
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 32 卷 第 4 號 1995 年 11 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 32, No. 4, November 1995

소형 프로펠러 단독시험기 설계

김재성^{*}, 송무석^{**}, 김효철^{*}

A Design Experience of Propeller Open Water Testing Dynamometer

by

J. S. Kim^{*}, M. Song^{**} and H. Kim^{*}

요 약

선박용 추진기의 단독시험을 위한 소형시험기를 설계제작하고 모형선 예인수조에서 검증시험을 실시하였다. 제작된 시험기는 전동기의 반동력을 스트레인 게이지를 이용하여 직접 계측함으로써 재래의 시험기에서 사용하고 있는 마모성 슬립링을 (Slip Ring) 제거하였다. 또한 기기의 구조 부재를 검력계의 검출부로 사용함으로써 소형의 모형선에 탑재될 수 있도록 경량화 및 소형화를 이룩하였다. 개발된 이 제품은 회류수조 등에서 효과적으로 사용될 수 있을 뿐만 아니라 선형시험수조 및 캐비테이션 터널에서 사용될 각종 시험 기기 설계의 기초기술을 포괄하는 것으로 평가된다.

Abstract

A new propeller open water testing device is developed and tested in a tow tank. The devised dynamometer consists of a torque measuring part, a thrust measuring part and a driving motor with an RPM counter. Torque is designed to be measured directly from the torsion of the structure holding the motor by using strain gauges and, consequently, conventional slip ring is removed. Also, in order to make the device fit in relatively small model ships, the weight and the size of the whole integrated structure are reduced in various ways. The developed tester is proved to be easily utilized in small circulating water channel experiments and is believed to have provided us with essential information for future design of various types of conventional or object oriented force measuring device.

발 표: 1994년도 대한조선학회 추계연구발표회('94. 11. 12.)

접수일자: 1995년 6월 9일. 재접수일자: 1995년 8월 2일

* 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

** 정회원, 홍익대학교 조선해양공학과

1. 서 언

조선해양공학 제 분야의 실험적 연구에 있어서 많은 부분이 각종 힘의 계측을 필요로 한다. 전통적인 저항시험 및 추진기의 성능 시험에서뿐만 아니라 새로운 해양구조물에 대한 다양한 실험이 요구됨에 따라, 실험 대상 구조물의 형상과 예상되는 하중의 크기에 합당한 검력계를 선정하여 사용하는 것이 바람직하다. 일반적으로 현재 연구목적으로 사용되고 있는 검력계들은 계측하는 힘의 종류와 계측치의 정확도에 따라 차이가 있으나 Load Cell만도 때로는 수천 만원을 호가하고 있다. 따라서 실험목적에 부합되는 적절한 검력계를 수시로 구입하는 것은 용이하지 않다. 뿐만아니라 실험목적에 따라 실험목적에 맞는 치수, 형식 등의 제약조건이 있어 그때마다 적합한 검력계를 개발하여 사용하는 것이 필요하게 되고, 최근 실험들에서는 (예, 임장규[1989], 서홍원[1993])로 드 션을 원하는 형태로 자체 제작하여 사용하여 실험성이나 정확성에서 충분한 성과를 얻은 것으로 알려져 있다.

한편, 통상적인 프로펠러 시험기에서는 추력 및 토크 검력계와 회전수의 계측이 동시에 이루어져야 하며 축계가 회전되고 있는 상태에서 모든 계측이 이루어져야 하는 것이 전제 되어있다. 이러한 조건을 충족시키기 위하여 통상의 프로펠러 시험기에서는 신호검출을 정밀한 슬립링을 이용하여 얻고 있다. 슬립링의 사용은 기기의 가격을 높이는 문제점을 안고 있을 뿐만 아니라, 세심하게 관리하지 못하는 경우에는 계측치의 신뢰도를 떨어뜨리는 원인이 된다. 또한, 전동기와 검력계부분이 분리되어 있어 대형의 기기사용이 제한되는 시설에서는 적용도가 떨어지고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 현실에 착안하여 소형회류수조에서도 사용이 가능하고 값싸며 신뢰도나 내구성 면에서 뛰어난 시험기의 설계개발을 시도하였다. 설계의 주요 착안점은 전동기와 검력계를 일체형으로 하여 소형화하고 전동기의 반동력을 계측구조부재로부터 직접 검출하는 방식으로 함으로서 슬립링을 제외시키는데 두었다.

