

## 전산해석기법을 이용한 수압분기관의 최적형상 설계

강승규\* · 윤준용\*\* · 강신형\*\*\* · 성낙원\*\*

### Optimization of Hydraulic Bifurcation by Computational Fluid Dynamics

Seung-kyu Kang\*, Joon-yong Yoon\*\*, Sin-hyoung Kang\*, Nak-won Sung\*\*\*

*KeyWords* : Head loss(수두손실), Hydraulic bifurcation(수압 분기관), Computational fluid dynamics(전산유동해석), Flow optimization(유동 최적화)

#### ABSTRACT

This study proposes a modified bifurcation model with a computational fluid analysis according to variation of a bifurcation geometry. FLUENT is used for a calculation of the head losses in case of a generation and a pumping. The pressure, velocity field and turbulent intensity are simulated in a bifurcation. With consideration about these flow properties, we propose the modified model to improve a flow efficiency and reduce a sound. The proposed model is able to cut down a head loss by 45% when a generation and 36% when a pumping.

#### 1. 서론

산업 현장에서 발생하는 유체에 의한 물질 전달이나 에너지의 수송 등을 수행하는 관로에서 형성되는 흐름의 성격은, 대부분 완전 난류 영역에 속하며 본 연구에서 고찰하고자 하는 수압 분기관에서의 흐름 또한 완전 난류영역에 포함된다. 관로를 지나는 유체의 거동에 대한 고찰은 근본적으로 유동장이나 압력장에 대한 정보를 기초로 하므로, 본 연구에서도 최종적으로 얻고자 하는 정보는 압력장, 특히 관로 내 정압의 변화 및 영구 압력 손실에 관한 정보를 얻고자 수치해석을 수행하였다.

파이프 내의 흐름과 같은 내류의 경우, 관로 내 압력의 변화, 또는 압력 손실에 영향을 미치는 인자는 크게 나누어 유체 흐름에 대한 척도인 레이놀즈수와 유체를 수송하는 관로의 성격으로 나누어 고려할 수 있다<sup>(1)</sup>. 레이놀즈수에 의한 영향은 유동의 성격을 층류의 영역과 난류의 영역으로 구분하고, 각 유동 영역에서의 손실의 평가는 서로 상이한 과정을 필요로 한다. 또한, 관로의 성격에 의한 영향은 유체와 접하는 관로 표면의 거칠기, 즉 표면 조도와 관로 형상에 따른 영향으로 구분된다. 상기의 열거된 몇 가지 인자들을 포괄한 손실의 정량적 평가는 유체와 접하는 표면의 거칠기에 따라 발생하는 주손실과 관로의 형상에 따라 발생하는 부차손실로 나누어 고려하는 것이 일반적이다<sup>(2)</sup>.

주손실과 부차손실의 크기는 경우에 따라 그 상대적인 크기를 서로 달리하는데, 주손실이 더 큰 경우도 있

\* 한국가스안전공사 연구개발원  
\*\* 한양대학교 대학원 기계공학과  
\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부  
책임저자 E-mail: joyoon@hanyang.ac.kr

고 그 반대의 경우도 발생할 수 있다. 본 연구에서 고찰하고자 하는 분기관은 경우, 배관 요소인 티 형상의 관로와 유사하게 흐름의 면적과 방향의 변화를 초래하므로 부차손실의 크기가 주손실의 크기에 비해 매우 클 것으로 예상되며, 이는 주손실의 정량적 크기를 무시하고 부차손실만을 평가함으로 전체 손실을 경제적으로 평가할 수 있음을 의미하기도 한다.

본 연구는 양수발전에서 사용되는 수압 분기관 형상에 실제 유동조건을 적용하고, 범용 유동해석 프로그램인 FLUENT<sup>(3)</sup>를 이용하여 유동해석을 수행하였다. 이를 통해 분기관 내부의 압력 및 속도장 그리고 난류분포를 예측하고, 유동효율을 극대화 할 수 있는 분기관의 형상을 설계하고자 한다. 분기관에서 발생하는 수두 손실량을 예측하여 제안되는 모델의 성능을 평가하고 최적의 분기관 모델을 제시하고자 한다.

