

대구경 사격소음 전달 영향인자에 대한 실험적 분석

Experimental Analysis about Influence Parameters at the Propagation of Large Arm's Firing Noise

김 응 수[†]
Eung-Su Kim

(Received April 5, 2016 ; Revised June 21, 2016 ; Accepted June 21, 2016)

Key Words : Impulsive Noise(충격소음), Large Arm's Firing Noise(대구경 사격소음), Noise Propagation(소음전달)

ABSTRACT

The firing noise produced at artillery test range or military training ground is impulsive burst noise which energy is generated within tens of milliseconds and distributed an isolated burst of sound energy separated to one by one noise. The long range propagation of this noise is affected by a caliber of gun, amount of propellant, distance between source and receiver, ground and meteorological condition. In this paper, main influence parameters have been described based on experimental analysis of measured data. It is considered that this analysis result can be used as useful materials for study of effective firing noise management and development of propagation model.

1. 서 론

지상 무기체계 시험장이나 군 훈련장에서 발생되는 대구경 포 발사 소음은 음향에너지가 수십 밀리초 이내에 발생하는 파열적인 충격성 소음(impulsive noise)이며 수 초 이상의 발생 간격을 갖고 있어 각각의 소음을 분리할 수 있는 분리충격소음(an isolated burst of sound energy)으로 분류된다. 포 발사소음은 여타의 충격소음과 달리 높은 발생 강도로 인해 원거리까지 전달되며 소음의 크기에 따라 구조가 취약한 민간인 지역의 건물진동 유발과 갑작스런 발생에 의한 심리적 불안감을 조성하여 쾌적한 생활 환경을 침해하는 민원요소로 작용하기도 한다. 광범위하게 전달되는 포 발사 충격소음의 크기는 포의 구경과 장약의 양에 의한 소음원의 크기, 소음원과

수음점간의 거리, 소음전달경로의 지형적인 특성 및 매질 그리고 기상상태에 따라 큰 변화를 갖는다. 특히 빈번하게 바뀌는 기상상태는 소음전달 특성에 매우 큰 영향을 주며, 소음지도 작성을 통한 소음예측 결과에 주 오차요인으로 작용한다.

이 논문에서는 소음원의 크기를 최대한 동일한 조건으로 하여 155 mm K9 자주포 사격 시 발생하는 포 소음을 대상으로 소음전달에 영향을 미치는 영향인자(influence parameter)들에 대한 실험적 분석결과를 기술하였다.

2. 소음 전달 영향인자

2.1 구조적 인자

(1) 지형적 영향

소음원부터 수음점까지 소음이 전달되는 경로에

[†] Corresponding Author; Member, Agency for Defense Development
E-mail : eungsu23@add.re.kr

[‡] Recommended by Editor Myung Jun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

서 지형적인 전달 영향인자로는 두 지점간 거리, 음의 흡수 및 반사에 영향을 주는 지면의 매질, 전달 경로상의 장애물의 유무 및 형상 등이 있으며, 이러한 영향인자는 소음전달에 있어서 감쇠에 영향을 미친다⁽¹⁾. 식 (1)~(3)은 ISO9613-2의 감쇠식을 나타낸 것이다. 식 (1)에 의하면 소음원부터 수음점까지의 거리(d)가 2배 멀어지면 6 dB가 감쇠함을 알 수 있다.

$$A_{div} = 10\log(4\pi d^2) = 20\log(d) + 11 \text{ [dB]} \quad (1)$$

단, 포 발사 시 발생하는 폭발과 형태의 충격소음인 경우, 미소(infinitesimal) 진폭과인 일반 환경소음과 달리 높은 진폭을 가진 유한(finite) 진폭과로서 초기에는 비선형(non-linear) 전달특성⁽²⁾을 보이며, 약 600 Pa 이하의 지점부터 식 (1)과 같은 선형 감쇠특성을 갖는다.

