

화력발전소용 원심 슬러리 펌프 임펠러의 침식경향 해석적 연구

천민우*, 이철희**.#

*인하대학교 건설기계공학과, **인하대학교 기계공학과

Numerical Study on the Erosion Tendency of Centrifugal Slurry Pump Impeller for Thermal Power Plants

Min-Woo Cheon*, Chul-Hee Lee**.#

*Department of Construction Machinery Engineering, Inha University,

**Department of Mechanical Engineering, Inha University

(Received 26 July 2021; received in revised form 11 September 2021; accepted 27 September 2021)

ABSTRACT

Centrifugal pumps are typically used in many slurry industries to transport solid materials. Solid particles in the slurry frequently shock the walls inside the pump, significantly abrading the flow path. Wear damage causes replacement of the pump components, which wastes manpower and time. Therefore, previous studies have been conducted on factors to improve efficiency and life time. This study identifies trends in pumps supplying lime to desulfurized devices from thermal power plants. The shear stress transport(SST) model is used to determine the erosion trend of the centrifugal pump that transfers lime slurry. The purpose of this study is to identify efficiency and erosion trends by selecting three of the various impeller design elements. The three impeller blade design variables mentioned above represent the inlet draft angle and blade angle of leading edge(L.E) and trailing edge(T.E). The maximum value of the erosion density rate tends to be similar to the Input power.

Keywords : Centrifugal Pump(원심 펌프), Impeller(임펠러), Erosion(침식), Lime Slurry(석회 슬러리)

1. 서 론

환경오염 요인 저감을 위해 탄화수소계 연료를 사용하여 발전하는 발전소의 환경오염 가스저감에

대한 중요성이 증대되고 있다. 주요 발전 형태 중 하나인 화력발전소에서는 대기환경 오염의 큰 영향을 미치는 가스 중 하나인 황산화물 배출을 저감하기 위해 탈황장치가 화력발전소에 필수적으로 설치되고 있다.

탈황장치의 형태는 배연탈황(FGD, Flue Gas Desulfurization)이며 탈황을 하기 위한 석회 슬러리

Corresponding Author : chulhee@inha.ac.kr

Tel: +82-32-860-7311, Fax: +82-32-873-7311

를 지속적으로 공급하기 위해 원심펌프를 이용하여 공급하고 있다. 슬러리 원심펌프는 연마재 고형물과 액체 혼합물을 이송시키는 용도로 보편적으로 사용되고 있으며, 사용 수명은 사용 유체의 조건에 따라 몇 주에서 몇 년까지 다양하다. 주요 고장 원인은 침식에 의한 마모이며, 마모를 포함하여 발생하는 피팅, 캐비테이션, 파울링현상은 펌프의 성능을 저하시키는 주요 요인이다^[1]. 10,000 m³/hr 이상의 대용량 슬러리 펌프의 경우에는 실제 시험을 통해 검증하기가 어려움이 있다. 비싼 비용과 오랜 시간이 소요되기 때문에 이를 극복하기 위해 CFD(Computational fluid dynamics) 코드를 활용한 연구가 활발하게 이뤄지고 있고, 유체기계에 대한 연구를 현상에 대한 예측 또는 검증의 도구로 활용하고 있다. Gandhi et al^[2]은 CFD 코드를 사용하여 원심 슬러리펌프 환경에서 고체 입자가 포함된 혼합물에 대한 영향에 대해서 연구를 진행하였다. 또한 Shojaefard et al^[3]은 원심펌프의 기하학적 특성을 변경하여 점성을 고려한 유동 환경에서의 영향을 수치해석을 통해 연구를 수행하였다. Kim et al^[4]는 펌프의 임펠러와 케이싱의 설계 최적화에 대한 연구를 진행하였고 또한 Paglthivarthi et al^[5]는 수치해석 코드를 사용하여 수치해석 코드를 사용하여 슬러리펌프에서 발생하는 침식을 2,3차원으로 나눠 연구를 수행하였다. 유량이 10,000 m³/hr의 유량의 원심 슬러리펌프는 국내에서 가공 및 제작하는 업체는 거의 없는 실정이며, 전 물량 해외업체에서 수입하여 유지보수 및 기술지원의 형태로 공급되고 있는 상태이거나 모사하여 제작하는 상황이다. 따라서 국산화가 절실하다.

