

수중펌프의 Leakage-free 자동탈착장치 개발

최영석* · 이경용** · 이창한*** · 이종훈***

Development of Leakage-free Automatic Discharge Connector in a Submersible Pump.

Young-Seok Choi*, Kyoung-Yong Lee**, Chang-Han Lee***, Jong-Hun Lee***

Key Words: Automatic Discharge Connector (자동탈착장치), Submersible Pump (수중펌프), Leakage Flow (누수)

ABSTRACT

ADC (Automatic Discharge Connector) is commonly used for the easy maintenance of the submersible pumps. However, the small gap between the flange of the base plate and that of the pipe due to the head rise, the flow momentum change and the mis-installation make a leakage flow that may be a great loss to the pumping system. In this study, the performance degradation was predicted with the simple leakage flow model through the gap. The newly developed ADC was tested, and the leakage performance was compared with the old one and also no-leakage piping system. The newly developed ADC reduced the leakage flow in a satisfactory way in comparison with the old model.

1. 서 론

수중 모터펌프의 유지 보수를 위해서는 펌프를 수시로 인양할 필요가 있으므로, 관로와 펌프의 탈착이 쉽도록 자동탈착장치 (Automatic Discharge Connector)가 일반적으로 사용되고 있다^{(1),(2)}. 수중에 장착된 자동탈착장치는 펌프의 운전에 따른 헤드상승 및 운동량의 변화에 의하여 결합부에 틈새가 발생할 수 있으며 이러한 틈새를 통하여 누수가 발생하게 된다. 누수에 의한 유량손실은 전체 펌핑 시스템에 손실을 유발하게 되고 결국 에너지 낭비로 이어지게 되므로 이에 대한 손실을 최소화 하는 자동탈착장치의 개발은 에너지 절약 관점

에서도 매우 중요하다고 할 수 있다. 즉 지금까지의 자동탈착장치는 유지·보수의 편의성을 중심으로 개발된 관계로 자동탈착장치의 결합부에 대한 일정량의 에너지 누수는 무시 가능하다고 생각되었으며, 따라서 에너지의 절감 측면은 적절하게 고려되지 않은 상황이었다. 근래에 들어 에너지절감에 대한 관심이 높아짐에 따라 자동탈착장치에서의 누수방지장치에 대한 개선이 중요한 문제로 대두되었다. 이러한 중요성에도 불구하고 국내에서는 자동탈착장치의 누수현상에 대한 규명 및 이로 인한 에너지 손실 정도에 대하여 아직까지 체계적으로 연구된 예가 없다. 본 연구에서는 틈새로 인한 누수가 펌핑 시스템에 어떤 영향을 미치는지를 이론적으로 규명하고, 자동탈착장치의 구조개선을 통한 새로운 모델을 제작 시험하여 새로운 자동탈착장치가 기존의 자동탈착장치에 비하여 어떤 성능 개선이 이루어졌는지를 시험을 통하여 비교 분석하고자 한다. 본 연구에서

* 한국생산기술연구원 신에너지환경팀

** 한국기술교육대 대학원, 한국생산기술연구원

*** 금정공업주식회사 기술연구소

책임저자 E-mail : yschoi@kitech.re.kr

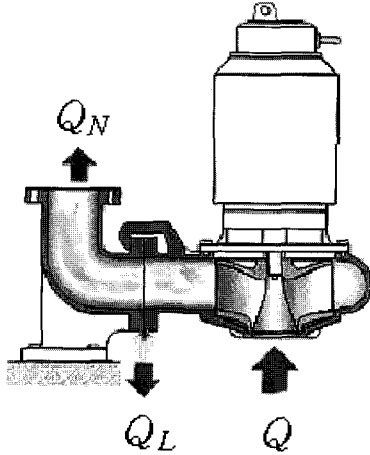


Fig. 1 Leakage flow in submersible pump

개발된 자동탈착장치는 간단한 구조로 되어있어 추가되는 비용이 적으며 수중펌프가 장착된 펌핑시스템의 에너지손실을 최소화하여 사용자의 전력소비를 획기적으로 감소시키는 효과가 기대된다.

