

대공간용 비상피난지원 시스템에 화재가 미치는 영향 분석

김지태¹, 성건혁¹, 박원희², 이덕희², 유우준³, 노경철^{3*}

¹중앙대학교 기계공학과, ²한국철도기술 연구원, ³동양대학교 철도기계시스템학과

Influence of the Fire on Emergency Evacuation Support System

JiTae Kim¹, Kun Hyuk Sung¹, Park Won Hee², Lee Duck Hee², Woo Jun You³,
Kyoung-Chul Ro^{3*}

¹Mechanical Engineering, Chung-Ang University

²Korea Railroad Research Institute

³Rail road Mechanical Engineering system, Dong-Yang University

요약 비상 피난 지원 시스템은 화재시 차연막이 형성되며 차연막 내에 가압을 하여 안전한 피난로를 확보해주는 시스템이다. 안정적인 작동을 위해서는 비상 피난지원 시스템의 차연막은 적절한 내화성능을 갖추어야 한다. 따라서 본 연구에서는 화재가 차연막에 미치는 영향을 수치해석적 방법으로 분석하였다. 수치해석 대상은 다중이용 건축물의 대공간 의류 상점의 화재로 가정 하였으며 상점의 가연물에 따라 화재 시나리오를 설정하였다. 차연막의 내화 안전 온도는 화재에 의해 발생하는 고온의 가스 온도가 200 °C 이하 일때로 가정 하였다. 그 결과 Ceiling jet 의 영향으로 천장 부분에서 가장 높은 온도가 나타났다. 차연막의 내화 안전성은 열 방출률에 따라 화재로부터 차연막의 거리가 20 m부터 또한 최대 열방출율시 30 m 이후에 확보 할 수 있을 것으로 판단하였다. 또한 비상 피난지원 시스템 내부로 연기 유입을 차단하기 위해 차연막 내부를 양압으로 유지 하여야 하며 약 5 Pa 이상 가압이 필요 할 것으로 판단하였다. 따라서 향후 비상 피난 지원 시스템의 설계시 본 연구의 결과가 유용하게 사용 될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract An emergency evacuation support system is used to maintain evacuation routes by pressurizing a space inside screens. In cases of fire, it is important to understand the thermal distributions in the tunnel for preventing system failure. In this study, we numerically investigated the effect of fire on an emergency evacuation support system in a large fabric store with some fire scenarios with different combustibles. The critical temperature for system failures was assumed to be 200°C. As a result, the highest temperature was predicted in the ceiling part due to the effect of a ceiling jet, and the fire safety of the screen was secured at distances of 20 to 30 m according to the heat release rate. To prevent the inflow of smoke into the system, it is necessary to maintain more than 5 Pa if positive pressure inside the smoke screen. The results of this study could be useful for designing an emergency evacuation support system.

Keywords : Fire, Large Space, Temperature, Evacuation, Smoke, Positive Pressure

이 논문은 2016년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 융합연구단 사업(no. CRC-16-02-KICT)의 지원을 받아 수행된 연구임.

*Corresponding Author : Kyoung-Chul Ro(Dongyang Univ.)

Tel: +82-54-630-1384 email: kcro@dyu.ac.kr

Received February 12, 2018

Revised March 21, 2018

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

1. 서론

인구의 증가와 도시화가 고도화됨에 따라 도시의 구조물은 공간적 효율성을 증가하기 위해 지하철, 상가, 영화관등이 밀집되어 있는 대공간 및 지하근린생활 시설로 지어지고 있다. 일반적으로 이러한 공간은 다중이용건축물로 현행 건축법 제 5조 4항 3호에는, “문화 및 집회시설(전시장 및 동 식물원을 제외한다), 판매 및 영업시설, 의료 시설중 종합병원 또는 숙박 시설중 관광 숙박시설의 용도에 쓰이는 바닥면적의 합계가 5000 m³ 이상인 건축물로 규정하고 있다 [1]. 다중이용건축물은 단위면적당 많은 인구가 밀집되어 있어 실화의 가능성이 높고 화재가 발생할 경우 많은 경우에 제연 시설의 노후화 및 제연 용량 부족 및 연기의 이동 경로와 피난 경로가 겹치게 되어 많은 인적 물적 피해가 발생 하는 문제점이 있다 [2].

