

Research on the evaluation of the perimeter lighting layout to operate the surveillance system for the physical protection of nuclear facilities

Inseon Back

Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control

isback@kinac.re.kr

1. 연구 개요

- 국내 원자력시설은 핵물질 불법이전 및 사보타주를 방지하기 위하여 '원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책 법'에 따라 물리적방호 체계를 운영하고 있음
- 동법 시행령에서 방호구역의 주변에 대하여 충분한 조명 및 시야를 확보할 것을 명시하고 있으며,
- 이에 원자력시설은 방호구역 경계에 보안등을 설치하여 방호인력의 가시성 확보 및 감시 카메라의 영상 판정에 활용하고 있음
- 본 연구의 목적은 방호구역 경계에 설치된 보안등을 대상으로 그 배치를 평가할 수 있는 수학적 모델을 개발하는 데 있음
- 입지 선정 문제(Facility location problem)[1,2,3]란 자원의 수, 비용, 배치 가능 위치 등의 제약 하에서 설정 목표를 최대한 만족시킬 수 있는 배치를 도출하기 위한 분석 기법임
- 본 연구에서는 입지 선정 문제를 활용하여 원자력시설에서 감시를 저해하는 음영 지점(조도 기준 미만)을 최소화할 수 있도록 하는 보안등의 최적 배치를 도출하는 수리 모델을 최대 지점 커버 문제(Maximal covering location problem)의 형태로 설계하였음
- 모형 설계 시 조명의 특성을 반영토록 보안등의 커버리지를 정의하며,
- 이후 배치 시험을 바탕으로 모델 계산에 따른 평가를 제시한다.

2. 보안등 배치 모형 설계

(1) 보안등 커버리지 정의

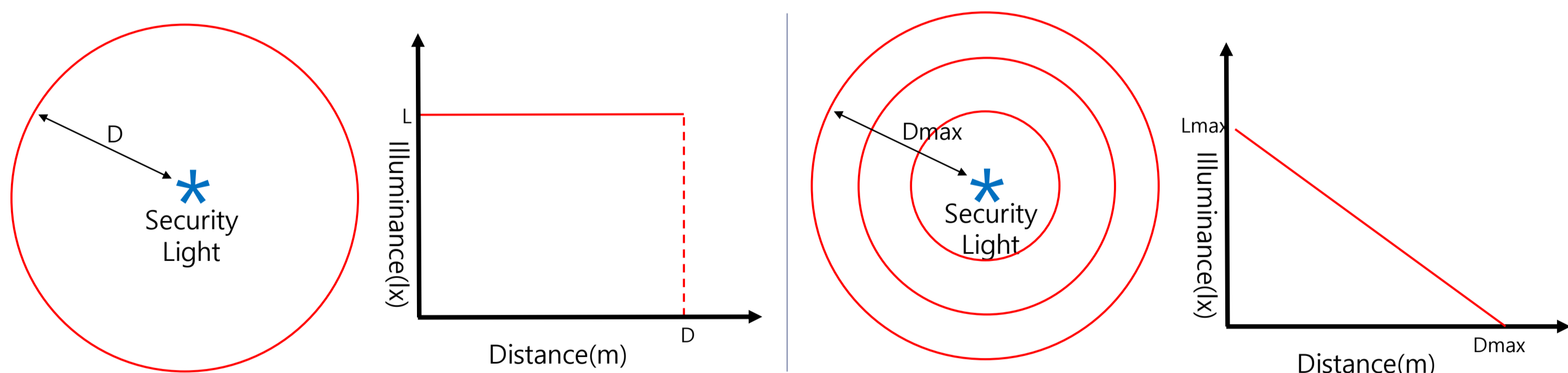
- 보안등의 커버리지 형태를 우선적으로 정의하며, 다음과 같은 조명의 특성을 반영 하였음
 - 광원으로부터 동일 거리에 있는 지점은 조도 역시 동일함
 - 광원에서 멀어질수록 조도는 감소함
 - 주변에 광원이 많을수록 지점의 조도는 증가함

① 원형 커버리지 적용

- 조도는 보안등과 지점 간 거리에 따라 결정되기 때문에, 보안등으로부터 같은 거리에 상에 위치하는 지점은 모두 동일한 커버수준(조도)을 제공받게 되며,
- 따라서 커버리지 형태는 보안등을 중심으로 하는 원형으로 정의됨