프로펠러 단독실험을 위해 만들어진 시험기는 구동부와 계측부가 조합된 일체형으로 제작되었으며 구조부재를 계측부재로 효율적으로 이용함으로써 슬립링을 제외시킬 수 있게 되어 경량화 및 소형화를 이루게 되었다.

개발된 시험기는 비교적 작은 모형을 사용하는

소규모의 실험에 적합하며 신뢰성도 기존의 제작된 시제품의 실험결과로부터 확인되었다. 또한 본 시험 장치의 개발과정을 통해 축적된 설계 및 제작 기술은 장차 다양한 검력계의 개발에 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 사료된다.

2. 시험기의 형상 및 특성

2.1 전체적인 구성

개발된 계측장치의 축계를 제외한 모든 부재는 두랄루민 계열의 알루미늄 합금으로 제작되었으며 전체적인 형상은 Figure 1 과 같다. 프로펠러로 연결되는 축은 일단 두개의 유니버설 조인트를 이용하여 계측기의 높이와 프로펠러 축 높이의 차이가 있는 경우에도 원활하게 회전동력이 전달되도록 계획하였다. 전달된 축계의 추력은 베어링케이스에 전달되도록 하였으며 전동기의 양단을 베어링으로 지지하여 베어링케이스의 부재가 전동기의 반동력을 검출하도록 하였다. 추력 계측부와 구동 모터 사이에는 벨로우즈형 후렉시블 커플링(flexible coupling) 두어 추력과 토크의 간섭을 극소화하여 진동 및 소음을 최소화하였다.

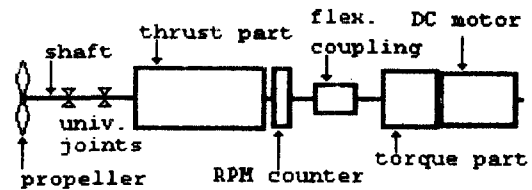


Fig. 1 A sketch of general arrangement of the propeller open water testing device

추력 계측부는 Figure 2 의 사진과 같은 형상을 하고 있다. 전체적인 형상은 추력이 전달되는 축을 지지하는 베어링케이스를 외부구조부재와 얇은 4개의 박판형기둥으로 연결되도록 일체로 방전가공한 모양이다. 축방향으로 힘이 주어지면 4개의 박판형기둥이 굽힘 변형을 일으키게 되며 이 때 표면에 발생하는 변형율을 스트레인 게이지로 계측하도록 계획하였다. 토크 계측은 Figure 3에 보인 계측부재에서 이루어진다. 추력계측부를 지나는 축에는 벨로우즈형 후렉시블-커플링이 있어 토크 계측 부에는

추력이 전달되더라도 벨로우즈에서 흡수되어, 토크만이 전달되도록 계획되었다. 계측부는 Figure 3에서와 같이 방사상으로 배열된 4개의 박판형기둥으로 일체로 연결된 두개의 정사각형 부재로 이루어져 있다. 이 부재는 축과 전동기를 받쳐주는 베어링 케이스의 역할을 하도록 계획되어 있다. 한쪽 베어링 케이스는 시험기의 본체에 연결되며 동시에 회전동력을 전달하는 축의 베어링을 받쳐주게 된다. 다른 한쪽의 베어링 케이스는 베어링을 받쳐주는 이외에 전동기와 직결되어 있다. 따라서 회전동력이 전달되어 전동기의 고정자에 반동력이 발생되며 두개의 베어링 케이스 사이에는 축을 중심으로 인한 각변위가 나타나게 된다. 이 각변위는 두개의 케이스 사이를 연결하는 기둥에 굽힘 변형을 일으키게 되고 이를 스트레인 게이지로 계측하도록 계획하였다. 이와 같은 방식을 사용하면 축과 전동기의 회전자는 운전중 회전하더라도 검출부에는 전동기 고정자에서 발생하는 반동력만이 작용하며 따라서 입출력 신호의 검출을 위하여 불가피하다고 생각되던 슬립링을 제외시키더라도 토크의 검출이 가능하게 된다.



