

수치 해석을 이용한 감압 회류 수조 설계

부경태^{†*}, 조희상*, 신수철*

삼성중공업*

Depressurized Circulating Water Channel Design Using CFD

Boo Kyungtae*, Cho Heesang* and Shin Suchel*

Samsung Heavy Industries Co., LTD*

Abstract

New high-speed depressurized circulating water channel was designed by using the CFD code. Flow in the channel has free surface and pressure in the test section can be depressed. In this study, Flow separation and bubble occurrence were considered in designing the contraction nozzle shape for better flow uniformity in the test section. To supplement velocity defect due to the free surface, nozzle injection system more effective in high-speed flow was installed instead of drum system. Necessary power and injection techniques were proposed. And guide vane arrangement was analyzed to reduce the flow resistance and keep quiet free surface from 'surging'. Wave absorber was devised to reduce the wave resistance and to prevent the entrainment of air to the diffuser.

*Keywords: circulating water channel(회류 수조), contraction nozzle(수축부), guide vane(유도깃), nozzle injection system(노즐 분사 장치), wave absorber(파동 흡수 장치)

1. 서론

본 연구에서는 수치 해석을 이용하여 회류 수조를 설계 하고 제작하였다. 본 수조는 통상의 수조보다 관측부에서 고속 유동이 가능하도록 여러부가 장치를 보완하거나 추가하였고 자유 표면 상공의 압력을 제어할 수 있도록 관측부 위로 두

껍을 씌웠다 (Fig.1). 사양은 영국의 계측기 및 수조 제조업체인 Cussons 사의 'FA11A'를 모델로 하였는데 Table 1에서 두 수조를 비교하였다.

이 수조는 안정적인 실험을 위해 Table 2와 같은 성능이 만족되어야 하고 관측부에서 2m/s 정도의 유속을 가지는 기존의 일반 수조들보다 유속이 빠르면서 자유 표면 상공의 압력을 조절할 수 있어야 한다. 이를 위하여 고속에서도 자유 표면의 거동이 안정적이고 유동의 균일성을 보장할 수 있는 수축부가 설계 되었고 자유표면에서의 속도 감소를 막기 위한 노즐 분사 장치가 고안되었다.

접수일: 2003년 4월 23일, 승인일: 2003년 7월 28일
†주저자, E-mail: kyungtae.boo@samcong.com
Tel:042-865-4733

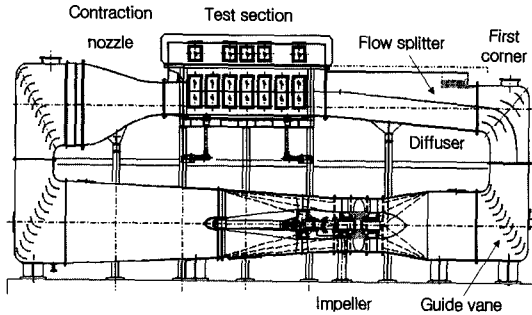


Fig. 1 Tunnel schematic.

Table 1 The comparison of 'FA11A' and new designed channel.

		FA11A	Present
tunnel	length	16.18 m	16 m
	height	5.68 m	5.6 m
	width	5 m	5 m
test section	width	1.4 m	
	depth	01. ~ 0.84 m	
	pressure	10 KPa	
	V_{MAX}	5.5 m/s	5.88 m/s (measuring value)
Impeller Power	74 KW	150 KW	

Table 2 Test section size and flow condition.

size (L×H×W)	5×0.84×1.4 m
velocity	In 3 m/s, within ± 2.5% except 50mm from the wall
surging	In 3 m/s, within ± 2.0mm
surface inclination	In 1.0 m/s, within 1/6000 In 2.0 m/s, within 1/1000

그리고 자유 표면이 끝나는 곳에서 유동이 벽면과 만나 발생하는 조파 저항과 자유 표면으로 물결이 지는 것을 막기 위해 파동 흡수 장치를 제안하였다. 수조의 코너에는 큰 에너지 손실 없이 유동이

흐를 수 있도록 유도 깃을 두었고 고속의 경우 임계 초과 유동(supercritical flow)이 되어 유동 전체가 불안정하게 되는 것을 억제하기 위해 디퓨저를 가르는 기다란 유동 분할 깃(flow splitter)을 설치하였다.

