

# UH60 헬기 조종사의 피폭진동 측정 및 평가 결과

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

정 완 섭\* · 변 주 현\*

Wan-Sup Cheung and Joo-Hyun Byeon

(2005년 4월 14일 접수 : 2005년 11월 11일 심사완료)

**Key Words** : Helicopter Vibration(헬기진동), Whole-body Vibration(전신진동), Vibration Comfort(진동안락도), Fatigue-decreased Proficiency Limit(효율저감한계), Vibration Exposure Limit(진동피폭한계)

### ABSTRACT

This paper addresses what amount of whole-body vibration is exposed to Korean pilots of UH60 helicopters during their mission flight. To measure the exposed whole-body vibration, the 12-axis whole-body vibration measurement system was used. It enables the direct measurement of whole-body vibration exposed from the body contact area consisting of the feet, hip and back. The measured 12-axis vibration signals were used to evaluate the vibration comfort level experienced by the pilots of UH60 helicopters. The evaluated vibration comfort level is found to be close to  $0.74\sim 0.79\text{ m/s}^2$ , which is equivalent to the semantic scale of "fairly uncomfortable". To assess the health effects of whole-body vibration exposed to Korean pilots of UH60 helicopters during their mission flight, the rms-based and VDV(vibration dose value)-based evaluation schemes, recommended by ISO 2631-1:1977, were exploited in this work. The evaluated results indicate that Korean pilots cannot avoid the fatigue-decreased proficiency limit after two-hour continuous flight. The whole-body vibration level exposed from the UH60 helicopters during continuous 10-hour mission flight is found to reach to the vibration exposure limit.

### 1. 서 론

헬기 조종사들의 피폭진동에 대한 이전의 연구사례는 Griffin<sup>(1)</sup>이 수행한 8종의 헬기 실험에서 관측된 전신 피폭 진동의 분석 결과라 할 수 있다. Griffin은 헬기와 인체가 직접 접촉하는 발, 엉덩이 그리고 등 부위로 전달되는 전신진동을 측정하였으며, ISO 2631(1985)와 BS 6841(1987)에 따른 주파수 가중합수를 적용하여 전신진동의 피폭량 환산과 보건 및 안

전에 대한 인체 영향을 평가하고자 헬기 기종별 실호치 피폭 진동량 환산결과를 소개하였다. 국내에서도 또한 1998년에 UH-1H 헬기에 대한 전신진동 측정과 분석<sup>(2,3)</sup>을 수행한 바 있으며 이들 연구는 조종사에게 피폭되는 진동이 임무수행 효율성에 미치는 영향을 분석 소개하였다.

이들 이전 연구들은 헬기관련 작업환경의 평가를 통하여 종사자들의 건강보호와 임무 효율의 극대화를 얻고자 한 사례들이다. 이번 연구의 목적 또한 UH60 헬기 조종사들의 운행 중 전신으로 전달되는 피폭진동에 대하여 조종사들의 보건과 임무효율의 증대를 위하여 수행되었다. 현재 우리나라가 가장 많이 운행 중인 헬기 기종이 UH60 모델이다. 이 연구는 국방관련된 종사자들의 작업 환경 및 작업자 보건관리 규

† 책임저자 : 정희원, 한국표준과학연구원 음향진동그룹  
E-mail : wansup@kriss.re.kr  
Tel : (042) 868-5302, Fax : (042) 868-5643

\* 창원파티마병원 산업의학과

정(국군훈령 제 640호, 1999)과 UH60 헬기 조종사들의 보건교육을 위한 작업환경 조사(신검 33321-58, 2004)의 일환으로 육군본부 보건과, 국군대전병원 산업의학과, 그리고 한국표준과학연구원 음향진동그룹이 함께 수행되었다.

