

초음파 집속변환기의 과도응답 특성 해석

○

박 순종*, 박 규철*, 윤 종락**, 김 천덕***

*부산수산대 전자통신공학과 **부산수산대 정보통신공학과 ***부산수산대 전기공학과

Analysis of Transient Response Characteristic on Ultrasonic Focusing Transducers

Soon Jong Park*, Kyu Chil Park*, Jong Rack Yoon**, Chun Duck Kim***

*Dept. of Electronic Communication Fisheries Univ. of Pusan

Dept. of Telematic Eng. *Dept. of Electrical Eng.

I. 서 론

초음파 변환기는 정밀계측, 탄성표면파의 측정, 물성계측, 수중소나, 의용진단장비 등에 많이 사용되고 있다. 특히, 초음파 집속변환기는 분해능이 우수하고 음향 에너지밀도가 높은 특징을 갖고 있어 초음파현미경등에서 핵심부품으로 사용되고 있다.

지금까지 초음파 집속변환기의 이론적 해석법은 방사면에 일정구동 조건으로 음장특성을 해석하기 때문에 실제와 달리 큰 오차를 포함하여 해석되어 졌다. 본 연구에서는 방사면을 일정하게 구동하지 않고 압전진동자의 구동에 의해 방사면상에 변위가 일어나도록 경계조건을 설정한 유한요소법을 적용하여 정상상태 조건하에서 음장특성과 과도상태의 음장특성을 해석하였다.

초음파 집속변환기의 동작은 압전진동자의 기계적 진동이 음향렌즈의 진동모드에 영향을 주고 방사면의 진동분포를 변화시켜 초점근방에 음향에너지가 집중되는 것이다.

초음파 집속변환기의 해석대상은 압전진동자, 음향렌즈의 탄성체계와 물의 음향계로 구성된 축대칭 구조의 복합변환기로써 해석방법은 정상상태에서 탄성체계, 음향계의 집점부근까지는 유한요소법을 외부 영역은 하이브리드형 무한요소법을 적용하여 음장특성을 해석하였다. 과도응답의 특성은 정상응답 신호를 FFT 알고리즘을 사용하여 해석하였다.

II. 이 론

II-1. 탄성체계와 음향계의 지배방정식

초음파 집속변환기 해석영역의 지배방정식은 탄성체계와 음향계가 결합되어 다음과 같이 주어진다.

$$[c]\nabla^2(u) + \omega^2 \rho_s(u) = (f) \quad (\text{탄성체계}) \quad (1)$$

$$\nabla^2 p + k^2 p = \zeta \quad (\text{음향계}) \quad (2)$$

[c] : 스티프니스텐서, {u} : 변위벡터, {f} : 구동력벡터,

ω : 각주파수, ρ_s : 탄성체밀도, p : 음압,

k : 파수(ω/c_0 , c_0 는 유체중의 음압), ζ : 변위

II-2. 유한요소식

앞절의 탄성체계와 음향계로 나타낸 각각의 지배방정식에 유한요소법을 도입하여 이산화를 행하며 탄성체계의 식(1)을 집속변환기 해석의 기본적 이산화 연립대수방정식 형태로 나타내면

$$([K_s] - \omega^2[M_s])\{d\} + [P]\{\varphi\} = \{f\} \quad (3)$$

$$[P]^T\{d\} - [G]\{\varphi\} = \{Q\} \quad (4)$$

로 된다. 여기서 압전진동자의 재질의 점성에 의한 기계적손실 $[R_s] = \alpha[K_s]$ 와 유전체손실인 전기적 손실 $[R_p] = \tan \delta [G]$ 를 고려하여 식(3), (4)를 나타내면