2. 수치 해석

2.1 지배 방정식

FLUENT V.5.4를 이용해 난류 해석은 벽함수를 이용한 $k-\epsilon$ 모델(Laundier/Spalding 1974)을 자유 표면을 위해서는 VOF (Volume Of Fluid) 방법이 사용되었다. 여기서 작동 유체의 밀도(ρ)는 998.2 kg/m^3 이고 점도(μ)는 $1.307 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 이다.

2.2 수축부(Contraction nozzle)

수축부는 관측부에서 필요한 유속을 만들고 유동을 균일하게 만드는 것이 목적이다. 본 연구에서는 Fig.2와 같이 입구는 2.17m의 정사각형이고 출구는 1.4×0.84m로 4:1의 수축비를 가지는 수축부를 설계하였다. z방향으로의 길이는 2.5m이고 형상은 Wetzel등(1994)이 제안한 식(1)의 5차 곡선식을 사용하였다. 이 식은 이차 유동의 발생을 막기 위해 두 번 미분한 값이 연속을 유지하고 있고 변곡점의 값에 따라 공동 현상이 발생할 수 있는 수축부 윗면과 박리 가능성이 있는 수축부 밑면의 역압력 구배 크기를 조절할 수 있는 효과가 있다.

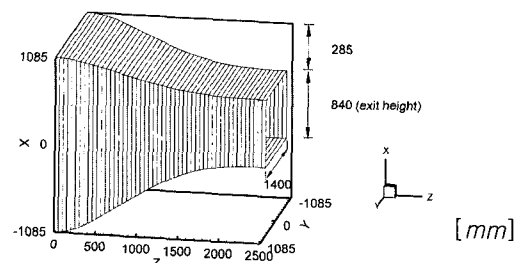


Fig. 2 Contraction nozzle.

$$\frac{x}{x_0} = A\left(\frac{z}{L}\right)^3 + B\left(\frac{z}{L}\right)^4 + C\left(\frac{z}{L}\right)^5 \quad (1)$$

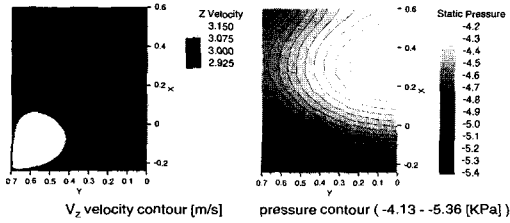
$$A = 10z_i \frac{(4z_i - 3)}{D}, B = -2A + 5$$

$$C = A - 4, D = 10z_i^2 - 12z_i + 3$$

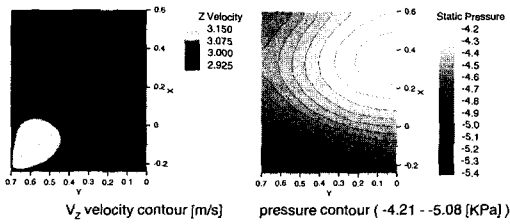
여기서 L 은 수축부의 길이이고 변곡점 z_i 는 아래와 같이 정의한다.

$$z_i = \frac{z}{L} \quad (2)$$

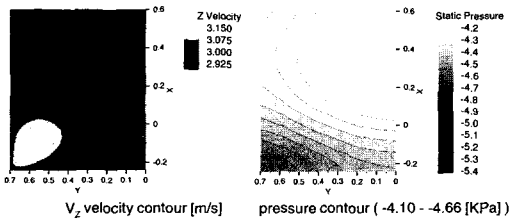
Fig.3은 변곡점이 다른 수축부 출구의 압력 분포이다. 그 결과 변곡점(I.P.)이 0.7인 경우가 가장 균일한 결과를 보였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Velocity and pressure at the nozzle exit; I.P.= (a) 0.5 (b) 0.6 (c) 0.7.

