

# 굴삭기 리턴 라인 유동소음 감소에 관한 연구 Research of Noise Reduction about Excavator Return Line

강병일 · 장달식 · 김성재 · 권영식

B. I. Kang, D. S. Jang, S. J. Kim and Y. S. Kwon

**Key Words** : Cavitation(캐비테이션), Excavator(굴삭기), Noise(소음)

**Abstract:** In this paper the noise source and the amplifying mechanism are analyzed to reduce the noise of the excavator return line using the experimental approach and the CFD simulation.

The result says that the reason of noise generation is pipe vibration caused by the cavitation at the main control valve and the level of noise is proportional to the valve back pressure at the return line. The methodology to reduce this noise was proposed and verified by the vehicle test.

## 1. 서 론

최근 사용자의 요구수준이 높아짐에 따라 제품의 신뢰성, 작업성과 같은 기본적 성능 외에 감성적인 성능에 대한 요구가 매우 높아지고 있다. 특히 본 연구는 기존 소음의 크기를 평가하여 그 결과로 개선 여부를 결정하는 관점이 아니라 작업자가 느끼는 소음의 질이 문제시되어 발의된 것으로 건설 중장비 분야의 새로운 판단 기준을 제시하고 있다. 예상되는 소음에 비하여 크기는 작으나 간헐적으로 발생하는 이음성 소음이 야간 작업과 같이 주위가 조용한 환경에서 작업을 할 경우 고객의 불만요인이 되어 새로운 연구를 하게 되는 계기가 되었다. 굴삭기에서 소음은 엔진 및 팬 외에 유압 소음 또한 큰 비중을 차지한다. 본 연구의 대상은 굴삭기 전면의 암이 운전석 방향으로 작동하는 동작인 크라우드(Crowd)시에 발생하는 유압과 관련된 유동 소음으로 시험을 통하여 소음 특성과 방사위치, 관련 유압부품 등을 분석하였다. 이후 해석적 방법과 시험을 통하여 개선안을 도출하고 실제 차량에 적용하여 그 효과를 검증하였다.

## 2. 유압 회로

본 장에서는 암 크라우드 작업과 관련이 있는 메

인 컨트롤 밸브의 주요 회로 및 리턴 라인 회로에 대하여 살펴보고자 한다.

### 2.1 제어밸브 암 크라우드 회로

암 실린더로 공급되는 메인 펌프의 유량은 메인 컨트롤 밸브의 암1, 암2 스톱에 의해 제어된다. 암 크라우드 작업 시 메인 펌프1, 메인 펌프2의 유량은 Fig. 1의 암1 스톱을 통과하기 전에 합류되어 암 실린더로 공급되고, 암 실린더로부터 복귀하는 유량은 암1 스톱과 재생 밸브를 통과한 후 리턴 라인을 거쳐 탱크로 들어가게 된다.

암 크라우드 작동은 작업부하에 따라 암 실린더로부터 복귀하는 유량의 일부를 다시 암 실린더로 공급하는 유량 재생 회로가 설계되어 있고 단면 형상은 Fig. 2와 같다.

재생되는 유량의 양을 제어하는 재생 밸브의 변위는 메인 펌프의 압력에 의해 제어된다.

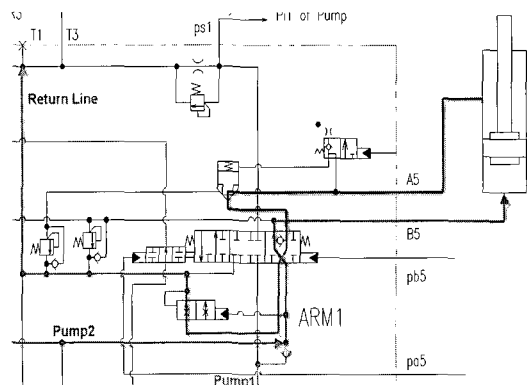


Fig. 1 Hydraulic circuit of arm 1 spool

접수일 : 2006년 4월 10일  
 강병일(책임저자) : 두산인프라코어(주) 중앙연구소  
 E-mail : byungil.kang@doosan.com, Tel : 032-211-1884  
 장달식, 김성재, 권영식 : 두산인프라코어(주) 중앙연구소

