유공압시스템학회논문집 제4권 제4호 pp. 21~27 2007년 12월

유압식 착암기 치즐의 타격 변형량 해석에 관한 연구
A Study On the Analysis Of Impact Strain for Hydraulic Breaker Chisel

박종원 · 이기욱 · 김형의
J. W. Park, K. W. Lee and H. E. Kim

Key Words : Hydraulic breaker(유압식 착암기), Impact energy prediction(타격에너지 예측), Hydraulic circuit analysis(유압회로 해석), Impact strain analysis(타격 변형량 해석)

Abstract: A hydraulic breaker for construction machinery generally used for the destroying and disassembling of buildings, crashing road pavement, breaking rocks at quarry and so on. So the measurement of the impact energy of a hydraulic breaker is very important thing to prove its capability to manufacturers and customers. Therefore the prediction of impact energy in design process is very helpful to the most of breaker manufacturers. In this study, we carried on modeling and simulation of a hydraulic breaker to predict impact energy via commercial CAE software. The modeling and simulation of a hydraulic breaker was achieved with two parts. One is a hydraulic circuit analysis part via AMESim and the other is impact strain analysis part via ANSYS.

기호 설명

A_{ori} : 오리피스 단면적
A_t : 시험용 치즐의 스트레인 게이지 부착위치 단면적
A_{v1}, A_{v2}, A_{v3} : 검사체적 i 의 밸브 수압면적
C_d : 오리피스 유량 계수
F_r : 피스톤과 치즐간의 탄성충돌 반발력
V : 검사체적
V_{ga} : 임의의 상태의 질소가스 부피
d_i : 밸브와 슬리브 사이의 지름
h_i : 피스톤과 실린더 사이의 간극
l_i : 접촉면적의 길이
p_1 : 검사체적 1의 압력
x_v : 방향제어밸브의 변위
$\ddot{x}_v$: 방향제어밸브의 가속도

접수일 : 2007년 11월 4일
박종원(책임저자) : 한국기계연구원 신뢰성평가센터
E-mail : jwpark@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7107
이기욱, 김형의 : 한국기계연구원 신뢰성평가센터

1. 서 론

건설기계용 유압식 착암기는 일반적으로 건물의 파괴 및 해체, 도로의 파쇄, 광산에서의 암반 분쇄 등에 사용되고 있다. 그래서 유압식 착암기에 있어서 타격에너지의 측정은 매우 중요한 것으로써, 착암기의 성능을 생산자와 소비자 모두에게 증명할 수 있는 단서가 되고 있다. 그러나, 유압식 착암기의 생산업체에서는 통상 10종 이상의 모델을 양산하고 있고, 신모델의 개발도 빈번하여 매번 시험을 통한 타격에너지의 측정이 비용과 시간에 있어 큰 부담이 되고 있는 실정이다. 유압식 착암기의 수학적 모델링 및 유압회로 해석에 대한 많은 연구가 진행되어 왔고, 이러한 연구들에서는 작동특성 분석 및 효율향상을 위한 주요 설계변수 도출 등의 연구결과가 보고되었다.[1~3] 그러나 유압식 착암기의 대표적 성능인 타격에너지에 대하여, 착암기 치즐의 타격시 그 변형량을 측정하고 이를 해석결과와 비교한 연구는 보고되지 않고 있다. 이에 착암기 생산업체에서 실질적으로 활용하고 있는 미국 건설기계장비협회(AEM)의 기준에 따른 타격에너지 측정시험과 그 시험결과를 전산 모사할 수 있는 기법에 대한 필요성이 현장의 설계 기술자들로부터 개진되어

본 연구를 수행하게 되었다.[4~7] 본 연구에서는 유압식 착암기의 유압회로 해석을 위하여 수학적 모델링을 수행하고, 이를 기반으로 AMESim을 활용하여 피스톤의 작동속도를 산출한 후, 그 결과를 ANSYS LS-DYNA에 적용시켜 타격시 치즐변형에 대한 해석을 수행하였다.

