

<論 文>

시트 현가계 설계를 위한 시트-인체계의 진동해석

Vibration Analysis of Seat-Human Model for the Design of Seat Suspension System

김형근* · 송세철** · 권순기*

Hyeong-Keun Kim, Se-Cheol Song and Soon-Ki Kwon

(1994년 11월 11일 접수 ; 1995년 1월 10일 심사완료)

ABSTRACT

In earth moving construction equipment used for rough and dangerous works, seat suspension system is the only means for reducing the vibration transmitted to the operator. Thus ISO(International Organization for Standardization) 7096 suggests a recommendation for the vibration characteristics of the seat suspension system in order to protect the human beings from excessive vibrations. In this research, a new mechanical type seat suspension system is designed and a mathematical model of the seat-human system is constructed. Through the vibration analysis of the seat-human model, effective design parameters of the seat suspension system are determined and concept design strategy is presented.

1. 서 론

굴삭기를 비롯한 중장비는 작업의 성격상 일반 차량과는 다른 특수한 구조와 동역학적인 운전조건을 갖고 있으며 주행 및 정지상태에서 불규칙한 동적하중을 지속적으로 받는다. 이러한 동역학적인 작업조건 아래서 발생하는 큰 동적하중은 장비의 피로수명 저하와 함께 진동/소음 측면에서 운전자의 작업환경 및 주변환경을 크게 악화시키는 요소가 된다.

중장비의 소음/진동원으로는 고출력의 엔진 및 동력전달 장치, 냉각팬, 유압배관 및 부품, 작업장치에 작용하는 충격하중, 주행시의 불규칙한 노면 가진 등이 있다. 엔진 및 동력전달장치에서 발생하는 진동은 인체의 주파수 특성 관점에서 볼 때 인체가 상대적으로 덜 민감한 고주파수 성분을 포함하고 있

으나 작업시의 충격력이나 노면 가진에 의한 진동은 상대적으로 인체가 민감한 저주파수 성분을 많이 포함하고 있다. 일반 차량 등에서는 차축에 장착된 완충스프링이나 동흡진기(shock absorber) 등을 통해 노면가진에 의한 진동이 흡수되나 중장비에는 차축 현가장치가 없어서 노면진동이 인체에 직접 전달된다.

그러나 일반 차량에 장착하는 차축 현가장치를 중장비에 부착하는 것은 기능상 곤란하며 인체에 전달되는 저주파 진동을 저감시키기 위해 캡마운트(cab mount) 또는 시트 현가계(seat suspension)가 주로 사용된다. 특히 시트 현가계는 중장비에서 인체에 전달되는 진동을 저감시키기 위한 거의 유일한 완충장치로써 국제규격에서는 과도한 진동으로부터 운전자를 보호하기 위하여 시트를 통해 인체에 전달되는 진동을 규제하고 있다(ISO 7096⁽¹⁾).

본 연구에서는 ISO 7096을 만족하는 중장비 시트 현가계의 개념설계를 위해 현가계, 시트 쿠션 그리고 인체에 대한 동역학적인 해석모델을 수립한 후

*정희원, 삼성중공업 창원연구소 CAET팀

**삼성중공업 창원연구소 CAET팀

ISO 7096에 의한 진동해석을 통해 중요한 설계변수 및 설계가능 영역을 결정한다. 또한 현가계의 기구/동역학 해석을 통해 실제 장착되는 스프링의 강성계수와 초기인장력, 처짐양, 댐퍼의 감쇠계수 등을 산출한다.

2. 진동해석 모델

2.1 인체 모델

수직방향의 전신진동에 대한 인체의 반응은 사람에 따라 천차만별이며, 성별, 체중, 신장, 자세 및 진폭, 가진주파수, 가진방향 등에 따라 다르다. 따라서 인체에 대한 정형화된 수학적 모델을 구하는 것은 매우 어려우며, 일반적으로 인체모델은 인체 각 부위의 기하학적인 정보나 무게 등을 이용하여 구성되는 강체모델^(2,3)과 집중질량계 모델^(4,5)로 구분할 수 있다.