## 2. 이론

동일 유선상의 정상, 비압축성 유동의 두 지점 간에는 다음과 같은 에너지 보존방정식(베르누이 방정식)이 성립한다<sup>(1)</sup>.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + H_L \quad (1)$$

여기에서, P는 정압 (static pressure, Pa),  $\gamma$ 는 유체의 비중량 ( $N/m^3$ ), V는 유속 (m/s), g는 중력가속도 ( $m/s^2$ ),

그리고 z는 기준면으로부터의 수직거리 (m)를 의미한다. 그리고  $H_L$ 은 에너지 손실이다. 베르누이 정리에 따르면, 유선상의 두 지점 간에는 항상 총수두가 일정하여야 하지만, 실제로는 관마찰에 의한 손실과 관로의 형상에 의한 손실 등이 반영 되어  $H_L$ 에 해당하는 수두손실을 포함하게 된다. 기준면으로부터 동일한 선상에 있는 두 지점이라면 위치변화에 의한 위치 수두의 변화는 무시할 수 있다. 이 경우 입·출구에서의 수두손실은 압력 및 속도에 의한 수두 손실로 나타나게 되고 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\text{Pressure Head Loss; } H_p = \frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} \quad (2)$$

$$\text{Velocity Head Loss; } H_v = \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \quad (3)$$

$$\text{Total Head Loss; } H = H_p + H_v \quad (4)$$

베르누이 정리는 동일 유선상의 두 지점에서 성립하는 보존식이다. 그러므로 평균유속을 사용할 경우 다음과 같은 수정된 베르누이 방정식을 사용한다<sup>(2)</sup>.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + H_L \quad (5)$$

여기에서,  $\alpha$ 는 평균유속과 각 지점에서의 속도 사이에 발생하는 오차를 보상하기 위한 수정계수로서 다음과 같이 계산한다.

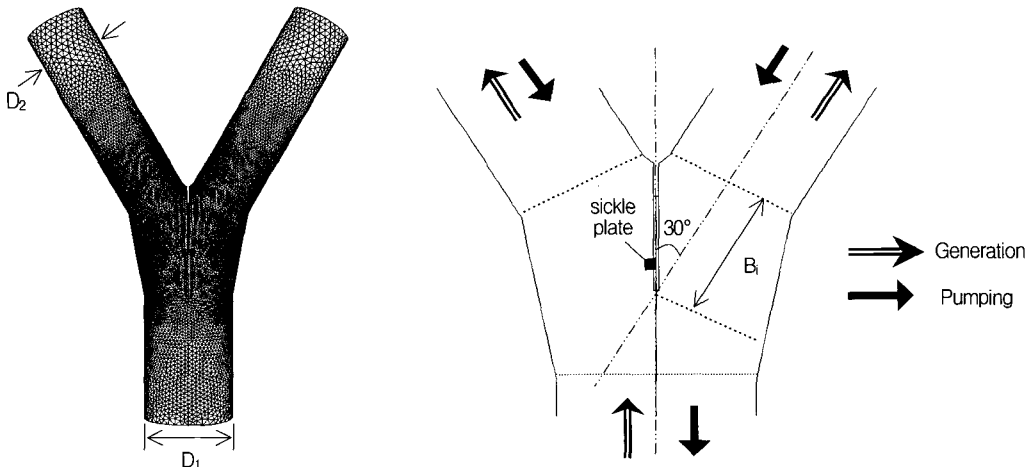


Fig. 1 Geometry and grid configuration for the initial bifurcation model

Table 1 Flow conditions for generation and pumping

Parameter	Generation	Pumping
Total head (m)	307.9	350.9
Total volumetric flow (m <sup>3</sup> /s)	113	78
Pipe diameter (m)	D <sub>1</sub>	5.4
	D <sub>2</sub>	3.8
Distance Bi (mm)	4000	
Reynolds number	3.51×10 <sup>7</sup>	1.72×10 <sup>7</sup>

$$\alpha = \frac{1}{A} \int_A \left( \frac{u}{V} \right)^3 dA \quad (6)$$

이때, A는 단면적, u는 각 지점에서의 속도, 그리고 V는 평균유속이다.

