

현악기의 물리적 모델링을 위한 최적의 멀티코어 프로세서 아키텍처 탐색

Exploration of Optimal Multi-Core Processor Architecture for Physical Modeling of Plucked-String Instruments

강 명 수, 최 지 원, 김 용 민, 김 종 면
(Myeongsu Kang, Jiwon Choi, Yongmin Kim, Jong-Myon Kim)

울산대학교 전기공학부
(접수일자: 2011년 4월 5일; 수정일자: 2011년 5월 16일; 채택일자: 2011년 6월 1일)

물리적 모델링 기반 음 합성 알고리즘은 음 합성 시 많은 연산량을 요구하며 이는 실시간 음 합성을 저해한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 물리적 모델링 기반 현악기 사운드 엔진을 멀티코어 프로세서에 구현하고, 사운드 엔진을 위한 최적의 멀티코어 프로세서 구조를 제안한다. 대상 현악기의 단위음을 합성하기 위해 각 프로세싱 엘리먼트 (processing element, PE)당 합성하는 샘플 (sample-per-processing element, SPE) 수를 변화시키는 실험을 통해 시스템의 성능 (system performance), 시스템 면적 효율 (area efficiency), 에너지 효율 (energy efficiency)을 각각 측정하고, 측정된 결과를 바탕으로 최적의 멀티코어 프로세서 구조를 선택하였다. 모의실험 결과, 어쿠스틱 기타는 SPE가 5,513과 2,756일 때 가장 높은 시스템 면적 효율과 에너지 효율을 보였으며, 클래식 기타는 SPE가 22,050과 5,513일 때 시스템 면적 효율과 에너지 효율이 가장 높았다. 또한 이를 이용하여 44.1 kHz의 샘플링율을 갖도록 대상 악기의 단위음을 합성한 결과 원음과 스펙트럼에서 매우 유사함을 확인할 수 있었고, 울산대학교 대학원생 및 교수 10명을 대상으로 실시한 MUSHRA 주관 청취 테스트에서도 좋은 결과를 얻었다.

핵심용어: 사운드 엔진, 최적의 멀티코어 프로세서, 시스템 면적 효율, 에너지 효율

투고분야: 음악음향 및 음향심리 분야 (8,6)

Physics-based sound synthesis usually requires high computational costs and this results in a restriction of its use in real-time applications. This motivates us to implement the sound synthesis algorithm of plucked-string instruments using multi-core processor architectures and determine the optimal processing element (PE) configuration for the target instruments. To determine the optimal PE configuration, we evaluate the impacts of a sample-per-processing element (SPE) ratio that is defined as the amount of sample data directly mapped to each PE on system performance and both area and energy efficiencies using architectural and workload simulations. For the acoustic guitar, the highest area and energy efficiencies are achieved at a SPE ratio of 5,513 and 2,756, respectively, for the synthesis of musical sounds sampled at 44.1 kHz. In the case of the classical guitar, the maximum area and energy efficiencies are achieved at a SPE ratio of 22,050 and 5,513, respectively. In addition, the synthetic sounds were very similar to original sounds in their spectra. Furthermore, we conducted MUSHRA subjective listening test with ten subjects including nine graduate students and one professor from the University of Ulsan, and the evaluation of the synthetic sounds was excellent.

Keywords: Sound engine, Optimal multi-core processor architecture, Area efficiency, Energy efficiency

ASK subject classification: Musical Acoustics and Psychoacoustics (8,6)

I. 서론

디지털 신호처리 기술의 발달과 함께 악기 음을 합성할 수 있는 다양한 합성 방식들이 개발되었다. 대표적인 합성 방법으로는 샘플링 (sampling), 가산 합성 (additive synthesis), 감산 합성 (subtractive synthesis), 주파수 변조 합성 (frequency modulation synthesis), 스펙트럼 모델링 합성 (spectrum modeling synthesis), 물리적 모델링 합성 (physical modeling synthesis) 방식 등이 있다. 이러한 음 합성 방식은 새로운 형태의 악기 인터페이스와 결합하여 사람의 감성과 오감을 자극하는 창조적인 음악 환경을 제공하는데 줄 없는 기타와 오버톤 바이올린 (overtone violin)은 이에 대한 좋은 예라고 할 수 있다 [1-2]. 줄 없는 기타는 전압 분배 회로를 이용하여 기타의 프렛을 묘사하였고, 레이저 모듈과 포토 다이오드를 이용하여 기타의 물리적인 현을 대체하였다. 이를 이용하면 물리적인 현 없이 기타 연주가 가능하다. 또한 D. Overholt에 의해 개발된 오버톤 바이올린은 기존의 바이올린 형태에 제스처 센서를 추가하여 소리를 확장 개선시킬 수 있는 새로운 표현법을 가진 뮤직 인터페이스이다. 최근에는 아이폰 오카리나 (iPhone ocarina) [3]와 모바일 폰 오케스트라 (mobile phone orchestra) [4]와 같이 스마트 폰을 하나의 악기로 개발함으로써 센서 기반의 뮤직 인터페이스와 함께 창조적인 음악 환경에 많은 영향을 미치고 있다.

이러한 악기 인터페이스의 음 합성을 위해 물리적 모델링 기반 음 합성 알고리즘이 최근 주목받고 있다. 물리적 모델링 합성은 고음질의 자연스러운 음을 합성할 수 있는데, 한국의 전통 현악기인 가야금과 핀란드의 전통 현악기인 칸텔레 (kantele)가 대표적인 예이다 [5-6]. 하지만 2009년 TMS320F2812를 이용한 국악기 사운드 엔진에서 볼 수 있듯이 물리적 모델링 합성은 음 합성 시 많은 연산량을 요구하므로 CD 음질의 합성음을 보장하면서 실시간으로 사용하기에는 많은 어려움이 있다 [7].

ASIC (application-specific integrated circuit)은 이러한 음 합성에서 요구하는 고성능, 저전력을 충족시킬 수 있지만 다양한 애플리케이션에서 요구하는 프로그램 능력 (programmability)과 유연성 (flexibility)을 만족시키지는 못한다 [8]. 반면 범용 프로세서 (general-purpose processor)나 디지털 신호처리기 (digital signal processor)는 다양한 애플리케이션에 대해 충분한 프로그램 능력과 유연성을 제공한다. 하지만 물리적 모델링 합성과 같은

멀티미디어 애플리케이션에서 요구하는 고성능을 만족시키지 못하는데 이는 프로세서 구조의 특성상 애플리케이션에 내재한 고도의 병렬성 (massive parallelism)을 활용하지 못하기 때문이다. 이와 같은 단점을 해결할 수 있는 대안으로 SIMD 기반 멀티코어 프로세서 아키텍처가 부각되고 있다. 명령어 레벨 (instruction-level)이나 스레드 레벨 (thread-level) 프로세서들은 실리콘 면적을 멀티포트 레지스터 파일 (multi-ported register file), 캐시 (cache), 파이프라인 (deep pipelined) 기능 유닛 등으로 사용하는 반면, SIMD 기반 멀티코어 프로세서는 수백 개의 저비용 프로세싱 엘리먼트 (processing element, PE)를 이용하여 고성능을 추구하고 동시에 저장 장소와 데이터 통신을 최소화하기 위해 PE와 데이터 입출력을 동일위치에 배치함으로써 저전력을 만족시킨다 [8]. 많은 PE를 사용할수록 전체적인 성능 향상은 달성할 수 있으나, 몇 개의 PE와 얼마의 내부 메모리를 사용해야 음 합성 알고리즘과 같은 멀티미디어 애플리케이션에서 최적의 시스템 면적 및 에너지 효율을 갖게 되는지에 대한 일반적인 견해는 없다. 따라서 본 논문에서는 대상 악기의 사운드 엔진 구현을 위해 PE당 합성하는 샘플 (sample-per-processing element, SPE) 수를 변화시키는 실험을 통해 시스템의 성능, 시스템 면적 효율, 에너지 효율을 측정하고, 음 합성을 위한 최적의 PE 배열을 찾는다. 130 nm 테크놀로지와 100 MHz 클럭 주파수를 갖는 메쉬 구조로 연결한 일곱 가지 PE 배열 (SPE=44, 100, 22, 050, 11, 025, 5, 513, 2, 756, 1, 378, 689)을 대상으로 샘플링율이 44.1 kHz, 양자화 비트가 16인 1초 길이의 음을 합성하였다. 실험 결과 어쿠스틱 기타는 SPE가 5,513과 2,756 (PEs=48, 96)에서 가장 높은 시스템 면적 효율과 에너지 효율을 보였고, 클래식 기타는 SPE가 22,050과 5,513 (PEs=12, 48)에서 최대의 시스템 면적 효율과 에너지 효율을 보였다. 이러한 결과를 통해 SIMD 기반 멀티코어 아키텍처에서 현악기 사운드 엔진을 효율적으로 디자인 할 수 있는 해결책을 제시할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 대상 악기의 구조 및 음향 특성과 현악기의 음 합성 알고리즘에 대해 설명하고, 3장에서는 멀티코어 프로세서 아키텍처의 구조와 디자인 공간 탐색 방법론에 대해 소개한다. 4장에서는 성능 평가를 위한 파라미터 추출 과정 및 성능 평가 지표에 대해 언급하고, 5장에서는 멀티코어 프로세서 아키텍처를 이용한 사운드 엔진 구현 결과 및 시스템 성능과 효율에 대해 기술한다. 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 뜯는 현악기의 음 합성

