

비가시 환경에서의 적외선 열화상 카메라의 가시도

조재완, 백성훈, 최영수, 정경민
한국원자력연구원 원자력융합기술개발부

Visibility of the Thermal Infrared Camera under Non-Visibility Environments

Jai Wan Cho, Seong Hoon Baik, Young Soo Choi, and Kyung Min Jeong
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 원자력발전소 중대 사고를 모사한 비가시 환경에서 적외선 열화상카메라의 관측성능(가시도)을 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 세계기상기구의 가시도 정의를 이용하여 가시도를 측정하였으며, 측정된 가시도 조건에서 적외선 열화상카메라의 관측성능을 평가하였다.

빔의 감쇄율을 측정하기 위해서, 초점거리 150mm 인 접합렌즈와 지름 1mm 인 핀홀을 사용하여, 2m 거리에서의 FOV를 12mm 로 제한하여 레이저빔의 랜덤 산란 효과를 제거하였다[1].

1. 서론

원자력발전소에 중대사고가 발생되면 원자로 격납건물 내부는 고 방사능 물질의 aerosol 로 인해 가시도(visibility)가 급격히 나빠진다. 원자로 노심을 냉각시키기 위해서 냉각수(부족할 경우에는 해수도 포함)가 노심살수계통(core spray system)의 노즐을 통과거나, 또는 소방계통의 배관을 통해 원자로 격납건물 내부로 주입된다. 이와 같이 주입되는 차가운 냉각수(해수의 경우 10 ~ 20°C 의 온도분포)는 노심을 감싸고 있는 원자로 압력용기와 같은 고온 구조물(표면 온도는 약 250°C 이상)에 부딪혀 증기로 기화하며, 증기가 식으면서, 에어로졸이 형성된다. 이러한 에어로졸로 인해 원자로 격납건물 내부의 가시도는 급격히 악화된다.

본 논문에서는 원자력발전소 중대 사고를 모사한 비가시(dense aerosol) 환경에서, 환경인식 용도로 활용될 수 있는 적외선 열화상 카메라의 관측 특성을 평가하였으며, 그 결과를 기술한다.

2. 가시도(Visibility)

가시도(또는 거리)는 볼 수 있는 거리로 정의된다. 세계기상기구의 가시도(또는 거리, visibility or visual range)는 빛이 전파되면서 빛의 세기가 5% 이하로 감소하는 지점까지의 거리로 정의된다. 이를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$I = I_0 e^{-kd} \quad (1)$$

I : 연기(또는 안개)가 있을 때의 빛의 세기

I_0 : 연기가 없을 때의 빛의 세기

k : 감쇄계수 [m^{-1}]

d : 거리 (광원과 수광체와의 거리)

$$d = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (2)$$

$I/I_0 = 0.05$ 로 하면, 가시도는 식 (3)과 같다.

$$V (= d) = \frac{1}{k} \ln(0.05) \approx \frac{3}{k} \quad (3)$$

식 (3)으로부터, 감쇄율을 구하면, 가시도를 유추할 수 있다. 본 논문에서는 가시도를 정량화 하기 위한 감쇄율 측정장치를 구현하였으며, 이를 그림 1에 나타낸다. 좌측의 He-Ne 레이저 빛이 일정거리를 지난 후, 우측의 수광부에서 대기를 통과한 빛의 세기를 측정한다. 측정된 투과율에서 감쇄계수를 구하고, 식(3)을 이용하여 가시거리(visual range)를 계산한다. FOV(Field Of View)를 줄여, 산란되어 들어오는 빛을 제거하여, 정확한 레이저

