

## 마이크로 제트엔진 배기플룸 주위 물 분사에 따른 장파장 적외선 신호특성 연구

유건원<sup>a</sup> · 최성만<sup>a,\*</sup>

### Study on the Characteristics of Long Wave Infrared Signal by Water Injection around the Exhaust Plume of the Micro-jet Engine

Gunwon Yu<sup>a</sup> · Seongman Choi<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Aerospace Engineering Department, Jeonbuk National University, Korea

\* Corresponding author. E-mail: [csmn@jbnu.ac.kr](mailto:csmn@jbnu.ac.kr)

#### ABSTRACT

An experimental study was carried out to understand the characteristics of the long wave infrared signal emitted from the exhaust plume when water is sprayed around it. The micro-jet engine was used to generate the exhaust plume, and eight water spray nozzles were installed around the exhaust nozzle. Two water injection angles were applied, one is spraying parallel to the exhaust plume, and the other is spraying water into the exhaust plume. The measurement results are as follows. When spraying water parallel to the exhaust plume, the long wave infrared signal is decreased with water spray flow rate. When spraying water the exhaust plume, the long wave infrared signal shows a larger value than plume only.

#### 초 록

배기플룸 주위에 물을 분사할 경우 배기플룸에서 방출되는 장파장 적외선에 대한 특성을 알기 위하여 실험적인 방법으로 연구를 수행하였다. 배기플룸을 생성하기 위하여 마이크로 제트엔진을 사용하였으며, 배기노즐 주위에 8개의 물 분사노즐을 배치하였다. 물을 배기플룸과 평행하게 분사하여 배기플룸을 감싸거나, 또는 배기플룸 내에 물을 분사하는 두 가지 분사각도를 적용하였다. 장파장 적외선 신호 측정결과 물을 배기플룸과 평행하게 분사할 경우 물 분사유량에 따라 적외선 신호는 감소되었다. 배기플룸 내에 물을 분사할 경우, 적외선 신호는 배기플룸만 분사하는 경우보다 오히려 큰 값을 나타내는 것으로 측정되었다.

Key Words: Micro-jet Engine(마이크로 제트엔진), Water Spray(물 분사), Long Wave Infrared Signal(장파장 적외선 신호), Exhaust Gas Temperature(배기가스온도), Transmission(투과율)

Received 3 December 2021 / Revised 9 February 2022 / Accepted 15 February 2022

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers  
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2021년도 추계학술대회(2021.11.24.~26. 웨스틴 조선호텔 부산) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

## Nomenclature

$\tau$	: Transmission
$C_{pg}$	: Specific heat of exhaust plume at constant pressure
$C_{pw}$	: Specific heat of water at constant pressure
$I_a$	: Total radiance after water spray
$I_b$	: Total radiance before water spray
$\dot{m}_g$	: Mass flow rate of exhaust plume
$\dot{m}_w$	: Mass flow rate of water
$T_o$	: Final temperature when water and exhaust plume mixed
$T_{gi}$	: Initial temperature of exhaust plume
$T_{wi}$	: Initial temperature of water

## 1. 서 론

현대 기술의 발전으로 항공기의 생존성은 매우 중요하게 인식되고 있으며, 레이더 및 적외선 스텔스 기술은 필수적인 요소로 자리잡고 있다 [1,2]. 특히 항공기로부터 방출되는 적외선 신호는 항공기 피탐지성에 매우 치명적이다. 주요한 적외선 신호의 방출요소로서는 항공기의 추진계통 및 배기가스에 의한 것이 있고, 공력가열로 인한 항공기 기체표면에서의 방사 등이 있다. 이들 중 고온의 엔진과 배기노즐에서 방출되는 배기가스로 인하여 방사되는 적외선 신호의 크기가 상대적으로 매우 큰 값을 가지고 있다. 적외선 신호는 적외선 신호 탐지거리(Lock-on Range)와 격추가능 범위(Lethal Envelope)에 직접적인 영향을 주며[3], 근래에는 낮은 온도의 파장영역까지 적외선 신호 탐지가 가능하도록 많은 연구가 진행되고 있다[4]. 따라서 항공기 생존성을 향상시키기 위해서는 적외선 신호 저감기술이 필수적이며, 적외선 신호를 저감시키기 위하여 추진계통의 열원을 차폐하거나 주변공기와의 혼합을 통한 배기가스의 온도를 감소시키거나 배기구 형상을 원형에서 타원 또는 직사각형 형태

로 변화시키는 연구를 수행하고 있다. 이러한 수동적 적외선 저감기술과 더불어 능동적으로 적외선 신호를 저감시키기 위한 방법으로 노즐에서 분사되는 배기가스 주위로 물 또는 입자를 분사하여 신호를 저감시키는 연구도 진행 중이다[5]. 특히 물 분사기법의 경우 물의 분사에 의한 적외선 신호의 투과도 감소효과와 더불어 배기가스온도를 낮추어주는 두 가지 효과에 의해 적외선 신호를 저감할 수 있을 것으로 예상되어 현재 국내·외에서 물 분사를 이용한 실험 및 해석연구가 다수 수행되고 있다. 현실적으로 항공기 내부에 물 분사 시스템을 구축하는 것은 공간 확보 및 무게 등의 측면에서 고려해야 할 사항이 매우 많을 수 있다. 그러나 물 분사시의 배기플룸의 적외선 신호특성을 파악하여 물 분사유량 및 분사방법에 대한 적외선 저감 효과의 특성을 이해하고 어느 정도 비용으로 적외선 저감효과를 나타내는지 파악하는 것은 매우 가치 있는 연구가 될 것이다. 해외 연구로는 Jun 등 [6]과 Guarnieri[7]가 물을 배기플룸 주변에 분사하여 온도 및 적외선 신호를 실험적 방법으로 측정하였으며, 온도 감소와 엔진 고온부 차폐효과가 있음을 확인하였다. Li 등[8], Tyagi 등[9]과 Ye 등[10]은 실험 및 수치해석 방법을 이용하여 배기플룸 주위로 물을 분사하여 온도변화를 측정하였으며, 온도 감소효과를 확인하였다. 한편, 국내에서는 이지원 등[11]이 배기플룸 주위로 물 분사에 따른 적외선 신호 및 온도 수치해석 연구를 수행하였으며, 물 분사유량이 증가함에 따라 플룸 고온부 길이가 점차 짧아짐을 확인하였다. 또한, 유건원 등[12]은 실험적 방법으로 마이크로 제트엔진 배기노즐 주위에 물을 분사하여 적외선 신호를 측정하는 기초적인 실험연구를 진행하였다. 현재 국내 연구는 수치해석 연구에 국한되어 있으며, 적외선 신호특성에 관한 실험연구가 체계적으로 진행되지 않은 실정이다. 따라서 물 분사유량 및 분사방식 변경 등의 다양한 방식을 적용하여 엔진 배기플룸 적외선 신호 특성에 관한 실험적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 실제 항공기와 유사한 배기가스를 모사할 수 있도록 마이크로 제트엔진을 이