2.1. 대상 악기의 구조 및 음향 특성

본 논문에서는 어쿠스틱 기타와 클래식 기타를 대상으로 SIMD 기반 멀티코어 프로세서 아키텍처를 이용하여 사운드 엔진을 구현한다. 그림 1 (a)에서와 같이 대상 악기는 구조면에서 상당히 유사하지만 악기를 구성하고 있는 현의 재질에서는 차이가 있는데 이는 각 악기의 음향 특성에 많은 영향을 미친다. 그림 1 (b)는 어쿠스틱 기타 (G3, 196 Hz)와 클래식 기타 (E4, 329.63 Hz)의 파형을 보이며 파형은 그 모양에서 유사함을 알 수 있다. 또한, 그림 1 (c)에서 어쿠스틱 기타와 클래식 기타의 배음 구조는 규칙적이지만, 현의 재질이 나일론인 클래식 기타는 현의 재질이 철인 어쿠스틱 기타에 비해 불협화음 성분이 더 많이 포함되어 있음을 확인할 수 있다.

2.2. 대체 도파관 합성 (Commuted Waveguide Synthesis)

1장에서 언급하였듯이 악기음 합성을 위해 많은 방법

들이 연구되고 있는데 최근에는 스펙트럼 모델링 합성과 물리적 모델링 합성을 이용한 악기음 합성이 주를 이룬다. 스펙트럼 모델링 합성은 관악기 혹은 활을 이용하는 현악기의 음 합성에 사용되며 [9-10], 물리적 모델링 합성은 뜯는 현악기의 음 합성에 주로 사용된다 [11]. 본 논문에서는 어쿠스틱 기타와 클래식 기타의 음 합성을 위해 뜯는 현악기 음 합성에 적합한 물리적 모델링 합성 방법의 하나인 대체 도파관 합성 방법을 이용하여 음을 합성한다.

현악기의 음 합성을 위해서는 브릿지 (bridge)와 몸통 응답 등을 표현할 수 있어야하며 이는 그림 2 (a)와 같이 디지털 필터들로 표현될 수 있다. 현악기의 음 합성을 위한 시스템은 선형 시불변 시스템으로 그림 2 (b)와 같이 재배치 될 수 있는데, 일반적으로 현악기의 몸통 응답을 위한 필터 설계가 복잡하고 높은 차수의 필터가 요구되므로 현 모델을 제외한 나머지 부분을 하나의 통합된 여기 신호 (single aggregate excitation)로 대체하여 합성하는 방법을 대체 도파관 합성이라고 한다 [12-13]. 그림 2 (c)는 대체 도파관 합성 기반 현악기 음 합성을 위한 블록도이다.

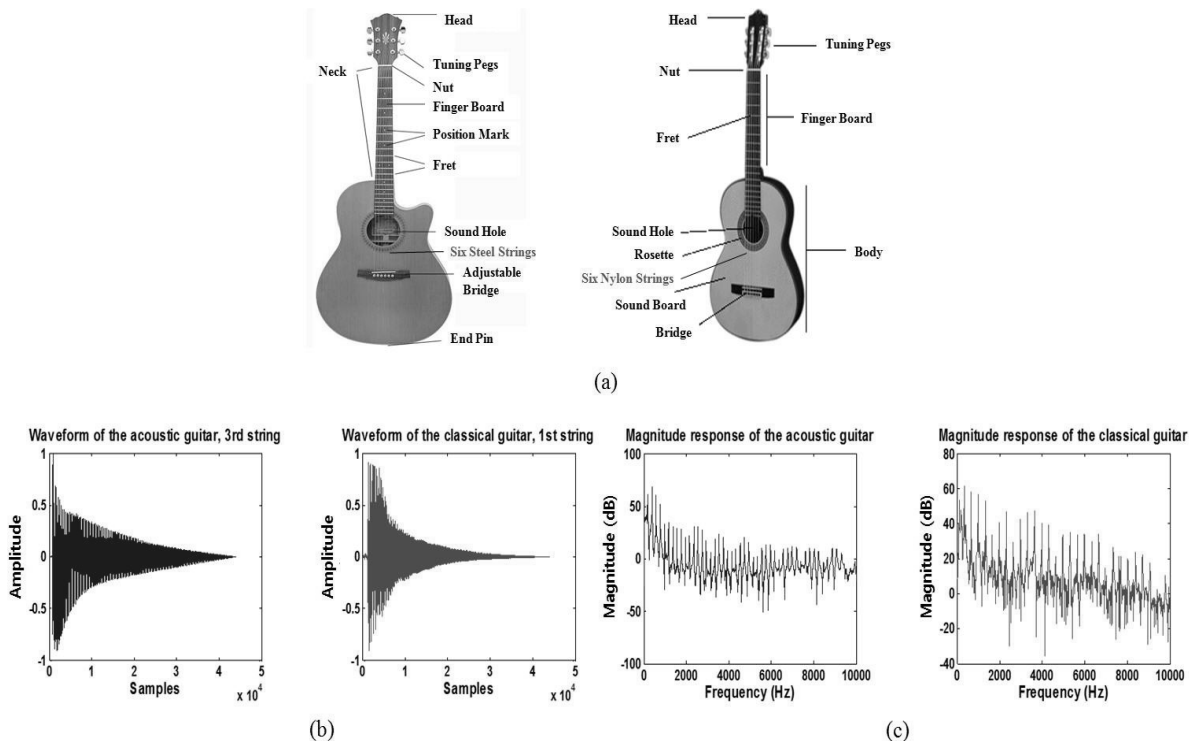


그림 1. 대상 악기의 구조와 음향 특성

(a) 대상 악기의 구조, (b) 어쿠스틱 기타 (G3, 196 Hz)와 클래식 기타 (E4, 329.63 Hz)의 파형, (c) 어쿠스틱 기타 (G3, 196 Hz)와 클래식 기타 (E4, 329.63 Hz)의 스펙트럼

Fig. 1. Structures and acoustic characteristics of target instruments.

(a) structures of target instruments, (b) waveform of the acoustic guitar (G3, 196 Hz) and classical guitar (E4, 329.63 Hz) and (c) Spectra of the acoustic guitar (G3, 196 Hz) and classical guitar (E4, 329.63 Hz).

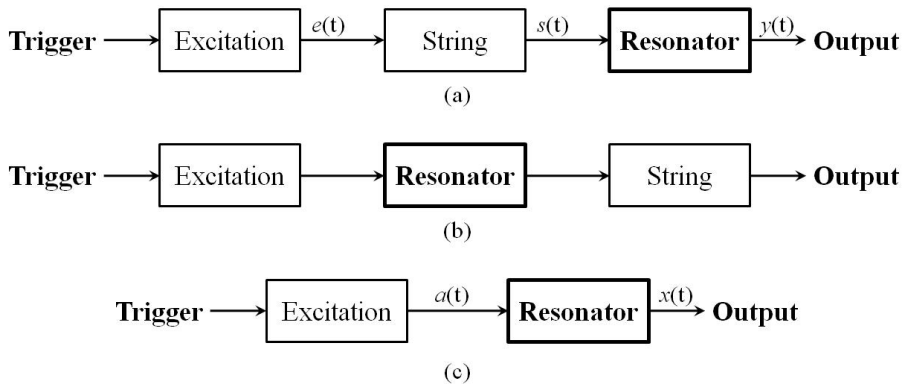


그림 2. 현악기의 음 합성

(a) 현악기의 음 합성을 위한 일반적인 모델, (b) 재배치된 음 합성 모델, (c) 대체 도파관 합성

Fig. 2. Sound synthesis of the plucked instrument.

(a) classical model for sound synthesis of the plucked string instrument, (b) rearranged sound synthesis model and (c) commuted waveguide synthesis.

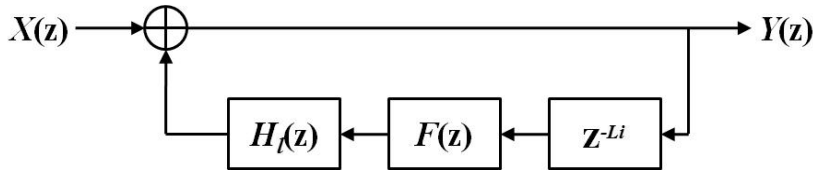


그림 3. 현 모델

$H_L(z)$ - 루프 필터, $F(z)$ - 미소 지연 필터, z^{-Li} - 지연 라인

Fig. 3. String model.