그러나 국내 중소기업의 연구개발 능력 및 인력 부족으로 인해 개발이 쉽지 않은 상황이다. 그렇기 때문에 본 연구 그룹에서는 대용량 원심 슬러리 펌프 설계 및 제작에 대한 개발에 대해서 연구를 수행하고 있다. 본 연구에서는 대용량(10,000 m³/hr) 슬러리 펌프에서 주요 부품 중 하나인 임펠러의 설계 요소를 변경하여 설계 요소 변경에 따른 침식 경향과 성능 변화를 파악하고 파악된 결과를 통해 설계시 고려해야 될 사항과 내마모성 향상을 위한 추가적인 고려 사항에 대해 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 2상 유동해석 및 난류 모델

고체-액체가 혼합되어 있는 유체의 해석 방법은 입자의 연속적인 유체 효과만 고려한 단방향 연산 방법과 유체, 고체입자간의 상호 작용을 고려한 양방향 방법이 있다. 입자의 개수가 적거나 입자에 의한 영향이 크지 않은 환경에서는 단방향 방법을 선택하고 입자의 개수가 많거나 혼합물의 입자 농도가 높은 경우에는 양방향 연산 방법으로 연산을 수행한다. 고체-유체 혼합물 계산 방법에 대한 계수 (β , particle mass loading)를 구하기 위한 방법은 식은 다음과 같다^[6].

$$\beta = \frac{r_p \rho_p}{r_f \rho_f} \quad (1)$$

여기서 r 은 입자의 직경, ρ 는 밀도를 나타내며 밀첨자 p 는 고체 입자를, f 는 유체를 의미한다. 또한 유량이 많은 펌프 해석은 N-S(Navier-stokes Equation)방정식 기반으로 연산을 수행하는 것이 일반적이며, 본 연구에서는 $k-\omega$ 모델을 기반으로 하여 파생된 모델인 SST(Shear Stress Transport)를 솔버로 선택하여 수행하였고 혼합물에 대한 모델식은 다음과 같다^[7].

$$\mu_T^m = \frac{\rho^m a_1 k^m}{\max(a_1 \omega^m, S^m F_2)} \quad (2)$$

여기서 k 는 난류 운동 에너지, ω 는 소산 속도, S 는 전단 응력, F 는 조화 함수, ρ 는 밀도, a_1 은 고체 또는 액체의 분율에 의해 결정되는 계수이고 m 은 혼합물을 의미한다.

2.2 침식모델

Finnie's 모델은 산업 환경에서 일반적으로 사용되어지는 침식모델 중 하나이다. 입자의 속도, 입자의 충돌 각도에 영향을 받는다 경험적 상관관계 도출을 통해 구해지며 식은 다음과 같다^[8].

$$E = k V_p^n f(\gamma) \quad (3)$$

여기서 k 는 유체의 물성치에 영향을 받는 상수이며, 밀도, 점성과 온도와 관련이 있다. 또한 V_p 는 입자의 속도를 나타내며, 금속 표면의 거칠기에 영향을 받는다. 그리고 n 은 속도 지수를 의미한다. $f(\gamma)$ 은 입자의 입사각에 대한 함수를 의미하며 다음과 같다.

$$f(\gamma) = \frac{1}{3} \cos^2(\gamma), \text{ if } \tan(\gamma) > \frac{1}{3} \quad (4)$$

$$f(\gamma) = \sin(2\gamma) - 3\sin^2(\gamma), \text{ if } \tan(\gamma) < \frac{1}{3} \quad (5)$$

$\gamma = 18.42^\circ$ 를 기준으로 18.42° 보다 작다면 미끄러짐에 의한 마모로 판단하고 18.42° 보다 크다면 충돌에 의한 마모로 판단할 수 있다^[7].

3. 해석 방법

3.1 해석모델 선정

본 논문에서 다루고 있는 임펠러는 해외업체 중 세계적으로 높은 점유율을 가지고 있는 Warman사의 방사 형태(Radial)의 임펠러(800TY GSL)를 채택하여 벤치마킹하는 형태로 연구를 진행하였고, 전력발전 회사에서 요구하는 설계기준서를 토대로 초기 임펠러 모델을 설계하였고 임펠러의 재질은 내마모성이 우수한 A49 ALLOY 재질로 제작을 진행하고 3D스캔장치로 얻은 정보를 토대로 3D모델로 작성하여 연구를 수행하였다. 임펠러 형상은 Fig. 1에 나타내었고, 사양은 Table 1에 나타내었다.

