

특집/오디오 분야

성덕대왕 신종의 소리

김 양 한
한국과학기술원

I. 서론

기원후 771년 통일 신라의 해공왕 7년에 비로소 완성된 성덕대왕 신종은 현재까지 한국에 남아 있는 범종 가운데 가장 웅장하고 아름다운 모양, 18900 kg에 달하는 질량, 그리고 한국인의 마음을 움직여 준다고 알려진 소리 등으로 인하여 많은 사람들의 관심의 대상이 되어 왔다. 특히 성덕대왕 신종은 당시 국교이었던 불교에 대한 국민의 신앙심을 깊게 함은 물론, 신라 국민에게 궁극적으로 소리의 원음을 확립하기 위한 목적까지를 염두에 둔 것으로 알려져 있다[1].

이러한 목적을 갖고 시작된 신종은 수많은 시행 오차를 거듭할 수 밖에 없었음은 자명한 일이다. 성덕대왕의 아들인 경덕왕 시대부터 시작된 종의 주조는 결국 그의 아들에 해당되는 해공왕 시대에 비로소 그 모습을 세상에 들어 낼 수 있게 된다. 당시 20만호의 웅대한 집성지를 이루고 있었던 신라의 수도 경주의 시민들에게 시각을 알려 주는 역할 또한 중요한 역할 중의 하나 이었던 만큼, 신종의 크기는 커 질 수 밖에 없었으리라 추측 할 수 있다. 사실 신종의 크기는 높이가 3.663 m, 초대 직경이 2.227 m에 이른다[2].

이렇게 큰 신종은 장대한 크기로 인하여 가질 수 있는 결함을 종의 곡선의 매끄러움과 전체적인 균형으로서 완벽하게 없애는 데 성공하였을 뿐만 아니라, 또한 그 표면에 미려한 장식을 하여 가까운 거리에서 바라보는 종의 아름다움 또한 완벽하도록 하는 완전함을 달성하는 데 성공하였다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 종은 종의 하대로부터 종을 종루에 매어 다는 부분인 용뉴에 이르기 까지 섬세한 문양을 갖고 있다. 즉 종의 하대를 장식하고 있는 연꽃 무늬, 종의 타종 위치, 또 그와 완전히 반대의 위치에 있는 큰 연꽃 무늬의 당좌(타격 점), 당좌를 중심으로 양편에 위치한 비천상, 종의 상부에 정확히 4등분 된 위치에 정교하게 표현한 유곽과 연꽃, 그리고 천판 즉 종의 상판에 자리 잡고 있는 종을 종루에 매어 달고 있는 힘찬 용, 즉 용뉴에 이르면 가히 적절한 수식이 부끄러워질 정도가 된다.

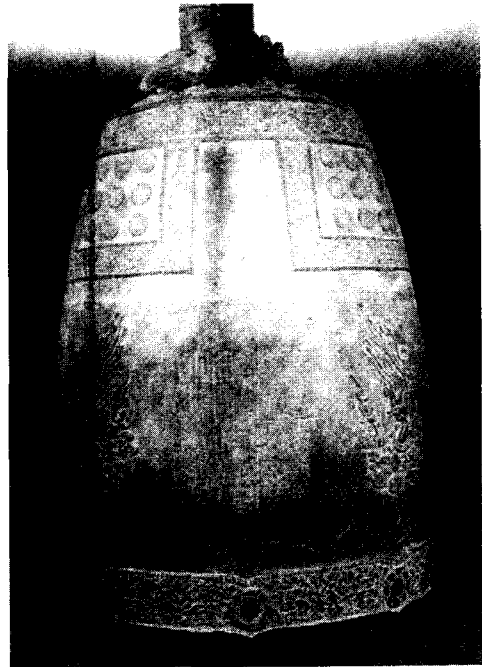


그림 1. 성덕대왕 신종의 사진

이러한 문양은 거대한 종을 주조할 때 동시에 이루어진 것으로 밝혀져 있어 많은 주조 관련 연구자들에게 연구 대상이 되고 있기도 하다. 그러나 종의 이름을 빛내고 많은 사람의 지속적인 사랑을 받게 한 것은 무엇보다도 종의 소리 일 것이다. 길고 긴 여음을 내는 종의 소리는 낮고, 웅장하면서 사람의 마음을 차분하게 하는 것으로 보고되고 있다.

이러한 특성을 갖는 종의 소리는 신종이 갖고 있는 독특한 구조와 연관 지어서 많은 추측 혹은 과학적이 분석이 있어왔다. 종의 구조와 관련한 호기심은 사실상 상당한 과학적 근거가 있는 것으로 밝혀져 있다. 즉 신라와 고려 범종만이 갖고 있는 특징인, 종의 위 부분에

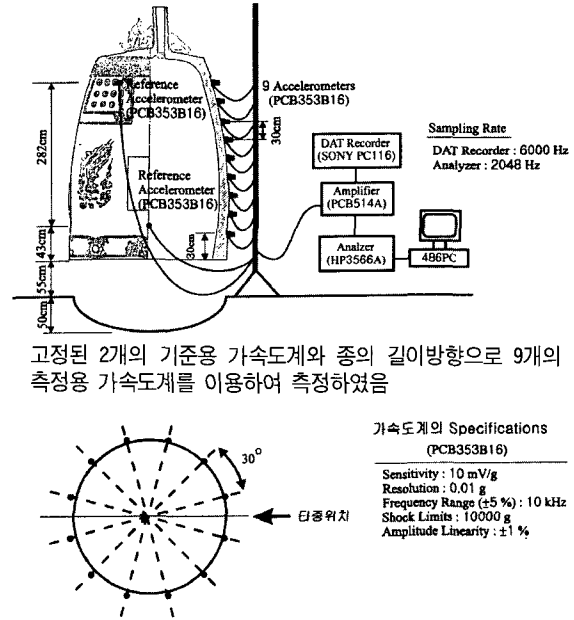
위치한 음관, 그리고 종을 매어단 지표면에 있는 여러 가지 형태의 울림통 등이 그것이다. 통일 신라 시대를 지나 고려 시대로 오면서 음관의 경우는 상당히 그 역할이 가볍게 취급되어 왔다는 추측이 가능한 증거가 많이 발견된다[3]. 즉 고려 시대의 일부 범종은 외면적으로는 음관을 갖고 있으나 사실 그 속은 뚫려져 있지 않고 채워져 있는 형태를 하고 있는 것이 상당 수 있는 것으로 보고 되어 있다. 그러나 이러한 음관의 시대적 쇠퇴가 음관에 대한 음향학자들의 관심까지도 쇠퇴시킬 아무런 이유도 있을 수는 없었다.

