

관다효과를 응용한 플랩이 달린 고양력 날개장치에 대한 실험적 연구

안해성^{†*}, 김효철^{*}

서울대학교 조선해양공학과, 해양시스템공학연구소^{*}

An Experimental Study of Coanda Effect
on the Flapped Control Surfaces

Haeseong Ahn^{*} and Hyochoul Kim^{*}

Dept. of Naval Arch. & Ocean Eng., RIMSE, Seoul National University^{*}

Abstract

To investigate the jet effect on circulation control, a segment of model was prepared and inserted horizontally across the test section of the cavitation tunnel. The hydrodynamic forces acting on the model were measured under the 2 dimensional flow behavior. Circulation flow control requires higher flow rate of water jet than boundary layer control does. Jet injection is effective in increasing lift coefficient and the increments reach to 160% in a certain combination of parameters such as an angle of attack, jet flow rate and flap angle. The blown water jet not only reduces form drag but also thrust effect, which is sometimes greater than the form drag in specific conditions.

※Keywords: Coanda effect(관다효과), control surfaces(제어판), water jet injection(물제트분사), circulation control(순환제어), fluid flap(유체플랩)

1. 서론

수상선박에서 적절한 운동성능을 확보할 목적으로 고정식 핀이나 발지 킬 등을 사용하고 있으며 잠수함에서는 운항자세를 제어하기 위하여 수평 안정핀이 채택되고 있다. (Wilson/Kerczek, 1979) 모형 타에서 물 제트를 분사하며 예인시험을 수행

한 결과 현저한 타 성능의 증가를 확인하였으나 (안해성/김효철, 1999) 3차원 효과의 발생과 국부적인 유동 관측의 어려움으로 물 제트 분사에 의한 플랩과 주날개 사이의 유동장의 변화 등 다양한 정보를 얻기에는 불충분하다고 판단되어 2차원 유동 중에서의 특성을 알아보기 위하여 캐비테이션 터널에서 실험을 수행하기로 하였다. 먼저 선박의 운동제어에 사용하기 위한 고성능 양력 발생 장치로 활용할 수 있는 플랩이 부착된 2차원날개를 설계 및 제작하여 새로운 모형 및 실험시스템을 구성하였다. 플랩의 표면으로 물 제트를 분사

접수일: 2003년 6월 16일, 승인일: 2003년 9월 4일

† 주저자, E-mail: teusahn@snu.ac.kr

Tel: 02-888-7333

할 때 물 제트의 속도와 유입유동의 속도, 플랩의 크기, 분사되는 슬롯의 위치의 영향 등을 조사하기 위하여 플랩의 크기가 서로 다른 모형을 제작하고 실험을 수행하였다.

2. 모형 및 실험장비의 구성

2.1 대상모형의 선정

실험에 사용된 날개단면은 가공 및 작업의 편의성을 고려하여 NACA 0021 단면으로 선정하였으며 스패의 길이는 148mm로 서울대학교 공동수조에서 제작이 가능한 최대 크기로 제작하였다. 코드 길이는 계측기와 물 제트 분사장치삽입을 위한 최소길이인 250mm로 기하학적인 가로-세로비는 0.592이지만 실험용 모형이 공동수조의 내벽에 완전히 부착되어 있다고 가정하면 유효 가로-세로비는 약 1.2 정도가 되어 일반적인 수중익선에서 사용되는 수중익이나 운동제어용 핀의 치수비와 큰 차이가 없다. 모형은 플랩의 길이, 물 제트 분출위치의 영향을 알아보기 위하여 두 가지의 형태로 제작이 되어 모형 I 은 플랩의 길이가 전체 코드길이의 30.5%로 설계 제작되었고 힌지는 앞날에서 코드길이의 75%에 위치하고 있다. 모형 II는 플랩의 길이가 코드길이의 50%이고 위치는 앞날로부터 58.2%에 위치하고 있다. 날개의 단면들에 대한 대략적인 내용이 Table 1에 나타나 있으며 Fig.1과 Fig.2는 실험에 사용된 모형 I 과 모형 II의 모습을 보이고 있다. 모형은 공동수조에서 유동에 수평하게 장착되었다.