용하고, 엔진 배기노즐 주위로 물을 다양한 각도로 분사할 수 있는 물 분사 시스템을 구축하고, 이를 이용하여 배기가스에서 방사되는 적외선 신호를 측정하여 물 분사에 따른 적외선 신호특성을 연구하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험장치

본 연구에서 배기플룸을 분사하기 위해 사용한 마이크로 제트엔진은 Netherlands AMT 사의 Olympus HP Engine으로 Table 1과 Fig. 1에 사진 및 제원이 제시되어있다. 마이크로 제트엔진은 원심형 압축기, 직류형 연소기 그리고 축류형 터빈으로 구성되어 있으며, 최대 회전수 108,500 rpm, 압축비 3.8, 최대 추력 230 N 그리고 최대 배기가스온도(EGT)는 750°C이다. 연료는 실물 엔진과 유사한 케로신(Kerosene)에 Mobil Jet Oil 2 윤활유를 4.5% 혼합하여 사용하였다.

Table 1. Micro-jet engine specification.

Parameter	Value(Max.RPM)
max.RPM	108,500
Thrust	230 N
Pressure ratio	3.8
Specific fuel consumption	46.4 g/kN · sec
Exhaust gas temperature	750°C
Air mass flow	0.45 kg/sec

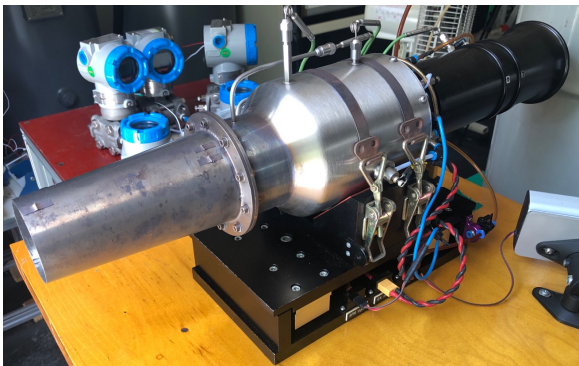


Fig. 1 Micro-jet engine.

마이크로 제트엔진 외관에는 각 스테이션 별로 압력을 측정할 수 있는 압력 센싱 포트가 구성되어 있으며, Table 2와 Fig. 2에 압력 센서 사양 및 압력 센싱 포트 위치가 제시되어있다. 압력은 AUTROL 사의 제품을 이용하였으며, 벨마우스 정압력( $P_{s1}$ ), 압축기출구 정압( $P_{s3}$ ) 및 전압( $P_{t3}$ ), 연소기출구 전압( $P_{t4}$ ) 그리고 터빈출구 전압( $P_{t5}$ )을 측정하였다. 벨마우스에서 측정하는 정압력( $P_{s1}$ )은 0~750 mmH<sub>2</sub>O의 범위에서 운용되며, 측정된 정압력을 이용하여 엔진제작사(AMT 사)에서 제공한 보정식으로 공기 흡입유량을 계산하였다. 엔진 운용은 throttle 10% 조건인 회전수 54,500 rpm에서 수행하였다. 이러한 엔진 운영조건을 설정한 것은 엔진흡입 공기유량에 대한 물 분사 질량유량의 비가 약 0.7에서 1.7 정도로 유지되도록 하여, 물 분사유량에 대한 장파장 적외선의 변화특성을 살펴보기 위한 것이다.

### 2.2 물 분사 시스템

마이크로 제트엔진의 배기노즐 출구 주위로 물을 분사하기 위해 물 분사 시스템을 구성하였으며, Fig. 3과 Fig. 4에 각각 물 분사 시스템과 시스템 개략도가 제시되어있다. 물 분사노즐은 총 8개로 엔진 및 배기노즐 중심으로부터 100 mm

Table 2. Engine pressure measurement specification.

Pressure port	Pressure sensor	Pressure range	Unit
$P_{s1}$	APT3100-M1BF	0~750	mmH <sub>2</sub> O
$P_{s3}$	APT3100-M1BF	0~3,800	mmH <sub>2</sub> O
$P_{t3}$	APT3200-M1BA	0~15	bar
$P_{t4}$	APT3500-M1BF	0~5,000	mmH <sub>2</sub> O
$P_{t5}$	APT3200-M1BA	0~10	bar

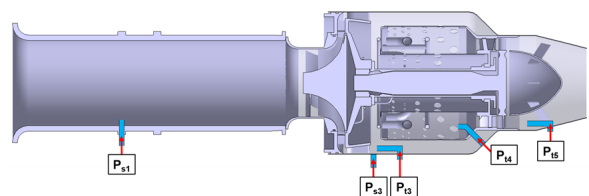


Fig. 2 Layout of pressure sensing port in micro-jet engine.

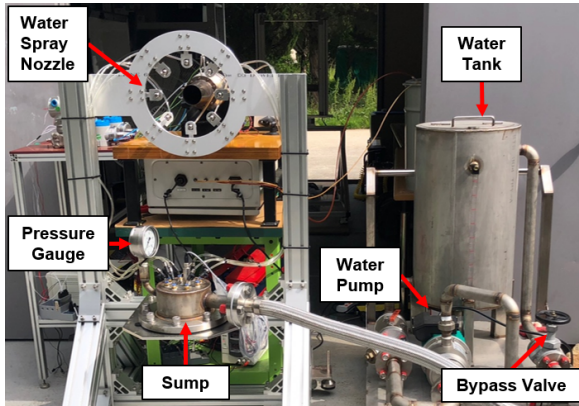


Fig. 3 Water spray system.

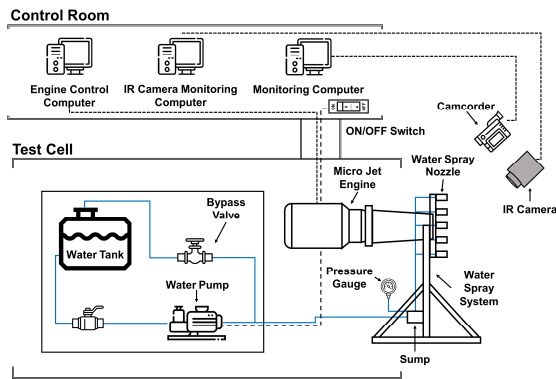


Fig. 4 Layout of water spray system.

