

## 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 원심펌프성능특성 비교

김동주\* · 노형운\*\* · 서상호\*

### Comparison of Centrifugal Pump Performances for Newtonian and Non-Newtonian Fluids

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

*Key Words* : Pump Performances(펌프성능), Newtonian and Non-Newtonian Fluid(뉴턴유체와 비뉴턴유체), Centrifugal Pump(원심펌프)

#### ABSTRACT

In the current study the effects on pump performances of a conventional centrifugal pump for Newtonian and non-Newtonian fluid were experimentally studied. The study aimed to compare the pump characteristics for Newtonian and non-Newtonian fluid. The working fluids are water, aqueous sugar solution, glycerin solution, muddy solution and pulp solution. The pump characteristics with high viscosity fluids were different. The operating efficiency for the sugar and glycerin solutions were decreased to 8.1% and 12.9% than that of water. The head reductions of the muddy solution for different concentration ratios were decreased to 7.97%, 15.11% and 24.87% than that of water. And the head reductions of the pulp solution for different concentration ratios were decreased to 11.87%, 19.79% and 36.81% than that of water.

#### 1. 서론

원심펌프는 산업현장에서 많이 사용되는 보편적인 펌프의 한 종류이다. 산업현장에서 펌프로 양수되는 유체는 시수나 지하수와 같은 뉴턴유체뿐만 아니라 흙탕물, 오수, 펄프 등과 같은 뉴턴유체와 비뉴턴유체가 있다. 산업용으로 사용되는 펌프를 선정하기 위해서는 용수의 특성을 고려한 펌프성능 시험자료가 반드시 필요하다. 그러나 펌프 성능해석은 청수를 사용하여 구하고, 고점성유체의 경우에는 청수로 실험한 성능 자료를 HI규격상의 수정방법으로 환산한 자료값을 이용한다. 이 규격상의 자료는 점성이 매우 높은(약 10cP~2200cP) 벙커 C유인 고점성 유체를 이용하여 수정

도표의 이용이 가능하나, 보편적으로 산업현장에서 사용되는 고점성 유체의 점도는 물(1cP)보다 점성이 높지만 벙커 C유 보다는 작기 때문에 성능 자료값을 환산시켜주기 위한 수정도표의 사용이 불가능하다. 또한, 흙탕물, 펄프액 등과 같은 비뉴턴유체의 특성을 갖는 용수에는 성능자료 값을 환산하는 방법이 아직 없다.

따라서 점성이 물보다 큰 점성계수를 갖는 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 펌프성능은 청수로 기준하여 실험적으로 구하거나 뉴턴유체로 간주하여 HI규격상의 수정방법을 이용하여 펌프성능특성을 구하고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 배경에서 점성이 다른 뉴턴유체와 비뉴턴유체를 이용하는 원심펌프의 성능에 미치는 변화를 연구하고자 하였으며, 산업현장에서 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 경우 펌프성능을 계산할 때 참조할 수 있는 성능환산 수정식을 제시하고자 하였다.

\* 숭실대학교 기계공학과

E-mail : kimdongjoo@yahoo.com

\*\* IVAI Consulting

## 2. 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 유동

### 2.1 뉴턴유체와 비뉴턴유체의 구분

뉴턴유체와 비뉴턴유체는 Fig. 1과 같이 산업현장에서 취급되는 유체이다. Table 1과 같이 뉴턴유체 중에는 기름, 약액 등과 같이 점도가 청수보다 높거나, 부식성이 있는 특수한 유체가 있고, 비뉴턴유체 중에는 빙엄유체, 고체 미립자가 액체 중에 분산하여 전체적으로는 균일한 액체라고 간주할 수 있는 슬러리(slurry), 또는 균일하지는 않지만 그 유동상태가 비슷하여 비뉴턴유체와 뉴턴유체의 간단한 조합인 이상유동이라 간주할 수 있는 종이 펄프액(종이 펄프가 수중에 분산된 것) 등이 포함된다.

