

## 로터형 슬러리 펌프 개발을 위한 실험적 연구

박상규<sup>1</sup> · 윤재근<sup>2</sup> · 양희천<sup>†</sup>

(Received March 16, 2015 ; Revised May 7, 2015 ; Accepted May 21, 2015)

### Experimental Investigation of the Development of a Rotor Type Slurry Pump

Sang-Kyoo Park<sup>1</sup> · Jae-Geun Yun<sup>2</sup> · Hei-Cheon Yang<sup>†</sup>

**요약:** 본 연구는 토네이도와 축류펌프의 원리를 적용하여 마중물 없이 슬러리를 송출할 수 있는 새로운 펌프기술 개발을 목적으로 한다. 개발한 로터형 슬러리 펌프는 전동모터, 구동축 및 커플링, 로터, 임펠러 그리고 흡입 및 송출관으로 구성된다. 청수를 이용한 성능시험에서는 로터의 설계조건에 따른 송출량, 소비 전력량 그리고 흡입관 부압특성에 대해 모터의 회전수를 변수로 검증하였으며, 시멘트를 이용하여 제조한 슬러리의 고형물 농도에 따른 송출량 특성에 대한 검증연구를 수행하였다. 로터의 직경과 높이가 커지면 송출량과 소비되는 전력량은 증가하지만 흡입관 부압은 감소하였으며, 송출량과 부압에 미치는 로터 두께의 영향은 거의 나타나지 않았다. 개발지표로 제시하였던 18 % 이상의 고형물 농도에서도 슬러리의 송출이 가능함을 확인하였다.

**주제어:** 슬러리 펌프, 토네이도 효과, 로터, 고형물 농도, 송출량

**Abstract:** The objective of this study was to develop an advanced pump technology using tornado and axial pumping principles without priming water. The developed rotor type slurry pump consisted of an electric motor, driving shaft and coupling, a rotor, an impeller, suction and discharge pipes. For the clean water test, the experimental results are presented for the discharge flowrate, electric power input and vacuum pressure with the rotor design parameters as a function of the motor rpm. The slurry discharge characteristics with the solid concentration of the cement slurry was performed. As the rotor diameter and height increase, the discharge flowrate and electric power input increase while the vacuum pressure in the suction pipe decreases. The rotor thickness had no significant effect on the discharge flowrate and electric power input. Slurries with more than 18 % solid concentration, which is the development factor, can be pumped.

**Keywords:** Slurry pump, Tornado effect, Rotor, Solid concentration, Discharge flowrate

### 1. 서 론

산업의 고도화 및 대량생산의 필요성에 따라 수반되는 각종 폐기물, 슬러지, 오·폐수 등의 발생이 증가하는 추세이다. 그러나 Figure 1과 같은 구성의 기존 원심 및 축류식 수중 펌프를 이용하여 슬러지 및 오·폐수를 처리하는 경우에는 임펠러의 막힘 현상과 파손 등으로 전체 공정에 지대한 차질을 초래하여 경제적 손실이 증가하게 된다. 또한 가동 정지 후 재시동 시에는 고형물과 슬러지의 침적으로 펌프의 기동이 어렵고, 케이싱과 임펠러 등 주요 구성요소가 슬러지 및 오·폐수 등의 오염원에 상시 잠겨있기 때문에 부식이 촉진되어 내구성의 저하를 초래하게 된다.

한편 수자원의 고갈과 수질오염의 심화로 인해 수자원의 안정적인 확보 및 이용효율 향상이 전 세계적인 관심사로 부각되고 있는 실정이므로, 오염물이 퇴적된 수자원 공급원의 하저면(bottom land)을 준설함으로써 수질오염원을 제거하는 효과를 기대할 수 있다. 일반적으로 준설에는 원심력을 이용한 슬러리 펌프가 주로 이용되고 있다. 이러한 슬러리 펌프는 고상의 입자가 다량으로 포함되기 때문에 임펠러나 케이싱의 마모, 침식 등의 문제가 발생하며, 화학성분이 포함된 슬러리를 이송하는 경우에는 부식으로 인한 내구성 문제가 발생하게 된다. 따라서 이러한 문제들을 극복할 수 있는 보다 내구성 높은 고성능 수중 슬러리 펌프의 개발이 필요하다.

