

그라인딩 작업에 의한 수완계 진동 계측 및 평가

Measurement and Assessment of Hand-arm Vibration due to Grinders

이종문* · 박진화**

Jong-Moon Lee and Jin-Hwa Park

Key Words : Hand-arm vibration(수완계 진동), vibration exposure(진동노출), grinder(그라인더), resilient material(탄성재), transmissibility(전달율), ISO 5349-1, ISO 13753

ABSTRACT

This work measured the hand-transmitted vibration due to shipyard worker's grinding and assessed the vibration exposure for predicted 10% prevalence of vibration-induced white finger in a group of exposed persons according to test procedure of ISO 5349-1. And also the transmissibility performance of resilient material, mainly applied to anti-vibration gloves in present market, was measured on the basis of ISO 13753 and confirmed that the material would probably not provide greater attenuation below 30 Hz, the dominant frequency range of hand-transmitted vibration due to grinder.

1. 서 론

1950년대 이후 모터나 공기압을 이용한 공구들이 산업현장에 광범위하게 사용되면서 생산성 향상을 가져왔으나, 부수적으로 작업자의 건강을 해치는 위해요소로 등장하게 되었다. 최근 동력공구 사용에 따른 진동 장애에 기인하여 직업병 유소견자로 판명되는 사례가 점차 증가하고 있고 노사관계의 주요쟁점으로 부상하고 있어 적극적인 대책이 요구되고 있는 실정이나, 현재까지 이에 대한 연구 및 관련 자료 분석 등이 매우 부족한 상황이다.

본 연구는 조선소에서 사용되는 주요 동력공구의 하나인 그라인더를 이용한 작업시 이로 인한 수완계의 진동을 평가하기 위해 관련 ISO 규정에 입각하여 작업자의 진동노출량을 계측/평가하였으며, 또한 진동전달을 경감시키기 위해 방진장갑의 주재료로 사용되는 탄성재(resilient material)의 전달율을 계측함으로써 방진효과를 검토하였다.

2. 수완계 진동 계측 및 평가 기준

2.1 ISO 5349-1

손-전달 진동 노출에 대한 계측 및 평가에 대한 일반적 사항은 ISO 5349-1에 기술되어 있고, 5349-2에는 작업장에서 손-전달 진동을 효율적으로 올바르게 계측하기 위해 ISO 5349-1에 부합되게 실질적인 가이드라인을 제공하고 있다. 인체진동의 측정과 평가에 관련된 규격은 ISO/TC 108, Mechanical vibration and shock,의 subcommittee SC4, Human exposure to mechanical vibration and shock에서 제정되었으며, ISO 5349는 1979년에 제정되어 1986년에 일부 개정되었다가 2001년에 2개의 규격으로 확장되었다.

ISO 5349-1은 손-전달 진동 노출에 대한 계측 및 평가에 대한 일반적 사항으로서, 계측방향, 계측항목, 평가방법 등을 기술하고 있는데, 여기에서는 계측진동량 및 평가방법에 대해 자세히 살펴보기로 한다.

진동노출량을 평가하기 위하여 계측해야 할 진동량은 주파수 가중치가 적용된 r.m.s. 가속도(r.m.s. frequency-weighted acceleration [m/s²])이다. 이때의 주파수 가중특성은 ISO 8041에 제시된 주파수 밴드(band-limiting)와 가중 필터(weighting filter)를 사용하며, 이 경우 각 밴드에 대한 주파수 가중 특성은 Fig.1에 보인 바와 같다. 참고로 전신진동에 대한 주파수 가중 특성도 같이 보였다.

실제 계측값을 분석할 때, 계측된 1/3 옥타브 밴드에서의 r.m.s. 가속도값을 이용하여 이에 해당하는 주파수 가중치를 적용한다.

