

화원 위치 추정을 위한 베이시안 추정 기반의 모델링 및 시뮬레이션 연구

김태완·김수찬·김종환[†]
육군사관학교 기계시스템공학과

Study on Modeling and Simulation for Fire Localization Using Bayesian Estimation

Taewan Kim·Soo Chan Kim·Jong-Hwan Kim[†]
Department of Mechanical & Systems Engineering, Korea Military Academy

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Fire localization is a key mission that must be preceded for an autonomous fire suppression system. Although studies using a variety of sensors for the localization are actively being conducted, the fire localization is still unfinished due to the high cost and low performance. This paper presents the modeling and simulation of the fire localization estimation using Bayesian estimation to determine the probabilistic location of the fire. To minimize the risk of fire accidents as well as the time and cost of preparing and executing live fire tests, a 40m x 40m-virtual space is created, where two ultraviolet sensors are simulated to rotate horizontally to collect ultraviolet signals. In addition, Bayesian estimation is executed to compute the probability of the fire location by considering both sensor errors and uncertainty under fire environments. For the validation of the proposed method, sixteen fires were simulated in different locations and evaluated by calculating the difference in distance between simulated and estimated fire locations. As a result, the proposed method demonstrates reliable outputs, showing that the error distribution tendency widens as the radial distance between the sensor and the fire increases.

Keywords : Fire localization(화원 위치), Bayesian estimation(베이시안 추정), Modeling and simulation(모델링 및 시뮬레이션), UV sensor(UV 센서), Indoor fire environment(실내 화재 환경)

1. 서론

2019년 국내 해양사고는 2971건이 발생하였고, 이 중 화재, 폭발 사고는 132건이었으며(KOrean Statistical Information Service(KOSIS), 2021), 선박 및 항공기의 화재사고에서 27명의 사상자와 55.6억 원 상당의 피해액이 발생했다(National Fire Data System(NFDS), 2021). 이러한 화재에 신속하게 대응하기 위해 다양한 자동 소화체계가 연구되고 있지만, 정확한 화원의 위치를 선정하여 대응하는 것이 어렵다. 특히, 선박의 격실과 같은 실내 화재 상황에서 부정확한 화재진압은 소방호스에서 물이 고압으로 다량 배출되어 내부 시설물 또는 장비의 손상과 같은 2차 피해를 야기할 수 있다(Kim et al., 2017). 화재 진압 간 불필요한 피해를 줄이기 위해서는 화원을 신속히

감지하는 것뿐만 아니라, 화원의 정확한 위치를 파악하고 신속히 진압하는 것이 중요하다. 최근, 한국기계연구원을 중심으로 선박 내 격실 등의 실내에서 활용할 수 있는 자율형 초동진압 소화체계가 개발되고 있다. 이것은 화재 발생시 스스로 화재를 감지하고 화원의 위치를 판단하여 자율적으로 진압하는 시스템이다. 이 중에서도 자율 화재진압을 위해 중요한 정확한 화원 위치를 파악하는 과정은 화원 감지 이후에 효과적인 화재진압을 구현하도록 개발되고 있다.

그러나 기존 관련 연구를 살펴보면, 실내 화재 환경에서 정확한 화원 위치 추정에 어려움을 겪고 있다. 근본적으로 화원 감지를 위해 일반적으로 사용되는 센서는 화재 발생만 인식할 뿐 화원 위치를 파악하는데 필요한 데이터를 제공하지 못하기 때문이다(Starr & Lattimer, 2012; Kim & Lattimer, 2015). 최근 연구되고 있는 화원 위치를 판단하는 연구는 시각 기반 방법

