
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 29 卷 第 4 號 1992 年 11 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 29, No.4, November 1992

제어판의 정상 및 비정상 토크에 관한 풍동시험

서민석*, 고상근*, 강신형**

Wind-Tunnel Experiment for the Steady and Unsteady Torques of a Control Panel

by

M.S. Suh*, S. Kauh* and S.H. Kang**

요 약

고정된 가이드 패널 뒤에 설치된 실제 형상의 3차원 제어판 모델이 균일유동 하에서 작동될 때, 제어판이 받는 토크의 정적 특성과 동적 특성에 대하여 풍동실험을 통해 연구하였다. 제어판이 가이드 패널에 의한 후류에서 작동되면 각도에 따른 토크의 증가는 적으며, 일정한 범위를 지나면 토크계수는 각도에 선형적으로 증가한다. 실험이 수행된 속도 범위 내에서는 토크계수는 속도에 따라서 변화가 거의 없었다. 토크계수가 영이 되는 중립각도의 크기가 영각에 따라서 증가하며, 영각의 절반 정도이다. 비정상 토크계수는 정상상태에 대하여 히스테리시스를 보이며, 풍속이 증가할수록 다소 커진다. 히스테리시스는 각속도가 증가할수록 증가하고, 각속도가 5.5rad/s 보다 적은(reduced frequency, $k=\omega c/z V_0$ 의 값은 0.035) 경우에는 준정상 상태라고 할 수 있다.

Abstract

The dynamic and static torque characteristics of a three dimensional control panel installed behind a guide panel were investigated in a wind tunnel. The panel was tested for various wind speeds, angles of attack and positions of the panel. The effects of the rotational speed and the amplitude of the sinusoidal motion were also studied. The increasing rate of torque coefficients with the angular position of the panel is small when the panel remains in the wake region, but is linear when it reaches the external stream. In case of a sinusoidal motion of the pannel, a hysteresis appears in the dynamic torque. The hysteresis becomes strong as

접수일자: 1992년 2월 13일, 재접수일자: 1992년 7월 16일

* 서울대학교 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 기계공학과

the wind speed and the angular speed of the panel increase. The unsteady torque is considered quasi-steady when the angular speed is less than 5.5rad/s, i.e. the reduced frequency is less than 0.035.

기호설명

- a : 제어판 운동의 진폭
- c : 일반적 제어판의 코드길이
- C_{ms} : 정상상태에서의 무차원화한 토크계수
($=2M/\rho V^2 c^2 s$)
- C_{md} : 비정상상태의 무차원화한 토크계수
- M : 제어판에 작용하는 유체력에 의한 토크
- V_o : 주유동의 속도
- s : 제어판의 폭
- α : 주유동과 가이드 패널 사이의 각도
- β : 제어판의 가이드 패널에 대한 상대적 각도
- ω : 제어판의 각속도

1. 서 언

잠수체의 운동은 흔히 선미에 제어판을 설치하여 조종한다. 수중 병기는 그 운동 제어의 범위가 다양하면서 정확성과 신뢰성이 요구되므로 외부 유동의 변화가 매우 크며, 이를 제어하는 제어판에 작용하는 토크의 변화가 심하다. 특히 비정상 토크 하에서 빠른 속도의 제어가 요구되는 경우에는 운동을 제어하는 제어판을 합리적으로 설계하여야 하며, 설계된 제어판에 작용하는 양력과 토크를 예측할 수 있어야 한다. 제어판의 형상, 부착되는 상태, 운전조건 등에 따라서 상당히 광범위한 설계자료가 필요하다. 그러나 이러한 문제는 현재까지 개발된 이론 또는 수치 해석적인 방법으로는 그 응용 범위가 매우 좁아서 풍동시험을 통해서 광범위한 시험 데이터를 체계적으로 확보해야 한다.