식 (2)는 흡수성이 강한 지면조건에서의 감쇠식이며, 그 값은 전달경로에서 지면으로부터의 높이(h_m)와 거리에 의해 결정된다. 지면에 의한 감쇠특성은 Fig.1과 같이 매질의 형태에 따라 주파수별 반사 및 흡수특성이 달라진다⁽³⁾.

$$A_{ground} = 4.8 - \frac{2h_m}{d} \left(17 + \frac{300}{d}\right) \geq 0 \text{ [dB (A)]} \quad (2)$$

식 (3)은 장애물에 의한 감쇠식으로서 지면 반사 효과(C_2)의 유무, 굴절의 수(C_3), 음의 파장(λ), 굴절경로와 직접경로간 차(z) 그리고 기상효과 보정계수(K_w)에 의해 결정된다.

$$A_{barrier} = 10\log\left(3 + \frac{C_2}{\lambda} C_3 z K_w\right) \text{ [dB]} \quad (3)$$

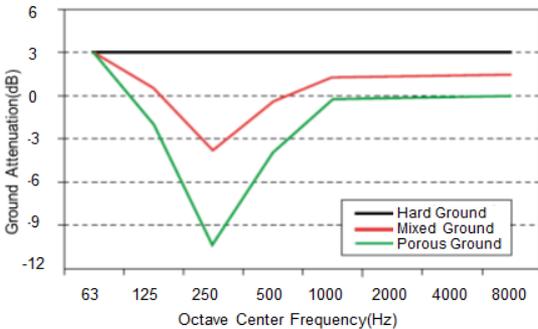


Fig. 1 Example of ground effect

(2) 소음원의 방향성(directionality)

포 발사소음의 경우, 소음은 탄의 발사방향(0°)을 기준으로 Fig.2와 같이 강한 방향성을 갖고 전달되며, 이러한 방향성은 포구제퇴기(muzzle brake)의 구조적 형상 및 장착 유무에 따라 서로 다르게 형성된다⁽⁴⁾. Fig.2에서 보는 바와 같이 수음점이 발사 방향을 기준으로 소음원의 후방(180°)에 위치할수록 전달되는 소음의 크기가 작아짐을 알 수 있다.

2.2 기상 인자

(1) 온도에 의한 영향

소음은 대기중에서 전달될 때 기상상태에 따라 하강방향(downward) 또는 상승방향(upward)으로 전달되는 음의 굴절(refraction)에 영향을 받는다. 이러한 굴절은 낮과 밤의 서로 다른 수직 온도의 경사도(temperature gradient)에 의해 발생되며, 원거리 수음원으로 전달되는 음의 세기에 큰 편차를 발생시킨다. Fig.3은 수직 온도 경사도에 따른 음의 굴절을 보여주는 것으로서 (a)와 같이 밤에는 지면의 온도가 대기온도보다 낮아지면서 양(positive)의 경사도를 보이며 소음의 굴절은 하강방향으로 진행된다⁽⁵⁾.

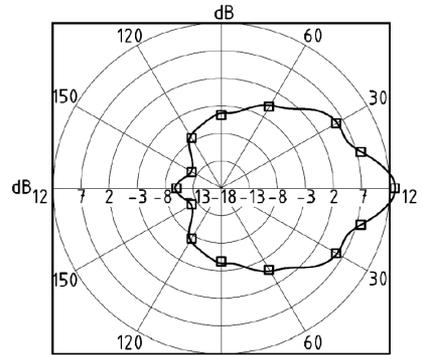


Fig. 2 ISO 17201-1 measured radiation pattern

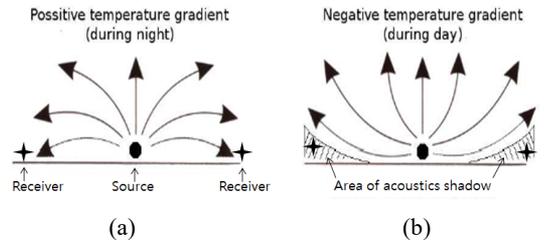


Fig. 3 Influence of temperature gradient

또한 (b)와 같이 낮에는 대체로 지면의 온도가 높아 음(negative)의 경사도를 보이며 소음의 굴절은 상승방향으로 진행된다. 즉, 같은 에너지를 갖는 소음원일지라도 굴절방향에 따라서 낮보다는 밤에 더 많은 에너지가 수음점까지 전달된다.