지난 90년대까지 일반적으로 알려진 종의 이러한 구조가 종의 소리에 미치는 영향을 정리하여 보면 대체적으로 다음과 같다. 첫째로 종의 소리는 약 63 Hz 근방의 두개의 근접한 주파수에 의한 소위 맥놀이 현상을 갖는 특징을 갖는다[3](후에 64 Hz로 밝혀졌음). 둘째로 음관은 고주파 음을 여과하여 종의 소리를 부드럽게 하는 역할을 한다. 즉 음관은 일종의 고주파 통과 여과기의 역할을 하고 있다고 보았다[3]. 마지막으로 지표면에 움푹 파져 있는 울림통의 역할은 종의 소리를 증폭 시키는 기능을 있다고 보았다[3]. 그러나 맥놀이 현상에 대한 연구를 제외하고는 명확한 과학적 고찰 즉 측정이나 분석 등에 근거한 결론이 라기 보다는 경험과 추측에 근거한 것이었다 해도 과언이 아니다. 이러한 아쉬움은 사실 많은 한국 내 학자들에 의하여 지적되어 왔으나 신종이 박물관에 국보로서 보존되어 있고 종의 오랜 보존을 위하여 타종조차 1993년 이후로 금지되어 있는 상황에서 해결될 수 있는 방법은 없었다.

그러나 1996년 시작된 성덕대왕 신종에 대한 국가적인 차원의 조사 작업은 이러한 모든 것을 해소 시켜 줄 수 있는 기회를 제공하였다. 사실 종의 실제 무게조차 정확하게 그 때까지 알려 진바 없었다. (삼국 유사 및 관련 자료에 의하면 12만근으로 표현되어 있었으나, 이 조사의 일환으로 수행된 실제 무게의 측정으로 18900 kg으로 밝혀 졌음) 이때 조사한 분야는 종의 금속학적 분석, 종의 정확한 치수의 측정, 종의 진동 및 음향 관련 측정으로 크게 나누어 볼 수 있다. 이 중 맨 마지막에 해당되는 부분의 자료가 신종의 소리와 관련된 궁극함을 풀어 주는 열쇠가 됨은 물론이다. 보고는 이 때 조사된 자료 중 종의 진동 및 음향 측정 자료에 근거하여 종의 소리 특성을 정리하고 있다.

II. 성덕대왕 신종의 소리 특성

우선 신종의 소리를 정확하고 충분히 측정하기 위하여 그림 2 및 그림 3에 도시 된 것과 같은 측정 시



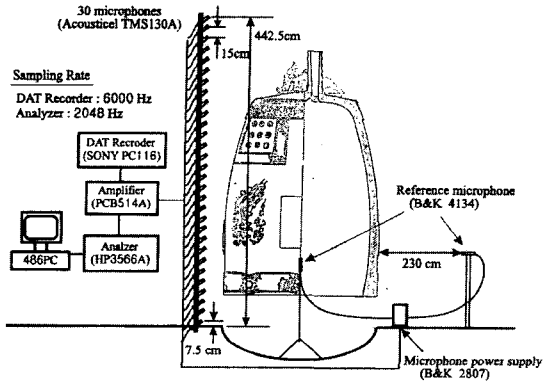
고정된 2개의 기준용 가속도계와 종의 길이방향으로 9개의 측정용 가속도계를 이용하여 측정하였음

종 둘레방향으로의 측정위치 (30도 간격으로 분할하여 돌아가면서 측정하였음)

그림 2. 종의 진동측정을 위한 실험장치 (9개의 가속도계로 이루어진 가속도계 어레이를 종의 둘레방향으로 30도씩 돌아가면서 측정하고, DAT Recorder에 저장함과 동시에 Analyzer로 진동신호를 분석하였음)

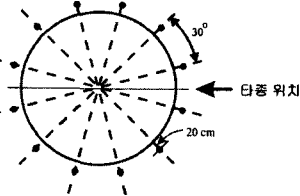
스템이 사용 되었다. 타종 후 종의 진동과 소리가 시간에 따라 어떠한 모양을 갖고 변화하여 가는 지를 상세히 알아 보기 위하여 가능한 많은 수의 측정 점을 확보하고 있는 것이 실험 장치의 특색이다. 종의 원주 각도 별로 30도의 위치 마다, 각각 9개 및 30개의 가속도계와 마이크로폰을 사용하고 있다. 결국 종 표면의 108개의 위치에서 가속도계를 이용한 진동 측정을 하고, 360개의 위치에서 음압을 측정하고 있다. 측정된 신호를 이용하여 진동 모드와 음향 모드를 얻기 위하여 이 실험은 각각 기준 가속도계와 마이크로폰을 두고 있다. (그림 2 및 그림 3 참조)

우선 타종 직후의 진동 신호와 음향 신호를 보도록 하자. 그림 4는 각각 종의 밑에서 43cm 위쪽에 위치한 가속도계와 종의 외부에 위치한 마이크로폰의 신호이다. 처음에는 타봉(대추나무로 만들어 졌으며 길이가 약 18 m 직경이 약 32 cm임)에 의한 가격에 의하여 큰 진폭을 갖는 그러나 지수 함수적으로 감쇠하는 아주 대표적인 선형 진동계의 응답 특성을 보여 주고 있다. 이 신호를 주파수 분석한 결과가 그림 5에 나타나



고정된 2개의 기준용 마이크로폰과 종의 길이방향으로 30개의 측정용 마이크로폰을 이용하여 측정하였음.

