

## 원심펌프 측면흡입구의 유동특성에 관한 수치해석적 연구

김성\* · 최영석\*† · 이경용\*

### A Numerical Study on the Flow Characteristics of Side-suction Inlet Geometry for Centrifugal Pump

Sung Kim\*, Young-Seok Choi\*\*†, Kyoung-Yong Lee\*

Key Words : Centrifugal pump(원심펌프), Side-suction inlet(측면흡입구), Design of experiments(실험계획법), CFD(전산유체역학)

#### ABSTRACT

This paper presents a numerical study on the design of side-suction inlet geometry which is used for multi stage centrifugal pumps or inline centrifugal pumps. In order to achieve an optimum inlet geometry and to explain the interactions between the different geometric configurations, the three dimensional computational fluid dynamics and the design of experiment methods have been applied. Geometric design variables describing the cross sectional area distribution through the inlet were selected. The objective functions are defined as the non-uniformity of the velocity distribution at the passage exit which is just in front of the impeller eyes. From the  $2^k$  factorial design results, the most important design variable was found and the performance of the side suction inlet was improved compared to the base line shape.

#### 1. 서론

대표적 유체기계인 원심펌프는 산업현장 및 가정에서 널리 사용되고 있으며, 사용용도의 다양성으로 인해 원심펌프 설치 방법도 매우 다양해지고 있는 추세이다. 일반적인 원심펌프의 경우 흡입유로 방향과 토출유로 방향이 수직을 이루고 있으나, 사용처에 따라서 흡입관과 동일한 축상에서 토출을 하여야 하는 경우도 발생하며, 다단원심펌프의 경우도 흡입부의 방향이 일반적인 원심펌프 연결방법과는 다른 형태를 가지게 된다. 또한 양흡입 원심펌프의 경우도 흡입 및 토출관이 평행하도록 하기 위해서 인라인타입(In-line type)의 원심펌프를 많이 사용하며, 이 경우도 흡입부는 임펠러 입구부와 직각을 이루며 복잡한 유로를 형성하게 된다. 일반적인 파이프(pipe)로 연결된 원심펌프는 입구부분에 파이프와 수직으로 연결할 경우, 보통 엘보우(elbow)로 연결하는 경우가 많으나 임펠러 입구부분과

원심펌프 설치면 사이가 좁아서 엘보우로 설치가 불가능한 경우, 즉 임펠러 입구부분과 원심펌프 설치면의 공간이 제한되어 있을 때에는 엘보우와는 다른 형태의 측면흡입구를 설치하여야 한다.

원심펌프의 경우 입구부의 유동형태에 따라 펌프 성능은 직접적으로 영향을 받게 되며, 가급적 균일한 축방향 속도성분을 가질 수 있게끔 입구부를 설계하는 것이 매우 중요하다. 높이가 제한된 측면흡입구의 경우 복잡한 기본형상을 가지게 되며, 손실을 최소화 하면서 균일한 유동형태를 보장하는 측면흡입구 형상설계는 펌프성능과 밀접한 관계를 가지게 된다.

본 연구에서는 측면흡입구에서 중요하게 고려되어야 하는 외부 형상 설계 변수 중에서 임펠러 입구부의 유체유동의 균일성에 직접적인 관련이 있는 측면흡입구의 형상 변화에 따른 유동특성 변화에 대한 연구를 수행하였다.