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5947-8098>): School of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University, 50 Daehak-ro, Yeosu, Jeonam, 550-749, Korea, E-mail: hcyang@chonnam.ac.kr, Tel: 061-659-7223

1 School of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University, E-mail: psk@chonnam.ac.kr, Tel: 061-659-7282

2 Envitec Co., Ltd., E-mail: jgyun815@naver.com, Tel: 061-792-7841

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

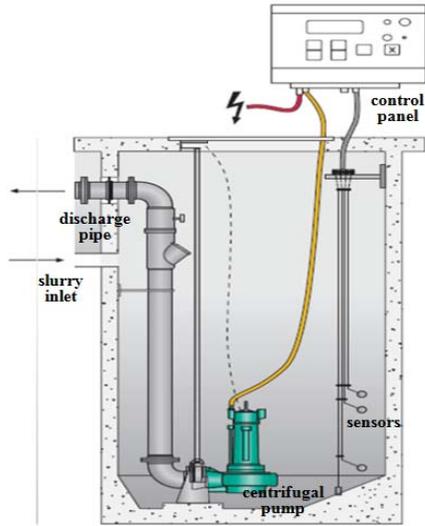


Figure 1: Example of a submersible centrifugal slurry pump system

수중 슬러리를 송출하는 용도로 가장 많이 이용되는 원심식은 저 비속도에서 고형물 농도가 높은 슬러리를 처리하는 경우의 문제점이 지적되고 있지만[1]-[4], 관련 연구의 거의 대부분은 원심식 임펠러를 알 수 있다. Wilson[5]은 미세 및 조대(fine and coarse) 입자의 직경, 밀도 및 농도 사이의 관계를 이용하여 원심 슬러리 펌프의 성능특성을 규명하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. Mihalic *et al.*[6]은 원심식 볼텍스 펌프의 양정에 미치는 볼텍스 로터의 영향을 규명하기 위해서 일반 원심펌프와의 비교연구를 수행하였으며, Khalil *et al.*[7]은 0~18 %인 슬러리의 중량 농도가 원심식 펌프의 양정, 축동력 및 효율에 미치는 영향을 조사하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. Sen *et al.*[8]은 수직형 원심식 슬러리 펌프의 수력학적 손실특성에 미치는 고체입자의 체적비의 영향, Crawford *et al.*[9]은 초점성 고령토 슬러리의 펌핑에 따른 원심펌프의 양정 및 효율 특성을 규명하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 또한 Chandel *et al.*[10]은 중량비 50 % 이상의 고농도 비산회(fly ash)의 첨가제에 따른 원심 및 용적식 펌프의 성능특성에 대한 실험적 연구를 수행한바 있으며, Gandhi[11]은 순수한 물과 고체-액체 혼합물에 대해 원심식 슬러리 펌프의 성능에 미치는 회전수의 영향에 대한 규명을 통해 적용성 검증연구를 수행하였다.

기존의 원심 및 축류식 펌프는 임펠러가 유체에 충만된 상태에서 원심력이나 양력에 의해 유체를 토출하는 방식인 반면에, 본 연구를 통해서 개발하고자 하는 슬러리 펌프는 Figure 2의 개념도에서와 같이 원심 및 축류식 펌프의 임펠러와는 형상이 전혀 다른 로터(rotor)의 회전력에 의해 생성되는 토네이도 효과를 이용하여 펌프 흡입부에 부압을 발생시켜 유체를 흡입 송출하는 방식이다[12]-[14]. 토네이도 원리를 적용한 Figure 2의 펌프는 로터(1), 구동축(2), 케이싱(3), 흡입관(4)과 송출관(8)으로 구성되며, 구동원리는 다음과 같다. 구동축(2)을 통해 전달되는 전동모터의 구동 에너지에 의해 발생하는 로터(1)의 회전력으로 로터 하부에 토

네이도 효과, 즉 하부의 흡입관 중심부에는 고압의 하향유동(5)이 야기되고 흡입관 내부 외주에는 상대적 저압의 상향유동(7)이 발생하게 되어 대상물의 흡입이 가능하게 된다. 그리고 흡입과정에서 하저면의 상대적으로 비중이 큰 물질(슬러지, 모래, 진흙 등)은 상대적 고압의 하향 유동에 의해 교반되어 상향유동에 슬러리 형태로 유입(6)되게 된다.

