

## 침수선박 구조를 위한 대용량 배수펌프 개발

김경수<sup>1</sup> · 정광현<sup>2</sup> · 김해영<sup>3</sup> · 김남훈<sup>4</sup> · 조제형<sup>†</sup>

(Received December 11, 2014 ; Revised February 13, 2015 ; Accepted March 3, 2015)

### Development of Drainage Pump for Rescue Sinking Ship

Kyeong-Soo Kim<sup>1</sup> · Kang-Hyun Jung<sup>2</sup> · Hae-Young Kim<sup>3</sup> · Nam-Hun Kim<sup>4</sup> · Je-Hyoung Cho<sup>†</sup>

**요약:** 국내에는 아직 침수선박 구조용 대용량 배수펌프에 대한 기술개발 사례가 없는 상황이다. 현재 침수선박 구조를 위해 농업용 배수펌프가 사용되고 있으나 실효성이 현저히 떨어지며, 낮은 배수량, 이물질 걸림 현상, 겨울철 운전 오작동 등의 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 해양에서 신속한 침수선박의 구조를 위해 현재 장비가 가지는 문제점을 개선하여 분당 20 톤의 배수량을 가지는 대용량 배수펌프 시스템을 개발하고자 한다. 대용량 배수펌프 시스템은 펌프 배출구를 통해 배출되는 흡입양정 8 m에서 분당 20 톤의 해수를 배출하는 것을 목표로 배수펌프 시스템 설계 및 개발을 수행하였다. 펌프종류는 조선해양 분야에서 액체를 이송하는데 가장 많이 사용되는 원심펌프를 채택하였으며, 요구 시방을 기초로 펌프를 설계하였다. 임펠러 블레이드는 요구 시방과 Stepanoff 설계 상수를 이용하여 임펠러 제원과 블레이드 입출구각을 도출하였고, 설계된 임펠러와 하우징 형상에서 목표 유량 만족 여부를 확인하기 위해 유동해석을 수행하여, 임펠러 회전수에 따른 유량을 검토하였다. 또한 실제 운전 중에 발생할 수 있는 제품에 대한 구조적인 취약성을 판단하기 위해 임펠러 구조해석을 수행하여 안전성을 검토하여, 침수선박 구조를 위한 배수펌프 시스템 개발을 완료하였다.

**주제어:** 침수선박, 구조, 원심펌프, 임펠러, 하우징

**Abstract:** There has been no previous study on technology development of large capacity drainage pump for rescue sinking ship in the country. The agricultural drainage pump was widely used for rescue sinking ship but this pump has several problems such as efficiency, low displacement and malfunction in winter. Therefore, this paper proposes to solve the problems for swiftly rescue sinking ship and develops the drainage pump system that has 20 m<sup>3</sup>/min mass flow rate specification at suction head 8 m. The centrifugal pump type the most commonly used in the field of naval architecture and ocean engineering was selected and designed based on the requirement specification. The blade design of impeller was derived from the Stepanoff coefficient and requirement specification and used computational fluid dynamics to review the target mass flow rate according to the impeller RPM at design operating conditions. We also performed structure analysis of the impeller to find structurally vulnerable points for the pump in service and completed the theoretical design of drainage pump system.

**Keywords:** Sinking ship, Rescue, Centrifugal pump, Impeller, Housing

## 1. 서론

최근 전 해역에서 침수 및 화재 선박은 연평균 300척 이상 발생되고 있으며, 이 중 침수 사고는 연평균 200척이상인 것으로 조사되었다. 또한, 최근 해양 콘텐츠 급부상에 따라 해난사고가 급증하여 인명 및 선체구조를 위한 다양한 해결방안과 대책이 요구되는 상황이다. 그러나 침수선박 발생 시 신속한 선체구조가 가능한 장비의 부재로 인명

구조율에 비해 선체 구조율이 저조하여 대용량 배수장비 개발에 대한 필요성이 더욱 대두될 것으로 예측된다.

국내에는 아직 침수선박 구조용 대용량 배수펌프에 대한 기술개발 사례가 거의 없는 상황이며, 침수선박 구조를 위해 농업용 배수펌프가 사용되고 있으나 실효성이 현저히 떨어진다. 현재 장비는 낮은 배수량, 이물질 걸림 현상, 겨울철 운전 오작동 등의 문제가 있으며, 특히 악천후나 파공부위가

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1681-6357>): Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, 38-6, Noksansandan 232, Kangseo-gu, Busan, 618-270, Korea, E-mail: [jhcho@rims.re.kr](mailto:jhcho@rims.re.kr), Tel: 051-974-5526

