

# 사판식 구동모터에 장착된 밸브의 설계변수 민감도 해석 사례

노대경<sup>1</sup> · 장주섭<sup>2\*</sup>

## Shape Design Sensitivity Analysis Case of the Valves installed in the Hydraulic Driving Motor

Dae-Kyung Noh · Joo-Sup Jang

### ABSTRACT

This paper is about study how to decrease surge pressure that is occurred in excavator driving motor. We used computer simulation program SimulationX. It is also about the way finding design problem and approaching a solution through interpreting shape design sensitivity analysis. Programmes are below. First of all, finding shape fault by analyzing dynamic behavior of valves installed in hydraulic driving motor which is designed now. And drawing variable which is considered sensitive to improve dynamic efficiency among a lot of shape variables. Then, targeting that variable and examining dynamic efficiency stabilization tendency with controlling it. Finally, suggesting the most effective tuning method through variable combination as there are a lot of sensitive variables.

**Key words** : Shape Design Sensitivity Analysis, Orifice, Flow Area, Piston Area, Surge Pressure, SimulationX

### 요 약

본 논문은 컴퓨터 해석프로그램인 SimulationX를 이용하여 굴삭기 주행모터의 내부에서 발생하는 서지압력의 저감 방법에 대하여 분석하는 연구이다. 설계민감도 해석을 통하여 설계상의 문제점을 파악하고 해결책에 접근하는 방법을 다룬다. 진행순서는 다음과 같다. 우선 현재 설계된 주행모터에 장착된 밸브들의 동적거동을 분석하여 설계의 문제점을 찾아낸다. 그 후 많은 설계변수들 중 동적성능향상에 민감하다고 판단되는 변수를 도출하고 설계치수를 조정하여 동적성능 안정화의 경향을 살펴본다. 마지막으로 민감한 변수가 다수 일 경우 변수조합을 통해 효과적인 튜닝방법을 제안한다.

**주요어** : 설계변수 민감도 해석, 오리피스, 개도면적, 수압면적, 서지압력, 시물레이션엑스

## 1. 서 론

대부분의 유압장치에 사용되는 작동유는 높은 비압축성을 갖는다. 유압장치는 이러한 작동유를 이용하여 동력을 전달하기 때문에 다른 동력전달매체를 사용하는 장치에 비해 동력밀도가 현저히 높다. 또한 대부분의 유압부품들은 강한 내구성을 가지고 있으며, 이는 거친 환경에서 작업을 수행해야 하는 건설기계의 특성에 잘 맞다고

볼 수 있다(Jang, 2011a, 2011b).

특히 굴삭기의 주행모터에는 운전자의 안전을 염두에 두어야 하기 때문에 더 높은 수준의 내구성이 요구된다. 이러한 이유로 오작동확률을 최소화하기 위해 굴삭기 주행모터에 장착된 밸브들은 솔레노이드를 이용한 방식이 아닌 순수기계방식을 선호하는 편이다(Lee 등, 2011).

하지만 순수기계식 밸브가 솔레노이드 방식의 정확한 밸브거동시점에 의해 나오는 안정적인 성능을 발휘하지 못한다. 이러한 순수기계식 밸브들의 안정성 향상을 위해 많은 연구를 진행해야 하지만, 유압시장의 경쟁과열로 인하여 연구의 초점이 안정성이 아닌 원가절감에 맞춰져있는 것이 현실이다(Cho, 2004). 시장의 논리에 따라 원가 절감 역시 포기 할 수 없는 부분이기 때문에 설계변수 민감도 해석을 수행하여 시제품을 제작하기 전에 안정적인

접수일(2013년 4월 19일), 심사일(2013년 9월 13일),  
게재 확정일(2013년 9월 14일)

<sup>1)</sup> 가천대학교 대학원 기계공학과

<sup>2)</sup> 가천대학교 기계자동차공학과

주 저 자 : 노대경

교신저자 : 장주섭

E-mail: jjs1@gachon.ac.kr

성능을 확보 할 수 있는 설계치를 찾는 것이 관건이라 할 수 있다.

