

壓電세라믹 變壓器의 昇壓特性에 관한 研究

A Study on the Step-up Properties of Piezoelectric Ceramic Transformer

김용혁 * · 최명규 * · 이원식 * · 김재호 *

(Yong-Hyuk Kim · Myung-Kyu Choi · Won-Shick Rhee · Jae-Ho Kim)

요 약

본 논문은 압전 세라믹스 재료를 사용한 장방형 압전 변압기의 승압특성에 관한 연구이다. 승압기구 분석을 위하여 진동모드에 따른 주파수 Spectrum을 구동부측과 발전부측에 대해 각각 조사하였다. 시편구조(전극길이, 두께, 폭)에 따른 진동상태와 승압비를 평가하고 압전 변압기로서 가져야 될 최적조건을 제시하였다. 또한 부하저항에 병렬로 연결된 등가손실저항과 발전부 공진임피던스 사이의 관련성을 검토하였다.

Abstract

This paper is the study on the step-up properties of rectangular piezoelectric transformer made from a piezoelectric ceramic materials. In order to Analysis the step-up mechanism we tried to investigate the frequency spectrum for different vibration mode of drive and generation section respectively.

The vibration behavior and step-up ratio for the various dimensions of specimen(Electrode length, thickness, width) have been estimated and the optimal dimension which piezoelectric transformeris to be made is proposed.

The correlation between the equivalent loss resistance in parallel with Load resistor and resonace impedance of generation section is also investigated.

1. 서 론

압전 변압기는 처음에 수정발진자의 동작원리로 부터 검토되었으며 고전압 발생원으로 주목된 것은 1958년 미국의 C.A.Rosen에 의한 실험보고 이후 P.A.Berkum, H.W.Katz 등에 의한 이론적 연구가 진행되면서 부터이다.¹⁾²⁾ 연구초기에는 BaTiO₃ 재료를 사용한 압전 변압기가 제작되었으나 승압비가 낮고 온도안정성이 떨어져 실용상의 문제점이 되었다. 최근에는 Pb(Zr, Ti)O₃ 계 압전 세라믹스 재료를 사용하여 우수한 승압특성을 갖는 압전 변압기가 여러 모델로 개발되었다.³⁾⁴⁾⁵⁾

압전 세라믹 변압기는 동작특성상 착화소자와 세라믹 필터의 중간적 존재로써 재질의 성질이나 구조면에서는 착화소자에 가깝고 공진특성이나 이론적 해석에 있어서는 세라믹 필터에 가까우며 압전특성면에서 압전정효과와 압전역효과를 이용하게 된다.

압전형 변압기는 1 차측 교변전압 - 초음파 기계진동 - 2 차측 발전과정을 거쳐 승압작용을 하므로 자계에너지 변환에 의한 권선형 변압기에 비해 소형경량이면서 불연성이고 출력측 단락에 대해 입력측이 안정한 등의 잇점을 갖기 때문에 고전압 소전류를 필요로 하는 전원장치⁶⁾에의 실용성이 매우 크다.

압전 세라믹 변압기는 원리적으로 횡진동효과를 이용하는 구동부 (Drive Section) 와 종진동 효과를 이용하는 발전부 (Generation Section) 로 나누어져 있으며 이들 진동의 상호작용에 의한 승압작용을 하기 때문에 전압발생 기구해석에는 많은 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 실용성이 매우 높은 장방향 압전 변압기를 PZT계 세라믹스 재

료를 사용하여 제작하고 승압특성에 미치는 제반요소들의 영향을 진동현상을 중심으로 연구 조사 하였다.

2. 실험방법 및 측정

2-1. 시편 제조

본 실험에서 사용한 압전 세라믹스 재료는 PE-650B (후지티탄) 로써 결합제가 첨가된 Transducer 용 PZT계 압전분말이다.

사용분말을 700kg/cm²의 압전하에서 5cm×2cm×T의 사각관형으로 성형한 후 최대 압전 정수값을 나타내는 온도인 1280℃에서 1시간 유지하여 소결하였다. 이때 두께 T는 실험과정에 따라 임의의 조정하였다. 소결된 시편을 Sic paper (# 1000) 로 양면을 곱게 연마한 후 은전극 (Dupont 7095) 을 도포하여 600℃에서 5분간 유지시켜 전극처리 하였다. 분극은 직류전계 2.5KV/mm를 가하여 100℃의 Silicone oil 내에서 30분 동안 행하였다.