<sup>1</sup> Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, E-mail: [kskim@rims.re.kr](mailto:kskim@rims.re.kr), Tel: 051-974-5588

<sup>2</sup> WOOSONG HYDRO, E-mail: [ckangzin@naver.com](mailto:ckangzin@naver.com), Tel: 055-648-1138

<sup>3</sup> KOREA COAST GUARD, E-mail: [mirr05@hanmail.net](mailto:mirr05@hanmail.net), Tel: 055-647-2563

<sup>4</sup> Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, E-mail: [nhkim@rims.re.kr](mailto:nhkim@rims.re.kr), Tel: 051-974-5520

큰 대형 침수사고의 경우 현실적인 구조 활동의 활용성에 문제가 있어 장비개발이 내외부적으로 시급한 상황이다.

대용량 배수펌프 시스템은 펌프 배출구를 통해 배출되는 유량, 흡입 및 토출 양정이 주요 개발 목표이며, 조선해양 분야에서 액체를 이송하는데 가장 많이 사용되는 원심펌프 타입으로 선정하여 개발을 진행 하였다. 또한 펌프 유형과 형상에서 유사성을 가지는 기존의 펌프 임펠러 및 하우징 설계와 유동해석, 구조해석 기법을 이용하여 수행된 연구 결과[1]-[8]를 응용하여, 제품사양에서 요구하는 시방을 기초로 펌프를 설계 하였다.

## 2. 개요

### 2.1 대용량 배수펌프 시스템의 개요

대용량 배수펌프 시스템은 진공펌프가 작동하여 흡입실 내부를 저압으로 만들어 흡입구를 통해 해수가 빨려 들어와 내부를 채우게 되고, 이 때 흡입실과 배출실 사이에 설치된 임펠러가 회전하면서 흡입실 해수를 배출실로 이송하여 고압으로 많은 유량을 배출구를 통해 배출되는 배수펌프 시스템을 말한다.

이러한 대용량 배수펌프는 침수선박 발생 시 선저 안의 이물질 등에 장애를 받지 않고, 신속하게 선박 내의 해수를 배출하고 복원성을 확보하여 인명과 선박을 동시에 구조하는 수난구조장비로 활용 가능하며, 선박 침몰에 의한 재산 피해를 최소화 할 수 있다.

기존 침수선박을 위한 배수장비는 농업용 원심펌프를 이용하여 분당 600 ℓ의 해수 배출이 가능하며, 침수량이 많을 경우 배수량이 침수량 보다 적어 실효성이 현저히 떨어지는 단점을 가진다. 또한 선저 안의 이물질에 의해 장비고장률이 높고, 겨울철 시동스위치 고장이 잦아 실질적인 선체구조시스템이 제대로 이뤄지고 있지 않은 실정이다. 그리고 선체구조 실패 시 초기 인명구조가 불가하여 대형 인명사고로 이어질 가능성이 높고, 침몰 선박의 의무 수색과 선체 인양에 많은 인력과 예산이 소요되고 있다. 이에 본 연구를 통해 현재 배수장비가 가지고 있는 문제점을 개선하고, 해양경찰의 인력과 예산을 효과적으로 절감할 수 있는 침수선박 구조용 대용량 배수펌프 시스템을 개발하고자 한다.

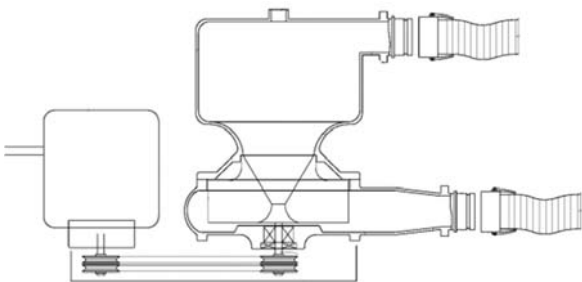


Figure 1: Schematic diagram of drainage pump system



Figure 2: Existing drainage pump of Korea coast guard

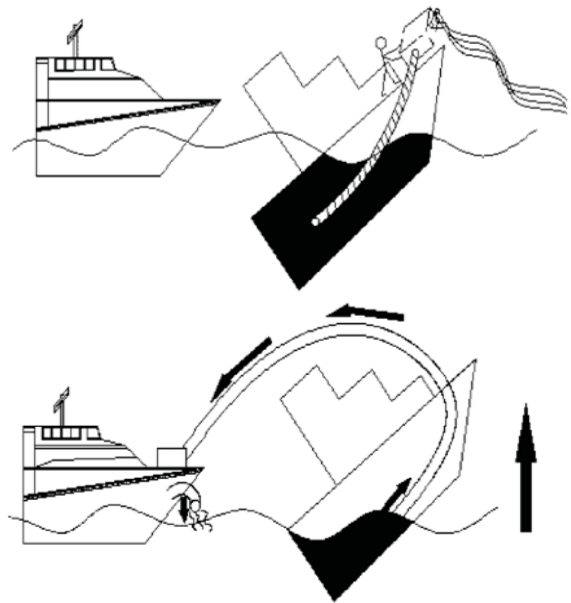


Figure 3: Diagram for rescue sinking ship using under development of large drainage pump system

