

水中아-크 放電音源에 관한 研究

張 在 煥* · 張 志 元*

ARC Discharge Sound Source in Underwater

Jae-Hwan CHANG* and Jee-Won CHANG*

In general the impulse sound sources of underwater generated by electric arc discharge had used static energy of the charged capacitors. The author proposed an underwater arc discharge sound source using secondary voltage of highvoltage transformer without capacitors.

The arc discharge device was composed of a high voltage transformer and a switching system.

The impulse current in the primary turn of the high voltage transformer is controlled by the switching system and inductive current of the secondary turn in the high voltage transformer is used in making impulsive arc discharge.

A series of experiment have been carried out to observe the acoustic characteristics of the impulse sound source generated by the arc discharge.

The results obtained were as follows:

1. Secondary current at the time of arc discharge keeps after ohm's law in the beginning and the maximum current flows out as soon as arc discharge breaks out.
2. A time difference between a start of applied current and a generation of arc discharge sound is the 3msec and it is generated arc sound when breaking down electric insulation at maximum voltage.
3. The sharper the end of electrodes and the higher the secondary voltage, the higher the sound pressure level.
4. Arc discharge sound was generated even at the distance of 100cm between electrodes and was stably reproductive at the gap of 1cm to 100cm.
5. Electric arc discharge sound wave is a shock wave of pulse-width of 0.15msec and spectral distribution of it is plenty of low frequency components less than 10 KHz.

緒 論

水中音源裝置에는 표적의 探知나 識別에 주로 利用되는 振動子式 音源裝置와 원거리 探知나 해저의 지형 地殼의 探查 등에 주로 利用되는 衝擊波音源裝置가 있다. 衝擊波音源裝置는 (1) 회망하는 시점에 音波를 放射할 수 있고, (2) 항상 같은 波形을 生成하고, (3) 安定되고 無指向性音源이 요구된다.

衝擊波音源裝置의 일종으로 高電壓을 케페시터에 저장하여 순간적 放出에 의해 絶緣破壞를 利用한 放電音源에 대해 尹(1980)과 李(1983) 등이 그 音響學의 特性을 고찰한 바 있다. 그러나 이와 같은 종래의 放電音源은 高電壓을 단속하는 關係로 音源을 制御하기 어려워 上記한 조건을 충족시키지 못하며 再現성이 좋은 結果를 얻기 어렵다.

本 研究는 水中 Arc放電音源에 必要한 조건을 거

* 釜山水產大學: National Fisheries University of Pusan.

의 만족시키면서 간단하게 構成할 수 있고 쉽게 利用할 수 있도록 하기 위해 高壓變壓器의 2次側을 制御하는 대신에 S. C. R, TR, U. J. T, T. T. L, 등으로 電流持續時間幅을 조정하여 1次側을 制御하고 커패시터 없이 2次側에 誘導된 高電壓을 放電시켰을 때의 電氣音響學的 諸特性에 대해 分析, 檢討하였다.

理 論

1. 液體誘電體의 電氣傳導

액체의 原子排列은 氣體와 固體의 中間이다. 액체 誘電體의 電壓-電流特性은 低電界에서 電流가 電壓에 비례하는 오姆법칙영역, 高電界에서 電流가 포화하는 포화영역, 더욱 高電界에서 電流가 급증하여 絶緣破壞에 다다르게 된다.

액체 誘電體의 電流密度(J)는 이온의 수, 이동농도, 電荷 및 印加電氣場을 각각 n_i, μ_i, e_i, E 라고 하면 $J = \sum n_i \cdot \mu_i \cdot e_i \cdot E$ 이며 액체中の 이온은 熱에너지에 의한 熱電子放出(thermionic electron emission)과 高電氣場에서 中性分子의 解離에 의하여 이루어진다. 熱電子에 의한 電流密度(J)는^{3,6)}

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \exp\sqrt{\frac{e^3 E / 4\pi}{kT}}$$

단, A : Richardson 常數

k : Boltzman 常數

T : 溫度 ($^{\circ}k$)

와 같고 熱電子放出電流는 電氣場(E)의 平方根의 指數函數에 比例하여 증가한다. 高電氣場에서 中性分子의 解離에 의한 電流密度(J)는 이온의 解離速度를 $\frac{dn_i}{dt} = k(E)$ 로 표시하면 電氣場과 더불어 解離速度가 증가하게 되고 전극사이의 거리를 d 라 하면 $J = e_i \cdot \left(\frac{dn_i}{dt}\right) \cdot d$ 와 같이 單位面積을 가진 電極間의 거리, 解離速度 및 電荷의 곱과 같다.

