수중 폭발음의 에너지 스펙트럼

Energy Spectrum of Underwater Explosive Sound

김 성 부*

(Sung Boo Kim)

요 약

수중폭발음의 Energy spectrum 분석에 보다 정밀한 이론적 뒷받침을 하기 위하여 폭발음의 파형에 Gaussian formula를 도입하였으며 이 파형에 따른 Energy spectrum 모델을 새로이 유도하였다.

Impulse formula를 이용한 Weston 모델이 낮은 폭발 에너지나 음원의 작동수심이 깊을 경우 이론적 모델로서 한계성을 갖는데 비해 이 모델은 이러한 조건에서도 실험결과와 잘 일치되고 있음을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

A New theoretical energy spectrum model for underwater explosive sound is introduced in order to calculate the precise spectral energy levels.

This model is obtained by Fourier analysis of Gaussian formula which accurately represents the pressure wave generated from Underwater explosions.

In case that explosive energy is very low The spectrum levels which are obtained from the new theoretical model are in good agreement with the experimental spectrum levels, while the Weston model using impulse formula cannot interpret the experimental results.

I. 서 론

수중폭발음이 해저탐사와 같은 해양조사나 해양의 음향학적 특성조사, 또는 수중표적물의 탐지를 위한 음원으로 널리 이용되어 왔다. 주로 폭약이나 airgun, 그리고 전기방전에 의한 spark system 등으로 부터 발생하는 수중폭발음의 이용에는 재현성이 없고 짧은 펄스폭으로 인한 신호처리에 어려움이 따르는 등의 몇가지 단점이 따르긴 하지만 무엇보다 간단하면서도 넓은 주파수 영역에서 고출력을 얻을 수 있다는 장점이 있다.[1] 특히 고출력의 저주파음은 깊은 해저저층에 관한 정보획득이나 장거리에 있는 수중표적물을 탐지함에 있어 매우 효과적이다.

일반적으로 수중폭발에 의한 음압은 최초의 충격파(shock wave) 발생에 이어 기포들의 진동에 의한 bubble pulse들로 구성되는데 이들의 발생과정과 제반특성에 관해서는 오래전부터 Arons, Weston 등에 의해 많이 규명되어져 왔다.[2-6] 특히 Weston에 의해 제시된 주파수 분석에 관한 이론적 모델은 폭약의 무게, 그리고 음원의 작동수심에 따른 Energy spectrum level을 미리 예측할 수 있게 함으로써 이들 음원의 사용에 그 효율성을 한결 더 높일 수 있었다.

그러나 이 이론적 모델이 실험결과와 비교적 잘

* 국립부산수산대학교 응용물리학과

일치되고 있음에도 불구하고 몇가지 제한점을 안고 있다. 이를테면 깊은 수심에서 작동시키거나 또는 폭발에너지가 낮을 때 나타나는 현상, 즉 pulse 들의 시정수(time constant)에 비해 pulse간의 간격이 매우 크지 않을 때 이 이론적 모델은 그때마다 수정을 가하거나 수치해석적인 방법을 동원하지 않으면 정확한 Energy spectrum level을 산출할 수가 없었다.(7)

본 논문에서는 이러한 점을 보완하기 위하여 수중폭발음에 근접된 파형으로 부터 유도되는 새 이론적 모델을 제시하고, 기존모델과의 비교검토및 낮은 폭발 에너지에 의한 실험 결과치와 비교 분석하려 한다.