$H_L(z)$ - loop filter, $F(z)$ - fractional delay filter, z^{-Li} - delay line.

2.2.1. 현 모델

본 논문에서는 대체 도파관 합성 방법을 이용하여 어쿠스틱 기타와 클래식 기타의 음을 합성한다. 그림 3은 이를 위한 현 모델이며, 현 모델의 전달 함수는 식 (1)과 같다.

$$S(z) = \frac{1}{1 - z^{-L} F(z) H_L(z)} \tag{1}$$

현 모델에서 지연 길이 L 은 합성음의 기본 주파수를 결정하며 식 (2)와 같다.

$$L = \frac{f_s}{f_0} \tag{2}$$

여기서 f_s 와 f_0 는 샘플링율과 원하는 기본 주파수이다. 식 (2)에서 지연 길이 L 은 일반적으로 정수부와 소수부의 합으로 표현되는데, 디지털 영역에서는 소수부를 표현할 수 없기 때문에 FIR 필터인 라그랑주 보간기 (Lagrange interpolator)를 이용하여 이를 해결하였다. 이는 그림 3에서 미소 지연 필터 $F(z)$ 로 표기되었으며,

미소 지연 필터의 계수는 식 (3)을 이용하여 계산한다 [13].

$$h(n) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq n}}^N \frac{D-k}{n-k}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, N, \tag{3}$$

여기서 N 은 라그랑주 보간기의 차수이고, D 는 원하는 지연으로 식 (4)와 같다.

$$D = \frac{N-1}{2} + x, \tag{4}$$

여기서 x 는 지연 라인 길이의 소수부이다.

지연 길이와 미소지연 필터를 이용하면 원하는 기본 주파수를 갖는 출력을 얻을 수 있으나 실제 자연계에 존재하는 주파수 의존적인 파동의 감쇄 현상은 표현 할 수 없다. 이를 해결하기 위해 식 (5)와 같은 루프 필터를 사용하였다 [11].

$$H_L(z) = g \frac{1 + a_1}{1 + a_1 z^{-1}}, \tag{5}$$

여기서 g 는 0 Hz에서의 필터의 이득으로 $|g| \leq 1$ 의

표 1. 어쿠스틱 기타와 클래식 기타 음 합성을 위한 필터 계수 및 이득

Table 1. Filter coefficients and gain for sound synthesis of the acoustic guitar and classical guitar.

	Delay length	Acoustic Guitar				Classical Guitar			
		$H_t(z)$ coefficients		$F(z)$ coefficients		$H_t(z)$ coefficients		$F(z)$ coefficients	
		a_1	g	h_0	h_1	a_1	g	h_0	h_1
E4 (329.63 Hz)	134	-0.0170	0.9908	0.33	0.67	-0.3400	0.9654	0.33	0.67
B3 (246.94 Hz)	179	-0.0280	0.9866	0.63	0.37	-0.1320	0.9929	0.63	0.37
G3 (196.00 Hz)	225	-0.1190	0.9842	0.87	0.13	-0.2780	0.9830	0.87	0.13
D3 (146.83 Hz)	300	-0.3040	0.9787	1.00	0.00	-0.3580	0.9909	1.00	0.00
A2 (110.00 Hz)	401	-0.5360	0.9763	0.30	0.70	-0.2400	0.9762	0.30	0.70
E2 (82.41 Hz)	535	-0.6520	0.9848	0.72	0.28	-0.4570	0.9819	0.72	0.28

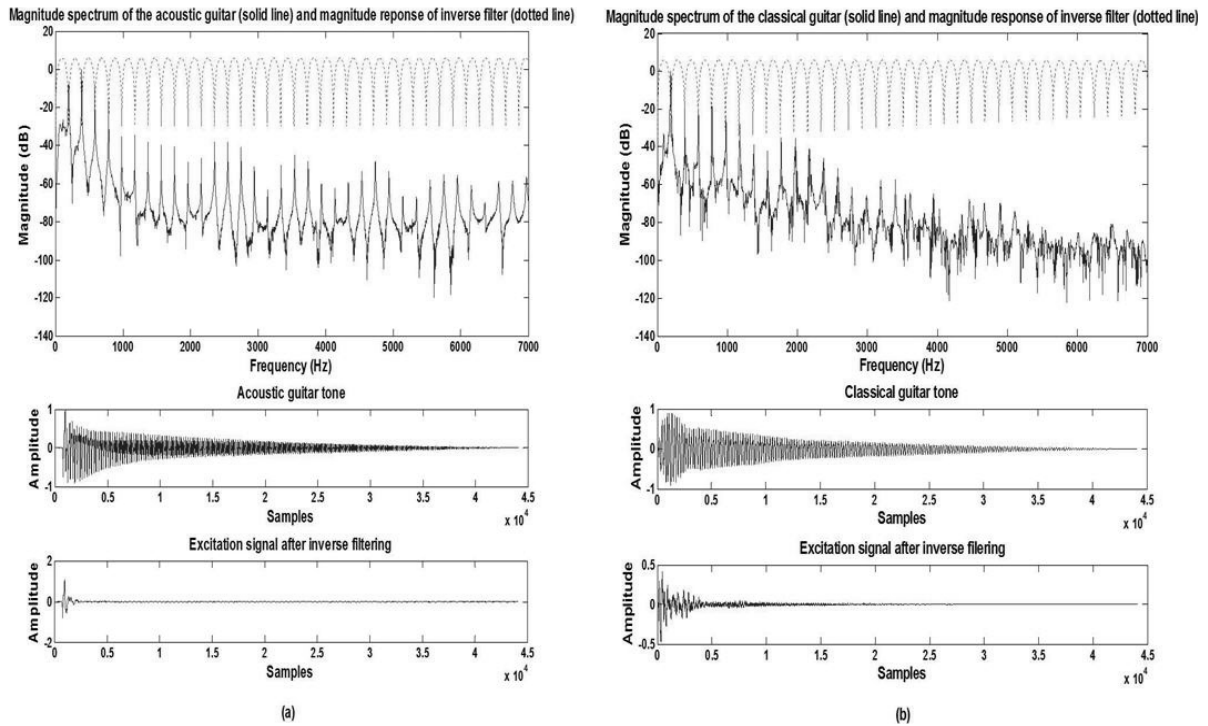


그림 4. 현 모델의 역 필터링을 통한 여기 신호 추출 (a) 어쿠스틱 기타, (b) 클래식 기타

Fig. 4. Extracted aggregate excitations using inverse filtering of the string model. (a) acoustic guitar and (b) classical guitar.

값을, a_1 은 차단 주파수를 결정하는 필터 계수로서 시스템의 안정성을 위해 $-1 < a_1 < 0$ 의 조건을 갖도록 하였다. 어쿠스틱 기타와 클래식 기타 음 합성을 위한 루프 필터 계수 및 이득, 미소 지연 필터의 계수는 표 1과 같다.

2.2.2. 여기 신호 추출

대체 도파관 합성의 여기 신호는 현 모델의 역 필터 (inverse filter)를 이용하여 추출할 수 있으며, 식 (6)은 역 필터의 전달 함수를 나타낸다.

$$S^{-1}(z) = \frac{1 + a_1 z^{-1} - g(1 + a_1 z^{-1})z^{-L_t} F(z)}{1 + a_1 z^{-1}} \quad (6)$$

그림 4는 역 필터를 이용하여 추출한 어쿠스틱 기타와 클래식 기타의 여기 신호로 배음 구조가 불규칙적이고 불협화음 성분이 많이 포함된 클래식 기타의 여기 신호의 양이 어쿠스틱 기타에 비해 더 많음을 보여준다.

어쿠스틱 기타와 클래식 기타의 현은 모두 6현이며, 음역도 'E2 (82.41 Hz) - A2 (110 Hz) - D3 (146.83 Hz) - G3 (196 Hz) - B3 (246.94 Hz) - E4 (329.63 Hz)'로써 동일하다. 일반적으로 대체 도파관 합성 기반 음 합성 알고리즘을 병렬 프로세서에 구현 시 악기의 동시 발음 수 (polyphonic notes), 불규칙한 지연 길이 (irregular delay length), 불규칙한 여기 신호 길이 (irregular excitation length)가 데이터의 병렬화에 많은 영향을 미친다. 하지

만 두 대상 악기의 경우 동시 발음수와 지연 라인의 길이가 동일하므로 본 논문에서는 여기 신호 길이의 차이가 시스템의 성능, 면적 효율, 에너지 효율에 미치는 영향과 어떠한 PE 배열에서 각 악기의 음 합성을 위한 최적의 성능이 나타나는지를 살펴본다.