② 점진 커버리지 적용

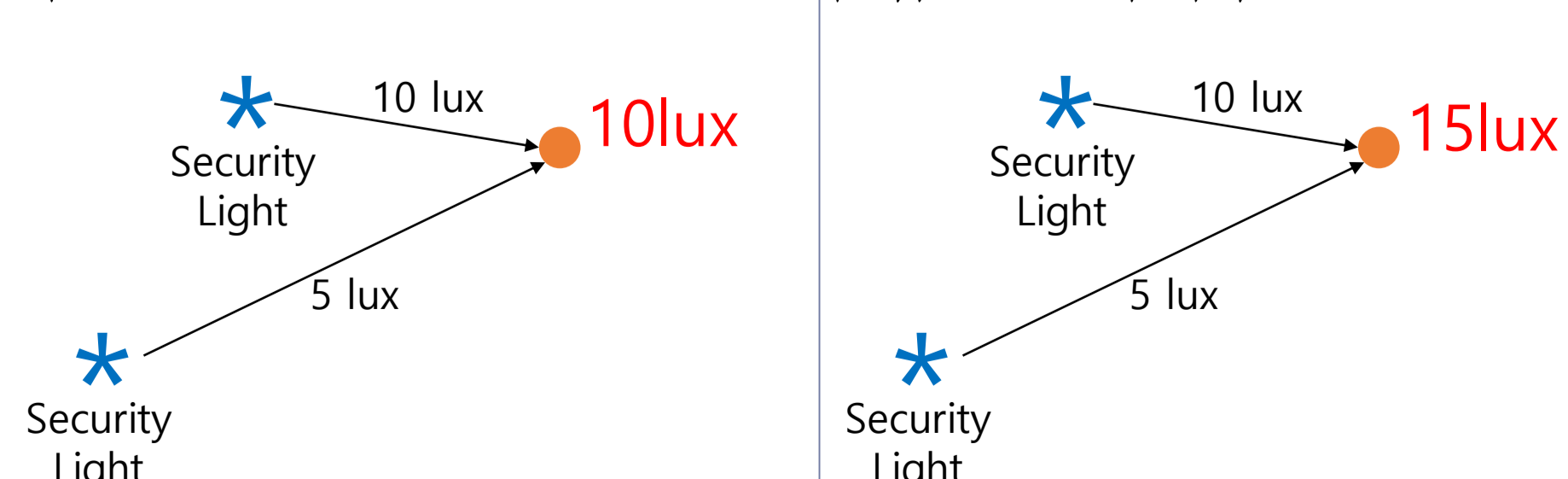
- 보안등과 지점 간 거리에 따라 조도 수준을 구분하고자 하며, 이는 보안등과 가까운 지점에서는 제공받는 조도가 높고, 보안등과 멀리 위치한 지점에서는 제공받는 조도가 상대적으로 낮게끔 표현하였음을 의미함
- 상기 표현을 위하여 점진 커버리지(gradual coverage)를 적용하였음
- 점진 커버리지가 아닌 일반 이진 커버리지(binary coverage)를 사용하게 되면,
- 지점이 보안등으로부터 일정 거리 내에 속하는 경우 커버되고, 해당 거리 바깥이면 전혀 커버되지 않는 형태로 적용됨
- 그러나 조도는 보안등과의 거리가 멀수록 점점 감소하는 특성을 갖기 때문에 점진 커버리지를 사용하였으며,
- 커버 수준을 나타내는 커버리지 함수를 거리에 따른 감소 함수로 설정하였다.



<그림> 보안등 이진 커버리지(좌)와 점진 커버리지(우) 적용 비교

③ 협력 커버리지 적용

- 지점의 커버 수준(조도)이 주변에 있는 광원 수에 의해 영향을 받도록 정의함
- 지점의 조도는 주변에 보안등이 많을수록 높아지도록 표현하였음을 의미하며,
- 이를 위하여 협력 커버리지(cooperative coverage)를 적용하였음
- 일반적인 커버리지 모형을 사용하게 되면 지점 근처에 여러 대의 보안등이 위치하더라도, 가장 밝은 빛 지점의 조도를 결정짓는 것으로 표현됨
- 그러나 지점의 조도는 지점 주변의 보안등 전부에 의해 결정되기 때문에 협력 커버리지를 사용하였으며,
- 주변에 위치한 모든 보안등이 지점의 조도에 기여하도록 정의하였다. 이를 위하여 지점에서의 조도는 도달한 모든 조도의 합으로 나타냄



