

## 論 文

大韓造船學會論文集  
 제 30 卷 第 4 號 1993 年 11 月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 30, No.4, November 1993

### 선미변동압력 계측시험에서의 불확실성 해석

최근일\*

#### Measurement Uncertainty Analysis for Fluctuating Hull Pressure

by

G. I. Choi\*

#### 요 약

캐비테이션 터널에서 변동압력의 정확한 계측은 실선에서의 진동과 소음세기 예측에 필요하다. 본문에서는 프로펠러 캐비테이션에 의해 야기되는 변동압력의 실험적연구 결과를 나타내고 논의 한다. 문제시 되고 있는 프로펠러 회전수에 의한 영향을 이해하고자 변동압력을 캐비테이션 터널에서 평판을 이용하여 여러 회전수에서 계측 하였다. 균일류에서 오차를 추정하기 위하여 계측 및 계측결과에서의 불확실성 해석이 사용 되었다.

#### Abstract

Accurate measurements of fluctuating pressure in the cavitation tunnel are necessary to predict vibration and noise intensities in full scale ship. In this paper, the results of an experimental study on fluctuating pressure induced by a cavitating propeller are presented and discussed. Extensive measurements at several propeller revolutions are made using the flat plate to understand controversial problems of the effects of propeller revolution in the cavitation tunnel. The analysis of the uncertainties in experimental measurements and results is used to estimate the errors in uniform flow.

#### 1. 서 론

선미에서 불규칙하게 반복되는 변동압력이 선체진동의 주요한 원인중의 하나로 되고 있다. 이러한 연

유로 그동안 프로펠러 캐비티에 대한 연구가 다방면에 걸쳐 수행되어 왔으며 일부 결과는 설계초기에 응용되고 있다[8,13]. 하지만 프로펠러 날개 위에서의 캐비티 거동을 정확하고 엄밀하게 이론적으로 추정

발 표 : 1993년도 대한조선학회 춘계연구발표회('93. 4. 17)

접수일자 : 1993년 5월 15일, 재접수일자 : 1993년 7월 19일

\* 정회원, 현대선박해양연구소

한다는 것은 매우 어려운 일이며 앞으로 상당기간 동안 연구가 계속 진행되어야 할 과제이다. 이에 더하여 캐비테이션에 의해 수중에 전파되는 변동압력을 추정한다는 것은 더욱 문제를 어렵게 만들고 있다.

모형시험에서 계측을 통하여 선미에서 프로펠러에 의해 야기되는 변동압력을 추정하고자 하는 노력도 적지않게 수행되어 왔으나[7,10,11] 이 방법에도 많은 문제점이 있는 것으로 지적 되었다. 제18차 ITTC [16] 전세계적인 계측결과 비교에서도 알 수 있듯이 변동압력 계수가 실선 계측치와 잘 일치하지 않을 뿐만 아니라 각 기관끼리의 결과치에도 많은 차이를 준 것으로 나타나 있다. 이러한 계측결과의 차이에는 여러 가지 이유가 있겠으나 ITTC[16]에서는 잠정적으로 반류분포 재현의 차이, 기포동력학(Bubble Dynamics), 동적응답(Dynamic Response) 등이 원인 일 것이라고 보고하고 있다.

선미 변동압력 계측에서 발생할 수 있는 오차를 세밀하게 분석 내지는 추정하여 오차해석을 정확하게 한다는 데에는 상당한 무리가 있으리라 예상 된다. 또한 구체적으로 무슨 요인 때문이다 라고 확신을 하기에는 너무도 많은 오차요인이 존재하고 있고 복잡적으로 작용하고 있다. 이러한 이유로 실험수행자나 연구자들이 무관심하게 취급한 계측의 정확도에 대하여 다시 한번 중요성을 강조하고 시험에서 그 동안 간과되었거나 무시되었던 각종 계측기기들의 정확도를 조사하고자 하는 것이다.

## 2. 캐비테이션 터널

모형시험에서 프로펠러에 의해 선미에 야기되는 변동압력은 캐비테이션 터널 혹은 예인수조에서 측정할 수 있으나 프로펠러 날개에서의 캐비테이션 거동이 변동압력에 지대한 영향을 끼치기 때문에 기하학적 상사와 함께 역학적 상사 중에서 캐비테이션 수가 중요한 역할을 하므로 가감압 시설이 되어 있는 MARIN(네덜란드)의 진공수조 이외에는 대부분 캐비테이션 터널에서 계측을 수행하고 있다. 캐비테이션 터널은 형식상 아래와 같이 구분할 수 있다.

- 대형 캐비테이션 터널(예인수조 모형선 사용)
- 중형 캐비테이션 터널(더미 모델 또는 평판 사용)
- 소형 캐비테이션 터널(평판 사용)

대형 캐비테이션 터널에서는 계측부의 단면이 크기 때문에 예인수조에서 사용하는 모형선을 수정없

이 사용할 수 있어 예인수조 반류에서의 변동압력 계측이 가능하다. 이렇게 함으로써 선형에 의한 효과도 고려할 수 있고 나아가서는 타(rudder)나 부가물(appendage)에 의한 영향도 고려할 수 있다는 이점이 있다[22,24,25]. 반면에 자유수면에 의한 영향을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 또 다른 문제는 대형 캐비테이션 터널이 중형이나 소형 캐비테이션 터널보다 모든 점에서 월등하다고 증명하기에는 아직도 문제가 있다.

중형 캐비테이션 터널은 더미모델을 사용할 수 있는 크기의 계측부를 갖고 있다. 예인수조에서 사용한 모형선을 사용할 수가 없기 때문에 반류재현에 어려움이 많으며 특히 고속에서는 와이어 매쉬에 의한 기포가 많아지게 된다. 평판을 이용해서 변동압력을 측정하는 경우에는 와이어 매쉬에 의해 측방향반류를 재현 한다.

소형 캐비테이션 터널은 와이어 매쉬에 의해 재현된 반류하에서 평판을 사용하여 변동압력을 계측하기 때문에 정도는 떨어지지만 간편하고 경제적이다. 계측부의 단면적이 작기 때문에 생기는 벽면효과가 클때도 있으므로 시험시 주의해야 한다.

현대선박해양연구소에서 보유하고 있는 캐비테이션 터널은 Kempf & Remmers K-15 형으로 구비하고 있는 계측부는 2종류이며 사용목적에 따라 상호교환이 가능 하다. 계측부에 대한 사양은 Table 1 과 같다. 본 연구에서 사용한 계측부는 2 계측부로서 제 1 계측부에 비하여 유속은 느리나 벽면효과, 평판설치 등에 의한 영향을 고려할 때 유리한 것으로 판명되어 선택 하였다.

Table 1 Measuring section in cavitation tunnel

	계측단면의 크기	계측부의 유속
1계측부	60 × 60 cm	최대 12m/sec
2계측부	85 × 85 cm	최대 6 m/sec

## 3. 시험대상 및 조건

컨테이너 운반선인 독일의 "Sydney Express[5, 17]"를 대상선박으로 정하였으며 이 선박의 주요제원은 Table 2에 나타내었다. 시험에 사용된 프로펠러의 주요목은 Table 3에 캐비테이션 터널의 반류분포를 Fig. 1에 나타내었다. 계측에 사용된 캐비테이션 터널 제 2 계측부에 설치된 평판의 일반배치는 Fig. 2에 평판에 고정된 압력변환기의 위치는 Fig. 3에 나타

Table 2 Principal dimension of ship

LBP (m)	210.0
LWL (m)	215.80
B (m)	30.5
d (m)	11.0
C <sub>B</sub>	0.616
Δ (m <sup>3</sup> )	43457.
BHP (PS)	32454.
SPEED (Kts)	22.0

Table 3 Principal particulars of propeller

	Ship	Model
Diameter (mm)	7000.	250.
Hub ratio	0.167	0.167
P / D at 0.7 r	0.97	0.97
P / D at blade tip	0.954	0.954
P / D mean	0.935	0.935
Exp. area ratio	0.78	0.78
No. of blade	5	5

