

헬리컬 코일 스프링 잔향기의 디지털 필터 모델

Digital Filter Model for Analog Helical Coil Spring Reverberator

박 준*, 전 상 배**, 이 종 훈*, 성 광 모**, 송 상 섭*

(Joon Park*, Sang-Bae Chon**, Jong-Hoon Lee*, Koeng-Mo Sung**, Sang-Seob Song*)

*전북대학교 전자정보공학부, **서울대학교 전기컴퓨터공학부

(접수일자: 2006년 7월 24일; 수정일자: 2006년 8월 14일; 채택일자: 2006년 8월 16일)

본 논문에서는 기타 앰프에 사용되는 아날로그 헬리컬 스프링 잔향기를 디지털 필터로 모델링하는 기법에 대하여 소개한다. 기존의 디지털 잔향기들이 실내 음향 기반의 음장모드를 제공하는데 비하여, 본래의 헬리컬 스프링 잔향기 자체에 대한 분석과 모델링이 없이 아직도 실질적으로 기타앰프의 70~80% 정도가 헬리컬 잔향기를 사용하기에, 실내 음향학적 접근이 아닌 헬리컬 스프링 잔향기 자체를 하나의 이펙터로 간주하고 이를 모델링하는데에 초점을 두고 연구를 진행하였다. 제안된 알고리즘으로 구현한 디지털 필터로 시뮬레이션을 수행하여 청취평가를 수행한 결과, 기존의 아날로그 헬리컬 스프링 잔향기와 인지적으로 구분할 수 없는 매우 유사한 특성을 나타내는 것을 확인하였다.

핵심용어: 헬리컬 코일 스프링형 잔향기, 잔향시간

투고분야: 전기음향분야 (3.1)

This paper proposes a new Digital Reverberator that models Analog Helical Coil Spring Reverberator for guitar amplifiers. While the conventional digital reverberators are proposed to provide better sound field mainly based on room acoustics, no algorithm or analysis of digital reverberators those model Helical Coil Spring Reverberator was proposed. Considering the fact that approximately 70~80 percent of guitar amplifiers are still with Helical Coil Spring Reverberator, research was performed based not on Room Acoustics but on Helical Coil Spring Reverberator itself as an effector. After performing simulations with proposed algorithm, it was confirmed that the Digital Reverberator by proposed algorithm provides perceptually equivalent response to the conventional Analog Helical Coil Spring Reverberators.

Key words: Helical coil spring reverberator, Reverberation time

ASK subject classification: Electro-Acoustic (3.1)

1. 서 론

1935년에 Laurens Hammond에 의해 개발된 스프링 잔향기 [1]는 처음으로 하몬드 오르간을 통하여 소개되었다. 많은 사람들에게 교회나 극장에서 들을 수 있는 전통적인 파이프 오르간의 음향을 각 가정에서 느낄 수 있도록 스프링을 이용하여 인공적인 잔향을 첨가하는 이 기법은 최초의 잔향 모델이었다. 이후 계속된 개발로 1960년에 하몬드 사의 알란 영 (Alan Young)은 목걸이 형태의 스프링 잔향기 (Necklace Reverberation Unit)를 개발하였는데 [2], 이 장치는 스프링이 한쪽 끝에서

수평으로 다른 한쪽 끝에 까지 걸쳐있는 구조로 되어 있었으며, 경박단소하고 자연음에 가깝도록 성능이 향상되어 라디오나 큰 오디오 장비에도 사용하기 시작하여 지금까지 계속 개발 사용되어 오고 있다.

1980년대 이후 반도체의 발달과 더불어 컴퓨터의 CPU의 급속한 성능 향상과 DSP (Digital Signal Processor)기술이 날로 발달함에 따라, 오디오 데이터의 실시간 처리가 가능해졌고 많은 하드웨어들이 소프트웨어적으로 전환되면서 대부분의 믹싱 콘솔 등에 여러 기능을 혼합한 음향효과 (Sound Effect) 기능이 계속 개발되어 오고 있다. 이러한 끊임없는 디지털 음향효과 장치의 개발은 잔향기 분야에서도 진행되었으나, 대부분의 디지털 잔향기들이 협소한 공간적인 제약을 개선하고자 하는 방향에서 진행되어 주로 오디오 기기에 음장 모드

책임저자: 박 준 (jjjunny@hotmail.com)
561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14
전북대학교 대학원 전자공학과 7호관 309호
(전화: 063-251-2413)

기능으로서 사용되어왔다. 이에 여전히 많은 전자 악기, 특히 기타 앰프에는 꾸준히 스프링 잔향기가 사용되고 있는데, 본 논문에서는 이러한 스프링 잔향기를 음장적인 측면이 아닌 그 고유의 음색에 초점을 두고 디지털 필터를 통하여 구현하는 방법을 소개한다.

