

# UH60 헬기 조종사의 피폭진동 측정 및 평가 결과

○정 완섭\*, 변 주현\*\*

\*한국표준과학연구원, 음향진동 그룹

\*\*창원 파티마병원, 산업의학과

## Measurements of Whole-body Vibration Exposed from UH60-Helicopter and Their Analysis Results

○Wan-Sup Cheung\*, Joo-Hyun Byeon

### ABSTRACT

This paper addresses what amount of whole-body vibration is exposed to pilots of UH60 helicopters during flight. To measure the whole-body exposed from the feet and seat, the 12-axis vibration measurement system was used. It enables simultaneous measurement of vibration exposure from the body contact area of the feet, hip and back. The measured 12-axis vibration signals are exploited to the comfort level of UH60 helicopters during flight. It is shown that the evaluated ride value is close to 0.74 ~ 0.79 m/s<sup>2</sup> and that it is equivalent to the semantic scale of "fairly uncomfortable". To assess the health effects of whole-body vibration exposed to pilots of UH60 helicopters during their flight, the rms-based and VDV(vibration dose value)-based evaluation results of measured four-axis vibration signals are shown in this work. The fatigue-decreased proficiency limit, whose level is half of the exposure limit, is expected to come after the two-hour flight. The exposure limit is shown to reach after the 10-hour flight.

### 1. 서론

본 연구는 군 작업환경 및 작업자 보건관리 규정(국군훈령 제 640 호, 1999)와 헬기 조종사들의 보건교육을 위한 작업환경 조사(신검 33321-58, 2004)를 위하여 육군본부 보건과, 국군대전병원 산업의학과, 그리고 한국표준과학연구원 음향진동그룹이 함께 수행한 UH60 헬기 조종사들의 운행 중 전신으로 전달되는 피폭진동을 측정 분석하였다. 본 논문에서는 측정 분석된 결과를 소개하고자 한다.

헬기 조종사들의 피폭진동에 대한 이전의 연구에 대한 학술적 발표 사례는 매우 적은 실정이다. Griffin[1]은 8 종의 헬기에서 전달되는 전신진동 피폭 결과를 소개 하였다. Griffin 은 엉덩이 병진 3 축과 등 접촉부 1 축(전후 방향)의 피폭진동을 측정하였다. ISO 2631(1985)와 BS 6841(1987)에 따른

주파수 가중함수를 적용하여 전신진동 평가를 수행하였으며 기종별 실효치 피폭 진동량을 소개하였다. 국내에서 최초로 1998 년에 UH-1H 헬기에 대한 전신진동 측정과 분석[2,3]을 수행한 바 있으며 이들 연구는 조종사에게 피폭되는 진동이 임무수행 효율성에 미치는 영향을 분석 소개하였다.

현재 우리나라군이 가장 많이 운행중인 UH60 기종의 헬기 조종사가 수행하는 업무 중 조종사의 양 발, 엉덩이 그리고 등 부위로 구성되는 기계적 접촉부로부터 피폭되는 전신 피폭 진동량을 측정 분석하여, (1) 조종사의 비행 환경에 대한 안락도 레벨(comfort level) 평가, (2) 누적 피로에 의한 임무능력 저감 한계 (fatigue-decreased proficiency limit) 도달 시간, 그리고 (3) 피폭 한계 (exposure limit) 도달 시간을 각각 산출한다. 이들 두 한계

도달시간을 실제 비행 시간과 비교함으로써 조종사의 안전비행과 임무수행의 효율화를 도모할 뿐 아니라 장시간에 걸친 조종사의 보건 및 안전을 실현하고자 함이다.

## 2. 측정장치 및 실험방법

조종사의 인체와 헬기의 기계적 부분이 접촉하는 양 발, 엉덩이, 등 부위로 전달되는 전신 피폭진동을 측정하기 위하여 설치된 전신진동 측정센서 들을 Fig. 1은 보이고 있다.