\* 한국생산기술연구원 에너지설비기술지원센터

† 교신저자, E-mail : yschoi@kitech.co.kr

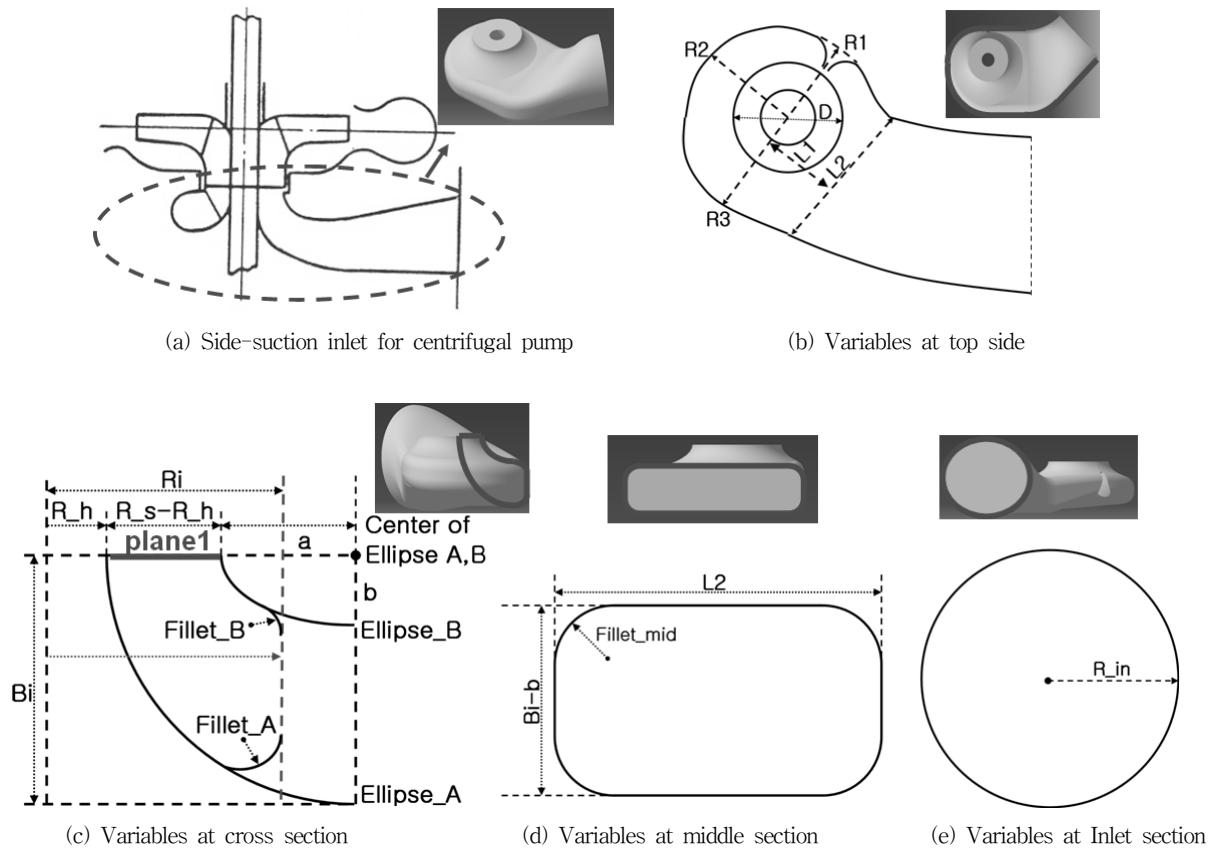


Fig. 1 Side-suction inlet shape and design variables<sup>1,2,3)</sup>

## 2. 해석대상 및 수치해석 방법

### 2.1 측면흡입구 형상

대상 펌프는 비속도 355(rpm, m<sup>3</sup>/min, m)인 원심펌프 형식이며, 원심펌프에 설치된 측면흡입구의 형상은 Fig. 1의 (a)에 보는 바와 같이 나타낼 수 있다.(1,2) 이러한 측면흡입구 형상을 효과적으로 설계하기 위해, 보는 방향에 따라 Fig. 1의 (b), (c), (d), (e)와 같이 측면흡입구 변수를 정의하였다.