지금까지 비정상 운동을 하는 익형에 관한 연구는 주로 공기역학의 분야에서 연구되어 왔다[1,2]. 움직이는 익형에서 영각의 변화가 크면 익형의 선단에 동적 실속이 발생하게 된다. 이 실속은 유동을 따라서 하류로 흐르게 된다. 이러한 과정에서 익형에는 비정상적으로 요동하는 압력이 발생하게 된다. 결과적으로 이 실속이 익형의 위를 스쳐 지나는 동안에 양력은 변하게 된다. 양력의 증가는 곧 토크의 증가를 가져오게 된다[3]. 익형이 받는 비정상 양력과

토크는 익형 주위의 복잡한 비정상 현상에 의해서 지배되기 때문에 아직도 잘 알려져 있지 않다[4-7].

본 연구에서는 수중에서 작동하는 제어판의 정상 및 비정상 토크특성에 대한 실험적 데이터를 일차적으로 확보함을 목표로 풍동에서 실험을 수행하였다. 제어판이 수중에서 작동할 경우에는 부가질량이 중요한 역할을 하나, 본 연구에서는 다루지 않았다. 제어부는 고정되어 있는 가이드 패널과 그 뒤에 움직이는 제어판으로 구성되어 있다. 가이드 패널에 의해서 후류가 형성되며, 제어판은 그 후류영역 내에서 작동되기 때문에 정상 토크 특성을 계측하였다. 또한 제어판을 좌우로 정현파 운동을 시키면서 비정상 토크를 계측했다.

2. 실험 장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 채택한 제어판의 모형과 풍동에 설치된 상태를 Fig.1에 나타내었다. 가이드 패널은 마티카 목재로 제작하였다. 제어판은 엔지니어링 플라스틱으로 뼈대를 제작하고 겉 부분은 일반 플라스틱으로 제작하여 자체 질량을 최대한으로 줄였다. 제어판 앞부분은 반경 30mm의 반원이고 뒷부분은 직선으로 설계되었으며, 코드 길이는 276mm이다. 한편 가이드 패널은 풍동의 바닥에서 약 10mm 정도의 간격을

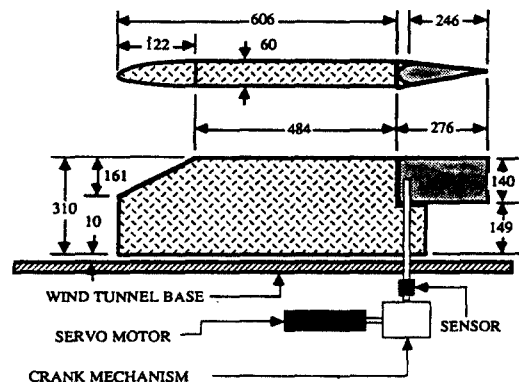


Fig. 1 Configuration of the model in the wind tunnel

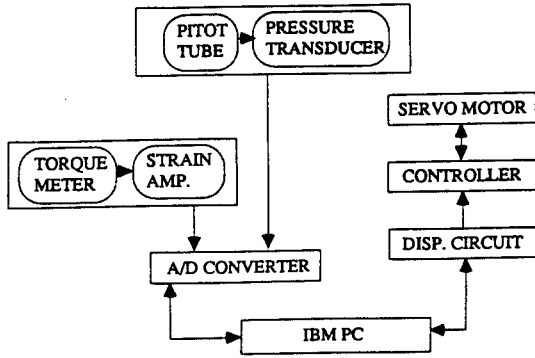


Fig. 2 Schematic diagram of the data acquisition system

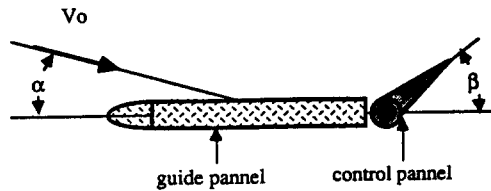


Fig. 3 Definition of experimental parameters

유지시켜 바닥과 가이드패널 사이의 코너유동을 방지하였다. 제어판의 축은 지금 30mm의 연강으로 제작하였고, 풍동바닥을 관통하여 토크메타와 연결하였다. 축은 바닥에 설치한 2개의 베어링에 의해서 지지되며, 토크메타에 워엄기어로 연결된 DC SERVO 모터에 의해서 구동되도록 하였다. 각도의 측정을 위해서는 포텐시오 메타를 제어판이 달려있는 축에 연결하여 그 출력으로 각도를 측정하게 하였다.

