

低音波에 관하여

成 宏 模

(正 會 員)

서울大學校 電子工學科 助敎授(工博)

I. 서 론

공기중의 기체분자들의 탄성적인 진동을 좁은 의미에서 소리(音)로 정의할 수 있다. 소리는 공간적으로 제한된 범위에서 압력이나 부피의 변화등의 교란에 의해 발생하며, 이것이 파동의 형태로 傳播되게 된다. 인간의 청각은 적당한 조건하에서 音壓 즉 교란된 압력의 변화가 靜壓의 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 범위에서 이미 音波를 감지할 수 있다. 음파에 대한 수신기로서의 인간의 청각은 주파수에 따라 그 감도가 다르며 주파수의 변화에 따라 연속적인 변화를 하기 때문에, 가청주파수를 벗어나는 범위 즉 인간청각의 上限 및 下限을 두개의 주파수로 간단히 표시하는 것은 어렵다. 그러나 통상적으로 20Hz~20KHz를 가청주파수의 범위로 잡고 있으며, 따라서“低音波”는 20Hz이하의 음파로 정의할 수 있다.

音波의 주파수가 계속 내려가면 아주 낮은 주파수범위에서는 기상학적인 고기압과 저기압의 발생 및 그의 이동 등도 포함하게 되어 고전적인 의미에서의 音響學의 범위를 벗어나게 된다. 1973년 불란서 파리에서 개최된 국제 저음파 학술대회에서는 이런 이유로 저음파의 주파수 범위를 0.1Hz~20Hz로 제한하기로 제안되었으며 이것이 받아들여졌다.

지난 수년간에 걸쳐 인위적으로 발생된 0~100Hz의 낮은 주파수 범위의 높은 레벨의 소음에 관한 연구가 많았으며 특히 低音波 騒音에 관해서는 여러가지 경우에 관해 보고되고 있다.

II. 低音波의 특성

音響學의 기본이론은 저음파에도 적용되며, 저음파의 특징은 단지 주파수가 매우 낮다는 것 뿐이다. 공기중 음파의 속도를 340m/s로 잡으면 20Hz일때의 파장은 17m이고, 2Hz에서는 파장이 170m나 된다. 이와 같

이 저음파는 파장이 매우 크기 때문에 보통의 건물등과 같은 장애물은 그 傳播에 별로 영향을 미치지 못한다. 즉 장애물에 의한 반사나 산란등이 적게 일어나기 때문에 저음파는 매우 멀리까지 도달할 수 있다.

音波의 傳播에 큰 영향을 미치는 것은 파장에 의한 영향 이외에도 공기중에서 일어나는 音波의 흡수로 인한 감쇠이다. 고전적인 이론에 의하면 기체중 음파의 흡수는 媒質의 粘性과 熱傳導에 의하며, 주파수의 제곱에 비례한다¹⁾. 이 이외에도 공기를 구성하고 있는 질소분자나 산소분자의 분자이완현상(molecular relaxation)이 추가되고, 수증기로 인한 물분자와의 충돌에 의한 영향등으로 대기중의 음파의 흡수는 그림 1에서 보는 바와 같이 주파수와 습도에 따라 크게 변한다. 어쨌든 20Hz이하의 낮은 주파수에서는 공기중 음파의 흡수가 매우 작기 때문에 때로는 수천 km의 거리도 큰 감쇠없이 傳播가 가능하다.

또한 적당한 주파수의 전자파가 지구위의 전리층에서 반사하듯이 저음파는 대기중에 자연적으로 형성되는 고도에 따른 온도분포의 변화로 인하여 그림 2에서 보는 바와 같이 온도변화가 바뀌는 층에서 반사하여 먼 거리까지 도달한다.

이상의 여러가지 이유로 0.1Hz 정도의 낮은 주파수의 음파는 지구를 한바퀴 도는데도 그 에너지의 5%정도만 잃기 때문에 지구를 몇바퀴라도 돌 수 있다. 이런 사실은 이미 1883년 Krakatoa화산이 폭발했을때 발생한 저음파가 지구를 몇바퀴 도는 것이 측정됨으로써 확인되었다.

