

〈論 文〉

# 유압브레커의 모델링 및 피스톤과 치즐간의 탄성충돌을 고려한 해석

고승환\* · 임종혁\*\*

(1994년 6월 1일 접수)

## Modeling and Analysis of a Hydraulic Breaker Considering Elastic Impact between the Piston and the Chisel

Seung Hwan Ko and Jong Hyuk Lim

**Key Words :** Hydraulic Breaker(유압브레커), Impact(충돌), Modeling(모델링), Finite Element(유한요소), Analysis(해석), Experiment(시험)

### Abstract

Equations of motion and continuity equations of a hydraulic breaker are derived. Hydraulic pressures are defined with 6 state variables corresponding to 6 control volumes. Impact analysis procedure of the piston and chisel is developed based on the finite element nodal displacement description. Computer simulation is performed with given design parameters and the results are compared with experimental results.

### 1. 서 론

본 연구는 산업기계인 굴삭기(excavator) 등에 장착하여 도로, 콘크리트 및 암반 등의 파쇄 등에 이용하는 유압브레커(hydraulic breaker)의 모델링과 전산시뮬레이션 그리고 시험에 관한 것이다. 유압브레커는 1970년대 초반에 유럽에서 실용화된 후 1970년대 말에 일본으로 기술이전이 되며 세계적인 건설장비의 하나가 되었고 국내에도 1980년대 초반에 수입되며 그 유용성이 널리 인정된 기계장치이다. 1980년대 말부터는 국내에서도 유압브레커에 대한 연구가 대학과 산업체에서 시작되었다.<sup>(1)</sup> 유압브레커는 왕복운동을 하며 반복적으로 타격을 가하는 피스톤과 이 피스톤의 운동에너지를 전달받아 목표물을 파쇄하는 치즐(chisel), 그리고 유압의 유

로(flow path)를 개폐해 주는 조절장치인 컨트롤밸브(control valve)와 유압에너지의 저장과 부족유량의 보충을 위한 어큐뮬레이터(accumulator) 등으로 이루어져 있다.

유압브레커의 전산시뮬레이션을 위한 모델링에서 피스톤과 치즐의 충돌현상은 반발계수(coefficient of restitution)를 이용하든가 아니면 접촉물체간에 물리적으로 만족해야 할 조건들을 수치적으로 처리하는 충돌해석기법을 이용하여야 하는데 전자의 해석방법은 브레커의 작동상태에서의 반발계수를 측정하는 것이 매우 어려운 일이므로 본 연구에서는 탄성체끼리의 접촉-충돌현상을 유한요소법을 이용하여 해석하는 방법<sup>(2~4)</sup>을 적용하였다.

제2장에서는 피스톤 및 치즐의 운동방정식, 그리고 각 유체실간에 만족해야 할 연속방정식 등이 충돌해석 이론과 함께 유도되었다. 이러한 식들을 이용하여 전산시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과들을 측정된 시험결과들과 비교하여 그 유용성을 검

\*정회원, 대우중공업 중앙연구소

\*\*대우중공업 중앙연구소



$$m_p \dot{y} = F_{p1} - F_{pu} - F_{bg} - m_p g - F_{pf} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} F_{p1} &= A_{p1} P_2 \\ F_{pu} &= A_{pu} P_4 \\ F_{bg} &= A_{pg} P_{bg} \\ F_{pf} &= |F_{pn}| \text{sign } 1(\dot{y}) \end{aligned} \quad (2)$$

으로서  $m_p$ 는 피스톤질량이고  $A_{p1}$ 와  $A_{pu}$ 는 피스톤 하실과 상실의 수압면적이며  $A_{pg}$ 는 백헤드부 가스 실의 수압면적,  $P_i$ 는 'i' 유체실(control volume)의 압력,  $P_{bg}$ 는 백헤드(back head)의 질소가스 압력,  $F_{pn}$ 은 피스톤에 작용하는 마찰력의 크기이며  $\text{sign } 1(\cdot)$ 은 다음과 같이 정해지는 함수이다.

$$\begin{aligned} \text{sign } 1(\dot{y}) &= 1, \text{ if } \dot{y} \geq 0.0 \\ &= -1, \text{ if } \dot{y} < 0.0 \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 4에서 밸브의 운동방정식은

$$m_v \ddot{x} = F_{vc} + F_{va} - F_{vb} - F_{vu} - F_{vl} - m_v g - F_{vf} \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} F_{vc} &= A_{vc} P_5 \\ F_{va} &= 0.428 A_{va} (P_4 - P_6), \quad 0.0 \leq x < \delta_1 \\ &= 0.0, \text{ Otherwise} \\ F_{vb} &= 0.428 A_{vb} (P_1 - P_4), \quad \delta_2 \leq x < \delta_3 \\ &= 0.0, \text{ Otherwise} \\ F_{vu} &= A_{vu} P_1 \\ F_{vl} &= A_{vl} P_6 \\ F_{vf} &= |F_{vn}| \text{sign } 1(\dot{x}) \end{aligned} \quad (5)$$

