

內燃機關 技術者를 위한 液體의 微粒化(II)

Atomization of Liquid for Internal Combustion Engineers(II)

柳 正 人*
Jeong In Ryu

1. 序 言

1 報에서 言及한 微粒化 方法과 그 實用例 中 超音波 振動에 對하여 細部的으로 言及하고자 한다.

本報는 현재 利用되고 있는 超音波 發生法의 原理와 特徵, 振動子의 設計法 및 振動의 擴大用 horn의 設計 등을 다루어 內燃機關 技術者가 直接 利用할 수 있도록 概說하여 液體의 微粒化를 마감하고자 한다.

2. 超音波 發生法과 振動子의 設計

현재 利用되고 있는 超音波 發生法은 表 1 에 나타낸 것과 같이 機械的 驅動과 電氣的 驅動으로 大別된다. 이 中에서 強力超音波 發生源으로 많이 利用되는 振動子는 珪炭산 바름, 질론산티탄산연, 니켈, 페라이트 등이 있다.

2.1 振動子의 種類

1) 壓電 振動子

超音波의 研究에는 옛날부터 水晶 振動子가 사용되어 왔다.

그림 12에서 보는 바와 같이 水晶의 X축에 수직으로, 소위 X커트의 振動子를 끊어내어 X축에 수직인 2면에 銀 등을 蒸着시켜 電

極으로 만든다. 이것에 交番電壓을 印加하면 壓電氣 逆效果에 의해 水晶板 등에서는 그 두께 방향으로 振動한다.

表 1 超音波 發生方法

驅動方法	驅動原理	振動子	發生周波數	媒 質
電	壓電形	水 晶	20~30.000	氣體, 液體, 固體
		로 셀 염	0.2~1.000	液體, 固體
		인산안몬	0.2~1.000	液體, 固體
氣	電歪形	티 탄 산 바 린 콘 산 티 탄 산 염	10~10.000	液體, 固體
		磁歪形	니 켈 Fe-Al Ni-Cu 계 Ferrite	10~100
機 械 的	電磁形		0.2~25	氣體, 液體, 固體
		Hartmann nozzle	5~50	液體
		Garton nozzle	2~100	氣體, 液體
	Siren	0.2~250	氣體, 液體	

板의 두께를 t 라고 하면 공진 주파수 f 는 $f = N/t$ 이다.

여기서 N 은 周波數 定數로서 水晶의 경우 285 KHz .cm 이다.

表 2는 各種 壓電素子의 定數를 나타낸다.

* 정희원, 충남대학교 공과대학 기계공학과 교수

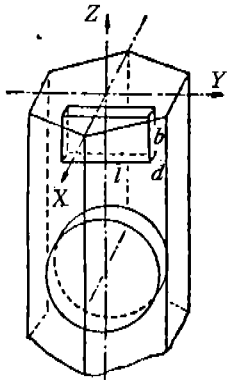


그림 12 水晶에서의 X 커트 振動子 切出法

表 2 壓電 材料의 定數

材 料	커트	振動 方式	壓電率 (e, s, u)	密 度 (g/cm^3)	周波數 定 數 (KHz/cm)	壓電歪 定 數 (mks)
水 晶 로 셀 염 A D P (Ammonium Dihydrogen phosphate)	X	두께	2.5	2.65	285	0.05
	$45^\circ X$	가로	300	1.77	160	0.09
	$45^\circ X$	가로	15.5	1.80	160	0.177

2) 電歪 振動子

티탄산 바륨 등으로 그림 13 과 같이 어느 두께의 원판등을 만들고 그 양면에 銀電極을 燒付해서 電極 사이에 直流의 高電壓을 가해 이것을 正員으로 變化시키면 두께 l 은 電界의 강도에 따라서 δl 만큼 變化해서 그림 14 와 같은 히스테리시스를 얻는다.

電歪 振動子は 그 형상과 電壓의 가하는 方法에 따라 그림 13 과 같은 여러 가지 형태의 振動을 한다.

