

점성이 높은 유체를 사용하는 펌프의 성능해석

김동주* · 노형운* · 서상호*

Pump Performance Analyses with High Viscous Fluids

Dong-Joo Kim*, Hyung-Woon Roh*, and Sang-Ho Suh*

Key Words: High viscous fluid (점성이 높은 유체), Pump performances (펌프 성능특성), Aqueous sugar solution (설탕 수용액), Glycerin solution (글리세린 수용액)

ABSTRACT

In this study the effects of fluid viscosity on the pump performances for a conventional centrifugal pump were experimentally investigated. The study aimed to compare the pump characteristics between water and viscosity fluids. In order to measure the flow rate and pressure, v-notch weir and bourdon pressure gauges were used for the codes of KS B6301 and KS B6302. The working fluids were water, aqueous sugar and glycerin solutions. The results were summarized as follows ; The experimental results were summarized as follows : the pump characteristics of the total head, shaft power, and efficiency with high viscosity fluids were different from those of water. When the viscosity of the applied fluid was increased, the total head and efficiency were more decreased than those of water. The decreasing gradients of the total head and the efficiency were larger than water due to the increased disk friction losses at the duty operation point. However, the shut-off head was almost constant regardless the viscosity of applied fluids. Each efficiency curves for the sugar 20w% and glycerin 20w% solutions was decreased up to 15.1% and 34.4% than that of water, respectively.

1. 서론

물용 원심펌프는 국내 대부분의 펌프제조업체에서 생산하고 있는 가장 보편적인 펌프의 한 종류이다. 원심펌프는 산업현장에서 많은 에너지를 사용하고 있는 펌프이므로 높은 효율의 펌프를 생산하기 위해서는 실험과 해석적 연구 등을 통해 기술향상이 이루어져야 한다. 그러나 국내에서는 펌프업체의 영세성으로 인하여 연구개발에 대한 투자가 원활하지 못한 것이 현실

이다. 원심펌프는 다른 유체기계에 비하여 생산단가가 낮아 연구개발에 대한 현실적인 투자의 어려움이 많다.

산업현장에서 펌프로 양수하는 유체는 흙탕물, 오수, 폐수, 펄프 등과 같이 고점성 유체가 많지만 현실적인 문제로 인하여 펌프성능해석은 청수를 사용한다. 고점성 유체를 이송하기 위한 특수펌프들이 많이 있지만 원심펌프도 자주 이용된다.

지금까지는 고점성 유체 관련 펌프성능시험은 작동 유체의 종류에 관계없이 청수로 시험한 뒤 HI 규격상의 수정방법으로 환산하여 고점성 유체에 대한 펌프성능특성을 파악하고 있다^(1,2). 그러나 해당규격에 제시된 유체는 점성계수의 범위가 10~3,300 cSt (40~15,000SSU)

* 숭실대학교 기계공학과

책임저자 E-mail : rohlee@yahoo.com

인 기름이기 때문에 오수나 폐수 등과 같은 유체의 성능시험자료는 반드시 필요하다. 고점성 유체의 성능은 실험으로 구하여야 하나, 실험하기에는 고가의 비용을 치러야 하므로 해당 규격을 그대로 이용하여 수정하는 방법을 사용한다. 또한, 적용된 유체마다 펌프성능특성이 달라지기 때문에 정확히 규격을 적용하기에는 무리가 있다.

HI규격이나 KS규격에 해당되지 않는 점성계수를 가지는 오수나 폐수 등과 같은 유체의 성능시험자료의 확보가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 점성이 다른 5가지 유체 즉, 물과 설탕물과 글리세린 수용액의 농도를 달리하여 각각 10%, 20%의 수용액으로 성능실험을 수행하여 점성유체를 이송하는 원심펌프의 성능특성의 변화를 연구하고자 하였고, 그때의 수정계수식을 제시하고자 하였다.