으로서  $m_v$ 는 밸브의 질량,  $A_{vc}$ 는 유체실 5의 수압면적,  $A_{va}$ 와  $A_{vb}$ 는 밸브유로의 개구면적으로 유로의 형상과 밸브변위  $x$ 의 함수이다.  $A_{vu}$ 와  $A_{vl}$ 은

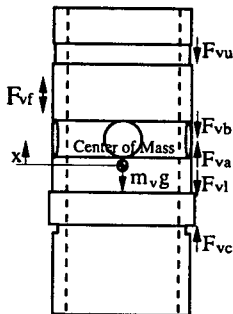


Fig. 4 Forces exerted on the valve

밸브의 상실 및 하실의 수압면적이며  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 는 설계변수이고  $F_{va}$ 와  $F_{vb}$ 는 오리피스(orifice)를 통과하는 유체의 관성력이고  $F_{vu}$ 와  $F_{vc}, F_{vl}$ 은 유체 압  $P_1, P_5, P_6$ 에 의해 밸브에 작용되는 힘이며  $F_{vf}$ 는 마찰력이고  $F_{vn}$ 은 마찰력의 크기이다. Fig. 2에서 각각의 검사체적에 대하여 압축성을 고려한 연속방정식은 다음과 같이 구해진다.

유체실(control volume) 1 :

$$\frac{dP_1}{dt} = -\frac{\beta}{V_1} (Q_{in} - Q_{12} - Q_{14}) \quad (6)$$

여기서,  $\beta$ 는 유체의 체적탄성계수(bulk modulus)이고,  $V_1$ 은 유체실의 체적,  $Q_{in}$ 은 브레이크에 공급되는 유체의 시간당 흐름(flow rate)이며  $Q_{ij}$ 은 'i' 유체실에서부터 'j' 유체실로의 시간당 흐름(flow rate)으로서

$$\begin{aligned} Q_{12} &= K_{12} \text{sign } 2\sqrt{|P_1 - P_2|} \\ Q_{14} &= K_{14} \text{sign } 2\sqrt{|P_1 - P_4|} \end{aligned} \quad (7)$$

이 되고  $K_{ij}$ 는 'i' 유체실과 'j' 유체실의 연결상태에 따라 정해지는 계수<sup>(5)</sup>이며 오리피스의 경우 다음과 같이 된다.

$$K_{ij} = C_d A_o \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (8)$$

여기서,  $C_d$ 는 유량계수(discharge coefficient)이고,  $A_o$ 는 개구단면적,  $\rho$ 는 유체의 밀도이다. 그리고  $\text{sign } 2(\cdot)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{sign } 2\sqrt{|P_i - P_j|} &= |P_i - P_j|, \text{ if } P_i \geq P_j \\ &= -|P_i - P_j|, \text{ if } P_i < P_j \end{aligned} \quad (9)$$

유체실(control volume) 2 :

$$\begin{aligned} \frac{dP_2}{dt} &= \frac{\beta}{(V_2^o + A_{p1}y)} (Q_{12} - Q_{23} - Q_{25} \\ &\quad - A_{p1}\dot{y} - q_{24} - q_{26}) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Q_{23} &= K_{23} \text{sign } 2\sqrt{|P_2 - P_3|} \\ Q_{25} &= K_{25} \text{sign } 2\sqrt{|P_2 - P_5|} \end{aligned} \quad (11)$$

이며  $V_2^o$ 는 유체실 2의 초기체적이고  $y$ 와  $\dot{y}$ 는 피스톤의 변위 및 속도이다. 그리고  $q_{24}$ 와  $q_{26}$ 은 누유(leakage)량으로서 단면 및 형상치수 등에 따라 결정되는데<sup>(6)</sup> 층류(laminar)인 경우 실린더와 피스톤 사이에 존재하는 환형(annular)간극을 통해 흐르는 누유량은 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$q_{ij} = \frac{\pi r c^3}{6 \mu L} \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{e}{c} \right)^2 \right\} (P_i - P_j) = C_{ij} (P_i - P_j) \quad (12)$$

여기서,  $r$ 은 피스톤반경,  $c$ 는 간극,  $e$ 는 편심량(Eccentricity),  $\mu$ 는 절대점도,  $L$ 은 피스톤 단면에 수직인 방향으로의 간극길이이다.

