

선체냉각을 위한 해수분사노즐의 산포특성에 관한 실험 연구

윤석태¹⁾ · 정호석¹⁾ · 조용진^{*,2)}

¹⁾ 동의대학교 함정적외선신호연구소

²⁾ 동의대학교 조선해양공학과

An Experimental Study on the Dispersion Characteristics of Seawater Injection Nozzle for Hull Cooling

Seoktae Yoon¹⁾ · Hoseok Jung¹⁾ · Yongjin Cho^{*,2)}

¹⁾ Ship Infra-Red Signature Research Center, Dongeui University, Korea

²⁾ Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dongeui University, Korea

(Received 21 June 2017 / Revised 11 September 2017 / Accepted 10 November 2017)

ABSTRACT

Infrared stealth is an important technology for naval ships. This technology helps improve the anti-detection performance and survivability of naval ships. In general, the infrared signature of naval ships are categorized into internal and external heat source. External signature are generated by ship surface heating by solar flux as well as the complicated heat transfer process with the surrounding weather condition. Modern naval ships are equipped with seawater injection nozzles on the outside for nuclear, biological and, chemical, and these nozzles are used to control external signature. Wide nozzle placement intervals and insufficient injection pressure, however, have reduced seawater dispersion area. To address this problem, nozzle installation standards must be established. In this study, an actual-scale experimental system was implemented to provide the evidence for nozzle installation standards in order to reduce the infrared signature of naval ships. In addition, the environmental conditions of the experiment were set up through computational fluid dynamics considering the ocean climate data and naval ship management conditions of South Korea. The dispersion distance was measured using a high-resolution thermography system. The flow rate, pipe pressure, and dispersion distance were analyzed, and the evidence for the installation of seawater injection nozzles and operation performance standards was suggested.

Key Words : Active Hull Cooling System(선체냉각장치), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Infra-Red Stealth (적외선 스텔스), Ocean Climate Data(해양기상자료), Seawater Injection Nozzle(해수분사노즐)

* Corresponding author, E-mail: cyjdeu@deu.com

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 서론

함정의 적외선 스텔스는 함정에서 방사하는 적외선 신호를 억제함으로써 피탐성 및 생존성을 향상시키는 중요한 기술이다. 일반적으로 함정의 적외선 신호는 내부적 신호와 외부적 신호로 분류하며, 이 중 외부적 신호는 태양 에너지에 의한 선체 가열 그리고 주변 환경과의 복잡한 열전달 과정을 통해 발생한다^[1].

현대의 함정에는 화생방전을 대비하여 함 외부에 해수분사노즐을 설치하고 있으며, 이를 이용하여 외부적 신호를 통제하고 있다. 하지만 일부 노즐의 배치간격이 넓고 분사압력이 불충분하여 해수의 산포 면적이 감소하는 문제점이 발생하고 있다.

해외의 국방 선진국에서는 선체 냉각시 발생하는 문제를 해결하기 위해 새로운 해수분사노즐의 개발 및 설치 기준에 대한 연구^[2]를 지속적으로 수행하고 있다. 하지만, 국내에서는 함정의 적외선 신호 감소를 위한 선체 냉각 기술과 관련한 연구가 미미한 실정이다.

본 연구는 함정의 적외선 신호감소를 위한 해수분사노즐의 산포 특성을 파악하고, 이를 토대로 해수분사노즐의 설치 및 작동 성능 기준의 근거를 제시하기 위해 수행하였다. 이를 위해 실제 규모와 동일한 실험장치를 구현하였으며, 노즐을 통과하는 유량변화에 따른 물의 산포거리를 측정하여 해수분사노즐의 설치 및 작동 성능 기준의 근거를 제시하였다.

2. 실험 환경 조건

2.1 함 운용 및 해양환경 조건

한반도 영해를 운항하는 함정은 부여된 임무에 따라 함형, 속도, 운용조건 등이 다르다. 따라서 본 연구에서 설정한 함속은 일반적인 함의 순항, 최대 속도인 18 knots, 25 knots로 설정하였다. 그리고 풍속은 약 10년 동안의 동해부이자료를 2차원 층화추출법을 통해 100개의 표본으로 축소한 선행 연구 자료를 사용하였으며, 추출된 표본의 풍속 평균값은 5.0 m/s, 표준편차는 3.0 m/s이었다^[3]. 설정된 함속과 풍속을 벡터로 표현하고 최대 속도를 계산하였으며, 그 결과를 Table 1에 정리하였다. 이는 노즐이 설치된 주변의 유속을 획득하기 위한 유동해석의 초기 조건 값으로 활용하였다.

