

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2011.35.6.677

ISSN 1226-4873

범용 유압 브레이커의 성능 최적화를 위한 연구

신 대 영^{**} · 권 기 범^{*}

* 한국생산기술연구원

A Study on Performance Optimization of a Hydraulic Breaker

Dae-Young Shin^{**} and Ki-Beom Kwon^{*}

* Korea Institute of Industrial Technology

(Received September 17, 2010 ; Revised March 24, 2011 ; Accepted March 25, 2011)

Key Words: Hydraulic Breaker(유압 브레이커), Optimization(최적화), Design of Experiments(실험계획법)

초록: 본 연구에서는 유압브레이커의 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과의 비교를 통해 시뮬레이션의 타당성을 검증하였다. 유압브레이커의 성능 향상을 위하여 비교적 설계 변경이 용이한 부품의 재원을 설계인자로 선정하였고, 요인시험과 회귀분석을 이용하여 각각의 설계 인자가 유압브레이커의 성능에 미치는 영향을 규명하였다. 본 연구의 결과로 기존 유압브레이커의 성능을 최대화 시킬 수 있는 방안을 제시하였다.

Abstract: In this study, a simulation model developed for a hydraulic breaker is verified through comparison of simulation results to the experimental results. For performance optimization, the design parameters are selected based on the physical parameters of the equipment for ease of modification. Also a factorial experiment and regression analysis were conducted to observe the effect of each parameter on the performance of the hydraulic breaker. As a result, a method for optimizing the performance of a hydraulic breaker is proposed.

1. 서 론

유압을 동력원으로 하는 건설기계의 일종인 유압 브레이커는 일반적으로 굴삭기에 장착되어 도로보수 및 암반의 파쇄작업이나 건축물의 해체작업 등에 널리 사용되고 있는 장비이다.

일반적으로 유압 브레이커의 성능은 타격에너지(Impact Energy Class)와 1분 동안의 타격수(Impact Rate)로 평가되는데, 작업 현장에서는 생산성을 높이기 위하여 고성능의 유압 브레이커를 선호하고 있어 브레이커의 성능을 향상시키기 위한 연구의 중요성이 더욱 대두되고 있다.

그동안의 연구내용을 살펴보면 유압 브레이커의 타격에너지 측정⁽¹⁾ 및 해석용 Tool 개발⁽²⁾에 대한 연구, 각 설계 인자들이 유압 브레이커의 성능에 미치는 영향을 규명⁽³⁾한 연구, 성능을 최

대화 시킬 수 있는 설계인자들의 최적화 기법⁽⁴⁾에 대한 연구 등 유압 브레이커의 성능을 향상시키기 위한 많은 연구들이 수행 되었다.

일반적으로 브레이커 성능을 향상시키기 위하여 설계 치수를 확대하면 장비가 필요이상으로 커지거나 구조적 취약을 나타낼 수 있다.

따라서 유압 브레이커의 전체 크기는 유지하면서 구조적 안정성을 확보할 수 있는 설계변수를 추출한 후에 이들 설계변수를 대상으로 최적화시켜야 하겠다.

본 연구에서는 가공성과 장비 크기 그리고 구조 안정성을 고려하는 설계변수를 추출한 후에 실험계획법을 이용한 요인분석을 수행하였으며 또한 회귀분석을 통한 유압 브레이커의 성능 즉 타격에너지와 타격수에 대한 설계인자의 관계식을 유도하였다. 이들 관계식은 유압 브레이커의 성능 최적화를 위한 모델링에 적용되었다.

최적화 알고리즘으로 Simplex method를 사용하였다. 최적화 결과, 피스톤의 행정거리를 7% 증

† Corresponding Author, dyshin@kitech.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

가, Back Head 충전압을 5% 증가, Back Head 체적을 4.7% 증가함으로써 5.6%의 타격에너지가 증대되었으나 타격수는 5.9%정도 감소하였다.

향후에는 장비 크기와 구조 안정성을 확보하면서 타격에너지와 타격수를 향상시킬 수 있는 추가 연구가 필요하겠다.

2. 유압 브레이커의 구조 및 작동과정

2.1 유압 브레이커의 구조

유압 브레이커는 Fig. 1에서와 같이 유체의 흐름 방향을 전환시켜주는 방향조절밸브 (Direction control valve), 유압에너지를 저장하고 부족한 유량을 보충함과 동시에 충격압력을 흡수하는 축압기(Accumulator), 질소가스로 충전되는 백헤드(Back Head), 왕복운동을 하면서 타격을 가하는 피스톤(Piston), 작업 대상물을 파괴하는 치즐(Chisel) 등으로 구성되어 있다.