3.2 해석모델 형상 생성 및 변수

다양한 임펠러 설계 요소 중 임펠러의 선,후단과 초입 각도는 펌프의 성능과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다^[9]. 본 연구에서는 3가지(선, 후단 각도, 입구 초입각도)를 변경하여 해석을 진행하였다.

Table 1 Main design parameters of the slurry pump impeller

Parameters	Unit	Values
Rotating speed	rev/min	450
Design flow rate	m ³ /hr	10,500
Head	m	24.2
Impeller diameter	m	1,045
Specific speed		3,753
NPSHr (m.H2O)	m	9

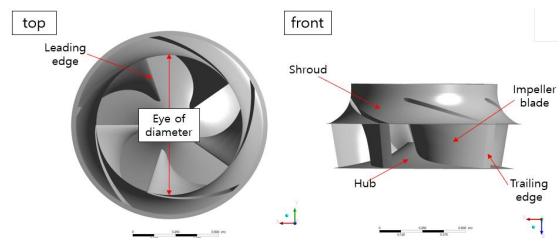


Fig. 1 3D model of centrifugal pump

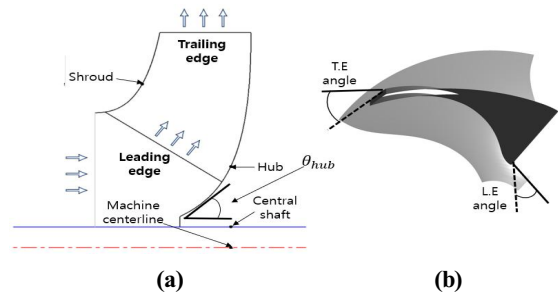


Fig. 2 Schematic of impeller(a) and definition of L.E and T.E angle(b)

Fig. 2(a)는 설계인자(입구 초입각도, Inlet draft angle)의 명칭과 위치를 나타낸 것이고, Fig. 2(b)는 임펠러에서 선단(Leading edge, L.E)과 후단(Trailing edge, T.E)의 위치를 나타낸 것이다. 초기 조건은 벤치마킹하여 제작한 시제품을 기준으로 정하여 연구를 수행하였다. 시제품에서 추출한 데이터를 통해 작성된 3D 모델을 레이저화 하여 형상 조건에 따라 변경할 수 있게 수행하였다. 형상 조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Geometry conditions

Condition	Initial	Range	Interval
L.E angle	16 °	12-20 °	2 °
T.E angle	22.5 °	20.5-24.5 °	1 °
Inlet draft angle	40 °	30-40 °	1 °

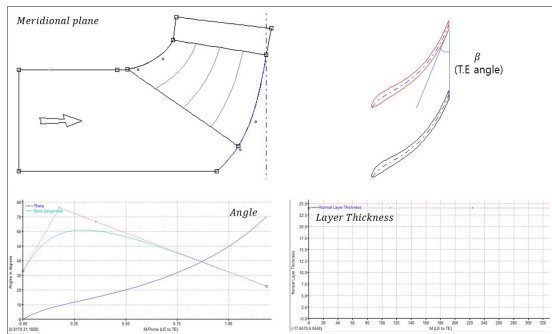


Fig. 3 Example of impeller geometry design

임펠러의 형상 설계는 ANSYS 설계 도구 중 하나인 BladeGen을 활용하여 벤치마킹한 제품의 레이어 정보를 입력하여 모델링하였다. Fig. 3은 BladeGen에서 수정할 수 있는 정보의 예시를 나타내는 것이다. 레이어 정보를 입력하여 자오선 면, 블레이드 전단에서 후단까지의 각도 정보, 블레이드의 두께, 블레이드 간의 각도 정보 등등을 설정할 수 있으며 본 논문에서는 하나의 변수를 조절할 경우, 다른 변수는 고정된 상태로 임펠러의 형상을 변경하여 연산을 진행하였다. 또한 임펠러 생성시 블레이드 개수에 따라 영역을 자동으로 배분하여 영역을 생성하는 기능이 있기 때문에 블레이드 1개 당 72°에 해당하는 영역을 생성하게 된다.

