

선박의 종경사 및 횡경사 변화가 화재 확산에 미치는 영향 예측

김벌* · † 황광일

*한국해양대학교 대학원, † 한국해양대학교 기계공학부

Prediction of the Effects of the Ship's Heel and Trim Conditions on the Fire Development Characteristics

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 : 선박사고는 환경적인 요인으로 인해 경사가 항상 존재한다. 선박의 경사는 선내 재실자의 피난 이동속도뿐만 아니라 선내 화재성장에도 영향을 미치기 때문에 화재해석 시 경사조건을 고려하여 위험분석을 할 필요가 있다. 이에 이 연구에서는 FLUENT를 이용하여 선박의 횡경사와 종경사 변화에 따라 산정된 온도결과 값에 의해 화재에 미치는 영향을 분석하였다. 화원의 위치를 기준으로 횡경사가 -10°일 때 37초, 종경사는 -10°일 때 36초 이내에 피난을 해야 하는 반면, 횡경사가 +10°, 종경사가 +10°인 경우 피난에 영향을 미치지 않을 것으로 예측되었다. 이와 같은 결과를 바탕으로, 선박화재 시 화재발생위치를 기준으로 횡경사와 종경사를 고려하여 피난유도 및 대책을 마련해야함을 확인하였다.

핵심용어 : 선박, 화재, 시뮬레이션, FLUENT, 횡경사, 종경사

Abstract : Due to the environmental factors of the sea, ship accidents always contain an inclination angle. The change in the ship affects not only the evacuation speed of passengers but also the fire growth in the ship. For this reason, when analyzing the fire, it is necessary to analyze the risks by considering conditions of inclination. In this study, the temperature that affects the fire was calculated by alteration of ship's heel and trim angle and analyzed using FLUENT. Based on fire occurrence position, evacuation should be done within 37 seconds under the condition of -10° heeling angle and 36 seconds under the condition of -10° trim angle. However, it was predicted that the evacuation will not be affected under the conditions of +10° heel angle and +10° trim angle. For these reasons, it is confirmed that when the ship is on fire, evacuation measures should be considered based on the heel and trim conditions as per the location of the fire.

Key words : Ship, Fire, Simulation, FLUENT, Heel, Trim

1. 서 론

해양안전심판원 통계자료에 따르면, 최근 5년간 해양사고는 2013년 1,093건, 2017년 2,582건으로 연평균 24%의 증가율로 매년 증가하는 추세이다. 그중 선박의 화재와 폭발사고는 5년간 485건으로 이로 인해 125명에 달하는 많은 인명피해가 발생하였다(KMST, 2017). 그리고 2018년 5월 21일 인천항에 정박 중인 선박에서 화재로 선적된 차량 1,500여 대가 전소된 사고사례로 볼 수 있듯이 재산피해 또한 크다(JoongAng Ilbo, 2018).

이처럼 선박화재로 인해 인적·물적 피해가 큰 이유는 선박의 구조적, 환경적 특수성에서 기인한다. 고기밀성 구조인 선박은 화재 시 연기와 고온의 가스가 공간 외부로의 배출이 어려우며, 선내 공조시스템의 덕트를 통해 선박 전체로 연기가 확산될 수도 있다. 그리고 선박은 낮은 천장과 긴 복도를 가지

는 특성으로 인해 복도가 연기통로가 되어 확산된다.

선박화재·피난과 관련된 선행연구로, Zhang et al.(2017)은 실제 선박 거주구역에 대상으로 화재실험을 실시하여 화재실의 공조방식이 연기확산에 미치는 영향을 검토하였으며, Kim and Hwang(2016)은 화재시뮬레이션 툴인 FDS를 이용하여 선박 거주구역 화재 시 급·배기 조건이 연기확산에 미치는 영향과 위험성을 분석하고, 급·배기 시스템을 효율적으로 사용할 수 있는 방안을 제안하였다. 그리고 Kim(2010)은 시뮬레이션을 통해 선박화재 시, 복도와 피난구의 폭 증가가 피난시간 확보에 미치는 영향을 확인하였으며, Hwang(2011)은 선내 화재는 내·외부 요인에 의해 영향을 받기 때문에, 화재 시 소방설비만이 대책으로 볼 수 없으며 선박 별 대응 매뉴얼과 선내 재실자의 분포특성을 고려한 피난 대응책이 필요함을 제안하였다.

† Corresponding author : 종신회원, hwangki@kmou.ac.kr 051)410-4368

* 정회원, pooh4762@gmail.com 051)410-5030

그러나 선박화재는 해상에서 진행되는 특성상 선박의 경사 조건과 같은 외부요인으로 인해 화재발달에 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고, 기존의 연구에서는 선박경사에 대한 조건을 제시하지 않은 채 화재실험 및 해석을 수행하였다. 하지만 육상의 경사진 터널 내 화재해석에 대한 연구결과에도 볼 수 있듯이, 일정한 경사가 존재할 경우 굴뚝효과에 의한 연소생성물 확산속도 증가로 피해가 가중될 위험이 크다(Atkinson et al., 1996; Junmei et al., 2012). 이러한 이유로 선박화재에서 중요한 요인으로 작용할 수 있는 경사조건을 고려한 연구가 필요한 실정이다.

