

수중음원으로써의 전기방전시스템

- I. 낮은 전기에너지로부터의 음압펄스 -

Electric Spark System as Underwater Acoustic Source

- I. Pressure pulses from low electric energy -

김 성 부*, 김 상 한**

(Sung Boo Kim*, Sang Han Kim**)

※이 논문은 1995년도 경성대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

요 약

0.4~1.6kJ의 비교적 낮은 전기에너지를 갖는 수중 전기방전 시스템으로 부터 발생하는 음파의 파형을 깊이별, 거리별로 관측하였다. 파형의 특성은 이미 보고된 에너지와 수심 의존도를 그대로 유지하고 있으나, 다른 두가지 특적인 현상들이 관측되었다. 첫째는 내파에 의한 1차 bubble 펄스들의 피크 음압이 초기 충격파의 것보다 높게 관측되었는데, 이것은 10kJ 이상의 고에너지 방전시스템에서만 뚜렷하게 나타나던 현상이다. 둘째는 음향에너지 변환효율이 통상 5kJ에서 0.02, 1kJ에서 0.01로 저에너지대에서 그효율이 감소하는 경향을 보인다고 보고되었으나 1kJ의 부근에서는 0.01로 그 효율이 다시 일정하게 유지되고 있음이 확인되었다.

ABSTRACT

The pressure pulses generated from the underwater electric spark system ranged from 0.4 to 1.6kJ are measured with the variation of source depth and range. The characteristics of pressure pulses obtained through this experiment continue to show the same electric energy and depth dependence previously reported, but two particular phenomena are observed.

First, it is observed that the peak pressure of the 1st bubble pulse induced from implosion is higher than that of the initial shock wave, which is particularly apparent to high electric energy more than 10kJ in previous studies. Second, it has been reported that the energy ratio (potential energy of bubble/intrinsic energy of source) has some tendency to "droop" on the low electric energy as 0.02 for 5kJ and 0.01 for 1kJ but the results of the present experiment show that it continues to have the ratio of 0.01 near 1kJ again.

I. 서 론

수중전기방전시스템은 지질학 또는 지구물리학적 탐사 내지는 해저자원탐사 등을 위한 음원으로 폭발물이나, air gun, boomer 등과 함께 널리 사용되고 있다. 이는 충전된 전기에너지로부터 음향에너지로 변환되는 에너지 효율이 다른 음원에 비해 매우 낮아 이를 보상하기 위한 대형 축전시스템이 필요한 단점이 있긴 해도 음파를 한번 방사한 후 재 방사하는 시간간격이 air gun 등에 비해 매우 짧은 잇점도 함께 지니고 있기 때문이다.

일반적으로 이와 같은 충격파 발생장치를 음원으로 자주 이용하는 데에는 해저의 지질학적 정보를 얻거나 장거리 음파전달특성을 조사하기 위한 수단으로 저주파 대역의 고출력 음파를 쉽게 얻을 수 있는 잇점 때문이다. 그러나 재현성의 부족이라든지 짧은 펄스간격에 기인한 신호처리상의 어려움 외에도 깊이에 따르는 파형의 변화와 유한진폭효과 등으로 인해 이용에 신중을 기해야 하는 단점도 함께 지니고 있다[1].

수중 전기방전시스템을 이용한 충격파음원에 관한 연구 결과는 주로 Luehrmann[2], McInnis[3] 등에 의해 밝혀졌다. 폭발물에 의한 충격파 발생과정과는 달리 +전극의 한 점에 고밀도 전류가 흘러 플라즈마가 발생, 기포가 급격히 팽창함으로써 충격파가 발생하게 되는데, 이때 기포 내에 있는 스팀은 팽창과 수축하는 과정에서 많은

* 부산수산대학교 물리학과

** 경성대학교 물리학과

접수일자: 1996년 4월 12일

양이 물로 응축되는 관계로 2차 bubble 펄스를 생성할 수 없게 된다. 그리하여 1차 bubble 펄스가 발생할 최대 수축 시점에서 소위 "slap" 현상으로 나타나는 내파(implosion)가 일어나게 된다. 이 결과에 따른 bubble 펄스들의 파형은 인가된 전기에너지에 따라 달라진다고 보고되었는데 주로 10kJ대 이상의 고에너지를 인가했을 때는 최초 발생하는 충격파보다 내파에 의한 1차 bubble 펄스의 음압이 짧은 시간에 걸쳐 높게 나타나나, 수 kJ에서는 짧게 쪼개어진 bubble들로 인해 피크음압이 상대적으로 낮으면서 비교적 긴 시간 동안 이어지는 소위 "sizzling" 타입의 특성을 보인다고 보고하고 있다[2, 3].