한편 건물을 구성하고 있는 보통의 벽, 바닥, 천정등은 저음파영역에서 음파에 대한 차폐능력이 대단히 떨어지며, 보통 사용하는 흡음재료도 저음파를 효과적으로 흡수하기가 어렵다. 따라서 한번 발생한 저음파를 傳播과정에서 없애기는 매우 어려우므로 그 발생의

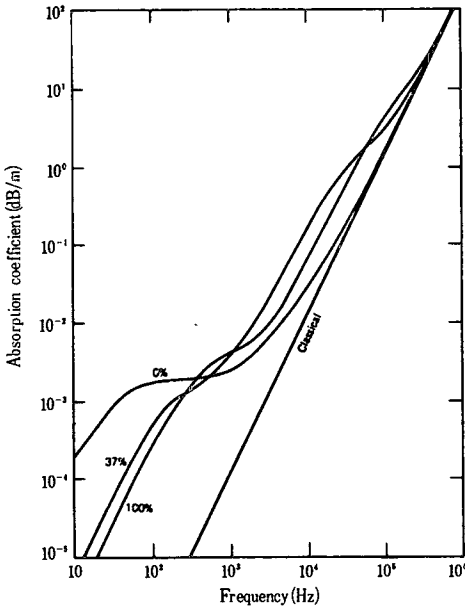


그림 1. 20°C 일때 주파수에 따른 공기중 소리의 흡수

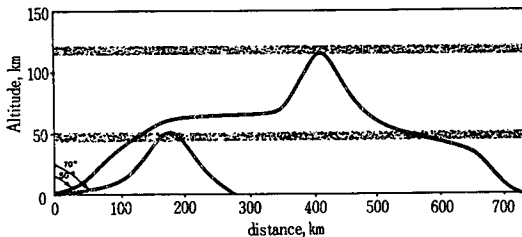


그림 2. 대기층의 온도분포로 인한 저음파의 傳播例

원인이 되는 音源을 제거하는 것이 효과적이다. 왜냐하면 저음파는 대부분의 경우 우리생활에 유용하기 보다는 우리에게 해를 주기 때문이며, 공업기술이 고도화, 대형화함에 따라 低音波源도 점점 많아지고 다양해지기 때문이다.

III. 低音波源

1. 자연적인 低音波源

자연계에서 발생하는 低音波源으로는 천둥, 바람, 화산, 해양의 파도 및 공기의 와류(turbulence) 등 여러 가지가 있다. 또한 일상생활중 자연스러운 인간활동중에 예를 들면 jogging이나 보행중 또는 앉았다가 일어날때 등에도 저음파를 받게 된다. 만일 어떤 사람이 달

릴때 머리의 고도를 15cm정도 변화시킨다면 그로 인한 低音波의 音壓은 90dB(re 20μPa) 정도이며, 수영을 할 때 귀가 7.5cm의 물깊이까지 잠긴다면 140dB의 저음파에 노출시키는 것과 같다. 이와 같은 현상은 승강기를 타올때 등 일상생활에서 많이 일어날 수 있으며 별다른 나쁜영향을 주지 않는다고 할 수 있다. 대부분의 경우 자연적으로 생기는 저음파는 주파수 범위가 2Hz 혹은 그 이하이다¹⁾.

2. 인위적인 低音波源

인간이 기계를 사용한 후부터 低音波의 發生源이 많아지고 있으며 그 예로는

- 난방 및 환기 시스템
- 수송 시스템
- 제트 및 로켓 엔진
- 초음속 비행기
- 대 포
- 분쇄기 또는 선광기계
- 특수 스피커 시스템

등을 들 수 있다. 이들 대부분의 인위적인 低音波源은 자연적으로 발생하는 경우보다 더 큰 세기(intensity)를 갖는 것이 보통이다.

표 1에 자연적 및 인위적인 低音波源을 열거하였고, 그에 의한 음압레벨 및 주파수범위를 보이고 있다.

IV. 低音波의 영향

1. 가청 임계레벨(Hearing Threshold Level)

저음파는 보통 우리 귀에 안 들린다고 말한다. 그러나 여러 연구자에 의해 발표된 결과에 따르면 1Hz까지의 낮은 저음파도 들을 수 있다는 결론에 도달한다. 단지 보통의 가청주파수 범위에서보다는 훨씬 높은 음압레벨에서 이것이 가능하고, 또한 단일주파수의 저음파를 들을 때에도 마치 증기기관차의 “칙-칙”하는 소리처럼 왜곡된 신호로 느껴진다는 것이다. 따라서 인간의 청각이 저음파를 직접 듣는다고보다는 中耳 또는 內耳의 非線型性에 의해 생성된 harmonics를 감지하게 되는 것이라고 볼수 있다¹⁾.

