

서브머지드 카고 펌프 시스템용 유량제어밸브의 특성

Characteristics of a Flow Control Valve for a Submerged Cargo Pumping System

이일영 · 최세령 · 이동렬 · 박형호

I. Y. Lee, S. R. Choi, D. R. Lee and H. H. Park

Key Words : Submerged Cargo Pumping System(서브머지드 카고 펌핑 시스템), Flow Control Valve(유량 제어 밸브), Hydraulic Valve(유압 밸브), Venturi Tube (벤투리 관)

Abstract: This study specifies the flow control characteristics of a flow control valve(FCV) in a submerged cargo pumping system through experiments and simulations. In the experiments, the functions of the major components of the FCV in relation to the FCV's flow characteristics are presented clearly. Through the simulations, it is shown that the simulation program suggested in this study can be utilized for the design of the FCV.

기호 설명

- A_1, A_2, A_3 : 벤투리 관 각부의 단면적
- A_s : DPR의 스톱 단면적
- K_1, K_2 : 벤투리 관 노즐부 및 디퓨저부의 압력 손실 계수
- F_s : DPR의 스톱에 작용하는 스프링력
- F_s^* : DPR이 열리기 시작할 때의 F_s
- p_1, p_2, p_3 : 벤투리 관 내 각부의 압력
- p_{11}, p_{12} : 식 (2) 및 식 (4)로 정의되는 압력 손실
- $\Delta p (= p_1 - p_2)$: 벤투리에서의 정압 강하
- $\Delta p^* : F_s^* / A_s$
- Q_v : Fig. 2에서 FCV를 통과하는 유량
- V_1, V_2, V_3 : 벤투리 관 내 각부의 평균 유속
- ρ : 유체의 밀도

1. 서 론

석유 제품을 운송하는 오일 탱커(oil tanker), 특

정 화학제품을 운송하는 케미컬 탱커(chemical tanker) 등의 선박에서는 액상 카고의 양하(unloading)를 위하여 서브 머지드 카고 펌핑 시스템(submerged cargo pumping system, SCPS로 약칭)이 설치된다. SCPS에서 카고 펌프(원심 펌프)의 구동 장치로는 유압장치가 널리 사용되고 있다.¹⁾ 카고 펌프의 구동에 유압장치가 선호되는 이유 가운데 하나는 가연성 가스 분위기 속에서도 유압장치는, 전동기와는 달리, 폭발을 일으킬 위험이 거의 없다는 점이다.

Fig. 1은 SCPS의 카고 펌프(원심 펌프) 구동부의 유압 회로를 예시한 것이다. 단 이 그림에는, 지면 관계상, 병렬로 연결되는 여러 대의 유압 모터 가운데서 1대만이 도시되어 있다.

탱크 속의 액상 화물을 선외로 배출함에 따라 탱크 내의 액위는 점차로 강하하고, 마침내 액위가 탱크 바닥 부근에 도달하면 카고 펌프 입구로 액체와 함께 가스(공기 등)가 흡입되면서 펌프의 부하가 급격히 낮아진다. 이 때 카고 펌프 구동용 유압 모터로 공급되는 유량을 적절히 제어하지 않으면 카고 펌프는 과속(over-run)을 일으켜서 유압 시스템에 큰 손상이 발생할 수 있다.¹⁾ SCPS의 유압 회로에는 유압 모터의 부하가 급격히 변동하는 동안에도 항상 일정한 유량이 유압 모터로 공급되도록 제어하는 독특한 구조의 유량제어밸브(flow control valve, FCV로 약칭)가 사용되고 있다.¹⁾

접수일 : 2009년 3월 12일, 게재 확정일 : 2009년 5월 19일
 이일영(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
 E-mail : iylee@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6153
 최세령 : 부경대학교 대학원 메카트로닉스공학과
 이동렬 : (주)보쉬렉스로스코리아
 박형호 : STX엔파코(주) 기술연구소