2.3 노즐 분사 장치 (Nozzle Injection System)

유동이 수축부에서 관측부로 흐르는 순간 대기를 만나고 그때 공기와의 속도 차이에 의해 자유 표면에 물결이 일어나는데 이를 억제하기 위해 제파판을 설치한다. 그리고 자유 표면에서는 유속이 떨어지므로 이를 막기 위해 표면의 속도를 가속시킬 수 있어야 한다. 일반적으로 이를 위해 일반 수조들은 드럼 타입의 표면류 가속장치를 사용하는데 이 장치는 고속에서 효과가 없고 감압을 시킬 경우 압력이 새는 것을 막기가 힘이 든다. 따라서 본 연구에서는 수조의 아래 관에서 펌프를 이용해 물을 끌어올려서 노즐을 통해 분사하는 장치를 설계하였다. 이때 분사 방식은 제파판 끝에서 수력 점프(hydraulic jump)가 발생하는 것을 막기 위해 Fig.4에서처럼 아래로 15°의 각도로 분사 하였고 가속 효과를 주기 위해 주 유동보다 2 배 빠른 속도를 기준으로 하였다. Fig.5는 노즐의 모습이고 주 유동이 6m/s일때 경계 조건으로는 압력 조건을 사용하여 노즐 두께에 따라 분사량과 필요한 펌프 동력을 수치 해법으로 유추하였다.

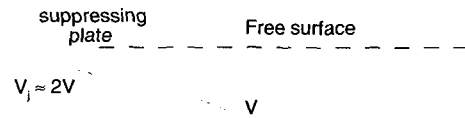


Fig. 4 Nozzle injection system.

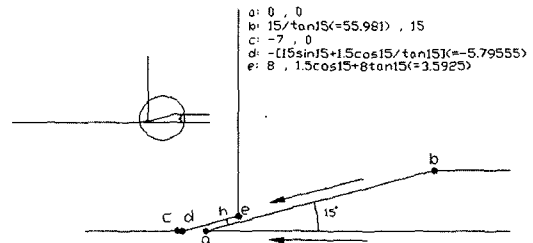
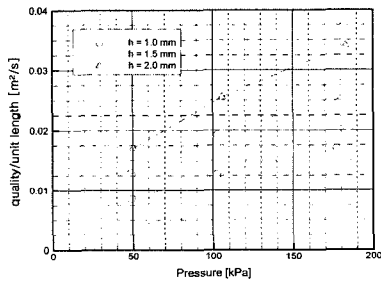


Fig. 5 Nozzle injection system schematic ($U_{\text{tunnel}}=6 \text{ m/s}$, dimension; mm).

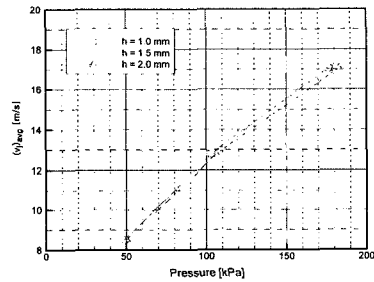
Fig.6에서 노즐 두께와 상관없이 압력차와 평균 유속은 선형적인 관계를 보이는데 주 유동 보다 2 배의 속도를 내기 위해서는 약 100KPa의 압력차가 필요하고 두께가 얇을수록 같은 동력에 대해 더 많은 물을 분사할 수 있으나 Fig.7에서 알 수 있듯이 가속 능력은 어느 정도의 두께 이상이어야 하므로 본 수조는 1.5mm두께로 제작하였다.

$$Power = [\Delta P_{nozzle} + \rho g H + f(Q)] \cdot Q \quad (3)$$

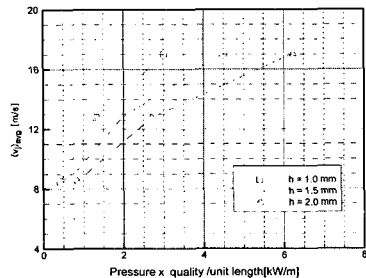
여기서 H 는 분사장치의 높이이고 Q 는 분사 유량을 그리고 $f(Q)$ 는 수두 손실을 의미한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 (a) Quality and (b) average velocity through out of the nozzle, and (c) power.

