

원심다단펌프용 디퓨저-리턴채널의 유동특성

오형우*

Hydrodynamic Characteristics of Vaned-Diffuser and Return-Channel for a Multistage Centrifugal Pump

Hyoung Woo Oh*

Key Words: Multistage centrifugal pump(원심다단펌프), Vaned-diffuser(베인디퓨저), Return-channel(리턴채널), CFD(전산유체역학), Crossover bend(크로스오버벤드), Performance analysis(성능해석)

ABSTRACT

This paper presents the steady-state performance analysis of the first stage of a multistage centrifugal pump, composed of a shrouded-impeller, a vaned-diffuser and a return-channel, using the commercially available computational fluid dynamics (CFD) code, ANSYS CFX. The detailed flow fields in the vaned-diffuser with outlet in its side wall and the return-channel are investigated by the CFD code adopted in the present study. The effect of the vaned-diffuser with a downstream crossover bend and the corresponding return-channel on the overall hydrodynamic performance of the first stage pump has also been demonstrated over the normal operating conditions. The predicted hydrodynamics for the diffusing components herein could provide useful information to match the inlet blade angle of the next stage impeller for improving the multistage pump performances.

1. 서론

석유정제·화학플랜트용 특수펌프의 경우, 해외선진 펌프 제조사의 높은 기술진입장벽으로 인해 국내 설계 및 제조기술은 대부분 제한적인 수준에 머물러 있다. 이러한 상황에서 지식경제부 주관 다년도(2007.12~2010.09) 연구과제인 ‘에너지효율향상사업’의 세부사업으로서 ‘고효율 저비속도 수직배럴형 다단원심펌프 개발’ 관련 연구^(1,2)가 수행되었다. 주관기관인 ‘한국기계연구원’에서는 과제총괄 및 수력설계, 로터-베어링 시스템의 회전동역학 설계·해석 등을 담당하고, 참여기업인 ‘(주)동양화공기계’에서는 현장경험에 기반한 수력설계, 핵심부품의 제작 및 조립, 펌프시스템의 성능시험을 수행했다. 위탁기관인 ‘충주대학교’에서는 원심펌프의 수력설계 및 CFD 성능해석기법에 대한 연구를 담당하였다. 중북되는 수력설계분야의 경우, 각 기관별 설계결과물의 성능을 비교하여 시제품 선정에 반영하였다. 과제수행 결과, 엄격한

설계기준인 API 610(VS6) 형식에 부합하는 수직배럴형(vertical barrel type) 10단 원심펌프(무차원 비속도 0.34에 해당)에 대한 국내 독자 설계 및 제조기술을 확보하게 되었다. Fig. 1은 수직배럴형 원심다단펌프의 시제품 형상을 나

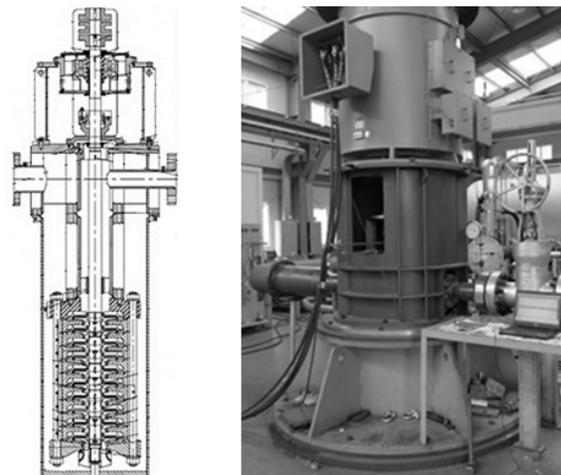


Fig. 1 Overview of a ten-stage centrifugal pump^(1,2)

* 충주대학교 기계공학과
E-mail: hw_oh@cjnu.ac.kr

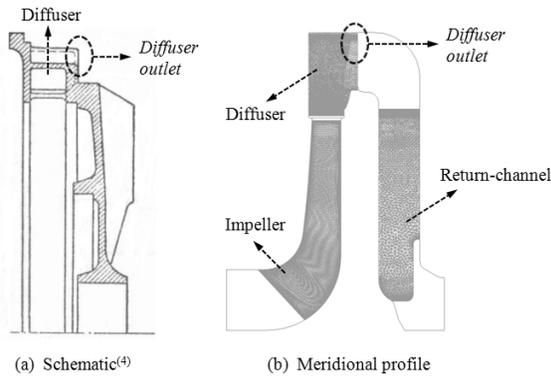


Fig. 2 Cross-sectional view of the first stage pump without crossover bend

타낸다. 제1단 펌프의 경우, 캐비테이션(cavitation)을 고려한 인듀서(inducer)가 장착되고, 임펠러(impeller), 베인디퓨저(vaned-diffuser)와 리턴채널(return-channel)의 조합으로 구성된다. 한편, 나머지 단계 대해서는 제1단과 동일한 베인디퓨저와 리턴채널을 공유하고 임펠러의 경우, 제1단 펌프임펠러보다 작은 입구폭(impeller eye)을 갖는 임펠러가 장착된다.