III. 실험 환경

3.1. 멀티코어 어레이 아키텍처

멀티코어 어레이는 2차원 PE 어레이, 내부 메모리, 각 PE와 입·출력 유닛을 제어 하는 어레이 컨트롤 유닛 (array control unit, ACU)으로 구성 된다. 그림 5는 본 논문에서 언급한 멀티코어 어레이 아키텍처와 상호 연결 네트워크를 보여준다. PE는 메쉬 (mesh) 구조로 서로 연결되어 있으며, ACU는 각각의 PE를 제어한다. 또한 데이터 전송 유닛 (data exchange unit)은 각 PE의 레지스터와 외부 입·출력 유닛 사이의 데이터 전송을 담당한다. 사운드 엔진 구현을 위한 각 PE는 RISC (reduced instruction set computer) 구조로 되어있으며 다음과 같은 특징을 갖는다.

- (1) 32비트 워드 폭의 내부 메모리
- (2) 32비트 폭의 16개 3포트 범용 레지스터
- (3) 간단한 산술 및 논리 연산을 수행하는 ACU
- (4) 멀티 비트 산술 및 논리 시프트 연산을 수행하는 배럴 시프트 (barrel shifter)

- (5) 64비트 곱셈 및 누산기 (multiply accumulator)
- (6) PE의 활성화 및 비활성화를 위한 Sleep 유닛
- (7) 이웃하는 PE와 데이터 통신을 위한 NEWS (north-east-west-south) 네트워크 및 직렬 입·출력 유닛

3.2. 디자인 공간 탐색 : SPE (sample-per-processing element) 변화

모바일 폰 악기와 같은 휴대용 악기 개발에 있어 핵심이 되는 설계 디자인 쟁점은 처리할 사운드 데이터에서 요구되는 성능 및 효율을 만족시킬 수 있는 PE 개수와 메모리 크기를 결정하는 것이 중요하다. 이러한 멀티코어 프로세서의 디자인 공간을 탐색하기 위해 본 논문에서는 SPE (sample-per-processing element)를 디자인 변수로 사용하였으며, SPE 값은 각 PE에 매핑되는 샘플 데이터의 수를 의미한다. 본 논문에서는 일곱 가지 SPE 값에 대해 시스템의 성능, 면적 및 에너지 효율을 살펴보았다. 또한 PE 내부 메모리의 크기는 SPE 값에 따라 달라지며, SPE 값이 증가할수록 적은 메모리 공간이 요구된다. 이는 음 합성 시 필터 계수, 지연 라인 길이, 음 합성 시 발생하는 임시 데이터와 같은 합성 정보를 저장하기 위한 공간이 줄어들기 때문이며, PE당 필요한 내부 메모리 공간 (MEMPE)은 식 (7)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$MEM_{PE} = \frac{Max\ Delay\ Length}{PE_{STR}} + 5 [words], \quad (7)$$

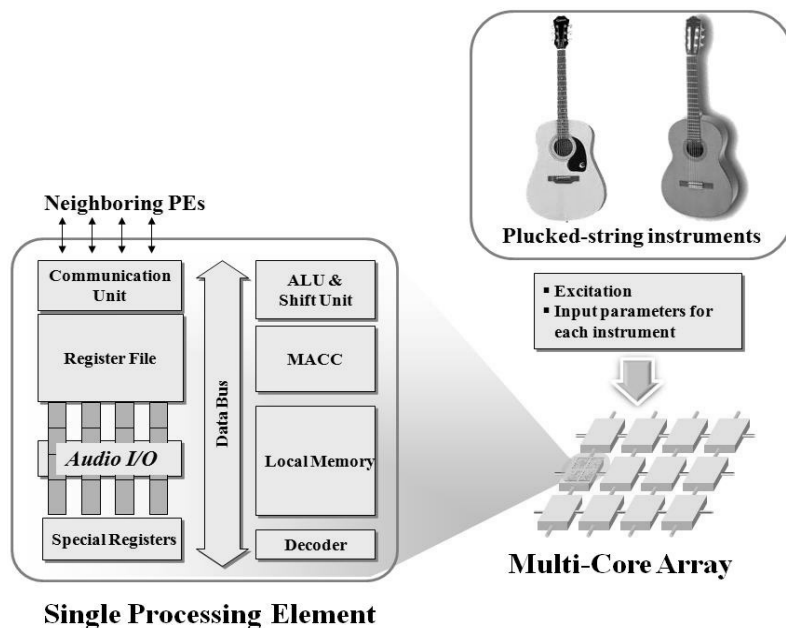


그림 5. 멀티코어 어레이와 프로세싱 엘리먼트의 블록도
 Fig. 5. A block diagram of a multi-core array and a processing element.

여기서 'Max Delay Length'는 합성음의 최대 지연 길이로, 본 논문에서는 535로 설정하였다. 이는 식 (2)에서 최대 지연 길이는 가장 낮은 기본 주파수에서 발생하며, 대상 악기의 합성음 가운데 가장 낮은 기본 주파수는 82.41 Hz로 최대 지연 길이 535를 갖기 때문이다. 또한 PESTR은 대상 악기의 각 현당 할당되는 PE의 수를 의미하며, 루프 필터 계수 (a1), 루프 필터 이득 (g), 라그랑주 보간기 계수 (h0, h1), 지연 길이 정보를 저장하기 위해 5위드의 메모리 공간이 추가적으로 요구된다. 전체 시스템에 대한 메모리 공간은 MEMSYS=MEMPE×NPE이며, 여기서 NPE는 PE의 수이다.

그림 6은 SPE 값에 대해 사운드 샘플이 어떻게 할당되는지를 보여주는데, 하나의 단위음을 합성하기 위해 각

PE는 기본적으로 한 번에 하나의 샘플만 합성한다. 하지만, SPE가 22,050일 경우 하나의 단위음 합성을 위해 두 개의 PE가 사운드 샘플을 하나씩 합성하므로 결과적으로는 두 개의 사운드 샘플이 동시에 합성되는 결과를 낳는다.

본 논문에서는 일곱 가지 SPE 값에 대해 시스템의 성능과 효율을 평가하였으며, SPE는 fs/PESTR로 정의된다. 또한 주어진 SPE 값에 대해 할당되는 PE의 수는 $NPE=STRNUM \times 2^i$ ($i=0, \dots, 6$)이며, 여기서 STRNUM은 대상 악기의 현의 수이다. 시스템의 성능 분석을 위해 130 nm 테크놀로지와 100 MHz의 클럭 주파수를 갖는 PE 배열을 사용하였고, 합성음은 44.1 kHz의 샘플링율과 16비트 양자화 비트를 갖는 1초 길이 음을 합성하였다.

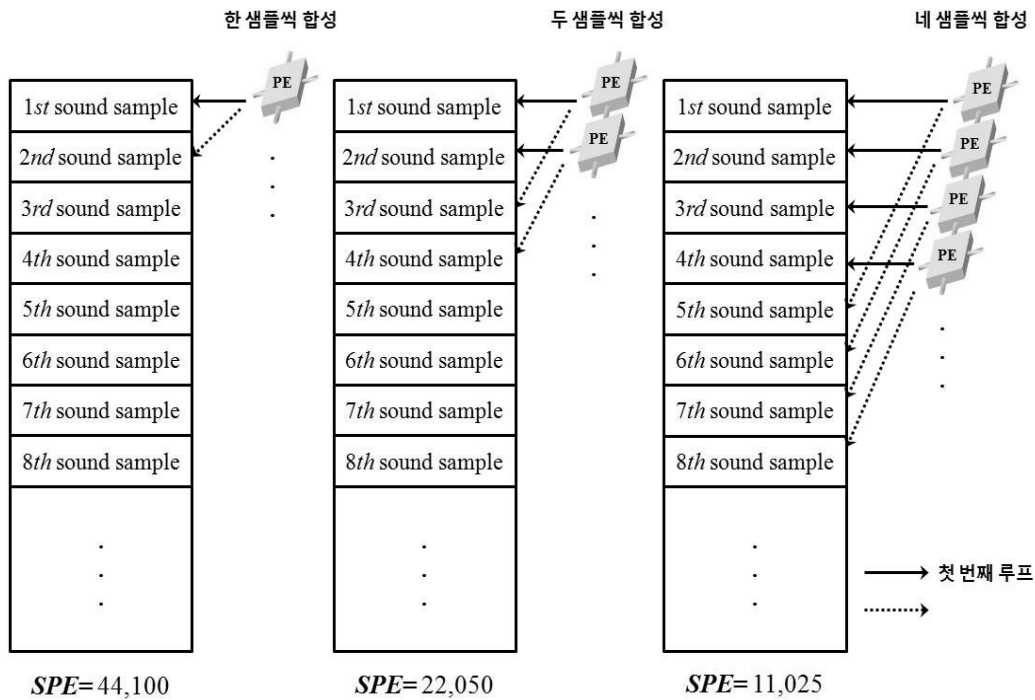


그림 6. SPE 변화에 따른 PE 구조의 예
Fig. 6. An example of a sample-per-processing element (SPE).

