

## 압전 세라믹스 주파수 소자의 소개와 개발 동향

기술해설

### Introduction and Development Trend of Piezoelectric Ceramic Frequency Devices

이개명

(Kae-Myoung Lee)

**Key Words(중요 용어)** : Ceramic filter(세라믹스 필터), Ceramic resonator(세라믹스 공진자), Piezoelectric ceramics(압전 세라믹스), Communication device(통신 부품)

#### 1. 서 론

압전 세라믹스 주파수 소자라 함은 일반적으로 통용되는 세라믹스 필터나 세라믹스 공진자 등을 포괄하는 용어이며, 주된 기판 재료가 압전 세라믹스이고 필터나 공진자와 같은 전기 신호의 처리와 관련된 부품을 의미한다.

1950년 B. Jaffe에 의해 온도, 습도의 변화와 시간 경과에 대해 안정된 재료 특성을 갖으며 압전성이 우수한  $Pb(Zr,Ti)O_3$ (일명 PZT) 계열 압전 세라믹스가 발견됨에<sup>1)</sup> 따라 압전 세라믹스 기판의 공진 현상을 이용한 주파수 소자가 본격적으로 개발되기 시작했다. 1960년대 초반에 세라믹스 기판의 면적 진동을 이용한 AM 라디오 용 455[kHz] 세라믹스 필터가, 1960년대 후반에 세라믹스 기판의 에너지 포획된 두께진동을 이용한 FM 라디오 용 10.7[MHz] 세라믹스 필터가 상용화되었다. 그 후 다양한 공진자와 필터가 개발되어 TV를 비롯한 각종 민수용 전자기기에 광범위하게 사용되게 되었다. 최근에는 이동통신 기기, 무선전화기, 호출기 등의 통신 용 부품의 수요가 비약적으로 확대되고 있다.

이렇게 광범위하게 사용이 가능하게 된 이면에는 압전 세라믹스 주파수 소자의 다음과 같은 장점이 있기 때문이다.

첫째, 주파수 특성의 안정성이 높다: 수정 주파수 소자에는 미치지 못하지만 RLC 소자보다는 온도, 습도의 변화와 시간의 경과에 따른 주파수 특성의 변화가 작다.

둘째, 소형이고 경량이다.

셋째, 부품 장착 후 조정이 불필요하다: RLC 소자의 경우는 회로에 장착 후 주변 회로의 영향으로 인해 조정이 필요하다.

넷째, 값이 저렴하다.

본 보고에서는 압전 세라믹스 주파수 소자에 관

한 이해를 돕기 위해 압전 세라믹스 재료와 소자의 특성과의 관련성, 진동 모드, 각 소자의 개요에 대해 먼저 소개하고 그 다음에 개발 동향에 대해서 살펴본다.

#### 2. 주파수 소자용 압전세라믹스에 요구되는 특성

B. Jaffe가 발견한 우수한 압전성과 안정성을 갖는 PZT는  $PbZrO_3$ 와  $PbTiO_3$ 의 두 성분이 혼합된 조성을 가지므로 기본 2성분계 조성이라 한다. 이 PZT에 하나 이상의 페로브스카이트 구조,  $ABO_3$  (A, B는 양이온) 구조의 산화물이 첨가된 조성을 복합형 3성분계 또는 복합형 다성분계라 하며, 기본 2성분계 PZT보다 폭넓은 압전 특성 범위를 얻을 수 있으며, 다양한 조성이 개발되어 주파수 소자용 재료로 사용되고 있다.

주파수 소자와 밀접한 관련이 있는 재료 특성은 전기기계결합계수, 유전률, 기계적 품질계수, 온도 특성, 경시변화 특성 등이 있으며, 이 재료 특성들은 조성의 종류뿐만 아니라 제작 조건에 따라서도, 달리 표현하면 세라믹스의 입경의 크기, 입계의 구조, 분극 정도 등에 따라서도 크게 변화 될 수 있다. 압전 세라믹스 재료 정수 중에서 필터나 공진자 용으로 사용 시에 요구되는 특성의 중요도를 표 1에 나타내었다. 표 2에는 재료정수와 세라믹스 필터 특성과의 관련성을 나타내고 있으며, 설계 시에 수순을 결정하는 데 참고가 될 것이다.