Table 1. Statistical value of relative wind speed

Course (angle)		0		30	
Velocity (knots)		18	25	18	25
Wind speed (m/s)	8.0	17.2	20.8	16.6	20.1
	5.0	14.2	17.8	13.7	17.3
	2.0	11.2	14.8	10.9	14.5

2.2 유동해석

본 연구에서 사용한 전산유동해석 프로그램은 STAR-CCM+ 11.02로써, 이는 유한체적법을 기반으로 3차원 형상 정보의 수정기능과 자동격자 기능을 통해 복잡한 해석모델의 격자를 쉽고 빠르게 구현 할 수 있다.

난류 유동은 연속방정식과 운동량 방정식에 레이놀즈평균 개념을 적용한 RANS방정식을 적용하였으며 그 식은 각각 (1), (2)와 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right] \tag{2}$$

여기서, u 는 직교좌표계에서 각 방향으로의 속도이고 \bar{f}_i 는 평균 체적력, \bar{p} 는 등방향의 압력, δ_{ij} 는 변형, μ 는 마찰계수이다.

식 (2)의 마지막 항은 레이놀즈응력으로, 이를 계산하기 위해 수렴성이 좋고 해석 시간이 짧은 Realizable K-Epsilon 난류에너지 방정식을 사용하였다.

Table 1의 결과에 대한 유동해석을 모두 수행하기 위해서는 많은 시간이 소요된다. 따라서 작성 결과에 대한 평균값과 표준편차를 이용하여 유동해석의 풍속 조건은 12.8 m/s, 15.7 m/s, 18.6 m/s로 설정하였다.

적외선 신호 감소를 위한 해수분사 노즐은 일반적으로 선체 수직면에 충분한 해수를 산포하기 위해 선체 측면에 위치한다. CFD해석을 위한 대상모델과 일반적인 해수분사노즐의 설치 영역을 Fig. 1에 보였다.

운항중인 함정 주변에 형성되는 유동은 선체(hull)와 선루(superstructure) 형상에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서 사용한 함의 1, 3번 구획은 각각 선체 전방의 유선형과 선루의 굴곡현상으로 인해 유동의 불균일성이 크게 발생한다. 하지만, 2번 구획은 상대적으로 유

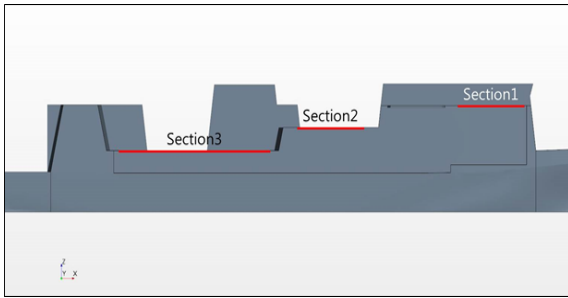


Fig. 1. Location of nozzle on the outside

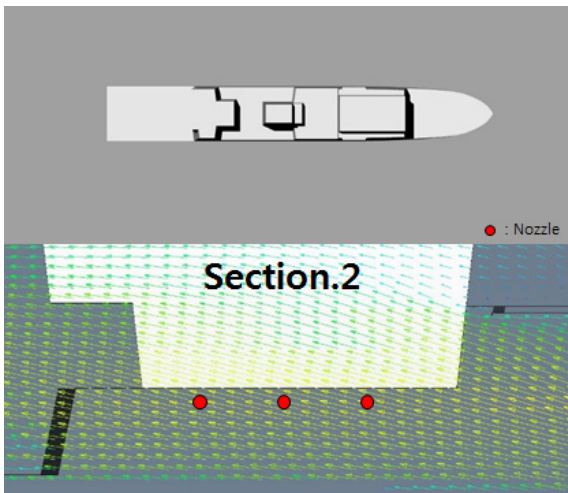


Fig. 2. Wind flow result at angle of attack(0°)

