

수조 성능 향상을 위한 공동 수조 내 방향 전환부 설계

부경태^{†*}, 신수철^{*}

삼성중공업 성능개발 2^{*}

First Elbow Design for the Improvement of Tunnel Performance

Boo Kyungtae^{†*} and Shin soochul^{*}

Samsung Heavy Industries Co., LTD Ship Performance 2^{*}

Abstract

In the cavitation tunnel, the first corner plays role for the flow direction to execute 90-degree turn. So, energy loss is serious, and the cavitation phenomena well occur in the guide vane surface. In this paper, the flow in the first corner was numerically calculated. From the calculation result, cavitation phenomena mainly occurred in the suction side of the last guide vane and vicinity that vane and tunnel wall adjoin each other. And bubbles occurred from all guide vanes if the flow velocity in the test section reaches the any critical value. We could analogize with our experience in the water tunnel that bubbles that occurred in time not vanish, and become miniature in the flow although the pressure recover. So, they circulate with flow in the tunnel, and come into view in the test section. Therefore, first corner must be designed for bubbles not to appear in the test section according to the flow condition like velocity and pressure demanded by the experiment. We analyzed flow in case that the first elbow configuration was redesigned and some of the existing guides vanes were eliminated. And we presented that first elbow can be easily designed for the improvement of tunnel performance through the computational analysis.

※Keywords: CFD(수치 해석), Cavitation Tunnel(공동 수조), Cavitation Phenomena(공동 현상), Guide Vane(유도 깃)

1. 서론

접수일: 2003년 11월 7일, 승인일: 2004년 7월 4일

† 주저자, E-mail: kyungtae.boo@samsung.com

Tel: 042-865-4733

공동 수조에서 정도 있는 실험을 하기 위해서는 관측부를 지나는 유동의 상태를 시험 조건에 맞게 제어할 수 있어야 한다. 공동 수조는 관측부를 기

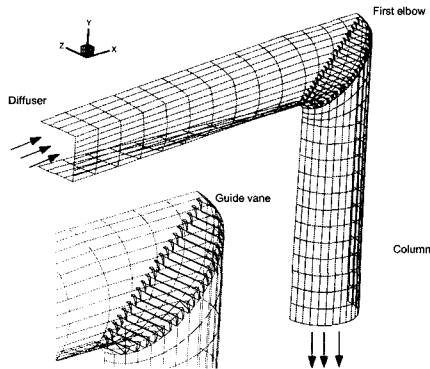


Fig. 1 First elbow configuration that is installed the guide vane.

준으로 유동 유입 쪽에 압축부가 있으며, 유동 후방 쪽에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 확대부, 유도 깃이 설치된 코너부, 그리고 수직부로 구성된다.

수조 내 유동은 압축부를 지나면서 관측부에서 균일한 유속 분포를 가지도록 유도 되고, 확대부를 통해 유속을 떨어뜨림으로써 방향 전환부로 흘러가는 유동의 압력을 회복시켜준다. 속도가 낮으면 유동 방향을 바꾸는데 필요한 에너지 손실이 줄고 압력이 높을수록 방향 전환부의 공동 현상 발생 또한 억제 할 수 있기 때문이다. 그리고 방향 전환부에는 관측부 후방의 유동을 90도 회전시키면서, 유동 박리를 최소화하기 위해 일련의 유도 깃을 설치한다. 수조의 에너지 손실은 바로 이곳에서 가장 크게 발생되고, 유도 깃 표면에도 공동 현상이 가장 발생하기 쉽다 (부경태 등 2003).

그런데 여기서 발생된 기포는 압력이 회복되면서 깨지는데 이때 소음이 발생되고 함께 발생되는 충격파로 주위 재질을 마모시킨다(Lambert 1996). 그리고 발생된 기포가 많을 경우엔 일부 기포는 사라지지 않고 미세화 된다. 이렇게 미세화 된 기포들은 물과 함께 수조 내를 돌아다니게 되고 관측부에도 나타나 관찰 시험 등을 매우 어렵게 한다. 따라서 이러한 기포 발생이 억제될 수 있도록 수조가 설계되어야 수조의 시험 능력을 넓힐 수 있다.

