



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

선박의 환기 시스템에 의한 오염물질의 확산과 위험성 예측에 관한 연구

A study on the risk assessment of contaminant spreading by the
ventilation system of ships



한국해양대학교 대학원

에너지플랜트공학과

심영훈

본 논문을 심영훈의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장

도 덕 희

(인)

위 원

황 광 일

(인)

위 원

방 광 현

(인)

2015년 12월 23일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figs	v
Abstract	vii

1. 서 론

1.1 연구배경	1
1.2 기존연구 고찰	3
1.3 연구목적과 방법	5

2. 이론적 배경

2.1 오염물질	8
2.1.1 환경 오염물질	11
2.1.1.1 휘발성 유기화합물	11
2.1.1.2 포름알데히드(HCHO)	12
2.1.1.3 일산화탄소(CO)	14
2.1.1.4 이산화탄소(CO ₂)	15
2.1.1.5 이산화질소(NO ₂)	17
2.1.2 화학 작용제	18
2.2 오염물질 확산 이론	20
2.3 환기방식	23
2.3.1 자연식 환기	23
2.3.2 기계식 환기	24
2.3.3 혼합형 환기	25

3. 시뮬레이션	
3.1 해석 대상 개요	26
3.1.1 선박의 개요	26
3.1.2 선박의 공기조화 시스템	28
3.2 해석 톨과 모델링	32
3.2.1 CONTAM 3.2	32
3.2.2 모델링	33
3.3 오염물질 확산 시나리오	35
4. 시뮬레이션 결과 및 분석	
4.1 시나리오-A의 결과	38
4.2 시나리오-B의 결과	40
4.3 시나리오-C의 결과	42
4.4 시나리오-D의 결과	44
4.5 시나리오-E의 결과	49
4.6 시나리오-F의 결과	54
4.7 치사량이상으로 오염되는 사린가스의 발생량 및 시간	59
5. 결론	
참고문헌	63
감사의글	65

List of Tables

Table 1 다중이용시설 실내공기질관리법의 적용대상	2
Table 2 생활용품에서 발생하는 주요 오염물질	9
Table 3 실내공기질의 국내외 규제 및 권고기준 비교	10
Table 4 휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds: VOCs)	12
Table 5 포름알데히드의 특성 및 인체영향	13
Table 6 포름알데히드의 농도별 인체영향	13
Table 7 일산화탄소의 특성 및 인체영향	14
Table 8 일산화탄소의 농도별 인체영향	15
Table 9 이산화탄소의 특성 및 인체영향	16
Table 10 이산화탄소의 농도별 인체영향	16
Table 11 이산화질소의 특성 및 인체영향	17
Table 12 이산화질소의 농도별 인체영향	18
Table 13 대표적인 화학 작용제	18
Table 14 실습선의 주요 사양	27
Table 15 데크별 주요배치	27
Table 16 냉난방 시스템 및 통풍시설의 개요	29
Table 17 AHU의 신선외기 도입용량(OA)과 배기용량(EA)	31
Table 18 별도의 선내 배기전용 시스템 용량	31
Table 19 시나리오 조건	36
Table 20 시나리오-A의 결과	39
Table 21 시나리오-B의 결과	41
Table 22 시나리오-C의 결과	43
Table 23 치사량 이상으로 오염되는 사린의 발생량 및 시간	60

List of Figs

Fig. 1 비정상상태의 농도구배	21
Fig. 2 정상상태의 확산 모식도	22
Fig. 3 기계 환기방식의 종류	25
Fig. 4 운항실습선의 외관	26
Fig. 5 AHU 주관의 공급계통 개념도	30
Fig. 6 CONTAM 3.2를 이용한 선박의 환기계통 모델링	34
Fig. 7 실습선의 복도 및 오염원 발생 지점	37
Fig. 8 시나리오-A의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source)	38
Fig. 9 시나리오-B의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source)	40
Fig. 10 시나리오-C의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source)	42
Fig. 11 시나리오-D의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source, OA: 0%)	45
Fig. 12 시나리오-D의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source, OA: 25%)	45
Fig. 13 시나리오-D의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source, OA: 50%)	46
Fig. 14 시나리오-D의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source, OA: 75%)	46
Fig. 15 시나리오-D의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source, OA: 100%)	47
Fig. 16 시나리오-D의 오염지역 (오염원 발생 지점: N-Source)	49
Fig. 17 시나리오-E의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source, OA: 0%)	50
Fig. 18 시나리오-E의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source, OA: 25%)	50
Fig. 19 시나리오-E의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source, OA: 50%)	51
Fig. 20 시나리오-E의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source, OA: 75%)	51
Fig. 21 시나리오-E의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source, OA: 100%)	52
Fig. 22 시나리오-E의 오염지역 (오염원 발생 지점: U-Source)	54
Fig. 23 시나리오-F의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source, OA: 0%)	55
Fig. 24 시나리오-F의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source, OA: 25%)	55

Fig. 25 시나리오-F의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source, OA: 50%) ...	56
Fig. 26 시나리오-F의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source, OA: 75%) ...	56
Fig. 27 시나리오-F의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source, OA: 100%) ·	57
Fig. 28 시나리오-F의 오염지역 (오염원 발생 지점: 2nd-Source)	59



A study on the risk assessment of contaminant spreading by the ventilation system of ships

Young Hoon Sim

Department of Energy Plant Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

With an improvement in the income levels of people in modern times, their interest in environment and health related issues has also increased. Therefore, the Korean government has endeavored to limit the amounts of contaminants generated and manage the indoor air quality in multiple use facilities and multi-unit dwellings in accordance with the “Indoor Air Quality Standard Administration law for Public Facilities” . However, there are no separate laws concerning such activity areas on ships and marine structures.

In this study, we predicted the diffusion characteristics of the contaminants released by a ship’s ventilation system, and a risk assessment was performed based on the assumptions that environmental contamination occurred and that the contaminants contained fatal nerve agents. In addition, this study used CONTAM 3.2, which is a multizone

airflow and contaminant transport analysis software developed by the National Institute of Standards and Technology of the US (NIST), and is an internationally recognized program.

To evaluate the diffusion characteristics of the contaminants from the ship's ventilation system, the contaminants, the location of occurrence of contamination, and input rate of outside-air flow were used as the prime variables.

The targeted contaminants were benzene and sarin gases, and the places at which these contaminants were found were: the high deck, the middle deck, and the lowest deck. The following five cases of input rate of outside-air flow were considered: 0%, 25%, 50%, 75% and 100%.

Scenarios A, B and C evaluated the characteristics of contaminants spreading on the entire deck, and scenarios D, E and F included the amounts and times of spread of contaminants along with their fatal amounts on each deck.

The time period within which the contaminants were removed was 20-70 minutes depending on the cabins where contamination occurred, and it was affected the most by the change in the input rate of outside-air flow in the Navi.&.Bri decks. The density of the contaminants was lower in the higher decks than in the lower decks by 3 times; however, the number of contaminated decks and places was more by over 1.5 times. The contaminants in the higher decks spread faster than in the lower decks; therefore, the higher decks were considered more dangerous.

The results of this study are expected to be used as base data for heating, ventilation, air conditioning, and improvement of air quality in ships.

KEY WORDS: Ship 선박; Contaminant 오염물질; Diffusion characteristic 확산 특성; CONTAM 3.2.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

최근 현대인들이 실내생활 증가에 비해 건축자재의 화학물질 사용 확대 등으로 인한 실내오염발생원 증가와 함께 환기부족 등으로 실내 공기오염이 심화되고 있다. 또한 각종 산업 분야에서 에너지 절감 및 효율을 높이기 위하여 실내 공간은 더욱 밀폐화되고, 복합 화학물질로 구성된 건축자재의 사용이 증가함에 따라 새집증후군, 주택의 실내 환경오염, 건물증후군과 같은 각종 실내 환경 문제가 제기되고 있다.

미국의 경우 실내공기오염을 미국이 직면한 가장 시급히 처리해야 할 환경문제 중 하나라고 보고 실내공기질에 대한 연구를 권장하고 지원하기 시작하였으며, 우리나라도 국민들의 환경에 대한 인식이 향상됨에 따라 대기오염 못지않게 새로운 환경문제로서 실내공기오염에 대한 관심이 증가하고 있다. 실내공기오염의 중요성은 인간이 실내에서 생활하는 시간이 하루 중 90% 이상을 차지하고 있으며, 실내공기질은 실외와는 달리 실내의 오염원과 실외오염물질의 유입에 의해 오염될 경우 쉽게 정화되지 않아 쾌적한 실내 환경의 저해요인이 될 뿐만 아니라 재실자들의 건강까지도 위협하게 되기 때문이다.

실내오염의 실례로 빌딩증후군(SBS, Sick Building Syndrome) 문제는 건물 내 거주자들이 일시적 또는 만성적인 건강과 관련된 증상을 호소하면서 비롯되었다. 그 원인물질로는 사람들의 여러 가지 실내 활동, 실내건축에 사용되는 마감재료, 생활용품 등에서 배출되는 것으로 주요 오염물질로는 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 이산화질소(NO₂), 아황산가스(SO₂), 오존(O₃), 미세먼지(PM10), 중금속(Heavy metal), 석면(Asbestos), 휘발성 유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds), 포름알데히드(HCHO), 미생물성 물질(Microbic substance), 라돈

(Radon) 등이 있다. 특히, 현대인들의 생활수준 향상과 더불어 쾌적한 환경과 건강을 더욱 요구할 것으로 예상되며, 발암성을 갖는 실내공기오염물질(라돈, 석면, 벤젠 등)에 대한 관심이 증대되어 이에 대한 연구와 관리정책이 시급히 요구된다.

이에 우리나라 정부는 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법(환경부, 2014)”에 의해 다중이용 시설 및 공동주택의 실내공기질 및 실내 오염물질의 발생량에 대해 관리하고 있다. “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”에서 규정하고 있는 실내공간은 지하역사, 지하도상가, 터미널(자동차, 공항, 항만), 도서관, 박물관, 의료기관, 실내주차장, 공동주택 등 육상 시설에 국한되어 있다. Table 1과 같이 적용 대상을 17개 시설군으로 확대하였지만 최근 수요가 증가하고 있는 선박을 비롯한 해상구조물 내 활동공간에 대해서는 따로 법으로 규정하고 있지 않다.

Table 1 다중이용시설 실내공기질관리법의 적용대상

시 설 명	규 모
지하역사	모든 지하역사
지하도상가(지상건물에 딸린 지하층의 시설제외), 여객자동차터미널, 철도역사의 대합실, 실내주차장(기계식 주차장 제외)	연면적 2천m ² 이상
공항시설중 터미널	연면적 1천5백m ² 이상
항만시설중 터미널	연면적 5천m ² 이상
도서관, 박물관, 미술관	연면적 3천m ² 이상
의료기관(입원진료병상이 100개 이상)	연면적 2천m ² 이상
지하에 위치한 장례식장, 국공립 보육시설, 노인의료보호 시설중 국공립 노인전문요양시설·유료노인전문요양시설·노인전문병원	연면적 1천m ² 이상
찜질방	연면적 1천m ² 이상
산후조리원	연면적 5백m ² 이상
대규모점포	모든 대규모점포

선박은 일반 건축물에 비해 기밀성이 매우 높고, 선박 내부 공기와 외부공기의 자연스러운 환기가 발생하기 어렵다. 그렇기 때문에 선내에 존재하는 다양한 오염물질은 적절한 환기 혹은 제거과정이 없을 경우 빠른 속도로 선내로 쉽게 확산되어 오염 농도가 가중되며 장시간 오염물질에 노출될 가능성이 높아져 승조원의 작업효율 저하뿐만 아니라 건강까지도 해칠 우려가 높아진다.

일반인들의 생각과는 달리, 승조원들은 항해 중이거나 선상 근무 시 오랜 시간을 선내에서 보내기 때문에 육상 생활자보다 실내 체류시간이 길다. 그래서 선박의 실내공기질은 승조원의 근무환경을 개선하고 승선자의 건강을 지켜주기 위한 매우 중요한 요소이다.

FTA(Free Trade Agreement, 국제자유무역)에 의한 해상물동량 증가로 승조원의 승선시간이 증가하고 있으며, 승선시간이 긴 크루즈선과 해양플랜트에 대한 기술개발은 수행되고 있으나 아직까지 선내 거주성능 및 환경에 대한 인식과 연구는 매우 부족한 실정이다.

1.2 기존연구 고찰

인간에게 유해한 대표적 환경오염물질 중 일산화탄소(CO)는 질식성 가스이고, 이산화질소(NO_2)와 폐질환의 원인으로써 사망 등 치명적 상해를 일으킬 수 있으며, 대표적 휘발성유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds)인 벤젠, 에틸벤젠, 톨루엔, 자일렌, 스티렌 등에 장시간 노출될 경우 마취증상, 호흡장애, 혈액장애, 의식불명, 성장장애가 발생할 수 있다는 의학적 연구 성과를 확인 하였다. 선박의 오염물질에 관련된 연구는 대부분 선박에서 배출하는 배기가스에 대한 연구이고, 선내의 환기 및 공기질 등 실내 환경에 대한 연구는 국내에서 매우 부족한 실정이다.

선실내 공기질에 관해서는, (도근영 등, 2007) 운항실습선을 대상으로 선박 승선자들의 선내공기 오염물질에 대한 노출을 평가하여 보다 쾌적한 선박환경의 조성과 선박 등의 특수 실내 환경에 대한 실내공기질 관련법의 확대 및 제정에 있어 근본적인 기초자료를 제공하기 위해 선박 내부의 공기질을 측정하였다. 측정 결과 선내 공기질은 이산화황을 제외한 오염물질의 농도는 대체적으로 양

호하다고 분석하였다. 또한 (신동걸 등, 2007) 운항실습선을 대상으로 환경 실태조사를 통해, 시너 작업시간을 제외한 시간대의 TVOC 농도는 평균 80ppb로 측정되어 환경부 권고기준을 만족하는 것을 확인 하였다. 그러나 시너 작업을 한 공간은 2nd 데크였으나 복도와 계단을 통하여 상부 데크로 급속히 전파되어 실내공기를 악화시키고 있음을 확인 할 수 있었다. 단지 별도의 공조계를 운영 중인 기관실은 항상 환경부 권고기준을 만족하고 있는 것으로 측정 되었다.

이와 같이 선박에서의 실내공기오염 관련 연구는 관점이 대부분 실측 평가 혹은 일정 장소의 구조적 형태에 중점을 두고 있다. 그에 반해, 육상 건물을 대상으로 한 연구 중에서는 오염원의 확산특성, 제어방안, 제거방안 등에 관련된 연구가 다수 있다.

(황치현, 2014)은 멀티존 시뮬레이션(CONTAM)을 사용하여 생물안전 3등급 연구시설 설치 기준에 따른 설계에 대한 적격성을 평가하였다. BSL3 연구시설의 설치 기준에 따른 설계에 대한 적격성 평가하기 위해 초기 설계된 불안정한 실압과 차압에 대한 문제를 해결하고 급, 배기량을 조정하여 존(Zone)에 설치된 문의 기밀도에 따라 멀티존 해석을 수행 하였다. 설계 변경된 안에 대해서 3가지 시나리오를 설정하고 Influenza A 바이러스 확산에 대하여 설계검증을 위한 해석을 수행한 결과, 실간 확산된 바이러스들은 설정된 높은 음압에 따른 차압이 형성되어 점차적으로 제거할 수 있음을 확인할 수 있으며, 인접한 실에 확산되지 않음을 확인하였다.

또한 (이현우, 2007)는 국내 청사건물을 대상으로 바이오테러가 발생시, 실내 미생물오염의 거동과 제거를 알아보기 위하여, 대상 건물에 대하여 멀티존 모델을 구성하고 바이오테러 시나리오 A, B, C에 따라 시뮬레이션 연구를 진행하였다. 바이오테러 시나리오는 탄저균을 사용한 바이오테러가 대상건물의 1층 외기 도입구에서 발생하는 시나리오 A, 탄저균을 사용한 바이오테러가 2~3층에 걸쳐있는 대공간(Hall)에 발생하는 시나리오 B, 탄저균을 사용한 바이오테러가 7층의 공조기 내부에 발생하는 시나리오 C로 수립하여 연구를 수행한 결과, 탄저균을 사용한 바이오테러가 1층 외기 도입구에서 발생하는 시나리오 A의 경우 코어부분을 통하여 건물 전체의 모든 공간으로 확산되는 것으로 나타났다.

이와 같은 결과들로 부터 필터와 UVGI15의 고성능 미생물오염원 제거장치를 설치하면 효과적으로 미생물오염의 확산을 방지할 수 있는 시나리오 A와 시나리오 C의 경우는 효과적으로 미생물오염의 확산을 방지할 수 있을 것으로 판단하였다.

(최상곤 등, 2006)은 환기해석 프로그램인 CONTAM을 사용하여 향후 현장실험이 어려운 실내 미생물오염 문제와 이를 방지하기 위한 면역기술의 적용에 대한 설계 및 평가의 도구로서 활용하기 위하여 실내 미생물오염 전파방지를 위한 해석방법으로 멀티존 모델에 관한 연구를 진행하였다. 실험실에서 진행된 미생물오염원 살균실험결과 멀티존 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 살균율이 서로 일치 하였고, 보균자 모델은 재실공간에서 재실자가 공기 전염성 병에 오염되었을 경우를 근사적으로 모사할 수 있는 결과를 확인하였다. 또한 실의 크기 및 재실시간 등의 변화에 대한 멀티존 모델에 의한 오염원제거 특성은 재실 스케줄에 따라 각 실에 확산되는 오염원에 대해 비교적 잘 부합되는 결과를 도출하였다. 이러한 결과 향후 이 연구에서 모델링한 각종해석 모델들을 이용하여, 재실공간에서의 미생물오염 문제와 오염원제거 및 미생물오염원의 이동에 따른 환기설계 활용 등 현장에서는 직접 실험하기 어려운 상황을 시뮬레이션으로 신뢰성 있게 해석할 수 있다고 판단되며, 이와 같은 멀티존 모델링기법이 면역건물기술의 실제적용에 대한 설계 및 평가의 도구로서 활용될 수 있을 것으로 판단하였다.

(김일영, 2015) 연구의 목적은 환기가 잘되지 않는 밀폐계단구조의 제연설비가 설치되어 있는 아파트를 대상으로 비상엘리베이터 홀의 환기성능을 제연덕트를 이용한 환기시스템을 적용하여 개선하고자 하였다. 환기 및 제연성능의 검증방법으로는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램의 하나인 CONTAM을 이용하였다. 향후 제연설비가 설치된 많은 건축물에 폭넓게 적용이 된다면 환기가 되지 않아 불편하였던 엘리베이터 홀의 환기가 가능하여 안전하고 쾌적하며 편리한 생활환경이 제공하게 될 것이라 언급하였다.

1.3 연구 목적과 방법

실내공기질은 건물구조, 환기실태, 지역, 계절 등에 따라 다양하게 변화될 수 있다. 일반적으로 실내공기 오염은 인간활동, 생활 및 사무용품, 건축자재, 오염된 대기의 유입 등으로 발생된다.

선박은 육상의 건물들과 달리 구조적인 특수성 때문에 자연환기 보다는 대부분 기계식 환기방식을 통해 실내공기와 외부의 공기를 순환한다. 선박에서도 실내환경 및 승선자의 특성과 노출시간 등을 고려한 실내공기오염물질의 권고기준 설정 및 선내의 공기질 유지를 위한 적정 공조설비 기준이 반드시 필요하다. 하지만 아직까지 국내에서는 선박을 포함한 해상구조물과 같은 곳에서의 실내공기질에 대해서는 관리를 하지 않고 있다.

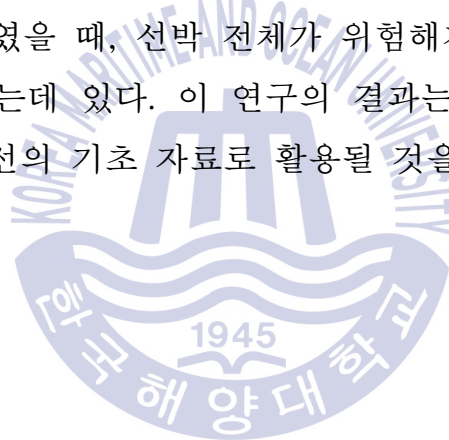
모든 선박의 선원이나 승객은 거의 대부분의 시간을 기밀화된 선실에서 생활하고 있으며, 선실에는 휘발성유기화합물질이 많이 방출되는 가구, 벽지, 장판, 페인트 등으로 구성되어 있다. 또한 휘발성유기화합물질을 많이 포함하고 있는 페인트를 이용하여 선박의 부식방지를 위한 작업이 수시로 이루어지고 있고, 바닥 청결유지를 위해 시너(Thinner)를 사용하여 구두 자국 등 이물질을 제거하고 있어, 선박의 선실 주위에는 항상 오염물질이 유입될 가능성이 매우 높다.

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)은 실내·외 공기 중에 존재하는 수많은 종류의 유기화합물질을 총칭한다. 휘발성유기화합물질은 증기압이 높아 대기 중으로 쉽게 증발되고, 주로 발생물질은 벤젠, 톨루엔, 자일렌, 에틸렌, 스티렌, 아세트알데히드 등이 있다. 피부 접촉이나 호흡기 흡입 등을 통해 인체에 노출되며, 노출될 경우 피로감, 정신착란, 두통, 구토, 현기증을 일으키며 신경계에 장애를 일으키기도 하고 심한 경우에는 암을 유발하기도 한다.

이에 이 연구에서는 미국국립 표준연구소(NIST)가 개발하여 세계적으로 그 성능을 인정받고 있고, 멀티존 해석 프로그램인 CONTAM 3.2를 사용하여 선박에서의 오염물질 확산특성에 대해 해석을 수행하였다. 연구의 대상 선박으로는 전문 해기사 양성을 목적으로 2005년 12월에 건조된 운항실습선으로 정하였고,

시뮬레이션의 시나리오는 오염원의 종류, 오염원의 발생 장소에 따라 6개로 구성하였다. 오염원의 종류는 환경오염물질 중 VOC, 신경계 작용제 중 사린가스로 선정하였으며, 오염원의 발생장소는 최상부 데크, 중간 데크, 최하부 데크에서 각각 발생하였다고 가정하였다. 또한 각각의 시나리오마다 선박에 공급하는 신선외기도입율을 설계용량 대비 0%, 25%, 50%, 75%, 100%로 나누어 오염물질이 확산되는 특성을 예측하고 그 위험성에 대해 평가 하였다. 환경오염물질에 대해서는 확산특성을 파악하는데 중점을 두었고, 신경계 작용제인 사린가스에 대해서는 운항실습선 선내 전체가 위험해지는 양과 시간을 예측해 그 위험성을 확인 하였다.

이 연구의 최종목적은 육상건물 구조와는 달리 고기밀성의 특수한 구조를 가진 선박에서 오염물질이 발생하였을 때, 선박이 가지고 있는 환기시스템에 따라 오염물질이 얼마나 빠르고 넓게 확산되는지에 대한 특성을 파악하고, 치명적인 오염물질이 발생하였을 때, 선박 전체가 위험해지는 양과 시간에 대해 파악해 위험성을 예측해보는데 있다. 이 연구의 결과는 향후 선박의 공조설비설계와 선내공기질 환경개선의 기초 자료로 활용될 것을 기대한다.



제 2장 이론적 배경

2.1 오염물질

“오염물질”이라 함은 실내공간의 공기오염의 원인이 되는 가스와 떠다니는 입자상물질 등으로서 환경부령이 정하는 것을 말한다. 건축자재나 가구에서 발생하는 휘발성유기화합물(VOCs)과 포름알데히드(HCHO) 등이 있다.