Ⅱ. Weston 모델

수중폭발음의 파형은 shock wave와 bubble pulse 들의 양의 압력(positive pressure)과 이들 사이에 있는 음의 압력(Negative pressure)으로 구성되어 있으며 shock wave(P_s)와 bubble Pulse(P_b)들의 압력파형은 이미 잘 알려진대로 (1), (2)식으로 표시 가능하다.

$$P_s(t)=P_0\, e^{\frac{t}{\tau_0}} \tag{1}$$

$$P_b(t)=P_1\, e^{-\frac{|t-T_1|}{\tau_1}} \tag{2}$$

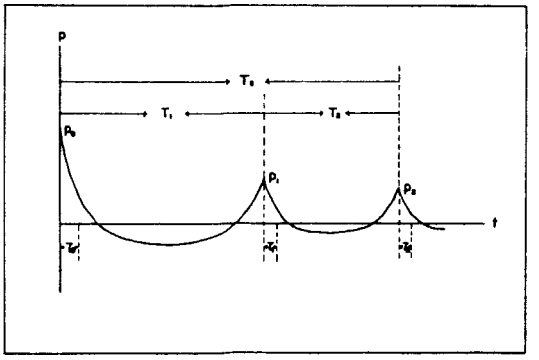

그림 1. 수중폭발음의 압력 파형

여기서 P_0와 P_1은 이들의 peak 압력이며 τ_0와 τ_1은 각각의 시정수, 그리고 T_1은 Pulse간의 간격이다.

전체 폭발음에 대한 Energy Spectrum은 (3)식으로부터 구할 수 있는데

$$E(f)=\frac{2}{\rho c}\, P(f)\, P^*(f) \tag{3}$$

전체 압력파형에 대한 P(f)를 구하기 어려우므로 Weston은 고주파 대역의 Energy Spectrum을 Shock Wave와 bubble pulse들의 압력파형으로부터 다음과 같이 구했다.

$$E_s(f)=\frac{2}{\rho c}\, P_0^2/\left(\frac{1}{\tau_0^2}+4\pi^2f^2\right) \tag{4}$$

$$E_b(f)=\frac{8}{\rho c}\, \left[P_1/\tau_1 \quad \left(\frac{1}{\tau_1^2}+4\pi^2f^2\right)\ \right]^2 \tag{5}$$

여기서 $E_s(f)$와 $E_b(f)$는 각각 shock wave와 bubble pulse에 대한 Energy spectrum level이고, ρ는 밀도, 그리고 c는 수중음속을 가리킨다. 한편, 저주파 대역의 spectrum은 양와 압력과 음의 압력의 파형에 따라 결정되어 지는데 일반적으로 pulse간의 시간간격 T가 이들의 시정수 τ에 비해 매우 크므로 Weston은 이들 파형을 Impulse 형인 (6)식과 같이 두었다. 이때음의 압력은 전체 시간-압력 곡선상에서의 Impulse가 0이 되도록 정해져야 한다.(6)

$$P(t)=I_0\delta(t)+I_1\ \delta(t-T_1)+I_2\ \delta(t-T_2)-\frac{I_0+I_1+I_2}{T_3}$$
$$0\leqq t\leqq T_2 \tag{6}$$

이 음압에 의한 Energy spectrum은 다음과 같이 쉽게 이끌어 낼 수 있다.

$$E(f)=\frac{2}{\rho c}\,[\{I_0+I_1\cos2\pi fT_1+I_2\cos2\pi fT_3-(I_0+I_1+I_2)\frac{\sin2\pi fT_3}{2\pi fT_3}\}^2+\{I_1\sin2\pi fT_1+I_2\sin2\pi fT_3-(I_0+I_1+I_2)$$

$$\left\{1-\frac{\cos 2\pi f T_3}{2\pi f T_3}\right\}^2 \quad (7)$$

여기서 $I_0=P_0\tau_0$, $I_1=2P_1\tau_1$, $I_2=2P_2\tau_2$ 이다.

