

수중폭발충격에 대한 수중음향 트랜스듀서의 내충격 특성 해석

Analysis for Anti-shock Characteristics of Underwater Acoustic Transducers to the Explosive Shock

서희선* · 고병준*

Hee-Seon Seo and Byeongjun Goh

(2006년 6월 27일 접수 ; 2006년 10월 17일 심사완료)

Key Words : Underwater Acoustic Transducer(수중음향 트랜스듀서), Anti-shock Characteristic(내충격 특성), Underwater Explosive Shock(수중폭발충격), NASTRAN

ABSTRACT

Underwater acoustic transducers can be exposed to a underwater explosive shock caused by various types of underwater weapon. So, a robust anti-shock design is required for transducers to endure the underwater explosive shock. To check the anti-shock characteristics of a transducer, underwater explosive shock test is needed. The conditions of underwater explosive shock test are set up referring to various oversea explosive shock test specifications, and the explosive shock pressure values are calculated according to those conditions. Transient analyses are carried out for two kinds of underwater acoustic transducer model to verify the anti-shock characteristics. The applied model has robust anti-shock characteristics enough to endure the explosive shock up to 2300 psi. In the future, the transducer design should be certified through the fields test, and modified if needed.

1. 서론

소나(SONAR) 장비는 음파를 이용하여 수중의 표적을 탐지하는 시스템으로 수중 음향 센서는 소나 장비의 주요 구성요소이다. 소나 장비 중 수상함에 서 운용되고 있는 선저고정형 소나(hull-mounted sonar)용 수중음향 트랜스듀서는 기뢰나 폭뢰에 의한 수중폭발 등의 선저방향에서 가해지는 충격에 견딜 수 있는 강인한 구조를 가지고 있어야 한다. 예를 들어 TNT 60 lb.를 사용하는 폭뢰의 경우, 1 m 거리를 기준으로 환산했을 때 10 m 거리에서 262 dB 정도의 음압을 발생시키는 것으로 알려져 있다.

이러한 수중폭발은 선체 구조 자체뿐만 아니라, 선저에 설치되어 있는 수중음향 트랜스듀서에도 악영향을 미친다. 수중음향 트랜스듀서는 돔에 의해서 외부로부터 보호되어 있지만, 음향적으로는 수중에 노출되어 있는 것과 같기 때문에 수중폭발의 영향을 직접적으로 받게 된다. 이러한 수중폭발의 영향으로 인해 트랜스듀서의 구조적 취약부분이 파괴되거나 손상을 입어 그 성능이 저하되거나 기능을 수행하기 어려워질 것으로 예상된다.

외국의 경우 수중폭발로 인한 구조적 손상이 발생하지 않도록 강인한 내충격 구조를 가지는 수중음향 트랜스듀서를 설계하고 그 성능을 평가할 수 있는 다양한 기준을 마련하고 있다. 미국에서 개발된 AN/SQS-58 소나의 경우에는 미 해군의 MIL규격(US Navy Military Standard)에 따라 평가기준을 마련하고 있다. 그 평가기준에서는 소나 스테이브

* 책임저자; 정회원, 국방과학연구소

E-mail : hsseo@add.re.kr

Tel : (055)540-6081, Fax : (055)542-3737

* 국방과학연구소

(stave)로부터 수직으로 24 feet, 수평으로 각각 40, 30, 25, 20 feet 떨어진 위치에서 60 lb.의 HBX-1 화약을 이용하여 수중폭발시험을 수행했을 때, 소나 트랜스듀서의 성능에 변화가 없을 것을 요구하고 있다⁽¹⁾. 역시 미국에서 개발된 TR-208의 경우에는 트랜스듀서 조립체에 대해 20 feet 거리에서 90 lb.의 HBX-1 화약을 이용하여 발생시킨 충격을 견딜 수 있도록 설계가 이루어져야 한다고 알려져 있다⁽²⁾.