위치(노즐 출구직경의 약 3배)에 원주 형태로 배치되어 있으며, 물로 배기가스를 차폐하거나 배기가스 내로 분사할 수 있는 물 분사노즐(NZRVFS1-2.0, 한국미스미 사)을 사용하였다. 물분사노즐의 출구 직경은 2 mm로 부채꼴 분무형상을 나타내며, 분무 각도는 물 분사압력이 1 bar 인 경우 38° 이고 6 bar 인 경우 60°로 나타난다. 물은 물탱크에 저장되며 엔진 운용 시 엔진 회전수가 54,500 rpm(Throttle 10%)에 도달하면, 엔진 제어실에서 On/Off 작동을 통해 펌프(MHI204M, Wilo 사)와 바이패스 밸브를 거친 후 섬프(Sump)를 지나 물 분사노즐로 공급되도록 설계하였다. 섬프는 펌프를 통해 공급되는 물을 1 L 공간에 수용하여 8개의 분사노즐로 균일하게 분배시키며, 섬프 상단의 압력게이지(232.50-61544446, Wika 사)로 분사압력을 확인하였다. 물 분사유량 조절은 바이패스 밸브(GSO-1F, YNV 사)를 사용하였으며,

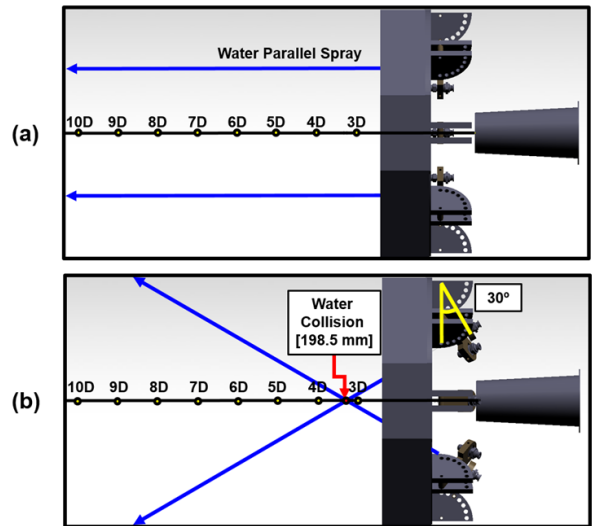


Fig. 5 Water spray nozzle arrangement (a) water parallel spray (b) 30° inclined spray.

분사유량 측정은 물 분사노즐에 호스를 연결하여 일정 시간 동안 분사한 물의 질량을 전자저울(EK-6100i, AND 사)을 이용하여 측정하였다. 또한 분사노즐로 공급되는 물의 온도는 K타입 열전대(TJC120-CAXL-062G-2.25, OMEGA 사)와 휴대용 열전대(54 II B, FLUKE 사)를 사용하여 측정하였다. 물 분사각도는 분사노즐 후방에 위치한 각도조절장치를 이용하여 15° 단위로 조절이 가능하다. 실험에 이용된 물의 분사각도는 배기플룸과 평행한 0°와 물을 배기플룸 내에 분사하여 서로 충돌시키는 30°의 분사각도를 이용하였다. 이때 30°의 물 분사각도는 분사되는 물로부터 엔진의 안전성 및 배기노즐과 물분사장치의 간섭 등을 고려하여 결정하였다. 물 분사각도에 따른 물 분사형태는 Fig. 5에 제시되어있다.

2.3 적외선 신호 측정

물 분사시 배기플룸으로부터 방사되는 적외선 신호를 측정하기 위해 적외선 열화상 카메라(A655sc, FLIR 사)를 사용하였으며, 측정 파장 범위는 7.5 ~ 14 μm 이고 온도 범위는 100 ~ 650 °C이다. 각 파장대별 적외선 신호측정이 매우 중요하나 본 연구에서는 현재 운용 가능한 열화상 카메라를 본 연구에 이용 하였으며, 추후 후속 연구에서 파장별 적외선 신호분석이 가능한 기자재를 도

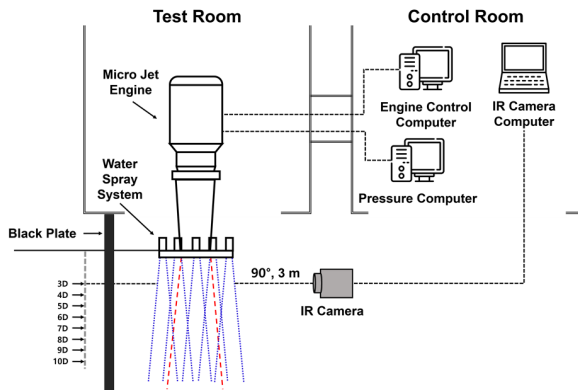


Fig. 6 Layout of LWIR signal measurement.

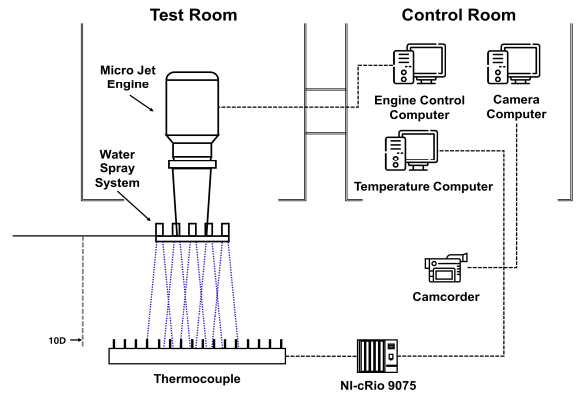


Fig. 7 Layout of plume temperature measurement.

Table 3. Details of measuring position.

Position	Distance	Position	Distance
3D	189 mm	7D	441 mm
4D	252 mm	8D	504 mm
5D	315 mm	9D	567 mm
6D	378 mm	10D	630 mm

입하여 계속 연구 진행할 예정이다. 실험은 엔진 회전수 54,500 rpm, 배기가스온도 약 506°C에서 수행되며, 물 분사시 배기가스 적외선 신호 분포의 거시적 변화를 확인하도록 장파장 대역의 적외선 열화상 카메라를 이용하였다. 적외선 열화상 카메라는 컴퓨터와 연결되며 실시간 제어 및 분석을 위해 전용 소프트웨어(ResearchIR)를 사용하여 실험을 수행하였다. 적외선 신호 측정 개념도는 Fig. 6에 제시되어있으며, 배기노즐 출구 중심에서 90° 각도로 3 m 떨어진 지점에 적외선 열화상 카메라를 위치하였다. 물은 배기플룸과 평행한 경우(물 분사각도 0°) 및 배기플룸 내로 분사하여 서로 충돌되는 경우(물 분사각도 30°)로 물 분사유량에 따른 노즐 출구에서 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D, 9D, 10D 거리에서의 적외선 신호를 측정하였다. 여기서 D는 배기노즐 출구직경으로 63 mm이며, Table 3에 측정 위치의 구체적인 수치가 제시되어있다.

