

## CFD를 활용한 축류형 혈액펌프의 펌프 특성 해석

최 승 한, 김 동 욱  
 순천향대학교 공과대학 정보기술공학부

### Pump performance analysis of Axial Flow Blood Pump using CFD

S. H. Choi, Kim, Dong-Wook  
 Division of Information Technology Engineering, Soonchunhyang University

#### Abstract

Artificial heart is divided by pulsation flow type and continuous flow type according to blood circulation pattern. Axial flow blood pump is a kind of continuous flow type artificial heart. Axial flow blood pump would be different pump performance according to impeller's shape and rotating velocity. Pump performance be able to compare by flow rate according to differential pressure and Impeller's rotating velocity.

It confirms Impeller model of better efficiency according to compare Pump performance of axial flow blood pump using CFD with actual experiment result.

#### 서 론

중증 심부전증 환자의 치료방법으로 서구에서는 심장이 식술이 행해지고 있으며 우수한 치료성적을 거두고 있다. 그러나 심장이식술이 폭넓게 이용됨에 따라 제공되는 심장의 부족이 심각한 문제로 대두되고 있어 심장이식만으로는 중증 심부전증 환자를 모두 치료할 수 없다는 것이 분명해졌다. 이 때문에 인공심장의 개발이 요구되어지고 있다. 완전인공심장은 혈액 순환방식에 따라 박동유형과 정상유형이 있다. 정상유형 인공심장 중 축류형 혈액펌프는 Impeller의 모양과 회전속도에 따라 유량과 차압이 다르며 그로인해 발생하는 난류에 의한 용혈양도 달라질 것이다.

이번 연구에서는 CFD(Computational Fluid Dynamic) 해석을 통해 용혈량 예측을 하기 전에 impeller 모델에 따른 회전수와 차압에 따른 유량을 확인하여 펌프 특성에 대해 알아보고, CFD 해석을 통해 얻은 결과와 실제 실험한 결과를 비교하여 CFD 해석의 유용성을 검증하고자 한다.

#### 축류형 혈액 펌프의 특성 해석방법

축류형 혈액 펌프의 Impeller 설계는 CFX-Blade Gen<sup>®</sup>을 사용하고 CFX-Turbo Grid<sup>®</sup>로 Impeller 격자를 구성하였다. 몸체 설계는 CFX-4.4 Build<sup>®</sup>를 사용하였고, 축류형 혈액 펌프의 해석은 CFX-TASCflow<sup>®</sup> 2.12.0을 사용하였다.

실제 인체 내에 순환되는 혈액량은 성인의 경우 분당 3 ~ 5리터 정도라고 한다. 펌프의 특성을 알기위해 출구부에 2L/min, 5L/min, 10L/min의 유량을 주고, 입구부에는 압력을 50mmHg(6650Pa) 주었다.

해석이 끝난 Impeller 모델은 펌프 출구부의 평균 압력을 산출하여 해석을 할 때 주었던 유량과 Impeller 회전수에 따른 펌프 출구부의 압력을 비교하여 펌프특성을 확인하고자 한다.

#### Impeller 설계

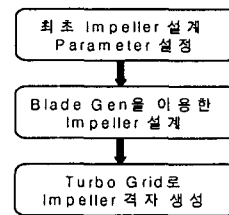


그림 1. Impeller 설계 과정

최초 설계에 필요한 impeller parameter는 각운동량과 익소이론을 함께 고려한 설계법에 따른 형상으로 설계하였다. 설계 조건은 표 1과 같은 조건을 주었다.

표 1. Impeller 설계 Parameter

Impeller 외경 지름	22.0 mm	
Impeller 내경 지름	13.0 mm	
Impeller Gap 길이	0.5 mm	
Blade의 내경과 외경의 각	외경 입구 각	16.4°
	외경 출구 각	19.2°
	내경 입구 각	26.1°
	내경 출구 각	40.7°
날개의 두께	1.0 mm	
날개의 높이	외경	4.31 mm
	내경	4.55 mm
Vane 수	4 매	

Blade Gen<sup>®</sup>으로 설계된 Impeller는 Export하여 Turbo Grid<sup>®</sup>에서 인식하는 hub.curve, profile.curve, shroud.curve 파일을 생성한다. Turbo Grid<sup>®</sup>에서 Impeller의 gap을 주기위해 Multi-block으로 격자생성을 한다. 설계된 Impeller의 기본 단위계는 mm단위이고 TASCflow<sup>®</sup>의 기본 단위계는 m단위계이므로 scale조정을 격자를 생성할 때 해주어야 한다. 격자가 이루어지는 각도는 최소 10°, 보통은 15°이상으로 하는 것이 좋다. 위의 작업으로 121,104개의 격자를 생성하였다. 그림 2는 표 1의 설계조건으로 설계된 Impeller 형상이다.