그러나 기존의 원심 및 축류식 펌프와 마찬가지로 로터의 회전력에 의해 발생한 토네이도 효과를 이용하는 방식의 펌프에서도 유체에 로터가 충만 되거나 마중물(priming water)을 제공해야만 송출이 가능하다. 따라서 본 연구는 토네이도 원리를 이용한 기술[12]-[14]과 축류펌프 원리를 적용하여 마중물 없이 슬러리를 송출할 수 있는 새로운 펌프기술 개발을 위한 연구를 목적으로 한다. 이를 위해 주물공정으로 제작된 케이싱의 설계, 길이와 두께 및 높이를 변수로 한 로터의 설계, 마중물 역할의 임펠러 설계 그리고 흡입 및 토출관의 설계과정을 거쳐 새로운 형상의 로터형 슬러리 펌프를 개발하였다. 그리고 개발의 목표달성 여부를 평가하기 위한 핵심지표로 제시하였던 임펠러의 마중물 역할 가능성 여부 및 18 % 이상의 고형물 농도를 갖는 슬러리의 송출 가능성 여부를 검증하기 위한 성능실험을 수행하였다. 청수(clean water)를 이용한 성능실험에서는 개발기술의 핵심 구성요소인 로터의 설계조건에 따른 부압, 송출량 그리고 소비 전력량 특성에 대해 전동모터의 회전수를 변수로 검증하였으며, 시멘트를 이용하여 제조한 슬러리의 고형물 농도에 따른 송출량 특성에 대한 검증연구를 수행하였다.

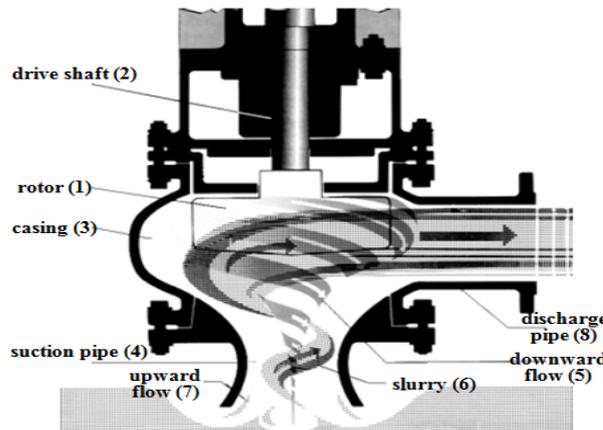


Figure 2: Configuration and operational mechanism of a tornado effect pump [12]

## 2. 로터형 슬러리 펌프 개발

### 2.1 케이싱

Figure 3은 목형 및 주물공정으로 제작한 케이싱의 설계사양을 나타낸다. 케이싱의 흡입구와 토출구의 직경은 80 mm와 63 mm 이며, 로터가 회전하며 토네이도 효과를 발생하는 케이싱의 내부 직경과 높이는 320 mm와 66 mm 로 설계하였다.

## 2.2 로터 및 임펠러

Figure 4와 Table 1은 로터의 설계변수 및 사양을 나타내며, Figure 5는 스테인레스 소재로 제작한 5 종류의 로터 실물사진을 나타낸다. 모터의 구동 에너지를 펌핑 대상물의 송출 에너지로 변환하는 원심 및 축류식의 임펠러와 동일한 역할을 하는 4엽 구조의 로터는 직경, 두께, 높이를 변수로 5 종류로 설계하였다. D1T1H1, D2T1H1, D3T1H1형 로터는 직경의 영향을 평가하기 위하여 두께와 높이는 12 mm와 31.5 mm로 동일하고 직경을 다르게 설계하였으며, D1T1H1과 D1T2H1형은 두께, D1T1H1과 D1T1H2형은 높이의 영향을 평가하기 위한 로터의 설계사양을 나타낸다. Figure 6은 기존의 축류식 임펠러와 유사한 구조로 마중물의 역할을 수행하는 직경 75 mm인 3엽 형상의 임펠러 실물사진을 나타낸다.

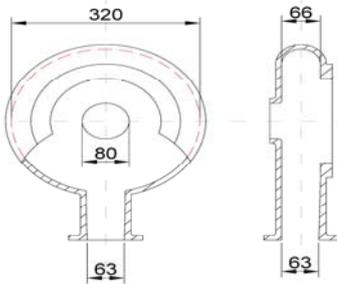


Figure 3: Design specifications of a casing

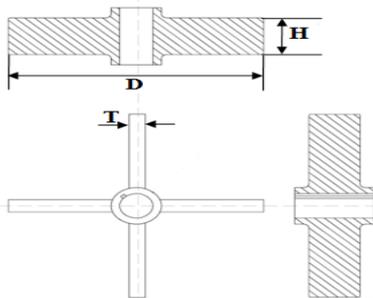


Figure 4: Design parameters of the rotor



Figure 5: Photograph of 5 rotors

Table 1: Specifications of 5 rotors

Type	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Height (mm)
D1T1H1	190	12	31.5
D2T1H1	200	12	31.5
D3T1H1	220	12	31.5
D1T2H1	190	15	31.5
D1T1H2	190	12	36.5