## 3. 개발 내용

### 3.1 임펠러 설계

배수펌프 임펠러의 블레이드 설계를 위해 임펠러 입구, 출구, 폭, 보스 직경을 고정 설계 변수로 지정한 후 요구 시방과 Stepanoff 설계상수[9]를 이용하여 블레이드 제원과 입출구각을 도출하였다. 임펠러 설계를 위해 고려된 요구 시방은 Table 1과 같으며, 요구조건은 회전수 1000 rpm에서 흡입양정 8 m를 만족하면서 분당 20톤의 해수를 배출하는 것이나 양정은 흡입양정과 토출양정을 모두 고려하여 20 m로 설정하고 임펠러 설계를 진행하였다. 그리고 설계에 사용한 Stepanoff 설계상수는 Figure 4에 나타내었다.

Table 1: Requirement design specifications

Requirement	
H (head)	20 m
Q (mass flow rate)	20 m <sup>3</sup> /min
N (rotation speed)	1000 rpm

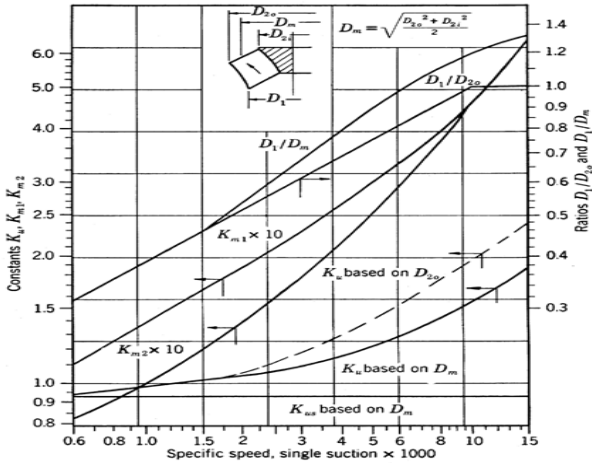


Figure 4: Stepanoff's empirical coefficients

### 3.2 배수펌프 유동해석

#### 3.2.1 유동해석 방법

앞 절에서 설계된 배수펌프 임펠러의 목표유량 만족 여부를 검토하기 위해 유동해석을 수행하였다. 해석 수행을 위해 설계형상을 3D 모델링 하였으며, 3D 모델을 해석모델로 수정하고 격자 생성 후 요구조건을 경계조건으로 하여 배수펌프의 유량을 검토하였다.

해석모델의 형상은 Figure 5에 나타내었으며, 해석모델의 크기 W x D x H는 각각 0.9m x 0.67 m x 0.45 m 이다. 해석모델은 임펠러를 포함한 회전영역과 회전하지 않는 하우징을 포함한 비 회전영역으로 분리하여 형상을 만들었다.

유동해석에 적용된 해석모델의 격자는 Figure 6에 나타내었다. 상용 CFD S/W인 STAR CCM+에서 제공하는 다면체 비정렬 격자를 사용하여 격자를 생성하였으며, 배수펌프 내부에 생성된 격자는 총 90만개이다. 유동의 변화가 클 것으로 예상되는 임펠러 주위에 격자를 조밀하게 생성하여, 유동정보의 변화를 잘 추종하고 해석 결과의 정확성을 향상시키고자 하였다.

배수펌프 내부유동은 정상상태, 비압축성 유동으로 가정하고 중력조건을 고려하였다. 펌프와 같은 회전체 해석 시 회전조건을 부여하는 방법은 회전영역의 격자를 회전수에 맞게 회전시키거나, 회전영역에 회전조건을 부여하는 방법이 있으며, 본 연구의 해석모델은 시간에 따라 동일한 속도로 회전하기 때문에 회전영역에 회전조건을 부여하는 방법을 적용하였다. 펌프와 같은 회전체 해석에 많이 사용되고 있는 RANS (Reynolds - Averaged Navier - Stokes) 기반의 STAR CCM+ v8.04에 RST (Reynolds Stress Transport) 난류모델을 적용하였으며, 해석에 적용된 경계조건은 Figure 8과 같다. 배수펌프의 상부로 해수가 유입되어 하부 출구로 배출되고, 하우징 및 임펠러에는 벽면 조건을 부여하였으며, 회전영역과 비 회전영역의 경계는 인터페이스로 처리하여 유동정보가 전달되도록 설정하였다.