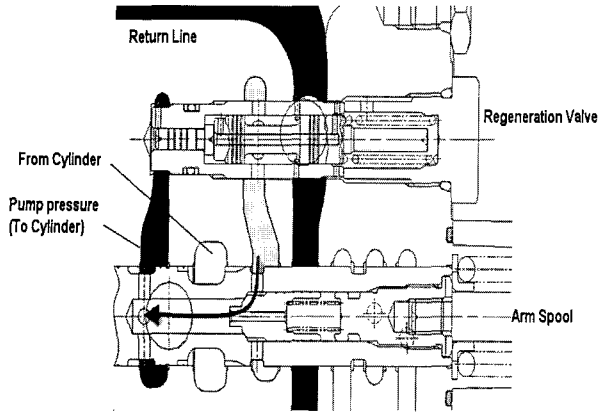


Fig. 2 Arm regeneration valve section drawing

메인 펌프의 압력이 낮으면 재생 밸브의 유로가 작아져 암 실린더의 출구측(Fig. 1의 A5)압력이 상승하게 되고, 이 압력이 공급압력 (Fig. 1의 B5)보다 높을 경우 암 스톨 내부 체크 밸브를 통해 실린더의 유량이 펌프 유량과 합류되어 실린더로 다시 공급되게 된다.

### 2.2. 리턴 라인 시스템

리턴 라인 시스템의 유압 회로도 Fig. 3과 같다. 리턴 라인인 최소 스윙 메이크 업(Swing Make-up) 압력 확보를 위한 바이패스 밸브(C1), 작동유 냉각을 위한 오일 쿨러, 오일 쿨러 보호를 위한 바이패스 밸브(C2) 등으로 이루어져 있다.

메인 컨트롤 밸브의 T 포트를 나온 유량은 C1 바이패스 밸브를 거쳐 일부는 오일 쿨러를 통과하고 일부는 C2 바이패스 밸브를 거쳐 탱크로 들어가게 되며 유량의 배분율은 C2 밸브의 특성과 작동유 온도에 의해 변화하는 오일 쿨러의 압력손실에 의해 결정된다.

## 3. 소음 시험 및 분석

### 3.1 소음 분석

차량에서 발생하는 소음의 특성 및 방사지역을 확인하기 위하여 실차 시험을 실시하였다.

암 크라우드시 발생하는 소음의 주파수 분석 결과는 Fig. 4와 같다. 약 4000Hz부근에서 상당히 높은 수준의 소음이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 5의 사운드 맵(Sound Map)에서 보면 더욱 명확하게 알 수 있는데 4000Hz의 소음 성분이 전체 소음 레벨을 좌우하고 있는 것으로 판단된다.

다음으로 위의 소음이 유체와 관련된 것인지 확인

하기 위해 C1 바이패스 밸브 전단부에서 압력의 맥동을 측정하였고 그 결과는 Fig. 6과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 압력의 맥동이 위에서 측정한 소음주파수와 일치하는 것을 알 수 있고 이로부터 소음이 유체와 관련된 것임을 확인할 수 있다.

