

## 유압 브레이커의 리턴 라인의 압력 맥동 감소에 관한 연구

성원준\*, 노태봉#, 송창섭\*\*

### A Study on the Reducing the Return Line Pressure Fluctuation of the Hydraulic Breaker System

Wonjune Sung\*, Taebong Noh# and Changseop Song\*\*

#### ABSTRACT

In this study, the hydraulic breaker system was analyzed and simulated using. The simulation result was certified comparing with the experimental result. From the parametric analysis, the effects of each factor were revealed. Through the simulation with varying parameters, the method to reduce the return line pressure fluctuation was presented.

**Key Words** : Hydraulic breaker system(유압 브레이커 시스템), parametric analysis(인자분석), Reducing the Return Line Pressure Fluctuation(리턴 라인 맥동 감소), Simulation(시뮬레이션)

#### 기호설명

A = Opening area  
 $C_d$  = Discharge coefficient  
P = Pressure of each control volume  
V = Volume of each control volume  
 $\beta$  = Fluid bulk modulus  
 $\rho$  = Fluid mass density  
 $\mu$  = Fluid absolute viscosity  
 $\kappa$  = Specific heat ratio

#### 1. 서론

유압 브레이커는 유압을 동력원으로 하여 작동되는 건설기계의 일종으로 일반적으로 굴삭기에 장착되어 건축물의 해체작업이나 포장도로의 보수작업, 암반의 파쇄작업 등에 사용되고 있다. 이형수<sup>[2]</sup>는 유압식 브레이커의 설계 변수에 관한 연구를 하였으며, 고승환, 임종혁<sup>3</sup>은 유압 브레이커의 모델링 및 피스톤과 치즐 간의 탄성 충돌을 고려하여 해석을 하였다. 최귀현<sup>4</sup>은 유압 브레이커의 성능 향상을 위한 연구를 행하였고, 이영규<sup>5</sup>는 유압 브레이커 해석용 TOOL 개발 및 성능 분석을

접수일: 2002 년 7 월 29 일; 게재승인일: 2003 년 7 월 11 일

- \* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과  
# 교신저자: 한양대학교 대학원 정밀기계공학과  
E-mail: wanaka@ihanyang.ac.kr, Tel: (02) 2290-0433  
\*\* 한양대학교 기계공학부

행하였다. 본 연구에서는, 연구 대상 유압 브레이크 시스템에서 문제가 되는 리턴 라인의 맥동 감소를 위하여, 유압 브레이크 시스템을 해석하였고, 시뮬레이션을 통해 인자 분석을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 실험을 통해 타당성을 검증한 후 인자 분석을 통해 리턴 라인의 맥동을 감소시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

## 2. 유압 브레이크의 구조 및 작동원리

### 2.1 유압 브레이크의 구성 요소 및 구조

본 연구에서 해석한 유압 브레이크 시스템은, 유압과 질소 가스의 에너지를 램 피스톤의 운동 에너지로 변환하고, 변환된 운동에너지는 치즐을 통하여 타격물에 전달되어 타격물을 파쇄하는 원리로 된 기계 장치이다. 치즐과 그 치즐에 충격력을 가하여 주는 램 피스톤, 램 피스톤에 압력을 공급하는 백헤드, 유로를 전환함으로써 램 피스톤의 운동방향을 전환시켜주는 방향 제어 밸브 등으로 구성된다.