본 논문에서는 수치해석을 통해 유도 깃을 포함한 방향 전환부 내의 유동을 해석하였고, 이를 통해 관측부 유동 조건에 따라 유도 깃에서의 기포 발생을 예측할 수 있었다. 그리고 그 결과를 바탕으로 방향 전환부 형상과 유도 깃이 주는 효과가 고찰되었고 수치해석이 수조 내 기포의 발생을 최소화 할 수 있는 설계 방향을 제시할 수 있음을 보였다.

2. 수치해석

Fig. 1의 방향 전환부에 대한 유동 해석을 상용 코드를 이용해 수행하였다. 작동 유체는 물이며 계산에서 사용된 수조 사양은 Table 1에 mks단위 계로 무 차원 하여 나타내었다. 그리고 형상은 좌우 대칭이므로 절반만 해석하였고 Fig. 2에는 방향 전환부 내에 등 간격으로 21개가 설치된 유도 깃 단면을 도시하였다.

Table 1 Geometric data of the test section and diffuser.

Test Section	Velocity	6 ~ 9
	Length	12
Diffuser (Squire to Circle)	Inlet	3 by 1.4
	Outlet (Diameter)	2.2
	Length	9.5
	Area Ratio	0.905
Corner	Guide vane	# 21 (regular interval)

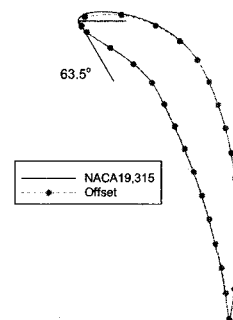


Fig. 2 The cross section of the guide vane.

수치해석을 위해 연속 방정식과 RANS식이 사용되었고(Peric 1985), 유동 해석을 위해 사용된 방법과 경계 조건은 Table 2에 나타내었다. 여기서 입구는 실제 상황을 묘사하기 위해 관측부를 지나며 발생하는 경계층을 식(1)의 1/7법칙을 이용해 가정하였는데 이때의 경계층 두께는 관측부 길이를 고려한 식(2)을 이용하였다 (White 1986).

$$\frac{U}{U_{max}} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \quad (y \leq \delta) \quad (1)$$

$$\frac{U}{U_{max}} = 1 \quad (y \geq \delta)$$

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.16}{Re_x^{1/7}} \quad (2)$$

Table 2 Computational code and the boundary condition.

Solver	FLUENT	
Governing Equation	Standard k-ε equation with wall function	
Algorithm	SIMPLEC	
Scheme	Second order upwind	
Boundary condition	Wall	No slip condition
	Symmetry plane	Symmetric condition
	Inlet	Equation(1)
	Outlet	Neumann condition

수치해석은 Table 3에 언급한 경우들이 다루어졌다. 입구 유속을 바꿔가면서 전환부 내의 유동을 분석하고 이를 통해 수치 해석이 공동 현상 발생을 예측할 수 있음을 보였고 (Case1, 부경태/신수철, 2003a), 유도 깃을 제거한다든지(Case 2) 수조 형상을 바꿈으로써(Case 3, 4) 전환부 내 압력장의 변화를 보고 공동 현상의 발생에 어떤 효과가 있는지 고찰하였다. 여기서 편의를 위해 유도 깃을 아래에서 위로 가면서 모두 21번까지 번호를 붙였고, case 2는 위에서부터 차례대로 출수 번 째 유도 깃을 하나씩 제거해 가며 해석하였다. 그리고 case 3,4에서 Fig. 3(a)과 같이 확대부의 입구 면적을 키워서 방향 전환부로 유입되는 유동

의 압력을 높이거나 Fig. 3(b)처럼 전환부의 부피를 증가시킴으로써 유동 내 유속이 떨어졌을 때의 효과를 분석하였다.

Table 3 Analyzed cases by computational calculation.

Case	Flow Velocity	Guide Vain	Etc.
1	6 ~ 9	#21	Standard
2	6	#21~14, 10	Standard
3	6	# 21	Diffuser
			Outlet
			(Diameter)
4	6	# 21	Corner volume 20 % increase

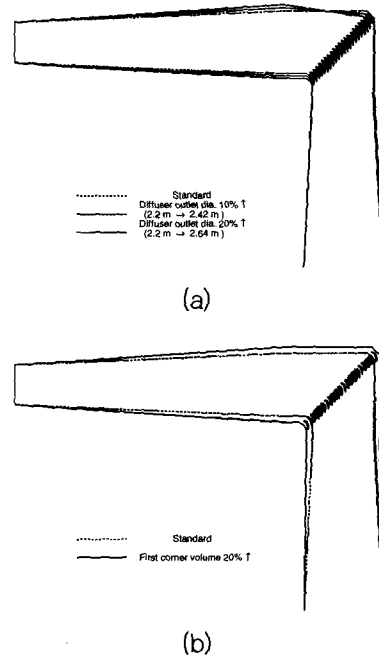


Fig. 3 The cross section of the tunnel.