표 1. 세라믹스 공진자와 필터 용 재료에 요구되는 재료특성의 중요도  
(+:중요도 지표, (+):콘덴서 부착 공진자의 경우)

Table 1. Importance difference in the required characteristics of the substrates for ceramic filters and resonators.

	세라믹스 공진자	세라믹스 필터
전기기계결합계수		+
유전 특성	(+)	+
기계적 품질계수	++	+
온도 특성	++	++
경시변화 특성	++	++
불요진동	+	++

표 2. 재료정수와 세라믹스 필터 특성과의 관련성

Table 2. Relativity of material constants and the characteristics of ceramic filters.

	주파수상수	전기기계 결합계수	기계적 품질계수	유전률
중심주파수	+++			
대역폭		++	+	
삽입손실		+	++	
임피던스				++
균지연시간			++	

표 3. 두께중진동과 두께 엇갈림 진동에서 포아손비에 따른 에너지 포획 방식  
(+:주파수 저하형, -:주파수 상승형)

Table 3. Energy-trapping types according to the Poisson ratio in thickness extensional vibration and thickness shear vibration.

포아손 비	종류	두께중진동			두께 엇갈림진동		
		1	3	5	1	3	5
0.170		-	+	-	+	-	+
0.200		-	+	-	+	-	+
0.211		-	+	+	+	-	+
0.244		-	+	+	+	-	+
0.250		-	+	+	-	-	+
0.280		-	+	+	+	-	-
0.300		-	+	+	-	-	+
0.378		+	+	+	+	+	+
0.418		+	-	+	+	-	-

그리고 두께중진동과 두께엇갈림진동을 이용하는 HF 영역의 세라믹스 공진자와 필터는 에너지 포획 방식을 적용해야만 하는데, 에너지 포획 방식에는 주파수 저하형과 주파수 상승형이 있으며 특정 기판이 정해지면 두 방식 중 오직 한 방식만을 실현시킬 수 있다. 주파수 상승형은 소자의 구조가 복잡해지므로 주파수 저하형 소자만 상용되고 있다. 어떤 기판에 어떤 방식이 적용될 수 있는지는 포아손비에 의해서 결정되며, 대략적인 관계를 표 3에 나타내었다<sup>2)</sup>. 이 표로부터 이용하려는 두께 진동의 차수에 의해서도 달라질 수 있음을 알 수 있다.

### 3. 압전 세라믹스 기판의 진동모드

탄성체는 형상, 재질 등에 의해 결정되는 고유 기계 공진 주파수를 갖는다. 분극된 압전 세라믹스에 교류 전기 신호가 인가되면 이 신호의 주파수

표 4. 압전 세라믹스 기판의 진동 모드

Table 4. Vibrational modes in piezoelectric ceramic substrates.

周波数帯	振動 모드	形 状
LF	屈曲 振動	
	길이 振動	
MF	輪郭 振動	
	徑方向 振動	
HF VHF	두께 縱 振動	
	두께 엇갈림 振動	

(備考)

○: 分極方向 →: 変位

와 같은 주기의 기계적 진동이 일어나는데, 이 교류 신호의 주파수가 압전 세라믹스 기관의 고유 기계 공진 주파수와 일치할 때 진동의 진폭이 최대가 된다. 이 때 기관 내부에서 탄성파가 정재파를 형성한다.

압전 세라믹스 기관의 기계적 진동에는 기관의 형상, 분극 방향, 전기 신호의 인가 방향 등에 따라서 각종 진동모드가 형성된다. 표 4에 압전 세라믹스 주파수 소자에 이용되는 대표적인 진동모드가 이용 가능 주파수 영역과 함께 나타나 있다. 이용 가능 주파수 영역은 정재파가 형성되는 방향의 길이에 의해 정해지는데 각 형상에서 가공 기술상의 한계로 인해 결정된 것이다. 따라서 가공 기술이 진전과 고체음향학의 발전에 따라 이용 가능 주파수 영역은 확대될 여지가 남아 있다.

