

압전초음파복합변환자의 공진주파수에 미치는 부하의 영향

김영재, 리철수, 김광성

압전초음파복합변환자는 효율이 높고 모양과 구조를 각이하게 변화시킬 수 있는 것으로 하여 초음파세척, 초음파용접, 초음파가공 등 초음파출력을 리용하는 분야에 광범히 응용되고 있다. 최근 압전초음파복합변환자의 최량설계가 연구[1-5]되고 음향부하가 변환자 성능에 영향을 준다는 것이 밝혀졌다. 그러나 음향부하를 결정하는 것이 어려우므로 변환자 특성에 미치는 부하의 영향에 대한 연구는 제한되어 있다.

본문에서는 압전초음파복합변환자에 미치는 부하의 영향을 전기-기계등가회로에 기초하여 해석하였다.

1. 부하를 가진 압전초음파복합변환자의 공진주파수방정식

부하를 가진 압전초음파복합변환자의 구조는 그림 1과 같다.

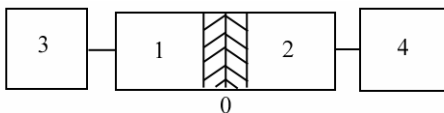


그림 1. 부하를 가진 압전초음파복합 변환자의 구조

0-압전사기, 1-금속뒤덮판, 2-금속앞덮판, 3-부하(공기), 4-부하(액체 혹은 고체)

보통 변환자의 뒤복사면에서의 부하는 무시되므로 $Z_{BL} = 0$ 이다. 그러나 변환자의 앞복사면에서의 부하는 무시할 수 없으며 그것의 부하전저항 Z_{FL} 은 변환자에 대한 부하의 반작용으로 표시된다.

각이한 초음파응용에 따라서 부하전저항은 서로 다르고 부하특성은 복잡하며 많은 경우 부하전저항을 해석적방법으로 얻는 것은 대출력초음파에서 특별히 어려운 문제이다.

액체부하와 고체부하인 경우 부하전저항은 근사적으로 다음과 같이 표시된다.

$$Z_{FL} = j\rho_L c_L S_L \tan(k_L l) \quad (1)$$

여기서 ρ_L , c_L , S_L 은 각각 부하매질의 밀도, 음속도, 가로자름면면적이고 l 은 부하매질의 길이이다. 부하매질의 길이는 세척수조에서의 액체의 높이, 구멍뚫기와 가공에서 리용되는 공구의 길이로 택하였다.

변환자는 3개의 부분 즉 금속뒤덮판(BM)과 금속앞덮판(FM), 금속덮판들 사이에 적층된 고리형압전사기진동자(PZT)로 구성되었다.

1차원진동리론에 기초하여 손실을 무시할 때 압전초음파복합변환자의 전기-기계등가회로는 그림 2로 표시할 수 있다.

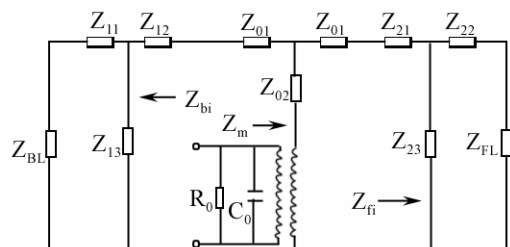


그림 2. 압전초음파복합변환자의 전기-기계 등가회로

Z_{BL} , Z_{FL} 은 변환자의 뒤와 앞복사면에서의 부하전저항, Z_{11} , Z_{12} , Z_{13} 은 금속뒤덮판의 전저항, Z_{21} , Z_{22} , Z_{23} 은 금속앞덮판의 전저항, Z_{01} , Z_{02} 은 고리형압전사기의 전저항, Z_{fi} , Z_{bi} 는 압전사기교리의 앞뒤단자전저항

압전사기고리의 앞뒤단자전저항 Z_{fi} , Z_{bi} 는 다음과 같다.

$$Z_{bi} = jZ_1 \tan(k_1 L_1) = j\rho_1 c_1 S_1 \tan(k_1 L_1), \quad Z_{fi} = jZ_2 \tan \alpha = j\rho_2 c_2 S_2 \tan \alpha$$