통상적인 원심다단펌프용 확산시스템(diffusion system)에 대한 설계기법⁽³⁾은 디퓨저와 리턴채널 사이를 U자형 유로로 연결한 방식에 기반을 둔다. 그러나 실제 현장에서 적용하는 원심다단펌프용 확산시스템은 펌프시스템의 부피를 감소시키기 위해 채널형 디퓨저의 측벽(side wall)에 출구유로를 만들고 디퓨저 뒷면에 리턴채널베인을 배치하는 방식을 많이 채택한다(Fig. 2(a)). 후자의 경우, 공개문헌상에 제시되는 일반화된 설계기법이 없고 내부유동현상을 고려한 상세설계가 아직 현장에서 이루어지고 있지 않다. 본 논문에서는 전산유동해석을 도입하여 Fig. 2(a) 방식의 확산시스템에 대한 수력성능특성을 분석하고 이를 상세설계에 반영하였다. Fig. 2(b)는 현재 적용된 확산시스템을 나타내고 있다. 한편, 크로스오버벤드(crossover bend or vaneless U-turn passage)를 포함한 통상적인 확산시스템의 수력성능과 비교함으로써 향후 설계조건에 따라 적절한 시스템을 선택할 수 있는 정보를 제공하고자 한다. 그리고 리턴채널 출구유동각 분포를 예측함으로써 다음 단 임펠러(next stage impeller)의 수력성능에 영향을 미치는 입사각(incidence)을 결정하는데 활용할 예정이다.

2. 유동해석방법

상세설계된 제1단 펌프에 대한 전산유동해석을 통해 작동유량범위에 대한 펌프시스템의 수력성능특성 및 설계점 상세내부유동을 예측하고자 한다. 이를 수행하기 위해 본 논문에서 적용한 유동해석방법을 제시하고자 한다. 먼저 CFD 해

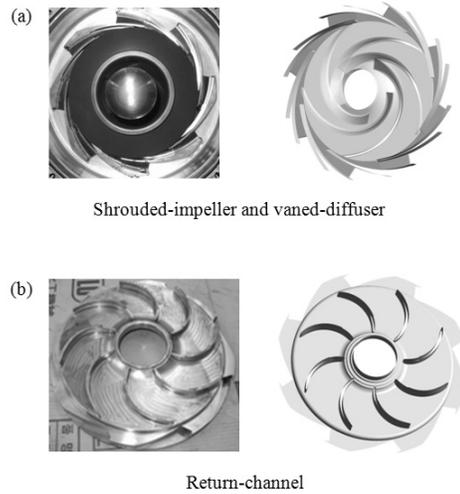


Fig. 3 Impeller, diffuser and return-channel for the first stage pump

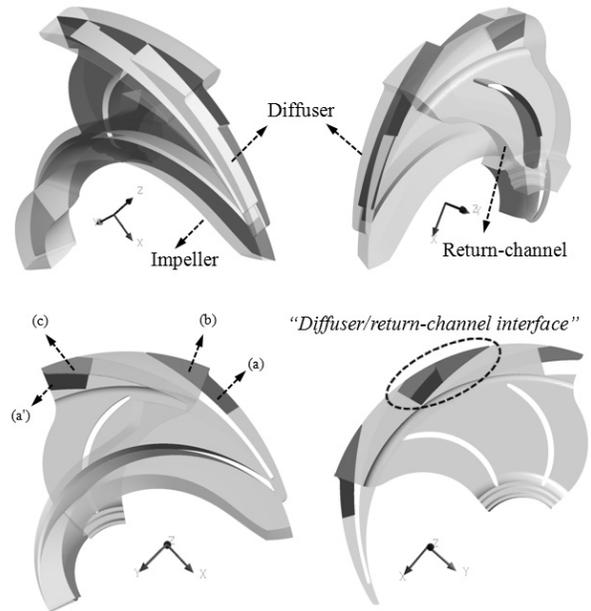


Fig. 4 Computational domains for the first stage pump

석에 필요한 형상모델링 작업이 필요하다. Fig. 3은 제1단 펌프의 시제품 원형(prototype)과 임펠러(날개수 5개), 베인디퓨저(날개수 8개) 및 리턴채널(날개수 8개)에 대한 3차원 모델링 형상을 나타낸다.