실험에 사용된 풍동은 Göttingen 형의 철제 풍동이며, 시험부의 크기는 길이가 3600mm, 폭이 900mm이고 높이가 900mm이다. 최대 속도는 60m/s이고, 풍속이 40m/s일 때 균일도는 0.3%이고 난류강도는 0.2% 이내이다.

제어판에 가해지는 토크의 측정을 위해서는 KYOWA TP-500 모델의 토크메타를 사용하였으며 용량은 500g·m이다. KYOWA사의 DPM-612B 스트레인 앰프를 사용하여 계측하였다. A/D 변환기로는 측정 속도를 고려하여 정상상태의 경우는 Hewlett Packard 3457A 모델을 사용하였고 비정상상태의 실험에서는 FICAD 8903을 사용하였다. 전체적인 시스템의 제어와 출력데이터의 확인을 위한 그래픽 처리는 C언어를 사용하여서 구성하였고 A/D 변환기

의 데이터 검출부는 빠른 속도의 데이터 검출을 위해서 ASSEMBLER로 작성하였다(Fig.2 참조).

2.2 실험방법

정상상태의 토크에 영향을 미치는 주 변수는 풍속 V_0 , 가이드 패널의 영각 α , 제어판의 각도 β 이다. 정상상태의 토크실험은 주어진 풍속과 영각에서 제어판의 각도 β 를 증가, 감소, 다시 증가시켜 원점에 돌아오도록 하면서 계측하였다. 계측된 토크는 다음과 같이 무차원화하여 토크계수 C_m 을 구하였다.

$$C_m = \frac{M}{1/2\rho V^2 c^2 s}$$

여기서 M 은 제어판이 유동장에서 유체에 의하여 받는 토크이고 c 는 제어판의 코드길이를 나타내며 s 는 제어판의 폭을 나타낸다.

비 정상 실험은 제어판의 각도를 정현파 운동 ($\beta = a \sin \omega t$)을 시키면서 계측하였다. 과도상태의 진동을 피하기 위해서 20주기 이상 움직인 후에 3주기의 움직임에서의 데이터를 검출하고, 이 중에서 한 주기의 토크를 취하였다. 주어진 조건에서 풍속이 영인 경우를 계측하여 구동 전 메카니즘의 관성에 의한 토크라고 생각하였다. 이 토크를 주어진 풍속에서 계측된 토크에서 감하여 유동에 의한 토크라고 생각하였다. 주유동 속도가 35m/s, 각속도가 9.0 rad/s, 진폭이 26°인 경우에 있어서 관성의 값을 제거하기 전과 제거한 후의 데이터를 Fig.4에 나타내었다. 제어판과 회전축계를 포함한 관성에 의한 모멘트

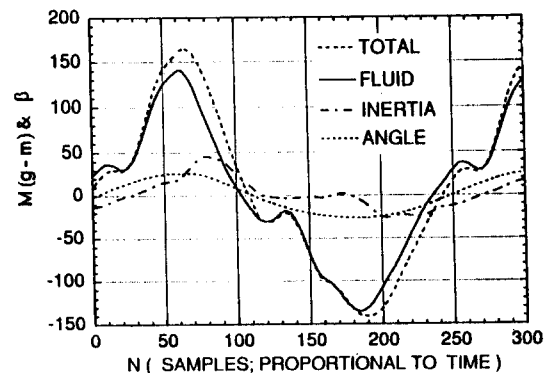


Fig. 4 Time history of the measured torques with the angular position of the pannel

를 최대한으로 줄이고 정확하게 계측하여야 한다. Fig.4에서 관성 모멘트가 각변위에 비례하지 않으며, 이는 각변위의 실제 오차, 구동시스템에서의 마찰 및 계측시스템의 동적 오차에 기인한다. 본 연구에서 제한된 실험장비로는 체계적인 오차분석을 하기가 어려웠다.