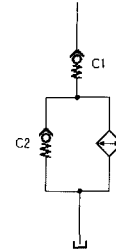


Fig. 3 Hydraulic circuit of return line system

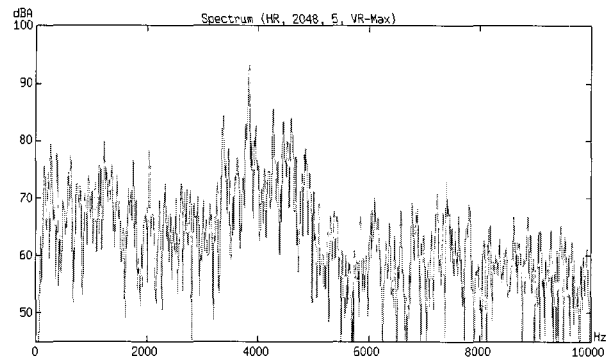


Fig. 4 FFT result of excavator noise

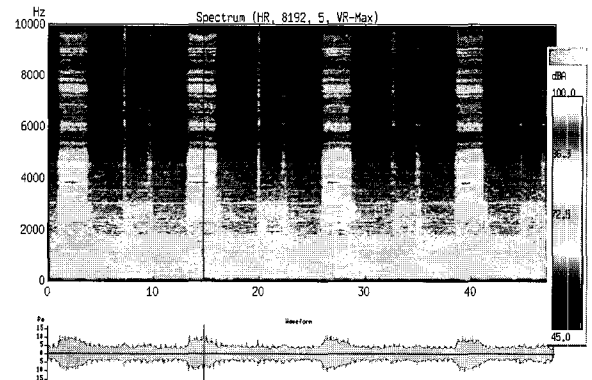


Fig. 5 Sound map of noise

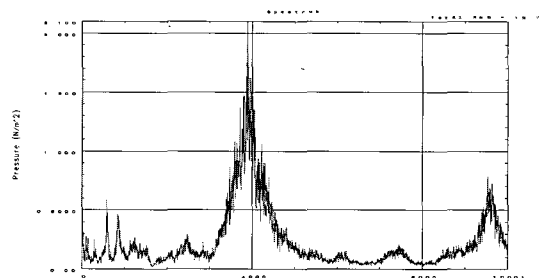


Fig. 6 FFT result of pressure

이로써 차량에서 발생하는 소음은 4000Hz 대역의 주파수 성분을 갖고 유체와 연관되어 있음을 확인할 수 있다.

다음으로 소음이 방사되는 위치를 확인하여 위하여 소음 강도(Sound Intensity) 측정시험을 실시하였다. 소음 강도 측정구역은 Fig. 7과 같이 메인 컨트롤 밸브 상단부터 리턴 라인 파이프가 설치되어 있는 위치로 총 16개 지점에서 소음을 측정하였다.

관심이 있는 4000Hz 대역의 소음 방사 위치는 Fig. 8과 같다. 붉게 표시되는 부분이 소음이 강하게 방사되는 곳으로 Fig. 7에서 그 위치를 확인해보면 C1 바이패스 밸브와 오일 쿨러를 연결하는 파이프임을 확인할 수 있다.

파이프에서의 수직 방향 위치 및 보다 정확한 측정을 위해 굴삭기 측면 리턴 파이프측과 컨트롤 밸브 상부에서 어쿠스틱(Acoustic) 카메라를 이용하여 소음을 재 측정하였고, 그 결과는 Fig. 9, 10과 같다.

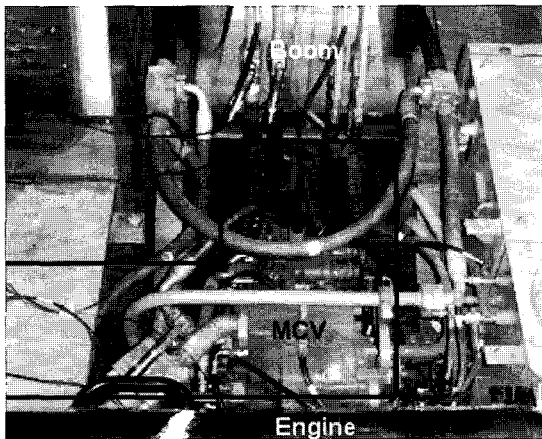


Fig. 7 Sound intensity test area

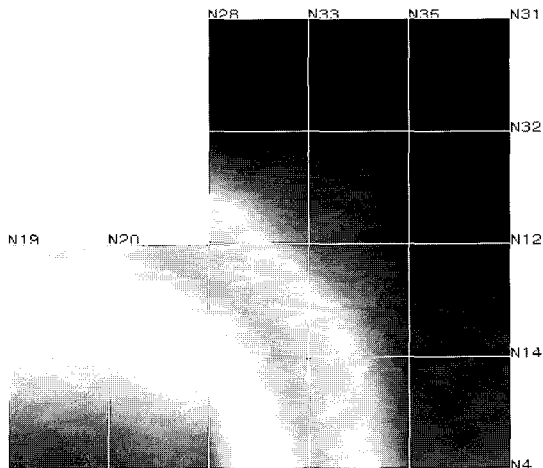


Fig. 8 Sound intensity test result

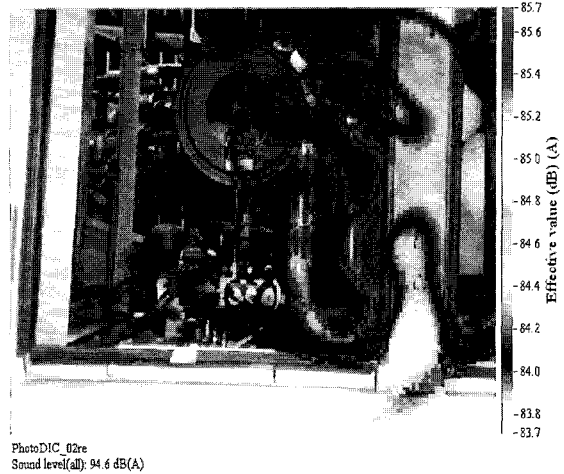


Fig. 9 Acoustic camera sound image(pipe side)