한편 외부 인가에너지로부터 음향에너지로 바뀌는 변환효율은 폭발물이나 air gun등이 종류에 따라 0.2~0.6 정도며, 이것은 인가에너지에 따라서는 거의 변하지 않는 것으로 알려져 있다. 그러나 전기방전 시스템에서는 변환효율이 전체적으로 0.01~0.03 정도로 전체적인 효율이 매우 낮을 뿐 아니라, 인가에너지가 수 kJ로 낮아지면서 점차 그 효율도 감소하는 것으로 보고되고 있다[2, 3].

본 논문에서는 0.4~1.6kJ 사이의 비교적 낮은 전기에너지를 갖는 수중 전기방전 시스템으로부터 발생하는 음파의 파형을 음원의 깊이와 측정거리 별로 관측함으로써 주로 1kJ 이상의 인가에너지로부터 얻은 종래의 파형적 특성이 이 에너지 대에서는 어떤 변화를 보이는지 알아 보려 한다.

II. 실험 장치

구리봉의 끝 부분만 남긴 채 절연물질로 씌워져 있는 +전극과 완전 노출된 접지봉 사이에 고전압이 걸리면 바닷물에 노출된 끝부분과 접지봉 사이에는 그림 1과 같이 급격한 전류가 흐르기 시작한다. 이때 +전극의 끝부분에서 강한 전류밀도가 형성되고, 더구나 끝부분이 거칠고 뾰족하게 만들어져 있어 전류는 구리 표면의 예리한 부분에 더욱 강하게 집중될 것이다. 전류밀도가 가장 큰 지점에서 열이 집중적으로 발생하므로 +전극의 끝부분에는 스타프와 이온화된 가스, 기화된 구리가스, 그리고 자유전자들로 구성된 매우 뜨겁고 밝은 플라즈마가 순간적으로 형성되어 충격파를 발생시킨다.

본 실험을 위한 충격음원으로 그림 1과 같이 +전극과 접지봉 사이의 간격을 10cm, 그리고 +전극 사이의 간격을 50cm로 둔 배열음원을 사용하였다. 여기에 공급되는 전기에너지는 32μF의 전기용량을 가진 축전지를 통해 공급되며, 인가전압을 5~10kV사이로 가변시킴으로써 0.4kJ에서 1.6kJ사이의 전기에너지를 얻을 수 있다. 실제 해상 실험에서는 해상상태가 비교적 잔잔한 가운데 수중청음기의 깊이를 25m로 고정시킨 채 충격음원의 깊이를 6~22m사이로, 그리고 관측거리를 27~55m사이로 가변시키면서 음원의 깊이와 관측 거리에 따른 파형의 특성을 관측하였다.

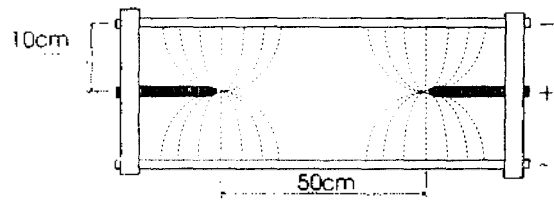


그림 1. 전기방전 시스템에 의한 충격파 발생 장치

III. Shock Wave

Aron[1], Luehrmann[2]등에 의하면 충격파(shock wave)의 피크 음압은 (1)식의 형태로 표현된다.

$$P_s \sim \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-1.13} \quad (1)$$

여기서 W는 인가에너지, 그리고 R은 음원으로부터 수 m 이상의 관측거리를 나타낸다.

