

인공기저막 기반 인공와우의 주파수 분리 성능향상을 위한 인공기저막 전산모사

김태인* · 장성민* · 송원준** · 배성재** · 김완두** · 조맹효*†

* 서울대학교 기계항공공학부, ** 한국기계연구원

A Simulation Study of Artificial Cochlea Based on Artificial Basilar Membrane for Improving the Performance of Frequency Separation

Taein Kim*, Seongmin Chang*, Won Joon Song**, Sung Jae Bae**, Wan Doo Kim** and Maenghyo Cho*†

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.,

** Dept. of Nature-Inspired Nano Convergence System, Nano Convergence and Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received January 5, 2012; Revised January 17, 2012; Accepted January 25, 2012)

Key Words: Artificial Cochlea(인공와우), Basilar Membrane(기저막), Frequency Separation(주파수 분리), Acoustic-Structure Interaction(음향-구조 연성)

초록: 기저막은 달팽이관의 한 기관으로서 주파수 대역에 따라 기저막의 최대 진폭 발생 위치가 변화하여 소리를 인지할 수 있게 되며 이는 기저막의 형상에 기인한다. 본 연구에서는 인공기저막 기반의 완전 삽입형 인공와우 개발을 위한 연구의 일환으로써 주파수 분리 대역폭을 보다 확장시킬 수 있는 기저막의 형상을 제안하기 위해 설계 인자 연구를 수행하였다. 상용 유한요소소프트웨어 Abaqus 를 이용한 유한요소 해석을 통해 인공기저막의 음향 진동 특성을 예측하였으며 해석결과는 실험결과와 비교하여 검증하였다. 기저막 모델의 다양한 형상 변화와 기저막 모델에 존재하는 잔류응력에 따른 주파수 분리 대역의 변화 추이를 설계 인자 연구를 통하여 제시하였다.

Abstract: The basilar membrane (BM), one of organs of cochlea, has the specific positions of the maximum amplitude at each of related frequencies. This phenomenon is due to the geometry of BM. In this study, as the part of the research for the development of fully implantable artificial cochlea which is based on polymer membrane, parametric studies are performed to suggest the desirable artificial basilar membrane model which can detect wider range of frequency separation. The vibro-acoustic characteristics of the artificial basilar membrane are predicted through finite element analysis using commercial software Abaqus. Simulation results are verified by comparing with experimental results. Various geometric shapes of the BM and residual stress effects on the BM are investigated through the parametric study to enable a wider detectable frequency separation range.

1. 서 론

인공와우는 외과시술을 통해 내이 달팽이관에 삽입되어 기저막과 유모세포의 기능을 대신하여 소리를 전기신호로 변환시켜주는 장치이다. 현재 삽입시술이 이루어지고 있는 인공와우는 수신안테나, 전극과 같이 체내에 삽입되는 부분과 어음처리기, 송신

안테나, 마이크로폰, 배터리와 같이 체외장치로 구성되어 있다. 소리는 외부의 어음처리기를 통해 전기신호로 변환되어 송신 안테나를 거쳐 체내의 수신 안테나로 전달된다. 안테나는 코일로 되어있어서 전자기 유도를 통해 신호가 전달된다. 체내로 수신된 신호는 달팽이관 내부에 삽입한 전극 어레이에 전달되고 소리의 각 주파수에 대응되는 전극이 달팽이관 내에 맞닿은 부위의 청신경을 직접 자극함으로써 신호가 대뇌로 전달된다.

하지만 현재의 인공와우는 체외부와 체내부로 분리되어 있기 때문에 항상 외부충격에 노출되어

† Corresponding Author, mhcho@snu.ac.kr

있고 어음처리, 신호의 송수신, 전극 활성화에 큰 전력이 소모되어 잦은 배터리 교체가 필요하다는 단점이 있다. 때문에 최근에는 기저막의 진동특성을 기반으로 한 체내 완전 삽입형 무전원 인공와우 장치에 대한 연구가 이루어지고 있다.