II. 스프링 잔향기

2.1. 잔향 시간 (Reverberation Time : RT)

잔향의 효과는 잔향시간에 주로 관계되는데, 만일 어떤 충격음이 방에서 발생하였을 때, 대표적인 시간의 응답을 보면 그림 1과 같이 나타난다. 이 시간응답은 잔향 효과로 나타내며, 크게 두 가지로 구성된 잔향의 개념을 생각할 수 있다. 첫 번째는 초기반향 (Early Reflection) [3,4]이라고 정의한 반향음을 들을 수가 있는데, 이 반향음은 처음에 발생했던 음과 이 음이 원인이 되어 주위 공간에서 반사되어 시간이 지연되어서 도달한다. 이 지연시간 (Delay Time)은 청취자로 하여금 청취공간의 전체적인 방의 크기의 개념을 느끼게 한다.

다음에 이 지연된 반사파는 청취공간에서 여러 번 반복되면서 각각의 지연음이 겹치면서 증가된다. 이 지연 반향음의 섞임은 클러터 (Clutter)라고 부르며 계속적으로 지연되면서 구성된 음장내로 스며들어간다. 이 현상으로 나타난 효과는 방이나 청취자의 주위의 조건에 따라 그 방의 음색 (Color)이나 잔향감 (Liveness)을 느끼게 한다.

따라서 이상과 같이 초기반향과 감쇠시간을 합한 길이를 소위 잔향시간 (Reverberation Time : RT) [3,4]이라 하며 초기 발생음이 60dB까지 감소했을 때의 시간을 말하며 약자로 RT60이라고 한다. 이때 잔향 감쇠 곡선이 60dB까지 감쇠되지 않을 때에는 30dB 감쇠된 시간을 구하여 2배로 한다.

2.2. 스프링 잔향기의 구조

그림 2는 일반적인 스프링 잔향기 [1]의 구조를 나타낸 것이다. 입력된 전기신호 $x(t)$ 는 Electro-Mechanical Transducer(EMT)를 통하여 기계신호로 변환되어 코일에 전달된다. 스프링 잔향기에는 일반적으로 2개~6개의 코일이 사용되는데, 각각의 코일에 전달된 물리적인 신호는 코일의 진동과 스프링의 특성에 의하여 결정되는 지연 시간차 (τ_1, τ_2 등)를 두고 스프링 자체의 전달함수 ($h_1(t),$

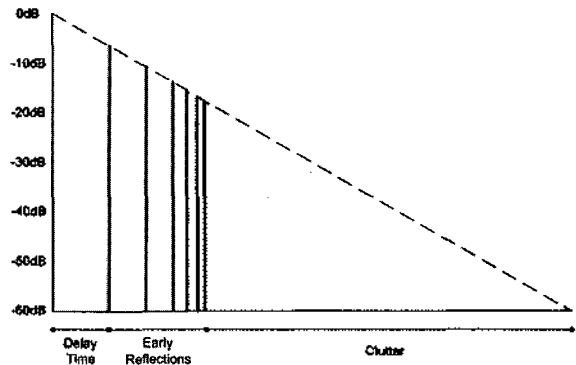


그림 1. 대표적인 잔향감쇠곡선
Fig. 1. Typical Curve of Decay Time RT60.

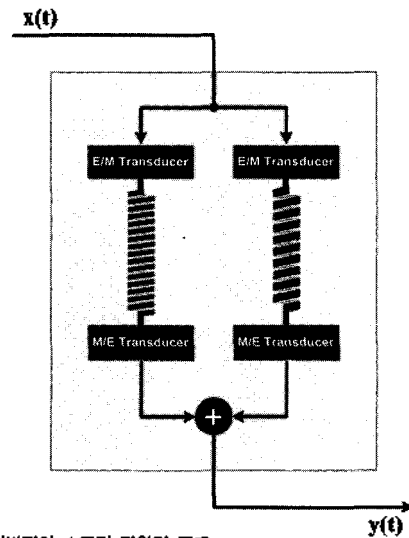


그림 2. 일반적인 스프링 잔향기 구조
Fig. 2. Generic Spring Reverberator.