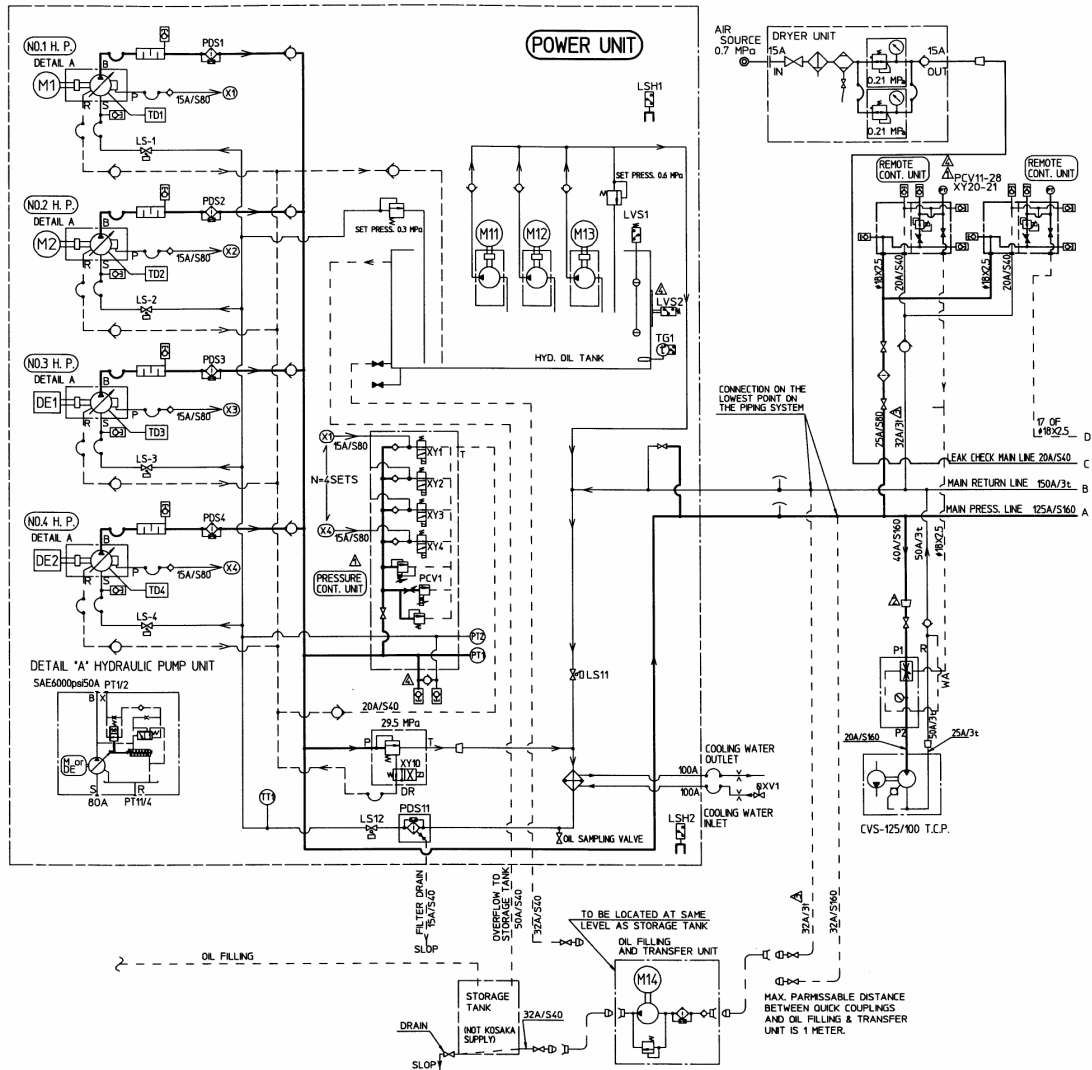


Fig. 1 Hydraulic driving part of a SCPS
(Only one hyd. motor is depicted and the others are omitted)

SCPS용 FCV에는 유량을 감지하기 위한 벤투리 기구가 사용되며, 일반적인 산업용 유압 시스템에서 사용되는 유량제어밸브와는 그 구조와 작동 원리가 매우 다르다. 저자들이 아는 한, 이러한 SCPS용 FCV에 대한 연구 성과는 지금까지 발표된 것이 없으며, 그 구체적인 내용이 알려져 있지 않다.

따라서, 이 논문에서는 SCPS용 FCV의 작동 원리를 명확히 밝히고, 그 제어 성능을 실험 및 시뮬레이션을 통하여 제시함으로써 관련 연구 및 기술의 발전을 위한 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. SCPS용 FCV의 작동 원리

Fig. 2는 Fig. 1의 유압 회로도를 1대의 유압 모터 및 FCV에 초점을 맞추어 간략화한 유압 회로도

이며, Fig. 3은 저자들이 설계 제작한 FCV의 사진 (외관)이다.