수치해석의 효율성을 고려하여 회전방향의 주기조건을 이용한 날개 1개의 유동영역을 계산영역으로 설정하였다(Fig. 4). 디퓨저 출구가 반지름 방향이 아닌 측벽(Fig. 2 참조)에 위치하고 있기 때문에 계산영역을 설정할 때, 주의가 요구된다. Fig. 4의 (a), (b), (c)는 디퓨저의 출구를 의미하고 (a'), (b'), (c)는 리턴채널의 입구에 해당한다. 디퓨저와 리턴채널 사이의 유로(diffuser/return-channel interface)에 대한 기하학적 이해를 돕기 위해 Fig. 4의 오른쪽 하단부에 디퓨저와 리턴채널의 유동영역(인접한 2개의 날개유로를 고려한)

을 나타내었다. 즉, 상기에 기술한 바와 같이 (a or a'), (b), (c)의 조합이 날개 1개의 유동영역에 해당하는 유로('접선타원' 부분)를 의미한다. 한편, 수치해석적으로 안정된 입·출구 유동조건을 유지하기 위해 가상의 직관을 임펠러 입구와 리턴채널 출구에 각각 연장(임펠러 입구쪽의 7.4배, 리턴채널 출구쪽의 8.5배)하여 전산해석을 수행하였다.

수치해석을 위한 계산격자는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 임펠러의 경우, 정렬 격자계⁽⁵⁾로 구성하였으며, 나머지 계산 영역에 대해서는 비정렬 격자계⁽⁶⁾를 도입하였다. 본 논문에서는 시제품 펌프의 성능시험결과를 바탕으로 1,610,234 노드(육면체 460,440; 사면체 1,764,207; 프리즘 1,529,775; 피라미드 8,310 요소)로 구성된 격자계를 CFD 성능해석에 사용하기로 한다. 한편, 복잡한 유동현상이 발생하는 디퓨저 및 리턴채널에 대한 격자계의 경우, 벽면 근처의 급격한 속도구배에 대한 수치해의 정확성을 높이기 위해 벽면에서 1번째 격자점까지의 무차원 거리(y^+)가 1 이하가 되도록 벽면에 프리즘 격자를 삽입하였다.

본 논문에서는 상용 CFD코드⁽⁷⁾를 도입하여 원심펌프 내부의 3차원 정상상태 난류유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 난류모델의 경우, 유동박리현상 해석에 적합한 전단응력 이송(shear stress transport, SST)모델을 사용하였다.

수치해석을 위한 경계조건으로는 펌프 입구에 전압(대기압)을 지정하고 펌프 출구에는 질량유량조건을 적용한다. 벽면에 해당하는 부분(베인, 허브 및 슈라우드)의 경우, 점착조건(no-slip condition)을 적용한다. 임펠러(회전영역)와 디퓨저(고정영역) 사이의 경계면은 Stage(경계면에서 유동현상에 관련된 각종 물리량들을 원주방향으로 평균하여 하루 방향으로 정보를 제공⁽⁷⁾) 기법으로 처리한다. 한편, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 경계면 (b)와 (c)에 대해서는 디퓨저 출구와 리턴채널 입구가 완전히 일치하기 때문에 경계면 처리를 따로 설정할 필요가 없다. 반면에 디퓨저 출구에 해당하는

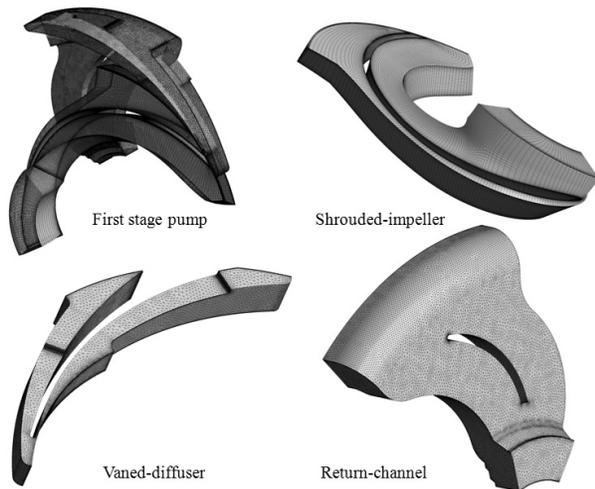


Fig. 5 View of computational mesh

(a)와 리턴채널 입구인 (a') 사이의 경계면은 Stage 기법으로 처리한다. 전산해석의 수렴성 여부는 이산화된 방정식의 수치해에 대한 상대잔차량(residual)만으로는 결정될 수 없고 펌프시스템의 전양정, 입력동력 및 펌프출구에서의 유속 등에 대한 모니터링(monitoring)을 통해 결정한다.