실내에서 발생하는 오염물질로는 입자상 오염물질과 가스상 오염물질, 병원성세균 등으로 크게 분류할 수 있다. 입자상 오염물질로는 미세먼지(PM10), 중금속(Heavy metal), 석면(Asbestos) 등이 있으며, 가스상 오염물질로는 물질의 연소과정에서 주로 발생하는 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂), 아황산가스(SO₂)와 사람의 호흡에 의해 발생하는 이산화탄소(CO₂) 그리고 건축자재에서 많이 발생하는 휘발성유기화합물(VOCs), 포름알데히드(HCHO), 라돈(Radon), 악취(Odor) 등이 있다. 또한, 병원성세균(Microbe)으로는 실내공기 중에 부유하는 부유세균과 낙하세균 등이 있다.

실내공기 오염물질의 발생원으로는 연소과정, 인간의 활동, 오염된 외부공기의 실내유입 등이 있으며, 최근에는 신축아파트의 경우 건축물의 밀폐화와 단열화를 위해 사용되는 내장재와 바닥의 소음 저감을 위해 사용하는 카펫트 등의 건축자재로부터 수많은 유해화학물질이 발생되고 있고 건축물의 유지와 관리 등 일련의 과정에 사용되는 방향제, 목재 보존제, 왁스 등도 실내오염의 중요한 발생원이다. 또한 가구, 방향제, 살충제, 세정제, 향수, 화장품 등 각종 생활용품에서도 포름알데히드 및 휘발성 유기화합물과 같은 오염물질들이 배출된다. 이러한 실내오염물질은 사람들의 호흡기와 순환기에 영향을 미치며, 특히 휘발성유기화합물 중의 일부 물질은 발암성을 내포하고 있다. Table 2는 생활용품에서 발생하는 주요 오염물질들의 발생원에 대해 정리한 것이다.

Table 2 생활용품에서 발생하는 주요 오염물질

발생원		오염물질
생활용품	난방기구 (가스, 석유 등)	CO ₂ , CO, 암모니아, NO, NO ₂ , VOC
	가습기, 공기정화기	세균, 곰팡이, 바이러스, 오존
	방향제, 살충제, 세정제	포름알데히드, VOC
	의류	미세먼지, 세균, 곰팡이, VOC
	화장품	VOC
	사무기기(복사기 등)	오존, 포름알데히드, VOC
	가구	포름알데히드, 트리클로로에틸렌(TCE)
건축자재	벽지, 바닥재, 접착제, 페인트, 단열재 등	포름알데히드, VOC, 라돈

국내외 다중이용시설의 실내공기질의 규제 및 권고기준 기준을 Table 3에 정리하였다.



Table 3 실내공기질의 국내외 규제 및 권고기준 비교

		한국	미국	일본	홍콩	캐나다	WHO
일 반 오 염 물 질	미세먼지	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	이산화탄소	1,000 ppm	3,500 ppm	1,000 ppm	1,000 ppm	3,500 ppm	-
	포름알데히드	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	총부유세균	800 CFU/ m^3	-	-	1,000 CFU/ m^3	-	-
	일산화탄소	10 ppm	9 ppm	10 ppm	8.7 ppm	10 ppm	10 mg/ m^3
	이산화질소	0.05 ppm	0.05 ppm	-	80 ppb	11 ppm	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	라돈	4.0 pCi/L	4.0 pCi/L	-	200 Bq/ m^3	800 Bq/ m^3	100 Bq/ m^3
	TVOC	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-
	석면	0.01 개/cc	-	-	-	-	-
	오존	0.06 ppm	50 ppb	-	61 ppb	20 ppb	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
개 별 V O C	벤젠	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	-	16.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	톨루엔	1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,092 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2,300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	에틸벤젠	360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	3800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,447 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	3,800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	자일렌	700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	870 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,447 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	1,447 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	스티렌	300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	-	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

2.1.1 환경 오염물질

2.1.1.1 휘발성 유기화합물

휘발성 유기화합물은 증기압이 높아 대기 중으로 쉽게 증발되고, 물질에 따라 인체에 발암성을 보이고 있으며, 대기 중에서는 광화학 반응을 일으켜 오존 등에 광화학 산화성 물질을 생성시켜 광화학 스모그를 유발하는 물질로 많이 알려져 있다. 실내에서 휘발성유기화합물의 발생원은 건축자재와 마감재료, 건물의 유지 관리 용품(청소용, 각종 세척제 등), 소모성 재료(복사기의 토너), 연소과 정의 물질, 재실자의 활동, 외부공기 등으로 구분할 수 있다.

실내에서 휘발성유기화합물의 농도가 증가하는 주요 원인은 건축자재와 시공의 측면에서 보았을 때 복합 화학물질을 이용한 새로운 건축자재의 보급과 시공과정에서 적정량 이상의 접착제 사용 등을 들 수 있습니다. 건축자재에서는 시공 후 초기단계에서 다량의 오염물질을 방출하게 되며, 시간의 경과에 따라 방출량이 점차로 감소됩니다.

고농도의 휘발성유기화합물에 노출되었을 때의 영향으로는 급성장애와 만성장애가 있다. 급성장애로는 독성작용으로 중추신경계를 억제하는 마취작용이 있으며, 급성장애의 증상으로는 지각력상실(시간, 장소, 사람들을 알아보는 정신 기능의 장애), 도취감, 현기증, 혼돈이 발생하고 노출 농도가 점차 심해지면 의식의 상실과 마비, 경련, 그리고 사망에 이르게 된다. 그밖에 눈, 피부, 호흡기 점막의 자극 증상을 나타내기도 한다. 만성장애로는 중추신경계의 장애와 말초신경계의 장애가 있는데 중추신경계의 장애는 휘발성유기화합물에 의한 비특이적인 중추신경계 작용으로서 급성적으로 나타나는 마취작용 외에 만성적인 신경행동학적 장애를 들 수 있다. 중추신경계의 장애로 인한 증상으로는 감각이상, 시각 및 청각 장애, 기억력 감퇴, 작업능률 저하, 수면장애, 혼돈, 신경질, 불안, 우울, 무관심 등의 정서장애를 보이고 사지 무력감, 조화 운동의 저하, 피로 등과 같은 운동장애가 발생한다. 개별 휘발성유기화합물들의 종류, 특징 및 인체의 영향은 Table 4와 같다.

Table 4 휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds: VOCs)

종류	내용
벤젠 (Benzene)	벤젠은 발암성 물질로 호흡을 통해 약 50%가 인체에 흡수되며, 아주 적은 양이지만 피부를 통해 침투되기도 하는데, 체내에 흡수된 벤젠은 주로 지방조직에 분포한다. 급성중독이 될 경우는 마취증상이 강하게 나타나며, 호흡곤란, 불규칙한 맥박, 졸림 등을 초래하여 혼수상태에 빠지게 된다. 만성중독이 될 경우 혈액장애, 간장장애, 빈혈, 백혈병과 같은 증상이 나타날 수 있다.
에틸벤젠 (Ethylbenzene)	에틸벤젠의 주요 인체노출 경로는 호흡을 통한 노출이며, 실내 주된 오염원은 담배연기로 알려져 있습니다.
톨루엔 (Toluene)	톨루엔의 체내 흡수는 주로 흡입에 의해 이루어지고, 흡입 후 체내에 남아있는 양은 40~60% 수준이다. 체내에 흡수된 톨루엔은 지방세포, 부신, 신장, 간, 뇌에 주로 분포하며, 피부, 눈, 목 등을 자극한다. 또한 두통, 현기증, 피로, 평형장애 등을 일으키며, 고농도에 노출될 경우 마비상태에 빠지고 의식을 상실하며 때로는 사망에 이르기도 한다.
자일렌 (Xylene)	고농도 자일렌을 흡입할 경우 현기증, 비틀거림, 졸림, 감각상실 등이 나타나고, 폐부종, 식욕감퇴, 떨림, 구토, 복부 통증 등의 증상이 나타날 수 있다.
스티렌 (Styrene)	스티렌 증기에 단기간 노출될 경우 눈, 피부, 코, 호흡기에 자극을 주며, 높은 농도에서는 졸리거나 혼수상태를 유발한다. 장기간 많이 노출되면 신경, 신장, 폐, 간에 영향을 준다고 알려져 있다.

2.1.1.2 포름알데히드(HCHO)

자극성 냄새를 갖는 가연성 무색 기체로 살균제나 방부제로 사용되고 피혁 제조나 사진, 간판, 폭약 등의 제조에 이용되며, 석탄계, 요소계, 멜라민계, 합성수지 제조 등 공업용으로 널리 사용된다. 특히 포름알데히드의 단열재나 섬유옷감, 실내가구, 바닥재, 난방연로의 연소과정, 흡연, 생활용품, 의약품, 접착제에서 주로 발생한다. 건축자재에서 발생된 포름알데히드는 건축자재의 수명, 실내온도 및 습도 그리고 환기율에 따라 그 방출량이 영향을 받으며, 일반적으로 포름알데히드는 낮은 습도에서 단시간 노출되었을 때 눈, 코, 목 등에 가려움을 느끼고 장시간 노출되었을 경우에는 기침, 구토, 어지러움, 두통, 불면증, 피부질환 등을 유발한다. 또한, 기관지 천식에도 영향이 있으며, 동물실험 결과 발암성도 있는 것으로 나타났다.

Table 5 포름알데히드의 특성 및 인체영향

분류	내용
물리화학적 성질	· 자극성 냄새, 무색의 기체 · 연소 시 일산화탄소 같은 유독가스와 증기가 발생 · 강한 산화제 및 알칼리 물질과 접촉하면 불이 나고 폭발
오염원	· 바닥재, 접착제 등 건축자재, 파티클보드, 합판 등을 사용한 가구, 싱크대 등 생활용품
노출경로	· 흡입, 눈 또는 경피 흡수

Table 6 포름알데히드의 농도별 인체영향

농도 [mg/m ³]	인체영향
0.1 ~ 5	눈의 자극, 최루성, 상부기도의 자극
1이하	눈, 코, 목의 자극
0.25 ~ 5	기관지 천식이 있는 사람에게는 심한 천식발작
10 ~ 20	기침, 머리가 무거움, 심장박동이 빨라짐
50 ~ 100	폐의 염증, 사망, 구토, 설사, 현기증, 경련, 의식불명

2.1.1.3 일산화탄소(CO)

일산화탄소는 탄소를 포함하는 모든 물질의 연소과정에서 발생하는 것으로, 물질의 연소 시 산소가 부족하거나 연소 온도가 낮은 상태에서 완전 연소가 일어나지 못하는 경우 불완전 연소 생성물로 생성된다. 일산화탄소는 체내에 산소를 운반하는 역할을 하는 혈액중의 헤모글로빈과 결합하여 일산화탄소-헤모글로빈을 만들어 혈액의 산소 운반 능력을 저하시키는 작용을 하므로, 과도하게 노출될 경우 사망에 이를 수 있다. 일산화탄소의 급성 중독은 뇌조직과 신경계통에 가장 많은 피해를 가져오며, 증상은 시야감소, 정신적 영향(불쾌, 피로촉진), 생리적 영향, 중독피해, 심폐환자의 병세악화 등이 있다. 만성적으로는 성장장애, 만성 호흡기질환(폐렴, 기관지염, 천식, 폐기종)등의 영향을 미치게 된다.

Table 7 일산화탄소의 특성 및 인체영향

분류	내용
물리화학적 성질	· 무색, 무미, 무취의 가연성 유독가스 · 헤모글로빈과 반응하여 COHb를 생성 · 친화력은 산소보다 270~300배 강함 · 강한 산화제와 접촉하면 불이 나거나 폭발함
오염원	· 유기연료의 불완전연소 · 실내 난방의 연료(가스, 석유, 석탄 등)
노출경로	· 호흡을 통한 인체 내 침입
인체에 미치는 영향	· 혈액의 산소운반능력을 방해하여 조직의 산소결핍을 초래 · 중추신경장애, 허혈증 · 일산화탄소로 인해 발생하는 저산소증은 두뇌, 심장, 혈관 내벽과 같은 조직에 산소공급 부족을 초래

Table 8 일산화탄소의 농도별 인체영향

농도 [ppm]	노출시간	인체영향
5	20분	신경계 반사작용 변화
100	3시간	체내 혈액 10% 기능 상실
200	5시간	격렬한 두통
300	8시간	사각, 정신기능의 장애
500	4시간	시력장애, 허탈감
2,000	2시간	사망
3,000~4,000	30분	사망 가능

2.1.1.4 이산화탄소(CO₂)

이산화탄소는 무색, 무미, 무취의 기체로 일반적으로 대기 중에 0.04%(400 ppm) 정도 포함되어 있으며, 주로 실내공기질 또는 환기상태의 척도로 사용되고 있다. 실내공간에서 이산화탄소의 농도가 증가하면 호흡에 필요한 산소의 양이 부족하게 되므로 일산화탄소와 함께 중요한 실내 오염물질 중의 하나로 취급되고 있다. 이산화탄소의 위생적인 허용기준은 0.1%(1,000 ppm)로 보고 있다. 실내에서 이산화탄소의 발생은 주로 재실자들의 호흡에 의하여 발생하게 되는데 사람들이 많이 모이는 곳에 가면 두통이나 권태, 현기증 등의 현상이 나타나는 것은 많은 재실자로 인하여 실내 이산화탄소의 농도가 증가하였기 때문이다. 그러나 이산화탄소 그 자체만으로는 인체에 큰 피해를 주지는 않아 중독을 일으키거나 신체장애를 일으키지는 않는다.

Table 9 이산화탄소의 특성 및 인체영향

분류	내용
물리화학적 성질	· 무색, 무취의 가스이나 액체나 고체도 존재 · 나트륨, 칼륨, 티타늄과 반응 시 발화 · 플라스틱, 고무류 및 피복제를 손상시킴
오염원	· 인간이나 동물의 호흡기로 배출 · 연료의 연소과정에서 생성
노출경로	· 호흡을 통한 인체 내 침입
인체에 미치는 영향	· 흡입 시 호흡과 맥박이 빨라지고 혈압 및 맥압이 상승 · 두통, 권태, 현기증, 구토, 불쾌감 등의 증상을 초래 · 발한, 이화감, 우울증, 시력장애 발생 · 15% 가벼운 정도의 대사 장애 · 7~10%에서는 수분 내 혼절

Table 10 이산화탄소의 농도별 인체영향

농도 [ppm]	증상
700	다수가 계속 재실하는 경우의 허용 농도
1,000	일반적인 경우의 허용농도, 환기계산에 사용되는 허용농도
2,000~5,000	상당히 불량한 상태로 경미한 두통 유발
5,000	매우 불량한 상태
40,000~50,000	호흡중추를 자극하여 호흡의 깊이, 회수를 증가시키며, 호흡시간이 길면 위험하고 O ₂ 의 결핍을 수반하여 장애가 두드러지게 되는 상태
80,000	10분간 노출 시 강한 호흡 곤란, 두통 발생, 의식 혼미
180,000 이상	치명적인 상태

2.1.1.5 이산화질소(NO₂)

이산화질소는 알칼리 및 클로로포름에 용해되는 자극성 냄새를 가진 적갈색 기체이다. 실내에서의 질소산화물은 취사용 시설이나 난방, 흡연 등에 의해 발생하며, 외부에서 유입되는 양도 상당량 존재 한다. 화석연료의 연소에 의해 발생하는 질소산화물은 인체에 유해한 영향을 끼치며, 실내에서의 이산화질소는 주로 취사용 프로판가스 기구의 사용, 흡연, 난방연료(나무, 석탄, 기름 등)의 연소로 발생된다. 일산화질소(NO)는 공기 중에 서서히 산화되어 이산화질소가 되는데, 실제로 건강에 장애를 주는 것은 이산화질소로써, 호흡할 때에 체내로 침입해서 폐포까지 깊이 도달하여 헤모글로빈의 산소 운반 능력을 저하시키고, 수 시간 내에 호흡곤란을 수반한 폐수종 염증을 일으키는 독성이 강한 물질이다. 또한, 점막 자극이 강하고 메트헤모글로빈을 형성하여 호흡기와 폐에 장애를 초래한다. 이산화질소는 일산화질소의 5~10배의 독성을 가지고 있다.

Table 11 이산화질소의 특성 및 인체영향

분류	내용
물리화학적 성질	• 적갈색의 발연성 액체 또는 기체, 독한 냄새가 남, 연소되지 않으나 강한 산화제임 • 가연성 물질, 암모니아 및 아황화탄소와 접촉 시 불이 나고 폭발함
오염원	• 자동차 배기가스 및 화석연료의 연소
노출경로	• 호흡을 통한 유입
인체에 미치는 영향	• 호흡 시 체내로 80~90%의 이산화질소가 흡수 • 호흡기 자극제 • 폐수종 및 폐생성 소기관지염을 일으킴 • 저산소증은 두뇌, 심장, 혈관내벽과 같은 조직에 산소 공급 부족을 초래

Table 12 이산화질소의 농도별 인체영향

농도	노출시간	인체영향
0.08~0.1	7~8년	아동의 급성 호흡기 질환 발생률 증가
0.11	1시간	기도과민성 증가(천식 환자)
1.0	-	폐기능 검사상 폐 환기 기능장애
1.6~2.0	15분	기도저항 증가(정상인 및 만성기관지염 환자)
5.0	10분	기도저항 증가
100~150	40분	사망

2.1.2 화학 작용제

화학 작용제란 생리학적 효과를 통하여 사람을 살상시키거나, 무력화 시키기 위한 목적으로 전쟁에서 사용하는 화합물로서 주로 독성 화학제(Chemical agent)를 말한다. 1969년에 발간된 UN보고서에서는 화학 작용제를 ‘사람, 동물 및 식물에게 직접적인 독성 효과를 주기 위해 사용되는 기체, 액체 또는 고체 상태의 화학물질’ 이라고 정의하고 있으며, 화학무기 금지협약(CWC, Chemical weapons convention)에서는 ‘독성화학물질과 그 원료물질’로 정의하고 있다.

Table 13 대표적인 화학 작용제

작용제 구분	명칭	무능화 성능		치사 성능		
		독성	반응 소요 시간	독성		반응 소요 시간
		호흡 [mg · 분/m ³]		피부접촉 [mg · 분/m ³]	호흡 [회]	
신경제	사린	55	1~10분	12,000	100	2~15분
	소만	25	1~10분	10,000	70	1~15분
	VX	5	1~10분	1,000	36	4~10분
혈액제	시안화 수소	-	-	-	5,000	1~15분
질식제	호스겐	1,600	3~12시간	-	3,200	3~24시간
수포제	겨자	200	4~6시간	10,000	1,500	4~24시간

일반적으로는 그 효과에 따라 분류되는데 신경작용제(Nerve agent), 혈액작용제(Blood agent), 질식작용제(Choking agent), 수포작용제(Blister agent) 등이 있다. Table 13은 대표적인 화학 작용제들의 무능화 성능 및 치사 성능을 정리한 것이다.

신경작용제는 가장 강력한 독성 화학물질이다. 일반적으로 무색, 무취, 무미이며 호흡기 체계, 눈, 피부 및 소화계통에 아무런 자극 없이 흡수되어 신경계통에서 신경자극의 전달을 방해하여 신경계를 마비시키므로 중독 후 수분 내에 사망에 이르게 한다. 매우 독성이 강하며, 잠깐 노출될 경우에도 일반적으로 매우 치명적이다. 대표적인 신경작용제로는 사린(GB)과 소만(GD), VX가 있다.

혈액작용제는 주로 호흡을 통해 인체 내에 흡입되어, 혈액내의 산소를 운반하는 헤모글로빈의 헴(heme) 및 미토콘드리아의 시토크롬 산화효소-C의 헴과 결합하여 조직 내에 산소운반을 저해하므로 순식간에 사망하게 된다. 혈액작용제에는 시안화수소(AC), 염화시안(CK), 아르신(SA) 등이 있다.

질식작용제는 눈과 호흡계통을 공격한다. 이 작용제는 특히 폐에 해로운데, 액체로 가득차 부풀게 하여 더 이상 혈액순환에 산소가 공급되지 못하도록 한다. 이것은 점차 질식으로 결국 죽음에 이르게 한다. 대표적으로 호스겐(CG), 디포스겐(DP)이 있다.

수포작용제에 노출되면 즉시 상처와 고통이 발생하고 질식으로 인한 사망에 이를 수도 있다. 또한 피부에 접촉되어 흡수되었을 때, 화상과 같이 수포성 물집이 생겨 탈수되거나 이차감염으로 사망한다. 겨자가스(HD), 질소머스타드(HN)가 대표적인 수포작용제이다.

사린(Sarin gas)은 유기인화합물로 신경가스(신경제)의 일종이고, 세계 2차 대전 중 독일이 대량 살상으로 개발하였다. 사린은 액체와 기체 상태로 존재하는 독성이 매우 강한 화합물로 중추신경계를 손상시킨다. 무색, 무취, 무미이고 비등점이 147℃의 액체이지만 증기압이 높고 휘발성 크다. 그러나 공기보다 무겁기 때문에 공기 중에 체류하기 쉽다. 일본에서는 1994년 6월과 1995년 3월에 범죄로 다수의 사린중독자가 발생하여 사회적으로 큰 문제를 일으킨 적이 있었다(Okumura, et al., 2005).

호흡기, 눈, 피부를 통해 인체에 흡수되어 콧물, 눈물, 침, 땀을 많이 흘리고 호흡곤란, 시력저하, 메스꺼움, 구토, 근육경련, 두통 등의 증상을 보인다. 증상 발현이 빠르고, 기도폐쇄, 호흡근육마비 등이 발생할 경우 생명을 잃을 수 있어 위험한 기체이다. 처음엔 시력저하부터 시작된다. 이후 시신경을 마비시키며 계속되면 사망에 이른다. 한 방울(약2mg)만 인체에 튀겨도 죽을 정도로 독성이 강하다. 1m^3 의 대기 중에 100mg의 사린이 함유돼 있으면 30초만 지나도 95%가 15분 이내에 사망할 정도의 독성을 가지고 있다(Disraelly, et al., 2011).

사린은 자연 발생하는 경우는 없고 유기인 화합물과 나트륨 및 알코올계 물질을 반응시켜 제조하는 것으로 전해진다. 사린가스가 위험하고 무서운 점은 화학에 어느 정도 지식을 가진 사람이면 합성이 가능하다는 점이다. 영국의 화학 무기 전문가인 리즈대학 아리스테어 헤이 교수는 BBC-TV와의 회견에서 “사린 가스는 상점에서 살 수 있는 물건은 아니지만 화학에 대해 약간의 지식이 있는 사람이라면 누구나 제조 할 수 있고 재료를 구하기도 어렵지 않다.” 고 하였다.

2.2 오염물질 확산 이론

대기에 존재하는 오염물질들은 Fick's law에 따라 확산된다. Fick's law는 제1법칙과 제2법칙으로 구성되어 있다. 제1법칙은 확산 유량과 입자의 밀도의 변화량과의 관계를 기술한 법칙이다. 계의 무피가 일정하다는 조건 아래, 확산 유량(diffusion flux) J 는 농도구배와 비례하며, 그 비례 상수 D 를 확산계수(diffusion coefficient)라고 한다. 확산 과정은 시간에 종속되는 과정이며, 확산 속도는 확산 유량에 의해 구해질 수 있다. 제1법칙에서는 시간에 따라 J 가 변하지 않을 때의 정상상태의 확산으로 해석한다. 구동력(driving force)은 농도구배(concentration of diffusing)이며 Fig.1과 같다.