$h_2(t)$ 등)를 거쳐 Mechanical - Electro Transducer (MET)를 통하여 다시 전기신호로 바뀌게 된다. 스프링이 양쪽 트랜스듀서간에서 진동하면서 인위적으로 초기반향과 계속되는 잔향을 만들어내고 이러한 시간차를 둔 음성분에 의하여 잔향을 느낄 수 있게 된다.

III. 스프링 잔향기의 모델링

3.1. 개요

Laurens Hammond에 의하여 고안된 스프링 잔향기는 본래 Hammond Organ에서 사용되었던 것으로 파이프 오르간의 웅장한 음장을 제공하기 위하여 설계된 것이나 [1], 본 논문에서는 스프링 잔향기의 목적을 웅장한 음장에 두지 않고, 기타 이펙터로서 지연된 신호음을 제공하여 그 잔향이 음을 더 풍부하고 부드럽게 하는 부분에 둔다. 이는 실내음향에서의 인공 잔향기가 한정된 공

간에서 부족한 잔향을 보강하여 현장감있는 음을 제공하려는 목적과도 다르게, 음색을 변조시켜 다른 음색을 지닌 다른 하나의 악기처럼 사용하고자 하는 데에 그 목적이 있다. 따라서, 스프링 잔향기의 특성에 따른 효과를 분석하고자 하지 않고, 주어진 스프링 잔향기를 그대로 디지털로 구현하는 부분에 초점을 두고 접근하여 본 연구를 진행하였다.

3.2. 스프링의 반사계수 모델링

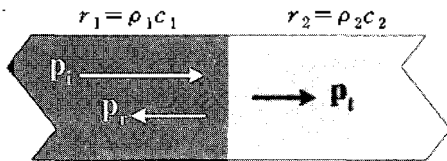


그림 3. 파동의 반사와 투과
Fig. 3. Reflection and Transmission.

그림 3과 같이 물리적인 파동 (예: 음파, 스프링의 진동 등)이 한 매체에서 다른 매체로 전파되는 경우, 이에 대한 반사 계수 (Reflection Coefficient)는 식 (1)과 식 (2)와 같이 정의된다. [4]

$$R = \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} \quad (1)$$

$$T = \frac{2r_2}{r_2 + r_1} \quad (2)$$

스프링 잔향기의 경우, 스프링의 임피던스 (r_1)가 대기의 임피던스 (r_2)에 비하여 충분히 크기 때문에 ($r_1 \gg r_2$) 위의 식 (1)과 식 (2)는 식 (3)과 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$R = \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} \approx -1 \quad (3)$$

$$T = \frac{2r_2}{r_2 + r_1} \approx 0 \quad (4)$$

따라서, 스프링 잔향기의 경우에 스프링 양 끝단에서 전반사가 일어난다는 모델링이 가능하다.

3.3. 스프링의 반사 프로세스 모델링

앞에서 살펴본 바와 같이 스프링의 진동시 파동은 양 끝단에서 전반사가 일어난다고 가정하면, 그림 4와 같이 반사음들이 진행된다고 볼 수 있다. 그림 4는 k번째 스프링에 의한 반사 흐름을 나타내는데 입력신호 $x(t)$ 가

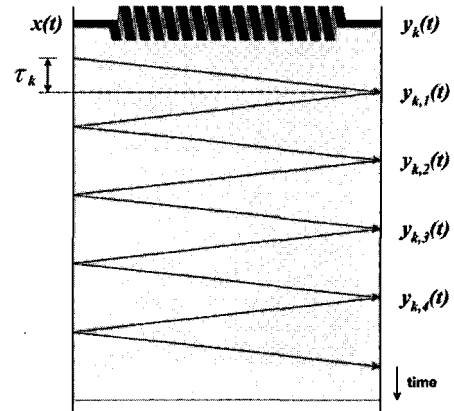


그림 4. 반사음 시나리오
Fig. 4. Reflection Scenario.