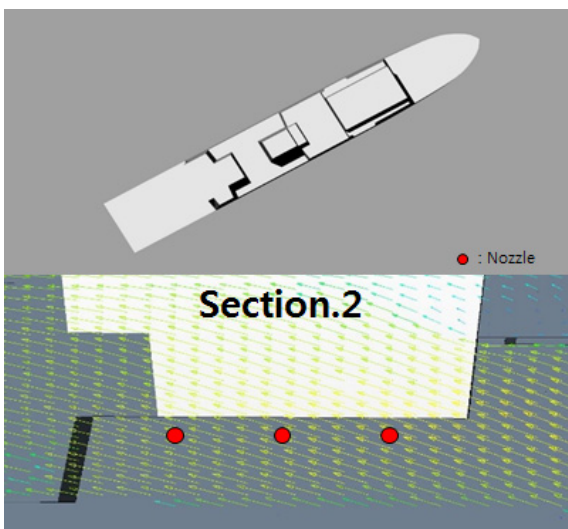


Fig. 3. Wind flow result at angle of attack(30°)

등을 뒤트는 구조물이 없어 균일한 유동현상이 확인되었다. 본 연구에서 고려한 함의 침로 방향과 2번 구획에서 확인된 유동의 흐름을 Fig. 2와 3에 보였다.

유동해석에서 고려한 침로 각도 그리고 세 가지의 풍속 조건을 통해 얻은 2번 구획의 평균값은 약 11 m/s 표준편차는 2 m/s로 계산되었다. 따라서 산포특성 실험에서는 최소풍속 9 m/s 그리고 최대풍속 13 m/s를 사용하였다.

3. 해수분사노즐의 특성 실험

일반적인 현대 함정에서는 수평 평면인 갑판(deck)에 Type-SB, 수직 평면인 선루(superstructure)에 Type-G, 그리고 곡면으로 이루어져 있는 선체(Hull)에 Type-II 노즐을 설치하고 있다.

본 실험에서는 선루의 넓은 수직 평면과 선체표면에 효과적으로 해수를 분사할 수 있는 Type-II 노즐을 사용하였으며, 이에 대한 상세제원과 형상을 Fig. 4에 보였다. Type-II 노즐의 분사 원리는 선내 배관을 흐르는 해수가 노즐을 통해 고압으로 분사되어 전면부에 충돌하고, 이후 좌우로 확산되어 선루 및 선체 표면에 해수를 분사하는 것이다. 제작사에서 제안한 노즐의 사용 권고압력은 최소 1.75 kgf/cm²에서 최고 4.2 kgf/cm²이다. 하지만 본 연구에서는 0 kgf/cm²부터 8.0 kgf/cm²까지 0.2 kgf/cm² 간격으로 펌프의 압력을 조절하였다.

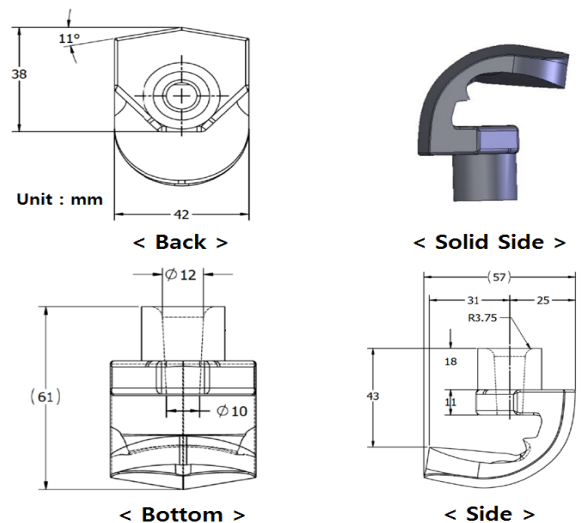


Fig. 4. Type- II nozzle

3.1 실험 장치 구성

본 연구에서 고려한 Type-II 노즐의 성능 평가를 위해 가로 25 m, 세로 8 m 옹벽 주변에 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치는 노즐로 유입되는 물을 연속적으로 지속공급하기 위한 3000리터의 수조, 노즐에 가해지는 압력을 선택적으로 변경하기 위해 인버터를 사용한 펌프, 배관에 흐르는 유량을 측정하기 위한 유량계, 노즐 주변 배관 내에 작용하는 압력을 측정하기 위한 압력계, 유동해석을 통해 얻은 풍속을 노즐에 작용하기 위한 초고속 송풍기, 송풍기를 통해 만들어진 풍속을 측정하기 위한 기상관측장비로 구성하였다.