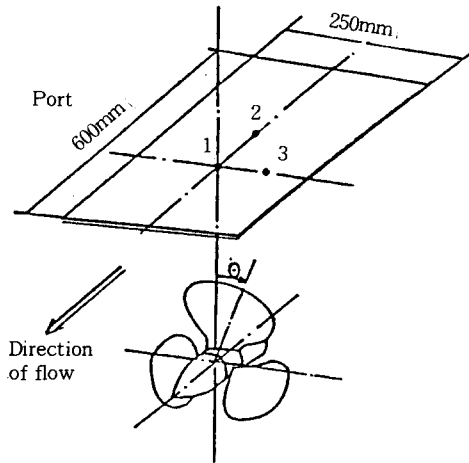
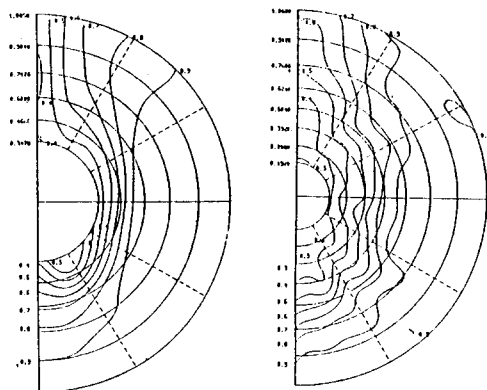


Fig. 3 Arrangement of pressure pick-up



Estimated full scale wake      Simulated wake  
Fig. 1 Axial wake distribution

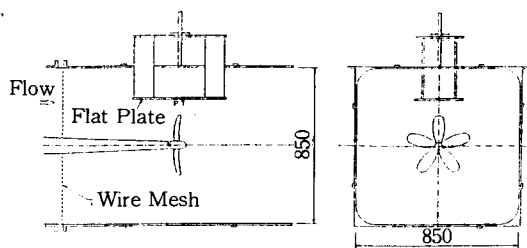


Fig. 2 Arrangement of flat plate

내었다.

압력변환기는 영국 Gaeltec 사에서 제작한 Absolute Strain Gauge 형을 사용하였는데 Membrane의 지름이 3mm 이며 고유진동수는 물속에서 약 20kHz 압력 측정 범위는 -1.0 bar ~ +0.6 bar 이다. 압력변환기의 고유진동수는 측정하고자 하는 신호의 주파수(1kHz 이하)보다 충분히 크기 때문에 계측상 문제는 없다고 할 수 있다. 압력변환기의 설치에 따른 오차요인을 최소화하기 위하여 압력변환기의 Membrane이 평판의 표면과 일치하도록 o-ring 과 볼트, 와셔등을 사용하여 고정시켰다. 압력변환기를 통해 전달되는 신호들은 직류증폭기(DC-Amplifier)에서 증폭된후 IID(Inductive Impulse Device)에서 나오는 충격(Impulse) 신호들과 함께 퍼스널 컴퓨터에 저장된다. 이때 신호특성들은 F.F.T.(Fast Fourier Transformation) 주파수 신호 분석기(Spectrum Analyzer)로 실시간(real time)에서의 신호의 특성을 모니터링 하여 신호들이 안정되고 이상이 없다고 판단되면 컴퓨터에 저장시킨다. 컴퓨터에 저장된 신호들은 나중에 수치조화분석(Digital Harmonic Analysis)을 수행하는데 Fourier 급수로 전개 한다.

시험은 균일류와 불균일류에서 수행하였고 프로펠러 회전수에 의한 영향을 조사하기 위하여 여러 가지

Table 4 Test condition

	K <sub>T</sub>	σ	rps(n)
Uniform	0.233	1.0	20, 22, 23, 25
Non-Uniform	0.184	1.826	15, 17, 19, 20, 22, 23, 25

회전수에서 실시하였으며 계측시의 시험조건은 Table 4와 같다.

#### 4. 시험상의 문제

예인수조에서 사용하는 모형선을 그대로 캐비테이션 터널에서 사용하거나 혹은 더미 모델을 이용하거나 또는 와이어 메쉬에 의해 반류를 재현 변동압력을 계측하여도 실선에서의 계측치와 비교하여 본 결과에 의하면 만족치 못한 결과를 얻었다. 이의 원인으로서는 변동압력 계측시에 반드시 거론되는 아래와 같은 문제가 있다.

- 반류재현(Wake Simulation)
- 기포핵(Bubble Nuclei)

실제적인 견지에서 보면 프로펠러는 실선 반류 하에서 동작하기 때문에 캐비테이션 시험이나 변동압력 계측은 재현된 실선 공칭반류분포 하에서 수행되어야 마땅하지만 시험 당시 실선 반류분포를 계측하거나 또는 예측하기가 어렵다는데 문제가 있다. 캐비테이션 터널에서 변동압력 계측시 실선 반류분포의 중요성은 Hadler[12], Okamoto[15] 등에 의해 강조되었으며 이는 변동압력이 반류분포의 하모닉 성분에 비선형의 관련이 있고 캐비테이션의 시간적 변화율에 따라 변하기 때문에 캐비테이션이 관계되는한 평균 반류만 고려하는 것은 충분치 않다. 모형선 반류분포를 실선 반류분포로 바꾸는 데에는 Sasajima[1], Hoekstra[2]에 의해 제시된 방법이 있다.

캐비테이션의 발생에 있어서 수조수 속의 기포핵이 중요한 역할을 한다는 것은 오래전부터 알려진 일이지만 캐비테이션 시험은 물속에 녹아 있는 공기함유량을 변화시켜 실시하고 있다. 실제적으로 관측이 잘 되도록 하는 것은 이전부터 주로 경험에 의존하는 경우가 많다. Ukon[21]에 의하면 공기함유량이 ITTC 기준이나 그의 1.5배로 하여도 캐비테이션의 불안정성을 억제 하는 것은 가능치 않고 이의 원인으로서는 캐비테이션 터널의 물속의 기포핵의 수가 실제 해수와 비교해서 급격히 적은 것과 함께 프로펠러 날개 앞날 근처의 압력이 비교적 shock free에 가까운 상태에서 작동하기 때문이라 하고 있다. 이러한 이유로 해서 모형시험에서 캐비테이션의 초기발생 단계에 캐비테이션 발생이 어렵게 되어 변동압력 신호가 주기적이 되지 못하고 해석된 진폭이 작게 되며 위상이 늦어지

는 경향이 있다. Friesch[25]에 의하면 대형 캐비테이션 터널의 경우 공기함유량의 영향은 캐비테이션의 크기에는 거의 영향이 없으나 캐비테이션의 안정성에는 민감하다고 보고하고 있다. 따라서, 캐비테이션 안정성에 필요한 공기함유량은 중형 캐비테이션 터널보다 높다고 지적하고 있다.

이러한 캐비테이션 불안정성 문제를 해결 하는 법으로서 전기분해에 의해 수소기포를 수조에 공급하는 방법이 있다. 이것은 가압수조에서 시작된 것으로 캐비테이션 발생을 안정 시키는 것이 가능해서 변동압력 계측에 유리한 것으로 이해되고 있다. 다른 하나는 프로펠러 앞날에 모래를 도포하여 거칠기를 주는 방법이 검토되고 있다. 이 방법은 상류에서 기포를 발생시키지 않아도 될 뿐만 아니라 프로펠러 익면상에서 난류축진을 시킨다는 의미도 있다[4]. 그러나, 거칠기 그 자체가 미세한 캐비테이션을 발생하여 프로펠러에서의 초기발생이 불명확하게 되는 것이나 거칠기 자체 저항에 의한 프로펠러의 성능에 약간의 변화를 갖게 된다[23]. 프로펠러 날개에 모래등을 도포하여 거칠기를 주는 방법이 프로펠러 캐비테이션 발생 및 안정성에 매우 중요하고 효율적이기는 하지만 실제로 거칠기의 크기, 도포량, 도포방법등에 대하여는 확실하게 정립된 방법이 없고 대개 경험에 의존하고 있어 각 기관마다 다양한 방법으로 수행하고 있다. 본 시험에서는 반류재현은 실선반류로 하고 기포핵의 영향은 단지 수조내의 공기함유량을 ITTC 에서 권고 하는 대로 하였다.