그림에서 長振動, 縱振動, 두께 振動, 呼吸 振動, 剪斷 振動의 周波數 定數를 各各 $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$ 라고 하고 D 를 直徑, l 을 角板, 円柱, 角柱 등에 円筒狀의 길이, a, b 를 角板 등에 角柱의 폭, t 를 円板 등에 円筒狀의 두께 d_1, d_2 를 円筒狀의 內徑, 外徑이라 하면 各 振動에 대하여 共振 周波數 f 는 다음과 같이 구해진다.⁷⁾

a) 徑方向 振動 $f = N_1 / D$ (Hz) 단, D 와

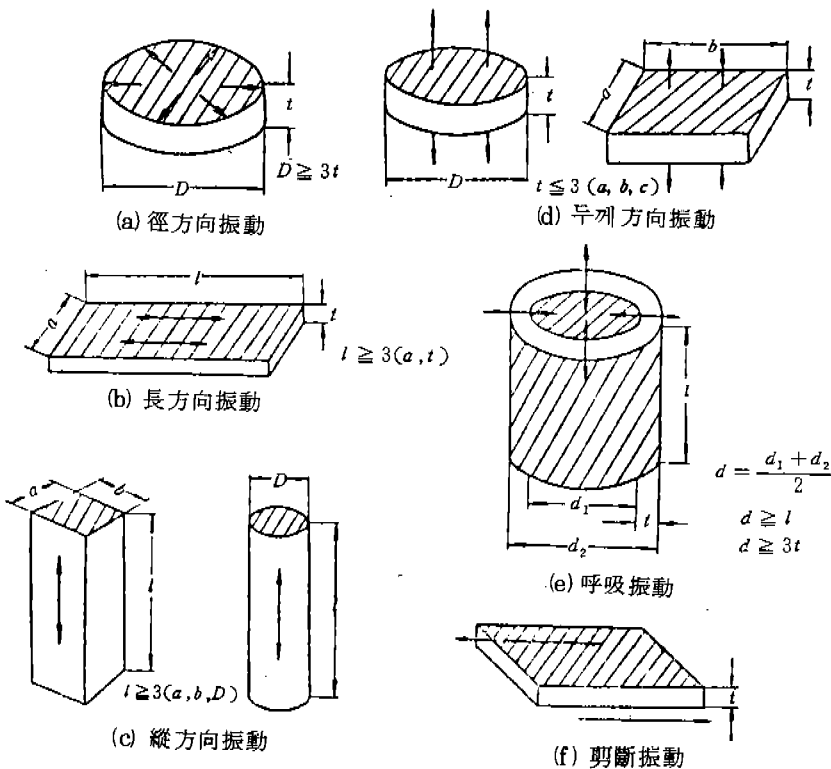


그림 13 電歪振動子の 振動形態와 모양

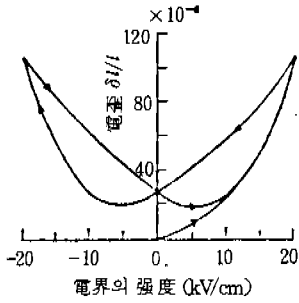


그림 14 電歪材料의 靜電歪特性

t 관계 $D \geq 3t$

b) 長方向 振動 $f = N_2/l$ (Hz) 단, $l \geq 3(a, t)$

c) 縱方向 振動 $f = N_3/t$ (Hz) 단, $l \geq 3(a, b, D)$

d) 두께 方向 振動 $f = N_4/t$ (Hz) 단, $t \leq (a, b, D)$

e) 呼吸 振動 $f = N_5/d$ (Hz) 단, $d = (d_1 + d_2)/2$, $d \geq l$, $d \geq 3t$

f) 剪斷 振動 $f = N_6/t$ (Hz)

3) 磁歪 振動子

니켈과 같은 強磁性體를 棒狀으로 하여 磁場 속에 두고 磁化시키면 그 磁化의 方向으로 길이가 變化한다. 이 現象을 磁歪現象(magnetostriction, 또는 Joule's effect)이라고 부른다.

그림 15는 各種 金屬의 磁歪 $\delta l/l$ (l 은 棒

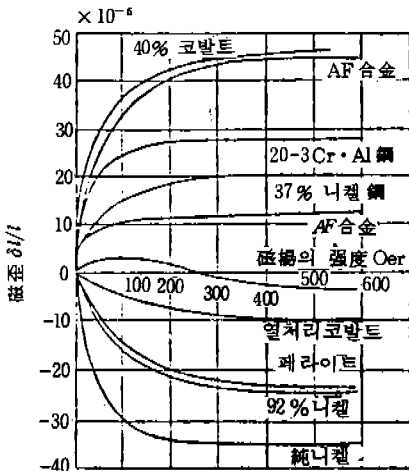


그림 15 磁歪金屬의 靜磁歪特性

의 길이, δl 은 팽창 또는 수축한 길이)와 그때의 磁場의 強度와의 關係를 나타낸다.