2. 유압식 착암기의 수학적 모델링

2.1 피스톤(piston), 치즐(chisel) 및 밸브의 운동방정식

Fig. 1은 피스톤과 치즐의 자유 물체도(free body diagram)를 나타내고 있으며, 피스톤과 치즐의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_p\ddot{x}_p = p_1 A_{p1} - p_5 A_{p2} - p_{gas} A_{pg} - M_p g - F_{cp} - F_{dp} + F_r \quad (1)$$

여기서, M_p와 $\ddot{x}_p$는 피스톤의 질량과 가속도이고, A_{p1}, A_{pg}는 검사체적 1의 수압면적과 가스실 검사체적의 피스톤 수압면적이며, F_{cp}와 F_{dp}는 실린더 벽면과 피스톤 벽면에서의 쿨롱 마찰력과 점성마찰력이다.

$$M_r\ddot{x}_r = K_r x_r + C_r\dot{x}_r - M_r g - F_r \quad (2)$$

$$F_r = \begin{cases} K_p(x_p - x_r) & (x_p < 0) \\ 0 & (x_p \geq 0) \end{cases} \quad (3)$$

본 연구에서는 피스톤 하강시 치즐과의 충돌과정을 탄성충돌로 가정하였고, 스프링-댐퍼로써 모델링하였다.[1~3,8]

Fig. 2는 방향제어밸브의 자유 물체도를 나타내고 있으며, 밸브의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M_v\ddot{x}_v = p_7 A_{v4} - p_i(A_{v1} + A_{v2} - A_{v3}) - M_v g - F_{cv} - F_{dv} \quad (4)$$

여기서, p_7과 p_i는 검사체적 7과 검사체적 i의 압력이고, F_{cv}, F_{dv}는 방향제어밸브의 벽면과 슬리브의 벽면에서 나타나는 쿨롱마찰력과 점성마찰력이며, M_v와 g는 밸브의 무게와 중력 가속도이다.

2.2 마찰력의 모델링

일반적으로 마찰력은 점성 마찰력, 정적 마찰력, 쿨롱 마찰력의 세 개의 부문으로 나뉜다.[3,8]

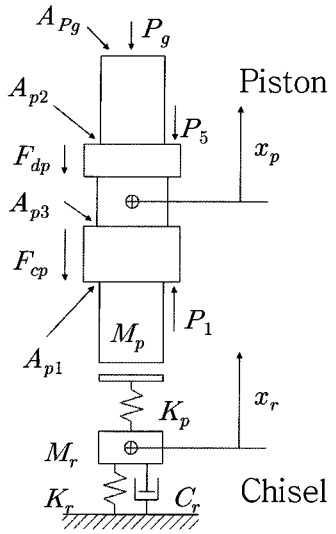

Fig. 1 Free body diagram of the piston & chisel

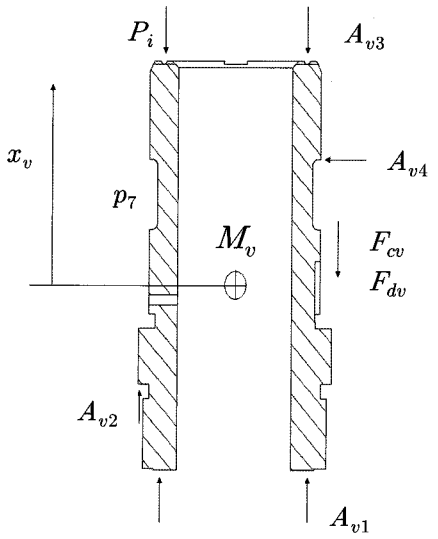

Fig. 2 Free body diagram of the directional control valve

점성 마찰력은 속도에 비례하여 운동을 저지하는 마찰력으로서 다음과 같이 표현된다.