유체실(control volume) 3 :

어큐뮬레이터(accumulator) 내에 형성되는 유체실 3은 고압측 유로와 항상 연결되어 있으며 압력의 급격한 변동을 흡수하고 잉여유량의 저장과 부족한 유량을 보충하는 역할을 하고 있다. 어큐뮬레이터 내의 질소가스의 압축-팽창이 짧은 시간(약 0.2초)에 이루어지므로 가역단열과정으로 생각할 수 있다. 자세한 유도과정은 부록에 유도되어 있으며 연속방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{dP_3}{dt} = \frac{Q_{23}}{\alpha} \quad (13)$$

여기서,

$$\alpha = V_a \left[ \frac{P_a^{1/\kappa}}{\kappa P_3^{(1+1/\kappa)}} + \frac{1}{\beta} \left\{ 1 - \left( \frac{P_a}{P_3} \right)^{1/\kappa} \right\} \right] \quad (14)$$

이며  $V_a$ 와  $P_a$ 는 어큐뮬레이터 질소가스의 초기체적과 압력이며  $\kappa$ 는 비열비이다.

유체실(control volume) 4 :

연속방정식은

$$\frac{dP_4}{dt} = -\frac{\beta}{V_4^0 - A_{pu}y} (A_{pu}\dot{y} - Q_{146} + q_{24}) \quad (15)$$

여기서,  $V_4^0$ 는 유체실의 초기체적이고  $Q_{146}$ 은 유체실로부터 빠져나가는 유량이다.

유체실(control volume) 5 :

$$\frac{dP_5}{dt} = \frac{\beta}{V_5^0 + A_{vc}x} (Q_{256} - A_{vc}\dot{x}) \quad (16)$$

여기서,  $V_5^0$ 는 초기체적이고  $A_{vc}$ 는 수압면적,  $x$ 와  $\dot{x}$ 는 밸브의 변위와 속도이며  $Q_{256}$ 은 유체실로 유입되는 시간당 유량이다.

유체실(control volume) 6 :

$$\frac{dP_6}{dt} = \frac{\beta}{V_6^0} (Q_{46} + Q_{56} - Q_{out}) \quad (17)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Q_{46} &= K_{46} \text{sign} 2 \sqrt{|P_4 - P_6|} \\ Q_{56} &= K_{56} \text{sign} 2 \sqrt{|P_5 - P_6|} \\ Q_{out} &= K_{out} \text{sign} 2 \sqrt{|P_6 - P_t|} \end{aligned} \quad (18)$$

이고  $P_t$ 는 작동유 귀환라인(return line)이 연결된 탱크(tank)의 압력이다.

### 2.2 피스톤과 치즐의 접촉-충돌 조건식

접촉하는 두 물체 사이에 물리적으로 만족해야 할 조건<sup>(2~4)</sup> 중 그 첫번째는 한 물체상의 어떠한 질량점도 상대편 물체 내로 침투할 수 없다는 “불침투조건”이며 두번째 조건으로는 접촉점 사이에 인위적인 정착장치를 하지않는 한 접촉면에서 인장력이 발생될 수 없다는 “비인장력조건”이다. Fig. 5에서 피스톤과 치즐의 충돌면에 존재하는 유한요소절점들의 위치벡터로 위의 두 조건들을 다음과 같이 유도할 수 있다.

(i) 불침투조건

$$(R_3 - R_1)^T n \geq 0 \quad (19)$$

여기서, ‘ $n$ ’은 접촉면에서 물체 외부방향으로의 단위법선벡터이고 상첨자 ‘ $T$ ’는 벡터의 전치(transpose)를 의미한다. 접촉이 일어나는 절점에서의 불침투조건은 다음과 같이 된다.

$$\Phi^n = (R_3 - R_1)^T n = 0 \quad (20)$$

비슷한 방법으로 점선방향으로의 접촉조건식을 유도할 수 있는데 유도과정은 참고문헌(2)에 자세히 나와 있으므로 결과식만을 써보면

$$\Phi^t = (R_3 - R_1)^T t - r \sqrt{(R_2 - R_1)^T (R_2 - R_1)} = 0 \quad (21)$$

여기서, ‘ $t$ ’는 접촉면에서의 단위점선벡터이고 ‘ $r$ ’은 이웃한 절점 사이에서의 위치를 정해주는 매개변수이다.