3-1. 에너지 포획 이론

에너지 포획 공진자의 전형적인 구조를 그림 1에 나타내었다. 압전체 판에 각형 또는 원형의 부분 전극 쌍이 위, 아래 면에 나란히 부착되어 있다. 외부단자는 두께진동을 억제하거나 교란 시키지 않도록 주 전극에 직접 연결되지 않고, 주 전극으로부터 측면으로 끌어낸 전극 위에 연결된다. 이때 외부 단자에 연결을 위한 띠 전극은 위, 아래 면에서 교차되지 않도록 배려되어 있다.

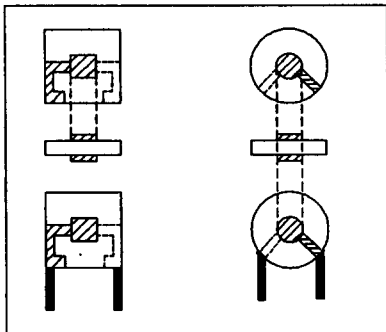


그림 1. 에너지 포획형 공진자의 구조

Fig. 1. Configuration of energy-trapped resonators

에너지 포획형 공진자의 구조가 다른 공진자의 구조와 다른 점은 부분 전극(Partial electrode)을 사용한다는 점이다. 압전체 기관의 일부분에 무거운 재질의 금속 전극이 위, 아래 면에서 마주 보고 있기 때문에 이 부분의 유효밀도가 주변 부분의 밀도보다 높게 된다. 이와 같은 질량 부과 효과

(Mass loading effect)와 압전반작용(Piezoelectric reaction)에 의해 금속 전극 밀부분의 압전체가 갖게 되는 차단 주파수(Cutoff frequency),  $f_c$ 가 주변 부분 압전체가 갖게 되는 차단 주파수,  $f_s$ 보다 낮게 된다.

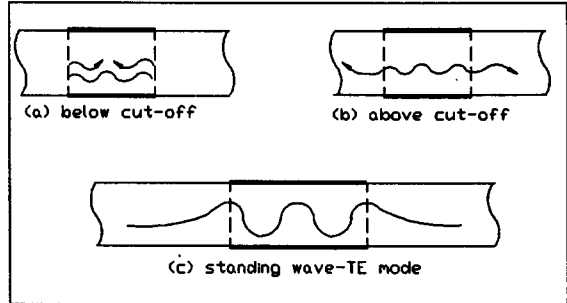


그림 2. 에너지 포획 현상

Fig. 2. Energy-trapped phenomenon.

탄성파(Acoustic wave)는 자신의 주파수보다 낮은 차단주파수를 갖는 매질에서는 감쇄없이 자유롭게 전파하나, 자신의 주파수보다 높은 차단주파수를 갖는 매질에서는 지수함수적으로 감쇄하게 된다. 그러므로  $f_e < f < f_s$ 의 주파수를 갖는 탄성파는 그림 2에서 처럼 전극 밀부분에서는 자유롭게 전파되나 주변부분에서는 지수함수적으로 감쇄하게 된다. 이는 경계면에서 탄성파의 반사를 의미하는 것으로 반사된 탄성파는 전극 밀부분 압전체에서 정재파(Standing wave)를 형성하게 된다. 따라서 탄성파의 에너지가 주변 압전체 영역으로 전달되지 않고 전극 밀부분에 포획(Trapping)되었다고 볼 수 있다. 포획되는 탄성파의 주파수는 시편의 주파수상수, 시편의 두께뿐만 아니라, 전극의 무게와 크기의 영향을 받게 된다.

4. 압전 세라믹스 공진자

압전 세라믹스 공진자는 주로 발진자와 디스크 리미네이터(Discriminator)로 사용되고 있으며, 1칩(Chip) 필터, 1칩 트랩(Trap) 등으로도 사용되는 것으로 각종 전자기기에 채택되고 있다.

세라믹스 공진자는 거의 대부분 2단자형이며, 그것의 기호 표시와 전기적 등가회로가 그림 3에 나타나 있다. 또 그것의 임피던스와 위상의 주파수 특성을 그림4에 나타나 있다.