여기서 $\tan \alpha = [Z_2 + Z_1 \tan(k_1 L_1) \cdot \cot(k_2 L_2)] / [Z_2 \cot(k_2 L_2) - Z_1 \tan(k_1 L_1)]$, ρ_1 , c_1 , S_1 은 금속뒤덮판의 밀도, 음속도, 가로자름면면적, ρ_2 , c_2 , S_2 는 금속앞덮판의 밀도, 음속도, 가로자름면면적, L_1 , L_2 는 각각 금속뒤덮판, 금속앞덮판의 길이, $k_i = \omega / c_i$ ($i=1, 2$) 는 파수, $c_1 = (E_1 / \rho_1)^{1/2}$, $c_2 = (E_2 / \rho_2)^{1/2}$ 은 각각 금속뒤덮판, 금속앞덮판의 세로파음속도, E_1 , E_2 는 금속뒤덮판, 금속앞덮판재료의 양그늘이다.

이로부터 변환자의 운동전저항 Z_m 은 다음과 같이 유도된다.

$$Z_m = jX_m = j \frac{Z_1 Z_2 \tan(k_1 L_1) \tan \alpha - Z_0^2 - Z_0 Z_1 \tan(k_1 L_1) \cot(k_0 L_0) - Z_0 Z_2 \tan \alpha \cot(k_0 L_0)}{2Z_0 \tan(k_0 L_0 / 2) + Z_1 \tan(k_1 L_1) + Z_2 \tan \alpha}$$

여기서 $Z_0 = \rho_0 c_0 S_0$, ρ_0 은 고리형압전사기의 밀도, $c_0 = (1 / (s_{33}^E \rho_0))^{1/2}$ 은 고리형압전사기의 음속도, S_0 은 가로자름면면적, X_m 은 변환자의 무효운동전저항, $k_0 = \omega / c_0$, s_{33}^E 는 압전사기재료의 유연률상수이다.

공진주파수방정식은 $X_m = 0$ 에 의해서 얻을수 있다.

$$\frac{Z_1 Z_2 \tan(k_1 L_1) \tan \alpha - Z_0^2 - Z_0 Z_1 \tan(k_1 L_1) \cot(k_0 L_0) - Z_0 Z_2 \tan \alpha \cot(k_0 L_0)}{2Z_0 \tan(k_0 L_0 / 2) + Z_1 \tan(k_1 L_1) + Z_2 \tan \alpha} = 0 \quad (2)$$

2. 압전초음파복합변환자에 미치는 부하의 영향에 대한 해석

액체부하 대출력초음파에서 액체매질 또는 혼합액체와 고체알갱이들은 초음파세척, 초음파추출, 초음파화학에서 부하로 된다. 이 경우 액체매질은 근사적으로 액체원기둥으로 고려되며 그것의 윗표면은 외부힘으로부터 자유롭다고 볼수 있다.

문에서는 간단하게 부하로 원통형세척수조를 가지는 변환자를 고찰하였다. 이 경우 변환자의 부하는 근사적으로 원기둥통안의 액체이며 그것의 부하전저항은 식 (1)에 의해 표시된다. S_L 과 l 은 액체원기둥의 자름면면적과 액체높이이다.

공진주파수방정식에 따르는 초음파복합변환자의 공진주파수와 액체높이사이관계는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 세척수조에서 액체높이가 증가할 때 변환자의 공진주파수는 감소한다. 또한 일정한 액체높이에서 액체원기둥의 자름면면적이 증가할 때 변환자의 공진주파수는 역시 감소한다.

한편 각이한 구조를 가진 변환자(그림 4)의 공진주파수에 미치는 부하의 영향을 고찰하였다.

그림 4에서 보는바와 같이 대칭구조의 경우 압전요소들과 변위마디는 변환자의 기하학적중심에 놓이며 비대칭구조(1)의 경우에는 변위마디가 액체매질로 초음파를 복사하는 금속앞덮판에 놓이며 비대칭구조(2)의 경우에는 변위마디가 액체매질로 초음파를 복사하는 금속뒤덮판에 놓여있다.

