

해양공학용 소형 회류수조 설계 및 성능분석

임영배* · 정우철** · 박찬원** · 홍기섭**

*메스텍

**인하공업전문대학 선박해양시스템과

Design and Performance Analysis of a Small Circulating Water Channel for Ocean Engineering

YOUNG-BAE YIM*, UH-CHEUL JEONG**, CHAN-WON PARK**, KI-SUP HONG**

*Marine Engineering System and Technology

**Department of Ship and Ocean System, Inha Technical College

KEY WORDS: Circulating Water Channel(CWC) 회류수조, Guide Vane 가이드 베인, Diffuser 디퓨저, Honeycomb 하니콤, Contractor 수축부, Impeller 임펠러, Stator 스테이터

ABSTRACT: A small circulating water channel (CWC) for experiments of ocean engineering is designed and made through the co-work of a company, MESTEC, and a college, Inha Technical Research Institute. General functions of the elements of CWC are explained. The velocities in the test section are measured and analysed to estimate the performance of the CWC. The result of the velocity distribution is acceptable for experiments of ocean engineering.

1. 서 론

회류수조는 오래 전부터 예인수조와 더불어 선박과 해양구조물 주위의 유동을 조사할 때 많이 사용되어 왔고 아직도 유용하게 사용되고 있다.

널리 알려진 것 중 하나가 1944년에 제작된 DTNSRDC가 보유한 것으로 예인수조에서 사용되는 크기의 모형선과 모형프로펠러를 그대로 사용할 수 있는 대형 회류수조이다. 이러한 회류수조의 큰 장점은 오랜 시간동안 저항 및 저항계측이 가능하다는 것이고 또 선체주위의 흐름을 보다 쉽게 관측할 수 있다는 것이다.

또 다른 하나의 회류수조는 베를린에 있는 것으로 이 수조의 특징은 자유표면 위에 있는 공기의 압력을 변화시켜 자유표면과 캐비테이션의 영향을 동시에 고려할 수 있다는 것으로, 조선공학도들에게 상당한 흥미를 유발시키는 것이다. 이 수조에서도 예인수조에서 사용되는 크기의 모형선과 모형 프로펠러가 사용될 수 있기 때문에 상당히 유용한 실험결과를 얻을 수 있다.

그러나 이러한 회류수조의 단점으로는 직관적으로 알 수 있듯이 관측창으로 흘러 들어오는 흐름이 예인수조에 서와 같이 이상적일 수 없다는 것이다.

이러한 단점에도 불구하고 회류수조 활용도가 비교적 높은 일본에서는 서일본유체기술연구소(FEL)를 중심으로 관측창으로 흘러 들어오는 흐름을 개선하고 또 적합한 실험해석법을 개발하여 소형의 회류수조를 보편화 시켰다. 그 결과 FEL은 일본과 한국내에 많은 회류수조를 공급하

제 1저자 임영배 연락처 : 인천시 남구 용현동 253
인하공업전문대학내 창업보육센터 032-870-2639
ybyim53@hanmail.com

있고, 지금까지 선박개발뿐만 아니라 해양구조물을 설계하는 데 유용하게 사용되고 있다.

지금까지 국내에서는 극소수의 회류수조를 제외하고는 주로 일본에서 제작한 것을 사용하여 왔다. 그러나 일본의 인건비와 물가 및 우리의 기술력을 고려해 볼 때 계속하여 회류수조를 수입한다는 것이 적합하지 못하여 당사에서는 해양공학 분야에서 활용 가능한 소형 회류수조 개발에 착수하여 2002년 말 첫 시제품을 제작하였고, 본 논문에서 그 설계에 사용된 중요한 기술적인 사항과 성능시험 결과를 언급한다.

2. 각 부분의 기능

기술적으로 볼 때 회류수조는 풍동 시험장치와 매우 비슷하다. 유체역학적으로 유일하게 다른 점은 풍동장치에는 계측부에 자유표면이 없는 대신에 회류수조에는 자유표면이 있다는 것이다.

회류수조나 풍동을 설계하는 데 있어서 가장 중요한 설계목표는 첫째 관측 창에서의 흐름이 균일하고 난류도 (Turbulence Intensity)가 낮아야 하고, 둘째 각 부분에서의 압력손실이 최소화되어 회류수조를 가동하는 데 손실되는 에너지를 최소화해야 한다는 것이다.