표 2. 모델링된 멀티코어 프로세서 아키텍처 파라미터
Table 2. Modeled multi-core process architecture parameters.

Parameter	Value						
Number of PEs	6	12	24	48	96	192	384
Sample-per-PE (SPE)	44,100	22,050	11,025	5,513	2,756	1,378	689
Memory/PE [word]	540	273	139	72	39	22	14
System Memory [KB]	12.96	13.11	13.35	13.83	14.98	16.90	21.51
VLSI Technology	130 nm						
Clock Frequency	100 MHz						
Interconnection Network	Mesh						
intALU/intMUL/Barrel Shifter/intMACC/Comm	1/1/1/1/1						

표 2는 대상 약기의 음 합성을 위한 최적의 멀티코어 프로세서 아키텍처를 찾기 위해 모델링된 멀티코어 프로세서 아키텍처의 파라미터이다.

IV. 실험 방법론 및 성능 평가 지표

4.1. 성능 및 효율 측정에 필요한 파라미터 추출

그림 7은 시스템의 성능 및 효율 측정에 필요한 파라미터 추출을 위한 방법으로, 애플리케이션 레벨, 아키텍처 레벨, 테크놀로지 레벨로 구성된다. 애플리케이션 레벨에서는 명령어 레벨의 SIMD 기반 멀티코어 프로세서용 시뮬레이터를 이용하여 사이클 수, 동적 명령어 빈도, 시스템 이용률 (system utilization) 등의 실행 데이터를 추출하며, 아키텍처 레벨에서는 모델링된 아키텍처의 디자인 변수를 계산하기 위해 Chai가 제안한 SIMD기반 멀티코어 프로세서용 아키텍처 모델링 툴을 사용하였다 [14]. 다음으로 테크놀로지 레벨에서는 각 아키텍처 모델들의 테크놀로지 변수 (지연 (latency), 전력 (power), 클록 주파수 (clock frequency))를 계산하기 위해 Generic System Simulator (GENESYS)를 사용하였다 [15]. 마지막으로 각 레벨에서 구해진 값들을 조합하여 SPE 변화에 대한 시스템의 실행 시간 (execution time), 시스템 이용률 (system utilization), 면적 효율 (area efficiency), 에너지 효율 (energy efficiency)을 측정하였다.

4.2. 성능 평가 지표

표 3은 대상 약기의 음 합성을 위한 시스템의 성능 및 효율 평가를 위한 지표를 나타낸다 [16]. 실행 시간은 음

합성 알고리즘이 수행되는 시간을, 면적 효율은 단위 면적당 시스템의 처리량을, 에너지 효율은 소비 에너지에 대한 시스템의 처리량을 각각 나타낸다.

여기서 C 는 사이클 수, f_{clk} 는 클록 주파수, t_{exec} 는 사이클 시간, $Area$ 는 PE 어레이 면적 (mm^2), $Energy$ 는 130 nm 테크놀로지에서의 음 합성 알고리즘을 실행하는데 소비되는 시스템 에너지이다.

4.3. 음 합성 알고리즘의 병렬 구현

그림 8은 SIMD 기반 멀티코어 프로세서 아키텍처에 대상 약기의 사운드 엔진 구현을 위한 흐름도로 각 행은 대상 약기의 하나의 현을 의미한다. 어쿠스틱 기타와 클래식 기타 모두 한 번에 N 개의 사운드 샘플을 동시에 합성하기 위해서는 $6 \times N$ 개의 PE가 할당되어야 하고, 음 합성을 위해 각 PE는 여기 신호, 지연 길이, 필터 계수 및 이득 등의 합성 정보를 포함하고 있어야 하는데 이러한 합성 정보는 ACU가 각 PE로 분배한다.

동시 발음수가 6인 기타의 음을 SIMD 기반 멀티코어 프로세서 아키텍처에 구현하기 위해서는 불규칙적인 지연 길이로 인해 PE의 활성화/비활성화 혹은 이웃한 PE

표 3. 성능 평가 지표 요약
Table 3. Summary of evaluation metrics.

Execution Time	$t_{exec} = \frac{C}{f_{clk}}$
Area Efficiency	$\eta_A = \frac{1}{t_{exec} \times Area} \left[\frac{1}{s \cdot mm^2} \right]$
Energy Efficiency	$\eta_E = \frac{1}{t_{exec} \times Energy} \left[\frac{1}{s \cdot Joules} \right]$

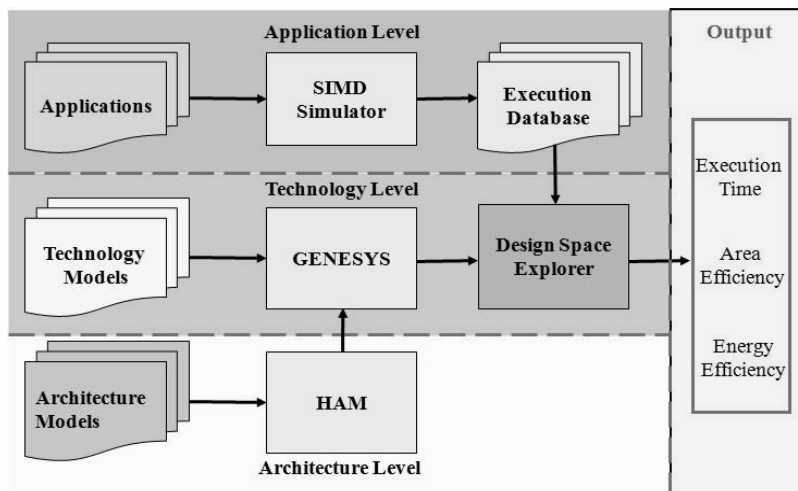


그림 7. 멀티코어 프로세서 아키텍처에 대한 실험 방법론
Fig. 7. Simulation methodology infrastructure for the multi-core processor architecture.

간 데이터 전송 등의 처리가 요구된다. 그림 9는 SPE가 11,025일 때 클래식 기타 6번 현 (E2, 82.41 Hz)에 대한 음 합성 과정을 보여준다. 불규칙적인 지연 길이의 문제를 해결하기 위한 방법으로는 두 가지를 고려할 수 있는데 아래와 같다.

방법 1. 첫 번째 PE부터 마지막 PE까지 어떤 PE도 비활

성화하지 않고 연속적으로 사운드 샘플을 합성하는 방법.

방법 2. 첫 번 PE부터 마지막 PE까지 SLEEP 명령어를 사용함으로써 사운드 샘플을 합성하는 방법.

그림 9 (a)에서와 같이 방법 1은 불규칙한 지연 길이 문제를 처리하기 위해 PE를 비활성화 시키지 않으므로 시스템의 이용률은 증가하나, 올바른 음을 합성하기 위

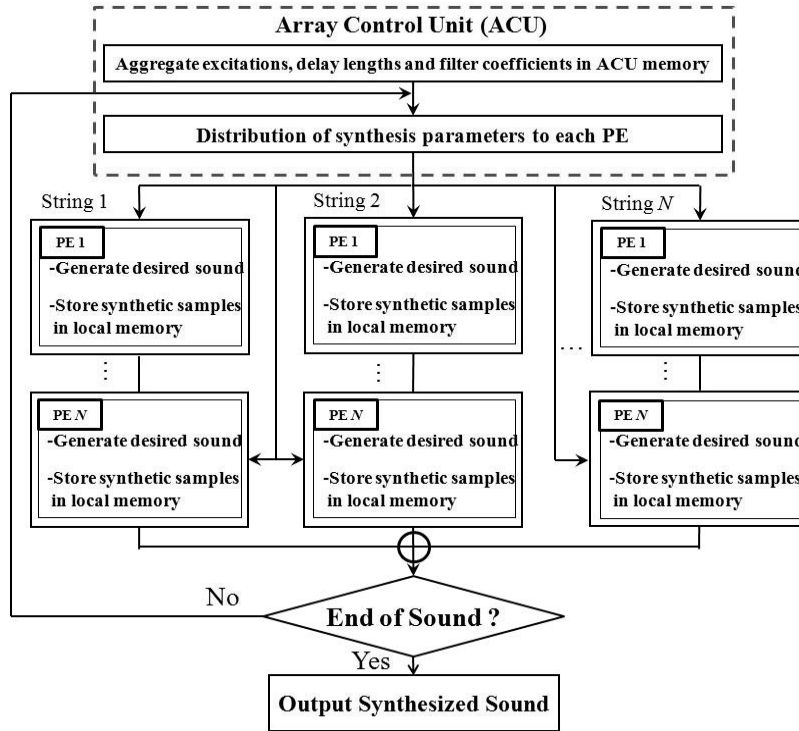
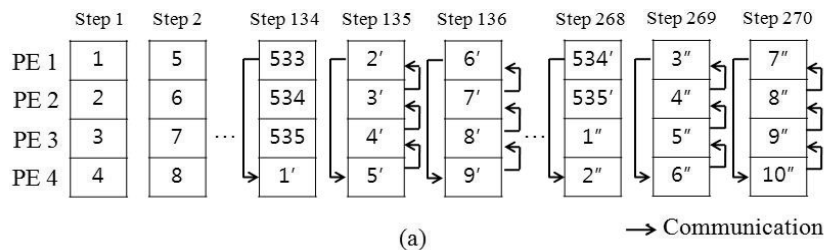
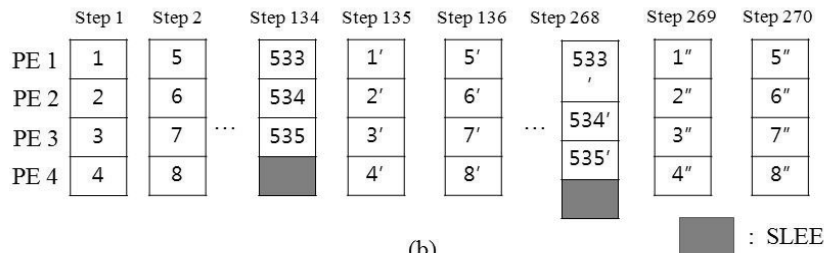