* 현대중공업 선박해양연구소
E-mail : jmlee@hhi.co.kr
Tel : (052) 230-7404, Fax : (052) 230-5485

** 현대중공업 선박해양연구소

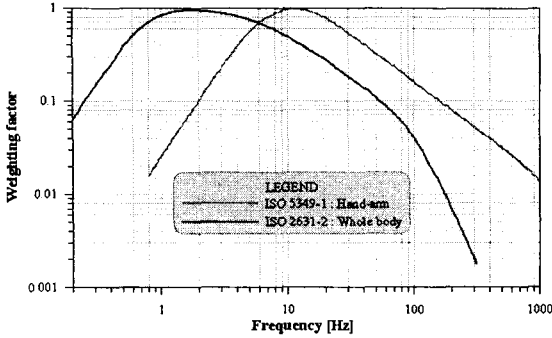


Fig. 1 Frequency-weighting curve for hand-transmitted vibration

$$a_{hv} = \sqrt{\sum_i (W_{hi} a_{hi})^2} \quad (1)$$

여기서 W_{hi} 는 i 번째 1/3 옥타브 밴드에서 가중치, a_{hi} 는 i 번째 1/3 옥타브 밴드에서의 r.m.s 가속도이다.

진동 노출량에 대한 평가는 3 방향에 대해 주파수 가중치가 적용된 r.m.s. 가속도를 합산한 결과를 기준으로 한다. 이것을 진동총량(vibration total value), a_{hv} 라 하며 다음과 같이 계산된다.

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hvx}^2 + a_{hvy}^2 + a_{hvv}^2} \quad (2)$$

진동노출(vibration exposure)은 진동크기와 노출시간에 따라 결정되며, 인체건강에 대한 영향을 평가하는데 있어서의 진동크기는 진동총량 a_{hv} 을 사용한다.

일일 진동노출량(daily vibration exposure)은 진동크기(진동총량) 및 일일 진동노출시간으로부터 계산된다. 서로 다른 일일 진동노출시간 간의 비교를 용이하게 하기 위하여 다음과 같이 일일 진동노출량을 주파수 가중치가 적용된 8 시간 등가에너지 진동총량(8-hour energy-equivalent frequency-weighted vibration total value)으로 표현한다.

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (3)$$

여기서 T 는 진동총량 a_{hv} 에 노출된 일일 총 시간이고, T_0 는 기준시간으로서 8 시간(28,800 sec)이다.

만약 서로 다른 진동크기를 갖는 여러 번의 작업으로 이루어진 경우라면 일일 진동노출량은 식(4)로 계산된다.

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^n a_{hvi}^2 T_i} \quad (4)$$

여기서 a_{hvi} 는 i 번째 작업시의 진동총량, n 은 진동노출 회수, T_i 는 i 번째 작업의 노출시간이다.

동력공구에 의한 진동노출량과 인체 후유증의 관계는 일

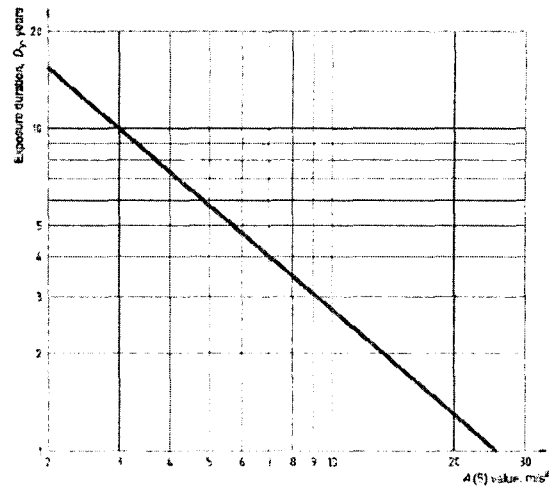


Fig. 2 Vibration exposure for predicted 10% prevalence of vibration-induced white finger in a group of exposed persons

일 진동노출량 $A(8)$ 의 크기에 따라, 진동에 노출된 사람 중 10%에서 백수증이 발생할 것으로 예측되는 기간으로 평가한다.

Fig. 2는 진동에 노출된 사람의 10%에서 백수증이 발생할 것으로 평가되는 일일 진동노출 $A(8)$ 을 보여주고 있으며, 이의 보간식은 다음과 같다.

$$\frac{D_y}{year} = 31.8 \left(\frac{A(8)}{m/s^2} \right)^{-1.06} \quad (5)$$

여기서 D_y 는 group mean total (lifetime) exposure duration으로서 단위는 년(years)이다.

2.2 ISO 13753

수완계 진동노출로 인한 진동피해의 위험성으로부터 작업자를 보호할 목적으로 진동전달을 완화시키기 위하여 손잡이(핸들) 및 방진장갑에 탄성재를 적용하고 있으며, 이런 탄성재의 전달율 계측 및 평가방법이 ISO 13753에 제시되어 있다.