2. 작동유체의 특성과 펌프성능 실험방법

2.1 점성계수에 의한 펌프 특성의 변화

원심펌프로 점성유체를 수송할 경우에는 유체의 점성계수가 증가함에 따라 원판 마찰손실이 많아질 뿐만 아니라, 임펠러 및 케이싱내 유체 마찰손실도 증가한다. 이 원판 마찰손실에 의하여 축동력은 증가하고 유로의 마찰손실로 펌프의 전양정은 감소하기 때문에 펌프 효율은 당연히 저하된다. Stepanoff의 연구에 따라 기름을 사용한 원심펌프의 성능실험 결과를 정리하면 대략 다음과 같다.⁽³⁾

일정 회전속도에 있어서는 점성계수가 증가함에 따라 토출량, 양정은 감소한다. 유체의 점성계수를 변경하였을 때 점성계수가 높아짐에 따라서, 양정이 감소하나 차단양정은 변하지 않는다. 따라서 점성계수가 높아짐에 따라서 유량-양정곡선은 구배가 커진다. 또한, 유체의 점성계수의 증가에 따른 펌프 축동력의 증가 비율은 꽤 넓은 유량의 범위에 걸쳐 대략 같은 양만큼 더하고 있는 것으로 보아, 이 축동력의 증가는 유체의 점성계수에 의한 임펠러의 원판 마찰손실의 증가에 기인하는 것이라는 것을 알 수 있다.

2.2 작동유체의 점성계수와 비중 측정

본 연구에서 적용한 작동유체는 상온에서의 물, 설탕물, 그리고 글리세린이다. 본 실험을 위해서 이들 유

Table 1 Values of viscosities and specific gravities for the applied fluids

	Aqueous sugar solution		Glycerin solution	
	viscosity (Pa · s)	specific gravity	viscosity (Pa · s)	specific gravity
10w%	0.00123	1.036	0.0015	1.023
20w%	0.00171	1.085	0.0028	1.048
30w%	0.00277	1.128		

체를 선정하게 된 이유는 오수와 폐수가 뉴턴유체(Newtonian fluid)이기 때문에 이에 대한 특성을 농도에 따라 손쉽게 유동특성을 살펴볼 수 있고 주위에서 쉽게 구할 수 있는 유체로서 비뉴턴유체(non-Newtonian fluid)의 특성을 연구하기 전에 먼저 고점성의 효과를 살펴볼 수 있기 때문이다. 설탕물과 글리세린 수용액은 주위에서 쉽게 구할 수 있는 유체로서 비뉴턴유체의 특성을 연구하기 전에 고점성의 효과를 살펴볼 수 있는 뉴턴유체들이다. 본 연구에서는 10 w%~30w%의 설탕물과 글리세린을 만들어 콘/플레이트 (cone/plate)점도계를 사용하여 Table 1과 같이 점성계수를 측정하였다. 이들 유체들은 농도가 증가함에 따라 점성계수가 비선형적으로 증가하는 점성유체의 특성을 가지고 있다. 또한, 점성계수뿐만 아니라 비중 또한 중요한 인자이다. 비중은 비중계를 이용하여 측정하였다⁽⁴⁾.

Table 1에 정리된 내용을 검토하여 보면 점성계수의 크기는 글리세린 20w% 수용액의 점성계수가 제일 크고 설탕물 20w% 수용액, 글리세린 10w% 수용액, 설탕물 10w% 수용액, 그리고 청수의 순서이다. 글리세린 20w% 수용액과 설탕물 30w% 수용액의 점성계수는 동일하게 나타났다. 이때 w%는 중량 퍼센트를 나타낸다.

2.3 실험

고점성 유체의 펌프특성을 실험하기 위하여 선정한 펌프는 Table 2에 제시된 바와 같으며, 성능시험은 Fig. 1과 같은 실험장치를 이용하여 수행하였다. 실험을 위한 상류와 하류의 배관은 각각 흡입 및 송출 구경의 4배가 되는 직관을 설치하여 물의 흐름을 안정되게 하였으며 플랜지 측면으로부터 구경의 2배되는 지

점에 압력측정용 구멍을 뚫고 부르동관식 압력계와 진공계를 평면에 대해 수직으로 설치하였다. 정확한 유량을 측정하기 위해서는 오리피스나 노즐과 같은 차압식 유량계를 이용하여야 한다.