2. 누수가 고려된 펌핑시스템 모델링

자동탈착장치 결합부의 틈새로 인한 누수가 펌프의 실제 양정 및 유량, 효율에 미치는 영향에 대해서 간단한 모델링을 통해 살펴보았다. Fig. 1은 모델링에 사용된 펌핑시스템을 나타내고 있다. 펌프의 흡입유량을 Q , 틈새로의 누출유량을 Q_L , 관로로의 유효유량을 Q_N 으로 나타내었으며 결합부의 틈새길이를 G 로 나타내었다. 해석에 사용된 가정은 아래와 같다.

- 펌프의 성능곡선을 알고 있다.
- 펌프 토출부의 유동은 ADC의 누수로 인해 영향을 받지 않는다.
- 틈새의 간격은 일정하게 유지된다.

틈새를 통한 누수유량은 펌프 토출부의 압력과 파이프 외부 수조 압력의 차이에 의해 결정되며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_L = c_d \sqrt{2g\Delta H} \quad (1)$$

여기서 c_d 는 유량계수(discharge coefficient)로서 편의상 1.0으로 가정하였으며, ΔH 는 펌프 입구와 토출부

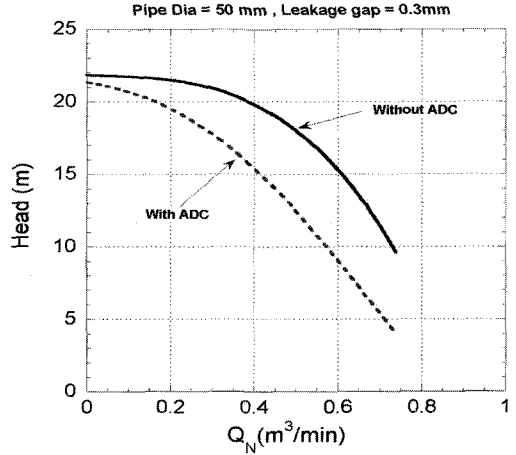


Fig. 2 Pump head curves with and without ADC

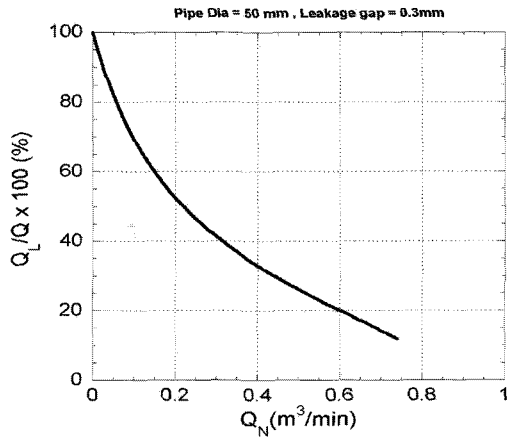


Fig. 3 Fraction of the leakage flowrate

의 양정차이를 나타낸다.

펌프 토출부의 압력은 펌프 성능곡선에서 알 수 있듯이, 유량에 따라 변하게 되므로 펌프의 운전점에 따라 누수유량은 달라지게 된다. Fig. 2에 자동탈착장치가 장착된 시스템과 장착이 되지 않은 시스템(관로로 틈새 없이 연결됨)의 펌프 헤드상승곡선에 대한 해석결과 예를 나타내었다. 수중펌프를 통해서 이송되는 유체의 유효유량을 기준으로 누수가 있는 ADC가 장착된 경우 헤드곡선이 하강하게 되어 필요로 하는 헤드에서 유량이 상대적으로 적어지게 되는 문제가 발생하게 된다. 예를 들어 헤드상승이 15m의 경우 유량차이는 약 $0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 이며, 이는 입구유량기준으로 약 33%가 틈새로 빠져나간다는 것을 의미한다. 입구유량 대비 누수유량의 정도를 유효유량에 대해서 나타내면 Fig. 3과 같다. 유효유량이 0이면 입구유량 모두가 틈

새로 빠져 나가게되어 100%가 되고, 유효유량이 증가함에 따라 누수유량의 정도는 줄어들게 된다. 이는 펌프의 헤드-유량곡선에서 볼 수 있듯이 유량이 증가하면 헤드가 감소하기 때문에 틈새를 통한 누수유량도 줄어들기 때문이다.