이에 이 연구에서는 여수↔제주를 운항하는 연안여객선을 연구대상으로 횡경사 및 종경사변화가 화재확산에 미치는 영향을 시뮬레이션을 이용하여 예측 및 분석하였다. 그리고 화원의 위치를 기준으로 선박의 경사조건을 고려한 피난대책 수립 필요성을 제시하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 연구의 범위와 방법

2.1 해석대상선박

이 연구의 수치해석 대상은 여수↔제주 항로로 운행하고 있는 15,000 Ton급 여객선으로, 여객정원은 1,220명이다. 대상 선박의 제원을 Table 1에 요약하였다.

Table 1 Specification of the passenger ship

Length	189 m	Width	27 m
Gross Ton	15,195 GT	DLWL	15.15 m
People	Total 1,248 (Passenger 1,220, Crew 28)		
Speed	Max. 25.981kts		

2.2 수치해석의 지배방정식

이 연구에서는 선박의 횡경사 및 종경사가 화재에 미치는 영향에 대한 해석을 수행하고자 ANSYS사의 Design Modeler를 이용하여 실험조건과 동일한 크기로 모델링 하고, 수치해석에는 상용 전산유체역학 코드인 ANSYS FLUENT 18.2.0를 이용하여 수치해석 하였다. 화재현상을 수치적으로 모사하기 위하여 적용된 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 화학종방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소산을 방정식으로 다음 식으로 나타낼 수 있다(ANSYS Co, 2018).

1) Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

2) Momentum equation

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

3) Energy equation

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\overline{\tau_{eff}} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (3)$$

4) Species transport equation

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

5) Turbulent kinetic energy equation

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

6) Dissipation rate equation of turbulent kinetic energy

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (6)$$

2.3 수치해석 검증

수치해석 툴의 화재해석 기법을 검증하기 위하여 Steckler et al.(1982)에 의해 수행된 단일구획화재 실험결과 값과 수치해석 결과 값을 비교하여 보았다. 이 실험은 화원의 발열량 정보와 측정점의 위치 별 온도, 속도 값을 제공하고 있어, 수치해석 툴과 기법 검증을 위해 널리 이용되고 있다(Kim and Lee, 2006; Novozhilov, 2001; Stavrakakis and Markatos, 2009; Xue et al., 2001).

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 화재실험을 했던 공간의 크기는 가로 2.8m, 세로 2.8m, 높이 2.18m이며, 한쪽 벽면에 폭 0.74m,높이 1.8m인 출입구가 존재한다. 화재실 내외부로 출입하는 온도와 속도를 측정하기 위하여 출입구에 열전대와 양방향 속도 프로브를 두었으며, 화원의 체적은 0.027m³이고, 열방출을 값은 62.9kW이다.

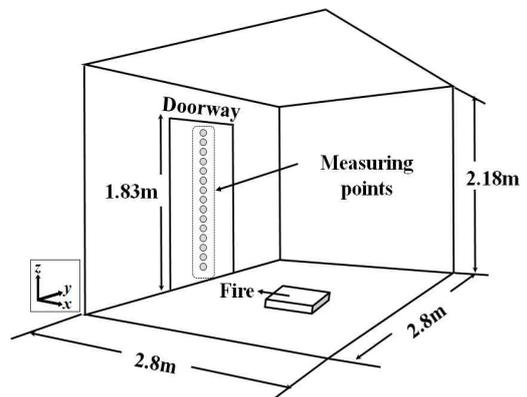


Fig. 1 Schematic of the fire compartment

전체 해석영역에 대하여 화재실 내부유동을 3차원, 비압축성, 비정상상태, 난류유동으로 가정하였고, 난류모델은 화재 시 고온의 공기에 의한 부력생성을 고려하기 위해 Realizable k-ε을 적용하였다. 그리고 복사열전달 해석을 위해 광학두께를 고려해서 DO(Discrete ordinate)모델을, 속도와 압력의 연결은 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다(Maele and Merci, 2009; Węgrzyński and Vigne, 2017). 또한 화재모델은 화학반응을 따로 고려하지 않고, 화원의 열방출율을 Source term으로 처리하는 VHS(Volumetric heat source) 모델을 적용하였다. 비정상상태 해석에 따른 시간은 1초 간격으로 발화 후 200초까지 계산하였다.

Fig. 2와 Fig. 3에 출입구 중앙에서의 높이에 따른 온도와 속도분포를 비교하였다. 높이 1.539m에서의 실험결과 값은 122.18°C이며, 수치해석 결과 값은 139.76°C로 14.39% 높게 예측되었으며, 동일한 높이에서 속도 값은 1.37m/s인 반면 수치해석 결과 값은 1.23m/s로 10.22% 차이가 발생하였다. 이러한 차이가 발생한 이유는 열원으로부터 고온의 상승기류가 발생하여 출입구를 통하여 빠져나가고, 외부 공기 또한 내부로 유입되며 난류가 생성되는데, 수치해석 상 난류모델의 한계로 인한 차이로 볼 수 있다. 하지만 전체적인 결과를 보았을 때 온도와 속도 모두 15% 이내의 차이로 실험결과 값과 비교하였을 때 유사하게 예측하고 있다.