그림 8. 대체 도파관 합성 기반 현악기 음 합성을 위한 병렬 구현 흐름도

Fig. 8. A flow diagram of parallel implementation for the plucked-string instrument using commuted waveguide synthesis.



(a)



(b)

그림 9. SPE가 11,025일 때 클래식 기타 6번 현 (E2, 82.41 Hz)에 대한 음 합성 과정

(a) SPE가 11,025일 때 방법 1을 이용한 음 합성, (b) SPE가 11,025일 때 방법 2를 이용한 음 합성

Fig. 9. Process of sound synthesis: sixth string of the classical guitar (delay length is 535).

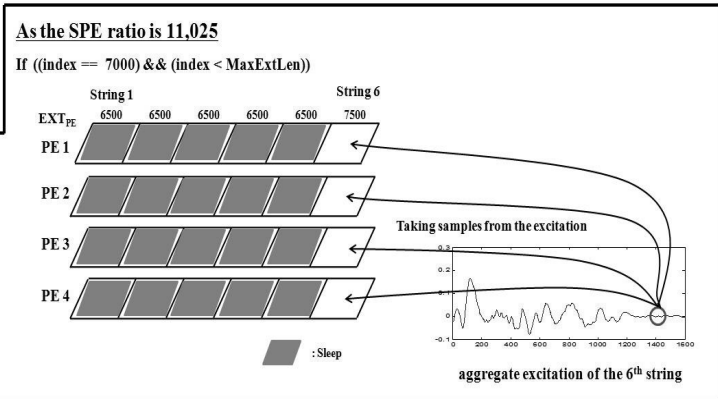
(a) Method 1 for generating sound samples for SPE=11,025 and (b) Method 2 for producing sound samples for SPE=11,025.

```

initialize index;
MaxExtLen = maximum excitation length;
EXTPE = aggregate excitation length of each PE;
DLPE = delay length of each PE;
DBuff[bufind] = synthetic sound samples of each PE;
REPEAT for end of note
    
```

```

IF index > MaxExtLen THEN
    Branch END_EXCT
END if
IF index > EXTPE THEN
    Sleep PEs
    Perform the synthesis algorithm with excitations
    Wakeup PEs
END if
    
```



```

END_EXCT:
Synthesize a sound sample with a sample in delay line
DBuff[bufind] = Synthetic sound sample;
IF bufind > DLPE THEN
    bufind = 0;
END if
index++;
bufind++;
END repeat
    
```

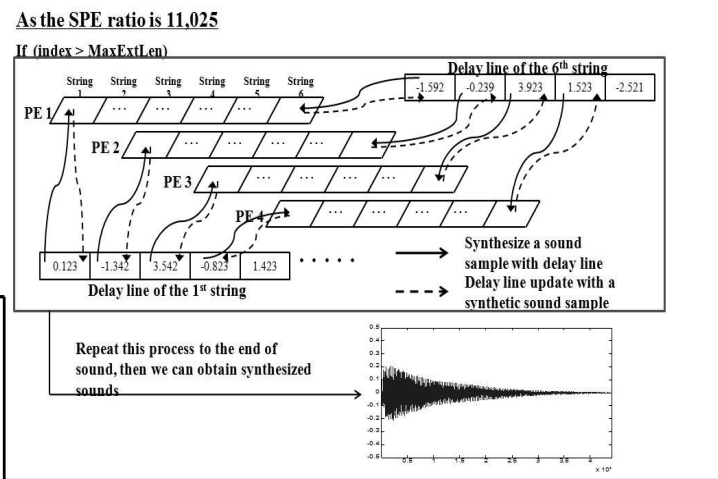


그림 10. SIMD 기반 멀티코어 프로세서 아키텍처에서 현악기의 음 합성을 위한 전체 메커니즘
Fig. 10. Full synthesis mechanism with the multi-core processor architecture for synthesizing musical sounds of the plucked-string instruments.

해 지연 라인의 인덱스 (index) 변수 수정과 이웃한 PE의 지연 라인으로부터 올바른 사운드 샘플을 가져오기 위해 주변 PE들과의 통신이 요구된다. 예를 들면, 그림 9 (a)에서 PE4는 134번째 단계에서 536번째 사운드 샘플을 합성하기 위해서 첫 번째 단계에서 PE1이 합성한 사운드 샘플이 필요하다. 따라서 PE1은 PE2, PE3, PE4와의 통신을 통해 PE4로 사운드 샘플을 전송한다. 이로 인해 음 합성 알고리즘의 실행 시간이 증가하고 이는 면적 효율과 에너지 효율이 감소되는 결과를 낳는다. 이와 달리, 그림 9 (b)는 불규칙한 지연 길이 문제를 해결하기 위해 PE를 비활성화 시키는 방법으로 이는 약간의 시스템 이용률을 감소시키는 결과를 가져오지만 이웃한 PE간 통신, 인덱스 변수 수정과 같은 추가적인 연산이 요구되지 않아 방법 1에 비해 시스템의 성능 및 효율 면에서는 효과적이다. 따라서 본 논문에서는 방법 2를 이용하여 불규칙적인 지연

길이의 문제를 해결하였다. 그림 10은 SIMD 기반 멀티코어 프로세서 아키텍처에서 현악기의 음 합성을 위한 전체 메커니즘을 보이며, 제한한 멀티코어 프로세서 아키텍처는 동시 발음수가 6인 1초 길이의 어쿠스틱 기타와 클래식 기타 음을 합성한다. 합성음의 샘플링율은 44.1 kHz, 양자화 비트는 16비트이다.

V. 실험 결과

5.1. 합성음 결과

본 논문에서는 SIMD 기반 멀티코어 아키텍처에 대해 도파관 합성을 이용한 어쿠스틱 기타와 클래식 기타를 위한 사운드 엔진을 구현하였다. 그림 11은 대상 악기의 원음과 합성음의 스펙트럼을 보이며, 합성음은 원음과 매우 유사하다.

