

진동 환경 재현 6-자유도 가진기 개발 진척도

정 원섭 (표준과학연구원), 우 준규, 김 수현 (KAIST), 윤 각진 (유응년제작소)

Progress in Developing the 6-DOF Vibration Environmental Simulator

W.S. Cheung (KRISS), C.K. Woo, S.H. Kim (KAIST), G.J. Yoon (HEAD)

ABSTRACT

In the experiments of design, vibration evaluation, and test of vehicles, aircraft, and other mechanisms the development of vibration simulator that serves environment similar to real fields takes lots of advantages. Especially, in the real field test of vehicles it possesses the advantages of showing the dynamic characteristics of the vehicle. In this study, to investigate the validity and fitness of proposed 6DOF parallel link mechanism we simulated that mechanism.

주요기술용어 : Vibration Exciter (가진기), Parallel Link Mechanism (병렬링크구조)

1. 서론

20 세기 공학의 가장 큰 진보는 동력을 이용한 운송 체계, 즉 자동차, 철도, 선박, 우주 항공 분야의 발전이며, 이는 인간의 생활 환경에 많은 변화를 야기하고 있다. 특히, 운송 체계에서 전달되는 인체 피폭 진동은 제품의 품질 (승차감과 안락도), 인간 활동성 및 작업 효율성 (읽기, 쓰기, 기계 조작 등), 그리고 보건 및 안전과 직접 관련된 복합적 문제점 들^[1]을 우리에게 부가하고 있다. 그러나, 인체의 접촉 부로 통하여 피폭되는 진동 문제점 들은 효과적으로 접근할 수 있는 학문 배경은 아직 매우 치약한 실정이다.

90년대 들어 인체 피폭 진동에 대한 실험적 접근 방안은 영국 ISVR의 Griffin 교수^[1] 등에 의하여 처음으로 공학 분야에 소

개 되었다. 이러한 인체 진동 관련 기술은 단순 물리량적 진동 측정치가 인간의 안락도나 활동성 및 건강 침해에 대한 평가치와 단순 비례량으로 나타나지 않는다는 점을 강조하고 있다. 즉, 발, 엉덩이, 혹은 등 부위와 같은 인체 접촉부로 전달되는 동일한 진동량은 피폭 부위에 따라 인지량이 다르며, 또한 접촉 부위별 피폭 진동 주파수 성분에 따라 인간의 인지량은 또한 다르다는 점이다. 이러한 인체 진동의 감응적 평가는 국내 자동차의 승차감에 대한 현주소 파악과 국산 자동차 의자 제품의 기술적 문제점 접근^[2,3]을 가능하게 하였다. 이러한 진동 승차감 평가 기술은 자동차, 철도, 선박, 항공, 국방 등의 관련 제품의 성능 평가에 매우 중요한 역할을 향후 수행할 것으로 기대된

다.

운송 체계에서 인간이 경험하는 진동 즉 진동 승차감이 제품의 품질을 좌우하는 일차적 인자라는 점은 향후 제품화 연구의 방향을 우리에게 시사하고 있다. 즉, 승차감에 대한 제품화 기술 연구는 인간이 경험하는 환경 진동을 실험실 내에서 재현할 수 있는 시험 장비의 구축에서 시작될 수 있다. 따라서, 1996년 초부터 과학기술부 선도기술사업인 감성공학 연구에서 인간이 경험하는 진동들의 재현 장치 개발과 진동 감성 측정 및 평가 장치 개발^[4,5]을 진행해오고 있다. 본 논문에서는 진동 환경 재현 장치에 대한 연세까지의 주요 연구 결과를 소개하고자 한다.