### 3. CFD 계산조건

본 연구는 유동이 3차원 정상상태이고, 작동유체가 물로서 비압축성 유동이라 가정하여, 상용 유동해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 계산을 수행한다. Fig. 1에 분기관 형상을 나타내었다. 발전 및 양수에 따른 유동조건은 Table 1에 나타내었다. 유동의 형태를 결정하는 레이놀즈수를 확인해 보면, 발전 시 및 양수 시 모두 10<sup>7</sup> 오더의 값을 나타냄으로써 매우 강한 난류 유동장이 형성됨을 알 수 있다. 일반적으로 원관 내부의 유동에 있어서 레이놀즈수가 2000이상에서 난류가 발생하는 것

으로 보고되고 있다<sup>(4)</sup>. 본 연구에서는 난류유동해석을 위해 공학계산에 일반적으로 사용되는 표준 k-ε 모델을 사용하였다. 컴퓨터 계산을 위한 경계조건으로서, 입구부 (Inlet)에서는 정격 유효낙차에 의한 압력 및 유량조건을 경계조건으로 사용하였으며, 출구부 (Outlet)에서는 유동이 충분히 발달되어 유동값의 변화가 크지 않을 것으로 판단하여 Neumann 조건을 사용하는 Outflow 조건을 사용하였다<sup>(3)</sup>. CFD 해석을 위한 3차원 격자망 구성은 분기부에서의 복잡한 경계형상을 효과적으로 나타내기 위해 비정렬 격자망을 사용하였으며, 분기부 및 sickle plate 주변에서의 불규칙적이고 복잡한 유동현상을 계산하기 위해 격자를 이 부분에 밀집시켜 주었다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 압력 및 속도분포

Figures 2와 3은 초기모델에 대한 유동해석 결과로서 분기관 표면에서의 정압분포와 유속 및 유선의 분포를 나타낸다. Fig. 2(a)의 발전 시 분기관 표면에서의 정압 분포를 살펴보면, 분기관의 분기점 및 sickle plate에서 최대압력 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이것은 고압의 유체가 접촉관을 통해 고속으로 유입하여 들어 오다가 분기부에 충돌하면서 정체압력이 발생하기 때문이다. 분기부를 지나 분기관으로 유체가 양분되면서 다시 압력이 점점 정상압력으로 회복되고 있으며, 분기관의 모서리 부분에서 최저압력 분포를 보인다. 이는 예리

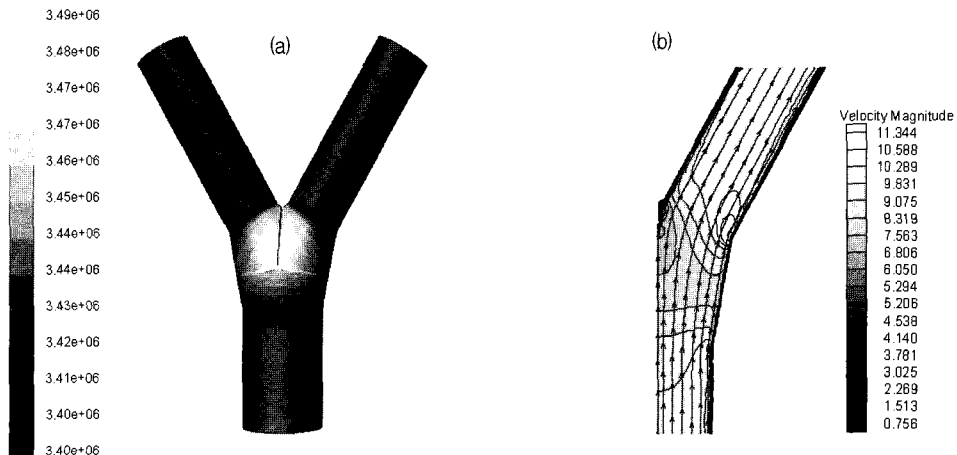


Fig. 2 Pressure [Pa] and velocity [m/s] distribution in case of a generation; (a) Pressure distribution on the surface of bifurcation, (b) Velocity contours and stream lines in the center plane.