그림 2. 4 Vane Impeller 형상

몸체 설계

몸체의 설계는 CFX-4.4 Build<sup>®</sup>로 작업을 하였다. Impeller 작업 때처럼 Turbo Gied로 격자를 따로 만드는 것이 아니라 Build 내에서 모든 작업이 이루어진다.

축류형 혈액펌프를 크게 세부분으로 나누어 설계하였다. Impeller를 기준으로 앞부분을 Body1, Impeller부분을 Body2\_Blade, 뒷부분을 Body3로 나누었다. 구조적으로 보면 Impeller부, 모터부, Guide Vane(안내 깃)으로 되어있다. 설계치수는 동맥이 연결되는 입구부와 출구부의 지름을 15.0mm로 하고, Impeller가 들어가는 부분의 지름은 23.0mm로 하였다. 모터부의 지름은 33.0mm로 하고, Guide Vane은 모터부에 위치하며 120°각각으로 높이 5.0mm, 날개 두께 1.0mm, 길이 45.0mm로 하였다. 펌프의 총 길이는 135.5mm로 설계하였다.

격자의 구성이 조밀할수록 CFX-TASCflow<sup>®</sup>로 해석할 때 양질의 데이터 값을 얻어낼 수 있기에 Body1은 67,000개, Body3는 162,000개로 격자를 구성하였다.

그림 3을 보면 축류형 혈액펌프의 전체적인 형태를 볼 수 있다.

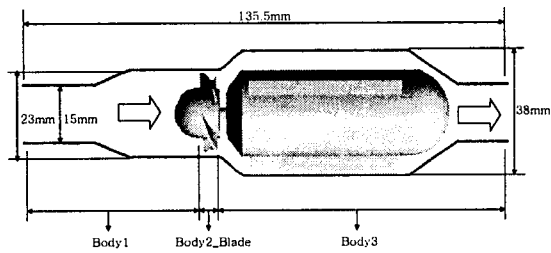


그림 3. Axial flow blood pump

CFX-TASCflow<sup>®</sup> 해석과정

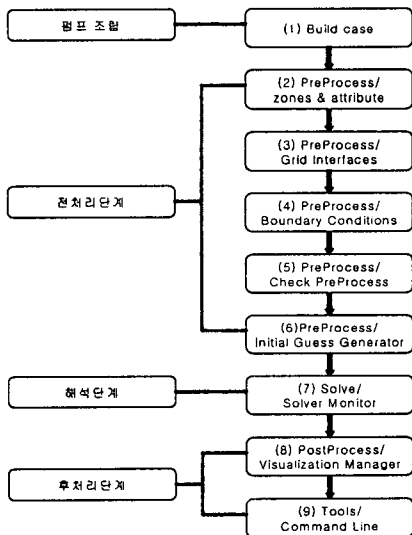


그림 4. CFX-TASCflow<sup>®</sup> 해석과정

(1) Build case  
CFX-Blade Gen<sup>®</sup>과 CFX-4.4 Build<sup>®</sup>에서 작업한 Body1,

Body2\_blade, Body3를 조립하는 과정이다. body1과 body3는 Other type으로 설정하고 body2\_blade는 Passage/Blade passage (Rotating)으로 설정을 한다. Files and Reference Frame에서 각 부분의 grd, bcf 파일을 읽어드린다. body2\_blade 부분에서는 Frame of reference에서 Rotating을 선택하고 rotation rate에서 Rad/second를 선택하고 해석하고자하는 Impeller의 회전수를 입력한다. passage and alignment에서 auto align all을 선택하여 각 부분을 연결하여 하나의 모델로 만든다. Interface option에서는 interface type을 Frozen rotor로하고 Operating Conditions에서 입구에 Pressure 출구에 mass flow를 입력한다. 이 부분에서 입력을 안 하더라도 후처리 부분에서 재설정이 가능하다.