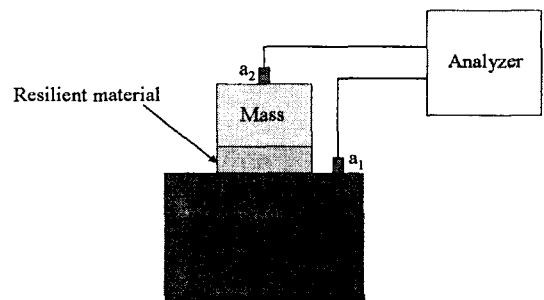


Fig. 3 Transmissibility measurement setup of resilient material

Fig. 3에 보인 바와 같이 손잡이의 등가하중에 해당하는 질량체로 하중을 가한 상태에서 10 ~ 500 Hz 영역에서의 재료 (mass-loaded material)의 임피던스 (impedance)를 계측함으로써 전달율을 계산하며, 이때 수완계의 임피던스는 ISO 10068에서 제시하는 표준치를 적용한다. 최종적으로 계산되는 탄성체의 전달율은 식 (6)과 같으며, 이렇게 계측된 전달율이 500 Hz 까지 모든 주파수 영역에서 0.6 보다 작아야 실제 진동경감 효과를 기대할 수 있다.

$$T = \sqrt{\frac{|Z_M|^2}{|Z_H|^2 + |Z_M|^2 + 2[(Z_H)_{Re}(Z_M)_{Re} + (Z_H)_{Im}(Z_M)_{Im}]}} \quad (6)$$

여기서 Z_M 은 탄성체의 임피던스, Z_H 는 수완계의 임피던스이다.

3. 진동노출량 계측 및 검토

조선소에서 많이 사용하고 있는 4인치 및 7인치 그라인더에 대해 3명의 작업자가 각각 3회의 작업을 수행하면서 진동계측을 수행하였다. 그라인더의 사양은 Table 1에 보인 바와 같고, 작업자의 신체적 특성은 Table 2에 정리하였다.

Table 1 Specification of grinders

	4인치 그라인더	7인치 그라인더
모 델	YASA AIR TOOLS YG-100X	YASA AIR TOOLS YG-180G-3
동력원	6 kgf/cm ² 압축공기	
회전수 [rpm]	11,000	6,500
숫돌 직경 [인치]	4	7

Table 2 Information of workers (*: mean value)

번호	나이 (세)	체중 (kg)	최대약력 (N)			
			오른손		왼손	
1	51	62	40.4	40.4*	40.2	41.5*
			40.4		42.7	
2	46	85	46.2	45.8*	45.8	45.7*
			45.4		45.6	
3	52	56	34.6	35.1*	35.0	33.8*
			35.5		32.5	

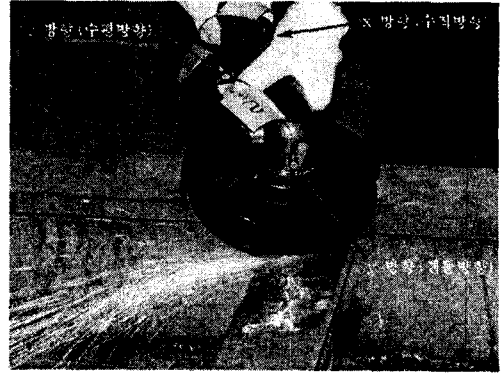
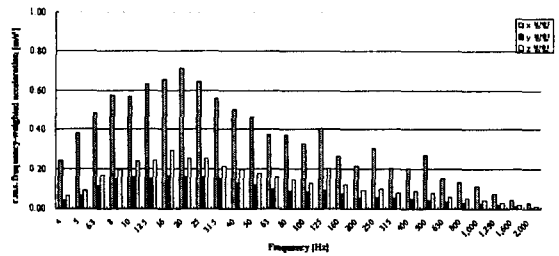


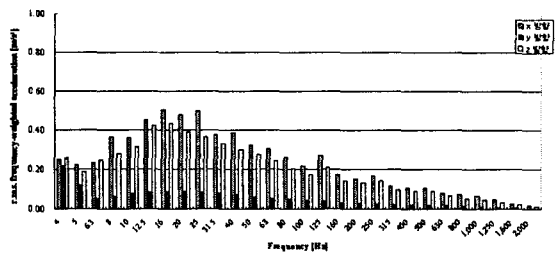
Fig. 4 Location and orientation of accelerometer

그라인더 작업시 가속도계 취부 위치, 방향은 ISO 5349-1에 따라 Fig. 4와 같이 설치하였다.

