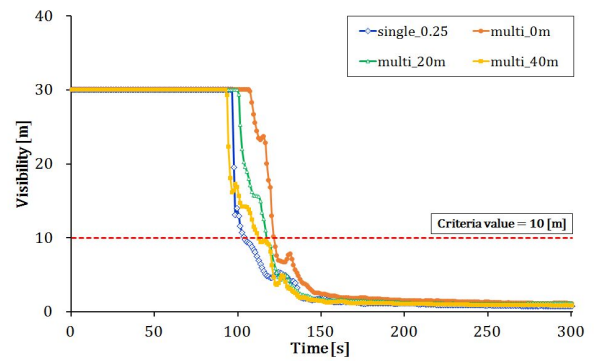


Fig. 12. Visibility value at the point ②.

Table 8. Time to criteria visibility value

Classification		Measuring points			
		①		②	
		sec	%	sec	%
Single mesh	single_0.25	24	-	103	-
	multi_0 m	23	4.3	121	14.8
Multi mesh	multi_20 m	24	0	117	13.5
	multi_40 m	24	0	112	8.0

4.2.2 온도 값

①번 위치의 온도 값의 경우 Fig. 13의 결과처럼 비슷한 경향으로 온도가 상승하였고, 화재위험성 평가기준인 60[°C]에 도달하는 시간 또한 single_0.25일 경우 26초, multi_0 m, multi_20 m 그리고 multi_40 m의 경우 24초, 26초, 24초에 도달하여 약 8% 차이로 유사하였다.

반면, ②번 위치의 온도 값은 Fig. 14에 제시된 것과 같이 발화 후 120초까지는 비슷한 경향으로 예측되지만 120초 이후 시나리오 single_0.25와 multi_0 m에 비해 multi_20 m와 multi_40 m가 높게 예측되는 경향이었으며, 결과 값에서도 확인할 수 있다. 발화 후 150초에 single_0.25와 multi_0 m의 경우 48[°C], 46[°C]이지만 multi_20 m와 multi_40 m의 경우 56[°C],

64[°C]로 single_0.25와 비교했을 때 multi_20 m는 약 16 %, multi_40 m는 약 33 % 높게 예측되었다. 이는 복도길이 20[m], 40[m]를 기준으로 분할된 공간인 시나리오 multi_20 m와 multi_40 m의 경우 multi_0 m에 비교하였을 때, 격자크기 종횡비가 1에서 2로 증가하여 온도 값에도 영향을 미친 것으로 판단된다. Table 9에 각 시나리오와 위치 별 화재위험성 기준값 도달시간과 single_0.25와 비교하였을 때의 결과값 차이를 백분율로 나타내었다.

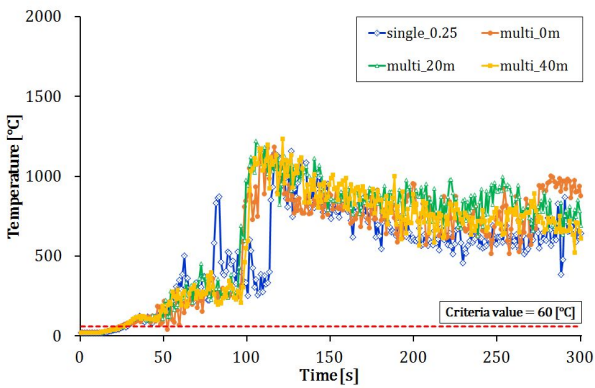


Fig. 13. Temperature value at the point ①.

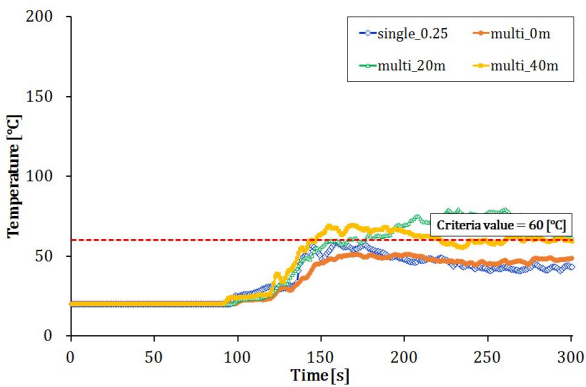


Fig. 14. Temperature value at the point ②.

Table 9. Time to temperature criteria value

Classification		Measuring points			
		①		②	
		sec	%	sec	%
Single mesh	single_0.25	26	-	×	×
	multi_0 m	24	8.3	×	×
Multi mesh	multi_20 m	26	0	154	×
	multi_40 m	24	8.3	143	×

4.2.3 수치해석 소요시간

동일한 수치해석 환경에서 격자생성방법만 다르게 하여 수치해석 시 소요시간을 Table 10에 비교하여 나타내었다. 격자생성방식이 multi mesh일 경우 single mesh일 경우와 비교하여 시나리오 multi_0 m는 수치해석 소요시간이 최소 약 53 %, 시나리오 multi_40 m는 최대 약 81 % 감소하였다. 이를 통해 격자생성방식에 수치해석 소요시간에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

Table 10. Computation time

Scenario		Total number of grid	Computation time
Single mesh	single_0.25	358,400	09 hrs 43 mins 00 secs
	multi_0 m	63,200	01 hrs 50 mins 53 secs
Multi mesh	multi_20 m	101,600	03 hrs 18 mins 50 secs
	multi_40 m	140,000	04 hrs 35 mins 20 secs

5. 결론

이 연구에서는 선박 거주구역 화재시물레이션 시 적용할 수 있는 적정 격자크기와 해석시간을 단축시키기 위한 격자생성방법을 제안하기 위해 대학교 실습선의 거주구역을 대상으로 화재시물레이션을 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 선박 거주구역에 single mesh로 격자를 생성하고, x, y, z방향의 격자크기는 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5[m]로 동일한 값을 적용하여 시물레이션을 수행하였을 때 온도, 가시거리 값 그리고 해석시간 비교를 통해 격자크기 0.25[m]가 적정 격자크기임을 알 수 있다.