장방향 압전 변압기는 두개의 진동도드를 이용하기 때문에 동일시편에 대해 두번 분극처리를 해야 한다. 본 실험에서는 두께방향 분극후 동일분극 조건하에 두께방향의 상하전극을 고통된 한 단자로 하고 길이방향 전극을 대응전극으로 하여 2번째 분극을 행하였다. 이때의 온도가열은 길이방향 분극 부분에만 국한시켰다. 압전판 시편을 상기의 조건으로 제조하여 압전성을 조사한 결과 재현성은 매우 양호하였다.

그림1은 제조된 장방향 압전 변압기 시편의 기본구조로써 구동부와 발전부의 분극방향은 화살표와 같다.

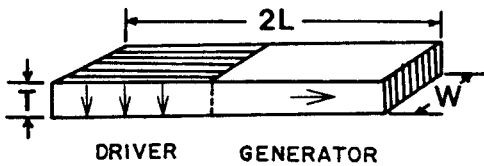


그림 1. 시편의 구조
Fig 1. Figure of specimen.

2-2. 측 정

유전상수는 Impedance Analyzer (HP4192 A)로 IKHZ에서 측정한 정전용량 값으로부터 계산하였다. 주파수특성 및 공진주파수 측정은 Spectrum Analyzer (HP8557)와 IRE Standard 방법⁷⁾을 이용하였다. 2차 측 발생전압을 Function Generator (FG-1882)와 SSVM(VT-150)을 조합하여 측정후 출력전압 (rms) / 입력전압 (rms)의 비율로써 승압비를 계산하였다. 그래프 처리에 사용된 모든 수치는 시편 10개의 평균치를 취한 것으로 하였다.

그림 2는 승압특성을 측정하기 위한 회로도이다.

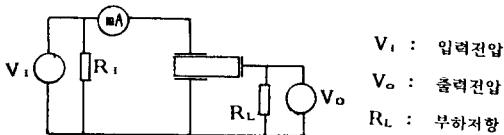


그림 2. 측정 회로도
Fig 2. Measurement circuit.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 지지점에 따른 출력 특성

그림 3은 판상 압전세라믹스의 진동상태에 따른 변위분포 (Displacement distribution)를 나타낸 것으로 진동모양에 따라 전장 (2L)에 대하여 $f = C/4L$ ($\frac{\lambda}{2}$ 모드)로 결정되는

기본공진파와 $f = \frac{C}{2L}$ (λ 모드)인 고조파 공진파로 이루어 진다.⁸⁾

구동부측의 공진주파수는 각각의 진동모드에 의해 결정되므로 최대 진동효과를 얻기 위해서는 각 진동모드에서 변위 0인점(응력최대)을 지지점으로 선택해야 한다.

그림 4는 지지점의 위치를 각 진동모드의 변위 0인점 A, B, C를 취하였을때의 주파수 Spectrum그림이다. 그림 4(a)는 지지점을 반파장 ($\frac{\lambda}{2}$) 진동에 있어서의 변위 0인점 (A점)을 취한 경우로써, $\frac{\lambda}{2}$ 모드 자신은 진동의 방해받지 않으나 λ 모드는 변위가 최대로 일어나는 점에 일치되므로 전파장 진동의 방해가 최대로 일어나게 되어 공진임피던스는 $\frac{\lambda}{2}$ 에 비해 증가한다.

B점을 지지할때는 그림 4(b)와 같이 모드 변위가 0인 반면 $\frac{\lambda}{2}$ 모드는 최대변위의 약 70%에 이르는 점이므로 진동의 방해로 진동특성은 저하되고 공진임피던스는 증가한다.

한편 C점을 지지하면 그림 4(c)와 같이 변위폭이 크므로 B점을 지지할때 보다 진동은 더욱 억제되어 공진임피던스는 증가되고 λ 모드는 B지지점 때보다 진동이 억제되어 공진임피던스가 증가한다. 이같은 지지점 효과는 발전부 측보다는 구동부 측의 공진임피던스 면에서 현저한 변화성을 보이고 있다. 그림 5는 각 지지점에 따른 출력측의 발생전압을 나타낸 것이다. $\frac{\lambda}{2}$, λ 모드의 최대 발생전압을 나타낸 주파수는 그림 4에서 관찰한 공진주파수점과 거의 일치되었으며 그 크기 면에서 구동부의 공진임피던스 변화와 같은 경향을 나타내었다.

