

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.10.831>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## CFX 와 HEEDS 를 이용한 사류펌프 임펠러-디퓨저 최적화방법<sup>§</sup>

이용갑<sup>\*†</sup> · 박인형<sup>\*</sup> · 신재혁<sup>\*</sup> · 김 성<sup>\*\*</sup> · 이경용<sup>\*\*</sup> · 최영석<sup>\*\*</sup>

\* (주)엔플럭스, \*\* 한국생산기술연구원

### Mixed-Flow Pump Impeller-Diffuser Optimization Method by Using CFX and HEEDS

Yong Kab Lee<sup>\*†</sup>, Jae Hyok Shin<sup>\*</sup>, In Hyung Park<sup>\*</sup>, Sung Kim<sup>\*\*</sup>, Kyoung Yong Lee<sup>\*\*</sup> and Young  
Seok Choi<sup>\*\*</sup>

\* ANFLUX Inc.

\*\* Korea Institute of Industrial Technology

(Received April 8, 2015 ; Revised July 30, 2015 ; Accepted August 2, 2015)

**Key Words:** Optimization(최적화), CFD(전산유체역학), Mixed Flow Pump(사류펌프), HEEDS, CFX, SHERPA

**초록:** 본 논문에서는 사류펌프의 성능을 향상시키는 최적화 방법을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 최적화 방법은 유동해석코드인 CFX 와 최적화 소프트웨어인 HEEDS 를 연계하는 프로세스로 이루어진다. CFX 는 유체기계해석 분야에서는 잘 알려진 소프트웨어로 해석결과의 신뢰성은 이미 검증되었으나, 새롭게 소개되고 있는 HEEDS 는 주로 구조해석 분야에서 최적화를 수행한 사례가 보고되어 있다. 이에 본 논문을 통해 유체기계에 적용하여 최적화 결과를 검토하였다. HEEDS 에는 SHERPA 라는 최적화 기법이 탑재되어 있으며, 다수의 설계변수를 설정할 수 있어 변수간의 교호작용 등을 효율적으로 검토할 수 있다. 본 논문에서는 DOE 방법으로 최적화가 이루어진 사류펌프 임펠러에 대해 개발된 방법을 적용하여 최적화 결과의 타당성과 안정성을 검토하였으며, 같은 방법을 디퓨저에 적용하여 최적화 형상을 검토하였다. 본 논문에서 개발된 최적화 방법을 이용하여 사류펌프 최적화를 수행한 결과, DOE 방법을 이용한 설계보다 개선된 결과를 적절한 시간 내에 얻을 수 있음을 확인하였다.

**Abstract:** An optimization process was developed to improve mixed-flow pump performance. The optimization process was combined with CFX (a computational fluid dynamics (CFD) code) and HEEDS (an optimization code). CFX is a widely used CFD software for turbo machinery, whereas HEEDS, which uses the SHERPA algorithm, is a newly introduced optimization code. HEEDS can use a large number of optimization variables; thus, it is possible to effectively consider interaction effects. In this paper, an impeller model, which is already optimized with design of experiments (DOE), is used as the base model. The optimization process developed in this paper shows an improved design within an acceptable timeframe.

### 1. 서 론

유체기계의 성능분석 및 예측에 CFD 기법을 이용하는 방법은 이미 일반화되어 있고 실험과 거의

비슷한 결과를 보이는 것을 여러 연구결과에서 확인할 수 있다. 특히 이종철<sup>(1)</sup>의 “유체기계분야 중 펌프 및 수차 분야의 연구동향”의 내용에 의하면 다양한 분야의 수차 및 펌프의 해석적인 연구에 CFX 가 사용되고 있으며 상용 CFD 코드의 활용영역이 유체기계의 성능개선 및 최적설계 등으로도 확장되고 있음을 알 수 있다. 또한 실험계획법(DOE) 등을 이용한 유체기계의 최적설계에 CFX 를 이용한 사례가 최영석 등<sup>(2)</sup>의 연구결과에서 보

<sup>§</sup> 이 논문은 2014년도 대한기계학회 유체공학부문 춘계학술대회(2014. 5. 15.-16., 부산 해운대 한화콘도) 발표논문임.

<sup>†</sup> Corresponding Author, [yklee@anflux.com](mailto:yklee@anflux.com)

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

고 되고 있으며, 이러한 연구결과를 종합하면 CFX 와 같은 상용 CFD 코드의 신뢰성이 유체기계의 정밀한 성능분석을 필요로 하는 최적설계에도 충분히 적용 가능하다고 인식되고 있다.

최적설계에는 여러 가지 기법이 개발되어 있으며 유전자기법(Genetic Algorithm), 반응면기법(Response Surface Method), 실험계획법(DOE) 등을 이용한 최적설계사례가 보고 되고 있다. 특히, 유체기계 중 사류펌프의 최적설계에 김진혁 등<sup>(3)</sup>과 최영석 등<sup>(2)</sup>의 연구결과에서 CFX 와 각 연구기관의 최적설계 기법을 적용하여 유체기계의 최적설계에 활용하는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 CFD 와 최적설계를 접목하여 유체기계의 성능을 향상시키는 최적설계를 수행하는 사례가 증가하는 추세에 있으며, 대부분의 연구에서 CFX 와 같은 상용 CFD 코드를 유동해석코드로 활용하고 있다. 이는 CFD 를 이용한 수치해석기법이 일반적인 사용자에게 의해 비교적 쉽고 일관된(robust) 해석결과를 얻을 수 있기 때문에 가능한 방법이다. 그러나, 최적설계에서 CFX 와 같이 사용자에게 따라 쉽고 일관성(robust)이 있게 결과를 얻을 수 있는 상용 최적화 코드는 비교적 최근에 소개되고 있는 추세이며, 사용 편의성과 최적설계 결과의 안정성을 제공하는 최적화 소프트웨어 중 하나로 HEEDS 를 검토할 수 있다.

본 연구에서는 SHERPA 알고리즘을 사용하는 최적화 소프트웨어인 HEEDS 를 유체기계해석에서 널리 사용되고 있는 CFX 와 연계하여 안정적이고 일관성(robust) 있는 유체기계의 최적화를 달성할 수 있는 방안을 검토하였다. 본 연구에서 확립한 방법론을 적용하면 비교적 적당한 해석시간 안에 유동해석과 최적설계의 일반적인 지식을 가진 사용자에게 의해 유체기계의 최적설계를 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. CFX 와 HEEDS 를 이용한 유체기계 최적설계 방법

### 2.1 CFX 를 이용한 유동해석 방법의 특징

본 연구에서 적용한 유체기계의 최적화 방법은 먼저 날개와 유로의 형상을 변경하는 인자를 설계 변수로 설정하고, 유동해석을 통해 설계변수에 따른 유체기계의 성능을 추출한 후 이를 최적화 코드에 입력하여 보다 향상된 결과를 도출할 수 있을 것이라고 판단되는 방향으로 설계변수를 변경시켜가는 방법을 반복적으로 수행하는 것이다. 이 방법에서 최적화 코드가 필요로 하는 설계변수에

따른 유체기계의 성능은 유동해석을 수행하여 얻어지기 때문에 유동해석 결과의 신뢰성과 안정성이 매우 중요하다. 본 연구에서 유동해석에 사용한 CFX 코드는 격자, 대류항의 처리기법 및 난류 모델의 적용에서 사용자가 큰 신경을 쓰지 않아도 해석결과와 신뢰성을 확보할 수 있는 특징이 있으므로, 적용한 기법 및 특징에 대해 다음과 같이 기술한다.

본 연구에서 사용한 CFX 는 Navier-Stokes 방정식 중 연속방정식을 밀도로 표현된 그대로 해석하지 않고 압력으로 표현한 수식을 해석하는 전통적인 압력에 기초한(pressure-based) 방법을 사용한다. 대부분의 상용 코드들은 SIMPLE 또는 SIMPLEC, Rhie and Chow 방법과 같은 압력에 기초한(pressure-based) 공식으로부터 만들어져 있다.<sup>(4,5)</sup> 압력을 기반으로(pressure-based) 한 CFD 코드 중 SIMPLE 기법과 같은 방식을 사용하는 코드는 비압축성해석에는 큰 문제가 없지만 압축성해석에는 수렴이 되지 않는 경향을 보인다. 또한, 관내 유동과 같이 단순한 형태의 유동은  $u, v, w$  속도장의 상호영향이 적기 때문에 해석에 큰 문제가 없지만, 유체기계와 같이 속도장이 서로 강하게 영향을 미치는 문제에서는 수렴이 느리다. 이를 해결하는 방법으로 CFX 는 Navier-Stokes 방정식의 연속방정식과 운동량방정식의 행렬을 SIMPLE 기법과 같이 분리해서 풀지 않고, 원래 그대로의 행렬을 푸는 방식(coupled solver)을 사용하기 때문에  $u, v, w$  속도장이 서로 강하게 영향을 주는 유체기계의 해석에 적합하고, 비압축성 뿐만 아니라 압축성해석에서도 수렴성이 양호하다.<sup>(6)</sup> 이런 특징 때문에 펌프 및 압축기 등 다양한 유체기계의 해석 및 최적화를 위해 본 연구에서는 CFX 를 적용하였다.