본래 음향 에너지의 열에너지로의 전환이나, 유한진폭 효과를 고려하지 않은 이상적인 음향이론에서는 환산거리($R/W^{1/3}$)의 -1승으로 거리의 증가에 따라 피크 음압이 감소되어야 한다. 그러나 높은 압력 하에서 바닷물은 비선형적 특성을 지니고 있으므로 음압과 물의 체적 사이의 이력현상에 의해 역학적 에너지의 일부분이 열에너지로 전환된다. 또한 음원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 충격파의 파형은 유한진폭효과로 인해 피크 음압의 추가적인 감쇠가 따르게 된다. 이러한 현상 때문에 음원으로부터 아주 가까운 거리에서는 -3승 가까운 높은 감쇠율을 갖다가 점차 낮아져 수m 이후부터는 충격파의 특성이 소멸될 때까지 -1.13승을 유지하게 되는 것으로 알려져 있다[1, 4].

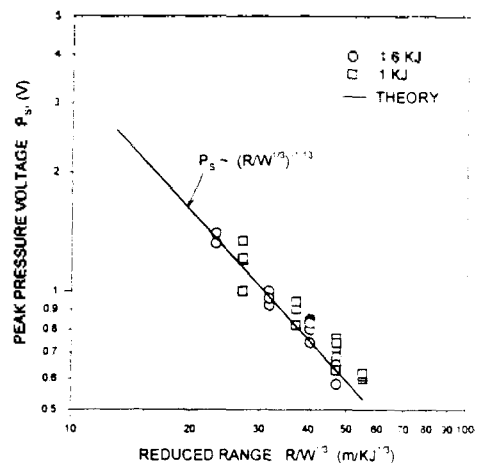


그림 2. 환산 거리에 따른 충격파의 피크음압

그림 2에 인가에너지를 1kJ과 1.6kJ로 두고, 관측거리를 27~55m사이로 변화시켰을 때 측정된 충격파의 피크 음압을 환산거리에 따라 나타내었다. 그 기울기가 -1.13승으로 앞서의 관측결과들과 잘 일치하고 있다.

IV. Bubble Pulses

그림 3에 0.4kJ과 1kJ, 그리고 1.6kJ의 방전시스템으로부터 발생한 충격파의 파형들을 보이고 있다. 20ms 전후에 나타나는 것이 음원으로부터 직접 전달된 충격파이며, 50ms 부근에는 해수면에서 반사되어 위상이 반전된 파가 나타나고 있다. 이 파형들은 폭발물에 의한 것과는 달리 2차 이상의 bubble 펄스가 나타나지 않고 있다. 이는 bubble 내의 스팀이 팽창과 수축하는 과정에서 액화됨으로써 2차 bubble 펄스를 생산할 에너지를 갖지 못하고 그대로 파괴로 끝맺기 때문이다. 이러한 bubble 펄스의 특성에 대하여 Leuhrmann, McInnis는 인가된 전기에너지가 수 kJ범위일 때 bubble 펄스의 피크음압이 충격파의 피크음압보다 높지 않으며 비교적 긴 시간(십수 ms)동안 내파현상이 나타나나, 그에 비해 십수 kJ이상의 높은 인가에너지일 때는 내파에 의한 피크음압이 충격파의 피크음압 보다 오히려 높게 나타나며 시간간격도 수 ms로 짧아진다고 보고하고 있다. 그러나 본 실험에서 나타난 결과는 인가에너지가 0.4~1.6kJ로 비교적 낮음에도 불구하고 내파에 의한 피크음압은 충격파의 음압보다 높게, 그리고 시간간격은 수 ms로 짧게 나타나고 있어 이에 대한 자세한 연구 검토가 필요한 것으로 판단된다.

한편 충격파와 bubble 펄스 사이의 시간간격 T는 충격파에 의한 물의 속도가 구 대칭적이고 물이 비압축성이라 가정하면, 에너지보존 관계식으로부터 아래 (2)식이 쉽게 유도된다[5,6].

$$T = 5.276 \times 10^{-4} \rho^{1/2} (\epsilon W)^{1/3} / (d + 10)^{5/6} \quad (2)$$

여기서 ρ : 해수밀도(kg/m³),
 ϵ : 음향에너지(Q)로의 변환효율(Q/W)
 W : 전기에너지(J), d : 수심(m)

해수밀도를 1,024kg/m³로 두었을 때, 수심변화에 따른 주기의 관측결과를 그림 4에 나타내었다. (d + 10)의 -5/6승에 비교적 잘 따름을 볼 수 있으며 이는 종래의 보고된 내용과도 일치한다.