따라서, 압전체판을 여기서키는 구동부에 대한 지지점은 2차전압 발생크기에 있어 진동모드에 따라 결정되어야 한다.

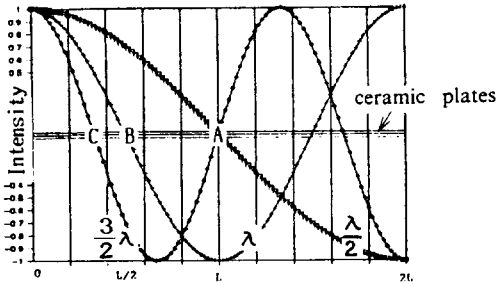


그림 3. 압전 세라믹판의 진동모드
Fig 3. Vibration mode of piezoelectric ceramic plate.

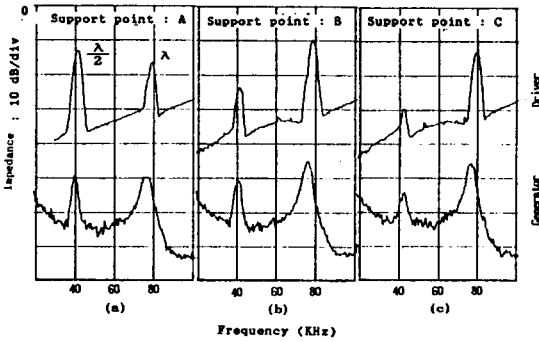


그림 4. 지지점 A.B.C에 대한 주파수 특성
Fig 4. Frequency spectrum in support point A.B and C.

3-2. 시편구조의 영향

그림 6은 구동전극부의 길이를 시편 전장의 0.4-0.8 배로 변화시켰을때의 승압비 특성을 나타낸 것이다.

전극부의 길이가 전장의 $\frac{1}{2}$ 이 되었을때 승압비는 최대값을 나타내었고 그 길이를 전후해서 급격히 감소하였다. 그리고 $\frac{\lambda}{2}$ 모드와 λ 모드에 대한 변화양상은 거의 비슷하였으나 λ 모드값이 약간 증가된 특성을 나타내었다. 이와같은 현상을 규명하기 위하여 그림 7에 전극부 길이에 따른 주파수 특성을 나타내었다. 전극부 길이의 변화에 대해 각 공진주파수점의 변화는 관찰되지 않았다. 따

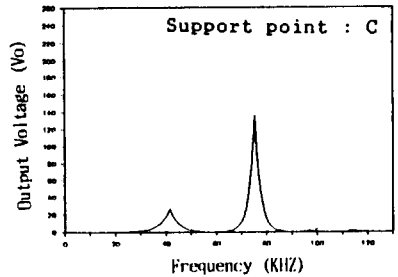
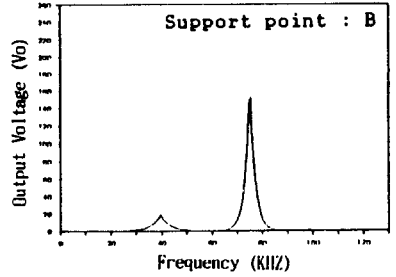
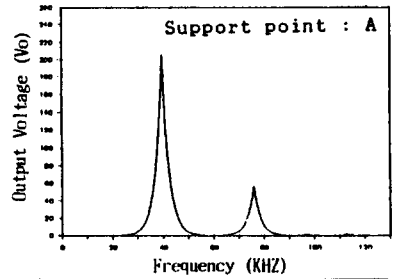


그림 5. 지지점 A.B.C에 대한 출력전압
Fig 5. Output voltage in support point A.B and C.

라서 압전판의 공진 모드는 전극면적에 관계치 않고 다만 전장에 대해 반파장 ($\frac{\lambda}{2}$)과 전파장(λ)의 크기로 진동이 여기 되고 있음을 알 수 있다.