과거의 연구자들은 소프트웨어의 미발달로 인하여 유압모터에 장착된 모든 기계식 밸브들의 거동을 해석할 수 없었다. 그러한 열악한 조건에서도 수많은 노력을 통해 유압브레이크의 동적특성을 컴퓨터 시뮬레이션으로 구현한 사례가 있었다(Yun 등, 1993). 이 같은 기존 연구자들의 노력에 힘입어 근래에 유압모터에 장착된 모든 밸브의 동적거동을 볼 수 있는 해석모델을 개발하였다. 이러한 해석모델로 수행한 기존의 연구에서 모터 가동 초기에 체크밸브(check valve)에서 불규칙한 진동이 일어나는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 곧 압력의 균형의 문제를 의미하며 설계변경을 필요로 한다(Noh 등, 2012a). 본 논문에서는 설계변수 민감도 해석을 통해 설계의 문제점을 발견하고 해결책에 접근하는 방법에 대하여 다룰 것이며 연구의 진행순서는 다음과 같다.

우선 현재 설계 된 주행모터에 장착된 밸브들의 동적 거동을 분석하여 설계의 문제점을 찾아낸다. 그 후 많은 설계변수들 중 동적성능향상에 민감하다고 판단되는 변수를 도출하고 설계치수를 조정하여 동적성능 안정화의 경향을 살펴본다. 마지막으로 민감한 변수가 다수 일 경우 변수조합을 통해 효과적인 튜닝방법을 제안한다(Noh 등, 2012b).

이 모든 과정을 컴퓨터 해석 시뮬레이션으로만 수행하였으며 사용된 해석도구는 독일 ITI사에서 개발된 상용소

프트웨어인 SimulationX이다.

## 2. 설계문제점 분석 및 고찰

Fig. 1은 해석의 대상이 되는 주행 모터 내부에 장착된 밸브들과 이를 해석도구에 구현한 해석모델이다. A port 로 유량을 공급하면 카운터밸런스 스푼(Counter Balance Spool)에 수압 면적이 형성되어 우측으로 미는 힘이 발생하게 된다. 이에 따라 스푼이 우측으로 이동하면서 브레이크 유로와 회전체 토출부의 유로가 개방된다. 작동유는 개방된 브레이크 유로를 거쳐 브레이크 피스톤을 밀어 회전체에 잡혀있는 브레이크를 해제시킨다(Yun 등, 1993). 그리고 이와 동시에 체크밸브의 포핏(poppet)이 크래킹(cracking)되며 피스톤이 있는 회전체로 유량이 이동하여 주행을 시작하게 된다. Fig. 2는 모터가동 시 체크밸브 포핏의 변위에 관한 해석결과이다. 체크밸브 포핏에서 크래킹 시 불규칙한 진동이 발생되고 있기 때문에 모터 내부의 압력균형에 문제가 있음을 예상할 수 있다.

Fig. 3는 회전속도와 우측 체크밸브 내부의 압력이며 회전 시작 시점에서 압력의 서지(surge)현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 밸브모듈 안에서 발생하는 압력서지현상은 부품의 내구성에 영향을 주며, 부드러운 초기기동성을 방해하는 요소 중 하나이다. 가속초기에 조작 이질감을 줄 수 있으며, 이는 오랜 기간 굴삭기 주행모터 뿐만 아니라 여러 유압부품에서 중요한 논쟁거리로 거론되는