종 둘레방향으로의 측정위치 (30도 간격으로 분할하여 돌아가면서 측정하였음)



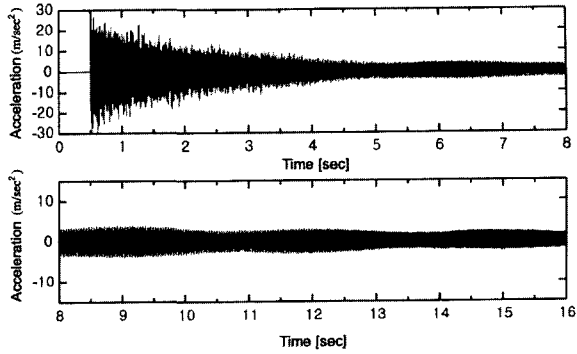
마이크로폰의 Specifications

	Acoustical TMS130A	B & K 4134
Response	Free-field	Random
Sensitivity	125mV/Pa	12.5mV/Pa
Frequency Range(±1dB)	10Hz~10kHz	6Hz~7kHz
Dynamic Range	<140dB	<160dB

그림 3. 종의 음향방사 측정을 위한 실험장치 (30개의 마이크로폰으로 이루어진 마이크로폰 어레이를 종의 둘레방향으로 30도씩 돌아가면서 측정하고, DAT Recorder에 저장함과 동시에 Analyzer로 음향신호를 분석하였음)

있다. 타종 후 시간이 지나면서 변하는 주파수 특성을 보면 고주파 음의 급격한 감쇠가 쉽게 관찰된다. 이것은 일반적으로 구조음에서 발생하는 현상과 일치하고 특별히 새로운 의미를 갖고 있지는 않다. 표 1에는 이러한 주파수별 음의 시간별 감쇠 현상을 보다 잘 나타내고 있다. 348 Hz의 음이 약 52 dB 감쇠하는 동안에 가장 저주파 음은 약 3 dB 에 그치고 있다. 그림 5를 좀더 자세히 관찰하면, 약 8초의 시간이 경과 하면 진동 및 음향 신호 모두에 일종의 맥놀이 현상이 지배적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉 두개의 아주 가까운 주파수를 갖는 진동 및 음향이 종의 특성을 지배하고 있음을 알 수 있다. 소위 맥놀이 주기는 이 경우 약 3초 정도가 됨을 그림을 통하여 알 수 있다. 주목할 또 하나의 사실은 진동의 경우 이러한 현상이 음향의 경우 보다 훨씬 명확하지 않다는 사실이다. 이것은 진

(a) 진동신호: 종의 밑에서 43cm 위쪽에 위치한 기준용 가속도계 신호



(b) 음향신호: 종의 외부에 위치한 기준용 마이크로폰의 신호

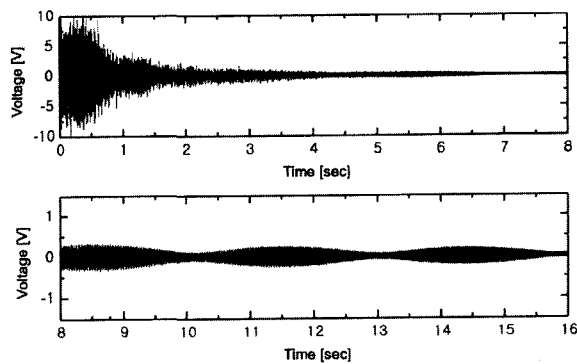
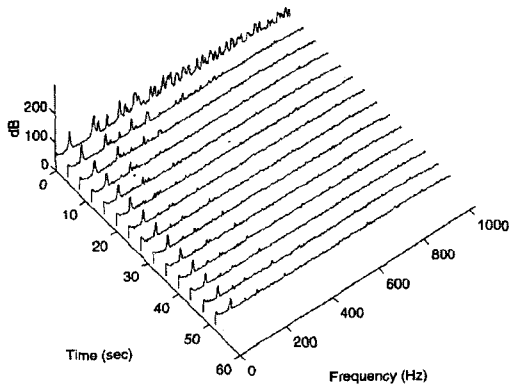


그림 4. 시간에 따른 진동-음향 신호 (sampling rate 2048 Hz, 종의 타격순간에는 큰 신호가 나타나다가 시간이 지나면서 점차 줄어들고 있으며 맥놀이가 발생함을 알 수 있음)

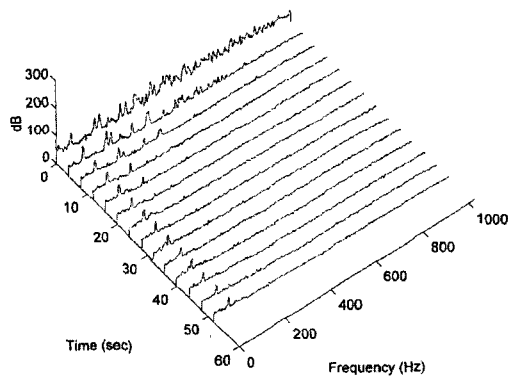
표 1. 시간에 따른 각 고유주파수의 레벨 감소 (Window length: 2초, 단위: dB)

Time(초)	64Hz	168Hz	282Hz	348Hz
0~2	104.4	110.6	104.2	100.6
2~4	104.2	102.0	94.7	89.8
4~6	102.6	87.9	85.7	79.3
6~8	101.4	98.4	76.8	68.7
8~10	101.3	88.6	67.6	58.4
Decay(0~10)	3.1	22.0	36.6	52.2

동 신호에 섞여 있는 고주파 성분이 잘 방사되지 못하기 때문이다. 이 신호를 좀더 면밀히 주파수 분석한 결과가 그림 6에 나타나 있다. 흥미로운 사실은 거의 모든 종의 고유 진동수가 아주 작은 주파수 차이를 갖는 한 쌍의 주파수 형태를 갖고 있다는 사실이다. 종래에



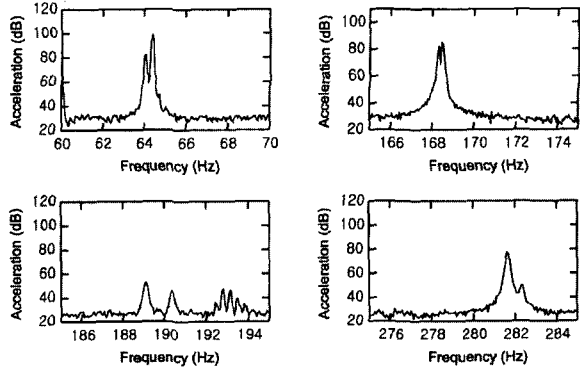
(a) 진동신호: 종의 밑에서 43cm위쪽에 위치한 기준용 가속도계의 신호(Sampling rate 2048Hz)