Fig. 2. Appearances of the thrust measuring part seen from various directions.

2.2 계측부위의 치수결정

계측부재의 치수가 되는 박판형 기둥 하나의 크기를 $L \times B \times H$ 라 하고 Figure 4와 같이 한쪽단이 고정되고 다른 한쪽단에 F 의 하중이 주어지는 외팔보로 이상화하자 (L, B, H 는 Figure 5에서 각각 박판의 높이, 폭 그리고 두께를 나타낸다). 이 때 임의의 길이방향 위치에서의 굽힘 모우먼트와 단면에서의 굽힘응력은 아래와 같이 된다. (Dally[1978]).

$$M(x) = P(x - \frac{L}{2}); \sigma(y) = \frac{yM(x)}{I} \quad (1)$$

스트레인 게이지를 $x=L/4$ 에 부착시켜 변형율을 계측하기로 한다면 위의 식에 $x=L/4$ (변형율을 계측할 위치)와 $I=BH^3/12$ 를 넣어 박판의 앞뒤 표면에서의 굽힘응력을 얻고 이에 해당하는 변형율을 구하면 각각 아래의 표현이 얻어진다.

$$\sigma_{max} = \frac{\frac{PL}{4} \frac{H}{2}}{\frac{BH^3}{12}} = \frac{3LP}{2BH^2} \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma_{max}}{E} = \frac{3LP}{2BH^2E} \quad (3)$$



Fig. 3. Appearances of the torque measuring part seen from various directions.

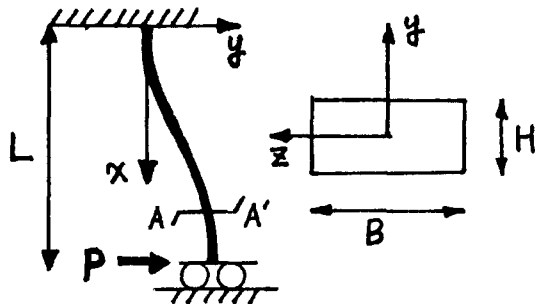


Fig. 4. A schematic force/deformation sketch and the coordinates.

시험대상 프로펠러의 최대직경을 10cm로 가정하고 추력계수를 0.5로 가정할때 추진기의 예상추력은

2000 rpm에서 60N이 된다. 따라서 한개의 기둥은 15N의 하중을 받는 것으로 생각할 수 있다. 검력계의 소재인 알루미늄합금의 물성, 스트레인 게이지의 특성들을 활용하면 검출부의 변형율은 1000×10^{-6} 까지 허용하는 것이 바람직한 것으로 나타난다. 그외에 그리고 가공의 편이성과 계측기의 구조적 안정성을 고려하고 스트레인 게이지의 치수 및 접착과 배선 작업등을 고려하여 박판형기둥의 치수를 $L=11\text{mm}$, $B=8\text{mm}$, $H=1\text{mm}$ 로 결정하였으며, 그 상세치수를 Figure 5에 보였다. 같은 실험대상 프로펠러의 2000rpm에서의 토크계수 Kq 를 0.12로 가정하면 예상되는 최대 토크는 1.33 N-m가된다. 이를 이용하여 앞에서와 같은 요령으로 구조부재의 치수를 우선 결정할 수 있다. 얻어진 계측부의 구조는 Figure 6에 보이였다.