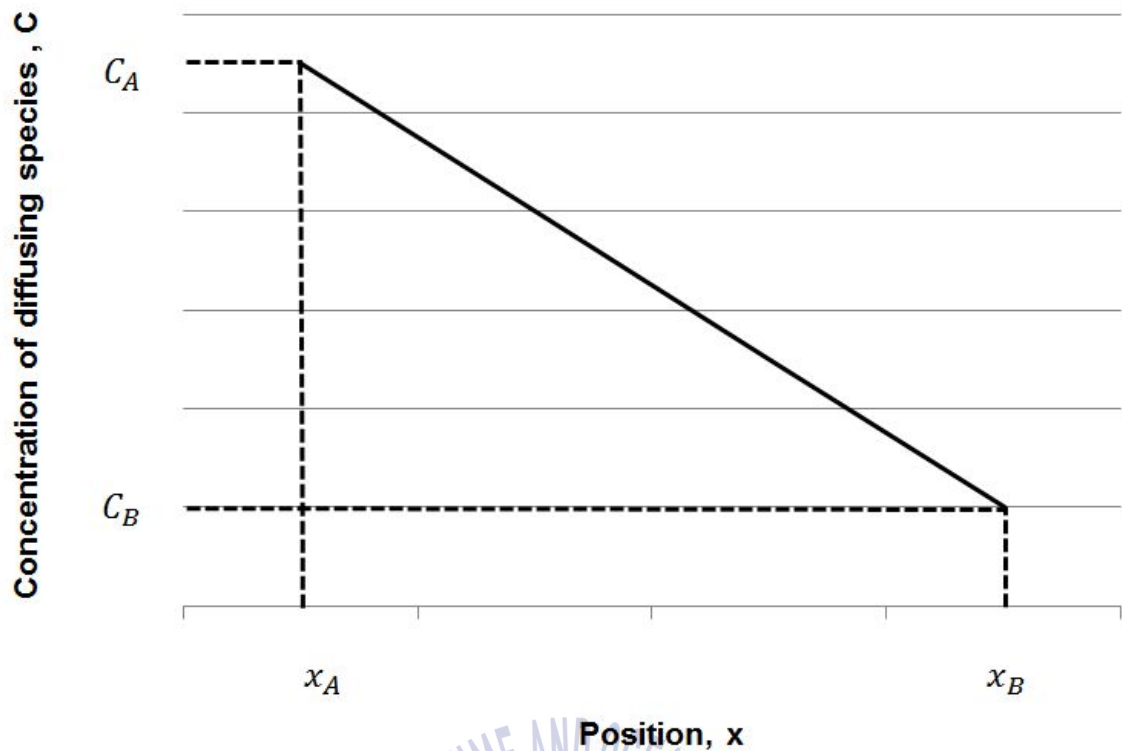


Fig. 1 비정상상태의 농도구배

또한, J 는 확산거리에 따른 농도구배에 비례하므로 식(1)과 같이 표현된다.

$$J = -D \cdot \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

제1법칙은 농도구배가 시간에 따라 변하지 않는 정상상태에 따르는 법칙으로, 실제 확산이 일어나는 비정상상태를 해석할 수 없다. 따라서 비정상상태의 해석을 하기 위해서는 제1법칙과 연속방정식으로부터 유도되는 밀도의 시간에 따른 변화를 나타내는 편미분 방정식인 제2법칙을 이용해야한다.

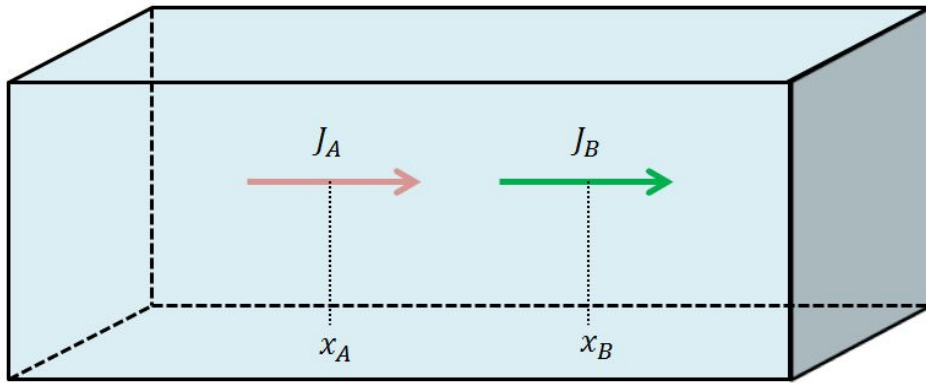


Fig. 2 정상상태의 확산 모식도

단위시간에 일정 체적을 지나는 용질량(mass)으로부터 식(2)에서

$$\Delta x \cdot A \cdot \Delta C = \Delta J \cdot \Delta t \cdot A \quad (2)$$

식(2)에 식(1)을 대입하여 미분하면 제2법칙인 식(3)을 얻을 수 있다.

$$\frac{dC}{dt} = D \cdot \frac{d^2 C}{dx^2} \quad (3)$$

제2법칙은 물리적 경계조건이 확립되었을 때 사용할 수 있다. 확산이 일어나기 전, 계 내에 확산원자들은 초기 농도구배 C_0 로 분포되어 있다. 변위 x 는 표면에서 0이고, 확산 계 안쪽으로 들어갈수록 증가한다. 계면 조건은 다음과 같이 정리 된다. C_0 는 확산이 시작하기 전, $0 \leq x \leq \infty$ 에서, $C = C_0$ 이고, 확산이 시작한 후, $x=0$ 에서 $C = C_s$, $x = \infty$ 에서 $C = C_0$ 가 된다. C_s 는 경계에서의 농도구배이다. 이러한 경계조건들을 제2법칙에 적용하여 식(4)을 얻을 수 있다 (Porter, 2014).

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (4)$$

C_x 는 확산깊이 x 에 따른 농도구배를 의미하고, $\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ 는 Gaussian error function으로 위와 같은 확산에 대한 일반식을 얻을 수 있다.

2.3 환기방식

환기란 실외로부터 청정한 공기를 실내에 공급하고, 실내의 오염 공기를 실외로 배출하여 실내의 오염 공기를 제거 또는 희석하는 과정을 말한다. 환기의 목적은 열, 수증기, 냄새, 분진, 유해 물질에 의한 실내 공기의 오염과 실내 산소 농도 등의 감소에 의한 재실자의 불쾌감이나 보건, 위생에 대한 위험성을 방지하고 산업 생산 공정이나 제품의 품질 관리에 있어서 주변 공기 환경의 악화로 부터 제품과 주변기기의 손상을 방지하는데 있다. 습기와 오염된 공기를 그대로 방치하면 응축하게 되어 건물 구조와 인체의 건강에 지속적인 손실을 주게 된다. 환기 방식에는 자연력을 이용하는 것과 기계력을 이용하는 것이 있으며 전자를 자연환기(natural ventilation)라 하며, 후자를 기계환기 또는 강제환기(mechanical or forced ventilation)라 한다. 또, 환기가 필요한 실을 전체 또는 부분적으로 환기하느냐에 따라 전체환기(general ventilation) 혹은 국소환기(local exhaust ventilation)로 나눌 수 있다(한국건설기술연구원, 2006).

2.3.1 자연식 환기 방식

① 풍압에 의한 자연환기

건물 벽면의 창, 틈새나 환기구 등의 개구부가 있으면 풍압이 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 공기가 흐른다. 이 경우 풍향이나 풍속에 의하여 환기량이 좌우되므로 건물에 환기구를 설치할 때는 부착 위치를 고려하여야 한다.

② 온도차에 의한 자연환기

실내·외의 온도차에 의해서도 환기가 생긴다. 실내의 공기 온도가 외기 온

도보다 높은 경우는 실내 공기의 밀도가 작아지므로 실내 공기는 부력을 발생시키고, 건물의 하부 측에서는 실내에 옥외의 공기가 유입되고, 상부 측에서는 옥외로 배출되는 현상이 나타난다.

자연력을 이용하므로 일정한 환기량과 제어가 어려운 단점이 있으나 동력비가 적게 들어 많이 이용하고 있으며 모니터 루프나 루프 벤틸레이터 등에 이용하고 있다. 기본적으로 창이나 문, 환기구 등을 이용하는 것으로 환기구의 위치와 크기에 따라 효과가 달라진다. 실내외의 온도차가 5℃ 이상이며, 2개 이상의 개구부가 상하로 나 있을 때 효과가 커진다.

2.3.2 기계식 환기 방식

원칙적으로 자연환기의 단점은 기계환기에 의해 보완 되어질 수 있다. 기계환기는 요구되는 환기량을 적절히 제공할 수 있고 거주자와 오염물 부하요구에 다양하게 응답할 수 있으며, 기후의 변화에 대응하기가 상대적으로 쉽다. 특히 최근 에너지 절약 등을 위하여 고층화 및 기밀화된 건축물에서 매우 효과적으로 적용할 수 있는 장점이 있다.

① 병용식 기계환기(제1종 환기)

송풍기와 배풍기를 이용하여 강제적으로 외기를 실내에 도입하고 오염된 실내 공기를 강제적으로 배출하는 방식이다. 이 방식은 가장 완전한 환기를 행할 수 있다. 또한 급기량과 배기량의 조절에 따라 실내의 기류 분포나 압력의 제어도 용이하다. 최근 일반 건물에서는 환기만 하는 경우는 드물며 공조설비에 포함되고 있다.

② 압입식 기계환기(제2종 환기)

송풍기에 의하여 강제적으로 외기를 도입하고 오염된 실내공기를 배기구나 개구부의 틈새에서 자연적으로 배출하는 방식이다. 이 방식은 실내의 기압이 정압으로 되므로 취기가 발생하는 방에 적용하면 건물 내에 취기가 확산하므로 바람직하지 않다. 그러나 다른 실에서의 오염된 공기의 침입을 방지할 수 있어 청정 환경실, 클린룸, 수술실 등에 유효하다.

③ 흡출식 기계환기(제3종 환기)

급기구나 개구부의 틈새에서 외기를 자연력에 의하여 실내에 도입하고, 오염된 실내 공기는 배풍기에 의하여 강제적으로 실외에 배출하는 방식이다. 이 방식은 실내의 기압이 부압으로 되므로 오염 공기가 다른 실에 누출하는 것을 방지할 수 있고 취기가 발생하는 ‘주방, 화장실, 축전지실’, 수증기를 발생하는 ‘욕실, 탕비실’, 유해가스를 발생하는 ‘실험실, 공장’ 등에 적합하다.

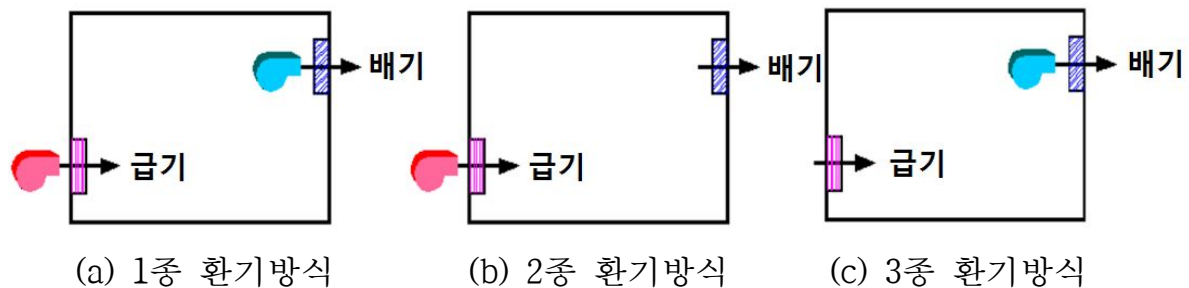


Fig. 3 기계 환기방식의 종류

2.3.3 혼합형 환기 방식(hybrid ventilation system)

자연 및 기계식 환기 설비를 적절히 조화시켜 환기성과 실내공기환경을 효과적으로 유지하면서 건물 에너지 소비량을 최소화할 수 있는 혼합형환기 방식이 최근 다양하게 개발, 보급되고 있다. 이 방식은 일반적으로 환기와 냉·난방이 동시에 요구되는 건물에 대한 에너지 절약적인 접근방법의 하나로 주로 사무소용 건물에 활용되었으나 최근 주거용 건물에 적용하기 시작되면서 재실자들에게 쾌적한 실내공기환경을 제공해주는 것뿐만 아니라 에너지 절약적인 측면에서도 적극적으로 검토 되고 있는 환기방식이다.

제 3장 시뮬레이션

3.1 해석대상 개요

3.1.1 선박의 개요

이 연구에서는 해기사 전문 인력 양성을 목적으로 2005년 12월에 건조된 실습선을 대상으로 연구를 수행하였다. Fig.4에 보이는 바와 같이 조타실과 학생 실습용 PC룸으로 구성된 Navigation and Bridge deck, 고급 승무원의 숙소와 비상탈출용 보트 승선장이 있는 Boat deck, 승무원, 사관식당, 세미나룸, 공조 및 환기 기계실 등이 있는 Shelter deck, 실습생 숙소와 식당 겸용 세미나실, 기관실 상부 등으로 구성된 Main deck, 실습생 숙소와 기관실 및 기관제어실, 실습생 숙소 등으로 구성된 2nd deck 까지 총 6개의 deck로 구성되어있다.

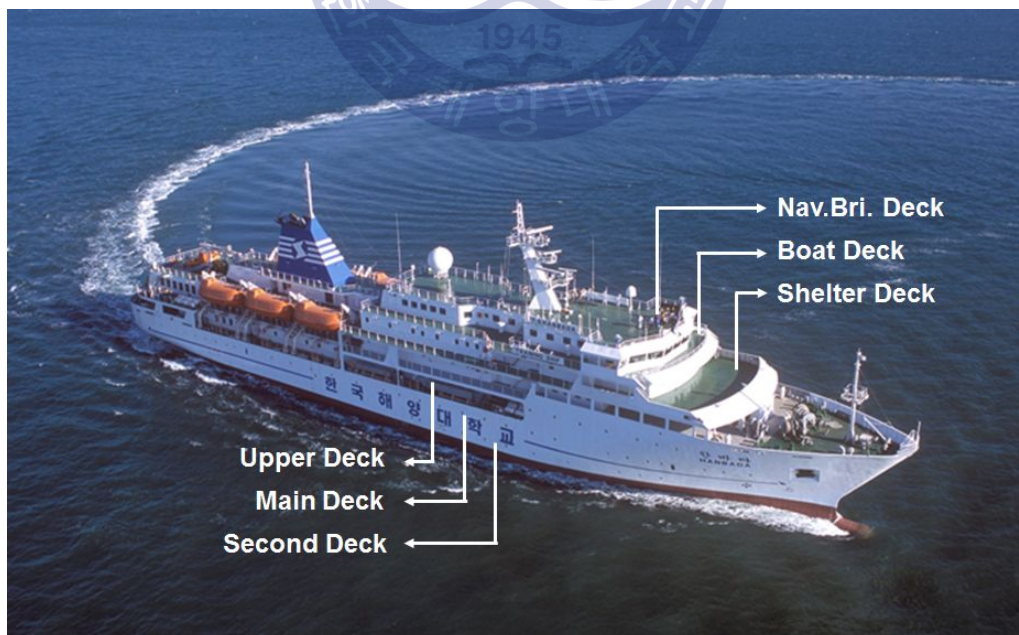


Fig. 4 운항실습선의 외관

실습선은 길이 117.2m, 폭 17.8m, 총톤수는 6,686톤이고 교수 및 승조원 42명과 훈련생 204명 등 총 246명이 승선할 수 있다. 이 실습선의 전반적인 개요는 Table 14와 같다.

Table 14 실습선의 주요 사양

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

실습선의 특성상 선교(실습 선교 포함), 기관실(실습 기관실을 포함), 강의실 등을 제외하고는 교수 및 사관구역, 승무원 구역, 학생구역으로 구분되어있으며 각 구역별로 식당 및 휴게실, 화장실, 샤워실, 세탁실 등의 편의시설이 배치되어 있다. 많은 인원의 원활한 통행을 위하여 복도의 폭은 1,400mm로 설계 되었고, 각 Deck별 주요배치는 Table 15와 같다.

Table 15 데크별 주요배치

구분	배치 내용
Navi.&Bri. Deck	선교, Multimedia Room
Boat Deck	세미나실, 선장실, 기관장실, VIP실, 교수실 (A)-(H), Doctor Room
Shelter Deck	사관식당, Ship's Office, 사관회의실, 항해사실, 기관사실 교육 교관실
Upper Deck	NO. 1 Lecture Room, No. 1 Reading Room, 현문당직실, 부원구역, 취사실, 학생실 (1)-(8)
Main Deck	NO. 2 Lecture Room, No. 2 Reading Room, 학생당직실, 학생실 (10)-(36)
2nd Deck	학생실 (37)-(52), 기관실, 냉장고, 체력단련실

3.1.2 선박의 공기조화 시스템

선박의 공기조화 시스템의 필요성은 선박이 처한 특수한 환경에 기인한다. 선박구조물은 육상구조물과 달리 고립된 해양환경에 처해있어 건물의 외피, 설비 등의 설계에서 수침 등의 안전적 측면도 고려해야 한다. 그렇기 때문에, 선박의 외피는 매우 치밀한 구조로 설계되어 있으며 이로 인해 선내에 오염원이 발생하면 일반 건축물의 냉난방 부하 계산에 반영되는 틈새바람의 부재로 환기 설비에 이상이 발생하게 된다. 틈새바람은 냉난방 부하에 큰 영향을 미치고 실내 공기의 오염을 완화시키는 역할을 하는데, 선박구조물의 경우 외피가 너무 치밀하기 때문에 바람이 통하지 못하여 오염원이 발생할 경우 공기질이 더욱 악화될 가능성이 높다. 또한, 선박구조물의 크기의 제약으로 인해 전공기 방식의 공조를 사용하는데 환기덕트가 없어서 복도를 통해 재순환 또는 배기하고 있다. 또한 선박의 급기덕트의 단면적은 굉장히 작기 때문에 청소 등 유지관리가 어려워 오염될 가능성이 많다. 이러한 오염원은 선박 전체로 퍼지기 쉬운데 그 이유는 선박의 외피는 치밀하지만 안에서 도는 공기는 복도를 통해 전체 실내로 확산되기 때문이다. 선박의 구조적인 문제 이외에도, 선박 내의 생활패턴에 따른 위험성도 있다. 장거리 항로의 크루즈선 등 여객선의 경우, 보통 몇 개월씩 선박 내에 거주하고, 어업종사, 해군 등 직업상 선상에 장기간 체류하는데 이러한 경우에는 일상생활이 선내에서 이루어지기 때문에 선내에 오염원이 발생했을 시 인지하기가 어려우며 장기간 오염공기에 폭로되며, 인지하였더라도 바다 한가운데에서 조치를 취하기가 어렵다.

선박 환경의 특수성으로 인해 오염원이 발생할 시에는 환기가 어려워 장시간에 걸쳐 승선자의 건강을 해칠 위험이 크다. 이러한 점에서 선박의 환기방법에 대한 연구를 포함하는 실내 공기질 개선 대책에 대한 연구가 시급하며 현재 실내공기오염 실태에 대한 현황 조사가 필요하다. 또한 “다중이용시설등의 실내 공기질 관리법” 과 같이 선박의 실내 공기질 관리에 대한 규정도 마련되어야 할 것이다.

이 실습선의 공기조화장치는 냉매 R-404를 사용하고 냉·난방 모든 구역을 처리하는 용량으로 각 75% 용량을 가진 피스톤 압축식 컴프레서를 갖춘

Chilled Plant 2 sets 및 AHU(Air Handling Unit) 5대를 사용하는 중앙 집중식 냉·난방 방식을 사용하고 있다. Chilled Water Tank가 Double Bottom에 설치되어 있으며 그 용량은 $19.2m^3$ 이다(조권희 등, 2007).

실습선에서는 많은 인원이 승선하여 교육·실습을 진행해야 하는 관계로 공실의 냉방과 통풍이 가능하며 냉·난방 시스템 및 통풍시설의 개요는 Table 16와 같다.

Table 16 냉난방 시스템 및 통풍시설의 개요

종류	격실
중앙 집중식 Air Conditioning	거주구역, 공용구역, 조타실, 항해실습실 등
해상용 Package Air Con.	기관실, 실습기관실, 실습공작실
육상용 Package Air Con.	선교, 실습선교, 세미나실, Saloon, 멀티미디어실, No. 1 & 2 Lecture Room, 부원식당, 취사실, No. 2 Lecture Room
기계식 통풍	취사구역, 저장구역, 위생구역, Bow Thruster Room 냉동기실, 냉수제조기실, 타기실, 유압 펌프실, Saloon, 부원식당, 세미나실, 강의실, 페인트 창고 등
자연식 통풍	축전기실, 공기조화실, 비상발전기실, 창고, CO ₂ Room, Fire Control Station 등

이 실습선의 공기조화 시스템은 선실에는 급기(Supply air)중심의 양압(Positive pressure)을, 복도 등은 흡기(Return air)중심의 음압(Negative pressure)의 구조로써 선실내외의 압력차에 의해 선실내 공기가 복도 및 계단 등 개방공간을 거쳐 AHU(Air Handling Unit)으로 환기되는 기류가 형성되도록 설계되었다.

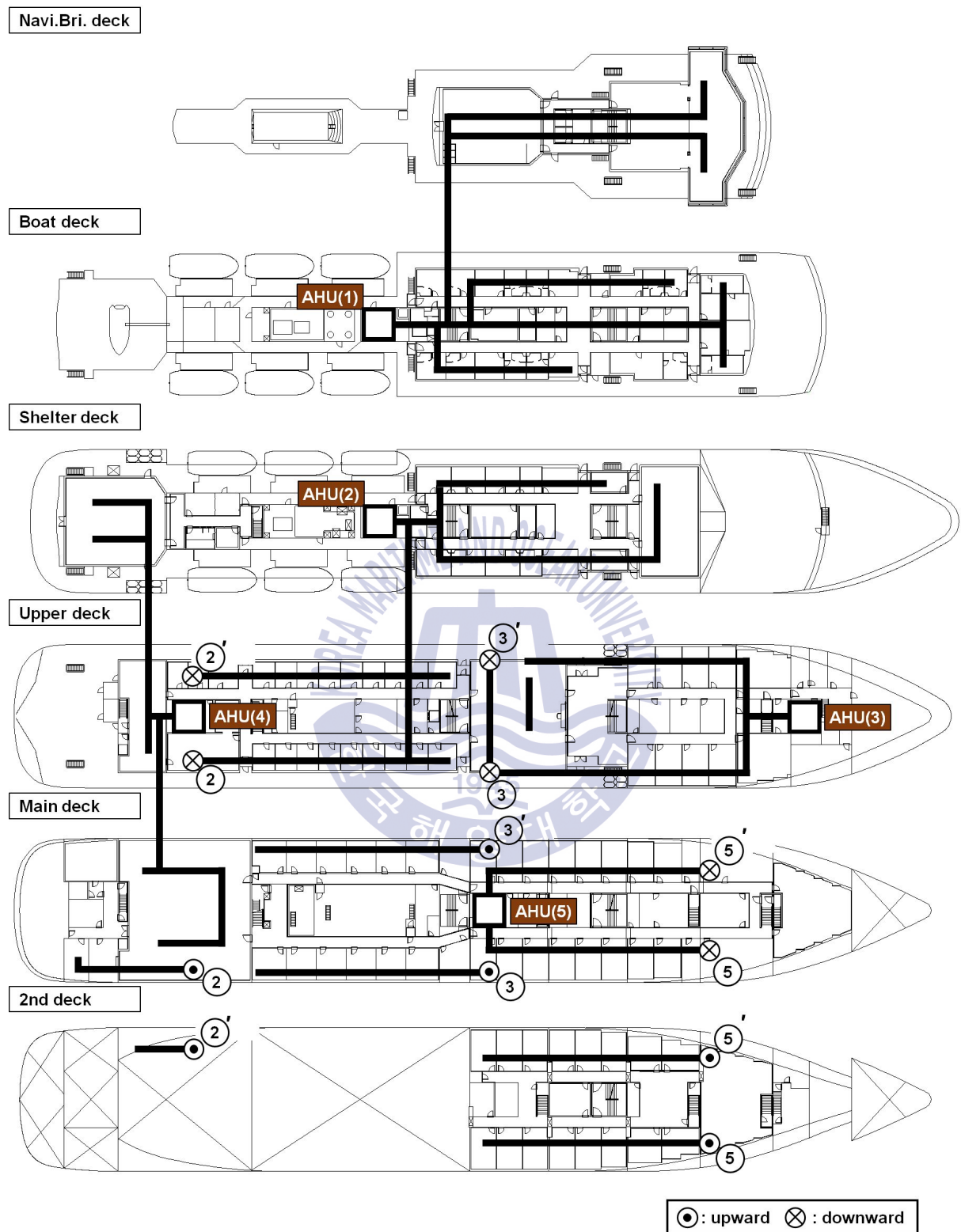


Fig. 5 AHU 주관의 공급계통 개념도

이 실습선에서는 5대의 AHU(Air Handling Unit)으로 6개 데크 전체에 대한 냉방과 난방에 대한 환기를 수행한다. 각 AHU는 Fig.5에 표시된 것과 같이 2개 이상의 데크에 신선외기를 공급하며, 각 데크는 수요에 따라 AHU들로부터 환기 및 급기를 통해 공조환경을 제공받는다. Table 17은 각 AHU의 신선외기 도입용량(OA, Outdoor air volume)과 배기용량(EA, Exhaust air volume)을 나타낸 것이다. 또한 이 실습선의 하부 데크에는 선내 공기환경 개선을 목적으로 데크 사이의 환기(Air circulation) 시스템이 구축 되어있는데 그 용량은 Table 18과 같다.