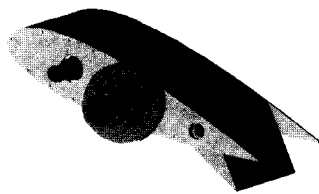


Fig. 1 Model I

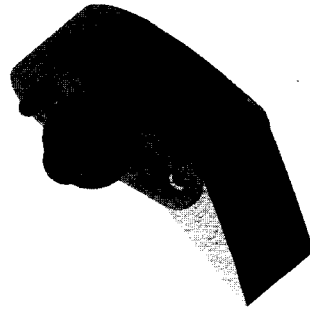


Fig. 2 Model II

2.2 모형 및 실험시스템의 구성

주날개에 작용하는 유체력을 계측하기 위하여 제한된 기능을 가지는 전용 분력계를 설계 제작하여 삽입하고 고정시킨 후 주날개와 플랩 양단을 NACA 0021 단면형상으로 잘려진 3mm 두랄루민 판으로 연결하였다. 플랩은 3mm 판에 힌지로 연결하여 원하는 각으로 조절이 가능하도록 하였다. 주날개에 삽입된 분력계에는 플랩에 작용하는 유체력이 시스템 양단에 부착된 3mm 판에 의하여 전달되도록 계획하였다. 분력계는 모형 I의 경우 단면의 최대 두께이며 주로 지지재가 삽입되는 앞날로부터 코드의 30%되는 위치에 분력계를 삽입하고 한쪽 끝단은 공동수조의 외벽을 통하여 계측 시스템과 연결되도록 하였다. 모형 II의 경우에는 주날개부분에서 분력계와 물 제트 공급장치의 중첩으로 인하여 분력계의 삽입위치를 앞날에서부터 12%의 위치로 변경하였다.

Table 1 Principal dimensions of fin model

NACA 0021	Main Foil (I , II)	Flap (I , II)
① Chord(mm)	182 178.2	76.3 (30.5%c) 125 (50%c)
② Span(mm)	148	148
③ position of sensor:(30%c, 12%c) from L.E.		
④ position of flap hinge:(25%c, 41.8%c) from T.E.		
⑤ maximum thickness:21%		
⑥ geometrical aspect ratio:0.592		

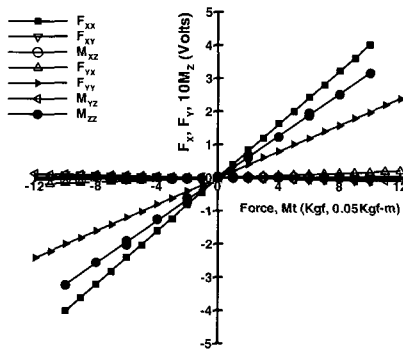


Fig. 3 Calibration results of load cell

2.3 분력계

모형 I 과 모형 II에 사용된 분력계는 각각 앞날에서부터 30%와 12% 위치에 삽입하여 감지부가 스펀의 중앙에 위치하도록 하였다. 감지부는 사주 박막형으로 예인시험에서 사용된 분력계(안해성/김효철, 1999)와 동일한 형식으로 날개에 작용하는 양력, 항력, 모멘트를 계측할 수 있는 삼분력계로 설계하였다. 삼분력계를 날개의 내부에 삽입한 후 수행한 교정시험 결과 Fig.3에 나타났듯이 직선성이 뛰어나고 분력간의 간섭이 적어 실험을 수행하기 적합하다고 판단되었다.

2.4 공동수조용 물 제트 공급장치

고압의 물 제트는 공동수조의 외부에서 공급되며 물 제트의 공급이 분력계에 영향을 주지 않도록 비접촉식 Labyrinth 연결방식을 사용하였다. 물 제트가 모형 I 에서는 전체 코드길이의 50%위치에서 공급되어 내부 압력실을 통하여 주날개와 플랩 사이의 간극에서 분사되도록 하였으며 모형 II의 경우에는 앞날에서부터 코드길이의 32%위치에서 물이 공급되도록 하였다. 또한 물 제트 분사는 날개의 윗면에서 플랩의 표면으로 분사가 이루어지도록 하였다. 물 제트 공급시스템은 Fig.4의 대략적인 계통도에서 나타내었다. 다만 고압펌프로 물을 흡입하여 축압 탱크에 저장하고 축압 탱크 내부의 압력이 3.5 bar로 일정하게 유지되도록 piezzo 형식의 압력 조절기를 부착하여 단위스팬에서 분사되는 유량은 6.6(kg/sec)과 13.2

(kg/sec)의 두 가지 경우로 수행하였다. 서울대학교의 공동시험수조의 형식이 비개방 형태이므로 제트 발생을 위한 물은 공동수조의 Degassing Tank에서 공급 받아 물 제트로 다시 분사하여 공동수조의 전체 유량이 일정하게 유지되도록 하였다.