3. 해석 결과 (Case 1)

SIMPLE 계열의 해석에서 압력은 상대값이지만 공동 현상의 발생은 절대 압으로 증기압력에 다다를 때 일어나므로 모든 해석 결과는 관측부의 압

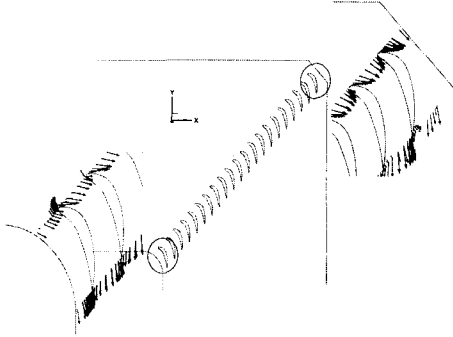
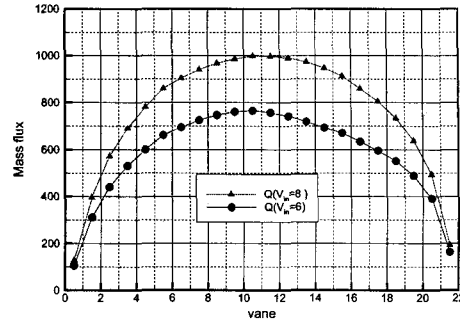


Fig. 4 Vector plot in the inlet and outlet of the guide vane.

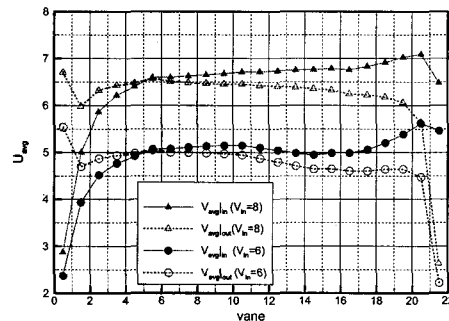
력을 기준으로 도시하였고 높이에 의한 정수압의 영향($= \rho gh$)은 상대적으로 작아 무시하였다.

Fig. 4는 해석 결과 얻어진 유도 깃을 지나는 속도 벡터를 보여 주고 있다. 깃간의 거리는 일정하나 터널 위, 아래 벽면과 인접된 양 끝의 깃은, 아래의 경우 수축부와 같은 형상이고 위쪽은 수축부처럼 면적이 줄었다가 다시 늘어난다. 따라서 아래쪽 유도 깃의 경우 유체가 유동 저항을 받으므로 유도 깃을 잘 지나지 못할 것을 예상할 수 있는데 위쪽의 경우 유동이 심한 받음각을 가진 것처럼 나타나고 깃을 지날 때는 확대부 모양의 형상 때문에 유속은 느려질 것이다.

Fig. 5에서는 각 유도 깃 사이를 지나는 유량과 평균 유속을 도시하였다. 여기서 x축은 앞장에서 언급했듯이 아래에서 위로 가면서 유도 깃에 붙인 번호를 뜻한다. Fig. 5(a)에서 유량은 면적이 넓은 가운데 영역에서 크고, Fig. 5(b)에 도시한 평균 유속은 양끝을 제외한 대부분 영역에서 일정한 값을 보여 유도 깃에 의해 균일한 유속 분포가 유도되고 있음을 알 수 있다. 그러나 터널 벽면과 아래 첫번째 유도 깃 사이에서 유체 저항이 크므로 작은 속도 값을 보였다가, 틈새를 지나 유도 깃을 떠날 때는 수축부와 같은 유로 때문에 큰 속도의 증가를 확인할 수 있다. 그리고 가장 상부에 위치한 유도 깃의 경우에는 반대로 확대부 모양의 형상 때문에 유도 깃을 떠날 때는 속도가 줄어든다. 그래서 유도 깃을 지나 나타나는 평균 유속이 가파르게 낮아지고 있다. 그렇지만 이 깃의 입구



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Mass flux and (b) average velocity through out of the guide vane.