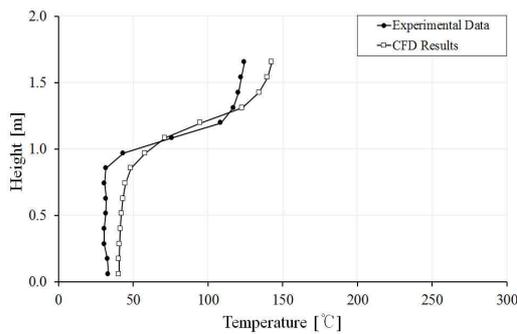


Fig. 2 Temperature profiles at the doorway

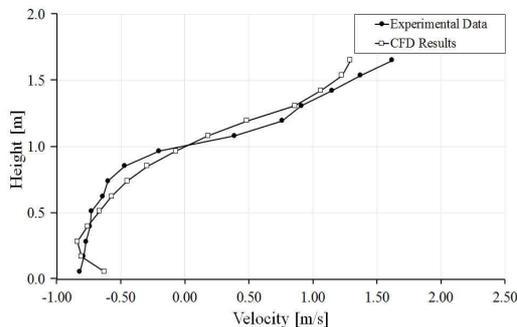


Fig. 3 Velocity profiles at the doorway

2.4 해석조건

수치해석 대상은 여객선의 데크 중 거주구역이 밀집하여 인명피해가 클 것으로 예상되는 A데크에서 화재 또는 침수와 같은 재난 시 사고확대를 방지하기 위해 40m 이하의 간격으로 선박을 구획하는 주수직구역의 개념을 적용하여 해석대상 영역의 범위를 설정하였다.

해석대상 영역은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 길이는 38.325m, 폭은 21.495m이며, 천장의 높이는 2.142m이다. 그리고 Exit1과 인접하고 있는 선실을 화재발생 위치로 하여, 화재발생 시 Exit 1을 사용하지 못하는 최악의 경우를 가정하였다. 또한 선박의 경사조건 적용 시 선실에 미치는 영향을 파악하기 위하여 모든 문은 열려있는 것으로 설정하였으며, 거주구역의 바닥과 벽면에는 해석시간을 줄이기 위하여 단열조건을 적용하였다. 그리고 화원의 체적은 0.125m³이고, 화원의 열방출율은 500kW를 적용하였다(Ha and Seo, 2017). 또한 화재시험에 관한 절차를 규정하고 있는 IMO의 FTP Code를 참고하여, 실험을 위해 버너에 적용할 수 있는 가스 중 하나인 프로판을 연료로 적용하였다(IMO, 2010). 화재에서 발생하는 연소는 완전연소로 가정하였으며, 프로판의 연소열은 50kJ/g이다. 계산을 위한 격자의 형태는 Tetrahedrons로 격자 수는 약 51만 개이다. 또한 해석은 1초 간격으로, 화재발생 후 300초까지 계산하였다. 그리고 기타 수치해석 조건은 앞서 수치해석 검증을 위해 적용하였던 조건을 반영하였다.

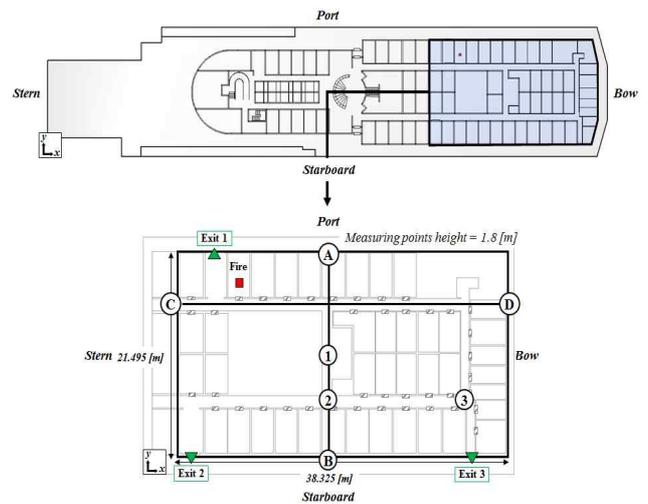


Fig. 4 Computational domain and measuring points

3. 선박의 횡경사 및 종경사 변화에 따른 수치해석

3.1 선박의 횡경사 및 종경사 시나리오

본 연구에서는 IMO의 피난해석지침인 MSC. 1/Circ.1238의 개정 시 피난해석에 경사조건을 고려할 목적으로 Nicholls

et al.(2012)이 제안한 시나리오인 횡경사 20° 및 종경사 10°와, 선박의 경사조건이 탈출승객의 이동속도에 미치는 영향을 파악하기 위해 수행된 바 있는 Kim et al.(2004)의 연구에서 적용된 시나리오인 횡경사 -20°~+20°, 종경사 0°~+10°을 참고하여 시나리오를 구성하였다. 계산을 위하여 적용된 좌표계는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 선수방향이 양(+)의 x축이고, 선박의 좌현이 양(+)의 y축이며 중력의 반대방향이 양(+)의 z축으로 하는 선박 고정좌표계(ship fixed coordinate system)를 사용하였으며, 이때 회전방향은 각 축에 대한 시계 방향이다(SNAK, 2012). 적용된 시나리오는 Fig. 6과 Fig.7에서 볼 수 있듯이, 횡경사 조건은 -20°, -10°, -5°, 0°, 5°, 10° 그리고 종경사는 -10°, -5°, 0°, 5°, 10°이다.