2. 液體誘電體의 絶緣破壞

액체 誘電體에 電氣場을 가하면 어떤 電氣場의 값에서 이온화되어 絶緣破壞되며 破壞機構의 定量的 說明은 어려우나 주된 破壞機構에는 (1) 熱的 破壞機構 (2) 電子的 破壞機構 (3) 電氣的 破壞機構로 分類할 수 있다.

熱的 破壞機構는 액체中에 용해 또는 電極에 흡착된 氣體가 電流에 의해 가열, 氣化되어 氣泡를 형성하기 때문에 破壞를 일으키게 된다.

Waston 등은 액체의 증발에 必要한에 너지(ΔH_1)를

$$\Delta H_1 = m[C_p(T_b - T_o) - l_b]$$

단, m : 증발한 액체의 量

C_p : 주위의 溫度 T_o 와 비등점 T_b 간의 액체의 定압비열

l_b : 액체증발의 잠열

와 음극상 돌기부근의 액체에 주어진 에너지 (ΔH_2)를

$$\Delta H_2 = AX^n \tau_r$$

와 같이 나타내었다.

단, A 와 n : 定數

τ_r : 액체가 정지하고 있는 時間

여기서 ΔH_1 과 ΔH_2 는 같다고 하면 破壞強度(X)는⁶⁾

$$X = \left[\frac{m}{\tau_r A} C_p (T_b - T_o) - l_b \right]^{\frac{1}{n}}$$

와 같이 표시할 수 있다.

3. 衝擊壓力 및 衝擊波

絶緣液體속에서 순간 Arc放電이 일어날 때, 高壓의 放電柱는 Martin(1960)에 의하면 放電開始 후의 經過時間을 $t(\mu s)$ 로 하였을 때, 그 直徑 $d(t)$ 는

$$d(t) = 1.8t^{0.5}$$

와 같이 나타내었다. 放電이 일어날 때 放電柱는 급격히 팽창하여 衝擊壓力波를 發生시키고, 또한 2次的으로 생긴 氣泡(gaseous bubble)의 주위 壓力에 대한 팽창, 수축운동으로 第2, 第3의 壓力波(bubble pulse)가 생긴다.

衝擊波가 어떤 매질을 전파해 나갈 때의 壓力과 時間과의 關係는 Arons¹⁰⁾(1954)에 의하면

$$P = P_m e^{-t/t_0}$$

단, P : 衝擊波前線(front)에서 時間 $t(\mu sec)$ 경과 후의 瞬間壓力

P_m : 시간 $t=0$ 에서의 最大壓力

t_0 : 壓力의 P_m 의 $\frac{1}{e}$ 로 감소할 때까지의

時定數

로 근사된다고 한다.

衝擊波가 갖는 에너지密度(E)는¹⁰⁾

$$E = \frac{1}{\rho c} \int_0^{\infty} P^2(t) dt = \frac{1}{\rho c} \int_0^{\infty} (P_m e^{-t/t_0})^2 dt \\ = \frac{P_m^2 t_0}{2\rho c} \text{ (erg/cm}^2\text{)}$$

단, ρ : 매질의 密度

C : 매질속의 音速

이다.

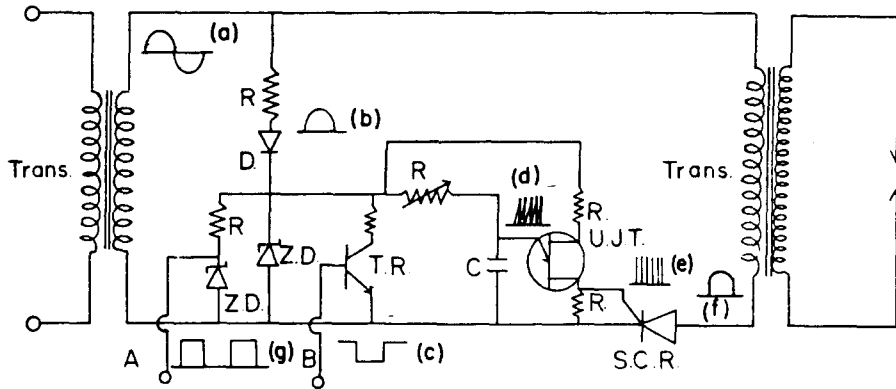


Fig. 1. Constitution of the discharge sound source and waveform.