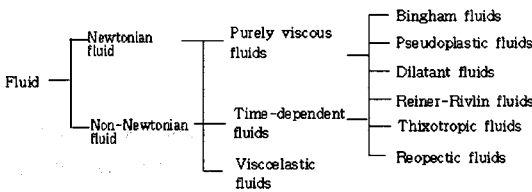


Fig. 1 Fluid classification for Newtonian and non-Newtonian fluids

Table 1 Fluids for industrial applications

Classification	Fluid
Newtonian fluid	Water, Oil, Hydrocarbon solution, Drug solution
Bingham fluid	Muddy solution, Asphalt, Paint
Pseudoplastic fluid	Polymer solution, Starch, Fiber, Ester., Glass fiber solution
Dilatant fluid	Starch solution, Solution with mica, Mixture solution with sand and water

### 2.2 뉴턴유체와 비뉴턴유체가 펌프성능에 미치는 영향

원심펌프로 고점성유체를 수송할 경우에는 액체의 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 따

라 원심펌프를 사용한 기름의 성능실험 결과 일반적인 경향을 정리한다면 대략 다음과 같다<sup>(3)</sup>.

(i) 회전속도를 변경하여 실험하면 어떠한 점성계수 일지라도 펌프의 사상법칙은 일단 성립하나, 청수의 경우만큼 정확하지는 않다. 즉 회전속도를 변경하면 토출량은 속도의 변화에 비례하고 양정은 대략 속도의 2제곱에 비례하여 변한다. 축동력은 속도가 빨라지면 속도의 3제곱에 비례한 값보다는 약간 적은 값을 나타내고 있으며, 펌프효율은 속도가 빨라질수록 좋아지는 경향이 있는 듯하다. 또 회전속도를 여러 가지로 변경하였을 때의 각 최고 효율에서의 비속도는 대략 일정한 값을 가지고 있다.

(ii) 일정 회전속도에 있어서는 점성계수가 증가함에 따라 토출량, 양정은 감소하나 다른 점성계수의 용액에 대한 최고 효율점에서의 비속도의 값은 대략 일정한 값을 보이고 있다. 지금 일정 회전속도  $N$ 으로 펌프를 작동시켜 다른 점성계수를 가진 두가지 작동유체에 관하여 실험하였을 때 각각의 최고 효율점에 있어서의 토출량과 양정을  $Q_1, H_1$  및  $Q_2, H_2$  로 하면 비속도  $N_s$ 에 대하여서도 근사값으로 계산할 수 있다.

$$N_s = N \frac{Q_1^{1/2}}{H_1^{3/4}} = N \frac{Q_2^{1/2}}{H_2^{3/4}} \quad (1)$$

여기에서 작동유체의 토출량과 양정사이에는

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^{3/2} \quad (2)$$

의 관계가 성립하고 이 관계식은 어떤 유체의 실험결과와 점성계수가 다른 유체의 펌프성능을 추정할 경우에 매우 중요한 식이 된다.

(iii) 회전속도는 일정하게 하고 액체의 점성계수를 변경하였을 때 점성계수가 높아짐에 따라서, 양정이 감소하나 차단양정은 변하지 않는다. 따라서 점성계수가 높아짐에 따라서 유량-양정곡선은 구배가 급해진다.

(iv) 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.

### 3. 작동유체의 점성계수와 비중 측정

본 연구에서는 점도변화에 따른 성능특성을 분석하기 위한 연구의 범위를 점도가 작고 균일한 뉴턴유체인 설탕수용액 및 글리세린수용액과 비뉴턴유체인 효탕물과 펄프수용액을 작동유체로 선택하였다.

뉴턴유체인 설탕수용액은 S사 제품의 설탕(정백당=순도 99.8%)을 청수와 혼합하여 중량농도 10w%와 20w%의 설탕수용액을 만들었으며, 글리세린은 I 화학제품의 글리세린(공업용=순도 94.4%)을 청수와 혼합하여 중량농도 10w% 및 20w%의 글리세린수용액을 만들었다.