과 센서 기반 방법으로 구분된다. Kim et al. (2014), McNeil and Lattimer (2016), Starr and Lattimer (2017)의 연구는 적외선 스테레오 비전 시스템을 사용하여 2개의 적외선 화상 이미지를 정렬시키고 이를 통해 화원의 3차원 정보를 생성하여 실내 화원의 위치를 산출하였다. 그러나 이 연구의 정확도는 적외선 카메라 두 대의 초점 사이 간격에 따라 달라지기 때문에 화원과 카메라 사이 거리가 길수록 정확도가 떨어지는 한계가 있었다. Pesatori et al. (2013)의 연구는 4x4 형태의 열전대열 (thermocouple)을 이용하여 화원의 위치를 판단하고, 그 중심을 계산하였다. 이 방법은 비용을 절감하고 설치를 단순화하는데 유용하였으나, 여전히 화원의 정확한 위치를 파악하는 데에는 한계가 있었다. 센서 기반 방법의 경우, Wi-fi, RFID를 사용하는 다중 온도 센서가 사용되었다. Overholt and Ezekoye (2012), Chu et al. (2017)의 연구는 연소실 천정에 설치된 열전대를 이용하여 화재시 실내 온도 분포를 측정하였다. 이는 실제 화재실험에서 관측된 온도를 고려하여 화원 위치의 확률 분포를 계산했다. 그러나 화원 위치에 관한 에러는 화원의 크기에 따라 달라졌고 정확도를 높이기 위해 많은 열전대가 요구되는 한계가 존재했다. Liu and Gu (2016)의 연구는 Wi-fi와 RFID 센서 네트워크를 이용하여 쇼핑물의 신호 강도를 측정하고 화원 위치를 계산하였다. 그러나 화원 위치를 판단하는 정확도는 센서의 적절한 위치 선정에 따라 변화하고, 정확도를 높이려면 Wi-fi 및 RFID 세트가 최소 3세트 이상이 요구되었다. 화원 위치를 판단하는 연구는 화원의 위치 판단에 대한 낮은 정확도와 비싼 설치비용의 문제들로 인해 연구를 수행하는데 어려운 실정이다.

본 연구는 베이지안 기반의 모델링과 시뮬레이션을 통해 불확실한 실내화재 상황에서 화원 위치를 확률적으로 판단하는 방법을 제시하였다. 이를 위해, 40m X 40m 크기의 가상의 2차원 공간과 두 개의 UV 센서를 모의하고, 실제 화재 실험 간 수집된 UV 센서 신호를 반영하여 16개의 서로 다른 위치의 화재 상황을 모의하였다. 또한, 베이지안 추정법을 적용하여 2차원 공간상의 화원 위치를 확률적으로 제시하고, 모의된 화원 위치와 본 연구에서 제안하는 추정된 화원 위치의 차이를 고려하여 제안한 방법의 성능을 분석하였다.

2. 시스템 구조

본 절은 두 개의 UV 센서를 결합하여 확률론적 화원 위치 추정에 대한 시스템 구조를 제시하였다. Fig. 1과 같이, 본 연구는 4단계로 구성되어 진행되었다. 첫 번째 단계는 센서가 0~180도를 스캔할 수 있도록 모델링하여 각도에 따른 UV 신호를 수집하였다. 두 번째 단계는 UV 센서와 화원 위치의 공간적 관계를 설정하여 각도별로 수집된 UV 센서 데이터를 극 좌표계로부터 x-y좌표계로 전환하였다. 세 번째 단계는 베이지안 이론을 적용하여 두 개의 UV 센서로부터 수집된 데이터를 통합하고 센서와 환경으로 발생하는 불확실성을 고려하여 화원위

치를 확률적으로 산출하였다. 네 번째 단계는 이전 단계에서 산출된 확률을 고려하여 화원 위치를 x-y좌표계에서 생성하고 확률의 값에 따라 다른 색을 부여하여 화원 위치 결과를 출력하였다.

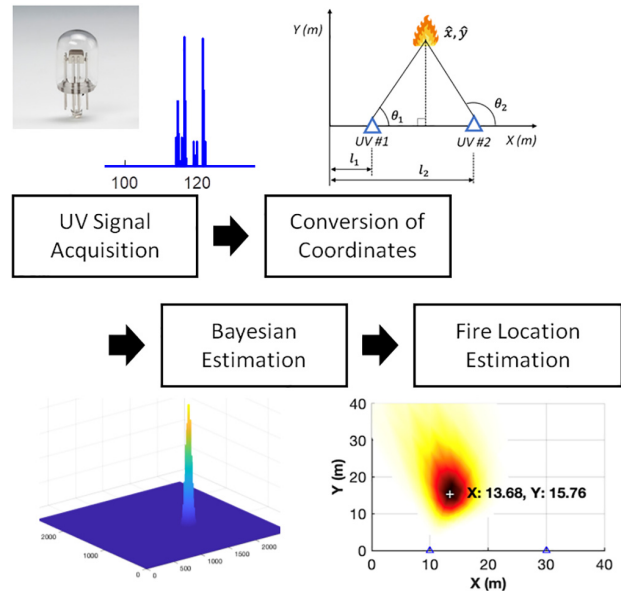


Fig. 1 System Architecture of fire localization estimation

2.1 UV 신호 획득

본 연구는 하미마츠 R9533 모델의 자외선 센서를 사용하여 Fig. 2의 제시된 UV센서 모듈을 제작하여 실제 화재로부터 UV 신호를 수집하였다. 이 센서는 기체와 금속의 반응으로 발생하는 광전효과로 작동되고, 50m 이내에서 185~260nm 파장 범위의 UV 입자에만 반응하며, 초당 80~110개의 sampling rate을 가지고 0~5V 사이의 아날로그 신호를 제공한다. 일반적으로 화재가 있는 경우 다량의 UV입자가 불출되기 때문에 UV센서는 각각의 UV입자에 반응을 하나 화재가 존재함에도 불구하고 UV 입자가 UV 센서에 닿지 않아 센서 신호가 없는 경우가 발생하기도 한다. 이점은 화재환경과 센서에서 발생하는 불확실성으로,

