

공기윤활평판실험에서 디지털 영상분석을 통한 윤활공기막 검출기법

박성현* · 이인원†

A Study on the Lubricating Air-layer Detection Techniques with Digital Image Analysis in Flat Plate Air Lubrication Test

SeongHyeon Park*, Inwon Lee†

Abstract. The reduction of CO₂ emissions has been a key target in the Marine Industry since the IMO's Marine Environment Protection Committee published its findings in 2009. The representative emission index is termed as the EEDI (Energy Efficiency Design Index) for the new ships. Among various flow control techniques ever proposed, the air lubrication method is the one of most promising one in terms of practical applicability. The present study examines the basic characteristics of the flat plate test with intention of applying the air lubrication technology to the reduction of the resistance of a ship. Image analysis technique is proposed as a tool to quantify the effectiveness of the air lubrication method.

Keywords : Air Lubrication(공기윤활), Drag Reduction(저항저감), Skin Friction(마찰저항), Image Analysis(영상분석), Image Filter(영상필터)

1. 서론

IMO(International Maritime Organization)에서는 지구 온난화의 영향으로 인한 온실가스 배출 규제 및 에너지효율 설계지수 EEDI(Energy Efficiency Design Index)를 2013년도부터 신조선을 대상으로 발효하였다. 이로써 선박 저항 및 추진효율 향상은 더 이상 선택의 문제가 아닌 조건 및 해운 업계의 생존 문제로 대두되고 있다.

선박의 운항 저항은 크게 선체가 일으키는 파도에 의한 조파저항과 물속에 잠긴 선체와 물과의 마찰에 의한 마찰저항으로 대별된다. CFD 및 선형기술의 발전에 따라 조파저항은 총저항의 20% 이하 수준으로 크게 떨어지고 있다. 마찰 저항이 총 저항에서 차지하는 비중은 저속 비대선의 경우 80~90%로 알려져 있다. 선박의 마찰 저항을 10% 저감할 경우, 전 세계적으로 약 20억불의 운송비 저감 효과가 있다.

공기막윤활 (Air-layer lubrication) 및 미소기포 마찰저

항 저감 기법은 마찰저항저감을 위하여 제안된 유동제어 기법 중 실용화에 가장 근접한 기법이다. 미소기포법은 표면 근처에 미세한 공기 방울을 분사하여 난류유동의 운동량 교환을 방해하여 저항을 저감하는 방법으로 일본 NMRI (National Marine Research Institute) 그룹에 의하여 실선 적용이 시도되어 3~4%의 운항효율 향상이 보고되고 있다^(1,2). 하지만 기포 분사공을 가공해야 하고 기포가 추진기의 cavitation 을 야기하여 추진효율이 저하되는 점은 실용화의 주된 걸림돌로 꼽히고 있다.

선체 표면으로 분사된 공기의 유량이 약 2배 이상일 때 기포가 병합되어 공기막이 형성된다. Air-layer lubrication 방법의 경우 공기를 분사하는 펌프의 소요동력보다 저항저감으로 얻는 이득이 커져야 경제성이 있다. Fig. 1은 평판에서의 공기분사 유량에 따른 저항저감율을 나타낸 그래프이며, 미소기포법(BRD) 보다 공기막윤활기법(ALDR)이 약 4배 이상의 저항저감효율을 보이며, 이는 공기막윤활기법이 Total Energy Saving 측면에서 효과적이 다고

* 부산대학교 조선해양공학과 대학원

† 교신저자 : Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University
E-mail : inwon@pusan.ac.kr

볼 수 있다^(3,4).

공기막윤활 저항저감기법은 평면에 공기를 분사하여 공기막을 형성하는 ALDR(Air Layer Drag Reduction) 과 오목한 부분에 공기를 분사, 공동부위를 형성하는 PCDR (Partial Cavity Drag Reduction) 방법이 있다. Fig. 2는 ALDR과 PCDR의 개념을 나타낸 그림이다. ALDR의 경우는 기본적으로 미소기로 분사법과 동일하다. 공기유량을 증가시키면 분사된 기포가 융합되어 막을 형성고 저항저감효과가 급격히 증가한다. PCDR의 경우 벽면에 공기공동을 가공하여 보다 적은 분사유량으로 공기막을 유지할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 가공된 공기공동으로 인한 형상저항이 증가하는 단점이 있다. 신규 제작된 선박뿐만 아니라 기 제작된 선박에 있어서의 적용 측면에도 ALDR기법이 용이하다 할 수 있다.