3. 누수 방지 자동탈착장치의 성능평가

기존의 자동탈착장치의 경우 고정형 파이프와의 연결부위는 금속면으로 되어있어 접착면에 이물질이 낀다던가, 또는 약간의 정렬불량에 의해서도 틈새가 발생하게 된다. 새로이 개발된 자동탈착장치는 Fig. 4와 같이 간단한 구조의 고무재질 (NBR)로 만들어진 개스킷을 접착면에 끼워지게 제작되었다. 개스킷의 형상은 파이프내부의 유동에 의해 탄성을 가지는 고무성분이

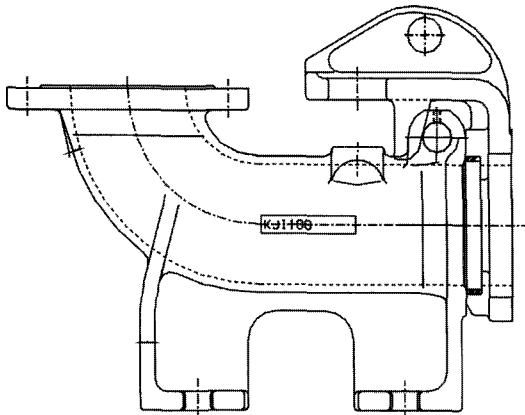


Fig. 4 Configuration of the new ADC

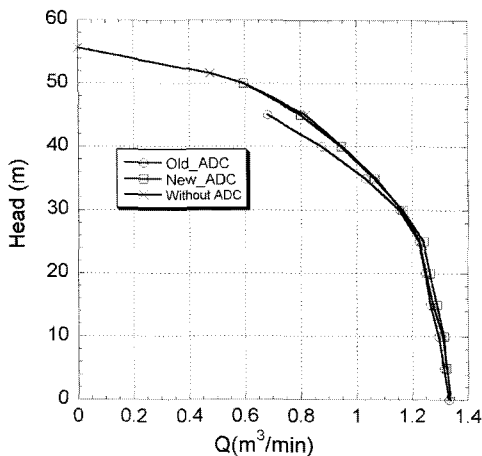


Fig. 5 Comparison of head-flowrate curve

접착면에 더욱 밀착될 수 있도록 유체흐름방향으로 누워있는 구조를 가지고 있다.

Fig. 5에 기존탈착장치와 새로 개발된 자동탈착장치를 사용한 펌프의 헤드유량곡선을 자동탈착장치가 부착되지 않은 고정파이프 (누수가 전혀 없음)에서 시험한 결과와 비교하여 나타내었다. 기존 자동탈착장치의 경우 고무성분의 개스킷이 없기 때문에 약간의 틈새로 인해 헤드곡선이 적게 나오는 것을 알 수 있으며, 새로이 개발된 자동탈착장치의 경우 시험이 가능한 범위 (유량 0.6m³/min 이상)에서 고정파이프의 시험결과와 거의 동일한 헤드-유량곡선을 보여주고 있다. 이것은 새로운 자동탈착장치의 경우 틈새를 통한 누수 유량이 거의 없다는 것을 보여주고 있다. 시험결과가 Fig. 2의 틈새면적이 일정하다는 가정하에서 예측된 헤드곡선의 하강현상과는 다른 경향을 보이는데, 이는 실제 시험조건이 유량변화에 따라 틈새의 면적이 일정하지 않기 때문으로 판단된다. 실제로 자동탈착장치가 장착된 경우 저유량 영역에서 펌프의 순간적인 들림 현상이 발생하여 헤드-유량의 시간에 따른 변동성분이 커져서 정밀한 측정이 불가능하였다. 하지만 측정가능 유량범위도 새로운 자동탈착장치의 경우 보다 더 저유량 영역까지도 측정이 가능하여 기존의 자동탈착장치에 비해 우수한 경향을 보여주고 있다. 저유량 영역의 펌프 들림 현상에 의한 누수발생원인에 대해서는 다음 장에서 자세히 분석하였다.