2.2 유압 브레이커의 작동과정

유압 브레이커는 유압과 질소 가스의 에너지를

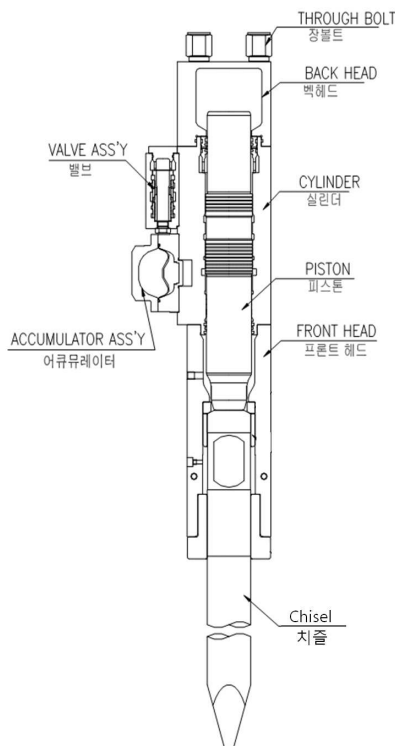


Fig. 1 Hydraulic breaker

피스톤의 운동에너지로 변환하고, 변환된 운동에너지는 치즐을 통하여 작업 대상물에 전달되어 그 대상물을 파괴하는 원리로 된 기계장치이다.

Fig. 2를 참고하여 구성 요소별로 작동 과정을 분석하여 보면, 유압 펌프로부터 송출되는 고압의 유체는 브레이커의 공급라인을 통해 유입되어 피스톤의 Lower chamber 와 방향제어 밸브의 High chamber 에 동시에 압력을 가하게 된다. 이때, 방향 제어 밸브 스푼은 좌측 방향으로 힘을 받게 되고, 피스톤은 우측 방향으로 힘을 받게 된다. Lower chamber에 가해지는 압력으로 피스톤은 우측으로 이동하게 되고, 백헤드의 질소 가스는 에너지를 축적하게 된다. 피스톤이 상사점을 지나게 되면, 공급라인을 통해 들어오던 고압 유는 Pilot 유로를 통해 방향 전환 밸브의 Alternate chamber로 들어가게 되고, High chamber 와 Alternate chamber의 수압 면적차에 의해 밸브는 우측으로 이동하게 된다. 밸브가 우측으로 이동하게 되면 피스톤의 Upper chamber로 통하는 유로를 개방시켜 저압의 상태에 있던 Upper chamber를 고압으로 바꿔준다. Upper chamber와 Lower chamber의 수압 면적 차이에 의한 힘과 백헤드의 질소 가스에 의한 압축력에 의해 피스톤은 좌측으로 이동을 하며, 치즐을 타격하게 된다. 피스톤이 좌측으로 이동함에 따라, 우측에 있던 방향 전환 밸브는 다시 좌측으로 이동하여 피스톤의 Upper chamber를 리턴부로 연결하여 다시 저압 상태로 만들어 주며, 타격 후 피스톤은 다시 우측으로 이동하는 반복행정을 하게 된다.