$$([K_s] + j[R_s] - \omega^2[M_s])\{d\} + [P]\{\varphi\} = \{f\} \quad (5)$$

$$[P]^T\{d\} - ([G] + j[R_p])\{\varphi\} = \{Q\} \quad (6)$$

로 된다. 여기서

$[K_s]$: 강성행렬, $[M_s]$: 질량행렬, $[P]$: 전기-기계결합행렬,

$[G]$: 정전행렬 {d} : 절점변위벡터, { φ } : 절점전위벡터,

{f} : 절점외력벡터, {Q} : 전하벡터

식(2)의 음향계 지배방정식을 유한요소식으로 이산화하면

$$([M_L] - \omega^2[K_L])\{p\} = -\rho_L \omega^2 \{\zeta\} \quad (7)$$

로 된다. 여기서

$[M_L]$: 음향계 질량행렬, $[K_L]$: 음향계 강성행렬,

{p} : 절점음압벡터, { ζ } : 절점변위벡터

상기와 같이 이산화한 유한요소식의 서로 다른 계 사이의 결합은 탄성체계와 음향계의 경계 즉 음파방사면에서는 법선방향에 대하여 응력이 같고 변위가 연속이라는 아래의 조건을 사용한다. 여기

초음파 집속변환기의 과도응답 특성분석

서 $[W]$ 는 배분행렬이다.

$$\{f\} = -[W] \{p\}, \quad \{f\} = [W]^T \{d\} \quad (8)$$

또한, 반무한계역영은 하이브리드형 축대칭 무한요소 유한요소의 경계 끝단에 부가하여 표현한다.

III. 수치시물레이션

수치시물레이션은 정상상태하에서 압전진동자에 의한 구동, 원판형 댐핑재(damping)를 장착하여 압전진동자를 구동, 원추형 댐핑재를 장착하여 압전진동자를 구동한 세가지 모델에 대하여 음장특성을 해석하였으며 과도상태하에서는 압전진동자에 의한 구동 모델에 관해 PC-486DX에서 수행하였다. 각 모델의 구성도는 그림 1과 같으며 치수는 전기입력 단자에서의 입력어드미턴스를 계산한 후 주공진주파수 f_0 의 음파를 수중(음속: 1500 m/s)에 방사한 경우의 파장 λ_0 으로써 규격화한 것이다. 모델의 구성은 압전진동자의 경우 얇은 원판형 압전세라믹(NEPEC6:축방향분극)이고, 음향렌즈의 경우 일반적으로 사파이어를 많이 사용하지만 탄성적으로 이방성 재료이므로 유한요소법으로 해석하기에 용이한 등방성의 석영글래스로 음원반경은 $7.6\lambda_0$ 이며 개구반각도를 60° 로 하였다. 이 경우 기하학적인 초점위치는 음파방사면(음향렌즈와 물의 접합부)으로부터 약 $8.8\lambda_0$ 로 주어지며 댐핑재는 에포키계의 접착제에 카본가루를 혼합한 것으로 설정하였다.

III-1. 정상응답 해석

정상상태하에서 주공진주파수 f_0 로 각 모델에 관하여 구동하여 음장특성을 시물레이션 하였다. 먼저 그림 2에 모드도와 등음압분포도를 나타내었다. 모드도에서는 압전진동자를 직접 구동한 경우보다 댐핑재를 장착한 두 경우 모두 개선된 모드형상을 가지며, 집속음장의 형태는 세가지 모델이 비슷한 형상으로 나타났으나 댐핑재를 장착하므로써 좀더 안정된 형태로 나타났다.

각 모델의 음축방향(Z) 음압을 각각 정규화하여 표현한 그림 3에서는 압전진동자 구동과 댐핑재 장착 구동의 두가지 모델이 같은 형태를 띠고 있지만 실제로는 댐핑재의 장착으로 인한 부가질량 효과로 음압의 감소가 일어남을 알 수 있었다.

그림 4는 음파가 집속된 초점에서 경방향(R)인 초점면상에서의 음압도으로써 음축방향 음압도에서와 같이 음압의 감소가 확인되었다.

음장형성에 가장 중요한 역할을 하는 방사면의 진동분포를 구하기 위하여 방사면상 변위 결과를 그림 5에 나타내었으며 이 결과에서는 댐핑재를 장착하므로써 상대적으로 변위가 안정되는 것과 원추형 댐핑재의 경우가 보다 안정된 변위를 가짐을 알 수 있었다. 이것은 원판형 댐핑재에서 일어나는 후면반사가원추형 댐핑재에서는 거의 일어나지 않기 때문으로 생각된다.

