

해석을 통한 휠로더 조향 충격 개선 Improvement of the Steering Shock of the Wheel loader through Simulation

조용락 · 장달식
Y. L. Cho and D. S. Jang

1. 서 언

건설기계인 휠로더는 굴절 차량(articulated vehicle)으로 프론트 프레임과 리어 프레임에 양단이 연결된 유압실린더의 신축에 의해 조향이 이루어진다. 휠로더 조향시스템은 일반적으로 스티어링 펌프, 조향휠이 연결되는 스티어링 유닛, 유량 증폭부(유량 증폭부(flow amplifier)), 유압실린더 등으로 구성된다. 휠로더 프레임의 큰 관성력과 타이어와 지면 사이의 마찰 특성에 의해 필연적으로 조향 시작 시에 충격이 발생되며 이러한 초기 충격은 승차감 및 작업성을 저해한다. 초기 충격은 유량 증폭부(유량 증폭부(flow amplifier))의 스펴의 노치를 통한 적절한 유량 제어를 통해 저감할 수 있다. 또한 어큐뮬레이터를 장착하여 충격을 흡수 하거나 별도로 바이패스 밸브를 설치하여 초기 유량을 바이패스 시킴으로써 충격을 저감할 수도 있다.

본 해설은 일종의 바이패스 밸브인 쿠션밸브를 통한 초기 충격 저감에 대하여 기술한 것이다. 휠로더 조향시스템을 유압계 해석 소프트웨어 AMESim을 이용하여 모델링하였다. 해석 조건 및 충격 평가 기법을 설정하고 시뮬레이션을 통해 쿠션 밸브를 최적화하였다.

2. 휠로더 조향시스템 모델링

2.1 휠로더 조향시스템

그림 1에 휠로더 조향시스템의 유압 회로도를 나타내었다. 스티어링 유닛에 장착된 조향 휠의 회전속도에 대응하여 유량 증폭부(유량 증폭부(flow amplifier))로 유량이 공급되면 유량 증폭부(유량 증폭부(flow amplifier))는 입력 유량에 대해 고유의 유량 증폭 계수(flow amplifying factor)만큼 증폭된 유량을 조향 실린더에 공급하게 된다. 스티어링 펌프는 스티어링 유닛으로부터 발생하는 로드 센싱(load sensing) 신호에 따라 유량을 토출한다. 쿠션 밸브는 두 개의

유압실린더 사이에 장착된다.

그림 2에 쿠션 밸브를 유압 회로도를 나타내었다. 쿠션 밸브는 두 개의 릴리프 밸브와 릴리프 밸브의 후단의 유로를 개폐하는 스펴로 이루어진다.

스플 양단에는 오리피스(Orifice)가 장착되어 있어 개폐 시간을 제어한다. 조향 초기에 하나의 유압실린더의 압력이 급격히 상승되면 릴리프 밸브가 크래킹(크래킹)되어 또 다른 유압실린더로 유량이 바이패스된다. 초기에 열려있던 스펴은 일정시간 후 유로를 막게 되므로 바이패스는 조향 초기 일정시간 동안만 이루어진다.