3. 원심펌프의 (탈)설계점 수력성능해석

본 논문에서 제시하는 성능해석방법의 타당성을 검증하기 위해 시제품 펌프(연구결과물)의 수력성능시험결과^(1,2)와 예측성능을 비교하고자 한다. 원심단원펌프의 단품(제1단 및 2단 펌프) 수력성능시험을 위해 '한국기계연구원'에서는 임펠러, 베인디퓨저 그리고 컬렉터(collector)로 구성된 성능시험장치를 구성하였다. 비록 리턴채널을 포함한 실제 펌프시스템과는 다른 구성이지만 각 단별 펌프의 정성적인 수력성능 특성에 대한 정보를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 원심단원펌프용 디퓨저 및 리턴채널의 수력학적 성능특성해석에 초점을 두고 있기 때문에 제1단 원심펌프에 대한 성능시험결과를 활용하고자 한다.

제1단 원심펌프의 수력성능특성을 효과적으로 도시(Fig. 6)하기 위해 다음과 같은 무차원수를 도입하기로 한다.

$$\phi = 100 \times Q / (\Omega D_2^3) \quad (1)$$

$$\psi = 4.08 \times gH / (\Omega^2 D_2^2) \quad (2)$$

$$\tau = 350 \times \dot{W} / (\rho \Omega^3 D_2^5) \quad (3)$$

$$\eta = \rho g H Q / \dot{W} \quad (4)$$

여기서 Q 와 Ω 는 각각 부피유량과 임펠러 각속도를 의미하고, D_2 와 g 는 임펠러 출구지름, 중력가속도를 나타낸다. 그리고 펌프전양정과 입력동력은 각각 H 와 \dot{W} 로 나타낸다. ρ 는 작동유체(본 연구에서는 '물')의 밀도를 의미한다. 유량(ϕ) 변화에 따른 펌프의 성능특성곡선(Fig. 6)을 살펴보