3.3 해석 조건

본 연구에서는 상용 프로그램인 ANSYS 2019 R2에 속해 있는 TurboGrid와 Ansys Meshing, BladeGen, CFX를 이용하여 연구를 수행하였다. 펌프의 주요 부품 중 하나인 임펠러와 볼류트 케이싱에서 발생하는 침식 경향도 함께 확인하기 위해 벤치마킹한 모델과 동일한 스펙의 볼류트 케이싱

을 포함하여 해석을 수행하였다. Fig. 4은 임펠러와 볼류트 케이싱의 위치를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 임펠러에서의 경계조건을 나타낸 것이며, Fig. 4(b)는 볼류트 케이싱의 경계조건을 나타낸 것이다. 임펠러의 형상은 반복적인 형태를 가지고 있어서 1개의 블레이드를 72° 간격으로 경계조건을 설정하였고, 실제 연산은 5개의 블레이드에서 이뤄진다. 또한 임펠러만 이용하여 연산을 수행하지 않고 케이싱까지 결합하여 연산을 진행하였다. 그리고 앞서 언급한 설계 변수를 제외하고 나머지 조건은 동일하게 연산을 수행하였다. 슬러리 입자의 농도는 화력발전소에서 요구하는 사양서를 기준으로 농도를 고정하여 해석을 수행하였다. 또한 부력과 침식에 관련된 계수들은 참고문헌을 참조하여 선정하여 진행하였고^[5], 밀도 조건은 사양서를 토대로 선정하였다. 사양서와 벤치마킹한 제품의 실제 테스트 조건과 동일하고, 해석 조건은 Table 3에 나타내었다.

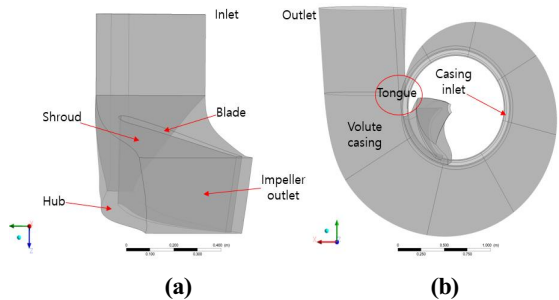


Fig. 4 Boundary conditions at Impeller(a) and Volute casing(b)

Table 3 Parameter for numerical analysis

Parameter	Symbol	Unit	Values
concentration of fluid	α_f	%	85
concentration of solids	α_s	%	15
Density of fluid (water)	ρ_f	kg/m ³	1,130
Density of solid (slurry)	ρ_s	kg/m ³	2,710
Lift coefficient	C_L		0.5
Finnie erosion model constant	k		1.2

