

성능 향상을 위한 이산화탄소 액화용 터보 팽창기 임펠러 공력 설계

김 성^{1,2†} · 정순영¹ · 김광호¹

¹한국생산기술연구원 산업에너지연구부문, ²과학기술연합대학원대학교 융합제조시스템공학

Aerodynamic Design of a Turbo Expander Impeller for Performance Improvement in CO₂ Liquefaction

SUNG KIM^{1,2†}, SOON-YOUNG JEONG¹, KWANG-HO KIM¹

¹Industrial Energy R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, 89 Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do 31056, Korea

²Convergence Manufacturing System Engineering, University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

[†]Corresponding author :
ks2928@kitech.re.kr

Received 16 July, 2026

Revised 28 July, 2026

Accepted 29 July, 2026

Abstract >> In this study, the design of a turbo expander for performance improvement was carried out using computational fluid dynamics (CFD). The blade angle distribution was defined as the design variable of the turbo expander impeller, and the turbo expander impeller was designed for performance improvement by controlling the blade angle distribution. Three-dimensional steady-state numerical simulations were carried out by solving the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations with the shear stress transport (SST) turbulence model. The performance variation according to changes in the turbo expander impeller design variables was analyzed based on numerical simulation results, and a turbo expander impeller geometry was designed to improve performance.

Key words : CO₂ liquefaction(이산화탄소 액화), Turbo expander(터보 팽창기), Aerodynamic design(공력 설계), Performance improvement(성능 향상), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

1. 서 론

최근 탄소중립 실현과 온실가스 배출 저감을 위한 정책적·산업적 요구가 강화됨에 따라, 이산화탄소(CO₂)를 포집하여 저장하거나 활용하는 CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) 기술의 중요성이 증대되고 있다. CO₂는 발전, 철강, 석유화학, 시멘트 등 주요

산업 공정에서 지속적으로 발생하는 대표적인 온실가스로, 배출량 저감을 위해서는 포집 이후의 안정적인 수송 및 저장 기술 확보가 필수적이다. 특히 포집된 CO₂를 기체 상태로 저장하거나 운송할 경우 부피가 크고 효율성이 낮기 때문에, 이를 고밀도 액체 상태로 전환하는 액화공정은 저장 용량 증대와 운송 경제성 향상 측면에서 핵심적인 역할을 한다.

CO₂ 액화공정은 압축, 냉각 및 팽창 과정이 연계되어 이루어지는 공정으로, 전체 시스템의 에너지 소비를 최소화하고 액화 효율을 향상시키기 위한 장치 구성과 운전 조건의 최적화가 중요하다. 일반적인 액화공정에서는 압축된 CO₂를 냉각한 후 감압을 통해 온도를 낮추고 액화를 유도한다. 그러나 팽창밸브를 이용한 감압 방식은 고압 상태의 CO₂가 보유한 압력 에너지를 회수하지 못하고 손실시키는 한계가 있다. 이에 비해 터보 팽창기는 팽창 과정에서 발생하는 압력에너지를 회전동력으로 전환할 수 있으며, 동시에 작동유체의 온도를 효과적으로 저하시켜 액화 성능을 향상시킬 수 있다. 따라서 터보 팽창기의 적용은 CO₂ 액화공정의 에너지 효율을 개선하고, CCUS 시스템의 경제성 및 공정 신뢰성을 높이기 위한 유효한 방안으로 제시되고 있다.

본 연구에서는 이산화탄소 액화공정에 사용되는 터보 팽창기의 성능 향상을 위해, CFD를 활용하여 공력 설계하였다. 자오면 고정 상태에서 날개각 분포 대상으로 주요 설계변수를 정립하고, 날개각 분포를 제어하여 터보 팽창기 형상을 설계하였다. 설계변수 변화에 따른 성능변화를 체계적으로 분석하고 성능이 향상된 터보 팽창기 형상을 제시하였다.