裝置 및 方法

1. Arc放電音源裝置의 構成

가. 高電壓 放電回路

放電音源의 構成은 Fig.1과 같으며, Fig.1에서 A·C 100 Vrms가 高壓變壓器의 1次側에 (a)와 같은 A·C 電壓이 印加되고, Diode 1에서는 (b)와 같은 半波 整流된 波가 나오며 V·R을 통해 c에서는 (d)와 같은 capacitor 充放電 波가 나온다. U·J·T의 B₁에서는 (e)와 같은 弛豫같은 波形이 나오며, 이것은 S·C·R의 Gate 信號가 되고, V·R값을 조정하므로써 gating 점을 移動할 수 있게 構成하였다.

본 實驗에서는 상승시간이 2.3ms일 때 gate信號가 入力되게 하였고, 高壓變壓器 1次側 電流持續時間幅은 7.3ms로 하였다. Z·D에서는 사다리꼴波가 생기며, 이 信號가 gating점을 同期시키는데 利用되며 高壓變壓器의 卷線比는 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50으로 하였고, 高壓變壓器 1次側에는 100 Vrms가 印加되게 했다.

나. 스위칭 回路

Z·D로부터 5V의 사다리꼴 波가 Fig.2의 A에 印加되어 sw 1을 set시키고 sw 2를 「on」으로 하면 이 사다리꼴波는 A·C signal과 同期되고, Fig.1의 베이스 電流는 「on」에서 「off」 상태로 된다. 그리고 U·J·T B₁에서 S·C·R에 Gate 信號를 보내게 되어 A가 5V에서 0V로 된다. 그 순간 T·T·L 74121에서 single pulse (negative single pulse) 하나가 나오게 되어 reset 시키고 1회의 放電이 끝난다.

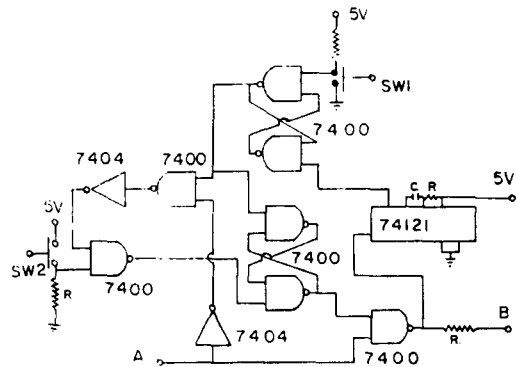


Fig. 2. Schematic diagram of electronic switch for arc discharge.

다. 放電電極

實驗에 使用된 放電電極은 Fig.3과 같으며, 이들 電極은 끝점을 제외한 나머지 부분은 완전히 絶緣시켰다.

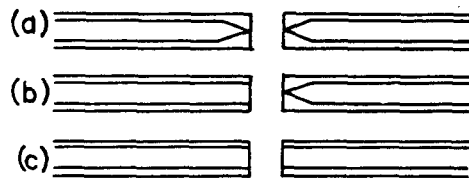


Fig. 3. Shape of electrodes.

- (a) sharp end to sharp end
- (b) flat to sharp end($\phi 2mm$)
- (c) flat to flat ($\phi 2mm$)

2. 實驗裝置

測定裝置의 系統圖는 Fig.4와 같고 水中放電音源裝置는 Fig.1의 高電壓 放電回路와 Fig.2의 스위칭

回路를 結合하여 放電電極에서 1회씩 放電音이 放射 되도록 構成하였다.

放射音은 水中聽音器로 受信, 增幅器로 增幅하였고, 波形을 관찰하기 위하여 오실로스코우프를 裝置하였으며, 또한 放電音의 周波數分析을 하기 위하여 Tape Recorder, FFT Analyzer, X-Y Recorder를 裝置하였다.