이 논문에서는 조종사들의 인체 접촉부로 피폭되는 피폭 진동 측정 값을 직접 소개하기보다는 헬기 조종사가 현재의 진동환경에서 몇 시간 연속적으로 조종하면 업무효율 저감이 유발될 수 있는지 그리고 몇 시간의 연속적 비행으로 전신 피폭진동 한계 치에 도달하는 가를 소개한다. 이러한 접근 피폭 시간 접근 방법은 자신의 비행시간을 매일 조사하여 임무 효율화와 자신들의 보건과 안전을 스스로 실천을 유도하기 위하여 사용하였다. 논문의 2절에서는 이번 연구에서 사용한 실험장치 및 실험 방법을 소개한다. 우선 조종사의 비행 환경에 대한 안락도 레벨(comfort level) 평가 결과를 소개하며, 누적 피로에 의한 임무능력 저감 한계(fatigue-decreased proficiency limit) 도달 시간 그리고 피폭 한계(exposure limit) 도달 시간의 산출결과를 제 3 절에서 소개한다. 그리고 이 연구의 주요 결과는 제 4 절에서 요약 소개한다.

## 2. 측정장치 및 실험방법

조종사의 인체와 헬기의 기계적 부분이 접촉하는 양발, 엉덩이, 등 부위로 전달되는 전신 피폭진동을 측정하기 위하여 설치된 전신진동 측정센서 들을 Fig.1은 보이고 있다. 전신피폭 진동 측정은 양 발로 피폭되는 병진 3축(앞뒤의 x-축, 좌우의 y-축, 그리

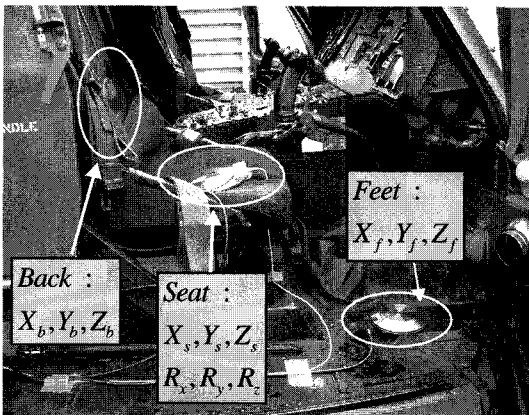


Fig.1 Setup of 12-axis whole-body vibration measurement sensors

고 상하의 z-축) 방향의 피폭진동을, 의자와 접하는 엉덩이 부위에서는 병진 3축 진동과 회전 3축(x-축 회전 roll, y-축 회전 pitch, z-축 회전 yaw 방향) 진동 즉 6축 진동 성분을, 그리고 등 부위로부터 피폭되는 병진 3축의 진동 성분을 각각 동시에 측정하였다. 이와 같이 발, 엉덩이 그리고 등 부위로부터 전달되는 총 12축의 진동 성분의 동시 측정방법은 국제표준 안(ISO 2631-1:1997)으로 채택되어 있는 표준 방법이다.

이 실험에서 발, 엉덩이 그리고 등 부위의 병진 3축 측정은 한국표준연구원에서 자체 제작한 SAE-pad형 고정밀 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. 이 전신진동 측정 및 기록장치는 이전 해군비행단의 UH-1H의 연구<sup>(2)</sup>에서도 사용한 바가 있었다.

이번 실험에는 3명의 조종사가 참여하였으며 이들의 신체 특성은 키가 각각 174 cm, 172 cm, 173 cm 그리고 몸무게가 68 kg, 76 kg, 65 kg였다. 제 1 피시험자는 헬기의 시동 및 점검, 그리고 계류장에서부터 지정된 이착륙 지점으로의 이동을 포함하는 "taxi" 임무를 수행하였다. 그러나 제 2 그리고 3 피시험자들은 이러한 준비단계를 하지 수행하지 않고 직접 지정된 이륙지점에서 헬기의 운전을 시작하였다. 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 4종의 선회 비행으로 구성하였다.