음향변환효율에 관해서는 충격파의 파형을 직접 적분함으로써도 가능하지만 주기 T를 통한 간접적인 방법으로도 도출할 수 있다. (2)식에서 음향변환효율 ϵ 이 1일 때 (2)식을 Rayleigh-Willis 공식이라 부른다[7,8]. 전기방전 시스템에서는 변환효율이 대개 0.01~0.03 정도로 매우 낮는데 이는 +전극과 접지봉 사이에 있는 많은 부피의 바닷물에 대부분의 에너지를 빼앗기기 때문이다.

그림 5에 음원의 수심이 6m, 11m, 18m, 22m일 때의 Rayleigh-Willis 곡선과 측정값들을 나타내었다. 6m와 11m, 그리고 18m의 경우, $\epsilon=0.01$ 일 때의 이론식과 거의 잘 일치하나 22m의 경우는 앞서의 결과에 비해 다소의 편차를 갖는다. 이것은 측정 당시 파고에 의한 음원 깊이의 불안

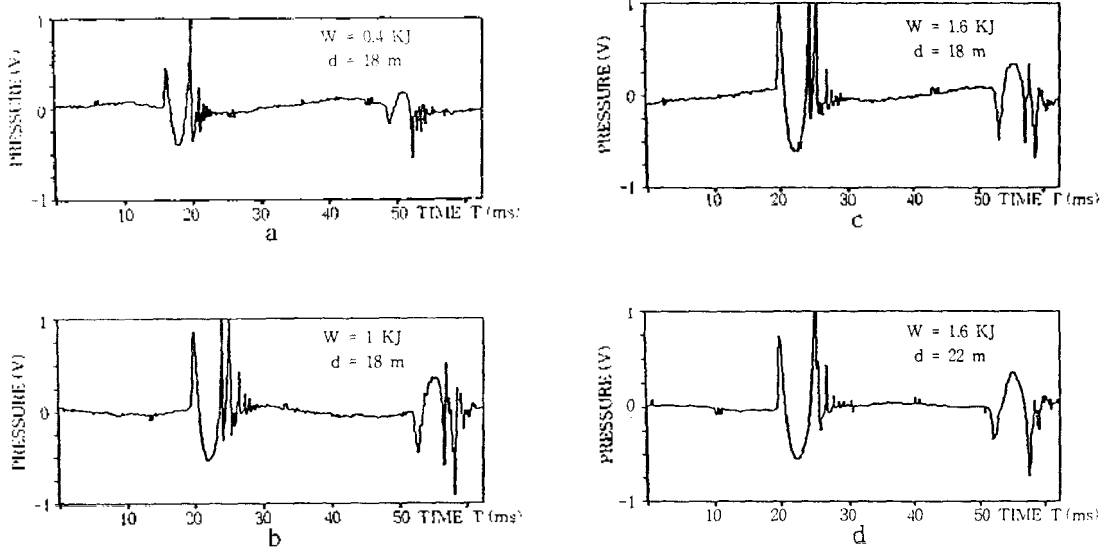


그림 3. 전기방전 시스템으로부터 발생한 충격파 파형
 a) W = 0.4kJ, d = 18m, b) W = 1kJ, d = 18m,
 c) W = 1.6kJ, d = 18m, d) W = 1.6kJ, d = 22m.