들어올 경우 처음에 스프링에 의하여 전달된 신호를 $y_{k,1}(t)$ 라 하면 출력단에서 전반사가 일어나는 성분이 다시 입력단 방향으로 파동을 전달시키고, 이는 입력단에서 다시 반사되어 출력단에 $y_{k,2}(t)$ 성분을 만들어낸다. 즉, 전체 N개의 스프링 중, k번째 스프링의 l번째 출력을 $y_{k,l}$ 이라 하고, 그 전달함수를 $h_{k,l}$, 지연 시간을 $\tau_{k,l}$ 이라 하면, 잔향기의 출력 $y(t)$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \sum_{k=1}^N y_k(t), \quad (5)$$

where $y_k(t) = \sum_{l=1}^{\infty} h_{k,l}(t) * x(t - \tau_{k,l})$

* : Convolution Operator

여기에서, $h_k(t) = h_{k,1}(t)$ 라 하면, k번째 스프링의 l번째 반사음에 대한 전달함수와 지연 시간은 식 (6), 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$h_{k,2}(t) = h_k(t) * h_k(t) * h_k(t)$$

$$h_{k,3}(t) = h_k(t) * h_k(t) * h_k(t) * h_k(t) * h_k(t)$$

$$h_{k,l}(t) = h_k(t) * \dots * h_k(t) \quad (6)$$

$$\tau_{k,l} = (2 \times l - 1) \tau_k \quad (7)$$

결론적으로, 식 (6)은 $h_{k,l}(t)$ 가 $h_k(t)$ 를 $2 \times l - 1$ 번의 Convolution을 취한 형태로 표현될 수 있다. 이를 블록도로 나타내면 k번째 스프링에 의한 잔향은 그림 5와 같이 표현할 수 있고, 스프링 잔향기 전체의 블록도는 그림 6과 같이 표현할 수 있다.

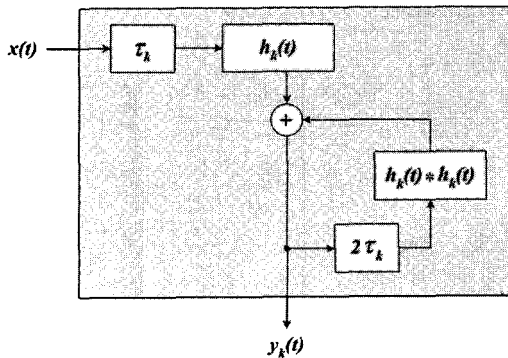


그림 5. 잔향 필터
Fig. 5. Reverberation Filter.

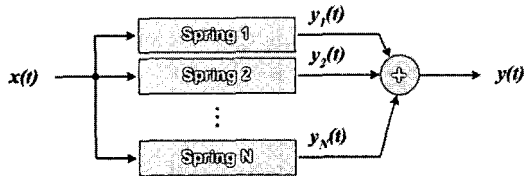


그림 6. N개의 스프링을 모델링한 잔향 필터뱅크
Fig. 6. Reverberation Filterbank for N Springs.

IV. 실험

4.1. 실험 개요

제안하는 모델링에 대한 검증에 대한 실험을 진행하였다. 스프링간의 진동에 Crosstalk이 없고, EMT와 MET에 의한 손실은 없다는 가정하에, 각각의 스프링의 전달 함수를 구하여 그림 6의 형태로 모델링하여 실험하였다. 실제 스프링 잔향기의 출력음과 제안하는 모델링 방법에 의하여 구현한 잔향기의 출력음을 비교하기 위하여 본 실험이 실행되었다.

스프링의 전달함수는 Swept-Sine Algorithm [5]을 이용하여 측정하였다. 그림 7은 Swept-Sine Algorithm으로 전달함수를 측정하는 흐름을 나타낸 것이다. Sine Sweep은 Adobe Audition을 사용하여 10초간 22Hz에서 22kHz까지 Log Sweep 방식으로 구현되었다. 구현된 Sweep은 D/A Converter (MOTU Traveler)를 통하여 Analog 신호로 바뀌었고, 이 신호가 스프링을 진동시키기에 충분치 않아 Mixer (Mackie 1604-VLZ 16 Channel)를 통하여 증폭시켜 2개의 스프링으로

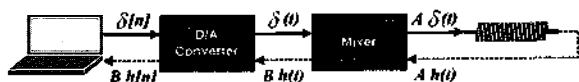


그림 7. 전달함수 측정
Fig. 7. Measuring Transfer Function.

구성된 스프링 잔향기 (BELTON BSN-1)에 인가되었다. 잔향기에서 나온 출력이 작아 다시 믹서에서 증폭시켜 A/D Converter를 거친 후 Adobe Audition을 통하여 녹음되었다.