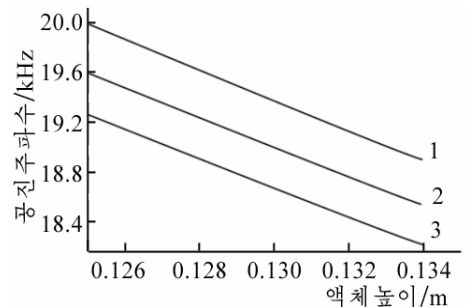


그림 3. 초음파복합변환자의 공진주파수와 액체높이사이관계

1-3은 액체원기둥의 자름면면적의 크기가 S_{L1} , S_{L2} , S_{L3} 인 경우($S_{L1} < S_{L2} < S_{L3}$)

각이한 구조를 가진 변환자의 공진주파수와 액체높이사이의 관계는 그림 5와 같다.

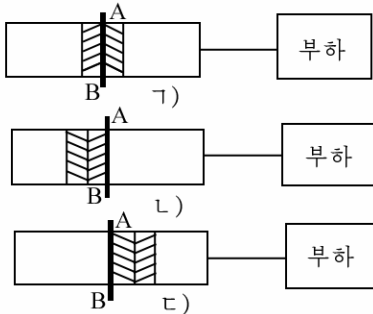


그림 4. 초음파복합변환자의 각이한 구조
 1) 대칭구조, 2) 비대칭구조(1),
 3) 비대칭구조(2); AB는 변위마디선

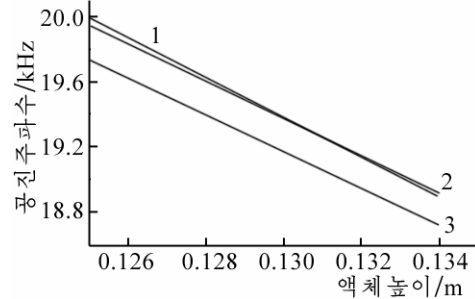


그림 5. 각이한 구조를 가진 변환자의
 공진주파수와 액체높이사이의 관계
 1-대칭구조, 2-비대칭구조(2), 3-비대칭구조(1)

그림 5에서 보는바와 같이 액체의 높이에 따르는 변환자의 공진주파수변화는 대칭구조를 가지는 변환자에서 가장 크며 변위마디가 금속뒤덮판에 있는 비대칭구조를 가진 변환자에서 가장 작다.

고체부하 초음파구멍뚫기와 초음파가공과 같은 부분들에서는 변환자의 부하가 고체원기둥으로 된다. 이 경우 변환자의 가공공구는 마모로 하여 변할수 있다. 이것은 변환자의 공진주파수를 변화시키는 결과를 초래한다. 일반적으로 변환자의 가공공구의 앞끝은 외부힘에 의해 반작용을 받는다. 그러나 초음파구멍뚫기와 같이 공구의 자름면면적이 작을 때 외부힘은 무시될수 있으며 가공공구의 앞끝이 근사적으로 외부힘에 대해 자유롭다고 볼수 있다. 이 경우 변환자의 부하전저항은 역시 식 (1)로 표시된다. 이때 S_L 과 l 은 공구의 자름면면적과 길이이다.

고체부하에 대하여 계산된 각이한 자름면면적을 가진 공구의 길이와 공진주파수사이 관계는 그림 6과 같다.

그림 6에서 보는바와 같이 공구의 길이가 증가될수록 변환자의 공진주파수는 감소한다. 한편 공구의 자름면면적이 더 작을수록 공진주파수에 미치는 부하의 영향은 작다.

각이한 구조를 가진 변환자의 공진주파수와 공구길이사이관계는 그림 7과 같다.