이외에 캐비테이션 터널에서 변동압력 계측시 생 각 하여야 할 것은 캐비테이션 터널 본체의 진동과 계측부 앞에 설치되어 있는 평판의 고유진동수이다. 캐비테이션 터널 물을 회전시키는 임펠러 기진력과 계측부 평판에 의한 진동이 실제 변동압력 계측의 공진력 대와 일치되지 않는가를 조사하기 위하여 캐비테이션 터널 본체와 계측평판의 진동을 계측한 결과 양호한 것으로 판명 되었다.

#### 5. 변동압력 계측

계측은 실선의 시운전 조건으로 하였으며 캐비테이션 패턴은 여러 각도 위치에서 관찰 하였다. 변동압력 계측점은 더미모델을 사용하는 경우에는 실선의 위치와 같은점에 압력변환기를 설치하는 것이 가능할지 모르지만 평판의 경우에는 제작상의 문제로 반드시 일치되지는 못한다. 특히, 모형 프로펠러의

크기에 따라 평판을 새롭게 제작 해야 하는 어려움이 따르므로 기존에 확정되어 있는 위치에서 계측을 하였다. English[7]가 지적하였듯이 감압상태에서 시험을 하는 경우 공기함유량이나 기포핵이 시간에 대해 매우 민감하므로 시험의 수행은 가능한 한 단시간 내에 되도록 하였다.

-균일류중의 시험

불균일류중의 시험은 반류재현의 방법 및 분포동에 따라 오차가 발생할 우려가 있으므로 우선 균일류중에서 시험을 수행하여 Ukon[21]의 결과와 비교하고자 하였다. 이때의 시험범위와 조건은 Table 4에 표기한대로 하였으며 평판과 프로펠러 축 중심 사이의 간격은 0.767D로 하였다. 단 여기에서 D는 프로펠러 직경이다. 공기함유량( $\alpha/\alpha_s$ )은 ITTC[3]에서 권고하는 대로 0.3~0.5 인 약 0.40로 하였다. 이 값은 시험수조에서 통상 쓰고 있는 값이며 이 상태에서 캐비티 현상이나 사진이 깨끗하게 찍힌다. 공기함유량 계측은 물속에 녹아 있는 산소를 측정하는 DO-meter를 사용 하였다. 프로펠러 날개 표면에 거칠기를 주기 위하여 날개 앞날로부터 3.0mm 까지 전 구간에 걸쳐 63  $\mu$ m 크기의 모래를 도포 하였다.

변동압력판이 있을때 프로펠러 회전수 25rps에서 관찰된 캐비테이션 패턴은 Ukon[21]의 결과와 함께 Fig. 4에 나타내었다. 캐비테이션 현상의 스케치는 관찰자의 보는 관점에 따라 차이가 있을 수 있으며 캐비테이션 발생범위 보다는 캐비테이션의 거동 및 질등이 변동압력에 미치는 영향이 더욱 크다[12]. 거칠기 없을 때보다 거칠기가 있는 경우가 캐비테이션의 양은 많으나 거동 자체가 안정적인을 Fig. 4에서 관찰 할 수 있다. 프로펠러 회전수에 따른 날개 주파수의 변동압력 계수를 일본 각 연구기관의 결과와 함께 Fig. 5에 보여주고 있다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 프로펠러 회전수에 의한 영향은 무시할만 하지만 균일류 일지라도 각 연구기관의 계측결과 사이에는 차이를 보이고 있다. 균일류에서는 예상한 바와 같이 날개 주파수 이외의 다른 주파수 영역에서는 거의 진폭이 나타나지 않았다. 거칠기가 없는 것이 캐비티 거동이 불안정하여 전체적으로 진폭이 높게 계측된 것으로 생각된다.

-불균일류중의 시험

불균일류에서의 시험은 균일류중에서의 그것과 비교할 때 안정치 못한것이 사실이다. 불균일류중 시험

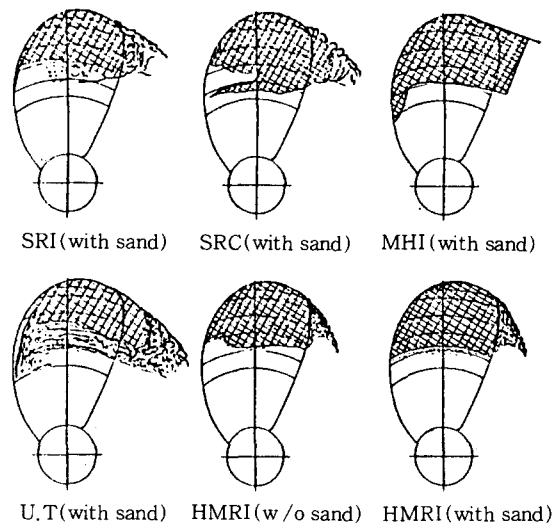


Fig. 4 Back cavitation pattern in uniform flow

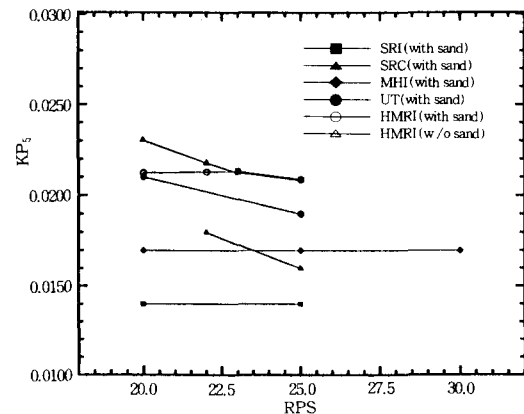


Fig. 5 Pressure amplitude of 1st blade rate at No. 1 position in uniform flow

에서 불균일 유동장을 회전하는 프로펠러와 캐비티의 영향 때문에 동력계의 추력이 미세하게 변동하게 되고 장시간 시험을 실시하는 경우 수조의 감압상태가 조금씩 변화되게 된다. 따라서 실선의 시험조건으로 한 후 20여분간 워밍업 한 후 모든 것이 안정된 후에 계측에 임하였으며 여러 회전수에서 시험을 장시간 수행함으로써 생기게 되는 공기 유입사태를 방지하기 위해 매 회전수마다 새로이 캐비테이션 터널의 압력을 조절 하였다.

실험에서의 오차를 최소화 하기 위하여 주어진 환경 및 시험기구등의 영향이 최소화 되도록 하였다.