국내의 경우 외국의 다양한 평가기준을 기반으로 내충격 특성 기준을 설정하고 있다. 따라서 수중음향 트랜스듀서 설계의 초기 단계에 내충격 기준을 적용함으로써 앞으로 제작되는 수중음향 트랜스듀서는 수중폭발에 대해서 강한 구조를 가질 수 있게 설계하도록 요구되고 있다. 그러므로 이 논문에서는 기계요소 해석에 일반적으로 사용되고 있는 NASTRAN을 이용해서 현재 설계된 수중음향 트랜스듀서의 충격 특성을 파악하고, 이를 이용해서 내충격 성능을 확인하였다.

2. 충격 조건 및 내충격 해석모델

2.1 충격조건

내충격 특성에 대한 해석을 수행하기 위해서는 수중음향 트랜스듀서에 가해질 충격조건을 정확하게 설정하여야 한다. 수중폭발의 충격조건은 폭발에 의해 발생한 에너지가 물이란 유체를 통해서 전달되기 때문에 일반적인 임펄스(impulse) 형태의 충격함수와는 다른 특성을 가지게 된다.

수중에서 다량의 폭약이 폭발하게 되면 고온, 고압의 가스가 발생하게 된다. 이렇게 발생된 가스는 Fig. 1과 같이 외부로 전달되며, 폭발에 의한 충격파의 압력 변화는 식 (1)과 같이 시간의 경과에 따라 지수함수의 형태로 감소하는 형태를 보인다^(3,4).

$$P(t) = P_{\max} e^{-\frac{t-t_1}{\theta}} ; t \geq t_1 \quad (1)$$

여기서 t 는 폭발이 일어난 후부터 경과된 시간, t_1 는 폭발이 일어난 후 목표물에 충격파가 도달하는데 걸린 시간을 의미하며, 모두 msec 단위로 표현된다. P_{\max} 는 충격파의 최대 압력 값이고, θ 는 감쇄 상수로 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이 표현된다^(3,4).

$$P_{\max} = K_1 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_1} \quad (\text{psi}) \quad (2)$$

$$\theta = K_2 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_2} \quad (\text{msec}) \quad (3)$$

여기서 K_1 , A_1 , K_2 , A_2 는 폭약의 종류에 따라서 결정되는 상수로 Table 1에 나와 있는 것과 같다. 그리고 W 는 사용된 폭약의 양으로 pound 단위이며, R 은 폭약과 목표물 사이의 거리로 feet 단위로 표현된다.

순수한 폭발력에 의한 충격파가 지나가고 나면 부가적으로 발생한 가스 버블에 의한 추가적인 압력이 가해진다. 이 가스 버블에 의한 영향은 어뢰에 의한 폭발과 같이 근접거리에서 폭발이 발생한 경우에는

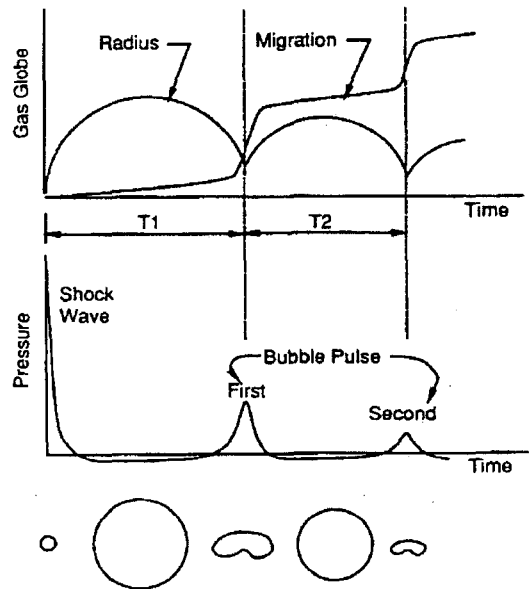


Fig. 1 Gas bubble growth, migration and bubble pulse⁽³⁾

Table 1 Shock wave parameter values⁽³⁾

Description	Parameter	Explosive Type		
		HBX-1	TNT	PETN
P_{\max}	K_1	22,347	22,505	24,589
	A_1	1.144	1.18	1.194
θ	K_2	0.056	0.058	0.052
	A_2	-0.247	-0.185	-0.257

선체를 포함한 구조물에 매우 심각한 손상을 줄 수 있으므로 중요하게 다루어지지만, 일반적인 수중폭발시험의 경우에는 실험이 비교적 원거리에서 이루어지기 때문에 그 영향을 고려하지 않는 것으로 알려져 있다⁽⁵⁾.