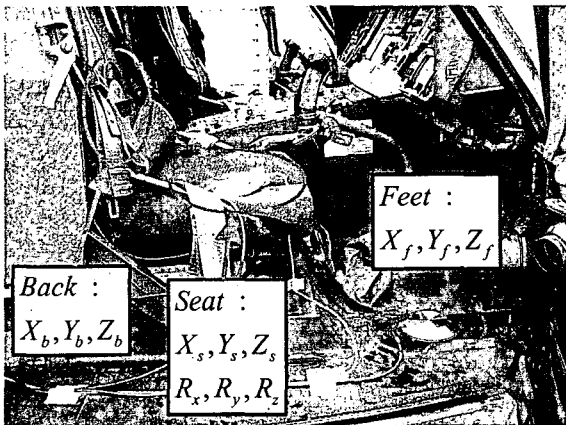


Fig.1 Setup of 12-axis whole-body vibration measurement sensors.

전신피폭 진동 측정은 양 발로 피폭되는 병진 3 축 (앞뒤의 x-축, 좌우의 y-축, 그리고 상하의 z-축) 방향의 피폭진동을, 의자와 접하는 엉덩이 부위에서는 병진 3 축 진동과 회전 3축 (x-축 회전 roll, y-축 회전 pitch, z-축 회전 yaw 방향) 진동 즉 6 축 진동 성분을, 그리고 등 부위로부터 피폭되는 병진 3 축의 진동 성분을 각각 동시에 측정하였다. 이와 같이 발, 엉덩이 그리고 등 부위로부터 전달되는 총 12축의 진동 성분의 동시 측정방법은 국제표준안(ISO 2631-1:1997)으로 채택되어 있는 표준 방법이다. 본 실험에서 발, 엉덩이 그리고 등 부위의 병진 3축 측정은 한국표준연구원에서 자체 제작한 SAE-pad형 고 정밀 3축 가속도 측정센서와 전용

신호 증폭기를 사용하였으며, 엉덩이의 회전 3축 진동은 ATA사의 회전진동 센서인 Dynacube 모델과 전용 신호증폭기(Dyna-ILG-DG)를 각각 사용하였다. 이들 12축 진동 신호들은 디지털 기록계(Sony PC-216A 모델)에 실시간으로 기록하였다. 본 전신진동 측정 및 기록장치는 이전 해군비행단의 UH-1H의 연구<sup>[2]</sup>에서도 사용한 바가 있었다.

금번실험에는 3 명의 조종사가 참여하였으며 이들의 신체 특성은 키가 각각 174 cm, 172 cm, 173 cm 그리고 몸무게가 68 kg, 76 kg, 65 kg였다. 제 1 피 시험자는 헬기의 시동 및 점검, 그리고 계류장에서부터 지정된 이착륙 지점에서의 이동을 포함하는 "taxi" 임무를 수행하였다. 그러나 제 2 그리고 3 피 시험자들은 이러한 준비단계를 하지 수행하지 않고 직접 지정된 이륙지점에서 헬기의 운전을 시작하였다.

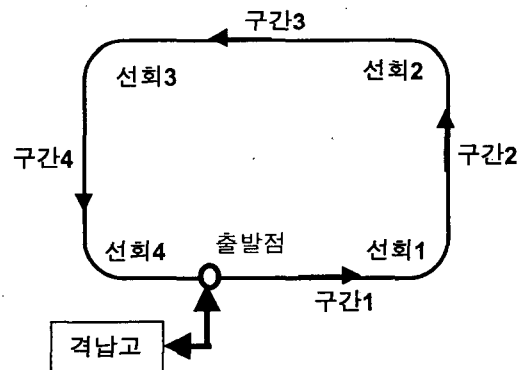


Fig.2 Flight plans.

Fig 2는 장주 비행의 운행 구성도를 보이고 있다. 이륙지점 즉 "출발점"에서 모든 피시험자들은 hovering을 수행한 뒤 장주 비행을 각각 수행하였다. 장주 비행은 4개의 직선 비행과 이들 사이를 연결하는 4 종의 선회 비행으로 구성하였다. 직선 비행의 제 1 구간은 상승비행, 제 2 구간은 수평비행, 제 3구간 또한 수평비행, 제 4구간은 강하비행이며, 제 1 선회 구간은 등속 상승선회, 제 2 선회 구간은 동 고도 등속도, 제 3 선회 구간은 감속 강하 선회, 그리고 제

4 선회 구간은 동 고도 등속 선회 비행이다. 금번 연구에서는 이들 장주 비행구간을 나누지 않고 하나의 비행요소로 간주하여 진동을 분석하였다.