$$F_d = B\frac{dx(t)}{dt} \quad (5)$$

여기서, B는 점성 마찰계수(viscous friction coefficient)이다. 각각 피스톤과 실린더 사이의 간극과 방향제어밸브와 슬리브 사이의 간극과 접촉 길이 등을 고려하면, 점성 마찰력은 다음과 같이 나타낼 수도 있다.

$$F_d = \sum\frac{\mu}{h_i}(\pi d_i l_i)\dot{x}_i = B\dot{x}_i \quad (6)$$

정적 마찰력은 운동의 시작점에서 작용하는 마찰부하로, 일단 운동이 일어나면 사라지고, 다음과 같이 표현된다. 마찰력의 방향은 운동의 방향에 관계한다.

$$f_s(t) = \pm (F_s)_{X=0} \tag{7}$$

쿨롱 마찰력은 속도에 관계없이 일정한 크기를 가지고 있는 마찰력으로 다음과 같이 표현된다.

$$F_c = \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} \tag{8}$$

여기서, F_c는 쿨롱 마찰력(coulomb friction force)이다.

2.3 유압회로 모델링의 지배방정식

기본적으로 유압회로를 모델링함에 있어서 유량과 압력의 계산을 위하여 다음과 같은 방정식을 이용할 수 있다.

- 유량방정식

$$Q_{ori} = C_d A_{ori} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \tag{9}$$

- 연속방정식

$$\Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out} = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{\beta_e}\frac{dP_{node}}{dt} \tag{10}$$

상기의 두식으로 정상상태 층류유동의 경우 별무리 없이 해석을 수행할 수 있다. 각 유압부품이 모델링되고 입출력 유량이 결정되면 부품과 부품 사이에 형성되는 노드에서의 압력을 계산할 수 있다.

2.4 검사체적의 모델링

Fig. 3은 피스톤과 실린더에 의하여 생성되는 검사체적을 나타내고 있다. 각각의 검사체적에 대한 압력과 각 체적으로 흐르는 유량 등은 연속방정식과 유량방정식, 누설유량방정식, 라인방정식으로 구할 수 있다[1~3,8]

피스톤과 실린더가 이루는 검사체적을 Fig. 3과 같은 방법으로 각각의 경계를 나타내었지만, 피스톤의 위치에 따라서 각각의 검사체적 사이에 개구면적이 형성되어 유량이 형성되기도 하고, 개구면적이 닫혀서 유량이 흐르지 않기도 한다. 또한, 누설유량은 피스톤의 위치에 따라서 누설관로의 길이가 달라지는 경우도 있고 일정하게 유지되는 경우도 있다.[9~10]

Fig. 4는 방향제어밸브와 슬리브에 의해서 생성되는 검사체적을 보여주고 있다.

2.5 AMESim 모델링 결과 및 시뮬레이션 결과

유압식 착암기의 유압회로에 대한 AMESim 모델을 Fig. 5에 나타내었다.

Table 1에는 유압식 착암기의 파라미터가 요약되어 있다.