(2) 풍향 및 풍속에 의한 영향

대기중에서 전달되는 소음의 굴절은 풍향 및 풍속에 의해서도 영향을 받는다. Fig. 4의 (a)에서 보는 바와 같이 수직풍의 풍속이 양의 경사도(positive wind velocity gradient)일 경우, 바람의 진행방향으로 하강하는 굴절이 일어나며, (b)와 같이 음의 경사도일 경우, 바람의 진행방향으로 상승하는 굴절이 일어난다⁽⁵⁾. 따라서 바람이 소음원으로부터 수음점으로 진행하고 풍속이 양의 경사도일 경우, 상대적으로 높은 크기의 소음이 수음점에 전달된다.

한편 해안지역에서는 지면과 해수의 온도차에 의해서 해륙풍이 발생하는데, Fig. 5에서 보는 바와 같이 낮 동안 바다에서 육지로 부는 해풍의 풍속은

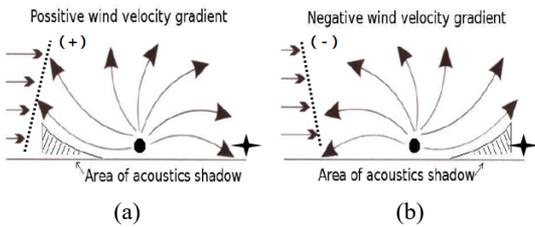


Fig. 4 Influence of wind gradient

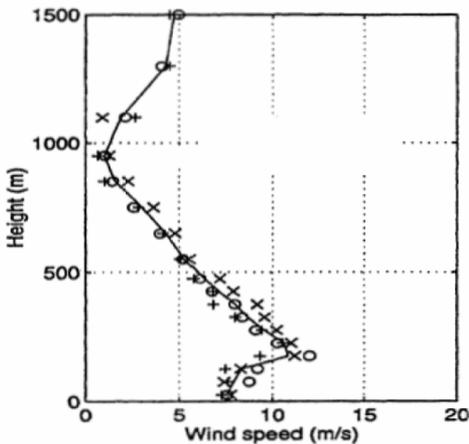


Fig. 5 Typical wind speed for a sea breeze

낮은 고도(250 m 이하)에서 강풍인 하층제트(low level jet)가 발생됨을 알 수 있다⁽⁶⁾. 이러한 풍속의 변화는 Fig. 4의 (a)와 같이 양의 경사도를 형성하며 하강방향으로 음의 굴절을 일으킨다.

3. 측정 자료의 분석

3.1 대상 소음원 및 수음점 위치

포 발사 충격소음은 Table 1에 나타난 소음원에 대해서 12개월 동안 측정되었다.

측정장비는 Bruel&Kjaer사의 3639-C NMT이며, 청감보정회로는 A특성, 동특성은 빠름(fast) 모드로 측정하였다. 소음원(source)과 수음점(receiver)은 각각 2개소이며, 그 위치와 포의 사격방향은 Fig. 6과 같다. 여기서 소음원을 기준으로 약 90°에서 230° 방향은 해수에 해당되며, 나머지는 해발 100 m 미만의 산지와 농지로 이루어져 있다.