제 2 절에서는 1997년 8월 설계 및 제작 시방이 완료된 진동 환경 재현용 6 자유도 진동 가진기의 구성과 주요 제원을 각각 소개한다. 그리고, 제 3 절에서는 본 장치의 설계 시 고려된 6 자유도 진동 가진기의 동적 특성을 자세히 소개한다. 그리고, 현재 KAIST 와 개발 중인 다축 가진기의 최적 제어 시스템에 대한 지금까지의 연구 진척도, 본 진동 환경 모사 장치의 주요 연구 결과, 그리고 향후 국내 산업계에 기여하게 될 파급 효과를 제 4 절에서 강력히 요약한다.

2. 6-자유도 가진기의 구성과 주요사양

운송 체계용 진동 환경 시뮬레이터는 실제 주행 환경을 그대로 모사해 주는 시스템이며, Fig. 1 은 현재 제작 중인 6 축 가진기의 전체 구성도를 보이고 있다. 이는 6 조의 유압 가진기로 구성된 진동 발생 장치, 진동 베드의 원하는 6 자유도 진동을 재현하기 위한 가진기 제어부, 그리고, 유압 가진기의 동력을 공급하는 유압 공급부로 구성되

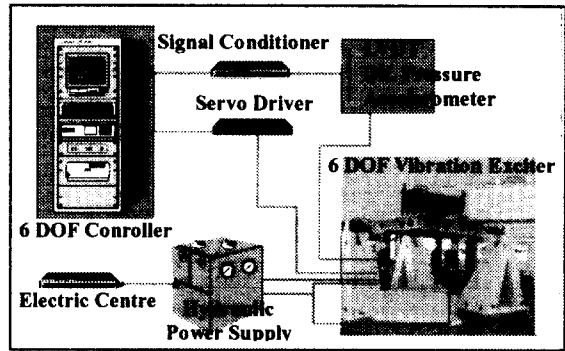


Fig. 1. Layout of 6 DOF Vibration Exciter.

어 있다. 상기 가진기는 실제 차량의 주행 시 사람에게 전달되는 6 자유도 진동 (앞뒤 (x-축), 좌우 (y-축), 상하 (z-축), Roll, pitch, yaw 성분)을 동시에 재현할 수 있는 기구학적 구조를 갖고 있다. 이는 기존의 스텐더트 플랫폼 형태의 시뮬레이터^[6,7]와는 달리, 각 링크들간의 간섭을 줄이면서 최대 60 Hz의 고주파 진동을 발생하기 위하여 앞뒤, 좌우, 그리고 yaw 운동을 발생하는 3 개의 수평 링크부와 상하, roll, 그리고 pitch 진동을 생할 수 있는 3 개의 수직 링크부로 구성된 2 가지의 수평 및 수직 병렬 구조 (parallel link mechanism)를 이용하여 6 자유도 운동을 구현하는 방법을 채택하고 있다.

이러한 구조를 갖는 6 자유도 가진기는 표준(연), 영국 ISVR, KAIST, 영국 STI사와 국내 유용년제작소가 공동으로 설계 뿐 아니라 제작 시방까지를 1997년 8월 성공적으로 완료하였다. 현재 유용년제작소는 표준(연)과 영국 STI사의 감리하에 6 자유도 가진기와 서보 밸브 구동단을 제작 중에 있으며, 본 장치의 주요 제원은 Table 1과 같이 요약된다. 그리고, 표준(연)과 KAIST 팀은 6 자유도 가진기의 최적 제어용 Hardware 및 Software를 개발 중에 있다. 특히, 영국의 ISVR은 인간을 대상으로 하는 시험 시 수반되는 안전 대책 방안과 인체

진동 특성의 해석 Software를 개발하고 있다.

Table 1. Specifications of the 6DOF Vibration Exciter.