### 2.2 유압 브레이크의 작동 원리

Fig. 1 에서와 같은 유압 브레이크 시스템은 밸브 전환실 안에 있는 방향 제어 밸브가 램 피스톤과 실린더에 연결된 유로를 전환시켜 램 피스톤의 운동 방향을 바꾸어 주고, 상하 운동하는 램 피스톤 위치에 따라서 밸브 전환실의 압력이 반전되고 방향 제어 밸브의 운동방향 및 위치가 바뀌게 된다. 램 피스톤과 방향 제어 밸브는 상호 종속적이고, 순차적인 운동을 하게 된다. 구성 요소별로 순차적인 운동을 분석하여 보면 다음과 같다. 유압 펌프로부터 송출되는 고압의 유체는 Supply 측을 통해 램 피스톤의 Lower Chamber 와 방향 제어 밸브의 High Pressure Chamber 에 동시에 압력을 가하게 된다. 이 때, 방향 제어 밸브 스톱은 아래 방향으로 힘을 받게 되고, 램 피스톤은 위 방향으로 힘을 받게 된다. Lower Chamber 에 가해지는 압력으로 램 피스톤은 상승하게 되고, 백헤드의 질소 가스는 에너지를 축적하게 된다. 램 피스톤이 상사점을 지나게 되면, Supply 로 들어오던 고압유는 Pilot 유로를 통해 방향 전환 밸브의 Alternate Pressure Chamber 로 들어가게 되고, High Pressure Chamber 와 Alternate Pressure Chamber 의 수압 면적 차에 의해 밸브는 상승하게 된다. 밸브가 상승하

게 되면, 램 피스톤의 Upper Chamber 로 통하는 유로를 개방시켜 저압의 상태에 있던 Upper Chamber 를 고압으로 바꿔 준다. Upper Chamber 와 Lower Chamber 의 수압 면적 차이에 의한 힘과 백헤드 질소 가스에 의한 압축력에 의해 램 피스톤은 하강 운동을 하며, 치즐을 타격하게 된다. 램 피스톤이 하강함에 따라, 상승했던 방향 전환 밸브는 다시 하강하여 램 피스톤 Upper Chamber 를 리턴부로 연결하여 다시 저압 상태로 만들어 주며, 타격 후 램 피스톤은 다시 상승하는 반복적인 왕복 운동을 하게 되는 것이다. 동작 순서를 요약하여 나타내면 [피스톤 상승] - [밸브 상승] - [피스톤 하강] - [밸브 하강]의 순서가 된다.

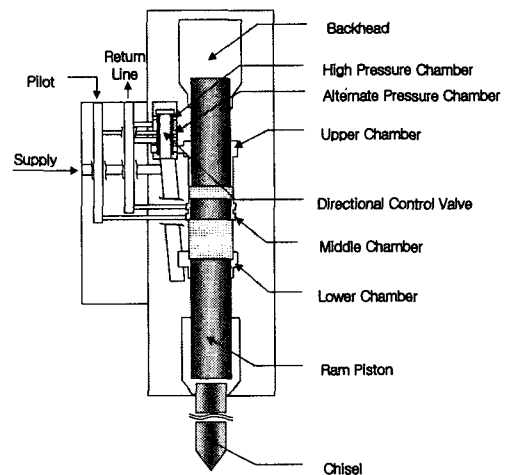


Fig. 1 Schematic Diagram of a Hydraulic Breaker System

## 3. 유압 브레이크의 해석

유압 브레이크 시스템을 해석하기 위해서, 먼저 램 피스톤과 실린더가 이루는 유실들과, 방향 전환 밸브 스톱과 슬리브가 이루는 유실들, 각 유실을 이어주는 유로들을 각각의 검사 체적으로 정의한다. 램 피스톤과 방향 제어 밸브 스톱에 가해지는 압력에 의한 힘, 마찰력, 중력, 등을 고려하여 각각의 운동 방정식을 구하고, 위에서 정의한 각 검사 체적으로 유입, 유출되는 유량을 나타내는 유량 방정식, 이들 유량과 검사 체적의 압축성을 고려한 연속 방정식을 적용하여 각각의 검사 체적의 압력을 구할 수 있다. 이 압력들을 이용해

운동 방정식의 압력에 의한 힘을 구한다. 또한 램 피스톤과 치즐의 충돌 현상은, 집중 질량의 스프링-댐퍼 계로 단순화하여 모델링 할 수 있는데, 본 연구에서는 치즐과 피파쇄물을 결합한 등가 1 자유도 스프링-댐퍼 시스템으로 가정하여 해석하였다.