3.2 수음점에 따른 전달소음의 크기변화

소음원과 수음점 사이의 거리는 동일하지만 소음 전달경로의 지형과 소음원의 방향성에 의해서 전달 최고소음(L_{max})의 평균은 Table 2에서 보는 바와 같이 소음원-1(S_1)과 수음점-1(R_1)의 평균 최고소음을 기준으로 최대 4.8 dB(ΔL_{max})의 차이를 보였다. σ 는 12개월 동안 각 소음원으로부터 수음점에 전달

Table 1 Information of the noise source

Object	Propellant
155 mm K9	K676 and K677

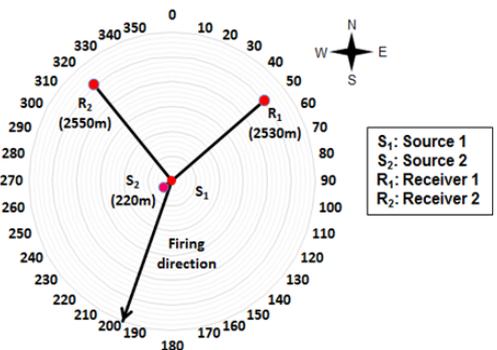


Fig. 6 Location of sources and receivers

된 최고소음의 표준편차를 나타낸 것으로 5.4 dB에서 5.7 dB 사이의 값을 갖는다.

수음점에 전달된 최고소음의 최대 편차는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 ±15 dB까지 크게 나타났다. 가로축은 평균 최고소음 기준 소음의 편차이며, 세로축은 시험 횟수를 나타낸다. 1회 시험에 총 10발에서 26발의 사격을 약 3분에서 5분 간격으로 수행하며, 전달 최고소음이 각 소음점 및 수음지 간 평균 최고소음을 기준으로 ±5 dB 이내의 값을 갖는 비중은 연간 시험횟수의 70%에서 74%를 차지한다.

3.3 기상인자에 의한 영향

포 발사 충격소음은 Table 1에 나타낸 소음원에 대해서 12개월 동안 측정되었다.

(1) 지면기상에 의한 영향

각 수음점에 전달되는 최고소음과 소음원 S₁으로부터 200 m 이격된 거리에서 수집된 기상자료(WXT520)를 대상으로 Pearson 상관분석법을 사용하여 변수 간 선형성을 나타내는 상관계수(coefficient of correlation)를 계산하였다. 분석결과는 Table 3과 같으며, 수음점 R₂에서 지면풍의 풍향과 관계에서 -1에 가까운 음의 상관관계를 보였으며, 나머지는

Table 2 Average L_{max} distribution at receivers(ref: S₁-R₁)

Source	Receiver	ΔL _{max} [dB]	σ [dB]
S ₁	R ₁	0(ref)	5.37
	R ₂	-4.6	5.13
S ₂	R ₁	-0.1	5.74
	R ₂	-4.8	5.25

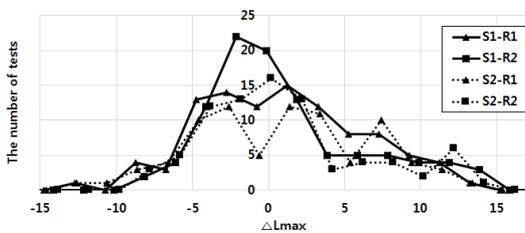


Fig. 7 Difference from an each average L_{max}

무상관(0)에 가까운 값을 갖는다.

Table 3의 분석결과를 토대로 Fig. 8은 수음점 R₂에서 1 m/s에서 5 m/s 풍속 범위와 평균 최고소음 기준 -4 dB 이하의 저소음 및 6 dB 이상의 고소음 분포에서 풍향에 의한 전달 최고소음의 차이를 분석하였다.

Fig. 8에서 3 m/s에서 5 m/s의 강한 바람이 불 경우, 풍향에 의한 전달 최고소음의 차이는 Fig. 9와 같으며, Table 4에서 보는 바와 같이 평균기준 최대 13.0 dB까지 전달 최고소음이 증가되었다.

