

플랩이 부착된 타에 미치는 물 제트 분사효과에 관한 실험적인 연구

안해성*, 김효철**

Experimental Study on the Effects of Water Jetting on a Flapped Rudder

by

Haeseong Ahn* and Hyochul Kim**

요 약

선박의 고속화에 따라서 선체를 부양시키거나 자세를 제어하기 위하여 높은 양력을 발생시키는 장치의 필요성이 증대하게 되었다. 뿐만 아니라 해양오염방지를 위하여 IMO 등의 국제기구에서는 대형 신조선에 대하여 충분한 조종성능을 확보할 것을 권장하고 있어서 높은 양력을 발생시키는 타의 필요성이 증대하게 되었다. 높은 양력을 얻는 문제는 항공분야에서 오래 전부터 핵심적인 문제로 다루어져 왔으며 그중 대표적인 것이 Coanda장치이다. 방형비척계수가 크고 길이-폭비가 작은 저속비대선에서는 통상적인 타를 부착할 경우에 높은 양력을 얻기 어려우므로 플랩이 부착된 타를 선정하고 이에 Coanda장치를 도입하였을 때 성능이 향상되는 것을 선형시험수조에서 실험적으로 확인하고자 하였다.

Abstract

In the development of high speed marine vehicle, lifting devices became important in sharing the pay load or controlling the attitude. The devices are also important to meet the IMO regulation to prevent the marine pollution by keeping the high rudder force for VLCC even in low speed operation. The high lift devices such as the Coanda device have been introduced to the aircraft as a common practice for a long time among the aero-engineers. If the Coanda device can be utilized to the flapped rudder, the severe requirement of rudder force could be provided for the VLCC in low speed operation. The performance of the rudder system has been investigated at the towing tank of Seoul National University.

접수일자: 1998년 12월 7일, 재접수일자: 1999년 2월 12일

* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 대학원

**정회원, 서울대학교 조선해양공학과, 해양시스템 공학 연구소

1. 서론

Coanda 현상은 자유흐름중에 놓여진 물체의 표면에 접선방향으로 제트를 분사하면 표면 근처의 압력이 낮아지게 되므로 제트유동은 물체로부터 떨어지지 아니하고 물체의 표면을 따라 흐르게 되는 현상을 말한다. 이러한 흐름은 물체형상이 상당한 곡률을 가지고 있는 경우에도 표면을 따라 흐르는 유체입자가 가지게되는 원심력과 평행이 깨어지지 않는 범위에서는 박리현상이 일어나지 아니하고 표면을 따르는 유동이 유지되게 된다. 이와 같은 Coanda 현상이 나타나면 박리현상을 지연시켜서 실속이 일어나는 받음각을 크게 할 수 있으므로 큰 양력을 얻을 수 있어서[1] 주로 이착륙시 활주거리 확보가 용이하지 않은 단거리 이착륙 항공기에서 응용되고 있다.[2][3] 저속비대선과 같이 조종성능이 비교적 나쁜 선박에서는 큰 양력을 발생시키는 타가 필요하여 플랩이 부착된 타를 채택하는 경우가 있다.[4][5] 플랩이 부착되어도 충분하지 못한 경우에 타에 물 제트를 분출시켜 주면 플랩 주위에 고속유동이 나타나게 하여 Coanda 현상을 발생시켜 박리 현상이 지연되고 순환이 증강되어 보다 큰 양력을 얻을 수 있으나 이 방식을 적용하는 데는 장치가 복잡하고 따라서 비용이 많이 든다는 문제점이 있다.

플랩이 부착된 타에 물 제트를 분사시켜 주었을 때 나타나는 물제트분사 효과를 서울대학교 공과대학 해양시스템 공학연구소의 선형시험수조에서 실험으로 평가하고자 하였다. 타는 NACA 0021 단면으로 제작하였으며 물 제트의 조절은 노즐을 바꾸어줌으로 가능하도록 계획하였으며 공급 압력은 축압식 물 제트 공급장치에서 조절 가능하도록 하였으며 실험중 유량을 계측하였다. 물제트공급 조건에 따르는 영향은 타와 플랩에 양력과 항력 그리고 모멘트를 계측할 수 있는 다분력계를 내장시켜 계측하였으며 타 장치 전체에 작용하는 힘도 별도로 계측하여 Coanda 현상이 어떻게 영향을 주는지 알아보려고 하였다.