Fig. 1의 (b)는 측면흡입구를 위에서, 즉 펌프의 축방향에서 보았을 때, 형상과 변수를 나타낸 것이다. D는 임펠러 입구부분의 쉬라우드 직경을 의미한다. 임펠러 중심축 기준으로 R1은 측면흡입구 스톱(suction-stop)부분에 위치한 반경을 나타내며, R3는 R1의 반대방향의 반경을, R2는 R1과 R3에서 수직으로 위치한 곳의 반경을 나타낸다. L2는 측면흡입구와 파이프를 연결하는 중간부분의 수평 길이를 나타내고, L1은 임펠러 입구부분의 중심과 L2 사이 길이를 나타낸다. 측면흡입구 변수 R1, R2, R3, L1, L2는 측면흡입구 단면적을 제어하는 중요한 변수이기도 하다.

Fig. 1의 (c)는 측면흡입구의 단면적 변수를 나타낸 것이다.

R<sub>h</sub>는 임펠러 입구의 허브 반경부분을 R<sub>s</sub>는 쉬라우드 반경부분을 나타내며, B<sub>i</sub>는 임펠러 입구부와 펌프설치면 사이 길이를 나타낸다. Ellipse\_A, Ellipse\_B는 측면흡입구 단면의 아랫부분과 윗부분의 윤곽을 나타내는 타원이며, Center of A, B는 Ellipse\_A, Ellipse\_B의 중점을 나타낸 것이다. a와 b는 Ellipse\_A의 수평축과 수직축의 길이를, B<sub>i</sub>는 Ellipse\_B의 수직축 길이와 일치하며, Fillet\_A, Fillet\_B는 Ellipse\_A, Ellipse\_B와 R<sub>i</sub>를 부드럽게 연결하는 윤곽선을 나타낸 것이다. R<sub>i</sub>는 Fig. 1의 (b)에 나타난 변수 R1, R2, R3, L1과 관련이 있으며, R1, R2, R3, L1에 의해 R<sub>i</sub>는 제어가 가능하다.

Fig. 1의 (d)는 측면흡입구와 파이프를 연결하는 중간부분의 단면을 나타내며, B<sub>i</sub>-b는 수직 길이를 나타낸다. Fillet\_mid는 B<sub>i</sub>-b와 L2를 부드럽게 연결하는 윤곽선을 나타낸 것이다.

Fig. 1의 (e)는 측면흡입구의 입구부를 나타낸 것이며, R<sub>in</sub>은 측면흡입구 입구부에 연결되는 파이프 반경을 나타낸다.

### 2.2 수치해석 형상 및 기법

측면흡입구 3차원 형상은 CATIA 프로그램을 사용하여 생성하였으며, 생성된 측면흡입구 형상에 대하여 격자생성 프로그램



Fig. 2 3D geometry and grid system for side-suction inlet

인 ANSYS CFX-mesh를 사용하여 비정렬 격자계(unstructured grid)를 생성하였다. 이 과정에서 측면흡입구 성능을 확인하기 위해 측면흡입구의 입구부 및 출구부 이후는 일정한 면적을 갖는 파이프 형상으로 근사화 하였다.<sup>(3)</sup> 측면흡입구의 3D형상과 격자계는 Fig. 2에 나타내었다. 생성된 격자계의 개수는 약 27만개이다.<sup>(3)</sup>

수치해석은 상용 3차원 점성유체 해석 프로그램인 ANSYS CFX-11을 사용하였다. 측면흡입구 내부의 비압축성 난류유동 해석을 위하여 3차원 레이놀즈 평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치해석 계산에 사용한 지배방정식은 유한체적법으로 이산화 되었으며, 이산화 기법으로는 2차 이상의 정확도를 가지는 고해상도기법(high resolution scheme)을 사용하였다. 난류유동의 해석을 위해 사용한 난류모델로는 유동박리 등의 예측에 적절한 전단이송(shear stress transport)  $k-\omega$  모델을 사용하였다.<sup>(3)</sup> 경계조건으로는 측면흡입구의 입구부에 균일한 상태의 대기압을 주었고 출구부에는 질량유량을 주어 해석을 하였으며, 작동유체는 물(water)을 사용하였다.