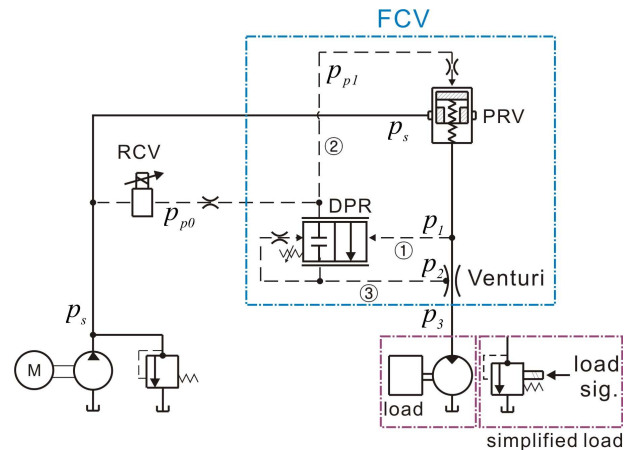


Fig. 2 Hydraulic circuit focusing on the FCV

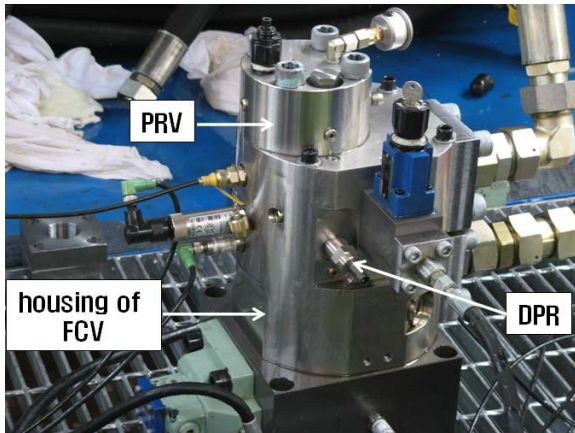


Fig. 3 External view of the FCV

SCPS용 FCV는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 유량 감지용 벤투리 관(Venturi tube), 감압 밸브 (pressure reducing valve, PRV로 약칭), 차압 ($p_1 - p_2$) 조절기(differential pressure regulator, DPR로 약칭)로 구성된다.

Fig. 2에서 RCV(remote control valve)는 DPR이 달혀 있는 유량 영역에서 PRV의 파일렛 압력 p_{p1} 을 원하는 값으로 설정함으로써 p_1 을 원격 조절하기 위한 압력제어밸브이다.

DPR은 유압 파일렛 작동식 비례 스펴 밸브의 일종이다. DPR은 벤투리 관 입구 압력 p_1 과 벤투리 관의 목 부분 압력 p_2 의 차 $\Delta p (= p_1 - p_2)$ 가 $\Delta p^* (= F_s^*/A_s)$ 에 도달하면 관로 ②와 ③을 개방시킨다.

PRV는 공급압력 p_s 를 PRV의 2차측 압력인 p_1 으로 감압시키는 역할을 하며, 2차측 압력 p_1 은 파일렛 압력 p_{p1} 을 추종하도록 제어된다.

벤투리 관 내부의 면적 축소 비(벤투리 목의 면적/벤투리 입구 면적)는 유압 모터로 흐르는 정격 부하 유량에서 설계자가 원하는 정격 차압 $\Delta p_r (= p_1 - p_2)$ 이 발생하도록 설계된다.

DPR의 스펴링력 F_s 는 벤투리 관에서의 차압이 정격치 Δp_r 에 도달했을 때 DPR이 개방되도록 ($\Delta p_r = \Delta p^* = F_s^*/A_s$) 설정된다. DPR의 스펴링력 F_s 를 $\Delta p_r \times A_s$ (A_s 는 DPR 내 스펴의 단면적)보다도 높게 설정하면 FCV의 유량 설정치가 증가하며, 반대로 F_s 를 낮게 설정하면 FCV의 유량 설정치도 감소한다.

여기서 DPR의 작동 원리를 더욱 구체적으로 기술한다. DPR은 p_1 과 p_2 의 압력 차를 일정하게 유지

시키는 제어를 수행한다. 만약 부하압력 p_3 가 낮아지면 p_2 로 낮아져서 차압 Δp_r 이 증가한다. Δp_r 이 증가하면 DPR은 ②와 ③을 연결하는 유로 면적을 증대시켜 p_{p1} 압력이 낮아지게 한다. 이에 따라 p_1 압력이 낮아져서 p_1 과 p_2 의 압력 차가 일정하게 유지된다. 반대로 부하 압력 p_3 가 높아지면 DPR은 ②와 ③을 연결하는 유로 면적을 감소시키며, 이에 따라 p_{p1} 압력이 높아지고, p_1 압력도 높아져 p_1 과 p_2 의 압력 차가 일정하게 유지되는 제어가 수행된다.

한편, 유압 모터로 흐르는 유량이 정격치보다도 낮은 유량 영역에서는 $\Delta p < \Delta p_r$ 이 되므로 DPR은 닫힌 상태로 유지된다. 이 때에는 RCV를 조절하여 p_1 을 조절함으로써 유압 모터로 흐르는 유량을 제어할 수가 있다. 그러나 이러한 유량 제어에서는 PRV에서의 압력 손실에 비례하는 에너지 손실이 발생하므로 짧은 시간 동안의 유량 제어 이외의 목적에는 활용하지 않는 것이 타당하다.

유량 감지용 벤투리 관의 작동에 대해서는 뒤에서 별도로 설명한다.