비뉴턴유체인 효탕물은 S사의 황토를 이용하여 중량농도 10w%, 20w%, 30w%의 효탕물을 제조하였으며, 펄프수용액은 M사의 화장실용 휴지를 이용하여 천연펄프수용액을 만들었다. 펄프수용액인 경우에는 농도를 크게 하면 펄핑이 되지 않기 때문에 중량농도비를 1.0w%, 2.0w%, 3.0w%로 변화시켜주었다. 이때 실험용 작동유체에 대한 각각의 성질들을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Fluid properties of the working fluids

Properties Working fluid	Specific weight	Viscosity	Remarks
Sugar 10w% solution	1.039	1.23 cP	Newtonian fluid
Sugar 20w% solution	1.083	1.71 cP	
Glycerin 10w% solution	1.023	1.56 cP	
Glycerin 20w% solution	1.048	2.82 cP	
Muddy 10w% solution	1.038	non-Newtonian fluid	
Muddy 20w% solution	1.067		
Muddy 30w% solution	1.135		
Pulp 1w% solution	1.008		
Pulp 2w% solution	1.014		
Pulp 3w% solution	1.025		

Table 3 Specification of the applied pump and motor

Specification		Value
pump	Capacity	0.12 m <sup>3</sup> /min
	Head	11.5 m
	Inlet diameter	40 mm
	Impeller diameter	169 mm
Motor	Power	0.75 kW
	Voltage	380 V (3 ϕ)
	Pole	4
	Frequency	60 Hz

### 4. 실험장치와 실험방법

뉴턴유체와 비뉴턴유체의 펌프특성변화를 실험적으로 연구하기 위하여 선정된 펌프는 Table 3에 제시된 바와 같으며, 성능시험은 Fig. 2와 같은 실험 장치를 이용하여 수행하였다. 실험을 위한 상류와 하류의 배관은 각각 흡입 및 송출구경의 4배가 되는 직관을 설치하여 물의 흐름을 안정되게 하였으며 플랜지측면으로부터 구경의 2배되는 지점에 압력측정용 구멍을 뚫고 부르동관식 압력계와 진공계를 평면에 대해 수직으로 설치하였다.

본 연구에서는 상온상태의 청수와 Table 2에 나타난 것과 같은 작동유체를 대상으로 하여 토출압력의 변화에 따른 펌프의 토출유량, 전양정, 축동력을 측정하였다. 펌프의 성능시험은 KS B 6301 "원심펌프, 사류펌프 및 축류펌프의 시험 및 검사방법"과 KS B 6302 "펌프 토출량 측정방법"에 의하여 상온(20℃)에서 수행하였다. 토출배관에 설치된 밸브를 차단상태에서부터 단계적으로 개방하는 방법으로 차단점에서부터 1.5kg/cm<sup>2</sup>에서 차례로 줄여가면서 토출유량, 전양정,

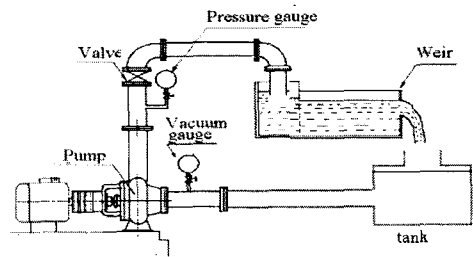


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

축동력을 측정하였다. 작동유체의 비중측정은 눈금액체비중계를 사용하여 측정하였으며, 점도측정은 cone/plate 점도계를 사용하여 Spindle 40, rpm=10-100rpm으로 하여 점도를 측정하였다.

## 5. 결과 및 검토

### 5.1 뉴턴유체의 원심펌프 성능특성

본 연구에서 펌프의 성능에 직접적인 영향을 미치는 비중, 농도, 점도 등의 변화에 따른 성능실험을 실험적으로 해석한 결과 점성계수가 높은 뉴턴유체의 경우는 펌프특성은 청수의 결과와 다름을 알 수 있다. 적용유체의 점성계수가 증가됨에 따라 운전점에서의 전압정과 효율은 청수의 결과보다 좀 더 감소하였고, 증가된 원판마찰손실 때문에 감소구배 또한 좀 더 커졌다. 그러나 차단양정은 적용된 유체의 점성계수에 상관없이 일정함을 알 수 있었다. 설탕물 20w%수용액과 글리세린 20w%의 효율곡선에서 작동점의 효율이 청수의 결과보다 각각 15.1%과 34.4% 감소하였음을 알 수 있었다<sup>(6)</sup>.

본 연구에서는 선행결과의 효율과 유량관계에서 얻어낸 관계식을 이용하여 식 (3)과 식 (4)으로부터 새로운 수정 동력계수식을 식 (5)와 같이 구하였다<sup>(6)</sup>.