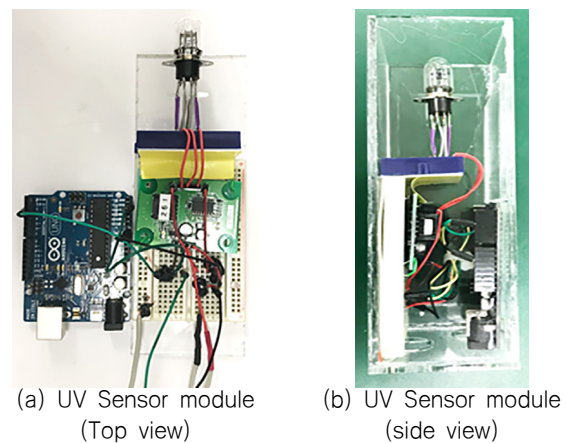


Fig. 2 The Prototype of UV Sensor module used in the test

본 연구에서 몬테칼로 기법을 적용하여 모의되도록 하였다. 본 연구는 두 세트의 UV 센서를 20m 간격으로 배치하였고, 모의 시 UV 센서의 수직 및 수평 감지범위(Field of View)를 설정하였으며, 서보모터에 의해 UV센서가 0~180도를 스캔하면서 각도별 신호를 수집할 수 있도록 모의하였다. 이러한 UV 센서 신호는 각도에 따른 평균과 분산을 고려하여 가우스분포로 전환하였고, 다음 단계의 입력 값으로 사용되었다.

2.2 좌표 전환

두 개의 UV 센서는 회전을 하면서 각 각도에 대한 UV 신호를 제공한다. x-y 좌표계의 화원 위치를 추정하기 위해서는 θ_1 과 θ_2 사이의 관계, 즉 x와 y의 관계를 정의할 필요가 있다. 식 (1)과 (2)는 Fig. 3에서 설명한 바와 같이 $\theta_1 = \arctan(y / (x - l_1))$ 와 $\theta_2 = \arctan(y / (x - l_2))$ 를 통해 계산된 각도와 좌표들의 관계를 보여준다. 따라서 센서에 의해 수집된 데이터는 식 (1) 및 (2)를 통해 x-y 좌표계로 변환한 후 베이지안 추정을 위한 입력 데이터로 이용된다.

$$x = \frac{l_1 \tan \theta_1 - l_2 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \quad (1)$$

$$y = (x - l_1) \tan \theta_1 \text{ or } y = (x - l_2) \tan \theta_2 \quad (2)$$

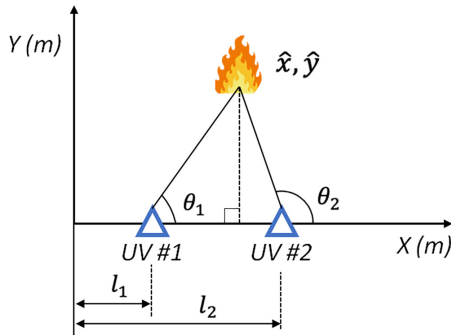


Fig. 3 The relationship between the angles of θ_1 and θ_2 and the Cartesian coordinates of x and y

2.3 베이지안 추정

UV 센서 t를 사용하여($t \in \{1, 2\}$), 데이터를 수집한 화원의 상태정보는 $x_{k+1}^t = f(x_k^t, u_k^t, w_k^t)$ 로 정의된다. 이때, $x_k^t \in X^t$ 는 일반적으로 시간 k단계에서의 수평 및 수직 위치의 화원 상태를 의미하고, $u_k^t \in U^t$ 는 센서의 제어 입력 세트를, $w_k^t \in W^t$ 는 화재 환경에서의 센서의 움직임이나 신호 획득과 같은 외부의 입력을 의미한다. 화원 위치를 확률적으로 추정하기 위해서, 화원의 수평 및 수직 위치에 대한 정보는 두 UV 신호를 동시에 결합하는 센서 플랫폼 S에 의해 수집된다. 센서 플랫폼 S는 데이터 수집간 노이즈 v_k^s 의 영향을 받는다. UV 신호와 각도를 이용하고 노이즈 v_k^s 의 영향을 반영되어, 센서 플랫폼 S에서 실시간

으로 화원 위치를 확률적으로 추정하여 관측치 $z_k^s \in h^s(x_k^s, v_k^s)$ 를 획득한다.