3. 벤투리 관(Venturi tube)의 작동

산업용 유압 시스템에서 사용되고 있는 일반적인 유량제어밸브에서는 교축밸브(throttle valve)가 유량 감지의 역할을 수행한다.²⁾ SCPS용 FCV에서는 유량 감지를 위하여 벤투리 관이 사용된다(Fig. 2 및 Fig. 4). 벤투리 관은 압력 회복 기능이 있으므로 교축 밸브에 비하여 에너지 손실이 적으며, 교축부에서의 압력차($p_1 - p_2$)가 일반적인 오리피스에서 이용 가능한 압력차($p_1 - p_3$) 보다 큰 것이 이점이다.

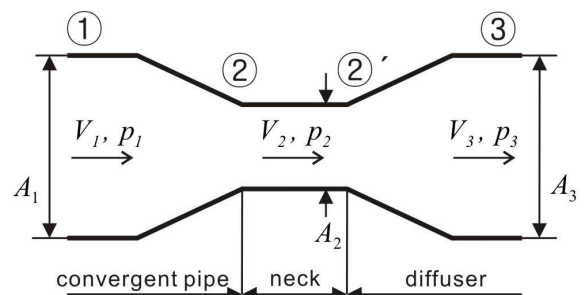


Fig. 4 A Venturi tube

벤투리 관은 축소 관로(=노즐), 연결 관로, 그리고 디퓨저로 구성된다(Fig. 4). 유체가 벤투리 관을 통과하면 Fig. 4의 ①~② 구간에서는 정압 강하 Δp_1

가 발생하고, ②'~③ 구간에서는 정압 회복 Δp_2 가 일어난다. 노즐에 의한 이상적인 정압 강하 $[\Delta p_1]_{th}$ 는 식 (1)로 표시된다.

$$[\Delta p_1]_{th} = \frac{1}{2} \rho V_2^2 [1 - (A_2/A_1)^2] \quad (1)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, V 는 평균 유속, A 는 유로의 단면적, 첨자들은 벤투리 관 내의 위치를 나타낸다.

식 (1)에 아래의 식 (2)로 표시되는 부차적 손실 압력을 추가함으로써, 노즐에서의 실제 정압 손실 Δp_1 을 구할 수 있다³⁾.

$$p_{11} = K_1 \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (2)$$

디퓨저(위치 ②'~③ 구간)에 의한 이상적인 정압 회복 $[\Delta p_2]_{th}$ 는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$[\Delta p_2]_{th} = \frac{1}{2} \rho V_3^2 [1 - (A_3/A_2)^2] \quad (3)$$

디퓨저에서의 부차적인 손실 압력은 아래의 식 (4)로 구할 수 있다.

$$p_{12} = K_2 \frac{\rho (V_2 - V_3)^2}{2} = K_2 \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_3} \right)^2 \right) \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (4)$$

디퓨저에서의 정압 회복 Δp_2 는 식 (3)의 $[\Delta p_2]_{th}$ 에 식 (4)의 p_{12} 을 감함으로써 구할 수 있다.

위의 식 (2) 및 (4)에 포함된 손실 계수 K_1 및 K_2 는 실험식에 벤투리 관 관련 치수를 대입하여 계산할 수 있다.^{3,4)}

4. SCPS용 FCV의 특성 실험

SCPS용 FCV의 특성 실험에 사용된 유압 회로는 Fig. 2와 같다. 단, 실험 장치를 간소화시킬 목적으로 부하 구동 장치인 유압모터를 대신하여 릴리프 밸브(Fig. 2에서 simplified load로 표시)를 사용하였다. Fig. 5는 실험 장치 주요부의 사진을 보여준다.

실험에서는 펌프의 공급 압력(p_s)을 200 bar, RCV의 설정 압력(p_{p0})을 180 bar로 설정하였다. 벤투리 관을 흐르는 유량이 370 l/min일 때, 벤투리 관의 축소부(노즐)에서 발생하는 차압이 8 bar가 되는 벤투리 관을 사용하였다.