기저막은 달팽이관 내부 나선형 공동을 따라 존재하며 하부에서 상부로 갈수록 폭이 지수함수 형태로 점점 넓어지는 길고 얇은 막 조직이다. 기저막의 하부는 중이 이소골 중 등골에 맞닿아 있으며 양 옆 모서리는 달팽이관 하부에서 상부까지 달팽이관 벽에 고정되어있다. 기저막은 내부에 너비방향으로 강성이 큰 콜라겐 섬유 배열이 존재하기 때문에 길이방향의 강성 보다 너비방향의 강성이 더 크다.^(1,2) 달팽이관 하부로 유입되는 주파수가 증가할수록 기저막에서는 자체의 형상과 경계조건으로 인해 최대 진폭 발생 위치가 기저막의 폭이 넓은 상부에서 좁은 하부로 이동하는 주파수 분리 현상이 나타난다.⁽³⁻⁵⁾

인공 기저막 기반의 인공와우는 실제 기저막에 서와 같이 주파수 분리 현상을 구현할 수 있는 인공 기저막 모델을 제작하여 사용하고자 하는 인공 청각기구로서 기저막 모델에서의 최대진폭 발생 위치로부터 유입 음파의 주파수를 역산해내는 방법을 취하고 있다. S. Hur 등은 PMN-PT cantilever의 길이를 변화시킴에 따라 공진주파수가 변화하는 실험을 통해 실험모델의 형상이 주파수에 따른 모델의 진동특성을 결정하는 요인임을 밝혔다.⁽⁶⁾ Shintaku 등은 서로 다른 두 유체, 공기와 실리콘 오일에서 기저막 모델 실험을 실시하였다. 공기 중에서 약 6.6 ~ 19.8 kHz, 실리콘 오일 내에서 약 1.4 ~ 4.9 kHz의 주파수 범위에서 주파수 분리가 나타나는 것을 확인하였다.⁽⁷⁾ Xu 등은 길이 1.5 mm ~ 7.5 mm의 polymer micro cantilever array를 이용하여 약 0.3 ~ 7.4 kHz 주파수 대역에서 주파수 분리가 나타나는 모델을 제작하였다.⁽⁸⁾

인공기저막 기반 인공와우의 성능은 인공기저막이 분별해 낼 수 있는 주파수 대역과 대역의 크기, 즉 대역폭으로 가늠할 수 있다. 인간의 기저막은 약 20 Hz ~ 20 kHz의 주파수를 구분해 내기 때문에^(9,10) 인공기저막의 주파수 분리 대역은 기본적으로 가청주파수 범위 내에 위치해야 하며 특히 일상 대화가 이루어지는 약 8 kHz까지의 음역에서의 주파수 분해능을 갖추어야 한다. 따라서 보다 큰 주파수 분리 대역폭을 갖는 인공기저막 모델이 요구된다. 인공기저막의 주파수 분리 대역과 대역폭은 기저막 모델의 형상과 강성, 경계조건에

의해 결정된다. 따라서 보다 큰 주파수 분리 대역폭을 갖는 기저막 모델의 형상과 물성에 대한 최적 설계가 요구된다.

본 연구에서는 인공기저막 모델의 형상에 따른 주파수 분리 대역폭 변화의 경향을 파악하여 보다 큰 주파수 분리 대역폭을 가지는 기저막 모델 형상 탐색의 방향을 제시하고자 한다. 이를 위하여 인공기저막 모델의 실험을 수행하고 음향-구조 연성 해석을 수행하였다. 실험으로 검증된 전산모사 기법을 통하여 다양한 기저막 모델에서의 주파수 분리 대역폭을 예측하였다. 전산모사 결과를 바탕으로 기저막 형상에 따른 주파수 분리 대역폭 변화의 경향을 파악하였다.

또한 기저막 실험모델 제작 시 기저막 변위 측정의 정확도를 향상시키기 위해 기저막 필름에 인장 변형을 가함에 따라 발생하는 잔류응력을 고려한 해석을 수행하였다. 이를 통해 잔류응력이 주파수 분리 대역폭 변화에 미치는 영향을 알아보았다.

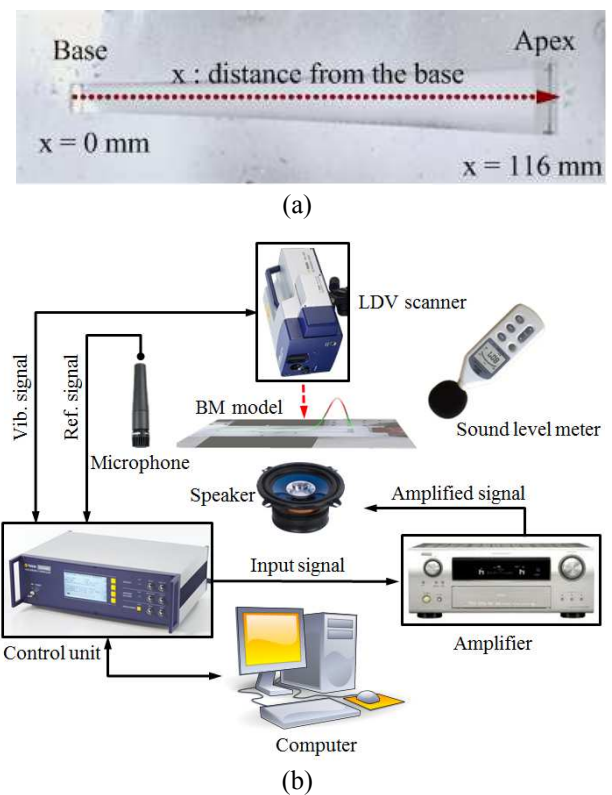


Fig. 1 The configuration of BM and schematic of experiment: (a) the artificial basilar membrane model composed of a polymer membrane and a stainless substrate, (b) the layout of the experimental setup