水槽는 500L×400W×450Hcm인 콘크리트 水槽를 이용하였으며, 깊이 400cm까지 담수를 채우고 깊이 200cm 지점에 放電電極과 水中聽音器를 水槽에 나란한 方向으로 100cm 간격이 되게 설치하였다.

3. 方 法

放電時 變壓器의 1次側 電壓은 100 Vrms, 電流의 持續時間幅은 7.3ms로 하였으며, 2次側 放電電流波形은 0.1ohm, 10A의 標準分流器를 放電回路의 2次側에 直列로 연결하여 전압강하 時의 波形을 오실로스코우프로 觀察하고, 電流는 전압강하 時의 값을 分流器抵抗 0.1Ω씩 나누어 구하였다.

電極間隔에 따른 音壓水準은 電極間隔을 0.1에서 100cm까지 변화시키면서 觀察하였다.

1次側 電流持續時間幅에 따른 音壓水準은 1次側 電流持續時間幅을 5, 6, 7ms로 變化시켜 觀察하였고, 2次側 誘導電壓의 變化에 따른 音壓水準은 卷線比를 조절하여 電壓이 1kv, 2kv, 3kv, 4kv, 5kv 되도록 하여 測定하였다. 放電音源의 指向性 및 音壓水準은 水中聽音器(B&K Type, 8101, 8100)를 360° 回轉시키면서 수신하고 measuring amplifier (B&K Type: 2606, 2607)로 增幅하여 測定하였다.

電流印加點과 放電音 生成間의 時間差를 구하기 위하여 電極과 聽音器를 가까이 하고 S·C·R gating

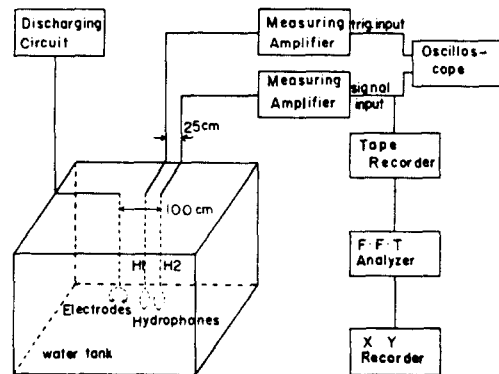


Fig. 4. Block diagram for the experimental setup with water tank (490L×500W×440Hcm).

신호를 oscilloscope의 external trigger에 入力하여 觀察하였다.

放電音의 周波數分析은 tape recoder(B&K, Type: 7004)로 放電音을 녹음하여 F·F·T Analyzer (ono sokki, co, Type:CF-400)로 分析하고, X-Y Recorder (ono sokki, co, Type: CX-445)로 기록하였다.

放電音의 音壓波形은 Fig.4와 같이 聽音器 1의 出力을 oscilloscope의 external-trigger 신호로 하고 聽音器 2의 出力을 入力신호로 하여 觀察하였다.

結果 및 考察

1. 放電時 電流波形 및 放電音生成間의 時間差

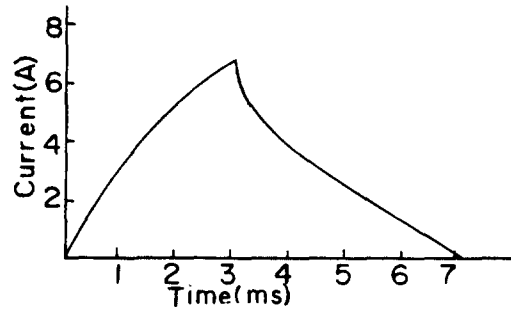


Fig.5. Secondary current mode of discharge (at secondary voltage of 3kv, gap 3mm).

Fig.5는 1次側 電流持續時間幅을 7.3ms로 하여 變壓器의 1次側에 電流를 印加시켰을 경우 2次側 變壓器에 흐르는 放電電流의 세기를 나타낸 것이다.

Fig.5에서 2次側 變壓器에 흐르는 最大電流는 6.3 A였으며 1次側에 電流가 印加된 후 약 3ms까지는 Ohm法則에 따라 변화하였고, 3ms 이후에는 放電電流波形으로 指數函數的으로 감소하는 電流波形이었다.