해수분사노즐은 투명한 물을 분사하기 때문에 가시광선 카메라로 산포거리를 측정하는 것이 불가능하다. 따라서 노즐에서 분사된 물의 산포거리를 측정하기 위한 장비로는 대상체인 물과 배경체인 옹벽과의 온도 차이를 이용하여 산포거리를 용이하게 측정할 수 있는 고해상도 열화상 카메라를 사용하였다. 본 연구에서 구현한 실험장치의 구성을 Fig. 5에 보였다.

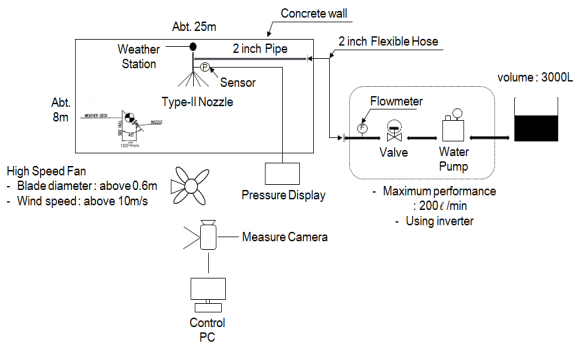


Fig. 5. Schematic configuration of experiment

4. 실험 결과 및 분석

4.1 유량 및 압력

배관은 노즐 출구를 제외한 단힌계이므로 유량손실이 발생하지 않고 배관 내의 압력은 수두 차의 영향을 받지 않는 범위에서 모두 동일하다. 배관에 흐르는 유량과 압력의 측정 결과를 Fig. 6에 보였다. 유량과 압력간의 관계는 비선형이라는 것을 확인할 수 있으며, 최고 압력은 펌프에서 설정한 압력(8.0 kgf/cm²)에서 약 0.2 kgf/cm² 적게 측정되었다. 이는 노즐이 설치된 위치가 펌프로부터 0.3 m 위에 있기 때문이다.

본 연구에서 구현한 시스템은 유량손실이 발생하지 않는다. 따라서 유량 방정식을 통해 노즐 출구에서 유속을 계산 할 수 있으며, 베르누이 방정식을 이용하여 분사된 물이 충돌하는 면에 작용하는 힘을 계산 할 수 있다. 유량 방정식과 베르누이 방정식은 각각 식 (1), (2)와 같다⁴⁾.

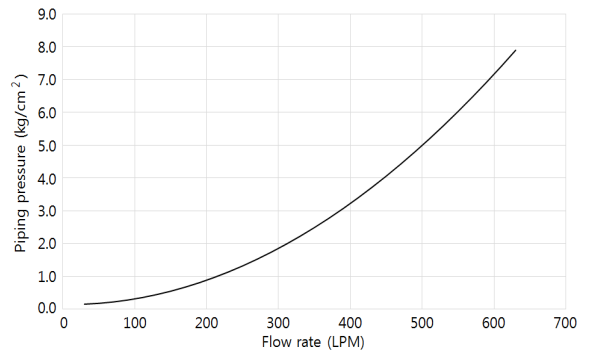


Fig. 6. Measurement result of pressure in pipe

$$Q = AV \tag{3}$$

$$P_{atm} + \frac{1}{2} \rho v_{air}^2 + \rho gh = P_{out} + \frac{1}{2} \rho v_{water}^2 + \rho gh \tag{4}$$

여기서, Q 는 유량(m³/s), A 는 노즐 출구의 면적(m²), V 는 노즐 출구에서의 유속(m/s), P 는 압력(N/m²), ρ 는 밀도(kg/m³), g 는 중력가속도(m/s²), h 는 높이(m)이다.