### 3. 분석 방법 및 결과

헬기진동의 전신피폭에 대한 다음의 두 가지의 영향평가를 수행하였다. 첫째 안락도 레벨 (comfort level)로 ISO 2631-1:1997에 기반으로 한 12-축 전신진동의 승차감 지수(ride value) 평가와 더불어 이들 평가치에 대응되는 어미론적 단위(semantic scale)로도 평가하는 방법과 둘째 보건 지침(health guidance): ISO 2631-1:1997 부록서 B에 제시된 권고안에 따라 전신진동의 실효치(rms)와 진동피폭량(VDV)을 평가하여 보건 및 안전에 대한 영향평가를 각각 수행하였다. 안락도 레벨을 평가하기 위한 승차감 지수는 아래 식과 같이 실효치(rms-value)을 이용하여 환산하였다.

$$rms = \left[ \sum_{j=1}^{12} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (m_j \cdot a_{w,j}(n))^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

위 식에서  $m_j$ 는 축별 배가인자 그리고  $a_{w,j}(n)$ 는 축별 주파수 가중화를 적용한 가속도 신호이다.  $N$ 는 시간영역에서 측정된 진동신호의 수를 나타낸다. 위식에서 나타낸 바와 같이 안락도 레벨은 12 축 진동신호를 이용하여 평가하였다. 그리고 보건 지침(health guidance)에 따른 보건 및 안전 영향평가는 아래 식과 같이 실효치(rms)와 진동 피폭량(VDV)를 함께 환산하여 수행하였다.

$$rms = \left[ \sum_{j=1}^4 \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (m_j a_{w,j}(n))^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$VDV = \left[ \sum_{j=1}^4 \Delta T \cdot \sum_{n=1}^N (m_j \cdot a_{w,j}(n))^4 \right]^{1/4} \quad (3)$$

위 식에서  $\Delta T$  가속도 신호의 수집주기 (sampling time)을 나타낸다. 보건 및 안전 영향평가는 영당이 병진 3축과 등 부위 1 축 (전후방향) 즉 4 축의 피폭진동 신호를 이용하여 평가를 수행하였다. ISO 2631-1:1997 표준 안 부록서 B의 보건 지침은 상한과 하한 두 종류를 제안하고 있으며, 상한 값을 피폭한계(exposure limit, "EL"로 표기)라 하며 하한 값을 피로 효율저하 한계 (fatigue-decreased proficiency limit, "FL"로 표기)라고 칭한다. 상한 피폭한계는 피로 효율저하 한계의 2 배의 레벨로 정의하고 있다. 피폭한계(exposure limit)는 실효치(rms)인 경우  $5.6 [m/s^2]$ 로 정의하며 그리고 진동피폭량(VDV)인 경우  $17 [m/s^{1.75}]$ 를 각각 정의하고 있으며 이들 두 값의 절반을 피로 효율저하 한계로 정의하고 있다. 앞서 소개한 한계수준 도달시간과 같이 피로 효율저하 한계 도달시간  $T_{FL}$  와 피폭한계 도달시간  $T_{EL}$  또한 다음과 같이 실효치(rms)인 경우와 진동피폭량(VDV)인 경우를 분리하여 계산한다. 즉 측정  $T_m$ 이 10 분 이하의 측정 실효치  $a_{rms}$ 를 이용하여 피로 효율한계와 피폭한계 도달시간은 각각 다음 계산식으로 환산하며

$$T_{FL} = 10 \cdot (2.8/a_{rms})^2,$$

$$T_{EL} = 10 \cdot (5.6/a_{rms})^2 \quad [\text{min}] \quad (4)$$

만약 측정  $T_m$ 이 10 분 이상인 경우는 위 식의 숫자 10 대신에  $T_m$ 을 넣어 계산한다. 그리고 측정  $T_m$  분 동안 측정된 진동피폭량  $a_{VDV}$ 를 이용하여 피로 효율 저감 한계와 피폭한계 도달시간은 다음 식으로 계산한다.

$$T_{FL} = T_m \cdot (8.5 / a_{VDV})^4,$$

$$T_{EL} = T_m \cdot (17 / a_{VDV})^4 \text{ [min]} \quad (5)$$

위 도달시간 환산식의 결과는 향후 몇 회를 반복적으로 비행하면 피로 효율저하 한계(FL)에 도달하거나 혹은 피폭한계(EL)에 도달하는 가를 정량적으로 판단하는 지표로 활용되고 있다.