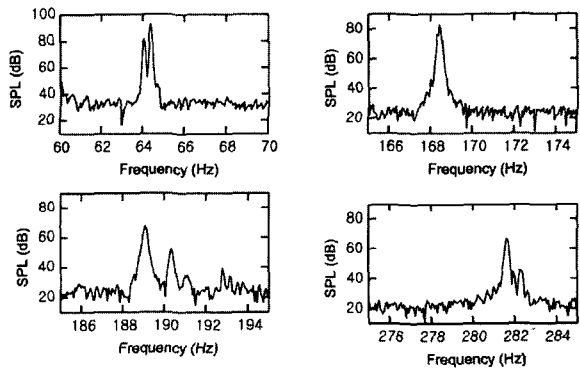
(b) 음향신호: 종의 외부에 위치한 기준용 마이크로폰의 신호(Sampling rate 2048Hz)

그림 5. 시간-주파수에 따른 진동 및 음향신호의 분포 (60초 동안의 신호를 4초씩 분할하여 주파수 해석을 한 것으로, 타종 초기에는 고주파수까지 고루 가진 되었으나 시간이 지나면서 점차로 중-고주파수 대역의 신호는 사라지고 저주파수의 대략 64 Hz와 168 Hz 성분은 오래 지속됨을 알 수 있음)

밝혀졌던 바와는 달리 이러한 현상은 비단 가장 저주파에서만 나타나는 것이 아니라 거의 모든 공진 주파수 영역에서 보편적으로 나타난다는 것이다. 표2는 이러한 결과를 잘 정리 하고 있다. 이러한 현상은 주로 구조물의 비대칭성에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다[45].



(a) 진동신호: 종의 밑에서 43cm위쪽에 위치한 기준용 가속도계 신호



(b) 음향신호: 종의 외부에 위치한 기준용 마이크로폰의 신호

그림 6. 주파수에 따른 진동-음향신호 분포 (sampling rate 2048Hz, 공명주파수가 두개 혹은 그 이상의 갯수로 서로 매우 근접하게 분포해 있는 특이한 형태임)

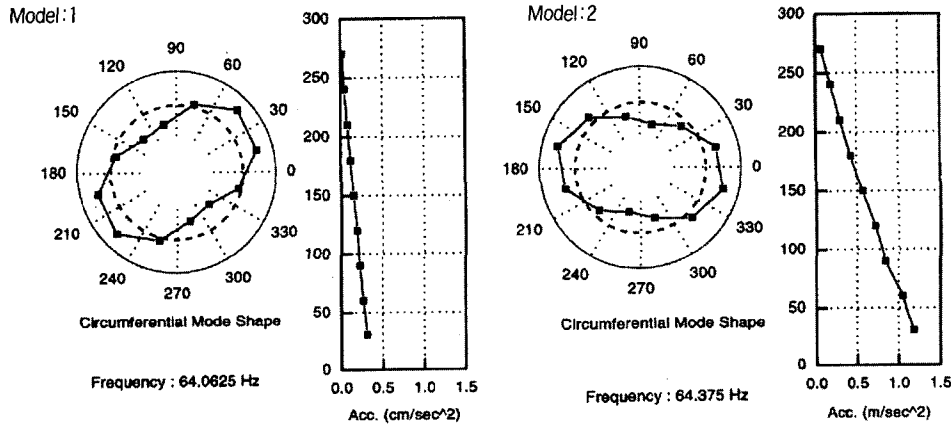
표 2. 각 고유주파수의 맥놀이 주파수 및 각 방향의 모우드수

번호	고유주파수 (Hz)	맥놀이 주파수(Hz)	길이방향 모우드수(m)	원주방향 모우드수(n)
1	64.06	0.32	0	2
2	64.38			
3	168.31	0.13	0	3
4	168.44			
5	189.13	1.125	1	2
6	190.38			
7	281.63	0.68	0	4
8	282.31			
9	345.50	1.44	1	?
10	346.94			
11	348.44	1.00	1	4
12	349.44			
13	352.13	1.06	2	3
14	353.19			

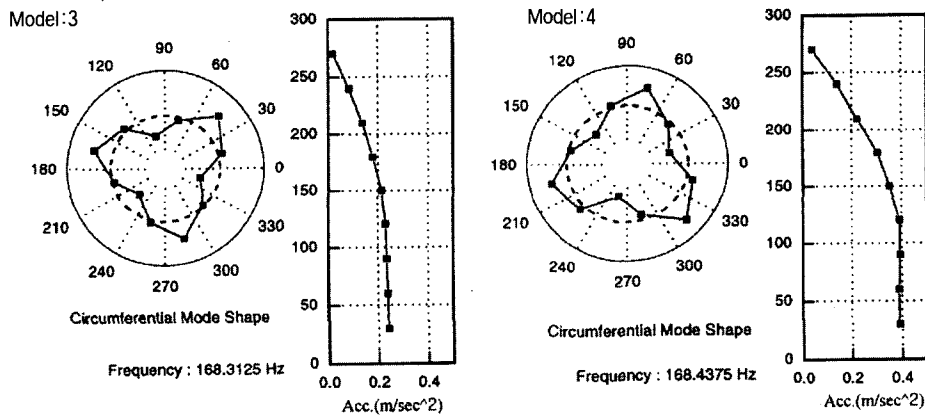
III. 진동과 음향 모드

다음으로 신종의 진동 모양과 음향 전파 모양을 살펴 보기로 한다. 그림 7과 그림 8은 각각 종의 가장 낮은 주파수 두 쌍의 진동 모드와 음향 모드를 보여 주고 있다. 이들은 각각 그림 2와 그림 3에 나타나 있는 측정에 의하여 얻어진 결과이다[6-8]. 흥미로운 사실 중의 하나는 진동 모드가 당좌 즉 타격 점을 중심으로 완전히 대칭의 위치에 있지 않다는 사실이다. 첫번째 고유 진동 모드 쌍의 경우 64.37 Hz에 해당되는 모드가 더욱 많은 가격 에너지(충격 에너지)를 받을 수 있는 상황에 있음을 쉽게 알 수 있다. 이러한 사실은 구체적으로는 길이 방향의 고유 모드의 변위