가진주파수에 따른 인체의 응답특성을 살펴보면⁽⁶⁾ 0~2 Hz 사이에서는 강체처럼 거동하며 2~5 Hz 사이에서는 진폭이 증가하여 몸통의 공진주파수인 5 Hz 근방에서 최대치에 이른다. 5~8 Hz 영역에서는 스프링의 역할이 증가하며, 8~15 Hz 영역에서는 두 번째의 공진영역이 존재하며 15 Hz 이상에서는 스프링-댐퍼 조합의 응답특성과 유사하다. 또한, 주파수에 따른 감쇠특성을 보면 0~6 Hz에서는 선형 감쇠의 특성을 보이며 6~10 Hz에서는 천이영역이, 10~30 Hz에서는 비선형 감쇠의 특성을 보인다⁽⁷⁾. 따라서 대략 10 Hz 이내에 가진에너지가 집중되어 있는 차량 진동문제에의 경우에 인체는 2 자유도 선형계로 가정할 수 있는 것으로 알려져 있다.

Fig. 1은 시트-인체의 진동해석을 위한 4 자유도 모델을 나타낸 것으로 인체, 시트 쿠션 그리고 현가계로 구성된다. 인체모델로는 Suggs 등⁽⁵⁾이 제안한 2 자유도 집중질량계 모델을 사용하였으며 이는 58.06 kg에서 89.81 kg 사이에 있는 11명의 인체평균인 73.48 kg의 인체를 기준으로 시험결과를 피팅하여 구한 것이다. Suggs 등이 시험으로 구한 것과 같이 사람이 시트에 앉는 경우 체중의 75%만이 시트에 의해 지지되고 나머지는 발 등에 의해 지지되므로 73.48 kg의 인체를 기준으로 하면 시트에 작용하는 실제하중은 약 55.11 kg (540 N)이 된다.

Fig. 1에서 m_1 과 m_2 는 각각 4.5 Hz 및 8 Hz에서의 공진을 나타내는 질량으로 $m_1=29.25$ kg, $m_2=5.85$ kg이며 k_1, k_2, c_1, c_2 는 각각의 강성 및 감쇠계

수로써 $k_1=23297.2$ N/m, $k_2=14728.4$ N/m, $c_1=364.7$ Nsec/m, $c_2=145.9$ Nsec/m이다. 각각의 감쇠비는 0.22 및 0.25이며 m_o 는 인체의 지지부인 척추에 해당하는 부분으로 14.62 kg이다.

2.2 쿠션 모델

시트 쿠션은 상대적으로 질량이 적으므로 질량을 무시하고 강성 k_o 및 감쇠 c_o 로 모형화 하였으며 각각의 값들은 시험으로 구하였다.

쿠션의 강성은 인장시험기에서 하중-변형 특성을 구한 후 각각의 하중하에서의 강성을 구하였다. Fig. 2는 당사에서 사용중인 시트 쿠션의 하중-변형 특성을 나타낸 것으로 하중의 증가에 따라 비선형성이 매우 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 시험은 두 개의 샘플에 대해 동일한 방법으로 실시하였으며 Fig. 2에서의 하중은 시트에 실제로 작용하는 하중이므로 운전자 체중의 75%에 해당한다.

Table 1은 각각의 하중(체중)하에서 구한 쿠션의

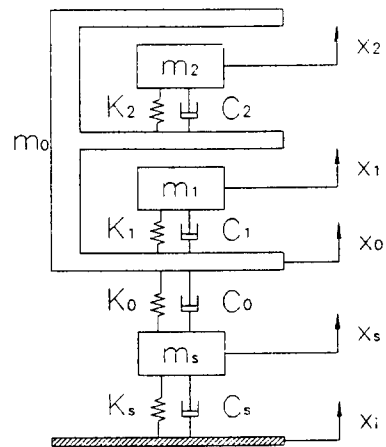


Fig. 1 4 degree-of-freedom seat-human model

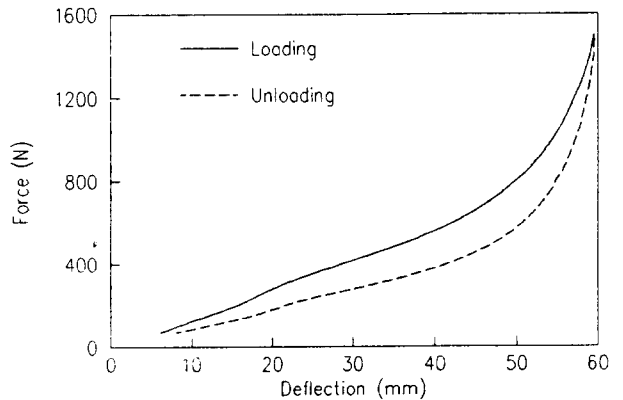


Fig. 2 Force-deflection characteristics of seat cushion

Table 1 Seat cushion stiffness

Load, N (Human weight, kg)	Stiffness(N/m)		Average stiffness(N/m)
	Sample 1	Sample 2	
370 N(50 kg)	19414	15113	17624
540 N(73.5 kg)	33828	27759	30793
706 N(96 kg)	58387	49029	53708
810 N(110 kg)	76408	66745	71577
960 N(130 kg)	103493	94867	99180