유속은 매우 빠르고 Fig. 3에서 가장 큰 곡률 반경을 가지므로 유체의 가속 또한 크게 발생되고 이로 인해 압력 변화도 클 것이다.

본 결과를 좀 더 고찰하기 위해 Fig. 6에 유도 깃 표면의 유선과 압력 분포를 나타내었다. Fig. 6(a)는 뒤에서 본 유도 깃 상부를 그리고 (b)는 앞에서 본 유도 깃의 하부를 도시하였다. 그림에서 한계 유선을 보면 유동이 역류하고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 앞에서 언급하였던 유동 저항 때문이며 따라서 Fig. 5에서 유량의 감소를 설명할 수 있다. 특히 상부 유도 깃 뒤편의 유동은 크게 가속을 받으며 회전하기 때문에 그 부근에서의 압력이 낮게 나타나 기포 발생의 위험이 큼을 알 수 있다. 여기서 도시하지 않은 상부 유도 깃 앞면과 하부 유도 깃 뒷면은 특별한 유동 현상이 없어 생략하였다.

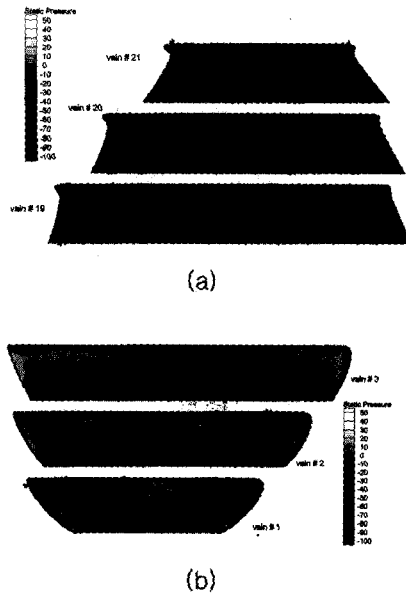


Fig. 6 Pressure distribution and flow path line on the guide vane surface; (a) front view, (b) rear view.

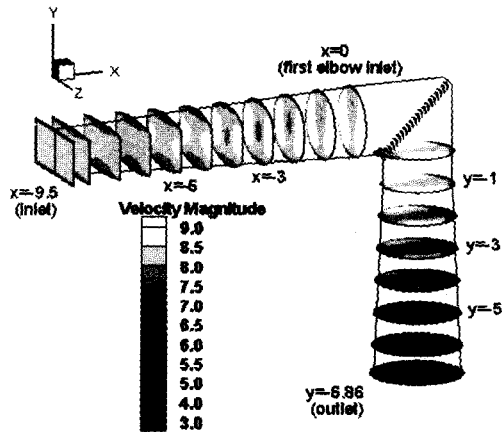


Fig. 7 Velocity magnitude contour in the cross section of the tunnel.

Fig. 7은 입구 유속이 8인 경우에 대해 수조 각 단면에서의 속도 분포를 보여준다. Table 1의 수조 사양과 함께 이 그림을 보면, 수축이 일어나고 있는 확대부 좌우 벽의 경우 벽 근처에서 오히려 유동이 가속되므로 경계층의 성장을 볼 수 없고

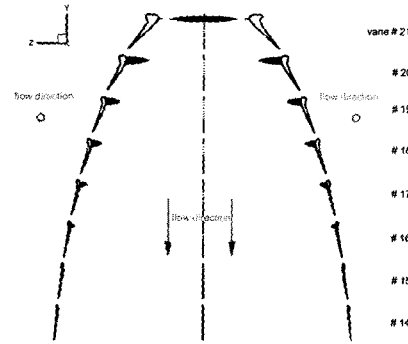


Fig. 8 Estimated region which cavitation phenomena may happen in the guide vane surface ($U_{in} = 8$).

확대되는 위, 아래의 벽면에서 경계층이 성장하다가 출구 쪽으로 가면서 사라지고 있다.

Fig. 8은 관측부 유속이 8일 경우, 유도 깃 표면의 압력 값을 가지고 공동현상이 발생되리라 수치적으로 판단되는 영역을 표시한 것이다. 그림은 유도 깃 뒤편에서 본 것인데 제일 상부 유도 깃의 suction side 그리고 유도 깃과 만나는 수조 벽면에 공동 현상이 발생할 것을 예측하고 있다. Suction side의 경우 유동이 심하게 가속 받으며 유도 깃을 지나기 때문이고 수조 벽면 또한 3차원적으로는 유로가 좁아지고 있기 때문이다.