2. 모형 및 실험장치

2.1 모형의 형상 및 치수

통상적으로 선박에서는 프로펠러 후류에 대칭형 단면의 타를 설치하여 사용하고 있다. 타에 쓰이는 대표적인 단면 형상은 대칭형 에어 포일 단면으로서 NACA 계열 단면이 사용된다. 플랩이 부착된 타에 물제트분사가 미치는 효과를 알아보기로 하고 선형시험수조에서 예인실험하기 위하여 NACA 0021 단면으로[6] 플랩이 부착된 타를 설계하고 이를 모형으로 제작하였다. 타의 치수는 통상의 타에서 사용되고 있는 치수비를 고려하고 전차의 예인속도, 물제트의 속도 및 기계가공성 등을 검토하여 Table 1과 같이 하였다.

Table 1 Principal particulars of the flapped rudder

	Main Foil	Flap
① Chord(mm)	300	122
② Span(mm)	600 (measuring part: 300)	600 (measuring part: 300)
③ position of sensor : 120 from L.E. (0.3 chord)		
④ position of flap hinge : 100 from T.E.(0.25 chord)		
⑤ maximum thickness : 84 (0.21 chord)		

2.2 모형의 제작과 조립

실험의 주요 목적이 물제트분사가 타의 성능에 미치는 영향을 알아보는 데 있으므로 계측값은 되도록 자유수면 영향이나 하단부의 삼차원 영향을 적게 받아야 한다.[7][8] Table 1에 주어진 타에서는 자유수면이나 삼차원 영향이 나타나지 않는 구간은 존재하지 않는다. 그러나 타의 중간에서 스펠의 1/2에 해당하는 구간에 대하여 실험하면 수면과 단부로부터의 영향을 상당부분 제거할 수 있게 된다. 그러므로 타를 1/4 스펠로 나누어 방전 가공하고 2개를 연결하여 중간의 시험 계측부를 구성하고 1/4 스펠은 상단에 그리고 나머지 1/4스

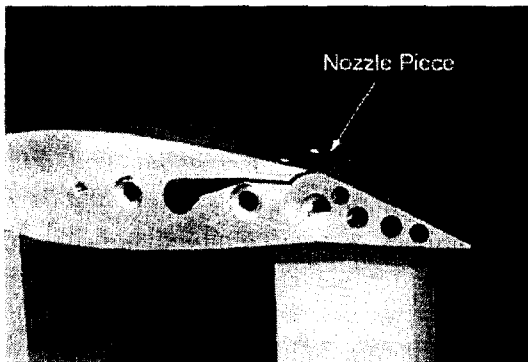


Photo 1 Nozzle & pressure hole of measuring segment

팬은 하단에 배치하여 실험용 모형을 구성하였다. 모형의 계측부에는 물 제트를 만들어주기 위하여 Photo 1에서 보인 바와 같이 압력실 출구에 노즐을 붙여주었다. 실험용 모형에서는 타의 대칭성을 고려하여 타의 한쪽 면에만 노즐을 설치하였다. 압력실에는 분사되는 물 제트가 타의 표면을 따라 고르게 분포되도록 유량배분 장치를 삽입하였다. 타의 중앙부 1/2스팬에 작용하는 힘을 계측하기 위하여 삼분력 검력계를 설계하여 사용하였다. 검력계의 상단은 타의 위쪽 1/4 구간과 내부에서 연결되도록 하였으며 다른 부재와는 직접 접촉되지 아니하도록 하였다. 타의 상단 1/4스팬과 하단부 1/4스팬은 스페이스로 견고하게 조립되며 조립된 상태에서는 중앙부 1/2스팬과는 직접적 접촉이 일어나지 않도록 계획되었다. 플랩은 주날개부분과 마찬가지로 방식을 사용하여 중간 1/2스팬에 대하여서만 힘을 계측하도록 계획하였다. 그리고 플랩 전체는 타의 주날개부분과 힌지로 연결되었으며 필요로 하는 각도로 조절할 수 있도록 하였다.