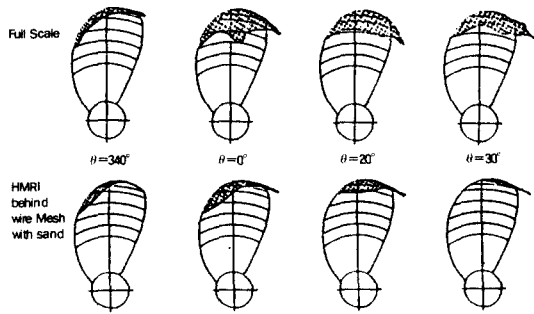


Fig. 6 Back cavitation pattern in nonuniform flow

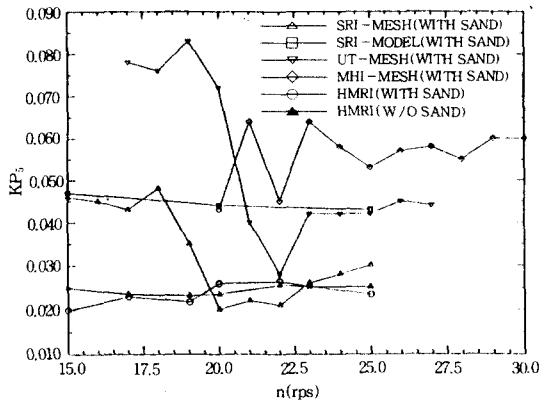


Fig. 7 Pressure amplitude of 1st blade rate at No. 1 position in nonuniform flow

균일류에서 사용한 상태에서 와이어 메쉬만 삽입하고 제반 시험을 실행 하였다. 불균일류에서도 거칠기는 균일류와 같이하였으며 변동 압력관이 있을때 프로펠러 회전수 25rps에서 관찰된 캐비테이션 패턴을 Fig. 6에 나타내었다. 변동압력에 대한 계측결과는 Fig. 7에 일본 연구기관과 함께 나타내었다. 결과에서 보여주듯이 일본 각 연구기관에 비하여 전반적으로 낮은 것을 알 수 있는데 이는 Fig. 1의 반류분포를 비교해 보면 반류스크린으로 재현된 반류가 실선 예측반류보다 평균반류가 크므로 추력일치법으로 시험조건을 설정할 때  $-30^{\circ} \leq \theta \leq 30^{\circ}$  국부영역에서 부담하중이 적게 된다. 더욱이 이 국부영역에서 캐비테이션이 주로 발생하게 되는데, 이 영역에서는 재현된 반류가 실선 예측 반류보다 적기 때문에 국부적으로 발생하게 되는 캐비테이션 양이 적게 되는 것이다. 따라서 변동압력이 작게 되었다[7,21]. 불균일류종의

다른 하나의 문제는 회전수에 의한 영향이다. 일본 각 연구기관의 시험은 프로펠러 회전수에 의해 크게 변동하고 있음을 파악할 수 있으며 이에 비해 우리의 시험결과는 안정적으로 나타나고 있다. 시험에서 프로펠러의 회전수가 25 rps로 제한된 것은 캐비테이션 터널 계측부에서의 유체속도 제한 및 고속인 경우 와이어 메쉬의 손상 및 실험 도중 와이어 메쉬가 늘어나는 현상등으로 인한 시험상의 오류를 방지하고자 함이다.

### 6. 계측결과의 불확실성 해석

계측 및 결과에서의 불확실성 해석의 목적은 변동 압력 계측에서 일반적으로 95%의 신뢰도를 갖는 참값의 불확실성의 구간을 찾아내는데 있다[14]. 95%의 신뢰도를 갖는 참값의 범위는 매 시험시마다 추정한다. 평판을 이용한 캐비테이션 터널 시험에서 얻어질 수 있는 자료에 한하여 사용하며 다른 특별한 또는 부가적인 계측은 고려하지 않는다.

- 계측 오차 항목(items for measurement errors)

아래에 열거하는 것들은 오차요인으로 가능성 있는 항목들이다.

- 1) 모형형상과 축척효과 (model geometry and scale effect)
  - 모형형상 정도, 레이놀즈 수(Reynolds No.)
- 2) 흐름 조건(flow condition - ambient flow)
  - 밀도(density), 수온, 증기압, 물의 오염
- 3) 시험조건(test condition)
  - 반류재현, 공기함유량, 벽면효과(wall effect)
- 4) 계측기기(instrumentation)
  - 동력계 정도, 자료취득, 압력센서(pressure sensor)
- 5) 자료해석(data analysis)
- 6) 외사법(extrapolation)
  - scaling 수순(procedure)

상기에 열거한 오차 요인들을 4 그룹으로 분류하고 그룹 4에 열거한 사항을 불확실성 해석에 포함하려고 한다.

- 그룹 1 : 실제시험 이전에 제거될 수 있는 오차요인
- 평판설치, 압력센서 설치 등

- 그림 2: 기존의 시험법 또는 축적된 자료에 의해 정량적으로 찾아내기 어려운 오차  
 - 모형형상의 제작 정도 및 표면거칠기  
 - 공기함유량, 기포핵의 크기 및 수  
 - 반류재현의 정도등
- 그림 3: 특수한 경우 이외에 일반 시험조건에서 무시될 수 있는 오차 요인들
- 그림 4: 불확실성 해석에 포함될 수 있는 오차들  
 - 동력계 정도, 온도계 정도, 압력센서 정도, 기압계 정도, 자료취득 및 해석

비록 그림 1, 그림 2, 그림 3에 속해 있는 각 항목에 대해서는 해석에 포함시키지는 않았으나 가능하다면 가까운 장래에는 포함시키도록 해야 한다. 그림 1 과 그림 2에 열거한 항목에 대하여는 오차를 최대한 배제하기 위하여는 사용한 방법들과 시험조건이 명백하게 기술되어야 한다.

#### - 계측의 불확실성

변동압력 계측은 동력계에 전달되는 추력을 조절하여 추력계수를 맞추고 캐비테이션 터널 내부의 압력을 조정하여 캐비테이션 수를 조정한 후에 프로펠러 및 프로펠러 캐비테이션에 의해 야기되는 변동압력을 평판위에 설치되어 있는 압력변환기를 통하여 컴퓨터에 저장한 후 신호처리를 하게 된다. 모형 프로펠러에 의해 발생하는 추력은 프로펠러 회전수를 고정시켜 놓고 캐비테이션 터널 내부의 유속을 서서히 증가시키면서 맞추어 나간다. 추력맞춤에 따르는 오차 요인들은 동력계 자체 오차이며 측정에 따르는 오차는 없는 것으로 가정 하였다. 캐비테이션 터널 내부 압력조정으로 인해 발생하는 오차는 명시적으로는 압력계 오차이며 간접적으로 영향을 미치는 요인들 즉, 온도변화에 의한 밀도와 증기압등이며 계측 때문에 생기는 오차는 없는 것으로 가정하였다. 변동압력 진폭은 압력변환기 오차, 계측 및 자료처리에 따른 오차가 발생하게 된다. 압력변환기 오차에는 압력변환기 자체에 내재하고 있는 오차요소 뿐만 아니라 프로펠러와 평판에 설치되어 있는 압력변환기 사이의 거리 측정에 따른 오차도 포함해야한다. 변동압력 신호  $x(t)$ 는 프로펠러 1회전시 100개의 자료를 등간격으로 취하여 Fourier 급수로 전개하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[19].

$$x(t) = P_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \Delta P_i \cos(2\pi f_i t - \phi_i) \quad (1)$$

여기에서  $\Delta P_i$ ,  $f_i$ ,  $\phi_i$  는 각각 진폭, 주파수 및 위상을 나타낸다.

임의의 시간  $t$ 에서 원래의 압력신호와 Fourier 급수전개에 따른 압력신호 사이의 차이는 매우 적다고 가정하여 이곳에서는 무시 한다. 프로펠러에 의해 야기되는 변동압력 신호의 경우 프로펠러 주파수 차수 이외에서는 진폭이 거의 나타나지 않거나 매우 미미한 값일것이기 때문에 무시한다고 가정하면 거의 모든 오차가 프로펠러 주파수 차수의 진폭으로 몰리게 된다. 따라서, 프로펠러 날개주파수의 오차가 압력신호의 오차를 대표한다고 말할 수 있다. 우연 오차는 100 회전의 자료취득후 분석하여 통계처리를 하여 정밀도를 구하게 된다. 압력신호를 Fourier 급수로 전개하는 이유는 압력신호가 1회전하는 동안 표현될 수 있기 때문에 주기적이라는 의미를 포함하고 있다. 프로펠러 날개위에서의 캐비티의 성장과 붕괴는 같은 위치에서 일정하게 시간에 따라 항상 변화되기는 어려우므로 압력신호가 항상 주기적으로 되지 못하는 이유가 되며 특히 불균일 반류에서 회전할때는 이러한 현상이 더욱 두드러지게 된다. 따라서 압력신호는 주기성을 가지면서 캐비티의 성장과 붕괴에 따른 비주기성도 포함하게 된다. 압력신호를 타당한 오차 이내로 예측할 수 없는 랜덤신호로 가정하면 스펙트럼 분석을 통하여 스펙트럼의 진폭을 구한다. 랜덤신호 처리에서 발생할 수 있는 신호해석/처리상의 오차는 2 가지로 구분할 수 있다. 하나는 랜덤신호의 비주기적 산포로 인해 생기는 오차인데 이는 신호의 통계 처리시 시간을 무한대로 하지 못하는 데에서 기인되는 오차이다. 다른 하나는 같은 방향과 크기로 일정하게 나타나는 오차로서 윈도우 조정등에 의하여 생기게 된다. 스펙트럼은 주파수 구간함수로서 신호의 평균치자승의 주파수분포를 직접적으로 나타내는 것으로 풀이된다. 즉, 평균치자승의 주파수대에서의 변화율로서 아래의 수식으로 표현할 수 있다[9].

$$\psi^2(f_1, f_2) = \int_{f_1}^{f_2} G_{xx}(f) df \quad (2)$$

단,  $\psi^2(f_1, f_2)$ 은 주파수 구간  $f_1, f_2$ 의 스펙트럼  $G_{xx}$  평균의 자승값이다.