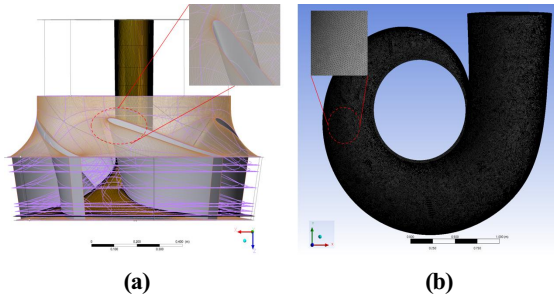


Fig. 5 Grid Generated Model, (a)impeller (b)volute casing

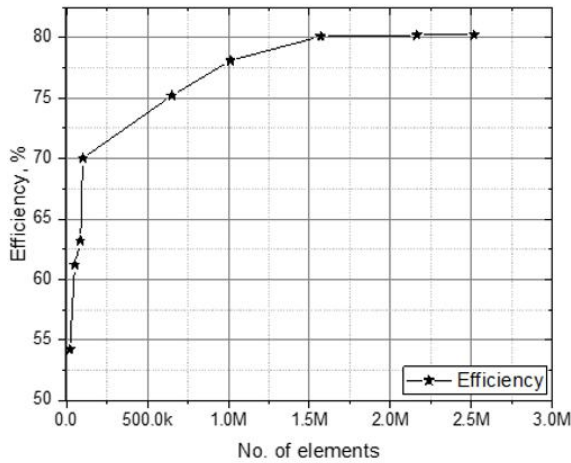


Fig. 6 Grid independence review result @Impeller

3.4 격자 생성 및 영향성 검토

임펠러의 격자 생성은 Turbogrid를 사용하여 생성하였고 볼류트 케이싱은 Ansys Meshing을 사용하여 격자를 생성하였다. Fig. 5는 격자 생성 도구를 이용하여 생성한 결과를 보여주는 그림이다. Fig. 5(a)는 임펠러의 전체적인 격자와 블레이드에서의 격자 품질을 보여주는 그림이다. 해석을 위한 솔버로 SST 난류 모델을 선정하였기 때문에 Re 수를 계산하여 y^+ 값을 구하고 반영하여 격자를 생성하였다. Fig. 5(b)는 볼류트 케이싱의 전체적인 생성 결과를 보여주는 그림이며 격자 수는 약 230만 개 정도 생성되었다. Fig. 6은 임펠러의 격자 수에 따른 영향성을 검토한 결과이다. 임펠러와 케이싱이 결합한 상태(초기 형상)에서 해석

을 수행하였고, 사양서에 명시된 펌프 효율의 하한선(78% 이상)보다 높게 결과가 나오기 시작하는 알맞은 격자 수를 찾기 위해 연산을 진행하여 확인하였다. 그리고 연산에 사용된 조건은 Table 1과 동일하며, 작동 조건과 변수들은 형상 변수를 제외하고 전부 동일하게 연산을 수행하였다. 여기서 효율은 축동력과 수동력의 백분율을 의미한다. 초기 형상을 사용하여 안정적으로 일정한 효율이 나오기 시작한 격자수는 약 150만개 이상임을 알 수 있었고 반영하여 연구를 수행하였다.

4. 해석 결과

4.1 해석 모델 검증

Fig. 7은 순수한 물을 이용하여 성능 시험을 실시한 결과와 CFD 해석 결과를 비교하여 나타낸 그래프이다. 슬러리 펌프 성능시험 조건은 벤치마킹한 제품을 이용하여 실제 시험하기에 어려움이 있기 때문에 벤치마킹한 제품의 성능 평가자료와 비교를 진행하였다. 저속에서는 오차율이 2~3.5% 차이를 보였으며, 고속으로 갈수록 오차율이 커지는 것을 확인하였다. 최고 부하점인 450 rpm에서는 약 6.3%의 오차를 확인하였다. 실제 테스트와 큰 차이를 보이지 않기 때문에 본 연구에서 진행하고 있는 해석 모델이 현장과 유사하게 구성되었음을 확인하였다. 실제 시험 환경과 전산 유체 해석 결과의 오차는 경계 조건에 따라 변화폭이 크다. 일반적으로 5% 내외의 오차가 적당하다고 알려져 있다. 본 해석 결과의 오차가 다소 크지만 경향성을 파악하는 것이 목적이기 때문에 오차를 감안하고 연구를 수행하였다. 슬러리 이송용 원심 펌프를 사용하는 환경은 상시 최고 부하(450 rpm)로 작동하는 화력발전소이며, 다른 펌프 회전 속도의 이용 비중은 매우 낮기 때문에 슬러리가 포함된 연산을 수행했을 때에는 펌프의 회전 속도를 450 rpm으로 고정하여 연산을 수행하였다.

4.2 일반적 침식 경향

형상을 변경하여 해석한 결과를 토대로 침식이 발생한 위치를 비교해보니 비슷한 경향을 보였다.

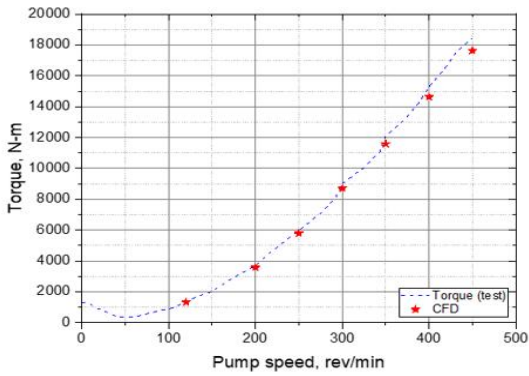
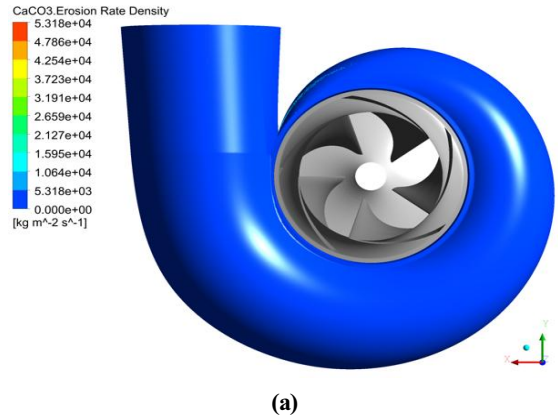
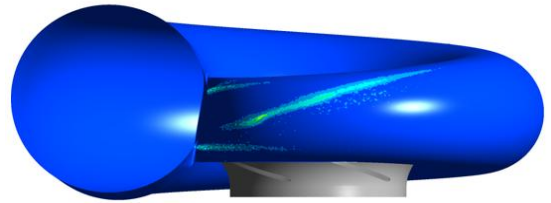