2. 터보 팽창기 형상

터보 팽창기는 고압 유체를 저압으로 팽창시키면서 유체의 압력에너지를 회전운동 에너지로 변환하

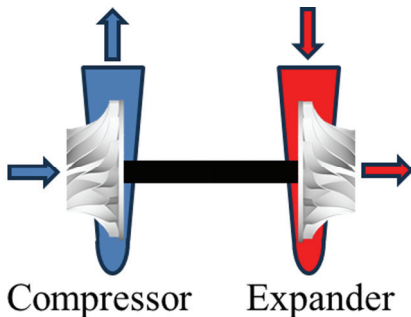


Fig. 1. Three-dimensional geometry of the compander

는 터보기계이다. 형상은 작동유량, 팽창비, 회전수 및 작동유체에 따라 원심형 및 축류형으로 결정된다. 특히, 원심형 터보 팽창기는 작동유체가 외주부에서 유입되어 블레이드 유로를 따라 반경 방향으로 팽창한 후 축 방향으로 토출되는 구조로 나타난다. 소형 고속 회전 및 고압비 조건에 적합한 형상적 특징을 나타내므로 CO₂ 액화공정용 소형 장치에서는 일반적으로 원심형 터보 팽창기 형상이 적합하다. 또한, 터보 팽창기는 압축기와 동일한 축상에서 배치한 컴팬더 타입으로도 사용된다. 컴팬더 터보기계는 터보 팽창기에 의하여 팽창 과정에서 회수된 축동력을 압축기의 압축 과정에 활용함으로써 시스템 효율을 향상시킬 수 있는 구조로 구성되어 있다. Fig. 1은 터보 팽창기를 포함한 컴팬더 형상을 나타내며, 본 연구에서는 컴팬더 타입으로 구성된 터보 팽창기 대상으로 성능 향상을 위한 공력 설계를 수행하였다.

터보 팽창기의 구성품 중에서 회전체인 임펠러가 주요 구성품이므로 임펠러 설계가 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 성능 향상을 위하여 터보 팽창기 임펠러를 설계하였다. 임펠러 설계는 자오면 및 날개각 분포로 나누어지는데 자오면은 터보 팽창기 구조 제한조건 때문에 고정하였고, 날개각 분포 대상으로 설계하였다. Fig. 2는 날개각 분포 설계변수를 나타낸 것이며, 베지어 곡선(bezier curve)을 이용하여 설계하였다. Fig. 2에서 β_1 및 β_2 는 입구 및 출구각을 나타내며, %CP1 및 %CP2는 입구 및 출구부의 조정점(control point)을 나타낸 것이다.

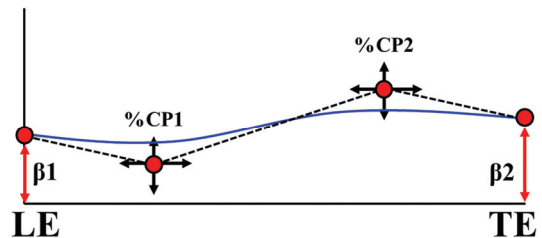


Fig. 2. Design variables of blade angle distribution

3. 수치해석 방법

CO₂ 액화용 터보 팽창기의 내부 유동흐름 분석을 위해, 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX-25 (Ansys, Canonsburg, PA, USA)를 이용하여 유동해석을 수행하였다. 임펠러 및 안내깃이 포함된 노즐 형상은 ANSYS Bladegen (Ansys, Canonsburg, PA, USA)을 이용하여 생성하였고, 격자계는 ANSYS Turbogrid를 사용하여 정렬격자계(structured grid)(Ansys, Canonsburg, PA, USA)로 생성하였다¹⁾. 팽창기 입구부에는 안내깃이 설치된 노즐 형상으로 구현하였고, 출구부는 축 방향으로 일정한 면적을 갖는 파이프(pipe) 형상으로 단순화하였다. 임펠러 및 입구부 안내깃의 날개 수는 11 및 20개이나 수치해석에 사용된 날개 형상이 동일하므로 수치해석 시간을 고려하여 주기조건(Periodic condition)을 사용하여 임펠러 및 입구부 안내깃의 각 1개의 날개 영역에 대해서만 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해 터보 팽창기의 격자 테스트를 수행하였고, 약 148만 개로 고정하여 수치해석을 수행하였다.

터보 팽창기의 압축성 난류흐름(turbulent flow) 분석을 위해 3차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 난류의 흐름을 분석하기 위해 난류모델(turbulent model)은 유동박리(flow separation)의 예측에 유리한 shear stress transport (SST) model을 사용하였다^{2,3)}. Table 1 및 Fig. 3은 터보 팽창기의 경계조건(boundary condition)을 보여준다. 입구부에는 압력(pressure) 및 온도(temperature) 조건을 주었고, 출구부에는 압력을 주었다. 작동유체(working fluid)는 CO₂로 사용하였으며, 디스크 마찰 손실 및 기계적 손실 등은 수치해석 결과에 포함되지 않았다.