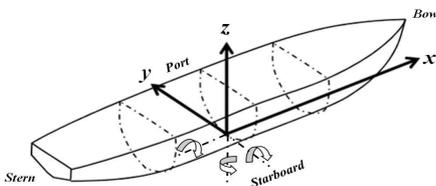


Fig. 5 Coordinate system

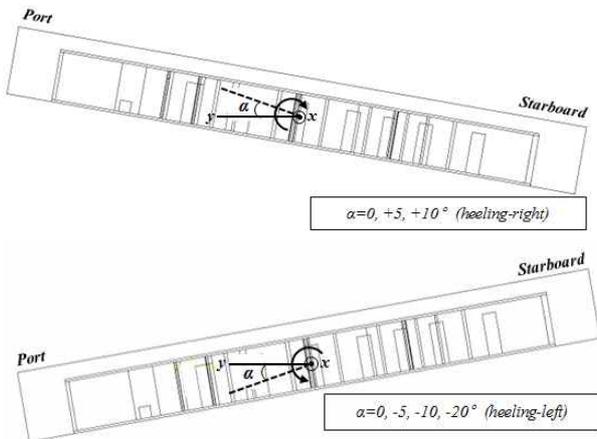


Fig. 6 The heel conditions of scenarios($\beta=0$)

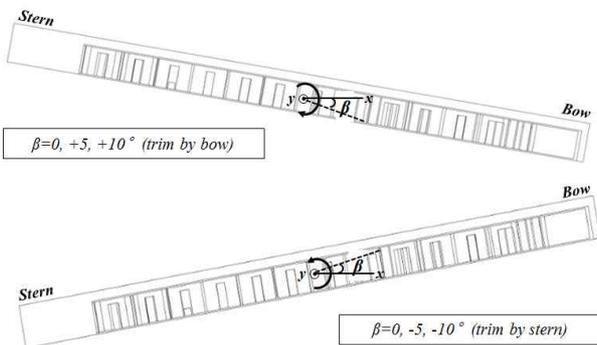


Fig. 7 The trim conditions of scenarios($\alpha=0$)

3.2 선박의 횡경사 및 종경사 시나리오에 따른 수치해석 결과

화재로 인한 피난 시, 선내 재실자의 주 피난통로가 되고 화원과 가까운 Exit1을 제외한 출구인 Exit2와 Exit3로 가기 위해 거쳐야 하는 복도에 측정점 ①, ②, ③ (Fig. 4 참조)을 두어 각도에 따른 온도 값을 비교하였다. 그리고 화원의 위치를 기준으로 경사조건에 따른 유효피난경로를 온도 값에 기초하여 제시하였다.

3.2.1 선박의 횡경사 시나리오에 따른 수치해석 결과

선내 화재발생 시 횡경사 조건이 화재에 미치는 영향을 확인하기 위하여 발화 후 300초 일 때, A-B구역 (Fig. 4 참조)의 온도분포를 Fig. 8에 나타내었다. B구역에서 가까운 선실 내부 중앙 높이 1.8 [m]지점에서의 온도는 횡경사 +10°일 때는 약 66°C인 반면 횡경사 -20°일 때는 103°C로 37°C 높은 것을 확인할 수 있었다. 이는 횡경사가 음의 값일 때, 화재로 인한 고온의 열기류가 우현 방향으로 상승기류를 형성하며 생긴 결과로 볼 수 있다.

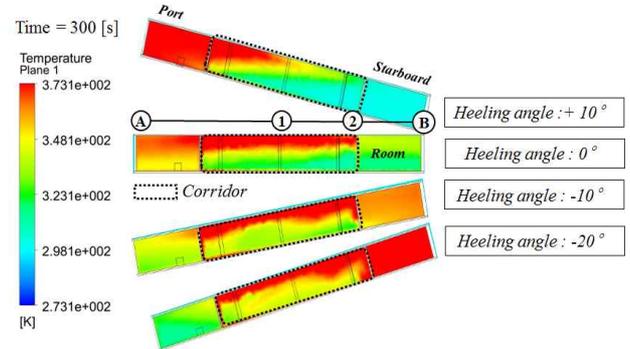


Fig. 8 A-B section temperature distribution

횡경사 시나리오에 따른 온도분포를 좀 더 자세히 확인하기 위하여 측정점 ①번과 ②번 위치의 횡경사 조건 별 시간에 따른 온도변화를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 횡경사가 양의 값인 경우, 음의 각도 값과 비교했을 때 ①번과 ②번 위치에서 모두 낮게 예측되며, 이는 횡경사에 따른 각 측정점 별 최고온도 값에서도 확인가능하다. Fig. 11에서 횡경사 -10°와 10°인 경우에 최고온도 값의 차이는 측정점 ①, ②, ③에서 각각 18.7°C, 63.97°C, 45.94°C이며, -10°와 10° 이외에도 횡경사가 음의 값일 때 양의 값일 때와 비교했을 때에 비하여 높은 것을 볼 수 있다.