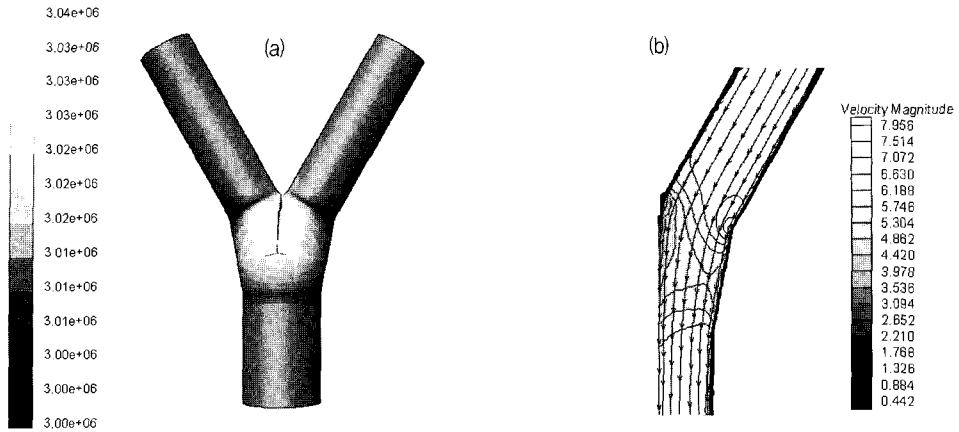


Fig. 3 Pressure [Pa] and velocity [m/s] distribution in case of a pumping; (a) Pressure distribution on the surface of bifurcation, (b) Velocity contours and stream lines in the center plane.

한 각을 가진 모서리 부근에서 유속이 상승하기 때문에, Fig. 2(b)를 통해 확인된다. 그리고 분기관에서의 유속분포를 살펴보면 모서리 쪽에서는 강한 유속이 분포하는 반면, sickle plate를 지나는 부분에서는 상대적으로 낮은 유속이 분포하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 비균일한 유동장의 형성은 유체 내부의 전단응력을 증가시켜 유체의 변형 및 난류량을 증가시키는 요인이 되며, 유로의 개선을 통해 분기관으로 유출되는 물의 유속을 균일하게 할 필요가 있다. Fig. 2(b)에서 유선의 분포를 살펴보면, 유동장 전체에서 와류는 발견되지 않는다. sickle plate 후면에서 아주 미세한 와류가 형성되고 있으나 유동장에 영향을 미칠 정도의 크기는 아니다. 와류는 유체의 흐름에서 커다란 압력손실을 유발하고 유동

효율을 저하시키는 요소로 작용하는데 본 모델에서는 이에 의한 손실은 아주 미소한 것으로 판단된다.

Figure 3은 양수 시 초기모델에 대한 유동해석 결과이다. 양수 시에는 분기관에서 유체가 유입되어 점착관으로 유체가 유출되는 형태로 유동장이 형성된다. 압력 및 속도분포의 형태를 보면 발전 시와 유사한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 정량적으로는 약간의 차이를 보이는데, 정압분포에서 최대압력을 살펴보면, 발전 시에는  $3.49 \times 10^6$  Pa이고 양수 시에는  $3.04 \times 10^6$  Pa이다. 이러한 차이는 발전 시에는 분기부에서 정체압력이 형성되지만, 양수 시에는 완전한 정체압력이 아니라 양 분기관에서 유입된 유체가 만나면서 속도의 지연으로 인해 압력이 상승한 것이므로 정체압력 보다는 낮은 압력이 형성된다. 속도 분포를 보면, 발전 시와 같이 분기관 모서리에서 급격한 유속의 상승이 발견되고 있으며 비균일한 유속분포를 보이고 있다.