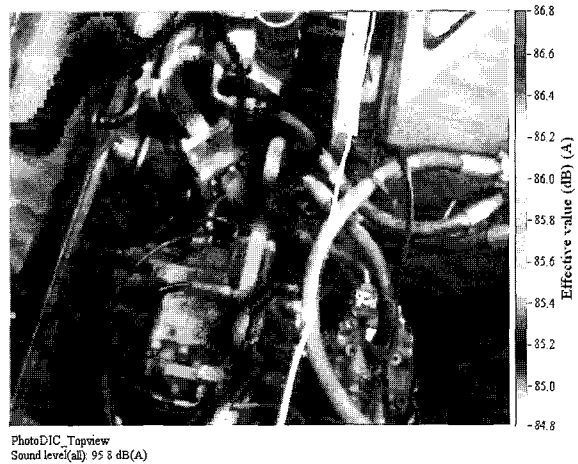


Fig. 10 Acoustic camera sound image(control valve side)

측정한 결과 소음 방사 위치는 Fig. 8의 소음 강도 결과에서 나타난 위치와 동일한 것으로 나타나고 있으며, 소음의 주된 방사위치는 Fig. 8~10의 결과를 종합해 볼 때 C1 바이패스 밸브를 지나 오일 쿨러로 향하는 수직방향 파이프임을 확인할 수 있다.

### 3.2 제거 시험

소음의 발생원인이 되는 요소를 찾기 위해 실차에서 제거법을 통한 시험을 실시하였다. 이는 원인이 될 가능성이 있는 요소를 제거한 후 소음의 발생여부를 조사하여 원인을 찾아내는 방법이다.

본 연구에서는 컨트롤 밸브 내부의 재생 밸브와 C1 바이패스 밸브에 대하여 제거 시험을 실시하였다. 재생 밸브의 경우 암 크라우드시에만 동작하고, 압력손실이 매우 크며, C1 바이패스 밸브의 경우 전단부 압력 맥동이 소음주파수와 동일하기 때문에 소음 발생 원인이 될 가능성이 높다.

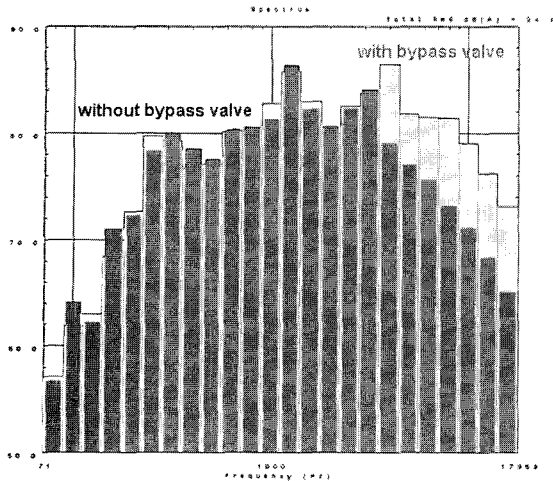


Fig. 11 Noise related to C1 bypass valve

Fig. 11은 C1 바이패스 밸브 제거 전후의 소음을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 C1 바이패스 밸브가 제거될 경우 4000Hz 이상의 고주파 소음 성분은 크게 감소하게 되며, 작업자가 감각적으로 듣기에 이상소음은 발생하지 않는다. 재생 밸브를 제거한 경우도 이와 동일한 결과를 나타낸다.

이상의 결과를 종합해보면, 이상소음은 암 재생 밸브 및 C1 바이패스 밸브와 관련이 있고 두 개의 요소 중 어느 하나가 제거되면 이상소음은 발생하지 않음을 알 수 있다.

### 3.3 벤치 시험

차량 시험의 경우 작업 공간상 제약이 많고 시험을 위한 시간과 비용이 많이 소요되는 문제로 인해 소음 발생의 원인 파악을 위한 추가 시험 및 효율적인 연구가 불가능하여 실차에서의 현상을 재현할 수 있는 시험 벤치를 구성하고 이를 통한 연구가 필요하다.

한편 벤치의 경우 실차에서 이루어지는 메인 펌프의 유량제어가 불가능하기 때문에 실차와 동일한 회로 구성은 불가능하여 소음발생과 관련이 없는 부분의 기능은 제거를 하였다.

제거된 부분은 유량이 재생되는 통로인 암1 스플 내부의 체크 밸브와 메인 펌프의 압력에 의해 변위가 제어되는 재생 밸브로, 수정된 유압회로는 Fig. 12와 같다.

암1 스플에 가공되어 있는 체크 밸브로의 유로는 플러그를 이용하여 폐쇄하고, 재생 밸브는 스톱퍼(Stopper)를 이용하여 실차 작업조건에서와 동일한 스트로크로 고정하였다.