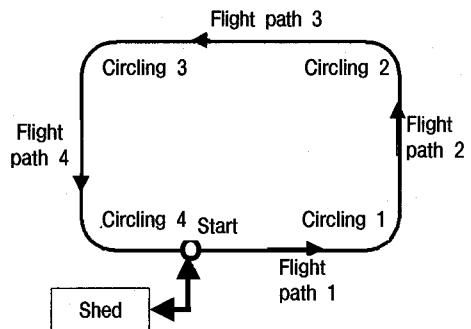


Fig.2 Flight plans

직선 비행의 제 1 구간은 상승비행, 제 2 구간은 수평비행, 제 3구간 또한 수평비행, 제 4 구간은 강하 비행이며, 제 1 선회 구간은 등속 상승선회, 제 2 선회 구간은 등 고도 등속도, 제 3 선회 구간은 감속 강하 선회, 그리고 제 4 선회 구간은 등 고도 등속 선회 비행이다. 이번 연구에서는 이들 장주 비행구간을 나누지 않고 하나의 비행요소로 간주하여 진동을 분석하였다.

### 3. 분석 방법 및 결과

헬기진동의 전신평폭에 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 식 (1)과 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. 위 식에서 나타낸 바와 같이 안락도 레벨은 12축 진동신호를 이용하여 평가하였다. 그리고 보건 지침(health guidance)에 따른 보건 및 안전 영향평가는 아래 식과 같이 실효치(rms)와 진동피폭량(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 엉덩이 병진 3축과 등 부위 1축(전후방향) 즉 4축의 피폭진동 신호를 이용하여 평가를 수행하였다. ISO 2631-1:1997 표준안 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 2배의 레벨로 정의하고 있다. 피폭한계(exposure limit)는 실효치(rms)인 경우  $5.6 \text{ m/s}^2$ 로 정의하며 그리고 진동피폭량(VDV)인 경우  $17 \text{ m/s}^{1.75}$ 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 10분 이하의 측정 실효치  $a_{rms}$ 를 이용하여 피로 효율한계와 피폭한계 도달시간은 각각 다음 계산식으로 환산하며

$$T_{FL} = 10 \cdot (2.8/a_{rms})^2, T_{EL} = 10 \cdot (5.6/a_{rms})^2 [\text{min}] \quad (4)$$

만약 측정  $T_m$ 이 10분 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 효율저감 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 3인이 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 : 2회의 장주 비행(이착륙 포함).

Table 1은 헬기 운행 시 조종사들이 느끼는 승차감 지수 즉 안락도 환경을 평가한 결과이다. 시동부터 기기점검까지의 비행 1단계에 소요된 시간은 6.3분이며 피폭진동 레벨은  $0.65 \text{ m/s}^2$ , taxi 및 이륙준비까지의 비행 제 2단계 소요시간은 6.3분이며 피폭진동 레벨은  $0.78 \text{ m/s}^2$ , 비행 3단계 hovering의 평균 소요시간은 2.6분이며 평균 피폭진동 레벨은  $0.68 \text{ m/s}^2$ , 그리고 비행 4단계인 장주 비행 1회 수행 평균 시간은 6.4분이 소요되며 이때 평균 피폭진동 레벨은  $0.82 \text{ m/s}^2$ 으로 나타났다. 세 조종사로부터 전구간 평균 피폭진동 레벨은  $0.74 \sim 0.79 \text{ m/s}^2$ 의 범위로 나타났으며 이들 평균값은  $0.76 \text{ m/s}^2$ 이었다. 이들 승차감 지수는 "fairly uncomfortable(상당히 불편한)"라는 어

**Table 1** Assessed comfort levels

Subjects	Conditions	Flight time (sec)	Comfort level [ $\text{m/s}^2$ ]	
			Part	Overall
Common	Start ~checking	380	0.65	0.76
	Taxi	375	0.78	
Subject 1: 174 cm, 68 kg	Hovering	140	0.39	
	Flight 1	415	0.84	
	Flight 2	365	0.85	
Subject 2: 172 cm, 76 kg	Hovering	166	0.72	
	Flight 1	400	0.78	
	Flight 2	360	0.77	
Subject 3: 173 cm, 65 kg	Hovering	170	0.84	0.79
	Flight 1	385	0.85	
	Flight 2	385	0.84	
Mean value				0.76