Description		Specification
Moving Platform Size		1200 mm × 1200 mm
Specimen Weight		500 kg(Maximum)
Excitation Motion		X,Y,Z,Roll,Pitch,Yaw
Excitation Frequency		0.1~60 Hz
Actuator	Maximum Stroke	±135 mm
	Neutral Length	1250 mm
	Maximum Velocity	1000 mm/sec (r.m.s.)
	Dynamic Force	35 kN(Maximum)
Maximum Dynamic Displacement	X Motion	±100 mm
	Y Motion	±100 mm
	Z Motion	±100 mm
	Roll Motion	±15 °
	Pitch Motion	±15 °
	Yaw Motion	±15 °
Maximum Dynamic Acceleration	X Motion	5.0 g,pk
	Y Motion	3.5 g,pk
	Z Motion	8.0 g,pk
	Roll Motion	131 rad/s ² ,pk
	Pitch Motion	125 rad/s ² ,pk
	Yaw Motion	73 rad/s ² ,pk

3. 가진기의 동역학적 특성 해석

본 연구에서 채택한 6 자유도 가진기는 Fig. 2에 보인 바와 같이 수평 및 수직 병렬 링크로 구성된 기구학적 구조를 갖고 있다. 즉, 수직으로 연결된 3개의 액츄에이터는 공간상에서 운동평판의 상하 (Z 축) 운동과 2방향의 회전 운동 (Roll and Pitch)을 발생시킬 수 있으며, 수평 방향의 3개의 액츄에이터는 공간상에서 운동평판을 앞뒤와 좌우 (X, Y 축) 운동과 한 방향의 회전 운동 (Yaw)를 발생시킬 수 있다. 이러한 구조의 동역학적 운동 방정식은 연성(couple)된 비선형 다항식이며, 닫힌 형식(closed form)의 해가 존재하지 않으므로, 식의 해는 수치 해석적으로 구해질 수 밖에 없다. 특히, 회전 운동에 의한 비선형성을 고려한 적합한 제어 기법을

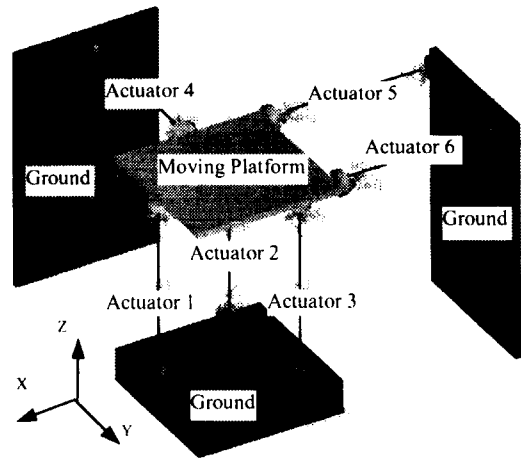


Fig. 2 Configuration of 6 DOF vibration exciter.

세우기 위해서는 구조의 기구학적, 동역학적 특성을 이해하는 것은 필수적이다. 따라서 본 연구의 6 자유도 가진 장치의 기구학적 동 특성을 이해하기 위하여 동역학 해석 프로그램인 ADAMS™를 이용하였으며, 가진 장치로서의 적합성과 타당성을 검증하였다.

금번 연구에서는 인체 진동 관련 관심 주파수 범위인 0.1 ~ 60 Hz의 주파수 영역에서 구동할 때 직면하는 3가지의 물리적 변수인 변위, 속도, 힘 (혹은 가속도)의 구동 조건에 대한 고찰을 우선 수행하였다.

3.1 가진기의 구동 영역 해석

본 장에서는 가진 시뮬레이터의 기구학적 특성을 이해하고 Table 1에 제시된 구조의 요구 사양과의 적합성을 검토하기 위해 병진 운동 시, 운동 평판의 구동 영역과 회전 운동시의 운동 평판의 회전각을 ADAMS™를 이용하여 해석하였다. 동적 힘의 관점에 의하면, 가진 시뮬레이터는 가진 시키고자 하는 500 kg인 대상물을 충분한 동적 힘을