1次側 電流가 印加되는 時間 즉, S.C.R gate에 signal이 印加되는 時間과 放電音生成間의 時間差로서 電流波形의 시작점과 音波生成間의 時間差로서 放電電極과 hydrophone을 거의 일치시켜 측정한 결과 音壓波形은 약 3 ms로부터 나타나기 시작하였다. 이는 2次側 電流波形이 最大가 되는 時間과 일치하므로 絶緣破壞는 2次側 電壓이 최고일 때 일어남을 알 수 있다.

2. 電極모양에 따른 音壓水準

Fig.6은 電極間隔을 3 mm로 하여 測定한 電極의

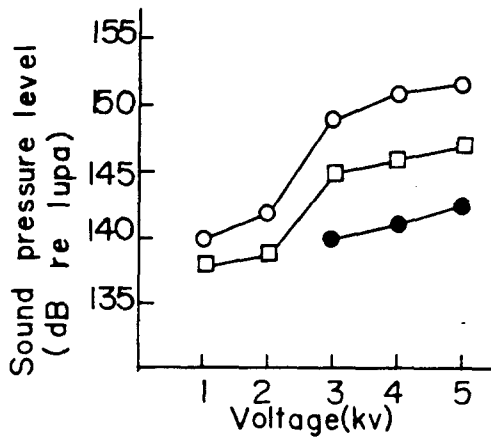


Fig. 6. Sound pressure level in accordance with secondary voltage (gap 3mm).

- : a electrode
- : b electrode
- : c electrode

種類別 2次側 電壓의 세기에 따른 音壓水準을 나타낸 것이다. 音壓水準은 2次側 電壓이 높을수록 높게 나타났으며, 狹窄한 電極이 隔窄한 電極보다 높은 경향을 나타내었다.

이와 같은 원인은 電極모양이 狹窄한 狀態에서는 漏電電流가 작고 電極의 單位 面積當 電流密度가 增加한 때문이라 생각된다. 또한 2次側 電壓이 5kv일 때 音壓水準은 153 dB로서 가장 높게 나타나 진극모양을 狹窄하게 할수록 音壓水準을 높일 수 있음을 알 수 있었다.

3. 電極間隔에 따른 音壓水準

2次側 電壓이 4kv이고 電極모양이 (b)와 (c)와 같

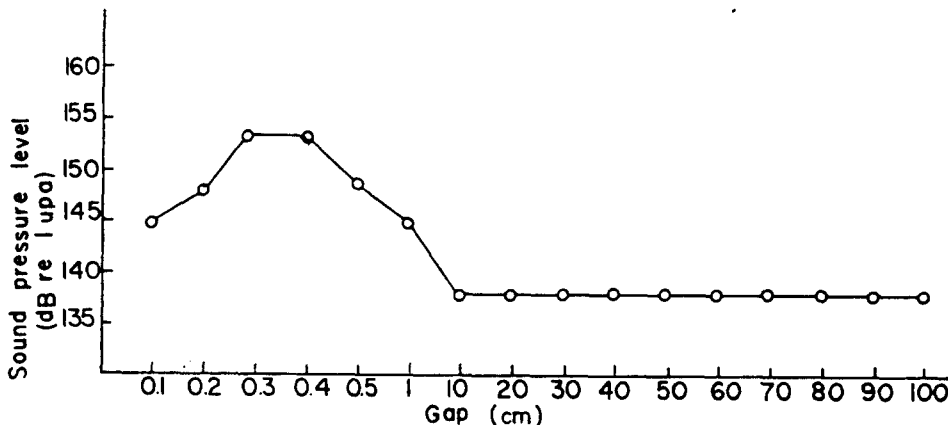


Fig. 7. Sound pressure level according to gap between electrodes (at secondary voltage of 4kv).

이 隔窄한 狀態에서는 電極間隔이 0.6cm까지만 放電音이 生成되었다. 그러나 電極모양이 狹窄한 (c)와 같은 狀態에서는 電極間隔이 멀어져도 放電音이 生成되었다.