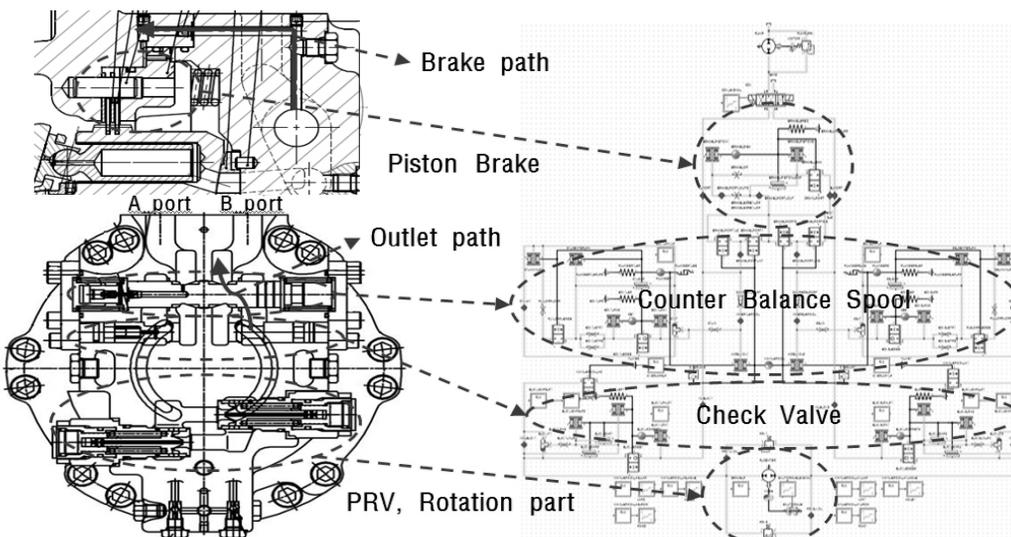


Fig. 1. Valves installed in driving motor and it's interpretation model realized on computer

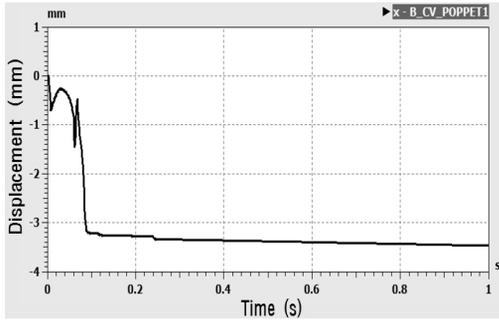


Fig. 2. Unstable vibration of poppet

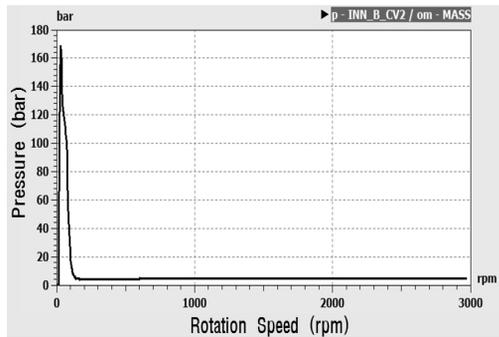


Fig. 3. Pressure within right check valve by rotation speed

현상이다(Jung 등, 1998). 체크밸브 내부의 압력은 카운터밸런스 스톱의 개도면적에 영향을 받는다. 압력의 서지 현상은 급격하게 유입되는 많은 유량의 작동유에 비해 유출되는 유량이 현저히 작을 때 일어난다. 즉 카운터밸런스 스톱의 초기 개도면적이 작다는 것을 의미하며 이는 노치(notch)의 기하학적 형상과 오버랩(overlap) 정도, 스톱의 이동속도와 밀접한 관련이 있다고 생각된다.

이러한 서지압력을 저감할 수 있는 방법은 카운터밸런스 스톱의 속도를 향상시켜 개도면적이 큰 구간으로 신속하게 이동시키거나 스톱의 기하학적 형상을 변경시켜 변위발생 초기의 개도면적을 증가시키는 방법이 있다. 즉 가속초기에 작동유의 흐름을 원활하게 해줘야 한다.

많은 연구자들은 이러한 물리적인 현상과 설계치 변경으로 인한 변화를 검증하기 위해 시제품을 제작하여 실험을 하는 방법을 택해왔다. 이는 많은 경제적 손실과 시간 소비를 초래하기 때문에 올바른 방법은 아니라 생각된다. 단시간 내에 효과적이고 체계적으로 문제를 풀어나가기 위해서는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램으로 설계변수 민감도 해석을 수행하여 물리적인 현상의 변화 경향을 살펴볼 필요가 있다(Yoon 등, 2012).