1) 업데이트(Update) 단계

추정된 상태확률 $p(x_k^t | z_{1:k-1}^s, \tilde{x}_{1:k}^s)$ 과 새로운 관측치 $z_k^s = \{s_1 \tilde{z}_k^s, s_2 \tilde{z}_k^s, \dots, s_{n_s} \tilde{z}_k^s\}$ 를 고려하고, 업데이트 단계를 통해 공간상의 화원 위치에 대한 확률 $p(x_k^t | z_{1:k}^s, \tilde{x}_{1:k}^s)$ 를 산출한다. 여기서 $s_{i:n_s}$ 는 각도별 두 UV 신호를 동시에 결합하는 센서 플랫폼을 나타낸다. 이 방정식은 베이지안 이론의 조건부 확률 계산 공식을 적용하여 도출할 수 있다.

$$p(x_k^t | z_{1:k}^s, \tilde{x}_{1:k}^s) = \frac{p(z_k^s | x_k^t, \tilde{x}_k^s) p(x_k^t | z_{1:k-1}^s, \tilde{x}_k^s)}{p(z_k^s | z_{1:k-1}^s, \tilde{x}_k^s)} \quad (3)$$

$$p(z_k^s | z_{1:k-1}^s, \tilde{x}_{1:k}^s) = \int p(z_k^s | x_k^t, \tilde{x}_{1:k}^s) p(x_k^t | z_{1:k-1}^s, \tilde{x}_{1:k}^s) dx_{k-1}^t \quad (4)$$

여기서 $p(z_k^s | x_k^t, \tilde{x}_{1:k}^s)$ 는 화원 위치를 추정하는데 영향을 주는 우도(likelihood)이며, 다음 식을 통해 계산될 수 있다.

$$p(z_k^s | x_k^t, \tilde{x}_{1:k}^s) = \prod_{i=1}^{s_n} p(z_k^i | x_k^t, \tilde{x}_{1:k}^s) \quad (5)$$

여기서 $k=1$ 에서의 업데이트 결과는 $p(x_k^t | z_{1:k-1}^s, \tilde{x}_{1:k}^s) = p(x_0^t)$ 을 적용하여 구현된다.

2) 예측(prediction) 단계

예측 단계는 현재 상태 $p(x_k^t | z_{1:k}^s, \tilde{x}_{1:k}^s)$ 의 화원 위치 확률을 통해 다음 상태 $p(x_{k+1}^t | z_{1:k}^s, \tilde{x}_{1:k}^s)$ 의 화원 위치 확률을 계산한다. 이 단계는 다음의 Chapman-Kolmogorov 방정식에 의해 수행되었다.

$$p(x_{k+1}^t | z_{1:k}^s, \tilde{x}_{1:k}^s) = \int p(x_{k+1}^t | x_k^t) p(x_k^t | z_{1:k}^s, \tilde{x}_{1:k}^s) dx_k^t \quad (6)$$

여기서 $p(x_{k+1}^t | x_k^t)$ 는 현재 상태 x_k^t 에서 다음 상태 x_{k+1}^t 로 변화하는 확률 정보이며 시뮬레이션 공간상에서 화원 위치가 결정되는 결과 값이다. 본 연구는 베이지안의 업데이트와 예측 단계를 반복적으로 적용하면서 x-y 좌표계 상의 화원 위치를 확률적으로 산출하였다.

2.4 화원 위치 출력

베이시안 추정에 의해 업데이트된 매개 변수를 통해 화원 위치를 위한 추정된 확률 값은 x-y 좌표계에서 출력되었다. 화재 환경의 온도, 공기 흐름 및 열에너지의 변화는 예측이 어렵기 때문에 몬테칼로 시뮬레이션을 통해 불확실성으로 모의되었다. 화원의 위치를 확률로 표현하기 위하여 확률 값에 따른 상이한 색을 설정하였고, 낮은 확률 값으로부터 높은 확률 값을 흰색-황색-적색-흑색 순으로 출력하였다. 또한, 추정된 확률 값이 가장 높은 영역의 평균값을 흰색 '+'로 표현하고 추정된 \hat{x} 및 \hat{y} 의 위치 값을 제시하였다. 이러한 결과는 Fig. 4에 표현되었다.