수중폭발에 의해 발생하는 압력은 식 (2)와 식 (3)에서 알 수 있는 것처럼 실험에 사용되는 폭약의 종류 및 양, 그리고 폭약과 표적 사이의 거리 등에 의해 결정된다. 폭약의 양 및 폭약과 표적 사이의 거리는 외국의 내충격 요구조건과 국내 함정에서 보유하고 있는 폭뢰의 규모 등을 고려하여 결정하여야 한다. 이 논문에서는 여러 조건 중에서 트랜스듀서의 입장에서 가장 열악한 조건에 해당하는 심도 24 ft, 수평거리 20 ft에서 90파운드의 폭약이 폭발하는 경우를 고려하였다. 폭약의 종류는 Table 1에 나와 있는 세 종류의 폭약을 모두 고려하여 구해진 폭약의 종류에 따른 압력의 변화는 Fig. 2와 같다.

압력의 크기와 경향은 폭약의 종류에 따라 큰 차이는 보이고 있지 않아 어떤 것을 선택해도 그 결과에 큰 차이는 없을 것으로 판단된다.

실제 압력변화에서는 Fig. 1에서 볼 수 있는 것처럼 압력 값이 0보다 작아지는 undershoot 부분이 발생하게 되지만 최대 압력의 크기에 비하면 그 크기가 작고 변화의 정도가 둔감하므로 실험식으로 구해진 압력에는 고려되지 않는다. 여기서 폭발압력의 지속시간은 식 (4)로부터 알 수 있다⁽⁶⁾. 그러므로 폭약의 양과 폭약과 표적 사이의 거리를 이용해서 폭발압력의 지속시간을 구하고, 이에 따라서 적절하게 압력이 트랜스듀서에 작용하는 시간의 범위를 결정한다.

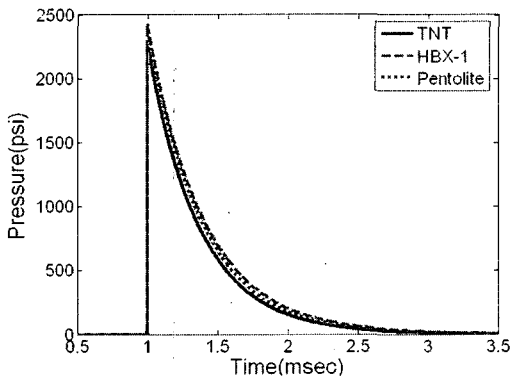


Fig. 2 Input pressure of three kinds of gunpowder

$$\tau = 0.075 m_{lb}^{0.26} r^{0.22} = 0.092 m_{kg}^{0.26} r^{0.22} \text{ (msec)} \quad (4)$$

여기서 m_{lb} 는 pound 단위의 TNT 폭약의 양, m_{kg} 는 kg 단위의 TNT 폭약의 양이다. 그리고 r 은 m 단위로 표적에서 폭발 지점까지의 거리이다. 각 상수는 TNT 폭약을 사용했을 때를 기준으로 하고 있으므로 다른 종류의 폭약을 사용할 경우에는 그에 따라서 적절하게 변경해줘야 할 것이다.