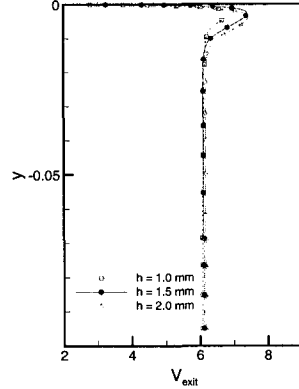
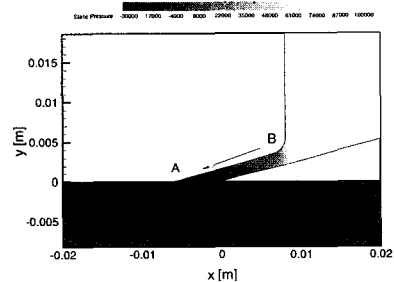
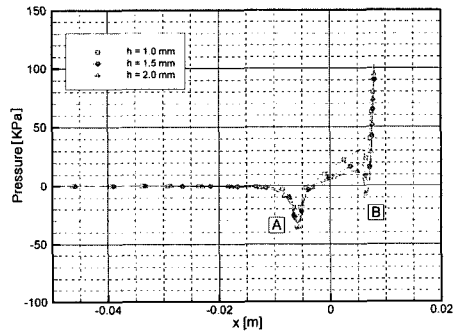


Fig. 7 Velocity profile at the outlet in case that ΔP is 103 KPa.



(a)



(b)

Fig. 8 Pressure (a) in the nozzle and (b) on the nozzle wall ($\Delta P = 103 \text{ KPa}$).

이 경우 필요한 동력은 식(3)에서 유추될 수 있는데 5m 높이에서 물을 끌어올리고 16m/s로 분사한다면 Fig.6 (c)에서 $\Delta P_{nozzle} \cdot Q$ 는 4KW/m 이므로 수두 손실을 무시했을 때 필요한 동력은 5.175KW/m가 됨을 계산할 수 있다. 그런데

Table 2에서 관측부 폭이 1.4m였으므로 동력은 7.245KW가 필요하다. 그리고 노즐 분사 장치를 설계할 때 좁은 틈새를 통해 유체가 이동되므로 Fig.8 에서처럼 압력 변화가 심하게 일어나고 벽면 기울기가 급한 부근에서 압력골과 함께 공동 현상이 일어날 위험이 크다. 따라서 유연한 흐름이 될 수 있도록 매끈한 벽면 처리와 충분한 곡률을 두고 제작 되어야 한다.

2.4 유도 깃(guide vane)

방향 전환부에는 유도 깃을 여러개 배치하여 유동의 방향이 바뀌면서 발생하는 이차 유동을 억제한다. 만약 유도 깃이 없다면 관측부 유동까지도 비정상성과 서징 현상이 나타날 것이다.

통상 사용되는 유도 깃의 모델은 Fig.9와 같은데 본 수조의 경우 고속 회류수조이나 공동수조에 비해 유속이 빠르지 않으므로 Fig.10의 모델을 사용하였다. 이곳에서의 에너지 손실은 동력의 많은 부분을 차지하고 통상의 설계 기준으로 깃의 간격과 코드 길이의 비율 1:3 이하로 하고 있다. 그러나 본 수조의 경우는 뒷장에 논의할 유동 분할 깃을 포함하여 그보다 작은 다섯 개의 유도 깃을 Fig.11과 같이 유선을 고려하여 설치하였다.

2.5 파동 흡수 장치(wave absorber)

본 장에서는 관측부 자유 표면 거동을 이차원적으로 해석하였다. 이때 방향 전환부의 높이가 자유 표면이 끝나는 높이와 같을 경우 유동이 조금만 불안정해져도 공기가 수조 내로 유입될 수 있으므로 50mm의 턱을 만들었다. 그리고 Fig.12에서처럼 유체가 수조 벽면과 만나서 파동을 일으키지 않도록 이곳에 침으로 채워진 망을 설치하였고 투과성이 $10^{-10}m^2$ 인 다공성 물질로 간주하여 수치적으로 해석해 보았다. Fig.13는 투과성이 그보다 작은 (a)의 경우 불안정해지는 자유 표면을 보여주고 있는데 실제 투과성은 변수가 많다. 침이 가지는 성질과 조밀도 그리고 물이 벽면과 만나는 면적과 이루는 각도에 따라 다른 결과가 나올 수 있으므로 유의하여야 한다.