본 연구에 앞서 선행된 자항바지모형선 실험을 통하여 Design Speed(11.7kts)에서 25.68의 저항저감율을 확인하였다. 이는 실선 적용 시 윤활을 위한 Pumping Power를 고려한 Total Energy Saving 측면에서 11.9%에 해당하는 수치이다. 촬영된 영상분석을 통하여 윤활 형태를 분석을 진행하였으나, 다양한 선종에 적용에 있어 정량적 분석의 어려움이 있었다.

본 연구에서는 항주사세, 분사유량 및 노즐의 형상 등에 따른 윤활특성을 알아보기 위하여 평판에서의 공기윤활실험을 실시하였고, 이에 따른 윤활형상 추출하기 위한 효과적인 영상분석기법을 제안한다.

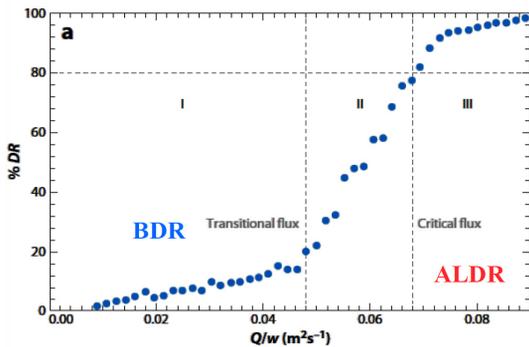


Fig. 1. Drag reduction efficiency as a function of air flux⁽³⁾

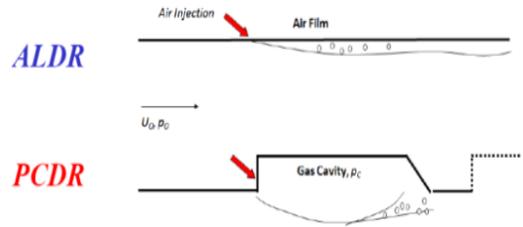


Fig. 2. Concept of ALDR and PCDR⁽³⁾

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

공기윤활평판실험은 길이(L) × 폭(B)은 2.5(m) × 1(m)로 제작되었다. 평판의 기울기 조절을 통하여 선박의 선수경사 혹은 선미경사 상태를 재현할 수 있도록 고정부는 힌지형태이며, 노즐의 교체가 용이하도록 제작되었다. 공기의 분사유량은 Mass Flow Controller(MFC)에 의해 제어된다. Fig. 3은 공기윤활평판실험에 대한 계략도이다.



Fig. 3. Schematic of the experimental apparatus

2.2 실험방법

공기가 안정화될 수 있는 실험시간과 유속에 의한 흔들림 없는 영상을 확보하기 위하여 오픈형 회류수조에서 실험을 실시하였다.

평판은 수심 0.47m에서 실험을 실시하였다. 평판의 종경사각은 평판후미의 고정부의 높이를 조정하여 변경하였다. 유동방향을 기준으로 0°, 2°, 4°, -2°에서 각각 진행되었다. 수조의 유속 및 분사공기의 유속은 Table 1에 정리하였다.

공기의 분사 후 10s 이상의 공기막 안정을 위한 대기시간을 가졌고, 20s 이상의 영상을 기록하였으나, 영상분석에 사용된 시간은 10s이다. 윤활영상은 액션캠(GoPro Hero3+)을 이용하여 촬영하였다. 1704×1524pixel 해상도

에서 29.97fps 속도로 촬영하였다.