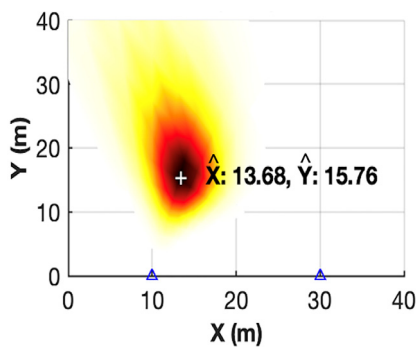


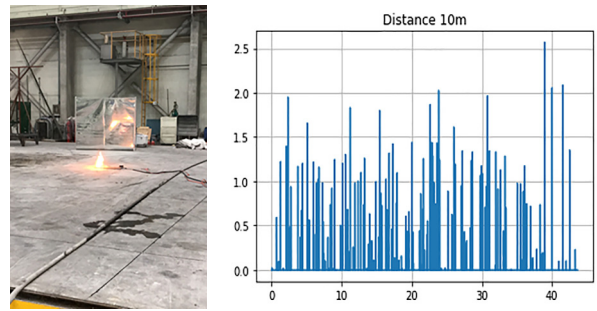
Fig. 4 Display of Fire localization with probability map and the coordinates of \hat{x} and \hat{y} that indicates the highest probability

3. 연구 결과

본 연구는 40m x 40m 규모의 가상의 공간을 생성하고 16개의 화원 위치를 선정 및 모의하여 2절에서 설명한 절차에 의해 시뮬레이션을 진행하였다. 여기서 화원 위치에 따른 센서의 신호 수집 확률을 설정하기 위해 실제 화재 실험을 통하여 거리에 따른 센서의 신호 수집 정보를 획득하였다.

3.1 Data 수집

본 연구의 시뮬레이션에서 모의하는 UV센서의 신호 데이터는 한국건설기술연구원 화재안전연구소의 협조하에 위에서 언급한 것과 같이 실제 화재 실험을 통하여 수집되었다. 실제 화재 실험은 화원을 발생시키기에 충분한 공간을 가지고 있고 화원의 정도를 조절할 수 있으며, 상황에 따라 즉각 소화가 가능하도록 안전한 환경에서 진행되었다. Fig. 5에서 보는 것과 같이 26.5 kW 규모의 가스화재를 발생시키고, 거리에 따라 변화하는 UV센서의 신호를 수집하였다. 이때, UV 센서의 아날로그 신호는 0 ~ 5V의 범위이고, 초당 평균 100Hz로 데이터를 수집하였다. 실제로는 화원의 위치를 조정하여야 하나, 안전상의 이유로 화원의 위치는 고정된 상태에서 센서의 위치를 조정하여 실험을 수행하였다.



(a) Fire of 23.5kw (b) UV signal samples at 10m

Fig. 5 Actual Fire Experiment

3.2 시뮬레이션 환경 구성

이렇게 수집한 센서 정보를 이용하여 일반 노트북 환경(Intel Core i5-6200U 2.3GHz CPU, 8.00G RAM)에서 시뮬레이션을 진행하였다. 40 m x 40 m 크기의 가상의 공간에 화원 위치가 다른 총 16건 상황을 조성하여 시뮬레이션을 수행하였고, 각 화원의 위치와 2개 센서의 위치는 Fig. 6에 나타낸 것과 같다.

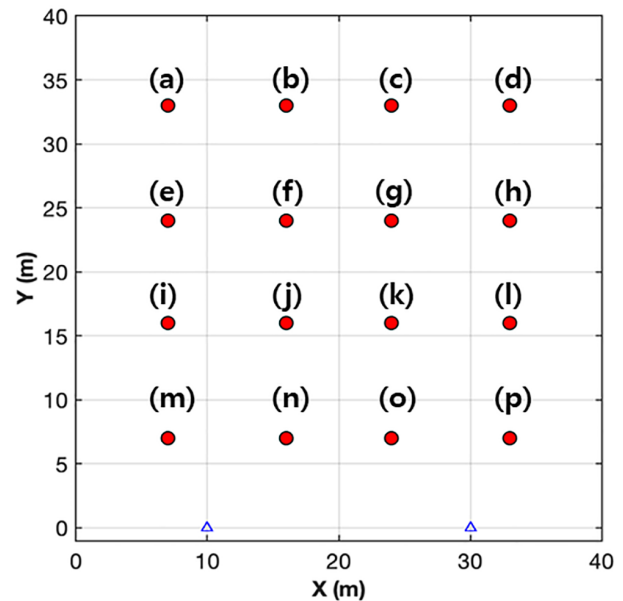


Fig. 6 Sixteen fire locations in red during the simulation and location of Two UV sensors in blue