대표적인 화재 사례로는 2003년 대구 지하철 화재와 2005년 대구 서문시장 화재가 있다. 대구 지하철 화재는 유독가스가 피난로에 유입되어 원활한 피난활동이 이루어지지 못하여 많은 인명 피해를 야기 하였으며 대구 서문시장 화재는 원단 및 섬유제품과 같은 가연성 물질들이 연소하면서 나온 질은 유독성 연기로 인해 소방관들의 소방 활동에 어려움이 많았으며 큰 물적 피해를 야기 하였다 [3].

이에 따라 이와 같은 공간에서의 제연설비의 성능확보가 중요한 쟁점이며 제연성능기준을 도출하고자 현장 조사를 통해 화재 위험도가 비교적 높은 대공간 지하상가의 종류, 면적, 높이 및 가연물 종류를 수집하여 각 상가의 추정 발열량을 도출해 내었으며 이러한 화재 모델을 바탕으로 대공간 상가의 피난 해석을 통해 피난성능을 평가 하였다 [4].

하지만 많은 다중이용건축물은 제연 팬이나 에어커튼 방식으로 제연을 하고 있으나 피난방향을 잘 못 선정할 피난자는 구조할 수 없으며 에어커튼방식은 사용 가능한 위치가 제한적인 단점을 가지고 있다. 그러므로 이러한 기존 시스템의 단점을 극복 하고자 차연막을 가지는 비상 피난지원 시스템을 연구 개발 하고 있으며 이러한 시스템은 공간내 전구간에 방향과 관계없이 피난자를 화재와 연기로부터 보호할 수 있는 장점을 가지고 있다.

비상피난지원 시스템은 차연막과 이를 펼칠 수 있는 구동부로 구성되어 있으며 화재 발생 시 차연막 내부에 의기를 가압하여 열 연기 유입을 방지하여 안전한 피난

로를 확보할 있다. 따라서 비상 피난 지원 시스템 설계시 높은 내화성능이 요구되어지나 경제성 및 작동방식에 따른 재료의 물리적 특성 때문에 차연막의 특성이 고려된 시스템의 설계가 요구되어진다.

따라서 본 연구에서는 비상피난 지원 시스템 설계시 적절한 작동 방식을 도출하기 위해 화재에 의한 차연막의 온도 상승과 압력 상승이 화재와 비상피난지원 시스템의 거리에 따른 영향을 분석하였다.

2. 수치 해석 모델 및 조건

2.1 지배방정식 및 난류 모델

대공간에서 화재에 의한 열유동을 해석하기 위해 미국 NIST의 BFRL그룹에서 개발한 화재해석용 소프트웨어인 Fire Dynamics Simulator (NIST, 2010)을 사용하였다. 지배방정식으로는 Low Mach Number Navier-Stokes 를 사용하였으며 난류 계산을 위하여 Large Eddy Simulation (LES) 모델을 사용하였다. FDS에서 사용된 LES 모델은 Navier-stokes 방정식을 필터링 하여 얻었으며 난류 점성모델은 Deardorff 가 제시한 모델을 사용하였다 [5]. 또한 복사 열전달을 해석하기 위하여 회색가스 복사 모델을 사용하였다.

2.2 형상 및 경계 조건

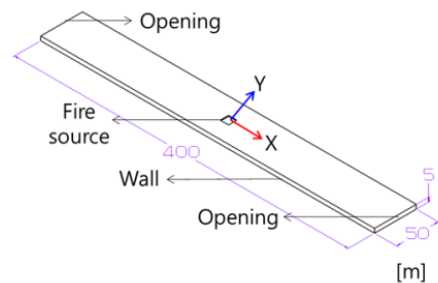


Fig. 1. Geometry and boundary conditions

Fig. 1 은 수치해석을 위한 대공간의 형상과 경계조건이다. 대공간은 지하상업시설로 가정 하였으며 총길이 400 m, 넓이 50 m 높이 3 m 로 설정하였다. 화원은 공간내 중심에 위치하였으며 화원의 크기는 지하상가의 류상점 평균 바닥 면적인 11.2 m² 에서 실 제품이 놓여 있는 면적으로 가정하였으며 한변의 길이가 2 m 높이가 1 m 인 직사각형으로 가정하였다. 경계조건은 공간의

양 끝에 대기압 조건을 주었으며 모든 벽면은 단열 조건을 주었다.