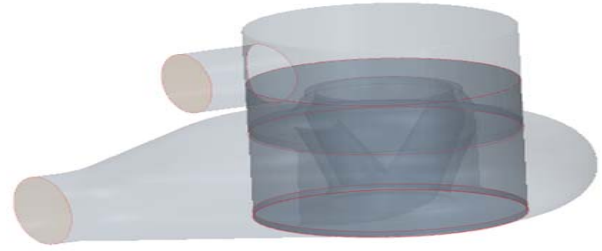


Figure 5: Geometry of numerical analysis model

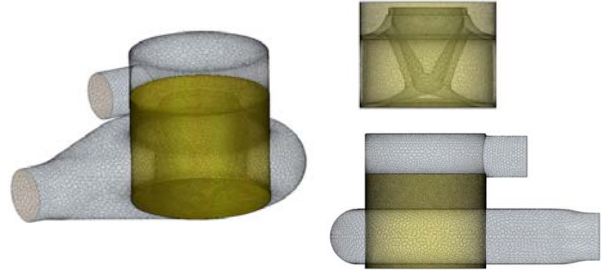


Figure 6: Unstructured mesh of computational domain

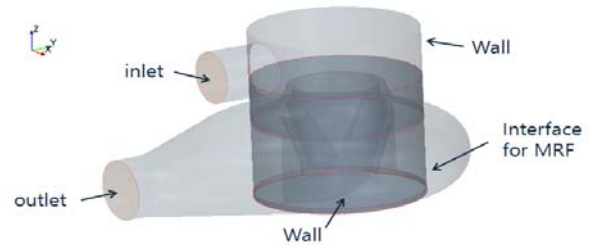


Figure 8: Boundary condition of computational domain

#### 3.2.2 속도분포 결과 및 분석

배수펌프 내부의 유동 분석에 앞서 임펠러의 주속도를 이론값과 수치해석 값을 비교하였다. 임펠러의 직경에 따른 주속도를 구하는 식은 아래 Equation (1)과 같다.

$$D_2 = \frac{60u_2}{\pi N}, \quad (1)$$

$$u_2 = \frac{\pi D_2 N}{60}$$

위의 이론식을 이용하여 계산된 주속도는 30.58 m/s이며, 해석에서 계산된 임펠러 주속도는 Figure 9와 같고 31.25 m/s이다. 원주방향 길이에 따라 임펠러의 주속도는 거의 유사해야 하나 수치해석에서는 케이싱 와류실의 위치에 따라 압력분포가 다르기 때문에 케이싱 위치에 따라 속도분포가 다소 다르게 나타났다. 국소적으로 약간의 차이를 보였으나, 전반적인 속도분포는 이론속도와 유사하게 나타났으며 이와 같은 결과를 바탕으로 내부 유동의 성능을 분석하고자 한다.