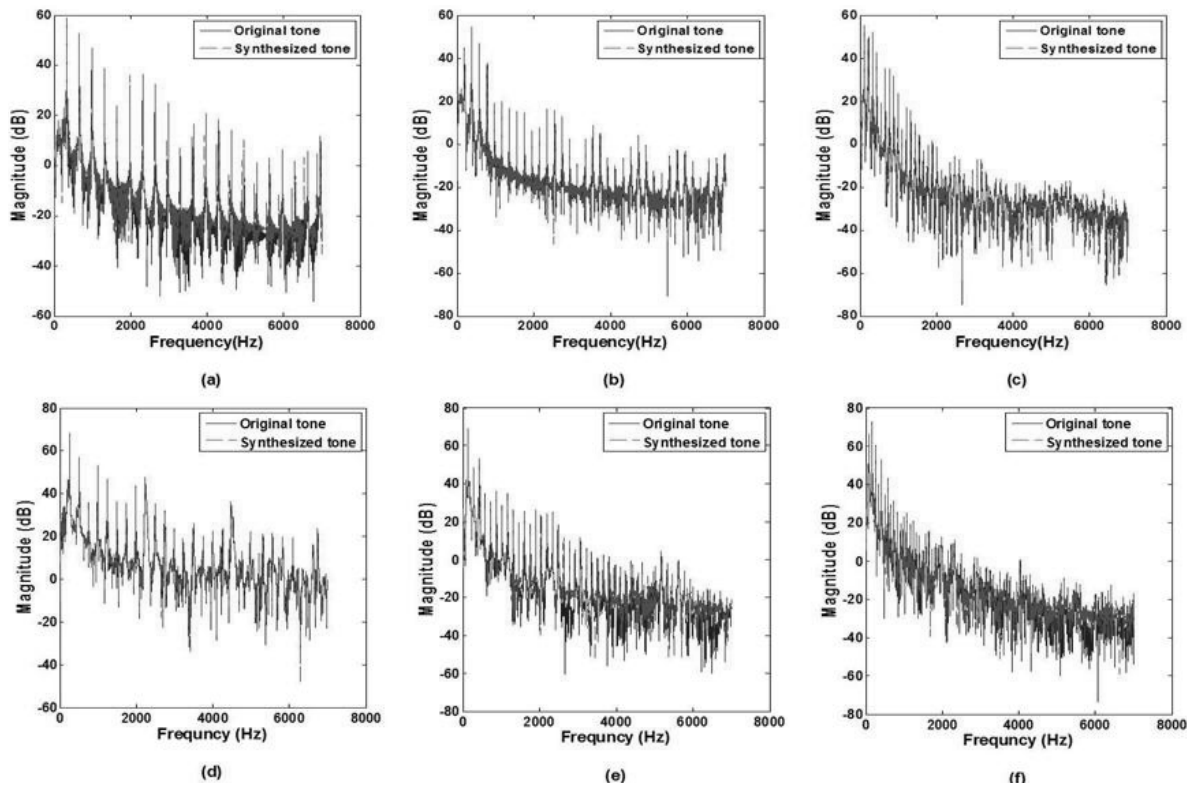


그림 11. 대상 악기의 원음 (실선)과 합성음 (점선)의 스펙트럼 결과 비교

(a) 어쿠스틱 기타 1번 현 (E4, 329.63 Hz), (b) 어쿠스틱 기타 3번 현 (G3, 196 Hz), (c) 어쿠스틱 기타 5번 현 (A2, 110 Hz), (d) 클래식 기타 2번 현 (B3, 246.94 Hz), (e) 클래식 기타 4번 현 (D3, 146.83 Hz) and (f) 클래식 기타 6번 현 (E2, 82.41 Hz)

Fig. 11. Spectra of the original sounds (solid line) and synthesized sounds on the multi-core processor architecture (dotted line). (a) acoustic guitar first string (E4, 329.63 Hz), (b) acoustic guitar third string (G3, 196 Hz), (c) acoustic guitar fifth string (A2, 110 Hz), (d) classical guitar second string (B3, 246.94 Hz), (e) classical guitar 4th string (D3, 146.83 Hz) and (f) classical guitar sixth guitar (E2, 82.41 Hz).

합성음의 음질을 평가하기 위해 주관 청취 평가 방법인 MUSHRA (Multi-Stimulus test with Hidden Reference and Anchor) 청취 테스트를 이용하였다 [17]. 이는 원 오디오 신호에 대한 테스트 오디오 신호의 음질을 평가할 수 있는 방법으로 본 논문에서는 합성음을 테스트 신호로 사용하였다. 청취 실험에 참여한 대상은 울산대학교 대학원에 진학 중인 대학원생과 교수, 총 10명을 대상으로 테스트를 실시하였다. 이때, 실험에 사용된 오디오 신호는 숨겨진 참조 신호, 차단 주파수가 3.5 kHz인 Butterworth 저역 통과 필터를 통과한 앵커 신호, 멀티코어 프로세서 아키텍처를 이용한 합성음이다. MUSHRA 청취 테스트 결과 어쿠스틱 기타 1번 현 (E4, 329.63 Hz)과 2번 현 (B3, 246.94 Hz), 클래식 기타 1번 현 (E4, 329.63 Hz)를 제외하고는 모두 평균이 80-90사이로 좋은 결과를 얻었다. 본 논문에서 합성한 음과 MUSHRA 청취테스트 결과는 아래의 웹 페이지에서 확인할 수 있다.

http://eucs.ulsan.ac.kr/ASK_multicore_soundengine.

5.2. 실행 시간

그림 12는 일곱 가지의 PE 배열에 대한 음 합성 알고리즘의 실행 시간으로 PE의 수가 증가할수록 실행 시간이 감소한다. 하지만 실행 시간의 효율을 나타내는 기울기는 각 PE 배열에서 다르게 나타나는 것을 볼 수 있는데 어쿠스틱 기타는 SPE가 5,513, 클래식 기타는 SPE가 22,050이후에서 이전 PE 배열에 비해 실행 시간의 감소가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 클래식 기타는 어쿠스틱 기타에 비해 음 합성 시 더 많은 실행 시간이 소요되는데, 클래식 기타의 경우 음 합성 시 많은 양의 여기 신호가 요구되며 ACU가 이를 분배하는 과정에서 더 많은 SLEEP 명령어를 사용하기 때문이다.

이와 같은 음 합성 알고리즘의 실행 시간은 합성음의 샘플링율과 밀접한 관계를 갖는다. CD 음질을 만족시키기 위해서는 44.1 kHz의 샘플링율을 보장하여야 하는데, 이는 하나의 사운드 샘플이 1/44,100 (0.02 ms) 초안에 합성되어야 함을 의미한다. 그림 12에서 클래식 기타의 경우 SPE가 44,100과 689일 때, 동시 발음 수 6인 44,100

의 샘플이 합성되는데 19.58 ms와 5.02 ms가 각각 소요되었다. 이는 동시 발음 수 6인 하나의 사운드 샘플이 합성되는데 $19.58 \text{ ms}/44,100 = 0.44 \mu\text{s}$, $5.02 \text{ ms}/44,100 = 0.11 \mu\text{s}$ 가 각각 소요됨을 의미하고 이는 44.1 kHz의 샘플링율을 충분히 보장할 수 있다.

5.3. 시스템 이용률

그림 13은 PE 배열에 따른 시스템 이용률이다. 어쿠스틱 기타는 SPE가 11,025 (PEs=24)이후에서 시스템 이용률이 약 83 %로 수렴하고, 클래식 기타는 SPE가 22,050 (PEs=12)이후에서 시스템 이용률이 80 %로 수렴한다. 대상 악기 모두 SPE가 22,050에서 시스템 이용률이 많이 감소하는 이유는 불규칙한 지연 길이와 여기 신호의 처리를 위해 많은 PE들이 유휴 상태 (SLEEP)에 놓이기 때문이다. 특히, 클래식 기타의 시스템 이용률이 더 낮은 이유는 앞 절에서 언급하였듯이 ACU가 여기 신호를 분배할 때 더 많은 PE들이 유휴 상태에 놓여 졌기 때문이다.

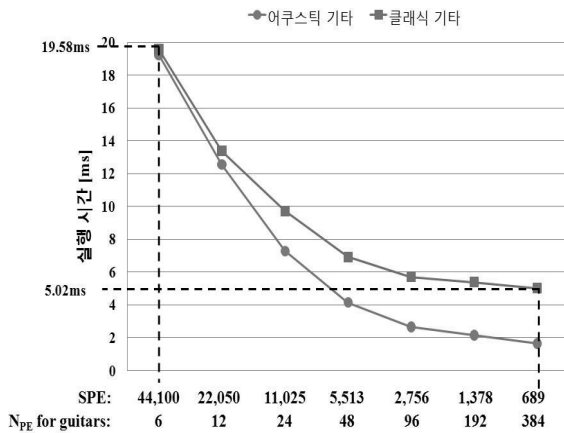


그림 12. 일곱 가지 PE 배열에 대한 음 합성 알고리즘의 실행 시간
Fig. 12. Execution times of the sound synthesis algorithm for various PE configurations.

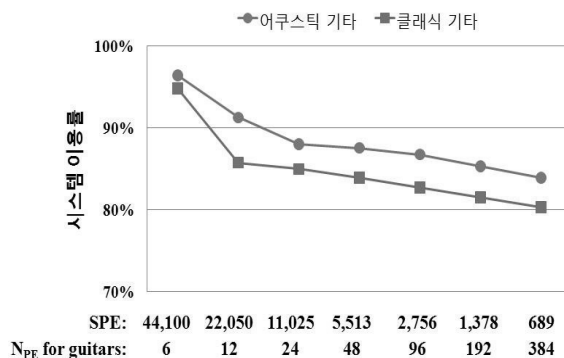


그림 13. 7가지 PE 배열에 대한 시스템 이용률
Fig. 13. System utilization for seven PE configurations.