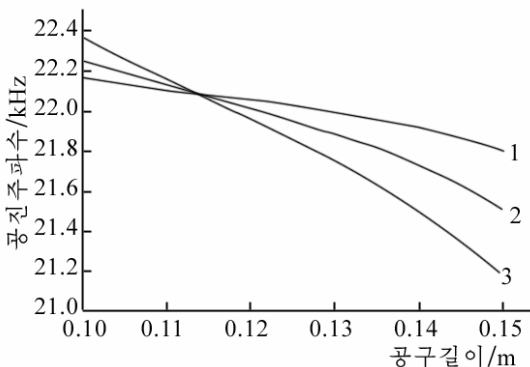


그림 6. 각이한 자름면면적을 가진 공구의
 길이와 공진주파수사이관계
 1-3은 공구의 자름면면적의 크기가
 S_{L1} , S_{L2} , S_{L3} 인 경우($S_{L1} < S_{L2} < S_{L3}$)

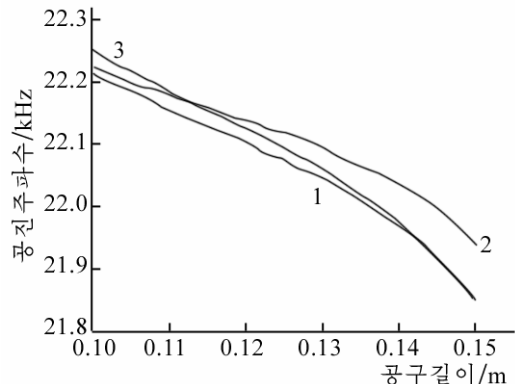


그림 7. 각이한 구조를 가진 변환자의
 공진주파수와 공구길이사이관계
 1-3은 그림 5의 1-3과 같음

그림 7에서 보는바와 같이 금속뒤텃판에 변위마디를 가지는 변환자의 공진주파수에 주는 고체부하의 영향이 제일 작으며 금속앞텃판에 변위마디를 가지는 변환자의 공진주파수에 주는 고체부하의 영향이 가장 크다. 이로부터 초음파구멍뚫기와 가공에는 변위마디가 금속뒤텃판에 있는 변환자를 리용하는것이 더 좋다.

3. 실험 결과

액체부하를 가진 변환자의 공진주파수를 측정하기 위한 실험구성도는 그림 8과 같다.

실험에서는 정해진 액체의 높이에서 발진기에 의해서 발생하는 러기신호의 주파수를 속도수감부의 출구가 최대로 될 때까지 변화시킨다. 이 최대 출구값에 해당하는 주파수가 액체부하를 가지는 변환자의 공진주파수이다.

실험에서는 입구출력이 대략 30W의 일정한 값을 유지하도록 하였다.

각이한 구조를 가진 변환자의 공진주파수를 액체높이와 자름면면적을 변화시키면서 측정한 결과는 표 1과 같다.

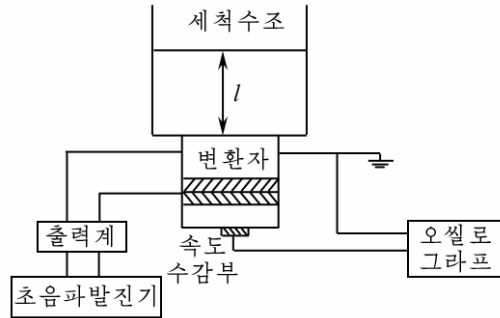


그림 8. 액체부하를 가진 변환자의 공진주파수 측정 실험 구성도

표 1. 액체부하를 가진 변환자의 공진주파수 측정값

l/mm	대칭구조						비대칭구조(1)						비대칭구조(2)					
	S_{L1}		S_{L2}		S_{L3}		S_{L1}		S_{L2}		S_{L3}		S_{L1}		S_{L2}		S_{L3}	
	$f_{제}$ /kHz	$f_{측}$ /kHz	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
125	20.0	19.7	19.6	19.2	19.3	18.9	19.7	19.6	19.3	19.2	19.1	18.9	20.0	19.8	19.6	19.4	19.3	19.1
128	19.6	19.3	19.2	19.0	18.9	18.5	19.4	19.2	19.0	18.9	18.7	18.5	19.6	19.5	19.3	19.1	18.9	18.8
131	19.3	19.0	18.9	18.5	18.6	18.1	19.1	18.9	18.7	18.5	18.4	18.2	19.3	19.1	18.9	18.8	18.6	18.4
134	18.9	18.5	18.5	18.1	18.2	18.1	18.7	18.6	18.4	18.2	18.1	17.9	18.9	18.8	18.6	18.4	18.3	18.1

표 1에서 보는바와 같이 각이한 구조를 가진 변환자에서 액체높이와 자름면면적에 따라 측정된 공진주파수는 계산결과와 잘 일치한다.