2.4 배기플룸 온도측정

배기플룸 주위로 물을 분사한 경우 배기플룸의 온도를 측정하기 위해 K-type 열전대를 사용

하였으며, 총 16개의 열전대를 20 mm 간격으로 배치하여 반경 방향으로 총 320 mm 범위(좌우 각각 160 mm)를 20 mm 단위로 측정하였다. 배기플룸의 온도측정은 데이터 수집장치인 NI-cRio 9075를 엔진 제어실의 컴퓨터와 연결하여 기록하였으며, 각 열전대의 온도측정 위치 및 온도 데이터를 분석하여 배기플룸 온도분포를 나타내었다. 배기플룸의 온도측정 개념도는 Fig. 7에 제시되어있으며, 배기노즐 출구 중심에서 길이 방향으로 10D 떨어진 지점에 열전대를 위치하여 물 분사유량에 따른 물 분사 전·후의 배기플룸 온도를 측정하였다.

2.5 적외선 투과율 측정

대기 중의 물 또는 수증기는 적외선 신호의 투과율에 큰 영향을 주므로, 물 분사시 배기플룸의 적외선 신호를 적절하게 파악하기 위해서는 적외선 투과율에 대한 정보가 필요하다. 물 분사시 적외선 투과율을 측정하기 위해 적외선 조사기(IOT/90, Elstein 사)를 사용하였다. 최대온도는 490°C 이고 파장 범위는 6~14 μm 이다. 물 투과율 측정 개념도는 Fig. 8에 제시되어있다. 엔진 배기노즐 중심에서 적외선 조사기를 적외선 측정장치와 수평이 되도록 배치하였다. 배기플룸에서 방사되는 적외선이 물을 통과하는 비율인 투과율(Transmission,  $\tau$ , %)은 Eq. 1로 표시된다.  $I_a$ 는 물 분사 후 적외선 신호,  $I_b$ 는 물 분사 전 적외선 신호를 의미하며, 단위는 W/sr-mm<sup>2</sup>이다.

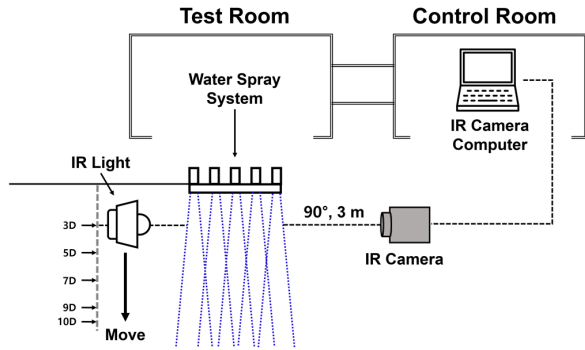


Fig. 8 Layout of LWIR transmission measurement.

$$\tau(\%) = \frac{I_a}{I_b} \times 100 \quad (1)$$

투과율 측정은 엔진 운용없이 적외선 조사를 배기노즐 끝단에서 3D, 5D, 7D, 9D, 10D 지점에서의 물을 배기플룸과 평행하게 분사한 경우 물 분사 전·후의 적외선 신호를 측정하여 투과율을 계산하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 물 분사유량

마이크로 제트엔진 배기노즐 주위로 분사하는 물의 유량 측정 결과는 Fig. 9와 Fig. 10에 제시되어있다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 물 공급압력에 따른 물 분사유량과 물 가스 질량비(Water to gas mass ratio)를 나타내며, 물 가스 질량비는 물 분사유량을 공기 흡입유량으로 나눈 값이다. 공기 흡입유량은 엔진 회전수 54,500 rpm에서 안정화 후 엔진 흡입구 압력 및 배기가스온도를 보정식에 기록하여 계산하였다. 엔진 흡입구에서의 정 압력과 배기가스온도는 각각 709 Pa 과 423℃이며, 공기 흡입유량은 0.2166 kg/s로 측정되었다. 물 분사유량은 물 분사노즐에서 1분간 분사한 물의 질량을 물 공급압력에 따라 측정하였다.

#### 3.2 적외선 신호

물 가스 질량비에 따른 배기플룸 적외선 이미

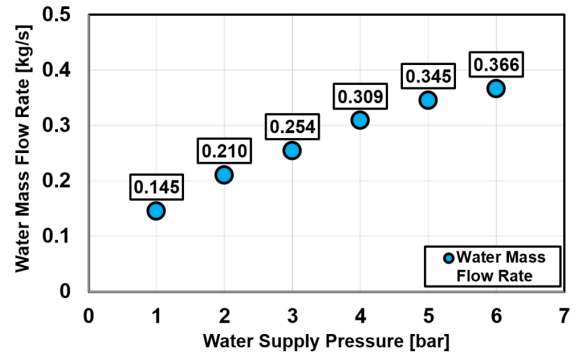


Fig. 9 Water spray mass flow rate with water supply pressure.

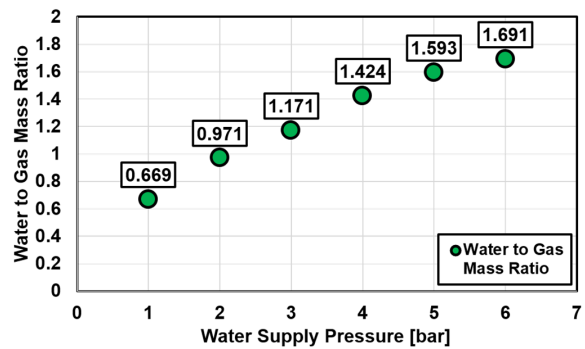


Fig. 10 Water to gas mass ratio with water supply pressure.