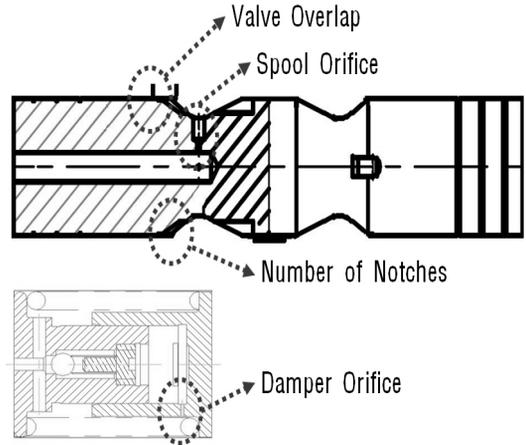


Fig. 4. Target of shape design sensitivity analysis

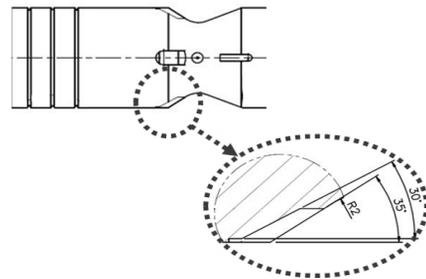


Fig. 5. Shape of a notch manufactured by end mill

### 3. 설계변수 민감도 해석

Fig. 4는 서지압력 저감에 밀접한 관련이 있다고 판단되어 해석의 표적이 된 변수들이다. 카운터밸런스 스톱의 노치는 초기개도면적과 관련이 있고, 나머지 변수들은 스톱의 응답성에 관련이 있어 이들을 집중해석의 표적으로 설정하였다.

#### 3.1 카운터밸런스 스톱의 노치 개수 조정

해석의 대상이 되는 카운터밸런스 스톱의 노치는 반원형상이며 챔퍼(chamfer) 타입의 랜드 부를 대각선으로 파고드는 형상이다. 가공도구는 엔드밀을 사용하며 얇은 깊이로 내려서 일정 구간을 수평이동 한 후 대각으로 파내려간 Fig. 5와 같은 형상을 갖는다. 모터의 구동 시 작동유의 누설을 최소화하기 위한 목적으로 설계된 형상이기 때문에 기하학적 형상 자체를 변경하는 것은 누설에 대한 노출을 초래할 수 있다.

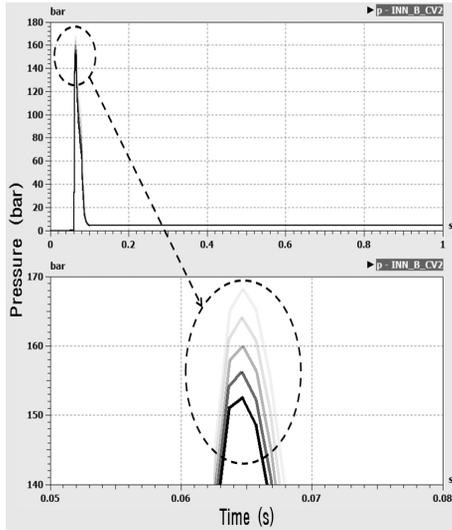


Fig. 6. Surge pressure as controlling the number of notch

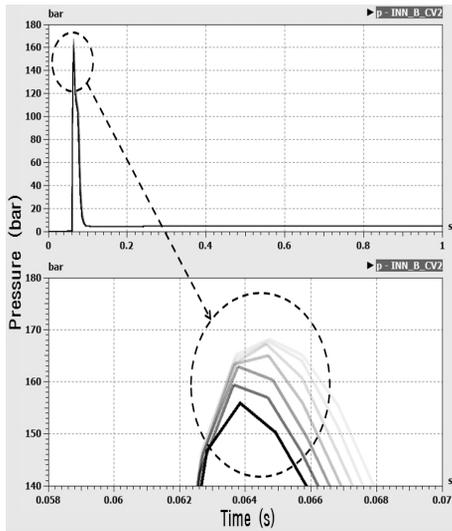


Fig. 7. Surge pressure as controlling valve overlap

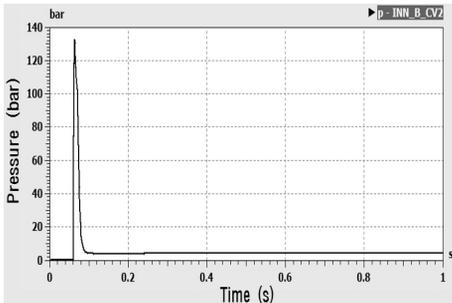


Fig. 8. Surge pressure in critical center spool

해석의 목적 자체가 스플이동 시 초기의 개도면적 증가에 따른 서지압력 저감경향을 확인하는 것이기 때문에 노치의 형상은 그대로 두고 개수만 4개부터 8개까지 증가시켜 해석을 진행해왔다.