Figure 6: Photograph of axial type 3 blades impeller

## 2.3 로터형 슬러리 펌프

Figure 7과 Figure 8은 개발한 로터형 슬러리 펌프의 상세 설계도 및 실물사진을 나타낸다. 펌프의 구성요소는 전동모터, 구동축 및 커플링, 베어링 시스템, 로터, 임펠러 그리고 흡입 및 송출관 등이다. 전동모터로부터 케이싱 중심까지의 거리는 384.5 mm, 케이싱 중심으로부터 흡입관 플랜지까지의 거리는 120.5 mm, 흡입관의 길이는 656 mm로 설계하였으며, 펌프의 총연장은 1,578 mm로 제작하였다. 로터형 슬러리 펌프는 커플링과 구동축을 통해 전달되는 전동모터의 구동 에너지로 발생하는 로터의 회전력에 의해 흡입관 중심부에는 하향유동이 생성되고, 흡입관 내부 벽 쪽에 상향의 와류유동이 생성되어 대상을 흡입하게 된다. 한편 로터가 유체에 충만 되지 않을 때는 수표면 부근의 상등수에 잠겨있는 임펠러의 마중물 역할로 송출이 가능하게 된다. 원심 및 축류식 수중 오배수 펌프는 임펠러가 하저면에 상시 잠겨있기 때문에 슬러지 및 고형물에 노출되어 부식 등으로 내구성이 저하되고 재시동이 불가능한 경우가 발생하는 반면에, 개발된 기술의 임펠러는 수표면 부근의 상등수에 잠겨있거나 갈수기에는 대기 중에 노출되기 때문에 내구성 저하를 최소화할 수 있는 기술적 특징이 있다.

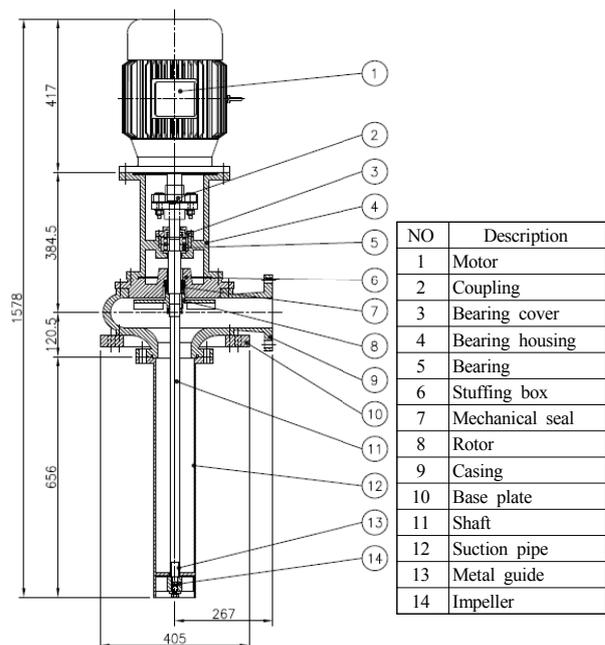


Figure 7: Layout of the rotor type slurry pump



Figure 8: Photograph of the rotor type slurry pump

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

Figure 9의 개략도에 나타난 실험장치는 일체형 슬러리 펌프 시스템, 전동모터, 실험수조, 유량계 및 진공계, 컨트롤 패널로 구성하였다. 3상 유도전동기(HSX1204251)는 5.5 kW 용량으로 컨트롤 패널에 내장된 인버터에 의해 회전수를 조절할 수 있도록 설계하였다. 실험수조는 약 4 m<sup>3</sup>의 용량으로 제작하였으며, 컨트롤 패널은 회전수 조절 레버, 전압 및 전류 측정 디지털 게이지와 제어 스위치로 구성하였다. 송출되는 유량은 송출관에 설치한 전자제어 유량계(EMP, E-MAG-1)를 이용하여 측정하였으며, 흡입관 부압은 케이싱의 흡입관 플랜지로부터 약 20 cm 아래쪽에 설치한 부르동관 진공계를 이용하여 측정하였다. 마중물 역할을 하는 흡입관내의 임펠러는 수면으로부터 약 20 cm 정도 잠기도록 수위를 조절하였다. Table 2는 전동기의 사양을 나타낸다.