지는 엔진 배기노즐 출구중심에서 90° 각도 및 3 m 떨어진 지점에 적외선 열화상 카메라를 위치하여 측정하였으며, Fig. 11과 Fig. 12에 결과가 제시되어있다. Fig. 11은 물을 배기플룸과 평행하게 분사한 경우의 적외선 이미지이며, Fig. 12는 물을 배기플룸 내로 분사한 경우의 적외선 이미지이다. 물을 배기플룸과 평행하게 분사한 경우 물 분사유량이 증가함에 따라 배기플룸 중심의 고온부 길이가 점차 짧아지며, 거리가 멀어질수록 적외선 신호가 감소됨을 확인할 수 있다. 물을 배기플룸 내에 분사하여 서로 충돌될 경우 물 분사유량이 증가함에 따라 배기플룸 중심부에서 적외선 신호가 증가함을 볼 수 있다. 배기노즐 출구거리에 따른 적외선 신호 감소율은 Fig. 13과 Fig. 14에 제시되어있다. 적외선 신호 감소율은 물 분사 전·후의 적외선 신호 차이를 물 분사 전의 적외선 신호로 나눈 값으로 Eq. 2에 제시되어있다.

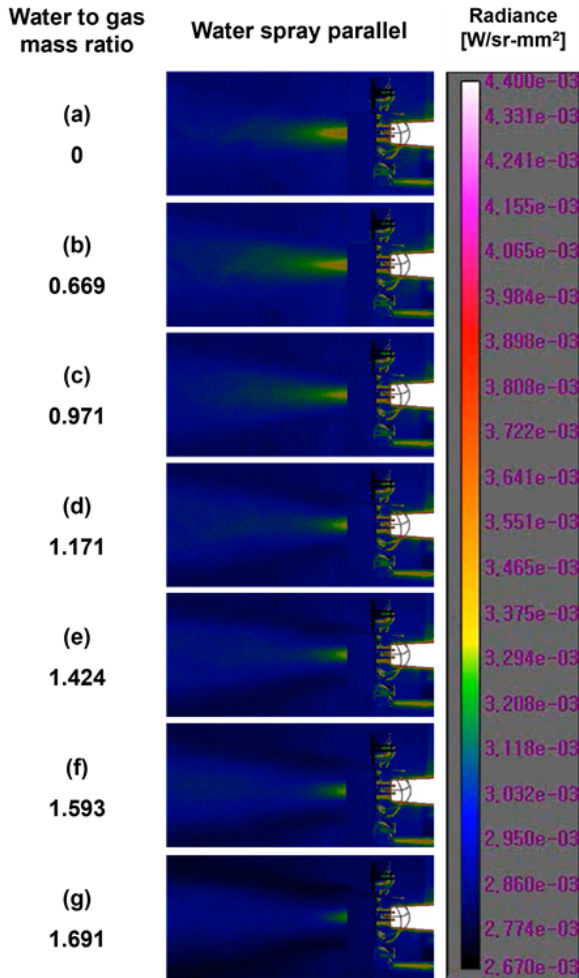


Fig. 11 IR signal with water to gas mass ratio(water parallel spray).

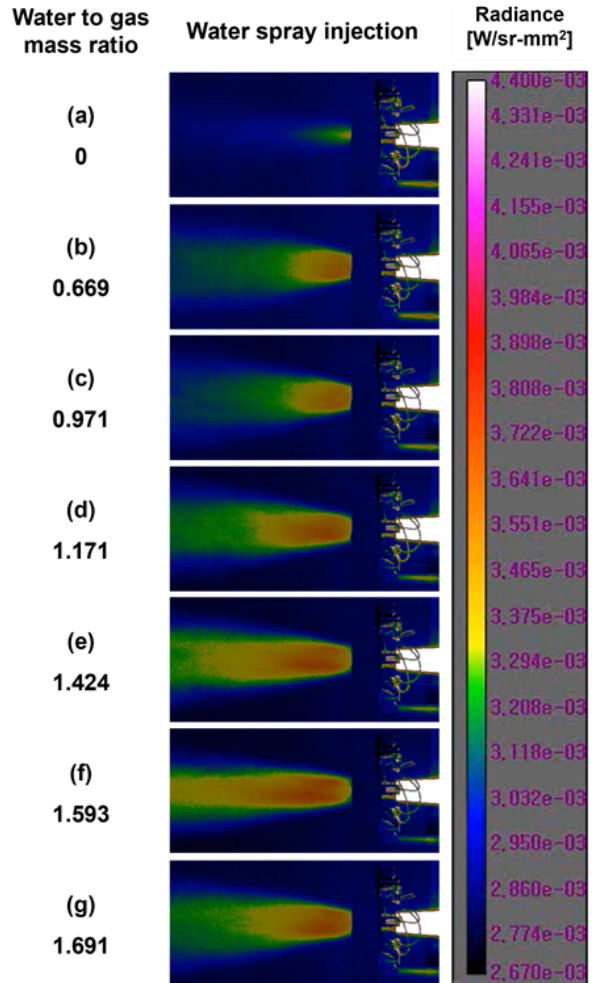


Fig. 12 IR signal with water to gas mass ratio(30° inclined spray).

$$Radiance\ reduction\ rate\ (\%) = \frac{I_b - I_a}{I_b} \times 1 \quad (2)$$

Fig. 13은 물을 배기플룸과 평행하게 분사한 경우의 적외선 신호 감소율을 나타내었다. 물 가스 질량비 0.699와 0.971의 경우 배기노즐 출구 중심에서 3D 떨어진 지점에서 적외선 신호가 각각 최대 0.76%와 1.95% 감소하였으며, 물 분사 유량이 증가할수록 적외선 신호는 4D 지점에서 최대 5.68% 감소함을 보였다.

Fig. 14는 물을 배기플룸 내로 분사한 경우의 적외선 신호 감소율을 나타내었다. 배기노즐 출구에서 3D 떨어진 위치에서 적외선 신호의 감소율은 음수로 적외선 신호가 증가함을 나타내며,

배기노즐 출구에서 6D 위치에서 물 가스 질량비 1.593인 경우 적외선 신호가 최대 21.6% 증가함을 보였다. 그러나 물 가스 질량비 1.691인 경우, 즉 물의 분사량이 매우 많은 경우 적외선 신호의 증가율은 둔화됨을 볼 수 있다.

### 3.3 배기플룸 온도 분포

물 분사시 물 가스 질량비에 따른 배기노즐 출구에서의 배기플룸 온도측정 결과는 Fig. 15와 Fig. 16에 제시되어있다. 이때 반경방향 영(0)인 지점은 배기노즐 중심을 나타낸다. 엔진 점화 후 54,500 rpm에 도달하여 안정적으로 운용될 때, 물 분사 전 플룸의 온도분포는 Fig. 15와 Fig. 16에 제시되어있다. 여기서 Plume은 물 분사 전

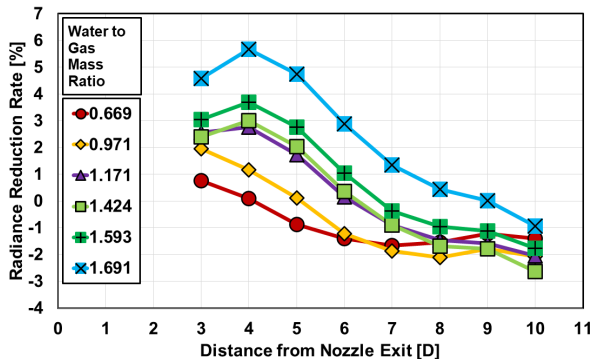


Fig. 13 Radiance reduction rate with nozzle exit distance (water parallel spray).