전극길이 변화에 따른 공진임피던스는 크기면에서 $\frac{\lambda}{2}$ 모드와 λ 모드에 대해 서로 다른 성질을 보이고 있다. 즉, 전극길이의 증가에 따라서 공진임피던스는 다음의 변화양상을 보이고 있다.

$\frac{\lambda}{2}$ 모드; 구동부: 감소
발전부: 증가

λ 모드 ; 구동부 : 증가

발전부 : 감소

이와 더불어 Spurious가 점차 증가되는 경향도 나타났다.

이같은 경향을 그림 6의 승압비 면에서 검토해 볼 때 $\frac{\lambda}{2}$ 와 λ 모드의 차이가 근사한 것으로 보아서 전극부에 따른 승압효과는 구동부와 발전부만의 단일효과보다는 서로의 상호작용에 의해 승압비가 결정되는 것으로서, 구동부측과 발전부측의 적정한 진동이 존재할때만 비로써 승압효과가 커지게 되는 것으로 생각된다. 또한 $\frac{\lambda}{2}$ 모드와 λ 모드 각각에 대해 서로 다른 승압작용을 나타냄을 알 수 있다.

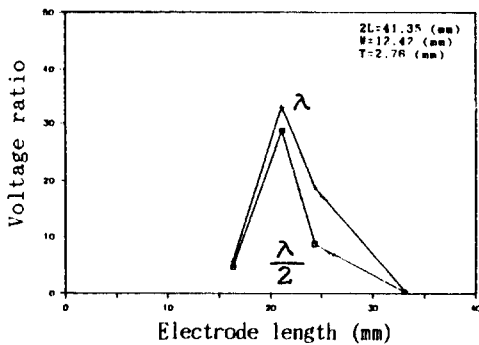


그림 6. 전극길이에 따른 승압비
Fig 6. Voltage ratio for electrode length.

지지점을 B로 하였을 때의 출력전압은 그림 5에서와 같이 λ 모드에 비해 $\frac{\lambda}{2}$ 모드에서는 현저하게 저하되므로 시편두께에 대한 승압비의 변화를 λ 모드에 대해서 그림 8에 나타내었다. 두께 T가 증가할수록 승압비는 거의 직선적으로 낮아지고 있다.

승압비 ($\frac{V_0}{V_1}$)는 압전 세라믹스의 재료정수와 Dimension 효과에 의해 다음식으로 나타낸다. 9)

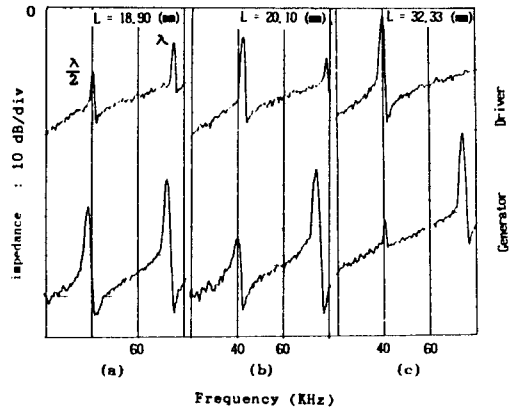


그림 7. 전극길이에 대한 주파수 특성
Fig 7. Frequency spectrum in electrode length.

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{4}{10} \pi^2 K_{31} \cdot K_{33} \cdot Q_m \cdot \frac{L}{T} \quad (1)$$

여기서, $K_{31} \cdot K_{33}$: 전기기계 결합계수
 Q_m : 기계적 품질계수

따라서 식(1)과 결과를 비교해 볼 때 잘 일치되고 있다. 그림 9는 시편두께 변화에 대한 주파수 특성이다.

구동부측은 두께 증가에 대해 공진임피던스가 증가하는 동시에 여기 되는 진폭이 현저히 감소하는 특성을 나타내고 있다. 반면에 발전부 측은 진동폭의 변화는 크지않으나 공진임피던스가 감소하는 경향을 나타낸다.

따라서 두께의 감소효과는 결국 구동부측의 공진특성의 향상에 기여하는 요소로 작용하는 것과 발전부 측의 공진임피던스 증가에 의한 등가손실저항 (후술하게됨)의 증가효과로 작용함으로써 승압비가 증가하는 것으로 생각된다.