4.2. 측정 결과

실험을 통하여 측정된 두 스프링의 전달함수는 그림 8과 같이 나타났다. 세 개의 파형 중 상단의 두 파형은 스프링 1과 스프링 2의 전달함수이고, 하단의 파형은 두 스프링 모두를 사용하였을 경우의 응답이다. 측정 결과가 다시 믹서에서 증폭되어 A/D Converter를 거친 후 Adobe Audition을 통하여 녹음되었다. 측정 결과 τ_1 과 τ_2 는 각각 22[msec], 27[msec]으로 나타났고, 반사 이전의 전달함수 $h_1(t)$ 와 $h_2(t)$ 는 각각 그림 9와 같다. 처음 반사된 성분인 $h_{1,2}(t)$ 와 $h_{2,2}(t)$ 는 그림 10의 상단 두 그림과 같고, 이들의 합은 그림 10의 세 번째 파형과 같으며 실제로 측정된 스프링 자체의 파형은 그림 10의 네 번째 파형과 같이 나타났다. 그림 10에서 나타나듯, 약간의 왜곡은 있으나 모델링에 의하여 구현된 잔향기의 $h_{1,2}(t) + h_{2,2}(t)$ 는 실제 잔향기로부터 측정된 $\hat{h}_{rev}(t)$ 와 상당히 유사함을 알 수 있다.

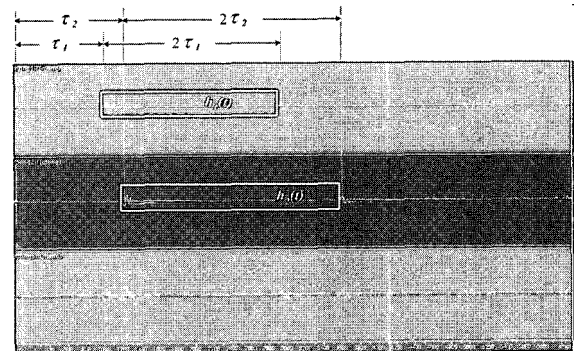


그림 8. 측정된 스프링 잔향기의 전달함수
Fig. 8. Transfer Function of Measured Spring Reverberator.

4.3. 청취 평가

스프링 잔향기의 모델링을 통하여 구현한 인공 잔향기와 스프링 잔향기를 비교하기 위하여 청취평가를 진행하였다. 청취평가에는 12명이 동원되었고, 그 중 5명은 예전에 유사한 청취평가의 경험이 있었으며, 8명은 전기기타 연주에 익숙한 사람이었다.

전기기타로부터 직접 녹음한 무향인 각기 특성이 다른 세 종류의 음원 (음원 1, 음원 2, 음원 3)을 동일 모델의 3개의 스프링 잔향기 (스프링 A, 스프링 B, 스프링 C)에

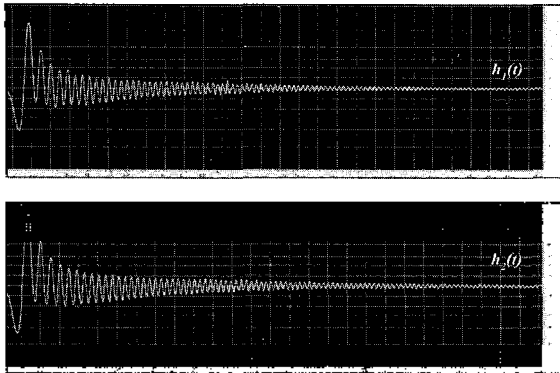


그림 9. 측정된 두 스프링의 전달함수 $h_1(t)$ 와 $h_2(t)$
 Fig. 9. Transfer Function $h_1(t)$ and $h_2(t)$ of Measured Spring Reverberator.

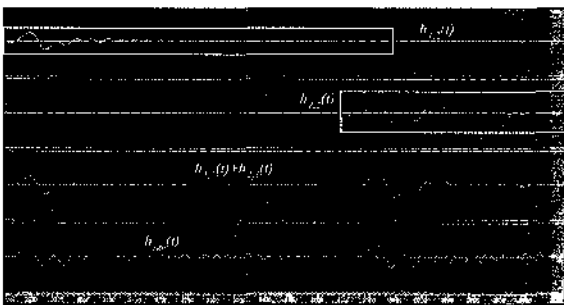


그림 10. 측정된 아날로그 스프링 잔향기의 전달함수 ($h_{rec}(t)$)와 디지털 필터 잔향기의 전달함수 ($h_{1,2}(t) + h_{2,2}(t)$)
 Fig. 10. Measured Transfer Function ($h_{rec}(t)$) of Analog Spring Reverberator and Simulated Transfer Function ($h_{1,2}(t) + h_{2,2}(t)$) of Digital Filter Reverberator.