앞서 설명한 바와 같이 피시험자 3 인이 다음과 같이 4 단계로 구성된 비행을 수행한 경우를 모델로 인체진동 유행성 평가를 수행하였다.

- 비행 1단계: 헬기의 시동부터 기계점검
- 비행 2단계: Taxi 수행으로 이착륙 지점까지 이동 및 비행준비
- 비행 3단계: Hovering
- 비행 4단계: 2 회의 장주 비행(이착륙 포함).

다음 페이지의 Table 1은 헬기 운행 시 조종사 들이 느끼는 승차감 지수 즉 안락도 환경을 평가한 결과이다. 시동부터 기기점검까지의 비행 1단계에 소요된 시간은 6.3분이며 피폭진동 레벨은 0.65 [m/s<sup>2</sup>], Taxi 및 이륙준비까지의 비행 제 2단계 소요시간은 6.3분이며 피폭진동 레벨은 0.78 [m/s<sup>2</sup>], 비행 3단계 Hovering의 평균 소요시간은 2.6분이며 평균 피폭진동 레벨은 0.68 [m/s<sup>2</sup>], 그리고 비행 4단계인 장주 비행 1회 수행 평균 시간은 6.4분이 소요되며 이때 평균 피폭진동 레벨은 0.82 [m/s<sup>2</sup>]으로 나타났다. 세 조종사로부터 전구간 평균 피폭 진동레벨은 0.74~0.79 [m/s<sup>2</sup>]의 범위로 나타났으며 이들 평균값은 0.76 [m/s<sup>2</sup>] 이었다. 이들 승차감 지수는 "Fairly uncomfortable(상당히 불편한)"라는 어미론적 정도 (semantic scale)에 해당된다. 이러한 승차감 지수는 대중교통 수단의 승차감 지수[4] 즉 새마을호의 승차감 지수인 0.32 [m/s<sup>2</sup>]에 비하여 2.4배 높은 진동이며, 우등 고속버스의 승차감 지수인 0.46 [m/s<sup>2</sup>]에 비하면 약 1.7배 높은 진동 환경임을 의미한다.

Table 1. Assessed comfort levels

피 시험자	측정조건	지속시간 (초)	안락도레벨 [m/s <sup>2</sup> ]	
			구간 별	전체
공통	시동~점검	380	0.65	0.76
	Taxi+준비	375	0.78	
시험자1: 174 cm, 68 kg	Hovering	140	0.39	0.76
	비행 1	415	0.84	
	비행 2	365	0.85	
시험자2: 172 cm, 76 kg	Hovering	166	0.72	0.74
	비행 1	400	0.78	
	비행 2	360	0.77	
시험자3: 173 cm, 65 kg	Hovering	170	0.84	0.79
	비행 1	385	0.85	
	비행 2	385	0.84	
3인 전 구간 평균				0.76

Table 2와 3은 국제표준규격 ISO2631-1의 부속서 B에 제시된 지침에 따라 4 축(영당이 병진진동 3 축과 등 앞뒤 한 축)으로 피폭되는 전신진동에 대한 보건영향의 평가결과를 보이고 있다. Table 2는 4축 전신 피폭진동의 실효치(rms)의 평가 결과이며, 그리고 표 Table 3은 4축 전신 진동피폭량(VDV)의 평가 결과이다.

Table 2. Rms-based assessment results: Fatigue-decreased proficiency limit T<sub>FL</sub> and exposure limit T<sub>EL</sub>.