**Table 2** Rms-based assessment results: Fatigue-decreased proficiency limit  $T_{FL}$  and exposure limit  $T_{EL}$

Subjects	Conditions	rms [ $\text{m/s}^2$ ]		$T_{FL}$ [min]	$T_{EL}$ [min]
		Part	Overall		
Common	Start ~checking	0.61	0.72	151	602
	Taxi	0.73			
Subject 1	Hovering	0.37			
	Flight 1	0.81			
	Flight 2	0.82			
Subject 2	Hovering	0.68			
	Flight 1	0.74			
	Flight 2	0.74			
Subject 3	Hovering	0.77	0.75	141	566
	Flight 1	0.81			
	Flight 2	0.80			
Mean value				0.72	600

미론적 등급(semantic scale)에 해당된다. 이러한 승차감 지수는 대중교통 수단의 승차감 지수<sup>(4)</sup> 즉 새마을호의 승차감 지수인  $0.32 \text{ m/s}^2$ 에 비하여 2.4배 높은 진동이며, 우등 고속버스의 승차감 지수인  $0.46 \text{ m/s}^2$ 에 비하면 약 1.7배 높은 진동 환경임을 의미한다.

Table 2와 3은 국제표준규격 ISO2631-1의 부속서 B에 제시된 지침에 따라 4축(영당이 병진진동 3축과 등 앞뒤 한 축)으로 피폭되는 전신진동에 대한 보건영향의 평가결과를 보이고 있다. Table 2는 4축 전신 피폭진동의 실효치(rms)의 평가 결과이며, 그리고 Table 3은 4축 전신 진동피폭량(VDV)의 평가 결과이다. 시동에서부터 장주 비행 2회를 포함하는 비행에서 세 명의 조종사에게 피폭되는 4축의 전신진동 피폭진동 실효치 평가치는  $0.70 \sim 0.75 \text{ m/s}^2$ 의 범위로 확인되었으며 이들 평균값은  $0.72 \text{ m/s}^2$ 이었다.

Table 2로부터 평균 실효치  $0.72 \text{ m/s}^2$ 에 해당되는 진동 레벨은 피로 효율 저감 한계 도달시간( $T_{FL}$ )이 150분에 해당된다는 점이 확인되었다. 즉 조종사가 2시간 30분(150분)을 비행할 경우 피로에 의한 임무 효율의 저감이 유발된다는 점을 의미한다. 그리고 보건을 위한 피폭한계 도달시간( $T_{EL}$ )은 10시간(600분)으로 확인되었으며 이는 10시간 이상의 연속 비행은 금지되어야 함을 의미한다.

Table 3은 전신진동 4축의 진동피폭량의 평가결과로 시동에서부터 장주 비행 2회를 포함하는 비행에서 세 명의 조종사에게 전달되는 전신 진동피폭량

**Table 3** VDV-based assessment results: Fatigue-decreased proficiency limit  $T_{FL}$  and exposure limit  $T_{EL}$

Subjects	Conditions	One-minute VDV [ $\text{m/s}^{1.75}$ ]		$T_{FL}$ [min]	$T_{EL}$ [min]
		Part	Overall		
Common	Start ~checking	2.61	2.60	115	1842
	Subject 1	2.75			
Subject 1	Hovering	1.11			
	Subject 3	2.62			
	Flight 2	2.62			
Subject 2	Hovering	2.19			
	Flight 1	2.36			
	Flight 2	2.28			
Subject 3	Hovering	2.57	2.64	107	1708
	Flight 1	2.63			
	Flight 2	2.62			
Mean value				2.59	1856