둘째, 화재가 발생한 선실과 연기가 확산되는 복도구역의 격자크기를 다르게 적용한 multi mesh일 경우, single mesh를 적용한 경우와 비교하여 화원에서 가까운 피난계단 입구의 가시거리 값은 4.3 %, 온도 값은 8.3 % 이내로 유사하고, 해석시간 또한 최대 81 % 감소하기 때문에 화재해석의 정확성을 유지하고 빠른 결과를 도출하기 위해서는 multi mesh 방법을 사용하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

그러나 이 연구는 수치해석 대상이 운항실습선의 한 Deck에 국한되는 한계를 안고 있기 때문에 이를 극복하기 위해 향후 다양한 선박의 거주구역 도면분석을 바탕으로 선박에 통상적으로 사용할 수 있는 격자크기를 검토할 필요가 있다. 또한 격자생성방법 중 multi mesh 방법을 적용하여 계산시간을 약 80 % 단축시켰지만 실시간으로 화재성상을 예측하기에는 격자크기와 생성방법 뿐만 아니라 여러 대의 컴퓨터

터를 연결하여 계산하는 병렬처리기법 등과 같은 해석기법도 병행 검토되어야 할 필요가 있다.

부 록

- D^* : Characteristic fire diameter
- Q : Total heat release rate of the fire
- ρ_{∞} : Density
- c_p : Constant pressure specific heat
- T_{∞} : Temperature
- g : Acceleration of gravity
- t : Time
- $\delta_{x,y,z}$: Nominal x, y, z size of a mesh cell
- ρ : Density
- u : Velocity
- p : Pressure
- g : Acceleration of gravity
- f_b : External force vector
- h_s : Sensible enthalpy
- q''' : Heat release rate per unit volume
- q_b''' : Heat release rate of particles
- T : Temperature
- W : Molecular weight
- R : Universal gas constant
- q'' : The conductive, diffusive, and radiative heat fluxes
- m_b''' : The production rate of species by evaporating particles

그리스 문자

- τ_{ij} : Viscous stress tensor
- ϵ : Dissipation rate
- v_{α} : Stoichiometric coefficient

References

- [1] Hu, L. H., N. K. Fong, L. Z. Yang, W. K. Chow, Y. Z. Li and R. Huo(2007), Modeling fire-induced smoke spread and carbon monoxide transportation in a long channel: Fire Dynamics Simulator comparisons with measured data, Journal of Hazardous Materials, Volume 140, Issues 1-2, pp. 293-298.
- [2] Hwang, J. H., K. S. Jeong and D. I. Kand(2008), 3D Fire Simulation Explanation: FDS Version 5, DongHwa Technology, p. 68 (in Korean).
- [3] IMO(2016), International Maritime Organization, MSC.1/Circ.1552, Amendments to the Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety, p. 4.
- [4] Jang, Y. J, C. H. Lee, H. B. Kim and W. H.(2008), Proceeding of Korea Society for Railway, The development of parallel computation method for the fire-driven-flow in the subway station, pp. 1792-1798.
- [5] Kim, B. and K. I. Hwang(2016), Smoke exhaust performance prediction according to air supply and exhaust conditions for shipboard fires from a human safety point of view, Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety, Vol. 22, No. 7, pp. 782-790.
- [6] Kim, W. O. and W. C. Park(2015), A study on grid aspect ratio of fire dynamic simulator, Fire Science and Engineering, Vol. 39, No. 9, pp. 923-928.
- [7] KMST(2016), Korea Maritime Safety Tribunal, Statistics for the marine accidents (in Korean), <https://data.kmst.go.kr/kmst/statistics/annualReport/selectAnnualReportList.do#a>.
- [8] McGrattan, K., S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt(2014a), Fire Dynamics Simulator FDS User's Guide, 6th ed., National Institute of Standards and Technology, p. 35.
- [9] McGrattan, K., S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt(2014b), Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, 6th ed., National Institute of Standards and Technology, p. 29.
- [10] NFA(2016), National Fire Agency, Statistics for the fire occurrence (in Korean), http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=156&tblId=DT_15601N_007.
- [11] Park, W. C.(2012), Selection of grid size in fire simulation for large scale buildings by using FDS, Fire Science and Engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 67-72.
- [12] Park, W. C.(2016), Simulation of under ventilated fires, Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 12-16.
- [13] Petterson, N. M.(2002), Assessing the Feasibility of Reducing the Grid Resolution in FDS Field Modelling, School of engineering, University of Canterbury, p. 45.
- [14] SMART Navigation(2017), <http://www.smartnav.org/html/SMART-Navigation/strategy.php>.
- [15] SOLAS(1980), Regulation 3 Definitions, Chapter II-2 Construction-Fire Detection and Fire Extinction.

- [16] Wahlqvist, J. and P. Hees(2013), Validation of FDS for large-scale well-confined mechanically ventilated fire scenarios with emphasis on predicting ventilation system behavior, Fire Safety Journal, Vol. 62, Part B, pp. 102-114.

Received : 2017. 10. 20.

Revised : 2017. 12. 06. (1st)
 : 2017. 12. 18. (2nd)

Accepted : 2017. 12. 28.