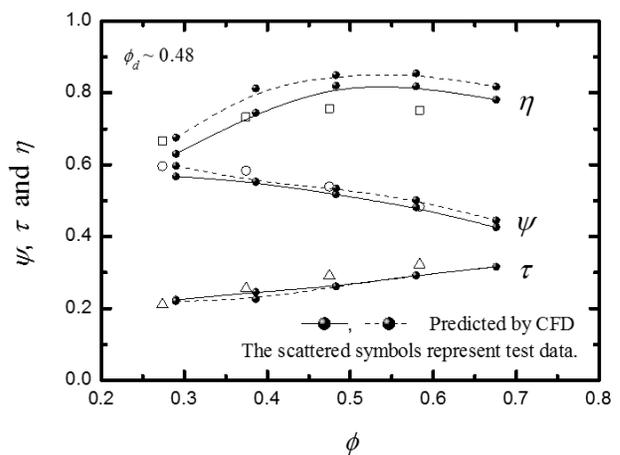


Fig. 6 Performance characteristics for the first stage pump

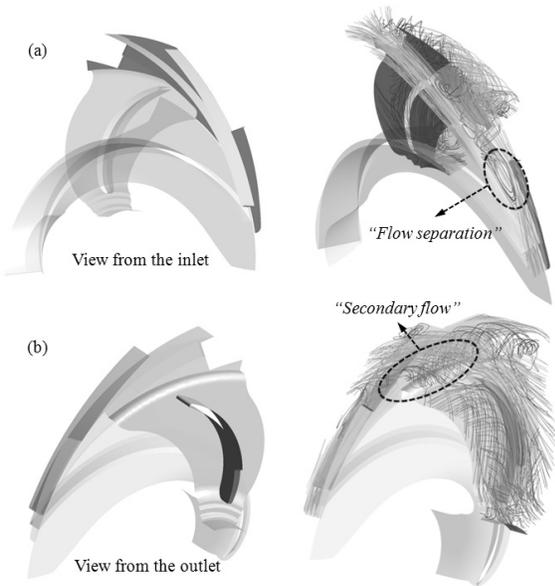


Fig. 7 Three-dimensional flow field for diffuser and return-channel

면, CFD코드에 의해 예측(‘실선+점’)되는 입력동력선도(τ)는 작동유체에 의한 수동력(water horsepower)을 기반으로 계산되기 때문에 기계적 외부손실 등을 포함한 성능시험결과(brake horsepower)와 비교시 정량적인 측면에서 차이를 보인다. 그러나 펌프운전영역에서 동력특성경향을 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 펌프전양정곡선(ψ)의 경우, 성능시험은 임펠러, 디퓨저 및 컬렉터로 구성되는 펌프시스템에 대해 수행되었기 때문에 실제 펌프시스템(임펠러, 디퓨저, 리턴채널의 조합으로 구성)을 기반으로 해석한 예측결과(‘실선+점’)와는 차이를 보이게 된다. 설계모델의 경우, 디퓨저 출구에서 급확대된 유동이 리턴채널을 통과하면서 발생하는 전압손실이 단품 성능시험에서 장착된 디퓨저와 컬렉터 사이를 통과하는 유동손실보다 크다는 것을 의미한다. 그러나 펌프전양정에 대한 정성적인 성능곡선경향은 유사하게 나타나고 있다. 이것은 컬렉터를 설치한 성능시험장치가 실제 단품 펌프시스템의 정성적인 성능특성을 도출할 수 있다는 것을 의미한다. 상기의 입력동력 및 전양정에 대한 해석 결과는 설계점($\phi_d \sim 0.48$) 및 그 이상의 유량 범위에서 펌프 효율(η)을 과도하게 예측(‘실선+점’)하는데 영향을 주고 있다. 하지만 예측효율 및 시험결과로 도출된 효율이 설계유량 근처에서 최대로 나타난 점은 본 연구에서 수행한 최적설계 및 성능해석이 신뢰성 있는 범위 내에서 이루어졌다는 것을 의미한다.

4. 디퓨저-리턴채널의 성능특성

본 절에서는 원심다단펌프용 베인디퓨저와 리턴채널의 설계점 수력성능특성에 대해 고찰하고자 한다.

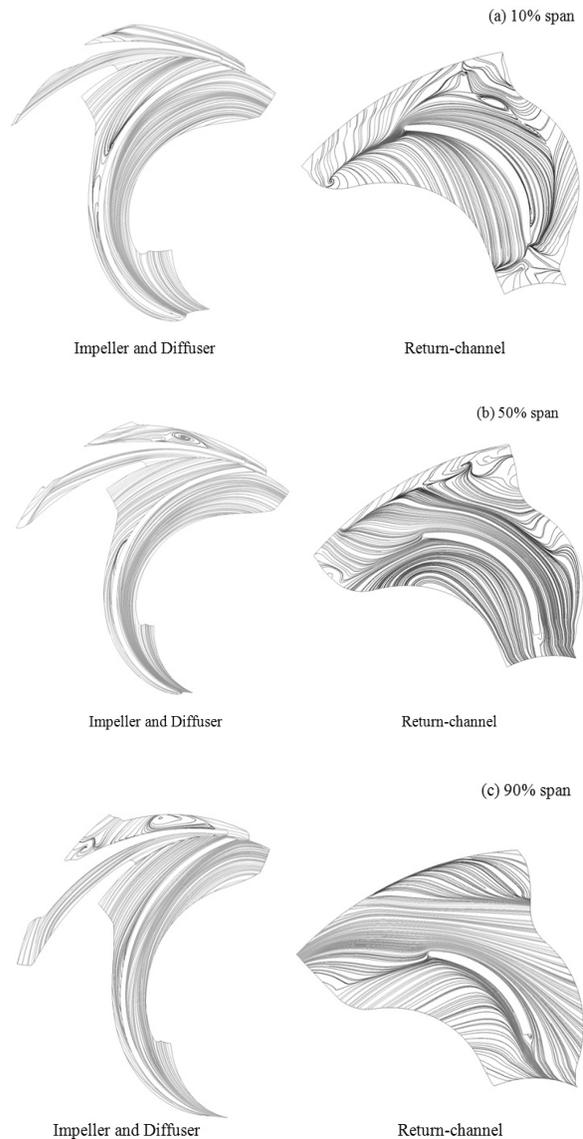


Fig. 8 Streamlines on blade-to-blade surfaces of the first stage pump

현재 적용된 디퓨저의 구조적 특성(디퓨저 측벽에 출구유로가 존재) 때문에 작동유체가 유출되지 못하고 디퓨저채널 내에 재순환하는 공간이 발생하게 된다. 이것은 유동의 역압력구배(adverse pressure gradient)를 일으키고 디퓨저 내부유동박리(flow separation)현상을 발생시킨다. 한편, 디퓨저 출구를 통과한 유동은 급격한 유로면적의 증가(리턴채널 입구)로 급확대(sudden expansion)됨으로써 전압손실이 발생하고 리턴채널 내부에 2차유동(secondary flow) 및 유동박리현상을 유발한다(Fig. 7).

이러한 3차원 유동구조를 스펠(span)별로 분석(Fig. 8)하면 다음과 같다. 먼저, 임펠러 출구유동에 의해 발생하는 디퓨저의 입사각손실(incidence loss)이 최소화 되도록 디퓨저 입구날개각이 설계되었음을 확인할 수 있다. 디퓨저 출구유로가 허브면에 존재하기 때문에 허브근처(10% span)에서는