1936년 Bekesy 이후 여러 연구자에 의해 저음파에 대한 가청임계레벨(hearing threshold level)이 조사되었으며 오늘날에는 어느 정도 그 결과가 일치하고 있다. 그림 3에 몇가지 결과를 요약하여 100Hz로 부터 저음파영역에 이르기까지 가청임계레벨이 표시되어 있다¹⁾.

표 1. Summary of some infrasonic sources

Natural			Man-made		
Source	Estimated frequency Hz	Estimated sound pressure level dB	Source	Estimated frequency Hz	Estimated sound pressure level dB
Thunder			<u>Free field</u>		
Earthquake			Jet engines	1-20	135
Ocean waves	< 1		Helicopters	1-20	115
wind: 100 km/h		135	Large rockets	1-20	150
25 km/h		110	Diesel engines	10-20	110
Atmospheric pressure pulsations	< 1	100	<u>Activities</u>		
Volcano	< 1	100	Running	< 2	90
			Swimming	< 2	140
			<u>Riding in:</u>		
			Aircraft	< 2	120
			Submarines	5-20	140
			Rockets	1-20	145
			Automobiles	1-20	120
			Helicopters	5-20	130

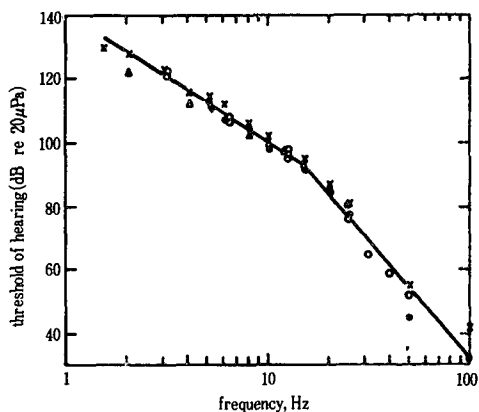


그림 3. Binaural Threshold Data

2. Temporary Threshold Shift^(4,5)

저음파가 우리의 청각에 주는 가장 대표적인 영향은 가청 임계레벨을 일시적으로 높여준다는 것이다. 쉽게 말하면 저음파로 인하여 우리 귀가 잠시 둔해진다 는 뜻이다. 이런 현상은 대략 130dB이상의 저음파에서 발견되었으며, TTS(temporary threshold shift)

가 일어나는 주파수는 3KHz~8KHz로서 인간의 청각이 가장 예민한 주파수 범위가 그 영향을 많이 받음을 알 수 있다. TTS는 저음파가 제거되면 30분~1시간 후에는 보통 정상상태로 회복된다고 알려져 있다.

3. 청각의 손상 및 통증

저음파에 의한 청각의 통증은 中耳의 시스템이 보통의 동작범위를 벗어난 기계적인 변위(displacement)를 하였기 때문에 일어난다. 이런 현상이 일어나는 임계치는 대략 20Hz에서는 140dB, 2Hz에서 162dB, 그리고 훨씬 더 낮은 주파수에서는 175~180dB로 알려져 있다⁽⁶⁾.

Tonndorf는 처음으로 독일 잠수함의 수병중 저음파에 과다히 노출되어 고막이 손상된 것을 알았으며, 계속해서 저음파에 영향을 받을 경우에는 고막에 염증등도 나타났음을 보고하였다⁽⁶⁾. 中耳의 손상은 보통 內耳의 손상도 수반하고 있으며, 이런 청각기관의 손상으로 인하여 영구적인 장애를 가져오는 수가 허다하다.

앞에서 언급한 손상이나 통증이 일어나는 레벨보다 조금 낮은 레벨의 저음파에서도 청각기관에 영향을 주

게 되는데 대표적인 현상이 中耳에 압력을 느끼게 하는 것이다. 이것은 대략 127~133dB의 저음파에서 일어나는 것으로 보고되어 있으며, 저음파가 제거된 후에도 얼마간 지속된다.