4. 실험 결과 및 검토

4.1 정상상태의 토크특성

정상상태에서 토크에 영향을 미치는 요소들은 주방향 유동 속도와 제어판의 각도이다. 본 실험에서는 제어판 앞부분의 가이드 패널로부터 생성되는 후류의 영향을 고려하여 주방향 유동의 속도 V_0 , 가이드 패널과 주방향 유동 사이의 영각 α 와 가이드 패널에 대한 제어판의 상대적 각도 β 의 세가지의 변수를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 풍속 V_0 는 20, 25, 30, 35m/s로 고정하였다. 영각 α 는 0,

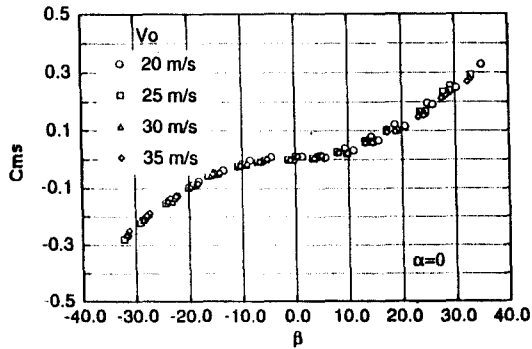


Fig. 5 Variations of the measured torque coefficients ($\alpha=0^\circ$)

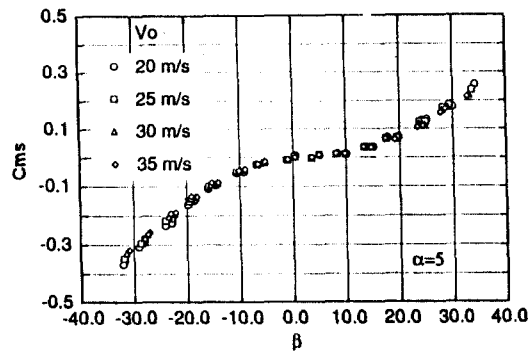


Fig. 6 Variations of the measured torque coefficients ($\alpha=5^\circ$)

5, 10°에서, 제어판의 각도 β 는 $\pm 35^\circ$ 범위에서 변화시켰다. 정상상태의 데이터는 각도를 증가시킨 후 다시 감소시키면서 측정하였다.

영각이 0°인 경우 β 에 대한 C_{ms} 의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 제어판의 각도에 따라서 토크 계수는 증가하였다. 제어판의 각도가 작을 때는 제어판이 가이드 패널의 후류에 있기 때문에 각도의 증가에 따른 토크의 증가는 적으며, 일정한 범위를 지나서는 토크계수는 각도에 선형적으로 증가한다. 실험이 수행된 속도 범위에서는 속도에 따라서 토크계수의 변화(즉 레이놀즈 수에 대한 변화)가 거의 없었고, 실험오차 범위 내에서 변화였다. Fig.6과 7에는 영각이 각각 5, 10°인 경우 토크계수의 변화를 나타내었다. 전체적인 변화의 특성은 영각이 0°인 경우와 동일하나 영각에 따른 대칭성은 보이지 않는다. 이는 영각이 영이 아닌 경우 가이드 패널의 후류가 비대칭 속도분포를 보이기 때문이다.

영각이 토크계수에 미치는 영향을 보기 위해서

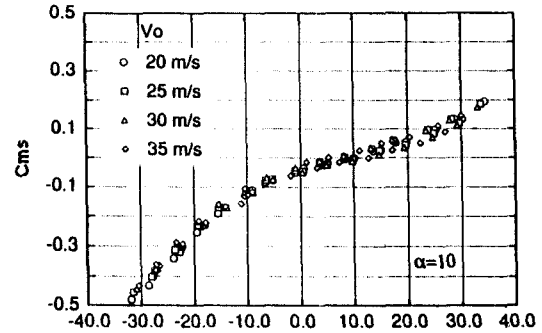


Fig. 7 Variations of the measured torque coefficients ($\alpha=10^\circ$)