Table 17 AHU의 신선외기 도입용량(OA)과 배기용량(EA)

No. of AHU	Outdoor air volume (OA) [m ³ /h]	Exhaust air volume (EA) [m ³ /h]
1	6,865	2,965
2	5,080	3,895
3	6,145	3,050
4	6,895	-
5	6,735	4,485
Sum	31,720	14,395

Table 18 별도의 선내 배기전용 시스템 용량

Direction		Air volume [m ³ /h]
From	To	
Navi.&Bri. deck	Boat deck	8,830
Main deck	2nd deck	6,235
Sum		15,065

3.2 해석 톨과 모델링

3.2.1 CONTAM 3.2

이 논문에서는 실내 공기질 및 환기에 대해 해석하는 톨으로 미국국립표준연구소(NIST)가 개발하여 세계적으로 그 성능을 인정받고 있는 CONTAM 3.2를 사용하였다. CONTAM을 이용한 연구 사례는 1.2절에서 언급한 것처럼 국내에서 연구(김학선 등, 2005; 이현우 등, 2009; 홍진관 & 최상곤, 2007; 황광일, 2011)에 사용되고 있으며, 국외에서는 다수의 연구(Lorenzetti, 2002, 2013; Ng, et al., 2012; Persily, et al., 2006; Yu, et al., 2015)에 사용되었다. CONTAM 3.2는 포름알데히드, 휘발성유기화합물, 일산화탄소, 이산화탄소 등 다양한 오염물질에 대한 해석모델을 제공하며, 공간과 공간 사이의 압력차에 의해 유동이 발생한다고 가정하여 멀티존 해석을 수행한다(Walton & Dols, 2013).

오염농도분포 지배방정식은 Axley에 의해 모델링 되어졌으며, 기본 개념은 제어체적내의 모든 대상오염물질의 질량은 보존된다는 질량보존법칙을 만족하는 것에서 시작한다. CONTAM의 지배방정식은 제어체적 j에서 제어체적 i로 유입되는 오염물 α 의 시간에 따른 질량변화율에 대한 식으로 j에서 i로 이동할 때 필터를 거쳐간 오염물의 질량, 다른 오염원 β 와의 작용에 의해 제어체적 i에 발생한 오염물의 질량, 원래 i에 있던 오염물의 질량의 합에 i에서 j로 이동하는 오염물의 질량을 제하는 방식이다. CONTAM의 멀티존 모델에서 존 i에서 j로 이동하는 공기량은 다음 식(5)과 같다.

$$F_{i \rightarrow j} = \alpha_{ij} c_{ij} |\Delta P_{ij}|^{n_{ij}} \quad (5)$$

초기 시간 t에 대한 기본 지배방정식은 식(6)와 같다.

$$\frac{dm_{\alpha,i}}{dt} = -R_{\alpha,i} C_{\alpha,i} - \sum_j F_{i,j} C_{\alpha,i} + \sum_j F_{j,i} (1 - \eta_{\alpha,j,i}) C_{\alpha,j} + m_i \sum_{\beta} k_{\alpha,\beta} C_{\beta,i} + G_{\alpha,i} \quad (6)$$

따라서, 시간 t에서 Δt 시간 이후의 오염량은 아래 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_i V_i C_i^{\alpha}|_{t+\Delta t} = & \rho_i V_i C_i^{\alpha}|_t + \Delta t [-R_{\alpha,i} C_{\alpha,i} - \sum_j F_{i,j} C_{\alpha,i} \\ & + \sum_j F_{j,i} (1 - \eta_{\alpha,j,i}) C_{\alpha,j} + m_i \sum_{\beta} k_{\alpha,\beta} C_{\beta,i} + G_{\alpha,i}]_{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

- m_i = 제어체적 i의 공기 질량
- $m_{i,\alpha}$ = 제어체적 내의 구성물질의 질량
- $c_{i,\alpha}$ = 제어체적내의 구성물질 α 의 농도
- R_i = 제어체적 i의 공기 기체상수
- $R_{i,\alpha}$ = 제어체적 내의 구성물질 α 의 기체상수
- C_p = 제어체적 i의 공기 정압비열
- $G_{i,\alpha}$ = 제어체적내의 오염물질 발생량
- $K_{i,\alpha}$ = 동역학적 작용율 (Kinetic reaction coefficient)
- $\eta_{j,\alpha}$ = 필터의 효율
- ρ_i = 존 i의 밀도
- V_i = 존 i의 부피
- $F_{i \rightarrow j}$ = 존 i에서 j로 흐르는 유량, [kg]
- $F_{j \rightarrow i}$ = 존 j에서 i로 흐르는 유량, [kg]

3.2.2 모델링

CONTAM 3.2를 이용하여 실습선의 모든 데크를 Fig.6과 같이 모델링하였다. 총 5개의 AHU(Air handling unit)에서 공급하는 급기, 환기, 배기 덕트 및 별도의 급기, 배기, 데크간 환기전용 덕트 등 설계도면 상의 모든 환기 시스템을 반영 하였다. Fig.6에서 파란색은 AHU를 통해 공급하는 급기덕트, 보라색은 별도의 급기덕트, 하늘색은 AHU를 통한 환기덕트, 초록색은 별도의 환기덕트, 주황색은 AHU를 통해 공기를 배출하는 배기덕트, 분홍색은 선박 별도의 배기덕트 시스템으로 나타내었다.

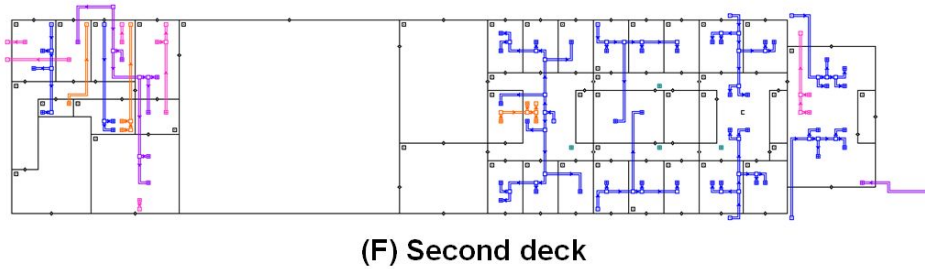
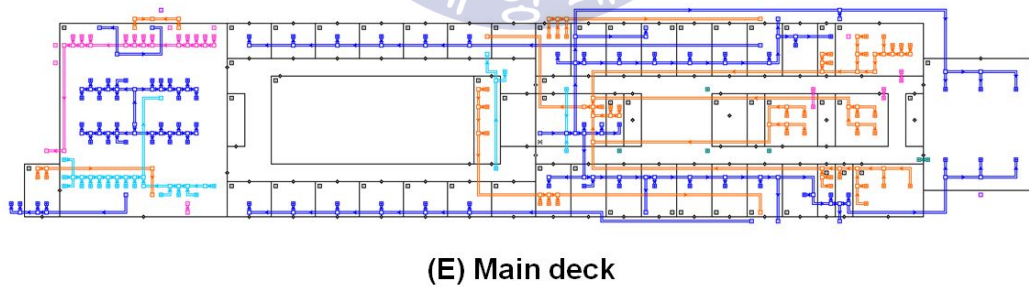
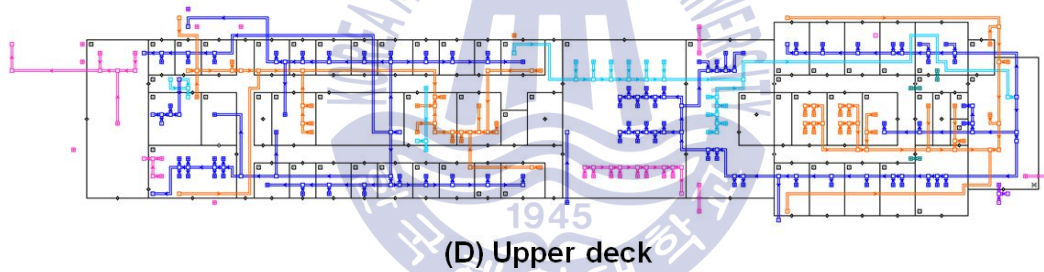
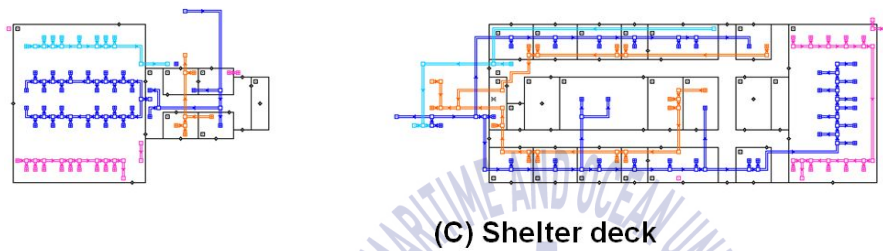
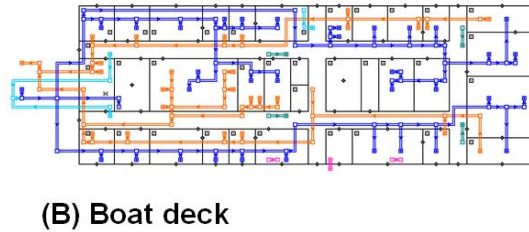
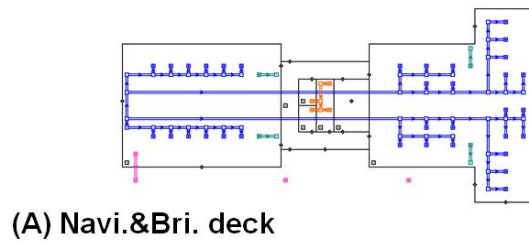
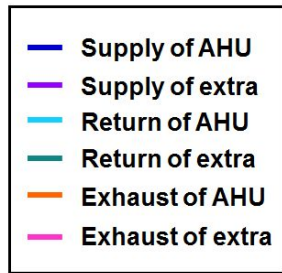


Fig. 6 CONTAM 3.2를 이용한 선박의 환기계통 모델링

3.3 오염물질 확산 시나리오

이 연구에서는 선박의 환기 방식에 의한 오염물질의 확산특성을 평가하기 위해서 오염물질, 발생장소, 신선외기 도입율을 주요변수로 설정하였다. 오염물질이 발생한 장소는 3곳으로 하였으며, 총 6개의 데크 중 최상위 데크, 중간 데크, 최하위 데크에서 발생한 경우로 설정하였다.

환기(Ventilation)에는 급기(SA, Supply air), 환기(RA, Return air), 배기(EA, Exhaust air), 신선외기(OA, Outside air)의 4가지 요소가 있는데, 실습선에서는 신선외기를 도입함으로써 실내의 공기질을 관리하고 데크간 연결되어있는 환기덕트를 통해 데크간의 공기를 순환시키며 각 데크의 배기덕트를 통해 오염물질을 외부로 배출한다. 신선외기 도입율은 0%, 25%, 50%, 75%, 100%로 총 5가지의 경우로 나누었다.

또한 오염원으로는 환경오염 물질인 휘발성유기화합물(VOC) 중의 벤젠(Benzene)과 화학 작용제 중 치명적인 독성을 가진 사린가스를 사용하였으며, 시간과 공간에 따른 오염물질들의 상대적 변화량을 비교해 확산특성을 평가하였다. 벤젠의 경우 발암성을 내포하고 있으며 일반적으로 구입하기가 어렵지 않고, 사린가스의 경우 앞서 언급했듯이 상점에서 구입할 수는 없지만 화학에 대해 약간의 지식이 있는 사람이라면 누구나 제조 할 수 있고 재료를 구하기도 어렵지 않기 때문에 오염물질로 선정하였다.

총 30개의 시나리오 조건들을 정리하면 Table 19와 같다. Fig.7에 표시한 지점 중 N-Source, U-Source, 2nd-Source은 각 시나리오별로 오염물질이 발생한 장소이다. 그리고 객실에서 외부로 나가기위해 반드시 지나야하는 각 데크의 복도를 N-1, B-1, S-1, S-2, U-1, U-2, M-1, M-2, 2nd-1로 Fig.7에 표시하였다.

시나리오 A, B, C는 전체 데크에 오염물질이 확산되는 특성을 평가하고, 시나리오 D, E, F는 각 데크의 복도에 치사량 이상으로 오염물질이 확산되는 양과 시간을 확인 하였다.

Table 19 시나리오 조건

Scenario	Contaminant	Deck	OA [%]
A	VOC (Benzene)	Navi.&Bri.	0
			25
			50
			75
			100
B		Upper	0
			25
			50
			75
			100
C	2nd	0	
		25	
		50	
		75	
		100	
D	Sarin	Navi.&Bri.	0
			25
			50
			75
			100
E		Upper	0
			25
			50
			75
			100
F	2nd	0	
		25	
		50	
		75	
		100	

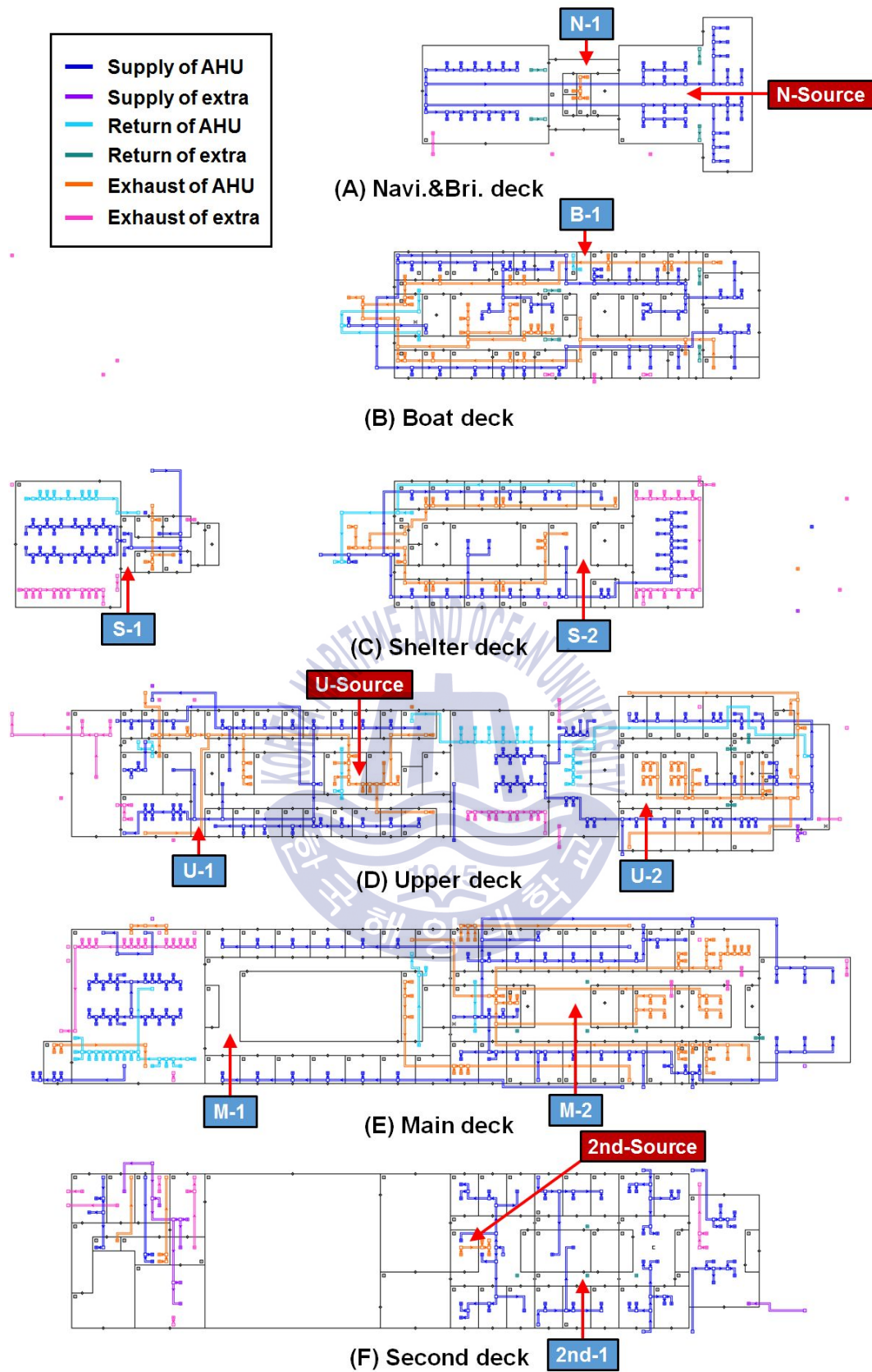


Fig. 7 실습선의 복도 및 오염원 발생 지점

제4장 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시나리오-A의 결과

실습선의 최상층인 Navi.&Bri. 데크의 N-Source에서 오염물질(벤젠)이 발생하였을 때의 오염원 발생지점에서의 신선외기 도입량에 따른 시간별 농도 변화는 Fig.8과 같다. 오염물질이 발생한 후 선박의 환기시스템과 압력차에 의해 인접 공간 및 하부의 데크로 오염물질이 확산된다. 신선외기 도입율에 따라 완전히 제거되기까지 40분에서 80분 정도 걸리는 것을 알 수 있다.

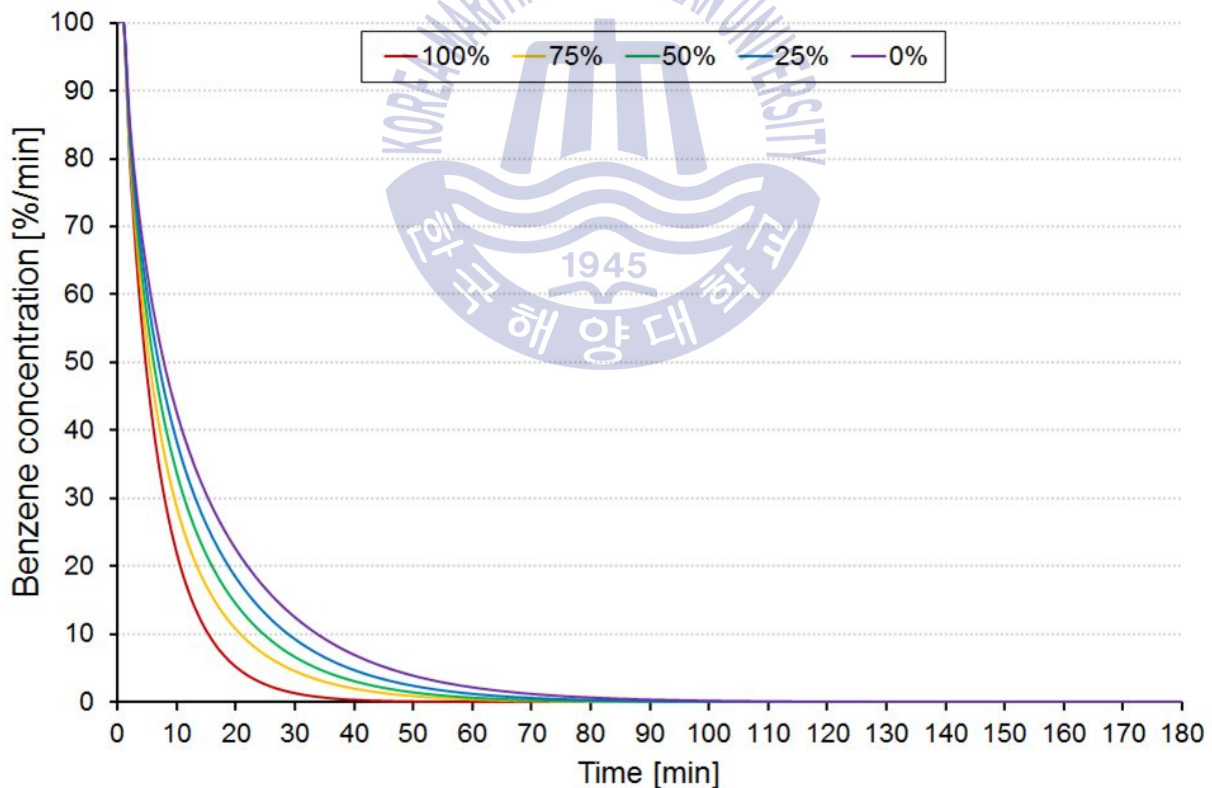


Fig. 8 시나리오-A의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source)

Navi.&Bri. 데크는 1대의 AHU를 통해서만 환기를 실시하기 때문에 다른 시나리오들보다는 오염물질이 제거되는 시간이 오래 걸리는 것을 알 수 있다. 오염물질은 발생 후 바로 아래의 Boat 데크와 연결되어 있는 환기덕트에 의해 대부분 확산된다. 외부로 배출되는 양이 매우 적기 때문에 발생한 오염물질은 대부분 하부의 데크로 확산되었다. 또한 다른 시나리오들에 비해 신선외기 도입율의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

Table 20 시나리오-A의 결과

[데크의 전체 면적대비 오염되는 지역, %]

Criteria [%]	OA ratio [%]	Deck					
		Navi. Bri	Boat	Shelter	Upper	Main	2nd
1	0	83.5	97.4	65.1	56.1	43.3	21.8
	25	83.5	97.4	25.1	56.1	43.3	21.8
	50	83.5	97.4	21.6	55.7	43.0	21.4
	75	83.5	95.1	21.6	54.3	43.0	12.2
	100	83.5	88.9	-	-	-	-
0.1	0	83.5	97.4	65.1	59.4	43.3	21.8
	25	83.5	97.4	35.6	57.7	43.3	21.8
	50	83.5	97.4	21.6	55.7	43.0	21.4
	75	83.5	97.4	21.6	54.3	43.0	21.4
	100	83.5	94.0	21.6	36.3	1.2	4.3
0.01	0	83.5	97.4	65.1	62.5	79.6	21.4
	25	83.5	97.4	66.3	57.7	79.6	21.8
	50	83.5	97.4	21.6	55.7	58.9	21.8
	75	83.5	97.4	21.6	55.7	43.3	21.8
	100	83.5	94.0	21.6	54.3	1.2	4.3
0.001	0	83.5	97.4	65.1	62.5	90.0	41.1
	25	83.5	97.4	86.7	62.3	87.8	33.8
	50	83.5	97.4	58.7	55.7	59.2	21.8
	75	83.5	97.4	42.0	54.3	58.9	21.8
	100	83.5	94.0	21.6	54.3	1.2	5.2

이 연구에서는 전체 선내를 대상으로 선박의 환기 시스템에 따라 오염물질 확산 특성을 파악하기 위해 시나리오-A, 시나리오-B, 시나리오-C의 오염된 공간을 각각 비율로 평가하였다. 오염된 공간의 비율을 평가하기 위해 판단기준을 1%, 0.1%, 0.01%, 0.001%로 정하고 결과를 Table 20에 정리 하였다. 오염물질이 발생한 Navi.&Bri. 데크 및 Boat 데크에는 80% 이상의 대부분 지역에 오염물질이 1%이상 확산되었다. 하부의 데크로 갈수록 오염된 지역은 감소하지만 데크간 환기를 목적으로 설치된 환기덕트를 통해 가장 아래 데크까지 20%이상 오염된 것을 확인 할 수 있다. 오염물질이 상부 데크에서 발생한다면 신선한 공기를 공급할 목적으로 설치된 환기덕트를 통해 빠르고 많은 양이 하부의 데크로 확산된다. 시나리오-A의 경우에는 신선외기 도입율의 영향은 설계용량 대비 75% 이상일 때 오염농도가 크게 변하는 것을 알 수 있다.