새로이 개발된 자동탈착장치는 Fig. 4에 나타났듯이 유체의 흐름을 이용해 벽면에 밀착되도록 고무재질 (NBR)의 개스킷이 유로 내부에 장착하게 되어있다. 하지만 장착된 개스킷에 의해서 유로의 단면적이 줄어들게 되므로 어느 정도 유로를 방해하는 역할을 하게되어 압력손실로 작용할 수 있다. 자동탈착장치의 개스킷이 유로 내면에 장착될 때 벽면으로부터 반경방향의 높이 r에 따라 유로 내부의 유동손실의 값을 상용 CFD 코드인 CFX-TASCflow⁽³⁾를 사용하여 해석한 결과로부터 구해보면 표 1과 같게 된다. 매끄러운 내부 유로 벽면의 경우에 비해서 개스킷의 반경방향높이가 r=1mm인 경우 압력 손실량은 파이프의 경우에 비해 32.5 Pa이 크고, r=2mm인 경우는 146.2 Pa이 커서, 비

Table. 1 Pressure loss of the ADC at Q=0.97 m³/min

Model	Pipe (Non-ADC)	ADC 1 (r=1mm)	ADC 2 (r=2mm)
Pressure			
ΔP_{tot} (Pa)	0	32.5	146.2

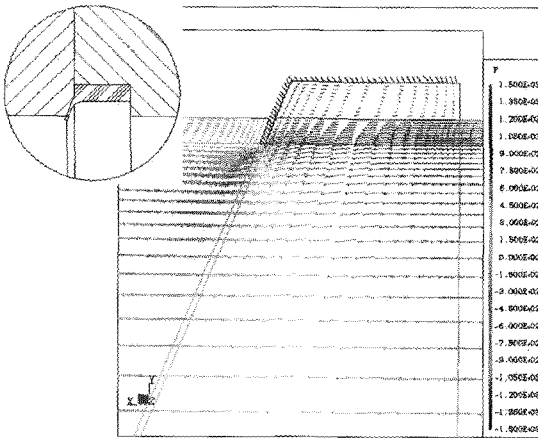


Fig. 6 Flow field in the ADC

교적 펌프 양정에 비해서 작은 값을 보이고 있어 개스킷의 장착으로 인한 압력손실은 전체 펌핑시스템의 관로 손실에 비해서 무시할 정도로 작음을 알 수 있다.

Fig. 6에 개스킷 주위의 속도장 및 압력분포를 나타내었다. 유체의 흐름에 의해 개스킷의 전면에 양의 압력이 걸리게 되어 개스킷을 파이프의 연결벽면에 더욱 밀착시키는 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다. 이때 반경방향으로 2mm 돌출된 개스킷의 경우 전면과 후면의 평균압력차이는 약 2kPa 정도가 된다.

4. 자동탈착장치 틈새 발생 원인에 대한 분석

자동탈착장치의 틈새 발생 원인으로는 장착시의 어긋남으로 인한 정렬불량, 펌프 작동시에 펌프헤드상승으로 인한 반발력 등의 원인을 들 수 있다. 새로이 개발된 누수방지 자동탈착장치의 경우 누수방지를 위한 개스킷 (gasket)이 탄성재질로 되어있고 펌프 출구부가 탱크에 비해 항상 양의 압력을 가지고 있어 어느 정도의 정렬불량에도 개스킷이 틈새를 매워주는 역할을 수행하므로 누수방지 효과가 유지된다. 하지만 Fig. 5의 시험결과에서도 나타났듯이 펌프의 헤드상승이 큰 경우 즉 저유량 영역에서 펌프가 작동될 때는 펌프에 작용하는 헤드상승으로 인한 반발력이 크게 되어 비정상거동을 포함하는 펌프 들림 현상이 발생하게 되고 이로 인해 자동탈착장치의 틈새가 발생하게되고 누수의 원인이 될 수 있다.