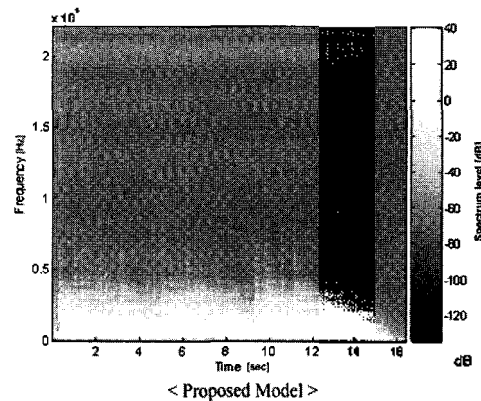
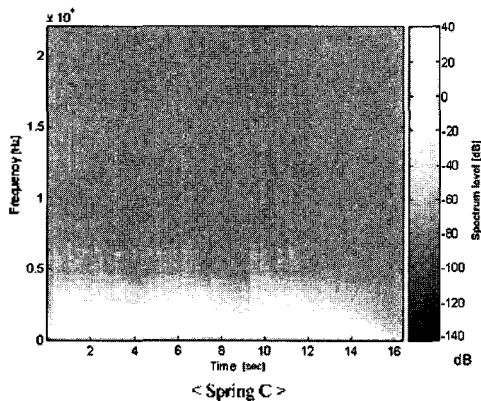
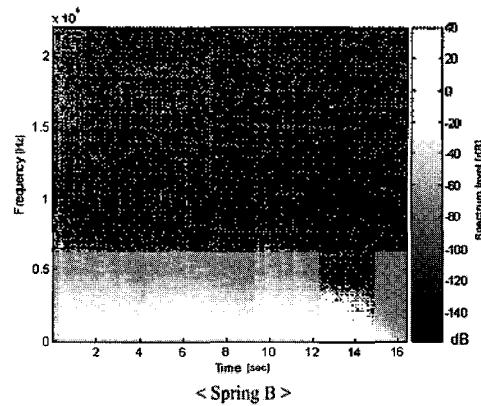
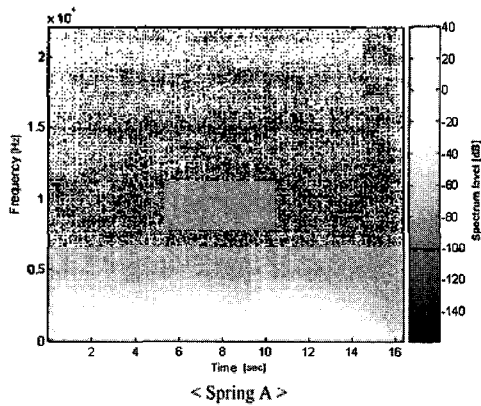


그림 11. 음원 1을 통과시킨 잔향 신호의 스펙트로그램
 Fig. 11. Spectrogram of Reverberated Signal of Sound Source 1.

표 1. 청취평가 결과

Table 1. Result of Listening Test.

	음원 1	음원 2	음원 3
스프링 A	2	3	2
스프링 B	4	4	4
스프링 C	4	2	3
제안 모델	2	3	3

입력한 후 출력 결과를 녹음한 음원들과 제안된 디지털 필터 (제안 모델)를 통하여 합성된 음을 비교하였다. 이때, 그림 5의 피드백을 무한히 사용할 수 없어 RT60에 해당하는 3초까지 적용시켰다. 여기에서 Gain의 감쇠 비율은 전달함수인 $h_k(t)$ 에 포함시켜 RT60에 해당하는 시간을 얻을 수 있었다.

청취평가는 4개의 각기 다른 잔향을 포함한 소리들을 Multiple Stimulus [6]하게 청취해가며 가장 유사하지 않은 하나를 찾는 과정으로 진행되었다. 본 청취평가의 결과는 표 1과 같다. 음원 1의 경우 12명의 청취평가자들 중 2명이 스프링 A를, 4명이 스프링 B를, 4명이 스프링 C를, 2명이 제안한 모델을 통과시킨 음색이 나머지 잔향 신호와 다르다고 판단하였다.