Table 3 Coefficient of correlation with L_{max}

Receiver	Temperature	Humidity	Pressure	Wind speed	Wind direction
R ₁	-0.16	0.20	-0.15	0.22	-0.11
R ₂	-0.11	0.28	-0.09	-0.02	-0.59

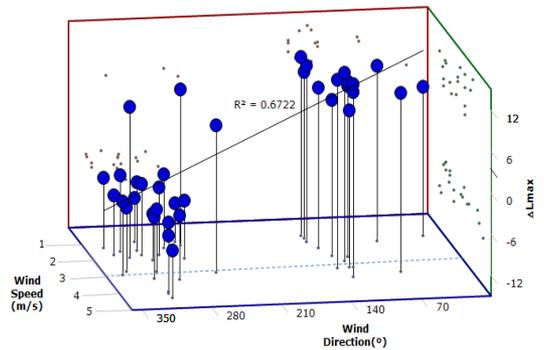


Fig. 8 Influence by horizontal wind direction at R₂

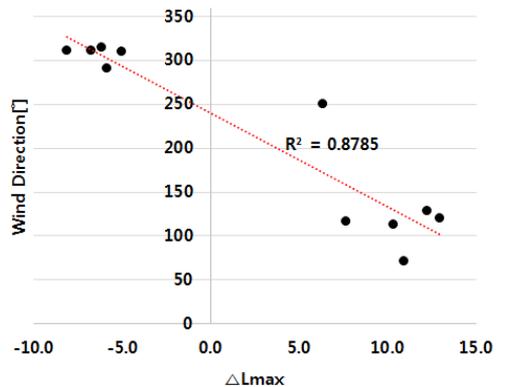


Fig. 9 Influence by horizontal wind direction at 3 m/s ~ 5 m/s

(2) 수직기상에 의한 영향

수직기상에 의한 영향을 분석하기 위하여 동일 소음원으로 부터 두 수음점 모두 평균 최고소음 이상 측정된 시점의 라디오존데(radiosonde) 측정 자료를 분석하였다. 라디오존데란 고도에 따른 온도, 상대습도, 기압, 풍향 및 풍속을 측정하는 장비로 헬륨을 주입한 풍선에 연결되어 지상으로부터 최대 30 km 고도까지 측정이 가능하다. 실험에 사용된 라디오존데는 VAISALA사의 RS-92SGP로서 온도 및 습도, 기압은 각 센서로부터 수집되며, 풍향 및 풍속은 GPS 수신장치에서 수집된 위치 자료로부터 추정된다.

Fig. 10에 의하면 음이 하강방향으로 굴절되는 수직온도 역전(inversion)층⁽⁷⁾이 1 km 이하의 고도에서 나타남을 알 수 있다.

역전층이 크게 나타난 2014년 5월 29일(140529) 과 2015년 6월 12일(150612)에는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 역전층이 발생된 고도에서 수직온도가 이슬점 온도와 가까워지면서 대기의 수증기가 응결되어 해무(sea fog)가 발생되었다.

Fig. 12와 Fig. 13은 고도에 따른 수평방향의 바람 세기 및 변화 속도(horizontal wind shear)를 나타낸

Table 4 Maximum variation of ΔL_{max} [dB] at 3 m/s ~ 5 m/s

Wind direction \ Receiver	R ₂
70° ~ 130°	13.0
290° ~ 320°	-8.1

것으로서 2014년 4월 22일(140422), 2014년 4월 27일(140427), 2015년 6월 12일(150612)에 수직온도의 역전층이 발생하는 고도 부근에서 하층제트가