구성된 회로의 타당성을 검증하기 위하여 실차에

서 위와 같은 조건으로 시험을 실시하였고 이상 소음 발생을 확인하였다.

Fig. 13은 벤치에서 C1 바이패스 밸브 유무에 따라 측정된 소음 시험결과이다. 밸브가 없을 경우 차량과 동일하게 고주파 소음 성분이 제거되는 것을 알 수 있고, 이로서 시험벤치가 차량에서의 소음 발생 현상을 재현 할 수 있음을 확인 할 수 있다.

## 4. 유동 및 소음해석

소음 발생원인을 파악하기 위하여 유동 및 소음 해석을 수행하였다. 유동해석은 SC/Tetra 5.0을 이용하였고, 유동소음은 FlowNoise를 이용하여 수행하였다.

### 4.1 재생 밸브

재생 밸브의 유동 해석 결과는 Fig. 14, 15와 같다. 해석에 사용된 경계조건은 굴삭기 작업조건하에서 메인 펌프의 유량 및 압력, 암 실린더의 속도 등을 이용하여 재생 밸브의 통과유량을 계산하여 사용하고, 유체의 물성치는 이수화학의 Equivis ZS46과 동일하다.

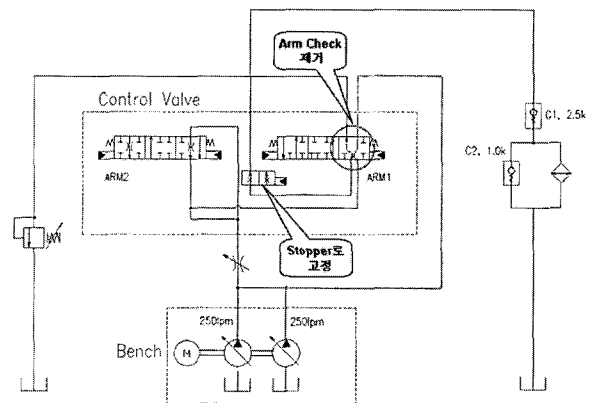


Fig. 12 Test bench circuit

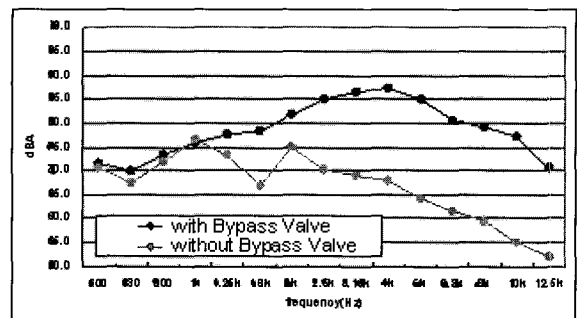


Fig. 13 Noise level of test bench

Fig. 14는 재생 밸브 출구 홀에서의 압력분포로 상당히 낮은 부의 압력이 형성되는 것을 알 수 있다. 이는 출구 홀에서의 빠른 유속 및 유동의 급격한 방향 전환, 큰 압력손실이 그 원인으로, 이와 같은 낮은 압력은 출구 홀에서 캐비테이션이 발생하는 것을 나타낸다.

Fig. 15는 재생 밸브 출구 홀 주변부의 속도분포로 매우 빠른 속도로 작동유가 분출되고 이것이 메인 컨트롤 밸브 하우징에 부딪히는 현상이 발생함을 확인할 수 있다.

Fig. 16은 위의 유동해석 결과를 바탕으로 재생 밸브 스톱, 재생 밸브 출구 홀, 컨트롤 밸브 하우징의 세 영역으로 나누어 소음을 분석한 것으로 유체가 컨트롤 밸브 하우징에 부딪히는 곳에서 유동소음이 발생하는 것으로 나타났다.