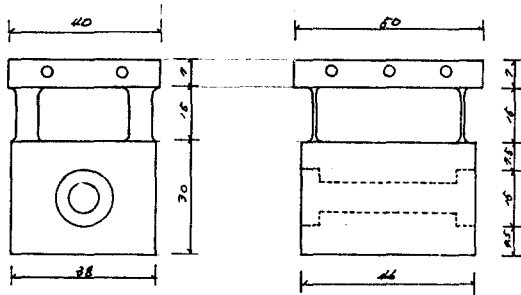


Fig. 5. Drawings of the actual thrust measuring part.

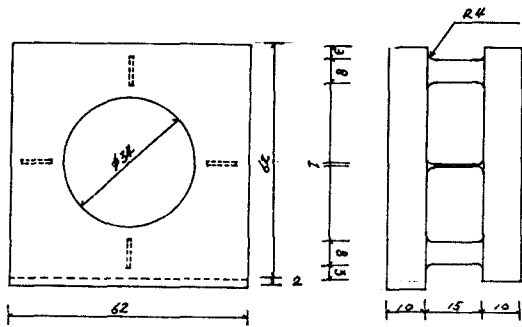


Fig. 6. Drawings of the actual torque measuring part.

2.3 Strain Gauge 의 배열과 Wheatson Bridge

전절에서 설명하였듯이 추력과 토크는 각 4개의 박판형기둥의 앞뒤면에 즉 인장과 압축면에 스트레인 게이지를 부착하여 계측하는 것으로 계획하였다. 스트레인 게이지로는 축력의 안정도가 높은 350Ω급의 것을 사용하였으며 회로의 특성을 검토하여 (Dally[1987], 임영하[1969], 백종승[1987, 참조), Figure 7 과 같은 Wheatson Bridge를 계측회로로 선정하였다. 검출부의 구조형식이 4개의 박판형기둥으로 이루어졌으므로 추력에 의하여 인장변형이 나타나는 4개의 면과 압축변형이 나타나는 4개의 면이 존재하게 된다. 따라서 저항의 증가가 검출되는 4개의 스트레인 게이지와 저항의 감소가 검출되는 4개의 스트레인 게이지로 회로를 구성할 수있게 된다.

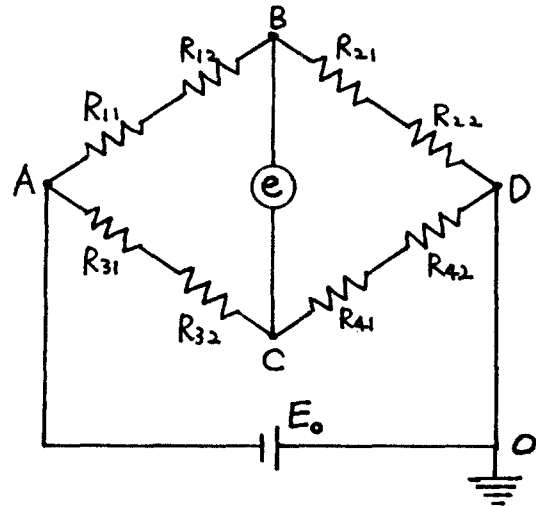


Fig. 7. The Wheatson bridge used. The same bridge applies both for the thrust-meter and the torque-meter.

서로 마주 보는 변이 되는 변 AB 와 CD에는 저항의 증가가 나타나는 2개의 스트레인 게이지를 연결하고 마주보는 다른 변에는 저항의 감소가 나타나는 2개의 스트레인 게이지를 연결하여 회로를 구성한다. 인장과 압축을 받는 스트레인 게이지 2개씩을 사용하여 브리지회로를 구성하게되면 보다 안정된 계측치를 얻는것이 가능하게된다. 브리지 전압(E_0)으로 12 Volt 를 걸어주면 출력전압은 e가되고 0점은 접지점을 기준으로 나타낸 것이다. 절점사이의 저항