강성계수를 나타낸 것으로 샘플에 따라 강성계수에 차이가 많아서 쿠션을 대표하는 값으로는 각각의 샘플에 대해 평균을 취하였다. 체중이 약 73.5kg인 운전자의 경우에 실제 쿠션에 작용하는 하중은 그 75%인 540 N이며 이 때의 강성계수는 $k_o=30793$ N/m이다.

시트 쿠션의 감쇠량은 1 자유도의 진동 이론을 적용하여 시험을 통해 구하였다. 즉, 쿠션 위에 일정 질량의 강체를 올려놓고 충격해머로 가진하고 그에 따른 가속도의 충격응답을 구한 후 로그감쇠이론을 적용하여 감쇠량을 추정하였다. 이 경우 강체의 질량은 체중의 75%에 해당하며 시험은 세 개의 샘플에 대해 강체의 질량을 달리 하며 실시하였다.

Table 2는 강체 질량의 변화에 따른 감쇠비의 변화를 나타낸 것으로 체중 77kg의 사람이 시트에 앉는 경우 감쇠비 ζ 는 대략 10% 정도가 되며 체중이 73.5kg이면 대략 9.3%가 되므로 제시한 인체모델에 적합한 시트 쿠션의 감쇠계수는 $c_o=242$ Nsec/m이다. ($m=55.11$ kg, $k_o=30793$ N/m, $\zeta=0.093$ 기준)

2.3 현가계 모델

시트 현가계는 시트의 진동절연에 가장 큰 영향을 미치는 부분으로 진동절연을 위한 스프링과 감쇠기 그리고 상하 방향의 운동을 구현하기 위한 링크기구로 구성된다. Fig. 3은 전형적인 수동형 시트 현가계

Table 2 Damping ratios of seat cushion

Mass weight, kg (Human weight, kg)	Damping ratio(%)
13 kg(18 kg)	5.6
48 kg(64 kg)	7.7
58 kg(77 kg)	10.0

를 나타낸 것으로 21번의 조절레버를 사용하여 체중에 맞게 스프링의 초기인장력을 조절하게 된다.

현가계는 1 자유도계로 모형화하였으며 Fig. 1에서 m_s 는 시트의 유효 등가질량, k_s 는 현가계의 수직방향 등가 강성계수 그리고 c_s 는 등가 감쇠계수이다. 현가계의 등가 강성계수는 시트-인체 모델의 고유진동수가 가진주파수의 0.7 이하가 되도록 결정하며, 시트 바닥에서 측정한 가속도 PSD의 최대값에 해당하는 주파수를 가진주파수로 선정한다.

ISO 7096에서는 각종 장비들을 시트 바닥에서의 진동특성이 비슷한 4가지 유형으로 구분하고 있으며 당사에서 생산하는 중장비는 그 중 Class 3과 Class 4에 해당한다. Fig. 4는 Class 3과 4에 대한 가속도 PSD를 나타낸 것으로 PSD의 최대값에 해당하는 주파수는 각각 2.1 Hz와 7.6 Hz이다. 따라서 이들의 0.7배를 시트-인체 모델의 고유진동수로 정하면 Class 3의 경우 1.5 Hz, Class 4의 경우 5.4 Hz가 된다.