Table 2 Specifications of the applied pump and motor

Specification		Value
Pump	Capacity	0.12 m ³ /min
	Head	11.5 m
	Inlet diameter	150 mm
	Impeller diameter	169 mm
Motor	Power	0.75 kW
	Voltage	380 V (3 ϕ)
	Pole	4
	Frequency	60 Hz

하수처리장 등과 같이 산업현장에서 많이 취급되는 흙탕물은 실험시 침전이 되기 때문에 웨어 (weir)를 사용하여 유량을 정확히 측정하기 어렵다. 그러나 흙탕물이나 설탕물과 같은 점성유체를 사용할 때 정확한 오리피스와 노즐 유량계의 유량계수를 구하는 것도 또 하나의 연구과제이다. 따라서 본 연구에서는 송출유량을 측정하기 위하여 일반적으로 펌프실험에서 많이 사용되고 있는 직각삼각위어 (V-notch weir)를 이용하였다.

실험시 실험장치에서 유체를 교체하여 송출량의 변화에 따른 전압정, 축동력, 펌프의 효율, 흡입양정 그리고 송출양정을 측정하였다. 펌프의 성능시험은 KS B 6301 원심펌프, 사류펌프 및 축류펌프의 시험 및 검사 방법과 KS B 6302 펌프 송출유량 측정방식에 의하여 상온에서 수행하였다. 송출부에 부착된 밸브를 차단상태에서부터 밸브를 단계적으로 개방하면서 차단점으로

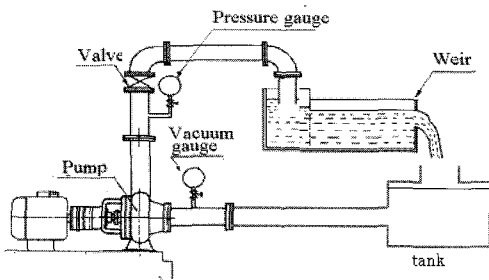


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

부터 각각의 송출유량에 대한 송출압력과 흡입압력, 축동력 및 회전수를 측정하였다. 본 실험의 결과는 최소 5번 이상 수행한 값을 평균값으로 나타내었기 때문에 실험오차를 거의 줄여 주었다.

3. 결과 및 검토

점성유체의 펌프성능특성변화를 살펴보기 위하여 유량에 따른 Table 1에서 측정된 것과 같이 청수, 설탕물 수용액, 글리세린 수용액의 유량에 따른 양정변화를 Fig. 2와 같이 나타내었다. Fig. 2에서 청수인 경우 사용된 펌프의 최대 효율에서 제시된 정격양정 (11.5 m)과 정격유량 (0.12 m³/min)과 비교하여 볼 때 11.3 m와 0.117 m³/min로서 거의 유사하게 나왔다.

이로부터 본 실험결과의 타당성을 검토하였다. 제 2장에서도 설명하였듯이 점성유체를 이용하여 실험하는 방법은 여러 가지 방법이 있지만 본 실험은 회전속도를 일정하게 하는 방법을 택하였다. 점성계수가 다른 유체를 실험할 경우 Stepanoff는 점성계수가 높아짐에 따라 차단양정은 변하지 않지만 유량이 증가함에 따라 양정이 감소하면서 그 유량-양정곡선은 구배가 급해진다고 하였다. 이러한 결과는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 Stepanoff의 결과와 정성적인 경향이 일치함을 알 수 있었다.

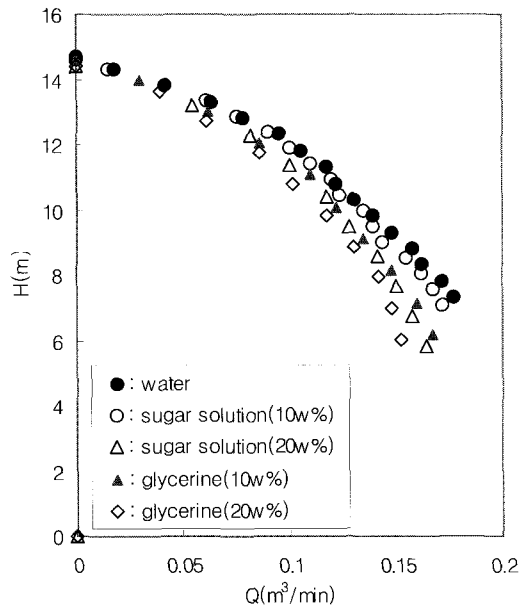


Fig. 2 H-Q curves for different viscous fluid

Table 3 Viscosity and head reduction ratios for the applied fluid (unit : SSU, %)