본 장에서는 각 부분들의 중요한 물리적인 기능과 그 성능을 예측할 수 있는 식들을 서술한다.

2.1 코너 및 가이드베인

유체가 흘러서 출발한 자리로 돌아 와야 하기 때문에 반드시 필요로 하는 부분이 코너들이다. 간혹 180도 코너도 사용되는 경우도 있지만 대부분 4개의 90도 코너를 많이 사용하기 때문에 여기서는 90도 코너와 그 곳에 부착될 가이드베인에 대해서 설명한다.

일반적으로 코너의 단면적이 일정하기 때문에 그 효율은 가이드베인의 성능에 의하여 정해진다. 원형 가이드베인이 잘 부착되었을 때 이 코너부분의 압력손실계수(2.5절에서 정의)는 0.2 정도이고 유체가 코너를 돌 때 발생하는 와류 현상도 가이드베인을 사용하여 현저히 줄일 수 있다. 가이드베인이 잘 설계되었다라도 부착이 잘 못 되었을 경우 그 성능은 현저히 떨어지기 때문에 이것이 잘 부착되었는지 여부를 결정하기 위하여 가이드베인 꼬리부분에 터프트를 부착하여 유체가 잘 흘러가는 지를 관찰하고 잘 못 되었을 경우 수정하기도 한다. 가이드베인의 성능을 향상시키기 위하여 그 단면을 비행기 날개단면을 사용하기도 하는데 잘 설계되었을 경우 압력손실계수가 0.11까지 줄어들기도 한다. 실험결과에 의하면 가이드베인의 받음각이 4~5도 정도이고 꼬리에서 유체가 부드럽게 흘러 나갈 때 압력손실계수는 0.06까지 줄어든 경우도 있

다. 이론적으로 이런 성능을 검증/예측하기 위하여 지금까지 포텐셜이론이 사용되어 왔는데 두께를 가진 단면을 개발하기 위하여 이 이론을 이용하면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

2.2 디퓨저

해양공학용 소형회류수조의 수축비는 2 : 1 이기 때문에 본 회류수조 설계에서는 디퓨저를 한 개만 사용하였다. 참고로 일반 풍동에서는 수축비가 4 : 1 이상이기 때문에 한 개의 디퓨저로는 확산각이 너무 커지게 되거나 디퓨저의 길이가 너무 길어지게 되기 때문에 보통 2개를 설치한다. 한 개는 계측부 바로 뒤에 또 다른 한 개는 임펠러 뒤에 설치하는 것이 보통이다.

디퓨저 설계 시 유의해야 할 점은 박리현상이다. 설계가 잘 못 되면 박리가 발생하게 되는데 이것은 진동을 유발시키고 또 임펠러에 걸리는 부하를 주기적으로 변화시키기 때문에 계측부에서의 종 방향속도가 주기적으로 변하는 현상이 발생하게 되는데 이러한 물리적 현상을 서어징(Surging)이라 한다. 박리현상이 발생하면 당연히 구동 모터의 마력도 증가하게 된다.

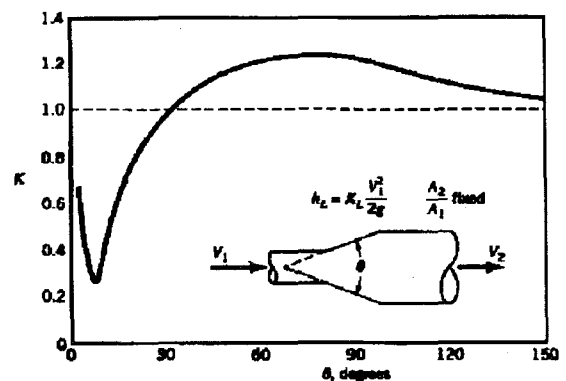


Fig. 1 Loss coefficient for a typical conical diffuser

이러한 문제들을 해결하기 위하여 디퓨저 확산각 θ 를 잘 정하여야 하는데 통상 경험적으로 8도정도의 값을 사용한다. 이 경우 디퓨저에 의한 압력손실계수는 0.2정도로 최저값을 가진다 (Fig. 1).