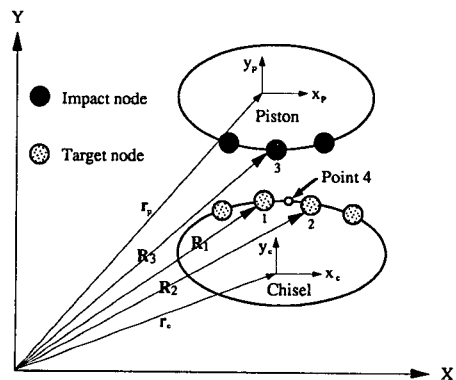


Fig. 5 Contact configuration

(ii) 비인장력조건

접촉점이 미끄럼없이 계속해서 접촉이 유지되도록 하기 위한 접촉력은 법선방향과 접선방향의 접촉구속조건식에 대응하는 라그랑지승수(lagrange multiplier)와 다음의 관계를 갖고 있다.

$$G^n = -\Phi_{n,i}^T \lambda^n \tag{22}$$

$$G^t = -\Phi_{t,i}^T \lambda^t \tag{23}$$

여기서  $\Phi_{n,i}^T$ 는 법선방향 접촉조건식을 Fig. 5에 표시된 국부좌표계 원점의 위치벡터  $r_i$ 에 대해 미분한 자코비안(jacobian) 행렬이고  $\lambda^n$ 은 그에 대응하는 라그랑지승수<sup>(2)</sup>이다. 그리고  $G^n$ 와  $G^t$ 는 관성좌표계에서 보았을 때의 법선방향의 접촉력벡터와 접선방향의 접촉력벡터이다. 그러므로 앞에서 유도한 비인장력 조건식은 다음과 같이 된다.

$$|G^n| \geq 0 \tag{24}$$

식(20), (21)의 접촉조건식들과 고려하는 동역학계의 나머지 구속조건식들을 벡터  $\Phi$ 로 표시하면 계의 운동방정식은 다음과 같은 형태의 행렬식으로 나타낼 수 있다.<sup>(2)</sup>

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \\ \gamma \end{bmatrix} \tag{25}$$

여기서,  $M$ 은 질량행렬이고,  $q$ 는 일반좌표(generalized coordinates)이며  $\Phi_q$ 는 자코비안행렬이다. 또한  $Q$ 는 일반힘(generalized force) 벡터이고  $\lambda$ 는 라그랑지승수이며  $\gamma$ 는 구속조건식을 시간에 대해 두 번 미분했을 때 나타나는 항이다.

### 3. 시험장치의 구성 및 시뮬레이션

#### 3.1 시험장치의 구성

유압브레커의 유량 및 유압을 측정하기 위한 시험장치는 센서(sensor)와 증폭기 그리고 노트북컴퓨터(note-book computer)로 구성되어 있다. 압력센서(pressure transducer)와 증폭기(amplifier)는 kyowa사의 PGM시리즈(series)와 DPM700B 시리즈를 이용하였고 유량계(flow meter)는 터빈식 유량계인 Hydrotechnik사의 RE3-600를 이용하였다. 증폭기를 통하여 나온 신호는 노트북컴퓨터에 장착된 데이터 습득장치(data acquisition system)를 통하여 PC에 파일(file)로 저장되며 해석용 소프트웨어를 이용하여 그 결과를 다양한 형태로 출력하여 볼 수 있었다.

#### 3.2 시뮬레이션

2.1절에서 유도한 피스톤과 밸브의 운동방정식인 식(1), (4)는 상태변수(state variable)를 도입하여 4개의 비선형 일차미분방정식의 형태로 바꿀 수 있는데 이 식들과 6개 유체실 각각의 연속방정식으로부터 유도된 6개의 미분방정식이 총 10개의 비선형 일차 미분방정식이 되어 유압브레커 시스템의 지배방정식을 구성하게 된다.

피스톤과 치즐의 충돌해석은 2.2절에서 설명한 접촉 조건식을 만족하는지의 여부를 확인하며 구속조건식을 수반하는 변형다물체계의 운동방정식을 수치적분하며 진행되는데 자세한 알고리즘은 참고 문헌<sup>(2~4)</sup>에 나와 있다. 브레커와 같이 급격하게 압력이 변하는 시스템인 경우 압축성을 고려한 연속방정식과 탄성체의 충돌현상을 지배하는 운동방정식이 매우 강한 비선형성을 보이는데 이로 인하여 수치적분에 많은 시간이 소요되게 된다. 본 연구에서의 수치적분은 프리딕터-코렉터(predictor-corrector) 알고리즘<sup>(6)</sup>을 이용하였으며 미니슈퍼컴퓨터인 컨벡스-3200(convex-3200)이 사용되었다. 해석순서는 Fig. 6에 보인 바와 같이 피스톤이 상승하여 정점에 도달한 후 다시 하강하여 치즐과 접촉이 되기 직전까지는 10개의 비선형 일차미분방정식을 수치적분하며 해를 구하는 과정(flow analysis)을 수행하고, 피스톤과 치즐의 유한요소절점의 어느 한 점이라도 접촉이 일어나는 것으로 계산되면 접촉해석(contact analysis)을 수행하게 된다. 이 때 유압과 피스톤상부 질소가스에 의해 가해지는 힘들은 유한요소의 절점력으로 계산되어 부과된