유량 방정식과 베르누이 방정식을 이용하여 분사된 물이 충돌 면에 작용하는 무게를 계산한 결과를 Fig. 7에 보였다.

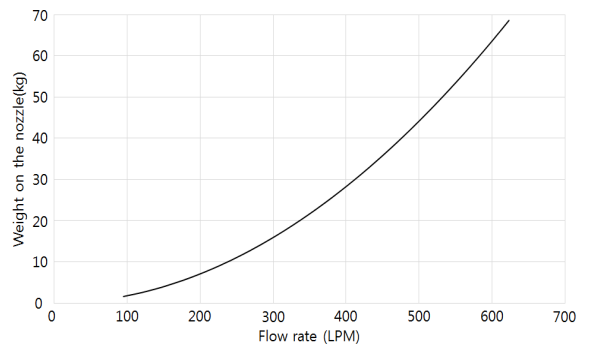


Fig. 7. Weight acting on nozzle

4.2 산포 거리

본 연구에서 산포 거리는 노즐 주변에 풍속이 없을 때와 풍속이 작용할 때로 구분하여 측정하였다. 작용 풍속은 전산유동해석을 통해 얻은 9 m/s, 13 m/s이고 상대각도는 0°와 30°로 하였다. 풍속이 없는 조건에서 고해상도 열화상 카메라를 이용하여 측정한 결과를 Fig. 8에 보였다. Fig. 8에서 펌프의 압력이 증가 할수록 산포 거리도 증가한다. 하지만, 용벽에 물이 충돌하여 생성된 박후현상을 제외하고 실제로 노즐이 분사 할 수 있는 산포거리와 벽면을 충분히 적실 수 있는 물줄기만을 고려하여 이미지에 표시하였다. 또한 실험시스템이 구축되어 있는 부분은 산포거리 측정을 방해하는 장애물이 존재하기 때문에 이미지의 왼쪽 방향으로만 산포거리를 측정하였다.

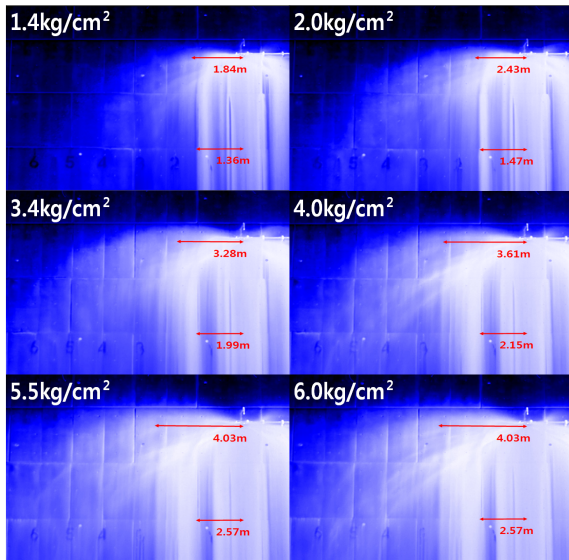


Fig. 8. Thermal image of nozzle experiment

풍속이 없는 조건에서 펌프의 압력과 산포 거리와의 측정결과를 편의성과 가독성을 높여 지수함수^[5]와 계측 값으로 표시하여 Fig. 9에 보였다. 노즐제작사에서 권고한 최소, 최고 압력에서는 벽면을 충분히 적실 수 있는 거리가 각각 약 1.5 m, 2.3 m로 측정되었으며, 산포 거리는 각각 2.5 m, 3.7 m로 측정되었다.

지수함수와 계측 결과는 약간의 오차가 있지만, 약 3 kgf/cm² 이상에서는 벽면을 충분히 적실 수 있는 물줄기의 거리가 한쪽 방향으로 2 m, 양쪽 방향으로 4 m 정도의 성능을 보이며, 거리의 증가폭이 높지 않다.