Fig. 2 에서 보는 바와 같이 램 피스톤에는 실린더 Lower Chamber 와 Upper Chamber 의 유체 압력과 백헤드 가스실의 가스 압력에 의한 힘이 작용되고, 램 피스톤의 자중과 실린더와의 마찰력을 받는다. 또한 치즐과 피타격물을 하나의 등가 스프링-댐퍼로 모델링하여 램 피스톤과 치즐이 접촉할 때 피스톤에 가해지는 반발력을 계산하였다.

이를 바탕으로 램 피스톤에 대한 운동 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$M_p \ddot{X}_p = F_{LC} - F_{UC} - F_{BH} + F_{IMP} - F_f - W_p \quad (1)$$

여기서,  $F_{LC}$  는 Lower Chamber,  $F_{UC}$  는 Upper Chamber 에 작용하는 힘,  $F_{BH}$  는 백헤드 가스실에 작용하는 힘,  $F_{IMP}$  는 충돌시 램 피스톤에 작용하는 반발력,  $F_f$  는 램 피스톤에 가해지는 마찰력,  $W_p$  는 자중을 나타낸다.

반발력  $F_{IMP}$  는 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$F_{IMP} = F_{DMP} + F_{SPR} \quad (2)$$

$$F_{DMP} = \begin{cases} -B_{eq} \dot{X}_p, & \text{if } \dot{X}_p < 0 \text{ and } X_p < X_{p,int} \\ 0, & \text{if otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

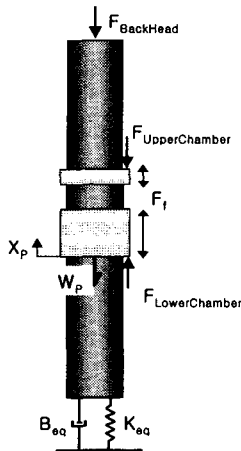


Fig.2 Free Body Diagram of the Ram Piston

$$F_{SPR} = \begin{cases} K_{eq}(X_{int} - X_p), & \text{if } X_p < X_{int} \\ 0, & \text{if } X_p \geq X_{int} \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $B_{eq}$  는 반발계의 등가 댐핑 상수,  $K_{eq}$  는 반발계의 등가 스프링 상수,  $X_{int}$  는 램 피스톤과 치즐의 접촉이 시작될 때의 피스톤 변위이다. 위의 식 (2)~(4)에서 댐핑력  $F_{DMP}$  와 스프링력  $F_{SPR}$  의 발생 조건으로 램 피스톤과 치즐의 접촉 조건을 이용하였다. 치즐의 질량을 무시하였으므로  $X_p < X_{p,int}$  인 경우 스프링 변위는 바로 피스톤의 변위가 되고, 댐퍼의 작용은 압축시에만 한정된 것으로 가정하였다.

각 검사 체적에 작용하는 힘은 수압면적에 작용하는 압력으로부터 구한다. Lower Chamber 와 Upper Chamber 에 작용하는 압력을 구하기 위하여 체적의 변화와 입출력 유량을 고려한 연속 방정식을 사용하였다.

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{\beta}{V_i} \left( \sum Q_{in} - \sum Q_{out} - \frac{dV_i}{dt} \right) \quad (5)$$

검사체적 i 와 j 간의 유량은 다음의 Orifice Flow Equation 을 이용하여 모델링하였다.

$$Q_{ij} = C_d A_{ij} \sqrt{\frac{2(P_i - P_j)}{\rho}} \quad (6)$$

백헤드 Head 가스실의 체적은 램 피스톤의 운동에 의하여 빠른 주기로 변하게 되므로, 한 번의 압축 팽창 사이클에서는 gas와 주변의 열교환이 거의 없다고 가정하여, 단일 과정으로 모델링하였다. 백헤드 가스 압력은 램 피스톤의 변위에 대한 함수가 되며, 다음 식으로부터 구했다.