2. 실험 장치 및 실험 방법

기저막 실험모델 형상은 실제 기저막 형상의 특징을 모사한 것으로, 길이 116 mm, 너비는 양 쪽이 각각 6.75 mm, 18.2 mm 이며 빗변은 아래 식 (1) 과 같은 지수함수 형태로 구성되었다.

$$\text{Width} = 6.75e^{0.0086x} \quad (1)$$

실험모델은 Polyethylene Terephthalate 재질의 두께 0.1 mm 인 필름을 사용하였으며 Fig. 1(a)와 같이 스테인리스 평판에 기저막 형상으로 구멍을 내고 그 위에 필름을 접착하여 제작하였다. 필름 접착 시 접착면의 필름에 미세한 주름이 발생, 실험상의 오차 유발 요인이 되는 것을 방지하기 위하여 필름을 기저막 모델 너비 방향으로 인장시킨 상태로 접착하였다.

실험은 Fig. 1(b)와 같이 구성하였다. 기저막 실험모델의 20 cm 수직하단에 위치한 스피커에서 약 86 dB 의 음파를 3.125 Hz~10000 Hz 의 주파수 대역에서 3.125 Hz 단위로 증가시켜가며 가진하였다. 기저막 필름 중앙선 부분의 진폭을 LDV 스캐너를 이용하여 속도데이터를 추출, 이를 최대 진폭 데이터로 변환시켜 얻었다.

기저막 모델 각 지점에서의 최대 진폭을 연결하여 나타내면 특정 주파수에서의 기저막 필름의 최대 변위 발생 지점을 알 수 있다. 이러한 방법으로 전 주파수 대역에서의 최대 진폭 발생 위치를 Fig. 2 과 같이 나타낼 수 있다. 775 Hz 이하의 주파수에서는 최대 진폭 발생 위치에 대한 경향성이 나타나지 않았다. 주파수가 증가함에 따라 Fig. 3 과 같이 최대 진폭 발생지점은 넓은 쪽에서 점차 좁은 쪽으로 이동하여 주파수에 따라 최대 진폭 발생 위치가 구분, 분리되는 경향이 나타났다. 기저막 모델의 주파수 분리 기능은 이와 같은 일정한

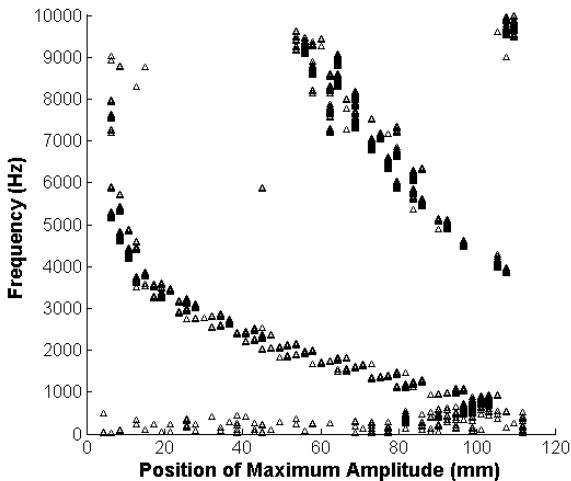
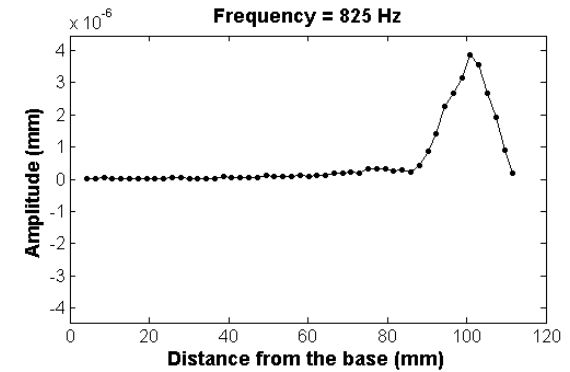
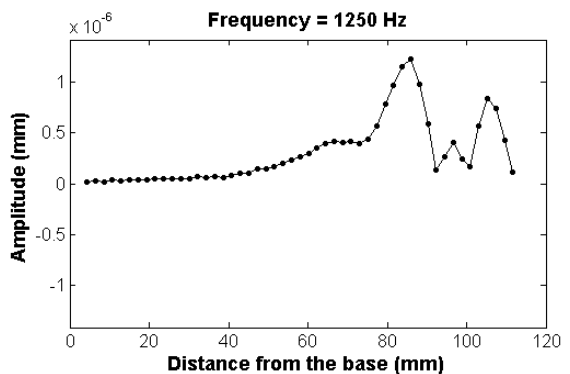