2.3 해석 조건

본 연구의 비상 피난지원 시스템은 대공간 지하 쇼핑센터와 같은 공간에서 화재 초기에 채실자의 안전한 대피를 위한 피난로 형성을 목표로 하고 있으며 따라서 가장 가혹한 화재 시나리오는 대공간 지하 쇼핑센터에서 가장 높은 발열량을 가지고 있는 것으로 알려진 의류상점으로 가정하였다.[4] 이때 의류상점 1개의 평균 총 발열량은 약 40 MW 이고 본 연구에서는 의류상점의 발열량을 최대 화원으로 설정하였다. 또한 화원의 열 방출율에 따른 영향을 분석하기 위해 Table 1. 과 같이 총 세 가지 Case 의 열 방출율을 설정하였다.

또한 화재의 성장곡선은 가혹한 조건을 주기 위하여 Ultra fast로 설정하였으며 모든 Case에서 460초에 최대 열방출율에 도달한다. 또한 해석 시간은 총 1200 s 까지 수행 하였으며 460초 이후에는 최대 열 방출율이 유지된다. Opening 조건은 대기압의 20 °C 로 설정하였으며 중력은 -z 방향으로 9.81 m/s² 이다. 대공간의 격자는 Fig. 2와 같이 격자 독립성 시험을 통해서 결정하였으며 가장 작은 격자의 한변의 길이가 0.25 m 인 직육면체 격자를 형성 하였다.

Table 1. Heat release rate and pool size of cases

Cases	Heat release rate [MW]	Pool Size [m]
Case 1	10	2.0 × 2.0
Case 2	20	
Case 3	40	

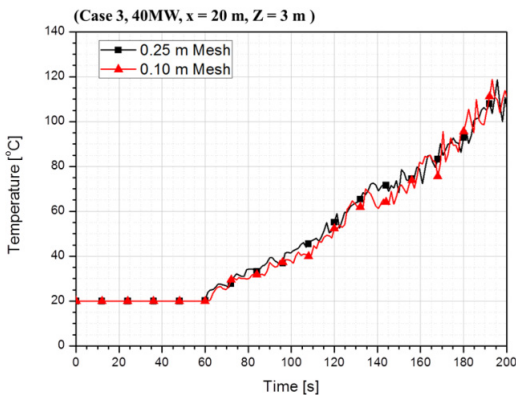


Fig. 2. Grid independence test.

2.3 수치해석 유효화

본연구의 열 유동은 Ceiling jet에 의한 열유동이 지배적이며 따라서 수치해석 유효화는 식 1 과 같은 Alpert [6]가 제시한 Ceiling jet의 온도를 예측하는 경험식과 비교를 하였다.

$$T - T_{\infty} = \frac{16.9\dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}} \text{ for } r/H \leq 0.18$$

$$T - T_{\infty} = \frac{5.38(\dot{Q}/r)^{2/3}}{H} \text{ for } r/H > 0.18 \quad (1)$$

이 식은 열방출률 \dot{Q} , 공간 높이 H, 화원의 중심으로부터 반경반향 길이 r 그리고 대기 온도 T_{∞} 를 통해 천장 부분의 특정 위치의 온도 T 의 관계를 예측하는 식이다. 수치해석 유효화를 확인하기 위하여 가장 Ceiling jet의 영향을 많이 받는 천장 (Z=3 m) 및 화원으로 부터의 20 m 인 부분의 온도를 비교하였다.