4.2 시나리오-B의 결과

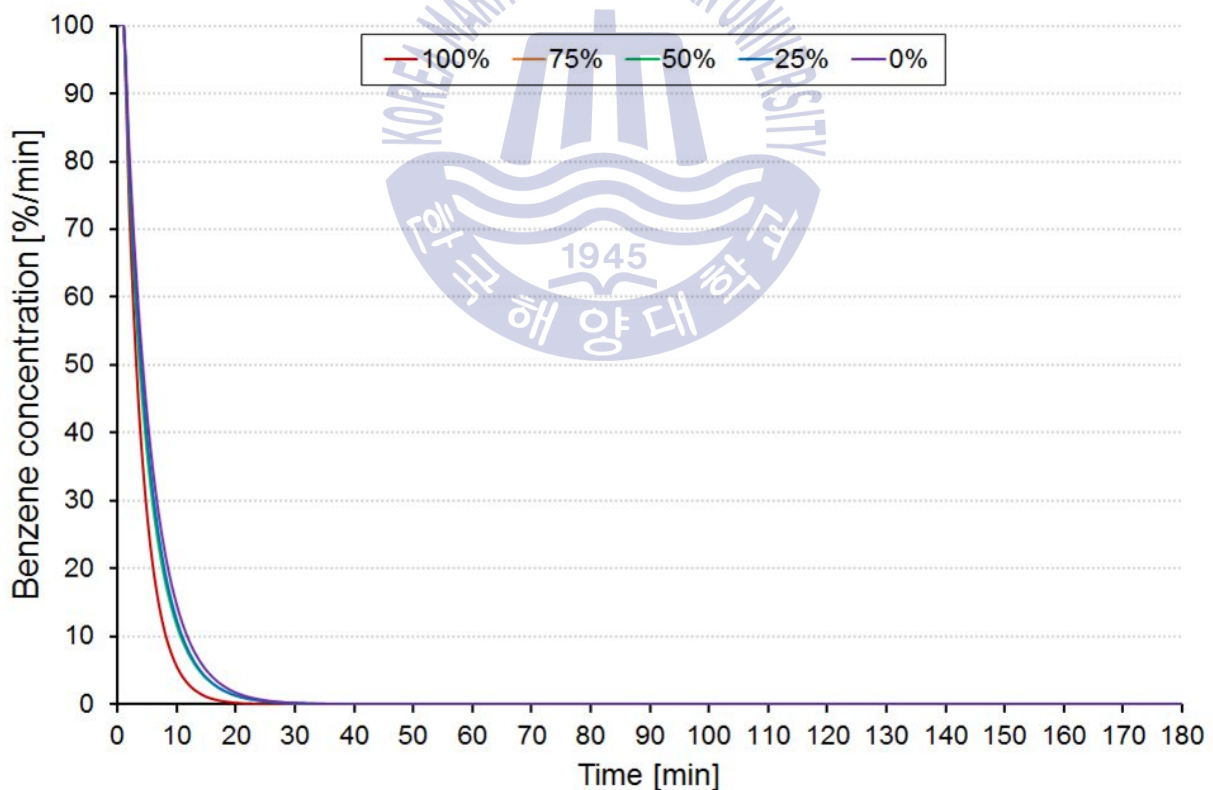


Fig. 9 시나리오-B의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source)

시나리오 B는 6개의 데크 중 중간층인 Upper 데크의 U-Source에서 오염물질(벤젠)이 발생한 경우이고, 그 결과는 Fig.9와 같다. 시나리오-A의 결과에 비해 신선외기 도입율에 따라 오염물질이 제거되는 속도의 차이가 상대적으로 더 작다. 시나리오-B에서는 신선외기 도입율에 따라 오염물질이 제거되는 시간은 20분에서 30분으로 최대 약 10분 정도의 차이를 보인다. 신선외기 도입율이 75%, 100%일 때 오염물질이 제거되는 시간이 거의 일치 하였고, 0%, 25%, 50%일 때의 경우 제거되는 시간의 차이가 3분 이내로 비슷하였다.

Table 21 시나리오-B의 결과

[데크의 전체 면적대비 오염되는 지역, %]

Criteria [%]	OA ratio [%]	Deck					
		Navi. Bri	Boat	Shelter	Upper	Main	2nd
1	0	83.5	81.6	42.5	54.3	43.0	21.4
	25	83.5	81.6	25.1	54.3	43.0	21.4
	50	83.5	70.1	21.6	41.0	43.0	13.7
	75	83.5	58.5	21.6	41.0	42.7	12.2
	100	-	-	-	15.5	0.8	-
0.1	0	83.5	97.4	42.5	59.4	43.3	21.4
	25	83.5	97.4	31.7	59.4	43.3	21.4
	50	83.5	97.4	21.6	54.3	43.0	21.4
	75	83.5	66.4	21.6	54.3	43.0	21.4
	100	-	30.6	21.6	31.9	0.8	-
0.01	0	83.5	97.4	66.3	63.5	73.8	21.8
	25	83.5	97.4	42.5	63.5	59.2	21.8
	50	83.5	97.4	42.0	56.4	58.9	21.8
	75	83.5	66.4	42.0	56.4	58.9	21.8
	100	83.5	30.6	42.0	42.7	1.2	19.9
0.001	0	83.5	97.4	86.7	63.5	84.8	38.5
	25	83.5	97.4	58.7	63.5	63.7	30.2
	50	83.5	97.4	42.5	59.3	59.2	21.8
	75	83.5	66.4	42.0	57.9	58.9	21.8
	100	83.5	31.7	42.0	56.4	1.2	21.8

또한 Upper 데크에서 발생한 시나리오-B의 경우 시나리오 A보다 최대 40분 정도 빠르게 오염물질이 제거된다. U-Source에서 오염원이 발생하고 인접 지역의 환기덕트들에 의해 AHU 및 인접 지역으로 오염원이 빠르게 확산되었다.

시나리오-B의 경우 3개의 AHU(2), AHU(3), AHU(4)를 통해 환기를 실시하기 때문에 상부에서 오염원이 발생한 경우보다 빠르게 확산되었고 그 결과를 Table 21에 정리 하였다. 발생한 오염원은 인근지역 AHU(2)의 환기덕트로 확산되어 빠르게 Boat 데크로 확산되고, AHU(4)의 환기덕트를 통해 하부 데크로 오염물질이 확산된다. Upper데크에는 외부로 배출되는 양이 시나리오-A에 비해 많기 때문에 빠르게 확산하면서, 또한 빠르게 제거되는 것을 알 수 있다. 시나리오-B에서도 설계용량 대비 신선외기 도입율이 75% 이상일 때 오염농도가 크게 변하였다.

4.3 시나리오-C의 결과

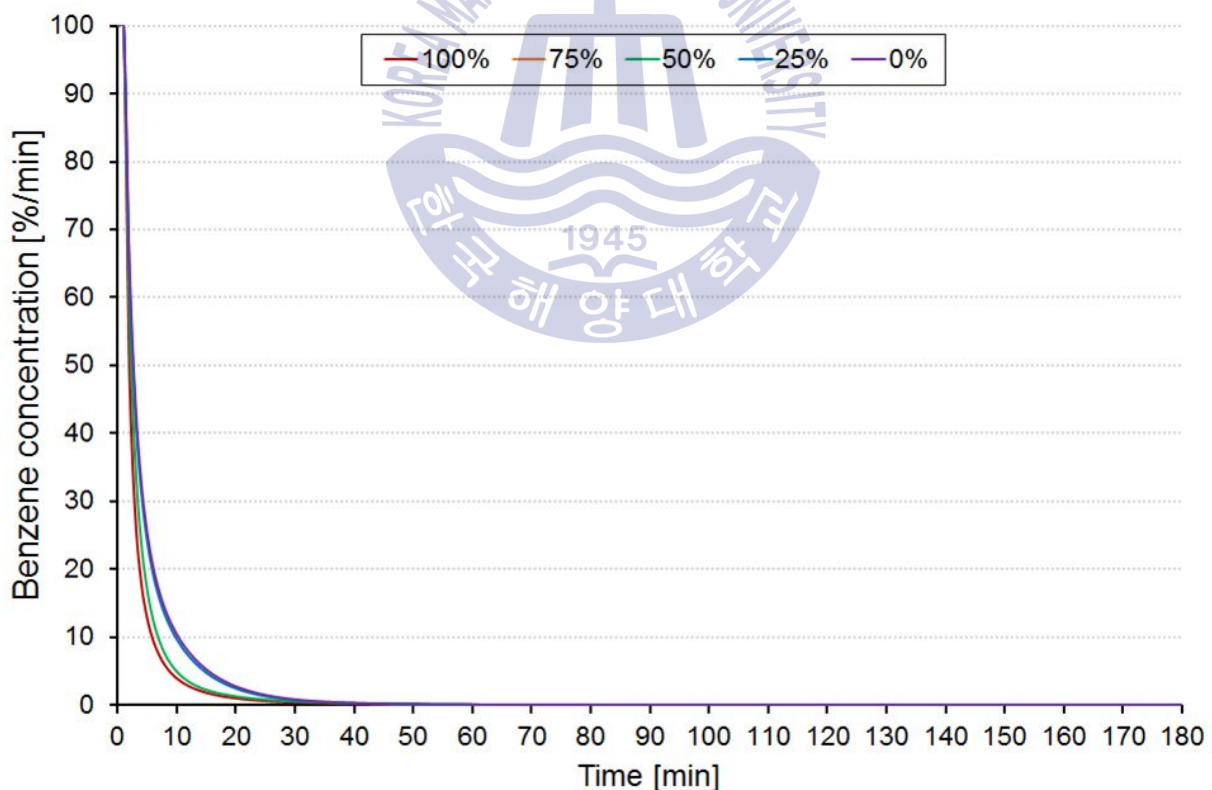


Fig. 10 시나리오-C의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source)

Fig.10은 실습선의 최하층인 2nd 데크의 2nd-Source에서 오염물질이 발생한 시나리오-C의 결과이다. 신선외기 도입율에 따라 0%, 25% 일 때 비슷한 결과를 보이고, 50%, 75%, 100%의 경우 제거되는 시간이 비슷한 결과를 보였다. 오염물질이 완전히 제거되기 까지는 약 10분 이내로 작은 차이를 보였다.

Table 22 시나리오-C의 결과

[데크의 전체 면적대비 오염되는 지역, %]

Criteria [%]	OA ratio [%]	Deck					
		Navi. Bri	Boat	Shelter	Upper	Main	2nd
1	0	16.5	31.7	78.4	87.1	70.4	45.8
	25	-	3.4	25.1	56.1	43.3	26.5
	50	-	-	-	36.2	41.9	21.4
	75	-	-	-	-	33.6	21.4
	100	-	-	-	-	33.4	21.4
0.1	0	100.0	97.4	78.4	89.3	70.4	45.8
	25	83.5	81.6	25.1	56.1	43.3	21.8
	50	-	-	-	49.8	57.8	21.8
	75	-	-	-	44.5	54.4	21.8
	100	-	-	-	-	54.1	21.8
0.01	0	100.0	97.4	98.8	89.3	86.3	45.8
	25	83.5	97.4	31.7	59.4	59.2	21.8
	50	-	-	-	49.8	57.8	21.8
	75	-	-	-	44.5	54.4	21.8
	100	-	-	-	-	54.1	21.8
0.001	0	100.0	97.4	98.8	89.3	86.3	45.8
	25	83.5	97.4	86.7	63.5	59.2	21.8
	50	-	-	-	49.8	58.1	21.8
	75	-	-	-	44.5	54.4	21.8
	100	-	-	-	-	54.1	21.8

시나리오-A, 시나리오-B 보다는 상대적으로 오염물질이 빨리 제거되었는데,

그 이유는 가장 아래 데크이기 때문에 상부 데크 및 외부로 배출되는 공기가 많기 때문이다. 오염물질이 발생하고 데크간 환기를 하기위한 덕트를 통해 Main 데크로 빠르게 확산되고, 배기덕트를 통해 외부로 오염물질이 확산하였다.

시나리오-C의 경우 오염된 공간의 비율은 Table 22와 같다. 상부 데크에서 오염원이 발생한 경우에 비해 오염원이 많이 확산되지 않았다. 아래의 데크에는 상부의 데크로 확산되는 양보다는 외부로 배출되는 양이 많게 설계되어 있기 때문에 이와 같은 결과를 얻게 되었다. 2nd 데크에서 발생한 오염물질은 대부분 Main 데크로 확산 되고, 확산된 오염물질은 Main데크의 배기덕트에 의해 많은 양이 외부로 배출되었다. 그리고 시나리오-C의 경우는 신선외기 도입율에 따라 오염되는 지역이 크게 변하는 것을 알 수 있다.

4.4 시나리오-D의 결과

시나리오-D는 소량에 노출되어도 사망할 가능성이 큰 사린가스를 오염물질로 설정하였다. 오염물질이 발생한 장소는 시나리오-A와 동일한 장소로 N-Source에서 오염이 시작된다. Fig.11~Fig.15는 시나리오-D에서 설계용량 대비 신선외기 도입율에 따라 각 데크의 복도에서 시간에 따라 오염되는 양을 나타낸 것이다. 사린가스의 발생량은 1kg으로 설정하였고, 사람들이 피난을 하기 위해 반드시 지나야 하는 복도에 얼마나 오염이 되는지를 확인 하였다. 사린가스는 유기인 화합물로 신경가스의 일종으로 무색, 무미, 무취이고 액체에서 기체로 변하면서 순식간에 확산되기 때문에 그 위험성이 더욱 크다. 기체상태일 때에는 1m³의 대기 중에 100mg의 사린만 함유돼 있으면 30초만 지나도 95%가 1~15분 내에 사망하게 된다.

신선외기 도입율이 0%일 때 가장 많은 지역이 오염되었고, 9개의 복도 중 7개의 복도가 오염이 되었다. 치사량 이상으로 오염된 지역은 신선외기 도입율이 0%, 25%일 때 4곳의 복도가 오염되었고, 50%일 때 3곳, 75%, 100% 일 때 2곳이 치사량이상으로 오염되었다. 복도에서 오염물질은 각각의 시나리오에서 50분~70분이 지나면 완전히 제거 되었다. 신선외기 도입율이 0%, 25% 일 때에는 실습선의 50% 이상의 인원이 위험해 질것으로 예상된다.

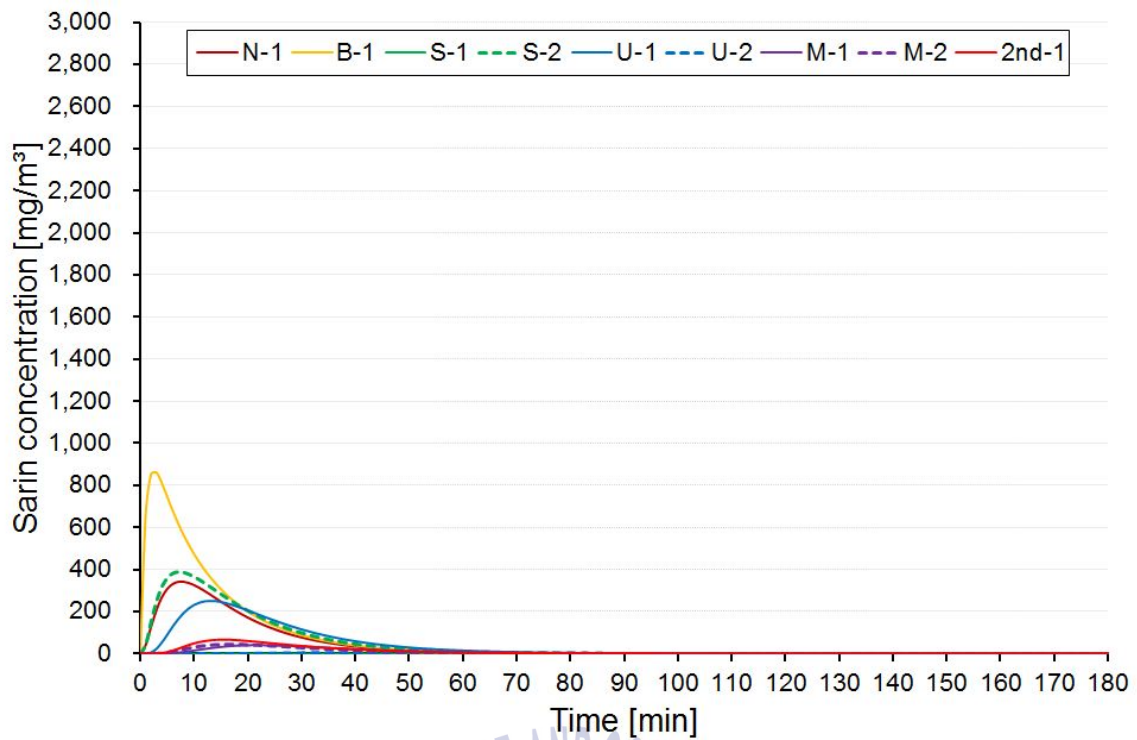


Fig. 11 시나리오-D의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source, OA: 0%)

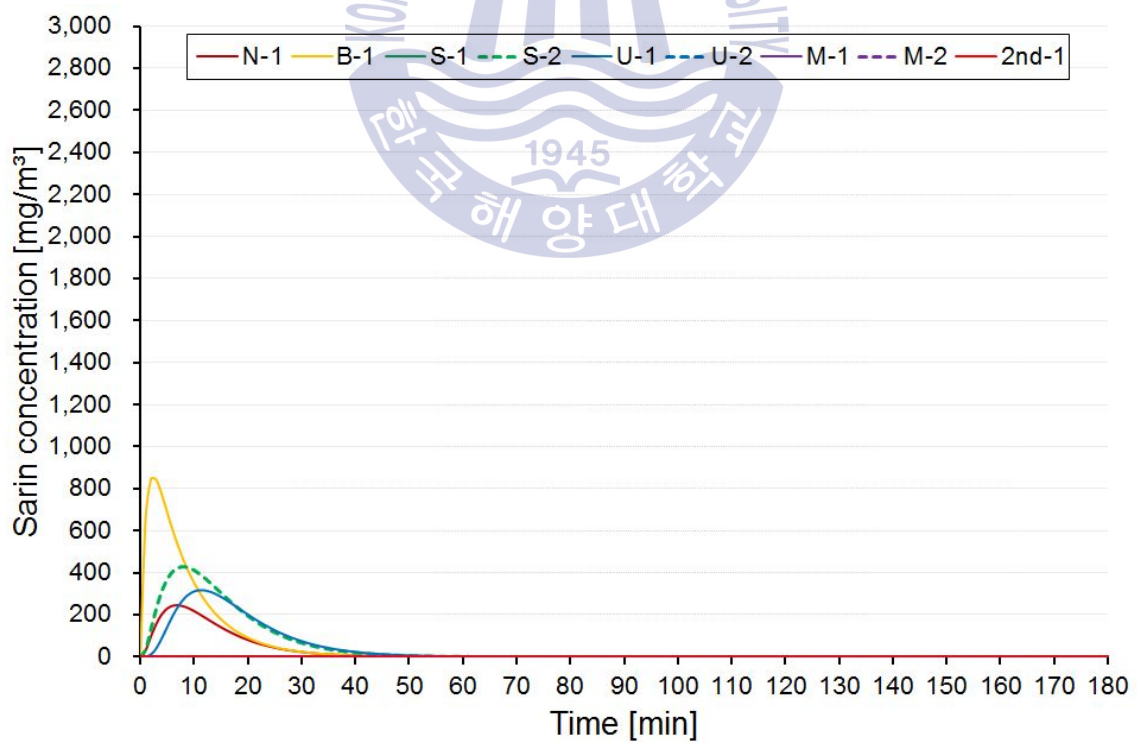


Fig. 12 시나리오-D의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source, OA: 25%)

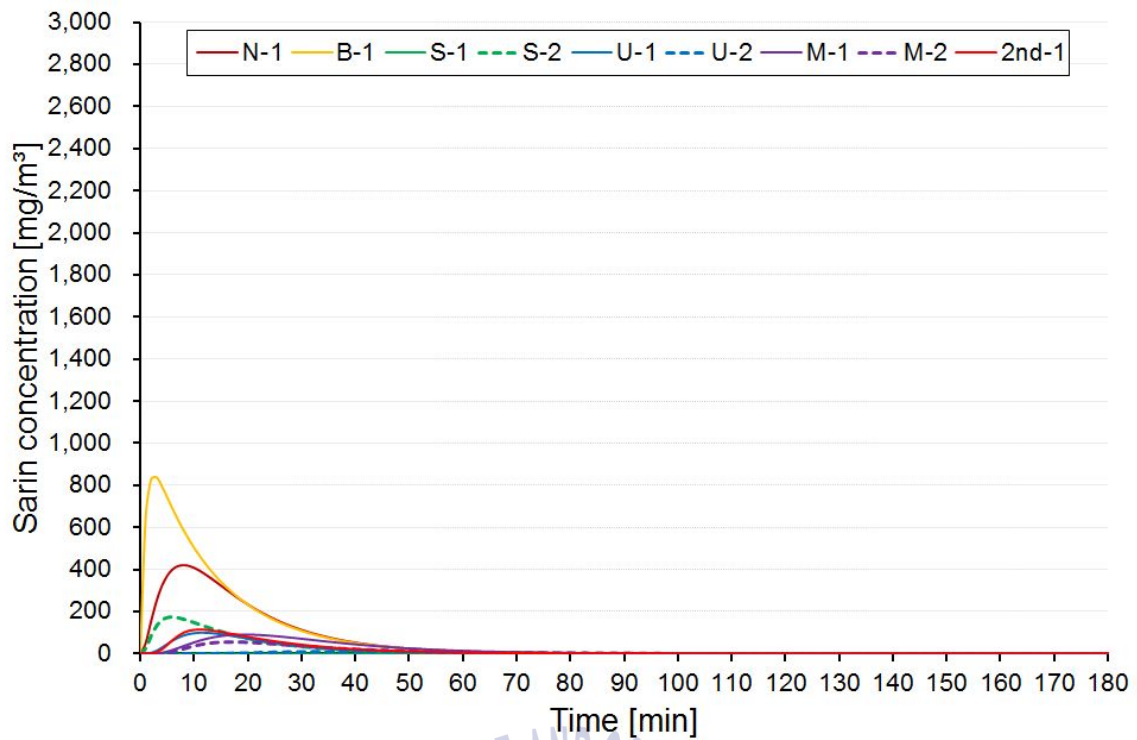


Fig. 13 시나리오-D의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source, OA: 50%)