2.2 내충격 해석모델

이 연구에서 해석하고자 하는 수중음향 트랜스듀서는 전면추와 후면추 사이에 압전 세라믹이 적층되고, 인장 강도가 압축 강도에 비하여 작은 압전 세라믹의 동적 작동 범위를 향상시키기 위해 장력 볼트로 전면추(head mass)와 후면추(tail mass)를 연결하는 구조로 되어있는 Tonpitz형 구조를 가지고 있다. Fig. 3은 시험 제작된 수중음향 트랜스듀서의 단면을 보이고 있고, 수중에서 사용하므로 폴리우레탄으로 몰딩되어 있다. Fig. 4는 수중음향 트랜스듀서를 해석하기 위해 축대칭 모델로 해석 단면을 나눈 것을 보인 것으로 이와 관련된 해석 및 시험 결과는 참고문헌 (7)에 자세히 수록되어 있다. 트랜스듀서에서 단면적의 변화가 크게 발생하는 부분은 전면추와 후면추가 각각 압전 세라믹 적층(stack)과 접촉하고 있는 부분이다. 이 중에서 전면추와 압전 세라믹 적층이 접촉하고 있는 부분은 단면적이 넓은 곳에서 좁은 곳으로 변화하는 부분이므로 압전 세라믹 적층에 집중응력이 크게 발생할 것으로 추정된다. 그리고 장력볼트는 압전 세라믹에 비해서 상대적으로 강성이 크고 변형률이 적으므로 길이방향을 따라서 입사되는 압력에 따른 변형에 의해서 압전 세라믹 적층보다 큰 응력을 받을 것으로 예상된다. 실제로 외부 압력에 의한 장력볼트의 파손이나 변형은 전체 장력볼트 손상의 15% 정도에 이르는 것으로 알려져 있다⁽⁸⁾. 그러므로 이 두 부분에서의 응력 분포를 조사하면 트랜스듀서의 이상발생 유무를 파악할 수 있을 것이다.

또한, 트랜스듀서는 Fig. 4에 제시된 바와 같이 전면추를 통하여 물과 접하고 있는 구조로 되어있다. 이러한 경우 폭발에 의한 내부의 응력발생은 전면추의 방사면에 수직으로 하중이 인가되는 경우 가장

큰 응력이 발생하므로 전면추가 물과 접하는 방사면에 수직으로 수중폭발이 전달되는 것으로 압력의 입력조건을 설정하였다.

이렇게 압력조건을 설정한 후, 이 압력조건을 적용해서 수중 폭발 충격에 의한 수중음향 트랜스듀서의 특성을 파악하기 위해 모델의 경계 조건을 설정한다. 기본적으로 Fig. 4에 나온 모델을 기반으로 실

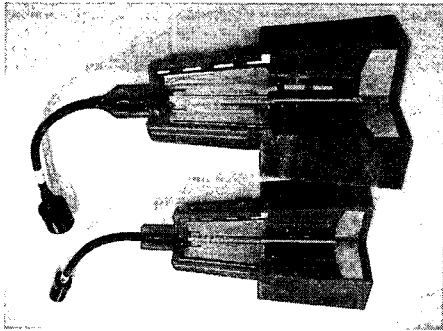


Fig. 3 Photo of underwater transducer

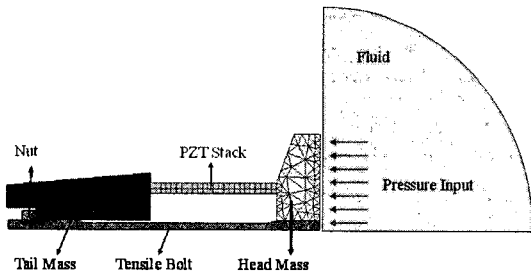


Fig. 4 Side view of underwater transducer⁽⁷⁾

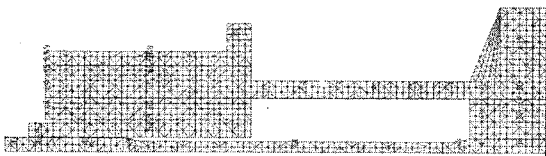


Fig. 5 Test FE model for underwater shock test simulation

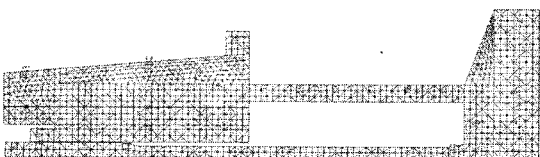


Fig. 6 Exact FE model for underwater shock test simulation

제 설치되는 조건과 유사한 경계조건을 가질 수 있도록 하였다.