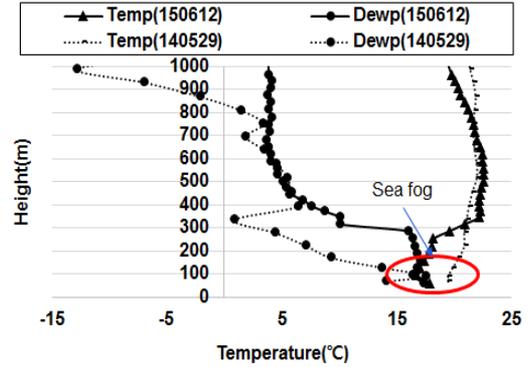


Fig. 11 Dew point and temperature gradient at high inversion

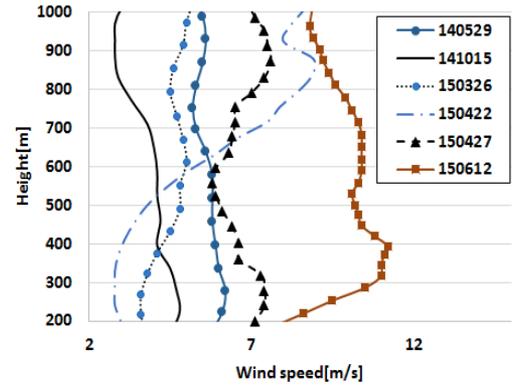


Fig. 12 Horizontal wind speed

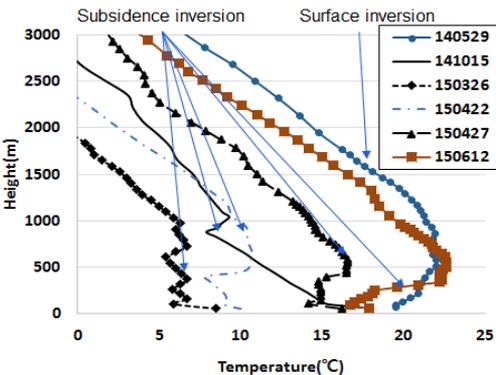


Fig. 10 Temperature gradient for downward noise propagation

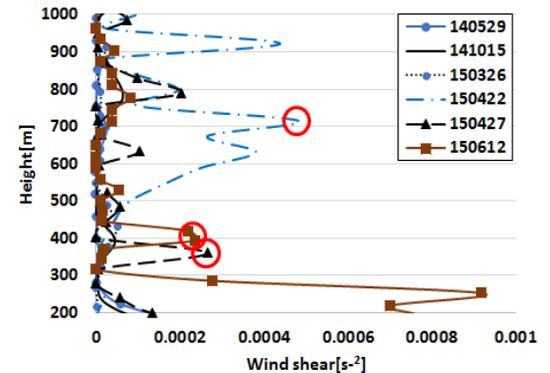


Fig. 13 Horizontal wind shear

각각 발생되었음을 알 수 있다.

Fig. 10에서 Fig. 13에 의하면 수직온도의 역전층은 발생하지만 풍속의 변화가 두드러지지 않은 경우, Table 5처럼 전달 최고소음의 편차는 구름 또는 해무가 있는 저기압 상태에서 매우 크게 나타나며, 평균기준 최대 9.8 dB까지 최고소음이 증가되었다.

수직온도의 역전층이 발생하는 고도 부근에서 수평방향의 풍속변화가 큰 경우, Table 6처럼 전달 최고소음이 평균기준 최대 10.8 dB까지 증가하였다.

3.4 시뮬레이션 결과

(1) 소음원의 파워레벨 추정

소음원(S₁)으로부터 약 280 m 이격된 거리에서 소음의 전달크기를 측정하였으며, Bruel&Kjaer사의 Acoustic Determinator 프로그램을 사용하여 Table 7과 같이 추정하였다.

(2) 수음점 전달소음 추정

추정된 소음원의 파워레벨과 수치 지형지도를 적

용하여 수음점에 전달되는 소음의 크기를 추정하였다. 사용된 소프트웨어는 Bruel&Kjaer사의 Predictor-LimA이며, 전달모델은 ISO-9613이다. 추정결과는 Fig. 14와 같다.

추정 결과값(L_{eq})의 소음단위를 순간 최고소음(L_{max}) 단위로 변환하기 위하여 두 수음점에서 측정된 자료를 대상으로 단위 변환함수를 Fig.15와 같이 추정하였다.