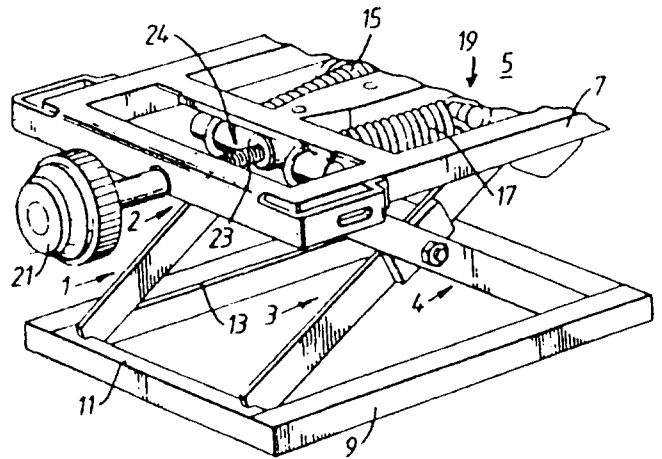


Fig. 3 A typical passive type seat suspension system

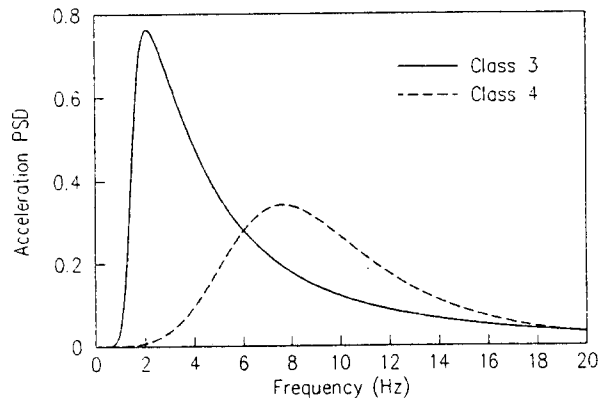


Fig. 4 Acceleration PSD of class 3 and 4

시트-인체 모델의 고유진동수에 대한 설계목표치는 1.5 Hz로 정하였으나 기계적인 구조로 고유진동수를 정확히 1.5 Hz로 유지하는 것은 어려우며 또한 정적 처짐이 지나치게 커질 우려가 있어서 10%의 설계영역을 고려하여 고유진동수는 1.5 Hz에서 1.65 Hz까지 변화할 수 있는 것으로 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

먼저 시트-인체 모델의 동특성 및 설계변수가 응답에 미치는 영향을 살펴보면, Table 3은 쿠션 강성의 변화에 따른 인체-시트 모델의 고유진동수 변화를 나타낸 것으로 쿠션강성에 따른 계의 첫번째 고유진동수 변화가 매우 적음을 알 수 있다. 즉 쿠션 강성에 오차가 있더라도 전체 계의 첫번째 동특성은 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

Fig. 5는 제시한 해석모델의 각 지점에서의 진동 전달율을 나타낸 것으로 ISO에서 요구하는 인체의 응답은 X_0 이며 첫번째 모드가 지배적임을 알 수 있

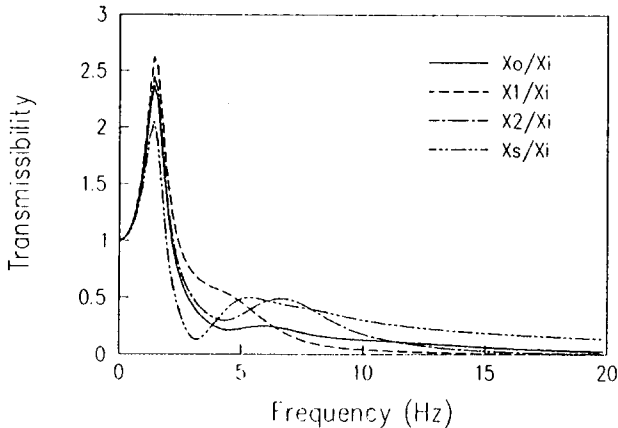


Fig. 5 Vibration transmissibilities of seat-human model

Table 3 Natural frequencies of the seat-human model w. r. t. cushion stiffness

Cushion stiffness(N/m)	Mode			
	1	2	3	4
20000	1.44	4.77	6.96	11.65
40000	1.50	5.26	7.58	13.18
60000	1.52	5.42	7.93	14.79
80000	1.53	5.49	8.12	16.33
100000	1.54	5.53	8.25	17.79

다.

Fig. 6은 쿠션 감쇠계수가 시트-인체 접촉부의 진동전달율(X_0/X_i)에 미치는 영향을 나타낸 것으로 쿠션의 감쇠비가 4%($c_0=100$)에서 23%($c_0=600$)까지 변하는 경우, 첫번째 모드에는 영향이 거의 없으나 두 번째 모드에는 영향이 많은 것을 볼 수 있다. 쿠션의 감쇠가 많을수록 인체가 민감하게 느끼는 4~8 Hz 영역에서의 진동이 감소하며 또한 주파수에 따른 인체의 가중치가 4~8 Hz 영역에서 1인 점을 고려하면 랜덤진동하에서 두 번째 모드의 영향은 더욱 커짐을 알 수 있다. 따라서 쿠션의 감쇠는 랜덤 가진하에서는 중요하며 가능한 많을수록 유리하다.