CFD 를 적용한 유동해석에서 격자의존성을 확인하는 것은 중요한 과정이다. 하지만, 최적화를 자동으로 수행하는 방법을 개발하기 위해서는 모든 경우에 사용자가 적절한 격자를 만들어서 제공하는 방법을 적용하기에는 효율성이 떨어지기 때문에 자동화된 방법에 의해 격자를 생성하여도 해석에 문제가 없는 경우가 가장 바람직하다. CFD 코드를 이용한 해석에서 가장 문제가 되는 부분은 격자의 조밀도에 따른 격자의존성 문제와 벽면 경계층 해석을 위해 벽면에 격자를 몰아주면서  $y^+$  를 적절한 값으로 맞추는 두 가지 문제이다.

해석결과와 격자의존성을 줄이기 위해 격자를 많이 사용하면 해석결과와 신뢰성이 높아지지만, 해석시간이 늘어나게 된다. 본 연구에서 적용한

최적화 방법은 수백 개의 계산을 수행해야 하기 때문에 너무 많은 격자를 사용하는 것은 바람직하지 않다. 이런 문제점을 해결하기 위해서 CFX 의 격자점(node based)방식의 유한체적법 방식이 장점이 된다. 왜냐하면, CFX 는 다른 CFD 코드와 같은 수의 격자(element)를 사용하여도 격자가 더 조밀한 효과가 있기 때문에 상대적으로 조밀한 격자를 해석하는 결과를 얻을 수 있다. CFX 는 Fig. 1 과 같이 계산을 통해 얻어진 해를 격자점의 노드에 저장하는 node based 방식이다. 즉, CFX 는 Fig. 1 에서 실선으로 표시된 사용자에게 의해 만들어진 격자를 점선으로 쪼개어 하위격자(sub-element)로 분해한 후 점으로 표시된 격자점(node)를 중심으로 하위격자(sub-element)를 제어체적을 재구성하는 방식을 사용한다. 이와 같이 생성된 다면체격자(polyhedral mesh)를 제어체적으로 사용하며, 계산 정밀도에 영향을 주는 적분점(IP: integration point)을 Fig. 1 의 붉은 x 표시와 같이 하위격자의 면에 구성한다.<sup>(7)</sup> 즉, Fig. 1 을 보면 실선으로 표시된 원래의 격자면에 적분점이 존재하는 경우 4 개의 적분점이 있게 되지만, 붉은색 x 로 표시된 CFX 의 적분점은 8 개가 되어 2 배가 많게 된다. 이를 3 차원 육면체 격자에 적용할 경우 일반적인 상용 CFD 코드는 면이 6 개이므로 6 개의 적분점을 가지지만 CFX 는 면당 4 개의 적분점이 있으므로 총 24 개의 적분점이 존재한다. 그러므로 육면체격자의 경우 동일한 격자를 사용할 경우 CFX 는 다른 CFD 코드보다 격자가 4 배 많은 효과가 있다. 사면체격자의 경우 격자점에 접하는 격자가 많기 때문에 일반 CFD 코드는 4 개를 가지지만 CFX 는 평균 60 개로 적분점이 많았으므로 훨씬 조밀한 격자를 사용하는 결과를 나타내게 된다. 이와 같이 CFX 는 동일한 격자에서 적분점이 많기 때문에 비교적 성긴 격자에서도 해석결과가 정확하고, 격자의존성이 상당히 작다. 이런 격자점 방식의 다면체 격자생성 및 적분점이 증가하는 효과로 인해 최적화 코드에 넘겨주는 CFD 해석결과의 격자의존성 문제를 해결할 수 있다.

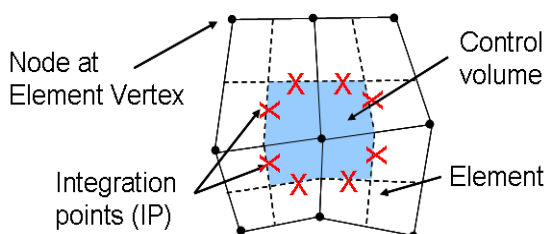


Fig. 1 Mesh arrangement and terminology for CFX

또한, CFD 를 이용한 일반적인 유동해석에서 벽면의 경계층 해석을 위해 첫번째 격자점의  $y^+$ 에 대해 주의해야 한다. 일반적인 CFD 의 유동해석에서 벽면의 점성저층(Viscous sub-layer)부터 해석하는 저레이놀즈 수 난류모델의 경우  $y^+$ 는 1~2 이하

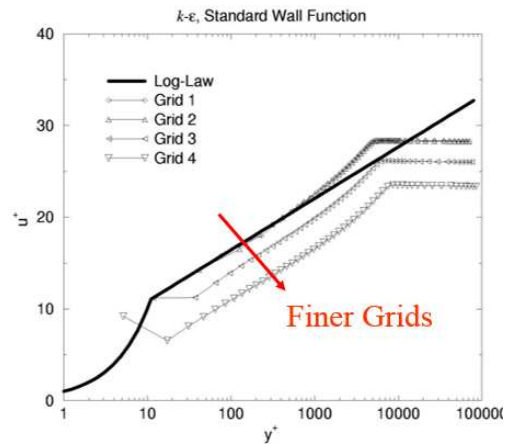


Fig. 2 Grid dependency test of k-ε model with standard wall function

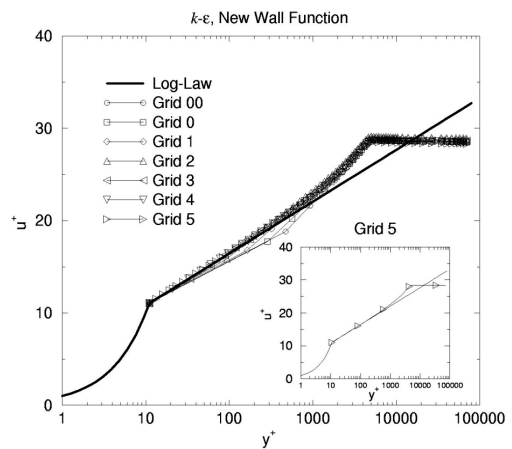


Fig. 3 Grid dependency test of k-ε model with scalable wall function

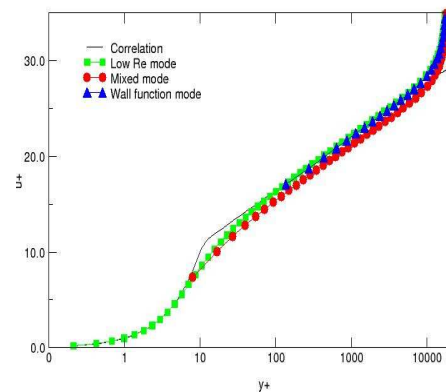


Fig. 4 Grid dependency test of k-ω model with CFX automatic wall function

여야 한다. 그러나, 이런 조건을 만족하기 위해서는 벽면에 밀집되는 격자가 많아 전체 격자수가 크게 증가하게 된다. 이를 해결하여 벽면에 밀집되는 격자수를 줄이기 위해 보통 벽법칙(wall function)을 사용하며, 이 경우에는 첫번째 격자점의 적절한  $y^+$ 의 범위가 20~300 정도라고 알려져 있다. 일반적인 벽법칙(standard wall function)은 실험에 의해 밝혀진 벽근처의 로그함수영역에서 적용되는  $y^+$ 와  $u^+$ 의 관계식을 사용하는 것으로 첫번째 격자점의  $y^+$ 가 결정되면 관계식에서 바로  $u^+$ 를 찾아내고 이를 바탕으로 첫번째 격자에  $u^+$ 로부터 계산된 속도를 경계조건으로 부여하는 방식을 사용한다. 이 경우 벽면에 조밀한 격자를 사용하지 않아도 실험에 의해 검증된 로그상관식을 바탕으로 적절한 속도를 부여할 수 있다. 하지만, 일반적으로 많이 사용하는 벽법칙(standard wall function)은 첫번째  $y^+$ 가 너무 작아 20 이하가 되면 위에서 설명한 로그상관식이 적용되지 않기 때문에 에러가 발생하게 된다.