그림에서 보는 바와 같이 Alfer 合金(Al : 12%, Fe: 88%)나 40% Co鋼과 같이 磁化하면 그 길이가 늘어나는 것이나 Ni 이나 Fernte 와 같이 반대로 수축하는 것, 또는 純鐵과 같이 磁場의 強度 크기에 따라 늘어나는 것도 있고, 수축하는 것도 있어 金屬의 材質에 따라 磁歪現象이 다르다.

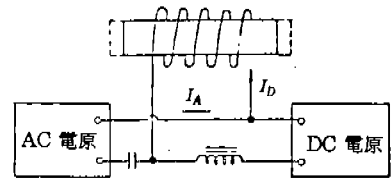


그림 16 磁歪振動子の 驅動原理

實際로 磁場을 만들려면 그림 16과 같이 니켈 등의 強磁性體의 棒에 卷線을 감아서 直流 電流 I_D 를 통하면 靜的 磁場의 強度 H_D 가 얻어지고 棒은 그 길이의 方向으로 磁化되어 偏倚磁化 M_D 가 생긴다. 다음으로 코일에 交流 電流 I_A 를 중첩해서 보내면 棒의 磁化는 偏倚磁化 M_D 를 中心值로 그림 17과 같이 交流 電流의 周波數와 똑같은 周波數로 變動한다. 磁化가 變動하면 Joule 效果에 의하여 棒은 신축하게 되어 棒의 兩端面에서 音波가 發射된다. 이 때 棒의 振動數는 交流 電流의 周波數와 똑같으면 棒은 共振하며 振動이 더욱 더 강하게 된다. 實際의 振動子は 棒

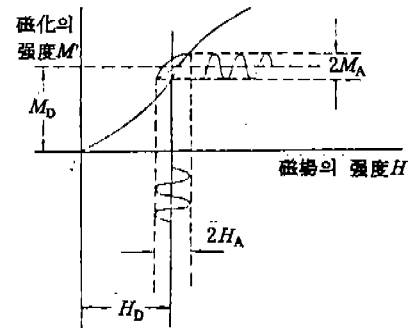


그림 17 磁場의 強度와 磁化의 強度의 交替變動

狀으로 하면 交流 電流에 의하여 表皮 效果 등 때문에 發熱이 크므로 그림 18과 같이 薄板을 겹친다.

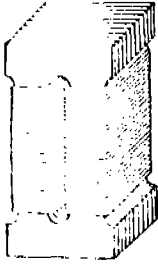


그림 18 磁歪振動子

磁歪 材料인 AF 合金은 磁歪率은 크나 材質的으로 취성이 있고 壓延으로 薄板을 만드는 것이 곤란하다. 니켈 振動子는 電氣·機械變換率이 60%이며 Ferrite는 燒結·金屬이므로 니켈 振動子에 비하여 우수하며 그 比較는 表 3과 같다.

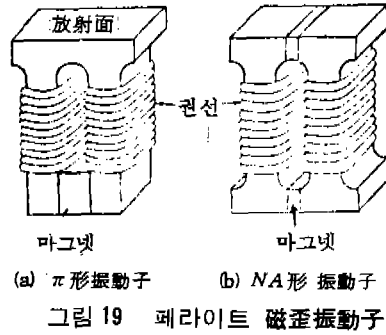
表 3 磁歪 材料의 特性 比較

內 容	純 니켈	Alfer	Ferrite
成 分	Ni 98% 이상	Fe 87%, Al 13% 合金	Ni-Cu 系 Ferrite
透 磁 率	40	190	20
固有抵抗 ($\Omega\text{-cm}$)	7×10^{-6}	91×10^{-6}	4×10^2 이상
電氣機械結合係數	20~30%	20%	22%
密 度 (g/cm^3)	8.9	6.7	5.0
音 速 (m/sec)	4.800	4.700	5.700
最適偏倚磁場 (Oer)	10~15	6~10	10~15
耐食性 (海水中)	良好	약간 良好	극히 良好
機械的 強度 (kg/cm^2)	2×10^6	1.4×10^6	$4 \sim 9.8 \times 10^2$

그림 18의 니켈 振動子와 달리 그림 19의 Ferrite는 π 형 또는 NA형으로 燒結成形한다. 이 경우에는 偏倚磁場을 주기 위하여 마그넷이 삽입된다.