3.3 시뮬레이션 결과 및 분석

본 연구에서 제안한 방법에 의해 화원 위치를 추정된 결과는 Fig. 7과 같으며, 여기서 추정된 16개의 화원 위치는 확률 값에 따라 색깔로 표시하였다. 0.0부터 1.0까지의 확률은 각각 다른 색상으로 표현되며, 가장 낮은 확률 값부터 높은 확률 값까지 흰색-황색-적색-흑색 순으로 표현되었다. 제안한 방법의 성능은 실제 모의된 화원 위치와 추정된 화원 위치의 차이로 계산되었다. 실제 모의된 화재 위치는 Fig. 6과 같이 16개의 지점으로 실시했으며, 추정된 화원의 위치는 본 연구에서 제안한 바와 같

이 2개의 UV센서 신호를 바탕으로 베이지안 추정 방법을 적용하여 화원위치의 평균값과 분산값에 대한 실시간 업데이트를 통해 도출하였다.

$$\text{오차}(Error), \epsilon_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

$$\text{비율}(Ratio), \gamma_i = \frac{\epsilon_i}{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}} \times 100 \quad (8)$$

실제 모의된 화원 위치와 추정된 화원 위치의 차이, 즉 오차(Error)는 유클리드 거리에 기반하여 식 (7)번에 의해 계산되었다. 여기서 x와 y는 실제 모의된 화원의 위치를 의미하고, \hat{x} 과 \hat{y} 은 추정된 화원의 위치를 나타낸다. 또한, 비율(Ratio)은 두 센서의 중간 지점과 화원 사이의 방사상 거리에 대한 오차를 분석하기 위한 것으로 식 (8)에 의해 계산되었다. 이러한 결과는 Table 1과 Fig. 8에 제시된 것과 같다. 결과를 보면 오차범위는 0.48 m ~ 8.03 m, 비율은 2.91 % ~ 29.42 % 사이에 분포했다. 주목할 것은 방사상 거리가 멀어질수록, 확률의 분포가 넓어지고 오차가 커지는 경향이 있다는 점이었다.

Fig. 7 (a)~(d)는 UV 센서로부터 가장 먼 방사상 거리에 위치한 화원들의 추정 위치를 보여준다. 방사상 거리가 멀 때, 화원 위치의 확률 등고선도가 넓게 분포되었다는 점을 주목할 수 있다. 이는 방사상 거리 증가에 따라 화원 위치에 대한 획득

Table 1 The result of Simulation

Position	Original Fire Location(x,y)	Estimated Fire Location (\hat{x}, \hat{y})	Errors (m)	Ratio (%)
(a)	7, 33	2.93, 37.72	6.23	17.57
(b)	16, 33	14.88, 29.05	4.11	12.36
(c)	24, 33	22.07, 27.66	5.68	17.09
(d)	33, 33	33.45, 36.11	3.14	8.85
(e)	7, 24	1.91, 30.21	8.03	29.42
(f)	16, 24	14.10, 21.88	2.84	11.67
(g)	24, 24	24.03, 25.10	1.10	4.52
(h)	33, 24	28.89, 25.43	4.35	15.94
(i)	7, 16	7.72, 13.85	2.27	11.01
(j)	16, 16	13.68, 15.76	2.34	14.19
(k)	24, 16	23.73, 15.61	0.48	2.91
(l)	33, 16	31.79, 17.02	1.59	7.71
(m)	7, 7	7.26, 5.53	1.49	10.09
(n)	16, 7	15.24, 5.93	1.31	16.25
(o)	24, 7	23.17, 6.63	0.91	11.29
(p)	33, 7	32.85, 8.05	1.06	7.18