청취평가 결과가 보여주듯, 청취자는 스프링 B의 경우가 가장 다르다는 판단을 하였고, 이는 같은 규격으로

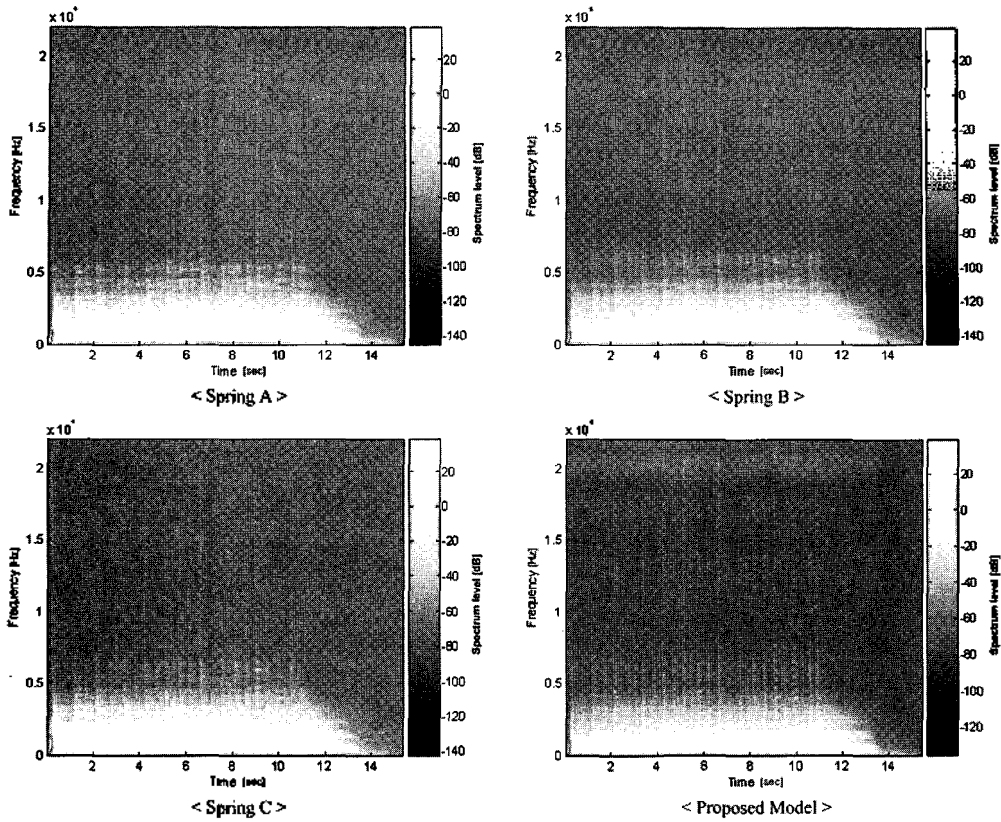


그림 12. 음원 2를 통과시킨 잔향 신호의 스펙트로그램

Fig. 12. Spectrogram of Reverberated Signal of Sound Source 2.