4. 균형감각 장애^{4, 6, 7, 8)}

몇몇의 연구자에 의해 저음파가 인간의 균형감각에 장애를 준다는 것이 발표되긴 하였으나 아직 그 결과는 일치하지 않고 있다. 균형감각에 장애를 줄 수 있는 이유는 청각과 균형감각기관이 해부학적으로 바로 인접해서 연결되어 있기 때문이다. 균형의 장애를 가져올 수 있는 저음파의 임계레벨은 보통 130dB 정도로 추산하고 있으나 경우에 따라서는 이미 105dB에서 이런 증상이 일어나는 것이 보고된 바 있으며, 어떤 연구자는 7Hz의 저음파가 특히 큰 영향을 미친다고 주장한 바 있으나 아직까지 어떤 통계적인 확실한 자료는 없다.

5. 혈압, 맥박, 호흡에의 영향¹⁵⁾

우주비행사들에 대한 저음파의 영향을 알기 위해 아폴로 계획이 추진될 당시 여러가지 실험이 실시되었다. 그 결과에 따르면 주파수범위 2~12Hz, 음압레벨 119~144dB에서 실험에 참가한 21명의 젊은 남자중 30% 정도는 1분간 맥박수가 6회 이상 증가하고, 24% 정도는 도리어 6회 정도 감소하였다. 호흡수는 140dB 이상에서 33%정도가 1분간 4회 이상 증가하였다.

전투기 조종사들을 대상으로도 비슷한 실험이 실시된 것으로 보고되었는데 여기서도 혈압, 맥박, 호흡의 변화가 발견되었고 주의력 감소, 신체반응의 둔화, 시간감각의 변화등이 발견되었다.

V. 低音波의 應用

앞 장에서 살펴본 바와 같이 저음파는 인간에게 장애나 손상을 가져오는 것이 보통이기 때문에 그 응용범위도 좁고 應用例도 부정적인 경우가 대부분이다. 제일 처음 저음파에 착안한 것은 제 1차 세계대전중 적의 대포위치를 알기 위해 저음파를 사용한 것이었다. 또한 제 2차 세계대전 중에는 영국과 일본에서 저음파 소음을 군사무기로 사용하는 연구가 있었다는 기록이 있다. 오늘날에도 가끔 이런 "Infrasonic Weapon" 이 거론되고 있으나 이의 실현은 아직 불가능한 것으로 보인다. 왜냐하면 무기로 사용하려면 목표지점에서의 음압레벨이 174dB 정도는 되어야 하는데, 저음파 음원이 250m 떨어진 곳에 위치한다고 가정하면 음원의 파워가 2×10^{11} Watt 정도는 되어야 하고 이것을 실현하

려면 음원의 직경이 1km 정도는 되어야 한다는 어마어마한 계산결과가 나오기 때문이다.

저음파의 응용중 최근 제일 성공을 거둔 것은 소위 "Infracone"을 사용하여 보일러를 세척하는 것이다¹⁶⁾. Infracone은 콤프레서나 송풍기를 사용하여 세척할 보일러에 저음파를 불어 넣음으로써 동작하게 되고 4KW 정도의 전기적 파워로 30MW 정도의 대형 보일러의 내부에 쌓인 먼지나 찌꺼기를 효과적으로 제거할 수 있다. 저음파 음압레벨은 125dB 정도이면 적당하고, 어려운 경우에도 140 dB 정도의 음압이면 세척이 가능하다.

또한 수신된 저음파 신호를 분석하여 이륙 및 비행하는 항공기를 추적하는데 이용되기도 하고¹⁰⁾, 생체신호중 저음파에 해당하는 주파수를 분석하여 의료용에 사용되기도 한다¹¹⁾.

VI. 결 론

저음파는 아직 우리 인간생활에 유용하게 응용되기 보다는 해를 끼치는 경우가 많음을 보았다. 이와 같은 현상은 꼭 저음파 영역에서 뿐만 아니라 그에 인접한 주파수 영역인 20~100Hz에서도 심하게 나타나고 있음이 알려져 있다. 또한 저음파와 관련된 저주파 진동은 직접 우리 신체에 작용하여 신체의 구조상 결정되는 여러기관이나 신체부위 사이의 역학적인 공진주파수를 여기(excite)시켜 해를 줄 수가 있다.