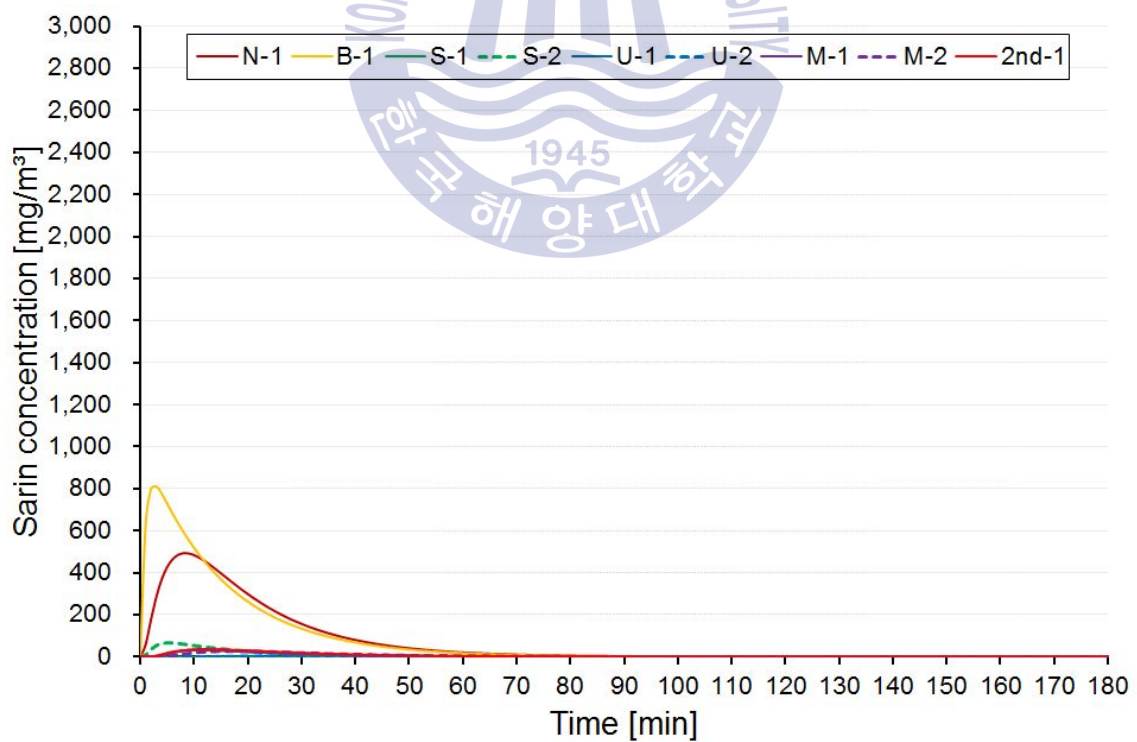


Fig. 14 시나리오-D의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source, OA: 75%)

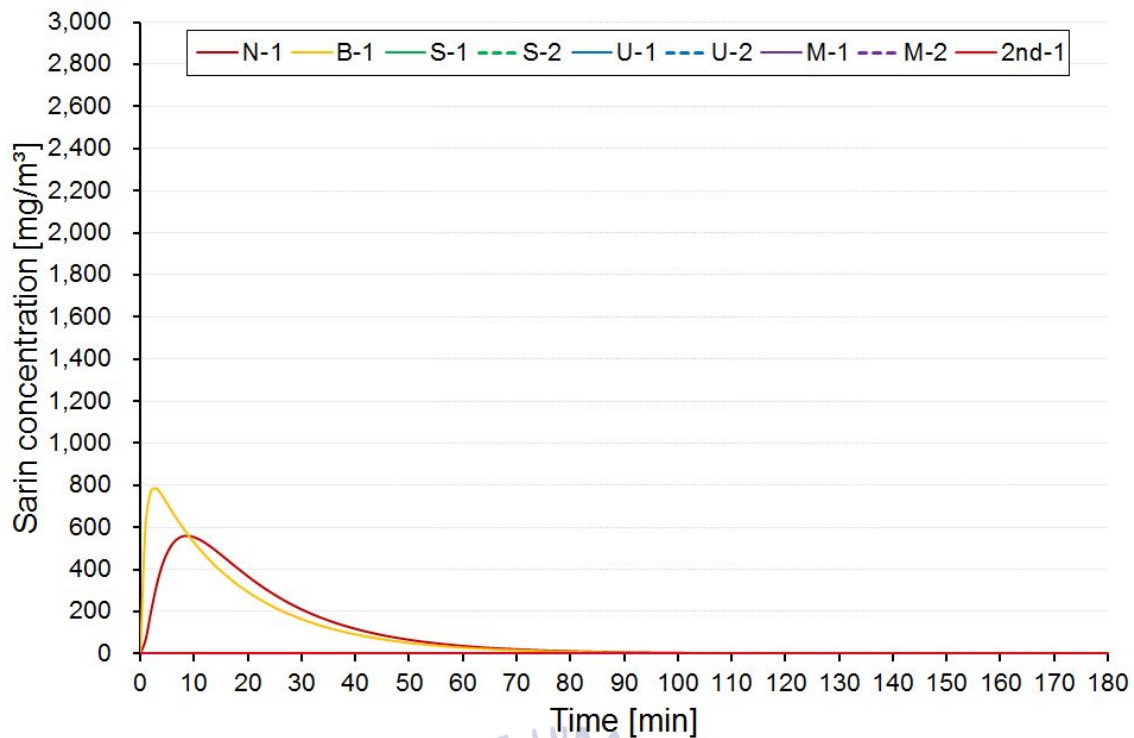
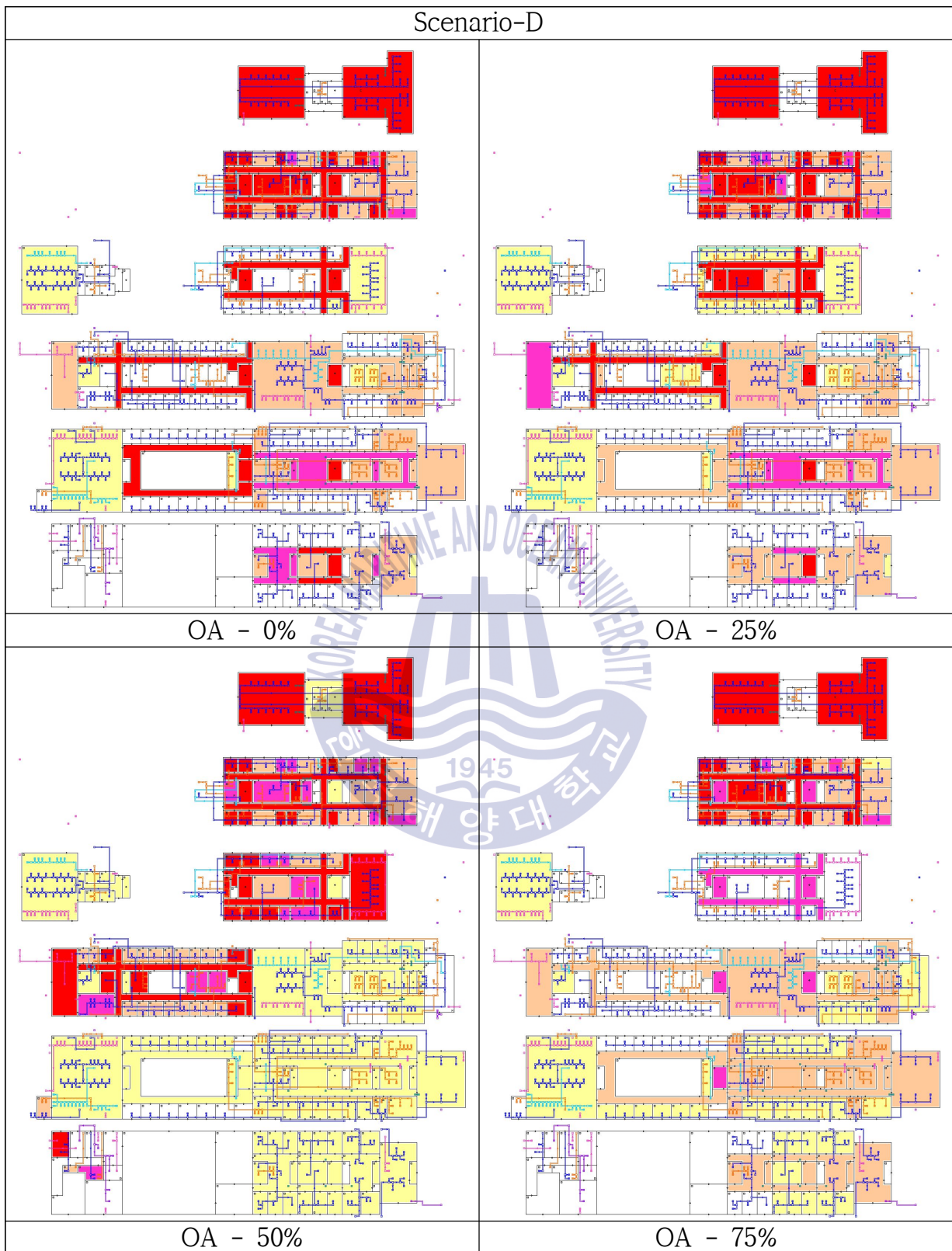


Fig. 15 시나리오-D의 결과 (오염원 발생 지점: N-Source, OA: 100%)

시나리오-D의 경우 사린가스가 실습선의 선실과 복도로 오염된 지역을 Fig.16에 나타내었다. 신선외기 도입율에 따라 각각 표시하였고, 빨간색으로 표시한 지역은 사린가스가 100mg/m^3 이상으로 치명적하게 오염된 지역이고, 분홍색으로 표시한 지역은 50mg/m^3 이상으로 위험한 지역이다. 살구색은 $1\text{mg/m}^3 \sim 50\text{mg/m}^3$ 으로 인체에 영향이 나타나는 지역이고, 노란색은 1mg/m^3 미만으로 극소량으로 오염된 지역이다. 신선외기 도입율이 많아질수록 오염된 지역은 많아지지만 오염지역의 오염농도는 줄어드는 경향을 보였다. 신선외기 도입율이 75% 이상 일 때는 2개의 데크만 치사량이상으로 오염된 지역이 존재하고 하부 데크는 대부분 50mg/m^3 이하로 낮은 농도로 오염이 되었다.

Scenario-D



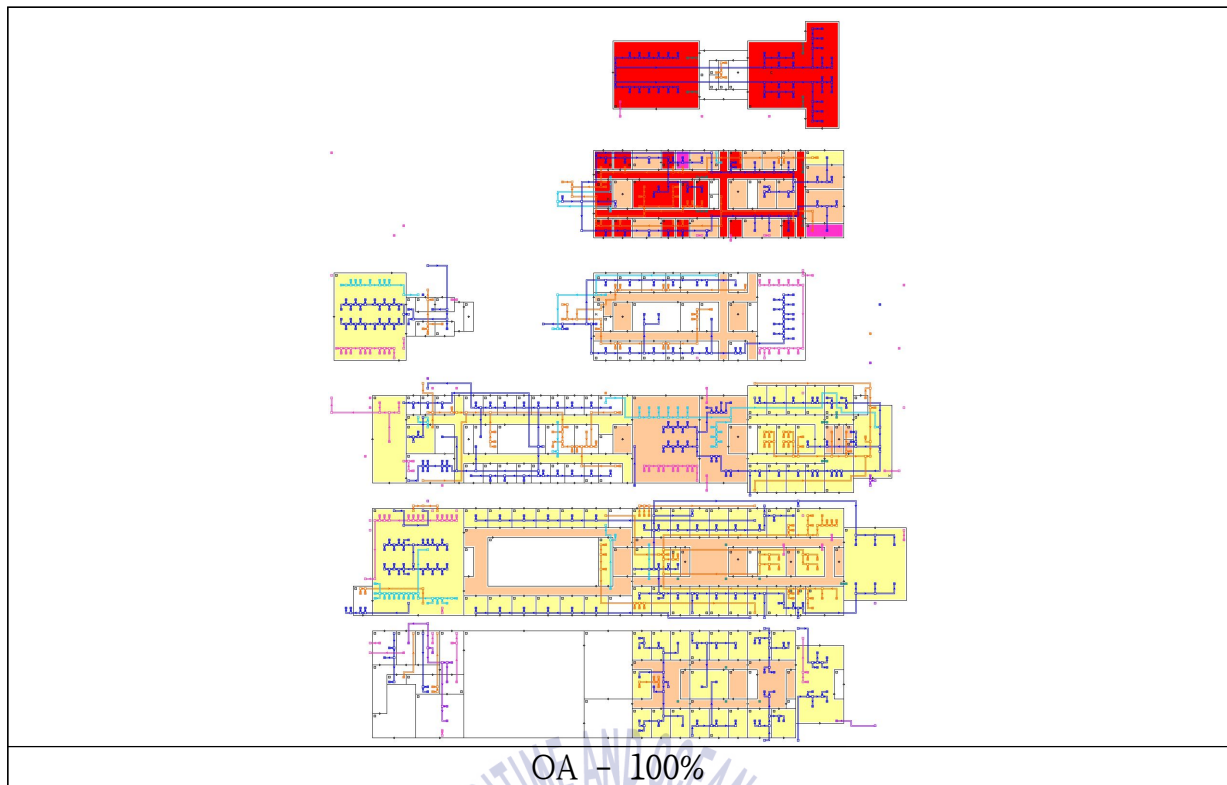


Fig. 16 시나리오-D의 오염지역 (오염원 발생 지점: N-Source)

4.5 시나리오-E의 결과

시나리오-E는 시나리오-B와 같은 Upper 데크의 U-Source에서 사린가스가 1kg 발생하였을 때의 경우이다. 시나리오-E의 신선외기도입량에 따른 결과는 Fig.17~Fig.21와 같다. 시나리오-E의 경우 시나리오-D 보다 상대적으로 적은 지역으로 적은양의 오염물질이 확산되었다. U-Source에서 발생한 오염물질은 U-1 복도와 인근 지역의 환기덕트에 흡수되어 Shelter 데크의 S-2 지점으로 많은 양이 확산되었다. 신선외기 도입율에 따라 0%, 25%일 때 3곳, 50%, 75%일 때 2곳, 100%일 때는 1곳이 치사량 이상으로 오염되었다. 신선외기 도입율이 25%~100% 일 때는 약 30분이 지나면 오염물질이 대부분 제거 되지만, 0%일 때는 60분이 지나야 완전히 제거되었다. Upper 데크의 U-Source에서 오염물질이 발생한 경우는 신선외기 도입율이 75% 이상이 되면 오염지역 및 제거되는 시간이 크게 변하는 것을 알 수 있다.

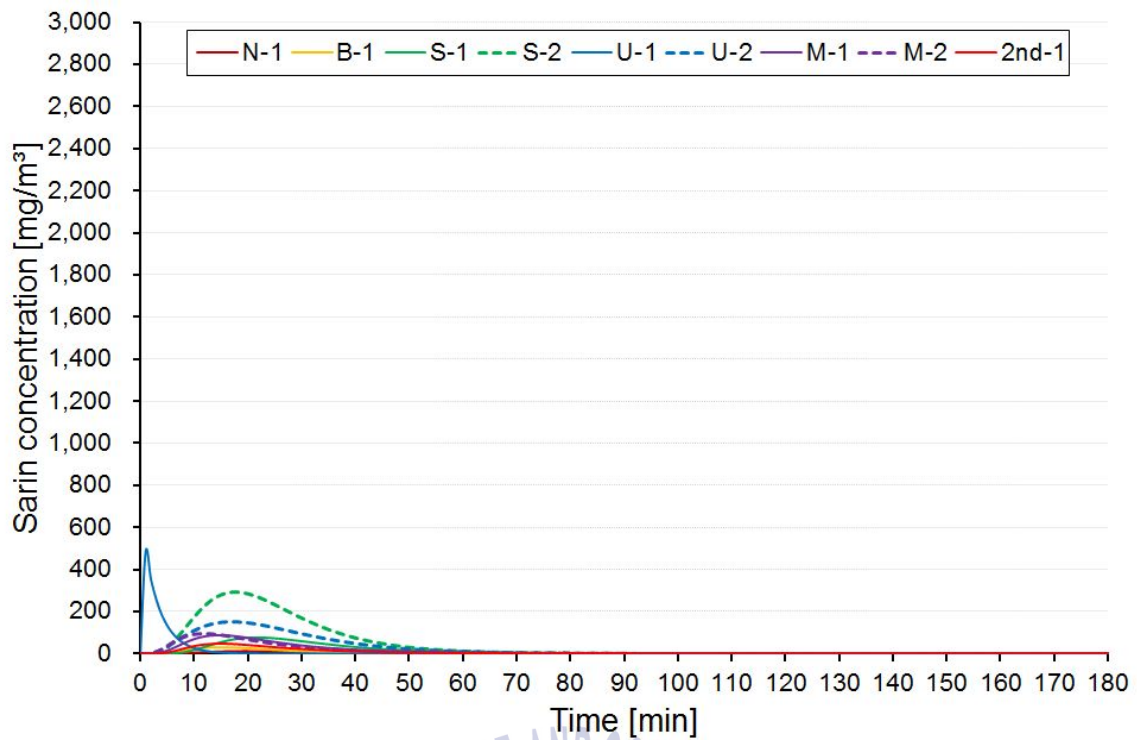


Fig. 17 시나리오-E의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source, OA: 0%)

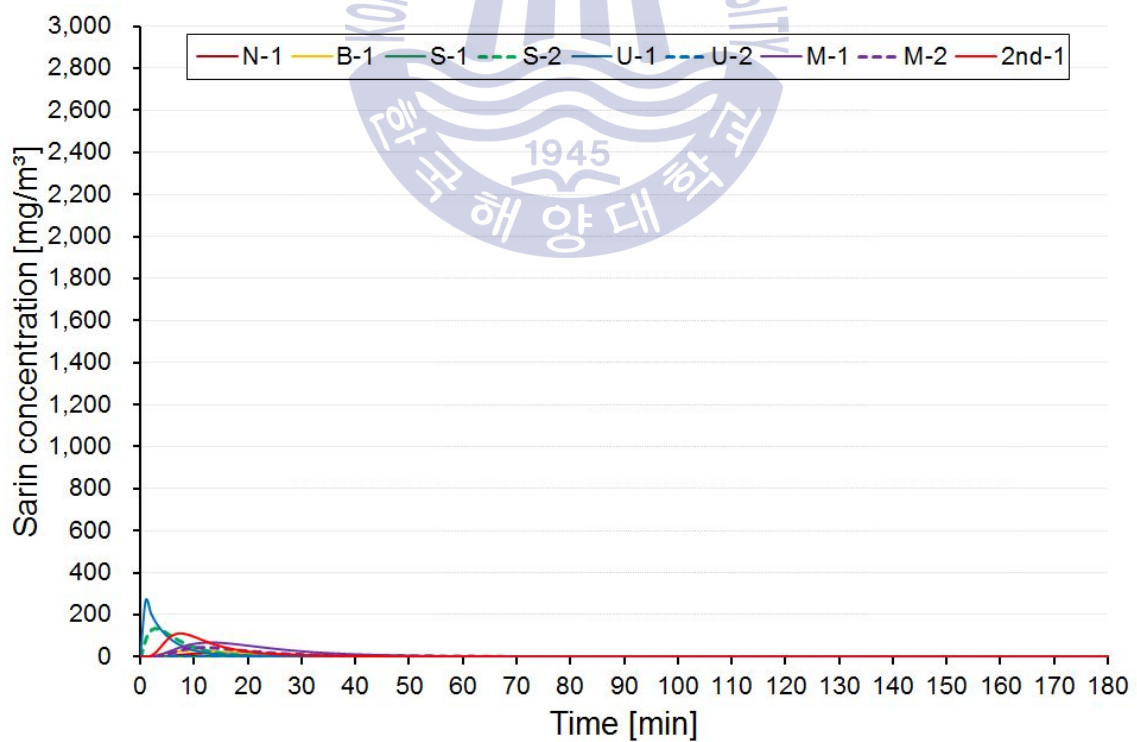


Fig. 18 시나리오-E의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source, OA: 25%)

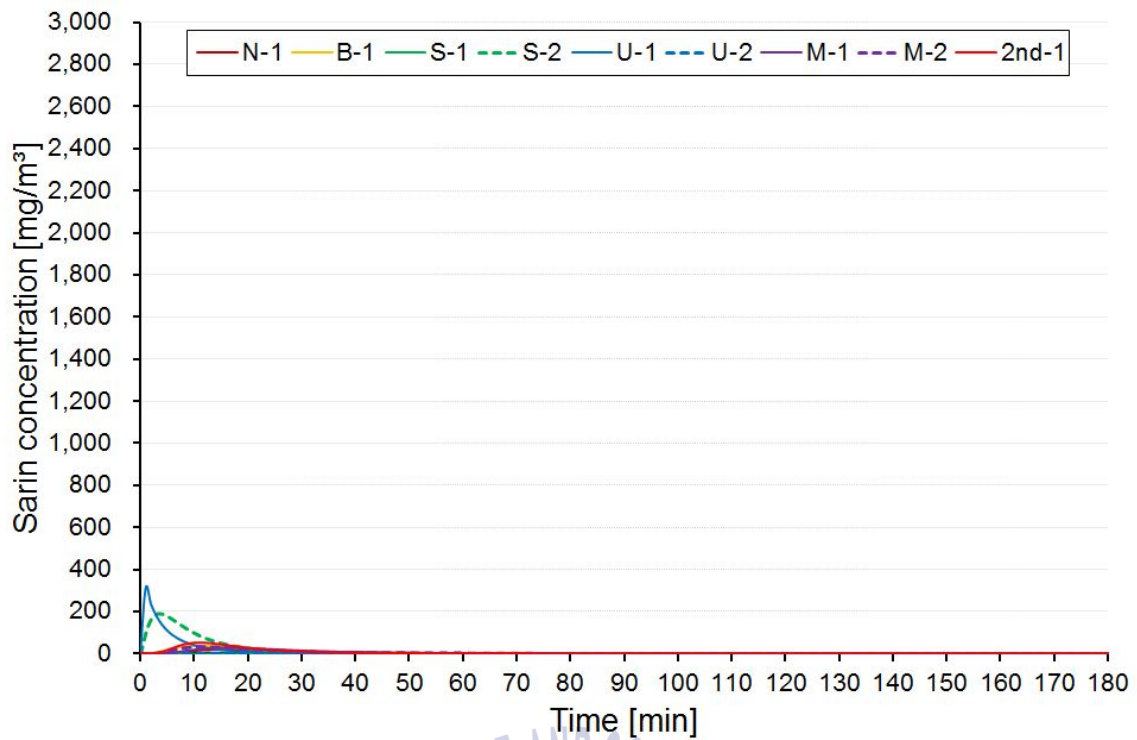


Fig. 19 시나리오-E의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source, OA: 50%)