2.3 분력계

주날개와 플랩에 작용하는 힘을 계측하기 위하여서는 계측기 자체가 모형내부에 삽입되어야 한다. 그래서 주날개와 플랩에 걸리는 하중조건에 적합하고 기구적으로 설치 가능한 구조의 전용 분력계를 설계 제작하는 것이 필요하다. 이 분력계는 자중에 대하여 충분한 강성을 가져야하는 조건

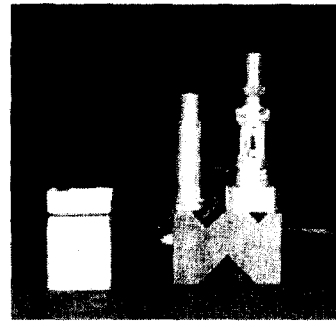


Photo 2 3-Component load cell

이 요구된다. 이와 같은 특성을 만족시키는 구조로서 Photo 2에 보인 것과 같이 4개의 기둥과 박막으로 이루어지는 사주박막형 구조의 감지부를 가지는 전용의 분

력계를 설계하였다. 박막부분에 나타나는 변형도를 계측하여[9][10] 분력을 검출할 수 있도록 하였다. 이들 분력계를 교정시험기에서 시험하여 Fig. 1에 보인 바와 같은 결과를 얻었다. 이 결과에서 확인할 수 있는 것처럼 분력간의 간섭도가 적고 직선성이 뛰어나 그대로 사용하더라도 충분한 정도를 갖는다고 판단되었다. 분력간의 상호 간섭이 선형적으로 나타나고 있어서 필요에 따라서는 대수처리로 간섭성분을 분리할 수 있어서 보다 높은 정도의 계측도 가능하다고 판단하였다. 분력계는 시험중 침수로 인한 손상을 피하기 위하여 충분한 방수처리를 실시하였다. 전체 시스템에 작용하는 유체력을 계측함에 있어서는 Nissho에서 규격제품으로 공급하고 있는 분력계를 사용하였다.

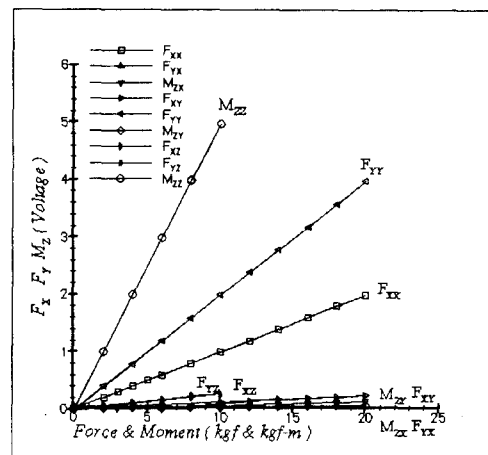


Fig. 1 The results of calibration

2.4 물제트발생장치

플랩이 부착된 타에 물 제트를 분사할 때 물 제트로 소모되는 유량과 공급되는 유량사이의 평형이 유지되어야 하므로 고압의 2단 펌프로 고압수를 얻고 이를 축압탱크에 저장하여 이 물이 압력 조절밸브를 통하여 주날개내의 압축실에 공급되도록 하였다. 축압 탱크의 압축된 공기는 소모되는 유량과 공급되는 유량사이의 불균형을 해소시켜 정상유동이 얻어지게 한다. 노즐을 통하여 물 제트가 균일하게 플랩의 표면을 따라 분사되며 노즐을 바꾸어 유속이 바뀔 수 있도록 하였다. 그리고 축압 탱크의 사용조건에 따라서 조절 가능한 압력 스위치를 달아 주었으며 분출되는 유량은 적산 유량계로 계측하도록 하였다. 장치의 개념도를 보면 Fig. 2와 같다.