Fig. 3은 FDS 수치해석 결과와 Alpert 의 경험식을 비교 한 결과이다. 비교 결과 최대 온도차는 약 12 °C 발생하였으며 이는 Alpert 의식은 Z 방향으로 4.6 m 이상인 공간에서 유도된 반면 본 연구의 천장은 3 m 이기 때문에 상대적으로 부력에 의한 속도 증가가 적기 때문일 것으로 판단되며 최대 온도차의 범위가 약 9 % 이내로 수치해석 유효화를 확보 한 것으로 판단하였다.

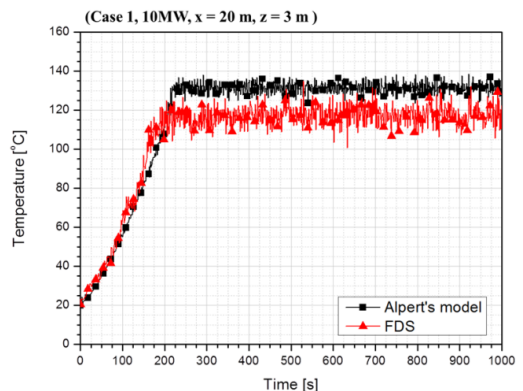


Fig. 3. Comparison of FDS result with Alpert's Ceiling jet equation.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용되는 차연막의 내화 온도는 약 200℃이며 따라서 본 연구에서는 차연막의 내화 온도가 만족되는 화원으로 부터의 최소 거리를 수치해석으로 분석하고자 하였다. Fig. 4는 Case 1의 천장 부분에서 화원으로부터 20 m 간격의 시간에 따른 온도이다.

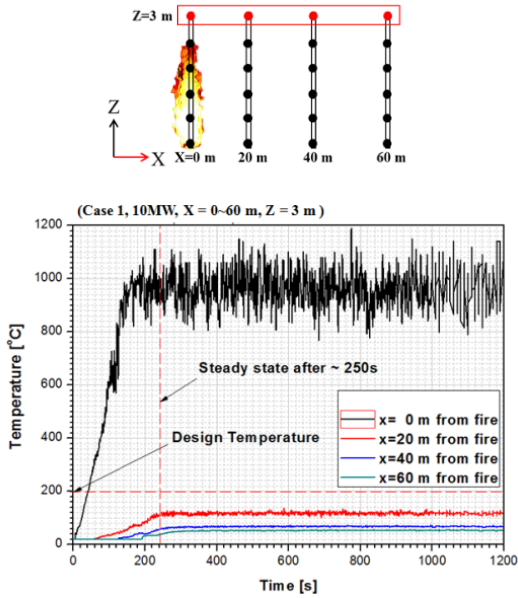


Fig. 4. Temperature of ceiling jet ($Z=3$ m) with distance from fire.

화원의 열방출률은 460초 까지 Ultra fast로 성장 하지만 공간내의 천장 근처의 온도는 약 250초 이후에 준정상상태가 된다. 또한 화원의 원점 위치의 천장 부분 온도는 난류의 영향으로 많은 온도 변화를 보이지만 화원으로부터의 거리에 따라 온도 변화의 폭이 매우 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 화원으로부터 거리에 따른 영향 분석은 600초부터 900 초까지의 평균 온도로 분석 하였다.

Fig. 5는 천장 근처 ($Z=3$ m)에서 화원의 크기와 화원으로부터의 거리에 따른 600초부터 900초의 평균온도이다. Case 1 과 Case 2는 화원으로부터의 거리가 약 20 m부터 설계목표온도인 200℃ 이하인 온도가 되지만 Case 3는 약 30 m부터 설계 목표 온도이하가 되었다. 또한 Fig. 6은 천장으로부터 1m 낮은 ($Z=2$ m) 부분에서의 화원으로부터의 거리에 따른 온도 분포로 모든 Case