Fig. 7은 2次側 電壓을 4kv로 하여 電極間隔을 0.1~100cm까지 變化시키면서 測定한 放電音壓을 나타낸 것이다. 최고 音壓은 間隔이 0.3cm일 때 152dB로 나타났으며, 放電音은 200cm까지 生成됨을 관찰하였고, 電極間隔이 1cm 이상에서는 대단히 安定된 音源이 生成됨을 알 수 있다. 따라서 安定된 音源을 얻기 위해서는 電極을 狹窄하게 만들어야 하고, 그 間隔을 1cm 이상 멀어지게 제작하여야 된다고 생각된다.

4. 1次側 電流持續時間幅과 音壓關係

Fig. 8은 放電電壓이 4kv일 때 1次側 電流持續時間

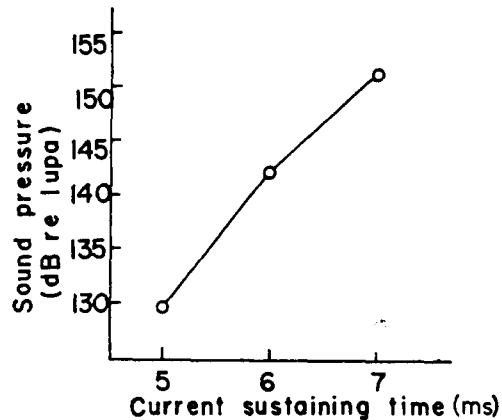


Fig. 8. Sound pressure in accordance with sustaining time of primary current (at secondary voltage of 4kv, gap 3mm).

幅에 따른 音壓水準을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 音壓水準은 1次側 電流持續時間幅이 길수록 높았고, 5ms 이하일 때는 放電이 일어나지 않았다. 이와 같은 원인은 電流持續時間幅이 짧으면 絶緣破壞 電壓에 다다르지 못하기 때문이라 생각된다. 따라서 音壓水準을 높이기 위해서는 電流持續時間幅을 길게 할수록 높일 수 있음을 알 수 있었다.

5. 放電音의 指向性

Fig. 9는 2次側 電壓이 4kV이고 電極間隔이 0.1~100cm일 때 全電極에 대한 指向特性을 극좌표로 나타낸 것이다.

Fig. 9에서 放電音은 無指向性을 나타내었다. 이와 같은 原因은 音源의 周波數成分이 주로 合成低周波인 때문이라 생각된다.

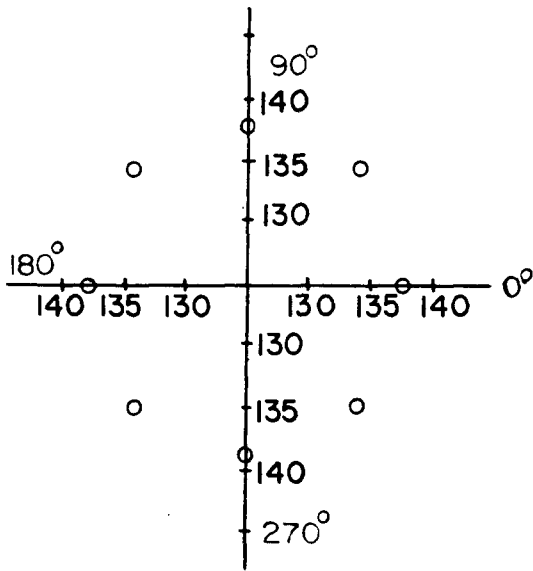


Fig. 9. Directivity of arc discharge sound.

6. 放電音의 音壓波形 및 周波數分析

Fig. 10은 (a)電極을 이용하여 2次側 電壓을 4kV로 하고 電極間隔을 3mm로 하였을 때의 水中 Arc 放電에 의해 生成되는 放電音의 音壓波形을 나타낸 것이다.

Fig. 10에서 音壓波形은 매질의 팽창과 수축에 의하여 衝擊波(shock wave)와 放電時 生成되는 氣泡에 의한 第1, 第2의 壓力波(bubble pulse)를 나타내었고, 衝擊波의 Pulse幅은 0.15ms 였다.