Table 1. Boundary condition

	Value
Inlet pressure (bar)	62.9
Inlet temperature (°C)	24.69
Outlet pressure (bar)	45.34
Rotational speed (r/min)	57,000

4. 터보 팽창기 성능 분석

4.1 2^k 요인실험

실험계획법(Design of Experiments, DOE)은 다수의 설계인자가 시스템의 성능에 미치는 영향을 통계적으로 분석하고, 주요 영향인자를 제한된 실험 또는 해석 횟수로 규명하기 위한 방법이다. 이 기법은 각 설계인자의 주 효과를 정량적으로 평가할 수 있을 뿐만 아니라, 두 개 이상의 인자 사이에서 발생하는 상호작용도 동시에 분석할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 터보 팽창기 임펠러의 날개각 분포가 내부 유동구조와 공력성능에 미치는 영향을 분석

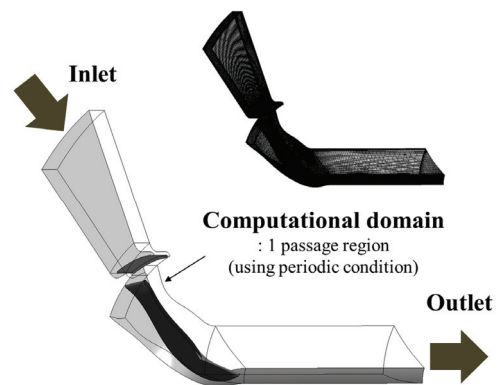


Fig. 3. Boundary conditions and grid system for the turbo expander

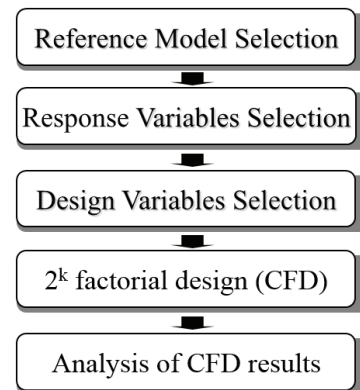


Fig. 4. Flow chart of 2^k factorial design

하기 위하여 2^k 요인실험을 적용하였으며, 분석 절차는 Fig. 4에 제시하였다⁴⁾.

완전요인설계는 모든 설계인자의 수준 조합을 고려할 수 있으나, 인자의 수가 증가할수록 요구되는 해석 횟수가 기하급수적으로 증가한다. 이에 본 연구에서는 설계인자의 수, 수치해석에 소요되는 계산시간 및 수행 가능한 해석조건을 고려하여 일부실시 요인설계(fractional factorial design)를 채택하였다. 일부실시 요인설계는 상대적으로 영향이 작을 것으로 가정되는 고차 상호작용을 다른 효과와 교락시켜 해석 횟수를 줄이면서도 주요 설계인자의 영향도를 효율적으로 평가하는 방법이다.

설계변수는 터보 팽창기의 핵심 회전체인 임펠러의 날개각 분포를 제어하는 변수로 선정하였다. 부드러운 날개각 분포를 설계하기 위해 베지어 곡선을 적용하였으며, 곡선의 내부 제어점은 고정하고 임펠러 입구 및 출구의 날개각을 설계변수로 설정하였다. 구체적으로 허브와 슈라우드에서의 입구 및 출구 날개각을 나타내는 $\beta1_h$, $\beta1_s$, $\beta2_h$, $\beta2_s$ 를 설계변수로 설정하였으며, Table 2는 2^k 요인실험에 적용된

Table 2. 2^k factorial design set

	$\beta1_h$ (°)	$\beta1_s$ (°)	$\beta2_h$ (°)	$\beta2_s$ (°)
1	-3	-3	-3	-3
2	3	-3	-3	3
3	-3	3	-3	3
4	3	3	-3	-3
5	-3	-3	3	3
6	3	-3	3	-3
7	-3	3	3	-3
8	3	3	3	3
Center	0	0	0	0

Available Factorial Designs (with Resolution)															
Run	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
4	Full	III													
8	Full	IV	III	III	III										
16		Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III	III	
32			Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
64				Full	Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV	

Fig. 5. Fractional factorial of design of experiments (DOE)

실험조건을 나타내었다.

Fig. 5에 제시한 일부실시 요인설계는 해상도 IV로 구성하였다. 이에 따라 주 효과는 2인자 상호작용과 독립적으로 추정할 수 있으나, 일부 2인자 상호작용 사이에는 교락이 발생한다. 이러한 설계구조를 바탕으로 네 개 변수의 수준 조합을 고려한 총 8개의 수치해석 조건을 설정하였다.