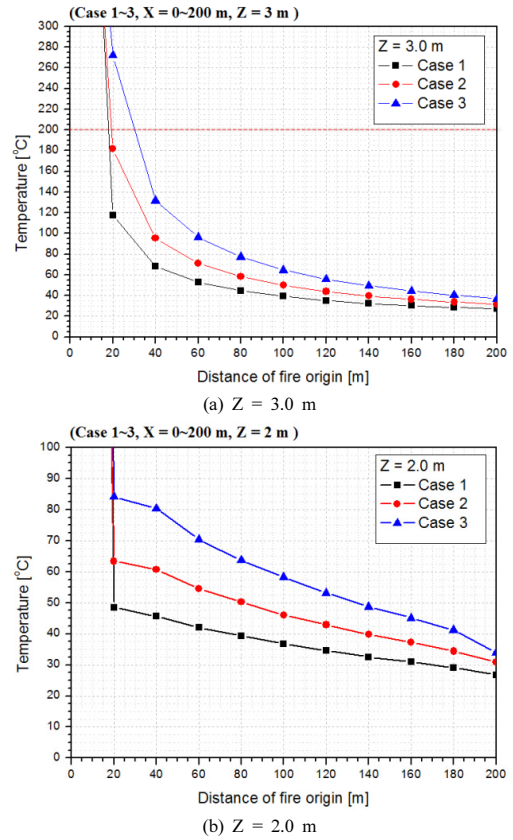


Fig. 5. Temperature of ceiling jet with distance from fire, (a) $Z=3.0$ m, (b) $Z=2.0$ m.

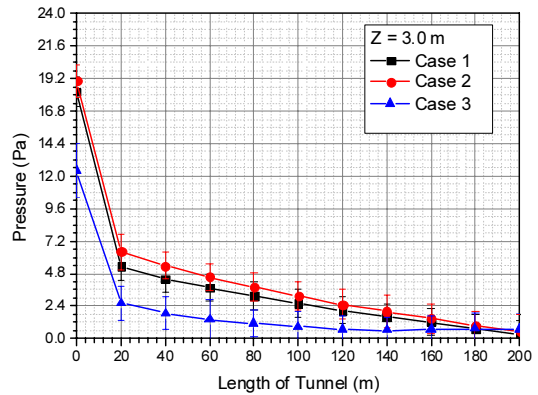


Fig. 6. Pressure of ceiling jet with distance from fire.

에서 20 m 이후부터는 설계 목표 온도보다 낮은 온도를 보이고 있다. 이러한 원인은 화재에 의한 열 기류는 천장에 부딪힌 후 개방된 출구 방향으로 향하는 Ceiling jet 유동을 보이며 화원으로부터의 거리에 따라 화재에 의한 열 기류는 주변으로 에너지를 소실하기 때문에 천장 부

분의 Ceiling jet의 온도는 화원으로부터 거리에 따라 감소하며 Ceiling jet의 영향을 간접적으로 받는 Z=2 m 인 부분의 온도는 비교적 낮은 온도 분포를 보인다.

따라서 안전한 비상 대피 지원 시스템의 설계를 위해서는 화재의 크기를 고려하여 화원으로부터 거리에 따른 초기 작동 시작 거리와 차연막의 지속적인 화재 안전성 확보를 위해 설치 높이를 충분히 고려해야 할 것으로 판단되었다.

Fig. 6은 천장 근처 (Z=3 m)에서 화원의 크기와 화원으로 부터의 거리에 따른 평균 압력이다. 화원으로부터 20 m 거리에서 Case 1, Case 2의 압력은 5.3 Pa, 6.4 Pa 이며 Case 3는 2.6 Pa 로 Case 3의 압력이 비교적 낮은 압력을 보이며 화원으로부터의 거리가 멀어질수록 압력이 선형적으로 감소하였다. 이는 Case 3의 화원이 크기 때문에 Ceiling jet의 유속이 비교적 빠르기 때문에 낮은 압력을 보이는 것으로 판단된다.