그림 20에서 振動子의 振動方向에 x 軸을 놓고, 振動子 中點을 座標의 原點으로 놓고 이 中點을 振動의 節點으로 하고 左右端을 振動의 Loop라 할 때 半波長共振의 振動을 고려하면 그 運動 方程式은

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \text{ 로 나타낸다.}$$



마그넷
(a) π 形 振動子 (b) NA形 振動子
그림 19 페라이트 磁歪振動子

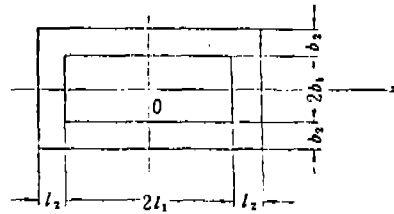


그림 20 4 각형 振動子

여기서 u_i 는 振動子의 變位로서 $0 \leq x < l_1$ 의 때 i 는 1, $b_1 \leq x < l_2$ 의 때 $i=2$ 이다. 또한 t : 시간, $C = \sqrt{E/\rho}$, E : 振動子 材質의 영률, ρ : 振動子 材質의 密度, l_1, l_2, b_1, b_2 는 그림 9의 치수이다. 이 振動子의 共振 周波數를 f , 円振動數를 $\omega (=2\pi f)$ 라 하면 $u_i = (A_i \sin \omega x / C + B_i \cos \omega x / C) \sin(\omega t + \varphi)$ 이다.

境界條件은 S_i 를 x 軸에 수직인 斷面積으로서 $x=0$ 에서 $u_i=0$, $x=l_1$ 에서 $u_1=u_2$, $S_1 \partial u_1 / \partial x_1 = S_2 \partial u_2 / \partial x_2$, $x=l_1+l_2$ 에서 $\partial u_2 / \partial x = 0$ 로 되므로 共振 條件式을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\tan \frac{\omega l_1}{C} \cdot \tan \frac{\omega l_2}{C} = \frac{S_1}{S_2} \text{ 8)}$$

이 식에서 振動子의 材質과 치수가 주어지면 그 固有 振動數가 얻어진다.

4) 縱振動用 Horn의 設計

超音波 振動裝置의 振動子系는 그림 21에서와 같이 振動子의 一端面에 콘(conical horn)을 땀질, 또는 은납땀질하여 이 콘 先端에 여러 가지 形狀의 혼(horn)을 붙트로 체결한다.

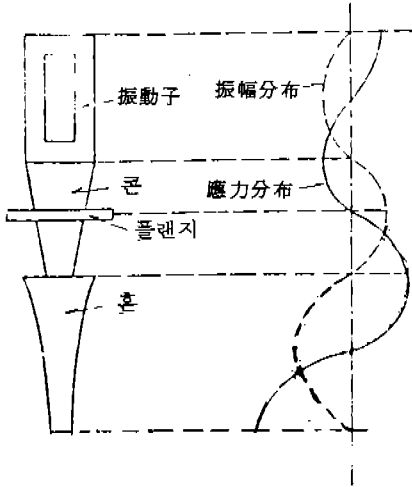


그림 21 振動子部の 振動모드

혼의 형상으로는 여러 가지가 있으나 기본적으로 그림 22 와 같이 step 형, catenoidal 형, exponential 형 및 conical 형이 가장 많이 사용된다.

Horn 形狀은 振幅 擴大率을 고려한다.

Horn 의 兩端面의 面積比가 同一하면 振幅 擴大率은 step形 > catenoidal 形 > exponential 形 > conical 形의 順序이다.

Horn 用 材料의 密度와 音速度는 表 4 와 같다.

表 4 horn 用 材料의 密度와 音速度

材 料	密 度 (g/cm ³)	音 速 度 (× 10 ⁵ cm/sec)
軟 鋼	7.8	5.2
니켈 크롬 鋼	7.8	5.1
18-8 스테인레스 鋼	8.0	5.0
黃 銅	8.5	3.4
銅	8.9	3.7
B 모 델	8.84	4.6
티 탄	4.54	4.85
알 루 미 늬	2.7	5.2

Conical 形 horn 의 設計時 共振 條件, 振幅 分布, 振幅 擴大率, 振動 節面(nodal plane)의 位置 및 振動 應力 分布를 고려하여야 한다.