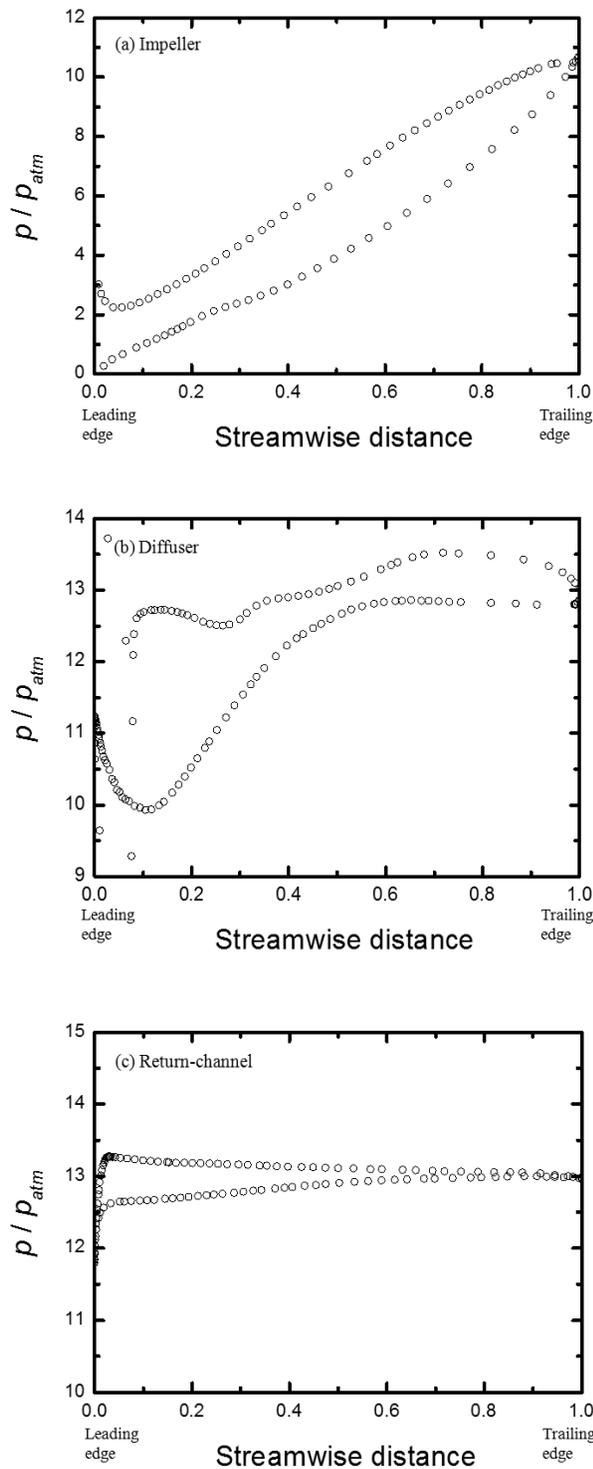


Fig. 9 Surface static pressure loading distributions at mid-span

디퓨저 내부유동박리가 발생하지 않음을 알 수 있다. 반면에 리턴채널의 경우, 급격한 유로확장 및 곡률변화 등으로 유동 박리현상을 확인할 수 있다. 디퓨저의 중간면(50% span) 및 슈라우드근처(90% span)에서는 디퓨저채널의 구조적 특성상 재순환 및 유동박리현상이 발생된다. 리턴채널 내의 복잡한 유동현상(2차유동 및 유동박리)에도 불구하고 리턴채널베

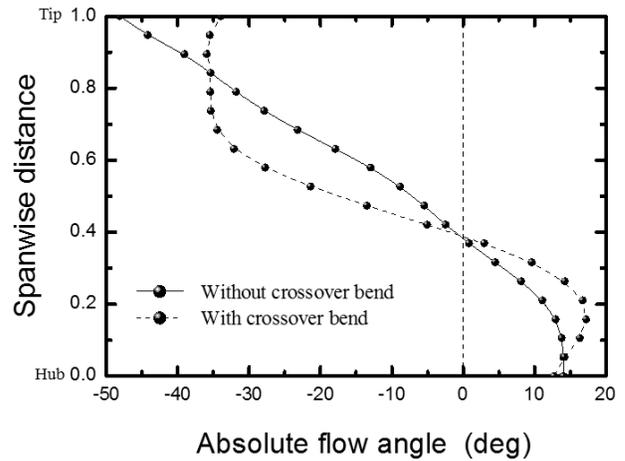


Fig. 10 Absolute flow angle profiles at return-channel exit

인의 입사각 설정이 적절하다는 것을 확인할 수 있고 날개표면에 유동박리가 발생하지 않도록 베인각도가 최적화되어있다.

한편, 유선방향 베인각도의 설정에 대한 설계지표로서 날개표면정압분포(날개부하, blade-loading)를 참조하는데 날개압력면(pressure surface)과 부압면(suction surface)에 작용하는 정압력이 적절히 분포되어있음을 알 수 있다(Fig. 9). 이것은 펌프구성품(임펠러, 디퓨저, 리턴채널)별 베인의 입구각도 및 유선방향으로의 베인각도 분포가 적절하다는 것을 의미한다.