스펙트럼이 하나의 주파수대에서 집중되어 날카로운 피크를 형성하면 주기적인 물리적 현상이 존재함을 의미 한다. 변동압력 신호를 스펙트럼을 구하면 주기성을 가지고 있기 때문에 프로펠러 날개주파수 각차수에서 날카로운 피크가 형성 된다.

- 불확실성 해석 표현

프로펠러 및 프로펠러 날개의 캐비티에 의해 평판에 야기되는 변동압력 진폭을  $\Delta P_i$  로 하면 변동압력 계수  $KP_i$  는 아래와 같이 정의된다[7].

$$KP_i = \frac{\Delta P_i}{\rho n^2 D^2} \quad (3)$$

단  $KP_i$  : 변동압력 계수(i차 성분)

$\Delta P_i$  : 변동압력 진폭(i차 성분)

$\rho$  : 물의 밀도(density of water)

$n$  : 프로펠러 회전수

$D$  : 프로펠러 직경

여기에서 캐비티의 시간에 대한 체적의 변화율을 아는 경우

$$\Delta P_i = \frac{\rho}{4IR} \frac{\partial^2 \nabla_{TOT}}{\partial t^2} \quad (4)$$

로 표현할 수 있다. 단 여기에서 R은 계측점과 프로펠러 축과의 거리이며  $\nabla$ 는 캐비티의 체적, t는 시간을 나타낸다. 위식으로 부터 변동압력 계수는 다른 모든 변수가 일정하다면 단지 시간에 대한 캐비티 체적의 변화율에 크게 영향을 받을 수 있다.

식(3)에서 알 수 있듯이 변동압력 계수  $KP_i$  는 변동압력 계측시 발생하는 계측 오차 뿐만 아니라 자료 방정식(data reduction equation) 전개에 따른 오차도 포함하게 된다. 식(3)에서 각변수는 서로 독립변수이고 곱의 형태이므로 불확실성해석표현은 아래와 같이 간단하게 나타낼 수 있다[18].

정확도에 대한 식

$$\left[ \frac{B_{KP}}{KP} \right]^2 = \left[ \frac{B_{\Delta P}}{\Delta P} \right]^2 + \left[ \frac{B_{\rho}}{\rho} \right]^2 + \left[ 2 \frac{B_n}{n} \right]^2 + \left[ 2 \frac{B_D}{D} \right]^2 \quad (5)$$

정밀한도에 대한 식

$$\left[ \frac{P_{KP}}{KP} \right]^2 = \left[ \frac{P_{\Delta P}}{\Delta P} \right]^2 + \left[ \frac{P_{\rho}}{\rho} \right]^2 + \left[ 2 \frac{P_n}{n} \right]^2 + \left[ 2 \frac{P_D}{D} \right]^2 \quad (6)$$

여기에서  $B_{KP}$ ,  $B_{\Delta P}$ ,  $B_{\rho}$ ,  $B_n$ ,  $B_D$  등은 각변수  $KP$ ,  $\Delta P$ ,  $\rho$ ,  $n$ ,  $D$ 에 대한 정확도(Bias Limit)을 나타내며  $P_{KP}$ ,  $P_{\Delta P}$ ,  $P_{\rho}$ ,  $P_D$  등은  $KP$ ,  $\Delta P$ ,  $\rho$ ,  $n$ ,  $D$ 에 대한 정밀한도(Precision Limit)을 나타낸다.

변동압력 계측에서 95% 포괄도에 대한 불확실성( $U_{KP}$ )은 식(7)을 이용하여 구한다.

$$\frac{U_{KP}}{KP} = \left[ \frac{B_{KP}^2}{KP^2} + \frac{P_{KP}^2}{KP^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

식(5), (6) 및 (7)에 따른 변동압력 계측에 대한 불확실성 해석은 아주 간단하게 보여 지지만 변동압력 계측 이전에 시험조건을 정확히 해야 한다. 실선과 모형에서 동일 추력계수와 캐비테이션 수 상태하에서 변동압력 계측을 해야하므로 이에 부수되는 제반 오차도 고려하여야 한다. 추력계수는 일반적으로 아래와 같이 표현 된다.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (8)$$

캐비테이션 터널에서 동일 추력계수에서 시험하기 위하여 프로펠러에 걸리는 추력을 사용하게 되므로 식(8)은 아래와 같이 변경한다. 즉,

$$T = K_T \rho n^2 D^4 \quad (9)$$

추력(T)에 대한 불확실성 해석 표현은 서로 독립 함수이고 곱의 형태로 되어 있으므로 간단하게 아래와 같이 나타내어질 수 있다.

정확도에 대한 식

$$\left[ \frac{B_T}{T} \right]^2 = \left[ \frac{B_{\rho}}{\rho} \right]^2 + \left[ 2 \frac{B_n}{n} \right]^2 + \left[ 4 \frac{B_D}{D} \right]^2 \quad (10)$$

정밀한도에 대한 식

$$\left[ \frac{P_T}{T} \right]^2 = \left[ \frac{P_{\rho}}{\rho} \right]^2 + \left[ 2 \frac{P_n}{n} \right]^2 + \left[ 4 \frac{P_D}{D} \right]^2 \quad (11)$$



불확실성에 대한 식

$$\frac{U_T}{T} = \left[ \frac{B_T^2}{T} + \frac{P_T^2}{T} \right]^{1/2} \quad (12)$$

캐비테이션 수와 관계되는 방정식은 아래와 같다.

$$\sigma = \frac{P_T - P_v}{\frac{1}{2} \rho n^2 D^2} \quad (13)$$

단  $P_v$  : 증기압

캐비테이션 터널에서 동일한 캐비테이션 수에서 시험을 하기 위해서는 캐비테이션 터널 내부 프로펠러 축 중심에서의 압력( $P_T$ )을 조정해야 한다. 캐비테이션 터널 내부압력에 대한 자료방정식은 식(13)로부터 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_T = \sigma \cdot 0.5 \rho n^2 D^2 + P_v \quad (14)$$

식(14)는 곱의 함수로 표현되어 있지 못하기 때문에 간단하게 불확실성 해석 표현으로 나타내지 못하고 각 변수에 대한 미분을 아래와 같이 구해야 한다 [14, 18].

$$\frac{\partial P_T}{\partial \rho} = \sigma \cdot 0.5 n^2 D^2 \quad (15)$$

$$\frac{\partial P_T}{\partial n} = \sigma \rho n D^2 \quad (16)$$

$$\frac{\partial P_T}{\partial D} = \sigma \rho n^2 D \quad (17)$$

$$\frac{\partial P_T}{\partial P_v} = 1 \quad (18)$$

정확도에 대한 식

$$B_{P_T}^2 = \left[ \frac{\partial P_T}{\partial \rho} B_\rho \right]^2 + \left[ \frac{\partial P_T}{\partial n} B_n \right]^2 + \left[ \frac{\partial P_T}{\partial D} B_D \right]^2 + \left[ \frac{\partial P_T}{\partial P_v} B_{P_v} \right]^2 \quad (19)$$