를 보면 더욱 명확하여 진다. 거의 3배 이상의 변위 차이가 있음을 알 수 있다. 아주 유사한 결과를 그 다음 고유 주파수 인 168.31 Hz와 168.43 Hz의 고유 모드에서도 찾아 볼 수 있다. 이것은 그림 6의 주파수 분포 곡선에서도 일부 관찰된다(첫번째 고유 진동수 쌍). 그림 8은 각각 그림 7의 고유 진동 모드에 해당되는 음향 모드를 표시한다. 그림 9는 각 음향 모드의 시간별 모양의 변화를 보여 주고 있다. 또한 그림 10은 시간의 경과에 따른 음장의 변화를 잘 보여 주고 있다. 여기서 주목할 사실은 앞서 본 진동 및 음향 신호(그림 4)에서 관찰된 특성이 구체적으로 어떻게 음장으로 표현되고 있는가를 볼 수 있다는 사실이다. 즉 타 종 직후에는 아주 복잡한 모양을 가진 소리들이 종에서 형성

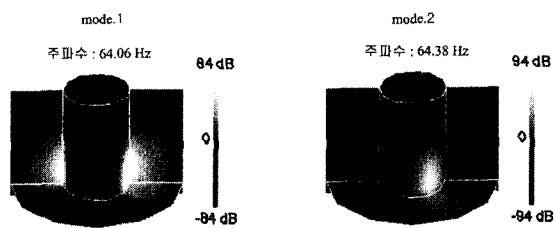


첫번째 모드의 절선(nodal line)은 타종위치에 근접해 있으며, 두번째 모드는 비절선(anti-nodal line)에 근접해 있으며, 종 위치에 노드선이 근접해 있으며 종 길이방향으로의 변위는 같은 위상으로 운동한다.

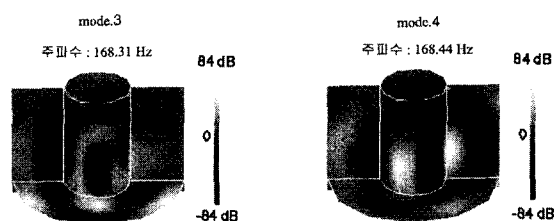


세번째 모드와 네번째 모드는 서로 30도 간격으로 틀어져 있으며, 종 길이방향으로의 변위는 같은 위상으로 운동한다.

그림 7. 종의 고유진동 모드 형상



첫번째 모우드와 두번째 모우드는 원주방향으로 4개의 절선(nodal line)이 형성됨을 알 수 있으며 서로 45도의 간격으로 틀어져 있다.



세번째 모우드와 네번째 모우드는 원주방향으로 6개의 절선(nodal line)이 형성됨을 알 수 있으며 서로 30도의 간격으로 틀어져 있다.

그림 8. 종의 방사 음장 형상

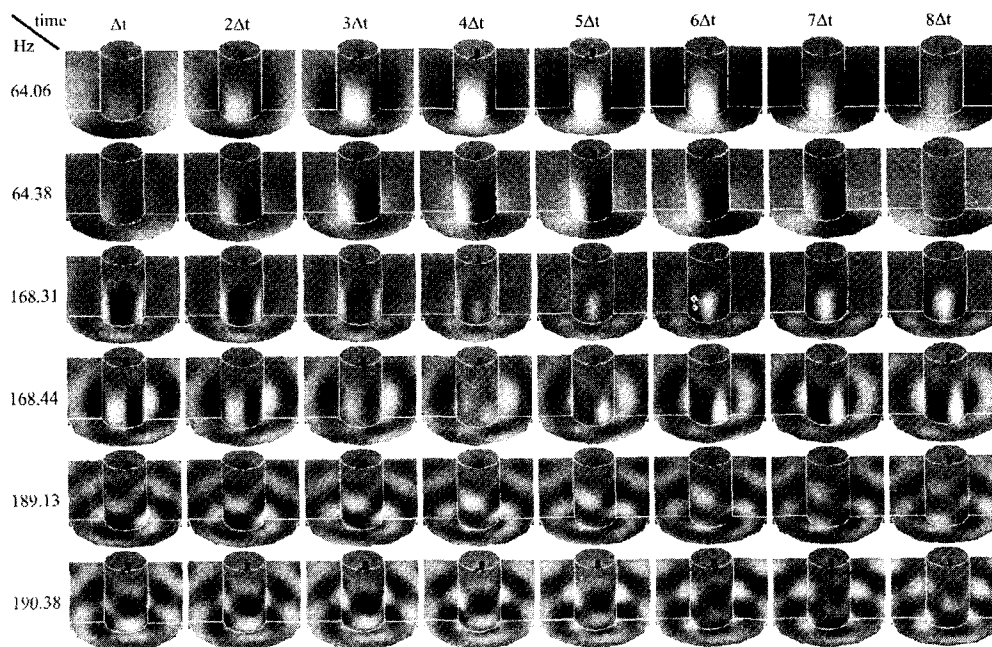


그림 9. 종의 주파수별, 시간별 방사 음장 형상의 변화 (첫째행부터 64.06, 64.38, 168.31, 168.44, 189.13, 190.38 Hz, 시간은 주기의 1/16 간격으로 반주기동안)

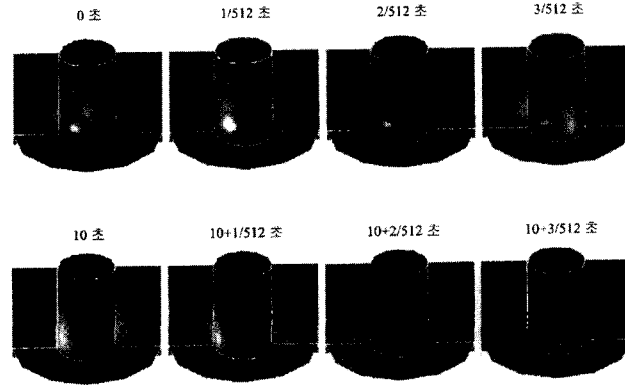


그림 10. 종의 시간에 따른 방사 음장 형상 변화 (첫째행: $t=0$ 초 ~ $3/512$ 초, 둘째행: $t=10$ 초~ $10+3/512$ 초, 시간간격: $1/512$ 초)

되어 전파 하다가 시간이 경과하면서 복잡한 형상의 소리들은 사라지고 아주 단순한 모양을 가진 단 두개의 모우드, 즉 한 쌍의 모우드 만이 맥놀이 현상으로 화답하면서 전파 한다는 사실이다.