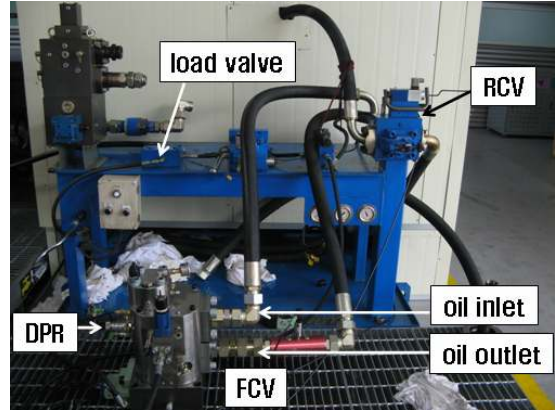
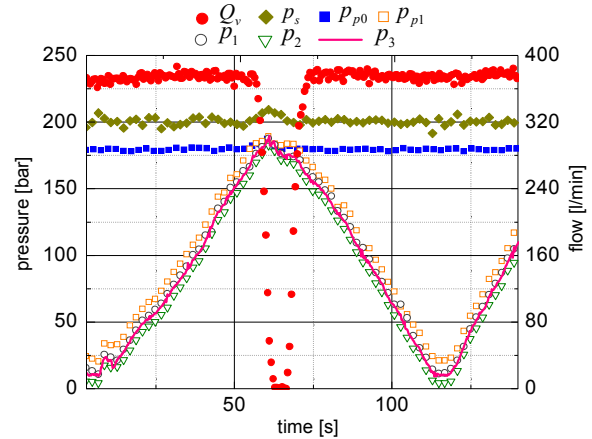
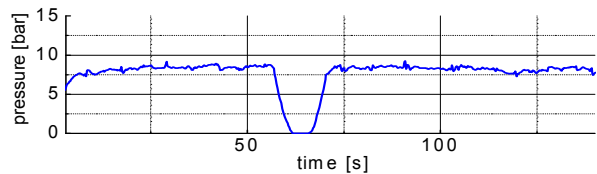


Fig. 5 Photo. of the experimental system

Fig. 6은 비교적 긴 시간 동안의 연속적인 부하 압력 변동에 따른 FCV의 동작을 나타낸다. 그림에서 p_s , p_{p0} , p_{p1} , p_1 , p_2 , 및 p_3 는 Fig. 2에 표시한 각 위치에서의 압력을 나타낸다. 부하 압력 p_3 를 10 → 180 → 10 bar로 연속적으로 변화시켰을 때, FCV를 통과하는 유량 Q_v (로 표시)는 비교적 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이와 같이 부하 압력이 넓은 범위에 걸쳐서 변화함에도 불구하고 부하 유량이 거의 일정한 값으로 유지되는 것은 FCV의 제어 작용에 따른 결과이다.



(a) steady state characteristics



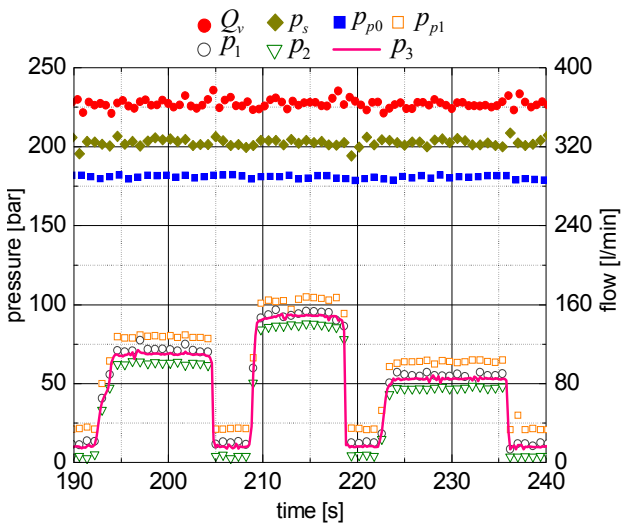
(b) $\Delta p (= p_1 - p_2)$

Fig. 6 Experimental results showing the FCV's control performances under rampwise variation of p_3

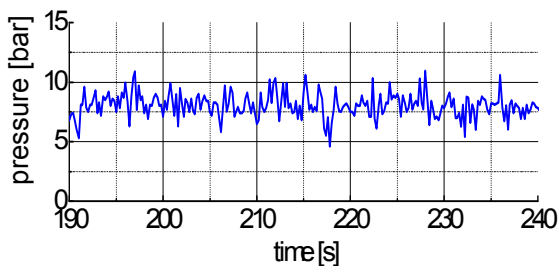
Fig. 6에서, p_3 이 180 bar(FCV의 2차측 압력 p_1 의 설정치) 부근에 이르면 더 이상 FCV는 유량 제어의 기능을 수행하지 못하며, 유량 Q_v 가 0으로 되는 것은 당연한 결과이다.

Fig. 6에서 $\Delta p_1(=p_1-p_2)$ 는 약 7.95 bar, $\Delta p_2(=p_3-p_2)$ 는 약 5.87 bar로서, 벤투리 관의 노즐에서 강하한 압력의 약 73.84%가 디퓨저에서 회복됨을 보였다.

Fig. 7은 부하 압력 p_3 를 계단상으로 변화시켰을 때의 FCV의 성능을 나타낸다. Fig. 7의 결과는 p_3 가 비교적 큰 폭으로 급격하게 변동하는 경우에도 실험에 사용한 FCV가 안정된 유량 제어 기능을 수행함을 보인다. 이로부터, SCPS가 정상 운전 상태에서 급격히 스트리핑(striping) 운전 상태로 진입할 때에도 유압모터가 과속(over-run)하는 것을 방지하는 제어 기능이 원활하게 수행됨을 알 수 있다.



