

스마트 컨테이너 제어를 위한 센서 위치 최적화 알고리즘 개발

김정호¹, 진병진², 박병준³, 이상진⁴, 임현석⁵, 김형훈^{6,*}

¹성균관대학교 전자전기공학부 ²서울대학교 기계항공공학부 ³건국대학교 전기전자공학부

⁴명지대학교 전자공학과 ⁵연세대학교 기계공학과 ^{6,*} (주) 삼성전자

dkrn0782@gmail.com, bjeon0913@snu.ac.kr, aaaaa9908@konkuk.ac.kr,

sjlee05301@gmail.com, dlagustjr5@yonsei.ac.kr, pastelom@gmail.com

Development of Sensor Placement Optimization Algorithm for Smart Container Control

Jeong-ho Kim¹, Byeong-jin Jeon², Byeong-jun Park³, Sang-jin Lee⁴,
Hyeon-seok Im⁵, Hyung-hoon Kim^{6,*}

¹Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University

²Dept. of Aerospace Engineering, Seoul National University

³Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Konkuk University

⁴Dept. of Electronic Engineering, Myongji University

⁵Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

^{6,*} Samsung Electronics

요 약

스마트 컨테이너 제어를 위해서는 컨테이너 내부에 센서가 필요하나, 센서의 개수가 증가하면 비용 및 시스템 부하가 증가한다. 본 연구에서는 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 얻은 컨테이너 내부 온도 데이터와 센서 위치 최적화 알고리즘을 이용하여 컨테이너 내부 모니터링을 위한 최적의 센서 위치 결정 방법론을 제시한다. CFD 상용 SW로 컨테이너 내·외부 상황을 가정하여 내부 온도 데이터를 추출하고, 이를 바탕으로 내부 상태를 대표하는 공간들을 구분한다. 컨테이너 내벽에 부착된 센서가 탐지할 수 있는 능력을 탐지 거리 및 각도의 수식들로 나타내어 각 수식을 조합하여 센서의 탐지 능력을 수치화하고, 이 수치에 따라 균등하게 분포된 센서 위치 후보군 중, 선별된 공간을 탐지하는 센서 위치를 최적화하여 효율적인 컨테이너 제어를 위한 여건을 마련한다.

1. 서론

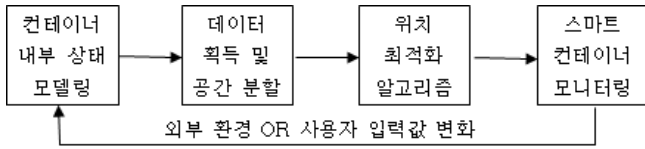
스마트 컨테이너에는 내부 모니터링을 위한 센서 배치가 요구되지만, 기존에는 정해진 기준 없이 등간격으로 센서를 배치하거나[1], 센서 성능 고도화 혹은 통신 품질 향상에 집중했다[2]. 본 연구에서는 컨테이너 내부 물리 데이터 분석으로 대표성을 가지는 공간을 설정하고, 해당 공간을 측정하는 최소 개수의 센서 위치를 도출하는 알고리즘을 개발하고자 한다. 축소 컨테이너 모형은 실제 환경 모사가 어려워 획득 데이터의 양이 제한된다. 울산항은 원유 및 액체화물 컨테이너를 취급하며[3], 열유체 해석(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 이용하여 액체화물 화재 발생 시 화염의 이동 경로를 예측하는 연구가 있었고[4], 로봇 물고기에 부착하는 최적 센서 위치 결정을 위해 통계적 방식을 사용한 연구가 있었다[5]. 이에 본 연구에서는 상용 CFD SW인 SOLIDWORKS Flow Simulation을 활용하여 온도 데이터를 다량 확보

하며, 변화에 반응하는 정도를 기준으로 컨테이너 내부 공간을 재구성한다. 또한, 지형을 3D 그래픽으로 표현하는 DEM(Digital Elevation Model)을 위한 센서 네트워크를 제안한 연구[6]를 바탕으로 벽면에 부착된 센서의 공간 탐지 능력을 탐지 거리와 각도의 조합으로 표현하여 유효성 검증 함수를 설정하고, 이를 통과한 위치 후보군을 추출하여 중요도에 따른 최적 센서 위치 결정 알고리즘을 구현한다. 컨테이너 내부 데이터 확보부터 센서 위치 탐색까지의 방법론을 제시함으로써 스마트 컨테이너 내부 모니터링 효율화 및 비용 절감을 기대할 수 있다.

2. 연구 방법

2.1 연구 구성도

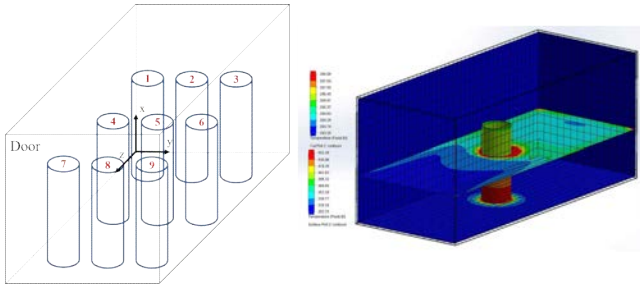
본 연구에서는 컨테이너를 모델링하여 계산한 데이터를 바탕으로 최적의 센서 위치를 결정하여 스마트 컨테이너 모니터링의 효율화 방안을 모색한다.