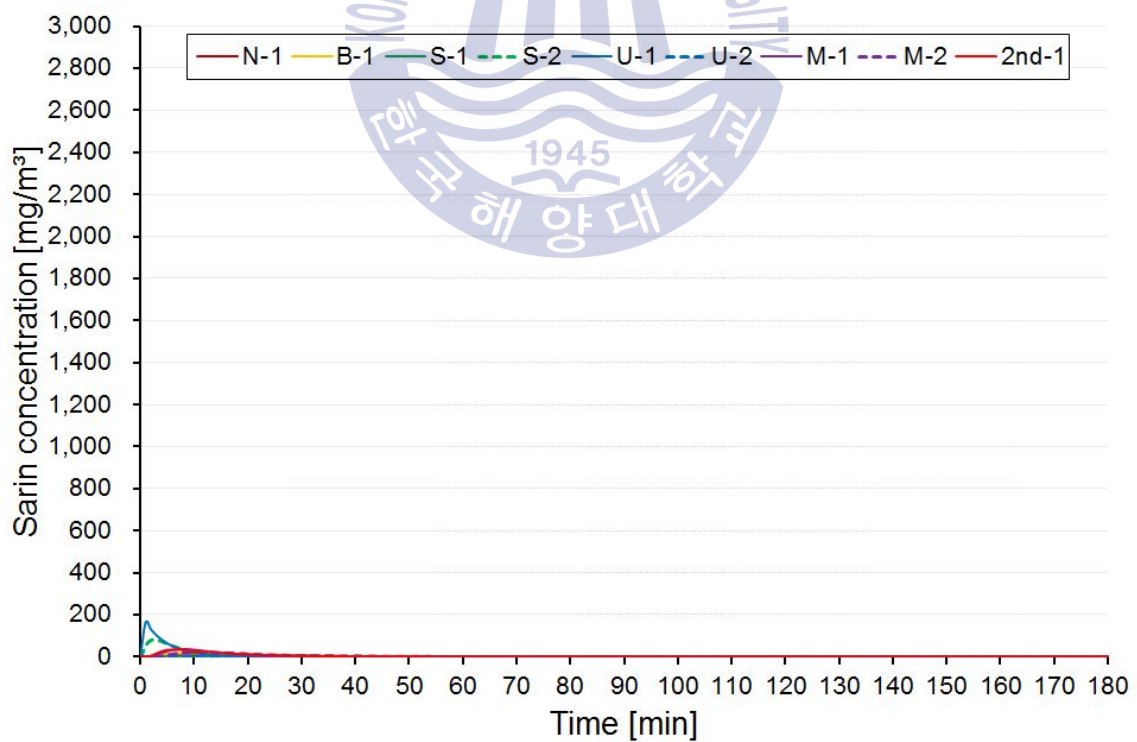


Fig. 20 시나리오-E의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source, OA: 75%)

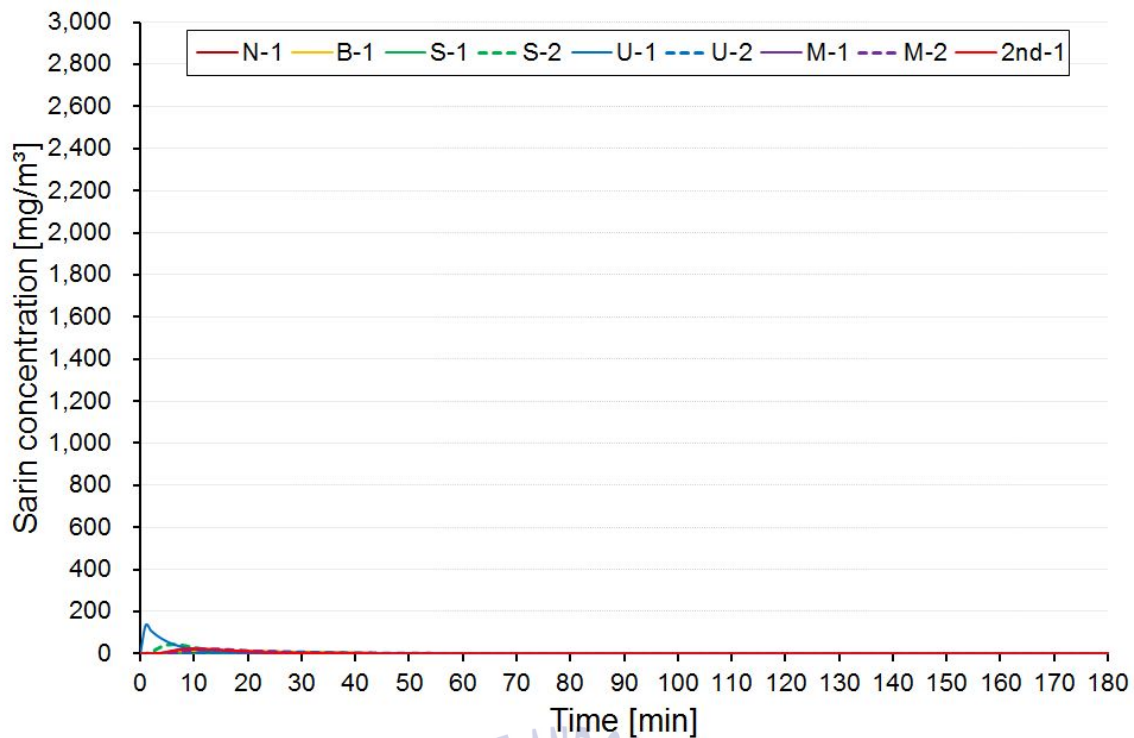


Fig. 21 시나리오-E의 결과 (오염원 발생 지점: U-Source, OA: 100%)

사린가스가 Upper 데크에서 발생한 시나리오-E의 경우의 결과는 Fig.22와 같다. 시나리오-E의 결과와 마찬가지로 신선외기 도입율에 대해 나누었고, 빨간색으로 표시한 지역은 사린가스가 100mg/m^3 이상으로 치명적하게 오염된 지역이고, 분홍색으로 표시한 지역은 50mg/m^3 이상으로 위험한 지역이다. 살구색은 $1\text{mg/m}^3 \sim 50\text{mg/m}^3$ 으로 인체에 영향이 나타나는 지역이고, 노란색은 1mg/m^3 미만으로 극소량으로 오염된 지역이다.

신선외기 도입율이 많아질수록 오염된 지역은 많아지지만 오염지역의 오염농도는 크게 줄어드는 경향을 보였다. 신선외기 도입율이 100% 일 때는 1개의 데크에만 치사량이상으로 오염된 지역이 존재하고 하부 데크는 대부분 나머지 데크는 50mg/m^3 이하로 낮은 농도로 오염이 되었다. 시나리오-E 보다는 치사량 이상으로 오염된 지역은 적었다.

Scenario-E

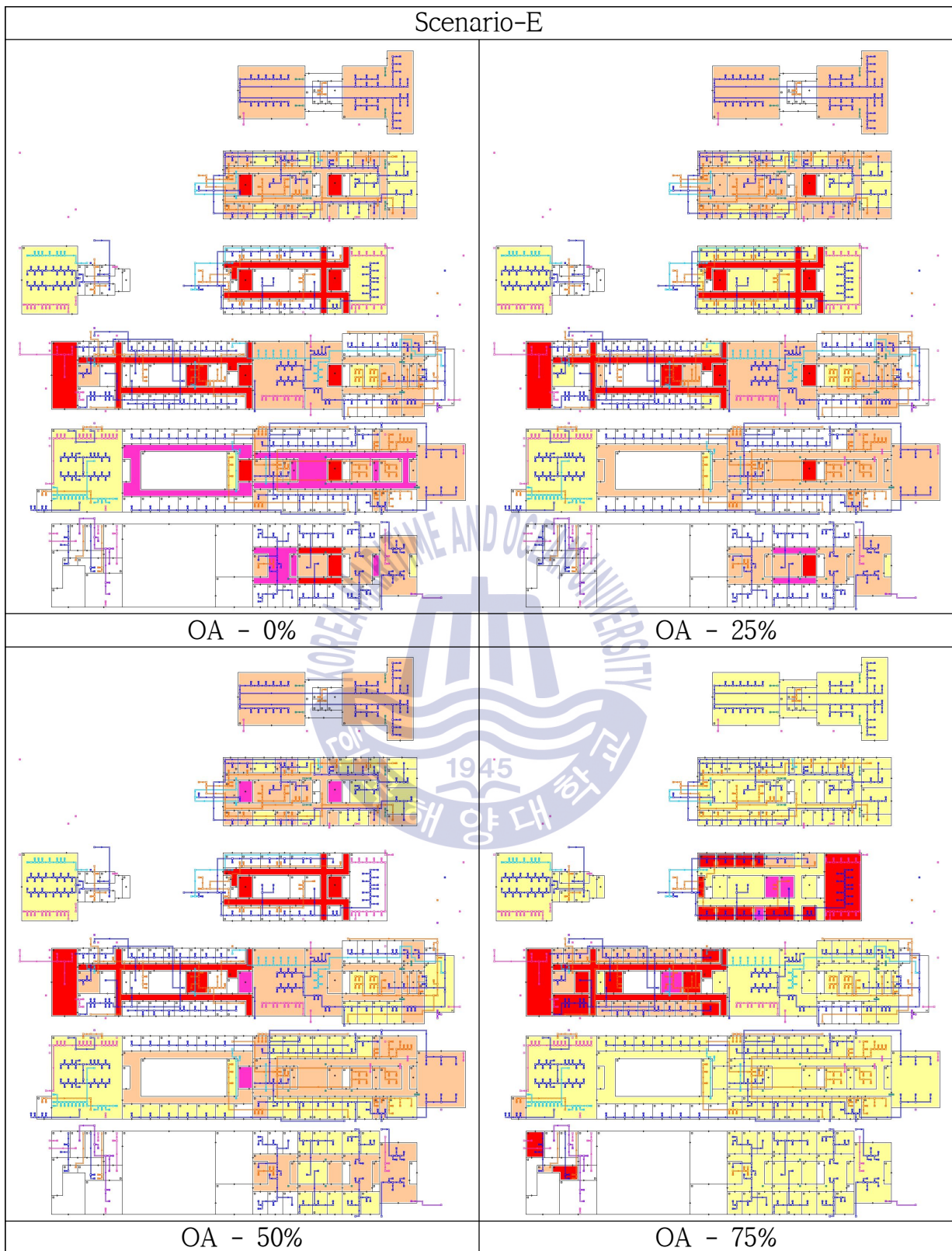




Fig. 22 시나리오-E의 오염지역 (오염원 발생 지점: U-Source)

4.6 시나리오-F의 결과

시나리오-F는 시나리오-C와 같은 2nd 데크의 2nd-Source에서 사린가스가 1kg 발생하였을 때의 경우이다. 시나리오-F의 경우 시나리오-E, 시나리오-F 보다 확산된 복도 지역에서 확산된 오염원의 양이 많다. 각각의 시나리오에서 2 곳 이상 최대 4곳까지 치사량이상으로 복도가 오염되었고, 완전히 제거되기 까지는 약 40분 정도가 소요 되었다. 신선외기 도입율이 0% 일 때 가장 많이 확산되고 2nd 데크에서 발생한 오염물질은 환기덕트에 의해 대부분이 Main 데크로 확산되고, Main 데크의 환기덕트에 의해 Shlter 데크로 확산되고 S-1 지점 까지도 치사량이상으로 오염되었다. 0%와 25%일 때 비슷한 경향을 보이고 50%~100%가 비슷한 결과를 얻었다. 오염물질이 최 하부 데크에서 발생한 경우에는 오염원의 발생농도는 높지만 다른 시나리오에 비해 전체 데크로 확산되지는 않았다. 하부 데크에서는 외부로 배출되는 양이 많게 설계되었기 때문이라고 판단된다.

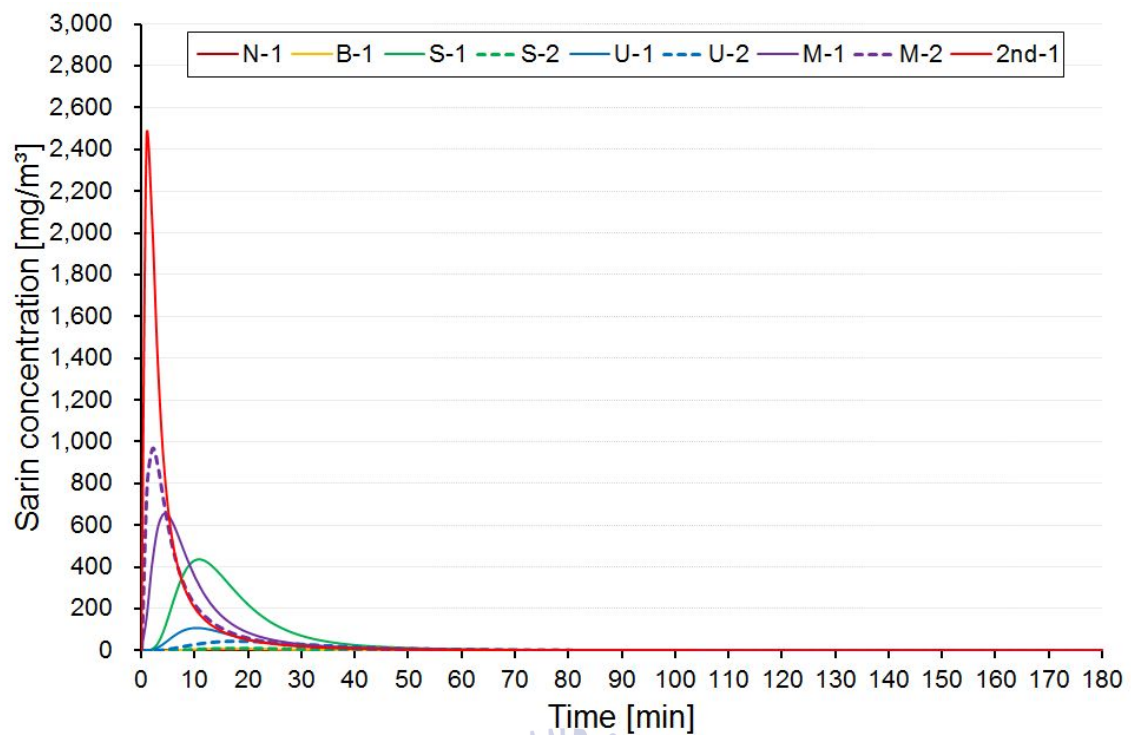


Fig. 23 시나리오-F의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source, OA: 0%)

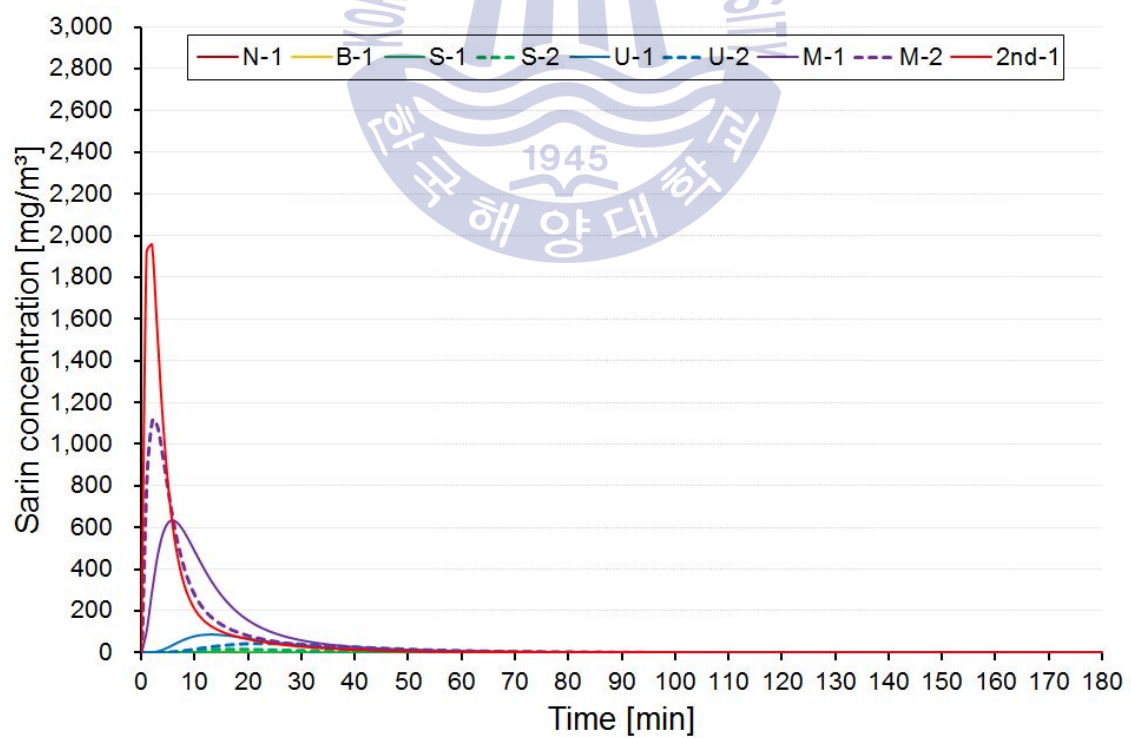


Fig. 24 시나리오-F의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source, OA: 25%)

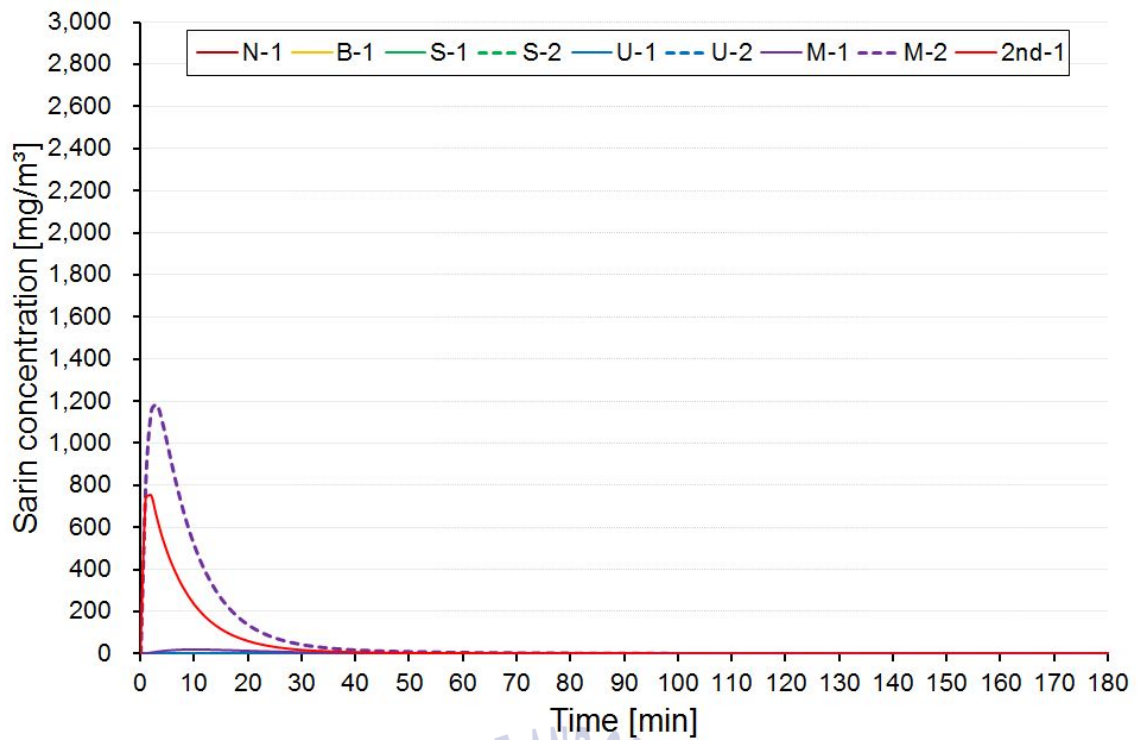


Fig. 25 시나리오-F의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source, OA: 50%)

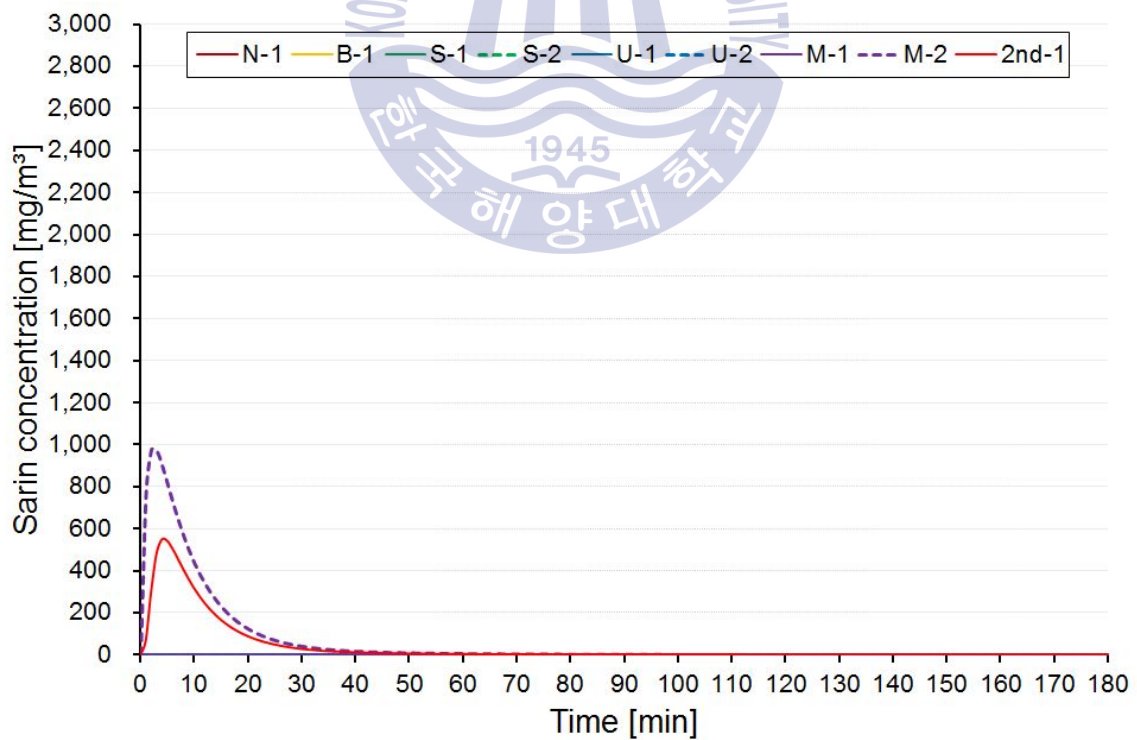


Fig. 26 시나리오-F의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source, OA: 75%)