IV. 음관의 역할

다음으로 관심 사항은 음관의 특성과 이 음관이 신종의 소리에 미치는 영향에 관한 사항이다. 그림11은 음관의 외부 형상과 대체적인 치수를 나타내고 있다. 재미있는 사실은 이 음관의 형상이 외형적으로는 용이 음관을 싸 안고 있는 형상을 하고 있고 내부적으로는 밑 등치 부분의 직경이 작고 위 부분의 직경이 큰(약 80%) 형태를 하고 있다는 사실이다. 이것은 흔히 음향 임피던스의 급작스러운 불연속을 방지하기 위하여 보편적으로 사용하는 형태를 갖고 있다. 즉 나팔과 같은 형태인 것이다. 마치 종의 내부에 고여 있는 소리를 밖으로 뿜어 내기 위하여 있는 것과 같은 형상인 것이다. 이러한 상상은 그림12를 보면 명쾌하게 이해가 된다. 이것은 음관에 두개의 마이크로폰을 넣어 입사파와 반사파를 측정하고 이를 이용하여 얻어졌다[9]. 전체적인 특성은 고주파 영역의 소리를 비교적 잘 통과시키는 고주파 통과 필터의 특성을 갖고 있음을 쉽게 알 수 있다. 주목할 사실은 종이 가장 오랫동안 내고 있는 주파수인 64 헤르츠 성분은 거의 통과 시키지 않는다는 사실이다. 이러한 음관의 특성은 고주파 음이 아주 약한 방사 효율을 갖고 있는 사실로 미루어 볼 때 반드시 필요한 종의 한 부분이어야 할까 하는 의문을 야기시킬 수도 있으나 비록 종의 전체 면적에 비하여 음관

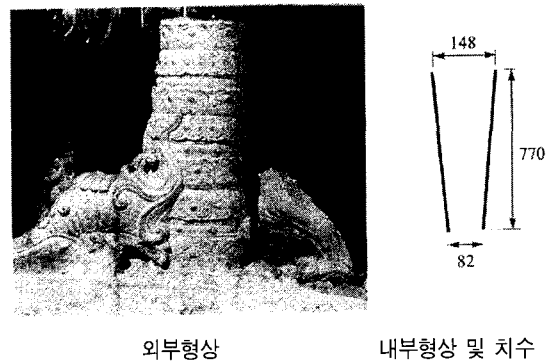


그림 11. 음관의 외부 및 내부의 형상 (단위: mm)

이 차지하는 면적이 극히 작으나, 상당히 정교한 의미의 감쇠기 역할을 하고 있는 것으로 말할 수 있다.

V. 공동의 역할

이제 남은 의문 사항, 즉 성덕대왕 신종을 구성하고 있는 음향학적 요소들이 신종의 소리에 미치는 영향들에 대한 의문 사항 중 남은 것은 종이 달려 있는 곳에 파여 있는 반구형 모양의 공동의 역할이다. 사실 거의 모든 신라 고려, 심지어는 조선 조의 범종까지 여러 가지 형태의 공동 위에 달려있다. 이 영향을 살펴 보기 위하여 그림 13과 같은 실험이 행하여 졌다. 즉 내부 음장을 해석하기 위하여 내부 음장의 고유 모우드와 고유 진동수를 측정하는 것이다.

그림14는 처음 3개의 음장의 고유 모우드와 주파수

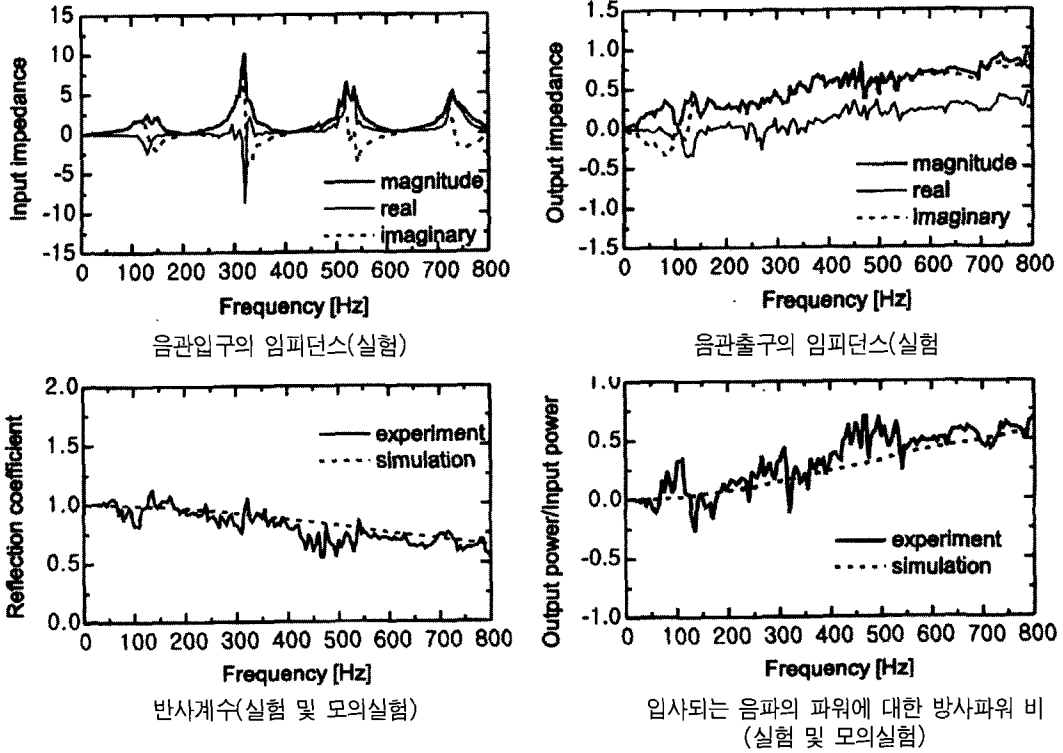
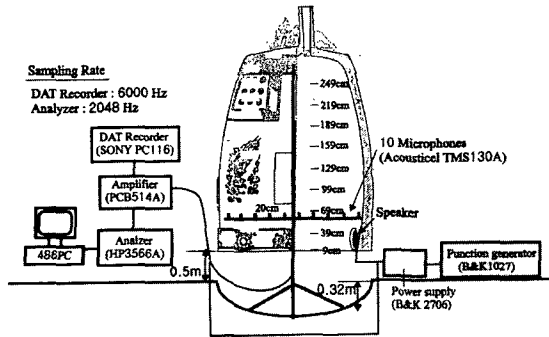


그림 12. 음관특성 규명을 위한 실험결과 (임피던스, 반사계수, 파워비)