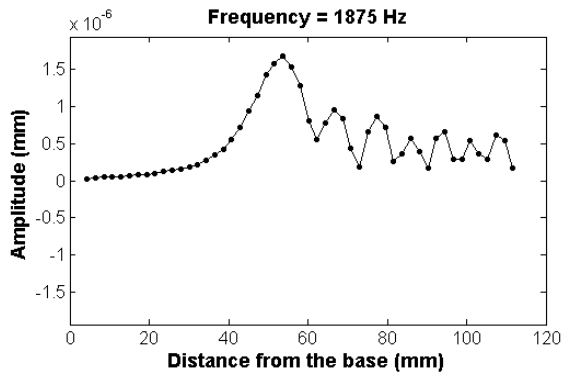
Fig. 2 The frequency-position map of the maximum amplitude in experiment



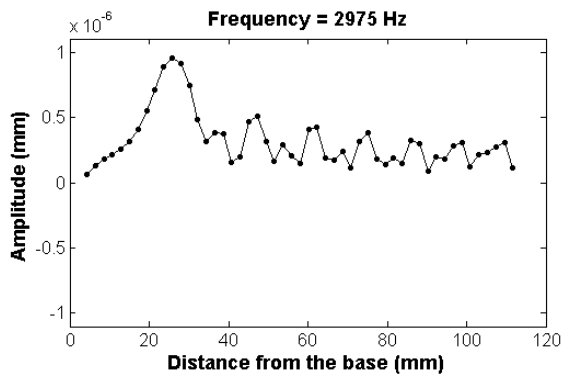
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 The displacement envelope along the center-line of the membrane: (a) 825 Hz, (b) 1250 Hz, (c) 1875 Hz, (d) 2975 Hz

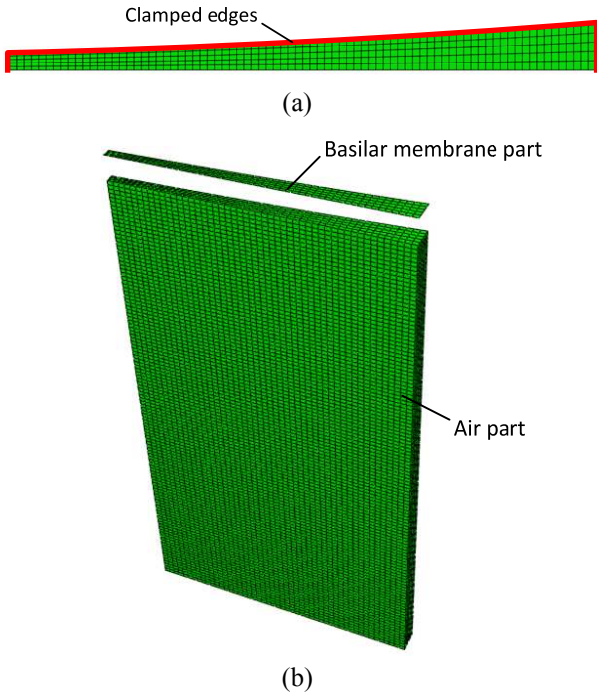


Fig. 4 The FE model for simulation: (a) FE model of basilar membrane for comparison with experiment (b) A exploded view of FE basilar membrane and air model

경향이 나타나는 주파수 대역에서 가능하게 된다. 실험모델의 결과에서 3840 Hz 이상의 주파수 대역에서는 기저막 실험모델의 양 끝 단에서 최대 진폭 발생 위치가 교차로 나타나기 때문에 최대 진폭 발생위치로부터 주파수를 역산하여 알아내는 방법론을 적용할 수 없다. 즉 기저막 실험모델의 경우, 식별 가능 주파수 대역은 775 Hz ~ 3840 Hz 로 약 3065 Hz 의 주파수 분리 대역폭을 가지는 것 알 수 있다.