그리고 이러한 온도 값의 차이는 탈출허용시간(ASET, Available Safe Egress Time)에도 영향을 미쳤다. IMO(2016) MSC. 1/Circ.1552에서 규정하고 있는 화재 위험성 평가기준인 60°C를 기준으로 측정점 높이 1.8 [m]지점에서, ASET을 산출하였을 때 ①번 위치의 경우, 횡경사 조건이 -20°, -10°, -5°, 0°, 5°, 10°일 때 각각 31초, 37초, 34초, 39초, 77초, 144초로 횡경사가 -10°와 10°인 경우를 비교했을 때 약 4.2배 차이

가 발생하였다. 그리고 ②번 위치의 경우는 10°일 때, 기준 온도 값인 60°C에 도달하지 않지만, -10°일 때는 38초 만에 도달하여 각도에 따라 피난에 미치는 영향이 달라질 수 있음을 확인하였다.

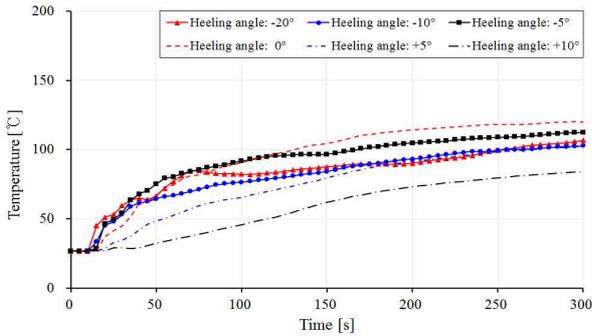


Fig. 9 Temperature profiles by the heel conditions at the point ①

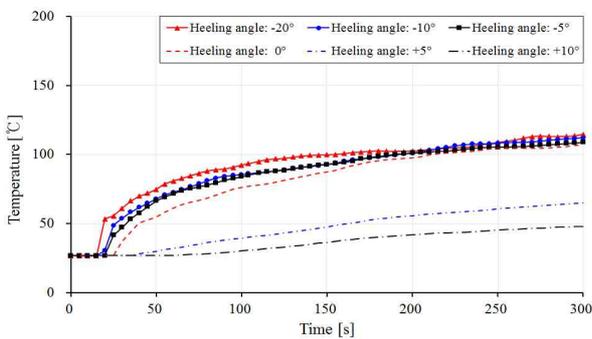


Fig. 10 Temperature profiles by the heel conditions at the point ②

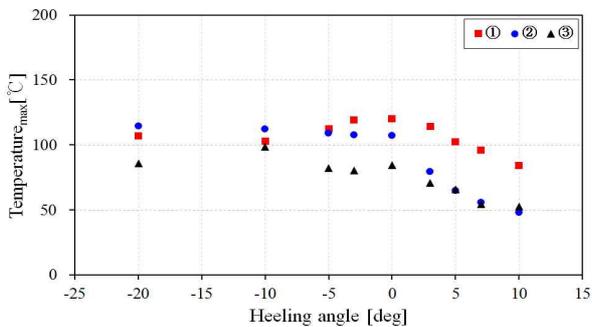


Fig. 11 Variation of the max temperature by the heel conditions

3.2.2 선박의 종경사 시나리오에 따른 화재해석 결과

종경사 조건이 화재에 미치는 영향을 파악하기 위하여 발화 후 300초 일 때, C-D구역 (Fig. 4 참조)의 온도분포를 확

인하였고, Fig. 12에 나타내었다. 선미방향으로 기울어진 경사로 인해 -10°일 때, 선수부분 복도 끝의 온도는 189°C에 도달하지만 10°일 때는 27°C로 D방향으로 재실자의 이동이 가능할 것으로 판단되었다. 이러한 결과를 보이는 이유는, 종경사가 음의 값일 때 화원으로부터 생성된 고온의 열기류가 선수방향으로 향해 복도의 천장을 따라 빠른 속도로 이동하기 때문이다. 이는 C-D구역의 위치 별 속도 값인 Fig. 13에서 확인가능하며, 종경사가 10°일 때와 비교하여 -10°일 때 약 10배 가까이 속도 값이 큰 것을 볼 수 있다.