정밀한도에 대한 식

$$P_{P_T}^2 = \left[ \frac{\partial P_T}{\partial \rho} P_\rho \right]^2 + \left[ \frac{\partial P_T}{\partial n} P_n \right]^2 + \left[ \frac{\partial P_T}{\partial D} P_D \right]^2 + \left[ \frac{\partial P_T}{\partial P_v} P_{P_v} \right]^2 \quad (20)$$

불확실성에 대한 식

$$\frac{U_{P_T}}{P_T} = \left[ \frac{B_{P_T}^2}{P_T} + \frac{P_{P_T}^2}{P_T} \right]^{1/2} \quad (21)$$

따라서 변동압력 계수  $KP_1$ 에 있어서 전체 요인 즉, 변동압력 계수 ( $KP$ ), 추력( $T$ ) 및 압력( $P_T$ )에 의한 불확실성은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{B}{KP} = \left[ \frac{B_{KP}^2}{KP} + \frac{B_T^2}{T} + \frac{B_{P_T}^2}{P_T} \right]^{1/2} \quad (22)$$

$$\frac{P}{KP} = \left[ \frac{P_{KP}^2}{KP} + \frac{P_T^2}{T} + \frac{P_{P_T}^2}{P_T} \right]^{1/2} \quad (23)$$

$$\frac{U}{KP} = \left[ \frac{B^2}{KP} + \frac{P^2}{KP} \right]^{1/2} \quad (24)$$

여기에서  $B_{KP}$ ,  $B_T$ ,  $B_{P_T}$ 는 각각  $KP$ ,  $T$ ,  $P_T$ 에 대한 정확도를 나타내며  $P_{KP}$ ,  $P_T$ ,  $P_{P_T}$ 는 정밀한도를 나타낸다. 윗식들을 이용하여 일례로 균일류 상태 20rps에서의 거칠기가 없는 경우의 불확실성 해석결과를 Table 5 및 Table 6에 나타내고 있다.

## 7. 불확실성 해석 결과

균일류 상태(uniform flow condition)에서 단일시험(single test)으로부터 측정결과에 있어서 프로펠러 날개주파수 변동압력계수  $KP_5$ 에 대한 각 회전수에서의 불확실성 범위는 거칠기가 없는 경우에는 Fig. 8에 나타내었으며 거칠기가 있는 경우에는 Fig. 9에 표시 하였다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 거칠기가 없는 경우 프로펠러 회전수 변화에 따라서 변동압력계수  $KP_5$ 가 약 10%의 범위에서 변화됨을 보여 주고 있다. 각 회전수에서 측정결과에서의 불확실성 범위는 20rps에서 5.31%, 25rps에서 3.75%로 됨을 알 수 있는데 이는

Table 5 Uncertainty analysis for measurement of fluctuating pressure (20 rps uniform)

Hull Pressure Error Sources	Errors	Sensitivity	Total Error Limit	
			Bias(B)	Precision(S)
D	0.250E+00m			
Model accuracy	0.500E-04m		0.500E-04m	
Temperature	0.231E+02C	F.S=0.400E+02C		
1) Thermometer acc	0.500E+00C		0.500E+00C	
2) Reading error	0.500E+00C			0.500E+00C
Thrust	0.363E+03N	F.S=0.294E+04N		
1) Dynamometer	0.150E-02 / F.S		0.441E+01N	
2) Calibration	0.130E+01N			0.130E+01N
3) Measurement	0.000E+00N			
Sub Sum			0.441E+01N	0.130E+01N
RPS	0.200E+02rps			
1) Signal acc	0.000E+00rps		0.000E+00rps	
2) Digital error	0.100E+02rps		0.100E-02rps	
3) Measurement	0.000E+00rps			0.000E+00rps
Sub Sum			0.100E-02rps	0.000E+00rps
A-D converter		F.S=0.100E+02volt		
1) Linearity	0.244E-03 / F.S		0.244E-02volt	
2) Offset Error	0.122E-03 / F.S		0.122E-02volt	
3) Digital Error	0.244E-03 / volt / bit		0.244E-03volt	
Sub Sum			0.274E-02volt	
Tunnel Press	0.153E+05PA	F.S=0.200E+06PA		
1) Sensor	0.300E-02 / F.S		0.600E+03PA	
2) Calibration	0.173E+03PA			0.173E+03PA
3) Measurement	0.000E+00PA			0.000E+00PA
Sub sum			0.600E+03PA	0.173E+03PA
Height	0.192E+00m	F.S=0.300E+00m		
1) Length scale	0.250E-03m		0.250E-03m	
2) Reading error	0.500E-03m			0.500E-03m
Fluctating Press	0.574E+03PA	F.S=0.100E+06PA		
- Transducer	0.200E-02 / F.S		0.200E+03PA	
- Calibration	0.400E+02PA			0.400E+02PA
1) Transducer	0.214E-02	Pst=0.934E+05PA	0.123E+01PA	
2) Calibration	0.428E-03			0.246E+00PA
3) A-D Converter	0.274E-02volt	0.338E+04PA / volt	0.925E+01PA	
4) Measurement	0.319E+01PA			0.319E+01PA
Sub Sum			0.933E+01PA	0.320E+01PA

Table 6 Uncertainty analysis for results of fluctuating pressure (20 rps uniform)

Hull Pressure Error Sources	Errors	Sensitivity	Total Error Limit	
			Bias(B)	Precision(S)
Density(kg /m <sup>3</sup> )	0.997E+03kg /m <sup>3</sup>			
1) Tem(bias)	0.500+00C	0.299E+00	0.150E+00kg /m <sup>3</sup>	
2) Tem(random)	0.500E+00C	0.299E+00		0.150E+00kg /m <sup>3</sup>
Vapour Press(PA)	0.282E+04PA			
1) Tem(bias)	0.500E+00C	0.299E+00	0.849E+02PA	
2) Tem(random)	0.500+00C	0.299E+00		0.849E+02PA
Thrust(N)	0.363E+03N			
1)Dynamo (bias)	0.122E-01		0.122E-01	
2)Dynamo (random)	0.358E-02			0.358E-02
3)Density(bias)	0.150E-03		0.150E-03	
4)Density(random)	0.150E-03			0.150E-03
5)rps(bias)	0.100E-03		0.100E-03	
6)rps(random)	0.000E+00			0.000E+00
7)D(bias)	0.800E-03		0.800E-03	
8)D(random)	0.000E+00			0.000E+00
Sub Sum			0.122E-01	0.358E-02
Uncertainty			0.141E-01	0.513E+01PA
Tunnel Press(PA)	0.153E+05PA			
1)Sensor (bias)	0.392E-01		0.392E-01	
2)Sensor (random)	0.113E-01			0.113E-01
3)Density(bias)	0.122E-03		0.122-03	
4)Density(random)	0.122E-03			0.122E-03
5)rps(bias)	0.815E-04		0.815E-04	
6)rps(random)	0.000E+00			0.000E+00
7)D(bias)	0.326E-03		0.326E-03	
8)D(random)	0.000E+00			0.000E+00
9)Pv(bias)	0.555E-02		0.555E-02	
10)Pv(random)	0.555E-02			0.555E-02
Sub Sum			0.396E-01	0.126E-01
Uncertainty			0.470E-01	0.7186E+03N
KPi	0.230E-01	Pi=0.574E+03PA		
1)Pi(bias)	0.163E-01		0.163E-01	
2)Pi(random)	0.557E-02			0.557E-02
3)Density(bias)	0.150E-03		0.150E-03	
4)Density(random)	0.150E-03			0.150E-03
5)rps(bias)	0.100E-03		0.100E-03	
6)rps(random)	0.000E+00			0.000E+00
7)D(bias)	0.400E-03		0.400E-03	
8)D(random)	0.000E+00			0.000E+00
9)Hei(bias)	0.130E-02		0.130E-02	
10)Hei(random)	0.260E-02			0.260E-02
Sub Sum			0.163E-01	0.615E-02
Uncertainty			0.204E-01	0.470E-03
Total Sum			0.446E-01	0.145E-01
Uncertainty			0.531E-01	0.122E-02

추력과 캐비테이션 터널 내부 압력에서의 오차가 계측결과로 전파되어 나타나고 있는 현상을 의미하고 다른 오차 요인 보다는 캐비테이션 터널 내부 압력에 의한 오차가 큼을 알 수 있다.