이 Impulse 공식에 의한 저주파 대역의 spectrum은 $f\ll\frac{1}{2\pi\tau_1}$ 일 때 가능하며 (4), (5)식의 합에 의한 저주파 대역의 spectrum level과 평행한 곡선상에서 만나는 결합점을 연결함으로써 전체적인 Energy spectrum level을 구할 수 있다. 예로서 1 lb짜리 폭약을 120ft의 수심에서 폭발시켰을 때($\frac{T_1}{\tau_0}\simeq 10^2$) 나타나는 Spectrum을 Weston모델에 의거 그림 3에 나타내었다. 30~100Hz 사이에서 Impulse formula에 의한 평균값과 shock wave와 bubble pulse들의 에너지 합에 의한 곡선이 일치하고 있으므로 두 곡선을 30Hz 부근에서 연결하므로써 전체적인 Energy spectrum level을 구할 수 있게된다.

Ⅲ. Gaussian 모델

그러나 앞에서 지적한 바와 같이 pulse간의 시간간격 T가 시정수 τ에 비해 그리 크지 못할 경우 Weston의 energy Spectrum은 특히 저주파 대역에서 많은 오차를 보이게 된다. 이와같은 현상은 아주 낮은 폭발 에너지를 음원으로 사용하거나 음원의 작동 수심이 깊은 경우에 나타나므로 Weston 모델에 의한 Energy Spectrum 산출에 특별한 주의를 요하게 된다.

이러한 문제점들을 극복하기 위한 수단으로 수중폭발음을 원형에 가깝게 구현시키고자 음의 압력 부분을 그림 2와 같이 Gaussian 함수형으로 두었는데 이때의 전체 압력 P(t)는 2차 bubble pulse까지의 합으로 표시 가능하다.

$$P(t)=P_0e^{-\frac{t}{\tau_0}}+P_0'e^{-(t-\frac{T_1}{2})^2/2\sigma_0^2}+P_1e^{-\frac{|t-T_1|}{\tau_1}}+$$

$$P_1'e^{-(t-\frac{T_1+T_2}{2})^2/2\sigma_1^2}+P_2e^{-\frac{|t-T_3|}{\tau_2}},\quad t\geq 0 \quad (8)$$

여기서, σ_0와 σ_1은 파형에 따라 조정 가능한 상수이다.

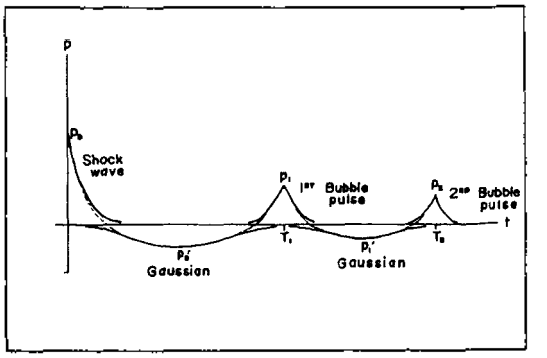

그림 2. Gaussian 함수로 표현된 수중폭발음의 파형

이 음압 파형에 대한 energy spectrum은 (9)식으로 표시된다.

$$E(f)=\frac{2}{\rho c}\left[\left\{\frac{I_0}{1+(2\pi f\tau_0)^2}+\frac{I_1\cos 2\pi f T_1}{1+(2\pi f\tau_1)^2}+\frac{I_2\cos 2\pi f T_3}{1+(2\pi f\tau_2)^2}-(I_0+\frac{1}{2}I_1)e^{-2\pi^2\sigma_0^2f^2}\cos\pi f T_1-(\frac{1}{2}I_1+I_2)e^{-2\pi^2\sigma_1^2f^2}\cos\pi f(T_1+T_3)\right\}^2+\left\{\frac{2\pi f\tau_0 I_0}{1+(2\pi f\tau_0)^2}+\frac{I_1\sin 2\pi f T_1}{1+(2\pi f\tau_1)^2}+\frac{I_2\sin 2\pi f T_3}{1+(2\pi f\tau_2)^2}-(I_0+\frac{1}{2}I_1)e^{-2\pi^2\sigma_0^2f^2}\sin\pi f T_1-(\frac{1}{2}I_1+I_2)e^{-2\pi^2\sigma_1^2f^2}\sin\pi f(T_1+T_3)\right\}^2\right] \quad (9)$$

이 식은 Weston의 이론식에 비해 다소 복잡하나 세가지 식의 결합으로 표시되던 Energy spectrum이 한 식으로 표시 가능할 뿐만 아니라 시정수 τ와 Pulse간의 간격 T 값에 구애됨이 없이 항시 Spectrum 을 구할 수 있다는 잇점이 있다.