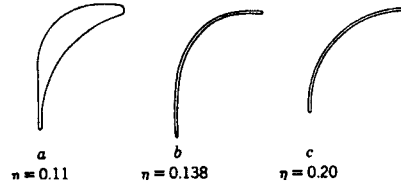


Fig. 9 Guide vanes ($\eta = \Delta P / [\frac{1}{2} \rho U_{in}^2]$).

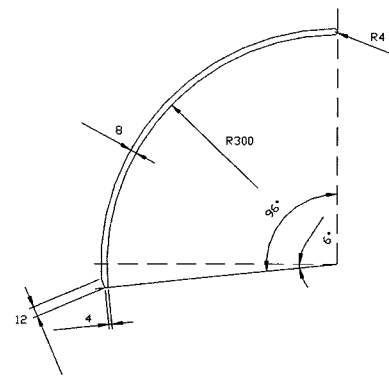


Fig. 10 Present guide vane [mm].

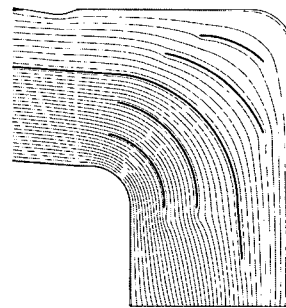


Fig. 11 Streamline in the first corner.

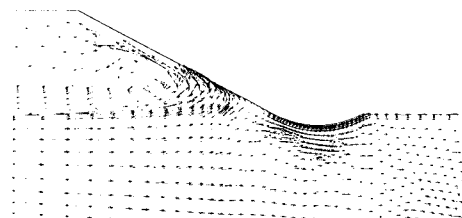


Fig. 12 Wave occurrence at the end of the free surface.

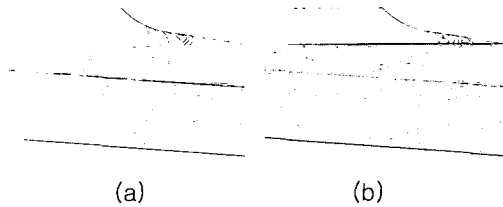


Fig. 13 Streamline when the flow collided with wave absorber; (a) unstable case (b) stable case.

2.6 유동 분할 깃(flow splitter)

고속 유동을 위해 Fig.14와 같이 디퓨저를 상하로 나누는 기다란 유동 분할 깃을 제작하였다. 이 경우 유동은 자유 표면 때문에 저항이 작은 위쪽으로 더 잘 흘러가서 깃이 없는 경우보다 속도가 빨라질 것이다. 그러나 단면적이 흐름 방향으로 점점 늘어나므로 자유 표면이 끝나는 곳에서는 유속이 더 작아져 유동이 수조벽에 주는 충격을 줄일 수 있다. 또한 이 장치는 수력 점프 현상을 분할 깃 위로만 제한시킬 수 있어 유동 전체가 흔들리는 것을 막을 수 있다. 이 장치의 앞부분은 힌지로 연결하여 위, 아래로 50mm씩 회전이 가능토록 해서 나뉘는 유량비를 조절 할 수 있도록 하였다.

3. 계측 결과

수치 해석적으로 분석된 결과를 바탕으로 수조가 제작되었고 그 성능을 확인하기 위해서 관측부에서의 유동 계측이 이루어졌다. Fig.15는 관측부 자유 표면에서 일어나는 서징을 유속별로 계측한 것으로 3m/s의 유속에서 2mm내로 억제됨을 확인할 수 있었다. Fig.16은 표면 경사도로 Table 1에서 유속이 2m/s일 때 제시된 1/1000보다 작은 1/2924로 계측되었다. Fig.17은 계측된 관측부 유속으로 임펠러 회전수와 유속간의 좋은 선형성을 얻을 수 있었으나 최대 유속이 5.8m/s로 낮게 계측되었다. 이는 해석 초기에 수두 손실을 너무 작게 유추한 결과이다. Fig.12와 13에서 나타나는 자연스러운 유동 흐름이 아니라 실재 수조 가동 결과 유동 저항이 심하게 나타나고 고속에서 수치

해석적으로 예측 하지 못하였던 수력 점프 현상이 유동 분할 깃 위로 나타나 이로 인한 에너지 손실이 커서 최대 유속이 낮게 계측되었다. 그러나 유동 분할 깃을 없애는 것은 수력 점프 현상이 관측부 전체 유동장에서 일어날 수 있고 그럴 경우

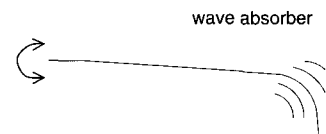


Fig. 14 Tunnel schematic which flow splitter and wave absorber are installed in.