3. 기저막 모델 전산모사

전산구조해석프로그램 Abaqus v6.10 을 이용하여 실험모델 형상의 유한요소 모델에 대한 전산모사 해석을 수행하였다. 기저막 해석모델은 Fig. 4(a) 과 같이 8 절점 쉘요소를 사용하여 실험모델의 너비방향에 대한 대칭모델로 구성하였으며 모서리에 위치한 절점의 자유도를 구속하여 경계조건을 지정하였다. 기저막 모델 하단으로부터 전달되는 음파는 원역장(far-field)의 평면파로 가정하기 위해 기저막 모델과 가진 평면 사이에 충분한 거리를 두었으며 이 구간의 공기 층을 20 절점 음향요소로 구성하였다. 기저막과 공기 층을 Fig. 4(b)와 같이 상하배치하여 음향-구조 연성 해석을 수행하였다.

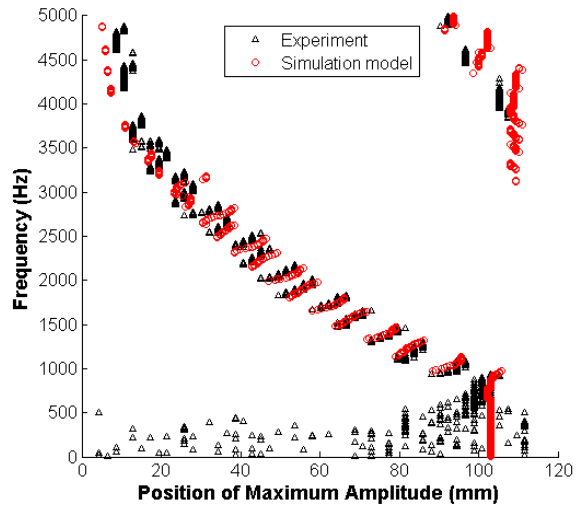


Fig. 5 The frequency-position map of the maximum amplitude compared with experiment and simulation

음파에 의한 기저막 모델의 변위는 음압의 크기에 비례하여 증가하기 때문에 공기 층 모델 하단에 적용되는 음압은 1 Pa 단위하중으로 설정하였다. 기저막 해석모델 요소에 적용할 물성치는 범용데이터베이스를 참조하여 가변 범위 내에서 영률 4.5 GPa, 포아송비 0.4, 밀도 1500 kg/m³ 로 결정하였다. 공기의 물성은 온도 20 °C 를 기준으로 한 밀도 1.166 kg/m³ 로 설정하였다.

Fig. 5 는 위의 물성치를 적용하여 10 Hz ~ 5000 Hz 주파수 대역에서 10 Hz 간격으로 수행한 전산모사해석결과와 실험결과를 나타낸 것이다.

4. 설계 인자 연구

형상을 변화시킨 여러 기저막 모델에 대한 음향-구조 연성 해석을 수행하여 주파수 분리대역의 변화 양상을 관찰하였다. 주파수 분리 대역폭 비교를 위한 기준모델 형상은 Fig. 6 과 같이 길이와 양 너비가 실험모델과 같은 사다리꼴 형상으로 하였다.

4.1 기저막 모델 형상 변화의 영향

Fig. 6 의 해석 기준모델에서 변 AD(왼쪽 너비)의 길이를 변화시킨 모델에 대한 주파수 분리 대역폭 변화를 확인하였다. 저주파 대역에서 최대 진폭은 해석모델의 폭이 넓은 오른쪽에서 나타나며 주파수가 증가함에 따라 점차 왼쪽으로 이동한다.

왼쪽 너비 변화에 따른 모델 오른쪽 부분의 국부적 강성 변화는 형상의 직접적인 수정이 가해진

Table 1 The bandwidth of the frequency separation in three FE models which are varied their width of left side

Width of left (mm)	Frequency range (Hz)	Bandwidth (Hz)
3.375	730 ~ 2770	2040
2.750	750 ~ 3050	2300
2.200	760 ~ 3130	2370

Table 2 The bandwidth of frequency separation in three FE models which are varied their width of right side

Width of right (mm)	Frequency range (Hz)	Bandwidth (Hz)
12.0	460 ~ 1910	1450
10.6	560 ~ 2400	1840
9.10	730 ~ 2770	2040