(VDV) 평가치는  $2.49 \sim 2.64 \text{ m/s}^{1.75}$ 의 범위로 관측되었으며 세 조종사의 평균 진동피폭량은  $2.59 \text{ m/s}^{1.75}$ 이었다. 이러한 평균 진동피폭량은 피로 효율 저감 한계 도달시간( $T_{FL}$ )이 116분에 해당됨을 확인하였다. 즉 조종사가 1시간 56분(116분)을 비행할 경우 피로에 의한 임무 효율의 저감이 유발된다는 점을 의미한다. 그리고 Table 3으로부터 보건을 위한 피폭한계 도달시간( $T_{EL}$ )은 30시간 56분(1.856분)으로 확인되었으며 이는 약 31시간 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( $T_{FL}$ )이 실효치 평가결과로는 2시간 30분 그리고 진동피폭량 평가결과로는 1시간 56분으로 진동피폭량 평가 결과가 약 34분 짧게 평가되었다. 그리고, 피폭한계 도달시간( $T_{EL}$ )은 실효치 평가결과로는 10시간 그리고 진동피폭량 평가결과로는 30시간 56분으로 실효치 평가결과가 약 21시간 짧게 평가되었다. 보건의 측면에서 짧게 평가된 피로 효율저감 한계 도달시간( $T_{FL}$ )과 피폭한계 도달시간( $T_{EL}$ )을 각각 사용하는 합리적이라고 사료된다. 즉 시동에서 장주 비행 2회를 포함하는 비행에서 피로 효율저감 한계 도달시간( $T_{FL}$ )은 1시간 56분(약 2시간)을 그리고 피폭한계 도달시간( $T_{EL}$ )은 10시간으로 정하는 것이 조종사들의 건강보호에 보다 긍정적 효과를 얻을 수 있다는 점이다. 그리고 피폭한계 도달시간( $T_{EL}$ )을 10시간으로 설정하는 것은 BS6841:1987에 근거한 12축 전신피폭진동의 한계수준(action level) 도달시간( $T_{15}$ )인 18.9시간 보다 적게 설정한 결과가 되기 때문에 조종사 건강 보호에 보다 효과적인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

이번 실험은 헬기 조종사가 수행하는 업무 중 조종사의 양발, 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 피폭한계(exposure limit) 도달 시간을 각각 평가하였다.

세 조종사의 12축 전신 피폭진동 평균 레벨은  $0.74 \sim 0.79 \text{ m/s}^2$ 의 범위로 나타났으며 이들 평균값은  $0.76$

$\text{m/s}^2$ 이었다. 이들 승차감 지수는 “fairly uncomfortable(상당히 불편한)”라는 어미론적 정도(semantic scale)임이 확인되었다. 그리고 4축 전신 진동 측정치로부터 실효치(rms)와 진동피폭량(VDV) 환산치를 각각 이용하여 보건영향(health effects) 평가를 수행하였다. 우선 피로 효율저감 한계 도달시간이 실효치 평가결과로는 2시간 30분 그리고 진동피폭량 평가결과로는 1시간 56분으로 진동피폭량 평가 결과가 약 34분 짧게 나타났다. 그리고, 피폭한계 도달시간은 실효치 평가결과로는 10시간 그리고 진동피폭량 평가결과로는 30시간 56분으로 실효치 평가결과가 약 21시간 짧게 나타났다. 보건 측면에서 짧게 평가된 피로 효율저감 한계 도달시간과 피폭한계 도달시간을 각각 사용하는 이 합리적이라 판단되었다. 따라서 시동에서 장주 비행 2회를 포함하는 비행에서 피로 효율저감 한계 도달시간은 1시간 56분(약 2시간)을 그리고 피폭한계 도달시간은 10시간으로 정하는 것이 조종사들의 건강보호에 보다 긍정적 효과를 얻을 수 있다고 기대된다.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

- (1) Griffin, M. J., 1989, Handbook of Humanvibration, Academic Press, London.
- (2) 송근식, 1998, UH-1H 조종사의 전신진동 노출에 따른 임무별 비행시간 한계에 관한 연구, 공군사관학교 항공우주공학과 군사대학원 석사논문.
- (3) Cheung, W. S. et al, 1999, “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.
- (4) 김진기, 홍동표, 최병재, 정완섭, 2001, “인체 진동을 고려한 국내의 대중교통 수단의 진동환경 평가에 관한 연구,” 한국소음진동공학회논문집, 제 11권, 제 7호, pp.267~274.