$$P_{New} = P_{Init} \left( \frac{V_{init}}{V_{init} - A_{Back} X_p} \right)^{\kappa} \quad (7)$$

밸브 스톱에는 Fig. 3 에서 보는 바와 같이, 공급된 고압의 유체에 의한 힘  $F_{high}$ , 램 피스톤이 상사점을 지날 때 피스톤 실린더의 Middle Chamber 로부터 공급되는 유체에 의한 힘  $F_{alter}$ , 밸브 슬리브와의 마찰력  $F_f$ , 자중 등이 작용한다. 이를 바탕

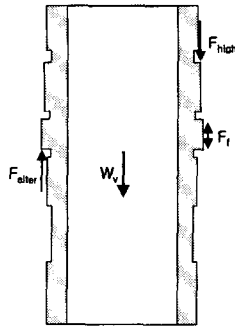


Fig. 3 Free Body Diagram of the Valve Spool

으로 밸브 스톨에 대한 운동 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$M_v \ddot{X}_v = F_{ether} - F_{high} - F_f - W_v \quad (8)$$

각 힘을 구하기 위해, 수압면적에 작용하는 압력을 구해야 하는데, 이는 각 검사 체적의 입출력 유량과 체적 변화를 이용한 연속 방정식을 이용해 구할 수 있다. 또한 검사 체적간의 유량은 Orifice Flow Equation 을 이용하여 구하였다.

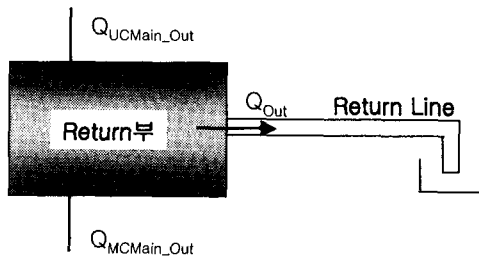


Fig. 4 The Modeling of Return Line

$$\frac{dP_{Main\_Out}}{dt} = \frac{V}{\beta} (Q_{UCMain\_Out} + Q_{MCMMain\_Out} - Q_{Out}) \quad (9)$$

$$Q_{Out} = \frac{\pi D^4}{128 \mu L} (P_{Main\_Out} - P_{Tank}) \quad (10)$$

리턴 라인에 Fig. 4, 식 (9), (10)과 같이 모델링 하였다. 램 피스톤 Upper Chamber 로부터 방향 전환 밸브의 하단부 틈을 거쳐 유입되는 유체와, 램 피스톤 Middle Chamber 로부터 유입되는 유체는 탱

크와 연결된 리턴 라인으로 나가게 된다. 리턴 라인의 압력은 이 유체의 흐름과 관련되게 되며, 리턴부에서의 압력 맥동이 리턴 라인에 전달되어 리턴 라인이 쉽게 터지고, 고정부가 고장나는 등 문제를 일으키게 된다. 이 맥동을 감소시키기 위하여, 이들 유체의 흐름에 영향을 미치는 인자를 분석하였다.

#### 4. 리턴 라인의 압력 측정 실험

Fig. 5 에 브레이커 리턴 라인의 압력 측정을 위한 실험 장치를 나타내었다. 브레이커 시스템과 리턴 라인의 연결부에 센서를 부착하고, 브레이커를 작동시킬 때 리턴 라인의 압력은 이 센서를 통해 측정되게 되며, 이 센서의 출력을 오실로스코프를 이용해 압력을 측정하였다.