피 시험자	측정조건	실효치 [m/s <sup>2</sup> ]		T <sub>FL</sub> [분]	T <sub>EL</sub> [분]
		구간 별	전체		
공통	시동~점검	0.61	0.72	151	602
	Taxi+준비	0.73			
시험자 1	Hovering	0.37	0.72	151	602
	비행 1	0.81			
	비행 2	0.82			
시험자 2	Hovering	0.68	0.70	158	633
	비행 1	0.74			
	비행 2	0.74			
시험자 3	Hovering	0.77	0.75	141	566
	비행 1	0.81			
	비행 2	0.80			
3인 평균 값			0.72	150	600

시동에서부터 장주 비행 2회를 포함하는 비행에서 세 명의 조종사에게 피폭되는 4축의 전신진동 피폭진동 실효치 평가치는 0.70~0.75 [m/s<sup>2</sup>]의 범위로 확인되었으며 이들 평균값은 0.72 [m/s<sup>2</sup>] 이었다. Table 2로부터 평균 실효치 0.72 [m/s<sup>2</sup>]에 해당되는 진동 레벨은 피로 효율 저감 한계 도달시간(T<sub>FL</sub>)이 150분에 해당된다 점이 확인되었다. 즉 조종사가 2시간 30분(150분)을 비행할 경우 피로에 의한 업무 효율의 저감이 유발된다는 점을 의미한다. 그리고 보건을 위한 피폭한계 도달시간(T<sub>EL</sub>)은 10시간 (600 분)으로 확인되었으며 이는 10 시간 이상의 연속 비행은 금지되어야 함을 의미한다.

Table 3. VDV-based assessment results: Fatigue-decreased proficiency limit T<sub>FL</sub> and exposure limit T<sub>EL</sub>.

피 시험 자	측정조건	1분 등가 진동피폭값 [m/s <sup>1.75</sup> ]		T <sub>FL</sub> [분]	T <sub>EL</sub> [분]
		구간 별	전체		
공통	시동~점검	2.61	2.60	115	1842
	Taxi+준비	2.75			
시험 자 1	Hovering	1.11	2.49	136	2167
	비행 1	2.62			
	비행 2	2.62			
시험 자 2	Hovering	2.19	2.64	107	1708
	비행 1	2.36			
	비행 2	2.28			
시험 자 3	Hovering	2.57	2.59	116	1856
	비행 1	2.63			
	비행 2	2.62			
3인 평균 값					

Table 3은 전신진동 4축의 진동 피폭량의 평가결과로 시동에서부터 장주 비행 2회를 포함하는 비행에서 세 명의 조종사에게 전달되는 전신 진동피폭량(VDV) 평가치는 2.49~2.64 [m/s<sup>1.75</sup>]의 범위로 관측되었으며 세 조종사의 평균 진동피폭량은 2.59 [m/s<sup>1.75</sup>]이었다. 이러한 평균 진동피폭량은 피로 효율 저감 한계 도달시간(T<sub>FL</sub>)이 116분에 해당됨을 확인하였다. 즉 조종사가

1시간 56분(116분)을 비행할 경우 피로에 의한 업무 효율의 저감이 유발된다는 점을 의미한다. 그리고 Table 3로부터 보건을 위한 피폭한계 도달시간(T<sub>EL</sub>)은 30시간 56분(1,856 분)으로 확인되었으며 이는 약 31 시간 이상의 연속 비행은 금지되어야 함을 의미한다.