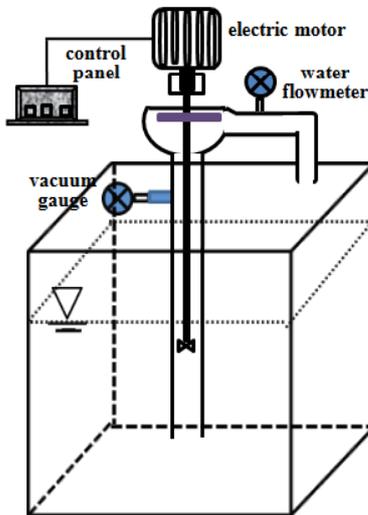


Figure 9: Experimental pump apparatus

Table 2: Specifications of 3-phase induction motor

Specification	
Power (kW)	5.5
Voltage (V)	380
Pole	4
Frequency	60
Rated revolution (rpm)	1,760

#### 3.2 실험방법

성능실험은 청수(수돗물)를 이용하여 전동기가 정상상태의 유동조건에 도달한 후에 실험변수에 따라 흡입관의 부압과 송출량, 전동기의 전압 및 전류를 측정하는 과정과 청수에 시멘트를 혼합하여 제조한 슬러리의 송출유량을 측정하는 과정으로 진행하였다. 전동기의 효율, 측정된 전압과 전류를 이용하여 식 (1)과 같이 정의되는 전력량을 산출하였다.

$$EP [kW] = \eta_M \cdot V \cdot I \quad (1)$$

여기서  $\eta_M$ 은 전동기의 효율,  $V$ 는 전압 그리고  $I$ 는 전류를 나타낸다. 청수를 이용한 실험의 변수는 5 종류의 로터와 1,000 ~ 1,750 범위의 전동기 회전수로 설정하였으며, DITIHI 로터를 이용한 슬러리 송출특성 실험에서는 7.35, 13.7, 24.0 %의 고형물 중량농도(%TS)를 변수로 설정하였다. 청수에 시멘트를 혼합한 슬러리의 고형물 중량농도는 식 (2)와 같이 시멘트와 슬러리의 중량을 이용하여 산출하였다[5].

$$\% TS = \frac{W_{solid}}{W_{slurry}} \quad (2)$$

여기서  $W_{solid}$ 는 시멘트의 무게,  $W_{slurry}$ 는 청수와 시멘트가 혼합된 슬러리의 무게를 나타낸다.

### 4. 결과 및 고찰

개발된 펌프의 성능검증은 크게 임펠러의 마중물 가능여부의 평가와 18 % 이상의 고형물 농도를 갖는 슬러리의 송출 가능여부를 평가하기 위한 실험으로 진행하였다. 임펠러의 마중물 가능여부는 개발기술의 핵심 구성요소인 로터의 설계조건에 따른 송출량, 소비전력 그리고 흡입관 부압특성에 대해 청수를 이용하여 검증하였으며, 18 % 이상의 고형물 농도 슬러리의 송출 가능여부는 청수에 시멘트를 혼합하여 제조한 슬러리의 송출량 특성으로 검증하였다. Figure 10~Figure 12는 임펠러의 마중물 역할 가능여부를 확인한 성능실험 결과로, Figure 10은 로터의 직경, Figure 11은 로터의 높이 그리고 Figure 12는 로터의 두께가 송출량, 소비 전력량과 흡입관 부압에 미치는 영향을 나타낸다. 성능실험에서 임펠러는 수심 약 20 cm에 잠긴 상태이고, 로터는 수표면 위 약 576 mm에 위치한 조건이다.

5 종류의 로터에 대해 전동 모터의 회전수가 커지면 소비 전력량, 송출량 및 흡입관 부압은 모두 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 모터의 회전수에 비례하여 소비되는 전력량이 증가하며, 로터에 전달되는 에너지도 회전수에 비례하여 증가하기 때문에 발생하는 토네이도 효과가 커져서

흡입관 부압과 송출량이 증가하는 것으로 판단된다. 로터의 직경과 높이가 커지면 소비되는 전력량과 송출량은 증가하는 반면에, 흡입관의 부압은 감소하는 것을 Figure 10 과 Figure 11의 결과를 통해서 알 수 있다. 직경과 높이가 커지면 로터의 중량 증가에 따른 회전부하 증가로 소비되는 전력량이 많아지고, 회전 단면적 증가로 토네이도 효과가 커지기 때문에 송출량이 증가하는 것으로 판단된다. 흡입관 부압의 감소는 송출 압력의 증가를 의미하며 이는 송출량의 증가로 확인할 수 있다. 한편 로터의 직경이 커지고 모터의 정격 회전수에 근접하면 송출량이 약간 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 케이싱 벽면에 가까워진 로터의 고속회전으로 인한 벽면 마찰손실 증가에 따른 토네이도 효과의 감소에 기인하는 것으로 판단된다. 로터의 두께가 두꺼워지면 Figure 12의 결과에 나타난 것과 같이 로터의 중량 증가에 따른 회전부하 증대로 소비되는 전력량은 증가하지만, 두께 증가에 따른 토네이도 효과의 영향은 크지 않기 때문에 송출량과 부압의 변화는 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다. 정량적으로 흡입관 부압은 직경이 가장 큰 로터의 1,000 rpm에서 약 30 cmHg로 최소값, 로터의 직경이 가장 작은 경우의 1,750 rpm에서 약 62.5 cmHg로 가장 큰 값을 나타냈다.