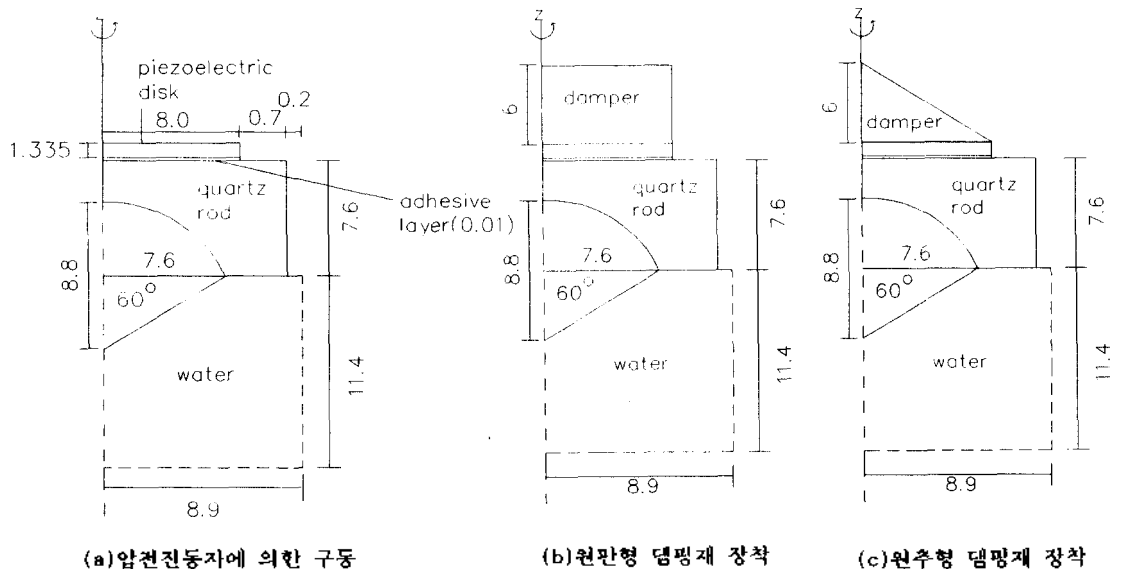
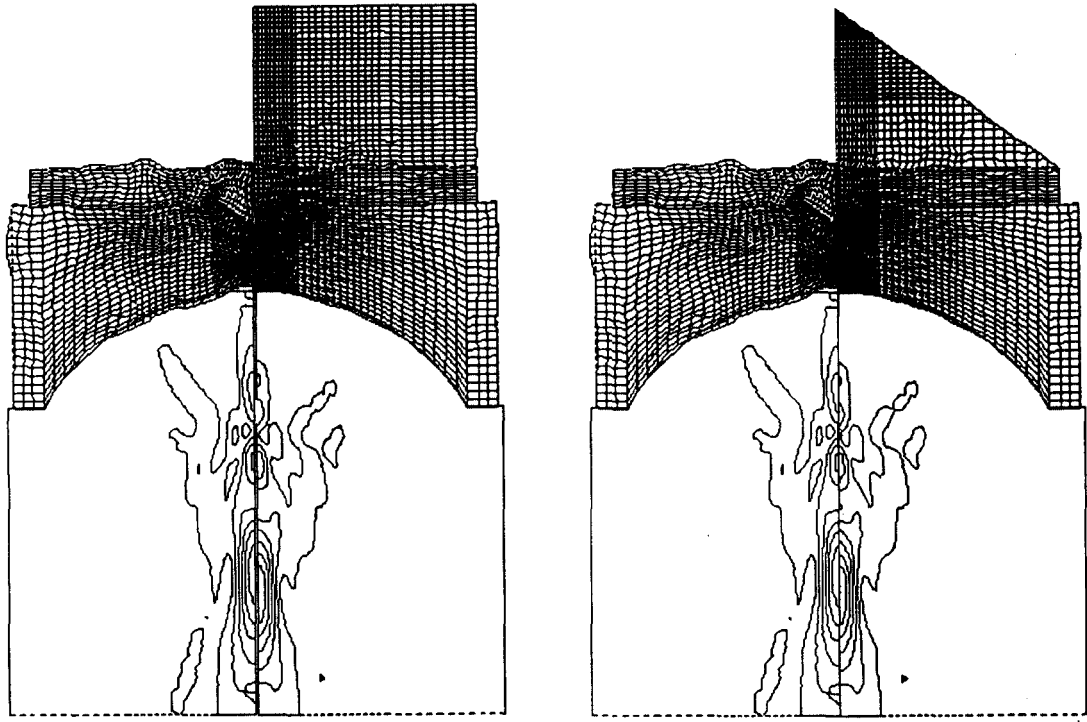