2.3 스크린, 하니콤 및 수축부

스크린은 유체의 횡 방향 속도교란보다는 종 방향 속도 교란을 진정시키는 역할을 한다. 계측부의 단면적이 클 때 그 곳에 맞는 스크린을 구하기 힘들어 스크린을 이어야 하는 경우가 생기는데 이 때 이음새를 정교하게 하지 않으면 계측부에서의 속도분포가 불균일하게 될 수 있

어 제작 시 주의하여야 한다. 일반적으로 스크린에 의한 압력손실은 하니콰에 의한 압력손실보다 크다.

하니콰는 유체의 종 방향 교란을 진정시키는 데는 덜 효과적이지만 그 길이가 길기 때문에 횡 방향 교란을 진정시키는데 더 효과적이다. 횡 방향 교란을 효과적으로 진정시키기 위하여 하니콰의 길이는 격자의 간격보다 최소한 6~8배 이상은 되어야 한다. 스크린과 하니콰가 속도가 가장 느린 부분에 놓여 있지만 압력손실은 매우 크다.

수축부의 역할은 디퓨저에 의해서 줄어든 유체의 속도를 다시 가속시키는 것이다. 즉 수축부의 입구에서 출구 쪽으로 유체가 흘러 들어가면 유속은 점점 증가하면서 압력은 점점 감소한다. 이 경우 압력감소에 의한 박리현상이나 코너부분에서 Secondary Flow(와류)가 발생할 수 있음을 유의해야 한다. 통상 회류수조에서 균일한 유속분포를 얻기 위하여 수축비(입구와 출구의 단면적 비)를 2 : 1 이상으로 하는 것이 좋지만 여러 가지 주어진 여건을 고려하여 정한다.

이렇게 하여 이 세 요소들이 공동으로 관측 창으로 유입되는 흐름의 질을 높이는 데 중요한 역할을 한다.

2.4 임펠러, 스테이터 및 샤프트

임펠러를 설계하기 위하여 van Manen et al.의 Ducted Propeller 이론을 이용하였다. 이 이론은 원통 속에 놓여 있는 임펠러와 경계조건이 비슷하기 때문에 현실적으로 문제가 없을 것으로 생각된다.

또한 유속이 1.0 m/s 이하이기 때문에 스테이터의 피치 각은 반경방향으로 고정된 값 0을 사용하였다.

축의 직경은 주어진 마력으로 임펠러를 구동시킬 때 축 표면에 발생하는 전단응력이 허용 전단응력을 초과하지 않도록 안전계수를 고려하여 결정하였다.

2.5 압력손실계수 계산

문제를 간단하게 하기 위하여 우선 원형단면을 가진 요소들에 대한 압력손실계수를 구하는 공식을 생각해 보기로 하자.

회류수조는 크게 평행부, 디퓨저, 코너 및 수축부 네 가지 요소로 구성되어 있는데 본 절에서는 이 네 가지 부분에 대한 압력손실계수와 스크린 및 하니콰의 압력손실계수를 구하는 방법을 설명하기로 하겠다.

어떤 요소의 입구에서의 압력과 출구에서의 압력 차이를 Δp 라 할 때 압력손실계수 K 는 다음과 같이 정의된다.

$$K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (1)$$

여기서

ρ : 유체 밀도

V : 각 부분의 유입속도

i) 평행부의 압력손실은 마찰에 의한 손실이 전부이기 때문에 그 길이를 L 직경을 D 라 하면 압력손실계수는

$$K = f \frac{L}{D} \quad (2)$$

여기서 f 는 마찰계수로 von Karman에 의하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{f^{0.5}} = 2 \log(Re \cdot f^{0.5}) - 0.8 \quad (3)$$

ii) 디퓨저의 압력손실은 마찰에 의한 압력손실 뿐만 아니라 압력증가에 의한 것도 고려해야 하기 때문에 다음과 같이 주어진다.

$$K = \left(\frac{f}{8 \cdot \tan(\theta/2)} + 0.6 \cdot \tan \frac{\theta}{2} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 \right) \quad (4)$$

D_1 : 작은 직경

D_2 : 큰 직경

θ : 확산각

iii) 가이드베인을 포함한 코너부분의 압력손실계수는 다음과 같다. 단 입구와 출구의 단면적은 같다.

$$K = \left(0.1 + \frac{4.55}{(\log Re_c)^{2.58}} \right) \quad (5)$$

$$Re_c = \frac{V \cdot c}{\nu}$$

c : 가이드베인의 코드길이

iv) 수축부의 압력손실계수는 다음과 같다.