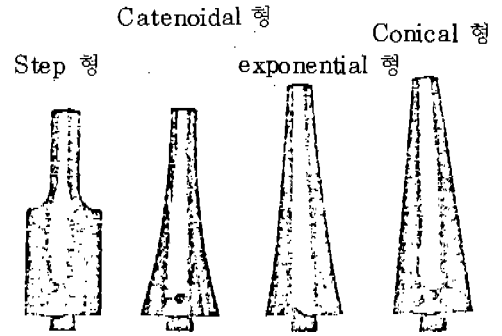


그림 22 各種 形狀의 혼

우선, 共振 條件만을 고려하면 그림 23에서 보는 바와 같은 斷面 不均一棒의 運動 方程式은 棒의 軸心에서 x 軸을 놓으면 $S_x \cdot \partial^2 u_x / \partial t^2 = C^2 \cdot \partial / \partial x (S_x \cdot \partial u_x / \partial x)$ 로 된다.

여기서 S_x 는 棒의 斷面에서 x 되는 點의 斷面積, u_x 는 그 斷面에서의 振動 變位, C 는 棒의 材料中에서 音速度, t 는 時間이다.

그림에서와 같이 conical 形 horn 의 縱振動은 境界 條件으로서 $x=0$ 및 l 에서 變位 勾配가 0 으로 되므로 $x=0$ 및 l 에서 $\partial u / \partial x = 0$ 를 이용하여 그 共振 條件式은, $\tan \alpha l = \omega l C (D_1 - D_2)^2 / \{ C^2 (D_1 - D_2)^2 + \omega^2 l^2 D_1 D_2 \}$ 로 된다.

또 斷面이 円形이 아닌 경우 兩端의 斷面積 S_1, S_2 를 이용하여 $\tan \alpha l = \omega l C (\sqrt{S_1/S_2} - 1)^2 / \{ C^2 (\sqrt{S_1/S_2} - 1)^2 + \omega^2 l^2 \sqrt{S_1/S_2} \}^{1/2}$ 이고 이것에서 horn 兩端面의 直徑 또는 斷面積 및 共振 周波數가 주어지면 l 가 구해진다.

Horn 내의 振幅 分布는 그림 23의 경우에서 大端面을 振幅 u_1 으로 驅動하면 大端面에서 距離 x 되는 斷面에서 振幅 u_x 는 다음식으로 주어진다.

$$u_x = \frac{l_0}{l} \cos(\alpha l \cdot \frac{x}{l}) - \frac{1}{\alpha l \frac{l_0}{l}} \sin(\alpha l \cdot \frac{x}{l})$$

$$\text{단, } \frac{l_0}{l} = \frac{\sqrt{S_1/S_2}}{\sqrt{S_1/S_2} - 1}$$

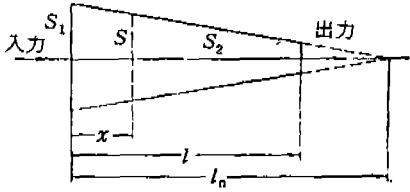


그림 23 Conical 形 혼 (先端自由)

Horn의 振幅 擴大率의 경우, 大端面과 小端面의 振幅比 M 은 윗식에서 $x=l$ 넣고 얻어진다. 즉 小端面에서의 振幅을 u_2 라고 하면

$$M = \frac{u_2}{u_1} = \frac{\sqrt{S_1}}{\sqrt{S_2}} \left\{ \cos \alpha l - \frac{1}{\alpha l} \left(1 - \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \right) \sin \alpha l \right\}$$

로 나타낸다.

Horn의 振動 節面(nodal plane)의 位置를 구하는 경우에는 그림 21과 같이 振動子에 直接 납땜 또는 은납땜하여 cone으로 이용하는 경우가 많다. 이 때 cone의 振動의 節에 알맞은 個所에 플랜지를 달고 이것을 外部 容器에 固定해서 振動子素의 支持를 한다. 振動節面의 位置는 大端面에서 節面까지의 距離로 다음식을 이용한다.

$$\frac{x_N}{l} = \frac{\tan^{-1} \left(\alpha l \cdot \frac{\sqrt{S_1/S_2}}{\sqrt{S_1/S_2}-1} \right)}{\alpha l}$$

단, αl 의 값은 共振 條件에서 決定한 값을 이용한다.

振動 應力 分布의 경우에 共振 狀態에 있을 때 그 内部의 應力 δ_x 의 分布는 다음식에 의하여 구한다.

$$\frac{\sigma_x}{j\rho C u_1} = \frac{\frac{x}{l}}{\alpha l \left(\frac{l_0}{l} - \frac{x}{l} \right)^2} \cos \left(\alpha l \cdot \frac{x}{l} \right) - \left\{ \frac{\frac{l_0}{l}}{\frac{l_0}{l} - \frac{x}{l}} + \frac{1}{(\alpha l)^2 \left(\frac{l_0}{l} - \frac{x}{l} \right)^2} \right\} \sin \left(\alpha l \cdot \frac{x}{l} \right)$$

여기서 u_1 는 大端面에서 速度 振幅 j 는 $\sqrt{-1}$ 이다.