Fig. 7 Comparison of experiments and CFD results

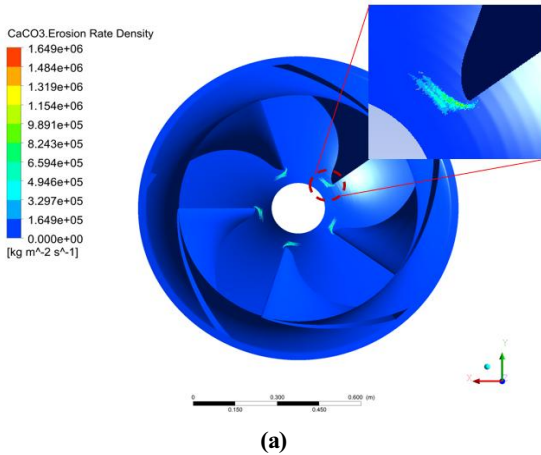


(a)

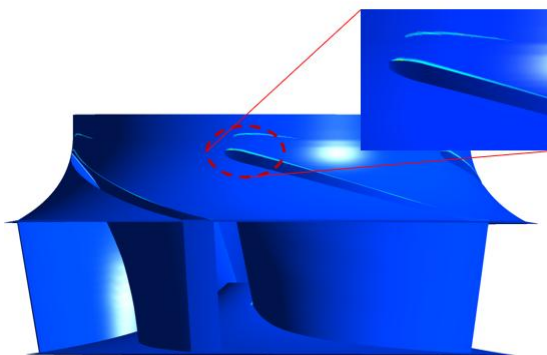


(b)

Fig. 9 Location of erosion on Volute casing, front view(a) and side view(b)



(a)



(b)

Fig. 8 Location of erosion on Impeller, front view(a) and side view(b)

Fig. 8은 임펠러에서 침식이 발생한 부분을 나타낸 그림이다. 임펠러에서 침식이 나타난 부분은 허브와 블레이드 선단 밑부분이 만나는 영역에서 침식이 관찰되었다. 또한 슈라우드 드와 블레이드 선단이 만나는 접점 부분에서 침식이 관찰이 되었고 슈라우드 자체에서도 침식이 발생하였다.

Fig. 9는 볼류트 케이싱에서 침식이 발생한 부분을 나타낸 그림이다. Fig. 4에 나타낸 케이싱 설부 부분에서 침식이 일어나기 시작하는 경향을 보였다. Fig. 8과 Fig. 9의 침식율의 크기를 비교했을 때, 임펠러에서 발생하는 침식의 정도가 많이 차이난다. 이는 케이싱보다 임펠러에서 침식에 의한 고장 및 마모가 더 자주 발생한다는 의미이다. 따라서 침식의 영향을 줄이기 위한 설계를 진행할 경우에는 케이싱에 대한 고려보다 임펠러에 대한 설계에 초점을 두어야 한다. Fig. 10은 임펠러 블레이드 입구와 출구 영역에서 입자의 압력분포를 표현한 그림이다. 입/출구 영역을 면으로 생각하면 입자의 질량과 유속은 해당 면에 대한 힘으로

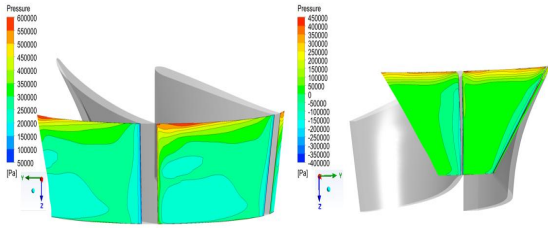


Fig. 10 Distribution of particle pressure at the impeller inlet and outlet area.