를 보여 주고 있다. 주목할 사실은 어떤 고유 주파수도 신종의 고유 주파수와 일치하지 않는다는 사실이다. 이러한 한편으로는 매우 실망스러운 사실은 보편적으로 인정되어 왔던 가설, 즉 공동을 포함한 내부 음장의 고유 진동수가 신종의 최저차 고유 진동수와 같을 것이라는 지금까지의 추측을 부정하는 명백한 증거가 되기 때문이다. 사실 내부 음장의 2번째 고유 진동수는 67 Hz로서 신종의 고유 진동수와는 약 3 Hz의 차이가 있다. 참고문헌 [10]은 이러한 불일치 현상이 발생하는 원인에 대하여 명쾌하게 설명하고 주파수 일치를 위한 새로운 공동의 크기를 제안하고 있다. 이 참고 문헌은 현재의 공동의 부피가 약 35배 정도 커져야 신종의 맥놀이 주파수와 일치하는 내부 음장 주파수를 가질 수 있다고 이야기하고 있다(현재 국립 경주 박물관은 이 제안을 받아 들어 공동의 크기를 증가 시켰음). 이러한 분석은 사실 현재의 신종이 옮겨오기 전 즉 경주 성문에 있을 때의 공동의 크기가 어른이 공동에 들어가 서 있을 경우 가슴 정도의 높이까지 공동의 높이가 되었다는 구전에 일치한다 볼 수 있다[11]. 공동의 고유 주파수와 종의 고유 주파수가 일치할 경우 나타나는 현

상은 맥놀이 주파수의 방사 음향 파워의 약간의 증가를 기대할 수 있다. 그러나 실제의 경우, 즉 느껴지는 소리는 매우 다르다. 즉 경주 성문에 신종이 있었을 때에 녹취된 소리와 현 위치 즉 경주 국립 박물관의 위치에서 타종하여 녹취한 경우의 소리는 현격한 차이가 있음을 누구나 느낄 수 있다[12]. 공동이 큰 경우가 훨씬 웅장하고 힘있는 소리를 낸다. 결론적으로 보면 공동의 역할은 신종의 증폭기 역할을 한다고 볼 수 있다. 재미 있는 사실은 이러한 역할을 하는 공동은 거의 모두가 상당히 쉽게 그 형태를 바꿀 수 있는 재료로 만들어져 있다는 사실이다. 현재의 신종이 있는 국립 경주 박물관의 경우에는 일종의 벽돌로서 바닥을 하고 있으나, 신종이 경주 성문에 위치 하였을 때는 백토로서 공동의 표면이 발라져 있었다 한다(많은 작은 범종의 경우 항아리 등으로 도공을 대신하거나 단순히 종이 달린 마루를 뚫어 공동을 대신하기도 한다). 이것은 공동의 크기를 종을 매어단 연후에 시행 착오를 통하여 맞추어 갔던 것을 강력히 시사한다.

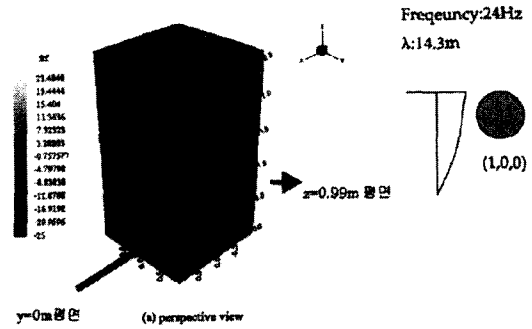
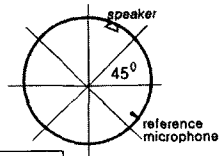
마지막으로 중요한 종의 요소 중의 하나는 종과, 즉 종의 하단과 지표면 사이의 거리와 관계된 종의 소리



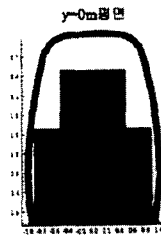
종 내부의 음향특성 파악을 위한 실험장치(신호발생기에서 만들어진 백색잡음을 기준신호로 하여 스피커를 가진시키고, 10개의 측정용 마이크로폰으로 구성된 마이크로폰 어레이를 이용하여 종의 길이방향으로 9지점의 평면상에서 측정하였음)

마이크로폰의 Specifications

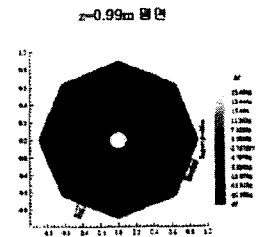
Acoustical TMS130A	
Response	Free-field
Sensitivity	125nV/Pa
Frequency Range(±1dB)	10Hz~10kHz
Dynamic Range	<140dB



(a) perspective view



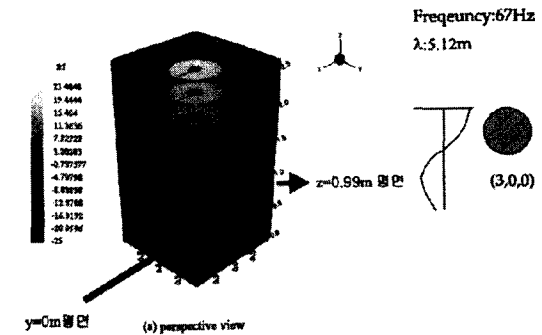
(b) longitudinal view



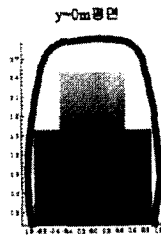
(c) z=0.99m

그림 13. 종의 내부음장 측정을 위한 실험장치 (스피커를 이용하여 종 내부에 백색잡음을 발생시킨 후 10개의 마이크로폰으로 이루어진 마이크로폰 어레이를 종 내부에서 45도 간격으로 회전시키면서 높이방향으로 9개의 평면상의 음압분포를 측정하여, DAT Recorder에 저장함과 동시에 Analyzer로 음향신호를 분석하였음)

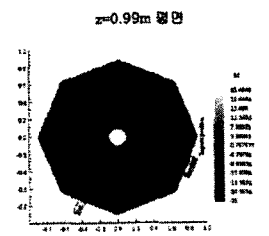
특성이다. 공동의 역할이 맥놀이 주파수에 해당되는 종의 소리를 오래 지속 되도록 돕는 역할이므로 이런 관점에서 이 거리를 분석할 필요가 있다. 64 Hz에 해당되는 음파의 파장은 약 5 m 이상이므로 현재의 거리 0.5 m는 사실 큰 영향이 없으리라 생각 할 수도 있다. 그러나 주의해야 할 점은 이 거리가 내부 음장의 고유 주파수를 결정하는 경계 조건의 임피던스를 변화시킬 수 있다는 점이다. 이 보다 더욱 중요한 관점은 종의 내부 음장의 고유 진동수와 종의 최저차 맥놀이 주파수가 일치할 이루어 그 소리를 가능하면 오랫동안 유지하는 것이 공동을 포함한 내부 음장의 궁극적인 목적이라는 점을 상기하면 이 거리는 불필요할 것이다. 왜냐하면 이 주파수에서 이 거리는 다만 이 주파수에 해당하는 음파의 감쇠를 더해 주는 기능 이외의 것은 없으므로. 따라서 현재의 성덕대왕 신종은 훨씬 더 내려 달아야 할 것이다.