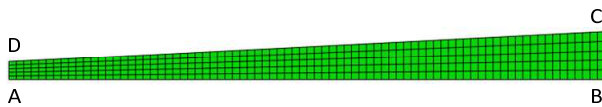


Fig. 6 The standard shape of FE model of basilar membrane in parametric study

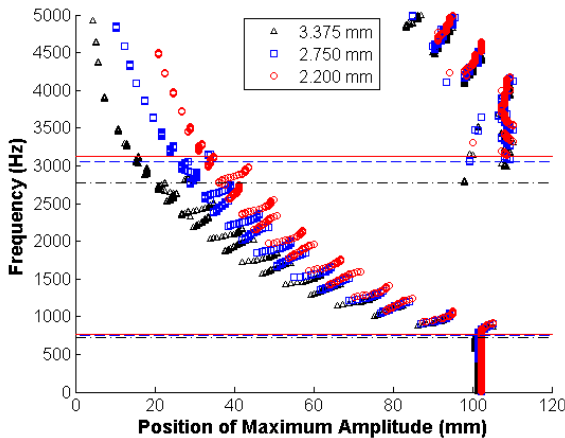


Fig. 7 The frequency-position map of the maximum amplitude in three FE models of which width at left side are varied

모델 왼쪽 부분의 국부강성 변화보다 작다. 때문에 저주파 대역에서 최대 진폭이 모델 오른쪽에서 나타날 때 각 해석모델의 최대 진폭 발생 위치는 크게 변하지 않는다. 보다 높은 주파수 대역에서 최대 진폭이 나타나게 되는 모델 왼쪽 부분은 형상변화로 인해 경계조건이 크게 변화한 부분으로, 총 세가지 해석모델의 경우에서 Fig. 7 에서와 같이 동일한 주파수에서 각기 다른 최대 진폭 발생 위치를 보인다. 주파수 분리 대역폭은 왼쪽 너비가 감소할수록 증가하며 Table 1 에 결과를 비교하였다.

Fig. 6 의 해석 기준모델에서 변 BC(오른쪽 너비)의 길이를 변화시킨 모델에 대한 주파수 분리 대역폭 변화를 확인하였다. 저주파 대역에서는 최대 진폭이 해석모델의 오른쪽에서 나타나며 주파수가 증가함에 따라 점차 왼쪽으로 이동한다.

오른쪽 너비 변화에 따른 모델 왼쪽 부분의 국

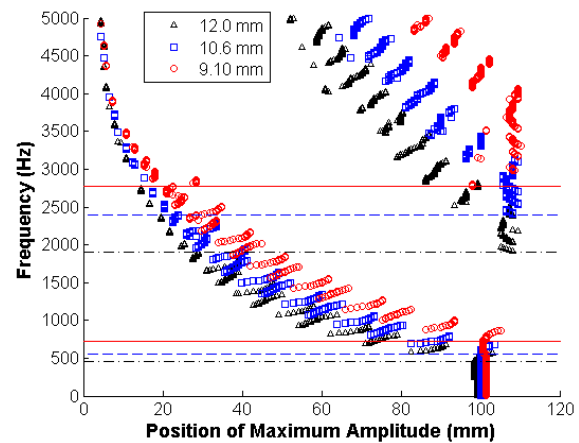


Fig. 8 The frequency-position map of the maximum amplitude in three FE models of which width at right side are varied

부적 강성 변화는 형상의 직접적인 수정이 가해진 모델 오른쪽 부분의 국부 강성 변화보다 작다. 이는 앞선 해석의 반대 경우로써 저주파 대역에서 최대 진폭이 모델 오른쪽에서 나타날 때 각 해석모델들의 최대 진폭 발생 위치에 차이가 나타난다. 반면 주파수가 증가함에 따라 최대 진폭 발생 위치는 경계조건의 변화가 작은 왼쪽 부분으로 이동, Fig. 8 에서와 같이 모델 간 최대 진폭 발생 위치의 차이는 점점 감소한다. 주파수 분리 대역폭은 오른쪽 너비가 감소할수록 증가하며 Table 2 에 결과를 비교하였다.

Fig. 6 의 해석 기준모델에서 변 AD 와 변 BC 의 길이를 동일하게 변화시킨 모델에 대한 주파수 분리 대역폭 변화를 확인하였다. 앞선 경우들과 마찬가지로 저주파 대역에서는 최대 진폭이 해석모델의 오른쪽에서 나타나며 주파수가 증가함에 따라 점차 왼쪽으로 이동한다. 해석모델 왼쪽과 오른쪽의 경계조건이 모두 변화하여 총 네 가지 해석모델의 최대 진폭 발생 위치는 Fig. 9 에서와 같이 해석 주파수 대역 전반에 걸쳐서 차이를 보이게 된다. 주파수 분리 대역폭은 양 너비가 동일하게 감소할수록 증가하며 Table 3 에 결과를 비교하였다.