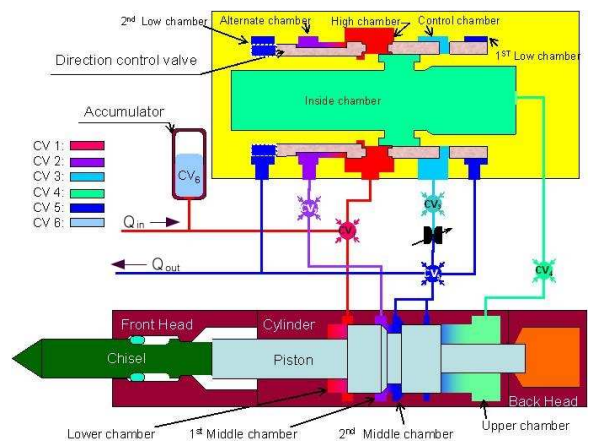


Fig. 2 Schematic of hydraulic breaker

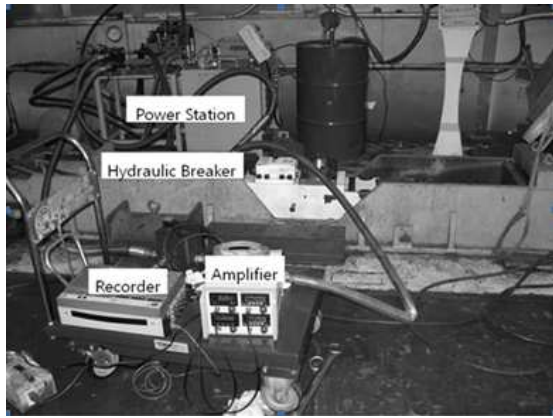


Fig. 3 Performance experiment of hydraulic breaker

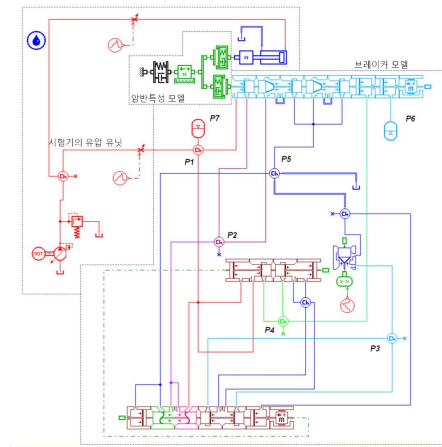


Fig. 4 Modeling of hydraulic circuit

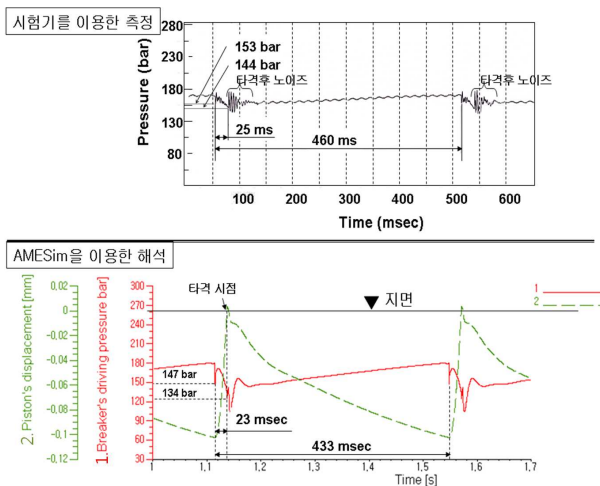


Fig. 5 Comparison of experimental result and analysis

Table 1 Comparison of experimental and analysis results

	타격 주기 [msec]	Impact Rate [bpm]	타격 이송 시간 [msec]	최고 구동 압력 [bar]
시험 결과	460	130	25	165
해석 결과	433	138	23	180

Table 2 Levels of design factors

부품	제원	단위	수준		
Back Head	충전압	bar	15.2	16.0	16.8
	체적	liter	5.795	6.100	6.405
Accumulator	충전압	bar	54.0	60.0	66.0
	체적	liter	0.81	0.90	0.99
Pump	공급유량	lpm	126.0	140.0	154.0
Relief valve	설정압	bar	171.0	190.0	209.0
Piston	행정거리	mm	102.0	107.0	112.0

3. 유압 브레이커의 유압 해석

3.1 시뮬레이션 모델 수립

본 연구에서는 23톤급 굴삭기에 적용되는 유압 브레이커의 유압 시스템을 대상으로 하였다.

Fig. 3 과 같이 유압 브레이커의 성능시험은 K사의 시험기를 이용하였고, 유압 브레이커의 해석은 Fig. 4와 같이 시험기를 고려한 모델링을 이용하였다.

3.2 시뮬레이션 결과와 실험 결과 비교

유압 브레이커 모델링의 정확성을 규명하기 위하여 성능 시험기의 유압 브레이커 성능시험 결과와 유압 브레이커를 고려한 해석결과를 상호 비교하였다. 그 결과는 Fig. 5 및 Table 1과 같다.

Table 3 Factorial experiment of Impact Energy Class

출처	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Back Head 충전압	2	318089	318089	159044	494.47	0.000
Back Head 체적	2	33115	33115	16557	51.48	0.000
Accumulator 충전압	2	138	138	69	0.21	0.810
Accumulator 체적	2	27	27	14	0.04	0.959
Pump 공급유량	2	514	514	257	0.80	0.472
Relief Valve 설정압	2	39585	39585	19793	61.54	0.000
Piston 행정거리	2	403319	403319	201660	626.96	0.000
오차	12	3860	3860	322		
전체	26	798647				

S = 17.9346 R-제곱 = 99.52% R-제곱(수정) = 98.95%

Table 1을 보면 타격수 오차율은 6.2%이고, 타격 이송시간 오차율은 8.7%로서 상당히 정확하게 모델링되었음을 알 수 있다.