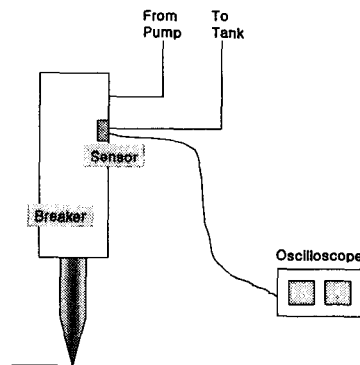


Fig. 5 Experimental Scheme for the Breaker System

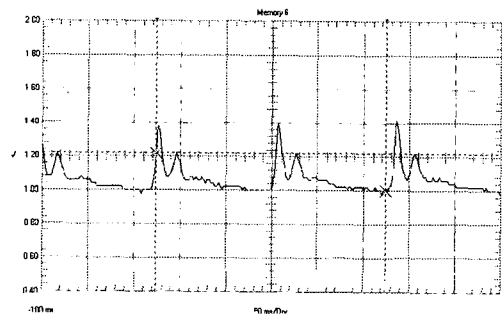


Fig. 6 Experimental Result of the Return Line

Fig. 6 은 실험 시의 오실로스코프의 출력 결과를 나타낸 것이다. 그림에서의 Y 축은 전압 단위로 되어 있는데, Y 축의 최대치로 나와 있는 2.00V

는 125Bar 를 나타내며, X 축의 한 칸은 0.5 초를 나타낸다. 실험결과에서 리턴 측의 최고 압력은 약 55Bar 이다.

### 5. 시뮬레이션 및 리턴 라인 압력 감소를 위한 인자 분석

#### 5.1 시뮬레이션

앞에서 구한 램 피스톤과 밸브의 운동 방정식과 각 검사 체적에 대한 연속 방정식, Orifice Flow Equation 을 이용하여 브레이크 시스템을 시뮬레이션하였다. 해석용 Tool 은 C++을 이용하였고, 적분을 위한 수치해석 방법은 4차 Runge-Kutta Method 를 이용하였다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과와의 비교를 통해 시뮬레이션의 타당성을 검증하였으며, 리턴 라인의 압력에 영향을 미치는 인자를 선정하여, 값을 다르게 시뮬레이션 하여, 리턴 라인의 압력을 감소시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 다음은 시뮬레이션에 사용된 몇 가지 Spec.이다.

Table 1 Simulation Specification

Supply Flow Rate	200 liter/min
Relief Valve Setting Pressure	210 Bar
Simulation Time Step	10 <sup>-7</sup> sec
Simulation Time	0.5 sec

#### 5.2 타당성 검증

Fig. 7 에 램 피스톤 변위와 밸브 변위에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 램 피스톤의 초기 위치는 기준점으로부터 50mm 이고, 램 피스톤에 이 초기 위치 이하로 내려갈 때 충돌이 일어나며,

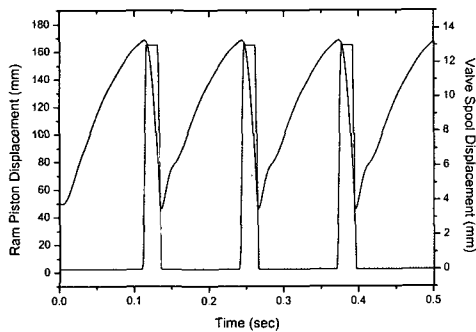


Fig. 7 Simulation Result of the Displacement of the Ram Piston and the Valve Spool

이 때 스프링 및 댐퍼의 영향을 받는 것으로 시뮬레이션 하였다. 그림으로부터 한 주기는 약 0.13 초이며, 이것으로부터 타격수를 계산해 보면 약 460BPM(Blows per Minute) 정도가 나오게 된다. 이는 메이커 측에서 제시한 타격수와 거의 일치한다