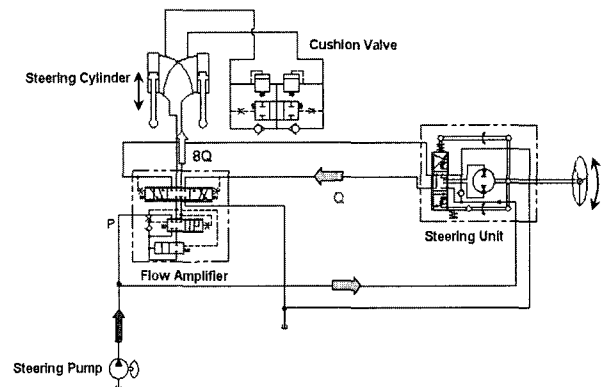


그림 1 휠로더 조향시스템 유압 회로도

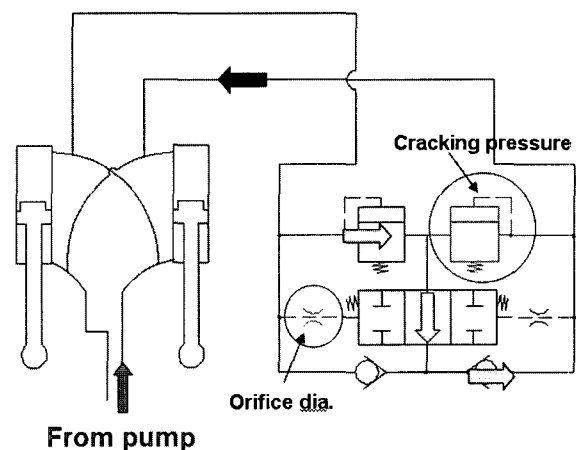


그림 2 쿠션 밸브 유압 회로도

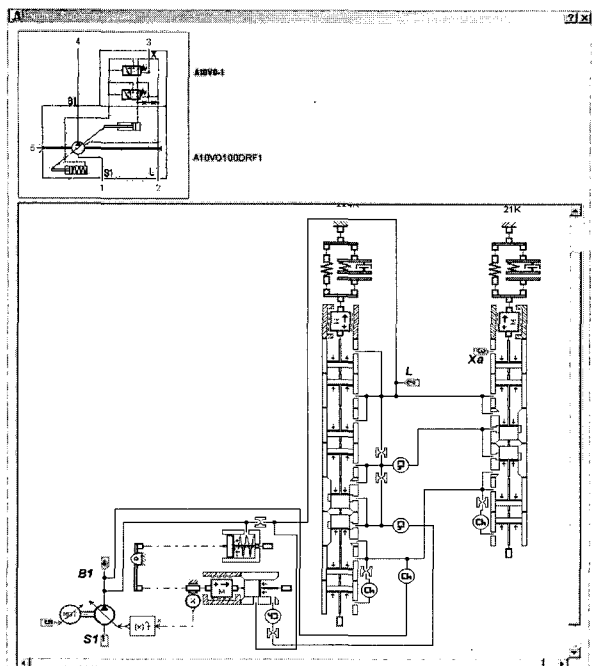


그림 3 스티어링 펌프 모델

2.2 조향시스템 AMESim 모델링

AMESim¹⁾을 사용하여 각 유압부품과 굴절 프레임을 모델링 하였다. 그림 3에 스티어링 펌프 모델을 나타내었다. 스티어링 펌프는 유량 및 압력 제어 펌프로서 사관각 제어부의 동특성을 고려할 수 있도록 그림과 같이 부품 레벨로 모델링하였다.

그림 4에는 스티어링 유닛 모델을 나타내었다. 스티어링 유닛은 크게 로터리 스푼(rotary spool)과 슬리브(sleeve), 지로터(gerotor)로 이루어진다. 지로터(gerotor)는 지로터 프로파일에 의한 유량을 계산하고 7개의 유압 체임버를 사용하여 모델링함으로써 유량 및 조향 휠 토크에 발생하는 맥동을 예측할 수 있도록 하였다.²⁾

그림 5에는 유량 증폭부(flow amplifier) 모델을 나타내었다. 유량 증폭부(flow amplifier)는 유량 방향을 제어하는 방향제어밸브(directional valve), 유량의 증폭하는 증폭밸브(amplifier valve), 우선동작밸브(priority valve), 속 및 흡입밸브(shock & suction valve), 배압을 형성하는 카운터 밸런스 밸브(counter balance valve)로 이루어진다.

유량 증폭부(flow amplifier) 밸브의 유량 증폭 정특성시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다. 증폭 계수(amplifying factor)는 입력 유량이 증가될 수록 감소하는 특성을 보인다. 반면에 부하에는 영향을 받지 않는다.