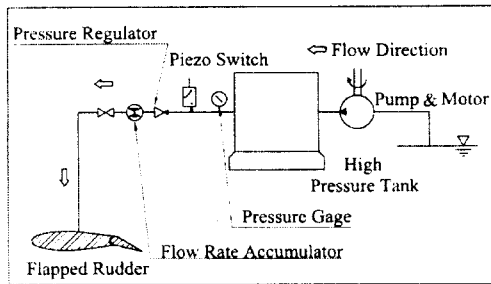


Fig. 2 Schematic diagram of jetting device

2.5 자료획득과 처리

타의 주날개와 플랩 그리고 전체 시스템에 작용하는 분력들은 전압형으로 증폭되어 출력되고 수치화하여 전산기에 기록된다. 이들 각각의 수치자료는 1초에 1,000개씩 순차적으로 20초동안 측정하고 각분력에 대하여 순차로 얻어진 20,000개의 계측결과를 처리하여 평균을 구하고 이때 표준편차가 1.0E-03 이상일 때는 신빙성이 없는 것으로 보아 제외시키며 나머지를 사용하여 분력별 평균을 다시 구하여 채택한 것이다. 이와 같은 방법을 채택함으로써 검력계 출력의 신뢰도를 높였다.

3. 실험 및 결과

3.1 검증 실험

실험용으로 만들어진 플랩이 부착된 타에서 플랩의 각도가 0도일 때는 단면이 NACA 0021인 삼차원 타에 해당한다. 따라서 타 시스템 전체에 대한 출력에는 하단부에서 나타나는 삼차원 영향과 자유수면에서 수면의 교란으로 인하여 나타나는 영향등이 포함되어 있기 때문에 이차원단면에 대한 실험결과와 정량적으로 비교하기에는 적합하지 않을 것으로 판단된다. 그러나 미국 해군연구소에서 수행한 실험결과[11]과 비교하면 Fig. 3이 얻어진다. 이 결과는 날개의 특성치가 다르기 때문에 직접적인 비교는 되지 않지만 실험이 적절하게 이루어졌음을 나타내는 것으로 판단된다.

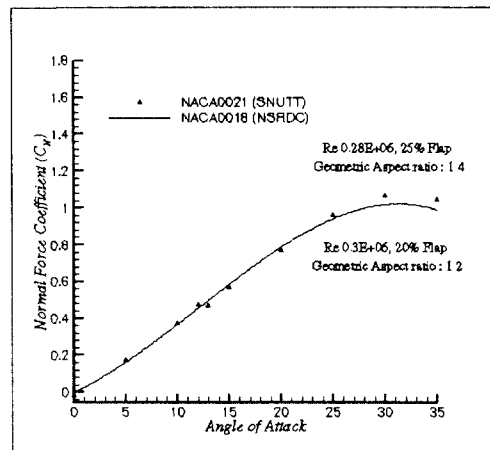


Fig. 3 Comparison of measured rudder forces

한편 타의 중앙부 1/2 스펠에 작용하는 유체력을 주날개와 플랩에서 계측한 결과로부터 구하고 Fig. 4에서 타 시스템 전체에서 계측된 결과와 비교하였다. 이 결과에서는 중앙부 1/2 스펠에서 발생하는 유체력은 여러 속도구간에서 타 시스템 전체에서 계측된 유체력의 약 66%에 해당하는 것으로 확인된다. 따라서 (1)식과 같이 정의할 수 있다.

$$F_{2D} = \beta F_{total} , \beta = 0.66 \quad (1)$$

이 결과는 3차원적인 특성을 갖는 타에서 중앙

부 1/2 스패의 구간에서 타력의 66%가 얻어지는 것으로 평가할 수 있음을 나타낸다.

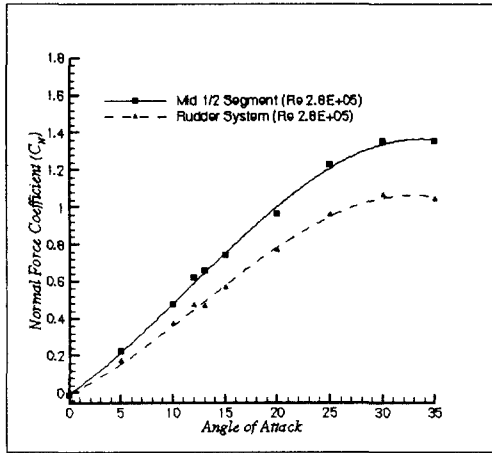


Fig. 4 Comparison of normal force on the rudder system and a mid half span segment