	Viscosity (SSU)	Head ratio (%)
Water	4.550	100.0 %
Sugar 10w% solution	5.402	94.5 %
Glycerine 10w% solution	6.665	87.3 %
Sugar 20w% solution	7.171	84.8 %
Glycerine 20w% solution	12.156	74.9 %

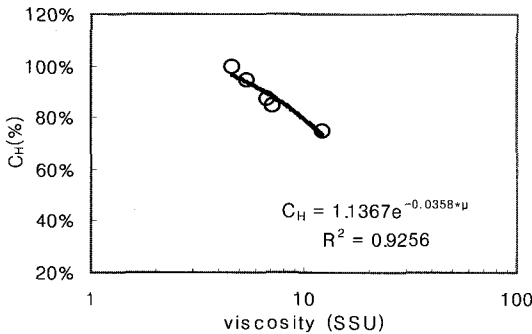


Fig. 3 Head correction factor with varied viscosity

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 차단양정에서 양정이 비슷하게 나온 이유는 토출밸브가 잠겨져 있으므로 펌프는 유체를 수송하려고 하는 압력만 작용하기 때문에 유동의 영향이 없기 때문이다. 그러나 이때 각 유체마다 작용하는 압력은 적용된 유체의 비중만큼 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 이때 적용된 유체의 비중은 각각 Table 1과 같으므로 이 값들을 가지고 각 토출압력 ($H_o = p_d / \gamma$)으로 나누어주기 때문에 차단양정은 동일해진다. 유량이 증가함에 따라 각 유체의 양정은 감소하기 시작한다. 감소 폭은 점성계수가 클수록 더 심하게 나타나는데 이러한 경향은 Table 3에서 볼 수 있다. Table 3은 청수의 정격유량을 기준으로 보았을 때 점성유체를 이용할 때 강해지는 양정의 비를 나타낸 것이다. Table 3에서 볼 수 있듯이 정격양정에서 양정 강하는 점성계수가 증가함에 따라 일정한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 적용한 유체 중 점성계수가 가장 큰 글리세린 20w% 수용액의 경우는 청수보다 75%만큼만 압상하고 있음을 알 수 있다.

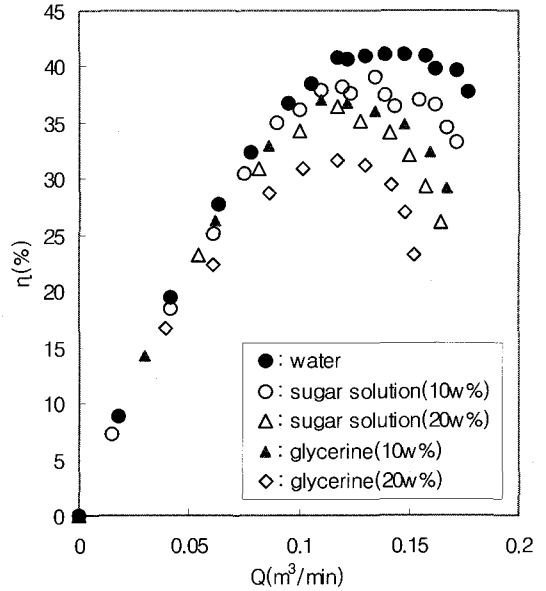


Fig. 4 η -Q curves for different viscous fluid

Table 3에 점성계수의 단위를 SSU (Saybolt Second Universal)으로 나타낸 것은 관련규격과 비교하기 위함이다. 이를 동점성계수인 cSt의 계수로 환산하여 주기 위해서는 Table 3의 값에다 환산계수인 4.550을 나누어주면 된다.

이러한 경향을 다른 점성계수를 갖는 유체에도 적용하기 위하여 Fig. 3과 같이 양정수정계수를 구하였다. Fig. 3과 같은 양정수정계수는 점성계수가 증가함에 따라 서서히 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉 청수의 점성계수가 4.550SSU일 때 100%로부터 글리세린 20w%인 경우에는 74.93%로 감소되었다. 이러한 수정계수는 HI규격이나 KS규격에서 나온 것과는 다르다.