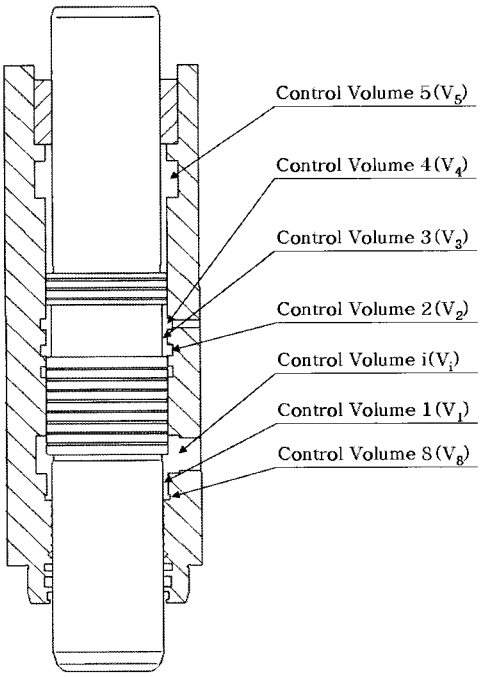

Fig. 3 Control volumes involving the movement of the piston

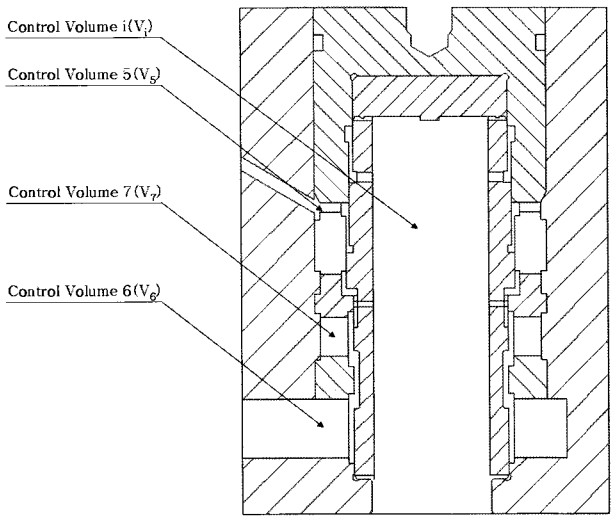

Fig. 4 Control volumes involving the movement of the directional control valve

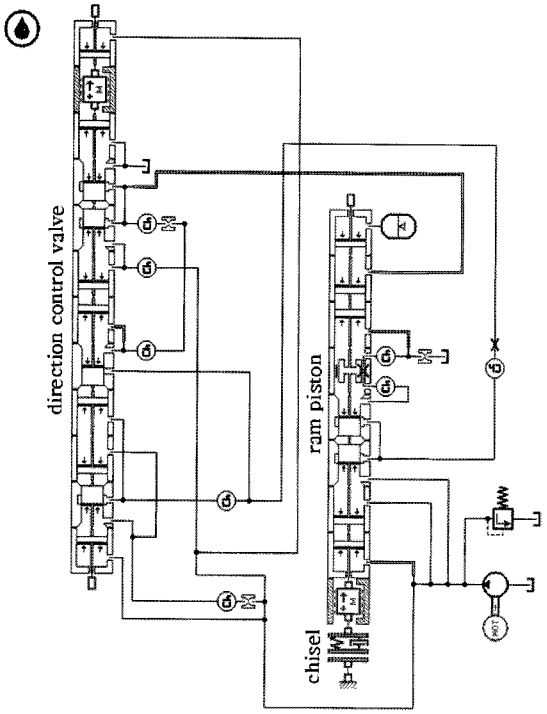

Fig. 5 AMESim model of a hydraulic breaker

Table 1 Hydraulic breaker Simulation parameters

piston diameter	77 [mm]
piston length	497 [mm]
piston mass	15 [kg]
chisel diameter	70 [mm]
chisel length	680 [mm]
chisel mass	20 [kg]
Back Head nitrogen pressure	14~22 [kg/cm^2]
rated flow-rate	35~70 [lpm]
rated pressure	110~165 [kg/cm^2]
Valve spool length	72 [mm]
Valve spool mass	0.3 [kg]

유압식 착암기로의 공급압력(p_s), 귀환압력(p_r), 공급유량(Q) 및 치즐의 변형(Xc)에 대한 시뮬레이션 결과를 5회의 타격시간동안에 대하여 Fig. 6에 나타내었다. 모델링된 대상 착암기가 축압기를 사용하는 제품이므로 공급압력의 맥동이 적고, 치즐의 변형에 대한 그래프 형상이 첨예하여 Fig. 13에 제시된 실험 결과와는 다소 상이함을 알 수 있다. 따라서, 유압회로의 해석만으로는 실험과 유사한 타격에너지의 산출에 어려움이 있음을 알 수 있다.