(a) perspective view



(b) longitudinal view



(c) z=0.99m

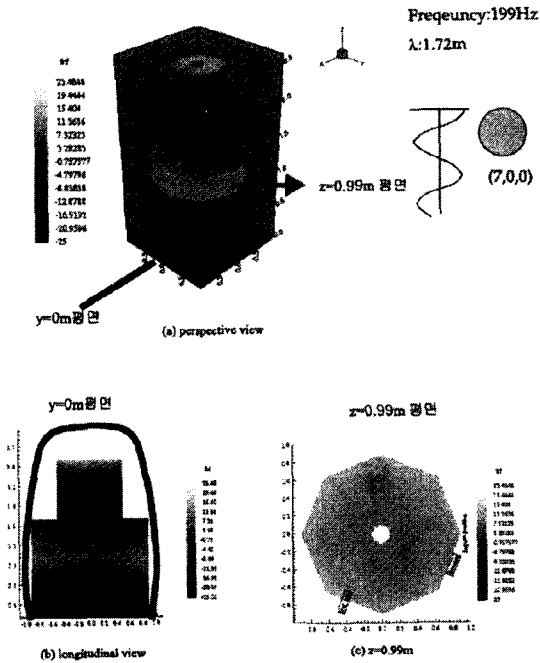


그림 14. 3개의 주파수 성분(24, 67, 199 Hz)에서의 내부 음장의 3차원 음장 분포도. 기준 마이크로폰에 대한 주파수 응답함수(FRF)를 나타내었으며 값 자체는 의미가 없음.

VI. 마치는 말

지금부터 1227년 전에 만들어진 거대하고 아름다운 신종에 대한 분석을 수많은 실측 데이터를 이용하여 일차 완료 하였다. 아쉬운 점은 이 종의 소리를 결국은 분석하여, 즉 많은 한국 사람들이, 불교를 믿는 사람이던, 그렇지 않은 사람이던, 이 종의 소리를 사랑하는 이유를 밝히지는 못하였다는 것이다. 우리는 다만 현대 과학이 허락한 많은 그리고 정교한 측정을 통하여 그동안 신비의 베일에 가려져 있던 신종의 구체적인 진동 및 음향 특성을 정확하게 분석하고 볼 수 있었다는 데에 만족해야 한다고 본다. 특히 많은 논란이 있었던 음관, 그리고 공동의 역할을 규명할 수 있었던 것은 이 조사의 큰 수확이라 생각한다. 또한 빼놓을 수 없는 것

은 종의 모든 고유 주파수가 각각 쌍을 이루어 분포하고 있다는 사실과, 이들의 진동, 음향 모양이 각각 타격점을 중심으로 약간의 비대칭성을 허락한 상태로 분포되어 있다는 사실이다. 완벽한 대칭을 추구함 보다는 약간의 비대칭성을 궁극적으로 포용하고 종의 특성으로 소화하면서 음관을 이용한 고도의 음의 정제를 꾀하고, 공동을 이용하여 최종적으로 원하는 정도의 증폭을 공동의 크기를 조절하여 맞추어 간 선조의 슬기와 과학적 접근을 통한 종의 숨결까지를 다스리려 한 깊은 생각 앞에 머리가 숙여질 따름이다.

참고 문헌

1. 강우방, "성덕대왕신종의 미술사적 위치", 제2회 우리의 종 세계의 종 성덕대왕신종 국제학술대회, pp. 15~20, 1996.
2. 염영하, "한국 범종에 관한 연구(제 7절 봉덕사종)", 한국범종연구회지 (범종), No. 6, pp. 1~34, 1983.
3. 염영하, 한국의 종, 서울대학교출판부, 1994.
4. Y.-H. Yum, J. M. Lee, and S. H. Kim, A study on the vibration and sound of bells with slight asymmetry, Proceedings 4th International Modal Analysis Conference, L.A., U.S.A., pp. 75~80, 1986.
5. 이정무, 전성하, 김석현, 염영하, "한국종의 진동특성에 관한 연구(1)", 대한기계학회논문집, 제13권, 제3호, pp. 397~403, 1989.
6. 김양한, "음향 진동 측정을 통한 성덕대왕 신종의 소리 특성 탐구", 한국음향학회지, 제16권, 제8호, pp. 20~27, 1997.
7. 김양한, 박연규, 김영기, "성덕대왕 신종의 3차원 진동 신호 측정 및 분석 결과", 한국음향학회지, 제16권, 제6호, pp. 41~47, 1997.
8. 김양한, 김시문, "원통형 음향 홀로그래피를 이용한 성덕대왕 신종의 방사음장 특성 분석", 한국음향학회지, 제16권, 제4호, pp. 94~100, 1997.
9. 윤두병, 김양한, "실험적 분석을 통하여 본 성덕대왕 신종 음통의 음향학적 특성", 한국음향학회지, 제16권, 제6호, pp. 19~24, 1997.
10. 김양한, 박순홍, 김시문, "성덕대왕 신종 내부 음장 및 울림통이 신종의 소리에 미치는 영향과 새로운 울림통 크기의 제안", 한국음향학회지, 제16권, 제5호, pp.60-67, 1997.
11. 김벌래 씨의 증언에 의함.
12. 김벌래 씨가 녹취한 두가지 테이프.

필자소개



김 양 한

- 1978. 서울대학교 공과대학 졸업
- 1984. MIT 졸업(공학박사)
- 현재 한국과학기술원 조교수, 부교수, 정교수