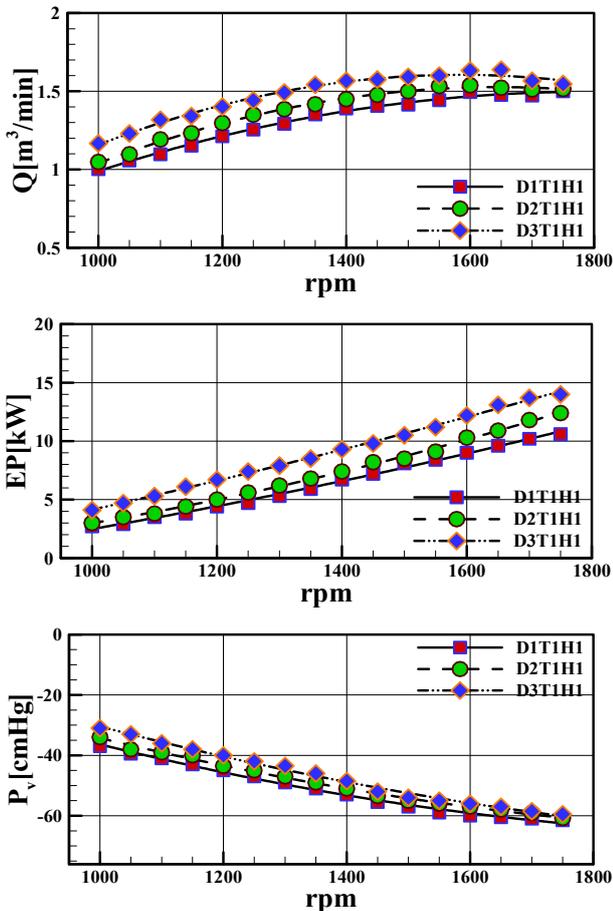


Figure 10: Effects of the rotor diameter on the discharge flowrate, power input and vacuum pressure with motor rpm

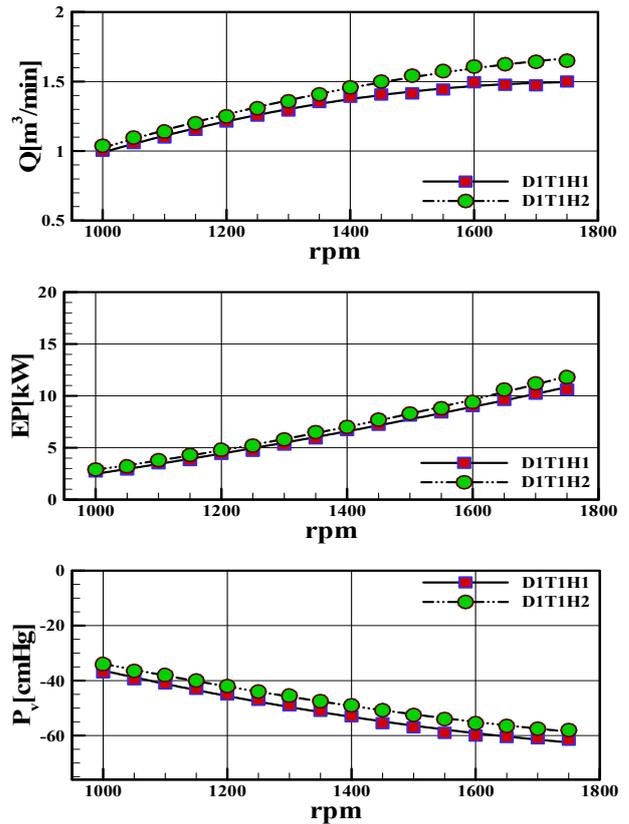


Figure 11: Effects of the rotor height on the discharge flowrate, power input and vacuum pressure with motor rpm