그러므로 비상 피난 지원 시스템 내부에 화재로 인해 발생하는 유독가스를 포함한 연기의 유입을 차단하려면 최소 6.4 Pa 이상 가압이 필요 할 것으로 판단되며 이 압력은 비상 피난 지원시스템을 사용하는 피난자의 움직임에 대한 피스톤 효과 차연막 사이의 누설면적 등과 같은 효과가 고려가 되지 않은 화재에 의한 압력 상승으로 향후 시스템 제작시 가압 시스템에 다른 효과를 포함한 좀 더 많은 고려가 필요 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문은 비상 피난지원 시스템에 화재가 미치는 영향을 분석하기 위해서 수치 해석적 방법으로 화원의 크기와 화원의 거리에 따라 비상 피난지원 시스템에 영향을 미치는 온도, 압력을 분석하였으며 이에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 화원으로부터 거리가 약 20 m 이후부터 비상 피난 지원 시스템의 내화성능이 가장 낮은 차연막의 설계 온도를 만족 하므로 실제 시스템 설계시 이를 고려하여 설계를 하면 안전성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.
- (2) 비상피난 지원 시스템 안으로의 연기 유입 차단을 위해서는 최소 화재에 의한 압력 상승 이상으로 가압이 필요하며 추후 다양한 요인을 고려하여 가

압 시스템 설계시 추가 해석 검증을 통하여 추가적인 안전성을 확보 할 예정이다.

References

- [1] Dong Gyun Park, "The failure of Emergency Management System and It's Implication of the Multi-Utilization Facilities Fire Model - with the Case of Seomun Market Fire", *Journal of the Korean Urban Management Association*, vol. 19, no. 1, pp. 201-217, 2006.
- [2] Sungyong Bae, Kyoung-Chul Ro, Hong Sun Ryou, "Numerical Study on the Effect of Fire Growth on the Evacuating Characteristics in the Carriage Fire", *In: Proceedings of 2009 Autumn Annual Conference, The Korean Society for Railway*, pp. 881-886, 2009.
- [3] Yong Jun Jang, Won-Hee Park, Woo-Sung Jung and Chang Hyun Lee, "The Comparative Analysis of Passenger Evacuation Results Using CFAST and FLUENT", *Proceedings of 2007 Autumn Annual Conference, The Korean Society for Railway*, pp. 1348-1355, 2007.
- [4] Chan sol Ahn, "A Study for Estimation of Ventilation Capacity of Large Enclosure Considering Evacuation", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, vol. 12, no. 5, pp. 7-12, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2012.12.5.007>
- [5] DEARDORFF, James W, "Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers", *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 29, no. 1, pp. 91-115, 1972.
- [6] EVANS, David D. Ceiling jet flows. "*SFPE handbook of fire protection engineering*", 2, pp 2.32-2.39, 1995.
DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1972\)029<0091:NIONAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<0091:NIONAU>2.0.CO;2)

김 지 태(Ji Tae Kim)

[준회원]



- 2015년 3월 : 중앙대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 중앙대학교 일반 대학원 기계공학과

<관심분야>

전산유체, 화재, 혈류역학

성 건 혁(Kun Hyuk Sung)

[정회원]



- 2014년 3월 : 중앙대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2018년 3월 : 중앙대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2018년 3월 : ~ 현재 : 중앙대학교 일반 대학원 기계공학과

<관심분야>

전산유체, 열류해석, 열전달, 화재해석

유 우 준(Woo Jun You)

[정회원]



- 2007년 3월 : 항공대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 : 중앙대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2017년 3월 : ~ 현재 : 동양대학교 조교수

<관심분야>

화재실험, 화재해석, 복사열전달

박 원 희(Won-Hee Park)

[정회원]



- 2000년 2월 : 중앙대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 중앙대학교 일반대학원 기계공학부 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원
- 2014년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학교대학원 철도시스템공학과 교수

- 2009년 6월 ~ 2009년 12월 : 호주 Victoria Univ. 연구원

<관심분야>

철도 방재 및 화재 열유체

노 경 철(Kyoung-Chul Ro)

[정회원]



- 2001년 2월 : 중앙대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2009년 8월 : 중앙대학교 일반대학원 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 2011년 8월 : 중앙대학교 기계공학부 연구교수
- 2011년 9월 ~ 현재 : 동양대학교 철도차량학과 조교수

<관심분야>

전산유체, 열전달, 화재해석, 열류해석

이 덕 희(Duck-Hee Lee)

[정회원]



- 1997년 8월 : 연세대학교 물리학과 (이학석사)
- 2016년 8월 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도화재 위험도평가, 가스독성분석, 화재시뮬, 피난설비