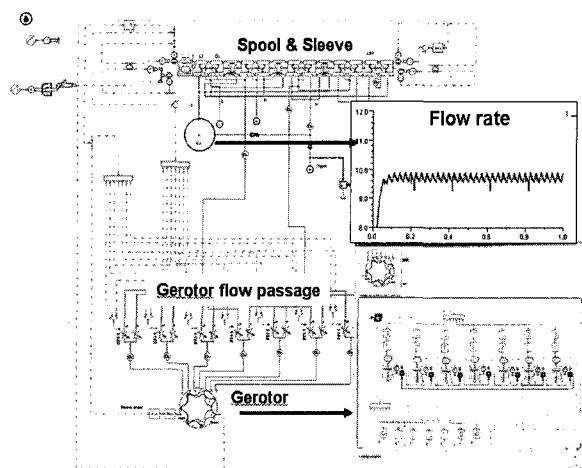


그림 4 스티어링 유닛 모델(오른쪽 위: 토출 유량 시뮬레이션 결과, 오른쪽 아래: Gerotor 모델)

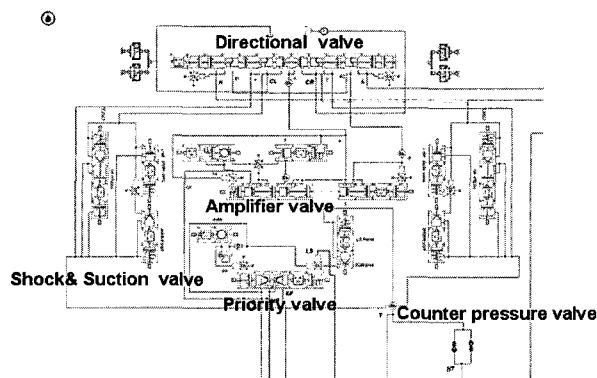


그림 5 유량 증폭부(flow amplifier) 모델

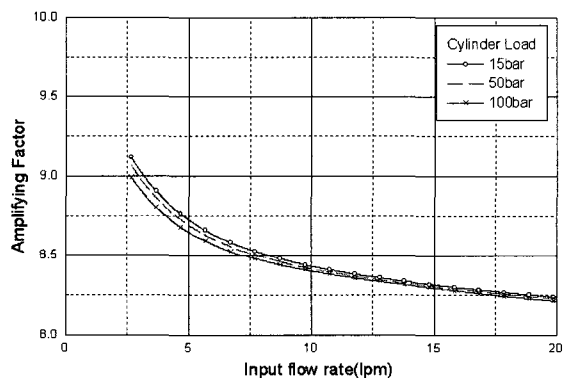


그림 6 유량 증폭부(flow amplifier)의 정특성

그림 7에는 굴절 프레임 모델을 나타내었다. 휠로더 굴절 프레임은 2차원으로 모델링 하였다. 굴절 프레임은 프론트 프레임과 리어 프레임, 4개의 타이어(마찰)모델로 구성된다. 타이어와 지면과의 마찰은 타이어의 강성과 댐핑을 고려할 수 있는 LuGre 동적 마찰모델(dynamic friction model)^(4,5)을 사용하여 모델링하였다. 타이어 회전방향 마찰력을 계산하기 위