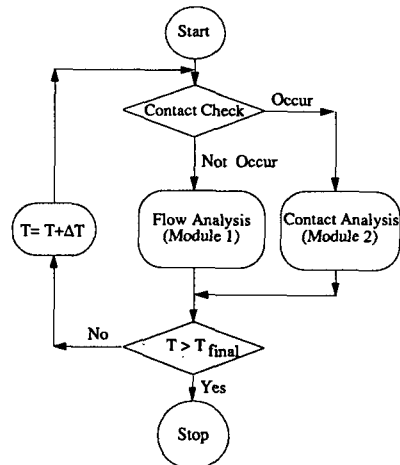


Fig. 6 Flow chart of the analysis

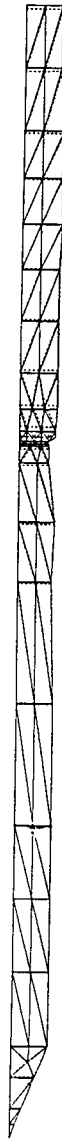


Fig. 7 Finite element mesh and deformed shape of the piston and the chisel

다. 충돌해석을 위한 피스톤과 치즐의 유한요소 모델은 축대칭 요소를 이용하여 Fig. 7과 같이 구성하였는데 점선은 접촉개시 후 약1.5(ms)인 순간에서의 피스톤과 치즐의 탄성변형이 20배 확대된 모양을 나타내고 있다. 그리고 브레이크에 들어가는 유량  $Q_m$ 은 시험시 유량계를 이용하여 측정된 값들을 완전한 형상이 되도록 근사함수를 도입하여 단순화하여 시뮬레이션의 입력(input)유량으로 이용하였으며 이에 대한 결과가 Fig. 8에 있다. 브레이크 작동시 피스톤 상부에 인접한 백헤드(back head)와 어큐뮬레이터의 질소가스 충전압력이 성능에 영향을 미치게 되는데 시험시 백헤드와 어큐뮬레이터의 초기 가스압력은 8(Bar)와 60(Bar)로 조정하였으며 식(12)에 표시된 계수  $C_{ij}(m^3/(S.N))$ 는  $C_{24}=4.391 \times 10^{-15}$ ,  $C_{26}=2.933 \times 10^{-14}$  이었다. 유체와 강철의 물성치는 Table 1에 표시된 값을 이용하였다. 피스톤과 밸브의 마찰력은 조립시 개략적으로 측정하였는데 피스톤과 밸브의 질량으로 각각의 마찰력을 나눈 값이 0.758(N/kg), 11.628(N/kg)이었다. 피스톤과 밸브의 질량과 수압면적, 그리고 각 유체실 사이의 유체의 흐름에 관계되는 계수  $K_{ij}$ 에 관한 값이 Table 2에 정리되어 있다. 시험은 치즐의 둥근 끝단을 120(mm) 두께의 철판에 고정시킨 채 타격을 가하는 것으로 하였는데 충돌해석시 치즐의 경계조건도 이런 조건에 부합되도록 Hertz의 이

Table 1 Material properties of fluid and steel

	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	Poisson ratio
Steel	7600	200	0.3
	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Bulk modulus (GPa)	
Fluid	900	1.6	

Table 2 Values of the design parameters used for simulation

$Z|_{x=\delta}$  means the value of Z calculated at  $x = \delta$

Units :  $A_{yy}/m_x[m^2/kg]$ ,  $K_{ij}=[m^4/(s.N^{1/2})]$

$\frac{A_{pl}}{m_p}$	$\frac{A_{pu}}{m_p}$	$\frac{A_{pg}}{m_p}$	$\frac{A_{vu}}{m_v}$	$\frac{A_{vc}}{m_v}$	$\frac{A_{v1}}{m_v}$	$\frac{A_{va} _{x=0}}{m_v}$	$\frac{A_{vb} _{x=\delta_3}}{m_v}$
$1.972 \times 10^{-5}$	$2.914 \times 10^{-5}$	$1.380 \times 10^{-4}$	$1.105 \times 10^{-4}$	$2.228 \times 10^{-4}$	$1.123 \times 10^{-4}$	$4.498 \times 10^{-4}$	$9.588 \times 10^{-4}$
$K_{12}$	$K_{14} _{x=0}$	$K_{23}$	$K_{25}$	$K_{46} _{x=\delta_3}$	$K_{56}$	$K_{out}$	
$9.463 \times 10^{-5}$	$2.372 \times 10^{-5}$	$2.000 \times 10^{-5}$	$8.536 \times 10^{-8}$	$1.113 \times 10^{-5}$	$8.535 \times 10^{-8}$	$1.400 \times 10^{-6}$	