### 3. 실험계획법을 이용한 측면흡입구 성능분석

#### 3.1 2<sup>k</sup>요인실험

실험계획법(design of experiments)은 근대적 통계해석법을 기반으로 이상변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한 원인을 적은 비용으로 선정하고 그 효과를 수량적으로 측정하는 방법이다.<sup>(3)</sup> 그리고 동시에 두 종류 이상의 인자를 대상으로 하여 인자들의 효과를 개별적으로 측정할 수 있다. 본 연구에서는 측면흡입구 변수에 의한 측면흡입구 유동특성을 알아보기 위해 실험계획법의 2<sup>k</sup>요인실험(factorial designs)을 사용하였고, 분석은 상용프로그램인 Minitab14를 이용하였다. 본 논문에서는 관심 있는 인자의 수, 실행할 수 있는 실험의 수,

비용, 시간 등을 고려하여 의미가 적은 고차의 상호작용을 교락 시켜서 실험의 횟수를 적게 하는 일부실시설계(fractional factorial designs)로 2<sup>k</sup>요인실험을 수행하였다. 일부실시설계의 해상도는 주효과 및 교호작용 효과 사이에 일어나는 교락을 나타내며, IV수준으로 주 효과가 2차 상호작용과 교락되지 않으나, 2차 상호작용 간에는 교락된 형태로 인자수 4개로 중심값을 포함한 9개의 수치해석 실험조건을 생성하였다. 2<sup>k</sup>요인 실험에서 선택한 변수들은 측면흡입구의 변수 중에서 측면흡입구 단면적을 쉽게 제어하고, 성능에 영향을 미칠 것이라 인식되는 변수들 즉, R1, R3, L1, L2로 지정하였으며, 임펠러 입구부분의 쉬라우드 직경(D)으로 무차원화하여 정의하였다. 지정된 4개의 변수 수준은 설계기준 값에서  $\pm 10\%$ 로 정하였다. Table 1은 2<sup>k</sup>요인실험에 적용된 실험조건을 보여준다.

측면흡입구의 단면적을 나타내는 변수,  $R_h$ ,  $R_s$ 는 임펠러 입구부에 의해 고정하였고, Ellipse\_A, Ellipse\_B, Center of A, B는 임펠러 입구부와 펌프설치면의 공간 제한조건에 의해 부드럽게 연결되는 타원과 타원의 중심으로 고정하였다. 또한  $R_i$ 는 R1, R2, R3, L1에 의해 제어가 가능하기 때문에 고정된 변수라 볼 수 있다. 측면흡입구와 파이프를 연결하는 중간부분의 단면의 변수  $Bi-b$ 는 펌프 설치면에 의해 고정하였고, Fillet\_A, Fillet\_B는 Ellipse\_A, Ellipse\_B와  $R_i$ 를 부드럽게 연결하는 윤곽선으로 Fillet\_mid는 L2와  $Bi-b$ 를 부드럽게 연결하는 윤곽선으로 고정하였다. 측면흡입구의 입구부에 연결되는 파이프 반경인  $R_{in}$ 은 측면흡입구와 연결되는 파이프 반경으로 고정하였고, R2는 R1과 R3의 중간 값으로 고정하였다.

#### 3.2 측면흡입구 목적값

2<sup>k</sup>요인실험에서 변수에 따른 측면흡입구의 유동특성을 분석하기 위해서는 목적값(response variable)을 정의해야 한다. 원심펌프 임펠러는 입구부 유동형태에 직접적인 영향을 받기 때문에, 균일한 축방향 속도성분을 나타내는 측면흡입구를 설계하는 것이 중요하다. 측면흡입구와 임펠러 입구부가 연결되는 면을 Fig. 3에서 plane1로 정의하여, plane1에서 축방향 속도성분의 균일성을  $U_{Vz}$ 로 나타내고 이를 목적값으로 사용하였다. 균일성을 나타내는 식은 다음과 같다.<sup>(4)</sup>

$$U_{Vz} = \frac{\overline{Vz, area}}{\overline{Vz, mass}} \quad (1)$$

여기서  $Vz, area$ 는 면적평균된 축방향 속도 성분,  $Vz, mass$ 는 질량평균된 축방향 속도 성분을 나타낸다. 이 양은 유동의 균일성을 나타내는 척도가 되며, 1에 근접할수록 균일한 유