은 직렬 연결됨으로 아래의 식으로 나타내어진다.

$$R_i = R_{i1} + R_{i2}, \quad i=1,2,3,4 \quad (4)$$

그리고 절점사이를 흐르는 전류는 A로부터 B로 흐를때를 I_{AB} , A로부터 C로 흐르는 전류를 I_{AC} 라 하면 I_{AB} 와 I_{AC} 는 (5)식으로 나타내어진다.

$$I_{AB} = \frac{E_0}{R_1 + R_2}, \quad I_{AC} = \frac{E_0}{R_3 + R_4} \quad (5)$$

결국 우리가 측정하고자하는 전압 e 는 점B 와 점 C 사이의 전위차이므로 식(5)를 이용하여 정리하면 아래와 같다.

$$e = V_B - V_C = R_2 I_{AB} - R_4 I_{AC} \quad (6)$$

$$= E_0 \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right]$$

스트레인 게이지를 구조부재의 형상과 하중에 대한 변형특성을 고려하여 인장및 압축 변형율의 절대값이 같아지도록 배치할 수 있다. 스트레인 게이지의 선정에서 게이지의 저항이 350Ω인 것을 선정하였으므로 각각의 게이지 저항 R_{ij} 는 저항의 변화량 r_{ij} 를 써서 $R_{ij} = R_0 + r_{ij}$ 로 표시할 수 있다. 저항 증가량 r_{ij} 는 $r_{ij} = KR_0 \epsilon_{ij}$ 로 표시되며 선정된 스트레인 게이지에서는 게인상수는 $K = 2.1$ 이 된다. 인장 및 압축에 대한 변형율이 같아지도록 게이지의 부착위치를 선정하였으므로 게이지들의 저항변화도 (7)식으로 표시할 수 있게 된다.

$$r_{11} = r_{12} = r_{41} = r_{42} = KR_0 \epsilon \quad (7)$$

$$r_{21} = r_{22} = r_{31} = r_{32} = KR_0 (-\epsilon)$$

(7)식을 (6)식에 넣어 다시 정리하면 아래의 결과를 얻는다.

$$e = E_0 \left[\frac{2R_0 + 2R_0 K \epsilon}{(2R_0 + 2R_0 K \epsilon) + (2R_0 - 2R_0 K \epsilon)} - \frac{2R_0 - 2R_0 K \epsilon}{(2R_0 + 2R_0 K \epsilon) + (2R_0 - 2R_0 K \epsilon)} \right] \quad (8)$$

$$= E_0 K \epsilon$$

이 결과에 의하면 (3)식의 관계와 선정된 구조치수를 대입하여 결정한 최대허용 변형율 $1000 \cdot 10^{-6}$ 일때의 브리지 전압을 예측하면 약 25 mili-Volt가 되며 이는 흔히 사용되는 스트레인 증폭기로 쉽사리 검출될 수 있는 값임으로 선정된 부재치수가 타당한 값임을 확인 할 수 있다.

2.4 정적 하중을 이용한 검력계의 검증

제작된 시험기의 추력검출부와 토크검출부에 정적하중을 부하시키고 얻어지는 출력을 정리하면 Figure 8과 9의 결과를 얻게 된다. 앞절의 (3)식과 (8)식을 결합하고 $P = F/4$ 를 대입하면 출력전압 e 와 하중 F 사이에는 (9)식과 같은 함수관계가 존재하게 된다

$$e = E_0 K \epsilon = \frac{3LE_0 K F}{8BH^2 E} \quad (9)$$

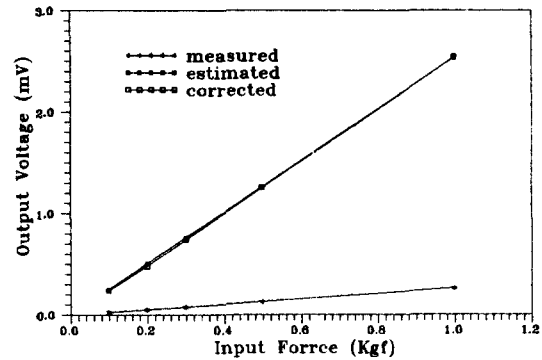


Fig. 8. Static calibration results along with the estimated for thrust.