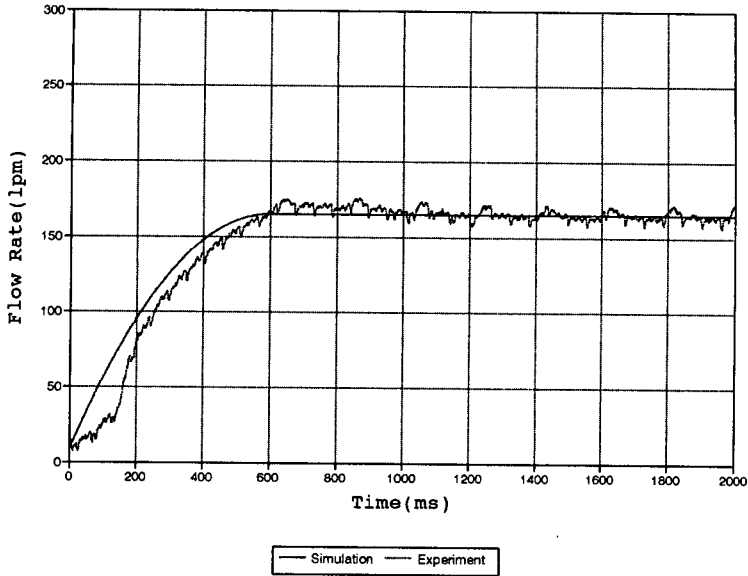


Fig. 8 Input flow rate.(Experimental result and curve fitted)

론<sup>(2,7,8)</sup>을 적용하였다. 모든 유체실은 초기압력이 영(aero)인 유체로 가득 채워지고 피스톤이 하사점에서 정지한 상태로 시작되는 것으로 시뮬레이션하였으며 이는 시험시의 조건과 동일하다.

4. 결과의 검토

식(1)과 (2)에서 유체와 가스의 압력에 의해 발생

하는 피스톤의 운동에너지가 브레이크의 성능과 직접 관련되어 있음을 알 수 있고 그 중 피스톤하실과 상실의 압력  $P_2$ 와  $P_4$ 가 제일 중요한 역할을 하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 이 두 압력의 시뮬레이션 값과 시험결과를 비교함으로써 결과의 타당성을 확인하고자 하였다. Fig. 9의 결과에서 보는 바와 같이, 피스톤하실의 압력  $P_2$ 의 형성과정 및 타격시의 압력변동에서 타격이 3~4회 일어나는 초