Fig. 2 는 매끄러운 평판 벽면에서의 속도프로파일의 로그스케일로 표현한 것으로 격자 조밀도에 따라 달라지는  $y^+$ 에 의해 유동해석결과가 받는 영향을 나타내고 있다.<sup>(8,9)</sup> Fig. 2 에서 첫번째 격자의  $y^+$ 가 10 이하의 층류 점성저층에 위치할 경우 도형으로 표시된 유동해석의 결과가 실선으로 표시된 이론 로그수식을 따라가지 못하는 문제가 발생한다. 즉, 해석정밀도를 높이기 위해 벽면에 격자를 많이 몰아주는 것이 일반적인 벽법칙(standard wall function)을 사용하는 경우 오히려 에러를 크게 하는 요인이 된다.<sup>(10)</sup> 이는 사용자가 격자를 생성할 때 주요 문제점이 되며, 자동화된 격자를 생성할 경우 일일이 격자를 확인할 수도 없기 때문에 해석결과의 신뢰성을 훼손할 수 있는 요인이다. 이를 해결할 수 있는 방법으로 CFX 는  $k-\epsilon$  과  $k-\omega$  모델에 대해 각기 다른 해결책을 제시하고 있다. CFX 의  $k-\epsilon$  난류모델은 Fig. 3 과 같이 일반적인 벽법칙(standard wall function)이 층류 점성저층에 첫번째 격자가 위치할 경우 에러가 발생하는 문제를 해결한 scalable wall function 을 사용한다. Scalable wall function 은 벽면에서 격자가 fine 하게 형성되어  $y^+$  10 이하의 층류저층에 첫번째 격자점이 위치하면  $y^+$ 의 최소값을 11.06 으로 제한하여 Fig. 3 에서 보듯이 유동해석결과의 에러가 크지 않게 하는 기법을 적용하고 있다.

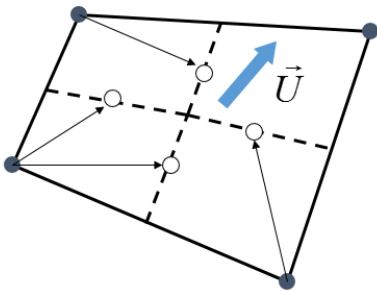
$k-\omega$  계열의 난류모델을 사용하는 경우는  $k-\epsilon$  모델과는 다른 벽면처리기법이 적용된다. 이 경우

벽면근처 층류저층의  $\omega$  수식과 log 영역의  $\omega$  수식을 혼합하여 적용하는 automatic wall treatment 기능을 사용한다. Fig. 4 에서와 같이 CFX 의 automatic wall function 의 경우 첫번째 격자의  $y^+$ 가 1 에서 100 사이에 위치할 경우 격자의  $y^+$ 에 따라 기호로 표시된 유동해석결과가 실선으로 표시된 이론수식값을 따라가기 때문에 벽면에서의  $y^+$ 문제를 해결하고 있다.<sup>(11)</sup> 이와 같이 CFX 를 사용하여 해석하면 벽면에 격자를 몰아주기만 하면  $y^+$ 에 대한 걱정 없이 유동해석을 수행할 수 있기 때문에 유동해석을 바탕으로 한 최적화 결과를 신뢰할 수 있다.

마지막으로 격자와  $y^+$ 가 적절한 경우에도 수치해석에 적용하는 기법의 선택에 따라 결과의 정확도가 달라질 수 있다. 대류항(advection term)의 처리는 CFD 의 해석결과의 정밀도에 큰 영향을 미치는 요소이며, 유동해석에서는 유동의 흐름에 따라 정보가 전달되는 특징을 반영하기 위해 풍상차분법(Upwind scheme)이 주로 사용된다. CFD 에 일반적으로 사용되는 풍상차분법의 정밀도는 1st order 와 2nd order 로 구분될 수 있으며, 일반적으로 2nd order 의 풍상차분법을 사용하여야 유동해석결과의 정밀도를 담보할 수 있다. Fig. 5 는 CFX 의 High Resolution 기법에 대해 설명한 것이다. Fig. 5 에서 실선은 격자를 나타내고 점선은 하위격자(sub element)를 나타낸 것이다. 검은 색 점은 격자에 저장된 변수를 의미하며 속이 빈 점은 하위격자(sub element) 면의 적분점(integration point)를 나타낸다. 1st order 의 경우 수식에 표현된 NAC (numerical advection correction) 항이 '0'인 경우, 즉,  $\beta=0$  인 경우이다. 이는 상류의 격자에 있는 해석값을 공간좌표가 바뀔 때 따른 거리의 변화나 해석값의 변화를 고려하지 않고 사용하기 때문에 수치확산(Numerical diffusion)이 심하고 결과의 정밀도가 떨어진다. 그러므로,  $\beta=1$  을 적용하는 순수 2nd order 를 사용하여야 정밀도가 높아지지만, 이 경우 수치분산(numerical dispersion)이 발생하게 된다. CFX 의 High Resolution 기법은 해석에 따라  $\beta$  를 0 에서 1 사이의 값을 가변적으로 적용하여 수치안정성과 정밀도를 모두 만족할 수 있는 기법이다.

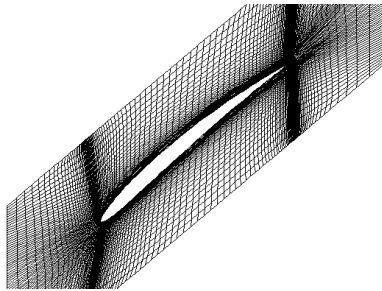
Fig. 6 은 날개 표면에서의 마하수 분포를 예측한 결과를 사용한 수치기법에 따라 나타난 것이다. 1st order 의 풍상차분법을 단순히 Upwind 라고 부르며, "High Resolution" 으로 표현된 CFX 의 기법은 Blend 1 로 표시된 순수한 2nd order 기법의 정

밀도에 근접하는 결과를 나타낸다. Fig. 6 에서 Upwind 기법은 날개표면에서의 충격파를 제대로 예측하지 못하는데 비해, High resolution 기법과 Blend 1 로 표시된 순수한 2nd order 기법의 경우 날개 표면에서의 충격파를 예측하고 있다. 본 연구에서는 CFX 의 High Resolution 기법을 사용하므로 유동해석결과의 정밀도를 확보하였다.

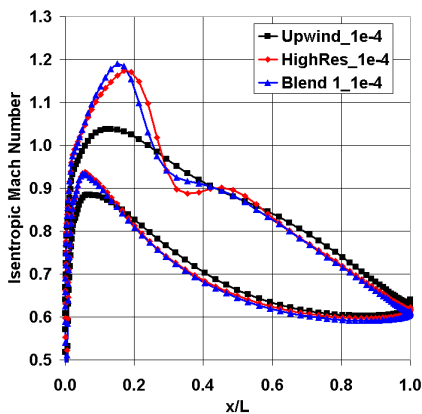


$$\begin{aligned} \phi_{IP} &= \phi_{up} + \Delta\phi_{NAC} \\ &= \phi_{up} + \beta \left( \Delta\vec{x} \frac{\Delta\phi}{\Delta\vec{x}} \right)_{IP} \end{aligned}$$

Fig. 5 High Resolution Scheme



(a) Grid of wing section



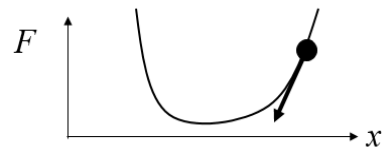
(b) Mach number prediction on the wing surface.

Fig. 6 Analysis accuracy of advection scheme

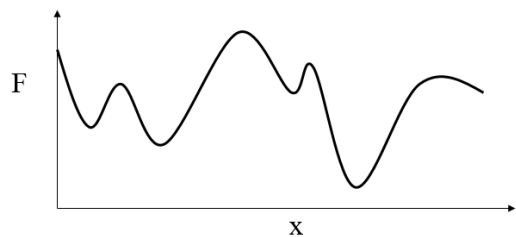
이와 같이 수치해석기법과 대류항 처리 및 난류 모델의 적용에서 격자의 영향을 덜 받도록 조치되어 있으므로 CFX 를 이용하는 일반적인 사용자가 비교적 일관된 해석결과를 얻을 수 있다. 본 논문에서 제시하는 유체기계의 최적설계는 CFD 해석결과를 바탕으로 진행되므로, 유동해석결과가 격자, 난류모델 및 해석기법에 크게 영향을 받지 않고 일관성이 있는 CFX 의 특성은 최적설계를 달성하는데 특히 중요하다.