본 연구에서 적용된 유체는 관련규격에서 제시된 점성계수의 범위 (10~3,300 cSt)에 해당되지 않기 때문이다. 계산된 결정계수 (coefficient of determination, R^2)가 Fig. 3에서 보듯이 92.5%로서 비교적 실험자료와 정확한 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

점성유체의 펌프성능특성변화를 정확하게 살펴보기 위하여 Fig. 4와 같이 청수, 설탕물 수용액과 글리세린 수용액의 유량에 따른 효율변화를 나타내었다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 양정의 차이 때문에 점성계수가 증가함에 따라 효율에서 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 점성계수가 커짐에 따라 효율이 감소하는 이유는 양정이 크게 감소하였기 때문이다. 유량이 증가하

Table 4 Viscosity and efficiency ratios for the applied fluid (unit : SSU, %)

	viscosity (SSU)	efficiency ratio (%)
water	4.550	100.0
sugar 10w% solution	5.402	89.3
glycerine 10w% solution	6.665	85.0
sugar 20w% solution	7.171	80.3
glycerine 20w% solution	12.156	65.7

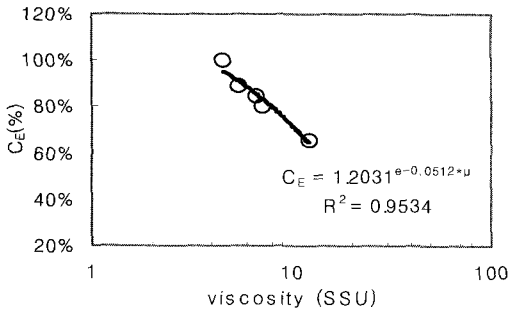


Fig. 5 Efficiency correction factor with varied viscosity

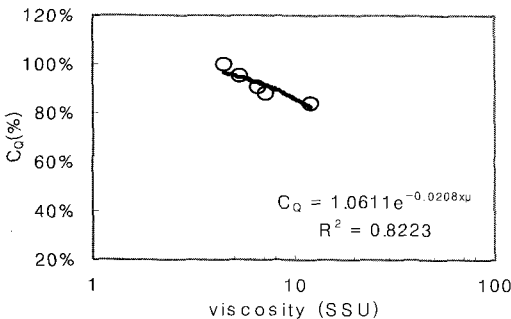


Fig. 6 Capacity correction factor with varied viscosity

면서 최대유량의 1/3 지점까지는 효율의 큰 차이는 없지만 유량이 계속 증가함에 따라 점성으로 인한 임펠러의 마찰손실의 증가로 인하여 효율이 떨어지기 시작하여 Table 4와 같이 정격점에서 글리세린 20% 수용액인 경우는 청수보다 약 34%나 효율이 떨어짐을 알 수 있다. 이와 같은 효율강하량을 해석하기 위하여 Fig. 5와 같이 효율수정계수곡선을 구하였다.

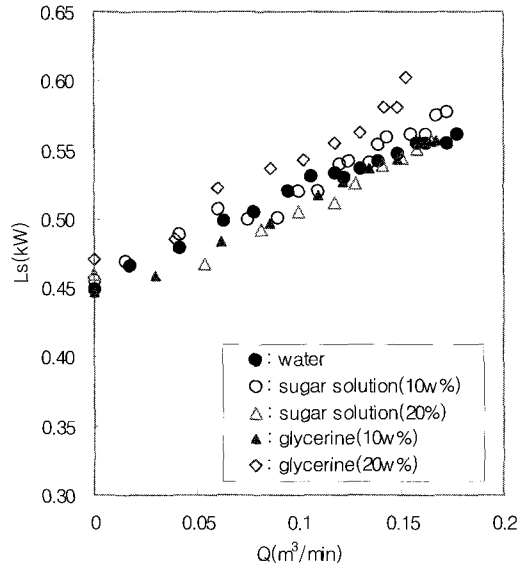


Fig. 7 Ls-Q curves for different viscous fluid

Fig. 5에서 보듯이 결정계수, R^2 가 95%로 근사한 상호관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 같은 방법으로 Fig. 6과 같이 유량수정계수 ($R^2=82\%$) 곡선을 구하였다.