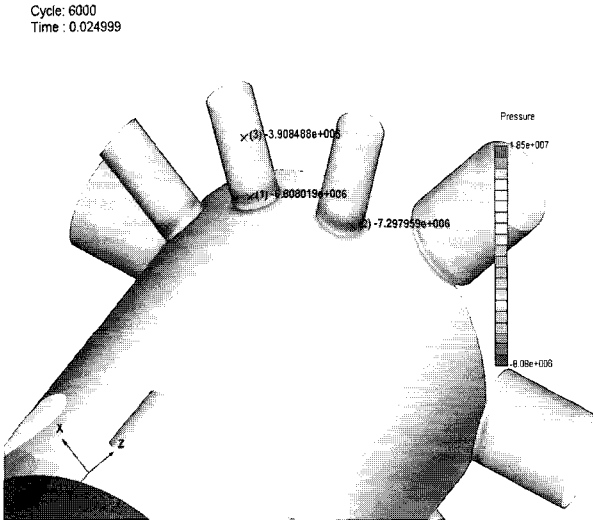


Fig. 14 Pressure distribution of outlet hole

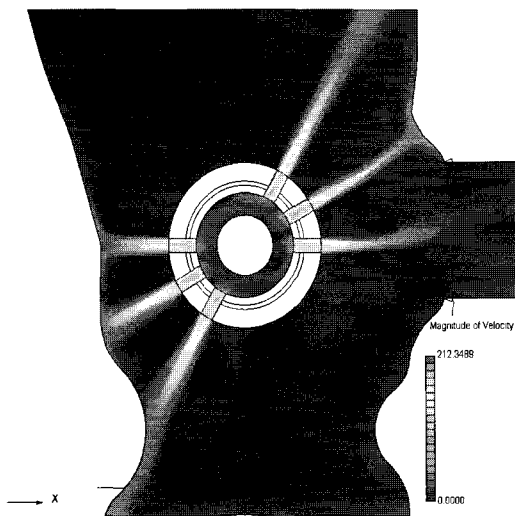


Fig. 15 Velocity profile of regen. valve

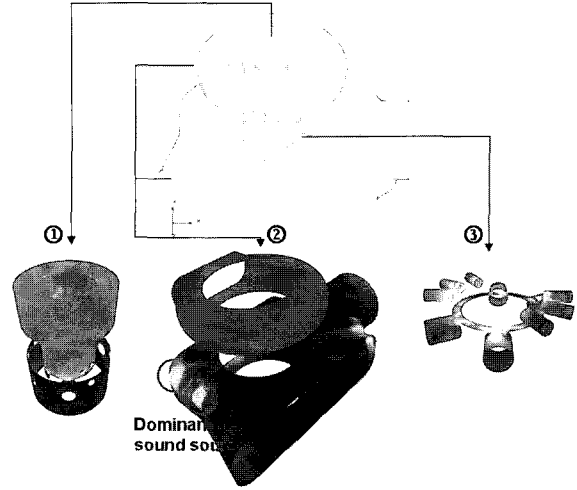


Fig. 16 Regeneration valve noise analysis

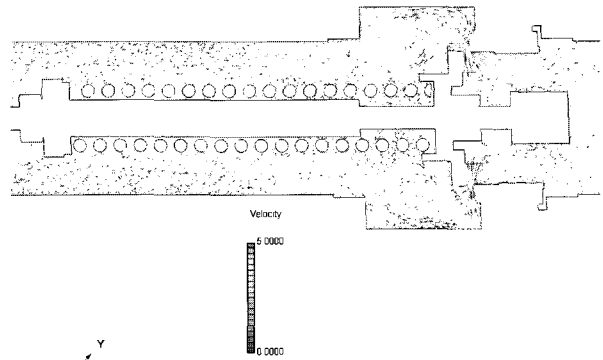


Fig. 17 C1 bypass valve distribution

#### 4.2 C1 바이패스 밸브 유동 해석

C1 바이패스 밸브의 유동해석에 있어서도 재생 밸브에서 사용한 경계조건 및 실차와 동일한 컨트롤 밸브 출구 압력을 형성하는 밸브 스트로크에서 해석을 수행하였다.

Fig. 17은 C1 바이패스 밸브의 속도 분포이다. 밸브 후단부에서 큰 와류가 발생하나 유동 소음과 관련이 있는 작은 와류의 발생 및 흐름은 나타나지 않는다.

따라서 C1 바이패스 밸브가 유동형상측면에서 유동소음에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

### 5. 소음 발생 원인 분석 및 개선

앞의 시험 결과 소음 발생은 재생 밸브 및 C1 바이패스 밸브와 관련이 있고, 해석 결과 재생 밸브에서는 소음발생 가능성이 나타났고, C1 바이패스 밸브는 유동측면에서 소음발생과는 관련이 없는 것으로 나타났다.

여기서 중요한 것은 C1 바이패스 밸브에서 나타난 시험결과와 해석결과의 차이로, 해석상에서 고려하지 못하는 요소가 소음발생과 관련이 있을 가능성이 있다.