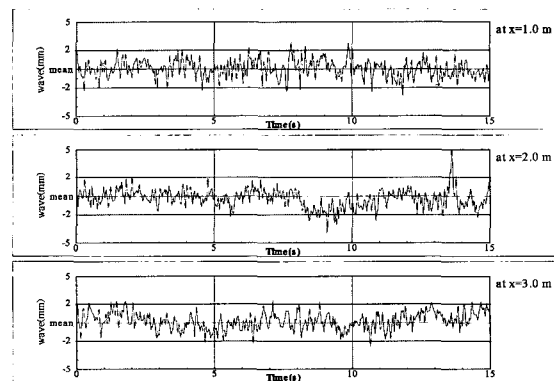


Fig. 15 Time signals of wave surging when the flow velocity of the test section is 3m/s.

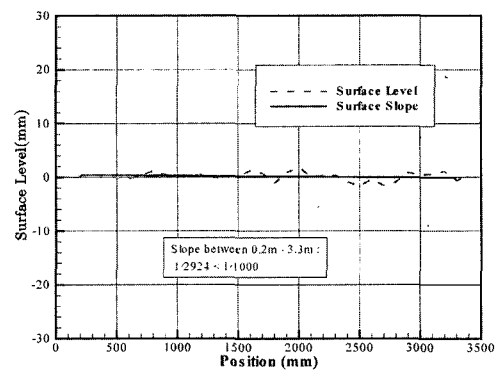


Fig. 16 Surface slope in the test section when the flow velocity of the test section is 2m/s.

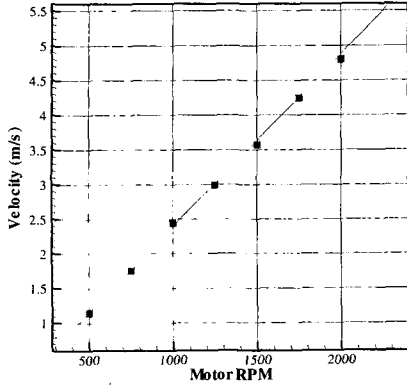


Fig. 17 Linearity between Motor RPM and flow velocity.

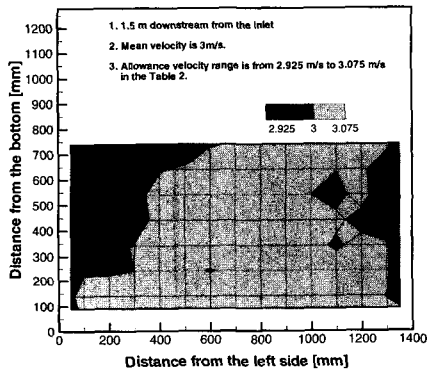


Fig. 18 Velocity distribution measured with Pitot tube in the test section ($u_{in} = 3m/s$).

너지 손실과 함께 유동 균일도 등이 크게 훼손된다. Fig.18은 유동 균일도를 확인하기 위해 수축부 끝단에서 흐름 방향으로 1.5m 떨어진 관측부 중앙 단면의 속도 분포를 Pitot tube로 계측한 결과이다. 터널 내 평균 유속은 3m/s였으며 터널 양 벽쪽에 속도가 감소되는 영역이 나타났다.

4. 결론

수축부 본래의 목적인 유동의 균질성이 우수한 수축부 형상이 제시되었다. 자유 표면의 속도 감소를 보충하기 위해서 노즐 분사 장치가 설계되었고 7.5KW 펌프를 설치하였다. 고속 유동에서 자