Fig. 10의 衝擊波의 放電音을 F. F. T. Analyzer로

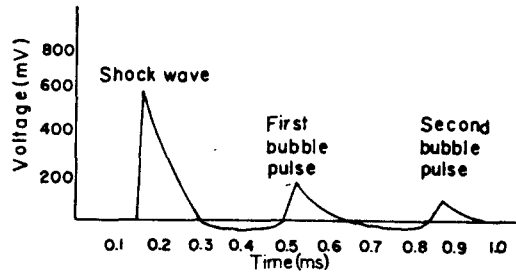


Fig. 10. Sound wave form generated by underwater arc discharge (at secondary voltage of 4kV gap 3mm).

周波數를 分析한 結果는 Fig. 11과 같다.

Fig. 10에서와 같이 Pulse幅이 0.15ms로 크기에 周波數대역이 좁아지는 현상을 나타내었다.

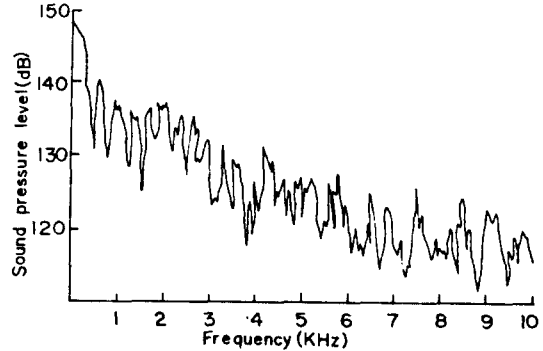


Fig. 11. Spectral distribution in the arc discharge sources.

要 約

高壓變壓器의 1次側을 제어하고 2次側에 유도된 電壓을 利用한 水中放電音源의 電氣音響學的 諸特性을 分析·檢討한 結果는 다음과 같다.

1. 放電時 2次側 電流는 초기에는 Ohm 法則을 따르다가 電流가 최고 6.3A 흘러 絶緣破壞되었으며, 그 순간 放電音이 生成되었다.
2. 電流印加點과 放電音 生成間의 時間差는 약 3ms 였으며, 電壓이 최고일 때 絶緣破壞가 일어나 放電音이 生成되었다.
3. 電極의 끝이 보폭할수록 2次側 電壓이 높을수록 音壓水準은 높았다.
4. 보폭한 형태의 電極은 電極間隔이 100cm일 때 도 放電이 일어났으며 電極間隔이 1cm以上부터 비교적 安定된 放電音이 生成되었다.
5. 放電音의 펄스폭은 約 0.15ms인 Shock Wave였으며, 10KHz 以下の 合成低周波 成分이었다.

參 考 文 獻

1. 張志元(1983): 漁業機器學. 신한출판사, 4-115.
2. 윤종락(1980): 絶緣液體속에 Arc 放電에 의한 衝擊音源. 수산학석사학위 청구논문.
3. 田春生(1980): 放電高電壓工學. 東明社, 22-60, 315-334.
4. 李元炳·張志元(1983): 水中 Arc 放電을 利用한 衝擊音源에 관한 研究. 日韓音響學術發表會論文集, 213-216.
5. 元本幹雄(1965): 放電應用裝置. 日刊工業新聞社, 1-28.
6. 赤崎正則(1980): 基礎高電壓工學. 昭晃堂, 21-63, 315-334.
7. Morris, E. Levine(1982): Digital theory and experimentation using I. C. Prentice Hall, 1-23, 147-156.
8. Jacob Hillman, Ph. D.(1978): Pulse, Digital and switching waveform. 탑출판사, 497-506.
9. Clarence, S. Clay(1977): Acoustical Oceanography. A Wiley-Interscience Publication, 253-287, 194-202.
10. Robert, J. Urick: Principles of Underwater sound. McGraw Hill Book Company, 79-92.
11. Stockhausen, J.H.(1964): *Energy* per unit area spectrum of the shock wave from 1-lb T.N.T. charges exploded Underwater. J. Acoust. Soc. Am., 36. 1220, 1221.
12. Urick, R.J. (1971): Handy curves for finding the sources level of an explosive fired at depth in the sea. J. Acoust. soc. Am., 49, 935-936.
13. Urick, R.J.(1963): Implosions as sources of Under water sound. J. Acoust. soc. Am., 35, 2026-2027