Table 1 Numerical analysis set of 2<sup>k</sup>factorial

	R1(%)	R3(%)	L1(%)	L2(%)
case1	-10	-10	-10	-10
case2	10	-10	-10	10
case3	-10	10	-10	10
case4	10	10	-10	-10
case5	-10	-10	10	10
case6	10	-10	10	-10
case7	-10	10	10	-10
case8	10	10	10	10
center	0	0	0	0

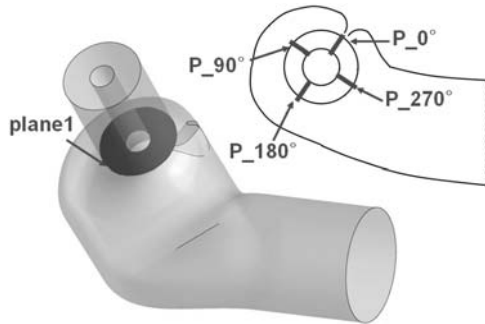


Fig. 3 3D Response variables for side-suction inlet

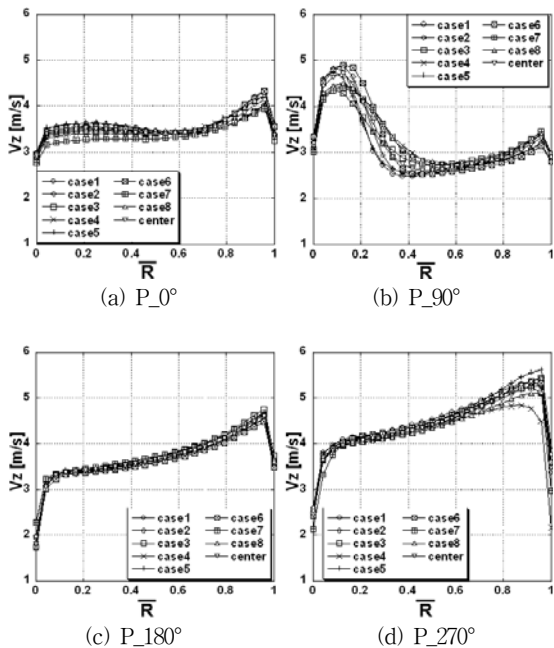


Fig. 4 Comparison of axial velocities at each position

동을 나타낸다. 또한 각 실험조건에 대한 축방향 속도분포의 자세한 분석을 위해, Fig. 3과 같이 plane1에서 측면흡입구 스

톱부분 기준으로 0°, 90°, 180°, 270° 위치에서 축방향 속도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 이때 0° 위치는 P\_0°, 90°는 P\_90°, 180°는 P\_180°, 270°는 P\_270°로 정의 하였다.

Fig. 4에서 X축은 허브부분을 0, 쉬라우드 부분을 1로 정의 했을때, 반경사이길이를 무차원화하여 나타내었고  $R = [(R - R_h) / (R_s - R_h)]$ , Y축은 축방향 속도를 나타내었다.

### 3.3 측면흡입구 형상 변수에 의한 유동특성 분석

Fig. 4를 보면 임펠러 입구부분의 축방향 속도분포를 알 수가 있는데, 여기서 (a)는 P\_0°, (b)는 P\_90°, (c)는 P\_180°, (d)는 P\_270°의 위치에서 축방향 속도분포를 나타낸 것이다. 각각 위치에서 축방향 속도분포를 비교해보면, 2<sup>k</sup>요인실험에 적용된 실험조건에 의해 축방향 속도분포에 차이가 있음을 알 수 있다.