Fig. 8 에는 리턴 라인의 압력에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

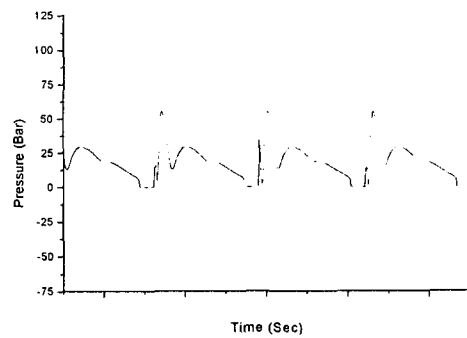


Fig.8 Simulation Result of the Return Line

Fig. 8 의 시뮬레이션 결과를 Fig. 6 의 실험 결과와 비교하여 보면, 피크치와 경향이 실험 결과와 대략 일치하는 것을 알 수 있다. 현재 문제가 되고 있는 것은, 리턴 라인의 압력 맥동이 커서 이 압력 맥동이 호스측의 잦은 고장의 원인이 되는 것이다. 본 연구에서는 이 시뮬레이션 결과를 바탕으로 리턴 라인 압력 맥동에 영향을 미치는 인자를 선정하여, 이 인자들의 값을 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하여, 맥동을 줄일 수 있는 방법을 제시하였다.

#### 5.3 압력 감소를 위한 인자 분석

본 연구에서는 리턴 라인 압력 맥동에 영향을 미치는 요소로 밸브 출구측 개구 면적, Middle Chamber 에서 리턴 라인으로의 연결 관로 지름, 리턴 라인 호스의 지름을 선정하여, 이 값들을 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하여, 결과를 분석하였다.

##### ① 밸브 출구측 개구 면적의 영향

램 피스톤이 상승하게 될 때, Upper Chamber 에 있던 유체는 방향 전환 밸브의 하단부의 틈을 지나 출구측으로 흐르게 된다. 이 때, 밸브측의 틈의 면적을 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하였다.

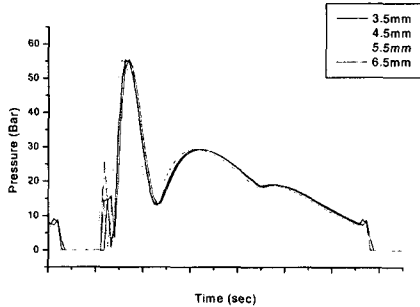


Fig. 9 Return Line Pressure according to Various Gaps

Fig. 9 는 밸브측 틈을 변화시켜 가며 시뮬레이션하여, 출구단의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 현재 밸브 틈은 5.5mm 로 되어 있고, 그림에서처럼 3.5mm~6.5mm 까지 변화시켜 가며 시뮬레이션을 했으나, 출구측의 압력은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 밸브가 빠른 속도로 움직이므로, 밸브측 틈을 통해 들어가는 유체의 양은 큰 변화가 없기 때문이다.

② Middle Chamber 에서 리턴 라인으로의 연결 관로 지름의 영향

램 피스톤이 상사점 이상 상승하게 되면, 램 피스톤 Lower Chamber 로 들어오던 유체는 램 피스톤을 상승시키다가 밸브의 Alternate Chamber 로 들어가 밸브를 상승시키게 된다. 밸브 상승 이후 램 피스톤이 하강할 때, 램 피스톤의 Middle Chamber 에 있던 유체는 리턴 라인과 연결되어 빠져 나가게 되는데, 이 때 리턴 라인으로의 연결부의 지름을 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 10 은 Middle Chamber 에서 리턴라인으로 연결되는 연결관의 지름을 변화시켜 가며 시뮬레이션 한 결과이다. 현재는 10mm 로 되어 있으며, 그림에서처럼 6mm, 14mm 로 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하였으나 출구측 압력은 거의 변화가 없었다. 여기서 지름을 너무 작게 할 경우, Middle Chamber 에 있던 유체가 잘 빠져나가지 못하게 되어, 성능에 나쁜 영향을 끼칠 수도 있다.

③ 리턴 호스의 지름에 의한 영향

리턴 라인에서 탱크로 빠져 나가는 호스의 길이를 5m 로 설정하고, 직경을 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하였다.