스웨덴의 직업안전위원회에서는 저음파로부터 인간을 보호하기 위해 구체적으로 다음과 같은 제안을 하고 있다¹²⁾.

- 주파수범위 2~20Hz의 저음파에 대한 노출 상한 레벨은 110dB.
- 최대 노출 허용시간은 하루에 8시간.
- 하루에 1시간 이내 노출시는 최대 허용레벨은 130dB.

참고로 공장소음, 운송수단 및 기타 騒音源에 대해 여러 연구자에 의해 측정된 평균 저음파레벨과 A-加重 음압레벨이 표 2에 요약되어 있다. 가정주파수에서 우리 귀의 주파수에 따른 감도를 대표적으로 고려한 A-加重 음압레벨과 저음파레벨은 늘 비례하지는 않는다는 것을 표 2에서 볼 수 있다.

부득이한 이유로 높은 레벨의 저음파에 노출되는 경우에는 청각기관을 보호하여야 한다. 보통 가정주파수의 소음방지에 사용되는 커덕개(earmuff)는 그림 4에서 보는 바와 같이 저음파영역에서는 소음차폐능력이 거의 없고 도리어 공진 현상에 의한 증폭이 일어나기

표 2. 여러가지 騒音源의 저음파레벨과 A-加重 음압 레벨

Source	Infrasound level dB(L)	SPL dB(A)
<u>Industries</u>		
Roasting factory, factory/premises/ovens	109	96
Ironworks, caldoooven/rotating	103	99
Electric furnace	117	102
Oil burner for cast iron mould heating	115	102
Mine, lift shaft	100	(80)
Combined power and heating plant in the furnace room	96	94
Compressor room	115	107
Crush-asphalt plant	94	97
Pulverizing mill (underground)	121	104
Water power plant (underground)	130max	78
	at 1.5Hz	
<u>Gas turbine hall</u>	109	112
Frame saw	98	95
Pulp industry (drum barker)	112	108
Paper printery, DN-newspaper press	85	103
Combined heating and power plant (Hasselby) machine hall	82	87
<u>Ships</u>		
Tank vessel 30T, tone at the air inlet by the commando station	116	74
	111	77
Torpedo boat, machine room	107	70
<u>Vehicles</u>		
Passenger car Citroen open side window c	126	75
Passenger car VW type I open side window	126	83
Train SJ in the sleeping compartment with open window	107	55
Aircraft SAS Caravelle	96	84
Aircraft SAS DC-9	93	93
Diesel loading machine	103	96
Diesel locomotive (ideling, side window open)	105	77
Electric locomotive (uphill) DM3	111	86
<u>Miscellaneous</u>		
Underground room, ventilation system	90	89
Lecture room, ventilation system	90	60
Kakriästornet (outlook tower 155m high)	89	69
Apartment building, 23rd floor	84	56
Office	97	52
Office, ventilation system	80	39
Audiological center, Sala	77	34
Audiological center, Västerås	74	22
Office in a quiet urban area	53	33

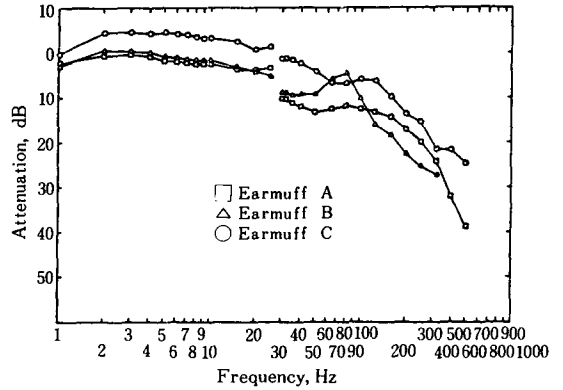


그림 4. 귀덮개의 저음파 및 낮은 주파수 가청음파에 대한 소음 차폐성능

도 한다. 따라서 귀덮개 보다는 귀마개(earplug)가 좋 으며 두가지를 모두 사용하는 것이 더욱 효과적이다.¹⁶⁾ 그러나 앞서 언급한 바와 같이 저음파소음으로부터 인 간을 보호하는 것보다는 가능한 한 低音波源이 생기지 않도록 노력함이 가장 중요한 것이다.