그림 1. 시물레이션 구성도



(a) 압전진동자 구동과 원판형 댐핑재 장착 구동

(b) 압전진동자 구동과 원추형 댐핑재 장착 구동

그림 2. 모드도와 동음압분포도

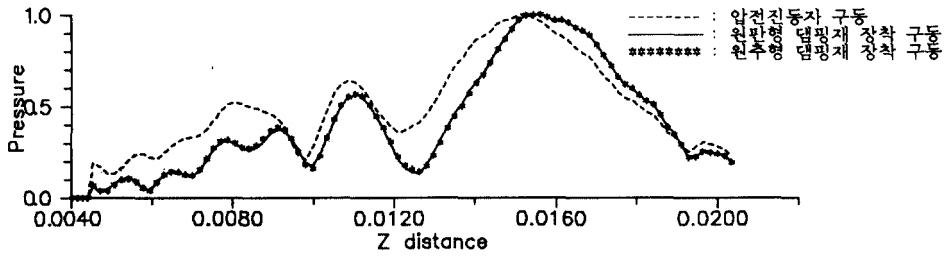


그림 3. 음축방향(Z) 음압도

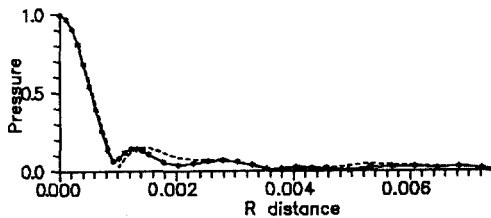


그림 4. 축점면상(R) 음압도

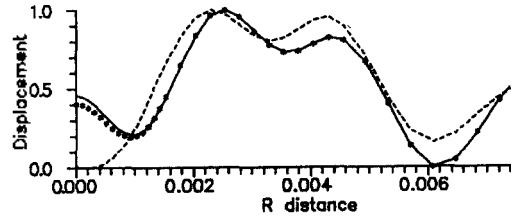


그림 5. 방사면상 변위도

초음파진속변환기의 음장특성 파라메타인, 축점거리와 분해능을 각 모델에 관하여 구한 것을 표 1에 나타내었으며 댐핑재를 장착하므로써 분해능의 개선이 이루어짐을 알 수가 있었다.

구분	모델	압전진동자 구동	원판형 댐핑재 장착	원추형 댐핑재 장착
축점거리		10.655 λ_0	11.055 λ_0	11.055 λ_0
음축방향분해능		5.9 λ_0	2.6 λ_0	2.6 λ_0
경방향 분해능		0.75 λ_0	0.71 λ_0	0.71 λ_0