4인치 및 7인치 그라인더에 대한 진동계측 결과, 주파수 가중치가 적용된 가속도 (r.m.s. frequency-weighted acceleration)를 Table 3 및 Table 4에 정리하였다. 작업자별, 작업회수별 진동응답의 크기에 변동이 있는데 이는 작업 자세, 피로력 및 그라인더 날의 각도 등과 같은 작업자의 작업특성에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 1/3 옥타브 밴드로 분석된 결과를 Fig. 5에 보였는데, 주파수 밴드별 가속도의 크기는 주파수에 따른 가중치특성과 유사하게 대부분 10~20 Hz 주변의 값이 크게 나타났다.



(a) 4 inch grinder



(b) 7 inch grinder

Fig. 5 Sample case of 1/3 octave band acceleration

Table 3 r.m.s. frequency-weighted acceleration [m/s²] of 4" grinder

작업자	SET	공회전 시			작업 시		
		x방향	y방향	z방향	x방향	y방향	z방향
1	1	2.63	1.00	2.97	3.59	0.65	0.95
	2	-	-	-	1.88	0.68	0.56
	3	-	-	-	1.20	0.53	0.74
2	1	1.22	1.09	3.94	1.22	0.59	0.99
	2	-	-	-	1.15	0.63	0.63
	3	-	-	-	0.78	0.55	0.51
3	1	1.86	1.38	4.38	2.15	0.53	0.84
	2	-	-	-	1.47	0.57	0.56
	3	-	-	-	1.56	0.39	0.57
최 대		2.63	1.38	4.38	3.59	0.68	0.99
최 소		1.22	1.00	2.97	0.78	0.39	0.51
평균치		1.90	1.16	3.76	1.67	0.57	0.71

Table 4 r.m.s. frequency-weighted acceleration [m/s²] of 7" grinder

작업자	SET	공회전 시			작업 시		
		x방향	y방향	z방향	x방향	y방향	z방향
1	1	8.77	0.37	0.49	2.60	0.36	0.84
	2	-	-	-	0.89	0.37	0.59
	3	-	-	-	0.73	0.31	1.40
2	1	10.58	0.42	10.04	3.03	0.49	0.80
	2	-	-	-	1.39	7.33	0.83
	3	-	-	-	1.94	0.59	1.77
3	1	12.43	0.45	10.49	0.96	0.41	0.81
	2	-	-	-	1.48	0.37	1.25
	3	-	-	-	1.24	0.35	1.30
최 대		12.43	0.45	10.49	3.03	7.33	1.77
최 소		8.77	0.37	0.49	0.73	0.31	0.59
평균값		10.59	0.41	7.01	1.58	1.18	1.07

Table 5 Vibration total value [m/s²] measurement result

작업자	SET	4 인치 그라인더		7 인치 그라인더	
		공회전 시	작업 시	공회전 시	작업 시
1	1	4.09	3.77	8.80	2.75
	2	-	2.08	-	1.13
	3	-	1.51	-	1.61
2	1	4.26	1.68	14.59	3.17
	2	-	1.45	-	7.51
	3	-	1.09	-	2.69
3	1	4.96	2.37	16.27	1.32
	2	-	1.67	-	1.97
	3	-	1.71	-	1.83
최 대		4.96	3.77	16.27	7.51
최 소		4.09	1.09	8.80	1.13
평균값		4.44	1.93	13.22	2.66

4 인치 그라인더의 경우, 공회전시의 진동응답이 오히려 작업시의 응답 보다 더 큰데 이는 공회전시에 그라인더 슷들이 작업시편에 닿지 않으므로 작업자가 상대적으로 약한 파지력으로 손잡이를 잡고 있기 때문이라고 판단된다. 공회전시에는 z 방향(수평방향)의 가속도가 가장 크지만, 작업시에는 슷들이 작업시편에 직접 접촉하므로 x 방향(수직방향)의 응답이 가장 크게 나타났다.