Fig. 15의 변환관계식을 적용하여, Fig. 14의 각 수음점의 추정 결과값(simulated ΔL_{eq})을 순간 최고

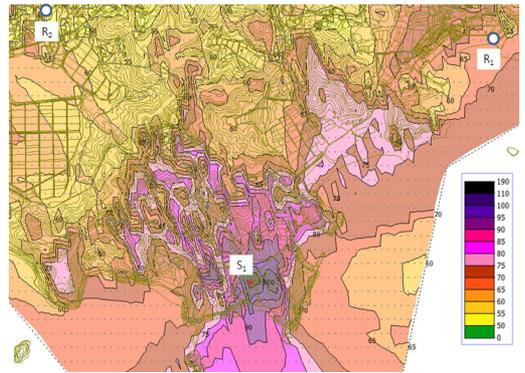


Fig. 14 Simulation result

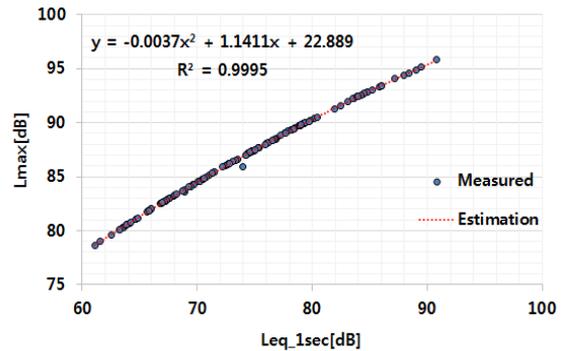


Fig. 15 Estimation function between L_{eq} and L_{max} of firing noise

Table 5 Variation of ΔL_{max} by temperature inversion

Date	ΔL _{max} [dB]	Pressure(hPa), cloud
2014.05.29	9.8	999.1, sea fog
2014.10.15	7.1	1008.7, clear
2015.03.26	7.1	1023.3 clear

Table 6 Variation of ΔL_{max} by additional horizontal wind shear

Date	ΔL _{max} [dB]	Height of wind shear[m]	Height of temperature inversion[m]
2015.04.22	9.1	710	400~500
2015.04.27	10.8	360	400~450
2015.06.12	8.2	390	250~350

Table 7 Estimation of source power level[Lwr(A)]

Freq[Hz]	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Total
Lwr(A)	178.8	171.6	166.4	162.9	160.9	157.0	155.1	155.1	166.6	180.2

Parameters

Sound character: impulse sound(occasional sound bursts)

Air absorption: HMRI-II.8

Ground attenuation: half sphere

Table 8 Estimation result of noise propagation at receivers[dB]

Source	Receiver	Measured	Simulated	
		ΔL_{max}	ΔL_{eq}	ΔL_{max}
S ₁	R ₁	0(ref)	-15.7	-0.3
	R ₂	-4.6	-26.3	-7.5

4. 결 론

이 논문에서는 155 mm K9 자주포 사격 시 발생하는 포 발사소음을 대상으로 소음전달에 영향을 미치는 영향인자(influence parameters)들에 대한 실험적 분석결과를 기술하였다.

분석결과, 기상상태에 의한 영향으로 동일 소음원에 대한 개별 최고소음은 ±15 dB의 큰 편차를 보였다. 수음점 방향으로 3 m/s에서 5 m/s의 풍속으로 바람이 불 경우, 평균 기준 최대 13.0 dB까지 전달 최고소음이 증가하였으며, 저기압 상태에서 수직온도의 역전층이 발생하거나 수직온도의 역전층과 함께 수평방향의 풍속변화가 크게 발생하는 경우, 음의 굴절에 의해 최대 10.8 dB까지 증가하여 영향도가 가장 높은 것으로 확인되었다.