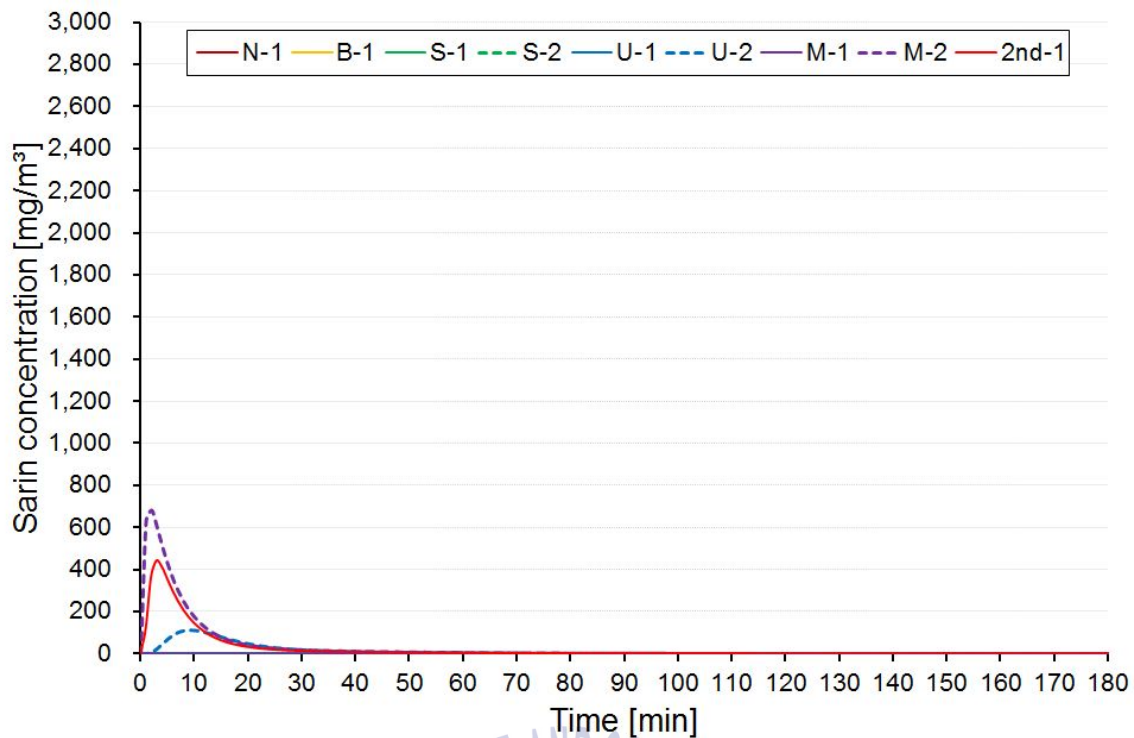
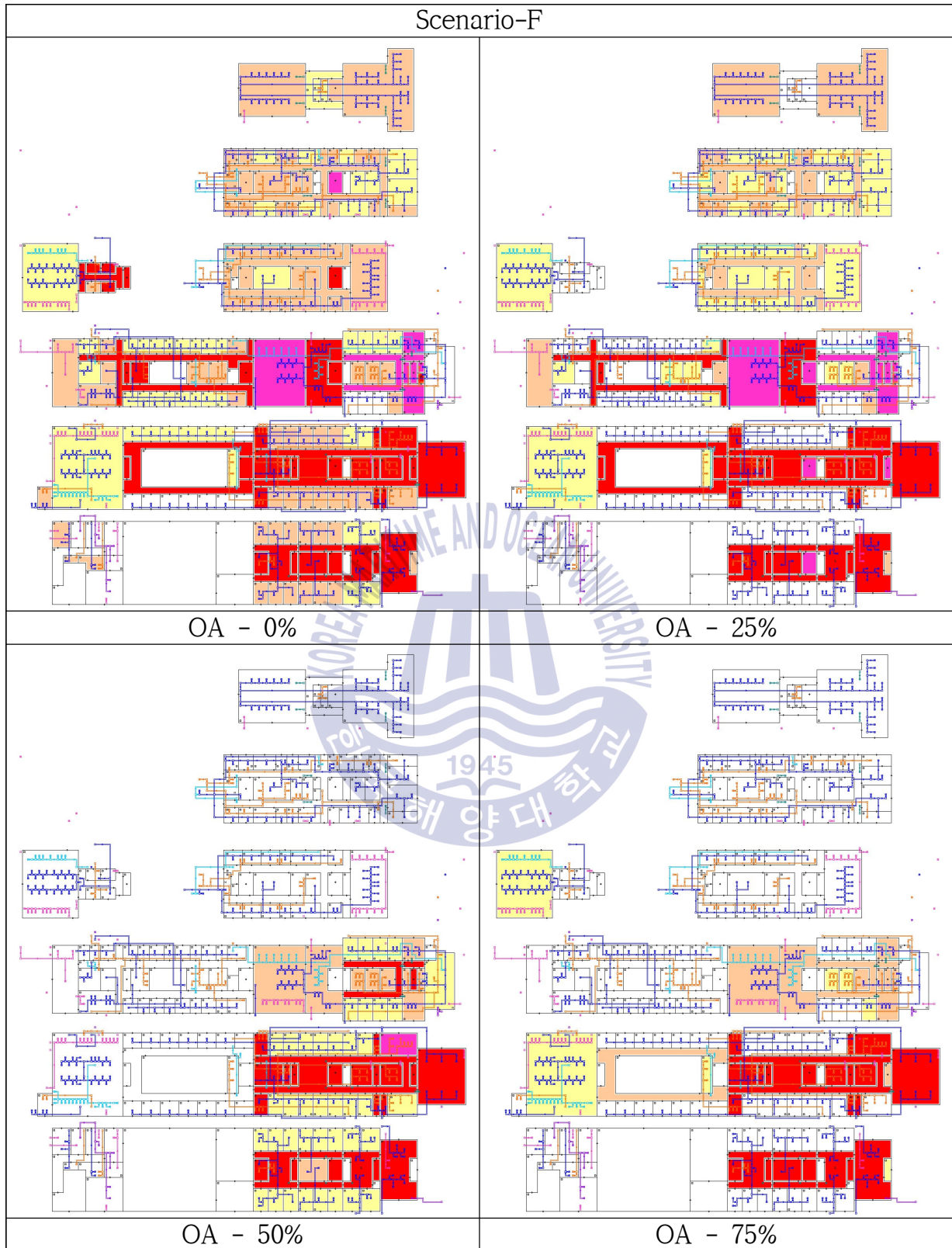


Fig. 27 시나리오-F의 결과 (오염원 발생 지점: 2nd-Source, OA: 100%)

가장 아래데크인 Upper 데크에서 사린가스가 발생한 시나리오-F의 결과는 Fig.28과 같다. 시나리오-D, E의 결과와 마찬가지로 신선외기 도입율에 대해 나누었고, 빨간색으로 표시한 지역은 사린가스가 100mg/m^3 이상으로 치명적이게 오염된 지역이고, 분홍색으로 표시한 지역은 50mg/m^3 이상으로 위험한 지역이다. 살구색은 $1\text{mg/m}^3 \sim 50\text{mg/m}^3$ 으로 인체에 영향이 나타나는 지역이고, 노란색은 1mg/m^3 미만으로 극소량으로 오염된 지역이다.

시나리오-F의 경우 신선외기 도입량에 따라 다른 시나리오들에 비해 결과의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 신선외기 도입율이 50% 미만일 때에는 전체 데크로 오염물질이 확산 되지만, 50% 이상일 때 부터는 4개 데크 미만으로 확산되었다. 특히 신선외기 도입율이 100%일 때에는 Main 데크와 2nd 데크만 오염되었고, 이는 Main 데크와 2nd 데크에서 외부로 배출하는 양이 상대적으로 많도록 설계되었기 때문이다.

Scenario-F



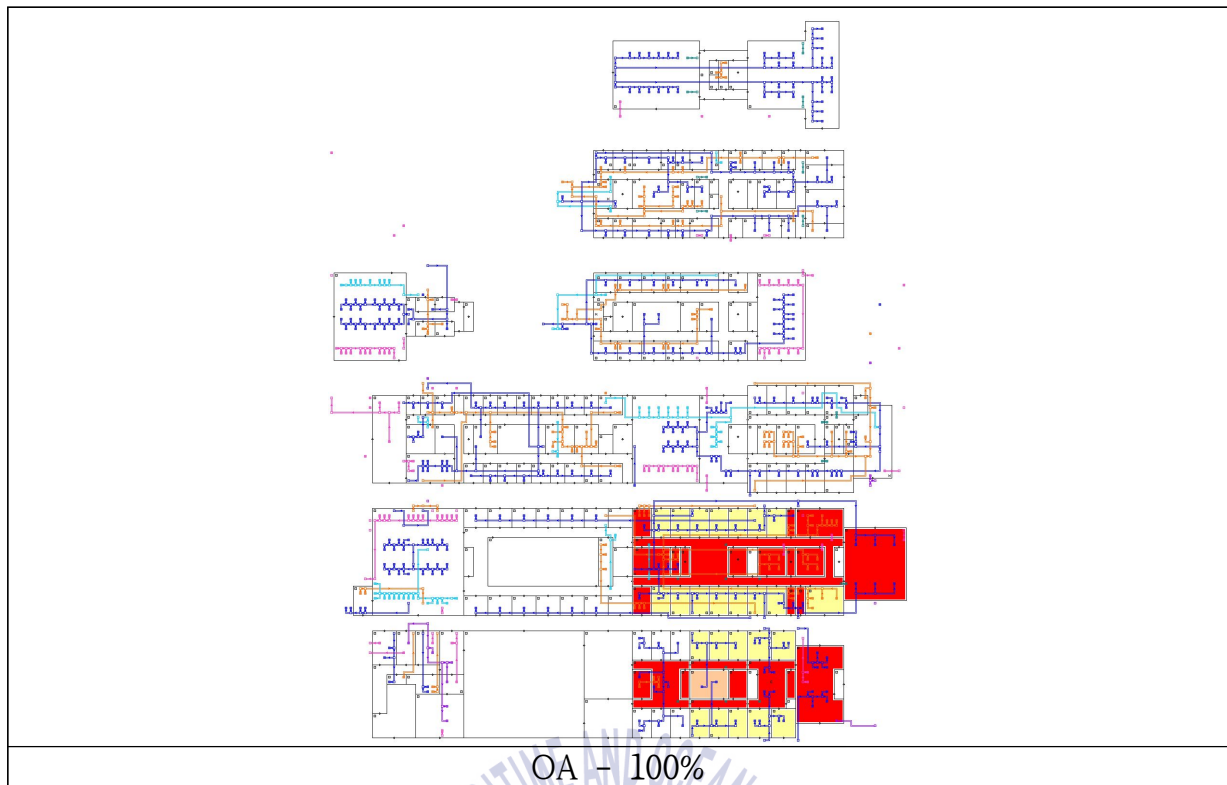


Fig. 28 시나리오-F의 오염지역 (오염원 발생 지점: 2nd-Source)

4.7 치사량이상으로 오염되는 사린가스의 발생량 및 시간

앞서 4.4절, 4.5절, 4.6절 에서는 오염원은 사린가스이고, 발생량은 1kg, 발생 지점은 Navi.&Bri. 데크, Upper 데크, 2nd 데크로 설정하였다. 사린가스가 1kg 발생하였을 때의 각각의 시나리오에서 모든 복도의 지역이 오염되지는 않았다. 이에 오염물질이 사린가스일 때, 전체 데크의 복도에 치사량 이상으로 오염되는 사린가스의 양과 도달하는 시간을 Table 23에 정리하였다.

시나리오-D의 경우가 가장 빠르고 적은 양으로 전체 데크의 복도지역이 오염 되는 결과를 확인 하였다. 시나리오-D의 신선외기 도입율이 0% 일 때, 2.9kg의 사린가스가 발생하면 전체 지역의 복도는 31분 만에 오염이 된다. 시나리오-F의 신선외기 도입율이 100%인 경우, 전체 데크의 복도 지역을 치사량이상으로 오염시켜 선박 내부 전체가 위험하게 되려면 사린가스의 양은 17.5kg, 도달하는 시간은 101분으로 가장 많은 양과 오랜 시간이 필요한 결과를 얻었다.

Table 23 치사량 이상으로 오염되는 사린의 발생량 및 시간

Scenarios	OA [%]	Sarin gas [kg]	Time [min]
D	0	2.9	31
	25	3.2	32
	50	4.3	39
	75	4.8	42
	100	5.7	51
E	0	4.1	35
	25	5.3	38
	50	7.3	41
	75	8.0	45
	100	9.4	58
F	0	9.0	54
	25	10.2	72
	50	12.4	80
	75	14.9	93
	100	17.5	101

제5장 결론

오늘날 현대인들은 개인의 소득 수준 향상과 함께 환경과 건강에 대한 관심이 증가하고 있다. 또한 FTA(국제무역)에 의한 해상운송량 증가로 승조원의 승선시간이 증가하고 있고, 크루즈산업의 발달과 더불어 승객과 승조원이 해상에서 보내는 시간이 점차 증가하고 있다.

선박은 고기밀성 구조를 가지고 있어서 선박의 내부와 외부 공기의 자연스러운 환기가 발생하기 어려우며, 오염물질이 발생한 경우 선박의 환기시스템을 통해 빠른 시간에 선박 내부로 확산되게 된다. 선박의 실내공간이 오염되었을 경우에는 장기간 거주하는 사람들의 건강에 심각한 영향을 미칠 수도 있다.

이에 이 연구에서는 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법”의 적용대상에 포함되어 있지 않은 선박에서 선내 오염물질이 발생하였을 때, 오염물질의 확산 특성과 그 위험성에 대해 예측하고 평가하였고, 연구의 성과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 오염물질이 발생한 데크에 따라서 발생한 오염물질이 완전히 제거되는 데에는 20분~80분이 소요 되었다. 그리고 오염물질 발생 장소는 동일하고, 신선외기 도입율이 다를 때에는 오염물질이 발생한 선실에서 오염물질이 제거되는 시간의 차이는 비슷하거나 최대 30분 정도의 차이를 보였다.

(2) 오염물질이 발생한 후, 모든 데크의 복도에서 오염물질이 제거되는 시간은 신선외기 도입율 및 발생 데크에 따라 20분~60분 정도 소요되었으며, 신선외기 도입율의 영향을 많이 받았다.

(3) 상부 데크에 오염원이 발생한 경우가 하부 데크에서 오염원이 발생한 경우에 비해, 오염원의 농도는 3배 정도 낮지만, 오염이 되는 데크 및 공간의 수

는 오히려 1.5배 이상 많아졌다. 이는 상부 데크의 공기는 데크간의 환기를 목적으로 설치한 환기덕트에 의해 아래쪽으로 공기를 순환하기 때문이다. 반면 하부의 데크에서는 상부의 데크 보다 많은 배기덕트가 있기 때문에 오염물질의 농도는 높지만 오염지역은 적었다.

(4) 오염물질이 최하부 데크에서 발생한 경우가 신선외기 도입율 변화에 따라 오염물질이 오염되는 공간의 비율과 오염 농도의 변화가 가장 컸다. 최하부 데크에서 오염물질이 발생한 경우에 신선외기 도입율이 50% 이상일 때는 3개의 데크만 오염이 되었고, 신선외기 도입율이 50% 이하일 때는 6개의 데크가 오염되었다. 반면 상부 데크에서 오염물질이 발생한 경우는 신선외기 도입율이 75% 이상일 때부터 오염된 지역의 오염농도가 큰 차이가 발생하였다.

(5) 선박에서 사린가스가 발생한다면 선박의 환기시스템에 의해서 30분 이내로 선내 전체 복도 중 50% 이상의 지역이 치사량 이상으로 오염이 되었다. 사린가스는 치사량이상인 지역에서 10분 이내에 있을 시 95% 이상이 사망하게 되기 때문에, 만약 사린가스가 발생한다면 40분 이내에 50% 이상의 지역이 매우 위험하게 된다. 또한 상부 데크에서 발생한 경우가 하부 데크에서 발생한 경우보다 빠르고 많은 지역으로 확산되기 때문에 상대적으로 더욱 위험하다고 평가되었다.

(6) 사린가스의 경우에는 신선외기 도입율 및 발생 장소에 따라 2.9kg~17.5kg 이상이 발생하였을 때, 31분~101분 경과된 후 선내 복도 전체가 치사량 이상으로 오염이 될 것으로 예측되었다.

선박은 고기밀성 구조라는 특수성 때문에 자연환기가 어려워 기계식 환기 시스템을 대부분 사용한다. 그렇기 때문에 평소에는 데크와 데크, 선실과 복도 사이의 공기가 잘 순환되는 구조를 가지지만, 오염물질이 발생한다면 선박의 환기 시스템을 통해 빠른 시간 내에 많은 공간으로 오염물질이 확산되는 것을 확인 하였다. 향후 선박의 환기시스템을 설계할 시 이와 같은 점들을 반드시 고려하여야 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 관계부처 합동(국무조정실, 교육인적자원부, 행정자치부, 산업자원부, 보건복지부, 환경부, 노동부, 건설교통부), 2004. *실내공기질 관리 기본계획*.
- 김일영, 2015. *제연덕트를 이용한 환기성능 개선에 관한 연구*. 박사학위논문. 군포:한세대학교.
- 김창남, 2006. *복합 건축자재의 물질전달계수를 이용한 실내 오염물질 농도 예측방법*. 석사학위논문. 서울:연세대학교.
- 도근영, 이한석, 이윤규, 이형기, 2007. 새로 건조된 선박의 실내공기환경 조사 연구. *한국항해항만학회지*, 31(5), pp.427-434.
- 신동걸 등, 2007. 신조운항실습선의 공기질 환경 실태 조사. *2007년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집*, pp.195-196.
- 유승호, 2015. *국내외 실내공기질 기준 및 관리 동향*. 고려대학교 보건과학대학.
- 이현우, 최상곤, 홍진관, 2009. 멀티존 시뮬레이션을 이용한 생물안전 3등급(BSL3)시설의 설계 검증에 관한 연구. *대한설비공학회 2009 하계학술발표대회논문집*, PP.745-750.
- 이현우, 2007. *건물의 바이오테러에 따른 실내의 미생물 확산 및 제어방안에 관한 연구*. 석사학위논문. 성남:경원대학교.
- 조권희, 이형기, 이진욱, 감문상, 2007. *실습선 한바다*.
- 최상곤, 이현우, 홍진관, 2006. 실내 미생물오염 전파방지를 위한 멀티존 모델링에 관한 연구. *설비공학논문집*, 18(11), pp.933-940.
- 한국건설기술연구원, 2006. *새집증후군 저감을 위한 공동주택 및 다중이용시설의 환기 설비 설치기준 해설서*, 건설교통부 한국건설기술연구원.
- 홍진관, 최상곤, 2007. 멀티존 시뮬레이션에 의한 공동주택의 미생물 오염원 확산과 제거에 관한 연구. *설비공학논문집*, 19(4), pp.291-298.
- 환경부, *다중이용시설 등의 실내공기질관리법*, 법률 제12216호, 2014.01.07.(타법개정)
- 환경부(서울시립대학교 도시과학연구원), 2002. *실내공간 실내공기오염 특성 및 관리방*

- 법 연구, 서울:환경부 서울시립대학교 도시과학연구원.
- 환경부 · 국립환경과학원, 2012. 주택 실내공기질 관리를 위한 매뉴얼.
- 황광일, 2011. 기계식 환기시스템에 의한 실내 오염물질 확산 특성 예측. *한국마린엔지니어링학회지*, 35(8), pp.1124-1131.
- 황지현, 2014. 생물안전 3등급(BSL3) 연구시설의 CONTAM_CFD 연동해석 및 신재생에너지를 적용한 에너지 성능 해석에 관한 연구. 석사학위논문. 성남:가천대학교.
- Disraelly, D. S., Walsh, T. J., Zirkle, R. A., & Curling, C. A., 2011. A New Methodology for Estimating Nerve Agent (Sarin(GB)/VX) Casualties as a Function of Time: Defining the Human Response Injury Profile Nerve Agent Methodology. *Journal of Chemical Health & Safety*. pp.1-11.
- Lorenzetti, D. M., 2002. Assessing Multizone Airflow Simulation Software. *Proceedings of the Indoor Air, Monterey, CA*. pp.267-271.
- Lorenzetti, D. M., Dols, W. S., Persily, A. K., & Sohn, M. D., 2013. A stiff, variable time step transport solver for CONTAM. *The International Journal of Building Science and its Applications*. pp.260-264.
- Ng, L. C., Musser, A., Persily, A. K., & Emmerich, S. J., 2012. *Airflow and Indoor Air Quality Models of DOE Reference Commercial Buildings*. NIST Technical Note 1734.
- Okumura, T. et al., 2005. The Tokyo Subway Sarin Attack-lessons Learned. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 207. pp.471-476.
- Persily, A., Musser, A., & Leber, D., 2006. *A Collection of Homes to Represent the U.S. Housing Stock*. NISTIR 7330. pp. 1-27.
- Porter, D. A., Easterling, K. E., and Sherif, M. Y., 2014. *Phase Transformations in Metals and Alloys*. 2nd Ed. Garland Science(Taylor and Francis Group).
- Yu, S., He, L., & Feng, G., 2015. The Transient Simulation of Carbon Dioxide Emission From Human Body Based On CONTAM. *9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE)*. 121, pp.1613-1619.
- Walton, G. N., & Dols, W. S., 2013. *CONTAM User Guide and Program Documentation*. NISTIR 7251.

감사의 글

지난 3년간의 짧지 않은 시간 동안 환경설비실험실에서 연구를 진행하면서 제 삶에 있어서 잊을 수 없는 중요한 부분을 많이 배울 수 있었습니다. 항상 부족한 시간과 중압감에 보낸 날들이었지만, 그 벅찬 시간 동안 학문을 포함한 많은 것들을 배우고 얻을 수 있었습니다. 학창시절 배우고 익힌 학문적 성과도 중요하지만, 오늘 이 순간까지 항상 저를 걱정해주시고 도움을 주신 분들과 함께한 시간들이 참으로 소중한 기억으로 남기고 또한 아름다운 인연으로 간직하겠습니다.

학위과정 동안 부족함이 많았던 저에게 격려와 가르침, 꿈과 희망을 가지도록 세심한 조언과 학문 그리고 인생의 바른 길을 알려주신 황광일 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 더욱 좋은 논문이 될 수 있도록 지도 편달을 아끼지 않으셨던 도덕희 교수님, 방광현 교수님께도 감사의 말씀을 올립니다. 제가 대학에 입학하면서부터 전공지식을 전해주시는 기계공학부 교수님들께도 깊이 감사드립니다.

더불어 연구실에서 저와 함께 동고동락 하며 저에게 항상 힘이 되고 저를 성장시켜 준 했던 구재혁, 조형오, 김별, 김정원에게 고맙다고 전하고 싶습니다. 또한 공동으로 연구를 진행하며 많은 일을 함께 하며 깊은 가르침을 주신 김윤해 교수님 및 복합재료 실험실원들께도 감사드립니다.

그리고 함께 지내며 나를 도와준 룸메이트 민수, 영택이, 형오, 문기형에게도 고맙다고 전하고 싶습니다. 석사과정 중에 같이 밤을 지새우며 물신양면으로 나를 도와주고 먹여 살린 셰프들 박창욱 박사학생(서른), 최고 셰프 유태식 유정오(종이장), 정민교(나가세-1)에게도 고맙습니다. 돌아보면 정말 많은 사람들의 도움과 관심 속에서 즐겁게 생활했습니다.

마지막으로, 많은 어려움 속에서도 항상 멀리서 지켜 봐주고 힘이 되어준 아버지, 어머니께 감사드립니다. 평생을 다 갚지 못할 사랑을 주신 부모님께 이 논문을 바치며 감사의 글을 마치겠습니다.

저를 항상 지켜보며 관심 보여주었던 제 주위의 모든 사람께 다시 한 번 감사하단 말씀 올립니다. 고맙습니다.