7 인치 그라인더의 경우에도 마찬가지로 공회전시의 진동응답이 작업시 보다 현저히 크게 나타났다. 공회전시 및 작업시 공회 x 방향의 가속도가 가장 크지만, 공회전시에 z 방향의 가속도도 상당히 크고 작업시에도 y 방향 및 z 방향의 가속도 크기도 x 방향과 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

계측된 3 방향 가속도로부터 ISO 5349-1에 정의한 수순에 따라 진동총량(vibration total value)을 계산하면 Table 5에 보인 바와 같다. 그라인더할 때의 진동총량은 4 인치 그라인더의 경우 1.93 m/s², 7 인치 그라인더의 경우는 2.66 m/s²이다.

일일 진동 노출량은 작업자가 공구를 이용한 작업을 수행할 때, 계측된 진동총량과 작업자의 일일 진동노출시간(daily exposure duration)에 의해 결정된다. 각 작업자의 일일 진동노출시간에 대한 자료를 얻는에는 별도의 통계적인 조사가 필요하므로, 여기서는 단순히 하루 8 시간 작업을 한다고 가정하면, 8 시간 등가에너지 진동총량은 식(3)에 의해 진동총량과 같게 된다. 이때 진동에 노출된 사람의 10%에서 백수증이 발생할 것으로 평가되는 기간은 식(5)에 의해 계산되었으며, 참고로 일일 4 시간 작업을 한다고 가정했을

Table 6 8-hour energy-equivalent frequency-weighted vibration total value and group mean total exposure duration

	4 인치 그라인더 작업시		7 인치 그라인더 작업시	
	진동총량 [m/s ²]	1.93		2.66
일일 진동노출시간	8 시간	4 시간	8 시간	4 시간
8 시간 등가에너지 진동총량 A(8), [m/s ²]	1.93	1.36	2.66	1.88
노출된 사람의 10%에서 백수증이 발생할 것으로 예측되는 작업시간 [year]	15.8	23.0	11.3	16.3

때의 8 시간 등가에너지 진동총량과 10% 백수증 발생 예측 작업시간을 Table 6에 정리하였다.

4. 방진장갑 탄성재의 전달율 계측

진동노출의 크기를 줄이기 위한 목적으로 동력공구의 핸들 또는 방진장갑의 주재료로 사용되는 탄성재에 대한 진동 전달율 계측이 수행되었다. 시중의 방진장갑에 사용되고 있는 7종의 재료에 대해 실제 장갑의 조건과 비슷하게 한편에는 형질을, 반대면에는 가죽을 부착하여 전달율 계측 시험을 수행하였다. Fig. 3과 같이 손잡이의 등가하중과 일치하는 2.5kg의 질량체로 하중을 가한 상태에서 sine sweep 신호로 가진하면서 10Hz에서 500Hz까지 1/3 옥타브 밴드별로 임피던스를 계측하였다. 계측에 사용된 7종의 탄성재를 장갑 생산업체에서 입수하였으나 구체적인 성분 및 재료 특성치 등은 입수하지 못한 상태이므로, 편의상 소부탄 1, 소부탄 2, V-STOP, 시편 A, 시편 B, 시편 C 및 AIR로 명명하였다. AIR는 공기세포 주머니로 되어있고, 나머지는 고무 또는 실리콘 재질로 되어 있다.

계측된 1/3 옥타브 밴드별 임피던스와 ISO 10068에서 제시하는 수완계 임피던스를 이용함으로써 탄성재의 전달율을 계산할 수 있으며, 그 과정은 ISO 13753에 잘 나타나 있다. 각 재질에 대해 계측된 전달율을 Table 7에 정리하였다.