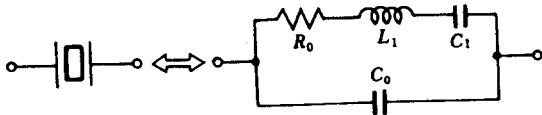


그림 3. 압전 세라믹스 공진자의 기호 표시와 전기 등가회로

Fig. 3. A symbol and an electrical equivalent circuit of a piezoelectric ceramic resonator.

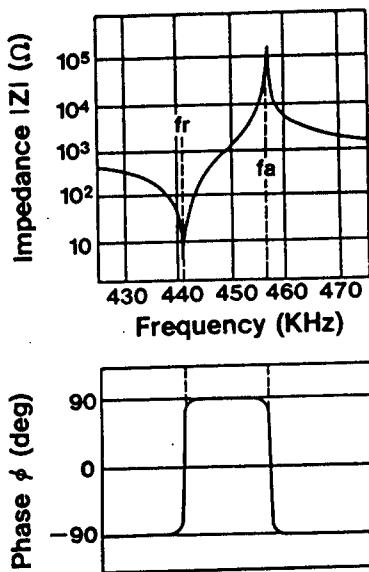


그림 4. 세라믹스 공진자의 주파수 특성

Fig. 4. Frequency characteristics of a ceramic resonator.

세라믹스 공진자를 발진자로 사용할 때에는 그림 4에 나타나 있는 것처럼 공진주파수와 반공진주파수 사이의 인덕턴스 성분을 이용하고, 디스크 리미테이터로 사용할 때에는 그림4의 공진주파수와 반공진주파수 사이의 위상 특성을 이용하며, 1 칩 필터로 사용할 때에는 공진자를 회로에 직렬 연결하고 이 때 공진자의 공진주파수 부근의 저손실 특성을 이용하고, 1칩 트랩으로 사용할 때에는 공진자를 회로에 병렬 연결하고 이 때의 공진주파수 부근의 고손실 특성을 이용한다.

세라믹스 공진자를 발진자로 사용할 경우에는 서론에서 언급한 주파수 소자의 장점 이외에 발진이 신속히 도달한다는 장점이 있어, 라디오, TV, VTR, 1칩 마이크로프로세서, 리모트 콘트롤, 전화기 다이얼 등의 고정신호 발생원으로 사용될 뿐만

아니라, 전압가변 발진자(VCO)로도 사용되고 있다.

### 5. MF 대역 압전 세라믹스 필터

MF 대역에 동작주파수를 갖는 압전 세라믹스 필터에는 링-돛트(Ring-dot) 분할 전극형 필터와 사다리형 필터가 대표적이다. 이 대역의 필터는 주로 각판의 넓이 진동을 이용하고 있으며, AM 통신 방식의 중간주파수(IF)인 455[kHz] 부근의 동작주파수를 갖는다.

#### 5-1. 링-돛트 분할 전극형 필터

그림 5와 같은 전극 구조로 되어 있으며, 전기적 등가회로는 그림 6과 같다. 1칩으로 그림 7과 같은 대역 통과 특성을 갖는 필터가 실현되므로, 크기가 소형이며 저렴하다. 이러한 장점으로 인해 AM 라디오의 IF 필터로 일찍부터 사용되어 왔다. 분할 전극의 크기는 회로와의 정합과 불요 진동의 억제

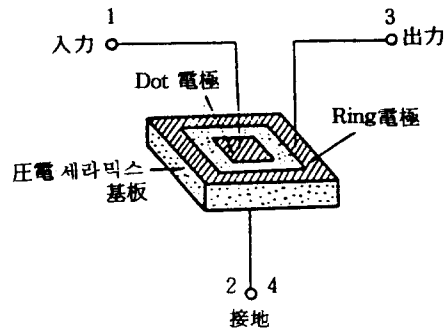


그림 5. 링-돛트 분할 전극형 필터의 구조

Fig. 5. Configuration of a ring-dot split electrode type filter.

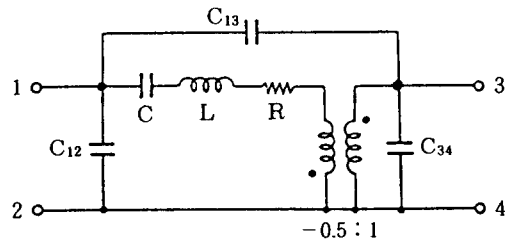


그림 6. 링-돛트 분할 전극형 필터의 전기 등가회로

Fig. 6. Electrical equivalent circuit of a ring-dot split electrode type filter.