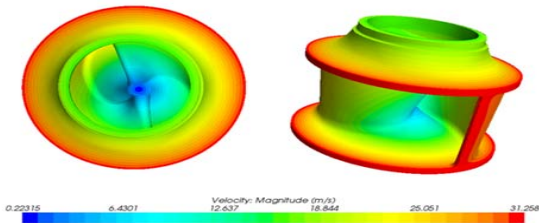


Figure 9: Velocity magnitude contour of impeller

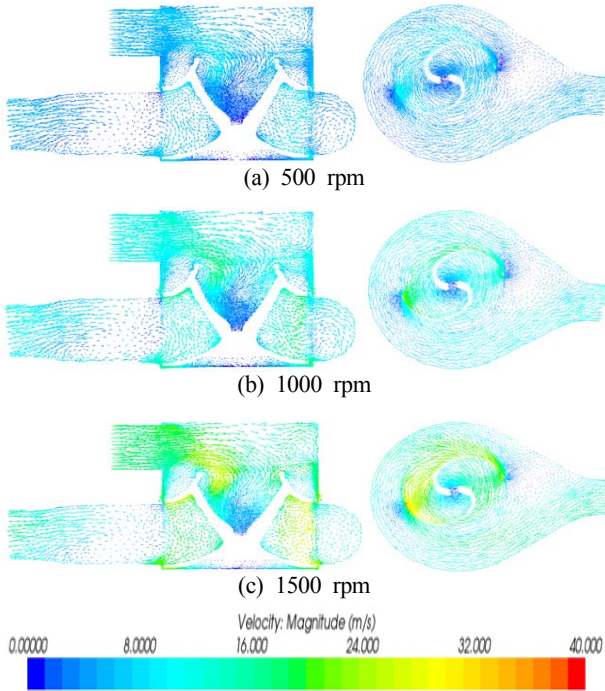


Figure 10: Vector contour of drainage pump

Figure 10은 배수펌프 중심단면에서의 속도크기 분포를 나타낸 것이다. 회전수가 증가할수록 임펠러 출구에서의 속도가 증가함을 확인할 수 있으며, 임펠러 단면에서 속도분포를 보면 블레이드 사이에 속도변화는 적은 것이 일반적이거나 본 연구에 적용된 임펠러의 경우 블레이드 개수가 적어 간격이 길기 때문에 블레이드 사이의 속도차가 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 해수에 장애물이 포함되어 유입되어도 임펠러를 통해 해수를 원활히 배출하기 위함이며, 반대로 블레이드 개수가 많을 경우 이물질이 유입 되면 블레이드 사이의 간격이 짧아 임펠러가 손상되거나 비정상적인 유량 감소 등의 문제점을 야기될 수도 있다.

그리고 하우징의 형상도 일반적인 원심펌프의 하우징과는 달리 임펠러와 임의의 간격을 두고 대칭적인 형상을 가지고 있다. 원심펌프에 많이 사용되는 벌류트 형상은 펌프와 케이싱 사이의 와류를 고려하여, 임펠러와 케이싱의 간격이 배출구로 갈수록 점점 커지는 회오리 형상을 가지나, 케이싱 형상 또한 해수에서 유입될 수 있는 장애물을 고려하여 일반적

인 원심펌프 보다 간격을 크게 설계하였으며, 이와 같은 설계는 침수선박 구조 용도에 적합한 것으로 사료된다.

Figure 11은 토출구로 배출되는 배수펌프의 질량유량을 나타내고 있다. 회전수가 500 rpm 일 경우 약 181 kg/s로 배출되고 있으며, 회전수가 증가할수록 배출유량이 증가하여 1,500 rpm에서 약 537.5 kg/s의 배출유량을 나타내었다. 분당 20톤의 유량은 kg/s 유량으로 환산 시 약 333 kg/s로, 설계 회전수 1,000 rpm에서 355.5 kg/s의 유량을 나타내어 목표유량을 만족하는 것으로 나타났다. 회전수가 증가하면서 배출유량도 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었으며, 회전수에 대한 효율 특성에 따라 유량 증가 비율은 감소할 것으로 판단된다.