4. 유압 브레이커의 성능 최적화

본 연구에서는 유압 브레이커의 대표 성능인 타격에너지와 타격수를 최적화하기 위하여 가공성과 장비 크기 그리고 구조 안정성에 영향을 미치지 않는 부품으로 Back Head, Accumulator, Pump, Relief valve, Piston을 선정하였다. 또한 Table 3과 같이 설계인자는 위의 부품의 제원을 선정하였다.

최적화를 위한 대표 성능과 설계인자의 관계식은 실험계획법(Design of Experiments)과 회귀분석(Regression Analysis)을 이용하여 도출하였다.

실험계획법을 위한 설계인자는 7인자 3수준으로 수행하였으며 수준표는 Table 2와 같다

4.1 요인시험과 회귀분석

4.1.1 타격에너지

유압 브레이커의 타격에너지에 대한 설계인자의 주효과를 살펴보기 위하여 요인 시험 분석을 수행하였으며 Table 3과 같다.

1종오류(α)를 0.01로 하였을 때 Back Head 충전압과 Piston 행정거리는 타격에너지에 90%정도 절대적인 영향을 미치는 반면에 Back Head 체적과 Relief Valve 설정압은 상대적으로 작은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그러나 Accumulator 충전압과 Accumulator 체적, Pump 공급유량은 유의하지 않을 뿐만 아니라 거의 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

Table 4 Regression analysis of Impact Energy Class

예측 변수	계수	SE 계수	T	P
상수	-2215.9	127.8	-17.33	0.000
Back Head 충전압	166.118	4.336	38.32	0.000
Back Head 체적	-140.63	11.37	-12.37	0.000
Relief Valve 설정압	2.4681	0.1825	13.52	0.000
Piston 행정거리	29.9366	0.6937	43.16	0.000

S = 14.7153 R-제곱 = 99.4% R-제곱(수정) = 99.3%

Table 5 Factorial experiment of Impact Rate

출처	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Back Head 충전압	2	10013.5	10013.5	5006.8	70.80	0.000
Back Head 체적	2	2513.0	2513.0	1256.5	17.77	0.000
Accumulator 충전압	2	61.7	61.7	30.8	0.44	0.656
Accumulator 체적	2	87.3	87.3	43.7	0.62	0.556
Pump 공급유량	2	324.0	324.0	162.0	2.29	0.144
Relief Valve 설정압	2	71725.8	71725.8	35862.9	507.14	0.000
Piston 행정거리	2	15186.8	15186.8	7593.4	107.38	0.000
오차	12	848.6	848.6	70.7		
전체	26	100760.7				

S = 8.40931 R-제곱 = 99.16% R-제곱(수정) = 98.18%

Table 6 Regression analysis of Impact Rate

예측 변수	계수	SE 계수	T	P
상수	591.36	89.76	6.59	0.000
Back Head 충전압	-29.143	3.044	-9.57	0.000
Back Head 체적	38.680	7.984	4.84	0.000
Relief Valve 설정압	3.3042	0.1282	25.78	0.000
Piston 행정거리	-5.8080	0.4870	-11.93	0.000

S = 10.3315 R-제곱 = 97.7% R-제곱(수정) = 97.2%

따라서 타격에너지의 회귀분석에서는 Accumulator 충전압과 Accumulator 체적, Pump 공급유량을 제외한 설계인자를 대상으로 1차식의 회귀분석을 수행하였으며 Table 4와 같다.

4.1.2 타격수

유압 브레이커의 타격수에 대한 설계인자의 주효과를 살펴보기 위하여 요인 시험 분석을 수행하였으며 Table 5와 같다.