축방향 속도분포의 전체경향을 보면, P\_0°, P\_180°, P\_270°에서 축방향 속도는 쉬라우드부분에서 높게 나타나고, 허브부분에서 낮게 나타는 경향이 있다. P\_0°는 P\_180°, P\_270°보다 허브와 쉬라우드부분의 축방향 속도가 비슷하여 균일한 특징을 보이고 있고, P\_180°, P\_270°는 상대적으로 쉬라우드부분의 축방향 속도가 커서 축방향 속도분포가 P\_0°보다 균일하지 않다.

P\_90°에서 축방향 속도분포는 P\_0°, P\_180°, P\_270°와 달리, 허브부분의 축방향 속도가 상대적으로 크게 나타나서 균일성이 떨어지고 있다. 임펠러 입구부분에서 축방향 속도분포의 균일성을 높이기 위해서는 P\_90°에서 축방향 속도분포의 균일성을 개선하는 것이 필수적이다.

측면흡입구의 변수가 임펠러 입구부 축방향 속도분포에 미치는 영향을 분석하기 위해, 주효과도표(Main effects plot)와 파레토차트(Pareto chart)를 이용하여 4개 인자의 주 영향력을 분석하였고, Fig. 5와 Fig. 6에 제시하였다.

Fig. 5는 목적값 U\_Vz(축방향 속도분포의 균일성)에 미치는 인자를 도식적으로 보여주고 있다. R1, R3 L2는 증가할수

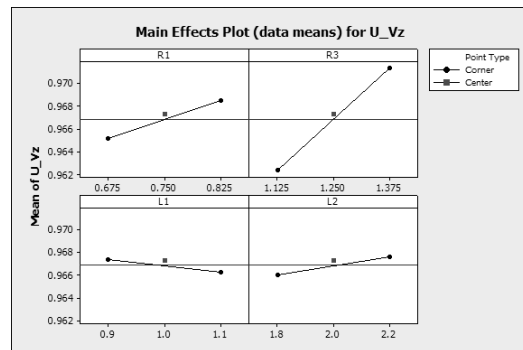


Fig. 5 Main effects plot for U\_Vz

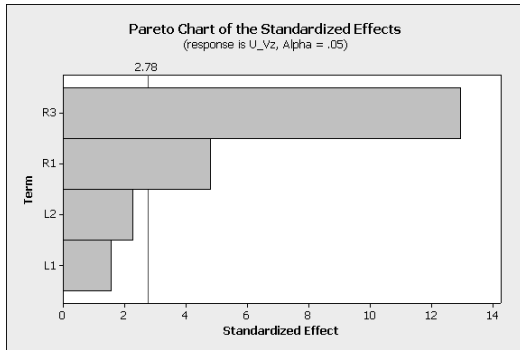


Fig. 6 Pareto chart for U\_Vz

Optimal		R1	R3	L1	L2
D	Hi	0.8250	1.3750	1.10	2.20
0.73569	Cur	[0.8250]	[1.3750]	[0.90]	[2.20]
	Lo	0.6750	1.1250	0.90	1.80
U_Vz					
Maximum					
y = 0.9747					
d = 0.73569					

Fig. 7 Plot for response optimization

록 L1은 감소할수록, 목적값 U\_Vz가 증가한다. Fig. 6을 보면, 목적값 U\_Vz에 영향을 미치는 인자는 R3, R1, L2 순으로 영향을 주고 있으나 R3에 대한 효과가 다른 변수에 비해 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

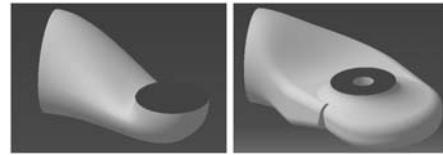
즉, R3를 제어하는 것이 측면흡입구의 축방향 속도분포 균일성을 높이는데 효과적이라는 것이다. R3 다음으로 R1, L2 순으로 축방향 속도분포 균일성에 영향을 줄 수 있다.