Fig. 3에 보이는 바와 같이 후면추와 몰딩재 사이에는 실리콘을 이용하여 진동 절연되어 있는 형태이다. 따라서 실제 모델과 유사한 결과가 나올 수 있도록 후면추에 실리콘 층과 알루미늄으로 된 지지구조를 추가적으로 삽입하고 실리콘 층에 감쇠(damping)를 부여하였다. 먼저 모델링을 쉽게 하고 압력조건의 적절함과 트랜스듀서 자체 특성의 경향을 파악하기 위해서 후면추의 형상을 변경한 시험용 모델을 Fig. 5와 같이 만들었다.

트랜스듀서는 Fig. 3에 보이바와 같이 지지구조의 돌출부에 의해서 구조물에 볼트로 고정되므로 그와 유사한 경계조건을 설정하였다. 그리고 지지구조와 후면추는 실리콘 층에 의해서 완전히 접촉해 있는 것으로 가정하였다. 실제 모델에서도 후면추가 테이퍼 형상이므로 압력에 의해서 후면추가 뒤로 움직이게 되면 실리콘 층이 압축되면서 함께 움직이기 때문에 이 가정에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한 실리콘 층에 감쇠를 부여하였기 때문에 실리콘 층에 의해 트랜스듀서의 움직임이 크게 제한되지 않을 것으로 생각된다.

또한, 시험용 해석 모델의 해석 결과를 바탕으로 실제 트랜스듀서의 특성을 파악하기 위해서 실제 트랜스듀서를 모델링하였다. Fig. 5의 시험용 해석 모델은 지지구조가 트랜스듀서의 거동을 크게 제한하지 않고 있다. 하지만, 실제 트랜스듀서에서는 후면추가 테이퍼 형상이기 때문에 지지구조에 의해 트랜스듀서가 뒤쪽으로 움직이는 것이 제한을 받을 것이다. 이러한 움직임의 제한으로 인해서 트랜스듀서 내부에 발생하는 응력의 크기가 실제 모델에서는 시험용 해석 모델을 사용할 때보다 더 커질 수 있을 거라고 추측된다. 그래서 Fig. 6과 같이 실제 모델에 더욱 유사한 형태를 갖는 테이퍼 형태의 후면추를 갖는 모델을 생성하였다. 실리콘 층과 지지구조도 후면추의 형상에 따라서 수정하였다. 모델 형상 이외의 경계조건 및 물성치 등은 시험용 해석 모델과 동일하게 하였다.

3. 트랜스듀서의 내충격 특성 해석 결과

해석은 수중폭발에 의한 충격의 영향이 트랜스듀서

에 도달한 시점부터 충격의 직접적인 영향이 완전히 사라질 때까지의 시간에 따른 트랜스듀서의 변화를 살펴보기 위해서 시간영역 해석(transient analysis)을 수행하였다. 해석을 수행하는 시간은 여러 번의 시험 해석을 통하여 응력의 시간응답 특성의 최대값을 관찰할 수 있고 그 값이 감소되는 특성을 알 수 있는 1.5 주기 정도에 해당하는 0.216 msec에 대해서 이루어졌다. 충격 에너지가 전면추에 인가되어 압전 세라믹을 거쳐 후면추에 전달되고, 다시 반사파의 형태로 전면추로 전해지는 과정을 살펴보기 위해 총 계산시간을 100 등분한 간격인 0.0024 msec마다 해석결과를 구하였다. Fig. 7은 내충격에 가장 취약한 것으로 알려진 압전 세라믹에 인가되는 응력을 시간에 대해 그린 것이다. 최대값을 관찰할 수 있고, 시간에 따라 감소되는 특성을 보임을 알 수 있다. 이렇게 구해진 각 모델에 대한 해석 결과 중 대표적으로 그 특성을 표현할 수 있는 시간대를 선택하여 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 제시하였다.