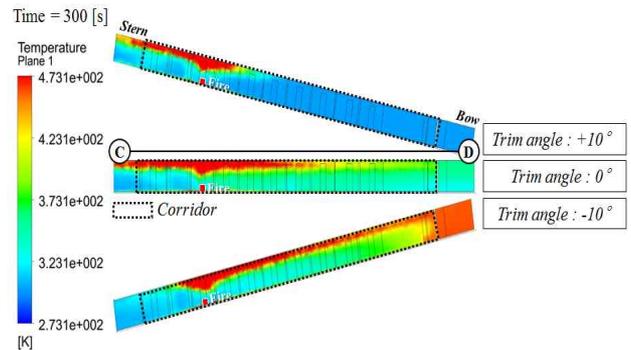


Fig. 12 C-D section temperature distribution

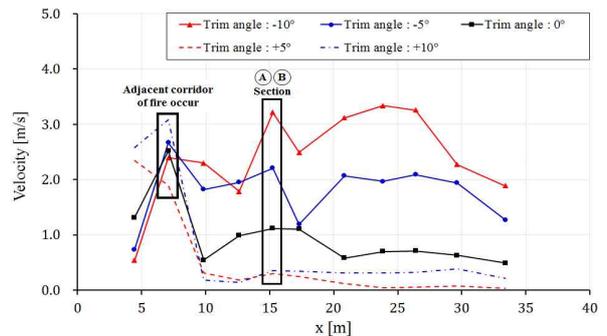


Fig. 13 Variation of the velocity values at the C-D section

또한, 종경사 시나리오에 따른 측정점 별 최고온도를 나타낸 Fig. 14를 통해, 종경사가 -10°일 때 측정점 ③의 온도는 173°C인 반면 10°일 때는 27°C로 146°C 차이가 발생한 것을 확인하였다. 이를 통해 종경사 조건이 피난에도 영향을 미칠 것으로 예측되어, 측정점 ②와 ③의 종경사와 시간에 따른 온도결과를 Fig. 15와 16에 정리하여 나타내고 ASET을 산출하였다. 측정점 ②번 위치에서는 60°C를 기준으로 종경사가 -10°, -5°, 0° 일 때 각각 96초, 58초, 39초, ③번 위치에서는 각각 36초, 49초, 93초 이내에 피난을 해야 하지만, 5°, 10°인 경우는 ②번과 ③번 위치 모두 기준 온도 값에 도달하지 않아 피난에 미치는 영향이 -10°, -5°, 0° 일 때와 비교하여 적을 것으로 예측되었다.

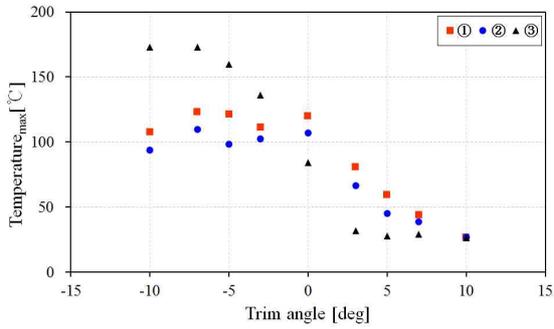


Fig. 14 Variation of the max temperature by the trim conditions

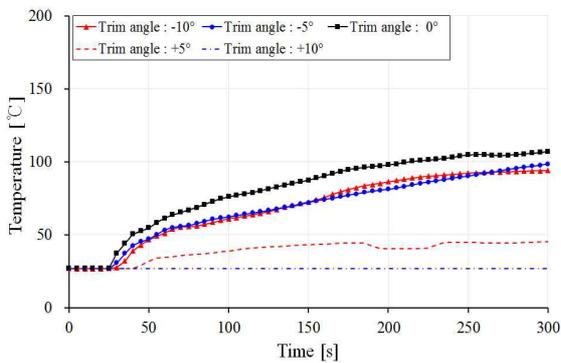


Fig. 15 Temperature profiles by the trim conditions at the point ②

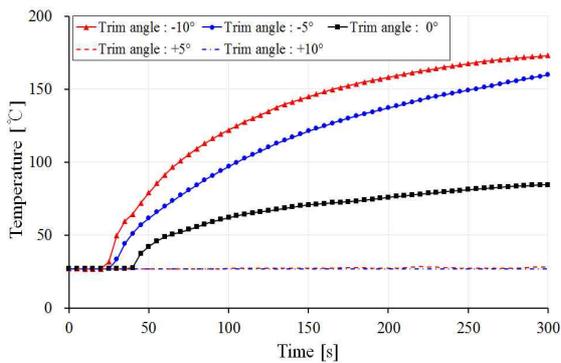


Fig. 16 Temperature profiles by the trim conditions at the point ③

3.3 선박의 횡경사 및 종경사 시나리오에 따른 유효피난경로

선박에는 비상상황 발생 시, 재실자의 안전한 피난을 위해 비상탈출 경로도가 선내 곳곳에 비치되어 있으며, 이는 승객의 위치로부터 가장 가까운 소집장소로 이동할 수 있도록 한다. 하지만 화재사고의 경우, 사고특성상 언제, 어디서 발생할지 모르며 선박의 경사조건에 의해 확산특성이 달라질 수 있기 때문에 이러한 위험성을 인지하여 피난안전대책을 세울 필요가 있다. 이에 이 연구에서는 횡경사 및 종경사 시나리오 적

용 시, 기준 온도 값인 60°C에 해당하는 구역과 피난경로를 나타내었다. 앞선 연구결과를 바탕으로, 최대온도 값의 차이가 가장 큰 횡경사 -20°, +10°, 종경사 -10°, +10°일 때의 결과를 Fig. 17과 18에 나타내었다. 이를 통해, 화재위험성과 선박의 특성을 고려한 피난안전대책 수립 필요성을 제안하고자 한다.

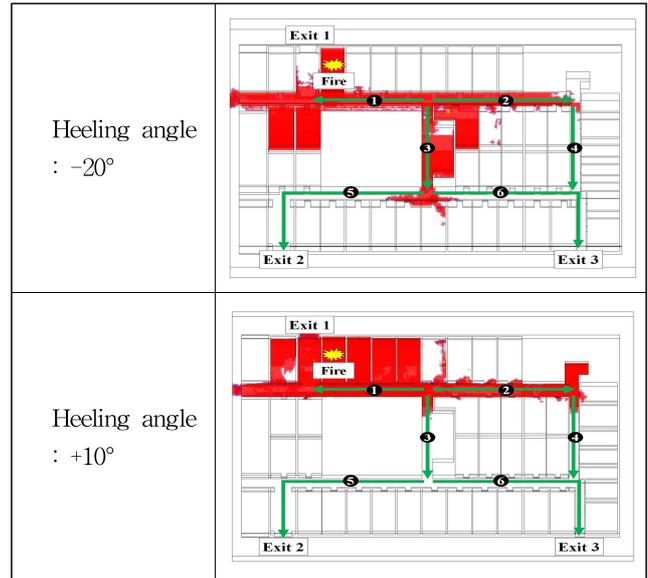


Fig. 17 Temperature distribution by the heel conditions at 60°C(1minutes after fire)