두 모델을 비교하기 위하여 1lb짜리 폭약을 120ft 수심에서 폭발시켰을 때 나타나는 Energy Spectrum을 그림 3에 나타내었는데 여기서는 Gaussian 함수의 상수를 $\sigma_0=\frac{T_1}{4}$, $\sigma_1=\frac{T_2}{4}$ 로 두고 분석하였다. Energy spectrum level이 최고치인 15Hz 부근에서 약 3dB 정도의 오차가 있는 것을 제외하고는 30Hz 이상에서 부터는 (4),(5) 식의 합으로 표시되는 값과 (9)식의 평균값이 잘 일치되고 있으며, 15Hz 이하에서는 Gaussian 모델에 의한 값이 Weston 모델에 비해 1~2dB 정도 높게 나타나

고 있다.

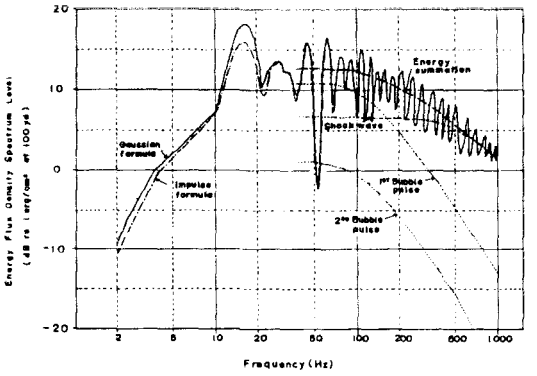

그림 3. 1lb 짜리 폭약으로부터 발생한 수중 폭발음에 대한 energy spectrum의 비교

Ⅳ 실험 및 결과

새 아본식의 낮은 폭발에너지에 대한 실험적 검증을 거치기 위하여 수중폭발음의 음원으로 전기방전에 의한 Spark System을 사용하였다. 이것은 반복해서 사용할 수 있는 경제적 잇점이 있는데 비해 전기에너지가 음향에너지로 바뀌는 효율성이 다른 것에 비해 낮다는 단점을 함께 지니고 있다.

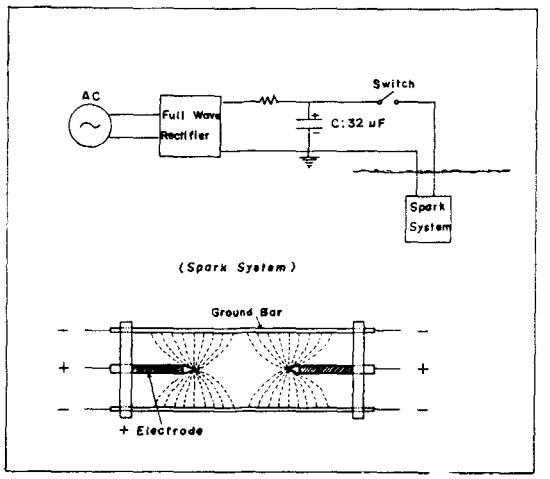

그림 4. 전기 방전에 의한 spark system의 구성도

실험에 사용된 음원의 구성도는 그림 4와 같으며 6~10KV의 고전압이 DC로 바뀌어 32μF의 Condenser 에 충전되고 나면 순간적으로 수중에 잠겨있는 spark system으로 전기에너지가 전달되어진다. +전극과 접지봉 사이에는 전류가 흐르기 시작하는데 +전극의 끝 부분만 수중에 노출되어 있고 나머지 부분은 완전 절연되어 있기 때문에 그림 4에서와 같은 전기장이 형성된다. +전극의 끝 부분에는 높은 전류밀도가 형성되므로서 아주 뜨겁고 밝은 Plasma 를 형성하게 되는데, 최초의 충격파는 갑자기 팽창하는 plasma구에 의해서 생성된다.[8]