해석에서는 실제 트랜스듀서 제작에 사용되는 재료의 물성치를 사용했으므로, 이 재료의 특성들로부터 각 부품이 견딜 수 있는 최대 응력 값을 구할 수 있다⁽⁹⁾. 이 값들을 Table 2에 정리하였으며, 해석에서 구해진 각 부품의 최대 응력 값이 각 부품의 허용 응력 범위 안에 있으면 그 부품은 충격을 견딜 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

전체 시간대에서 각 부품에서 발생하는 최대 응력은 Table 3에 나와 있는 것과 같다. Table 3에서 볼 수 있는 것처럼 트랜스듀서에서 발생하는 응력의 크기는 각 부품들이 견딜 수 있는 최대 응력에 비해

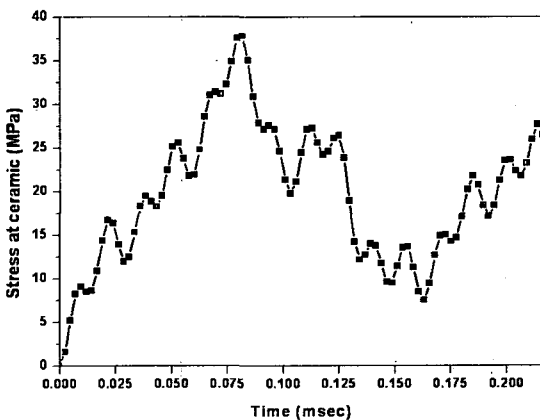
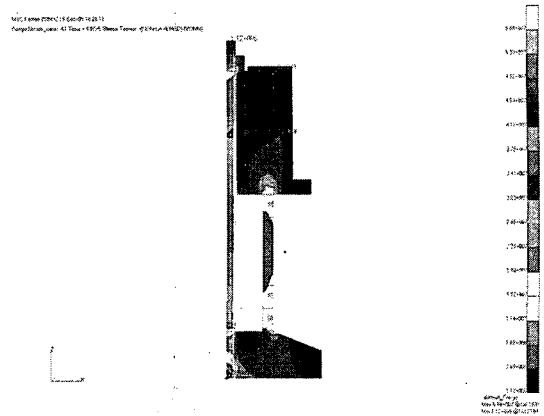
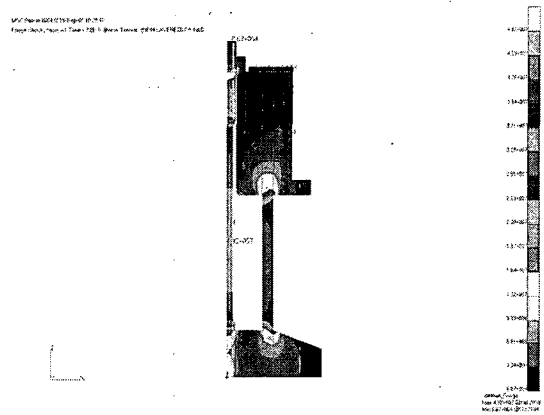


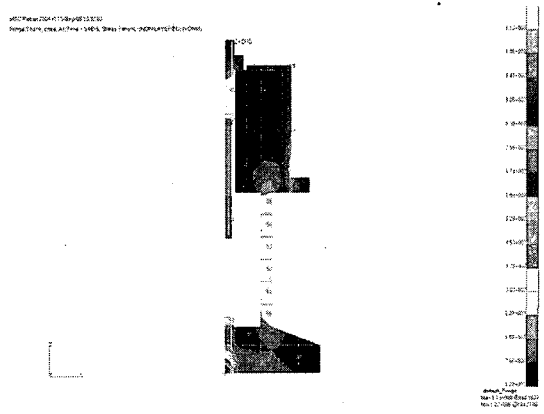
Fig. 7 Stress versus time at piezoelectric ceramic