(그림 1) 전체 프로세스

2.2 온도 데이터 수집

유체 방정식 계산을 위한 경계조건으로는 해상물 류용 컨테이너로 주로 사용되는 20ft 연강(mild steel) 컨테이너를 적용하였으며, 컨테이너 외부에는 울산의 7월 표준 기온(30℃) 및 7월 1일 15시의 햇 빛, 컨테이너 내부에는 공기의 표준 온·습도(20℃, 65%) 및 컨테이너 문 부근에 1기압(101325Pa)을 설정하였다. 컨테이너 내부의 액체화물에서 모종의 화 재가 발생하여 온도가 상승한 것을 가정하여, 알루미늄 소재 보관 용기에 200~1000℃의 온도 변화를 부여하고[7], 용기 위치를 9개로 나누어 온도 데이 터를 수집하였다.



(그림 2) 보관 용기 case 분류 및 Case #5 온도 분포

2.3 내부 상태를 대표하는 공간좌표 도출

CFD는 계산 공간을 격자들로 나누어 계산을 수 행한다. 격자 설정에서 컨테이너 내부 장애물은 제 외되므로 센서가 탐지해야 할 공간에서 장애물에 의 한 방해로 방지한다. 컨테이너 내부에서 화재 등으 로 온도 변화가 발생하면 내부 공기 온도가 변화하 는데, 내부 열원 온도가 증가해도 온도 값이 크게 변하지 않는 공간, 즉 해당 격자의 좌표는 모니터링 에 크게 중요하지 않은 위치이다. 각 격자 온도 데이 터의 표준편차를 변화 정도로 상정하고, (1) 동일 한 온도 변화가 서로 다른 위치에서 발생하는 경우 와 (2) 하나의 위치에서 여러 온도 변화가 발생하는 경우를 나누어 각 경우에서 좌표 당 표준편차의 평 균값을 정렬하여 상위 100개 좌표를 도출하였다.

2.4 센서 위치 최적화 알고리즘

2.3절의 공간좌표 집합 S_i 와 컨테이너의 길이, 너

비, 높이를 각각 0.1m씩 분할하여 구성한 센서 위치 후보군 집합 E_i 를 아래와 같이 정의한다.

$$S_i = \{r_i, \mathbf{s}_i, \alpha_i, \theta_i, \zeta_i, \beta_i\}, \mathbf{s}_i = (x_i^s, y_i^s, z_i^s)$$

$$E_i = \{\mathbf{e}_i, w_i\}, \mathbf{e}_i = (x_i^e, y_i^e, z_i^e)$$

센서의 탐지 능력을 • 탐지 거리 f_r • 탐지 수평 각도 f_h • 탐지 수직 각도 f_v 로 표현하고, 각 요소와 유효성 검사 결과를 아래와 같은 함수로 정의한다.

$$f_r(\mathbf{s}_i, \mathbf{e}_i, r_i) = \begin{cases} 1 & d(\mathbf{s}_i, \mathbf{e}_i) \leq r_i \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$f_h(\mathbf{s}_i, \mathbf{e}_i, \alpha_i, \theta_i) = \begin{cases} 1 & \arctan\left(\frac{z_i^e - z_i^s}{d(\mathbf{s}_i, \mathbf{e}_i)}\right) \in [\alpha_i, \alpha_i + \theta_i] \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$f_v(\mathbf{s}_i, \mathbf{e}_i, \zeta_i, \beta_i) = \begin{cases} 1 & \arctan\left(\frac{y_i^e - y_i^s}{x_i^e - x_i^s}\right) \in [\zeta_i, \zeta_i + \beta_i] \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$\text{effect} = f_r \times f_h \times f_v = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

f_r 은 센서 감지 거리 r_i 내 공간좌표 존재 여부 를, f_h, f_v 은 공간좌표가 센서로부터 수평으로 α_i 와 θ_i 사이, 수직으로 ζ_i 와 β_i 사이에 존재하는지 확인 해, 세 조건을 모두 만족하였을 때 유효성 검사 통 과로 판단하였다. 사용된 센서의 규격은 다음과 같 다.

<표 1> 센서의 최대 탐지 거리 및 각도[8]

r_i	α_i	θ_i	β_i	ζ_i
3.5m	30°	60°	50°	10°

각각의 공간좌표가 검증이 통과할 시 해당 \mathbf{s}_i 와 \mathbf{e}_i 를 1:1로 저장하는 리스트(act_list)와 \mathbf{s}_i 만 저장하 는 리스트(sen_list)를 구성한다.

act_list에서 공간좌표가 같을 경우, 해당 공간좌표 를 탐지할 수 있는 센서들을 같은 순서쌍으로 묶어 아래의 집합을 생성한다.

$$C_{\text{change}} = \{(\mathbf{s}_i : \mathbf{e}_j, \mathbf{e}_k \dots)\}, i \in [1, N_{\text{space}}], j, k \in [1, M]$$

N 은 센서 위치 후보군의 개수이며, N_{space} 는 공간 좌표의 개수이다.