투과율 측정 실험장치



비가시 환경에서의 투과율 측정 실험



<그림 1> He-Ne 레이저를 이용한 투과율 측정 장치 구성 및 실험장면

3. 실험 및 결과

원자로 격납건물내부의 중대사고 시의 에어로졸 생성으로 인한 비가시 환경을 모사하기 위하여, 폭×높이×깊이가 2.5×2.5×12.5m 인 안개방(fog room)을 제작하였다. Fog room 에 안개를 주입하고, 이때에 He-Ne 레이저 광원의 투과율을 측정한다. 투과율로부터, 감쇄율을 계산하고, 이를 식 (3)에 대입하여 가시도를 구하였다. 이러한 가시도 조건에서 적외선 열화상 카메라의 관측성능을 평가하였다. 이를 위해 Hot plate를 제작하였으며, 5m 및 10m 거리에서 Hot Plate 의 Contrast 를 식 (4)와 같이 계산하였다[2]. 일반적으로 영상의 Contrast 를 계산하는 방법은 RMS, Michelson, Weber fraction 등의 3 가지 방법이 사용된다. 적외선 열화상 카메라의 경우, 배경에 비해 Hot Plate 만 지배적인 열 성분이 관측되기 때문에 식 (4)에 나타난 Weber fraction 기법으로 적외선 열화상카메라의 관측성능을 평가하였다. Weber fraction 에서 0.01 의 값이 갖는 물리적 의미는 배경에 비해 1% 의 열적 차이를 갖는 물체를 검출할 수 있다는 것을 나타낸다.

$$Hot\ Plate_{contrast} = \frac{I - I_b}{I_b} \quad (4)$$

I : Hot Plate (적외선 열화상 카메라 관측영상)의 밝기

I_b : 배경(적외선 열화상카메라 관측영상의 배경성분)의 밝기

그림 2에 안개 방에 위치한 Hot Plate 의 관측영상을 나타낸다. 그림 2에서 좌측은 안개 주입전의 CCD 카메라 관측영상을 나타내고, 우측은 동일한 시간대에 관측한 적외선 열화상카메라의 관측영상을 나타낸다. CCD 카메라 관측영상에서 보이는 5m target 의 뒷면에는 표적에 열을 발생시키기 위한 열원이 부착되어 있다. 그림 2의 우측의 5m 타겟에서 상대적으로 밝은 부분이 열원을 나타낸다. 실험에 사용한 적외선 열화상카메라는 LWIR (7~14um) 파장대의 특성을 갖는다. 그림 2 우측의 Hot Plate 표면의 어두운 bar 는 안개방 내의 온/습도를 측정하기 위한 센서

를 나타내며, 열화상 카메라의 관측 시야를 가리는 장애물로 작용한다.



CCD 카메라 관측영상

적외선 열화상 카메라 관측영상

<그림 2> Hot Plate (5m 위치) 관측 영상 (안개 주입전)

그림 3에는 안개 방내에 안개가 주입되기 시작한 직후의 관측영상을 나타낸다. He-Ne 레이저를 이용하여 측정된 가시도(Visibility)는 4.58 m 이었다. 그리고, 식 4를 이용하여 구한 Weber fraction 값은 2.58로 양호한 표적 (Hot Plate) 판별성을 보이고 있다.

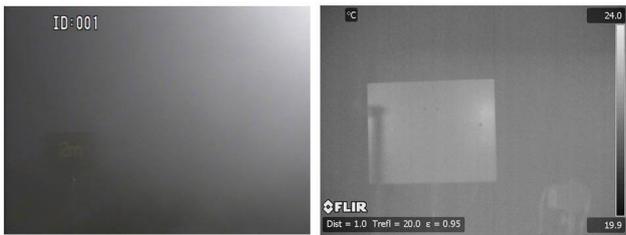


CCD 카메라 관측영상

적외선 열화상 카메라 관측영상

<그림 3> Hot Plate (5m 위치) 관측 영상 (안개 주입 직후, 가시도 4.58m)

그림 4는 안개 방내에 주입된 안개가 포화되어, 가시도가 2m 이하에서의 관측 영상을 나타낸다. 좌측의 CCD 카메라 관측영상의 경우에는 2m 표적을 제외하고는 5m 거리에 위치한 표적(Hot Plate)를 인식할 수 없다. 이에 비해 열화상 카메라의 경우, 표적을 판별할 수 있다. 이때의 Weber fraction 값은 0.25 이고, 가시도는 1.46m 이다.