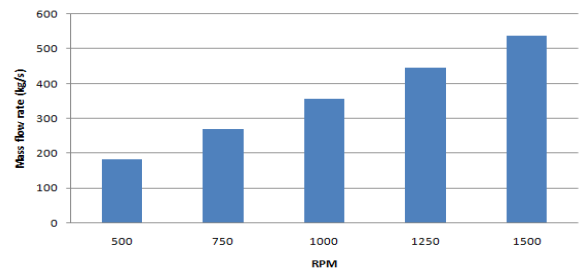


Figure 11: Mass flow rate for drainage pump

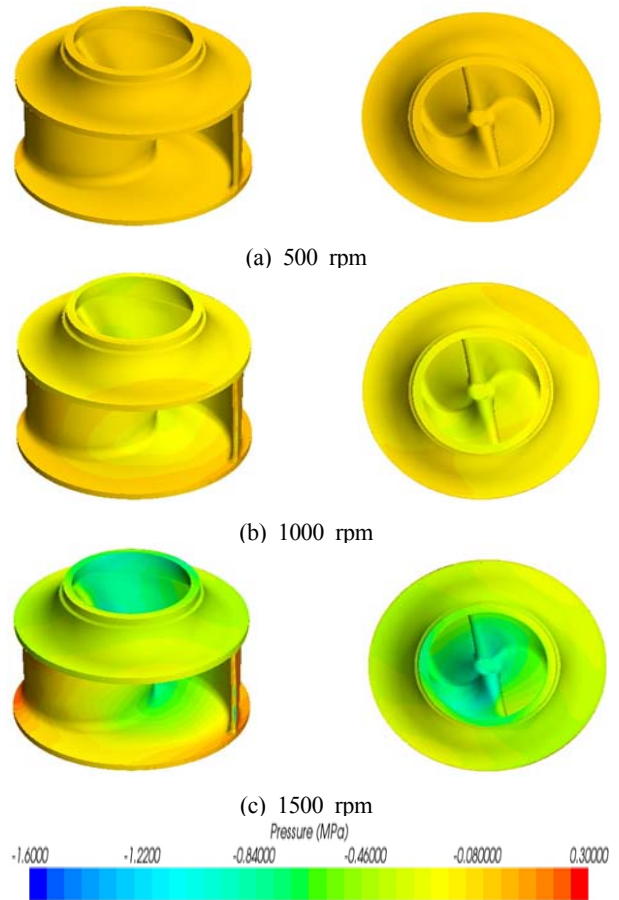


Figure 12: Pressure contour of impeller

회전수 증가에 따라 임펠러 표면에 받는 압력분포는 Figure 12에 나타내었다. 임펠러의 회전수가 증가할수록 유체가 받는 원심력이 증가하기 때문에 임펠러 표면에서의 압력분포가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 원심력을 가장 많이 받는 임펠러 출구부에서 압력분포가 가장 높은 것을 알 수 있다. 따라서 실제 임펠러에 작용하는 원심력에 대한 응력분포 또한 이 부분에서 가장 크게 발생할 것으로 판단되며, 임펠러 변형량도 가장 크게 나타날 것으로 예상된다.

3.2.3 압력분포 결과 및 분석

Figure 13은 배수펌프 중심 단면의 전압분포를 나타낸 것이다. 해석조건에 따라 출구는 대기압 조건으로 설정되므로 정압은 대기압에 가깝게 된다. 임펠러에서 압력이 상승하였다가 출구로 나가면서 압력이 변화하는데, 압력에너지는 줄어들고 속도에너지가 증가되어 속도압인 동압이 증가하게 된다. 따라서 출구쪽으로 갈수록 압력변화가 발생하고, 관로마찰과 대기압 작용에 의한 압력회복 등의 요인이 포함되어 내부 유체가 배출되므로, 배수펌프의 케이싱 설계도 중요 요소임을 확인 할 수 있었다. 회전수 변화에 따라 계산된 입출구부의 압력차와 최대 압력값은 Table 2에 나타내었다.

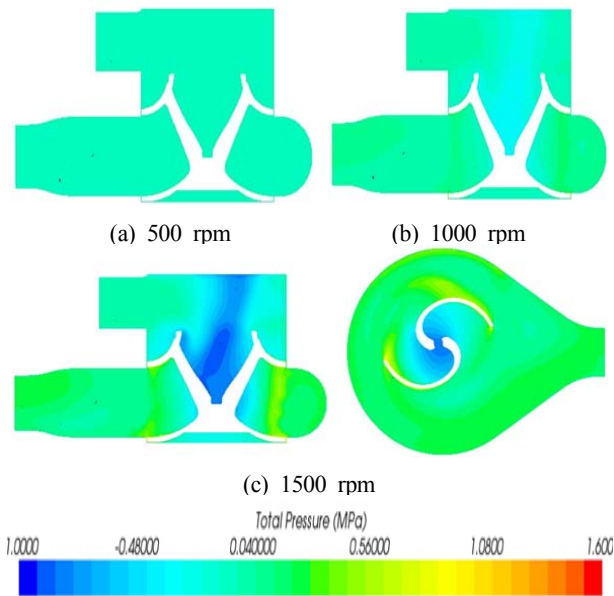


Figure 13: Total pressure contour of drainage pump

Table 2: Pressure difference & maximum pressure of pump

	$\Delta P_{out-in}$	$P_{T \max}$
500 rpm	17 KPa	0.62 MPa
1000 rpm	71 KPa	1.6 MPa
1500 rpm	143 KPa	3.5 MPa

3.3 배수펌프 임펠러 구조해석

3.3.1 구조해석 방법

배수펌프의 임펠러는 1,500rpm 이상 고속회전을 하는 회전체이므로 강도적인 측면에서 충분히 안전성을 고려되어야 한다. 실제 설계를 통해 모델을 완성하였다 하더라도 운전 중에 발생할 수 있는 제품에 대한 구조적인 취약성을 판단하고, 정량적 평가항목 만족을 위해 상용 구조해석 S/W인 Patran을 사용하여 임펠러에 대한 구조해석을 수행하였다. 구조해석에 적용된 하중 조건은 유동해석을 통해 구한 임펠러에 작용하는 최대압력 값 1.6 MPa를 적용하였다.

배수펌프 임펠러의 기계적인 물성은 Table 3과 같다. 임펠러는 AC4C의 알루미늄 주물소재를 이용하여 제작되며, 72.4 GPa의 탄성계수와 250 MPa의 허용응력 값을 가진다.

구조해석에 적용된 배수펌프의 격자는 Figure 14와 같으며, 해석에 적용된 경계조건과 구속조건은 Figure 15에 나타내었다. 임펠러는 축을 중심으로 회전만 가능하고, 반경방향과 축방향으로 움직임이 없는 조건을 부여하여 구조해석을 수행하였다.