원심다단펌프에 설치된 리턴채널베인의 출구유동은 다음 단 임펠러의 입사각손실과 관련되고 이것은 펌프전양정특성에 영향을 미친다. 그러므로 가장 이상적인 리턴채널의 출구유동장은 스펠방향으로의 절대유동각(자오면을 기준으로 한 각도)이 0°가 되도록 형성되어야 한다(Fig. 10의 '점선'). 그러나 실제 스펠방향으로의 출구유동 분포를 살펴보면 회전속도성분은 반드시 존재하게 되고 설계자는 이것을 최소화하는데 설계목표를 둔다. 연구과제수행에서 도출된 리턴채널의 출구유동각 분포를 예측('실선+점')한 결과, 평균절대유동각이 -13.6°인 것으로 나타났다. 원심다단펌프의 부피를 줄이기 위해 도입된 확산시스템(채널형 디퓨저와 리턴채널)의 구조적 특성을 감안할 때, 현재 리턴채널에 대한 베인각도의 설정은 최적의 수준으로 평가받을 수 있다.

5. 크로스오버벤드를 포함한 확산시스템

본 논문에서는 크로스오버벤드를 포함한 확산시스템(Fig. 11)을 추가로 설계하고 이에 대한 수력성능특성을 도출함으로써 시제품 펌프에 적용된 확산시스템과의 성능을 비교하고자 한다. 이를 통해 향후 설치환경에 따라 설계자가 적절한 확산시스템을 선택할 수 있는 정보를 제공하고자 한다. 각 시스템의 수력성능을 서로 비교하기 위해 다음과 같은 설계제한조건을 두고자 한다.

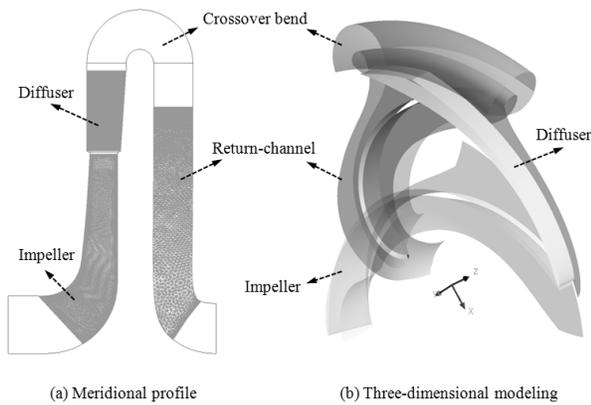


Fig. 11 A pump stage with crossover bend

- 동일한 임펠러의 장착
- 디퓨저의 입구폭과 확산각을 동일하게 유지
- 펌프시스템의 축방향 길이를 동일하게 유지
- 날개수 유지
- 리턴채널의 출구지름·폭을 동일하게 유지
- 펌프출구의 절대유동각을 시제품 펌프와 유사하게 분포

상기의 조건을 고려해서 설계한 형상자료를 Fig. 11에 나타내었다. 설계점 유량조건에 대한 펌프시스템의 스펠별 유동구조를 살펴본 결과(Fig. 12), 디퓨저의 유로가 길어짐에 따라 유동의 마찰손실이 증가하고 역압력구배의 영향 등으로 중간면에서 유동박리가 발생하고 있다. 리턴채널베인의 경우, 디퓨저의 출구유동각에 부합하는 입사각 설정(-81.1°) 그리고 펌프시스템의 출구유동각에 대한 제한조건 등을 만족시키기 위해 랩각(wrap angle)이 증가하게 된다. 디퓨저 출구가 반지름 방향으로 형성되어있고 유동이 크로스오버벤드를 통과하기 때문에 접선방향으로의 속도성분이 상대적으로 커지게 되고 이것은 입사각의 증가로 나타난다. 참고로 측벽에 디퓨저 출구가 존재하는 시제품 펌프의 경우, 리턴채널 입사각은 -44.5° 정도이다. 이러한 이유로 리턴채널베인의 랩각이 작아지고 상대적으로 펌프시스템의 출구유동각을 제어하기가 쉽다. 그러나 확산시스템 내의 유동구조를 비교해 보면, 현 시제품 펌프의 확산시스템의 경우, 2차유동 및 유동박리가 광범위하게 분포되어있는 반면, 비교대상으로 설계한 크로스오버벤드를 포함한 확산시스템의 경우, 리턴채널 출구근처의 부압면에서만 유동박리가 발생하고 있기 때문에 확산시스템내의 총전압손실량은 감소하게 된다. 이로 인해 펌프시스템의 전양정은 증가하고 이것은 펌프효율의 증가로 나타난다(Fig. 6에서 '접선+점'으로 표기됨).