Fig. 6는 해석결과이며 노치의 개수가 증가할수록 서지압력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 해석결과에서도 볼 수 있듯이 감소폭이 작아서 노치의 개수를 늘리는 방법만으로는 큰 효과를 얻을 수 없을 것으로 판단된다. 또한 노치의 개수가 증가하면 가공비 역시 비싸지게 되기 때문에 시장에서의 경쟁력을 잃게 되는 결과를 초래할 수도 있다.

### 3.2 카운터밸런스 스플의 오버랩 조정

현재 설계된 카운터밸런스 스플은 1.2mm의 오버랩 구간을 갖는다. 이는 초기 응답성을 저해하는 요소이기 때문에 오버랩구간을 1.2mm부터 0.6mm까지 0.1mm의 간격으로 감소시키며 서지압력의 저감 경향을 살펴봤다.

Fig. 7은 해석결과이며 오버랩구간을 줄여서 초기 응답성을 향상시켜도 서지압력 저감에는 별다른 효과가 없음을 볼 수 있다. 조금 더 명확한 결론을 얻기 위해 오버랩구간을 완전히 제거하여 임계상태로 만든 후 해석을 진행해 봤다.

Fig. 8은 임계상태에서의 서지압력을 보여주며 감소폭이 미미하나 감소가 이루어진 것을 확인할 수 있다. 하지만 임계상태에서의 카운터밸런스 스플은 유량누설을 초래하기 때문에 고압조건에서 작동해야 하는 주행모터 특성상 치명적인 설계가 될 수 있다. 오버랩구간의 감소가 서지압력 저감에 탁월한 효과가 있으면 누설을 초래하지 않는 적정선에서 설계에 반영해야 하겠지만 그렇지 않기 때문에 주요변수에서 제외해도 무방하다 생각된다.

### 3.2 댐퍼와 카운터밸런스 스플의 오리피스 조정

댐퍼는 스플의 절환충격으로부터 모터를 보호하는 역할을 한다.

댐퍼의 구성품인 슬리브(sleeve)의 측면에는 오리피스가 있으며 이는 스플의 오리피스와 같이 절환속도에 큰 영향을 미치는 변수이다. 응답성 향상을 위해 오리피스의 직경을 너무 확장시킬 경우 댐퍼는 제 기능을 하지 못하게 된다. 절환충격이 모터내부에 그대로 전해지게 되면 모터의 손상이 예상되기 때문에 댐퍼 오리피스의 배치에 신경을 써야한다. 이상적인 댐퍼의 오리피스 배치는 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

- (1) 오리피스의 직경을 확장하면 응답속도가 향상되어 서지압력이 개선되어야 한다.
- (2) 오리피스 직경을 확장해도 절환충격으로부터 모터를 보호해야 한다.

현재 설계된 댐퍼의 슬리브 측면 오리피스의 배치는 Fig. 9(a)와 같다. 이러한 배치상태에서 오리피스를 확장할 경우 (1)번 조건은 만족하나 (2)번 조건을 만족할 수 없어 내구성을 보장하기 힘들어진다. 즉 이러한 배치는 오리피스 직경 확장에 제약을 주게 되기 때문에 Fig. 9(b)와 같이 설계를 변경할 필요가 있다고 생각된다.

체크밸브 내부에서 압력의 서지현상이 시작될 때 카운터밸런스 스펴은 노치로만 유량이 흐르는 상대적으로 개도면적이 작은 구간을 지나고 있었다. 그러한 해석결과를 Fig. 10에 나타내었고 이것으로부터 스펴의 이동속도를 개선하여 개도면적이 작은 구간을 빠르게 지나가면 압력의 상승시간이 줄어 서지압력을 개선시킬 수 있다고 예측할 수 있었다.