를 고려하여 설계되며, 접촉식 외부 단자는 윤곽진동이 억제되지 않는 진동의 마디에 위치하게 된다.

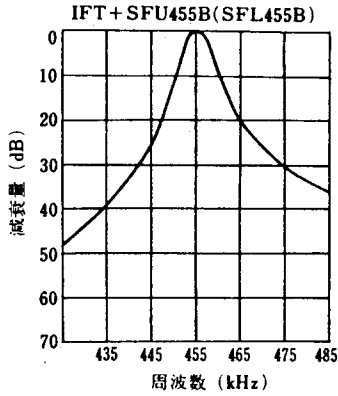


그림 7. 링-돛트 분할 전극형 필터의 주파수 특성

Fig. 7. Frequency characteristics of a ring-dot split electrode type filter.

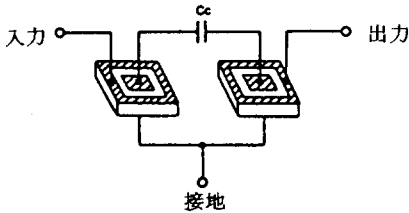


그림 8. 링-돛트 분할 전극형 필터의 직렬 연결  
Fig. 8. Cascade connection of two ring-dot split electrode type filters.

필터의 지지대역에서 보다 큰 감쇄량이 필요한 경우에는 필터를 그림 8처럼 두 개의 필터를 직렬 연결하여 사용한다.

### 5-2. 사다리형 필터

개인 통신 기기의 사용이 비약적으로 확대됨에 따라 수요가 급증하는 부품으로, 다수의 공진자를 사다리형으로 배열한 구조를 갖는다. 그림 9에 1단(2소자) 사다리형 필터의 구조와 그것의 전기적 동가회로가 나타나 있다. 직렬단에 있는 공진자를 직렬 공진자, 병렬단에 있는 공진자를 병렬 공진자라 하며, 그림 10과 같은 공진, 반공진 주파수를 갖는 직렬, 병렬 공진자를 선택하여 사다리형 필터를 구성하면 같은 그림에서 보여지는 대역 통과 필터 특성을 갖게 된다.

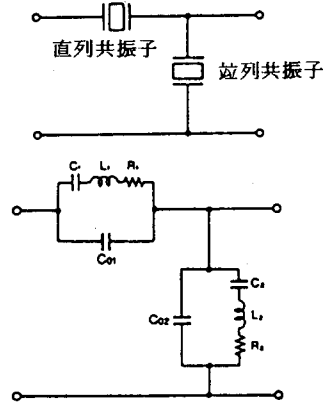


그림 9. 1단(2소자) 사다리형 필터의 구조와 전기 동가회로

Fig. 9. Configuration and an electrical equivalent circuit of an one-section ladder filter.

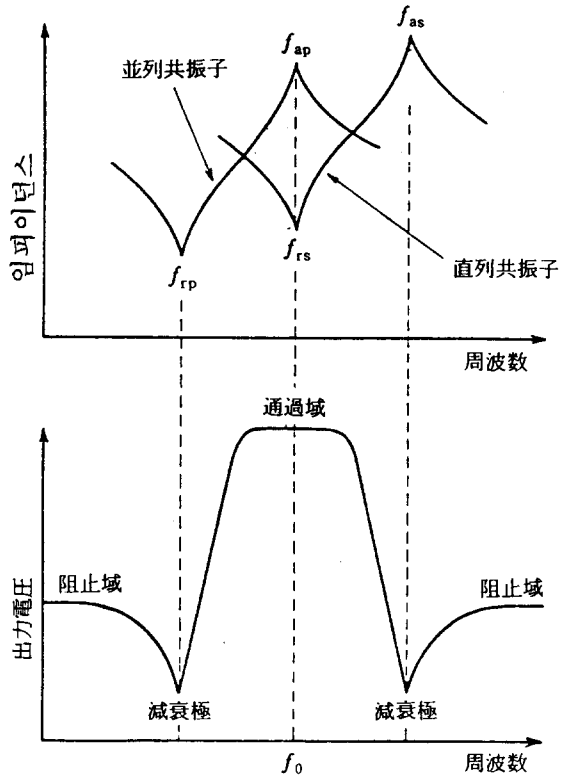


그림 10. 1단(2소자) 사다리형 필터의 직렬, 병렬 공진자의 배열과 주파수 특성

Fig. 10. Arrangement of series and parallel resonators and frequency characteristics of an one-section ladder filter.