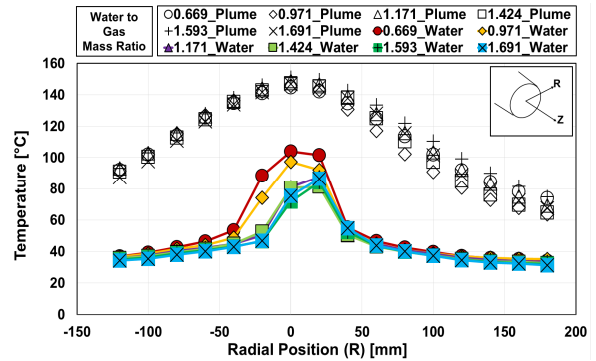


Fig. 15 Exhaust plume temperature distribution with water spray (water parallel spray, 10D).

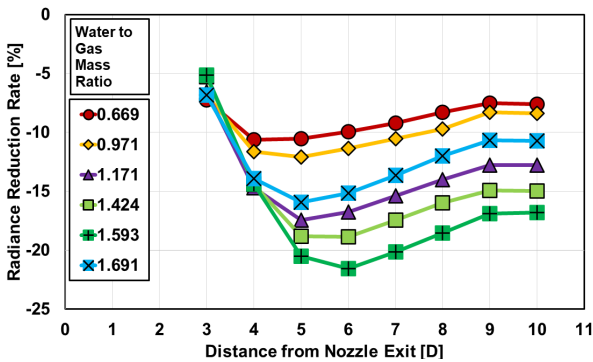


Fig. 14 Radiance reduction rate with nozzle exit distance (30° inclined spray).

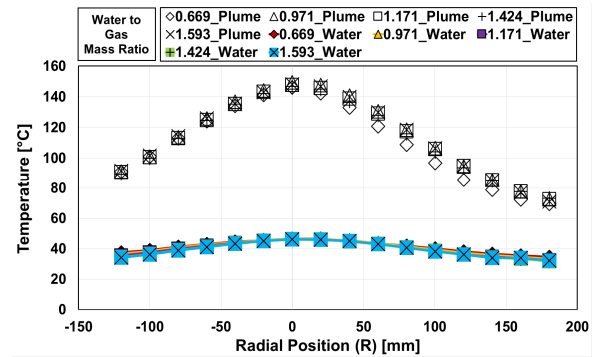


Fig. 16 Exhaust plume temperature distribution with water spray (30° inclined spray, 10D).

10D 위치에서의 플룸 온도이며, Water은 물 분사 후 10D 위치에서의 물과 플룸이 혼합된 온도이다. 물을 배기플룸과 평행하게 분사한 경우의 온도분포는 Fig. 15에 제시되어있다. 배기노즐에서 10D 떨어진 위치에서 배기플룸 중심부의 온도는 물 분사 전에 비해 물 가스 질량비가 0.669인 경우 약 40.8°C(약 28.2%) 감소하였으며, 1.171인 경우 약 79.1°C(약 52.4%) 감소하였다. 반경방향 좌우로 40 mm 이상에서는 물 가스 질량비가 증가할수록 물 공급온도와 유사하게 냉각됨을 확인하였다.

물을 배기플룸 내로 분사하여 서로 충돌하는 경우의 온도분포는 Fig. 16에 제시되어있다. 배기노즐에서 10D 떨어진 지점에서 배기플룸 중심부의 온도는 물 분사 전에 비해 물 가스 질량비가 0.669인 경우 약 99.3°C(약 68%) 감소하였으며, 1.171인 경우 약 101.8°C(약 68.81%) 감소하

였다. 물 가스 질량비가 증가하더라도 배기노즐 출구중심부 온도는 약 46°C로 거의 일정하게 나타남을 확인할 수 있다. 이것은 물을 배기플룸 중심부로 분사할 경우 배기플룸과 완전하게 혼합되지 않은 물이 열전대를 냉각하여 발생한 결과로 판단되며, 가시화 측정결과에서도 배기플룸과 혼합되지 않은 물 입자를 발견할 수 있었다.

배기플룸과 물의 완전한 혼합을 반영한 이론식 Eq. 3[13]을 이용하여 계산한 온도 값이 Fig. 17에 제시되어있다. 물과 배기가스가 혼합될 때 실험에서 측정된 온도와 이론적으로 계산된 온도가 어떤 차이를 보여주는지 확인할 수 있다. 이때 물과 배기플룸은 완전혼합되는 것으로 가정하여 계산하였다. 실험의 경우 물은 약 30°C로 분사되었으며, 물과 배기가스 혼합 시 100°C 미만이므로 물의 증발에 의한 잠열 효과는 고려하지 않았다. 정성민[13] 등의 경우는 배기가스 유



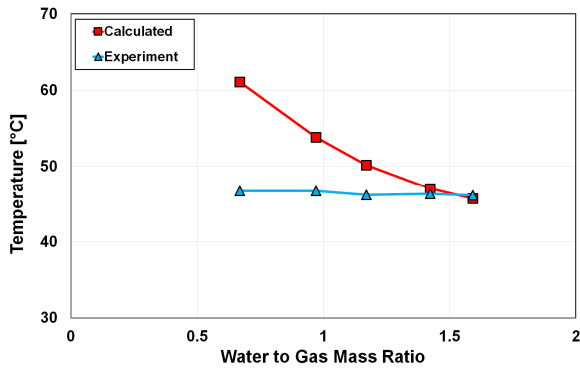


Fig. 17 Calculated and experimental exhaust plume temperature with water to gas mass ratio at the nozzle center(30° inclined spray, 10D).