카운터밸런스 스펴의 이동속도에 가장 밀접한 관련이 있는 요소는 Fig. 11에 나타난 것과 같이 댐퍼를 구성하는 슬리브 측면 오리피스와 스펴을 관통하는 오리피스라

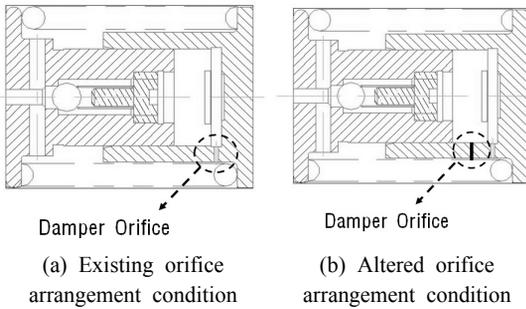


Fig. 9. Orifice arrangement

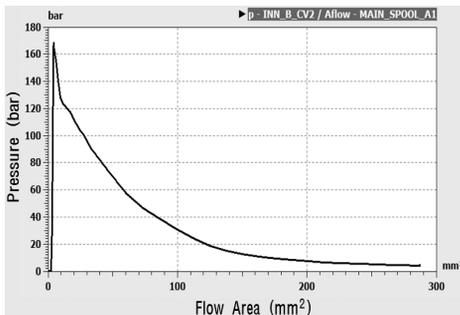


Fig. 10. Surge pressure by flow area

고 할 수 있다.

스플이 이동하려면 작동유가 스펴 오리피스를 통과하여 수압면적이 형성되어야 한다. 스펴이 이동할 때 댐퍼는 압축되며, 이로 인해 댐퍼로부터 유출되는 유량은 슬리브 측면 오리피스를 지나 스펴 오리피스로 나가기 때문에 두 오리피스는 연계성을 갖는다.

응답성을 극대화시키기 위해서는 두 오리피스의 직경을 동시에 확장시켜야 한다. 하지만 두 개를 같이 확장할 경우 변수 별 민감도를 확인할 수 없으므로 하나의 오리피스 직경을 고정하고 나머지 오리피스를 변수로 두어 설계변수 민감도 해석을 진행했다.