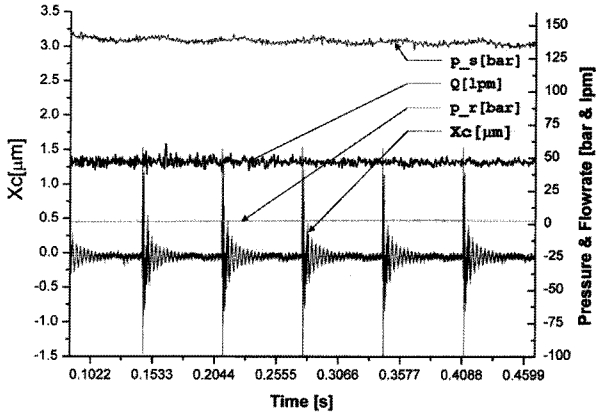

Fig. 6 AMESim Simulation result

3. ANSYS LS-DYNA를 이용한 타격시 치즐 변형 해석

3.1 타격시 치즐 변형 해석절차

유압식 착암기의 피스톤과 치즐간의 타격에너지를 예측하기 위해서는 충돌 해석을 통한 충격시의 변형량을 계산하여야 한다.

LS-DYNA를 이용한 치즐의 타격시 변형량 해석에서 입력조건으로 사용되는 피스톤의 하강 속도를 알기 위해서는 공급된 유량과 압력에 의하여 피스톤이 상승한 후 착암기 백 헤드(Back Head) 부의 질소가스가 압축되었다가 팽창할 때의 팽창력과 유압이 결부된 하강속도를 산출하여야 한다. 이와 같은 피스톤의 하강속도 계산을 위하여 착암기 유압회로에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 계산결과를 활용하여 치즐의 타격시 변형량에 대한 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 충돌 해석을 위하여 피스톤과 치즐의 모델링은 Pro-Engineer를 활용하였고, 메쉬(Mesh) 생성과 Solver로써 ANSYS LS-DYNA를 사용하였다. Fig. 7에 Mesh가 생성된 3D 모델을 나타내었다. 유한요소 모델은 Explicit 해석에 적합한 Solid 164를 적용하였고, 재료 물성 모델(Material Model)은 선형 탄성 등방성(Linear Elastic Isotropic) 재료 물성을 적용하였다. 피스톤을 운동부(Moving Component)로 지정하고, 치즐을 고정부(Target Component)로 지정하였으며, 피스톤과 치즐에 축방향의 1자유도만을 허용하고, 치즐의 끝단에 6자유도 변위에 대한 구속조건을 부가하였다.

충돌시의 접촉은 면과면의 접촉으로 정의하고 피스톤의 초기속도는 AMESim의 해석 결과를 적용하였다. 해석은 0.1초 동안 수행하였고, 결과는 50 Step으로 나누어 저장하였다.

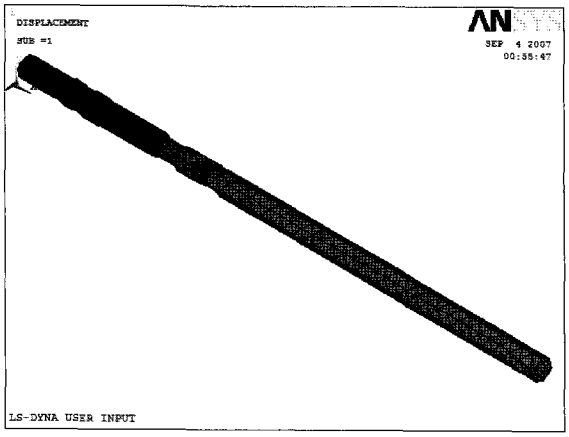

Fig. 7 Mesh generation result

3.2 Impact 해석결과

치즐의 타격시 변형량 해석에 대한 결과를 Fig. 8~10에 나타내었다. Fig. 8은 폰 미세스 등가 응력에 대한 해석결과이고, Fig. 9는 변형량에 대한 해석결과이다. Fig. 10은 시간에 따른 치즐의 특정부위에서의 변형량을 나타낸 것인데, 실험결과와의 비교를 위하여 실험시 치즐의 스트레인게이지 부착부에 대한 변형량 해석결과를 도시하였다.