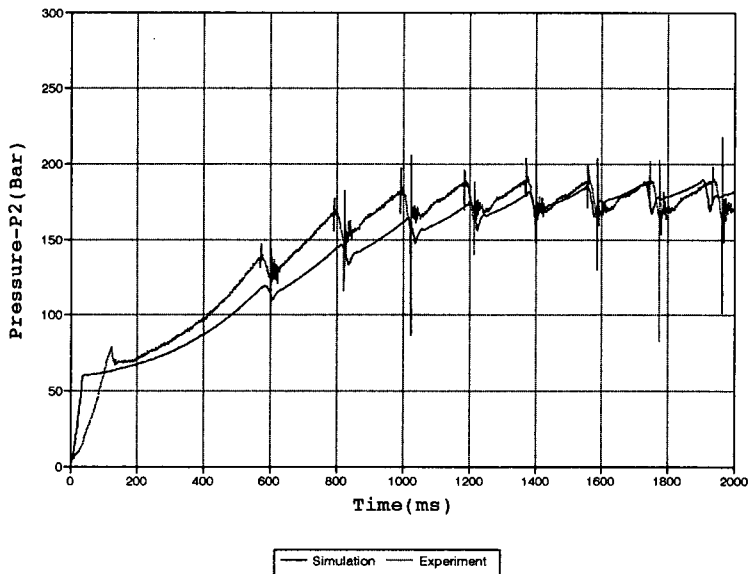


Fig. 9 Pressure of the lower chamber

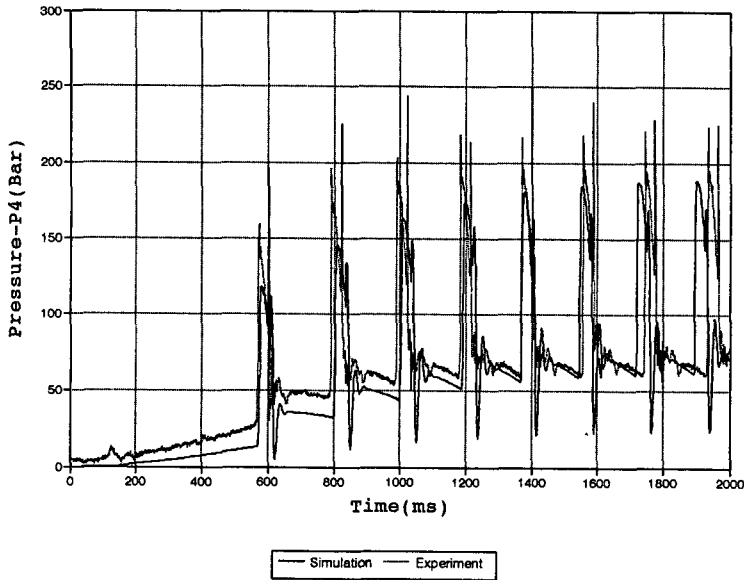


Fig. 10 Pressure of the upper chamber

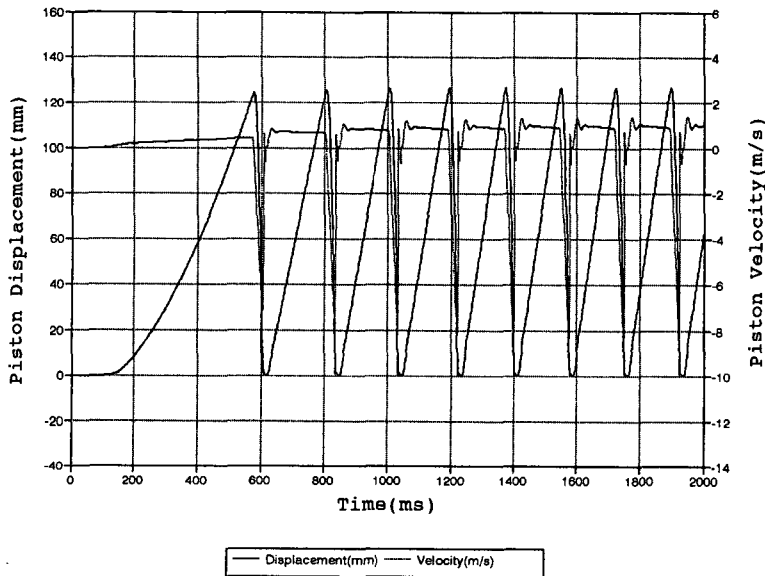


Fig. 11 Displacement and velocity of the piston.(Simulation results)

기 구간에서는 두 결과의 오차가 최고 9.8(%)까지 생기나 그 이후에는 오차가 점차 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 가동초기의 오차는 불안정한 여러 요소들(점성변화, 마찰력, 어큐뮬레이터 고무의 초기저항 등) 때문으로 판단된다. Fig. 10에는 피스톤 상실의 압력  $P_4$ 의 변화에 대한 값들이 나타나 있는데  $P_2$ 와 마찬가지로 초기의 오차는 정상운전상태가

됨에 따라 소멸되는 것을 알 수 있다. 피스톤의 변위 및 속도는 측정이 쉽지않은 문제이므로 본 연구에서는 시뮬레이션 결과만을 Fig. 11에 보였으며 이것들로부터 피스톤의 최대행정거리 및 타격속도 등을 알 수 있다. 한편 Fig. 9에서 정상상태에서의 피스톤의 타격주기( $\Delta t$ )를 보면 시뮬레이션시  $\Delta t_{sim} = 0.1743(sec)$ 이고 이로부터 분당타격수( $bpm$ )를 계



산해 보면 약  $bpm=344$ 가 됨을 알 수 있다. 그리고 시험결과에서는  $\Delta t_{exp}=0.1868(sec)$ 이고,  $bpm=321$ 로서 두 결과의 오차는 약 7.2(%)가 된다.

5. 결 론

피스톤과 밸브의 운동방정식과 만족해야 할 유체의 연속방정식을 함께 유도한 후 수치적분법을 이용하여 해를 구하여 그 결과를 시험값과 비교하였다. 두 결과의 오차는 최대치가 10(%)미만이었으며 정상상태(steady state)에 도달함에 따라 그 오차는 현저하게 줄어들음을 알 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 제시한 모델링 및 해석 방법들이 인자 최적설계(parameter optimization)를 통한 브레이크의 성능향상을 위해 유용하게 적용될 수 있으리라 판단된다. 그리고 상이한 타격대상물이 유압브레이크의 성능에 미치는 영향 등에 대해서는 향후 좀더 연구가 진행되어야 하겠다.