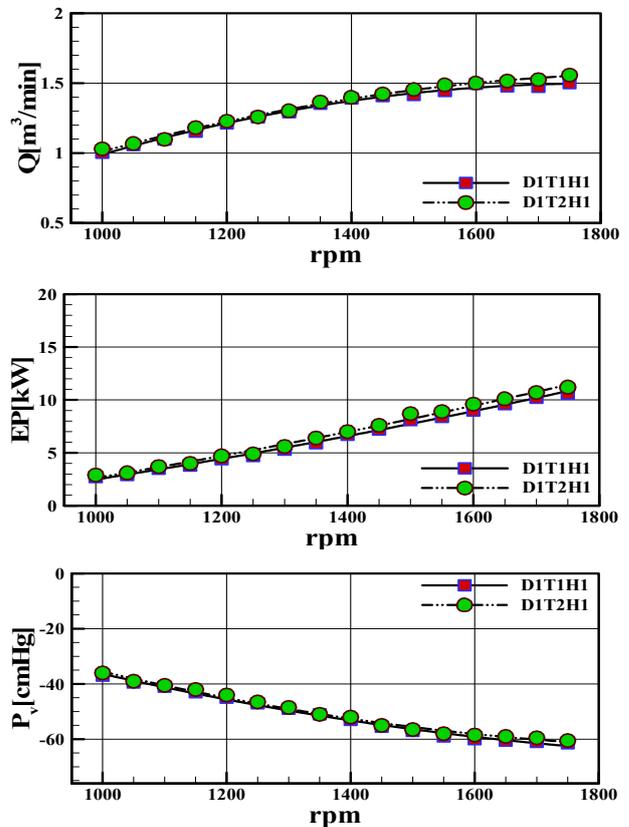


Figure 12: Effects of the rotor thickness on the discharge flowrate, power input and vacuum pressure with motor rpm

Figure 13은 DIT1H1 로터를 이용하여 전동 모터 회전수 1,750 rpm에서 수행한 슬러리의 고형물 농도에 따른 송출량 특성실험 결과를 나타낸다. 고형물 농도가 7.35 %인 경우에는 분당 약 1.51 m<sup>3</sup>, 13.7 %인 경우에는 1.37 m<sup>3</sup> 그리고 24 %인 경우에는 약 1.26 m<sup>3</sup> 정도 송출이 가능함을 확인하였다. 고형물 농도가 7.35 %인 경우의 분당 송출량을 청수를 이용한 실험결과인 Figure 10의 DIT1H1 로터의 경우와 비교하면 약 1.5 m<sup>3</sup>로 거의 동일한데, 시멘트가 중량비로 7.35 % 포함되어 슬러리의 비중이 커진 것을 고려하면 상대적으로 송출량이 높다는 것을 알 수 있다. 이는 슬러리 성능실험을 청수실험과는 달리 0.3 m<sup>3</sup> 용량의 별도의 수조에 약 0.25 m<sup>3</sup>의 슬러리를 채우고 임펠러가 수조 바닥으로부터 약 20 cm 정도에 위치한 조건에서 수행하였기 때문인 것으로 판단된다. 수조의 폭이 좁고 흡입관 입구가 바닥에 근접되면 부압이 작용하는 영역이 상대적으로 적어서 슬러리가 부압에 의해 흡입관 입구로 빨려오는 효과가 커지기 때문인 것으로 사료된다.

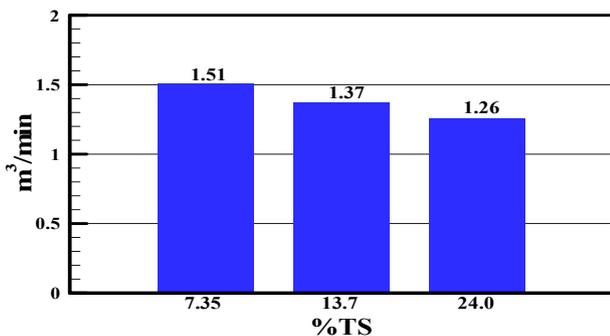


Figure 13: Slurry discharge flowrate with total solid concentration of slurry

본 논문은 토네이도 및 축류펌프 원리를 적용하여 마중물 없이 슬러리를 송출할 수 있는 펌프 개발을 위한 1차적인 연구로, 임펠러의 마중물 역할 가능여부 및 일정량의 고형물이 포함된 슬러리의 송출가능 여부를 평가한 결과이다. 그러나 개발된 기술의 타당성 및 적용성 검증과 상품화를 위해서는 다양한 변수를 고려한 성능특성 곡선의 제시가 필요하다. 또한 개발된 기술은 진공 및 축류식이 병용된 펌프 기술이기 때문에 기존의 원심 및 축류식 특성곡선 변수들의 적용 타당성에 대해 공인된 기관의 인증 과정이 필요한 것으로 판단된다. 따라서 추후에 계속되는 연구에서는 공인기관의 인증결과를 바탕으로 송출량, 양정, 축동력, 효율 등에 대한 특성실험과 로터와 임펠러의 형상 및 슬러리 성상 등의 변수를 고려한 최적화 검증실험을 수행할 예정이다.