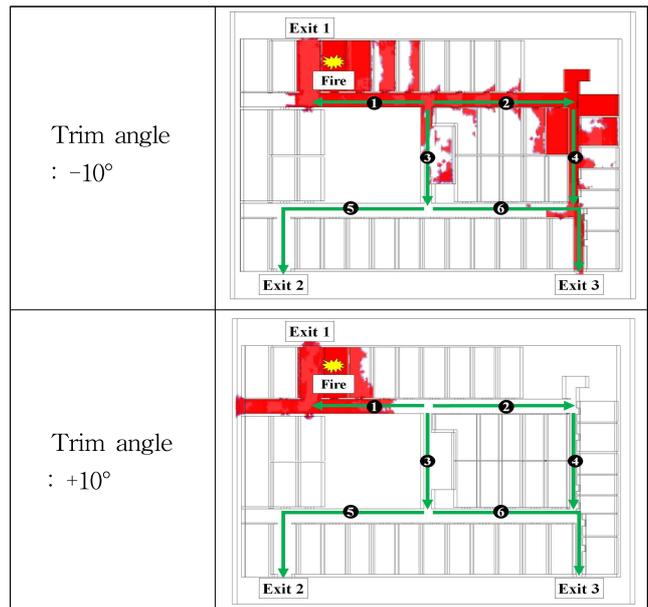


Fig. 18 Temperature distribution by the trim conditions at 60°C(1minutes after fire)

Fig. 17을 통해 볼 때, 화재발생 1분 후 횡경사가 -20°와 +10°일 때 모두 피난경로 ①번과 ②번으로의 이동은 어려울 것으로 예측되었다. 특히 횡경사가 -20°일 때는 좌현으로 생긴 경사의 영향으로 인해, Exit2와 Exit3으로 이동할 수 있는

③번 피난경로가 있는 곳까지 열기가 확산된 것을 관찰할 수 있다. 그리고 종경사 +10°, -10°일 때, 60℃인 구역의 온도분포를 Fig. 18에서 보면, 종경사가 +10°인 경우, ①번 피난경로를 제외한 모든 경로로 이동이 가능하여 Exit2와 3번으로 접근이 가능할 것으로 보였다. 그러나 종경사가 -10°인 경우는 복도를 비롯하여, Exit3까지 열기류가 이동하여, 피난이 쉽지 않을 것으로 판단되었다.

위의 결과를 바탕으로, 횡경사 및 종경사변화에 따라 화재시의 이동할 수 있는 피난경로의 차이가 확연히 드러나, 선박의 환경적 요인에 의해 생성된 경사특성을 고려한 피난안전대책 수립이 필요함을 확인하였다.

4. 결 론

이 연구는 선박화재 시 횡경사 및 종경사변화가 화재확산에 미치는 영향을 예측하고, 경사조건을 고려한 피난대책 수립 필요성을 제시하는 것을 연구목적으로, 15,000톤 급 여객선을 대상으로 FLUENT를 이용하여 화재시물레이션을 수행한 것이다. 이 연구 성과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 선박에 횡경사 조건을 -20°, -10°, -5°, 0°, 5°, 10° 적용하여 시물레이션을 수행하였을 때, Exit2와 Exit3으로 가기 위해 거쳐야 하는 복도의 ②번 측정점에서 ASET을 비교하였다. 횡경사가 -20°, -10°, 0°인 경우 30초, 38초, 58초에 도달하는 반면 10°인 경우는 허용기준 값에 도달하지 않아 피난에 지장이 없을 것으로 판단된다.

둘째, 선박의 종경사 조건을 -10°, -5°, 0°, 5°, 10°로 적용한 경우 피난출구 Exit3와 가까운 복도의 ③번 측정점에서 안전탈출필요시간을 비교하면 0°, -10°인 경우 93초, 36초에 도달하는 반면 10°인 경우는 허용기준 값에 도달하지 않았다. 이를 통해 종경사의 경우는, 음의 값일 때 즉 화원의 위치를 기준으로 선미트림일 때, 열기류의 확산이 빠른 것을 확인할 수 있었다.

위와 같은 결과로부터, 선박화재 시 경사변화에 따라 ASET이 달라짐을 확인하였다. 이러한 이유로 화재위험분석을 기반으로 피난예측을 할 경우 경사조건을 고려한 화재해석을 수행해야 하며, 화재로 인한 피난대책 수립 시에도 경사조건을 고려하는 것이 피난안전 확보에 효과적일 것으로 판단된다.

그러나 이 연구는 해석대상과 화재발생위치, 크기가 한 가지 사례로 국한되며, 화재위험성만을 분석한 한계를 가진다. 따라서 향후 이를 극복하기 위하여 선박의 화재발생위치와 크기 그리고 조합경사 조건을 적용하는 등 다양한 선박특성을 고려하고, 이와 더불어 피난해석을 수행하여 보다 실질적인 피난대책을 마련할 필요가 있다.