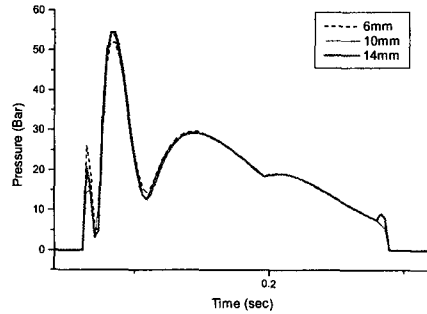


Fig. 10 Return Line Pressure according to Various Line Diameters

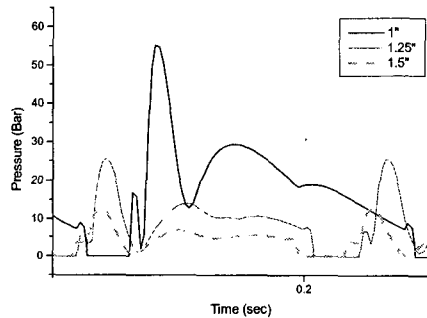


Fig. 11 Return Line Pressure according to Various Hose Diameters

Fig. 11 은 리턴 라인 호스의 지름을 변화시켜 가며 시뮬레이션한 결과이다. 현재 사용하고 있는 1 인치의 호스를 1.25 인치, 1.5 인치로 변화시켰을 때 리턴측의 압력이 감소하고 있음을 알 수 있다.

리턴 라인에서 호스쪽으로 빠져나가는 유량을 원활히 해 주는 것이, 리턴 라인의 맥동을 감소시키는 데 가장 큰 영향을 미쳤다.

6. 결론

1. 유압 브레이커 시스템을 운동 방정식, 연속 방정식, Orifice Flow Equation 등을 이용해 해석하였고, 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였으며, 시뮬레이션 결과를 실험 결과와 비교하여 시뮬레이션의 타당성을 검증하고, 리턴 라인 맥동 감소를 위하여, 몇 개의 인자를 선정하여 그 값을 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행하여 맥동을 감소시킬 수 있는 방안을 찾았다.

2. 램 피스톤의 Upper Chamber 로부터 밸브 하단부의 틈을 지나 리턴 라인으로 들어가는 유량은 리턴 라인의 압력에는 영향을 끼치지 못하였다.

3. 램 피스톤의 Middle Chamber 로부터 리턴 라인으로의 연결 관로의 지름은 리턴 라인의 압력에는 영향을 끼치지 못하였고, 이 값을 너무 작게 했을 때는 Middle Chamber 의 유체가 리턴 라인쪽으로 충분히 빠지지 못하여, 램 피스톤이 제대로 상승하지 못하는 등 성능이 저하되었다.

4. 리턴 라인에서 탱크로 빠져 나가는 호스의 지름을 변화시켜 가며 시뮬레이션 하였을 때, 리턴라인의 맥동이 감소하였다. 현 브레이커 시스템의 구조 상, 리턴 라인으로 들어 오는 유량을 조절하는 것보다는 탱크로 빠지는 호스의 직경을 크게 하는 것이 리턴 라인의 맥동을 감소시킬 수 있다.

5. 향후 연구 과제로, 이 연구 결과를 실제 시스템에 적용하여, 리턴측 맥동을 감소시킨 브레이커 시스템을 개발하여야 한다.

6. John Watton, Fluid Power Systems, Prentice Hill, 1989.

### 참고문헌

1. Herbert E. Merrit, Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons, 1967.
2. Lee, H. S., "A Study on the Design Parameter of Hydraulic Breaker," Master's Thesis of Hanyang Univ., 1989.
3. Ko, S. H., Lim, J. H., "Modeling and Analysis of a Hydraulic Breaker Considering Elastic Impact between the Piston and the Chisel," Trans. KSME, Vol. 19, No. 2, pp. 338-347, 1995.
4. Choi, K. H., Sung, W. J., Song, C. S., "A Study on the Performance Improvement of the Hydraulic Breaker," Trans. METRIC of Hanyang Univ., Vol. 5, No. 1, pp. 57-64, 1999.
5. Lee, Y. K., Sung, W. J., Song, C. S., "The Development of an Analysis Tool and the Performance Analysis of a Hydraulic Breaker System," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 4, pp. 189-196, 2000.