$$K = \frac{\Delta p_f}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (6)$$

$$\Delta p_f = \frac{\rho}{2} \int_0^{L_c} f \cdot \frac{V^2}{D} \cdot dL$$

L_c : 수축부의 길이

v) 스크린 대한 압력손실계수는 다음과 같다.

$$K = K_0 + \frac{55.2}{Re_d} \quad (7)$$

$$K_0 = \left(\frac{1 - 0.95 \cdot \beta}{0.95 \cdot \beta} \right)^2$$

$$\beta = \left(1 - \frac{d}{M} \right)^2$$

d : 철사 직경

M : 격자 간격

$$Re_d = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

vi) 하니콤의 길이가 격자 간격의 6~8배인 경우에 대한 압력손실계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K = 0.30 & : \text{원형 단면 격자} \\ K = 0.22 & : \text{사각형 단면 격자} \\ K = 0.20 & : \text{육각형 단면 격자} \end{aligned} \quad (8)$$

위의 압력손실계수들은 원형 단면을 가진 덕트에 관한 것으로 이 것들을 사용하기 위해서는 사각형 단면을 원형 단면에 대한 것으로 바꾸어 주어야 한다. 어떤 사각형 단면의 면적을 A 라하고 그 둘레의 길이를 S 라고 할 때 이 사각형 단면에 대응하는 원형 단면의 지름 D_h 는

$$D_h = \frac{4A}{S} \quad (9)$$

로 주어 진이다. 이 식을 이용하여 상기 식들을 사각형 단면을 가진 요소들에 사용하면 된다.

2.6 임펠러 구동마력 계산

2.5절에서 계산된 K 값들을 가지고 구동모터의 소요마력을 계산하는 식은 다음과 같다. 총 손실압력 Δp_T 는

$$\Delta p_T = \sum_i \Delta p_i = \frac{\rho}{2} \sum_i K_i \cdot V_i^2 \quad (10)$$

이고, 이 유체만을 움직이는데 필요한 동력 P_o 는

$$P_o = \Delta p_T \cdot A_b \cdot V_b \quad (11)$$

A_b : 임펠러가 놓이는 부분의 단면적

V_b : 임펠러가 놓이는 부분의 유속

여기에 축계의 전달효율 η_i 및 임펠러효율 η_o 등을 고려하면 소요동력 P 는 식 (12)와 같다.

$$P = \frac{P_o}{\eta_i \cdot \eta_o} = \frac{\rho \cdot g \cdot h_T \cdot A_i \cdot V_i}{\eta_i \cdot \eta_o} \quad (12)$$

3. 구조 설계

소형 회류수조의 구조설계는 변형을 최소화하면서 운반 및 설치시 운용이 쉽도록 경량화의 관점에서 수행하였다.

구조부재의 재료는 부식을 예방하기 위해서 SUS304를 택하여 보수유지가 간단하도록 하였다. 본 구조물은 규모가 작아서 제작이 용이하도록 하며 제작비를 줄이기 위하여 부재 수를 줄이고 단순화시켰으며, 이러한 관점에서 동체에는 별도의 보강재를 설치하지 않아도 가능한 두께를 선정하여 사용하였다. 특히 변형관점에서 관측창부의 유리는 구조부재의 상대변형에 의하여 파손될 우려가 있어 구조부재의 변형이 최소화될 수 있도록 상세설계에 주의를 기울였다. 상대 변형량을 구하기 위하여 본 구조물에 대한 강도해석을 수행하였다. 하중조건으로는 수조 내부에 물을 가득 채운 조건이었으며 바닥에 단순지지조건을 부여하였다. 구조해석 결과의 예로서 등가응력의 분포를 Fig. 2에서 보여주고 있다. 구조 부재에 발생하는 응력은 허용응력을 만족하였으며, 관측창부의 상대 변형량도 창틀의 고무변형의 허용치를 만족하고 있음을 확인하였다.

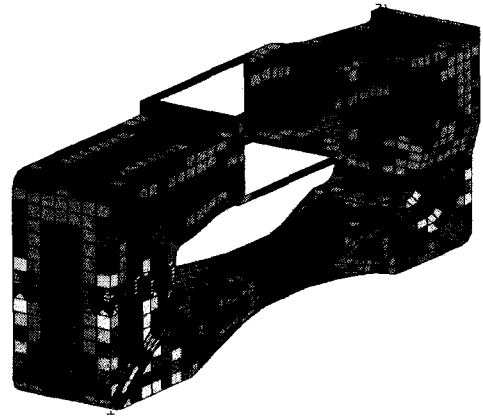


Fig. 2 Distribution of equivalent stress

4. 유속분포 및 성능분석

Fig. 3은 해양공학 실험을 위하여 제작된 소형 회류수조로, 주요제원은 Table 1과 같다.