Table 3 The bandwidth of frequency separation in three FE models which are varied their widths of left and right side

Width of left (mm)	Width of right (mm)	Frequency range (Hz)	Bandwidth (Hz)
3.375	9.1	730 ~ 2770	2040
2.375	8.1	930 ~ 3510	2580
1.375	7.1	1220 ~ 4340	3120
0.675	6.4	1510 ~ 5310	3800

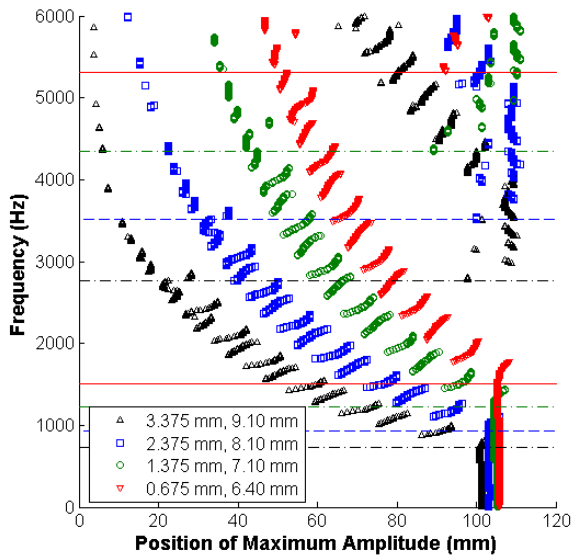


Fig. 9 The frequency-position map of the maximum amplitude in four FE models of which widths at left and right side are varied

앞선 여러 해석작업에서 가장 큰 주파수 분리 대역을 나타낸 모델은 Fig. 6의 해석 기준모델에서 양 너비를 동일하게 2.7 mm 씩 줄인 모델이었다. 모델의 빗변은 Fig. 6의 변 CD(빗변) 형상 변화에 따른 주파수 분리 대역폭의 변화를 알아보기 위해 실험모델에서의 지수함수 궤적 곡선을 위 모델의 빗변에 적용하여 해석하였다. 두 모델에 대한 최대 진폭 발생 위치를 Fig. 10과 같이 나타내었다. 그 결과, Table 4와 같이 기존의 해석모델 중 가장 큰 주파수 대역을 보였던 사다리꼴 형상의 모델 보다 빗변형상을 지수함수 형상으로 수정한 모델에서 더 큰 주파수 분리 대역폭이 예측되었다. 이를 통해 기저막 모델의 빗변 형상 또한 주파수 분리 대역폭 변화의 요인이며 빗변이 지수함수 궤적 형상일 때에, 보다 넓은 주파수 분리 대역을 갖는다는 것을 확인하였다.

Table 4 The bandwidth of frequency separation in two FE models which are varied their shape of the slope

Shape of slope	Frequency range (Hz)	Bandwidth (Hz)
Exponential	1650 ~ 5810	4160
Trapezoidal	1510 ~ 5310	3800

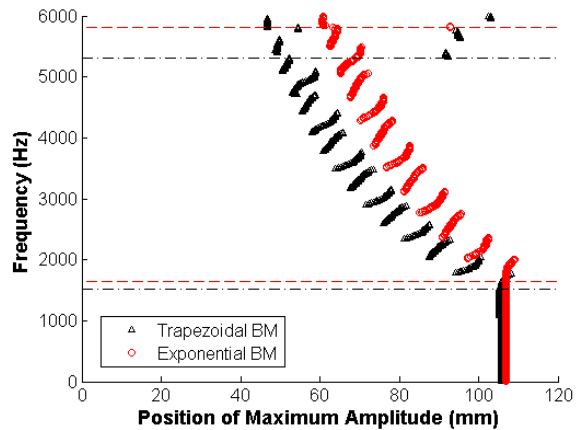


Fig. 10 The frequency-position map of the maximum amplitude in two FE models of which shape of the slope are varied from the 4th BM model at Table 4 in section 4.3

4.2 잔류응력의 영향

스테인리스 평판에 기저막 필름을 접착하여 실험모델을 제작 시 접착면에 국부적인 주름이 발생한다. 주름이 유발할 수 있는 기저막 변위에서의 영향을 최소화하기 위해 필름을 기저막 형상의 너비 방향으로 인장시켜 접착하였다. 이로 인해 기저막 필름은 기저막 형상 너비방향의 잔류응력성분을 포함하게 된다. 인장에 의해 발생하는 주파수 분리 대역의 변화를 알아보기 위해 기저막 모델에 잔류응력을 적용하였고, 3장에서 언급한 해석과정에 따라 전산모사를 수행하였다.