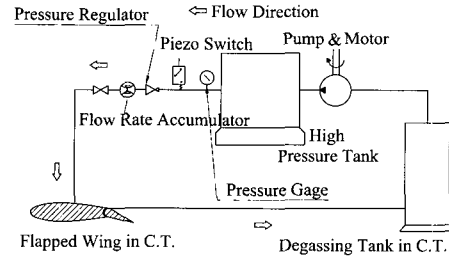


Fig. 4 Schematic drawing of water jet generator for cavitation tunnel

3. 날개특성 조사 및 결과

3.1 물 제트 분사효과 조사

물 제트를 플랩표면에 접선방향으로 분사할 때 물 제트의 속도 v_j 는 타시스템에 유입되는 유동의 속도 U_∞ 보다 어느 정도 높아야 한다. Williams/Butler(1963)의 연구에 의하면 제트의 속도 v_j 는 U_∞ 보다 최소 1.2배는 되어야 한다고 알려져 있다. 만약 분사의 강도가 더욱 높아지면 플랩을 따라가던 물 제트가 뒷날을 벗어나 일정한 세기를 가진 일종의 유체플랩효과를 나타내게 되는 순환제어영역으로 전환되게 되며 순환현상의 증가로 인한 현저한 양력의 증가를 수반하게 된다. 하지만 분사되는 제트의 양으로 순환을 제어하는 것은 경계층을 직접적으로 제어하는 것보다 제트운동량의 증가량에 대한 양력증가의 비는 많이 감소하게 된다. 물 제트의 유량 및 제트속도에 의한 영향을 알기 위해서 가장 중요한 변수는 제트운동량 계수이며 유한한 가로-세로비를 가진 날개에서는 다음과 같이 정의된다.

$$C_j = \frac{hV_j^2}{1/2 U_\infty^2 c} \tag{1}$$

여기서 h 는 슬롯에 부착되어 있는 노즐의 높이

(m), c 는 코드길이(m), V_j 는 물 제트의 속도(m/sec)가 된다. 물 제트의 속도를 구하기 위하여 여러 차례에 걸쳐 물 제트를 분사하여 평균유량을 측정하였으며 물 제트가 분사되는 노즐의 출구 단 면적을 알고 있으므로 이를 이용하여 물 제트의 속도를 구하였다. 물 제트를 분사하여 측정되는 양력은 다음과 같이 나눌 수 있다.

$$C_{LT} = C_{LB} + C_{LR} \quad (2)$$

여기서 C_{LT} 는 실험에서 측정되는 전체 양력계수이며 첫 번째 항인 C_{LB} 는 물 제트를 분사할 때 발생한 관다효과에 의하여 플랩주변 유동장의 순환현상이 증가되어 얻어진 양력이 포함된 날개의 수정된 양력이고 C_{LR} 은 물 제트를 분사할 때 물 제트의 운동량이 유발하는 힘이며 즉, 일종의 반력으로서 날개에 작용하는 양력방향의 분력계수가 된다. 여기서는 물 제트가 주변의 자유흐름보다 고속이므로 물 제트의 점성은 무시하기로 한다. 본 연구에서는 고양력 발생장치를 얻는 것이 목적이므로 C_{LT} 가 관심의 대상이나 물 제트 분사에 의한 관다효과 발생 및 양력증가에 관련된 물리적 현상을 규명하기 위해서는 C_{LR} 이 배제된 C_{LB} 을 고려해야 한다. C_{LR} 은 전 스패에 걸쳐서 분사되는 유량 \dot{m} 과 물 제트 속도 V_j 에 의하여 간단히 구할 수 있다. 위와 같은 방법으로 항력을 나누면 다음의 (3)식이 된다.

$$C_{DT} = C_{DB} + C_{DR} \quad (3)$$

같은 방법으로 C_{DR} 을 구하여 측정된 전체 항력 C_{DT} 에서 배제하면 물 제트 분사로 유동장의 변화가 포함된 항력 C_{DB} 을 구할 수 있다. 그런데 항력의 경우에는 물 제트운동량에 의한 항력의 기여분 C_{DR} 은 음의 값이 된다. 그러므로 C_{DB} 는 더욱 증가된 값을 가지게 된다.