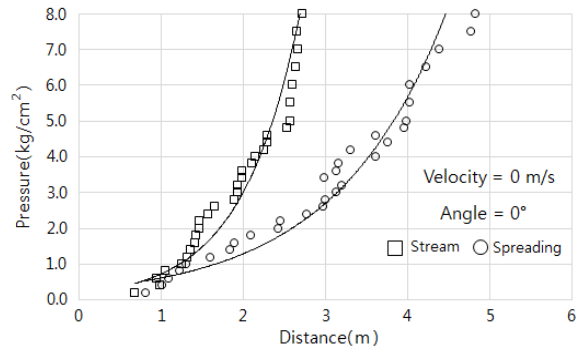


Fig. 9. Dispersion distance without wind

노즐 주변의 풍속이 9 m/s, 13 m/s 그리고 각도는 0°로 작용했을 때의 산포거리를 각각 Fig. 10과 Fig. 11에 보였다. 풍속이 없는 조건과 비교하여 풍속이 있는 조건은 물이 분사되는 반대 방향으로 풍압이 작용하기 때문에 물줄기의 거리와 산포거리 모두 풍속이 없는 조건 보다 적은 값이 측정되었다.

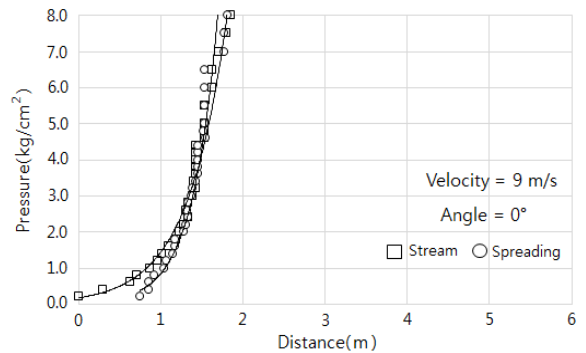


Fig. 10. Dispersion distance with wind(9 m/s)

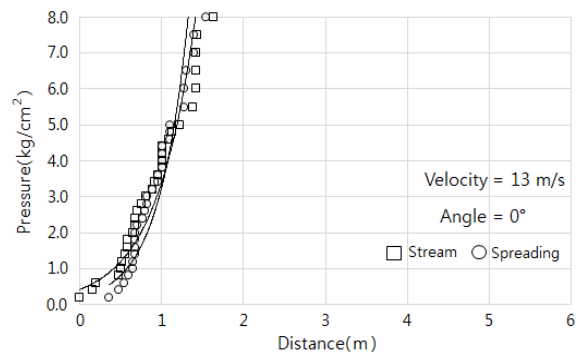


Fig. 11. Dispersion distance with wind(13 m/s)

노즐 주변에 작용하는 풍속의 값은 동일하지만 각도를 30°로 변경하여 계측한 결과를 Fig. 12와 Fig. 13에 보였다. 바람이 작용하는 각도와 상관없이 풍속이 있는 조건에서는 물줄기와 산포거리가 유사한 거리로 분사되었으며, 수압 3 kgf/cm² 이상에서는 한쪽 방향으로 분사하는 거리가 약 1 m 이상으로 계측되었다⁶⁾.

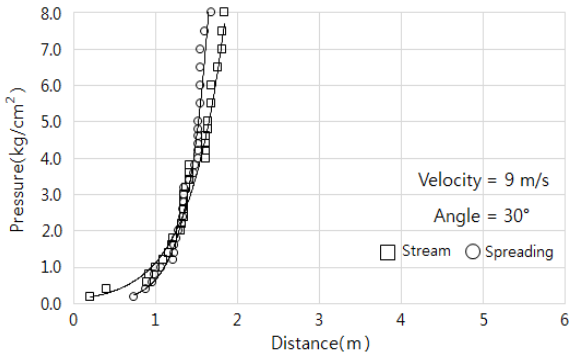


Fig. 12. Dispersion distance with wind(9 m/s)