다음에 사다리 형 필터의 특성과 각 공진자의 특성과의 관련성을 간단히 알아보자. 직렬, 병렬 공진자의 정전용량  $C_{01}$ ,  $C_{02}$  가 필터 전체의 입력, 출력 임피던스를 결정한다. 필터의 통과 대역폭은  $C_{02}/C_{01}$  이 작을수록, 각 공진자의 반공진과 공진 주파수의 차이가 클수록 넓어진다. 저지역 감쇄량은  $C_{02}/C_{01}$  이 클수록, 필터의 단수가 클수록 증가한다.  $C_{02}$ 를 크게 하기 위해 병렬 공진자의 소체의 유전률을 크게 하고 두께를 얇게 하며, 반면에  $C_{01}$ 을 작게 하기 위해 직렬 공진자의 소체의 유전률을 작게 하고 소체의 두께를 두껍게 하고 부분전극을 사용한다. 또 선택도는  $C_{02}/C_{01}$  이 작을수록 높아진다. 다만 필터일 경우에는 직렬, 병렬 공진자의 조합에 의해서도 임피던스, 선택도, 대역폭을 부분적으로 조절할 수 있다.

### 6. HF 대역 압전 세라믹스 필터

대표적인 것이 TV 음성단의 4.5[MHz] 필터와 FM 라디오 IF단의 10.7[MHz] 필터이며, 이 외에 3단자 디스크리미네이터가 있다. 그림 11에 기본 구조가 나타나 있고 이 필터를 이중 결합 필터라 하며, 이 형태는 동일 기판 위에 2개의 에너지 포획 공진자가 나란히 배열된 것으로 두 공진자 간의 탄성 결합이 형성되어 대칭모드와 반대칭모드라는 새로운 진동이 생긴다. 전극 설계를 적절히 하면 그림 12와 같이 대칭모드와 반대칭모드의 배열을 가져갈 수 있고 대역 통과 필터 특성을 갖게 된다. 그림 13과 같은 등가회로를 가지며, 저지역 감쇄량이 더 요구될 경우에는 하나의 기판 위에 다수의 단일 이중 결합 필터 전극 패턴을 형성한 형태의 필터를 사용한다.

초기에는 주로 기판의 두께진동을 이용하여 필터를 제작하였으나, 이 때 중심주파수의 반 크기의 주파수 부근에서 두께엇갈림진동에 의한 잡음이 생성되므로 최근에는 시편의 두께가 절반이 되어 가공 상의 어려움이 있지만 이러한 잡음이 안

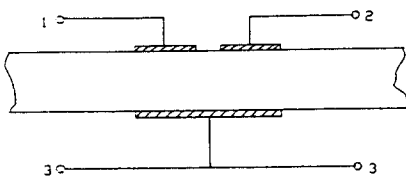


그림 11. 단일 이중 결합 필터의 구조  
Fig. 11. Configuration of a double-coupled filter.

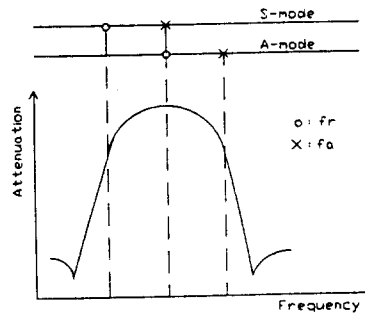


그림 12. 단일 이중 결합 필터에서 형성되는 두 모드의 배열과 주파수 특성  
Fig. 12. Arrangement of two modes built up in a double-coupled filter and its frequency characteristics.