Fig. 9는 공동 현상의 발생 여부를 판단하기 위해 깃 표면의 압력 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 두꺼운 실선은 압력이 증기압일 때의 경우로 공동 현상이 발생하는 한계치이다. 이때 기준 압력은 관측부의 압력을 대기압으로 하였다. Fig. 9(a)는 입구 유속이 6인 경우로서 공동 현상의 위험이 크게 나타나지 않는다. 그러나 유속이 8인 Fig. 9(b)의 경우, 상부에 위치한 유도 깃 표면에서 압력이 두꺼운 실선 밑으로 내려가 기포가 크게 발생할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 기준이 되고 있는 관측부에서의 압력을 40이상 낮추거나 유속을 빨리하여 그림에서 두꺼운 실선이 -60까지 올라온다면 대부분의 유도 깃에서 공동 현상이 발생할 것을 유추할 수 있다. 우리는 이 경우처럼 갑자기 많은 영역에서 기포가 발생되면 사라지지 않고 미세화 되어 관측부까지 나타난다

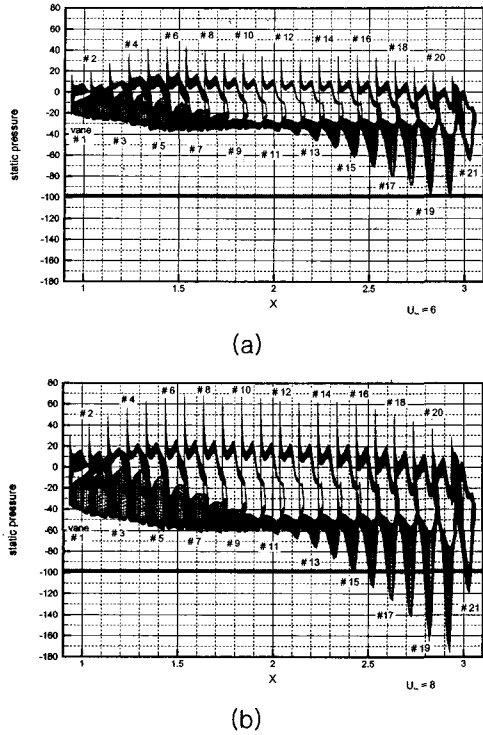


Fig. 9 Pressure distribution on the guide vane surface.

고 판단하고 있다(부경태 등 2003). 따라서 모든 유속에 대하여 대응되는 관측부에서의 임계 압력을 나타내는 map을 그리게 되면 이 그림을 통해 우리는 기포 때문에 실험이 불가능한 관측부의 유동 조건을 알 수 있게 된다.

4. 해석 결과 (Case 2, 3, 4)

본 경우에는 유도 깃을 일부 제거해 보거나 전환부 형상을 제 설계함으로써 유장에 어떤 영향이 있는지를 고찰하였다(부경태/신수철 2003b). Fig. 10은 그 결과로써 유도 깃이 수조벽면과 만나는 곳에서의 압력분포를 도시한 것이다. 여기서 압력이 가장 낮게 계산된 영역은 원으로 표시하였다.

그림에서 유도 깃을 제거하지 않은 경우 상부에서 최소 압력을 가지다가 유도 깃을 위에서부터 제거할수록 아래로 내려온다. 그리고 확대부의 지

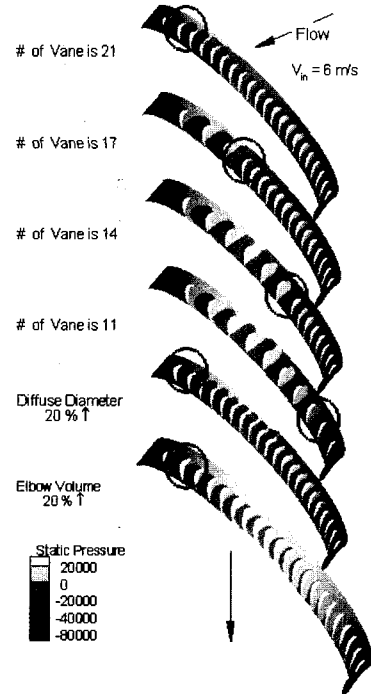
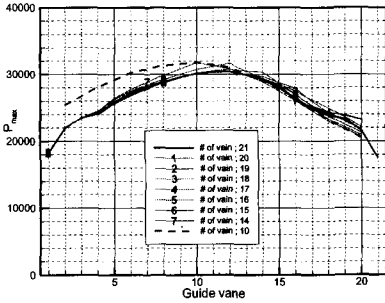


Fig. 10 Pressure distribution on the corner that vane and tunnel wall adjoin each other.