(a) transient characteristics



(b) $\Delta p(=p_1-p_2)$

Fig. 7 Experimental results showing the FCV's control performances under stepwise variation of p_3

Fig. 2의 유압 회로에서 벤투리 관의 치수는 불변인 상태로 두고, DPR이 열리기 시작하는 $F_s^*[= \Delta p^* \times A_s]$ 를 변화시키면 FCV의 제어 유량이 변화한다. Table 1은 DPR의 스프링력을 변화시켜 $\Delta p^*(=F_s^*/A_s)$ 를 8, 6, 4 bar로 변화시켰을 때의 유량 변화에 대한 실험 결과이다. 실험에서 Δp^* 가 8, 6, 4 bar일 때의 어느 경우에서나 안정된 유량 제어가 수행됨을 확인하였다. DPR이 열리기 시작하는 스프링력 F_s^* 는 동일한 DPR에 각기 강성이 다른 스프링들을 적용하고, 스프링의 초기 변위를 조정나사로 미세 조정함으로써 설정하였다. Table 1의 실험 결과로부터, 동일한 FCV에서 DPR의 스프링력만을 변화시킴에 따라서 제어 유량을 변경할 수 있음을 확인하였다.

Table 1 Experimental results on flowrate due to DPR's spring force variation

| $\Delta p^* [= F_s^*/A_s]$ | | |
|----------------------------|-----------|-----------|
| 8 bar | 6 bar | 4 bar |
| 370 l/min | 270 l/min | 110 l/min |

5. SCPS용 FCV의 특성 시뮬레이션

SCPS용 FCV의 설계 지원에 사용할 목적으로, 범용의 유압 시스템 해석 소프트웨어인 AMESim⁵⁾을 사용한 시뮬레이션 프로그램을 작성하였다.

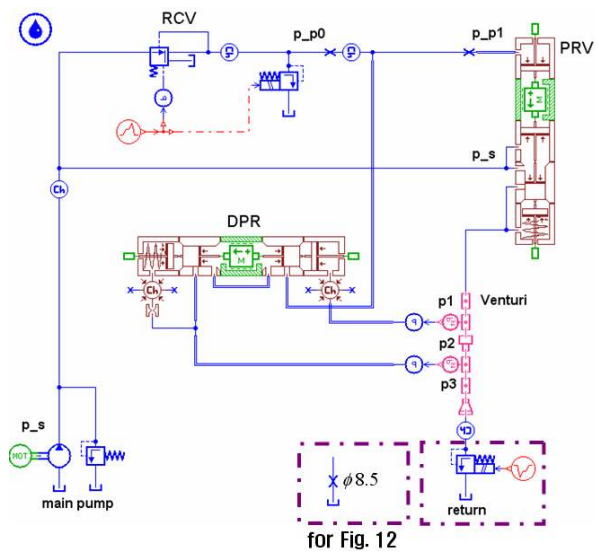


Fig. 8 Simulation model for the hydraulic circuit

Fig. 8은 Fig. 2에 나타난 실험 유압 회로를

AMESim의 시뮬레이션 모델로 작성한 결과이다. Fig. 8에서 DPR과 PRV는 HCD(hydraulic component design)⁶⁾ 라이브러리에서 제공되는 요소들을 조합하여 작성하였으며, 벤투리 관은 HR(hydraulic resistance)⁶⁾ 라이브러리가 제공하는 요소들을 사용하여 작성하였다.

Fig. 8의 모델 작성에 앞서서, AMESim HR 라이브러리의 요소들로 구성된 벤투리 관 모델의 신뢰성을 확인할 목적으로 Fig. 9와 같은 간단한 모델을 작성한 후에, $\Delta p_1 (= p_1 - p_2)$ 와 $\Delta p_2 (= p_3 - p_2)$ 를 계산하였다. 한편, 식 (1)~(4)를 사용하여 Δp_1 과 Δp_2 를 계산하기 위한 프로그램을 별도로 작성하였다. Fig. 9의 모델을 사용한 계산 결과와 수식 (1)~(4)를 사용한 계산 결과를 비교하였으며, 그 결과들은 Δp_1 과 Δp_2 의 어느 경우에서나 1.5% 이내의 오차 범위 내에서 서로 일치하였다. 이로부터 Fig. 8에 사용한 벤투리 관 모델의 신뢰성을 확인하였다.