3.2 플랩영향 조사시험

플랩이 부착된 타에서 플랩의 영향을 알아보기 위하여 주날개의 받음각을 0, 5, 10, 20, 35도로 바꾸어가며 각각의 받음각에서 플랩의 각도를 주날개에 대하여 -40도에서 40도까지 변화시키면서 실험을 실시하였다. 주날개와 플랩에 작용하는 유체력을 분력계로 직접계측하고 이들로부터 Fig. 5의 관계를 고려하여 벡터 합성하면 타 시스템 전체에 작용하는 유체력을 구할 수 있다. 주날개의 받음각을 0도로 고정하고 플랩의 각도만을 바꾸어 주었을 때 계측되는 유체력은 Fig. 6~9와 같다. Fig. 6에 주날개와 플랩에서 단면의 두께방향으로 직접 계측되는 분력을 나타내었다. 여기서 주날개는 받

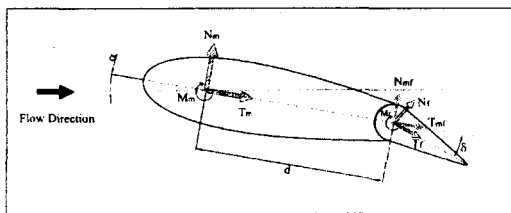


Fig. 5 Force diagram for the flapped rudder

음각이 없는 상태에서도 플랩의 영향으로 양력이 유기된다는 사실을 알 수 있다. Fig. 7에는 날개단면의 코오드 방향으로 계측된 분력을 나타내었다. 그리고 Fig. 8에는 분력계위치에서 계측되는 모멘트를 표기하였다. Fig. 6~8의 결과로부터 주날개와 플랩으로 조립된 1/2 스패의 타 시스템에 작용하는 양력을 구하고, 앞에서 확인하였던 수정계수 0.66을 고려하여 이를 전체 시스템에 작용하는 값으로 환산한 후 직접 계측된 양력과 Fig. 9에서 비교하였다. 이에 따르면 주날개와 플랩에서 분력으로 계측하여 추정된 타시스템의 유체력이 전