이 식 (3)-(5)는 HI규격이나 KS 규격에 제시된 수식을 정리하여 나타낸 것이다.

$$C_H = 1.1367 e^{-0.0358 \mu} \quad (3)$$

$$C_E = 1.2031 e^{-0.0512 \mu} \quad (4)$$

$$C_Q = 1.0611 e^{-0.0208 \mu} \quad (5)$$

식 (5)에 있는 수정계수들의 곱은 지수식으로 나타낼 수 있으며 점성계수  $\mu$ 의 함수임을 알 수 있다.

이렇게 제시된 수정곡선식은 HI 규격이나 KS규격에서 제시된 점성계수의 범위에서 벗어나는 경우에 대해 펌프성능을 수정할 수 있을 것이라 판단된다.

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

### 5.2 비뉴턴유체의 원심펌프 성능특성

작동유체가 뉴턴유체인 경우에는 비중과 점도변화에 따른 성능변화만 나타나게 되므로 HI규격으로 환산이 가능하다 할 수 있으나, 흙탕물이나 펄프와 같이 비 뉴턴유체의 경우에는 이송하는 유체 중에 고체입자가 침전 또는 부유하고 있기 때문에 그 농도에 의해서 펌프의 성능이 변화하게 된다. 농도가 증가하면 비중이 점점 커져서 임펠러는 유체에 압력에너지와 운동에너지를 주지만 유체 중에 있는 고체입자는 압력에너지를 전달할 수 없기 때문에 단지 운동에너지만을 임펠러로부터 받는다. 그러나 고체입자가 갖는 운동에너지는 압력에너지로 전환되지 않고 대부분 소비된다. 따라서 고체입자를 펌프로 이송하는 경우 유체는 임펠러로부터 받은 에너지의 일부를 소비하여 고체입자를 이송하게 된다. 그러므로 고체입자를 포함하는 경우에는 유체만을 이송하는 경우에 비해 수력손실이 증가하여 펌프의 성능이 저하된다. 그 성능저하의 정도는 농도 외에 고형물체의 종류 및 입도의 분포에 따라서 달라진다. 또한, 그 변화의 경향은 다양해서 일반적으로 설명하기는 매우 어렵다.

Fig. 3과 Fig. 4는 비뉴턴유체인 흙탕물과 펄프수용액의 농도를 변화시켰을 경우 양정의 변화를 실험적인 방법으로 구하여 나타낸 그림이다. 그림은 농도를 변화시켰을 때 양정의 변화를 청수의 경우와 상호 비교하기 위해서 토출유량을 가로축에 전압정을 세로축으로 하여 나타내었다.

뉴턴유체의 결과와 같이 청수의 결과와 비뉴턴유체인 흙탕물과 펄프수용액의 비중이 각각 서로 달라서 토출압력이 다르게 나타난다. 그러나 비중변화에 따른 성능특성에서 설명하였듯이 토출압력은 작동유체의 비중배(比重倍)로 작용하므로 토출압력을 가가의 비중량으로 나누어( $H_o = P_d/\gamma$ )주기 때문에 동일하게 된다. 양정의 변화는 Figs. 3, 4와 같이 차단점(Shut-off point)에서는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이것은 토출축의 밸브가 닫혀있어 펌프가 작동유체를 이송하려는 압력만 작용하고 유동의 영향이 없기 때문이다. 그러나 차단점으로부터 유량이 증가함에 따라서 양정은 다른 형태의 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 흙탕물의 경우는 청수와 유사한 형태로 감소하다가 최대토출유량의 약 30%인 지점부터 감소하는 폭이 크게 나타나면서 양정의 줄어드는 폭이 점점 더 커지고 있

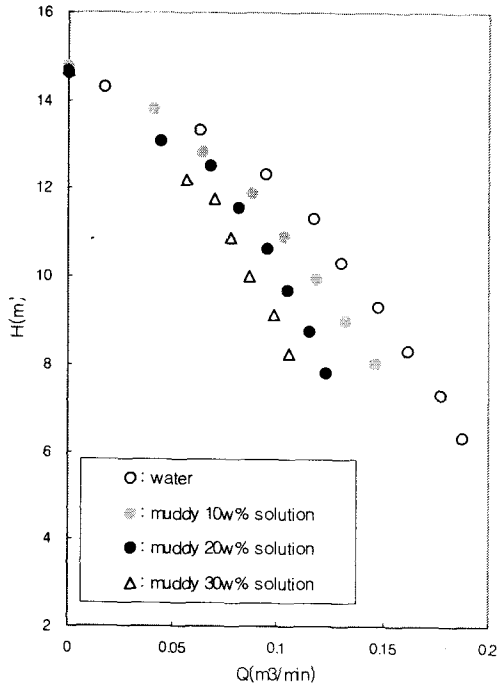


Fig. 3 H-Q curves for the muddy solution with different concentrations (muddy solution)