본 연구에서는 U\_Vz가 최대가 되는 모형을 설계 목표값(target of design)으로 설정하였다. 목표값을 만족하는 형상을 결정하기 위하여 반응최적화(response optimization)기법을 이용하여 Fig. 7과 같은 반응최적화 도표를 도식하였다. 반응최적화 결과 R1은 0.825, R3는 1.375, L1은 0.9, L2는 2.2에서 U\_Vz는 0.975로 예측되었다. 이 결과는 설계 목표값을 만족하여 최적화형상(optimization design)으로 선택하였다. 선택된 최적화 형상을 수치해석 하였고, 수치해석 결과를 Table 2에 설계기준 형상의 수치해석결과와 2<sup>k</sup>요인실험의 예측결과와 함께 비교 제시하였다. 측면흡입구 형상 변화는 R1, R3, L2는 10%증가하였고, L1은 10%감소하였다. 2<sup>k</sup>요인실험의 성능예측 결과와 최적화 형상의 수치해석 결과를 비교해 보면 U\_Vz에서 약 0.2%의 오차를 보이고 있어, 2<sup>k</sup>요인실험을 이용한 성능예측이 매우 정확함을 알 수 있다.

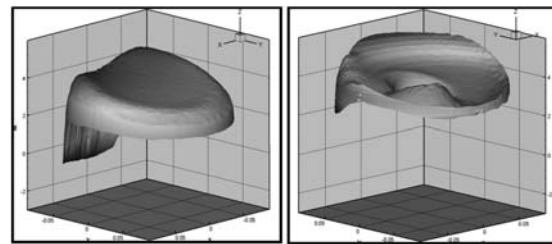
임펠러 입구부분과 원심펌프 설치면이 공간적으로 제한되어 있어 엘보우로 설치가 불가능한 경우, 엘보우를 대신하여 측면흡입구를 설치하는데, 같은 공간적 제한 조건에서 설계된 엘보

Table 2 Comparison of optimization results with design base

	R1(%)	R3(%)	L1(%)	L2(%)	U_Vz
Optimization model (CFD)	10	10	-10	10	0.973
2 <sup>k</sup> estimate value	10	10	-10	10	0.975
Base design model (CFD)	0	0	0	0	0.967



(a) Elbow (b) Side-suction inlet  
Fig. 8 Elbow and side-suction inlet 3D geometry



(a) Elbow (b) Side-suction inlet  
Fig. 9 Comparison of axial velocity plot in plane 1

우와 측면흡입구에 대해서 형상 및 유동특성을 비교해 보았다.

Fig. 8에서 (a)는 엘보우, (b)는 실험계획법을 이용하여 최적화된 측면흡입구 3차원 형상을 나타낸 것이다. 엘보우 형상을 보면, 임펠러 입구부분과 원심펌프 설치면의 공간이 좁기 때문에 임펠러 입구부와 파이프가 급격하게 연결된 것을 볼 수 있다. 엘보우와 최적화된 측면흡입구의 plane1에서 축방향 속도분포의 3차원 그림을 Fig. 9에 나타내었다. 최적화된 측면흡입구는 전체적으로 축방향 속도가 균일한 것을 볼 수가 있으나, 엘보우는 유동박리(back flow)가 일어나는 구간이 있어, 임펠러 입구부 유체유동의 균일성에 나쁜 영향을 미친다.