수립된 실험계획에 따라 각 설계변수의 수준 조합에 대한 수치해석 조건을 생성하였으며, 각 조건에서 도출된 유동장과 성능지표를 Minitab 14를 이용하여 분석하였다. 이를 통해 임펠러 날개각 분포가 터보 팽창기의 유동특성과 성능에 미치는 영향도를 정량적으로 비교하고, 성능 향상에 지배적인 설계인자를 도출하였다.

4.2 터보 팽창기 임펠러 설계변수 변화에 따른 성능 분석

터보 팽창기 임펠러 형상 변화에 따른 성능 변화는 질량유량 및 효율 대상으로 분석하였다. 이때, 입구 및 출구 압력조건은 팽창비를 고려하여 수치해석을 수행하였으므로, 설계변수 변화에 따른 팽창비의 변화는 미세하므로 성능분석 대상에서 제외하였다. 터보 팽창기 임펠러 형상 변화에 따른 성능 변화는 주 효과 도표(main effects plot) 및 파레토 차트(pareto chart)를 이용하여 분석하였다.

Fig. 6은 임펠러 설계변수의 변화에 따른 질량유

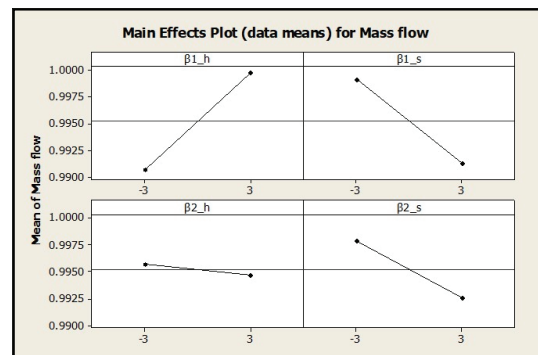


Fig. 6. Main effects plot for mass flow

량의 변화를 나타낸다. 분석 결과, $\beta 1_h$ 가 증가할 수록 질량유량은 증가하는 반면, $\beta 1_s$, $\beta 2_h$ 및 $\beta 2_s$ 는 감소할수록 질량유량이 증가하는 경향을 보인다. Fig. 7의 파레토 차트에 따르면 질량유량에 대한 설계변수의 영향도는 $\beta 1_h$, $\beta 1_s$, $\beta 2_s$, $\beta 2_h$ 순으로

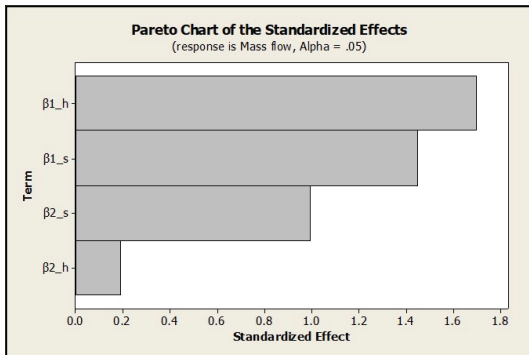


Fig. 7. Pareto chart for mass flow

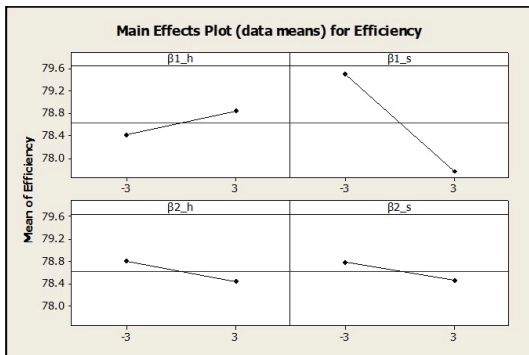


Fig. 8. Main effects plot for efficiency

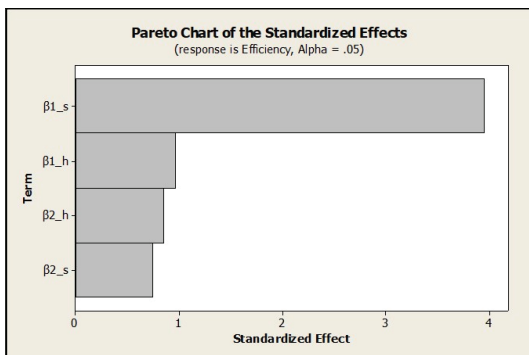


Fig. 9. Pareto chart for efficiency

나타났다. 특히 $\beta 1_h$ 의 설계변수가 질량유량 변화에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