또한 두께가 커짐에 따라 구동부 측이나 발전부 측에서의 Spurious 현상이 두드러지게 나타나는 현상은 미소진동세력으로 존재하고

있는 판의 종진동 성분(두께진동성분)이 두께가 증가됨에 따라서 크게 여기 되어 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

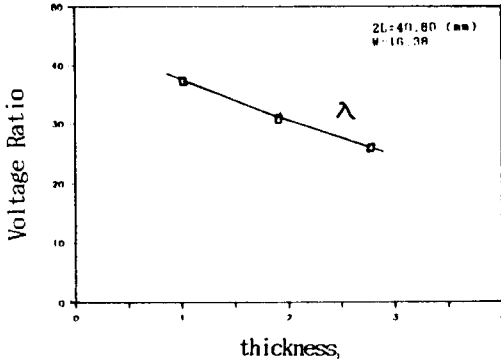


그림 8. 시편두께에 따른 승압비
Fig 8. Voltage ratio for thickness of specimen.

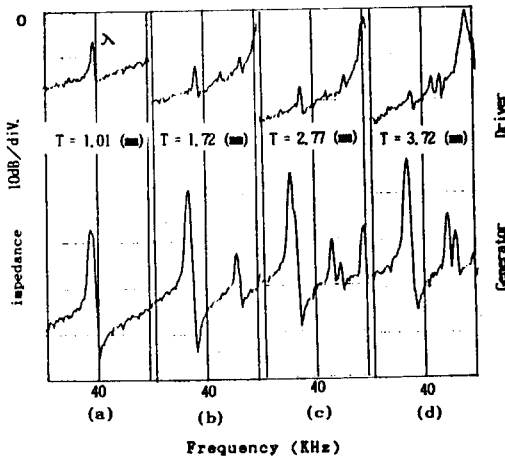


그림 9. 시편두께에 대한 주파수 특성
Fig 9. Frequency spectrum in thickness of specimen.

그림 10은 시편폭의 변화에 대한 승압특성이다. $\frac{1}{2}\lambda$ 모드는 폭의 증가에 따라 승압비가 증가하고 있으나 λ 모드에서는 폭 13.18 (mm)에서 피크를 나타낸 후 다시 감소하는 특성을 나타내었다. 판상의 압전체가 횡진동을 행할때 길이방향과 폭방향으로의 진동이 동시

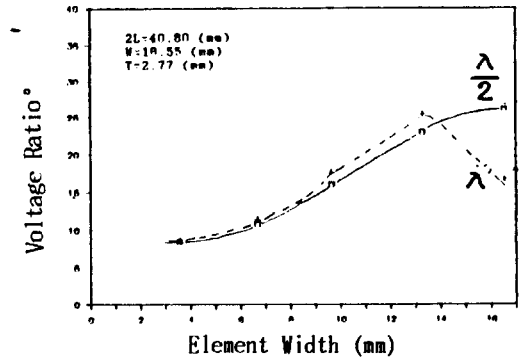


그림 10. 시편폭에 따른 승압비
Fig 10. Voltage ratio for width of specimen.

에 일어나기 때문에 길이방향의 진동모드를 이용하게 될때에 폭에 따른 영향을 고려하여야만 한다.

H.L.Krushima는 Chladni Figure의 관찰을 통해 폭방향으로 생기는 진동(Spurrious)이 길이방향의 기본주파수 보다는 고조파 진동이 되면서 더 증가한다는 사실을 제안하였다.¹⁰⁾ 따라서, 그림 10에서 기본공진인 $\frac{\lambda}{2}$ 모드에서는 폭에 대한 영향이 적지만 고조파 진동인 λ 모드에서는 폭 13.18 mm까지는 폭의 변화에 의한 Spurious 발생이 생기지 않기 때문에 이의 영향을 배제할 수 있지만 13.18 mm 이상에서는 Spurious의 영향이 길이방향의 진동에 미치게 되어 승압비가 감소하는 것으로 생각된다.

결과적으로 폭에 대한 Spurious 영향이 배제된 최적의 시편구조는 전장에 대한 폭의 비($\frac{W}{2L}$)를 산출함으로써 알 수 있다. 이에 따라서 본 시편으로부터 구한 $\frac{W}{2L}$ 의 값은 0.32로 계산되었다.