(a) Stress distribution of transducer model at 0.048 msec

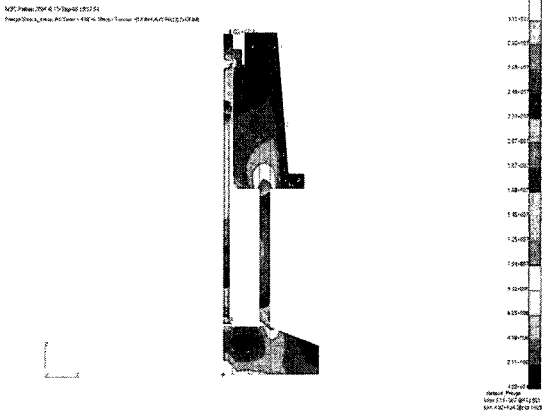


(b) Stress distribution of transducer model at 0.072 msec

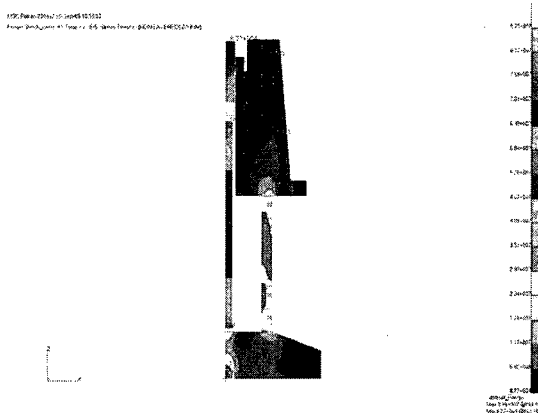


(c) Stress distribution of transducer model at 0.096 msec

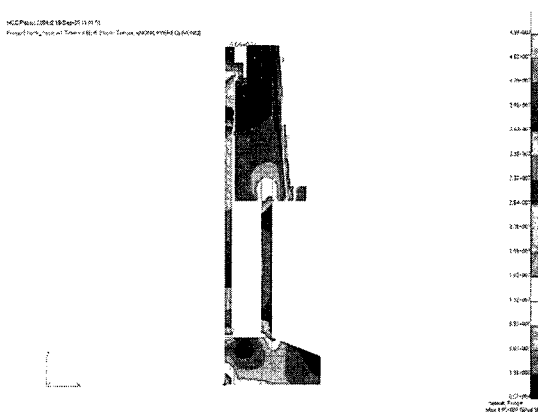
Fig. 6 Test FE model results of transient analysis for underwater shock



(a) Stress distribution of transducer model at 0.048 msec



(b) Stress distribution of transducer model at 0.072 msec



(c) Stress distribution of transducer model at 0.096 msec

Fig. 7 Exact FE model results of transient analysis for underwater shock

Table 2 Maximum durable stress of transducer parts

	σ_y
Tensile bolt	670 MPa
Head mass	375 MPa
Tail mass	490 MPa
Nut	490 MPa
Ceramic	517.2 MPa (for compression)

Table 3 Maximum stress of transducer parts

	σ_y	
	Test model	Real model
Tensile bolt	113 MPa	95.8 MPa
Head mass	22.7 MPa	23.4 MPa
Tail mass	28.6 MPa	29.2 MPa
Nut	28.6 MPa	19.7 MPa
Ceramic	37.8 MPa	36.3 MPa

두 모델의 해석결과에서 지지구조에 의해서 트랜스듀서의 이동이 제한됨에 따라 같은 0.096 msec에서 지지구조에 발생하는 최대 응력의 크기가 30.3 MPa에서 39.6 MPa로 더 커진 것 정도의 차이가 있다. 하지만, 해석을 수행한 시간이 연속적이지 않아서 측정하는 시간에 따라 그 값이 조금씩 달라질 수 있음을 고려했을 때, 각 부품에 나타나는 최대 응력의 값은 Table 3에서 볼 수 있는 것처럼 두 경우에 대해서 큰 변화가 없다고 볼 수 있다.