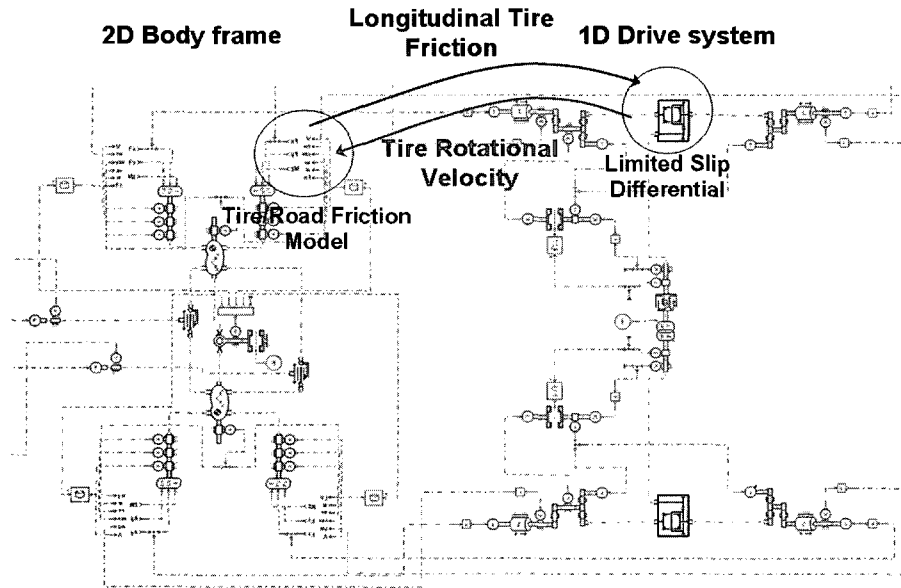


그림 7 휠로더 굴절 프레임 모델

해선 타이어의 회전속도를 알아야 하는데, 1차원의 구동 시스템을 모델링함으로써 계산할 수 있다. 구동 시스템 모델은 회전방향 타이어 마찰력을 입력 값으로 타이어의 관성과 유한 슬립 편차(limited slip differential, LSD)의 운동학적 관계를 이용하여 회전속도를 계산한다.

2.3 모델 검증

조향시스템을 시험결과에 튜닝하기 위해서 유압부품 모델의 유량계수와 유동력, 타이어의 마찰 계수 및 물성치, 호스의 물성치 등을 튜닝하였다. 그림 8과 9에 펌프 압력 및 로드 센싱(load sensing) 압력의 시뮬레이션 결과를 시험 결과와 비교하여 나타내었다. 시뮬레이션의 조향 휠 속도의 시험결과를 입력으로 하여 수행하였다. 그림 8은 조향 휠 속도가 20rpm인 미세조작이고 그림 9는 70rpm인 급조작의 경우이다. 미세조작의 경우 예측 결과와 시험 결과가 상당히 일치함을 알 수 있다. 급조작의 경우 그 양상은 유사하나 미세조작에 비해 오차가 크다.

3. 쿠션 밸브 최적화

3.1 시뮬레이션 조건

조향시 발생하는 초기 충격을 저감하기 위해 시뮬레이션을 통해 쿠션 밸브를 최적화 한다. 시뮬레이션 조건은 현실적인 작업 조건에 기초하여야 하는데, 여기서는 가장 빈번하게 발생하는 통상 조작 조건에 집중하였다. 통상적인 조작은 최대 조향 휠 속도

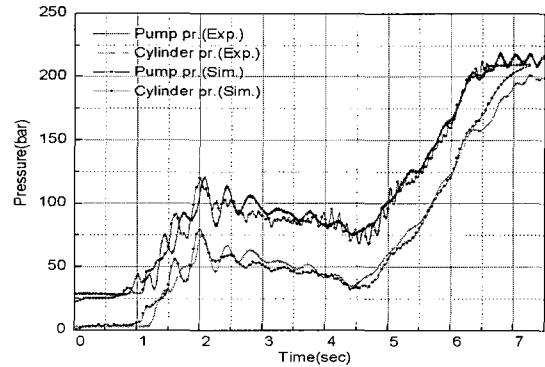


그림 8 시뮬레이션 및 시험 결과 비교
(조향 휠 속도 : 20 rpm)

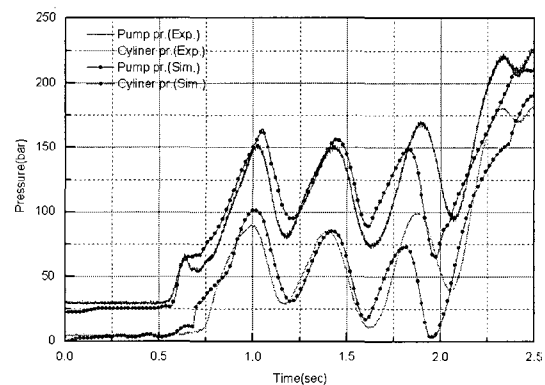


그림 9 시뮬레이션 및 시험 결과 비교
(조향 휠 속도 : 70 rpm)

40rpm, 최대 조향 휠 속도에 이르는 시간 0.4 초로 정의된다. 차량의 자세는 중립 위치에서 왼쪽 최대 각도까지 조향되었다가 다시 오른쪽 최대 각도까지 조향되는 것으로 정의하였다. 또한 차량의 부하 상태

에 따라 거동이 크게 변화하므로 빈 버킷 조건과 4.5ton(최대부하의 약 85%) 부하 조건에 대해 각각 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 10에 통상 조작 조건에 따른 시뮬레이션 결과를 도시하였다.