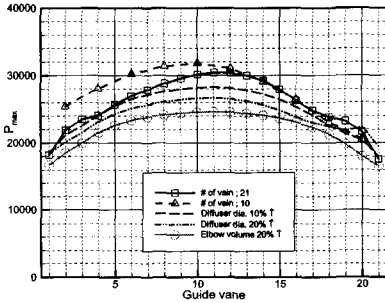
름이 20%커져 면적이 넓어진 경우는 그렇지 않은 제일 상부 벽면의 압력 분포와 차이가 없었고 부피를 넓힌 경우에 유속이 떨어지므로 압력 변화의 크기가 작아져서 분포는 동일하지만 최소 값이 상대적으로 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 11, 12는 본 연구에서 고려되었던 경우들의 정량적인 비교를 위해 유도 깃 표면에 작용하는 최대, 최소 압력 값을 비교한 것이다.

Fig. 11에서 최대 값의 분포는 유도 깃의 수량과 관계가 없음을 알 수 있다. 그러나 유도 깃이 기존보다 절반으로 줄어든 경우에는 방향 전환부 하부를 지나는 유동의 방향을 전환시키기 위해 각 유도 깃에 작용하는 부하가 커지므로 최대 압력이 상승한 분포를 보인다. 그리고 확대부의 면적을 키우면 Fig. 3(a)의 수조 형상에서 알 수 있듯이 전환부 입구의 면적이 넓어지면서 유속이 떨어지고, 수조 벽면이 기울게 되므로 유도 깃과 만나는 유동의 받음각이 작아지게 된다. 따라서 방향 전



(a)

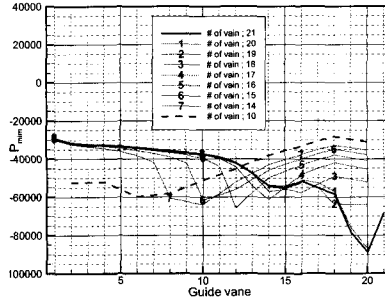


(b)

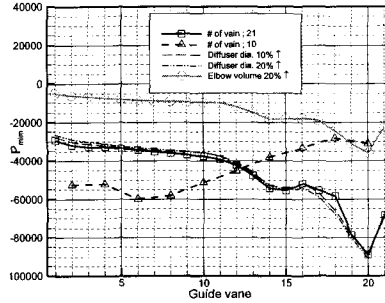
Fig. 11 Maximum pressure on the guide vane surface.

환부 입구에서 압력이 더 많이 회복되었지만 유도 깃 표면의 정체점에 발생하는 최대 압력 값이 상대적으로 작아졌음을 볼 수 있다. 그리고 방향 전환부의 부피가 늘어난 경우에도 전환부 입구 압력이 높더라도 유도 깃을 지나는 유속이 가장 낮으므로 최대 압력 값 또한 낮아지게 된다.

Fig. 12는 압력의 최소 값 분포이다. Fig. 10에서 언급 했듯이 상부에서 유도 깃을 제거해 갈수록 최소 압력의 위치도 함께 내려오는데 정수압을 고려하지 않았으므로 내려온 높이(h)만큼 수두가 발생하여 그만큼 압력 상승($=\rho gh$)의 효과가 발생한다. 따라서 유도 깃이 절반으로 줄어든 경우가 가장 좋은 결과를 보인다. 이 결론으로부터 우리는 현재의 경우가 유도 깃이 너무 많이 설치되었다고 판단할 수 있다. 일반적으로 유도 깃 설계는 깃 간 거리와 코드 길이의 비를 1:3을 기준으로 하는데(부경태 등 2003), 그보다 많이 설치된 본 경우는 유동을 균일하게 회전시켜준다는 면에서는



(a)



(b)

Fig. 12 Minimum pressure on the guide vane surface.