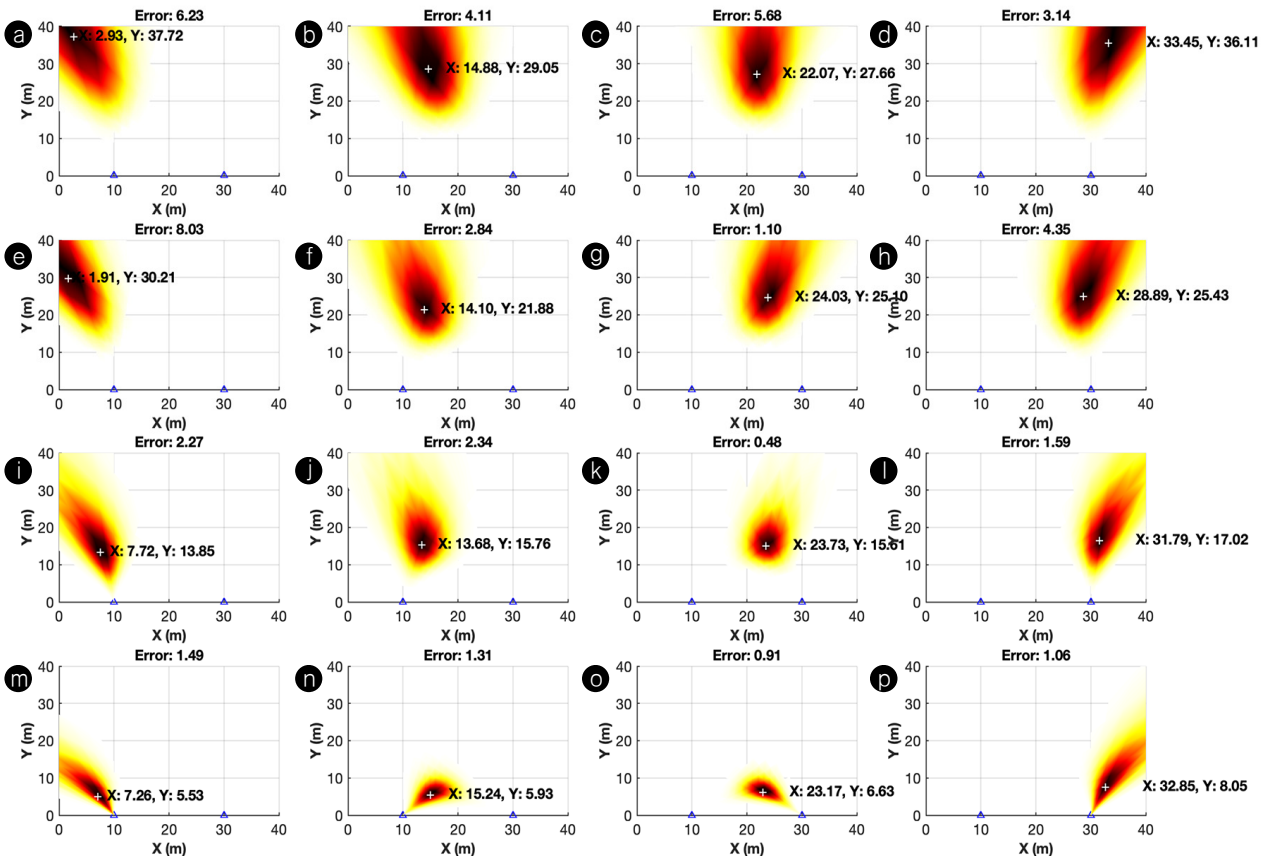


Fig. 7 Estimated results of sixteen actual fire locations by the contour maps with the estimated coordinates of x and y.