Fig. 8은 임펠러 설계변수 변화에 따른 효율의 변화를 나타낸다. 각 설계변수에 따른 효율 변화는 전반적으로 질량유량과 유사한 경향을 보였다. 즉, $\beta 1_h$ 가 증가하고 $\beta 1_s$, $\beta 2_h$ 및 $\beta 2_s$ 가 감소할수록 효율이 향상되는 것으로 나타났다. Fig. 9는 효율에 대한 파레토 차트를 나타내며, 설계변수의 영향도는 $\beta 1_s$, $\beta 1_h$, $\beta 2_h$, $\beta 2_s$ 순으로 나타났으며, 질량유량과 달리 $\beta 1_s$ 가 효율 변화에 가장 큰 영향을 미치는 설계변수로 확인되었다.

본 연구에서는 설계유량 조건에서 터보 펌프기의 효율을 최대화하는 것을 설계목표로 설정하였다. 설정된 목표를 만족하는 임펠러 형상을 도출하기 위하여 반응최적화(response optimization) 기법을 적용하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다^{5,6)}. 반응최적화 결과, 설계변수의 최적조건은 $\beta 1_h$ 는 3° , $\beta 1_s$ 는 -3° , $\beta 2_h$ 는 -3° , $\beta 2_s$ 는 3° 에서 질량유량은 만족하고 효율은 최대화로 예측되었다. 해당 조건에서는 설계유량을 유지하면서 효율이 향상되는 것으로 확인하였다. 예측된 설계조건을 최적형상으로 선정하고 수치 해석을 수행하여 최적모델의 유동특성과 성능을 검증하였다. Fig. 11은 기존 및 최적형상의 임펠러 3차원

Table 3. Comparison of CFD results

	Reference model	Optimum model
Mass flow	1	1
Efficiency (%)	75.1	80.3

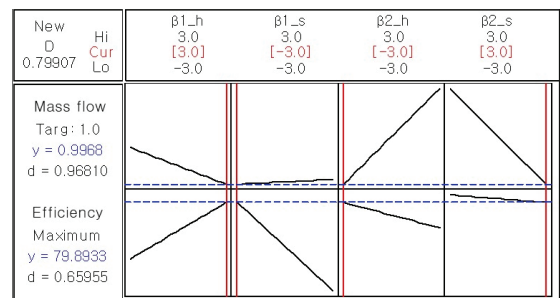


Fig. 10. Plot of response optimization

형상을 비교하였고, Table 3은 수치해석 결과를 비교하였다. Fig. 11을 보면, 기존 및 최적설계된 임펠러 형상의 차이를 알 수 있으며, 입구 및 출구 각도를 포함한 날개각 분포의 차이를 확인할 수 있다. Table 3을 보면, 최적형상은 기존형상과 동일한 질량유량 조건에서 효율이 약 5% 향상되었음을 확인하였다.

기존형상과 최적형상의 내부 유동장을 Fig. 12에 비교·분석하고, 유동구조의 변화와 성능 향상 간의 연관성을 검토하였다⁷⁾. Fig. 12(a)의 기존형상에서는 블레이드 주위의 유동이 불균일하게 형성되며, 일부 영역에서 유동 박리가 발생하는 것으로 나타났다. 이