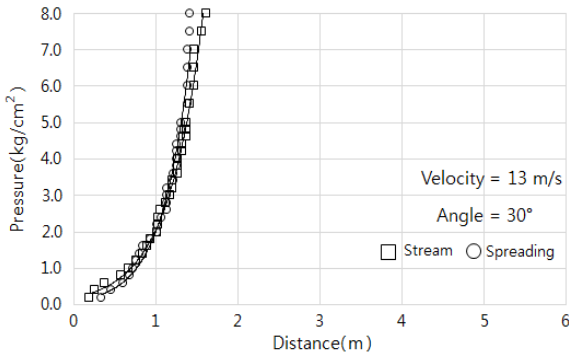


Fig. 13. Dispersion distance with wind(13 m/s)

5. 결론 및 향후계획

본 연구는 함정 적외선 신호감소를 위한 해수분사 노즐을 대상으로 실제 규모와 동일한 실험 장치를 구현하여 압력 변화에 따른 산포특성을 계측하였다. 본 연구의 내용과 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 한반도 영해를 운항하는 일반적인 함의 운용조건을 설정하고 동해부이의 기상계측 자료를 바탕으로 노즐이 설치된 부분의 유속을 획득하기 위한

유동해석의 초기조건 값을 작성하였다.

- (2) 해양기상의 초기조건과 현대의 함정을 대상으로 전산유동해석 프로그램을 사용하여 노즐이 설치될 부분의 유속을 획득하였으며, 그 값은 평균이 약 11 m/s, 표준편차는 약 2 m/s로 계산되었다.
- (3) 현대 함정에 설치되는 Type-SB, Type-G, Type-II 노즐 중 Type-II을 대상으로 0 kgf/cm²부터 8.0 kgf/cm²까지 0.2 kgf/cm² 간격으로 펌프의 압력을 조절하였으며, 고해상도 열화상 카메라를 사용하여 압력변화에 따른 산포거리를 계측하였다.
- (4) 풍속이 없는 조건에서는 압력변화에 따라 벽면을 충분히 적실 수 있는 물줄기의 거리와 노즐에서 물이 직접 분사되는 거리와의 확인한 차이를 보였다.
- (5) 풍속이 있는 조건에서는 물이 분사되는 반대 방향으로 풍압이 작용하기 때문에 물줄기와 분사되는 물의 거리차이가 거의 발생하지 않았으며, 풍속이 증가할 경우 산포거리도 감소하였다.
- (6) 해수분사노즐의 작동압력이 3 kgf/cm² 이상에서 풍압이 작용하는 한쪽 방향으로 약 1 m 이상의 산포거리가 계측되었으며, 풍압이 직접적으로 작용하지 않는 다른 방향은 물이 흩날리는 효과를 볼 수 있다. 따라서 3 kgf/cm² 이상의 압력에서는 노즐을 중심으로 좌우 4 m 정도의 분사 성능을 나타낼 것이라고 판단된다.

본 연구에서 사용한 Type-II 노즐은 해외제조사에서 개발한 제품으로 선류의 수직격벽과 곡면으로 이루어져 있는 선체에 탁월한 성능을 보인다. 하지만, 국내에서는 제품수급, 조달기간 등의 문제가 발생하기 때문에 향후 연구로는 선체냉각을 위한 새로운 노즐 개발연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 선체해수냉각장치 설계기준 정립방안 연구 지원에 의해 연구되었음을 밝힙니다.

References

- [1] S. T. Yoon, "A Study on the Diffuser Design of

- Exhaust Pipes for the Infra-Red Signature Reduction of Naval Ship,” M.S Thesis, Dong-Eui University, pp. 1-10, 2013.
- [2] J. Cross, “Active Hull Cooling Installation Proposal CFAV Quest,” Davis Engineering Research Report, pp. 1-21, 2011.
- [3] S. I. Han, “A Study on the Sampling Methods of Ocean Meteorological for Ship IR Signature,” M.S Thesis, Dong-Eui University, pp. 36-56, 2013.
- [4] Bruce R Munson, Donalds F. Young, Theodore H Okiishi, Wade W Huebsch, “Fundamentals of Fluid Mechanics,” pp. 47-116, 2013.
- [5] J. Bergh, J. Lofstrom, “Interpolation Space : An Introduction,” pp. 22-128, 2012.
- [6] H. S. Jung, “A Study on the Establishment of Design Criteria for Hull Seawater Cooling System,” Ship Infra-red Signature Research Center Research Report, pp. 23-42 , 2016.