효과적일 수 있으나 공동 현상을 억제하는 면에서 비효율적이다. 여기서 유도 깃을 하나만 제거하더라도 최소 압력 값을 상승시킬 수 있는데 이것은 Fig. 8에서 볼 수 있는 최 상부 유도 깃과 터널 벽면 사이에 발생하는 흡입 면에서의 압력 강하 현상이 사라지기 때문이다. Fig. 4에서 이곳의 형상이 압축부처럼 수축하다 확대되는 것을 알고 있는데 이 때문에 여기를 지나는 유동이 가속되어 압력 강하 현상이 발생하는데 유도 깃을 제거함으로써 이런 현상이 사라진 것이다.

그리고 확대부의 면적을 키운 경우는 대칭면에서의 압력 분포를 도시한 Fig. 13에서 확대부를 거치면서 압력 회복 량이 다르므로 서로 상이한 분포를 보인다. 그러나 유도 깃과 만나는 수조 벽면에서는 수조 면적이 같아지면서 유속이 같아지고 Fig.12(b)에서 보듯이 최소 압력 값은 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 그러나 부피를 증가시킨 경우는 유속이 낮아지면서 압력 변동 량 또한 작

아지므로 가장 높은 압력 분포를 보인다.

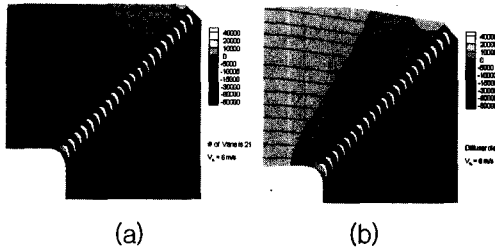


Fig. 13 Pressure distribution in the symmetric plane.

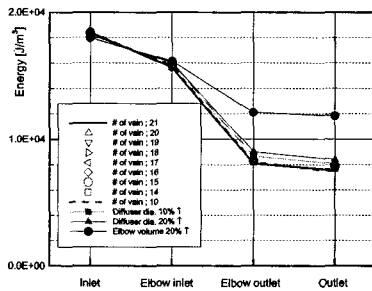


Fig. 14 Energy in each section of the tunnel. where, $Energy = \frac{1}{A} \int_A (P + \frac{1}{2} \rho v^2) dA$.

Fig. 14는 해석되어진 각 경우에 에너지 손실량을 비교하고 있다. 그림에서 유도 깃을 제거한 경우 에너지 손실량은 차이가 없고 부피를 키워 속도를 떨어뜨린 경우가 30%이상의 에너지 손실을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이 경우 같은 임펠러 동력을 사용한다고 했을 때 관측부 유속이 가장 빨라진다. 여기서 벽면에 작용되는 전단력에 의한 에너지 손실은 무시하였다.

5. 결론

국내의 경우 대형 공동 수조 혹은 감압형 회류 수조 보급이 매우 적기 때문에 수조 성능에 주요한 영향을 미치는 방향 전환부의 수치해석과 설계의 응용 부분에는 연구 결과가 미흡한 실정이다. 그러나 국내에서 삼성중공업(주)이 대형 공동 수조를 보유하고 있고, 감압 회류수조의 설계 경험

이 있기 때문에 이에 대한 연구가 이루어져왔다. 본 연구는 그 일부로 관측부 유동 조건에 따른 방향 전환부에서의 기포 발생 여부와 위치를 수치적으로 예측하였다.

참고 문헌

- 부경태, 신수철, 2003a, “공동 수조 내 방향 전환부 설계를 위한 수치 분석,” 대한조선학회 춘계학술대회, pp. 407-413.
- 부경태, 신수철, 2003b, “수조 성능 향상을 위한 공동 수조 내 방향 전환부 설계,” KTTC 공동 workshop
- 부경태, 조희상, 신수철, 2003, “수치 해석을 이용한 감압 회류 수조 설계,” 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 4호, pp. 22-29.
- Lambert, D. 1996 Cavitation—Minimizing Its Destructive Effects in Control Valves. Control Engineering, Dun - Donnelley Publishing Corp.
- Peric, M., 1985, A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts, Ph.D. thesis, Univ. of London.
- White, F.M., 1986, Viscous Fluid Flow McGraw-Hill, Inc., pp. 400-404



< 부 경 태 >



< 신 수 철 >