Fig. 8A에는 거칠기가 없는 경우에 변동압력계측을 각 회전수에서 3회씩 계측한 결과를 나타내고 있으며 이는 실제적으로 2회씩 더 계측한 결과이다. 즉, 동일 시험 조건하에서 같은 시각에 변동압력 신호를 2회 더 계측하여 해석한 것으로서 모두 계측 오차 범위 안에 있으므로 지금까지 계산된 계측 결과에서의 불확실성 범위가 타당한 결과임을 명백하게 보여주는 것을 의미 한다.

Fig.9에 표시된 결과에 의하면 거칠기가 없는 경우에 비하여 프로펠러 회전수에 의한 영향이 미미한 것을 보여 주고 있는데 이는 프로펠러 날개 위에서의 캐비테이션 거동이 좀 더 안정적으로 발생하고 있는 현상을 나타낸다고 말할 수 있겠다. 캐비테이션 패턴에 있어서는 거칠기가 있는 경우가 거칠기가 없는 경우 보다 양과 범위는 많으나 캐비테이션에서는 양과 범위보다는 캐비테이션의 거동특성이 더욱 변동압력에 영향을 크게 미치는 것을 알 수 있다. Fig.9A에도 거칠기가 없는 경우와 동일하게 각 회전수에서 동일 시각에 3회씩 계측한 결과를 보여 주고 있으며 모두 불확실성 범위에 있음을 나타내고 있다.

Fig. 8, Fig. 9에서 불확실성 범위는 거칠기가 있는 경우와 없는 경우 모두 동등하게  $\pm 6\%$  이내임을 알 수 있는데 이는 변동압력계측에 대한 오차보다는 시험 조건 즉 추력계수와 캐비테이션 수에 의한 오차가 지배적임을 의미하고 있다. 프로펠러 날개 주파수 2차 변동압력 계수  $KP_{10}$ 는 변동압력 계수  $KP_5$ 에 비하여 무시할 정도로 적은 값이어서 이곳에서는 취급하지 않았다. 균일류 경우에는 변동압력 계수  $KP_5$  이외에는 진폭이 나타나지 않는 것이 정상적인 시험 결과라 하겠다.

불확실성 해석 결과에서 알 수 있듯이 거칠기가 있거나 거칠기가 없거나 불확실성 범위에는 변화가 미미하나 변동압력 계수 자체가 캐비티의 거동에 따라 변화되므로 프로펠러 날개에 거칠기를 주어 캐비티의 불안정성을 제거시킨 후에 변동압력계측시험을 수행하는 것이 타당하다고 생각된다.

균일류의 경우 거칠기가 없는 경우 동일 날짜 오후에 4개의 회전수 조건에서 모두 변동압력 신호를 계측하였으며 거칠기가 있는 경우도 시각은 다르지만 거의 같은 실험 환경하에서 동일 날짜 오후에 4개의

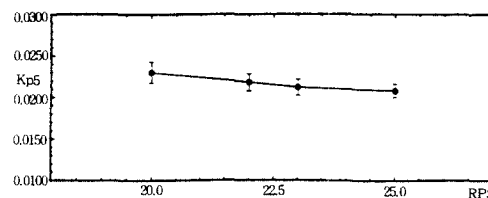


Fig. 8 Uncertainty Range of  $KP_5$ (without sand) in uniform flow at 1st Blade Rate

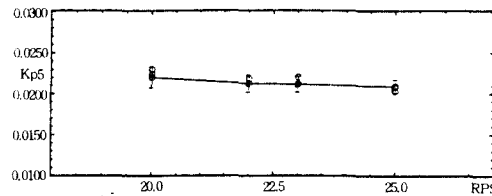


Fig. 8A  $KP_5$ (without sand) in uniform flow at 1st Blade Rate

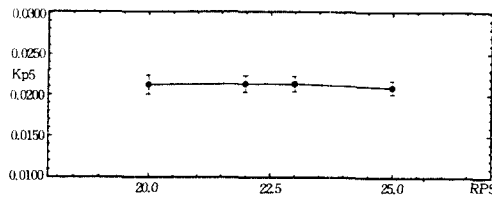


Fig. 9 Uncertainty Range of  $KP_5$ (with sand) in uniform flow at 1st Rate

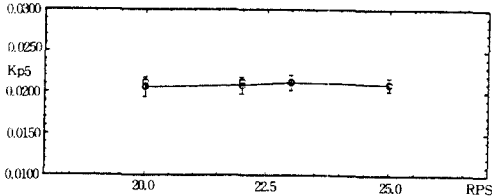


Fig. 9A  $KP_5$ (with sand) in uniform flow at 1st Blade Rate

회전수에서 모두 계측 하였다. 균일류에서 전반적으로 고려할 때 변동압력 계수  $KP_5$ 는 20~25rpm 사이에서 국한하여 0.02~0.02420 범위에 있다 하겠다. 하지만 이러한 불확실성 범위는 장시간에 걸친 반복적인 시험에 의하여 확인되어야 됨을 간과해서는 안 된다.

### 8. 토의 및 결론

실험적인 방법에 의해 캐비테이션 터널이나 진공 수조에서 변동압력을 정확히 계측해 보고자 하는 노력도 이론적 계산 방법의 발전과 함께 되어 왔으나 ITTC[16]에서 알 수 있듯이 실험에서조차도 실선 계측과 불일치를 보이고 있다. 이는 단적으로 실험적

인 방법으로도 변동압력을 추정하는 것이 어렵다는 것을 증명해 보이는 것이기도 하다. 하지만 각 참여 기관간의 산포나 실선 계측과의 불일치가 항상 다른 경우의 선박에서도 반드시 존재한다고 볼 수는 없다. 특히 참여기관간의 산포는 각 참여기관에서의 시험 조건, 계측결과해석, 모형 프로펠러 크기 및 가공 정도, 캐비테이션 터널의 크기가 서로 상이하고 시험 수행 방식의 다양성에서 기인된 것이라고 단정지을 수 있다. 이는 시험실간의 오차, 환경 변화에 따른 오차가 때에 따라서는 예상보다도 큰 오차를 나타낼 수 있기 때문이다.

ITTC[16] 발표 이후 시험의 정확성에 대한 인식이 확산되어 비교 시험에 대한 연구가 계속되어 왔으며 최근 일본에서는 공동 연구 형태로 여러 일본 국내 기관이 참여하여 각 시설 자체에서 계측을 수행하고 각 기관끼리의 계측 결과를 비교하여 발표 하였다 [20]. 균일류 시험에서 프로펠러 날개 주파수 1차 성분 변동 압력 계수  $KP_5$ 가 0.014~0.021 범위에 있어 계측이 비교적 잘 된 것으로 판명되었고 불균일류에서는 변동압력 계수  $KP_5$ 가 0.02~0.06 사이에 있어 더욱 큰 차이를 보였다. 또한 프로펠러 회전수에 따른 변동압력이 크게 변화됨을 불균일류의 경우에서 보여주고 있다.

이번의 변동압력 계측에 대한 불확실성 해석은 초보적이고 예시적인 수준이기는 하지만 우선 시도해 보았다는 것 자체만으로도 의미가 있다고 본다. 이와 같이 프로펠러의 변동압력 계측과 균일류 계측결과에서의 불확실성 해석을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 변동압력 계측에서 가장 큰 오차요인이 반류라 할 수 있는데 균일류에서는 이러한 장애요인을 제거할 수 있어 오차 분석에 좋은 본보기라 할 수 있으며 다른 한편으로는 캐비테이션 거동이 프로펠러 1회전 동안 변화되지 않고 일정한 형태를 갖는다는 이점도 있다. 균일류의 변동압력 계측에서 프로펠러 날개 앞날에 거칠기가 없는 경우 즉, 모래를 도포하지 않는 경우의 프로펠러 회전수에 따른 변동압력 계수  $KP_5$ 는 큰 변화가 없었고 캐비테이션 패턴은 불안정 하였다. 프로펠러 날개에 모래를 도포하여 날개에 인위적으로 거칠기를 준 경우 변동압력 계수  $KP_5$ 는 프로펠러 회전수에 따라 변화됨이 거의 없이 일정하였고 거칠기가 없는 경우 보다 캐비테이션 양은

많았으나 변동압력 값은 적게 계측되었다.