Table 3: Material property of impeller

Property	Value
Material	Aluminum (AC4C)
Elastic Modulus	72.4 GPa
Yield strength	250 MPa

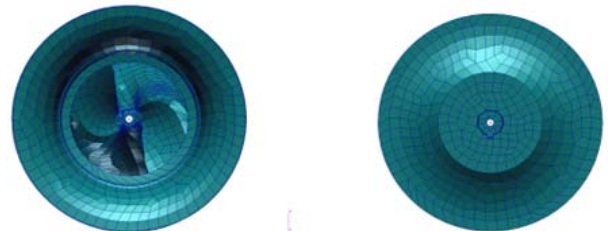


Figure 14: FEM model for drainage pump impeller

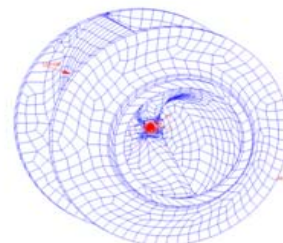


Figure 15: Boundary and constraint condition of impeller

3.3.2 임펠러 구조해석 결과 및 분석

Figure 16은 임펠러 구조해석 결과 등가응력 분포와 변형량을 나타낸 것이다. 등가응력이 최대로 발생하는 지점은

임펠러와 축계가 연결되는 부분으로써 응력 값은 40.2 MPa로써 해석되었으며, 하중이 적용된 임펠러의 날개 부분에서 계산된 응력 값은 8 MPa로써 시제품의 재료특성을 고려한 허용응력이 250 MPa과 비교해 볼 때 구조적으로 매우 안전함을 확인할 수 있었다.

또한, 아래 그림은 임펠러의 하중에 따른 변형량의 분포도를 나타내고 있다. 해석결과 최대 0.03mm의 변형이 계산되었으며, 변형량을 판단한 결과 구조적으로 안전한 것으로 판단 되었다.

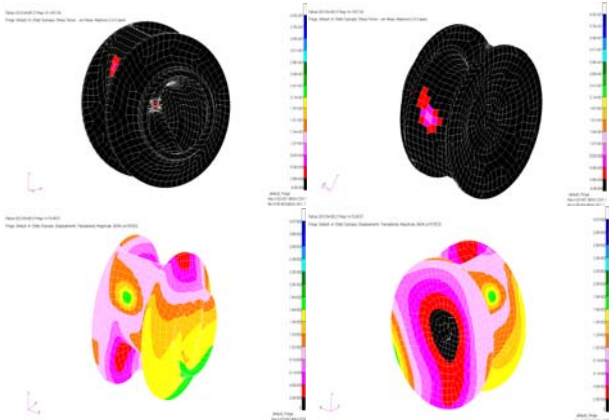


Figure 16: Equivalent stress and deformation for impeller

### 3.4 임펠러 및 하우징 설계

3.1절의 기본설계와 유동해석 및 구조해석을 통해 설계된 임펠러의 형상은 Figure 17과 같으며, 해수 유입 시 장애물이 포함되어 유입될 수도 있으므로 블레이드 사이의 간격과 임펠러의 현절비를 고려하여 선정된 블레이드 개수는 2개이다.

펌프 하우징은 임펠러와 케이싱 사이에 이물질이 걸리지 않도록 적정한 간격을 두어 설계하였으며, 분당 20톤의 배수량을 얻기 위하여 일반적인 펌프에서 사용되고 있는 구경에 따른 유량범위를 참고하여 흡입구경과 토출구경을 결정하였다. 설계된 하우징 형상은 Figure 18에 나타내었다.