량의 0.05배 정도의 물을 분사하여 잠열을 고려 하였으나, 본 연구에서는 배기가스 유량의 0.7배 이상으로 물을 분사하여 70°C 미만의 혼합가스 온도가 산출되어 잠열의 영향을 배제하는 것이 적절하다고 판단된다.

$$T_o = \frac{\dot{m}_g C_{pg} T_{gi} + \dot{m}_w C_{pw} T_{wi}}{\dot{m}_g C_{pg} + \dot{m}_w C_{pw}} \quad (3)$$

여기서  $T_o$ 는 물과 배기플룸의 완전한 혼합 이후 최종온도이며,  $T_{gi}$ 와  $T_{wi}$ 는 각각 배기플룸 및 물의 초기온도를 의미한다.  $\dot{m}_g$ 과  $\dot{m}_w$ 는 각각 배기 플룸 및 물의 질량유량으로 단위는 kg/s,  $C_{pg}$ 와  $C_{pw}$ 는 각각 배기플룸과 물의 비열로 단위는 kJ/kg · K 이다.

물을 배기플룸 내로 분사한 경우 반경방향 영 지점에서의 잠열을 고려하지 않은 온도 계산값과 측정온도의 편차는 물 가스 질량비가 0.669인 경우 약 14.4°C, 1.593인 경우 약 0.4°C을 보인다. 이는 실험조건에서 물과 배기플룸이 완전히 혼합되지 않고 분사된 물의 일부분이 액적상태로 존재하기 때문으로 판단된다.

### 3.4 배기플룸 온도에 대한 적외선 신호 특성

배기노즐 출구중심에서 10D 떨어진 위치에서의 배기플룸의 온도에 대한 적외선 신호 크기는 Fig. 18과 Fig. 19에 제시되어있으며, 각각 물을

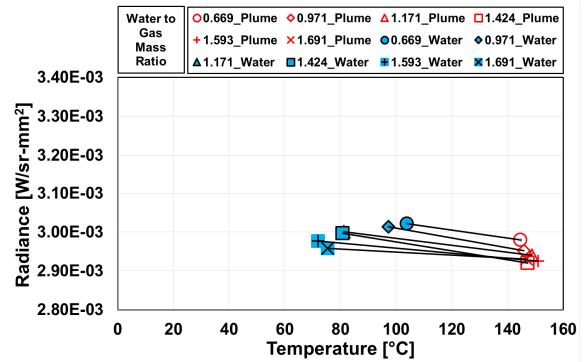


Fig. 18 IR radiance with exhaust plume temperature (water spray parallel, 10D).

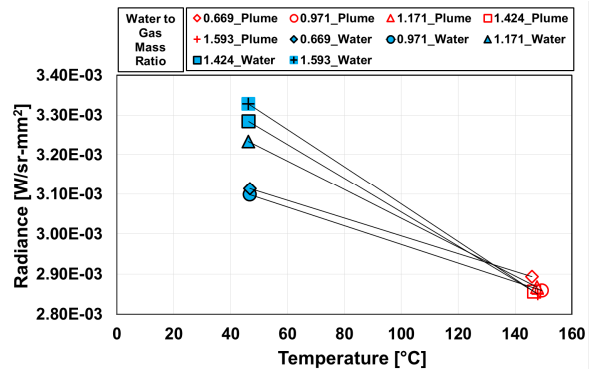


Fig. 19 IR radiance with exhaust plume temperature (30° inclined spray, 10D).

배기플룸과 평행하게 분사한 경우와 물을 배기 플룸 내로 분사한 경우를 나타낸 결과이다. 물 가스 질량비가 증가할수록 물을 평행하게 분사 한 경우 배기플룸 온도는 약 71~104°C 에 분포 하고 있어, 플룸과 평행하게 물을 분사하더라도 노즐 출구에서 멀리 떨어진 10D 위치에서는 물 과 어느 정도 혼합이 진행됨을 알 수 있다. 그리고 적외선 신호는 물 분사 전에 비해 다소 큰 값을 가진다. 물을 배기플룸 내로 분사한 경우 배기플룸의 온도는 크게 감소하여 약 46°C 근처 에서 일정하게 유지되며, 적외선 신호는 물 가스 질량비에 따라 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 물과 배기플룸의 혼합으로 인해 생성된 물 가스 혼합기체 내 고온의 H<sub>2</sub>O에서 방출하는 적외선 신호가 배기가스 온도저감에 의한 적외선 신호 감소 효과보다 더 크게 작용하는 것으로 판단된 다. 이것은 최재원[14]의 단파장 또는 중파장에

서 H<sub>2</sub>O 분자들의 영향으로 적외선 신호가 증가하는 결과와 유사하나, 추후 파장대별 적외선 신호의 크기를 분석할 수 있는 측정장비를 이용하여 추가적인 연구 및 분석이 필요하다.

3.5 적외선 투과율

배기플룸에 평행하게 물을 분사할 경우 적외선이 감소하는 특성을 이해하기 위하여, 물을 배기플룸과 평행하게 분사할 때 물 분사량에 따른 적외선 투과율을 측정하였으며 투과율 측정결과는 Fig. 20에 제시되어있다. 배기노즐 출구로부터 거리가 멀어질수록 적외선의 투과율이 감소함을 확인할 수 있으며, 또한 물 가스 질량비가 증가할수록 적외선 투과율이 감소함을 볼 수 있다. 배기노즐 출구로부터 3D 떨어진 위치에서의 물 가스 질량비에 따른 적외선의 투과율은 물 가스 질량비가 0.669인 경우 투과율은 87.3%이며, 물 가스 질량비가 1.691인 경우 투과율은 82.2%로 투과율이 감소함을 볼 수 있다. 배기노

즐 출구로부터 10D 떨어진 위치에서 물 가스 질량비에 따른 적외선의 투과율은 다음과 같다. 물 가스 질량비가 0.669인 경우 적외선의 투과율은 79.3%이며, 물 가스 질량비가 1.691인 경우 48.1%로 적외선의 투과율이 대폭 감소하는 것을 확인할 수 있다. 투과율과 적외선 신호 간의 상관관계는 Fig. 21에서 확인할 수 있다. 투과율이 감소함에 따라 적외선 신호가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 즉 플룸 주위의 분사된 물 입자에 의하여 적외선 방사 신호는 일정 부분 흡수되어 투과율이 감소하게 되며, 결국 차폐율의 증가로 적외선 측정장치에서 측정되는 적외선 신호는 감소하게 된다.

4. 결 론

마이크로 제트엔진을 이용하여 배기플룸을 생성하고 배기노즐 주위로 물 분사시 물 분사유량에 따른 장파장 적외선 신호 및 온도측정 연구를 수행하였다. 물 분사 시스템을 구성하여 물을 분사하였으며, 1에서 6 bar까지 물 공급압력을 조절하여 총 6가지의 물 분사유량 조건과 총 2가지의 물 분사각도에서 실험을 수행하였다.