3.1 현가계의 설계 강성계수

현가계 링크기구 모델에 대해 기구/동역학 해석 소프트웨어인 DADS(Dynamic Analysis and Design System)를 적용하여 현가계의 수직방향 등가 강성 및 장착 스프링의 초기인장력을 결정하였다. 진동절연의 측면에서 현가계 강성은 적을수록 좋으나 이 경우 현가계의 처짐양이나 상대적인 변위가 지나치게 커져 문제가 되므로 스프링에 초기 인장력을 가하여 이를 조절해야 한다. 체중에 따른 스프링의 초기 인장력은 장착 스프링의 강성계수를 먼저 가정한 후 정적처짐(대략 50 mm 이내)과 시트-인체 모델의 고유진동수(1.5~1.65 Hz)를 적절히 조정하며 결정하였다.

Fig. 7과 8은 최종적으로 산출한 운전자 체중에 따른 스프링의 초기인장력과 등가 강성계수를 나타낸 것으로 Fig. 7에서 스프링의 초기 인장력은 운전자 체중에 따라 선형적으로 변하는 것을 볼 수 있다. Fig. 8에서 시트-인체 모델의 고유진동수가 원하는

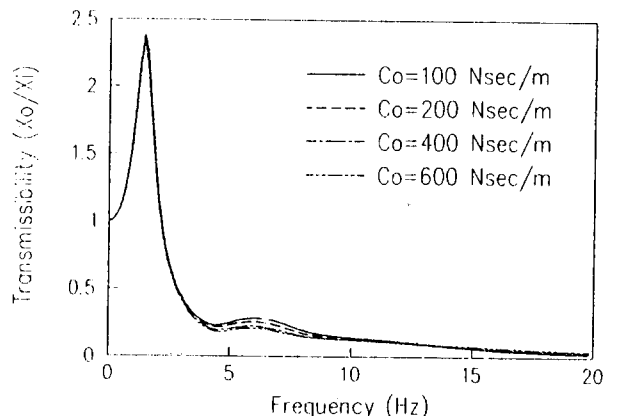


Fig. 6 Comparison of transmissibility w. r. t. cushion damping

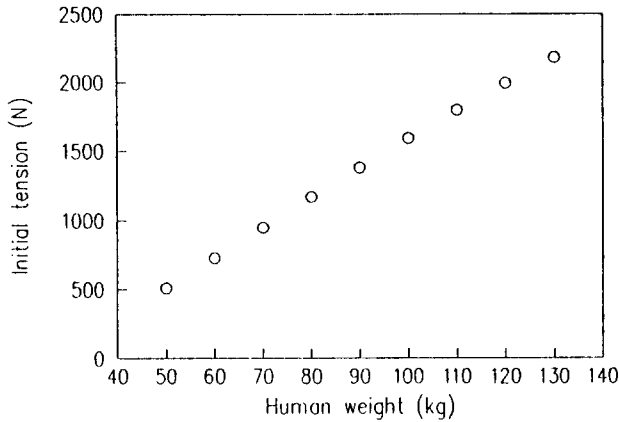


Fig. 7 Spring initial tensions versus human weight

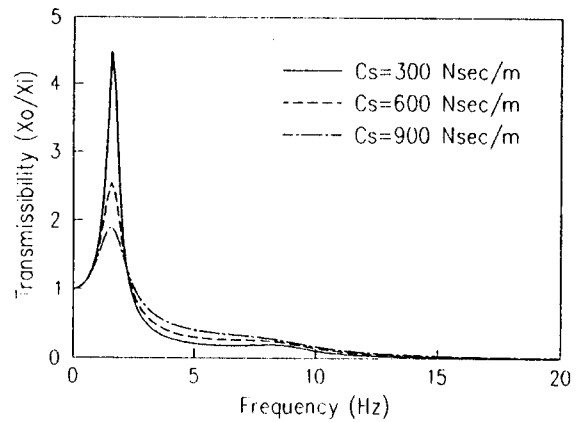


Fig. 9 Vibration transmissibilities at the sinusoidal test condition

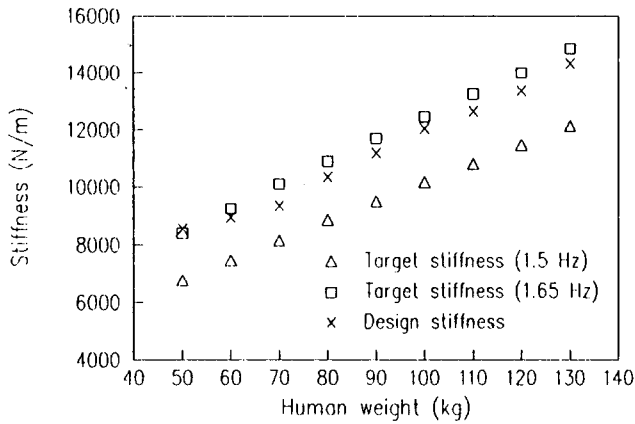


Fig. 8 Design stiffnesses of the suspension system

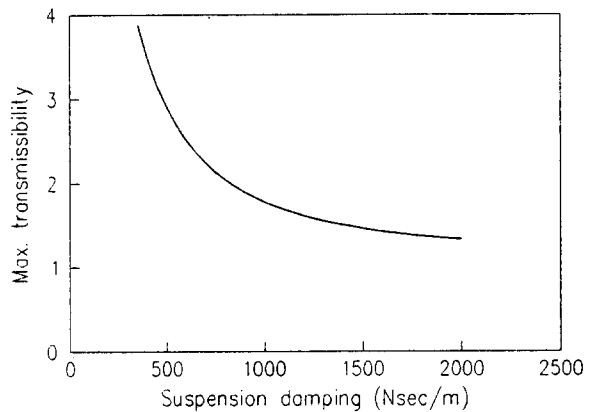


Fig. 10 Variation of maximum transmissibility w. r. t. suspension damping

범위내에 있기 위한 수직방향 등가 강성계수를 시행 착오법으로 구할 수가 있었으나 체중 50 kg의 경우에는 정적처짐이 지나치게 커져서 강성계수를 약간 크게 조정하였다. 체중의 변화에 따른 정적처짐의 양은 대략 44 mm에서 28 mm에 이르렀다.