3.3 모형 I의 양력특성 조사

30.5% c 의 플랩이 부착된 모형 I에서 받음각을 0, 10, 20, 25도로 각각 고정시킨 상태에서 플랩 각을 0, 20, 40도로 바꾸어 가면서 동시에 물 제

트를 분사하여 날개에 작용하는 양력을 조사하였다. 물 제트 분사량은 제트운동량 계수인 (1)식을 사용하여 무차원화 하였다. 플랩각을 40도로 고정된 상태에서 물 제트를 분사하고 분사전과 비교한 결과를 Fig.5에 나타내었다. 측정된 값에는 물 제트 운동량에 의한 양력방향의 기여분이 포함되게 된다. (2)식에 의하여 측정된 양력을 분리하고 물 제트 운동량의 양력방향성분을 배제한 C_{LB} 와 측정된 C_{LT} 를 함께 나타내었다. 물 제트운동량계수 C_j 가 증가할수록 물 제트의 운동량에 의한 양력방향성분인 C_{LR} 이 증가함을 알 수 있다.

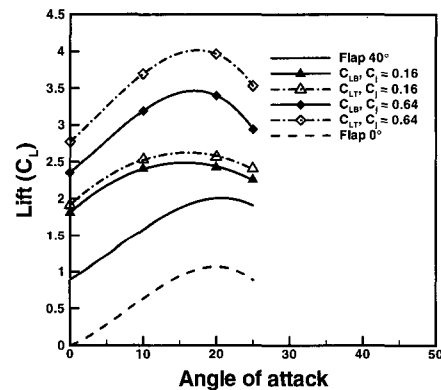


Fig. 5 Investigation of lift augmentation due to the jet injection at flap angle 40°

하지만 물 제트 분사에 의하여 양력의 증가가 현저하게 나타남을 확실하게 보여주고 있으며 이는 물 제트의 속도 및 유량이 증가되면서 관다효과에 의하여 플랩표면에 부착되어 흐르는 제트의 양이 증가되는 것을 의미하며 또한 플랩주변의 순환현상 증가에 기인한 양력증가로 판단할 수 있다. 설계초기에 예상했던 실속각의 증가는 나타나지 않은 것은 받음각의 증가와 함께 앞날에서 발생하는 앞날유동박리가 상당히 증가된 것이 주요한 원인으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 플랩을 40도로 고정하고 물 제트를 분사하는 경우에 164%의 증가가 발생하는 것으로 보아 항력이나 모멘트, 압력중심, 효율 등 다른 특성을 함께 비교하여야 하지만 본 연구의 주된 관심이 고양력 발생이므로 양력관점에서 보면 상당한 개선이 있음

으로 판단된다. 또한 3차원 관점에서 보면 실속이 더 큰 받음각에서 일어날 것으로 판단되지만 기존의 최대 작동영역에서 얻을 수 있었던 양력을 낮은 받음각과 적절한 물제트 분사에서 얻을 수 있을 것으로 예상된다. (표상우, 1999)

3.4 항력특성 조사

Fig.6 에서는 플랩을 일정한 각도인 40도로 고정시키고 물 제트를 분사했을 때 계측된 항력 C_{DT} 와 (3)식과 같이 물 제트 운동량에 의한 항력방향의 분력을 고려한 항력 C_{DB} 를 같이 나타내고 물 제트를 분사한 후와 분사하기 전의 항력특성을 비교 조사하여 보았다.

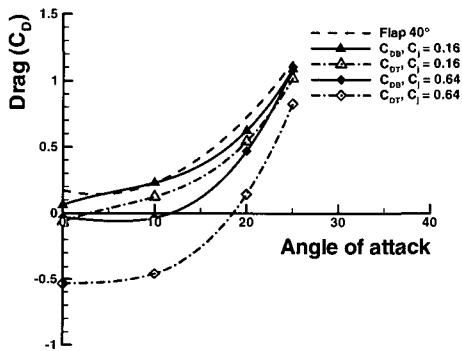


Fig. 6 Investigation of drag due to the jet injection at flap angle 40°

계측된 항력에서는 물 제트 분사로 인하여 음의 값까지 나오는 경우도 있으며 게다가 물 제트 운동량에 의한 항력방향의 분력을 배제한 Fig.6에서 실선을 보면 확실하게 항력의 감소가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 받음각이 증가하면서 항력이 급격히 증가하는 구간이 나타나는데 이 구간에서는 이미 플랩의 뒷면은 이미 경계층의 흐름이 박리되어 있어서 유동이 플랩을 따라 흐르지 못하게 되는 현상으로 생각되며 물 제트를 분사함에 의하여 플랩근처의 박리유동 및 박리점을 플랩의 뒷날 후방으로 계속 밀어내어 플랩근처의 경계층 후류 구역이 좁아지면서 이에 따라 후류지역에서의 전방 방향의 압력이 회복되게 되는데 이것이