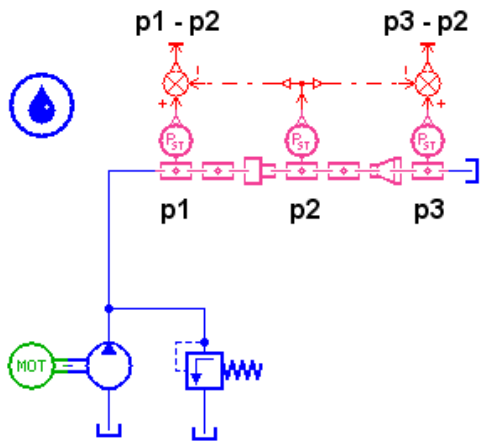
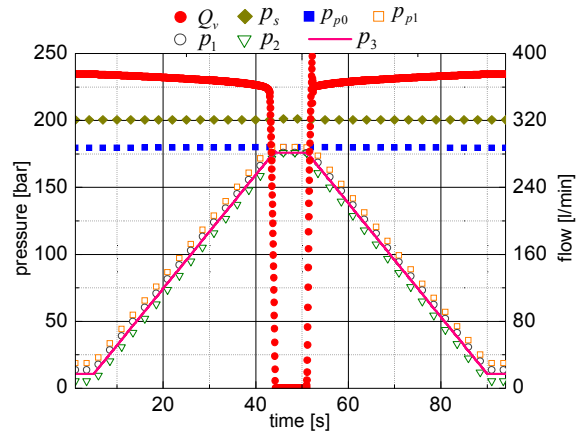
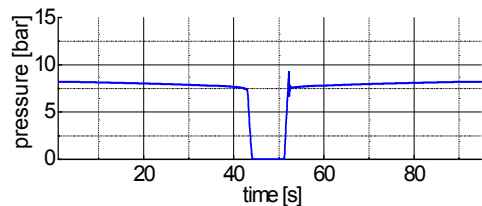


Fig. 9 Simulation model for the Venturi tube

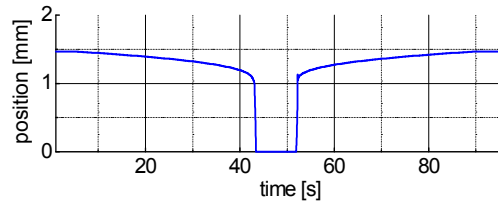
Fig. 10은 Fig. 8의 시뮬레이션 모델에서 Fig. 6의 실험과 유사하게 부하 압력(p_3)을 램프(ramp) 상으로 변화시켰을 때의 SCPS용 FCV의 제어 특성을 나타낸 것이다. Fig. 10 (a)의 시뮬레이션 결과에 나타난 모든 물리인자들의 변화는 Fig. 6의 실험 결과들을 대체로 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 10에 나타난 Q_v 와 Δp 를 Fig. 6의 Q_v 및 Δp 와 비교해보면, 그 변화 양상에서 다소의 차이를 확인할 수가 있다. 이러한 차이는 스펴 및 포핏의 모델이 실제 밸브에서의 형상을 완전하게 반영하지 못함에 따른 계산 오차(예: 정상 유동력의 계산 오차)에 기인하는 것으로 짐작된다.



(a) steady state characteristics



(b) $\Delta p (= p_1 - p_2)$

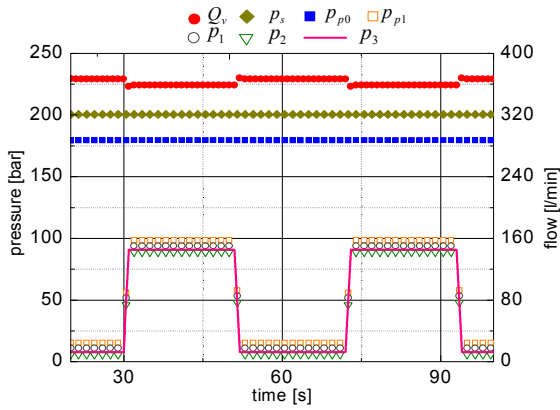


(c) spool position of DPR

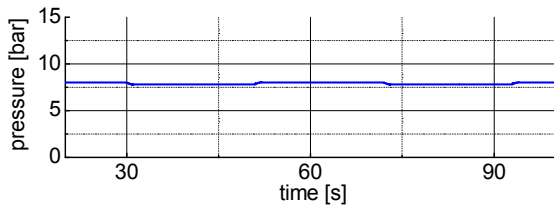
Fig. 10 Simulated results showing the FCV's control performances under rampwise variation of p_3

Fig. 11은 Fig. 7의 실험과 유사하게, 부하 압력(p_3)을 계단상으로 변화시켰을 때의 FCV의 제어 성능을 시뮬레이션한 결과이다. Fig. 11의 결과는 Fig. 7의 실험 결과와 유사한 경향을 보이고 있으며, p_3 가 큰 쪽으로 급격하게 변하는 경우에도 FCV가 안정되게 유량 제어 성능을 발휘함을 보여 준다.