4축 전신진동을 두 평가 방법 즉 실효치(rms)와 진동피폭량(VDV)을 이용한 평가 결과를 소개하였다. 이들 두 평가 결과로부터 피로 효율 저감 한계 도달시간(T<sub>FL</sub>)이 실효치 평가결과로는 2시간 30분 그리고 진동피폭량 평가결과는 1시간 56분으로 진동피폭량 평가 결과가 약 34분 짧게 평가되었다. 그리고, 피폭한계 도달시간(T<sub>EL</sub>)은 실효치 평가결과로는 10 시간 그리고 진동피폭량 평가결과는 30시간 56분으로 실효치 평가결과가 약 21시간 짧게 평가되었다. 보건의 측면에서 짧게 평가된 피로 효율저감 한계 도달시간(T<sub>FL</sub>)과 피폭한계 도달시간 (T<sub>EL</sub>)을 각각 사용하여 것이 합리적이라고 사료된다. 즉 시동에서 장주 비행 2회를 포함하는 비행에서 피로 효율저감 한계 도달시간(T<sub>FL</sub>)은 1시간 56분 (약 2시간)을 그리고 피폭한계 도달시간 (T<sub>EL</sub>)은 10시간으로 정하는 것이 조종사들의 건강보호에 보다 긍정적 효과를 얻을 수 있다는 점이다. 그리고 피폭한계 도달시간 (T<sub>EL</sub>)을 10시간으로 설정하는 것은 BS6841:1987에 근거한 12축 전신피폭진동의 한계수준(action level) 도달시간(T<sub>15</sub>)인 18.9시간 보다 적게 설정한 결과가 되기 때문에 조종사 건강보호에 보다 효과적인 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

금번 실험은 헬기 조종사가 수행하는 업무 중 조종사의 양 발, 엉덩이 그리고 등 부위로 구성되는 기계적 접촉부로부터 피폭되는 전신 피폭 진동량을 측정 분석하여, 조종사의 비행환경에 대한 안락도

레벨(comfort level), 피로 효율 저감 한계(fatigue-decreased proficiency limit) 도달시간, 그리고 피폭 한계(exposure limit) 도달 시간을 각각 평가하였다.

세 조종사의 12 축 전신 피폭진동 평균 레벨은 0.74~0.79 [m/s<sup>2</sup>]의 범위로 나타났으며 이들 평균값은 0.76 [m/s<sup>2</sup>]이었다. 이들 승차감 지수는 “Fairly uncomfortable (상당히 불편한)”라는 어미론적 정도(semantic scale)임이 확인되었다. 그리고 4 축 전신 진동 측정치로부터 실효치(rms)와 진동피폭량(VDV) 환산치를 각각 이용하여 보건영향(health effects) 평가를 수행하였다. 우선 피로 효율저하 한계 도달시간이 실효치 평가결과로는 2 시간 30 분 그리고 진동피폭량 평가결과로는 1 시간 56 분으로 진동피폭량 평가 결과가 약 34 분 짧게 나타났다. 그리고, 피폭한계 도달시간은 실효치 평가결과로는 10 시간 그리고 진동피폭량 평가결과로는 30 시간 56 분으로 실효치 평가결과가 약 21 시간 짧게 나타났다. 보건 측면에서 짧게 평가된 피로 효율저하 한계 도달시간과 피폭한계 도달시간을 각각 사용하여 것이 합리적이라 판단되었다. 따라서 시동에서 장주 비행 2 회를 포함하는 비행에서 피로 효율저하 한계 도달시간은 1 시간 56 분(약 2 시간)을 그리고 피폭한계 도달시간은 10 시간으로 정하는 것이 조종사들의

건강보호에 보다 긍정적 효과를 얻을 수 있다고 기대된다.

본 실험의 수행에 많은 도움을 주신 육군본부 보건과, 국군대전병원 산업의학과, 그리고 육군항공대대 비행사 여러분에게 감사를 드립니다. 그리고 본 연구는 환경부 과제 “소음, 진동 물리적 위해요인의 정량평가 기술 과제에 의하여 구축된 실험장치 및 분석 기법을 이용하여 수행되었다.

#### 참고 문헌

- [1] M.J. Griffin, Handbook of Humanvibration, Academic Press, London, 1989.
- [2] 송근식, UH-1H 조종사의 전신진동 노출에 따른 임무별 비행시간 한계에 관한 연구, 공군사관학교 항공우주공학과 군사대학원 석사논문, 1998.
- [3] Wan-Sup Cheung, et al, “Assessment of the whole-body vibration exposed to helicopter pilots and analysis of its effects on their flight duration,” inter-noise 1999, Fort Lauderdale: USA,, 907-910, 1999.
- [4] 김 진기, 홍동표, 최병재, 정 완섭, “인체진동을 고려한 국내의 대중교통 수단의 진동환경 평가에 관한 연구,” 한국소음진동공학회지, 11권 7호, pp. 267~274, 2001.