CCD 카메라 관측영상

적외선 열화상 카메라 관측영상

<그림 4> Hot Plate (5m 위치) 관측 영상 (안개 포화 상태, 가시도 1.46m)

그림 3과 4를 비교할 경우, 우측의 열화상 카메라 관측영상에서, 그림 3의 열화상카메라의 온도범위는 21.7~30.9를 갖고, 그림 4의 열화상카메라의 온도범위는 19.9~24를 갖는다. 이는 안개 방이 야외에 설치되어 있고, 태양의 복사열에 의한 영향을 배제하기 위해 일몰 후의 저녁시간대에 실험이 수행되었기 때문에, 대기의 온도가 하강하며, 이를 적외선 열화상 카메라가 AGC 기능에 의해 자동으로 보정한 것이다. 그림 4의 영상으로부터, 적외선 열화상 카메라의 경우, AGC 기능에 의해 관측할 경우, 1.5 m 이하의 가시도 조건에서도 5 m 거리의 Hot Plate를 관측할 수 있음을 나타낸다. 그림 5는 10m 거리의 Hot Plate에 대한 관측영상을 나타낸다. 좌측의 CCD 카메라 관측영상에서는 내장된 ZOOM 기능을 이용하여 10m 표적이 FOV에 가득 차도록 하였다. 그리고, 우측은 열화상 카메라의 10m 거리의 Hot Plate 관측영상을 나타낸다. 그림에서 밝게 보이는 부분은 Hot Plate 뒷면에 부착된 열원을 나타낸다. 그림 6은 안개방내의 안개가 포함된 상태에서, 10m 거리의 Hot Plate 관측영상을 나타낸다. 육안으로 세심히 관측하면, Hot Plate의 존재를 알 수 있다. 레이저 측정에 의한 가시도는 0.8m이었으며, Weber fraction 값

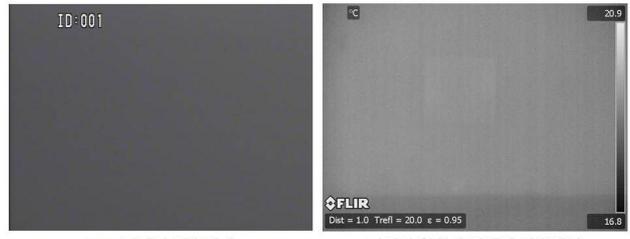
은 0.04 이었다. 이는 배경과 Hot Plate의 밝기 구분이 4% 이하임을 나타낸다.



CCD 카메라 관측영상

적외선 열화상 카메라 관측영상

<그림 5> Hot Plate (10m 위치) 관측 영상 (안개 주입 전)



CCD 카메라 관측영상

적외선 열화상 카메라 관측영상

<그림 6> Hot Plate (10m 위치) 관측 영상 (안개 포화 상태, 가시도 0.8m)

10 m 표적에 대한 실험은 어떻게 수행되었다. 태양에 의한 복사열을 직접받기 때문에, 실험 기간 중에 안개방의 온도는 3도 이상 상승하였다. 따라서, 배경온도 상승에 의해 Hot Plate의 Weber fraction 값이 낮은 것으로 추정된다. 이는 추후 규명이 필요하다.

3. 결 론

본 논문에서는 원자력발전소 중대 사고를 모사한 비가시 환경에서 적외선 열화상카메라의 관측성능 (가시도)을 정량적으로 평가하였다. 세계기상기구의 가시도 정의를 이용하여 가시도를 측정하였으며, 측정된 가시도 조건에서 Weber fraction 지수를 이용하여, 적외선 열화상카메라의 관측성능을 정량적으로 평가하였다. 야외에 설치된 안개방의 대기 조건에 영향을 받지만, 5m (Weber fraction 0.25) 및 10 m (Weber fraction 0.04) 거리에 위치한 Hot Plate를 인식할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 조재완, "Monitoring Performance of the Thermal Infrared Camera under Visibility Constraint Environments", 대한 전자공학회 하계학술대회, 2015
- [2] Jesteadt, "Intensity discrimination as a function of frequency and sensation level", *J. of the acoustical society of America*, Vol.61, pp169, 1977