1종오류(α)를 0.01로 하였을 때 Relief Valve 설정압은 타격수에 71%정도 절대적인 영향을 미치고 있으며 Back Head 충전압과 Piston 행정거리는 10~15% 정도로 상대적으로 작은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그러나 Accumulator 충전

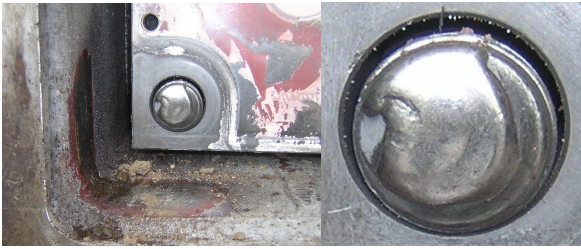


Fig. 6 Fatigue fracture of the through bolt

압과 Accumulator 체적, Pump 공급유량은 유의하지 않을 뿐만 아니라 거의 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

따라서 타격수의 회귀분석에서는 Accumulator 충전압과 Accumulator 체적, Pump 공급유량을 제외한 설계인자를 대상으로 1차식의 회귀분석을 수행하였으며 결과는 Table 6과 같다.

4.2 회귀분석식을 이용한 최적화

유압 브레이커의 타격에너지를 20% 이상 높게 설정하면 유압 브레이커 부품들의 구조 안전성을 확보하기 어렵게 된다. 예를들면 Fig. 6과 같이 장볼트의 파손 가능성이 있다. 그리고 유압브레이커의 제작비용을 낮추기 위해서는 기존의 설계인자에서 비교적 가공비용이 적은 설계인자를 선정하는 것이 효율적이다.

본 연구에서는 유압브레이커가 구조 안전성을 확보할 수 있도록 타격에너지를 10% 향상을 목표로 하며 설계인자는 Back Head 충전압과 Back Head 체적, Piston 행정거리로 선정하였다.

유압 브레이커의 공급압력을 190bar, 타격에너지를 3,406J로 설정하였을 때 타격수의 최적화를 위한 모델링은 다음 식과 같다.

maximize Impact Rate
 subject to Impact Energy Class=3406
 $15.2 \leq \text{Back Head 충전압} \leq 16.8$
 $5.795 \leq \text{Back Head 체적} \leq 6.405$
 $102.0 \leq \text{Piston 행정거리} \leq 112.0$
 Back Head 체적=6.12
 Relief Valve 설정압=190

여기에서, 타격에너지의 회귀분석식은 Table 5에 제시되어 있고, 타격수의 회귀분석식은 Table 7에 제시되어 있다. 최적화 알고리즘은 Simplex method를 이용하였다.

Table 7 Optimized design factors and results

	타격 에너지 [J]	타격 에너지 증감률 [%]	Back Head 충전압 [bar]	Back Head 체적 [liter]	Piston 행정 거리 [mm]	Impact Rate [bpm]	Impact Rate 증감률 [%]
기	3,096	100	16.0	6.12	102.0	397	100.0
최	3,406	110	16.8	6.41	109.3	342	86.1

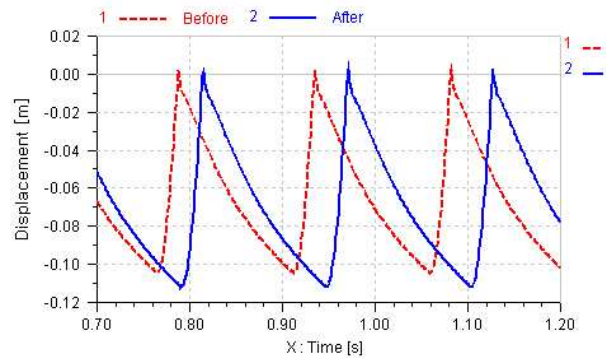


Fig. 7 Transient responses of the piston displacement

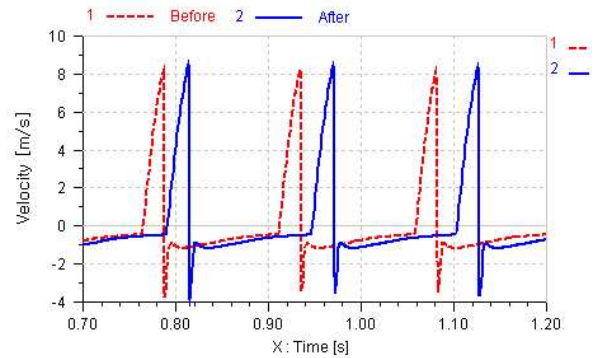


Fig. 8 Transient responses of the piston velocity

Table 7과 같이 최적화 결과를 보면 타격에너지는 10.0% 증가하고, 타격수는 13.9% 감소함을 기대할 수 있다.

최적화된 설계인자를 고려하였을 때 유압 브레이커의 성능을 재해석 하였으며 피스톤 변위와 속도를 도시하였다.