#### 4. 결 론

토네이도 및 축류펌프 원리를 적용하여 마중물 없이 슬러리를 송출할 수 있는 새로운 펌프기술 개발 결과를 요약하면 다음과 같다.

로터의 토네이도 효과와 임펠러의 마중물 역할로 18 % 이상의 고형물 농도를 갖는 슬러리의 송출이 가능하였다.

수표면 부근의 상등수에 위치한 마중물 역할의 임펠러 적용기술로 고형물 및 고농도 슬러리와와의 접촉을 최소화할 수 있기 때문에 내구성과 운전 경제성 향상이 가능함을 확인하였다.

로터의 직경과 높이가 커지면 중량 증가에 따른 회전부하 증대로 소비 전력이 증가하며, 로터의 회전 단면적 증가로 토네이도 효과가 커지는 것에 기인하여 송출량은 증가하고 흡입관 부압은 감소하였다.

로터의 두께가 커지면 회전부하 증대로 소비되는 전력량은 증가하지만, 토네이도 효과를 발생시키는 로터와 유체의 접촉 단면적 변화가 거의 없기 때문에 송출량과 부압의 변화는 거의 나타나지 않았다.

#### 후 기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2013년도 산학연공동기술개발사업(No. C0116257)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

#### References

- [1] Y. D. Choi and J. Kurokawa, "Improvement of performance instability and miniaturization of very low specific speed centrifugal pump," *Journal of Fluid Machinery*, vol. 10, no. 4, pp. 21-28, 2007 (in Korean).
- [2] J. E. Yun, "Development of submersible axial pump for wastewater," *Transactions of the Korean Society Mechanical Engineers B*, vol. 37, no. 2, pp. 149-154, 2013 (in Korean).
- [3] J. E. Yun, "Effect of impeller shape of submersible nonclogging pump on its performance," *Transactions of the Korean Society Mechanical Engineers B*, vol. 36, no. 12, pp. 1201-1207, 2012 (in Korean).
- [4] J. E. Yun, "CFD analysis of submersible slurry pump with two blades," *Transactions of the Korean Society Mechanical Engineers B*, vol. 35, no. 3, pp. 263-268, 2011 (in Korean).
- [5] G. Wilson, "The effects of slurries on centrifugal pump performance," *Proceedings of the 4th International Pump Symposium*, pp. 19-25, 1987.
- [6] T. Mihalic, Z. Guzovic, and A. Predin, "Performance and flow analysis in the centrifugal vortex pump," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 135, pp. 011002-1-011002-7, 2013.
- [7] M. F. Khalil, S. Z. Kassab, A. A. A. Naby, and A. Azouz, "Performance characteristics of centrifugal

- pump conveying soft slurry,” *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 5. pp. 103-112, 2013.
- [8] P. K. Sen, L. G. Das, and B. Halder, “The characteristics of a vertical submersible slurry pump in transporting dredged slurry,” *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 3, no. 1, pp. 516-522, 2013.
- [9] J. Crawford, F. van Sittert, and M. van der Walt, “The Performance of centrifugal pumps when pumping ultra-viscous paste slurry,” *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 112, pp. 959-964, 2012.
- [10] S. Chandel, S. N. Singh, and V. Seshadri, “Effect of additive on the performance characteristics of centrifugal and progressive cavity slurry pumps with high concentration fly ash slurries,” *Coal Combustion and Gasification Products*, vol. 3, pp. 67-74, 2011.
- [11] B. K. Gandhi, S. N. Singh, and V. Seshadri, “Effect of speed on the performance characteristics of a centrifugal slurry pump,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128, no. 2, pp. 225-233, 2002.
- [12] W. Johnson, S. Myers, R. Schepis, J. Crew and R. Keltner, “Zero leakage tornado effect pumps in carrier sewage systems,” *Naval Engineers Journal*, vol. 109, no. 2, pp. 73-82, 1997.
- [13] H. Weinrib, P. Lucas, R. Keltner, and W. Johnson, “Tornado effect pump in the fleet-status report,” *Naval Engineers Journal*, vol. 112, no. 4, pp. 317-334, 2000.
- [14] J. G. Yun, “Pumping device for fluid,” Korea, Patent 10011169690000, February 8, 2012 (in Korean).