가지고 가진 시켜야 하며 필요한 힘은 바로 가속도의 크기에 비례한다. 일반적으로, 가진 시물레이터에 의해 가진 되는 대상물의 변위가 주기함수 형태로 나타나게 되며, 이러한 경우, 가속도의 크기는 변위의 진폭과 주파수의 자승의 곱의 크기와 같게 된다. 따라서, 가속도의 크기는 바로 주파수의 함수가 된다. 고주파 영역에서는 주파수가 크기 때문에 충분한 가속도로 대상물을 가진 시킬 수 있지만, 저주파 영역에서는 주파수의 크기가 작기 때문에 충분한 가속도로 대상물을 가진 시키기 위해서는 큰 변위 진폭이 요구된다. 따라서 Table. 1에 나타난 가진 시물레이터의 유압 액츄에이터의 최대 진폭에 따른 제안된 가진 시물레이터의 구동 영역에 대한 해석이 요구된다.

해석 시 가진 시물레이터의 상하 방향의 3개의 액츄에이터와 운동 평판 사이의 연결점을 꼭지점으로 하는 정삼각형의 한 변의 길이는 1000 mm로 가정하였으며 유압 액츄에이터의 중립 길이(neutral length)는 1250 mm, 진폭은 ± 100 mm로 가정하였다. ADAMS™를 이용하여 해석한 가진 시물레이터의 변진 3축 운동영역은 Fig. 3에 그리고 회전각은 Fig. 4에 각각 보이고 있다.

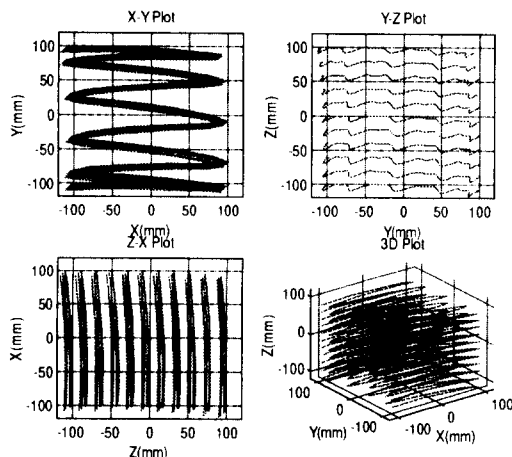


Fig. 2. Workspace (displacement) of 6DOF vibration exciter.

Fig. 3의 결과에 의하면 제안된 가진 시물레이터는 Table 1에 제시된 요구사항에 적합하게 X, Y, Z축 방향으로 균일하게 구동할 수 있다는 것을 알 수 있다.

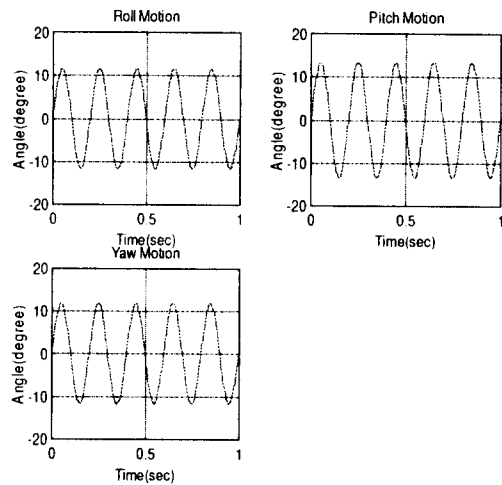


Fig. 4. Workspace (angle) of 6DOF Vibration Simulator.

또한, Fig. 4에 나타난 시뮬레이션 결과로부터 Roll, Pitch 및 Yaw의 3개의 회전 운동에 대한 가진 시물레이터의 구동 영역 즉, 최대 회전각이 Roll 운동의 경우 13°, Pitch 운동의 경우 14°, 그리고 Yaw 운동의 경우 12°임을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 Table 1의 사양에 다소 미흡하다는 것을 알 수 있으며 액츄에이터의 진폭이 다소 커져야 함을 이해할 수 있다.