Fig. 7은 최적화 후의 피스톤 변위에 대한 동특성을 기존설계와 비교하여 나타내고 있다. 피스톤 행정거리는 기존 102.0mm에서 최적화 후 109.3mm로 증가하였으며, 타격주기는 기존 147 msec에서 최적화 후 156 msec로 길어졌다. 타격수를 계산하면 약 408 bpm에서 약 384 bpm으로

5.9% 감소하였다.

Fig. 8은 최적화 후의 피스톤의 속도를 기존설계와 비교하여 나타내고 있다. 최적화 후의 피스톤 속도는 8.30m/s에서 8.53m/s로 약 2.8% 증가하였으며, 타격 에너지를 계산하면 3,079J에서 3,252J로 5.6% 증가하였다.

회귀분석식을 통해 예상된 최적화 후 타격수는 342 bpm이지만, 해석결과 나타난 타격수는 384 bpm으로 오차율은 약 12.3%이다.

또한 회귀분석식을 통해 예상된 최적화 후 타격 에너지는 3,406J이지만, 해석결과 나타난 타격 에너지는 3,252J로 오차율은 약 4.5% 이다.

이와 같은 타격 에너지와 타격수의 오차들은 3수준으로 수행한 회귀분석식의 오차에 기인한다. 따라서 실험계획법의 수준을 3수준에서 5수준 이상으로 확대하면 위의 오차를 줄일 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 유압 브레이커의 대표성능인 타격에너지와 타격수를 최적화하기 위하여 실험계획법 및 회귀분석식을 이용하여 최적화를 수행하였다.

회귀분석식을 보면 Piston 행정거리, Back Head 충전압, Back Head 체적의 변경은 타격에너지가 증가(또는 감소)하게 되면 타격수는 감소(또는 증가)하게 되는 모순된 관계를 갖고 있다. 하지만 Accumulator 충전압과 Accumulator 체적, pump 공급유량은 타격에너지와 타격수에 거의 영향을 미치지 못하고 있다.

최적화 결과로 피스톤의 행정거리를 7% 증가, Back Head 충전압을 5% 증가, Back Head 체적을 4.7% 증가함으로써 5.6%의 타격에너지 증대효과를 기대할 수 있었으나 타격수는 5.9%정도 감소하였다.

비록 회귀분석식으로 예측한 최적화된 성능과 유압브레이커 해석으로 검증한 성능에서 오차율이 약 12.3%가 발생하였으나 실험계획법 및 회귀분석식을 이용한 최적화는 유압브레이커의 설계 단계에서 성능 최적화를 위한 방안이 될 수 있다.

위의 오차들은 3수준으로 수행한 회귀분석식의 오차에 기인하므로 실험계획법의 수준을 높이면 오차들은 감소된다.

참고문헌

- (1) Lee, G. H., Lee, Y. B. and Jeong, D. S., 2004, "Development of the Hydraulic Pressure Transducer System for Testing the Impact Energy of Hydraulic Breaker," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 154~160.
- (2) Lee, Y. G., Sung, W. G. and Song, C. S., 2000, "The Development of an Analysis Tool and the Performance Analysis of a Hydraulic Breaker system," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 189~196.
- (3) Choi, K. H. and Song, C. S., 1998, "A Study on the Performance Improvement of a Hydraulic Breaker," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering 1998 Fall Conference*, pp. 1028~1031.
- (4) Baek, H. Y., Chang, H. W. and Lee, I. J., 2005, "Optimal Design of a Hydraulic Breaker using Taguchi Method," *KSME 2005 Fall Conference*, pp. 2033~2038.
- (5) Ko, S. H. and Lim, J. H., 1995, "Modeling and Analysis of a Hydraulic Breaker Considering Elastic Impact between the Piston and Chisel," *Trans. of the KSME*, Vol. 19, No. 2, pp. 338~347.
- (6) Choi, S. and Chang, H. W., 2000, "Performance Improvement of an Integrated-type Fully-Hydraulic Breaker by Sensitivity Analysis," *Journal of the Korea Fluid Power Systems Society 2008 Fall Conference*, pp. 57~62.
- (7) Park, J. W., Lee, K. W. and Kim, H. E., 2007, "A Study On the Analysis Of Impact Strain for Hydraulic Breaker Chisel," *Journal of the Korea Fluid Power Systems Society*, Vol. 4, No. 4, pp. 21~27.