Fig. 12는 슬리브 측면 오리피스를 변수로 두어 기존 설계된 0.7mm부터 1.2mm까지 0.1mm간격으로 직경을

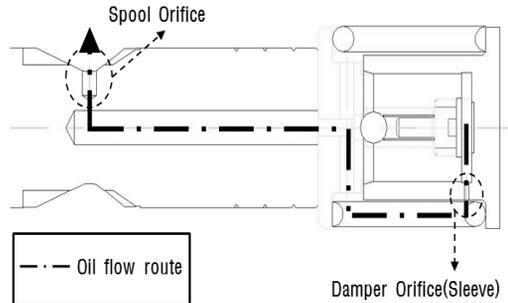


Fig. 11. Damper orifice and spool orifice

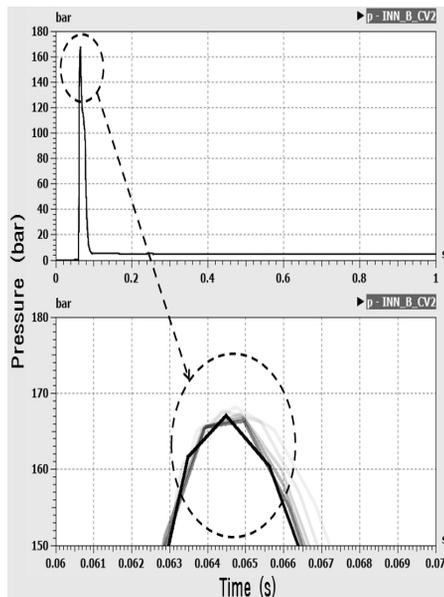


Fig. 12. Surge pressure as adjusting diameter of damper orifice

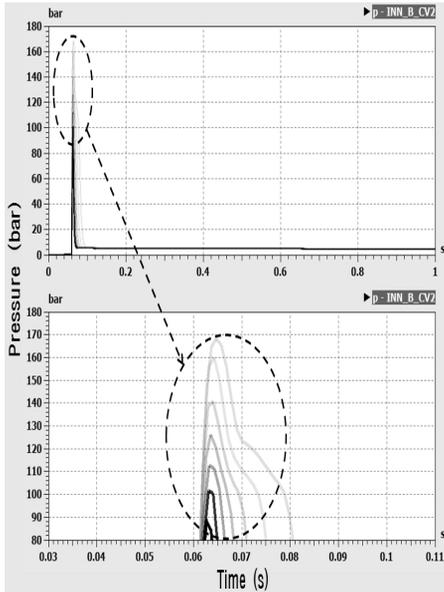


Fig. 13. Surge pressure as adjusting diameter of spool orifice

확장했을 때 서지압력에 관한 해석결과 이다. 스톱 오리피스와의 연계성 때문에 슬리브 측면 오리피스의 확장만으로는 서지압력 저감에 별다른 효과가 없음을 볼 수 있다.

Fig. 13은 스톱 오리피스를 변수로 하여 기존 설계된 0.9mm부터 1.5mm까지 0.1mm간격으로 확장했을 때 해석결과이다. 0.1mm의 확장만으로 큰 폭으로 서지압력이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 슬리브 측면 오리피스 보다 서지압력 저감에 훨씬 민감하게 반응하는 이유는 두 가지로 생각된다.

- (1) 스톱이 이동할 때 댐퍼로부터 유출되는 유량은 최종적으로 스톱 오리피스를 통과해서 나간다.
- (2) 스톱의 이동속도는 댐핑 효과보다 수압면적을 형성하는 유량에 더 큰 영향을 받는다.

Fig. 14는 두 개의 오리피스를 동시에 확장했을 경우와 스톱 오리피스만을 단독으로 확장했을 경우의 서지압력을 비교한 것이다. 슬리브 측면의 오리피스만을 확장했을 경우 서지압력 저감에 별다른 효과가 없었는데 두 개의 오리피스를 같이 확장해보니 감소폭이 커지는 것을 볼 수 있다.

\*본 논문에서 전공자가 아니면 알기 어려운 용어들은 부록에 별도로 표기했다.

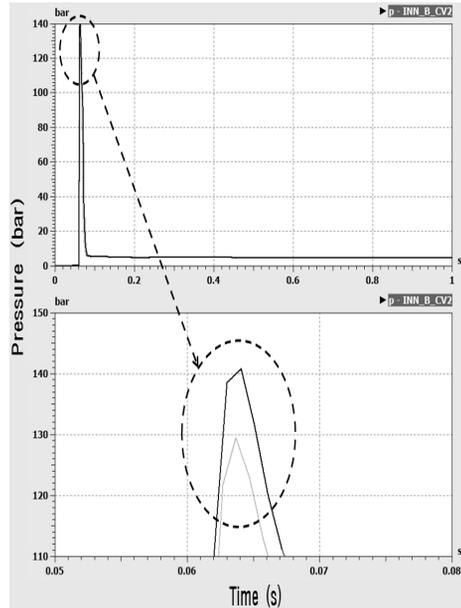


Fig. 14. Reduction effects of surge pressure as adjusting diameter of two orifices

#### 4. 결 론

본 논문에서는 주행모터에 장착된 밸브의 동적거동을 해석한 결과로부터 크래킹 시 체크밸브 포핏의 이상거동을 발견하였고, 압력균형에 문제가 있음을 예측하여 문제 해결을 위한 접근을 시작하였다.

밸브플레이트의 토출구와 인접한 체크밸브 내부에서 압력의 서지현상이 발견되었고, 이를 저감하기 위해 설계 변수 민감도 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 카운터밸런스 스톱의 노치 개수를 늘려 초기의 개도면적을 확장시키면 서지압력이 감소하나 감소폭이 크지 않다.
- (2) 현재 스톱의 형상을 유지한 채 오버랩구간을 조금씩 줄이는 것은 서지압력 저감에 별다른 효과가 없다. 임계상태로 스톱을 설계 시 서지압력은 감소하나 유량누설에 노출되어 치명적인 설계가 될 수 있다.
- (3) 카운터밸런스 스톱의 오리피스를 확장할 경우 스톱의 응답속도 향상으로 서지압력이 가장 확실하게 감소한다.
- (4) 댐퍼의 슬리브 측면 오리피스만 확장할 경우 서지압력 저감에 별다른 효과가 없으나, 스톱 오리피스와 같이 확장하게 되면 서지압력 저감에 시너지효과를 볼 수 있다.