저주파수를 제외하면 AIR가 전반적으로 가장 전달율이 낮고, 시편 C, 시편 B, V-STOP 순으로 전달율이 낮다는 것이 확인된다. Fig. 1에 보인 손-전달 진동에 의한 주파수 가중치 곡선 및 실제 그라인딩 시 손-전달 진동총량 계

Table 7 Transmissibility of resilient materials

Frequen- cy [Hz]	전달율 (Transmissibility, T)						
	소부 탄 1	소부 탄 2	V-ST OP	시편 A	시편 B	시편 C	AIR
10	1.000	0.999	1.001	0.999	0.999	1.002	1.042
12.5	0.996	0.997	1.000	1.001	1.007	0.969	1.028
16	0.997	0.997	0.998	1.000	1.010	1.007	0.971
20	0.988	0.989	0.988	0.991	1.001	0.997	0.886
25	0.984	0.983	0.971	0.986	0.982	0.964	0.749
31.5	0.964	0.965	0.941	0.963	0.941	0.904	0.670
40	0.934	0.936	0.902	0.929	0.877	0.854	0.606
50	0.936	0.939	0.882	0.934	0.827	0.831	0.681
63	0.913	0.919	0.964	0.904	0.847	0.840	0.575
80	0.908	0.912	0.881	0.905	0.876	0.866	0.571
100	0.919	0.922	0.898	0.920	0.941	0.887	0.539
125	0.926	0.929	0.900	0.931	0.900	0.883	0.433
160	0.949	0.953	0.915	0.957	0.919	0.890	0.359
200	0.963	0.965	0.894	0.969	0.903	0.858	0.277
250	0.991	0.995	0.901	1.001	0.906	0.833	0.220
315	0.998	0.998	0.830	0.996	0.810	0.712	0.157
400	0.995	0.997	0.777	0.990	0.726	0.602	0.113
500	1.017	1.019	0.748	1.003	0.661	0.485	0.106

측결과를 보면 30Hz 이하의 저주파수 영역이 지배적인데 시험한 탄성재는 이 주파수 영역에서 만족스러운 성능을 발휘하지 못하는 것으로 확인되었다.

5. 결 론

최근 산업계의 주요 현안 문제로 대두되고 있는 근골격계 질환과 관련하여 조선소에서 많이 사용되는 그라인더를 이용한 작업시 ISO 규정에 근거하여 진동노출량을 계측하고 백수증 발생 예측시간을 평가하였다. 또한 동력공구에서 손으로 전달되는 진동을 경감시키기 위하여 동력공구의 핸들 또는 방진장갑에 적용되는 시중의 탄성재에 대하여 전달율을 계측함으로써 성능을 확인하였다. 실제 그라인딩 작업시 손-전달 진동은 30Hz 이하의 저주파수 영역의 진동이 지배적으로 나타나고 있으나 이 영역에서 탄성재의 전달율 성능은 만족스럽지 못한 것으로 확인되었다.

실제 조선소 근로자들이 동일 직종에서 장시간 진동에 노출되는 경우에 백수증이 발생할 확률이 높은 것으로 파악되며, 이의 예방을 위해서 방진장갑의 성능향상, 진동을 최소화

확할 수 있는 작업방법에 대한 표준 마련, 전문의의 정기검사를 통한 체계적인 관리 등 다각적인 노력을 통해서 예방할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

(1) ISO 5349-1 : 2001 (E), Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration -, Part 1 : General requirements

(2) ISO 5349-2 : 2001 (E), Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration -, Part 2 : Practical guidance for measurement at the workplace

(3) ISO 13753, 1998, Mechanical vibration and shock - Hand-arm vibration -, Method for measuring the vibration transmissibility of resilient materials when loaded by the hand-arm system.

(4) ISO 10068, 1998, Mechanical vibration and shock - Free, mechanical impedance of the human hand-arm system at the driving point.

(5) ISO 10819, 1996, Mechanical vibration and shock - Hand-arm vibration - Method for the measurement and evaluation of the vibration transmissibility of gloves at the palm of the hand.

(6) ISO 8662-1, 1998, Hand-held portable power tools -Measurement of vibrations at the handle -, Part 1: General.

(7). ISO 8662-4, 1994, Hand-held portable power tools -Measurement of vibrations at the handle -, Part 4: Grinders.

(8) ISO 8041, 1990, Human response to vibration - Measuring instrumentation.

(9) 장한기, 2002, "수완계 진동에 대한 규격제정 동향", 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집.

(10) 정완섭, 박용화, 1999, "인체 진동측정 ISO 표준안과 비 표준안들의 비교 및 분석", 한국소음진동공학회 1999년도 추계학술대회논문집.

(11) Donald E. Wasserman and Jack F. Wasserman, 2002, "The nuts & bolts of human exposure to vibration", Sound and Vibration.