펌프시스템의 출구유동각 분포(Fig. 10)를 살펴보면 크로스오버벤드를 적용한 확산시스템('접선+점')의 경우, 설계제한조건에 따라 시제품 펌프의 확산시스템('실선+점')과 유사한 유동각 분포를 보이고 있다. 참고로 크로스오버벤드를 포

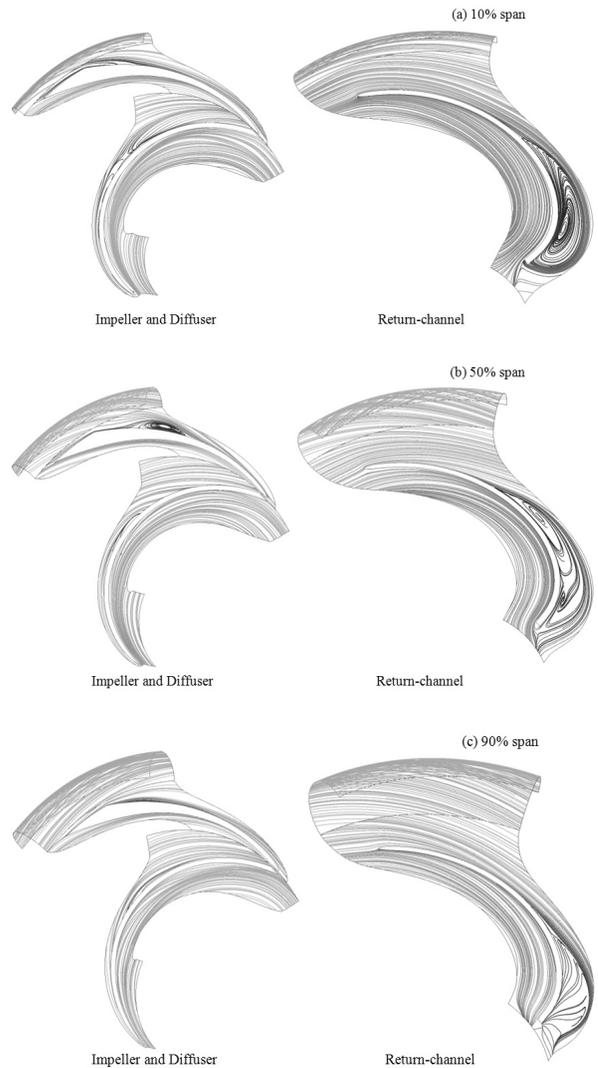


Fig. 12 Streamlines on blade-to-blade surfaces of a pump stage with crossover bend

함한 확산시스템의 평균절대유동각은 -11.9°인 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 논문에서는 원심다단펌프용 디퓨저 및 리턴채널의 수력학적 성능특성을 분석하기 위한 전산해석을 수행하였다. 시제품 펌프의 단품 수력성능시험결과와 예측성능결과를 비교함으로써 본 연구에서 제시한 성능해석방법의 타당성을 검증하였다. 디퓨저 측벽에 출구유로를 갖는 채널형 디퓨저와 리턴채널을 포함한 확산시스템에 대한 유동손실인을 내부유동장 분석을 통해 고찰하였다. 한편, 크로스오버벤드를 포함한 확산시스템에 대한 성능해석을 수행함으로써 원심다단펌프의 최적설계단계에서 설계자가 적절한 확산시스템을 선택할 수 있는 유용한 정보를 제공하였다.

향후 본 논문의 연구결과를 바탕으로 원심다단펌프시스템

에 대한 성능해석을 통해 리턴채널의 출구유동조건이 다음 단 임펠러의 수력성능에 미치는 영향 등을 고찰하고자 한다.

후 기

지식경제부과제의 연구결과물인 원심다단펌프의 수력성능시험자료를 본 논문에 인용할 수 있도록 승인해 주신 한국기계연구원의 윤의수 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 한국기계연구원, 2010, “지식경제부, 고효율 고흡입성능 사

류 및 원심펌프 개발: 고효율 저비속도 수직배럴형 다단원심펌프 개발(세부 2),” 최종평가발표자료.

- (2) 유일수, 윤의수, 박무룡, 김성기, 2010, “비속도 150급 수직배럴형 10단 원심펌프 개발,” 2010 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 170~171.
- (3) Stepanoff, A. J., 1957, “Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, Design, and Application,” John Wiley & Sons, Inc.
- (4) Lazarkiewicz, S. and Trokolanski, A-T., 1965, “Impeller Pumps,” Pergamon Press.
- (5) ANSYS TurboGrid 13.0, 2010.
- (6) ANSYS ICEM CFD 13.0, 2010.
- (7) ANSYS CFX 13.0, 2010.