Table 1. Test condition

중경사각	deg	0, 2, 4, -2
유속	m/s	0.5, 1.0, 1.5
분사속도	유속배율	10, 15, 20, 28, 32, 35, 40, 60, 80, 100

3. 영상분석

실험에 통해 계측된 영상은 Fig. 4의 순서로 영상분석이 진행되었다.

3.1 왜곡영상보정

대부분의 액션캠은 넓은 범위를 촬영하기 위하여 어안 렌즈를 사용하고 있다. 실제 공간정보가 이미지에 기록이 되면 바깥쪽이 휘어져 보이는 현상이 있다. 이는 공기유희 면적계측에 있어서도 정확한 유희형태 분석에 있어 방해요인이 된다. 몇 가지 수식을 통하여 이러한 특성은 보정이 가능하나, 본 연구에서는 상용 툴 Adobe After Effect 를 이용하여 어안효과보정(De-fisheye) 진행과 0.1s 시간 간격으로 실시간 정지이미지를 추출하였다. Fig. 5는 -2° Bare상태의 평판에 어안효과보정을 비교한 사진이다.

3.2 원근보정 및 계산영역 지정

영상 촬영시 카메라는 유동방향에 수평으로 고정이 되어 있는 반면, 평판은 중경사각에 따라 경사지게 된다. 때문에 양 혹은 음의 중경사각 때에는 평판의 한쪽 끝이 좁아져 보이고 다른 쪽 끝이 넓어져 보인다. 0° 상태와 같은 조건으로 분석을 진행하기 위하여 원근보정을 실시하였고, 계산에 필요하지 않은 평판의 외곽부와 공기분사가 일어나지 않는 평판의 상부부분을 잘라 내었고, 동일한 중횡비와 Pixel size(1950 × 1000 pixel)가 되도록 조정하였다. Fig. 6은 상용 툴인 Adobe Photoshop에서 보정을 시시한 사진이다. Fig. 7은 평판에서의 해석영역과 유효유희 영역을 나타낸 이미지이다.