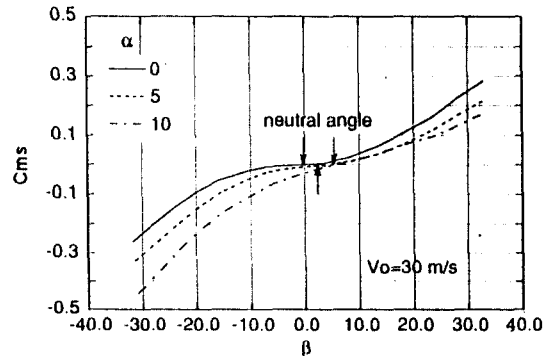


Fig. 8 Comparison of the measured torque coefficients for different values of the attack angle

풍속이 30m/s인 경우 계측된 결과를 Fig.8에 나타내었다. 그림에서 토크계수가 영이 되는 중립각도의 크기가 영각에 따라서 증가한다. 영각이 5도인 경우에는 약 3도, 영각이 10도인 경우에는 약 6도 정도가 되어 대체로 영각의 절반 정도라고 생각된다.

3.2 비정상상태의 토크특성

설치된 가이드 패널과 유동이 평행한 경우 즉 $\alpha=0$ 인 경우에 대하여 제어판의 각속도 ω 와 주유동의 속도 V_0 , 그리고 진폭 a 를 변화시키면서 비정상 토크를 계측하였다.

주 유동 속도에 대한 영향을 조사하기 위하여 V_0 를 20, 25, 30, 35m/s 4가지 경우에 대하여 $a=26^\circ$ 로 고정시키고 ω 를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 대표적으로 ω 가 9.0rad/s인 경우, V_0 가 20 및 35m/s일 때, 비정상 토크계수를 동일한 제어판의 각도에서 정상 토크계수에 대한 변화를 Fig.9와 10에 나타내었다. 만약 비정상 토크계수가 준 정상상

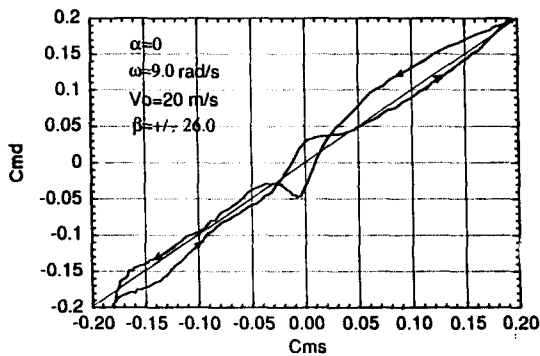


Fig. 9 Hysteresis of the dynamic torque coefficient ($V_0=20$ m/s)

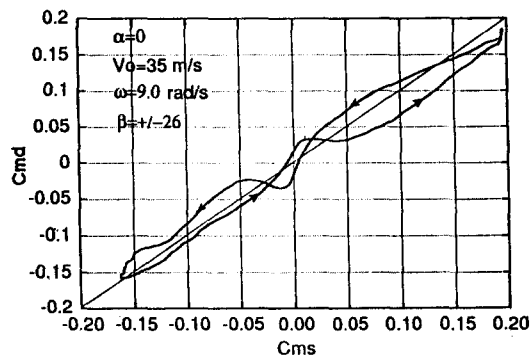


Fig. 10 Hysteresis of the dynamic torque coefficient ($V_0=35$ m/s)

태라면 그림에서 직선으로 나타날 것이다. 그림에서 화살표는 제어판의 각도가 증가, 감소 다시 증가, 감소하는 경로를 나타낸다. Fig.9에서 제어판의 변위가 양의 값으로 증가할 때 비정상 토크는 정상 상태의 토크보다 작은 값을 유지하면서 증가하나, 최대 변위에서 제어판의 각도가 감소하면, 비정상 토크는 정상 토크보다 큰 값을 유지하면서 감소하다가 제어판이 후류 영역으로 되돌아 오면서 급격히 감소하여 음의 값을 보인다. 이후 변위가 음의 값으로 증가, 감소하는 과정에서의 비정상 토크는 앞서의 경우와 동일하다. 전체적인 비정상토크의 변화과정은 대칭성을 보이며, 정상상태의 토크변화에 대하여 약간의 양의 위상변화를 보인다. 이러한 비정상 토크 변화의 특성을 본 연구의 제한된 실험 결과로는 설명하기가 어려우며, 계속 연구되어야 할 과제라고 생각된다.