컨트롤 밸브와 리턴 라인 시스템 전체를 고려할 경우 해석상 고려하지 못하는 가장 큰 요소는 C1 바이패스 밸브 장착에 컨트롤 밸브 압력의 상승이다. 곧, C1 바이패스 밸브 장착으로 인해 컨트롤 밸브 출구단의 압력이 상승하더라도 해석상 컨트롤 밸브 내부는 압력상승은 발생하지만 압력상승에 의해 유동형상은 영향을 받지 않는다.

이와 같은 추론에 따라 바이패스 밸브 장착에 따른 컨트롤 밸브 출구단 압력의 영향을 알아보기 위하여 출구단 압력에 따른 소음 시험을 실시하였고 그 결과는 Fig. 18과 같다.

압력이 낮은 경우 고주파수 성분의 소음은 존재하지 않으나, 출구단의 압력이 1bar 이상이 되면 고주파 성분의 소음이 급격하게 증가하고, 출구단 압력이 증가할수록 그에 비례하여 소음이 증가하는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로 소음 발생원인을 추론하면 컨트롤 밸브 내부 재생 밸브에서 캐비테이션이 발생하는데, 이 때 발생한 버블이 역압(Back pressure, 출구단 압력)에 비례하는 강도로 붕괴가 되고, 이로 인해 컨트롤 밸브 내부에서 붕괴에 따른 소음 및 진동이 발생하게 되며, 이것이 리턴 파이프에 전달되어 소음이 발생하는 것으로 생각된다.

한편 리턴 파이프에서의 소음을 제거하기 위해서는 근본 원인이라 할 수 있는 재생 밸브에서의 캐비테이션 제거 또는 소음 발생 원인 지역에서 소음이 소음 방사 지역으로 전달되지 못하도록 하여야 한다.

전자의 경우 차량 성능에 영향을 줄 수 있는 컨트롤 밸브로 수정해야 하기 때문에 어려움이 따른다.

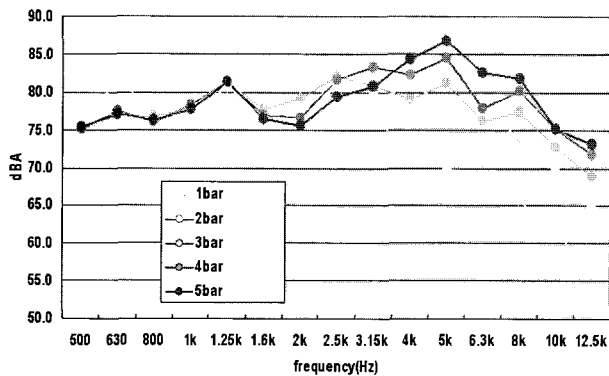


Fig. 18 Noise according to valve back pressure

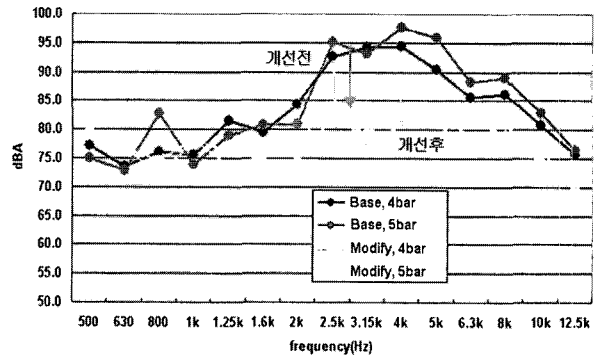


Fig. 19 Noise characteristic of modified system

따라서 본 연구에서는 후자의 방법론을 검증하기 위하여 컨트롤 밸브와 리턴 파이프 사이에 튜브를 사용하여 컨트롤 밸브에서의 진동이 파이프에 전달되지 않도록 한 후 시험을 실시하였고 그 결과는 Fig. 19와 같다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 고주파수 영역에서 최대 15dBA 이상의 소음이 감소하고 이는 파이프에서의 소음제거에 매우 효과적인 방법임을 알 수 있다.

이상 벤치 시험 결과로 가능성을 확인 한 후 실차 적용시험을 실시한 결과를 사운드 이미지로 표현한 것이 Fig. 20, 21과 같다.

Fig. 20은 굴삭기 메인 컨트롤 밸브 윗부분에서 측정된 것으로 이것은 주로 컨트롤 밸브 소음의 영향을 받고, Fig. 21은 굴삭기 측면 커버를 열고 측정된 것으로 리턴 파이프 소음의 영향을 많이 받는다.