표 1. 축점거리, 음축방향(Z) 분해능, 경방향(R) 분해능

초음파 집중변환기의 과도응답 특성 해석

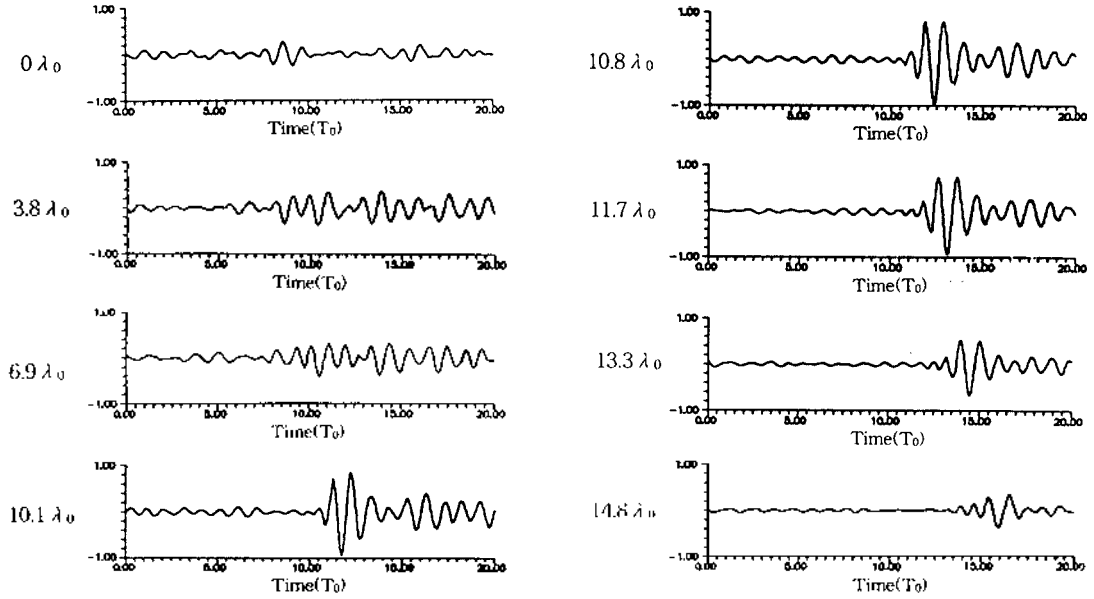


그림 6. 음축방향 각절점의 시간응답 (방사면으로 부터의 거리)

III-2. 과도응답 해석

초음파 집중변환기는 일반적으로 과도상태에서 동작되기 때문에 정상응답 해석과 더불어 과도응답의 음장도 해석되어져야 한다. 해석방법으로는 전 절의 압전진동자 구동에 의한 모델에 관하여 먼저 정상상태하에서 $0.02f_0$ 간격으로 128점의 전달함수를 구한다. 그리고, $50T_0$ 까지 2048점 샘플링한 정현파 한주기분을 FFT한 입력파의 주파수 스펙트럼과 앞서 구한 전달함수를 곱한 후 다시 IFFT하여 과도응답을 구하였다.

과도응답의 해석결과는 그림 6과 같고 촛점거리가 정상응답에 비하여 $1.045\lambda_0$ 후방인 $10.655\lambda_0$ 근처에서 나타났으며, 최대진폭을 가지는 펄스가 시간축상에서 후방으로 지연되는 것은 음파 도달시간을 나타내고 있음을 알 수가 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 적용하여 초음파 집중변환기의 성능평가에 필요한 촛점거리, 분해능을 수치해석 시뮬레이션에 의하여 구하였다.

정상상태에서 원판형과 원추형 두 종류의 댐핑재를 장착시킴으로써 압전진동자가 피스톤 운동을 하지 않아 생기는 방사면 진동분포의 불안정이 안정화되어 음축방향 분해능 $3.3\lambda_0$, 촛점면상 분해능이 $0.04\lambda_0$ 로 개선되었다. 또한 원판형 댐핑재의 후면반사를 원추형 댐핑재의 사용으로 진동분포의

불안정을 감소시켰다.

과도응답 특성의 계산에서는 음향전달 특성을 구할 수가 있었으며, 과도응답에서의 촛점거리는 정상응답에서의 촛점거리와 거의 일치함을 보였다.

참고문헌

1. 加川幸雄, 村山健一 著, BASIC による 電氣·電子有限要素法, 科學技術出版社
2. 加川幸雄 著, 有限要素法による振動·音響工學/基礎と應用, 培風館
3. 土屋隆生, 加川幸雄, 山淵龍夫 著, 有限要素法による集束トランスジューサの 應答解析, 電子情報通信學會論文集, A Vol. J74-A No. 7, pp.929-940, 1991, 7
4. 김천덕, 윤종락, 서희선, 김대환, 유한요소법을 이용한 원통형 압전변환기의 입력임피던스 해석 한국음향학회지, Vol. 11 No. 6, pp.32-40, 1992, 6
5. David S. Burnett, Finite Element Analysis, Addison Wesley
6. 菊地文雄 著, 有限要素法概説,サイエンス社
7. 電子技術研究會, 알기쉬운 超音波應用, 技文社