이 3가지 곡선들은 점성계수가 증가함에 따라 감소하고 있으며 이들을 곡선적합 (curve fitting)하여 구하면 각각 아래의 식과 같다.

$$C_{\mu} = 1.1367 e^{-0.0358 \mu} \quad (1)$$

$$C_{\eta} = 1.2031 e^{-0.0512 \mu} \quad (2)$$

$$C_Q = 1.0611 e^{-0.0208 \mu} \quad (3)$$

점성유체에 관한 펌프성능을 해석할 때 양정과 효율만 고려하는 것이 아니라 동력 또한 고려해야 할 인자이다. 그러나 Fig. 7에 있는 동력곡선을 살펴보았을 때 점성계수의 변화에 따라 양정의 변화와 달리 동력 변화의 경향은 일정하지 않을 뿐더러 별 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 적용된 유체의 점성변화와 비중 변화의 폭이 비교적 작기 때문이라 판단된다. 이때 KS B 6301에서 제시된 수식을 이용하여 축동력을 계산할 때 모터의 효율과 역률은 각각 0.75와 0.7로 하였다. 수정동력계수식을 구하기 위하여 Fig. 7의 자료를 이용하여야 하지만 일정한 경향이 없고 그 변화가 미미

하므로 주어진 자료로부터 상관관계를 구하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3, Fig. 5와 Fig. 6의 양정, 효율과 유량관계에서 얻어낸 식 (1)~(3)을 이용하여 식 (4)로부터 새로운 수정 동력계수식을 아래와 같이 구하였다.

이 식 (4)는 HI규격이나 KS 규격에 제시된 수식을 정리하여 나타낸 것이다. 식 (4)에 Fig. 3, Fig. 5와 Fig. 6으로부터 구한 (1)~(3)을 각각 대입하여 정리하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_v &= C_Q \times Q_w \quad (m^3 / \text{min}) \\ H_v &= C_H \times H_w \quad (m) \\ \eta_v &= C_E \times \eta_w \\ L_v &= \frac{0.163 \times Q_v \times H_v \times \gamma}{\eta_v} \quad (kW) \end{aligned} \quad (4)$$

$$L_v = \frac{C_Q \times C_H}{C_E} \times L_w \quad (kW) \quad (5)$$

식 (5)에 있는 수정계수들의 곱은 지수식으로 나타낼 수 있으며 점성계수 μ 의 함수임을 알 수 있다. 따라서 4가지의 식으로부터 점성 유체의 성능을 예측할 수 있을 것이다.

제시된 수정곡선식은 설탕물과 글리세린과 같이 수용액인 경우에는 적용이 가능하다. 하수처리장이나 오수처리장에서 사용되는 펌프는 비속도가 같은 경우라면 이 결과식의 적용이 가능하다고 판단된다. 그러나 거친 모래나 자갈과 같은 유체에서는 적용하기가 어렵다.

4. 결론

점성이 높은 유체를 사용할 때 달라지는 펌프의 특성곡선을 살펴보기 위한 기초실험으로써 얻은 결과는 다음과 같다. 회전속도를 일정하게 하고 점성계수가

다른 유체를 실험한 경우 점성계수가 높아짐에 따라 차단양정은 변하지 않지만 유량이 증가함에 따라 양정이 감소하면서 그 유량-양정곡선의 구배가 커짐을 확인하였다. 또한 이에 따른 동력 또한 원판마찰 손실로 인하여 증가하기 때문에 효율은 점성계수가 증가함에 따라 감소하였다.

본 결과는 KS규격과 HI규격에 있는 성능수정선도 내 점성계수 범위에 해당되지 않기 때문에 성능수정곡선을 검증하지 못하고 새로운 수정식을 제시하였다.

이렇게 제시된 수정곡선식을 HI 규격이나 KS규격에서 제시된 점성계수의 범위에서 벗어나는 경우에 대해 펌프성능을 수정할 수 있을 것이라 판단된다. 향후 연구로써 흙탕물과 같이 침전이 있는 유체를 이송할 때의 펌프성능실험을 Yatesmeter와 차압식 유량계와 같은 신뢰성이 있는 장비를 이용하고 유량변화와 점도변화를 동시에 고려한 실험을 수행할 계획이다.

후 기

이 연구는 숭실대학교 2003년 교내학술연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) KS B 6306, 1995, 기름용 원심펌프의 시험 검사방법, 한국공업표준협회.
- (2) ポンプ便覧, 6 ed., 1986, 株式会社西島製作所, pp. 54~56.
- (3) 김진섭 역 4판, 1988 화학기계용 펌프, 성안당
- (4) 서상호, 조민태, 유상신, 2000, “모세관내 비정상유동 개념을 이용한 비뉴턴유체 및 혈액의 점도측정”, 한국유체공학학술대회, pp. 487~490.