Catenoidal 形 horn의 設計時도 conical 形과 같은 項을 고려한다.

우선, 共振 條件만을 고려하면 그림 24에서 보는 바와 같은 형에서 縱振動의 運動 方程式은 $\sqrt{1-(n/\alpha)^2} \cdot \alpha l \cdot \tan \{ \sqrt{1-(n/\alpha)^2} \cdot \alpha l \} = -\sqrt{1-S_2/S_1} \cosh^{-1} \sqrt{S_1/S_2}$ 로 바꿀 수 있다.

여기서 $\alpha = \omega / C$ ($\omega = 2\pi f$, 角振動數; C : horn 材料中 音速度)이고 catenoidal 曲線은 $S_x = S_2 \cosh^2 \eta (l-x)$ 이고 斷面 円形의 경우는 直徑 D_x, D_2 를 이용하여 $D_x = D_2 \cosh \eta (l-x)$ 로 된다.

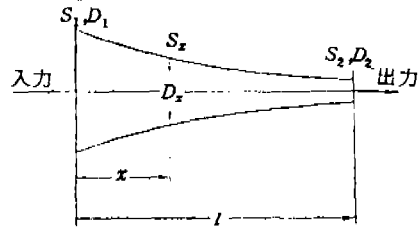


그림 24 Catenoidal 形 혼

결국 $\eta = (1/l) \cosh^{-1} D_1/D_2 = (1/l) \cosh^{-1} \sqrt{S_1/S_2}$ 되는 관계가 존재한다.

縱振動의 運動 方程式과 η 의 관계를 이용하여 表 5에서 αl 를 구하여 이것을 圖表하면 그림 25와 같게 된다. 이 때 그림에서와 같이 $\sqrt{S_1/S_2}$ 의 값에 대하여 αl 은 일정하게 증감하지 않고 $\sqrt{S_1/S_2} \approx 2$ 에서 최소값을 나타낸다.

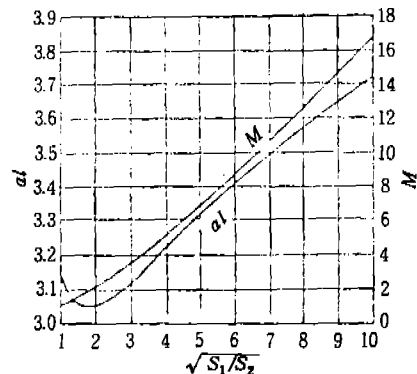


그림 25 Catenoidal 形 혼의 αl 및 M 값

大端面과 小端面의 面積 S_1 및 S_2 가 주어지면 그림에서 al 이 구해져 horn의 길이가 결정된다. 이 l 을 이용하여 catenoidal 定數 η 가 구해져 horn의 치수가 計算된다.

Horn 내의 振動 速度 또는 振幅 分布 만을 고려하면 大端面에서 x 되는 位置의 振動 速度 v_x 는

$$v_x = v_1 \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \cdot \frac{\cos \left\{ \tau al \left(1 - \frac{x}{l} \right) \right\}}{\cos \left\{ \left(1 - \frac{x}{l} \right) \cosh^{-1} \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \right\} \cos \tau al}$$

로 된다.

여기서 波長 定數率 τ 를 주면 al 과 $\sqrt{S_1/S_2}$ 가 정해지게 된다.

또 horn 兩端面의 振動 速度比 또는 振幅 擴大率은 $\sqrt{S_1/S_2}$ 의 여러 값에 대한 M 의 값을 계산하면 表 6과 같이 되고 이 결과를 $\sqrt{S_1/S_2}$ 에 대하여 그림 25에 나타낸다.

horn의 振動 節面(nodal plane)의 位置 決定은 horn의 大端面에서 x_N 에 하면 $\alpha x_N = al - (\pi/2\tau)$ 로 된다.

$\sqrt{S_1/S_2}$ 의 여러 값에 대하여 αx_N 의 값을 구하면 表 7과 같다.

Horn 內의 振動 應力 分布의 경우에는 그 內部 交番 應力이 매우 크게 되면 疲勞 破斷을 일으키는 것이 있으므로 그 最大値가 許容 限界를 넘지 않도록 주의하여야 한다.