형상항력 감소의 주된 원인이라고 예상할 수 있다.

3.5 모형 I 과 모형 II 의 양력특성 비교

플랩의 길이와 분사슬롯의 위치에 따른 물 제트 분사의 영향을 보기 위하여 모형 I 과 모형 II 에서 플랩을 40도로 고정하고 받음각의 변화에 대한 계측된 양력값을 Fig.7에 나타내었다. 고정된 받음각에서 플랩의 크기가 큰 모형 II 에서 계측된 양력이 더 높은 것으로 확인되었으며 평균적으로 최대 양력계수가 20% 증가되는 것으로 조사되었다. 하지만 양력곡선의 기울기와 실속이 발생하는 받음각은 플랩의 길이 변화와 분사의 위치를 뒷날에서 앞날로 15% 이동하여도 큰 변화가 없는 것으로 판단된다. 하지만 모형 I 과 모형 II 모두 주날개부에 유입되는 유동이 0도 일 때 플랩각의 적절한 변화와 물 제트 분사로 인하여 현저하게 증가된 양력을 얻을 수 있음으로 인하여 선박에 적용가능성이 매우 높은 결과라고 생각된다.

3.6 모형 I 과 모형 II 의 항력특성 비교

플랩의 길이와 분사위치에 대한 항력의 변화를 조사하기 위하여 플랩길이 30.5%c의 모형 I 과 50%c의 모형 II 를 비교한 결과를 Fig.8에 나타내었다. 플랩의 크기가 작은 모형 I 의 항력이 모형 II 의 항력보다도 더 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 플랩의 변각은 단면형상에 유효 캠버를 줄 뿐 아니라 유효받음각까지 변화시켜 양력을 증가시키는 역할을 하지만 항력의 관점에서 보면 유입 유동에 대한 장애물의 역할을 하게 되므로 플랩의 길이가 증가되면서 형상항력의 초기 증가량이 존재하여 물 제트를 분사하여도 형상항력이 감소되는 양이 줄어드는 것으로 이해할 수 있다. 모형 I 과 모형 II 모두 최소항력의 감소는 최대 300%까지 감소하는 것으로 나타났으며 이는 물 제트 분사량이 증가할수록 더욱 더 큰 감소가 나타날 것으로 기대된다.