펌프를 포함한 자동탈착장치는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 고정형 파이프와 연결시키기 위해서 훅 (hook) 모양의 연결고리를 사용하고 있으며 장착시 가이드를

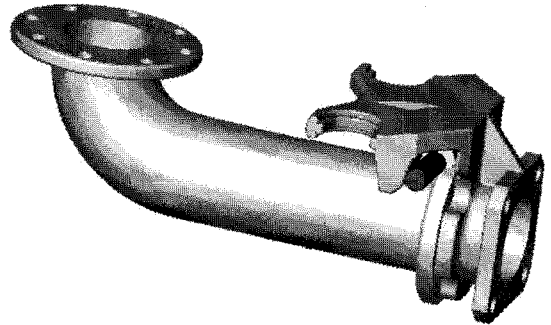


Fig. 7 Connection of ADC with the fixed pipe.

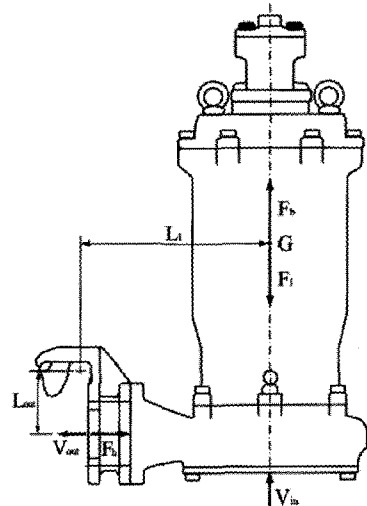


Fig. 8 Torque exerted by a submersible pump

따라서 약간 경사지게 유지된 펌프가 내려와 연결고리가 고정형 파이프 상단에 위치한 원형수평기둥에 걸리게 된다. Fig. 8에 ADC를 포함한 수중펌프에 작용하는 외력 및 운동량성분을 도식적으로 나타내었다. ADC를 포함한 수중펌프를 제어체적 (control volume)으로 훅 (hook)의 중심에서 각운동량 이론을 적용하면 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다⁽⁴⁾.

$$\begin{aligned} \sum T_{\text{hook}} &= T + (L_1 \times F_b) + (L_1 \times F_1) + (L_{\text{out}} \times F_h) \\ &= (L_{\text{out}} \times V_{\text{out}})(\dot{m}_{\text{out}}) + (L_1 \times V_{\text{in}})(-\dot{m}_{\text{in}}) \quad (2) \end{aligned}$$

여기에서 T는 토크, F_b 는 부력, F_1 은 펌프 하중, V_{in} 은 입구부 평균속도, V_{out} 은 펌프 출구부 평균속도, F_h 는 펌프 헤드상승에 의해 출구단면에 작용하는 힘, L_1 은 무게중심과 훅 중심과의 수평거리, L_{out} 은 출구 단면의 중심과 훅 중심과의 수직거리, \dot{m} 는 펌프를

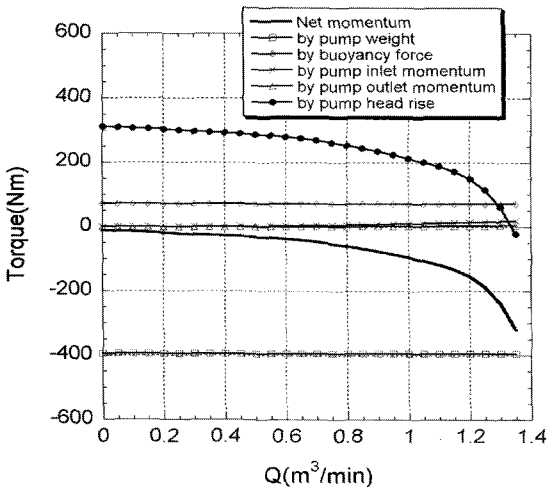


Fig. 9 Change of the momentum component

통과하는 질량유량을 나타낸다.