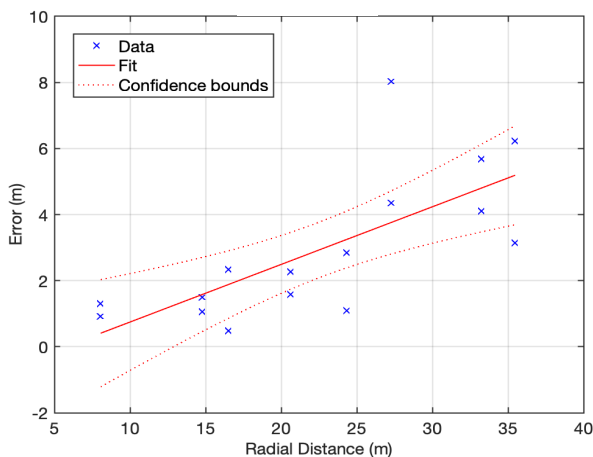


Fig. 8 Tendency of error by distance

오차가 커지는 UV 센서 감지범위의 한계 때문이라고 할 수 있다. 다만, 본 연구에서 제안한 방법이 화원의 위치를 확률 분포로 추정하므로, 화원 위치의 확률이 넓게 분포하더라도 실제 화원 위치와 추정 위치 간의 오차는 평균 2.93 m, 비율은 평균 12.38 % 정도로 국한되었다. Fig. 7 (e)–(l)의 경우, Fig. 7 (a)–(d)의 결과와 비교했을 때, 확률의 분포가 비교적 좁았고 오차는 평균 2.88 m, 비율은 평균 12.17 %인 것으로 나타나, 상대적으로 더 좋은 성능을 보였다. 다만, Fig. 7 (e)의 경우, 오차가 8.03 m, 비율이 29.42 %로 가장 크게 나타났다. 이것은 화재환경의 불확실성을 모의하기 위해 적용된 몬테칼로 시뮬레이션에서 가장 높은 불확실성이 적용된 결과이며, 모의값 낮은 확률로 발생할 가능성이 존재하는 이상치로 판단된다. 마지막으로, Fig. 7 (m)–(p)는 방사상 거리가 가장 가까운 경우였다. 확률의 분포가 가장 좁았고, 오차는 평균 1.19 m, 비율은 평균 11.20 %로 가장 좋은 성능을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 선박의 격실과 같은 실내의 화재 환경에 대한 확률론적 화원 위치 추정 방법을 제안하였다. 두 개의 UV 센서가 동시에 0도부터 180도까지 회전하며 각 각도에 대한 UV 신호를 수집한 후, 데이터를 x-y 좌표계로 전환한 다음 베이시안 추정법을 적용하여 화원 위치를 확률적으로 산출하였다. 제안한 방법을 검증하기 위해, 화원 위치가 다양한 실제 같은 화재 환경을 조성하여 16건의 화재 실험을 수행하였다. 그 결과 오차범위가 0.48 m ~ 8.03 m, 비율은 2.91 % ~ 29.42 %로 나타나 센서와 화원 사이의 방사상 거리가 멀수록 확률의 분포가 넓고 오차가 크게 나타나는 경향성을 확인하였다. 따라서, 향후 화원 위치 추정의 정확도를 높이기 위한 연구와 더 높은 추정 성능을 위해 최적의 센서 개수를 결정하는 연구가 추가로 수행되어야 할 것이다.

마지막으로 본 연구에서 UV 센서는 수평 방향으로만 스캔하기 때문에, 3차원에서 화원의 위치를 추정하는 데는 한계가 있

다. 또한, 모든 실험은 시뮬레이션으로 수행되었고 실제 화재 상황에서는 검증되지 않은 한계가 존재한다. 본 연구에서 제안한 방법을 실제 화재 상황에 적용하기 위해서는, 실제 상황 시나리오에서 검증해야 할 뿐만 아니라 3차원에서도 화원의 위치를 추정할 수 있어야 한다. 이러한 문제들은 추후 연구될 것이다.

후기

본 연구는 대한민국 정부 산업통상자원부 및 방위사업청 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 협약번호(No. 18CM5061).

References

- Chu, Y., Kodur, V. & Liang, D., 2017. A probabilistic inferential algorithm to determine fire source location based on inversion of multidimensional fire parameters. *Fire technology*, 53, pp.1077–1100.
- Kim, J.-H. & Lattimer, B.Y., 2015. Real-time probabilistic classification of fire and smoke using thermal imagery for intelligent fire fighting robot. *Fire Safety Journal*, 72, pp.40–49.
- Kim, J.-H., Starr, J. & Lattimer, B., 2014. Firefighting robot stereo infrared vision and radar sensor fusion for imaging through smoke. *Fire Technology*, pp.1–23.
- Kim, J.-H., Sung, Y. & Lattimer, B.Y., 2017. Bayesian estimation based real-time fire-heading in smoke-filled indoor environments using thermal imagery. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Singapore, Singapore, 29 May–3 June 2017.
- KOrean Statistical Information Service, 2021. *Occurrence status of Marine accidents by type*. URL: <https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do> (Accessed 04 July 2021).
- Liu, C. & Gu, Y., 2016. Research on indoor fire location scheme of RFID based on WiFi. *2016 Nicograph International (Nicolnt)*, Hanzhou, China, 6–8 July 2016.
- McNeil, J.G. & Lattimer, B.Y., 2016. Autonomous fire suppression system for use in high and low visibility environments by visual servoing. *Fire Technology*, 52, pp.1343–1368.
- National Fire Data System, 2021. *Fire Statistics*. URL: <https://www.nfds.go.kr/stat/general.do> (Accessed 07 February 2021).
- Overholt, K.J. & Ezekoye, O.A., 2012. Characterizing heat release rates using an inverse fire modeling technique. *Fire Technology*, 48, pp.893–909.
- Pesatori, A., Magnani, A. & Norgia, M., 2013. Infrared image sensor for fire location. *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*,

Minneapolis, MN, USA, 6–9 May 2013.

Starr, J.W. & Lattimer, B., 2012. Evaluation of navigation sensors in fire smoke environments. *Fire Technology*, pp.1–23.

Starr, J.W. & Lattimer, B., 2017. Evidential sensor fusion of long-wavelength infrared stereo vision and 3d-lidar for rangefinding in fire environments. *Fire Technology*, 53, pp.1961–1983.



김 태 완



김 수 찬



김 종 환