3.2 현가계의 설계 감쇠계수

현가계의 설계 감쇠계수 결정을 위한 진동해석은 ISO 7096에서 제시하는 방식대로 정현파 및 랜덤가진하에서 수행하였으며 ISO에서 요구하는 현가계 공진주파수에서의 최대 진동전달율과 보정된 인체 가속도의 비에 제한치는 각각 2.0과 1.25 m/s²이다. (부록 참조)

정현파해석에서는 75 kg의 강체(체중 100 kg)를 기준으로 하며 이 때 쿠션의 강성 및 감쇠는 각각 $k_o=58813$ N/m, $c_o=503.4$ Nsec/m이다. Fig. 8에서 나타나듯이 현가계의 등가 강성계수는 $k_s=12049$ N/m이다.

Fig. 9는 정상상태에서 인체의 진동전달율을 나타낸 것으로 Fig. 5와 마찬가지로 첫번째 모드가 지배적임을 알 수 있다. Fig. 10은 현가계 감쇠계수의 변화에 따른 공진주파수에서의 최대 진동전달율의 변화를 나타낸 것으로 최대 진동전달율은 감쇠의 증가에 따라 감소하며 이 값이 2.0 이하가 되기 위해서는 현가계의 감쇠계수는 850 Nsec/m 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

랜덤가진하에서 진동해석은 55 kg(-0% ; +10%) 과 98 kg(-0% ; +10%)의 인체를 기준으로 하나 본 과제에서는 60 kg과 100 kg 그리고 평균체중인 73.5 kg의 세 가지 경우에 대해 해석을 수행하였으며 Table 4는 체중 73.5 kg인 인체모델의 매개변수를 기준으로 60 kg 및 100 kg 인체의 매개변수를 추정하여 구한 것이다.

Fig. 11 및 Fig. 12는 Class 3과 Class 4에 대해 현

Table 4 Mathematical parameters of three human models

Human weight(kg)	Mass(kg)			Stiffness(N/m)			Damping(Nsec/m)		
	m ₁	m ₂	m ₀	k ₁	k ₂	k ₀	c ₁	c ₂	c ₀
60	23.9	4.8	11.9	19107	12128	23146	297.3	120.6	147.3
73.5	29.3	5.9	14.6	23298	14728	30793	364.7	145.9	242.0
100	39.8	8.0	19.9	31840	20137	58813	495.3	200.3	503.4