시뮬레이션에 의한 검증은 다음과 같다. ISO-9613 모델을 적용한 소음전달크기의 예측결과는 측정된 평균 전달소음 기준 최대 2.9 dB의 차이를 보였다. 굴절현상에 의한 고소음 전달특성은 측정된 수직온도 프로파일을 대상으로 ray theory에 적용한 결과, 수음점 지점에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

References

- (1) STN ISO 9613-2:2006 Acoustics, Attenuation of Sound During Propagation Outdoors Part2: General Method of Calculation.
- (2) Frits van der Eerden, Frank van den Berg, 2010, The Acoustic Source Strength of High-energy Blast Waves: Combining Measurements and A Non-linear Model, Proceedings of 20th International Congress on Acoustics.
- (3) Hannah, L., 2006, Ground, Terrain and Structure Effects on Sound Propagation, New Zealand Acoustics, Vol. 20, No. 3, pp. 22~29.
- (4) STN ISO 17201-1:2005 Acoustics, Noise from Shooting Ranges Part1: Determination of Muzzle Blast by Measurement.
- (5) Drahos, M. and Drahos, R., 2012, Influence of Meteorological Conditions on Propagation of Sound, University of Kosice's Technical Documentation.

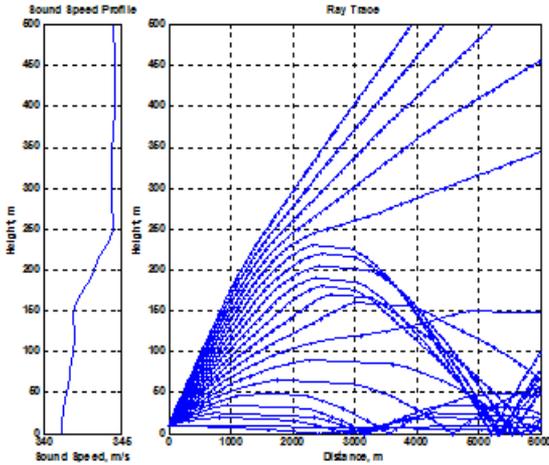


Fig. 16 Simulation result of sound refraction due to temperature inversion(150612)

소음 단위(simulated ΔL_{max})로 변환한 결과 및 측정된 순간 최고소음의 평균(measured ΔL_{max})은 Table 8과 같다. 수음점 R₁ 및 R₂에서의 순간 최고소음 측정 평균값과 시뮬레이션에 의한 추정값 간 편차는 0.3 dB 및 2.9 dB의 편차를 보인다.

(3) 수직온도에 의한 음의 굴절

대기온도(T)와 음속(c)의 관계는 식 (4)와 같으며⁽⁸⁾, 고도에 따른 음속의 변화로써 발생하는 굴절현상에 대한 추정은 ray theory⁽⁹⁾를 기반으로 결과를 얻었다.

$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}, c_0 = 343 \text{ m/s and } T_0 = 293 \text{ K} \quad (4)$$

Fig. 16은 Fig. 10의 “150612” 수직온도 프로파일을 대상으로 역전층에 의한 음의 굴절현상을 추정할 것으로, 소음원로부터 수음점까지 거리에 해당되는 2500 m 지점 부근에서 굴절된 음이 전달되는 것을 추정할 수 있다.

(6) ISSN 1651-5536,2003, Sound Propagation Around Off-shore Wind Turbines.

(7) Wilson, D. K., Pettit, C. L. and Ostashev, V. E., 2015, Sound Propagation in the Atmospheric Boundary Layer, Acoustics Today, Vol. 11, No. 2, pp. 44~52.

(8) Oliveira, A. P., 2012, The Effect of Wind and Turbulence on Sound Propagation in The Atmosphere, Master Degree's Paper of Technical University of Lisbon.

(9) Urlick, R. J., 1983, Principles of Underwater Sound 3rd ed, McGraw-Hill, New York.



Eung-Su Kim received B.S. degree in the Dept. of information and communication engineering from Sungkyunkwan University and M.S. degree in the Dept. of electrical and computer engineering from Korea University. He is currently a senior researcher at Agency for Defense Development.