Horn의 軸方向으로 振動에 의한 交番 應力을 구하면,

$$\left| \frac{\sigma x'}{\rho C v_2} \right| = \frac{\tau \sin \tau al \left(\frac{x'}{l} \right) + \sqrt{\frac{1-\tau^2}{\tau}} \tanh \left\{ \tau al \sqrt{\frac{1-\tau^2}{\tau}} \left(\frac{x'}{l} \right) \right\} \cos \left\{ \tau al \left(\frac{x'}{l} \right) \right\}}{\cosh \left(\frac{x'}{l} \cosh^{-1} \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \right)}$$

表 5 Catenoidal 形 혼의 αl 값

$\sqrt{S_1/S_2}$	$\frac{\text{arc cosh}}{\sqrt{S_1/S_2}}$	αl
1.2	0.62236	3.111
1.5	0.96242	3.055
2.0	1.31696	3.047
2.5	1.56680	3.073
3.0	1.76275	3.114
3.5	1.92485	3.161
4.0	2.06344	3.210
4.5	2.18464	3.260
5.0	2.29243	3.309
6.0	2.47789	3.403
7.0	2.63392	3.492
8.0	2.76866	3.573
9.0	2.88727	3.649
10.0	2.99322	3.720

表 6 Catenoidal 形 혼의 振幅 擴大率 M

$\sqrt{S_1/S_2}$	$\frac{\eta}{\alpha}$	M	$\sqrt{S_1/S_2}$	$\frac{\eta}{\alpha}$	M
1.2	0.2000	1.21	4.5	0.6701	6.00
1.5	0.3151	1.54	5.0	0.6928	6.89
2.0	0.4322	2.17	6.0	0.7215	8.51
2.5	0.5098	2.85	7.0	0.7544	10.64
3.0	0.5661	3.58	8.0	0.7748	12.60
3.5	0.6089	4.34	9.0	0.7912	14.68
4.0	0.6428	5.16	10.0	0.8046	16.78

表 7 Catenoidal 形 혼의 振動 節面의 위치 x_N

$\sqrt{S_1/S_2}$	αx_N	$\sqrt{S_1/S_2}$	αx_N	$\sqrt{S_1/S_2}$	αx_N
1.2	1.189	4.0	0.823	9.0	0.879
1.5	0.907	4.5	0.831	10.0	0.884
2.0	0.824	5.0	0.837		
2.5	0.808	6.0	0.847		
3.0	0.809	7.0	0.862		
3.5	0.816	8.0	0.870		

여기서 τ 가 주어지면 内部 應力 σx 가 구해진다. 이 경우 x 는 小端面에서의 距離이다.

Step形 horn의 設計時도 다른形과 마찬가지로 共振 條件, 振幅 擴大率 등을 고려한다.

Step形 horn은 強力 超音波 應用에 널리 사용되며 그림 26과 같은 單純 step形의 경우 振幅 擴大率在 大端面와 小端面的 面積比로 되며 先端에서 매우 큰 振幅이 얻어진다. 단, step부에서의 斷面積比가 크게 되면 設計 計算의 前提인 應力連續의 假定이 成立되지 않고, 共振周波數가 設計한 값보다 크지 않아 實用이 어렵다. 그래서 보통은 step부에 適當한 曲率을 만들거나 step부를 exponential 曲線으로 結合한다.

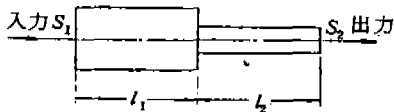


그림 26 單純 Step形 horn

우선, 振幅 擴大率의 경우, 그림 26에서 $l_1 = l_2 = \lambda/4$ (λ 는 파장)으로 하면 兩端에서 振幅이 最大, step部에서 振幅이 0으로 된다. 이 때의 振幅 擴大率 M 은 $M = S_1/S_2$ 로 兩端의 面積比로 되고 斷面 円形의 horn이면 兩端面的 直徑이 2乘比로 된다.