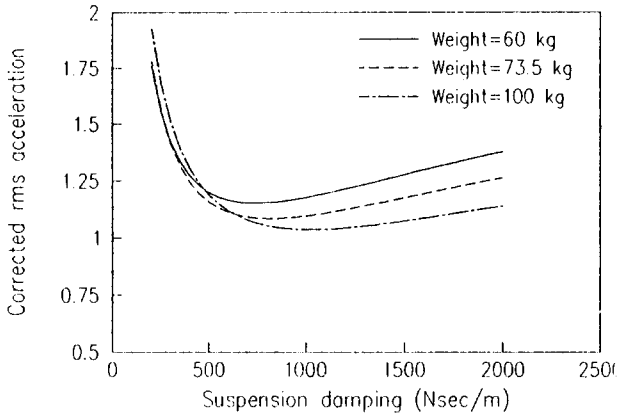


Fig. 11 Variation of corrected rms acceleration for class 3

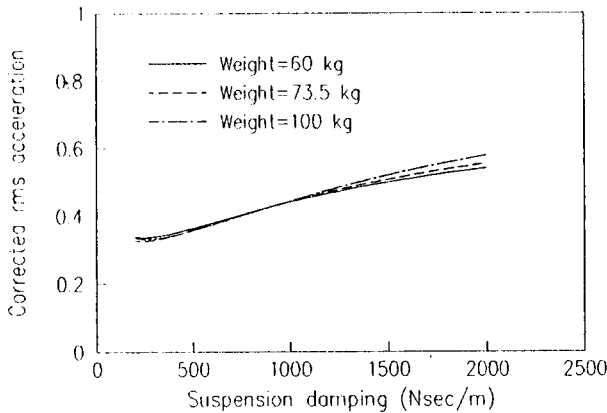


Fig. 12 Variation of corrected rms acceleration for class 4

가계의 감쇠계수를 달리할 때 보정된 인체 가속도의 비를 세 가지의 인체 모델에 대해 나타낸 것으로, Class 3을 기준으로 설계한 현가계는 Class 4의 조건을 항상 만족하는 것을 알 수 있다. Fig. 11에서 보듯이 랜덤가진하에서 보정된 가속도의 비는 감쇠의 증가에 따라 감소하다가 어느 한도 이상이 되면 고주파영역의 영향으로 인해 오히려 증가함을 알 수 있다. 운전자의 체중에 따라 설계 가능한 감쇠기의

영역이 다르며 체중이 적을수록 만족하는 감쇠계수의 영역이 좁고 체중이 많을수록 범위가 넓음을 알 수 있다.

Fig. 10, 11 및 Fig. 12의 결과를 종합하면 정현파 및 랜덤가진 조건을 모두 만족하는 감쇠계수의 범위는 850~1350 Nsec/m임을 알 수 있으며, 따라서 최적의 현가계 감쇠계수는 1100 Nsec/m 정도로 결정하였으며 850~1350 Nsec/m 사이에서 변화할 수 있는 것으로 결정하였다.

4. 결 론

인체 및 시트 쿠션 그리고 시트 현가계로 구성된 선형모델을 사용하여 ISO 7096을 만족하는 시트 현가계의 설계변수들을 결정하였고 시트 현가계의 개념설계 방안을 제시하였다. 시트-인체 접촉부에서의 진동전달율을 저감하기 위해 설계변수로는 쿠션의 강성 및 감쇠 그리고 현가계의 강성 및 감쇠를 선정하였다.

Table 5와 같이 시트 쿠션의 강성은 선진사의 쿠션⁽⁸⁾과 비교하면 강성계수는 만족스러운 것으로 판정된다. 또한 시트 쿠션의 감쇠는 인체가 가장 민감하게 느끼는 4~8 Hz 영역에서 가장 큰 영향을 미치며 현재의 쿠션 감쇠비는 선진사의 값(0.13~0.25)과 비교하면 다소 낮으므로 쿠션의 감쇠비를 높일 필요가 있다.

현가계 강성의 목표치는 시트-인체 모델의 고유진동수가 1.5~1.65 Hz 이내에 있도록 조정하였으며 지나친 처짐을 방지하기 위하여 스프링의 초기인장력을 조정하였고 현가계의 감쇠계수는 850~1350 Nsec/m가 적당함을 알 수 있었다.

Table 5 Seat cushion stiffness of each company

Load, N (Human weight, kg)	Stiffness(N/m)			
	Seat A	Seat B	Seat C	Seat D
540 N(73.5 kg)	47700	22100	33800	33800
706 N(96 kg)	82300	35800	59000	59900
960 N(130 kg)	-	68000	68000	122200

참 고 문 헌

- (1) ISO 7096, 1984, "Earthmoving Machinery-Operator Seat-Transmitted Vibration," International Standard.