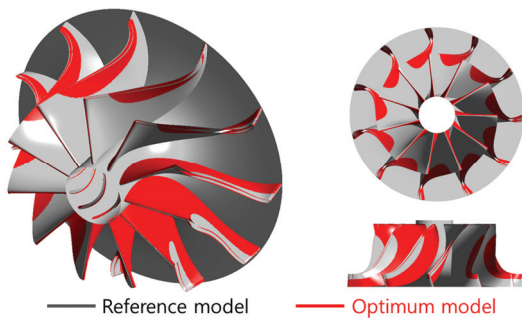


Fig. 11. Comparison of the three-dimensional impeller geometry

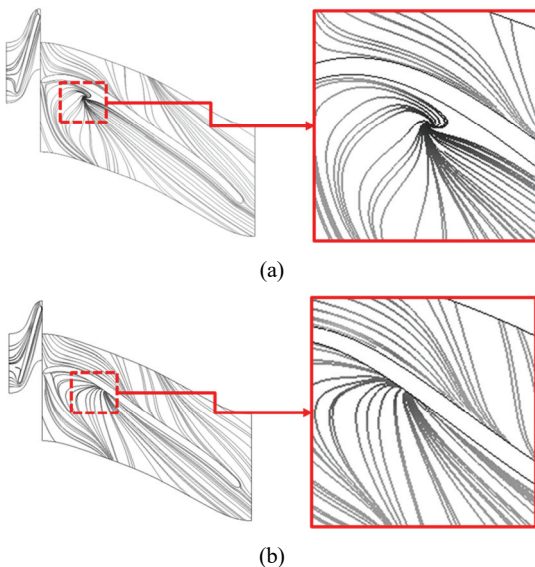


Fig. 12. Comparison of the streamlines (a) reference model, (b) optimum model

러한 유동 불안정은 임펠러 내부의 유동손실을 증가시키는 원인으로 판단된다. 반면 Fig. 12(b)의 최적형상에서는 블레이드 표면을 따라 상대적으로 유동이 원활하게 형성되고, 기존형상에서 관찰된 불균일한 유동영역이 감소한 것을 확인할 수 있다. 따라서 임펠러 날개각의 최적화를 통해 내부 유동흐름이 개선되었으며, 이러한 변화가 효율 향상에 기여한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 터보 팽창기의 공력성능을 분석하기 위하여 전산유체역학(CFD)을 적용하였으며, 임펠러 설계변수에 따른 질량유량 및 효율의 변화를 평가하기 위해 2^k 요인실험을 이용하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 터보 팽창기의 핵심 구성품인 임펠러 형상을 정량적으로 제어하기 위한 설계변수를 정의하였다. 허브와 슈라우드의 입구 및 출구 날개각을 설계인자로 선정함으로써 임펠러의 날개각 분포를 체계적으로 변화시킬 수 있는 설계방법을 제시하였다.
- 2) 임펠러 설계변수 변화에 따른 질량유량과 효율은 전반적으로 유사한 증감 경향을 나타냈다. 그러나 각 성능지표에 대한 설계변수의 상대적 영향도는 서로 다르게 나타났으며, 질량유량과 효율을 지배하는 주요 설계인자가 동일하지 않음을 확인하였다.
- 3) 반응최적화를 통해 도출된 최적형상은 기존형상에 비해 임펠러 내부의 유동 박리와 불균일한 저속영역이 감소하고, 블레이드 표면을 따른 유동이 안정적으로 형성되었다. 이러한 내부 유동구조의 개선으로 최적형상의 효율은 기존형상 대비 약 5% 향상되었다.
- 4) 실험계획법과 CFD를 연계한 설계방법이 터보 팽창기 임펠러의 주요 형상인자를 분석하고 공력성능을 개선하는 데 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제이다(RS-2026-25527616).

References

1. J. H. Kim, H. C. Lee, J. H. Kim, S. Kim, J. Y. Yoon, and Y. S. Choi, "Design techniques to improve the performance of a centrifugal pump using CFD", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, 2015, pp. 215-225, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-014-1228-6>.
2. K. S. Lee, K. Y. Kim, and A. Samad, "Design optimization of low-speed axial flow fan blade with three-dimensional RANS analysis", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, 2008, pp. 1864-1869, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-008-0724-y>.
3. S. Y. Lee and K. Y. Kim, "Design optimization of axial flow compressor blades with three-dimensional Navier-Stokes solver", *KSME International Journal*, Vol. 14, 2000, pp. 1005-1012, doi: <https://doi.org/10.1007/BF03185803>.
4. S. Kim, S. B. Ma, Y. S. Choi, and J. H. Kim, "A numerical study on the improvement of performance for the 2 vane pump impeller", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 3, 2020, pp. 293-301, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.3.293>.
5. S. B. Ma, H. Park, S. J. Kim, S. Kim, and J. H. Kim, "Optimization design for improving the hydraulic performances of the portable hydro-turbine Enomad UNO", *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 24, No. 5, 2021, pp. 16-23, doi: <https://doi.org/10.5293/kfma.2021.24.5.016>.
6. M. W. Heo, K. Y. Kim, J. H. Kim, and Y. S. Choi, "High efficiency design of a mixed-flow pump using a surrogate model", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, No. 2, 2016, pp. 541-547, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0107-8>.
7. D. Lee, S. B. Ma, S. Kim, J. Y. Kim, C. Kang, and J. H. Kim, "A numerical study on the flow uniformity according to chamber shapes used for test of the semi-conductor chip", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 5, 2020, pp. 480-488, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.5.480>.