參 考 文 獻

- [1] Kinsler, L.E. et al.: Fundamentals of Acoustics. J. Wiley, New York, 1982.
- [2] Johson, D.L.: Infrasound, its sources and its effect on man. Aerospace Medical Research Lab. 1976.
- [3] Yeowart, N.S. and Evans, M.J.: Threshold of audibility for very low-frequency pure tones. JASA 55 (1974) p. 814.
- [4] Von Gierke, H.E. and Nixon, C.W.: Effects of intense infrasound on man. Infrasound and Low Frequency Vibration (W. Tempest, Editor) Academic Press, London, 1976.
- [5] Alford, B.R. et al.: Human tolerance to low frequency sound. 1966.
- [6] Broner, N.: The effects of low frequency noise on people-A review. J. Sound & Vibr. 58 (1978) p. 483.
- [7] Evans, M.J. et al.: Clinical application of low frequency sound. Sound 5 pp. 47, 1971.
- [8] Harris, C.S. and Johnson, D.L.: Effects of infrasound on cognitive performance.

- Aviat. Space and Environ. Med. 49 (1978) p. 582.
- [9] Olsson, M.: Practical applications of infrasound. Cleaning of boilers with Infra-fone. Infrasonik AB Conf. Finspong, Sweden 1982.
- [10] Fasbender, J.: Research on the directional location of infrasound waves-measurements on jet planes. Acustica 45 (1980) p. 169.
- [11] Anastassiades, A.J. and Petounis, A.D.: Infrasonic analysis of carotid vibration as a diagnostic method in carotid insufficiency syndrome. 1976.
- [12] Arbetarskyddsstyrelsens anvisningar nr 110:1, 1978 Infraljud och ultraljud i arbetslivet *

◆ 用 語 解 說 ◆

Disk, Fixed-head(고정 헤드 디스크)

각 트랙마다 헤드가 있어서 특정한 트랙에 도달하기 위해서 헤드를 움직일 필요가 없는 디스크를 말한다. 이런 디스크에서는 특정한 섹터로 가기 위해서 헤드를 움직일 필요가 없기 때문에 접근 속도가 빠른 반면, 보다 많은 헤드와 전자 장치가 필요하기 때문에 값이 비싸다.

Debugging(오류 수정 작업)

프로그램이나 장비에서 나타나는 모든 비정상 동작 혹은 잘못을 옳게 수정하는 작업

User Area(UA) : 사용자 구역

반영구적인 자료가 저장되는 디스크상의 영역, 또한 이 영역은 프로그램과 부프로그램, 서브루틴을 저장하기 위해서도 사용된다. 이 영역은 컴파일러와 트랙, 섹터 정보등 기록되지 않는 것들을 가지는 지정된 영역과 대조된다.

TLU(Table Look Up) : 테이블 조사

컴퓨터에 기억된 함수값 표에서 주어진 혹은 원하는 변수에 해당하는 함수값을 찾는 것

Timing Error(타이밍 오류)

프로그램과 테이프간의 전달 속도에 보조가 맞지 않아서 생긴 오류나 앞의 명령이 완전히 수행되기 전에 새로운 동작이나 선택 명령이 내려져서 생기는 오류

Queue(대기행렬 : 큐)

처리기에 의하여 처리되기를 기다리고 있는 일들의 집단이나 대기 행렬. 일반적으로 주기억 장치속에 들어 있으며 번지 지정어에 의하여 서로 연결되어 있다.

Peripheral Devices(주변장치)

중앙 컴퓨터의 제어하에 있으나 중앙 컴퓨터의 일부가 아닌 다양한 장치. 주변 장치는 컴퓨터의 데이터를 표시하거나, 데이터를 저장하였다가 되돌려 주거나, 사용자에게 데이터를 준비하거나 또는 외부에서 데이터를 얻어 컴퓨터가 사용할 수 있는 형태로 변환한다. 카드 판독기, 카드 천공기, 자기 테이프, 라인 프린터 등이 있음

Pop(팝)

스택의 끝에서 정보를 제거하고 스택에 저장된 다음 부분의 정보를 액세스할 수 있도록 해두는 스택 처리 과정. 일반적으로 이 과정은 스택 포인터 레지스터의 값을 변화시켜서 기억 장치에 저장된 데이터 화일에 있는 데이터의 다음 부분의 값을 지시하게 된다.