부 록

$C_{1\epsilon}$	1.44
C_2	1.9
E	Total energy
\vec{F}	Force vector
G_b	The generation of turbulence kinetic energy due to the buoyancy
G_k	The generation of turbulence kinetic energy due to the mean velocity gradients
\vec{J}_j	diffusion flux of species j
R_i	Net rate of product of species i by chemical reaction
S_h	Volumetric heat source
S_i	Rate of creation by addition from the dispersed phase plus any user defined sources
S_k, S_ϵ	User defined source terms
Y_i	Mass fraction of each species
Y_M	The contribution of the fluctuating dilatation in compressible turbulence to the overall dissipation rate
g	Gravitational acceleration
h_j	Sensible enthalpy of species j
k	Kinetic energy per unit mass
k_{eff}	Effective conductivity
p	Pressure
t	Time
u_j	Velocity magnitude
\vec{v}	Overall velocity vector
ϵ	Turbulent dissipation rate
ρ	Density
σ_k	Turbulent Prandtl numbers for k
σ_ϵ	Turbulent Prandtl numbers for ϵ
$\vec{\tau}$	Stress tensor
μ	Dynamic viscosity
ν	Kinematic viscosity

References

[1] ANSYS Co(2018), "ANSYS Fluent Theory Guide", pp. 1-870.
 [2] Atkinson, G. T. and Wu, Y.(1996), "Smoke Control in

- Sloping Tunnels”, *Fire Safety Journal*, Vol. 27, pp. 335-341.
- [3] Ha, Y. C. and Seo, J. K., “Applicability of CO₂ Extinguishing System for Ships”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 54, No. 4, pp. 294-300.
- [4] Hwang, K. I.(2011), “Comparative Studies of Evacuation Time According to the Distribution Characteristics of Training Ship’s Personnels”, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 35, No. 3, pp. 213-218.
- [5] IMO(2010), International Maritime Organization, “International Code for Application of Fire Test Procedures(2010 FTP Code)”, Resolution MSC.307(88).
- [6] IMO(2016), International Maritime Organization, “MSC.1/ Circ.1552, Amendments to the Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety”, p. 4.
- [7] JoongAng Ilbo(2018), <http://news.joins.com/article/22651828>, accessed May 24, 2018.
- [8] Junmei, Li., Shanshan, L., Yanfeng, L., Chao, C., Xuan, L., and Chenchen, Y.(2012), “Experimental Study of Smoke Spread in Titled Urban Traffic Tunnels Fires”, *Procedia Engineering*, Vol. 45, pp. 690-694.
- [9] Kim, B. and Hwang, K. I.(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 Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 22, No. 7, pp. 782-790.
- [10] Kim, H. T., Lee, D. K., Park, J. H. and Hong, S. K. (2004), “The Effect on the Mobility of Evacuating Passengers in Ship with Regard to List and Motion”, *IE Interface*, Vol. 17, No. 1, pp. 22-32.
- [11] Kim, S. C. and Lee, S. H.(2006), “Numerical Prediction of Smoke Concentration in a Compartment Fire by Using the Modified Volumetric Heat Source Model”, *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 344-350.
- [12] KMST(2017), Korea Maritime Safety Tribunal, Statistics for the marine accidents (in Korean), <https://www.kmst.go.kr/kmst/statistics/annualReport/selectAnnualReportList.do#a>
- [13] Kim, W. O.(2010), “A Study on the Crew’s Survival Ratio According to Ship’s Structure”, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 34, No. 6, pp. 423-427.
- [14] Maele, K. Van. and Merci, B.(2008), “Application of RANS and LES Field Simulations to Predict the Critical Ventilation Velocity in Longitudinally Ventilated Horizontal Tunnels”, *Fire Safety Journal*, Vol. 43, No. 3, pp. 598-609.
- [15] Nicholl, I., Hifi, Y., Lee, B. S., Galea, E. R., Deere, S., Blackshields, D. and Sharp, G.(2012), “The Safeguard Heel Scenario Evacuation Benchmark and Recommendations to IMO to Update MSC Circ 1238”, *Safeguard Passenger Evacuation Seminar*, pp. 83-90.
- [16] Novozhilov, V.(2001), “Computational Fluid Dynamics Modeling of Compartment Fires”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, pp. 611-666.
- [17] Stavrakakis, G. M. and Markatos, N. C.(2009), “Simulation of Airflow in One- and Two-Room Enclosures Containing a Fire Source”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2690-2703.
- [18] Steckler, K. D., Quintiere, J. G. and Rinkinen, W. J.(1982), “Flow Induced by Fire in a Compartment”, *Symposium (International) on Combustion*, Vol. 19, Issue. 1, pp. 913-920.
- [19] SNAK(2012), The Society of Naval Architects of Korea, Naval Architectural Calculation, Textbooks Press, pp. 48-51.
- [20] Węgrzyński, W. and Vigne, G.(2017), “Experimental and Numerical Evaluation of the Influence of the Soot Yield on the Visibility in Smoke in CFD Analysis”, *Fire Safety Journal*, Vol. 91, pp. 389-398.
- [21] Xue, H., Ho, J. C. and Cheng, Y. M.(2001), “Comparison of Different Combustion Models in Enclosure Fire Simulation”, *Fire Safety Journal*, Vol. 36, pp. 37-54.

Received 5 July 2018

Revised 22 August 2018

Accepted 23 August 2018