Table 4의 지수함수 빗변 모델에 너비방향으로 잔류응력 성분을 적용하여 주파수 분리 대역폭 변화를 확인하였다. 잔류응력을 Table 5과 같이 증가시키며 전산모사를 수행하였다. 잔류응력의 크기가 증가할수록 주파수 분리 대역폭이 증가하는 경향이 나타났다. 주파수 분리 대역폭의 증가는 잔류응력의 크기가 증가할수록 주파수 분리가 시작되는 시점의 주파수가 소폭 상승하고 끝나는 시점의 주파수가 보다 크게 상승하여 이루어진다. 이를 통해 잔류응력이 주파수 분리 대역폭 확장을 위한 하나의 요인이 될 수 있음을 확인하였다.

Table 5 The changes of the bandwidth of frequency separation due to the width-directional residual stress on the FE basilar membrane model. Each analysis is performed with corresponding the magnitude of stress

Residual stress (Pa)	Frequency range (Hz)	Bandwidth (Hz)
0×10^5	1650 ~ 5810	4160
1×10^5	1700 ~ 5850	4150
2×10^5	1740 ~ 6230	4490
3×10^5	1790 ~ 6260	4470
4×10^5	1830 ~ 5950	4120
5×10^5	1870 ~ 6330	4460
6×10^5	1910 ~ 6370	4460
7×10^5	1950 ~ 6770	4820
8×10^5	1990 ~ 6800	4810
9×10^5	2030 ~ 6840	4810
10×10^5	2060 ~ 6870	4810
11×10^5	2100 ~ 6900	4800
12×10^5	2130 ~ 6930	4800

5. 결 론

본 연구에서는 인공기저막 모델의 형상에 따른 주파수 분리 대역폭 변화의 경향을 파악하여 보다 큰 주파수 분리 대역폭을 갖는 기저막 모델 형상 탐색의 방향을 제시하였다. 기저막 해석 기준모델의 한 쪽 너비가 감소하거나 양 쪽 너비가 동일하게 감소할 때, 빗변의 형상이 지수함수 형상일 때 주파수 분리 대역폭이 증가함을 확인하였다. 이와 같은 방향으로 기저막 형상이 변화할 때, 주파수 분리가 시작되는 시점의 주파수가 소폭 상승하고 끝나는 시점의 주파수가 보다 크게 상승하여 주파수 분리 대역폭의 증가로 이어지게 되었다.

또한 너비방향의 잔류응력을 포함한 유한요소 기저막 모델 전산모사를 통해 잔류응력이 기저막 모델의 주파수 분리 대역 변화에 미치는 영향을 알아보았다. 그 결과 주파수 분리 대역은 위와 동일한 변화 양상을 보이며 변화하였고. 이를 통해 잔류응력이 주파수 분리 대역폭을 확장시킬 수 있

는 요인임을 검증하였다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 미래유망 융합기술 파이오니어사업(No. 2011-0001661, 2011-0001664)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- (1) Iurato, S., 1962, "Functional Implications of the Nature and Submicroscopic Structure of Thetectorial and Basilar Membrane," *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 34, No. 9B, pp. 1386~1395.
- (2) Vold'rich, L., 1978, "Mechanical Properties of Basilar Membrane," *Acta Otolaryngol*, Vol. 86, No. 1~6, pp. 331~335.
- (3) Bekesy, G.V., 1956, "Current Status of Theories of Hearing," *Science*, Vol. 123, No. 3201, pp. 779~783.
- (4) de Boer, E., 1980, "Auditory Physics. Physical Principles in Hearing Theory. I," *Physics Reports*, Vol. 62, pp. 87~174.
- (5) Zweig, G., Lipes, R. and Pierce, J. R., "The Cochlear Compromise," *J. Acoust. Soc. Am*, Vol. 59, pp. 975~982.
- (6) Hur, S., Lee, S.Q. and Choi, H.S., 2009, "Fabrication and Characterization of PMN-PT Single Crystal Cantilever Array for Cochlear-Like Acoustic Sensor," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 181~184.
- (7) Shintaku, H., Nakagawa, T., Kitagawa, D., Tanujaya, H., Kawano, S. and Ito, J., 2010, "Development of Piezoelectric Acoustic Sensor with Frequency Selectivity for Artificial Cochlea," *Sens. Actuators A Phys*, Vol. 158. No. 2, pp. 183~192.
- (8) Xu, T., Bachman, M., Zeng, F.G. and Li, G.P., 2004, "Polymeric Micro-Cantilever Array for Auditory Front-End Processing," *Sens. Actuators A Phys*, Vol. 114, No. 2~3, pp. 176~182.
- (9) Dallos, P., Popper, A. and Fay, R., 1996, *The Cochlea*, Springer, Volume 8 of Springer handbook of Auditory Research.
- (10) Parthasarathi, A. A., 2000, "Numerical Modeling and Electro-Acoustic Stimulus Response," *Analysis for Cochlear Mechanics*, Ph.D. thesis, University of Michigan.