주 유동 속도가 증가하면 비정상 토크계수는 정상 상태에 비하여 다소 증가된 차이를 보이거나 전체적인 경향은 동일하다. 그러나 Fig.10에 나타낸 바와 같이 약간의 음의 위상 차이를 보이며, 변위가 0° 근처에서의 변화 폭이 감소한다. 한편 각속도 ω 를 5.5, 7.0, 8.0, 9.0로 변화시키면서 실험을 수행하였으며, ω 가 증가할수록 위의 히스테리시스의 경향은 증가한다. 그러나 ω 가 5.5rad/s보다 적은 (reduced frequency, $k=\omega c/2V_0$ 의 값은 0.035) 경우 비정상상태의 토크값은 정상상태의 경우와 거의 같아서 준 정상 상태라고 할 수 있다. 참고로 본 연구에서 수행된 접근유동 20m/s, $\omega=9.0$ rad/s일 때 reduced frequency, k 의 값은 0.062이다. 한편 진폭을 $a=9.3^\circ, 13^\circ, 17.4^\circ, 26^\circ$ 로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 진폭이 $9.3^\circ, 13^\circ$ 인 경우는 제어판이 후류영역 내에 있기 때문에 정상상태와 동일하였으나, 17.4° 로 증가하게 되면 비정상상태 데이터의 전형적인 모습이 보이기 시작함을 알 수 있었다. 그 결과는 여기서 나타내지 않았다.

4. 결 언

본 연구에서는 가이드 패널 뒤에 설치된 특정한 3차원 제어판의 정상상태와 비정상상태의 토크를 계측하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 제어판이 가이드 패널의 후류 내에서 작동하기

때문에 각도가 작을 때에는 각도에 따른 토크의 증가는 적으며, 제어판이 후류를 벗어나면 토크계수는 각도에 선형적으로 증가한다. 실험이 수행된 속도 범위에서는 속도에 따라서 토크계수의 변화가 거의 없었다. 토크계수가 영이 되는 중립각도의 크기가 영각에 따라서 증가하며, 영각의 절반 정도이다. 이러한 데이터는 실제 설계시 참고자료로 활용될 수 있다.

(2) 비정상 토크계수는 정상상태에 대하여 특이한 히스테리시스를 보며, 풍속이 증가할수록 다소 증가한다. 또한 각속도가 증가할수록 증가하고, 각속도가 5.5rad/s보다 적은 (reduced frequency, $k=\omega c/2V_o$ 의 값은 0.035) 경우에는 준 정상상태라고 할 수 있다.

5. 후 기

본 연구의 수행을 제안하고 도와주신 진해기계창의 박성희 박사 및 여러분에게 깊은 감사를 드립니다. 또한 모형제작을 해주신 해사기술연구소 박찬일 실장 및 여러분에게 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] McCroskey, W.J., "Unsteady Airfoils", *Ann. Rev. Fluid Mechanics*, Vol.14, pp.285-311, 1982.
- [2] Kemp, N.H., "Approximate Unsteady Thin-Airfoil Theory for Subsonic Flow", *AIAA*, Vol. 14, No.8, pp.1083-1089, 1976.
- [3] Ham, N.D., "Aerodynamic Loading on a Two-Dimensional Airfoil during Dynamic Stall", *AIAA*, Vol.6, No.10, pp.1927-1934, 1968.
- [4] Carta, F.O., "Unsteady Aerodynamic Response of a Two-Dimensional Airfoil at High Reduced Frequency", *AIAA*, Vol.12, No.1, pp.43-48, 1974.
- [5] Stanford D., "Experimental Studies of Unsteady Trailing-Edge Conditions", *AIAA*, Vol.16, No. 2, pp.125-129, 1978.
- [6] Tomoaki M., "Measurement of Dynamic Characteristics of Airfoil", *Trans. of JSME(B)*, 56(523), pp.750-756, 1990.
- [7] Leishman, J.G., "Dynamic Stall Experiments on the NACA 23012 Airfoil", *Journal of Experiments in Fluids*, Vol.9, pp.49-58, 1990.