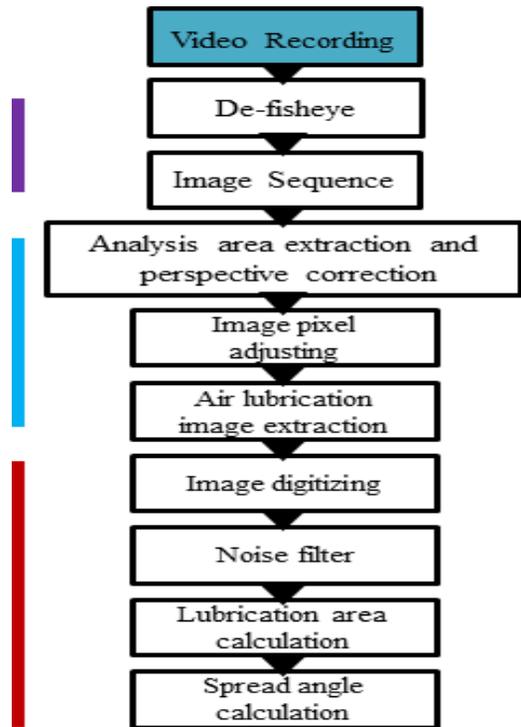


Fig. 4. Flowchart of digital image analysis

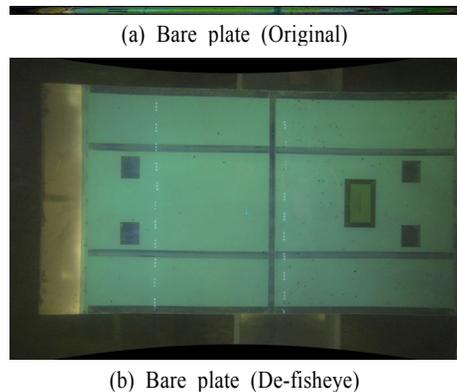


Fig. 5. Result of De-fisheye correction

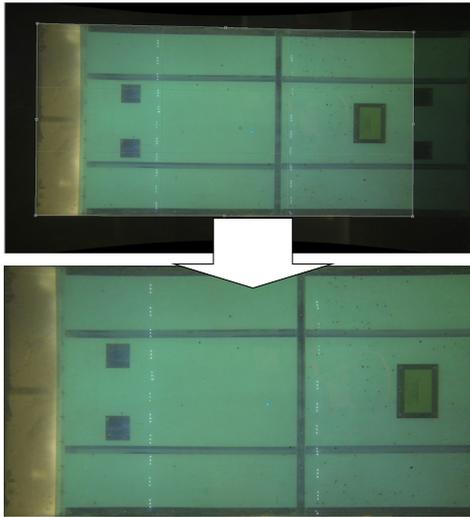


Fig. 6. Analysis area extraction and perspective correction

3.3 윤활영상 추출

Digital 영상에서 공기윤활영역을 검출하기 위해서는 Edge Detection 이나 Thresholding 처리를 통한 검출방법 이 있다. 하지만 평판이 단일색상으로 제작된 것이 아니기 때문에 Edge Detection을 바로 적용하기에 문제가 있다. Thresholding 처리를 통한 검출방법에 있었어도, 윤활 영상의 색상과 평판의 특정 부분의 색상이 유사하여 바로 적용하기에 무리가 있다.

평판의 영상이 고정되어 있는 점을 이용하여 실시간 윤활영상에서 Bare상태의 영상의 차이를 이용하여 윤활영상만을 획득하는 기법을 적용하였다. 이는 식 (1)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$|I_{Real Time} - I_{Bare}| = I_{Air} \quad (1)$$

영상의 차이는 각 채널의 색상 정보를 보고 기본 색상과 혼합 색상 중 명도 값이 더 큰 색상에서 다른 색상을 뺀다. 흰색과 혼합하면 기본 색상 값이 반전되고 검정색과 혼합하면 색상 변화가 없게 된다.

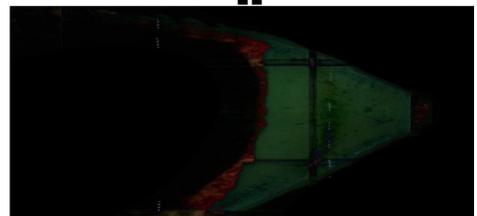
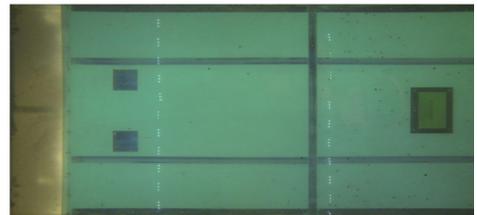
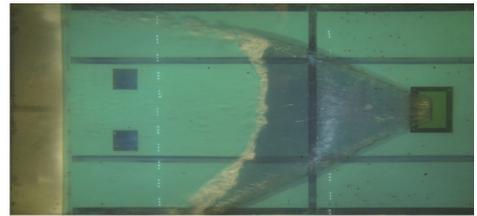
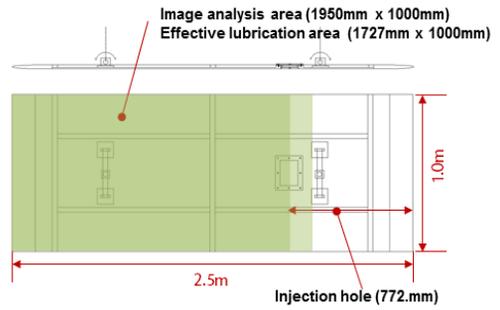


Fig. 7. Air lubrication image extraction (C-(-2°)-1.5m/s-028)

3.4 영상 수치화 및 필터링

추출된 윤활영상은 그레이스케일영상 단위에서 Thresholding 처리를 통한 2진화된 매트릭스구조의 Data로 변환한다. 3.2의 전처리를 통하여 단일 Thresholding으로도 윤활영역을 분리하기가 용이하다. 실시간 이미지 내부의 각화소의 위치 값 $I_{(i,j)}$ 가 특정 값 T이상인 화소를 윤활영역으로 분리한다. 이는 식 (2)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\begin{cases} \text{if } I_{(i,j)} < T \text{ then } I_{(i,j)} = 1 \\ \text{elseif } I_{(i,j)} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Fig. 8은 2진화된 매트릭스구조를 다시 이미지화한 그림이다.