3.2. 가진기의 속도 및 힘 해석

본 연구에서 개발하고자 하는 가진 시물레이터는 유압 액츄에이터에 의해 구동되기 때문에 유압 시스템의 특성과 제약조건은 가진 시물레이터의 제어 특성과 상당히 관련되어 있다. 일반적으로, 유압 액츄에이터는 실린더로 들어오는 유체의 최대 유속뿐만 아니라 액츄에이터가 받는 동적 힘도

한 제한되어 있다. Table 1에 나타난 바와 같이 가진 시뮬레이터의 유압 액츄에이터는 실린더로 들어오는 유체의 유속이 1000 mm/sec (rms)이고, 동적 힘이 35 kN으로 제한되어 있어 가진 시뮬레이터의 6개의 액츄에이터에 대한 구동 주파수에 따른 속도 및 힘 (혹은 가속도)의 특성에 대한 해석이 필요하다. 다시 말해, 액츄에이터의 속도 및 힘이 한계치에 달하면 제어해야 할 변수를 변환하여 액츄에이터가 각각의 최대치 이상으로 구동 되는 경우를 방지해야 한다. 즉, 액츄에이터의 속도가 한계치인 1000 mm/sec (rms)에 대응하는 주파수에서 제어 변수를 ‘위치’에서 ‘속도’로, 액츄에이터의 동적 힘 한계치인 35 kN에 대응하는 주파수에서 제어 변수를 ‘속도’에서 ‘힘’의 제어로 변환해야 한다.

본 절에서는 6 자유도 각각의 운동에 대한 6개의 유압 액츄에이터들의 구동 주파수에 따른 각각의 속도 및 힘 특성을 이해하기 위해 ADAMS™를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 절에서는 가진기의 액츄에이터를 ±100 mm 진폭으로 0.01 Hz에서 20 Hz까지 ‘정현파 스위프(Sine Sweep)’시켰을 경우의 결과를 소개한다. z축 방향으로만 가진 시뮬레이터를 구동할 경우, Fig. 2에 보인 x-축 방향으로 설치된 6번 유압 액츄에이터가 2.6 Hz 부근에서 한계 속도인 1000 mm/sec (r.m.s.)에 달함을 알 수 있다. 따라서, z축 방향만의 운동일 경우, 2.6 Hz 이전 주파수 부근에서 제어하여야 할 변수를 ‘위치’에서 ‘속도’로 변환하여야 한다. 나머지 운동에 대해서도 동일한 방법으로 해석하였으며 그 결과는 Table. 2에 나타난 바와 같다. 이렇게 유압 액츄에이터의 속도가 그 한계치에 달하는 주파수를 ‘속도 차단 주파수 (Velocity Cut-Off Frequency)’라고 한다.

Table 2에서 액츄에이터의 번호는 6 자유도 각각의 운동에 대해 가장 먼저 속도 한계치에 달하는 액츄에이터를 나타내고 있다.

Table 2. Velocity Cut-Off Frequencies of Each Motion of Simulator.

Motion	No. of Actuator	Velocity Cut-Off Frequency
X Motion	Actuator 5	1.8 Hz
Y Motion	Actuator 4	1.8 Hz
Z Motion	Actuator 3	2.4 Hz
Roll Motion	Actuator 4	1.2 Hz
Pitch Motion	Actuator 1	1.2 Hz
Yaw Motion	Actuator 6	1.2 Hz

그리고, 앞서 언급한 바와 같이 z축 방향으로만 가진 시뮬레이터를 구동할 경우, 유압 액츄에이터가 7 Hz 부근에서 동적 힘이 한계치인 35 kN에 달함을 알 수 있다. 따라서, z축 방향만의 운동일 경우, 7 Hz 이하의 주파수에서 제어하여야 할 변수를 ‘속도’에서 ‘힘’으로 변환하여야 한다. 나머지 운동(X, Y, Roll, Yaw)에 대해서도 동일한 방법으로 해석하였으며 그 결과는 Table. 3에 나타난 바와 같다.