3-3. 부하저항에 따른 승압 특성

그림 11은 비교적 부하저항에 대해 출력 안정성이 좋은 지지점 B의 선택위치에 대해 부

하저항을 변환시킨때의 승압특성을 시편폭에 따라서 나타낸 것이다.

부하저항 1.2MΩ 이하에서는 지수적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

압전체의 기계적 진동시 발생하는 기계적 에너지 손실량을 부하저항 R'와 병렬로 연결되는 공진시의 삽입손실로써 등가손실저항 Rloss로 고려하면 승압비는 다음식으로 나타낼 수 있다.11)

$$\frac{V_0}{V_1} = j\omega W \cdot \frac{d_{31} Y_1}{-Y_3^D g_{33}} \cdot \frac{R' \cdot R_{loss}}{R' + R_{loss}} \quad (2)$$

여기서, d_{31} : 압전정수
 Y_1, Y_3^D : Young 을
 g_{33} : 전압정수

식(2)의 R'와 Rloss항으로 나타낸 승압비의 변화를 그림 12에 도시하였다. 손실이 없는 압전변압기의 승압비는 단지 부하저항 R'만에 의해 선형적으로 변화된다. 그러나 모든 압전체는 공진시 기계적 진동에 의한 등가손실저항 Rloss가 존재하기 때문에 R'에 따라서 승압비는 지수적으로 증가한다. 그림 11의 결과는 그림 12와 거의 일치되는 경향을 보이고 있다.

식(2)에서 $R' \rightarrow \infty$ 이면,

$$\frac{V_0}{V_1} = P \cdot R_{loss} \quad (P : \text{재료정수}) \quad (3)$$

이고 또한 $R' = R_{loss}$ 이면,

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{1}{2} P \cdot R_{loss} \quad (4)$$

이므로 $R' \rightarrow \infty$ 인때의 승압비는 $\frac{1}{2}$ 점에서 부하저항 R'값을 구하면 등가손실저항 Rloss와 같다.

그림 13은 그림 11로 부터 구한 등가손실저항 Rloss를 시편폭에 따라서 나타낸 것이다. 폭의 증가에 비례하여 Rloss는 지수적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 여기서,

이 Rloss는 발전부 단자와 병렬로 증가화 되었기 때문에 발전부 측에서 본 공진임피던스와의 관계를 예상할 수 있다. 이에 관한 관련성을 검토하기 위하여 그림 14에 시편폭에 따른 발전부측의 임피던스 특성을 나타내었다.

폭이 증가할수록 진동여기 상태가 감소되면서 공진임피던스는 증가하고 있다. 따라서 그림 13의 특성과 거의 일치하는 경향을 보이고 있다.

이와같은 관련성을 검토해 볼 때 발전부측의 공진임피던스 특성이 등가손실저항 Rloss로 작용하게 되어 승압작용에 기여하는 것으로 생각된다.

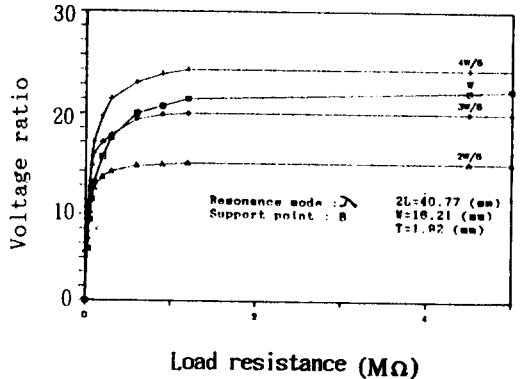


그림 11. 부하저항에 따른 승압비
 Fig 11. Voltage ratio for load resistance.

4. 결 론

장방형 구조를 갖는 압전 세라믹스 변압기를 제작하여 승압특성에 미치는 영향들을 진동모드를 중심으로 연구 조사한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 최대 출력전압을 얻기 위해서는 각 진동모드의 변위 0 인점을 지지점으로 선택해야 한다.