유 표면의 안정성을 위해 디퓨저를 가로 지르는 유동 분할 깃을 두었는데 방향 전환부 내에는 유선의 모양에 따라 5개의 유도 깃을 제안하였다. 그리고 자유 표면이 끝나는 곳에서는 에너지 손실과 파도가 이는 것을 막기 위해 파동 흡수 장치가 고안되었다. 그 결과 제작된 수조는 관측부 내 자유 표면이 있으면서 압력을 조절할 수 있고 Table 2에 제시된 성능들을 만족시킬 수 있었다. 그러나 파동 흡수 장치가 기대만큼의 효과를 내지 못하고 예상하지 못한 수력 점프 현상이 빨리 발생해 그로 인한 유동 저항 때문에 최대 유속이 기대만큼 크지 않았다. 예를 들어 'FA11A'와 비교한다면 Table 1에서 본 수조의 경우 임펠러 동력이 약 2배 인데 이론적으로 수조에서 유속과 임펠러 파워와는 3승근의 관계가 성립하므로 유속은 $\sqrt[3]{2}$ 배인 6.93m/s가 될 수 있어야 하나 본 수조의 경우 약 5.88m/s로 그보다 최대 유속이 작다. 그렇지만 2m 모형선을 기준으로 저항, 차항 실험 그리고 프로펠러 단독 성능 시험 등이 가능하다고 기대되며 관측부 좌우 벽 뿐 만 아니라 바닥에도 아크릴 창을 제작하여 유동 관측을 용이하게 하였다. 공동 관찰 실험 등을 위해서는 수조내 기포가 없어야 하는데 대기압에서 관측부 유속이 3m/s를 넘어가면 수조 내에서 작은 기포들이 발생되기 시작하였으므로 이 이상의 유속에서는 실험이 곤란할 것으로 판단된다. 그러나 그 보다 낮은 속도에서는 우리가 없으며 압력 센서등의 설비를 갖출 경우 변동 압력 실험등이 가능하다. 그리고 압력을 조절 할 수 있고 실험 유속 범위를 넓게 가져갈 수 있어 좀 더 다양한 실험 조건을 만족시킬 수 있다. 그렇지만 지금보다 유속을 빠르게 할 수 있는 방안들이 모색될 필요가 있다. 그러나 속도를 향상시키기 위해 임펠러의 용량을 올리는 것은 비 경제적이고 그 보다 고속에서 발생하는 수력 점프 현상을 억제하거나 유동이 수조 벽과 만날 때의 충격을 좀 더 잘 흡수할 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 이를 위해 디퓨저를 가르는 유동 분할 깃에 유동이 빠져 나갈 수 있도록 구멍을 만들거나 방향 전환부의 부피를 키우는 방안들이 수치적으로 모색되었다. 그 결과는 수조를 재 계측한 구체적인 결과와 함께 정리할 수 있는 기회를

가지겠다.

참 고 문 헌

- 김진, 김형태 1997 "수축부 기초 유동 해석을 위한 삼차원 Euler 방정식 풀개 개발," 한국 전산 유체 공학회, 제2권 제 1호.
- 부경태 2001 "감압 회류수조 설계를 위한 수치 해석 연구," 삼성중공업(주) 조선플랜트연구소 연구 보고서.
- 이승준 1995 "회류수조의 과거와 미래," Report of the Ind. Educ. Research Center, Vol. 18. No. 1, pp.130-138.
- Launder, B.E., Spalding, D.B. 1974 "The Numerical computation of Turbulent Flows," Comp. Meth. Appl. Mech. and Eng., Vol.3, pp. 269-289
- Muzafarija, S., Perić, M., 1997 " Computation of Free-Surface Flows Using the Finite-Volume Method and Moving Grids," Num. H. Trans., Part B Vol. 32, pp. 369-384.
- Runstadler, P. W. Jr., et al., Diffuser Data Book, Create Inc. Tech. Note 186, Hanover, N. H., 1975
- Robert Gordon, Mohammed S. Imbabi, 1998 "CFD Simulation and Experimental Validation of a New Closed Circuit Wind/Water Tunnel Design," Tran. ASME, J. Fluid Eng., Vol.120, pp. 311-318.
- Wetzel, J. M., Arndt, R.E.A., 1994 "Hydrodynamic Design Considerations for Hydroacoustic Facilities: Part 1-Flow Quality," Tran. ASME, J. Fluid Eng., Vol.116, pp. 324-331.
- William H. Rae., Jr. A. Alan Pope. "Low Speed Wind Tunnel Testing"



< 부 경 태 >



< 조 희 상 >



< 신 수 철 >