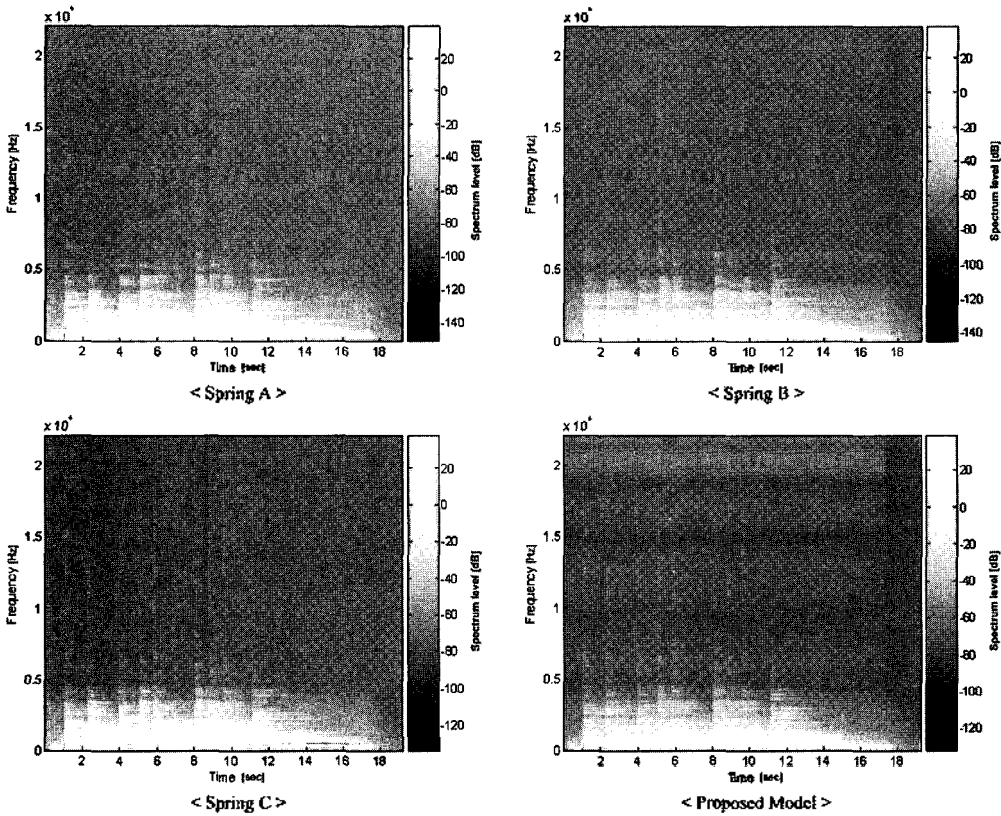


그림 13. 음원 3을 통과시킨 잔향 신호의 스펙트로그램

Fig. 13. Spectrogram of Reverberated Signal of Sound Source 3.

재조된 세 개의 스프링 잔향기의 편차 안에 제안된 디지털 필터 잔향기가 위치함을 알 수 있다.

아울러 그림 11, 그림 12, 그림 13은 세 개의 음원인 음원 1, 음원 2, 음원 3을 각 스프링 잔향기와 제안된 모델에 통과시켰을 때 얻어진 스펙트로그램을 보여준다. 이 결과 역시 거의 동일함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 아날로그 스프링 잔향기를 디지털 필터 잔향기로 모델링하는 기법을 제안하였다. 또한 그 음질이 본래 모델링한 Reference인 스프링 잔향기 제품 자체의 오차범위 안에 들어가는 것을 확인하였고, 제안한 기법은 IIR필터의 Feedback 형태이며 따라서 원하는 특성을 위해 전달함수를 구하면 보다 향상된 성능을 갖는 스프링 잔향기를 편차없는 제품으로 만드는 방법을 제공할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 뉴미디어 통신공동연구소의 지원과 함께 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Laurens Hammond, "Electrical Musical Instrument (Original Reverb Patent)," US Patent 230836, 1941.
2. "www.accutronicsreverb.com", The History of Spring Reverberation.
3. Thomas D. Rossing, F. Richard Moore, Paul A. Wheeler, "The Science of Sound, 3rd Ed.," Addison Wesley, 2002.
4. Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics, 4th Ed.," John Wiley & Sons Inc., 2000.
5. Swen Muller, Paulo Massarani, "Transfer-Function Measurement with Sweeps," Journal of Audio Engineering Society, 49 (6) 2001.
6. ITU-R Recommendation BS. 1534-1, "Method for Subject Assessment of Intermediate Sound Quality (MUSHRA)," International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2001.

저자 약력

• 박 준 (Joon Park)



1998년: 전남대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)
 2003년: 전북대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
 2006년 현재: 전북대학교 전자공학과 재학(박사과정)
 ※주관심분야: 음향 신호처리, 고속통신 신호처리

• 전 상 배 (Sang-Bae Chon)



2000년: 전북대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 2005년: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(공학석사)
 2006년 현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 재학(박사과정)
 ※주관심분야: 음향 신호처리, 음성/음향 코덱, 심리음향

• 이 종 훈 (Jong-Hoon Lee)



1996년: 전북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1998년: 전북대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
 2006년 현재: 전북대학교 전자공학과 재학(박사과정)
 ※주관심분야: 고속통신 신호처리, 정보 및 부호이론, 음향 신호처리

• 성 평 모 (Koeng-Mo Sung)

한국음향학회지 제 20권 제 1호 참조

• 송 상 섭 (Sang-Seob Song)



1978년: 전북대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 1980년: KAIST 전기/전자공학과 졸업(공학석사)
 1990년: 캐나다 Univ. of Manitoba 전기/컴퓨터공학과 졸업(공학박사)
 2006년 현재: 전북대학교 전자정보공학부 교수
 ※주관심분야: 정보 및 부호이론, 고속통신 신호처리