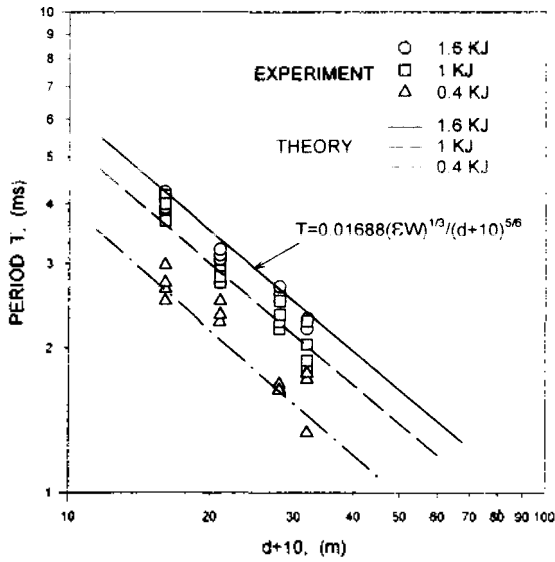


그림 4. 수심변화에 따른 주기 T의 변화

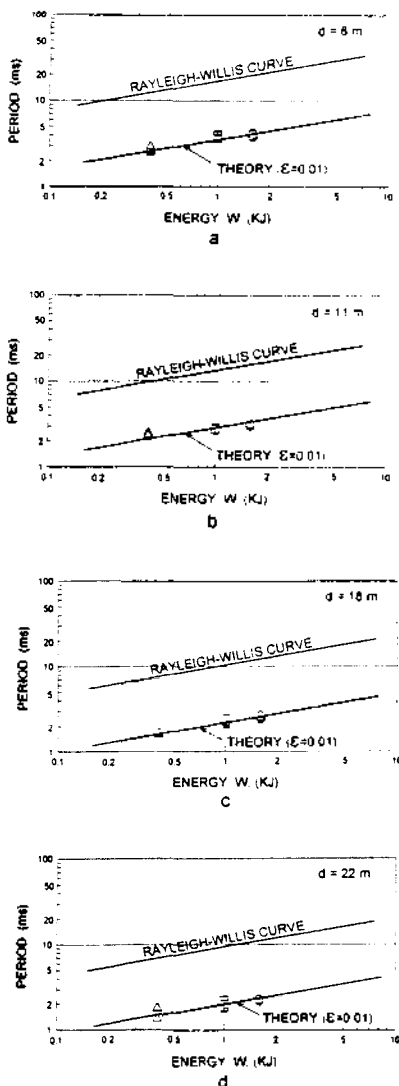


그림 5. 음원깊이별 전기에너지에 대한 주기 T
a) d = 6m, b) d = 11m, c) d = 18m, d) d = 22m

정성 때문에 여겨진다.

그러나 전기에너지가 1.6kJ에서 0.4kJ로 떨어질 동안 ϵ 의 값은 0.01로 대체로 일정하게 유지되고 있다. 이것은 앞서의 보고결과-즉 10kJ대 이상에서는 0.03으로 일정하게 유지되다가 3~5kJ에서 0.02, 1kJ에서는 0.01로 감소하는 경향을 가짐-와는 달리 1kJ부근에서는 다시 0.01로 일정한 값을 기점을 의미하고 있다.

V. 결론

0.4~1.6kJ의 전기에너지를 갖는 수중방전 시스템으로부터 발생하는 충격파의 음향학적 특성은 일반적인 충격파 음원이 갖는 제반 특성을 대부분 지니고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 bubble 펄스의 파형적특성은 Luehrmann, McInnis등이 보고한 것과는 달리 비교적 낮은 에너지에서도 내파에 의한 파크음압이 충격파의 것보다 높게, 그리고 시간 간격도 수 ms로 짧게 나타나고 있다. 또한 이 영역의 에너지 대에서는 음향변환 효율이 0.01로 더이상 감소하지 않고 다시 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

1. A. B. Arons, "Underwater explosion shock wave parameters at large distances from the charge," J. Acoust. Soc. Am. 26, 1954.
2. W. H. Luehrmann, "Marine, non dynamite energy sources (The sparker and WASSP)," Geophysical Soc. Houston, 1968.
3. J. J. McInnis, "Boomer/Sparker evaluation," Internal Report, EG&G Internation, 1964.
4. M. Blaik, E. A. Christian, "Near-surface measurements of deep explosion," J. Acoust. Soc. Am. 38, 1965.
5. C. Herring, "Physics of sound in the sea (Explosions as sources of sound)," Dept. of the Navy Headquar. Naval Mat. Com. Washington, D. C., 1969.
6. D. E. Weston, "Underwater explosions as acoustic source," Proc. Phys. Soc. London, 76, 1960.
7. L. Rayleigh, "On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity," Philosophical Magazine vol. 34, 1917.
8. H. F. Willis, "Underwater explosions time interval between successive explosions," British Report. WA-47-21, 1941.

▲김 상 한(Sang Han Kim): 15권 2호 참조

▲김 성 부(Sung Boo Kim): 15권 2호 참조