식(2)에 의해 구해진 순토크 (net torque) T 와 각 토크성분을 유량에 따라 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 양의 부호는 시계반대방향 즉 펌프가 혹은 중심으로 돌리게 되는 토크가 작용한다는 의미로 ADC에서의 틱새가 발생할 수 있는 방향의 토크가 작용한다는 것이고, 음의 부호는 펌프가 연결 파이프와 밀착되는 토크성분을 가지게 된다는 의미이다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 음의 값으로 작용하는 것은 ADC를 포함한 수중펌프의 중량에 의한 토크이고 양의 값은 펌프의 양정 상승, 수중펌프에 작용하는 부력, 그리고 펌프 입출구의 운동량변화에 의한 토크성분이다. 유량이 증가함에 따라 펌프의 헤드-유량곡선은 감소하므로 펌프의 양정 상승에 의한 토크성분도 감소하게 되고 이로 인해 순토크 (net torque) 성분도 감소하게 된다. Fig. 9의 해석결과에 의하면 양정 상승이 가장 큰 shut-off 유량에서도 순토크는 아주 작은 음의 값을 가지므로 펌프의 운전으로 인해 ADC에서의 틱새가 발생하지는 않을 것으로 판단된다.

위의 해석결과에서는 어떤 유량범위에서도 양의 토크값이 존재하지 않지만, 입력값 (펌프의 중량, 무게중심까지의 거리, 펌프 출구부의 양정 상승 등)이 순토크 계산에 영향을 미치는 정도에 대한 민감도 해석을 수행하여 변수의 변화에 대하여 양의 토크값이 존재할 수 있는 가능성의 정도를 살펴보는 것도 중요한 일이라 판단된다. 예를 들어 펌프의 무게중심을 정확하게 구하기는 어려우므로 입력값이 약간 변화했을 때 토크 계산결과에는 어떤 영향을 미치는지, 펌프의 무게나

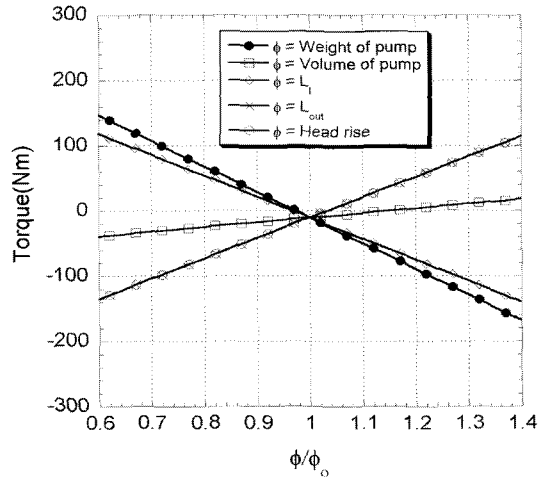


Fig. 10 Sensitivity of the input parameters at $Q=0$

부피가 변할 경우는 어떻게 되는지, 펌프의 출구연결 파이프의 단면적 변화에 의한 영향은 어떻게 되는지, 또한 펌프 작동시 맥동 현상으로 인해 펌프의 출구부 압력이 순간적으로 평균값보다도 커졌을 경우는 어떠한지 등을 고려하여 민감도 해석을 통하여 펌프가 들릴 가능성이 있는지를 판단해 보고자 하는 것이다.