2.2 HEEDS 를 이용한 최적화 방법

본 연구에서 사용한 최적화 소프트웨어는 HEEDS (Hierarchical Evolutionary Engineering Design System)로 이 소프트웨어의 가장 큰 특징은 최적화에 사용하는 SHERPA 알고리즘이다. SHERPA 알고리즘은 특별히 새로 개발된 기법이라기 보다는 지금까지 알려진 최적화 기법들을 동시에 사용하는 기법이라고 할 수 있다. Fig. 7 에 수학 수식을 이용한 설계공간(design space)를 나타내고 각각의 최적화 기법에 따른 문제점을 검토하였다. Fig. 7(a)와 같이 설계공간에서 최저점이 하나인 경우는 경사도가 '0'인 x 값을 찾는 경사도법(gradient method)이 빠른 시간 안에 최적화를 수행할 수 있는 방법이다.<sup>(12)</sup> 반면, (b)와 같이 여러 개의 저점이 존재하는 경우는 경사도법의 경우 최저점이 아닌 국부적인 저점(local minimum)에서 벗어나지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 이런 경우에는 설계공간에서 광역 최저점(global minimum)을 찾아낼 수 있는 유전자법(Generic Algorithm)<sup>(13)</sup>을 사용하는 것이 바람직하다. 하지만, 유전자기법은 탐색시간이 길기 때문에 단순한 설계공간에서도 최저값을 찾는 데 경사도법보다 오랜 시간이 걸리는 단점이 있다.



(a) Single minimum point problem



(b) Multiple minimum point problem

Fig. 7 Example of design space problem



이와 같이 설계공간에 여러 개의 저점이 존재하는 상황에서 최저점을 찾는 문제를 해결하기 위해 한가지 최적설계기법을 사용할 경우 경사도법과 같이 국부적인 저점에 빠져 원래 목적인 최저점을 찾지 못하거나, 유전자법과 같이 최저점을 찾더라도 오랜 시간이 걸리는 문제가 발생한다. SHERPA 알고리즘은 한가지 최적화기법을 사용함에 따라 발생하는 문제를 해결하기 위해 여러 개의 최적화기법을 동시에 사용한다. “Heterogeneous multi-agent approach” 탐색방법인 SHERPA 알고리즘은 유전자법, 경사도법과 같은 다수의 탐색방법 들이 설계공간에 대한 정보를 서로 교환하며 반독립적(semi-independent)으로 탐색을 수행하여 제시된 목적함수와 제한조건을 만족하도록 진행된다. 각각의 설계결과로부터 다음 최적화를 위한 방향성을 파악하기 위한 기여도를 평가하기 위해 설계결과의 성능(Performance)를 수치화 하고 성능이 높은 설계결과를 위주로 선택하는 방식으로 최적화가 진행된다. 이때 목적함수와 제한조건을 반영하여 설계결과의 적합도(Goodness)를 판단하기 위한 성능(Performance)은 아래의 수식과 같이 정의된다.

$$P = \sum_{i=1}^{Nobjs} \left( R1_i \frac{f_{oi}}{|n_i|} + R2_i \left( \frac{f_{oi}}{|n_i|} \right)^2 \right) - \sum_{i=1}^{Ncons} C \left( P1_i \frac{|f_{ci} - t_i|}{|t_i|} + P2_i \left( \frac{f_{ci} - t_i}{|t_i|} \right)^2 \right)$$

위의 수식에서 P 는 성능을 나타내며, Nobjs 는 목적함수의 개수를 의미하며, Ncons 는 제한조건의 개수를 나타낸다. R1<sub>i</sub> 는 설계결과의 만족도에 따른 성능에 대한 보상치(reward)의 1 차상수이며, R2<sub>i</sub> 는 2 차상수이다. i 번째 목적함수(f<sub>oi</sub>) 는 절대값 n<sub>i</sub> 에 의해 무차원화 된다. P1<sub>i</sub> 는 제한조건을 위반할 경우 성능을 나쁘게 하기 위한 페널티의 1 차상수이며, P2<sub>i</sub> 는 2 차상수이다. i 번째 제한조건함수(f<sub>ci</sub>)는 설정된 제한조건의 목표(t<sub>i</sub>)의 절대값에 의해 무차원화 된다. 제한조건이 만족되면 C 는 0 을 사용하고, 위반되면 1 을 사용한다. 위의 수식에서 제한조건이 만족되는 설계변수의 경우 목적함수에 대한 보상이 모두 적용되게 되지만, 제한조건을 위반하면 그에 따라 보상이 감소하여 성능이 떨어지는 결과를 나타내게 된다. 이와 같은 방법으로 평가된 성능이 높아지는 방향으로 설계변수의 방향이 결정되어 최적값을 탐색하고, 탐색과정에서

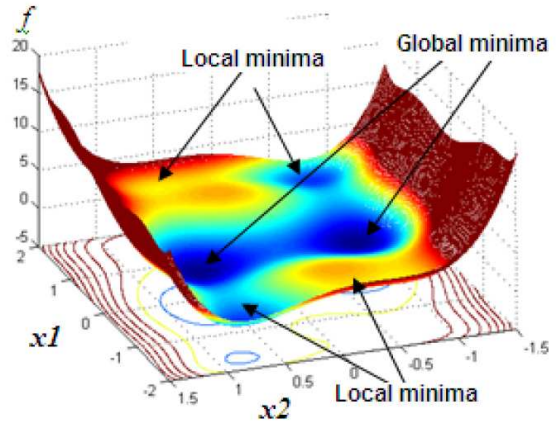


Fig. 8 Three-dimensional contour plot of the local region surrounding the global minima locations of the Six Hump Camel Back Function

설계공간에 따라 국부탐색과 전체탐색에 적용된 가중치(tuning parameter)를 자동으로 조정하며, 이를 통해 설계공간의 특성에 따라 적합한 최적화기법을 자동으로 적용하는 방법이다.

최적화 기법에 익숙한 사용자가 최적화를 수행할 경우, 설계공간의 특성을 사용자가 완전히 파악해서 가장 적당한 최적화 기법을 적용하는 것보다 효율적일 수도 있다. 하지만, 최적화 기법 등에 대한 전문지식이 없어 설계공간에 대한 파악이 힘든 일반적인 사용자의 입장에서는 SHERPA 기법과 같이 여러 가지 최적화 기법을 설계공간에 맞게 자동으로 적용하는 SHERPA 기법이 상당히 유용하다고 할 수 있다.

이와 같은 HEEDS 의 SHERPA 알고리즘의 특성을 검토하기 위해 6 개의 국부최저점(local minima) 과 2 개의 광역최저점(global minima)이 있는 Six Hump Camel Back 함수에 대해 HEEDS 및 여러 최적기법을 적용하여 성능을 비교하였다. Six Hump Camel Back 함수는 다음과 같이 정의되며, Fig. 8 에 함수의 전체 설계공간에 대한 그림을 나타내었다.

$$f = \left( 4 - 2.1 \cdot x_1^2 + \frac{x_1^4}{3} \right) \cdot x_1^2 + x_1 \cdot x_2 + \left( -4 + 4 \cdot x_2^2 \right) \cdot x_2^2$$

$$-3.0 \leq x_1 \leq 3.0$$

$$-2.0 \leq x_2 \leq 2.0$$

Fig. 9 와 Fig. 10 은 임의의 시작점과 평가회수에 따라 이미 알려진 최소점을 얼마나 빨리(Fig. 9), 얼마나 편차가 없이(Fig. 10) 찾아내는 가를 검토할 수 있는 bench mark 자료이다.<sup>(14,15)</sup> Fig. 9 의 결과에서 유전자기법(GA: genetic algorithm),<sup>(13)</sup> 모의단련법(ASA : adaptive simulated annealing),<sup>(16)</sup> 비선형이차계획법(NLQPL : non-linear sequential quadratic

programming),<sup>(12)</sup> Pointer (hybrid and adaptive search method within the iSIGHT software)<sup>(17)</sup> 등의 최적화 기법보다 SHERPA 기법이 비교적 적은 수의 평가 회수에서도 최적결과에 근접하는 것을 알 수 있다. SHERPA 는 50 번의 평가회수에 완전히 수렴되지만, ASA 는 100 번, Pointer 는 250 번의 평가를 수행해야 수렴된다. 경사도법인 NLPQL 은 방법의 특성상 시작점에 따라 다른 기법에 비해 성능이 좋게 나타날 수도 있으나, 국부 최저점에 빠져 광역 최저점을 찾지 못하는 경우도 발생하기 때문에 설계공간에 대한 정보가 없는 상태에서 최적화를 수행하기에는 위험한 것으로 파악된다.