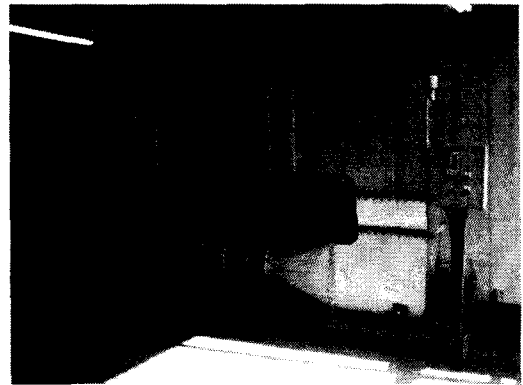


Fig. 3 CWC for ocean engineering

Table 1 Principal dimensions of the CWC

| Items | Dimensions | |
|-------|------------|-------------------|
| | Whole body | Measuring section |
| L (m) | 3.4 | 1.3 |
| B (m) | 1.0 | 1.0 |
| D (m) | 2.0 | 0.8 |

제작된 수조의 성능을 확인하기 위하여 관측부의 길이, 폭 및 깊이 방향의 중앙부에서 유속을 계측하였다. 해저에 매설된 파이프 주위의 유동관찰 모형시험이 가장 빈번하게 수행될 속도인 $V=0.6\text{m/s}$ 에서 시간에 따른 유속변화를 분석하였다. 유속은 프로펠러 유속계로 10회에 걸쳐 계측하였으며, 매 계측 시 5초 동안의 평균을 구하였다 (Table 2, Fig. 4). $V=0.6\text{m/s}$ 를 중심으로 최대 약 5% 범위 내에서 진동하는 양상을 보이고 있다. 이러한 결과는 해양 구조물 주위의 유동을 관찰하는데 큰 무리가 없다고 판단된다.

Table 2 Measured velocities

| Times | Velocity (m/s) |
|-------|----------------|
| 1 | 0.612 |
| 2 | 0.630 |
| 3 | 0.598 |
| 4 | 0.600 |
| 5 | 0.621 |
| 6 | 0.574 |
| 7 | 0.623 |
| 8 | 0.577 |
| 9 | 0.604 |
| 10 | 0.591 |

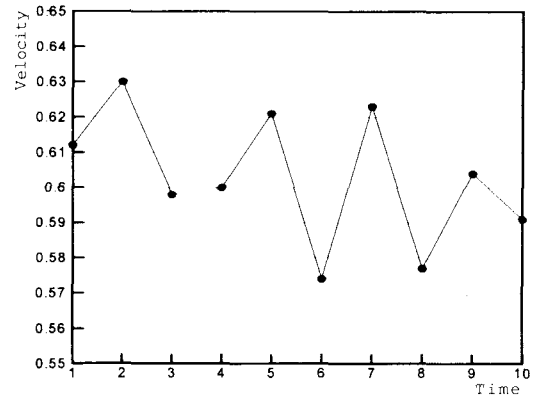


Fig. 4 Measured velocity distributions, $V=0.6\text{m/s}$

5. 결 론

해양공학용 소형 회류수조를 개발하여 그 성능을 확인하였다. 가장 빈번하게 실험이 수행 될 대표유속인 $V=0.6\text{m/s}$ 에서 최대 5% 정도의 오차를 보이고 있으며, 해양 구조물 주위의 유동을 관찰하는데 큰 무리가 없다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2002년도 중소기업청 기술혁신개발사업의 연구비 지원으로 수행된 "해양공학관련 수리실험장치 개발"의 일부이며, 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- Circulating Water Channel Group of Japan (1985), "Seminar on Circulating Water Channel," December.
- van Manen, J. D. and Oosterveld, M. W. C. (1966), "Analysis of Ducted Propeller Design," SNAME Trans. Vol. 74.
- Rae, Jr. W. H. and Pope, A. (1984), "Low-Speed Wind Tunnel Testing".