3.7 추진효과의 조사

주날개와 플랩사이의 틈새에서 물 제트를 분사하여 플랩의 앞날에서 플랩의 뒷날부근까지의 경

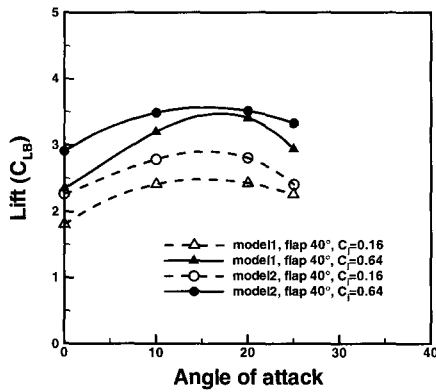


Fig. 7 Comparison of measured lift with model I and model II at flap angle 40°

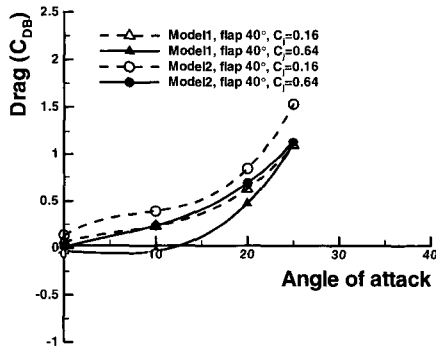


Fig. 8 Comparison of measured drag with model I and model II at flap angle 40°

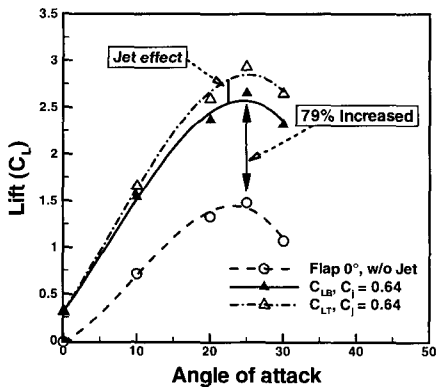


Fig. 9 Lift investigation of model II due to the propulsion effect

계층이 제어되고 강력한 제트유동에 의한 최대양력의 증가와 최소항력이 감소됨을 확인하였다.

이에 플랩각을 변화시키지 않은 상태 즉 일반 날개에서 특정한 위치에서 날개 뒷날 쪽으로 날개 표면에 물 제트를 분사하는 경우의 얻어지는 효과에 대하여 알아보기로 하고 모형 II에서 플랩각이 0도일 때 물 제트를 분사하고 얻어진 결과를 Fig.9에 나타내었다. 양력값이 현저히 증가하고 있으며 특히 양력곡선의 기울기가 증가하였음을 알 수 있다. 모형 II에서의 증가분은 최대 양력값이 발생하는 받음각에서 $C_f = 0.64$ 일 때 79%의 증가를 나타내고 있다. 이는 날개표면에 접선방향으로 분사된 물 제트가 표면에서 이탈되지 않고 관다효과에 의하여 날개표면에 부착되어 흐르게 됨으로 날개 윗면의 압력을 현저하게 감소시킴으로 인한 양력의 증가로 생각된다. 특히 받음각이 0도인 상태에서도 물 제트 분사로 인하여 얻을 수 있는 양력이 존재하므로 갑자기 제어력이 필요한 상황에서도 물 제트 분사로 원하는 양력을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

물 제트의 유량 및 속도를 증가시켜서 순환현상을 증강시키고 순환제어를 선박의 운동안정용 제어된 시스템에 적용하기 위하여 공동수조에서 실험을 수행한 결과 받음각과 플랩각, 물 제트 분사량 등의 조합에 따라서 최대 160%까지 양력이 증가됨을 확인하였으며 경계층 제어를 적용하였던 타의 경우와는 다르게 형상항력의 감소가 나타났음을 확인하였다. 플랩의 크기와 물 제트 분사위치에 따른 영향을 조사한 결과 양력의 증가는 플랩의 크기가 증가할수록, 형상항력의 감소는 플랩의 크기가 작을수록 증가함을 확인하였다. 고양력의 발생은 고속의 물 제트 분사에 의하여 관다효과가 발생되고 물 제트가 플랩 표면을 따라서 흐르게 됨에 의하여 플랩 윗면에서의 압력감소가 유발되는 구역의 증가가 주된 원인이라고 판단되며 또한 형상항력의 감소는 플랩 근처의 발달된 경계층의 박리점을 플랩 뒷날 후방으로 밀어내므로 경계층에 의한 후류 구역이 줄어들어 압력이 회복되

는 것이 주된 원인이라고 판단된다.

후 기

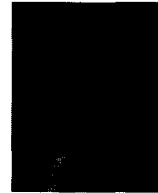
이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2002-005-D00032)

참 고 문 헌

- 표상우, 서정천, 김효철, 1999, “표면 유체분출로 인한 수중날개의 유동해석”, 대한조선학회 논문집 제35권 제1호
- 안해성, 2003, “관다효과를 응용한 플랩이 달린 고양력 날개장치에 대한 실험적 연구”, 서울대학교 대학원 조선해양공학과 공학박사 학위논문
- 안해성, 김효철, 1999, “플랩이 부착된 타에 미치는 물 제트 분사효과에 대한 실험적 연구”, 대한조선학회 논문집 제36권 제1호, pp. 22-29
- Williams, J. and S.F.J. Butler, 1963, "Aerodynamic Aspects of Boundary Layer Control for High Lift at Low Speeds", Journal of Royal Aeronautics Society, Vol. 67, No. 628, pp 201-223
- Wilson, M. B. and von Kerczek, C., 1979, "An Inventory of Some Force Producers for Use in Marine Vehicle Control", DTNSRDC report DTNSRDC-79/097



< 안 해 성 >



< 김 효 철 >