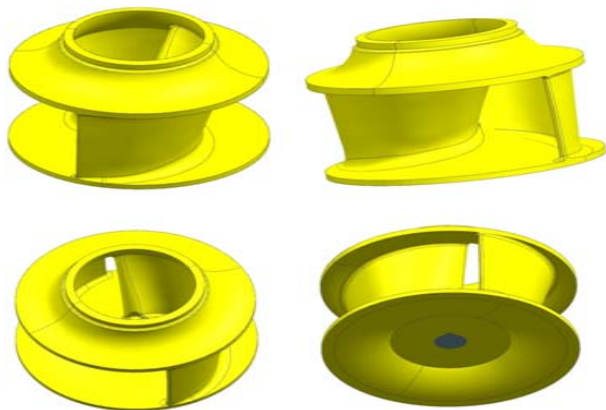


Figure 17: Impeller 3D modeling

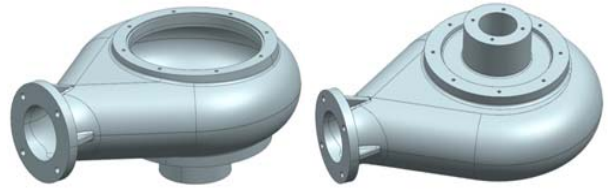


Figure 18: Housing 3D modeling

## 4. 시제품 제작 및 성능시험

배수펌프 시제품은 설계에 따른 임펠러와 하우징 제작을 위해 목형을 제작하고, 알루미늄 주물 형태로 제작하였다. 형상제작 후 내외부예의 정밀 가공을 실시하고 구성부품을 조립하여 배수펌프 시스템 시제품을 완성하였다. 시제품의 제작 및 조립과정은 Figure 19에 나타내었다.

완성된 배수펌프 시제품은 GE사의 초음파 유량계 Transport PT878 모델을 이용하여 유량성능 시험을 수행하였다. 시험과정은 Figure 20에 나타내었으며, 시험결과는 약 22.54 m<sup>3</sup>/min의 유량이 측정되어 시뮬레이션과 유사한 결과를 얻었다.



Figure 19: Prototype production of drainage pump system



Figure 20: Rate of discharge performance test using the ultrasonic flow meter

## 5. 결론

분당 20톤의 배수량을 가지는 침수선박 구조용 배수펌프 개발에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 배수펌프 시스템의 유동해석을 바탕으로 분당 20톤의 유량을 만족하는 대용량 배수펌프의 임펠러 및 하우징 설계를 완료하였다.

2) 배수펌프의 임펠러에 작용하는 압력분포와 최대압력을 분석하고 이를 바탕으로 구조해석을 수행하여 임펠러의 구조 안전성을 검토하였다.

3) 배수펌프 임펠러와 하우징 시제품을 제작하고 초음파 유량계를 이용하여 유량성능 평가 결과 22.54 m<sup>3</sup>/min의 유량이 측정되어 개발 목표를 만족하였다.

4) 본 연구에서 개발된 분당 20톤의 배수량을 가지는 침수선박 구조용 배수펌프는 침수 선박 구조활동에 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

향후 함정의 배수펌프 시스템 탑재에 따른 선체 복원성 및 균형성을 검토하고, 배수펌프 운전시의 저진동 및 저소음화 최적화 연구를 통해 실제 함정에서 구조활동이 원활히 진행되도록 추가 연구를 수행할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 중소기업청 구매조건부 신제품개발사업 S2118514 신속한 침수선박 구조를 위한 대용량 진공 배수펌프 시스템 개발 과제의 지원으로 수행된 연구결과입니다

## References

- [1] J. O. Mo, Y. T. Mo, and Y. H. Lee, "Numerical study on cavitation performance evaluation in a centrifugal pump impeller," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 286-293, 2012.
- [2] K. B. Pyun, J. H. Kim, Y. S. Choi, and J. Y. Yoon, "Design optimization of a centrifugal pump impeller using RSM and design of volute," *Journal of the Korean Society for Fluid Machinery*, vol. 15, no. 3, pp. 39-45, 2012.
- [3] Y. J. An and B. R. Shin, "Numerical analysis on the effect of flow rate variation in double-suction centrifugal pump," *Journal of the Korean Society for Fluid Machinery*, vol. 6, no. 6, pp. 51-53, 2010.
- [4] S. H. Baek, W. H. Jung, and S. M. Kang, "Shape optimization of impeller blades for bidirectional axial flow pump," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineering*, vol. 36, no. 12, pp. 1141-1150, 2012.
- [5] S. Kim, Y. S. Choi, J. Y. Yoon, and D. S. Kim, "Design optimization of centrifugal pump impeller us-

ing DOE," *Journal of the Korean Society for Fluid Machinery*, vol. 11, no. 3, pp. 36-42, 2008.

- [6] J. Gonzalez, J. Fernandez, and E. Blanco, "Numerical simulation of the dynamic effects due to impeller-volute interaction in a centrifugal pump," *Journal of Fluid Engineering*, vol. 124, no. 2, pp. 348-355, 2002.
- [7] K. Majidi, "Numerical study of unsteady flow in a centrifugal pump," *ASME Turbo Expo 2004*, vol. 5, pp. 805-814, 2004.
- [8] H. B. Jin, M. J. Kim, C. H. Son, and W. J. Chung, "Spiral casing of a volute centrifugal pump - effects of the cross sectional shape," *Journal of the Korean Society for Fluid Machinery*, vol. 16, no. 4, pp. 28-34, 2013
- [9] F. G. Johann, *Centrifugal Pumps*, Springer, 2010.