좀 더 정확한 축방향 속도분포를 분석하기 위해 Fig. 10에서 P\_0°, P\_90°, P\_180°, P\_270° 위치의 축방향 속도분포를 비교하였다. Fig. 10에서 elbow는 엘보우를, center는 설계기준의 측면흡입구를, optimum은 최적설계된 측면흡입구를 나타낸 것이다. P\_270°에서 축방향 속도분포를 보면 앞에서 언급했듯이 엘보우는 유동박리가 일어나서 균일성이 떨어지는 것을 알 수 있으나 측면흡입구는 엘보우와는 달리 유동박리가 일어나지 않아 균일성이 엘보우보다 높게 예측된다. 또한 P\_90°에서 설계기준 측면흡입구는 허브 부분에서 축방향 속도가 상대적으로 크게 예측되었는데, 최적화된 측면흡입구는 이

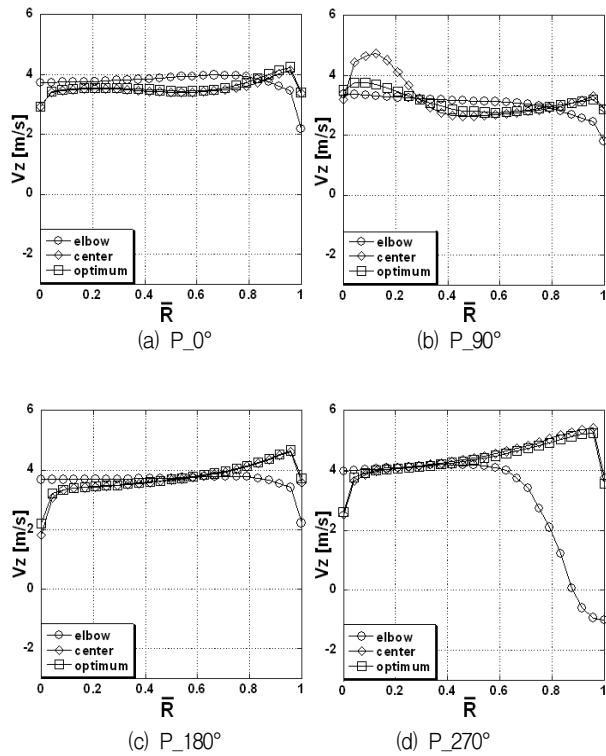


Fig. 10 Comparison of axial velocity distribution

Table 3 Comparison of side-suction inlet with elbow at velocity uniformity

	U_Vz
Elbow (CFD)	0.935
Base side-suction inlet (CFD)	0.967
Optimization side-suction inlet (CFD)	0.973

점을 개선하여 임펠러 입구부 유체유동의 균일성을 증가 시켰

다. Table 3에서 엘보우, 설계기준 측면흡입구, 최적화된 측면 흡입구의 수치해석결과를 함께 비교 제시하였다. 최적화된 측면 흡입구의 U\_Vz는 엘보우보다 4%, 설계기준 측면흡입구보다 0.6%높게 예측된 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

측면흡입구의 변수를 정의하여, 유동특성을 알아보았고, 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 흡입과 토출이 같은 방향인 원심펌프의 경우 측면흡입구를 사용할 수 있으며, 측면흡입구의 단면적을 제어하기 위해 형상 변수를 정의하였고, 효율적으로 단면적을 제어하는 측면 흡입구 변수를 정립하여 제시 하였다.

(2) 공간적 제한조건이 동일한 경우, 엘보우와 측면흡입구 유체유동의 균일성을 비교하면, 엘보우는 유동박리로 인해 균 일성이 떨어지나, 최적화된 측면흡입구는 유동박리가 일어나 지 않아 펌프입구부로 유입되는 유동의 균일성을 향상시킬 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) A. J. Stepanoff., 1957, Centrifugal and Axial Flow Pumps.
- (2) B. Neumann., 1991, The Interaction between Geometry and Performance of a Centrifugal Pump.
- (3) 김 성, 최영석, 윤준용, 2008, “원심펌프 측면흡입구 형상 설계,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 577~578.
- (4) 최영석, 주종일, 이용갑, 주원구, 2002, “상용 CFD코드를 이용한 공조기 입구 형상 설계,” 유체기계저널, Vol.5, No.3, pp. 54~59.