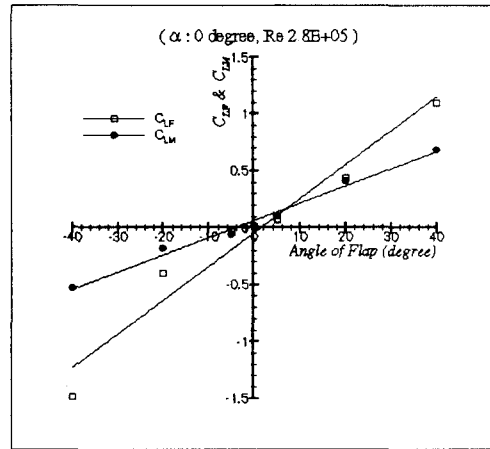


Fig. 6 Effect of the flap on the lift force of the rudder in zero attack angle

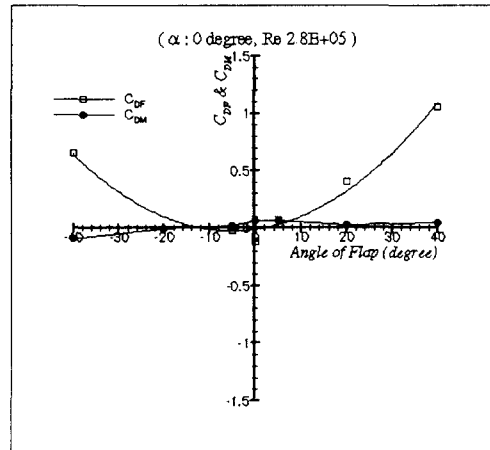


Fig. 7 Effect of the flap on the drag force of the rudder in zero attack angle

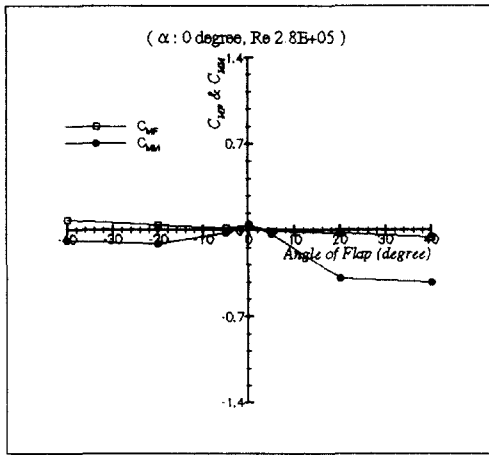


Fig. 8 Effect of the flap on the moment of the rudder in zero attack angle

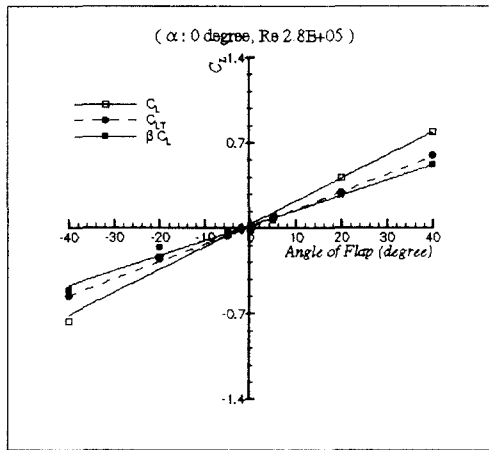


Fig. 9 Effect of flap angle on the lift coefficient of the rudder system

체시스템에서 계측된 결과와 매우 잘 일치하고 있어서 공학적으로 활용도가 높은 값으로 판단된다.

한편 플랩의 각도를 일정하게 고정시키고 주날개의 받음각을 바꾸어 가며 유체력을 계측하고 이들을 합성하여 타의 중간 1/2 스펜에 작용하는 양력과 항력 그리고 모멘트를 구하여 Fig. 10~12에 나타내었다. 양력을 계측한 Fig. 10의 결과에서 플랩의 각변위를 증가시키면 플랩의 영향으로 추가의 양력을 얻어 타 시스템 전체의 양력 증가가 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라

서 설계자가 타각과 플랩의 각도를 동시에 선정하여 주면 보다 효과적인 타의 양력을 얻을 수 있을 것이 기대된다. 타의 항력을 조사한 Fig. 11의 결과를 보면 플랩의 각변위를 증가시키면 타시스템의 양력인 경우 타각의 증가에 따르는 실속현상의 영향을 받았으나 항력의 경우에는 실속을 일으키는 타각에서도 항력 변화에 별다른 특이 현상이 나타나지 않는 것이 확인된다. Fig. 12에서는 플랩의 각도를 변화시킴으로서 타의 회전 모멘트를 줄일 수 있음이 확인되고 있다. 따라서 타의 회전 중심을 적절히 선정하고 플랩각도를 조절하여 타각을 조절하는데 필요로 하는 모멘트를 상당히 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