이상의 결과로부터 SHERPA 기법은 다른 기법에 비해 비교적 적은 평가회수로 일관된 최적값을 찾아주는 것으로 판단할 수 있으며, 여러 가지 벤

치마크 문제에서도 같은 특징을 나타내는 것<sup>(14,15)</sup> 으로부터 최적화에 대한 전문지식이 없는 일반적인 사용자 들도 최적화를 수행하는데 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다.

### 2.3 CFX 와 HEEDS 를 연계한 최적설계방법

2.1 과 2.2 에 설명한 바와 같이 본 연구에서 유체기계의 최적화를 수행하는데 사용한 CFX 와 HEEDS 는 일반적인 사용자들이 유동해석 결과와 최적화 결과를 얻는데 무리가 없도록 개발되어 있는 것이 가장 큰 특징이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 이런 특징을 가진 CFX 와 HEEDS 를 연계하는 방법을 검토하였으며, 팬과 펌프 등에 대해 적용한 결과 기존에 비해 향상된 유체기계의 형상을 얻어내는 결과를 확인하였다.

Fig. 11 은 HEEDS 의 최적화 과정을 도식적으로 나타낸 것이다. BladeGen 은 유체기계의 날개형상을 만들어 주는 프로그램이며, BladeGen 의 입력과 일에 있는 설계수치를 변경함으로써 날개의 형상을 바꿀 수 있다. TurboGrid 는 BladeGen 에서 생성된 날개형상을 격자로 만드는데 사용한다. 격자를 생성할 때 TurboGrid 에 설정된 수치를 이용하여 격자의 조밀도와  $y^+$  등을 제어할 수 있다. 본 연구에서는 기존에 격자의존성 테스트를 수행한 결과를 바탕으로 벽면에서의  $y^+$ 가 20 근처의 값이 되고 해석결과에서 입구와 출구의 압력차를 밀도와 중력가속도로 나눈 수두(Head : [m]로 표시)가 소수점 둘째 자리(1cm 내외)에서 크게 변하지 않는 조건 및 펌프의 수동력을 파워로 나누어 계산되는 효율이 소수점 셋째자리 (0.1%)에서 크게 변하지 않는 격자를 생성하였다. CFX-Pre 에서는 해석조건을 설정하고, CFX-Solve 는 CFX solver 를 이용하여 유동해석을 수행한다. CFX-Post 에서 성능평가를 위한 효율, 압력상승 등의 결과를 추출한다.

위에서 설명한 내용은 CFX 를 이용하여 유체기계의 유동해석을 수행하는 일반적인 과정으로 BladeGen 에서의 형상 결정부터, 격자생성, 해석 및 결과평가까지 CFX 의 batch 작업에 의해 자동으로 수행되게 구성할 수 있다. 이 과정에 HEEDS 를 적용한 최적화를 덧붙여 유체기계의 형상최적화 방법을 개발하였다. BladeGen 에서 batch 작업을 수행할 때 사용되는 입력파일은 text 형태의 bgi (bladegen input file)이며, 파일에 기술된 text 내용에 깃각 및 자오면 형상을 결정하는 수치가 기입되어 있다. bgi 파일의 내용을 수정하면 날개의 형상이 변경되며, 이후의 과정은 batch 작업에 의해 자동

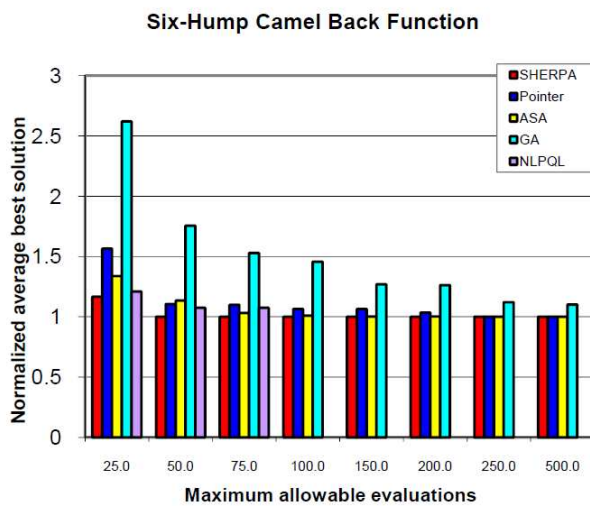


Fig. 9 Normalized average best solution vs. maximum allowable evaluations for the six hump camel back function

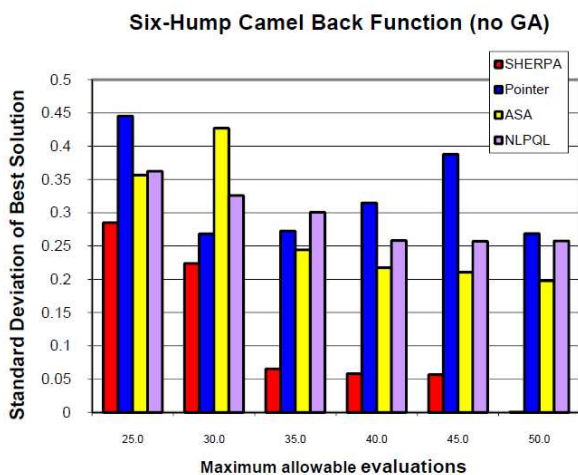


Fig. 10 Standard deviation of the best solution vs. maximum allowable evaluations for the six hump camel back function

으로 진행된다. 해석이 완료된 이후 CFX-Post 에서 추출된 효율 및 양정 등의 데이터를 text 형태로 출력하면 CFX 를 이용한 자동화된 해석과정에서 bgi 파일과 출력파일만 검토하여 날개형상에 따른 성능을 알 수 있다. HEEDS 는 bgi 파일의 수치를 제어하고 출력파일의 결과를 검토함으로써 깃각 등 날개형상(설계변수)변경에 따른 효율(목적함수) 및 양정(제한조건) 등의 결과를 가지고 설계변수의 성능(Performance)를 수치화 한 후 이를 바탕으로 설계변수의 방향성을 탐색하는 과정을 반복함으로써 최적값을 도출하게 된다.

앞에서 설명한 바와 같이 HEEDS Process 에서는 여러 가지 최적설계기법을 선택할 수도 있지만, 설계공간에 따라 적합한 최적설계기법을 적용하는 SHERPA 기법을 기본으로 사용하여 일반적인 사용자가 최적설계기법의 선택에 대한 특별한 고민 없이 최적결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

### 3. CFX 와 HEEDS 를 이용한 사류펌프 임펠러-디퓨저 최적설계 결과

#### 3.1 최적설계를 위한 임펠러-디퓨저 설계변수의 설정

본 연구에서는 최영석 등<sup>(2)</sup>의 연구결과를 바탕으로 임펠러와 디퓨저의 설계변수를 설정하였다. Fig. 12 는 임펠러의 자오면 형상을 결정하는 설계변수들을, Fig. 13 은 디퓨저의 자오면 형상을 결정하는 설계변수들을, Fig. 14 는 임펠러와 디퓨저의 날개각을 결정하는 설계변수들을 나타낸 것이다.