초기모델의 유동해석 결과로부터 sickle plate에 압력 집중을 분산시키고, 분기관에서의 속도분포를 균일하게 하기위해, 분기부 원추관에  $5^\circ$ 의 경사를 주고, 분기점에서 분기관까지의 도약거리 ( $B_1$ )를 기존의 4000 mm에서 5000 mm로 증가시켰다. Fig. 4에 개선모델의 분기관 형상을 나타내었다.

Figures 5(a)와 6(a)의 발전 및 양수시 정압분포를 보면, 분기부에서 이전 모델에 비해 비교적 균일한 압력 분포를 보이고 있다. Figs. 5(b)와 6(b)의 발전 및 양수시 속도분포에서는 이전 모델들에서 문제가 되었던, 분기관에서 유속분포의 비균일성이 상당히 해소되었음을 확인할 수 있다. 이것은 분기점으로부터 분기관까지의

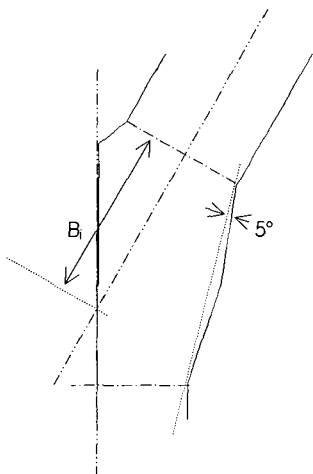


Fig. 4 Modified bifurcation model.

전산해석기법을 이용한 수압분기관 최적형상 설계

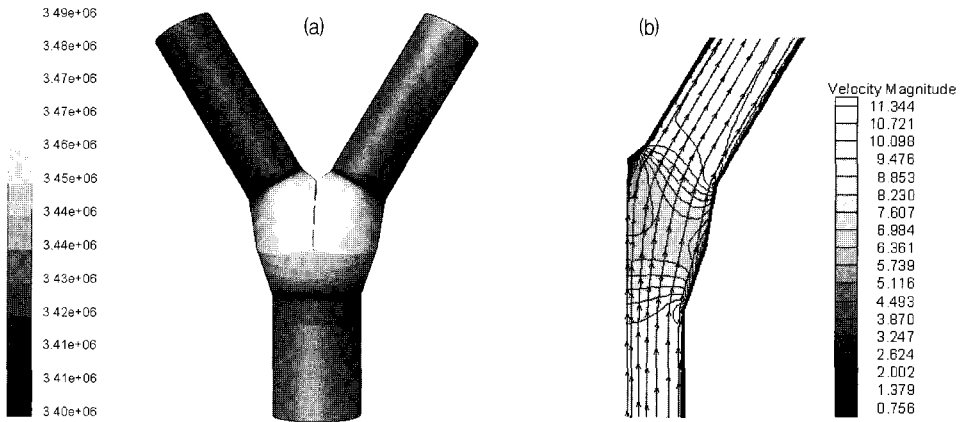


Fig. 5 Pressure [Pa] and velocity [m/s] distribution for the modified bifurcation model in case of a generation; (a) Pressure distribution on the surface, (b) Velocity contours and stream lines in the center plane.