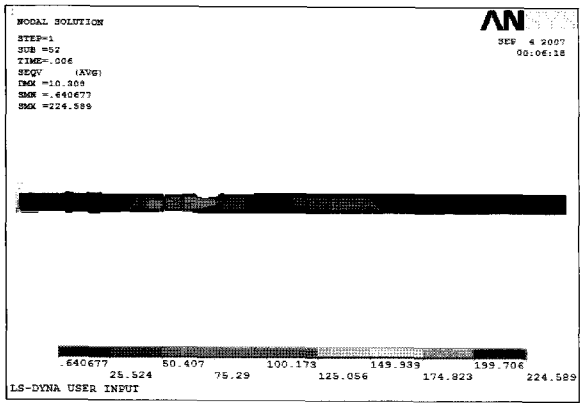

Fig. 8 Von Mises Equivalent Stress Analysis Result

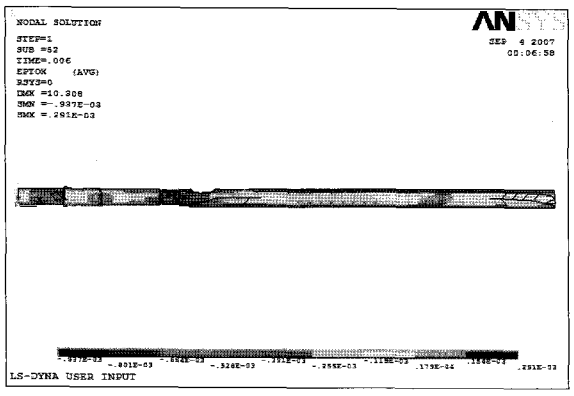

Fig. 9 Strain Analysis Result

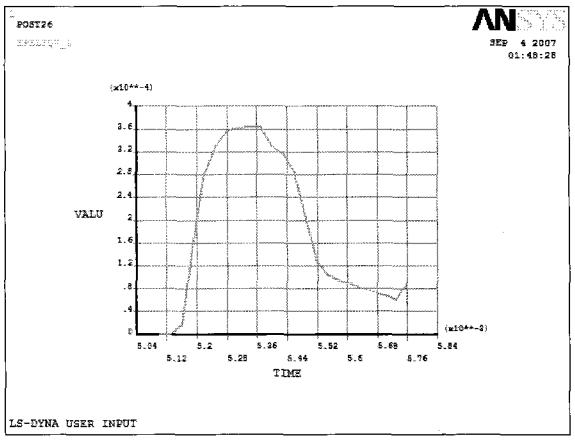

Fig. 10 Time Variation of Strain

4. 타격에너지 측정결과와 해석결과의 비교

유압식 착암기의 타격에너지는 시험용 치즐에 부착된 스트레인 게이지의 변형량을 측정한 후 정하중 시험에서의 보정 인자를 사용하여 평가할 수 있다.[9] Fig. 11에 스트레인 게이지가 부착된 시험용 치즐을 나타내었다.[4,10]

유압식 착암기의 타격에너지 평가는 다음과 같은 과정으로 진행되어야 한다.

시험용 유압식 착암기의 1회 타격에 의한 타격에너지는 스트레인 게이지로부터 측정된 변형량과 충격하중에 대한 탄성변형에너지 방법으로부터 유도된 식 (11)을 사용하여 산출될 수 있다.[5]

$$E_i = \frac{CF^2}{A_t \cdot \sqrt{E_t \cdot \rho_t}} \int_{t_i}^{t} \varepsilon_i^2 \cdot dt \qquad (11)$$

여기서 εi는 4 U / (2.6 k UB Ka)이며, Et는 시험용 치즐재료의 Young's 계수이다.