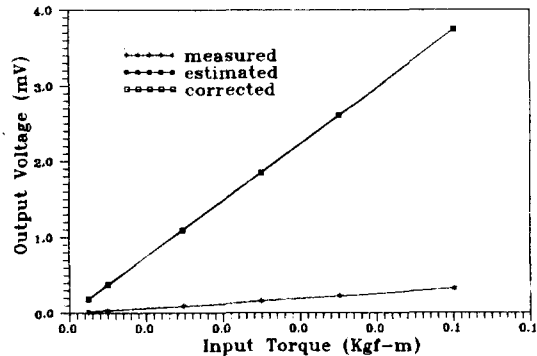


Fig. 9. Static calibration results along with the estimated for torque.

이 값은 브리지 회로에서 얻어지는 출력전압의 예측치가 된다. 이 값과 검정시험에서 얻어진 출력전압

을 함께 표기하였다. Figure 8,9의 두경우에서 볼 수 있듯이 추력과 토크 모두 우수한 선형성을 보이고 있다. 예측치와 검정 시험결과가 절대치에서는 차이를 보이나 모두 우수한 선형성을 보이고 있다. 절대값의 차이는 설계 당시 Figure 4와 같이 극단적으로 이상화된 모델을 사용함에 기인한다고 사료되는데, 축계와 지지틀이 복잡하게 얽혀 힘의 전달 메커니즘이 단순하지 않은 본 시스템과 같은 장비의 설계시 좀 더 세심한 주의가 요구된다 하겠다. 두 곡선의 기울기로부터 교정상수를 구하고 이를 적용하면 교정 출력값과 이론적 추정값은 그림과 같은데 선형성은 1.3% 이다. 설계하중을 약 6Kg으로 설정하였으나 검정시험은 2Kg까지 수행하여 충분한 선형성을 확인 하였다. 일반적으로 축계를 얇은 박판이 지지하는 형식이 될 경우에 축계의 미세한 편심 등에 의해 유기되는 진동이 우려되는데, 본 장비의 경우 후렉시블-커플링의 사용으로 그와 같은 계측치의 떨림은 관찰할 수 없었으나 제작시 축계와 지지부의 진직도 유지는 매우 조심스럽게 다루어져야 한다.

따라서 설계제작된 추진기 단독시험기의 추력 검출부와 토크 검출부는 세심한 검정시험을 거친다면 정밀한 출력을 얻을 수 있음이 확인되었으며 실제의 계측에서는 브리지의 출력전압을 적절한 증폭비로 증폭시킴으로써 부하를 직접 읽어 낼 수 있을 것으로 판단된다.

3. 프로펠러 단독시험 에

개발된 프로펠러 단독시험기의 최종검증을 위하여 동일한 프로펠러로 새로 개발된 시험기와 기존의 시험기로만 단독시험하고 그 결과를 비교하고자 하였다. 회류수조에서의 정성적 실험을 위하여 제작된 직경 10 cm, 날개수 5, 피치비 약 1.0인 프로펠러를 대상으로 하여 실험하였다. 검출부를 내장하고 있는 프로펠러 단독시험기를 써서 RPM을 1700에 고정시켜 시험을 수행하고 결과를 Figure 10a에 보였다. 개발된 시험기를 이용하여 얻은 결과를 Figure 10b에 보였는데, 두 장비에서 얻어진 Kt 및 Kq가 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 기존의 시험기를 이용하여 얻은 결과는 J가 작은 경우에 오히려 불합리하게 느껴지는 Kq값을 보이고 있으나, 두 시험기의 구조형식의 차이가 있으며 축계의 배치와 형식에 차이가 있음을 감안할 때에 두 계측기를 사용한 계측치의 차이는 앞으로 개선을 통하여 쉽사리 해소될 수 있을 것으로 기대된다.