Fig. 10에 $Q=0$ 인 shut-off 유량에서의 민감도 해석 결과를 나타내었다. 펌프의 중량과 무게중심까지의 거리 (L_1)는 값이 커짐에 따라 토크가 감소하게 된다. 펌프의 중량이 가장 큰 영향을 미치며, L_1 은 펌프의 부력에 의해 토크가 증가하는 영향도 포함하기 때문에 펌프의 중량보다는 민감도가 덜하게 된다. 펌프의 헤드 상승에 의한 영향은 펌프출구의 중심까지의 거리 (L_{out})와 같은 경향으로 토크의 증가에 영향을 주게 된다. 즉 현재의 입력값을 기준으로 하면 shut-off 유량에서 토크는 음의 값을 가져서 펌프의 들림 현상이 없게 되나, 펌프의 무게, 부피, 헤드상승 등의 변화에 따라 펌프의 들림 현상은 언제든지 발생할 수 있으며 이로 인해 ADC 연결부위의 틱새가 발생하여 누수가 발생할 수 있다는 것이다.

유량 $0.65\text{m}^3/\text{min}$ 에서의 민감도 해석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 각 변수에 의한 민감도 경향은 shut-off에서의 경향과 같으나, 기준 유량에서의 현치를 기준으로 한 순토크 (net torque)의 값이 shut-off 유량에서의 값보다는 작은 값을 가지므로 펌프의 들림 현상이 발생할 여지는 줄어들게 된다. 예를 들어 펌프의 중량이 약 10% 가벼워진다면, 펌프 헤드가 약 10% 높아지게 되어야 이 유량에서 작동하는 펌프에 들림

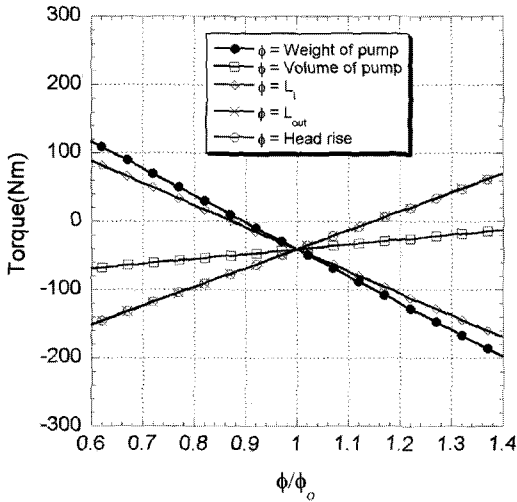


Fig. 11 Sensitivity of the input parameters at Q=0.65

현상이 발생할 수 있다.

이상의 분석결과를 살펴볼 때 펌프의 중량이나 부피 등에 따라 다르겠지만 일반적으로 고양정 펌프이고 저유량 영역에서 작동할 때 펌프의 들림 현상이 발생해서 누수가 발생할 여지가 매우 높으므로 주의하여야 한다. 저 유량영역에서의 들림 현상을 방지하기 위해서 ADC 접속부의 하단에 결괴 등을 사용하여 들림 현상을 강제적으로 잡아주는 방법도 추후 고려되어 개선될 예정이다.

5. 결론

수중펌프의 자동탈착장치에서의 틈새를 통한 누수를 모델링하여 펌핑 시스템에 적용하여 누수로 인한 손실이 에너지 낭비를 초래함을 정성적으로 분석하였다. 새로이 개발된 누수방지 자동탈착장치는 비교적 간단한 구조변경으로 기존의 자동탈착장치에 비하여 우수한 누수방지 효과를 볼 수 있었으며, 유동 손실도 크지 않음을 알 수 있었다. 연결부 힌지 (hinge)를 기준으로 펌프에 작용하는 모멘텀 성분을 분석하여 유량변화에 따른 토크변화량을 분석하였다. 저 유량 영역에서 헤드상승으로 인한 모멘텀의 변화로 펌프의 들림 현상이 발생할 여지가 많았으며 이로 인해 틈새가 발생하여 누수가 발생하므로 이에 대한 보완이 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Grundfos, 2002, *Grundfos Sarlin Pumps Catalog* (<http://www.grundfos.com>).
- (2) ITT Industries, 2002, *Flygt Submersible Pumps Catalog* (<http://www.flygt.com>).
- (3) AEA Technology, 2001, *CFX-TASCflow User Documentation*.
- (4) White, Frank M. 1979, *Fluid Mechanics*, McGRAW-HILL.