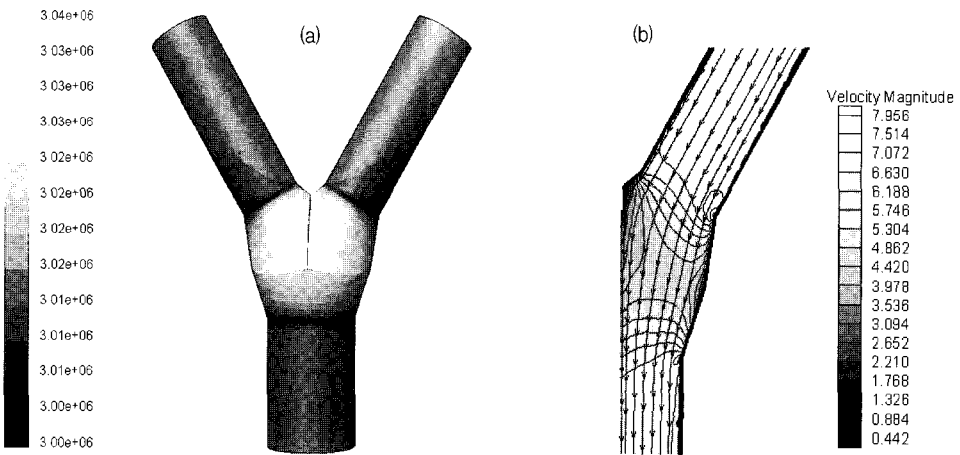


Fig. 6 Pressure [Pa] and velocity [m/s] distribution for the modified bifurcation model in case of a pumping; (a) Pressure distribution on the surface, (b) Velocity contours and stream lines in the center plane.

도약거리를 증가시킴으로써 유속이 안정적으로 분기관으로 유입 및 유출될 수 있음을 확인시켜 준다. 따라서 개선모델이 이전 모델에 비해 분기관에서 발생하는 비효율적인 유동형태를 상당히 개선할 수 있는 모델인 것으로 사료된다.

4.2. 난류분포

난류현상은 유체의 유동에서 가장 흔히 볼 수 있는 물리적인 상태이다. 난류는 유체의 일부분에서 발생되

는 복잡한 현상이며 유체가 흘러가면서 비정상적인 속도 분포를 만들고, 다른 부분의 유체와 상호영향을 주게 된다. 또한 난류는 유체에서 발생하는 소음과 밀접하게 관련되어 있다. 유체유동에서 발생하는 난류운동에너지는 대부분이 열에너지의 형태로 소멸되며, 일부는 소음(sound)을 일으키며 소멸된다<sup>(5)</sup>. 따라서 난류에너지의 분포를 통해 소음의 분포나 강도 등을 예측하는데, 일부 선행연구자들에 의하면 소음의 강도는 난류강도의 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있다<sup>(6)</sup>. Figs. 7(a)와 (b)는 각각 초기모델과 개선모델의 발전 시 중심단면에서의

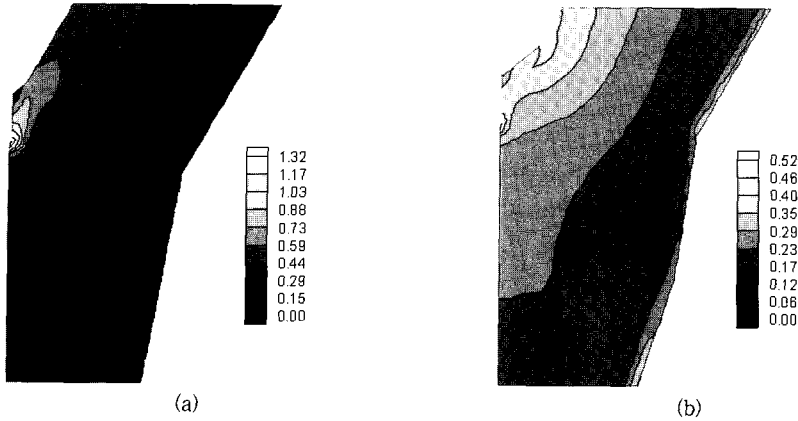


Fig. 7 Turbulent intensity  $[I = u'/u_{avg}]$  distribution in case of a generation; (a) initial model, (b) modified model.