- (2) Hatze, H., 1980, "A Mathematical Model for the Computational Determination of Parameter Values of Anthropomorphic Segments," *Journal of Biomechanics*, Vol. 13, pp. 833~843.
- (3) Jensen, R. K., 1978, "Estimation of the Biomechanical Properties of Three Body Types Using a Photogrammetric Method," *Journal of Biomechanics*, Vol. 11, pp. 349~358.
- (4) Nigam, S. P. and Malik, M., 1987, "A Study on a Vibratory Model of a Humal Body," *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 109, pp. 148~153.
- (5) Suggs, C. W., Abrams, C. F. and Stikeleather, L. F., 1969, "Application of a Damped Spring Mass Human Vibration Simulator in Vibration Testing of Vehicle Seats," *Ergonomics*, Vol. 12, No. 1, pp. 79~90.
- (6) ISO 5982, "Mechanical Driving Point Impedance," International Standard.
- (7) Muksian, R. and Nash, C. D. Jr., 1974, "A Model for the Response of Seated Humans to Sinusoidal Displacements of the Seat," *Journal of Biomechanics*, Vol. 7, pp. 209~215.
- (8) Boileau, P. E. and Rakheja, S., 1990, "Vibration Attenuation Performance of Suspension Seats for Off-Road Forestry Vehicles," *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vo. 5, pp. 275~291.
- (9) ISO 2631, 1985, "Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration-Part I : General Requierments," International Standard.

부 록

ISO 7096
 ISO 7096(Earth-moving Machinery-Operator seat-Transmitted vibration)은 실험실내에서 시트를 통해 인체에 전달되는 수직방향의 전신진동에 대한 측정, 평가법 및 허용한계를 명시한 국제규격으로 운전자를 과도한 진동으로부터 보호하기 위하여 각종 건설

장비에 장착되는 시트의 진동특성에 적용된다.

ISO 7096에서는 각종 장비들을 시트 바닥에서의 진동특성이 비슷한 4가지 유형으로 구분하고 있으며 당사에서 생산하는 중장비는 그 중 Class 3과 Class 4에 해당한다. 시트에 대한 시험의 입력으로 정의되는 수직진동은 Fig. 4에 가속도의 PSD(power spectral density) 형태로 제시되어 있다. 이 진동특성은 각 클래스에 속한 장비들이 가혹한 조건하에서 작업을 할 때 측정된 대표적인 데이터에 기초를 둔 것으로 실제 현장에서 각종 작업시 발생하는 진동보다 더 가혹한 조건으로 볼 수 있다.

ISO 7096에서 제시하는 시험은 시트의 고유진동수에서의 최대 진동전달율을 제한하기 위한 정현파시험과 일정한 주파수영역내의 에너지의 양을 제한하기 위한 랜덤진동시험으로 구분되며 각각의 시험방법과 제한조건은 다음과 같다.

(1) 정현파 진동시험

- 질량 75 kg의 강체(lead shot) 사용(인체 100 kg에 해당)
- 가진주파수는 현가계의 공진주파수(± 0.1 Hz)
- 진폭은, 공진주파수가 2 Hz 이하인 경우에는 50 mm(peak-to-peak displacement), 공진주파수가 2 Hz 이상인 경우에는 7.9 m/s^2 (peak-to-peak acceleration)
- 인체와 시트 쿠션 접촉부에서의 가속도 a_{wfs} (frequency-weighted rms acceleration) 측정
- 시트 바닥에서의 가속도 a_{wfb} (frequency-weighted rms acceleration) 측정
- 인체의 주파수 특성을 나타내는 가중함수(weighting function)는 ISO 2631⁽⁹⁾ 이용
- 공진에서의 최대 진동전달율 : $a_{wfs}/a_{wfb} < 2.0$

(2) 랜덤 진동시험

- 입력 진동은 Fig. 4를 기준
- 체중이 55 kg(-0% ; +10%) 및 98 kg(-0% ; +10%)인 두 사람에게 대해 시험 실시
- 각각의 사람에게 대해 a_{wfs} 와 a_{wfb} 측정
- 보정된 인체 가속도 : $a_{wfs} \times \text{목표치} / a_{wfb} < 1.25 \text{ m/s}^2$ (목표치는 Class 3의 경우 1.65, Class 4의 경우 1.40)