3.2 충격의 평가

쿠션 밸브가 초기 충격에 미치는 영향을 분석하기 위해선 시뮬레이션 결과를 통해 초기 충격을 정량화하여야 한다. 초기 충격의 정량화는 ISO 2631-1⁽⁶⁾의 승무원 안락도 계산 과정(procedure for calculating comfort for seated persons)을 따른다. 그림 11에 그 계산 절차를 도시하였다.

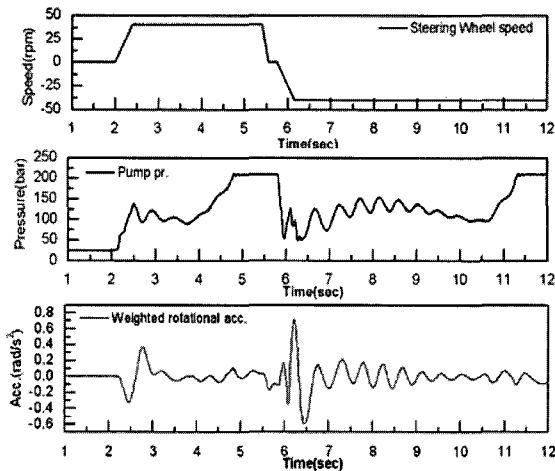


그림 10 시뮬레이션 결과

(조건 : empty bucket, 위 : 조향 휠 속도, 중간 : 펌프 압력, 아래 : 운전석의 회전 진동)

휠로더 조향은 2차원 운동이므로 그림 11에 표시한 바와 같이 x, y, rz 방향의 가속도 성분만이 정의된다. 또한 운전석이 위치하는 리어 프레임은 'seat'의 동특성 등이 포함되지 않은 하나의 강체로서 모델링 되었으므로 'seat', 'back', 'feet'의 구분이 무의미하다.

휠로더 조향은 2차원 운동이므로 그림 11에 표시한 바와 같이 x, y, rz 방향의 가속도 성분만이 정의된다. 또한 운전석이 위치하는 리어 프레임은 'seat'의 동특성 등이 포함되지 않은 하나의 강체로서 모델링 되었으므로 'seat', 'back', 'feet'의 구분이 무의미하다. 최종적인 'vibration total value'의 계산은 rms값을 사용하였는데, rms를 계산하는 구간의 그림 10의 회전방향 진동(rotational vibration)에 도시한 것과 같이 조향 초기 구간이다. 이것은 본 연구 목적에 맞게 최대 조향 각도에서 발생하는 정지 충격을 고려하지 않기 위함이다.

3.3 쿠션밸브의 최적화

쿠션밸브에서 최적화가 요구되는 설계 파라미터는 릴리프 밸브의 크래킹 압력과 쿠션 밸브를 바이패스 작동시간을 제어하는 스펴의 오리피스 직경이다. 두 개의 설계 파라미터는 릴리프 작동 타이밍과 지속 시간이 결정한다. 표 1과 같이 16(4X4)가지 경우에 대해 무부하 및 부하 상태에 대해 각각 시뮬레이션을 수행하였고 초기 충격을 평가하였다.

그림 12에 무부하시 초기 충격의 칸투어(contour)