<그림> 보안등 이진 커버리지(좌)와 협력 커버리지(우) 적용 비교

- 지점의 커버 기준은 지점의 조도가 일정 문턱값(threshold) 이상인 경우로 설정함
- 각 지점의 조도는 사전에 설정한 조도 요건(최소 기준)과 비교하며, 지점의 조도가 조도 요건 이상인 경우 해당 지점 충족을, 지점의 조도가 조도 요건 미만인 경우 해당 지점 미충족(음영지점임)을 의미함
- KINAC 심검사기준[4]에서 언급되는 방호 구역의 최소 조도 요건을 적용한 사항임

(2) 보안등 배치 모형 도출

- 1장에서 정의한 보안등 커버리지를 기반으로 한정된 보안등을 이용하여 최대한 많은 지점을 커버할 수 있도록(음영 지점을 최소화할 수 있도록) 수리 모형을 구축함
- 보안등을 설치할 후보지는 방호 구역 울타리 안쪽 지점, 보안등이 비추는 지점은 방호 구역 울타리 안쪽 지점이지만, 보안등 설치 후보지와 수요 지점 모두 이산화하여 지점의 집합으로 표현하였음
- 지점을 여러 세부 지점으로 나누고, 각 세부 지점을 대표하는 점을 지정한 것으로 가정하며, 이를 바탕으로 설계한 보안등 배치 모형은 다음과 같음

$$\begin{aligned}
 & \text{maximize } \sum_{i=1}^N y_i \\
 & \text{subject to} \\
 & \sum_{j=1}^M x_j = p \\
 & \sum_{j=1}^M \Psi(d_{ij})x_j \geq T y_i \quad \forall i \in N \\
 & x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in M \\
 & y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in N
 \end{aligned}$$

[변수]

$$y_i = \text{수요 지점 } i \text{ 가 } \begin{cases} \text{조도 조건 충족 시 } 1 \text{ (조도가 문턱값 } T \text{ 이상)} \\ \text{미충족 시 } 0 \end{cases}$$

$$x_j = \text{후보 지점 } j \text{ 에 } \begin{cases} \text{보안등 설치 시 } 1 \\ \text{미설치 시 } 0 \end{cases}$$

[입력값]

i : 방호 구역의 수요 지점 $\Psi(d_{ij})$: 보안등이 j 에 설치될 경우 수요 지점 i 에 도달하는 보안등의 조도(단위 lx)
 N : 수요 지점 i 의 집합 T : 최소 조도 요건(단위 lx)
 j : 보안등 설치 후보 지점
 M : 설치 후보 지점 j 의 집합 p : 설치할 보안등 갯수

3. 배치 실험

(1) 실험 환경 설정

- 제안 모형의 최적해는 JAVA 언어와 위치 선정 알고리즘 구현 소프트웨어인 ILOG CPLEX를 활용하여 구현함
- 가상의 지면을 설정하였으며 아래와 같이 시험 환경을 설정함

<가상 방호구역 설정>	대상 영역	50 m X 50 m
	보안등 설치 후보지	내측 울타리, 5m 간격, 총 32개 지점
	보안등 개수	10개
	수요 지점	이중 울타리, 5m 간격, 총 72개 지점
	지점 커버 기준	조도 10 lux 이상
	보안등 전구 조도	20 lux
	보안등 빛의 최대 도달 거리	20 m

(2) 보안등 위치 최적해 도출 결과

<최소 조도(커버 기준)을 만족한 수요 지점>	
최적 배치(계산결과) (좌)	임의 배치 (우)
72개 (전체 지점)	48개 (67%)

3. 결론

- 주어진 보안등 배치에 대한 음영 지역 및 비음영 지역 산출'은 물리적방호시스템 규제 차원의 보안등 배치 심사에 활용 가능함
- 야간에 원자력시설 현장 확인을 하지 않더라도, 음영 지역이 있는지 설계 모형에 보안등 설치 위치를 입력하여 확인 가능함
- 설계 모형은 매우 간단한 요소만 반영되어 있으므로 실제와 차이가 있을 수 있지만, 현장을 전부 점검하지 않고 보안등 배치에 대하여 일정 수준 판단이 가능하다는 데 의의가 있음
- 특히, 보안등이 시설에 설치되기 이전에 이루어지는 물리적방호규정등의 최초 심사에도 유용하게 활용 가능할 것임

참고문헌

- [1] Arabani et al. "Facility location dynamics: An overview of classifications and applications". Computers & Industrial Engineering, 2012, 62(1), pp. 408-420.
 [2] 한국원자력통제기술원, "KINAC/RS-103 침입탐지 및 판정", 2020.