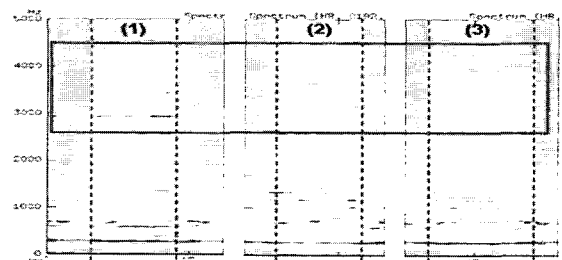


Fig. 20 Excavator sound image(above control valve)

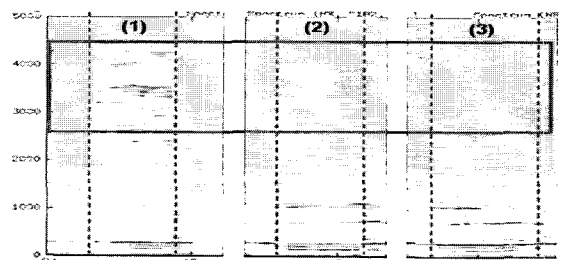


Fig. 21 Excavator sound image(pipe side)

Fig. 21 (1)의 기존 차량과 (2) 진동 차단한 경우의 시험 결과를 보면 진동차단을 통해 파이프에서의 이상 소음은 대부분 제거된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 20의 컨트롤 밸브 상부에서 측정된 개선 전 (1), 후(2) 결과를 보면 그 효과가 미미한데 이것은 컨트롤 밸브 내부 소음으로 위의 개선안이 컨트롤 밸브 자체의 소음을 줄이는 데는 큰 효과가 없음을 알 수 있다.

한편 컨트롤 밸브 자체의 소음을 줄이기 위하여 재생 밸브 출구 홀의 형상에 대하여 연구하였고, 개선 형상에 대한 시험 결과는 Fig. 20, 21의 (3)과 같다. 결과에서 알 수 있듯이 파이프에서의 소음뿐만 아니라 컨트롤 밸브에서의 이상 소음 또한 (1), (2)에 비하여 크게 감소함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

굴삭기 암 크라우드 동작 시 발생하는 이상소음을 개선하기 위하여 실차 및 벤치 시험을 통해 소음의 특성과 방사위치, 관련 요소를 파악 한 후 유동해석 및 소음 해석을 통해 원인을 유추하였고 그 결과는 다음과 같다.

1. 소음은 컨트롤 밸브, 재생 밸브에서 빠른 유속 및 방향전환, 큰 압력손실로 인해 발생한 캐비테이션이 붕괴하면서 발생하는 미세진동에 의해 리턴 파이프가 진동하여 발생한다.
2. 이상 소음의 발생의 가장 큰 인자는 밸브의 형상이 아닌 재생 밸브 후단부의 압력이고 소음의 크기와 압력은 비례한다. 이와 같은 현상이 발생하는 원인은 압력이 증가하면 캐비테이션이 붕괴하는 시점과 그 정도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

3. 리턴 파이프에서의 이상소음을 제거하기 위해 컨트롤 밸브와 리턴 파이프사이에 진동이 전달되지 못하도록 하는 것이 효과적인 것으로 나타났으며, 재생 밸브의 형상 변경을 통해서 추가적으로 소음을 감소시킬 수 있고, 실차 시험을 통해 그 효과를 입증하였다.

마지막으로 굴삭기의 경우 메인 컨트롤 밸브나 기타 밸브류에서 큰 압력차이로 인해 캐비테이션이 발생할 가능성이 매우 높으나 아직까지 캐비테이션에 의한 소음 발생을 예측 할 수 있는 해석 기법이 개발되어 있지 않으므로 향후 이에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

#### 참고 문헌

- 1) N. Kugou, H. Matsuda, H. Izuchi, H. Miyamoto, A. Yamazaki and M. Ogasawara, "Cavitation Characteristics of Restriction Orifices", ASME, Fluid Engineering Division, pp. 457~462, 1996.
- 2) H. Ueno, A. Okajima, H. Tanaka and T. Hasegawa, "Noise Measurement and Numerical Simulation of Oil Flow in Pressure Relief Valve", JSME International Journal, Vol. 37, No. 2, pp. 336~341, 1994.
- 3) A. S. Tusseling, A. E. Vardy and D. Fan, "Fluid-Structure Interaction and Cavitation in a Single-Elbow Pipe System", Journal of Fluid and Structures, Vol. 40, No. 4, pp. 395~420.
- 4) S. Skaistis, "Noise Control of Hydraulic Machinery", Marcel Dekker, Inc. New York and Basel, pp. 147~220, 1988.