Fig. 12는 Fig. 8의 회로에서 부하 모의용 릴리프 밸브 대신에 고정 오리피스(직경: 8.5 mm)를 설치하고, RCV의 설정 압력 p_{p0} 를 180→0→180 bar로 연속적으로 변화시켰을 때의 시뮬레이션 결과를 보인다. p_{p0} 가 180 bar 부근에 머무를 때에는 아직도 DPR이 개방 상태이므로 p_{p1} 과 p_{p0} 사이에는 큰 압력 차이가 존재한다. Fig. 12로부터 p_{p0} 가 약 125 bar에 이르면 Q_v 와 $\Delta p_1 (= p_1 - p_2)$ 의 감소로 인하여 DPR이 폐쇄되며, DPR이 닫혀져 있는 p_{p0} 의 구간(0~125 bar)에서는 RCV로 p_{p0} 를 조절함으로써

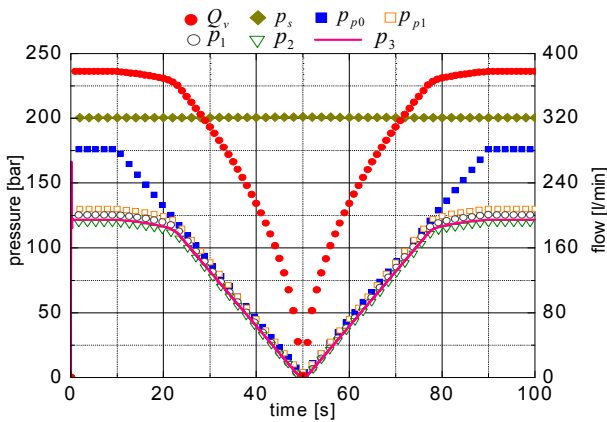


(a) transient characteristics

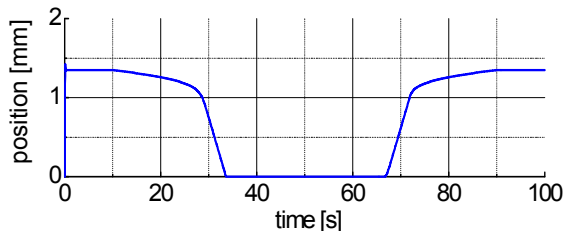


(b) $\Delta p (= p_1 - p_2)$

Fig. 11 Simulated results showing the FCV's control performances under stepwise variation of p_3



(a) steady state characteristics



(b) spool position of DPR

Fig. 12 Simulated results showing the FCV's control performances under p_{p0} variation by RCV

연속적으로 Q_v 를 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 RCV의 압력 설정치를 변화시켜 유량을 제어할 때는, 앞의 2절에서도 언급한 바와 같이, PRV에서의 압력 손실에 비례하는 에너지 손실이 발생하므로 짧은 시간 동안의 유량 제어 이외의 목적에는 사용하지 않는 것이 좋다.

이상의 시뮬레이션 결과로부터, 이 연구에서 범용의 유압 시스템 해석 소프트웨어(AMESim)로 구성된 시뮬레이션 프로그램이 SCPS용 FCV의 설계 지원 목적으로 유용하게 활용할 수 있음을 확인하였다. 덧붙여서, 실험에서 측정하기가 힘든 물리 변수(예: DPR의 스톱 변위 등)들의 변화를 파악하는 데에 유용하게 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

6. 결 론

이 연구에서는 선박의 서브머지드 카고 펌프 시스템(SCPS)용 유량제어밸브(FCV)의 유량 제어특성을 실험 및 시뮬레이션을 통하여 제시하였다.

실험을 통하여, FCV를 구성하는 요소인 감압 밸브(PRV), 차압 조절기(DPR), 유량 감지용 벤투리관이 FCV의 유량 제어에 어떻게 기여하는 지를 명확하게 제시할 수 있었다.

시뮬레이션에서는, 이 연구에서 범용의 유압 해석 소프트웨어(AMESim)로 구성된 시뮬레이션 프로그램이 SCPS용 FCV의 설계 지원 목적으로 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- 1) 김종기, 박명환, 김태형, "선박용 서브머지드 카고 펌프 시스템에 사용되는 유압 기술", 유공압 시스템학회지, 4권 2호, pp. 35~43, 2007.
- 2) A. Esposito, "Fluid Power with Application", Pearson Prentice Hall, pp. 290~293, 2009.
- 3) Robert W. Fox, "유체 역학", 사이텍미디어, pp. 418~431, 2000.
- 4) B. S. Massey, "Mechanics of Fluids", Van Nostrand Reinhold., pp. 201~203, 1979.
- 5) LMS IMAGINE S.A., "AMESim Reference manual", pp. 41~74, 2008.
- 6) LMS IMAGINE S.A., "AMESim Library manual", 2008.