설계변수 민감도 해석으로부터 도출해낸 서지압력 저감방안을 실제 주행모터의 설계에 반영하면 안정적인 동적성능을 갖는 모터 양산에 도움이 될 것으로 기대한다.

## Reference

1. J. S. Jang. (2011a), "Development of Analysis Model for Characteristic Study of Fluid Power System in Injection Molding Machine", journal of KFPS vol. 8 No. 4 pp. 1-8.
2. J. S. Jang. (2011b), "Characteristics Analysis of the Fluid Power System for a Double-color Injection Molding Machine Development", journal of KFPS vol. 8 No. 4 pp. 24-31.
3. S. N. Yun. and I. Y. Lee. (1993), "A study on Dynamic Characteristics of Hydraulic Motor Brake System with Counter Balance Valve", Bull. Korea Fish. Tech. Soc. 29(3), pp. 214-219.
4. Y. H. Yoon., J. S. Jang. and Y. S. Lim. (2012), "Analysis Model Development for Hydraulic Component and System Design", journal of KFPS vol. 9 No. 1 pp. 56-69.
5. D. K. Noh. and J. S. Jang. (2012a), "Dynamic Analysis of the Valves installed in the swash plate type of Hydraulic Driving Motor", journal of KFPS vol. 9 No. 4 pp. 62-69.
6. D. K. Noh. and J. S. Jang. (2012b), "Shape Design Sensitivity Analysis of the Valves installed in the

- Hydraulic Driving Motor", Proceeding of the KSFC 2012 Autumn Conference, Kintex, S6-1, pp. 140-145.
7. Y. J. Cho. (2004), "Present Situation of Hydraulic Industry in Korea", journal of KFPS vol. 1 No. 1 pp. 15-22.
8. Y. G. Jung., I. Y. Lee. and Y. H. Yoon (1998), "Effective Smoothness of Surge Pressure Generated in the Return Line of Active Suspension Hydraulic System for Vehicle", journal of KSAE vol. 6 No. 5 pp. 111-118.
9. J. S. Lee., J. H. Yoo., P. Y. Kim., L. G. Choi. and M. H. Lee (2011), "A Study on Hydraulic Control Characteristics of Travel Motor for Mid-Class Excavator Using 1-D Hydraulic System Analysis", Proceeding of the KSME 2011 Spring Conference, pp. 32-33.

## 부 록

1. 수압면적: 유체에 의한 압력이 작용할 수 있는 면적.
2. 크래킹: 밸브가 열리기 시작함을 알리는 말.
3. 개도면적: 밸브가 열렸을 때 유체가 흐를 수 있는 유로의 최소단면적.
4. 오버랩: 스펴이 이동해도 개도면적이 발생하지 않는 구간. 즉, 오버랩이 5mm인 밸브는 스펴이 5mm까지 이동해도 개도면적이 발생하지 않아 유량이 흐르지 않음.
5. 랜드 부: 보통 스펴에서 직경이 큰 부분을 말함.



**노 대 경** (nointown@hanmail.net)

2012 가천대학교 기계자동차공학과 학사  
2012~현재 가천대학교 대학원 기계공학과 석사과정

관심분야 : 건설기계 및 산업기계의 유압계통 동역학 모델링&시뮬레이션



**장 주 섭** (jjs1@gachon.ac.kr)

1987 경희대학교 기계공학과 공학사  
1989 경희대학교 기계공학과 공학석사  
2000 경희대학교 기계공학과 공학박사  
1988~1996 만도기계 중앙연구소 선임연구원  
1996~현재 가천대학교 기계·자동차공학과 교수

관심분야 : 자동차 및 건설기계 부분의 유압장치의 액추에이터 설계와 모델링&시뮬레이션