Fig. 11 Strain gauge attached chisel

시험용 치즐에 영향을 주는 유압식 착암기의 정적 예하중 효과를 차단하고, 다음 타격의 펄스 또는

응력파의 반향으로부터 축적되는 응력을 방지하기 위하여 식 (11)에서의 적분구간 t_1에서 t_n 은 각각의 타격시마다 측정되어 정의되어야만 한다.

25회의 타격에너지 측정값이 시험용 착암기의 사양과 함께 정상 상태 가동중에 기록되어야 한다.

전술한 25회의 타격에너지 측정값은 최소한 5개의 연속적인 타격회수의 세트로 분할될 수 있다. 각각의 측정한 타격에너지 값은 최종적으로 산출된 타격에너지 평균값의 ±10%안에 있어야 한다. 최종적인 타격에너지는 식 (12)에 의해 산출 될 수 있다. 최종적으로 산출된 이 범위를 넘는 타격에너지 값은 무시되어야 하고 측정을 다시 해야만 한다.[6~7,11]

$$E = \frac{1}{25}\sum_{i=1}^{25} E_i \qquad (12)$$

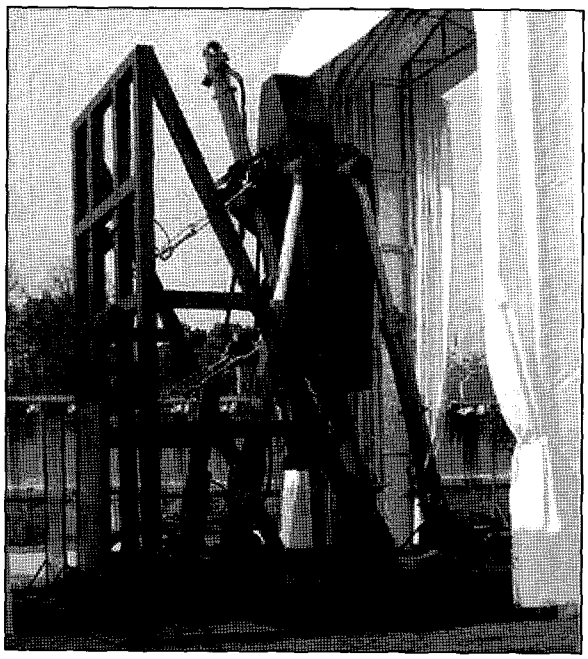

Fig. 12 Mechanism of test system

Fig. 13은 본 연구에서 시험한 유압식 착암기의 타격에너지를 25회 측정한 값으로 25회 모두 타격에너지 평균값 302.86 J의 ±10%안에 들어 시험의 유효성을 확인하였다.

Fig. 14는 시험을 통하여 측정한 Impact 파형을 나타내는데, 3.2절의 Fig. 10에 나타낸 충격시의 변형량 해석결과와 유사한 형상을 가짐을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 수행한 타격에너지 예측기법이 시험 전의 설계 검토용 도구로서 유용한 역할을 할 수 있을 것이라 판단된다.