Fig. 12 에서 R1h 는 허브, R1s 는 쉬라우드 부분의 입구부 반경을  $\phi_1$  은 임펠러 날개전단의 기울어진 각을 의미한다. R2 는 임펠러 외경을 나타내며,

b2 는 임펠러 날개후단에서의 날개폭을,  $\phi_2$  는 날개 후단의 기울어진 각을 나타낸다. 그리고 임

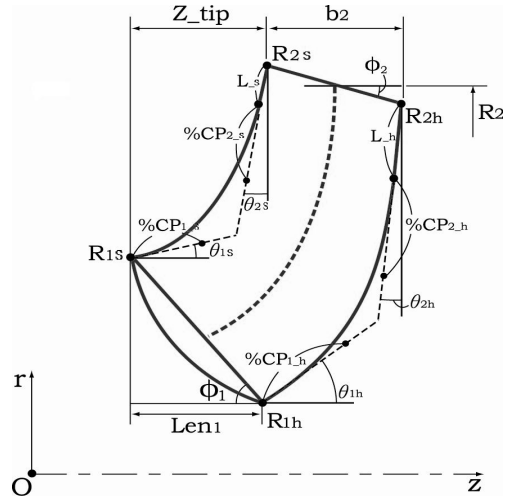


Fig. 12 Impeller design variables in a meridional plane

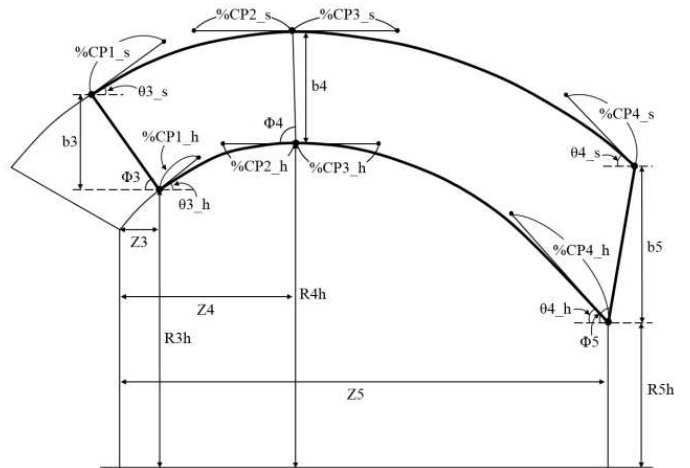


Fig. 13 Diffuser design variables in a meridional plane

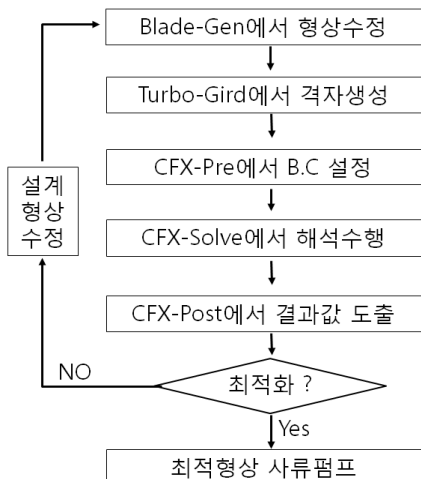


Fig. 11 HEEDS process for turbomachinery

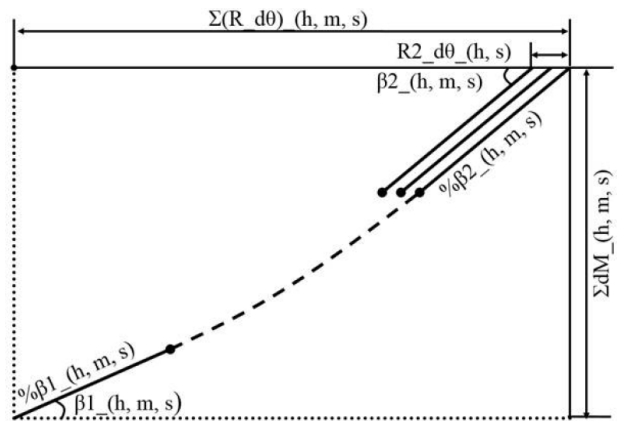


Fig. 14 Blade angle design variables in a vane plane development



펠러 출구부 허브와 쉬라우드에서의 직선 구간을 각각  $\%L_h$ ,  $\%L_s$  로 정의하였다. 임펠러 허브 곡선이 수평, 수직선과 이루는 입구부각과 출구부각을  $\theta_{1h}$ ,  $\theta_{2h}$  로 나타내었고, 임펠러 쉬라우드는  $\theta_{1s}$ ,  $\theta_{2s}$  로 나타내었다. 임펠러 입구부와 출구부는 베지어 곡선을 사용하여 연결하였다. 허브 입구부분과 출구부분의 베지어 조정점을  $\%CP1_h$ ,  $\%CP2_h$  로 나타내었고 쉬라우드는  $\%CP1_s$ ,  $\%CP2_s$  로 나타내었다.  $Z_{tip}$  는 쉬라우드 입구부와 출구부의 축 방향 길이를 의미한다. 디퓨저는 Fig. 13 에 설계변수를 나타내었으며, 임펠러와 비슷한 방법으로 정의되었다.

Fig. 14 에서  $\sum dM_{(h,m,s)}$ 은 자오면에서의 날개 길이를 모두 더해준 값을 의미한다.  $\% \beta_{1(h, m, s)}$ ,  $\% \beta_{2(h, m, s)}$ 는 날개전개도상의 입구부와 출구부 날개각이 입구와 출구날개각과 동일한 값을 유지하는 정도를 나타내며 날개전개도에서는 선형적인 특징을 보인다.  $\beta_{1(h, m, s)}$ 는 임펠러 날개의 입구 각도를 나타내며  $\beta_{2(h, m, s)}$ 는 임펠러 날개의 출구 각도를 나타낸다.  $R2_{d\theta}(h, s)$ 는 임펠러 출구부의 허브와 쉬라우드에서의 원주방향으로 기울어진 정도를 나타낸다. 입구 부분과 출구부분은 각도가 일정하게 변해가는 부드러운 곡선으로 연결하였다. 표기에서  $h$ 는 허브,  $m$ 은 미드스팬,  $s$ 는 쉬라우드를 의미한다.<sup>(19)</sup>

최영석 등<sup>(2)</sup>의 기존 연구결과에서 실험계획법(DOE)를 적용하여 최적설계를 수행한 사류펌프의 임펠러와 디퓨저의 최적설계방법이 설명되고 있다. 이러한 연구결과를 이용하여 최영석 등<sup>(2)</sup>에 의해 실험계획법(DOE)를 적용하여 최적 설계된 비속도 550 급 사류펌프 임펠러를 초기모델(base model)로 CFX 와 HEEDS 를 이용한 임펠러의 최적설계를 수행하였다. 임펠러 최적설계의 목적은 과연 CFX 와 HEEDS 를 이용하여 Fig. 12 에서 Fig. 14 에 정의한 다수의 설계변수를 동시에 적용하였을 경우 실험계획법(DOE)를 이용하여 사용자가 직접 장시간을 들여 최적화를 수행한 결과에 필적하거나 더 나은 결과를 빠른 시간 안에 도출할 수 있는가를 검토하는 것이다. 실험계획법(DOE)를 수행하는 경우 앞에서 설명한 모든 변수를 한번에 처리할 수 없기 때문에 소수의 변수만 사용하고 대부분의 변수는 고정하여야 한다. 이런 제한으로 인해 각각의 변수간의 교호작용 반영이 불명확할 수도 있고, 선택되는 소수의 변수를 다르게 할 경우 반복적인 실험계획법(DOE)을 수행하여야 하므로 최적화에 걸리는 절차와 시간이 능숙한 연구자의 경우도 2

주 정도 소요된다고 한다. 이미 최적화가 수행된 비속도 550 급 사류펌프 형상이기 때문에 효율 등 목적하는 성능의 향상은 크지 않을 것으로 판단되나, 기존 효율과 비슷한 값이 나온다면 안정적으로 최적화가 수행된다고 판단할 수 있다. 또한, 다수의 설계변수를 동시에 적용하여 변수간의 교호작용이 반영되고 기존 실험계획법(DOE)보다 짧은 시간 안에 최적 설계가 된다면, 이를 통해 새롭게 제안된 방법이 안정적인 최적설계 결과를 빠르게 얻을 수 있는지를 확인할 수 있다.