그러므로 Fig. 3과 같이 제작된 수중음향 트랜스듀서는 현재 고려되고 있는 폭뢰에 의한 수중 폭발에 의해서 발생하는 압력의 최대값인 약 2300 psi 정도의 압력에서 큰 성능상의 저하나 기계적인 파손이 발생하지 않을 것으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 수중폭발에 의해 발생하는 충격함수의 특성을 살펴보고 이를 수중음향 트랜스듀서 설계에 적용하였다. 그리고 유한요소 해석이 가능한 코드인 NASTRAN을 이용하여 설계된 수중음향 트랜스듀서의 수중폭발에 대한 기계적인 특성을 알아

보고 수중음향 트랜스듀서의 내충격 특성을 파악하였다. 그 결과 제작된 수중음향 트랜스듀서는 현재 고려되고 있는 폭뢰에 의한 수중 폭발에 의해서 발생하는 압력의 최대값인 약 2300 psi 정도의 압력에서 큰 성능상의 저하나 기계적인 파손이 발생하지 않을 것으로 판단할 수 있다.

현재 수중폭발시험은 각 국가별, 각 제품별로 다양한 조건을 적용하고 있으며, 실제로 수중폭발이 일어나는 상황도 매우 다양하다. 향후에는 이런 다양한 조건들을 만족시킬 수 있는 해석 방안을 마련하여 이를 적용한 내충격 설계를 수중음향 트랜스듀서에 적용할 수 있도록 해야 할 것이다. 그리고 향후 실제 제작품을 해상에 설치하고 충격 요구조건을 만족하는 수중 폭발이 있는 상황에서 트랜스듀서의 성능과 직접적인 관련이 있는 임피던스를 실시간으로 측정할 계획이다. 또한, 과도한 입력 전압에 의한 수신회로 보호를 위해 충격에 의해 발생하는 출력 전압을 실시간 측정하여 트랜스듀서의 내충격 특성을 시험하고 문제점을 수정할 예정이다.

참 고 문 헌

(1) Test Requirements Specification for AN/SQS-58 Transducer Array, RAYTHEON COMPANY.
 (2) Ship Systems Command Contract Specification : Transducer for Detecting-range Sets, SONAR AN/SQS-23 and AN/SQQ-23, MIL Handbook.
 (3) Shin, Y. S., "Response of Undersea

Vehicles to Underwater Explosions" .

(4) Park, B.-W., An, C.-W. and Cho, Y.-S., 2000, "Study on the Estimation of Structural Damage of Plates under Explosion Loads" , ADD Technical Report, NSDC-513 -000854.
 (5) Park, B.-W., An, C.-W. and Cho, Y.-S., 1996, "Underwater Shock Analysis of Ship Hull Girder with Charge Conditions" , ADD Technical Report, NWS-513-960861.
 (6) Heinz G. Urban, 2002, "Handbook of Underwater Acoustic Engineering" , STN ATLAS Elektronik GmbH, Bremen.
 (7) Kim, J.-S., Lee, J.-M. and Cho, Y.-H., 2005, "A Study on Design of Underwater Acoustic Transducers Using the Electro - mechanical Coupling Analysis Code ATILA" , Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 10. pp.1211~1216.
 (8) AN/SQS-56 Sonar Transducer Reliability Prediction Update, RAYTHEON COMPANY.
 (9) Crandall, S. H., Dahl, N. C. and Lardner, T. J. 1978, "An Introduction to the Mechanics of Solids" , 2nd Edition with SI Units, McGraw-Hill.
 (10) MSC/NASTRAN Version 70.5 Quick Reference Guide, 1998, The MacNeal-Swendler Corporation.
 (11) MSC/Patran Version 7.5 User's Manual, 1997, The MacNeal-Swendler Corporation.