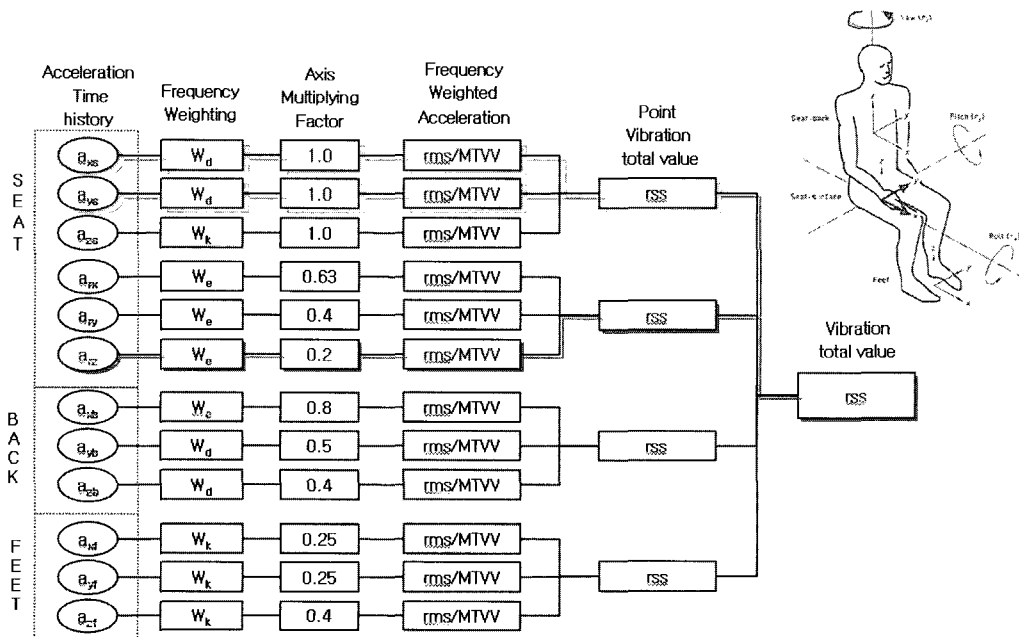


그림 11 승무원 안락도 계산 과정(ISO 9631-1)

를 나타내었다. 크래킹 압력 50bar, 오리피스 직경 ϕ 0.5의 쿠션 밸브가 가장 작은 충격이 발생시킴을 알 수 있다.

그림 13은 부하시의 충격의 칸투어(contour)인데, 크래킹 압력 11.4bar, 오리피스 ϕ 0.8의 쿠션 밸브가 가장 작은 값을 나타낸다.

무부하시 최적의 쿠션 밸브와 부하시 최적의 쿠션 밸브의 충격을 쿠션 밸브가 없는 경우와 비교하여 표 2에 나타내었다. 쿠션 밸브가 없는 경우를 기준으로 크래킹 압 11.4bar에 오리피스 직경 ϕ 0.8을 갖는 쿠션 밸브는 부하시 초기 충격을 25% 저감할 수 있는 반면에 무부하시 충격은 오히려 26% 증가된다. 크래킹 압 50bar에 오리피스 직경 ϕ 0.5을 갖는 쿠션 밸브는 무부하시 14%, 부하시 6% 충격을 저감 시킨다.

Loaded Shock(m/s²)

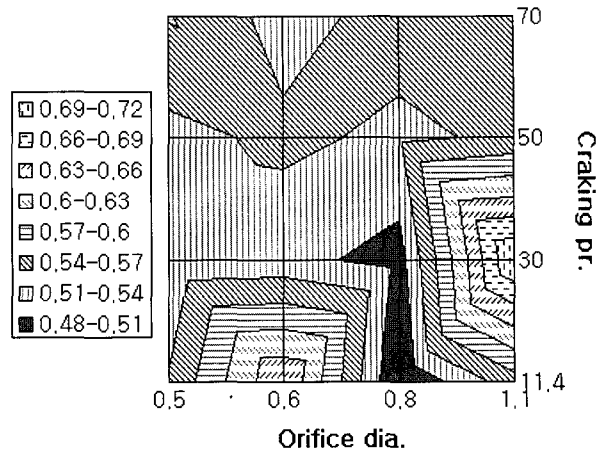


그림 13 부하시 설계 파라미터에 따른 초기 충격

표 1 쿠션 밸브 설계 파라미터

크래킹 압(bar)	11.4	30	50	70
오리피스 직경(mm)	0.5	0.6	0.8	1.1

두 개의 쿠션 밸브는 부하상태에 따라 상반된 결과를 나타내는데, 시뮬레이션 결과를 통해 시간 영역에서 확인할 수 있다. 이와 같이 부하 상태에 따라 쿠션 밸브 설계 파라미터의 최적값이 크게 변화되므로 선택의 문제가 발생된다. 무부하 조건과 부하 조건의 중요도가 동등하다면 크래킹 압 50bar에 오리피스 직경 ϕ 0.5이 최적값이 되며, 초기 충격을 약 10% 저감할 수 있다.