해상실험에서는 음원의 깊이를 20m에, 그리고 음파의 수신은 음원으로부터 90m 떨어진 지점의 40m 수심에서 수중청음기 (B&K 8100)로 수신 녹음하였다. 녹음된 음파는 실험실에서 1 Octave filter 를 거친 후 직접파(Direct Path)에 대한 Energy Spectrum을 구했다.

8KV의 인가전압을 가했을 때 수신된 파형 중 하나를 그림 5에 나타내었는데 이 파형의 제반 수치는 다음과 같다.

P_0=4467dyne / cm², P_1=5188dyne / cm², P_2=3969 dyne / cm²

τ_0=4.8×10⁻⁴sec, τ_1=3.0×10⁻⁴sec, τ_2=1.7×10⁻⁴sec,

T_1=2.86×10⁻³sec, T_2=1.25×10⁻³sec

앞서의 1lb짜리 폭약에 의해서는 $T/\tau \simeq 10^2$였는데 비해 Spark system에 의해서는 $T/\tau \simeq 10^1$ 정도이다. 이 값들을 (4),(5),(7) 식과 (9)식에 각각 대입하

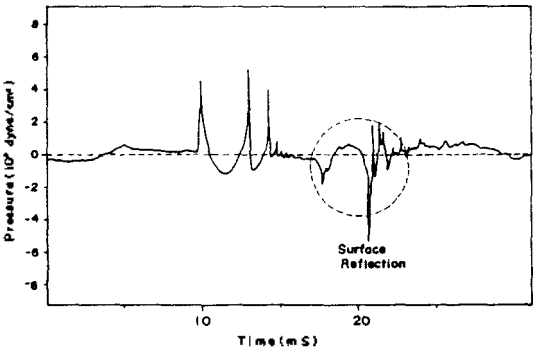

그림 5. 인가전압 8KV인 spark system을 20m 깊이에서 작동시켰을 때 나타난 압력파형

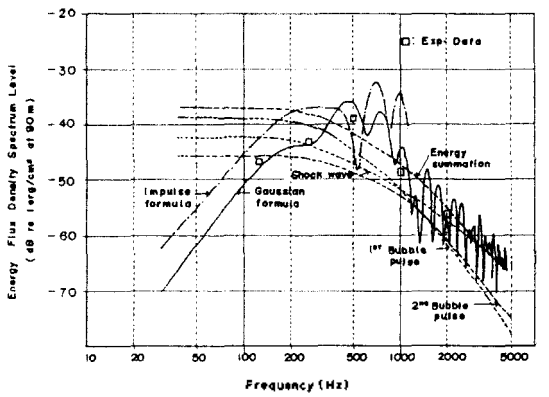

그림 6. Spark system으로부터 발생한 압력파형의 Energy spectrum.

고 $\sigma_0=\frac{T_1}{4}$ $\sigma_1=\frac{T_2}{4}$ 로 두었을 때 그림 6과 같은 Energy spectrum을 얻었다.

우선 Weston 모델로 전체적인 Energy spectrum을 구하고자 했을 때, Impulse formula로 대변되어지는 저주파 대역의 spectrum과 Shock wave와 bubble pulse 들의 에너지 합으로 표시되는 고주파 대역의 Spectrum과는 200~500Hz 사이에서 서로 교차하지만 그림 3에서와는 달리 서로겹치는 주파수 대역이 없으므로 이들의 연결이 매우 어렵다. 뿐만아니라 300Hz 이하에서 실험치와 Impulse formula와는 무려 3~7dB의 차이를 보이고 있는데 이와같은 결과는 10Kv의 인가전압까지도 여전히 나타나고 있었다.