Table 3. Force Cut-Off Frequencies of Each Motion of Simulator.

Motion	No. of Actuator	Force Cut-Off Frequency
X Motion	Actuator 5	6.6 Hz
Y Motion	Actuator 4	5.0 Hz
Z Motion	Actuator 3	7.0 Hz
Roll Motion	Actuator 4	6.0 Hz
Pitch Motion	Actuator 1	5.6 Hz
Yaw Motion	Actuator 6	4.8 Hz

위의 같이 유압 액츄에이터의 동역학적 힘이 그 한계치에 달하는 구동 주파수를 ‘힘 차단 주파수(Force Cut-Off Frequency)’라고 한다.

지금까지 소개한 내용은 본 연구에서 고찰한 6 축 가진기의 동적 특성 중 일부분의 내용이며, 이는 본 학술회의 논문의 한정된 페이지 분량에 때문에 이만 줄이고자 한다.

4. 결론

본 연구에서는 제안된 6 자유도 가진 시뮬레이터의 제어 기법은 기존의 아나로그 PID servo 구동단과 비선형 디지털 제어 기법이 함께 최적화를 도모할 수 있는 “Co-operative scheme”^[8] 을 실현 할 수 있는 제어 장치의 시작품을 표준(연), 영국 STI 사, 그리고 KAIST 가 공동으로 제작 중에 있다.

본 논문에서 소개한 바와 같이 6 자유도 가진기 구조의 기구학적, 동역학적 특성 고찰을 ADAMS™를 이용하였으며, 이들 해석 결과를 이용하여 1997년 8월까지 성공적으로 6 자유도 가진기의 설계 및 제작 시방서 구축을 성공적으로 마쳤다. 현재, 국내 유능년제작소는 표준연과 영국 STI 사의 감리하에 시작품을 제작 중에 있으며, 1998년 하반기에 제작을 완료할 예정이다.

본 연구의 가장 중요한 의미는 6 자유도 가진기의 설계 및 제작 기술의 국산화 기반 구축이며, 국내 기업에 구축된 기술은 단축, 2 축, 4 축 (4 post Road/Load 가진기), 그리고 다축 등 고 정밀 유압 가진기의 국산 제품화에 직접 활용할 예정이다.

후기: 본 연구는 ‘G7 감성공학 프로젝트: 음향·진동 환경 제시 기술 개발’ 과제로

수행된 일부 연구 내용입니다.

참고 문헌

- [1] M.J. Griffin, *Handbook of Human Vibration*, Academic Press, 1990
- [2] 정 완섭, 조 영건, 박 세진, “국내의 승용차 승차감 지수의 비교 분석,” 한국소음진동공학회 '97년 춘계학술대회 논문집, pp. 324~335, 1997.
- [3] 정 완섭, 우 춘규, 박 세진, 김 수현 “동시 3 축 가진에 의한 자동차 의자류의 승차감 평가,” 한국소음진동공학회지, 제 7 권 제 1 호, pp 143~152, 1997.
- [4] 과학기술정책관리연구소, *감성측정평가 시뮬레이터 기술 개발*, '98년도 1 차/2 차 Workshop, 1997
- [5] 과학기술정책관리연구소, *감성측정평가 시뮬레이터 기술 개발*, '97년도 1 차 ~ 4 차 Workshop, 1997
- [6] D. Stewart, “A Platform With Six Degree of Freedom”, Proc. Institute of Mechanical Engineering, Vol. 180, No. 5, pp. 371-386, 1965
- [7] W. Kading and F. Hoffmeyer, “The Advanced Dailmer-Benz Driving Simulator”, SAE Paper 950175, 1995
- [8] Wan-Sup Cheung, *Identification, Stabilisation and Control of Nonlinear Systems Using Nonlinear Parametric Modelling*, Ph.D Thesis, ISVR (University of Southampton), England, 1993.