참고문헌

- (1) 정규홍, 1988, “공유압식 브레이크의 성능에 관한 연구,” 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- (2) 고승환, 1991, “유한요소법을 이용한 변형 다물체계의 마찰을 고려한 접촉-충돌 해석,” 한국과학기술원, 박사학위논문.
- (3) Seung Hwan Ko. and Byung Man Kwak., 1992, “Frictional Dynamic Contact Analysis Using Finite Element Nodal Displacement Description,” *Computers & Structures*, Vol. 42, No. 5, pp. 797~807.
- (4) Seung Hwan Ko. and Byung Man Kwak., 1992, “Frictional Dynamic Contact Analysis in Deformable Multibody Systems,” *Finite Elements in Analysis and Design*, 12, pp. 27~42.
- (5) Herbert E. Merritt, 1966, *Hydraulic Control System*, John Wiley & Sons.
- (6) Shampine, L. F. and Gordon, M. K., 1975, “Computer Solution of Ordinary Differential Equations: The Initial Value Problem,” *W. H. Freeman and Company*, San Francisco.
- (7) Zukas, K. L., etc, 1982, *Impact Dynamics*, John Wiley & Sons, New York.
- (8) Jonson, K .L., 1985, “Contact Mechanics”, Cambridge University Press.

bridge University Press.

부 록

어큐물레이터의 연속방정식 유도

Fig. A-1에서 보는 바와 같이 어큐물레이터에 작동유가 유입되기 전의 초기상태 때는 질소가스가 어큐물레이터의 전체 체적을 차지하게 되는데 이때의 질소가스의 압력과 체적을  $P_a, V_a$ 라 하고 임의의 시간에서의 질소가스의 압력과 체적을  $P_t, V_t$ , 그리고 어큐물레이터에 유입된 유체에 의해 형성되는 검사체적의 압력과 체적을  $P_3$ 와  $V_3$ 라 하면 어큐물레이터의 체적은 일정하므로 다음의 관계식이 성립한다.

$$V_t + V_3 = V_a = \text{const} \tag{A-1}$$

한편 질소가스실의 압축-팽창과정을 가역단열과정으로 가정하는 경우

$$P_a V_a^\kappa = P_t V_t^\kappa \tag{A-2}$$

이 되는데, 여기서  $\kappa$ 는 비열비이다. 얇은 고무주머니(rubber bladder)에 의한 저항과 질량효과를 무시하는 경우 힘의 평형조건으로부터

$$P_t = P_3 \tag{A-3}$$

이 되므로 식(A-2)와 식(A-3)를 식(A-1)에 대입하면 유체실의 체적  $V_3$ 는 다음과 같이 유체실의 압력  $P_3$ 의 함수만으로 표시된다.

$$V_3 = V_a - V_t = V_a \left\{ 1 - \left( \frac{P_a}{P_3} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right\} \tag{A-4}$$

식(A-4)의 양변을 시간에 대해 미분하면 다음의 식을 얻는다.

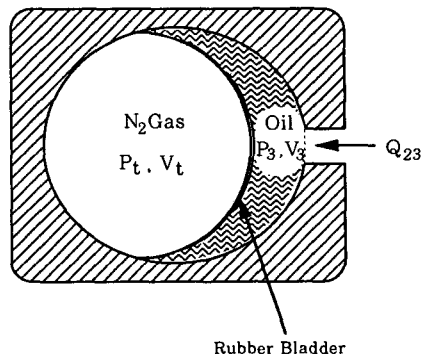


Fig. A-1 Schematic diagram of the accumulator

$$\frac{dV_3}{dt} = \frac{V_a P_a^{1/\kappa}}{\kappa P_3^{(1+1/\kappa)}} \frac{dP_3}{dt} \quad (\text{A-5})$$

이 되고 식(A-4)와 식(A-5)를 식(A-6)에 대입하면 다음의 식을 얻는다.

한편, 어큐뮬레이터에 유입되는 유체의 시간당 흐름을  $Q_{23}$ 라 하면 유체실의 연속방정식은

$$Q_{23} = V_a \left[ \frac{P_a^{1/\kappa}}{\kappa P_3^{(1+1/\kappa)}} + \frac{1}{\beta} \left\{ 1 - \left( \frac{P_a}{P_3} \right)^{1/\kappa} \right\} \right] \frac{dP_3}{dt} \quad (\text{A-7})$$

$$Q_{23} = \frac{dV_3}{dt} + \frac{V_3}{\beta} \frac{dP_3}{dt} \quad (\text{A-6})$$