### 3.2 CFX 와 HEEDS 를 연계한 사류펌프 임펠러 최적설계 결과

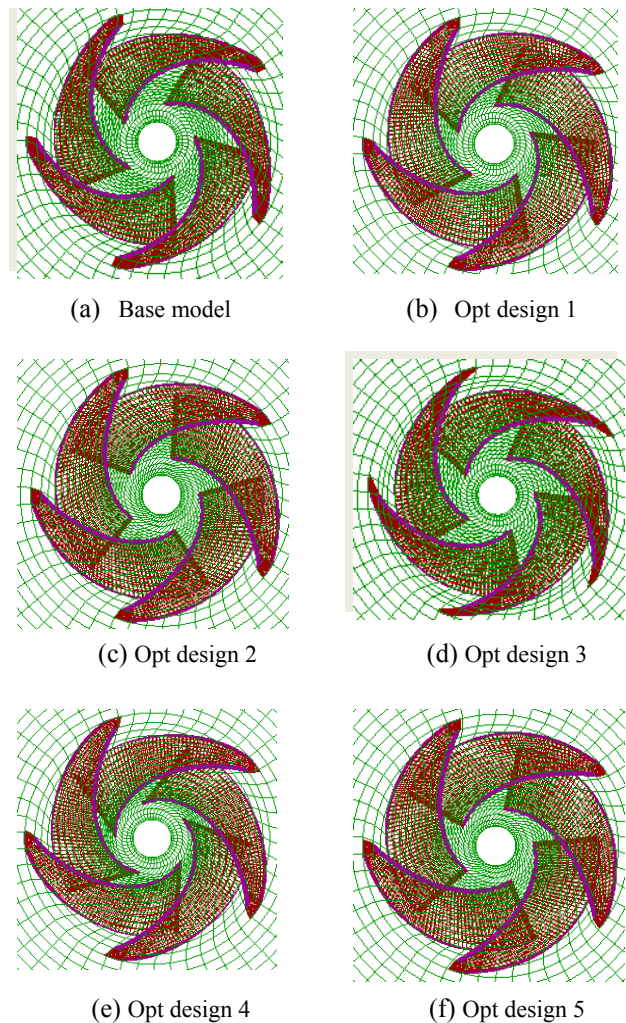
Table 1 과 Fig. 15 에 임펠러의 효율을 최대화하는 최적설계 결과를 나타내었다. 기존 초기모델(base model)이 실험계획법(DOE)에 의해 최적설계된 형상이므로 형상변화가 크지 않은 것을 알 수 있다. 그러나, 실험계획법(DOE)에서는 적용하기 힘든 다수의 설계변수(17 개)를 동시에 적용하였기 때문에 인자간의 교호작용이 반영되어 종합적인 최적설계결과를 얻은 것으로 판단된다. 또한, HEEDS 를 이용한 최적설계에서는 구속조건으로 정해진 수두(Head)를 만족하는 조건을 설정하여 원하는 비속도가 정확히 설계되도록 설정하였다. 이 구속조건에 의해 Table 1 에 나타난 최적설계의 수두(Head)가 모두 19.5m 에 근접한 값을 나타내고 있다.

Opt design 1 은 초기모델(base model)과 동일하게 깃각(beta)의 분포를 직선형태로 적용한 것이며, HEEDS 의 최적설계결과로 나타나는 효율이 기존 초기모델(base model) 보다 0.41 % 향상된 결과를 나타내고 있다. Fig. 12 에서 초기모델(base model)과 Opt design 1 과의 형상차이가 크지는 않지만 쉬라우드부분의 깃각 분포가 달라진 것이 확인된다. 이 결과에 실험계획법(DOE)에서 성능에 미치는 영향이 있다고 판단된  $L_t$  를 적용한 것이 Opt design 2 이다. 그러나, Opt design 2 의 효율은 Opt design 1 에 비해 향상되지 않은 것을 알 수 있다. 이는 실험계획법(DOE)에서는 다수의 설계변수를 고려하기 어려워 자오면 형상변수인  $L_t$  의 영향을 고려하였을 때 날개의 깃각(beta) 분포는 고정하고 최적설계를 수행하였기 때문에  $L_t$  의 변화에 의해 성능향상이 나타나는 결과가 나타나지만, HEEDS 에서는 자오면과 날개각 형상에 대한 모든 변수의 영향이 동시에 고려되었기 때문에 깃각(beta)와 자오면 형상의 다른 설계변수가 미치는 영향이  $L_t$

**Table 1** Optimization results of mixed flow pump impeller

Case	특징	설계변수 17 개	효율 (%)	수두 (m)
Base model	DOE 방법 적용	Lh, Lt, CP1h,	96.41	20.12
Opt design 1	Liner beta angle 분포	CP2h, CP1t,	96.82	19.51
Opt design 2	Opt design 1 + Lt 적용	CP2t, $\beta 2_h$ ,	96.82	19.43
Opt design 3	Opt design 2 + lean angle	$\beta 2c_h$ , $\beta 1b_h$ ,	96.79	19.5
Opt design 4	Bezier beta angle 분포	$\beta 1_h$ , $\beta 2_s$ ,	96.79	19.49
Opt design 5	Opt design 4 + Lt	$\beta 2c_s$ , $\beta 1b_s$ , $\beta 1_s$ , % $\beta 2c$ , % $\beta 1b$ , lean angle	96.78	19.47

보다 크게 반영되어 Lt 가 성능에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 판단된다. Opt design 3 는 trailing edge 의 lean angle 을 추가로 반영한 결과이며 최적 설계 전의 예상과는 다르게 날개의 후연(trailing edge)가 회전방향과 반대로 기울어지는 결과를 보이고 있다. Opt design 4 는 초기모델(base model)과는 다르게 깃각의 분포를 Bezier 곡선으로 정의한 것이며, Opt design 5 는 Opt design 4 에 Lt 의 영향을 고려한 것이다. Table 1 에 나타낸 HEEDS 를 이용한 최적화 결과는 크게 변하지 않는데 비해 Fig. 15 에 나타난 날개의 형상은 다소 변하는 것을 알 수 있다. 이는 설계변수의 설정이 변함에 따라 요구되는 목적함수의 목표를 달성하기 위해 각각의 설계변수 값이 다소 달라지기 때문이다. 이상의 결과에서 HEEDS 와 CFX 를 이용한 최적화를 수행하면 사용자가 설정하는 설계변수의 변화에 적응하여 각각의 설계변수가 제어됨으로써 실험계획법(DOE)보다 향상되고 일관성이 있는 설계를 달성할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한 HEEDS 를 이용할 경우 1 주일 정의의 시간이 필요한데 이는 능숙한 연구자가 실험계획법(DOE)를 이용하는 경우 소요되는 2 주일의 시간보다 최적화에 소요되는 시간을 대폭 줄인 것으로 판단된다. 이상의 결과에서 HEEDS 와 CFX 를 연계한 최적화 프로세스를 적용할 경우 국부적인 탐색과

**Fig. 15** Optimized impeller designs of mixed flow pump

전체적인 탐색을 모두 적용하는 SHERPA 알고리즘의 도움으로 넓은 탐색공간에서 최적화를 수행하기 때문에, 일반적인 사용자가 넓은 범위의 변수를 설정하여도 최적화 결과를 도출할 수 있다는 것이 본 연구를 통해 개발된 방법의 장점이라고 할 수 있다.

### 3.3 CFX 와 HEEDS 를 연계한 사류펌프 디퓨저 최적설계 결과

디퓨저는 임펠러에서 발달한 유동의 영향을 받기 때문에 3.2 에서 최적설계로 얻어진 Opt design 3 의 임펠러 형상을 사용하고, 디퓨저를 연결하여 유동해석 및 최적설계를 수행하였으며, 이 결과를 Table 2 와 Fig. 16 에 나타내었다. 임펠러에 대한 최적설계를 수행할 때는 이미 실험계획법(DOE)에 의해 설계된 형상을 기본으로 사용하였기 때문에 임펠러의 형상변화는 크지 않았다. 반면, 디퓨저의 자오면은 기존 설계데이터를 바탕으로 결정하였지

만, 깃각은 개략적으로 정한 값을 초기값으로 부여하였기 때문에 형상변화가 크게 나타난다.

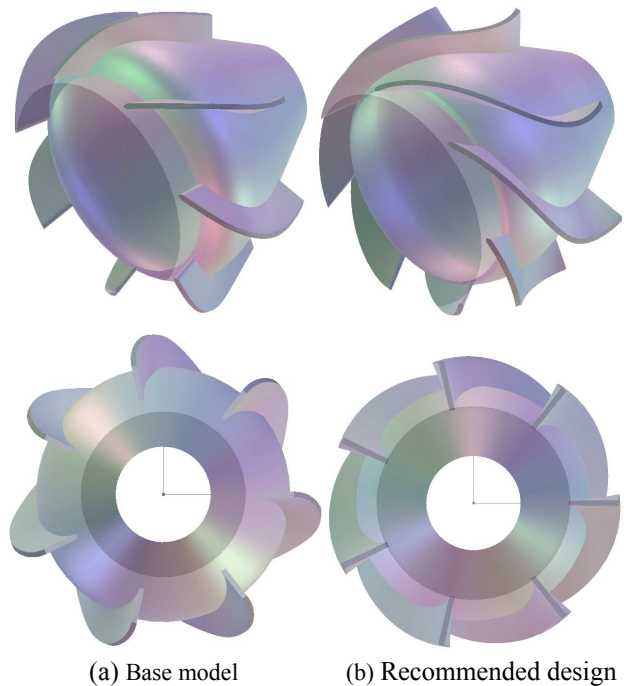
디퓨저의 최적설계는 임펠러와 같은 방식으로 HEEDS 와 CFX 를 연계한 최적설계가 수행되었으며, 설계변수는 임펠러의 경우보다 많은 26 개가 반영되었다. 임펠러의 경우 출구 반경인 R2 가 고정되었고 이미 최적화가 수행된 형상이라 형상변화가 심하지 않았지만, 디퓨저는 허브와 쉬라우드에서의 반경 및 축방향 길이를 결정하는 R4h, b4, R5h, b5, Z4h, Z4s, Z5h, Z5s 등의 값이 설계변수이기 때문에 자오면 형상의 변경과 깃각의 변화에 의한 날개형상이 Fig. 16 에서와 같이 크게 변한다. 그렇기 때문에 출구반경 등 자오면 형상을 결정하는 인자에 대한 구속조건을 설정하는 것이 필요하다고 판단되며, 추후 연구를 통해 최적의 자오면형상을 결정할 수 있는 구속조건을 결정하는 것이 필요하다.