이로부터 각각의 센서가 탐지하는 공간의 개수 w_i 로 구성된 전체 집합 E_i 를 정의고 w_i 가 클수록 더 많은 공간을 보는 중요한 센서이다. 반복문 내에서 최대 w_i 를 업데이트하며 중요도가 높은 센서 위치

e_i 를 얻는다. C_{change} 에서 해당 센서가 포함된 공간을 모두 지우고 E_i 를 초기화하는데, 이는 센서가 여러 공간을 동시에 탐지할 수 있으므로 센서 관측 공간의 중복을 방지하기 위함이다. 최적 위치 탐색 알고리즘은 <표 2>와 같다.

<표 2> 최적 센서 위치 탐색 알고리즘

```

1. maximum sensor = 0
2. pos = 0
3. while  $E_i \neq \text{empty}$ 
4.   for i=0 to length of  $E_i$ 
5.     if  $w_i > \text{maximum sensor}$ 
6.       maximum sensor  $\leftarrow w_i$ 
7.       pos  $\leftarrow i$ 
8.     end if
9.   end for
10.  sub_final_list  $\leftarrow E_i(i = \text{pos})$ 
11.  Delete ( $e_i, w_i$ ) from  $E_i$ 
12.
13.  count = 0
14.  count2 = 0
15.  for i=0 to length of  $C_{change}$ 
16.    t = quotient of length of  $C_{change}(i=i-\text{count}) / 3$ 
17.    if t > 1
18.      for j=0 to t
19.        if  $\exists e_j$  of  $C_{change}(i=i-\text{count}) \in \text{sub\_final\_list}$ 
20.          Delete  $C_{change}(i=i-\text{count})$  from  $C_{change}$ 
21.          count2  $\leftarrow$  count2 + 1
22.          i  $\leftarrow$  i + 1
23.          count  $\leftarrow$  count + 1
24.        break
25.      end if
26.    end for
27.  end if
28. end for
29. if count2 > 0
30.   final_list  $\leftarrow$  sub_final_list
31. end if
32.  $N_{space} \leftarrow N_{space} - w_i$ 
33. Initialize sub_final_list
34.
35. removed_final_list = remove repeat from final_list

```

3. 연구 결과

물류용 컨테이너 내부 온도 연구[1]에서는 본 연구와 동일한 컨테이너에 대하여 시간에 따른 온도 변화 및 여러 냉각 방식에 따른 내부 온도 변화를 측정하였다. 센서를 등간격으로 배치하여 내부에 장애물이 있는 경우 총 68개의 센서를 사용하였다. 아래 <표 3>은 [1]에서 사용된 센서 개수와 본 논문의 2.3절 (1), (2) 경우에서 결정된 센서 개수를 비교한 결과이다.

컨테이너 내부에서 온도 변화 양상과 관계없이 센서 개수를 줄일 수 있었으며, 데이터 획득부터 장애물을 피해 최적화된 위치에 센서를 배치하는 방법론

을 제시하였다.

<표 3> 센서 개수 감소 정도 비교

	센서 개수(개)	감소율(%)
선행연구	68	52.941
경우 (1)	32	
경우 (2)	28	

이를 통해 센서 개수 감소에 따른 설치 비용과 통신 부하 감소 등의 효과가 기대되며, 센서 구매 부문에 있어 센서를 등간격으로 배치한 경우 대비 약 55.9%(6천650억 원)의 절감 효과를 얻을 수 있으므로 해양 운송 분야의 경제적 효과와 에너지 절약에 기여 가능하다.

※ 본 논문은 해양수산부 실무형 해상물류 일자리 지원사업의 지원을 통해 수행한 ICT멘토링 프로젝트 결과물입니다.

참고문헌

[1] J. Rodriguez-Bermejo et al, "Thermal study of a transport container", Journal of Food Engineering, Vol. 80, pp. 517-527, 2007.

[2] R. Jedermann et al, "Smart Sensor for the Intelligent Container", European Conference on Smart Objects, Dortmund, Germany, 2014, pp. 1-2.

[3] 울산항만공사, "2021년도 울산항 통계연감", 해양문화사, 2022.

[4] Q. Zhang et al, "Research on thermal response of pool fire of oil tank based on PyroSim", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020.

[5] D. Xu et al, "Sensor placement optimization in the artificial lateral line using optimal weight analysis combining feature distance and variance evaluation", ISA Transactions, Vol. 86, pp. 110-121, 2019.

[6] N. T. Tam et al, "Optimization for the sensor placement problem in 3D environments", IEEE 12th International Conference on Networking, Sensing and Control, Taipei, Taiwan, 2015, pp. 327-333.

[7] 심상보 외 2인, "사용 환경에 따른 배터리 화재 위험성에 관한 연구", 한국소방학회 2013 추계학술대회 초록집, pp. 95-96, 2013.

[8] T. Liu, "Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22", Aosong Electronics Co., Ltd.