한편 Gaussian formula를 이용한 새 이론식의 Energy spectrum은 1000Hz 이상의 고주파 대역에서는 Weston 모델과 실험결과치가 모두함께 잘 일치하지만 그 이하의 주파수에서는 전혀 다른 Spectrum 분포를 보이고 있다. 특히 주목할 점은 Spectrum level의 최고치가 실험결과치와 마찬가지로 $f_m=$ 450Hz 부근에서 나타나는데 이는 f_m이 $\frac{1}{T_1}$과 $\frac{1}{T_2}$ 사이에 있음을 의미한다. 이러한 결과는 아마도 2차 bubble pulse의 값이 상대적으로 높기 때문으로 추정되어지는데 Weston 모델에서는 이 경우 최고치의 추정이 거의 불가능하게 된다.

따라서 Weston 모델을 이와같이 낮은 폭발에너지에 적용시키기에는 한계성을 갖는 것으로 여겨진다.

새 이론모델이 상수 σ값에 따라 어떤 변화를 보이는지 알아보기 위해 $\frac{T}{6}$ 에서 $\frac{T}{3}$ 사이로 변화시켜 보았는데 실험자료에 따라 600Hz 이하에서 2~3dB 이내의 변화를 보일 뿐이었고 $\sigma=\frac{T}{4}$ 일 때 실험결과치와 가장 근접하게 나타났다.

V. 결 론

아주 낮은 폭발에너지로 부터 발생되는 음압의 Energy spectrum을 산출함에 있어 Weston의 이론적 모델이 한계성을 갖는데 비해 Gaussian formula를 이용한 새 이론식으로 부터는 $\sigma=\frac{T}{4}$ 일 때 실험결과와 잘 일치됨을 확인할 수 있었다. 특히 그 동안 Energy spectrum의 최고치가 shock wave와 1차 bubble pulse간의 시간간격 T_1의 역수, 즉 $f_m=\frac{1}{T_1}$ 에서 나타나는 것으로 알려져 왔으나 2차 bubble pulse가 상대적으로 클 경우 실험결과치와 Gaussian 모델은 $\frac{1}{T_1}<f_m<\frac{1}{T_2}$ 에서 최고치가 나타나고 있음을 보여주었다.

참 고 문 헌

1. R.J. Urick, "Principles of Underwater sound" ch.4, McGraw-Hill, 1983.
2. A.B. Arons, and D.R. Yennie, "Energy Partition in Underwater Explosion Phenomena", Rev. Mod. Phys. 20:519, 1948.
3. A.B. Arons, "Underwater Explosion shock wave parameters at Large Distances from the Charge", J. Acoust. Soc. Am., 26:343, 1954.
4. R.J. Urick,"Implosions as Sources of Underwater Sound", J.Acoust. Soc. Am., 35:2026, 1963.
5. A.B. Arons, "Secondary Pressure Pulses Due to Gas Globe Oscillation in Underwater Explosions: Ⅲ. Selection of Adiabatic Parameters in the Theory of Oscillation", J. Acoust, Soc. Am., 20:277, 1948.
6. D.E. Weston, "Underwater Explosions as Acoustic Sources", Proc. Phys, Soc. London, 76(pt.2):233, 1960.

7. E.A. Christian, and M.Blaik, "Near Surface Measurements of Deep Explosions VII.Energy Spectra of small Charges" J.Acoust. Soc. Am., 48(1), 1970

8. W.H. Luehrmann, "Marine, Non Dynamite Energy Sources (The Spark, and WASSP)", (A Symposium), Geophysical Soc. of Houston, 1986.

▲ 김 성 부(정회원)

1948년 10월 6일생

1971년 2월 : 서강대학교 물리학과 졸업

1977년 9월 : 서강대학교 대학원 물리학과

1977년12월~1983년 2월 : 진해기계창 선임연구원

1983년 3월~현재 : 부산 수산대학교