Empty bucket Shock(m/s²)

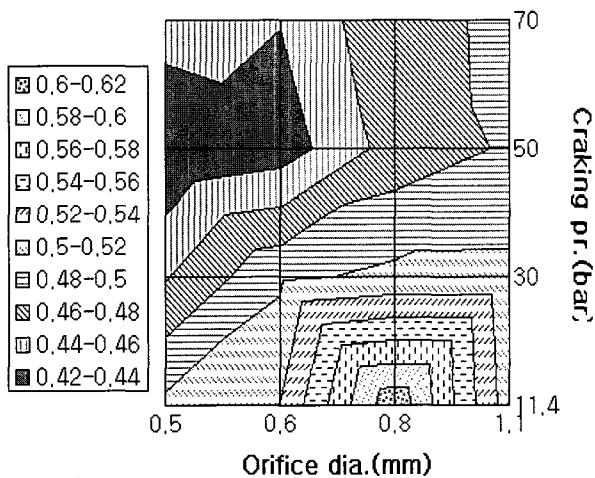


그림 12 무부하시 설계 파라미터에 따른 초기 충격

4. 결 언

휠로더 조향시 발생되는 초기 충격 저감을 목적으로 사용되는 쿠션 밸브를 최적화하기 위해 조향시스템의 Dynamic Model을 개발하였다. 통상 조작 조건에 따른 시뮬레이션과 ISO 2631-1에 따른 충격 평가를 통해 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 쿠션 밸브 최적값은 부하 조건에 따라 민감하게 변화한다.
- 2) 쿠션 밸브의 사용으로 초기 충격이 10% 저감된다.

표 2 쿠션 밸브에 따른 초기 충격

Parameter	무부하		부하		Total
	Shock(m/s ²)	비율(%)	Shock(m/s ²)	비율(%)	비율(%)
11.4bar, ϕ 0.8	0.6148	126	0.4788	85	104
50bar, ϕ 0.5	0.417	86	0.5305	94	90
No Cushion valve	0.4861	100	0.5638	100	100

참 고 문 헌

- 1) IMAGINE : AMESim version 4.2
- 2) N. Nervegna, S. M. M.Rundo and L. Gilardino, "Hydraulic components design", European AMESim Users' Conference-Paris, May 26, 2000.
- 3) L. Gilardino, S. Manco, N. Nervegna and A. Pavanetto, "유량 증폭부(flow amplifier)s In Hydrostatic Steering", SAE., 2002.
- 4) J. Deur, J. Asgari and D. Hrovat, "A Dynamic Tire Friction Model for Combined Longitudinal and Lateral Motion", Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- 5) X. Claeys, J. Yi, L. Alvarez, R. Horowitz and C. C. de Wit, "A Dynamic Tire/Road Friction Model for 3D Vehicle Control and Simulation", IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings, 2001.
- 6) ISO 2631-1, "Mechanical vibration - Laboratory method for evaluating vehicle seat vibration-", First edition 1992.

[저자 소개]

조용락(책임저자)



E-mail : yonglakcho@doosan.com

Tel : 032-211-1780

한양대학교 공과대학원 기계공학과 학사/석사 졸, 두산인프라코어(주) 중앙연구소 주임 연구원

[저자 소개]

장달식



E-mail : dalsik.jang@doosan.com

Tel : 032-211-1771

서울 대학원 기계설계학과 학사/석사 졸, 독일 아흐엔(Aachen)대 박사 (Dr.-Ing.) 졸, 두산인프라코어(주) 중앙연구소 수석 연구원, (사)유공압시스템 학회 이사, ISO 전문위원(유공압 부품 및 시스템), (사)기독대학인회(ESF) 이사, 공학박사, 시인