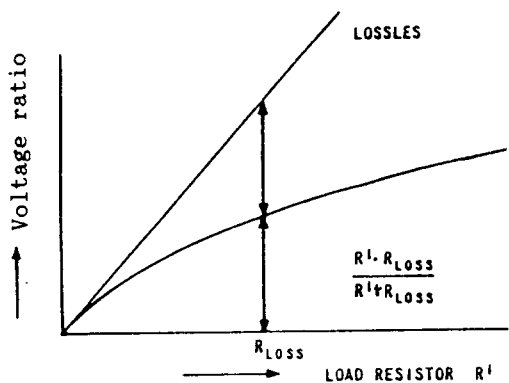


그림 12. 등가손실저항과 승압비의 관계
 Fig 12. Relation between equivalent loss resistance and voltage ratio.

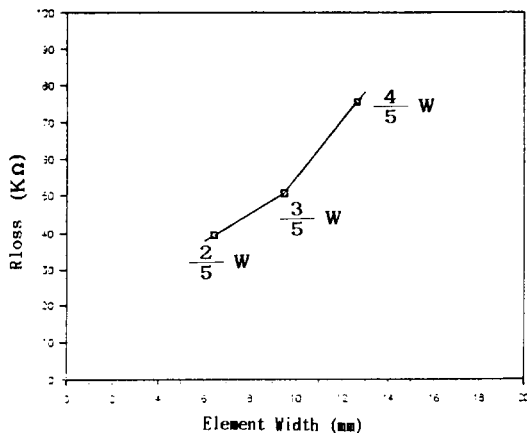


그림 13. 시편폭에 따른 등가손실저항
 Fig 13. Equivalent loss resistance for width of specimen.

- (2) 전극부의 길이가 전장의 $\frac{1}{2}$ 이 되면 최대승압비를 나타낸다.
- (3) 시편 두께가 감소할수록 승압비는 반비례하여 증가한다.
- (4) λ 모드에서 최대승압비를 갖는 전장에 대한 폭의 비 ($\frac{W}{2L}$)는 0.32이다.
- (5) 발전부 측의 공진임피던스와 등가손실저항의 비례관계를 관찰하여 발전부 측의 공진임피던스가 증가할수록 승압비가 증가됨을 확인하였다.

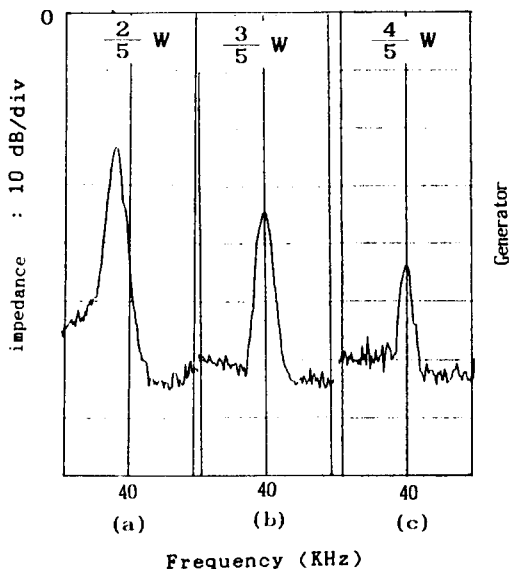


그림 14. 시편폭에 대한 주파수 특성
 그림 14. Frequency spectrum in width of specimen.

※ 본 연구는 문교부의 학술연구조성비로 이루어졌음을 밝히고 문교당국에 깊은 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

- 1) C.A.Rosen: *Electromechanical transducer*, U.S.Patent, 2,830,274 (1958).
- 2) H.W.Katz: *Solid state magnetic and dielectric devices*, John wiley and sons, Inc. N.Y. (1959).
- 3) 電子材料工業會: 壓電セラミクスヒソの應用, 159~175(1974).
- 4) T.Tanaka: *Ferroelectrics*, 40, 167~187 (1982).
- 5) H.Jaffe: *IEEE Trans. On Electron*

- devices*, ED-16, 557~561(1969).
- 6) 川田雄彦: 電子材料, 10, 57~64(1971).
- 7) IRE Standard on piezoelectric crystal;
Measurement of Piezoelectric Ceramics
(1961).
- 8) 土屋英俊: エレクナロコワ・セラミツクス,
3, 181~184(1971).
- 9) 小玉裕二郎: エレクナロコワ・セラミツクス,
7, 397~401(1971).
- 10) H.Lkushima and K.Ohji: *Jap. J.Apply. Phys.* 13. 1. 28~33(1974).
- 11) P.A. Van Berkum: *IRE.Trans. BTR.*,
81, 22~35(1962).