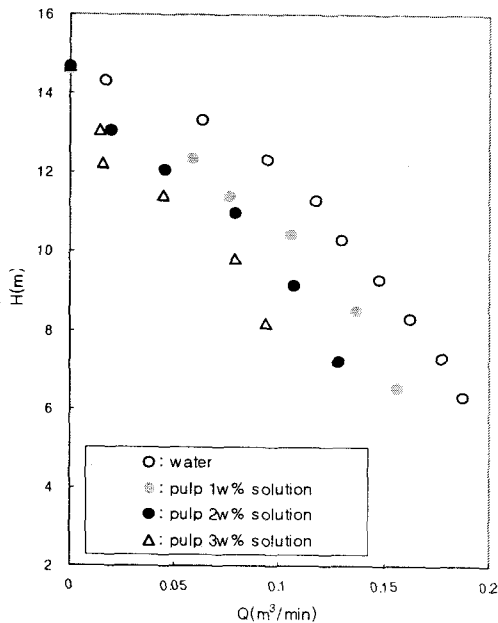


Fig. 4 H-Q curves for the pulp solution with different concentrations (pulp solution)

음을 알 수 있으며, 그 차이는 농도가 커질수록 더 심한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 펄프 수용액인 경우는 유량이 적은 부분의 양정이 유량이 큰 부분보다 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 농도의 상관없이 같게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 흙탕물과 펄프액 모두 뉴턴유체와는 다른 특성을 가지고 있기 때문이다. 즉, 흙탕물의 경우는 고형물을 가지고 있지만 항복응력을 가지고 있는 빙엄유체의 성질을 나타내고 있다. 따라서 펌프의 압력이 흙탕물의 항복응력보다 크게 작용하기 때문에 뉴턴유체와 유사한 경향을 나타내고 있다. 반면에 펄프액은 전단율에 따라 점성계수가 줄어드는 의소성유체의 특성과 빙엄유체의 성질을 모두 가지고 있기 때문이다. 펄프액의 농도가 높으면 높을수록 유동성이 나쁘고 흡입관의 마찰손실이 커서 충분한 압입높이를 주지 않으면 펌프 흡입구의 압력이 저하하여 섬유 사이에 들어있는 공기가 팽창하여 임펠러 입구를 막아 흐름이 단속적으로 되기 때문이다. 이런 현상은 유량이 적은 부분에서 토출량이 저감하는 경향을 나타내거나, 갑자기 토출량이 격감하고 임펠러 입구가 저압으로 되어 흐름이 끊어지기 때문이다.

이러한 상황은 펌프의 캐비테이션에 의한 성능저하와 비슷하며 저농도의 유체에서는 흡입압력의 저하와 함께 토출량은 서서히 감소하여 가고 최후에는 급격히 감소하여 양액 불능이 된다. 따라서 본 실험에서, 4%의 이상의 고농도의 액에서는 흡입 압력의 저하로 인하여 토출량은 점감하는 경향은 보이면서 양액 불능의 상태가 되어 실험을 할 수가 없었다.

따라서 이 두 가지 유체를 같이 비교하기에는 무리가 있다. 따라서 최대 효율점에서 Table 4와 Table 5와 같이 각각 두 유체의 점도가 높은 순서로 양정의 강하 비를 나타내었다. Table 4와 Table 5는 뉴턴유체와 같이 청수의 정격유량을 기준으로 하여 흙탕물과 펄프수용액의 강하되는 양정의 비를 나타낸 것이다. 또한, 비뉴턴유체는 전단율에 따라 점성계수가 변화하기 때문에 최대 효율점에서 점성계수를 구하는 것이 큰 관건이다. 따라서 식 (6)을 이용하여 유속에 따른 전단응력을 구하는 것이 일반적이다.