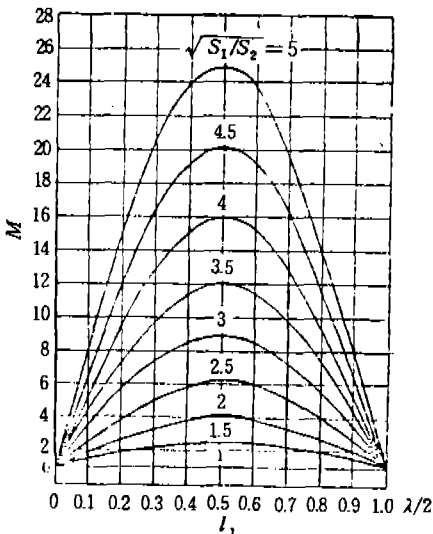


그림 27 單純 Step形 horn의 치수와 振幅 擴大率

그림 27은 半波長 共振하는 horn에서 l_1 의 길이를 變化시킨 경우의 振幅 擴大率을 나타내며, l_1 이 $\lambda/4$ 와 같을 때 M 은 最大로 된다.

또한 入力側 直線部(l_1 의 部分)와 出力側 直線部(l_2 의 部分)의 材質이 서로 다른 것을 사용하면 그 振幅 擴大率은 入力端 및 出力端에서 機械 impedance의 比에 똑같게 되므로 $M = \rho_1 C_1 S_1 / \rho_2 C_2 S_2 = E_1 C_2 S_1 / E_2 C_1 S_2$ 로 된다.

윗식에서 兩側 直線部の 材質을 適當히 선택하면 同一材質에 비하여 振幅 擴大率이 크게 된다.

3. 結 言

液體의 微粒化는 內燃機關 技術者들이 觀心을 가지고 研究할 價値가 있다.

燃燒器의 特徵에 따라 微粒化裝置가 決定되었지만 本報에서 言及한 振動子의 特性, Horn의 特性, 微粒化裝置의 特性 등을 理解하여 燃燒器의 經濟性, 效率向上을 얻도록 계속적인 研究·開發이 있어야 하겠다.

Nomenclature

- S_1 : horn의 大端面積, cm^2
- S_2 : horn의 小端面積, cm^2
- S_x : horn의 大端面에서 x 되는 位置의 斷面面積, cm^2
- D_1 : horn의 大端部 直徑, cm
- D_2 : horn의 小端部 直徑, cm
- D_x : horn의 大端面에서 x 되는 位置의 直徑, cm
- ρ : horn 材料의 密度, g/cm^3
- C : horn 材料中에서의 音速度, cm/sec
- f : horn의 共振 周波數, $1/s$
- ω : horn의 共振 角周波數($= 2\pi f$), $1/s$
- α : 波長 定數($= \omega/c$), $1/cm$
- l : 半波長 共振하는 horn의 길이, cm
- λ : horn 材料中の 超音波 波長($= c/f$), cm
- u_1 : horn 大端面的 振幅, cm
- u_2 : horn 小端面的 振幅, cm

u_x : horn의 大端面에서 x 되는 位置에서 振
幅, cm

M : 振幅 擴大率

x_N : 大端面에서 節面까지의 距離

E_1 : 入力側 材料의 영울

E_2 : 出力側 材料의 영울

參考文獻

- 1) Toshio Kurabayashi, 內燃機關, Vol. 15, No. 188, p. 73 ~ 80 (1976).
- 2) 류정인 외 3인, 가솔린 기관용 超音波 微粒化 장치의 타당성에 관한 연구(1), 한국 자동차공학회지 Vol. 9, No. 4, p. 41 ~ 49. (1987).
- 3) 류정인 외 2인, 가솔린 기관용 흡기관내에서의 흡인연료 微粒化에 관한 연구, 충남대학교 공업교육연구소, Vol. 8, No. 2, p. 67 ~ 73. (1985).
- 4) 류정인, 초음파를 이용한 흡입 연료의 微粒化 性能에 관한 연구, 충남대학교 산업기술연구소, Vol. 2, No. 2, p. 55 ~ 64 (1987).
- 5) 류정인의 1인, 가솔린 엔진용 代替燃料의 妥當性에 關한 研究 Ⅲ, 忠南大學校 工業教育研究所, Vol. 5, No. 2, 70 ~ 73 (1982).
- 6) 류정인, 가솔린 엔진용 代替燃料의 妥當性에 關한 研究 Ⅳ, 大韓工業教育學會誌, 第 8 卷第 2 號, pp. 67 ~ 73. (1983)
- 7) 류정인, 양옥룡, 가솔린 엔진용 代替燃料의 妥當性에 關한 研究 Ⅴ, 仁荷大學校 産業科學技術研究所 論文集, 第 13 輯, p. 11 21 (1985).
- 8) 東北金屬工業(株) Catalog.
- 9) 島川正憲, 超音波工學, 工業調查會, 1985.