본 연구에서 진행된 연구 결과를 바탕으로 다음과 같은 목적함수를 설정하는 것이다. 우선 디퓨저에서의 손실을 최소화 하기 위해 압력손실을 최소화 하도록 목적함수를 설정하였다. 또한 출구의 형상을 결정하는 구속조건으로 출구에서의 동압이 최소가 되도록 출구에서의 전수두(Ht)와 정수두(Hs)의 차가 최소가 되는 목적함수를 설정하였다. 출구의 동압은 손실로 감쇄되기 쉬우므로 정압을 높이는 방향으로 설계 목표를 설정한 것이다. 마지막으로 출구에서 선회속도(swirl velocity)를 줄이는 것도 펌프에서 토출된 물이 파이프를 흐르면서 에너지의 손실이 최소화 될 수 있는 방안으로 판단하여 목적함수로 설정하였다.

위와 같은 개념으로 최적설계를 진행하였으며, 본 연구에서 도출된 결과 중 최고의 성능을 나타내는 결과를 Table 2 와 Fig. 16 에 나타내었다. 앞에서 설명한 바와 같이 디퓨저 출구에서는 정압의 성능이 중요한 인자로 판단되므로 Table 2 에 전압에 의한 결과와 정압에 의한 결과를 나누어서 효율과 수두를 나타내었다. 최적화된 Recommended design 의 결과가 기존 초기모델(Base model)의 디퓨저 보다 전압성능과 정압성능 모두 향상된 것을 확인할 수 있다. 전압 및 정압효율이 80% 대에서 90%대로 향상되었으며, 특히 정압효율은 약 83%에서 약 92%로 크게 향상되었다. 이는 전압수두와 정압수두의 차인 (Ht-Hs) 가 최적화된 모델에서 더 작은 값을 가지기 때문이다. 이와 같이 목적함수를 결정할 때 출구에서의 정압과 선회각(swirl angle)에 대한 고려가 되었기 때문에 정압성

**Table 2** Optimization result of mixed flow pump diffuser

Case	설계변수(26 개)	효율 (%)	수두 (m)	Ht-Hs (m)
Base model	Z4h, R4h, Z5h, R5h, b4, b5, CP1_h, CP2_h, CP3_h, CP4_h, CP1_s, CP2_s, CP3_s, CP4_s, $\beta_{2\_h}$ , $\beta_{2c\_h}$ , $\beta_{1b\_h}$ , $\beta_{1\_h}$ , $\beta_{2\_s}$ , $\beta_{2c\_s}$ , $\beta_{1b\_s}$ , $\beta_{1\_s}$ ,	Total		1.93
		88.66	18.52	
		Static		
		83.86	16.59	
Recommended design	% $\beta_{2c\_s}$ , % $\beta_{1b\_s}$ , % $\beta_{2c\_h}$ , % $\beta_{1b\_h}$ ,	Total		0.93
		92.81	19.17	
		Static		
		92.83	18.25	



**Fig. 16** Recommended diffuser design of mixed flow pump

능이 크게 향상되었으며, 이와 같은 결과를 반영하여 Fig. 16 과 같이 디퓨저의 날개각 분포 및 자오면

의 형상이 결정되었다. Fig. 16의 Recommended design 결과에서 디퓨저의 날개각 변화가 Base model 보다 큰 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 일반적인 사용자에게 의한 유체기계 최적설계 방법을 확립하는 방안을 검토하였다. 유체기계해석에 안정적이고 신뢰성 있는 결과를 제공하는 CFX를 유동해석코드로 사용하고 전문적인 지식이 없어도 최적설계를 수행할 수 있는 HEEDS를 최적설계코드로 사용하였으며, 유체기계분야에 두 코드를 연계하여 적용하는 방법을 확립하였다. 이와 같은 방법론을 사류펌프 임펠러와 디퓨저의 최적설계에 적용하였으며, 본 연구에서 개발한 방법론이 기존의 실험계획법(DOE)에 의해 최적설계된 사류펌프 임펠러와 디퓨저 보다 향상된 설계결과를 보다 빠른 시간에 도출하는 것을 확인하였다.

본 연구에서 개발된 방법론은 일반적인 사용자가 쉽고 안정적으로 사용할 수 있는 상용유동해석 코드와 상용최적화 코드를 이용한 방법이므로 다양한 유체기계의 최적설계에 적용되어 국내 유체기계산업의 경쟁력을 높이는데 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

#### 후 기

본 연구는 ‘비속도 150-1200 급 원심 및 사류펌프 설계 기술 개발’ 사업(No. 10044860)의 일환으로 진행되었습니다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Lee, J. C., 2011, "Research trends in Pumps and Hydraulic Turbine," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 14, No. 2, pp. 65~67.
- (2) Choi, Y. S., Lee, K. Y., Kim, S. and Kim, J. H., 2010, "Design Optimization of Mixed-flow Pump Impellers and Diffusers," *Proceedings of the KFMA Annual Meeting*, pp. 168~169.
- (3) Kim, J. H., Jin, C. H. and Kim, K. Y., 2010, "High Efficiency Design of a Mixed-Flow Pump through Optimization Techniques," *Proceedings of the KFMA Annual Meeting*, pp. 31~32.
- (4) Ferziger, J. H. and Peric, M., 1997, "Computational Methods for Fluid Dynamics," Springer.
- (5) Raithby G.D. and Schneider, G.E., 1979, "Numerical Solution of Problems in Incompressible Fluid Flow," *Treatment of the Velocity-Pressure Coupling. Numer. Heat Transfer*, 2.
- (6) Raw, M., 1996, "Robustness of Coupled Algebraic Multigrid for the Navier-Stokes Equations," AIAA Paper 96-0297, AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV.
- (7) Raw, M., 1985, "A New Control-Volume Based Finite Element Procedure for the Numerical Solution of the Fluid Flow and Scalar Transport Equations," Ph.D.Thesis, University of Waterloo, Canada
- (8) Coles, D.E. and Hirst, E.A., editors, 1969, "Computation of Turbulent Boundary Layers - 1968 AFOSR-IFP-Stanford Conference," Vol. 2, Stanford University, CA.
- (9) Menter, F.R. and Grotjans, H., "Application of Advanced Turbulence Models to Complex Industrial Flows," AEA Technology GmbH, Staudenfeldweg 12 D-83624 Otterfing, Germany
- (10) Esch, T., Menter, F.R. and Vieser, W., 2003, "Heat Transfer Predictions Based on Two-Equation Turbulence Models," *6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Hawaii.
- (11) Menter, F.R., 1994, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA-Journal* 32(8), pp. 269-289.
- (12) Schittkowski, K., 1985, "NLPQL: A Fortran Subroutine for Solving Constrained Nonlinear Programming Problems," *Annals of Operations Research*, Vol. 5, pp. 485~500.
- (13) Goldberg, D.E., 1989, "Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning," Addison Wesley Longman, Inc.
- (14) "SHERPA - An Efficient and Robust Optimization/Search Algorithm," Red Cedar Technology
- (15) "A Benchmark Study of Optimization Search Algorithms," Red Cedar Technology
- (16) Ingber, L., 1996, "Adaptive Simulated Annealing (ASA): Lessons learned," *Control and Cybernetics*, Vol. 25 No. 1, pp. 33~54.
- (17) iSIGHT-FD Version 2.5 User's Manual, 2007.
- (18) 2014, ANSYS CFX Version 14 User's Manual.
- (19) Kim, S., Choi, Y. S., Lee, K. Y. and Yoon, J. Y., 2007, "Effect of Blade Angle Distribution on the Performance of a Centrifugal Pump in a Fixed Meridional Shape," *Proceedings of the SAREK Annual Meeting*, pp. 21~26.