$$\dot{\gamma} = \frac{8V}{D} = 10.19 \frac{Q}{D^3} \quad (6)$$

Table 4 Viscosity and head reduction ratios for the muddy solutions

	Viscosity(cP)	Head ratio(%)
Water	1.0 cP	100.0 %
muddy 10w% solution	$0.0033\gamma^{-0.1698}$	92.03%
muddy 20w% solution	$0.0042\gamma^{-0.157}$	84.89%
muddy 30w% solution	$0.0331\gamma^{-0.3729}$	75.13%

Table 5 Viscosity and head reduction ratios for the pulp solutions

	Viscosity(cP)	Head ratio(%)
Water	1.0 cP	100.0 %
pulp 1.0w% solution	$0.4707\gamma^{-0.8839}$	88.13%
pulp 2.0w% solution	$0.8249\gamma^{-0.9065}$	80.21%
pulp 3.0w% solution	$2.061\gamma^{-1.0556}$	63.19%

Table 4와 같이 운전점(Q=0.09m<sup>3</sup>/min, H=11.5m)에서 흙탕물의 양정의 감소폭을 자세히 살펴보면 청수에 비하여 농도가 10%의 경우 92.03%, 20%인 경우 84.89%, 30%인 경우 75.13%로 나타났다. 따라서 청수로 시험한 경우에 대하여 각각 7.96%, 15.10%와 24.87% 더한 보정 값이 필요함을 알 수 있다. 이러한 결과는 Table 5와 같이 펄프수용액의 경우와도 유사하게 나타남을 알 수 있다. 펄프액의 보정치는 1%의 경우가 11.87%, 2%가 19.79% 그리고 3%의 농도일 때 36.81%임을 알 수 있다. 이러한 결과는 뉴턴유체의 결과와 유사하게 나왔지만 그 폭이 더 큼을 알 수 있었다. 또한 본 연구의 결과는 Stepanoff<sup>(7)</sup>, 眞野一徳<sup>(5)</sup>, 長谷川<sup>(6)</sup>, 그리고 Hicks<sup>(9)</sup>의 연구 결과와 정성적인 경향이 일치함을 알 수 있었으며, 이로서 본 실험의 결과가 타당성이 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 뉴턴유체와 비뉴턴유체가 원심펌프의 성능에 미치는 영향을 실험적인 방법으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 뉴턴유체의 경우 회전속도를 일정하게 하고 점성계수가 다른 유체를 실험한 경우 점성계수가 높아짐에 따라 차단양정은 변하지 않지만 유량이 증가함에 따라 양정이 감소하면서 그 유량-양정곡선은 구배가 급해짐을 확인하였다. 또한 이에 따른 동력 또한 원관마찰손실로 인하여 증가하기 때문에 효율은 점성계수가 증가함에 따라 감소하였고 청수에 따른 보정값이 설탕물과 글리세린 수용액의 경우에 91.9%와 87.1%만큼 필요하였다.

2. 비뉴턴유체의 전양정의 변화의 폭은 뉴턴유체의 경향과 유사하였지만 고형물의 영향으로 인하여 양정의 감소폭이 크게 나타났으며, 유량 - 양정곡선(H-Q 곡선)의 기울기가 급해짐을 알 수 있었다. 또한, 청수로 시험한 경우에 대하여 보정값은 각각 흙탕물일 때 농도 변화에 따라 7.96%, 15.10%와 24.87%를 보정시켜 주어야 하며, 펄프액인 경우는 11.87%, 19.79%과 36.81%임을 알 수 있다.

## 참고문헌

- (1) KS B 6306, 1995, 기름용 원심펌프의 시험 검사 방법, 한국공업표준협회.
- (2) ポンプ便覽, 6 ed., 1986, 株式會社西島製作所, 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.
- (5) 眞野一徳, 일본기계학회지, 62권, 485호, 1959년, pp. 927
- (6) 김동주, 노형운, 서상호, 2003, “점성이 높은 유체를 사용하는 펌프의 성능해석”, 유체기계저널 제 7권, 제 2호, pp. 21~26
- (7) A.J. Stepanoff, Centrifugal and Axial Flow 펌프, 1948
- (8) 長谷川, 八本, 徳永, 일본운용기술연구회보고, 7권 6호, 1957년 9월
- (9) T. G. Hicks, Pump Selection and Application, 1958