배기플룸의 적외선 신호 및 온도 측정결과 물을 배기플룸과 평행하게 분사한 경우 적외선 신호 크기가 감소하며, 물을 배기플룸 내로 분사하여 서로 충돌하는 경우 적외선 신호는 오히려 물 분사 전보다 더 증가하였다. 이러한 상반되는 효과를 이해하기 위하여 물 분사 전·후의 배기 가스 온도측정과 적외선 신호의 투과율 측정을 수행하였다. 이 결과로부터 물을 플룸과 평행하게 분사한 경우 물 분사유량이 증가함에 따라 배기플룸 적외선 신호가 분사된 물에 의해 일정 부분 흡수되어 차폐효과가 나타나는 것으로 판단된다. 그리고 물을 플룸 내부로 분사하는 경우 물 가스 혼합기체 내 고온의 H<sub>2</sub>O 성분으로 인해 배기플룸만 있는 경우보다 방사하는 적외선 신호가 오히려 커지는 것으로 판단된다. 따라서 배기플룸 주위로 물을 분사하는 경우 물 분사방식의 선택이 적외선 신호 저감에 매우 중요한

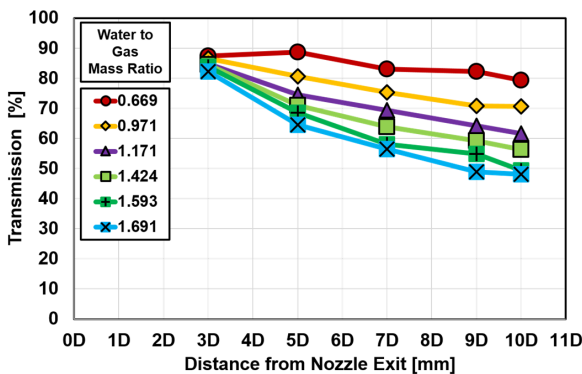


Fig. 20 Transmission with nozzle exit distance.

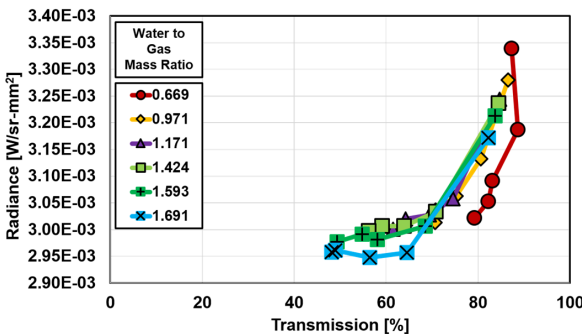


Fig. 21 Radiance with LWIR transmission.

역할을 하고 있음을 본 연구에서 파악할 수 있었다. 국내외 수치해석 선행연구의 경우 주로 온도감소 효과에 대한 결과만 제시되어 본 연구결과와 비교는 다소 어려운 측면이 있다. Guarnieri[7]의 경우 물을 배기플룸과 평행하게 분사하여 고온부 차폐를 확인할 수 있었으며, 물 가스 질량비 1.18에서 107°C 정도 온도 감소효과를 확인하였다. 본 연구결과에서 물 가스 질량비 1.17에서 79.1°C의 온도감소가 확인되어 유사한 경향이 있음을 알 수 있다.

본 연구를 통해 배기플룸 주위로 물을 분사한 경우 분사유량 및 분사각도에 따른 적외선 신호 특성을 이해할 수 있었으며, 추후 각 파장별 적외선 신호저감 추가연구를 통해 보다 엄밀한 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 항공 피탐지 감소기술 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## References

1. Rao, G.A. and Mahulikar, S.P., "Integrated Review of Stealth Technology and its Role in Airpower," *The Aeronautical Journal*, Vol. 106, No. 1066, pp. 629-641, 2002.
2. Machulikar, S.P., Sonawane, H.R. and Rao, G.A., "Infrared Signature Studies of Aerospace Vehicles," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 43, No. 7-8, pp. 218-245, 2007.
3. Kim, T.I., Kim, T.H., Lee, H.S., B, J.Y., J, D.Y. and Cho, H.H., "Susceptibility Analysis of Supersonic Aircraft Considering Drag Force of Infrared Guided Missile," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 20, No. 2, pp. 255-263, 2017.
4. Ramana Rao, J.V., *Introduction to Camouflage and Deception*, 1st ed., Defense Research & Development Organisation, New Delhi, India, Ch. 5, 1999.
5. Jung, S.M. and Jo, H.N., "Recent Studies in IR Signature Suppression using Water Spray," *51th KSPE Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 411-415, December 2018.
6. Gong, H., Cai, Y., Chatard, J.P. and Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, *Infrared Components and Their Applications: 8-11 November, 2004, Beijing, China*, 1st ed., SPIE, Washington, Washington, U.S.A., Ch. 1, 2005.
7. Guarnieri, J.A., "Thermal Signature Reduction through Liquid Nitrogen and Water Injection," Master Dissertation, Department of Aerospace Engineering, Texas A&M University, Austin, Texas, U.S.A., 2004.
8. Li, J., Jiang, Y., Yu, S. and Zhou, F., "Cooling Effect of Water Injection on a High-Temperature Supersonic Jet," *Energies*, Vol. 8, No. 11, pp. 13194-13210, 2015.
9. Tyagi, A. and Subbarao, P.M.V., "Feasibility Studies on Use of Water Mist For Plume Infrared Suppression," *International Journal of Engineering Inventions*, Vol. 5, No. 3, pp. 33-44, 2016.
10. Ye, W., Zhang, Q., Xie, Y., Cai, J. and Zhang, X., "Spray cooling for high temperature of exhaust gas using a nozzle array in a confined space: Analytical and empirical predictions on cooling capacity," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 127, pp. 889-900, 2017.
11. Lee, J.W., Lee, Y.Y., Kim, J.W. and Myong R.S., "Analysis of Characteristic of Aircraft Nozzle Flow by Injecting Water Mist," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 102-112, 2020.
12. Yu, G.W., Jang, H.S., Choi, S.M. and Kim, J.W., "An Experimental Study of Infrared

- Signal Characteristics for Micro Jet Engine Plume with Water Injection 1," *56th KSPE Spring Conference*, Jeju, Korea, pp. 1-3, May 2021.
13. Jung, S.M., Jin, J.Y. and Baek, C.W., "An Analysis of the Mass Flow Rate of Water Sprayed to reduce IR Signature of an Exhaust Gas," *53th KSPE Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 49-52, November 2019.
14. Choi, J.W., Jang, H.S., Kim H.M. and Choi, S.M., "Infrared Signal Characteristics of Small Turbojet Engine Plume by Observation Angle," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 24, No. 4, pp. 28-35, 2021.