- 초보적이고 아직 해결해야 될 문제는 많이 있지만 우선적으로 변동압력 계측에 있어서 불확실성 범위를 구하고 이 방법에 대한 예를 제시한 것은 이 계통의 모든 연구자에게 보다 나은 시험을 할 수 있는 하나의 방법을 제시했다고 할 수 있다. 앞으로 반영해야 할 것은 반류에 의한 오차, 물속의 기포핵 및 벽면효과(wall effect)에 의한 오차이다.

- 균일류 시험에서 시험실간의 비교에서는 캐비테이션 패턴도 차이가 있고 변동압력에서도 차이가 있다. 이는 여러 가지 요인에 의해 발생되는데 우선 캐비테이션 터널 시설 자체의 크기 및 모양, 시험 방식에 따른 것으로 추측 된다. 본 연구에서 사용한 캐비테이션 터널에서 균일류에서의 불확실성은 약  $\pm 6\%$ 로 계산 되었으며 이는 시간 변화에 따른 오차 요인을 고려치 않은 것이다.

- 불균일류 시험에서 변동압력 계측을 하었는데 회전수에 의한 영향이 거의 미미해서 시험이 성공적으로 수행 되었다. 하지만 불균일 반류중에서는 회전수에 따라 변동압력이 크게 변화될 수 있으므로 여러 회전수에서 계측을 하여 캐비테이션 터널의 공진 및 기타 원인들을 규명해야 한다.

- 본 연구에서 사용한 와이어 메쉬에 의한 방법이 축방향 속도 분포만을 재현하고 재현된 속도 분포 자체에도 오차가 있을 수 있고 모형선 효과를 고려치 못하는 단점등이 있으나 가장 간편하고 쉽게 변동압력을 예측할 수 있는 장점이 있다.

- 시험실간의 비교는 될수록 모든 시험조건, 외부 환경 조건 및 시험결과처리 등에 의한 조건이 대등한 상태에서 하여야 좋은 결과를 얻을 수 있다. 특히 변동압력계측의 경우에는 모형시험에서 아직 규명이 되지 못한 요인 즉 벽면효과, 기포핵등이 있다. 모형시험과 실선 계측 비교에서도 주의를 기울여야 하며 3~4척의 실선 계측과 모형시험으로부터 상관관계를 도출해 내려고 하는 우는 범하지 말아야 한다.

-프로펠러에 모래를 도포하여 프로펠러 날개에 거칠기를 주는 경우 캐비테이션 초기발생을 촉진시키고 캐비테이션 거동을 안정시키는 것이 관찰되어 유용한 방법이라 생각 된다. 프로펠러 날개 앞날에 모래를 도포 하는 방법은 도포 양이나 크기 등이 숙련자에 따라 변화되므로 보다 확실한 방법으로 레이저(Laser)를 사용하여 날개 앞날에 거칠기를 주는 방법도 고려되어져야 한다.

### 참 고 문 헌

- [ 1 ] Sasajima, H. and Tanaka, I., "On the estimation of wake and ships", *Proceed of 11th ITTC*, 1966.
- [ 2 ] Hoekstra, M., "Prediction of full scale wake characteristics based on model wake survey", *International Shipbuilding Progress*, Vol. 22, No. 250, 1975.
- [ 3 ] 14th ITTC., "Report of Cavitation Committee", *Proceed of 14th ITTC*, 1975.
- [ 4 ] Kuiper, G., "Cavitation scale effects a case study", *International shipbuilding Progress*, Vol. 25, No. 284, Apr. 1978.
- [ 5 ] Weitendorf, E. A. and Keller, A. P., "A determination of the free air content and velocity in front of the "Sydney Express"-propeller in connection with pressure fluctuation measurements", *12th symposium on naval hydrodynamics*, Washington, D. C, June. 1978.
- [ 6 ] Johnsson, C. A., "Some experiences from vibration excitation tests in the SSPA large cavitation tunnel", *Proceedings of the symposium on propeller induced ship vibration*, London, Dec. 1979.
- [ 7 ] English, J. W., "Cavitation induced hull surface pressure measurement in a water tunnel", *Proceedings of the symposium on propeller induced ship vibration*, London, Dec. 1979.
- [ 8 ] Lee, C. S., "Prediction of the transient cavitation on marine propellers by numerical lifting-surface theory", *13th symposium on naval hydrodynamics*, Tokyo, Oct. 1980.
- [ 9 ] Bendat, J. S. and Piersol, A. G., "Engineering applications of correlation and spectral analysis", *John wiley & Sons*, 1980.
- [ 10 ] Huse, E. and Guogiang, W., "Cavitation-induced excitation forces on the hull", *Trans, SNAME*, Vol. 90, 1982.
- [ 11 ] Breslin, J. P., Van Houten, R. J., Kerwin, J. E. and Johnson, C. A., "Theoretical and experimental propeller-induced hull pressure arising from intermittent blade cavitation, loading, and thickness", *Trans, SNAME*, Vol. 90, 1982.
- [ 12 ] Hadler, J. B., English, J. W. and Gupta, S. K., "Program to minimize propeller induced vibration on converted Maersk "E" class ships", *Trans, SNAME*, Nov. 1984.
- [ 13 ] Szantyr, J., "A computer program for calculation of cavitation extent and excitation forces for a propeller operating in non-uniform velocity field", *The Naval Architect, RINA*, Nov. 1985.
- [ 14 ] ASME performance test codes supplement on instrument and apparatus, part 1., "Measurement uncertainty", *ANSI/ASME PTC19. 1-1985*.
- [ 15 ] Okamoto, Y. and Kasahara, Y., "Experimental and theoretical investigation of hull pressure fluctuations caused by a cavitating propeller", *Proceedings of the international symposium on propeller and cavitation*, Apr. 1986.
- [ 16 ] 18th ITTC., "Report of cavitation committee", *Proceed. of 18th ITTC*, 1987.
- [ 17 ] Weitendorf, E. A., "25 years research on propeller excited pressure fluctuations and cavitation", *HANSA*, Sep. 1989.
- [ 18 ] Coleman, H. W. and Steele jr, W. G., "Experimentation and uncertainty analysis for engineers", *John wiley & Sons*, 1989.
- [ 19 ] Doebelin, E. O., "Measurement systems application and design", *Fourth edition, Mcgraw-Hill Publishing Co.* 1990.
- [ 20 ] 19th ITTC., "Report of cavitation com-

- mittee", *Proceed. of 19th ITTC*, 1990.
- [21] Ukon, Y., "Study on experimental prediction on ship hull vibration induced by propeller and cavitation", 운수성 선박기술연구소 보고 제28호 제4호 1991년 7월.
- [22] Briancon-Marijolle, L. and Frechou, D., "Cavitation in "Le grand tunnel hydrodynamique"(GTH)", *2nd international symposium on propeller and cavitation*, Sep. 1992.
- [23] Kuiper, G., "Correction factor for viscous scale effects on propellers", *2nd international symposium on propeller and cavitation*, Sep. 1992.
- [24] Wilson, M. B. and Etter, R. J., "Hydrodynamic and hydroacoustic characteristics of the new David Taylor Model Basin large cavitation channel", *2nd international symposium on propeller and cavitation*, Sep. 1992.
- [25] Friesch, J., Johannsen, C. and Payer, H. G., "Correlation studies on propeller cavitation making use of a large cavitation tunnel", *Trans, SNAME*, Oct. 1992.