- (2) PreProcess/zones & attribute  
난류 모델 설정, 밀도나 점성계수 같은 물질의 특성을 입력, 회전 영역의 rps 값 등을 입력하는 단계이다.  
turbulence : k-ε 적용  
Materials : 밀도 1059kg/m<sup>3</sup>  
점성계수 0.0036Pa·s  
Rotating frame : RPM에 따른 값을 rps[(RPM×2π)/60]로 입력한다. 예를 들어 8000rpm일 경우 837.758rps가 된다.

- (3) PreProcess/Grid Interfaces  
body3 부분을 설계할 때 Guide Vane을 설계하였는데 기본적으로 모델을 설계할 때는 90°각도를 기준으로 한다. 하지만 Guide Vane부분에서는 120°각도로 설계를 하기 때문에 CFX-TASCflow<sup>®</sup>가 해석할 때 그 부분을 벽으로 인식하게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 90°로 설계된 면과 120°로 설계된 면이 붙어있는 부분을 연결시켜준다.

- (4) PreProcess/Boundary Conditions  
축류형 혈액펌프의 기본적인 경계조건을 적용하는 부분이다.  
body1, body3에 해당하는 wall부분은 Absolute 설정 Blade의 외경을 Absolute 설정  
입구부 6650 Pa = 50mmHg  
출구부 Mass flow(질량유량) 0.088kg/s ≈ 5L/min  
위의 질량 유량 0.088kg/s 데이터는 5L/min에 해당하는 유량이고 출구부의 유량이 다를 경우 질량유량을 계산하여 적용한다.  
Body2\_blade부분에서 지정해 주지 못한 Impeller부분을 지정하여 몇 가지 조건을 입력한다.  
Type : spinning  
Frame : relative  
Rotating speed : RPM에 따른 값을 입력한다. 예를 들어 8000rpm일 경우 837.758rps가 된다.

- (5) PreProcess/Check PreProcess  
zones & attribute, Grid Interfaces, Boundary Conditions의 설정한 데이터를 중간 저장해주는 부분이다.

- (6) PreProcess/Initial Guess Generator  
Domain type : General  
Velocity : Uniform specified cartesian  
W : 0.5 m/s  
Pressure : 6650 Pa  
Turbulence : 난류강도 0.001(low)  
점성계수비 1.0

- (7) Solve/Solver Monitor  
Parameter들을 설정하여 필요한 데이터를 확인할 수 있게 설정해준다.

- (8) PostProcess/Visualization Manager  
후처리단계로써 다양한 정보를 visual하게 모니터를 통해

확인할 수 있다. 압력이 증가하는 것을 확인하기 위해 Object type의 Fringe Plot를 선택하여 펌프의 압력분포를 확인할 수 있다.

(9) Tools/Command Line

후처리 단계로써 Visualization Manager와는 다르게 Dos 명령어처럼 CFX-TASCflow<sup>®</sup>에서 지원하는 명령어를 사용하여 축류형 혈액펌프 출구부의 유량을 확인할 수 있다.

결 과

그림 5는 후처리 단계에서 Fringe Plot을 이용하여 혈액 펌프를 Y축 방향으로 절단하여 펌프의 압력이 증가 하는 것을 보여주고 있다.