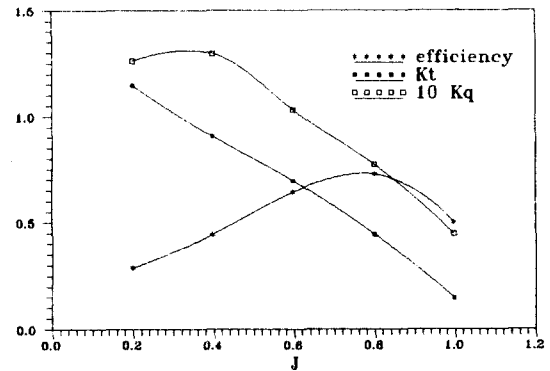


Fig. 10a. POW results obtained by using commercial dynamometer.

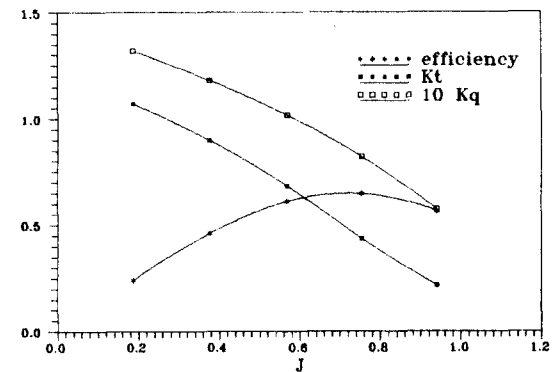


Fig. 10b. POW results obtained by using the developed dynamometer.

4. 결 언

회류수조등에서 사용할 것을 목표로 소형프로펠러 단독시험기를 설계제작하고 이를 시험 검증하였다. 설계에서 시험기의 구조부재가 추력 및 토오크를 검출하는 기능을 가지도록 설계제작하는 한편 전동기의 고정자에 발생하는 반작용력을 계측하는 방법을 사용하였다. 따라서 종래의 시험기에서 회전부재의 비틀변형을 계측하는 방식과는 다르게 슬립링을 제거할 수 있었다. 전동기를 일체형으로 시험기와 결합함으로써 종래의 시험기에 비하여 시험장치를 소형 경량화 시킬 수 있었다. 개발된 시험기의 정적 검정 시험 결과는 매우 만족스러우며 기존 시험기와 비교 시험결과도 재현성있는 결과를 주고 있다. 따라서 개발된 시험기는 기기의 소형화가 요구되는 회류수조용으로 적합하다고 판단되며 동적인 특성을 개선함으로써 선형시험수조 및 캐비테이션 터널에서도 활용될 것으로 기대된다. 또 얻어진 경험은 선형시험수조등에서 쓰여지는 계측장비의 설계에서도 기초기술로 활용될 것으로 기대된다.

후 기

계측기의 검증 실험과 결과 정리에 도움을 준 서울대학교 저항추진연구실의 안해성군 등 대학원생들께 감사함을 표합니다.

참 고 문 헌

- [1] Dally, J.W. and Riley, W.F., *Experimental Stress Analysis*, 2nd ed., McGraw-Hill, 1978.
- [2] 백종승, 강대임, 이덕기, 김동진, 장원철, 나두영, "고정밀 로드셀 개발", 한국표준연구소 보고서, KSRI-87-32- IR, 1987.
- [3] 서홍원, "준 정상상태에서의 조파저항에 관한 실험적 연구", 석사학위논문, 서울대학교, 1993.
- [4] 염영하, 한웅교, 스트레인 게이지 기술, 서울대학교 기계공학과편, 1969.
- [5] 임창규, "선미노의 추력발생 기구 규명을 위한 실험적 연구", 석사학위논문, 서울대학교, 1989.