볼 수 있다. 따라서 입자의 압력이 높다는 의미는 해당 영역에서 다른 영역에 비해 입자의 유속이 빠르고 유속에 의해 시간당 충돌 빈도가 많기 때문에 상대적으로 높은 압력이 걸리게 되며, 침식에도 영향을 끼친다.

4.3 변수에 따른 성능 변화 및 침식 경향

본 연구에서 선정된 시제품의 성능 개선 여부를 파악하기 위해 3.2절에서 서술한 3가지 형상 변수를 변경하여 연산을 수행하였고 소요 동력과 효율을 비교하여 Fig. 11~13에 나타내었다. 여기서 검은색 심볼은 소요 동력을 의미하고, 파란색은 효율, 빨간색은 최대 침식률을 의미한다. 소요 동력은 연산으로 계산된 축 토크와 각속도를 이용해 축 동력을 구한 후 여유율(α , API610)을 0.1로 산정하여 계산하였고 식은 다음과 같다.

$$Input\ power = T_{shaft} \times \omega \times \alpha \quad (6)$$

효율은 수동력과 축동력을 구하여 계산하였다. 소요 동력과 효율을 구하는 식은 다음과 같다.

$$Efficiency = abs\left(\frac{Hydropower}{Shaft\ power}\right) \times 100 \quad (7)$$

블레이드 선단의 각도를 변경한 경우에는 초기 설계값에서 제일 좋은 효율과 낮은 소요 동력을 보여주었고 블레이드 후단의 각도를 변경한 경우에는 각도를 증가시킬수록 소요 동력과 효율이 좋아지는 경향을 보여주었지만 일정 각도(23.5°) 이후에는 소요 동력과 효율이 떨어지는 경향을 보인다. 또한 허브 초입 각도를 변경한 조건에서는 각도가

증가할수록 소요 동력과 효율이 좋아지는 결과를 얻었다.

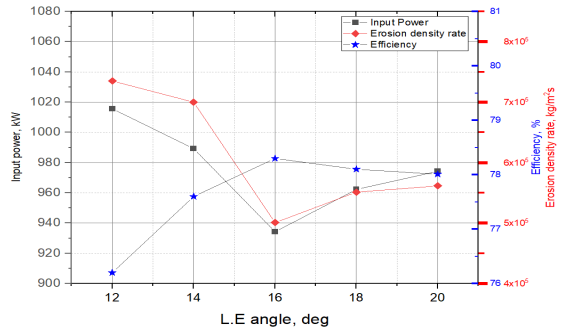


Fig. 11 Input power, efficiency, maximum erosion density rate according to shape changes @L.E angle

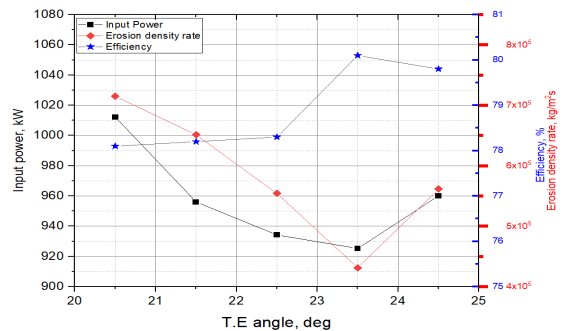


Fig. 12 Input power, efficiency, maximum erosion density rate according to shape changes @T.E angle

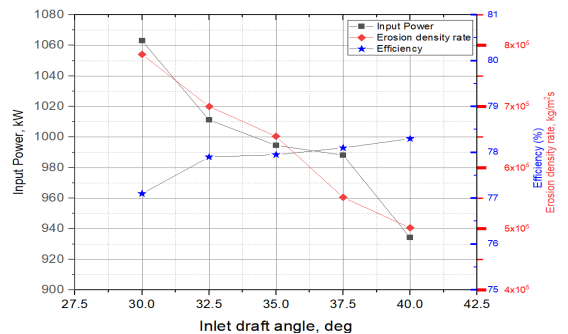


Fig. 13 Input power, efficiency, maximum erosion density rate according to shape changes @Inlet draft angle angle