고체부하를 가진 변환자의 공진주파수를 측정하기 위한 회로는 그림 9와 같다.

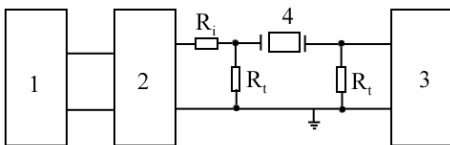


그림 9. 고체부하를 가진 변환자의 공진주파수 측정 회로

1-주파수계, 2-신호발생기,
3-오실로그래프, 4-변환자,
 R_1, R_t 는 저항($R_1 \gg R_t$)

실험에서는 오실로그래프의 출력값이 최대값으로 될 때까지 신호발생기의 주파수를 변화시킨다. 이 최대값에 해당하는 주파수가 고체부하를 가지는 변환자의 공진주파수이다.

각이한 구조를 가진 변환자의 공진주파수를 공구의 길이와 자름면면적을 변화시키면서 측정한 결과는 표 2와 같다.

표 2에서 보는바와 같이 측정값은 계산값과 잘 일치한다.

표 2. 고체부하를 가진 변환자의 공진주파수측정값

l/mm	대칭 구조						비대칭 구조(1)						비대칭 구조(2)					
	S_{L1}		S_{L2}		S_{L3}		S_{L1}		S_{L2}		S_{L3}		S_{L1}		S_{L2}		S_{L3}	
	$f_{제}$ /kHz	$f_{측}$ kHz	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
132	22.0	21.8	21.9	21.7	21.7	21.4	22.0	21.7	21.9	21.5	21.7	21.3	22.0	21.9	21.9	21.7	21.8	21.6
138	21.9	21.8	21.8	21.5	21.6	21.3	21.9	21.6	21.8	21.4	21.5	21.3	22.0	21.8	21.9	21.6	21.7	21.5
144	21.9	21.7	21.7	21.4	21.4	21.1	21.9	21.6	21.6	21.3	21.3	21.0	22.0	21.8	21.8	21.6	21.5	21.4
150	21.8	21.7	21.5	21.2	21.2	20.9	21.8	21.5	21.5	21.1	21.1	20.8	21.9	21.7	21.7	21.4	21.4	21.2

맺는 말

초음파세척과 같은 액체부하로 되는 경우 세척수조에서 액체높이가 증가할 때 변환자의 공진주파수는 감소하며 일정한 액체높이에서 액체부하의 자름면면적이 증가할 때 역시 변환자의 공진주파수는 감소한다. 초음파구멍뚫기와 가공에서 고체부하로 되는 가공공구의 길이와 자름면면적이 증가할 때 변환자의 공진주파수는 감소한다.

액체 또는 고체부하인 경우 다같이 공진주파수는 변위마디가 금속뒤딛판에 있는 변환자에서 제일 작고 금속앞딛판에 있는 변환자에서 가장 크다.

참고 문헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 59, 1, 64, 주체102(2013).
- [2] 리철수; 초음파변환자, 고등교육도서출판사, 69~108, 주체104(2015).
- [3] Dale Ensminger et al.; Ultrasonics, CRC Press, 92~125, 2009.
- [4] K. Nakamura; Ultrasonic Transducer, WP, 64~186, 2012.
- [5] V. M. Mastronardi et al.; Microelectric Engineering, 121, 59, 2014.

주체106(2017)년 8월 5일 원고접수

Effect of Load on the Resonance Frequency of the Piezoelectric Ultrasonic Composite Transducer

Kim Yong Jae, Ri Chol Su and Kim Kwang Song

On the basis of the equivalent circuit theory, we studied the load characteristics of high power piezoelectric ultrasonic composite transducer. We considered two types of loads. One is liquid load and the other is solid load. And we analyzed the effect of load and structure of the transducer on the resonance frequency of the transducer.

Key words: ultrasonic, piezoelectric composite transducer