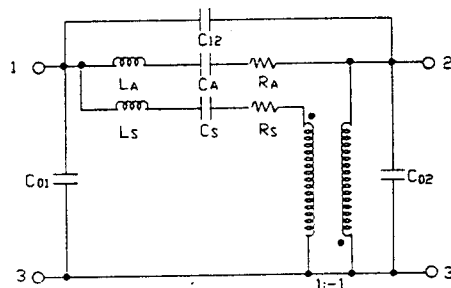


그림 13. 단일 이중 결합 필터의 전기 등가회로  
Fig. 13. An electrical equivalent circuit of a double-coupled filter.

생기는 두께엇갈림진동을 이용하여 중심주파수 4.5[MHz] 부근의 필터가 상용되고 있다.

### 7. 압전 세라믹스 주파수 소자의 개발 동향

전자 기술의 발전에 따라 부품에 대한 새로운 요구 사항이 부과되고 있다. 전자기기의 소형화와 휴대화가 진행됨에 따라 세라믹스 주파수 소자의 경량화와 소형화가 요구되고 있으며, 생산 공정에서 표면실장 기술의 보급에 따라 부품의 SMD화와 자동삽입화가 요구되고 있다. 또한 전자통신 기술이 디지털 방식을 채택하는 방향으로 전개됨에 따라 세라믹 필터의 평탄한 균지연 특성이 요망되고 있다.

소형화와 경량화에 대한 요구에 부응하기 위해 가는 세라믹스 봉의 길이진동을 이용하여 MF 대

역의 필터와 공진자를 제작하려는 시도가 진행되어 일부 부품이 상용되고 있으며, SMD화와 결부되어 소체와 외장에 대한 재설계가 진행되어, 예전보다 보다 소형의 SMD형 필터와 공진자가 다수의 기종에서 출하되고 있다. 또 세라믹스 재료의 기계적 품질계수를 낮추거나 설계 상의 고안을 통해 필터의 균지연 특성의 향상이 도모되고 있다.

한편 이러한 일반적인 경향 이외에 AM 스테레오 방송의 채택에 의한 부분적인 변화도 있다. AM 스테레오 신호의 스펙트럼이 넓고, 위상 정보를 갖고 있기 때문에 수신기 IF 단 필터에 광대역, 고선택도와 평탄한 균지연 특성이 요구되고 있다. 이에 따라 기존에 사용되던 링-도트 분할 전극형 필터 대신에 사다리형 필터의 새로운 기종이 사용되게 되었다.

끝으로 장기적인 전망으로서, 세라믹스의 미세구조의 제어를 통한 보다 안정된 특성의 기관이 얻어지게 되고 설계와 가공 기술이 진보하게 되면, 보다 고주파 영역으로 압전 세라믹스 주파수 소자의 동작 주파수를 높일 수 있게 되어, 아직 값이 비싸고 필터의 대역폭이 좁은 수정 소자를 대체할 수도 있으리라 생각된다.

## 8. 결 론

다른 부품 업체와 마찬가지로 이 분야에 있어서 국내 기업은 아직 시작 단계에 있으면서도 다른 선진사의 높은 기술 상태의 부품을 만들지 않으면 경쟁이 되지 않기 때문에 어려움이 많다. 또 압전 세라믹스 주파수 소자의 설계와 제작에 경험 있는 전문가도 별로 없기 때문에 시스템 업체가 요구하는 경향에 맞춰 부가가치가 높은 신 제품을 내놓기도 아직 힘든 상태이다. 통신기기와 전자기기에 있어서 이 부품의 중요성을 고려한다면 본 궤도에 도달할 때까지 외부의 지원이 필요하리라 생각된다. 아울러 전기와 재료 두 분야에 걸쳐 있는 본 압전 세라믹스 주파수 소자의 특성을 감안한다면 전기공학 전문가와 재료공학 전문가의 협력이 양산과 설계 과정에서 부딪치는 문제의 해결의 지름길이 될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. B. Jaffe, R. S. Roth and S. Marzullo, J. Appl. Phys. 25, pp.809-810, 1955.
2. 永田, 中\*, 佐木, 信學會超音波研資 US 73-3, 1973

## 시시수개



### 이개명

1961년 8월 19일생. 1984년 연세대학교 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학(석사). 1990년 동 대학원 전기공학(박사). 1991년-현재 제주대학교 공대 전기공학과 조교수.