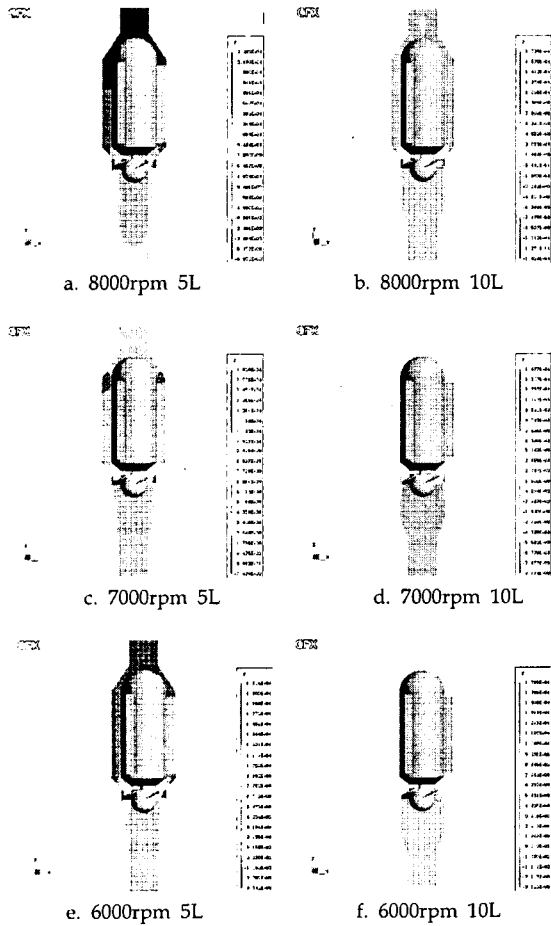


그림 5. RPM과 유량에 따른 압력 분포

그림 5에서 보듯이 CFX-TASCflow<sup>®</sup>를 이용하여 펌프 입구부에서는 압력의 변화가 없다가 Impeller를 지나는 부분부터 펌프내의 압력이 급격히 증가하는 것을 확인하였다.

실제 실험을 통해 얻어낸 데이터를 보면 유량이 증가할수록 차압이 서서히 감소하다가 5L유량을 기점으로 차압이 상대적으로 크게 떨어지고 10L로 갈수록 차압이 서서히 감소하는 결과를 보였다. 실험 결과와 CFD 해석 결과를 비교한 값은 그림 6에 표시하였다.

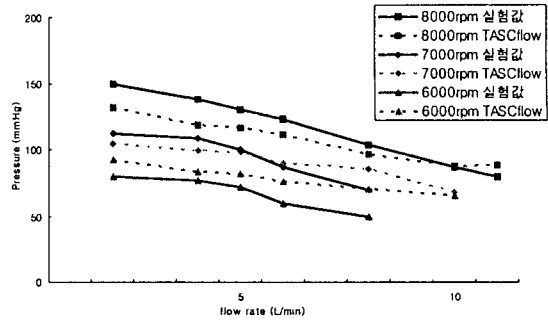


그림 6. 펌프 특성 곡선

축류형 혈액펌프의 전산유체 해석을 활용하여 다음과 같은 특성 곡선을 확인할 수 있었다. 펌프의 특성 곡선을 보면 유량이 많을수록 펌프의 압력 증가가 낮아지고 Impeller의 회전수(RPM)가 낮을수록 압력 그래프가 상대적으로 높은 RPM보다 낮은 압력 값을 보였다. 전체 해석된 데이터를 놓고 비교해본다면 신뢰할 수 있는 결과값을 확인할 수 있었다.

표 2. 실험 결과에 따른 CFD해석 결과 비교

유량 \ 회전수	8000rpm	7000rpm	6000rpm
4L	85.65 %	91.66 %	108.87 %
5L	89.82 %	97.95 %	114.73 %

결 론

연구 결과, 혈액 펌프 내에서 혈액이 비교적 원활하게 출구부로 나오는 것을 확인할 수 있었고, CFD(전산유체)를 이용한 축류형 혈액 펌프의 해석결과를 보면 유량과 Impeller 회전수에 따른 펌프 출구부 압력 패턴을 확인할 수 있었다. 또한 CFD 해석결과와 실제 실험 결과를 비교해보면 해석결과 6000rpm과 8000rpm은 각각 실험 결과보다 조금 높고 낮은 결과를 확인할 수 있었지만 7000rpm의 경우 실험값과 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 유량 5L를 기준으로 볼 때 유사한 결과값을 보여주었다. 전산유체 해석을 통해서도 실제 실험과 유사한 결과값을 얻을 수 있는 것을 확인하였기 때문에 앞으로는 CFD 해석을 활용하여 유량과 Impeller의 회전수 따른 다양한 Impeller 모델에 대한 해석을 쉽게 할 수 있고 가장 최적의 Impeller 모델을 설계할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 한국과학재단 지정 순천향대학교 차세대BIT무선부품연구센터(R12-2002-052-01004-0)의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. 김동욱, 三田村好柁, "심장내 이식형 축류 혈액펌프 용혈특성에 관한 연구", 의공학회지, vol.21, no.4, pp.353-362, 2000
2. Nose Y., Long-term *ex-vivo* implantation (Longer than one year) of rotary blood pumps., Artificial Organs, Vol. 21, pp. 863,1997
3. Y. Mitamura, H. Nakamura, E. Okamoto, R. Yozu, S. Kawada, D.W Kim, "Development of the Valvo-Pump: Axial flow pump mplantd at the heart valve position preserving the diseased heart muscle, Artificial Organs Vol23, No6, pp.566-571, 1999