난류강도 ( $I = u'/u_{avg}$ ) 분포를 나타낸다. 분기부에서 난류강도가 급격히 상승하는 것을 확인할 수 있으며, sickle plate에서 최대값을 나타내고 있다. 따라서 sickle plate를 중심으로 주변에서 매우 불안정한 상태의 유동장이 형성되고 있는 것을 알 수 있으며, 난류에너지 상승은 맥동적인 반력을 유발하여 소음을 증가시키는 역할을 하게 된다<sup>(7)</sup>. 그러므로 이 부분에서 유체에 의한 유동소음이 지배적으로 나타난다는 것을 예측할 수 있다. 초기모델과 개선모델의 최대 난류강도를 비교해 보면, 개선모델이 약 60%의 최대 난류강도를 감소시킬 수 있다. 이것은 분기관 형상의 변경으로 분기관 내부의 유동장이 매우 안정화되었음을 확인시켜 주는 것이며, 이로 인해 분기관에서 발생하는 유동소음도 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4.3. 수두손실

발전 및 양수 시 속도 및 압력에 의한 수두손실 결과를 Table 2에 나타내었다. 두 모델에 대한 발전 시 압력 및 속도에 의한 총 수두손실을 비교해 보면, 개선모델이 초기모델에 비해 2.84 m의 수두손실을 감소시키는 것으로

확인된다. 이는 개선모델이 초기모델에 비해 45% 정도의 효율을 향상시킬 수 있음을 의미한다. 양수 시에는 개선모델이 약 36% 정도 유동효율을 향상시킬 수 있었다.

#### 5. 결론

본 연구는 양수발전에서 사용되는 수압 분기관 내부의 유동장을 전산해석하고 초기모델과 개선된 모델의 유동 성능을 비교 분석하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) CFD해석을 통해 발전 시 분기부에서 정체압력이 형성되는 것을 확인하였으며, 초기모델의 경우는 정체압력이 분기점 및 sickle plate에 집중되는 것으로 나타났다. 분기부의 형상을 5°의 각을 가진 원추형으로 변형시킨 개선모델에서는 이러한 압력 집중을 분산시킴으로써 분기부에서의 과도한 응력집중 현상을 해소할 수 있다.
- 2) 초기모델의 경우 분기부의 모서리 부근에서 급격한 속도의 증가로 유체가 분기되면서 비균일하게 분기관으로 유입되는 현상이 CFD해석을 통해 관찰되었다. 유체 내의 이러한 속도구배는 유체내의

Table 2 Calculated head losses in case of a generation and a pumping.

	Model	Pressure Head Loss (m)	Velocity Head Loss (m)	Total Head Loss (m)
Generation	Initial model	4.87	1.43	6.30
	Modified model	2.15	1.31	3.46
Pumping	Initial model	2.09	0.66	2.75
	Modified model	1.16	0.61	1.77

전단응력을 증가시킴으로써 유체의 변형 및 난류량의 증가로 이어진다. 분기부 형상의 변화로 개선모델에서는 분기부에서 발생하는 이러한 비균일 유동장을 비교적 균일한 분포로 개선시킬 수 있었다.

- 3) 발전 시 CFD 해석을 통한 분기관의 총 수두손실에 있어서 개선모델에서는 3.46m로 기존모델의 6.30m에 비해 약 45%의 수두손실이 감소하였다. 그리고 양수 시에는 기존모델이 2.75m이고, 최종 제안모델이 1.77m로서 약 36% 정도의 수두손실을 감소시킬 수 있었다.

### 참고문헌

- (1) White, F.M., 1999, Fluid mechanics, 4th ed., McGraw-hill.
- (2) 김병하, 모양우, 손창호, 윤순현, 윤준용, 전운학, 1999, 유체역학, 淸文閣.
- (3) Fluent 6.0 User's Guide and Manual, 2002, Fluent Inc.
- (4) Schlichting, H., 1979, Boundary-Layer Theory, Seventh Edition, McGraw-Hill, Inc.
- (5) Pope, Stephen B., 2000, Turbulent Flows, Cambridge University Press.
- (6) Kwon, Y.P., 1997, "Fundamentals of industrial noise control," The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigeration Engineers of Korea, Vol. 26, No. 6, pp. 447~457.
- (7) White, R. G. and Walker, J. G., 1982, Noise and Vibration, Ellis Horwood, Halsted Press.