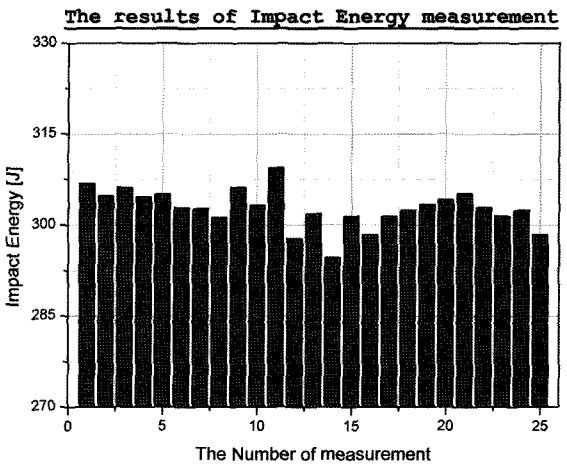

Fig. 13 A results of Impact Energy measurement

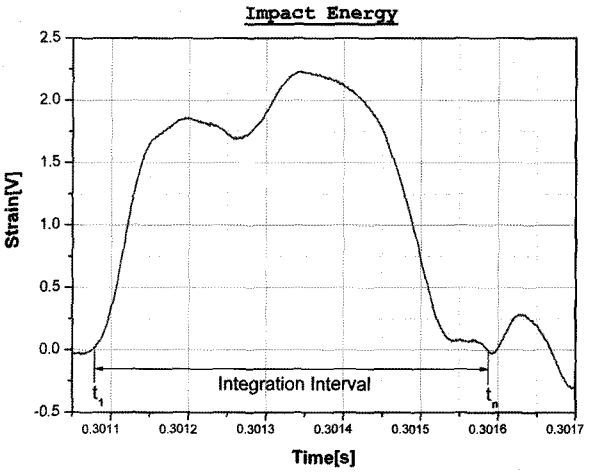

Fig. 14 Shock wave of impact energy strain

5. 결 론

본 연구에서는 CAE TOOL을 활용하여 유압식 착암기의 타격에너지를 예측하기 위한 기법을 개발하고, 시험평가 방법과 비교 검토하였다.

유압식 착암기의 유압회로를 해석하기 위하여 AMESim을 사용하여 모델링하고, 작동특성을 파악하였으며, 그 결과를 ANSYS LS-DYNA에 적용시켜, 피스톤과 치즐간의 Impact 해석을 수행하였다.

해석결과는 AEM에 의해 개발된 유압식 착암기의 타격에너지 등급 평가 지침에 따라 시험 결과와 비교되었으며, 유사한 경향을 가짐을 확인할 수 있었다.

개발된 기법은 유압식 착암기의 생산업체에서 기존 양산 모델의 설계 수정이나, 신제품 개발시에 많은 비용과 시간을 들여 시험을 수행하기 전에 설계 검토 단계에서 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구내용은 산업자원부에서 시행한 부품·소재 종합기술지원사업의 지원결과 중 일부임을 밝힙니다.

참고 문헌

1) Won-June Sung, "Performance Analysis of a Hydraulic Breaker Considering Ground Condition", Ph.D. thesis Hanyang University, 2002.
2) Bardet, J.P., "Experimental Soil Mechanicss", Prentice-Hall, 1997.
3) Su-Hyon Cho, "Optimal Design of a Hydraulic Breaker Using Taguchi Method", Master thesis Korea University, 2002.
4) AEM (Association of Equipment Manufacturers), "Measuring Guide for Tool Energy Rating for Hydraulic Breakers", Milwaukee, USA, 1996.
5) ASTM E251, "Test Method for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain-gages"
6) Jong-Won Park, Hyoung-Eui KIM, "Development of the Test System for Measuring the Impact Energy of a Hydraulic Breaker", Proceedings of the 6th JFPS International symposium, pp. 75~79, 2005.
7) Jong-Won Park, Hyoung-Eui KIM, "Impact Energy Measurement of A Hydraulic Breaker", Key Engineering Materials, ICEM 2006, No. 326, pp. 1669 ~ 1672, 2006.
8) Woon-Yong Jung, "Anlysis of Dynamic Characteristics and Performance for a Hydraulic Breaker using AMESim", Master thesis Korea University, 2004.
9) Watton, J., "Fluid Power System", Prentice-Hall, 1989.
10) Viersma, T.J., "Analysis, Synthesis and Design of Hydraulic Servo-systems and Pipelines", Elsevier, 1980.
11) Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston Jr, "Vector Mechanics for Engineers 2nd S.I. Metric Edition", McGraw-Hill, 1990.