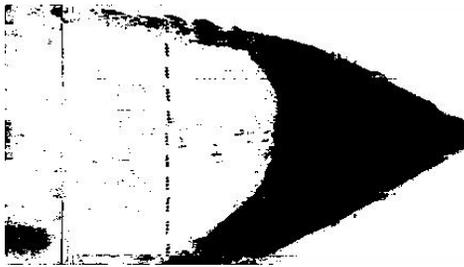


Fig. 8. Air lubrication image (2bit)

평판의 떨림 및 조명이 균일하지 못하여 영상에 노이즈가 많을 것을 확인 할 수 있다. 또한 윤활공기가 차지하는 영역이지만 Bare Plate의 색상 레벨이 차이가 나지 않거나, 색상변화가 더 이상 발생하지 않는 부분 또한 영상 노이즈로 작용한다. 이런 노이즈는 침식연산(Erosion)과 팽창연산(Dilation)의 반복을 통하여 완화 시킬 수 있다. 침식은 정해진 방경 내에서 가장 작은값을 방경 중심부 값으로 바꾸는 최소값 필터의 역할을 한다. 영상으로 나타내면 영상의 영역이 줄어들게 된다. 팽창은 침식연산과는 반대로 최대값 필터 역할을 하며, 영상으로 나타내면 영상의 영역이 일정하게 넓혀가게 된다. Fig. 9는 침식과 팽창연산을 이용한 이즈 제거 및 영역 내부의 홀을 제거하는 응용 법을 나타낸 것이다. Fig. 10은 침식과 팽창연산을 적용하여 노이즈를 및 홀을 제거한 윤활영상이다.

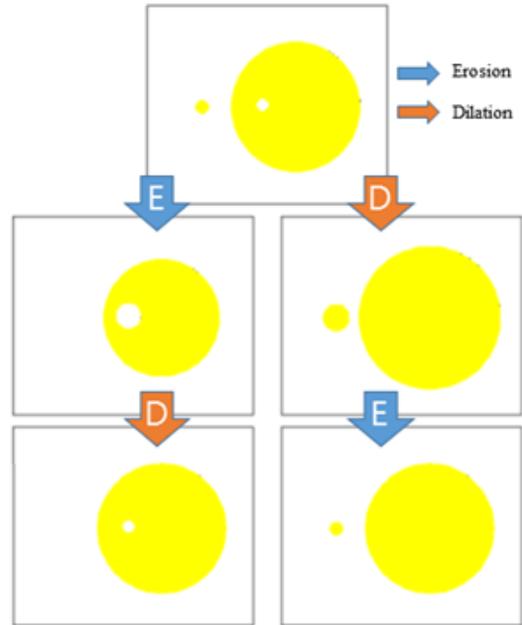


Fig. 9. Application of erosion and dilation

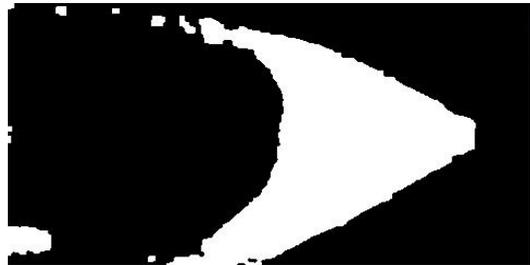


Fig. 10. Air lubrication image with noise removed

3.5 Data 분석

추출된 윤활영상 Data에 평판과의 Scale Factor를 고려하면 윤활면적을 계산할 수 있다. 또한 Step edge분석을 통해 윤활면적의 가장자리 위치를 추출하고 추세선을 이용한 윤활확산각을 검출 하였다. Fig. 11은 선미침하량이 선수침하량보다 낮아지는 선미경사각 (-2°) 상태에서 분사유속이 유동의 28배가 일 때의 실시간 윤활영상을 분석한 이미지 이다. Fig. 12는 같은 조건에서 0~10s 구간의 100장의 영상을 분석하여 평균한 이미지 이다. Contour level이 1에 가까울수록 지속적인 공기윤활막을 유지함을 나타낸다.