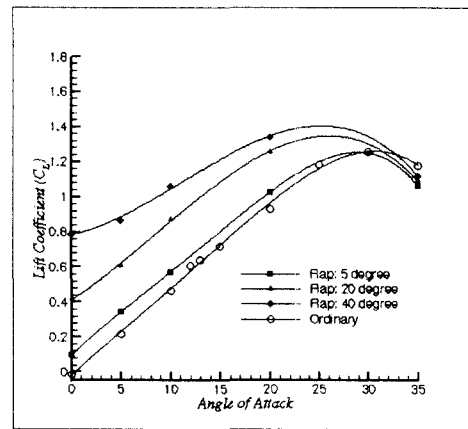


Fig. 10 Increase of lift force induced by the flap

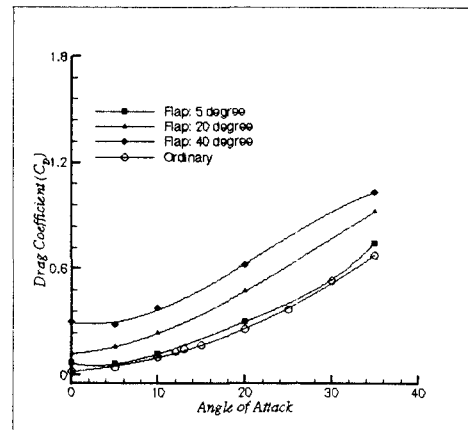


Fig. 11 Increase of drag force induced by the flap

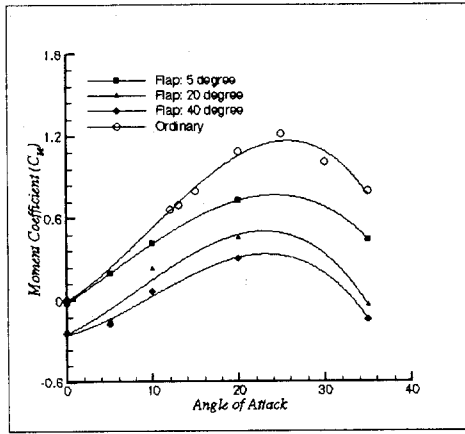


Fig. 12 Change of rotational moment of the rudder by flap angle variation

3.3 물제트분사가 미치는 영향

Fig. 2에서 보인 물 제트 분사장치로 물을 분사하고 플랩각과 받음각을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 여러 차례에 걸쳐 제트를 분사하고 유량을 계측하였으며 분사노즐의 출구단면적을 알고 있으므로 이를 이용하여 물 제트의 속도를 구하였다.[12] 이때 분사되는 제트의 모멘텀 계수는 (2) 식으로 정의하기로 하자.

$$C_j = \frac{hu_j^2}{\frac{1}{2}CU_\infty^2} \quad (2)$$

여기서 h 는 노즐 출구의 간격이고, u_j 는 물 제트 분사속도, C 는 전체날개의 코오드길이, U_∞ 는 예인속도이다. 이와 같이 정의하면 모멘텀 계수는 단위시간당 분사되는 물 제트가 가지고 있는 운동량과 무한원방의 유체흐름이 참고면에 가하는 힘의 비가 된다. 물 제트의 수량을 일정하게 유지하고 예인속도를 변화시켜 C_j 를 변화시킬 수 있었다. 실제 실험에서는 예인전차속도와 물제트 분사장치를 고려하여 C_j 가 0.04인 경우를 대상으로 하였다. 플랩각을 20도로 설정하였을 때 물 제트를 분사하여 얻어지는 양력의 변화를 Fig. 13에 보였다. Fig. 13의 결과를 보면 플랩각을 20도로 설정함으로써 타의 양력증가가 나타나며 이

에 다시 제트를 공급함으로써 추가로 양력을 증가시킬 수 있음이 잘 나타나 있다. 플랩각을 40도로 설정하였을 경우에도 Fig. 14에 보인 바와 같이 동일한 경향이 나타나고 있다. 다만 Fig. 13에서 영각 25도 이후에 나타나고 있는 양력의 갑작스런 감소는 물제트가 분사되고 있는 플랩부분에서 원호구간이 충분하지 못하여 Coanda효과가 부족한데 기인하는 것으로 판단되며 Fig. 14에서 플랩각을 증가시켰을 때 원호구간의 증가와 더불어 Coanda효과가 충분히 발생하고 있는 것으로부터도 입증되고 있다. 하지만 위의 실험결과로 판단해볼 때 최대 타각에서 얻을 수 있는 양력을 타각 0도에서도 적당한 플랩각의 변화와 물제트 분사로 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

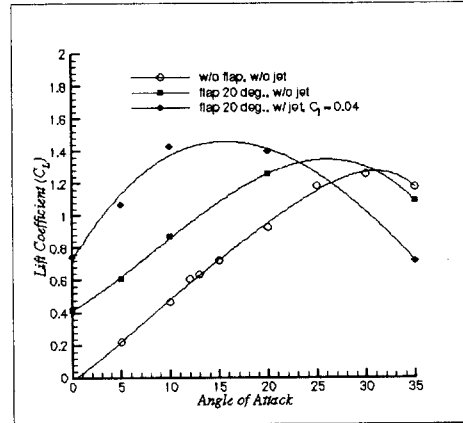


Fig. 13 Effect of water jetting on the lift force of the rudder (flap angle 20deg.)