이 부분은 각도를 증가시켜 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다. 본 연구에서 채택하고 있는 설계 사양서에 의해 허브 초입 각도를 40°로 제한하여 연산을 수행 하였다. 소요 동력의 증가/감소에 따라 침식률의 최대값도 비슷한 경향으로 나타나는 것을 알 수 있다. 형상에 따라 소요 동력, 최대 침식률, 효율의 결과를 비교했을 때, 소요 동력과 침식률이 낮게 계산한 경우에서 효율이 좋게 나오는 경향을 보여주고 있다. 그리고 소요 동력과 침식의 경향성이 유사하게 나오는 이유는 형상이 변경됨에 따라 입자가 임펠러와 닿는 면적의 변화에 의한 영향으로 추정할 수 있다. 이는 임펠러 형상 변수 조합에 의한 영향에 대해 규명하기 위해 실험계획법(D.O.E)으로 구성하여 연구를 수행할 필요성이 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 화력 발전소에서 사용되고 있는 대형 원심 슬러리 펌프의 임펠러를 해외 제품 중 하나를 선정하여 연구를 수행하였고, 상용 해석 프로그램(ANSYS CFX 2019 R2)를 활용하여 주요 설계 인자 중 3가지를 선정하여 성능 개선 여지 파악과 침식 경향을 확인하기 위해 해석 및 연구를 진행하였다.

1. 임펠러의 직경을 고정하고 3가지의 형상 변수를 변경하여 성능변화 및 침식경향을 확인하였다.
2. 허브 영역과 블레이드 밑단에서 많은 침식이 발생함으로 해당영역에 대한 보완 설계가 요구 되고, 케이싱 설부에서도 침식이 빈번하게 발생 하기 때문에 보완설계가 필요하다.
3. 침식에 의한 마모 설계를 할 경우, 케이싱 보다 임펠러에서 침식에 대한 영향이 크기 때문에 임펠러 설계에 내마모 설계 비중을 높여야 한다.
4. 펌프에서 손상 원인은 다양하기 때문에 침식율은 물리적인 지표로 활용하기 보다는 경향성에 대한 지표로 사용해야 한다.

본 연구에서는 상용 CFD 해석 프로그램을 사용하여 침식 경향과 성능 변화만을 관찰하였고, 조금 더 명확한 현상 구명을 하기 위해서는 석회 슬

러리의 부식, 고체 입자 농도 변화, 입자 충돌 속도 등등 다양한 조건을 고려하고 시험을 통해 결과 비교가 필요하다.

REFERENCES

1. Wilson, K. C., Addie, G. R., Sellgren, A., Clift, R., "Slurry Transport Using Centrifugal Pumps," Gardners Books; Elsevier Applied Science: London, UK, 1992.
2. Tarodiya, R., Gandhi, B. K., "Hydraulic performance and erosive wear of centrifugal pumps," Powder Technology, Vol. 305, pp. 27-38, 2017.
3. Shojaeefard, M. H., Tahani, M., Ehghaghi, M. B., Fallahian, M. A., & Beglari, M., "Numerical study of the effects of some geometric characteristics of a centrifugal pump impeller that pumps a viscous fluid," Comput. Fluids 60, pp. 61-70, 2012.
4. Kim, J. H., Oh, K. T., Pyun, K. B., Kim, C. K., Choi, Y. S., Yoon, J. Y., "Design optimization of a centrifugal pump impeller and volute using computational fluid dynamics," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 15, 2012.
5. Pagalthivarthi, K. V., Furlan, J. M., Visintainer, R. J., "Comparison of 2D and 3D predictions of erosion wear in centrifugal slurry pump casings," American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division FEDSM, 2013.
6. Abid, M., Noon, A. A., "Turbulent flow simulations through Tarbela Dam Tunnel," Journal of Engineering, Vol. 2, pp. 507-515. 2010.
7. Gohil, P. P., Saini, R. P., "Effect of temperature, suction head and flow velocity on cavitation in a Francis turbine of small hydro power plant", Energy, 93, pp. 613-624, 2015.
8. Finnie, I., "Some observations on the erosion of ductile metals", Wear, Vol. 19, pp. 36-44, 1972.
9. Kim, S., Choi, Y. S., Yoon, J. Y. and Kim, D. S., "Design Optimization of Centrifugal Pump Impeller Using DOE," Journal of Fluid Machinery, Vol. 11, No. 3, pp. 36-42, 2008.