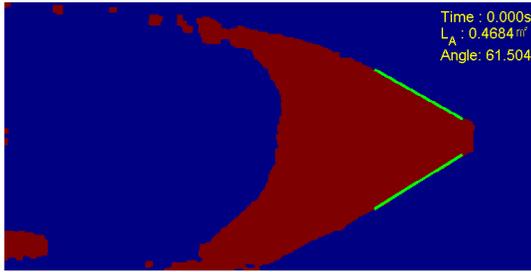


Fig.11. Real time air lubrication image
(C(-2°)-1.5m/s-028, at t=0.00s)

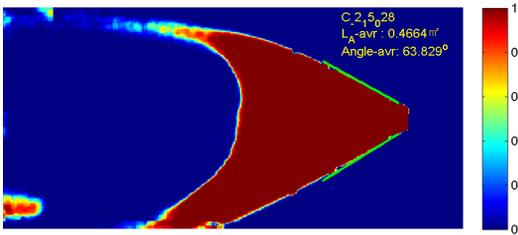


Fig.12. Average air lubrication image
(C(-2°)-1.5m/s-028)

4. 결론 및 고찰

선박의 중경사각에 따른 공기유회의 특성을 분석하기 위해 평반에서의 공기유회실험을 수행 하였다. 영상계측을 통하여 실시간 유회면적 및 유회확산각등을 계산해 보았다. 침식 및 팽창연산을 이용하여 보다 정도 높은 결과값을 얻을 수 있다. 유회면적계산에 있어서는 미소기포의 경우 노이즈로 판단되어 면적계산에서 배제된다. 따라서 다소 소극적인 면적계산이 이루어진다고 볼 수 있다.

영상분석을 위한 실험 시 균일한 색상의 유지를 위해 직접조명보다는 간접조명을 이용하여 조도의 균일성을 유지하는 것이 초기 노이즈를 줄이는데 중요하다.

모형선실험에 적용에 있어서는 모형선의 움직임을 고려한 특이점분석을 통한 위치 보정 또는 관측부에 사전 격자구조를 마킹을 하여 Dewarping이 가능 하도록 하는 것이 용이하겠다. 본 화상처리기법으로는 2차원적인 유회면적 분석만이 가능했는데 향후 분사기체에 균일한 밀도의 연막을 섞어 분사 할 수 있다면 영상의 Color level 분석을 통한 각 위치의 유회두께 계측이 가능 하리라 사료된다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

REFERENCE

- 1) Kodama, Y., Kakugawa, A., Takahashi, T., Ishikawa, S., Kawakia, C., Kanai, T., Toa, Y., Kato, H. Ikemoto, A., Yamashita, K., and Nagamatsu, T., 2002, "A Full-scale Experiment on Micro-bobbles for Skin Friction Reduction Using SEIUN-MARU Part 1 The Preparatory Study", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol.192, pp.1-14.
- 2) Kodama, Y., Kakugawa, A., Takahashi, T., Ishikawa, S., Kawakia, C., Kanai, T., Toa, Y., Kato, H. Ikemoto, A., Yamashita, K., and Nagamatsu, T., 2002, "A Full-scale Experiment on Micro-bobbles for Skin Friction Reduction Using SEIUN-MARU Part 2 The Full-scale Experiment", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, vol.192, pp.15-28.
- 3) Ceccio, S. L., Perlin, M. & Elbing, B. R. 2010, "A cost-benefit analysis for air layer drag reduction", International Conference on Ship Drag Reduction SMOOTH-SHIPS, Istanbul, Turkey.
- 4) Ceccio, S. L., 2010, Friction Drag Reduction of External Flows with Bubble and Gas Injection, Annual Review of Fluid Mechanics, vol.42, pp. 183-203.