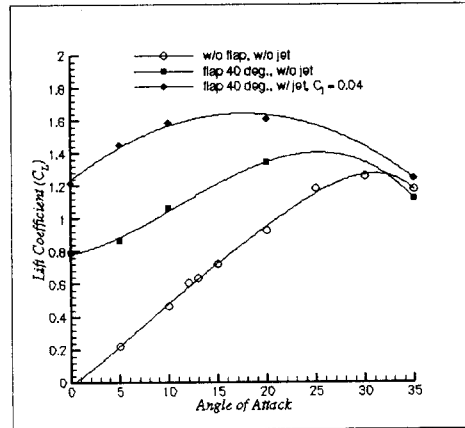


Fig. 14 Effect of water jetting on the lift force of the rudder (flap angle 40deg.)

4. 결론

플랩이 부착된 타를 설계하고 예인수조에서 실험을 수행하여 플랩의 효과를 실험적으로 확인하였다. 주날개와 플랩사이에 물 제트를 분사시킬 수 있도록 타의 구조를 설계하고 물제트를 분사시켜 타시스템에 나타나는 Coanda 현상에 의한 양력증가 현상을 확인하였다. 주날개와 플랩에 작용하는 유체력을 계측하기 위하여 전용의 3분력 검력계를 설계제작 하였으며 타의 중앙부 1/2 스패에 해당하는 구간에 작용하는 유체력을 별도로 계측하였다. 이 계측 결과는 미국해군 연구소의 계측결과와 비교하여 정성적으로 신뢰할 수 있는 결과를 보이며 직접 계측한 타 시스템 전체에 작용하는 유체력과도 일관된 상관 관계를 보이고 있어서 공학적인 유용성이 매우 높은 결과를 제시하고 있다.

이번의 실험적 연구에서는 날개 단면의 2차원적인 특성의 조사, 날개와 플랩 사이의 상호작용, 분사되는 유량과 유속(C_j), 선속의 영향, 타각에 따르는 최적 플랩의 각도등에 관하여 충분한 연구가 이루어지지 못하고 있으나 연구과제가 한국학술진흥재단의 대학부설 연구소 지원사업의 연구과제로 지원 받고 있어서 후속 연구로 이들에 대한 연구가 이루어질 것임을 밝힙니다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단 대학부설 연구소과제 연구비에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] Paul K. Chang, " Control of Flow Separation ", McGraw-Hill, 1976
- [2] Robert J. Englar, " Circulation Control for High Lift and Drag Generation on STOL Aircraft ", J. Aircraft, Vol 12, No. 5, May 1975
- [3] John L. Loth and Michael Boåsson, "Circulation Controlled STOL Wing Optimization", J. Aircraft, Vol. 21, No. 2, 1982
- [4] Justin E. Kerwin, Philip Mandel, S. Dean Lewis, " An Experimental Study of a Series of Flapped Rudder ", J. of Ship Research, Dec. 1972
- [5] Keh-Sik Min, " Experimental Study of Small Flapped Rudder with Rotating Cylinder and Analytical Estimation of Improvements in Ship's Maneuvering Performance with its Application ", J. of the Soc. of Naval Architects of Korea, Vol.16, No.3 Sep. 1979
- [6] Ira H. Abbott, Albert E. von Dohenhoff, "Theory of Wing Sections ", Dover Publications.,1959
- [7] Sighard F. Hoerner, Henry V. Borst, " Fluid Dynamic Lift ", Hoerner Fluid Dynamics,1975
- [8] Sighard F. Hoerner " Fluid Dynamic Drag ", Hoerner Fluid Dynamics, 1965
- [9] Karl Hoffman, " An Introduction to measurements using strain gages ", HB.M GmbH, 1989
- [10] J.W. Dally, W.F.Riley, " Experimental Stress Analysis ", McGraw-Hill, 1978
- [11] C.R.Olson, " Effects of Various Linkage Ratios on the Free Stream Hydrodynamics Characteristics of an all Movable Flapped Rudder ", DTMB report 991, 1955
- [12] Rameswar Bhattacharyya, " Dynamics of Marine Vehicles ", John Wiley & Sons Inc.,1978