5.4. 시스템 면적 효율

시스템 면적 효율은 단위 면적당 시스템의 처리량을 의미하며, 그림 14는 PE 배열에 따른 시스템 면적 효율을 보여준다. 그림 14에서 시스템 면적 효율은 각 대상 악기 시스템 면적 효율의 평균값으로 정규화된 값으로써 세로 축의 값은 의미가 없고 그래프가 나타내는 모양이 중요하다. 어쿠스틱 기타와 클래식 기타는 SPE가 5,513, 22,050에서 각각 최대의 시스템 면적 효율을 가지는데, 이는 시스템 면적과 실행 시간과 관계가 있다. 어쿠스틱 기타의 경우 SPE가 5,513에서 이전의 PE 배열에 비해 시스템 면적은 약 13.8 %가 증가하였고 (표 4 참조), 실행 시간은 약 43.1 %가 줄어 (그림 12 참조) 시스템 면적 증가대비 실행 시간 감소의 폭이 가장 컸다. 반면, 클래식 기타는 SPE가 22,050에서 이전 PE 배열에 비해 약 44.6 %의 시스템 면적 증가 (표 4 참조)와 약 31.6 %의 실행 시간 감소 (그림 12 참조)를 보여 SPE가 22,050에서 가장 높은 시스템 면적 효율을 나타내었다.

5.5. 에너지 효율

에너지 효율은 소비 에너지당 처리량을 의미하며, 그림 15는 PE 배열에 따른 에너지 효율로 시스템 면적 효율

표 4. SPE 값에 따른 시스템 면적
Table 4. System area for SPE variation.

	대상악기	SPE ratios						
		44,100	22,050	11,025	5,513	2,756	1,378	689
시스템 면적 [mm ²]	어쿠스틱 기타	2.54	3.92	6.41	11.4	21.3	41.2	81.1
	클래식 기타	2.54	3.92	6.41	11.4	21.3	41.2	81.1

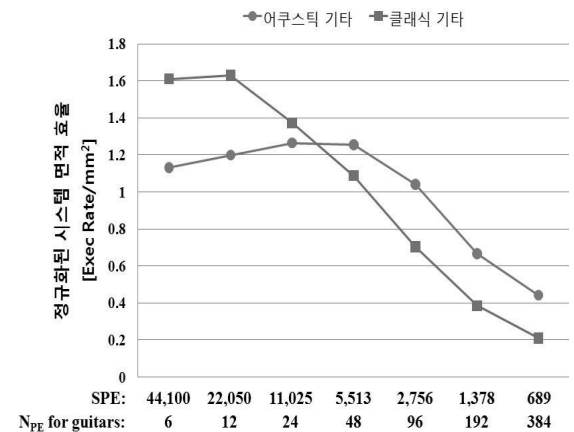


그림 14. PE 배열에 따른 시스템 면적 효율.
(a) 어쿠스틱 기타, (b) 클래식 기타
Fig. 14. Area efficiencies for PE variations.
(a) acoustic guitar, and (b) classical guitar.

표 5. SPE 값에 따른 에너지 소비
Table 5. Energy consumption for various SPE ratios.

	대상악기	SPE ratios						
		44,100	22,050	11,025	5,513	2,756	1,378	689
에너지 소비 × 10 ³ [Joules]	어쿠스틱 기타	4.858	4.758	4.088	3.676	6.276	5.253	7.043
	클래식 기타	4.692	5.243	4.533	4.743	6.276	10.190	17.441

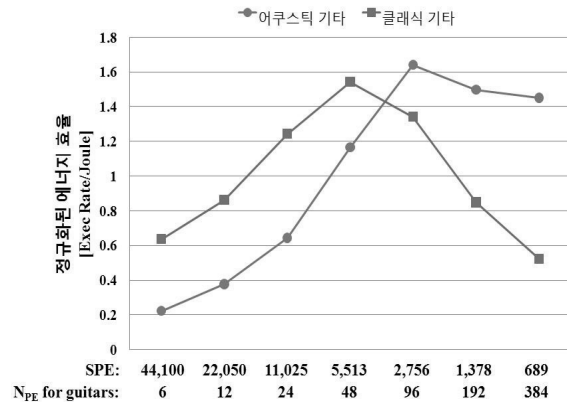


그림 15. PE 배열에 따른 에너지 효율
(a) 어쿠스틱 기타, (b) 클래식 기타
Fig. 15. Energy efficiencies for PE variations.
(a) acoustic guitar, and (b) classical guitar.

과 같이 세로축은 각 대상 악기의 에너지 효율의 평균값으로 정규화한 값이다. 그림 15에 나타나듯이 어쿠스틱 기타는 SPE가 2,756에서, 클래식 기타는 SPE가 5,513에서 최대의 에너지 효율을 갖는데, 이는 소비된 에너지와 실행 시간과 관계가 있다. 어쿠스틱 기타의 경우 SPE가 2,756에서 이전 PE 배열에 비해 에너지 소비가 약 10.5% 증가하고 (표 5 참조), 실행 시간은 약 35.7% 감소 (그림 12 참조)하여 가장 높은 에너지 효율을 보였고, 클래식 기타의 경우 SPE가 5,513에서 약 13.2%의 에너지 소비 증가 (표 5 참조)와 약 28.8%의 실행 시간 감소 (그림 12 참조)를 보여 최대 에너지 효율을 나타내었다. 클래식 기타의 경우 시스템 면적 효율과 에너지 효율 모두 어쿠스틱 기타에 비해 적은 수의 PE를 사용하였을 때 가장 좋은 효율을 보였는데, 이는 PE의 수가 증가할수록 불규칙적인 지연 길이와 많은 양의 여기 신호를 병렬 처리함에 있어 어려움이 있기 때문이다.

5.6. 시스템 면적과 전력

배터리로 동작하는 휴대용 악기 개발을 위해서는 다음 두 가지 제약이 있는데, 전력이 배터리로 제한된다는 점과 최대 허용 가능한 시스템 면적이 제한된다는 점이다. 이러한 제약을 극복하기 위해서는 시스템 면적과 전력이

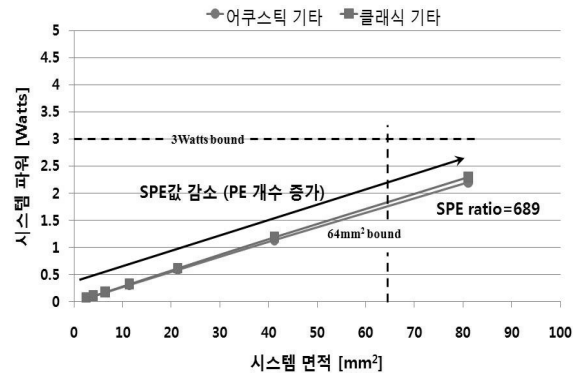


그림 16. 일곱 가지 PE 배열에서 요구되는 시스템 면적과 전력
Fig. 16. System area versus power for seven PE configurations.

64 mm²와 3 Watts로 제한되어야 한다 [18]. 그림 16은 대상 악기의 음 합성을 위해 일곱 가지의 PE 배열에서 요구되는 시스템 면적과 전력으로, SPE 값이 689 (PE=384)인 경우를 제외한 모든 PE 배열에 있어 휴대용 악기 개발에 적합함을 알 수 있다.

VI. 결론 및 향후 과제

최근 휴대용 악기 개발을 위한 실시간 음 합성에 대한 요구가 급증하고 있는데, 이러한 휴대용 악기는 시스템 면적과 전력에 있어 제약이 있다. 이를 위해 본 논문에서는 다양한 PE 배열을 갖는 멀티코어 프로세서 아키텍처에 어쿠스틱 기타와 클래식 기타에 대한 사운드 엔진을 구현하여 시스템의 성능, 시스템의 면적 및 에너지 효율을 측정하였다. 130 nm의 동일한 공정과 100 MHz의 클럭 주파수를 갖는 멀티코어 프로세서 아키텍처를 이용하여 44.1 kHz의 샘플링율과 16비트의 양자화비트를 갖도록 대상 악기의 단위음을 합성한 결과, 스펙트럼에서 원음과 매우 유사하였으며, 울산대학교 대학원생 및 교수 10명을 대상으로 MUSHRA 주관 청취 테스트에서도 어쿠스틱 기타 1번 현과 2번현, 클래식 기타 1번 현을 제외한 합성음에 대해서는 좋은 결과를 얻었다. 또한 시스템 효율과 면적 효율에 대해 실험한 결과 시스템 면적 효율은 어쿠스틱 기타와 클래식 기타의 경우 SPE가 5,513과 22,050일 때 가장 높은 효율을 보였으며, 에너지 효율은 SPE가 2,756과 5,513에서 각각 최대의 효율을 보였다. 이처럼 본 논문에서는 단위음 합성에 적합한 PE 구조를 제시하였는데, 향후 기타 솔로 연주법을 추가한 알고리즘에서도 동일한 결과를 보이는지에 대한 연구와 이를 바탕으로 FPGA 등을 이용한 하드웨어 설계에 관한 연구도 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20100027574). 또한 이 논문은 2011년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0017941).

참고 문헌

1. 강명수, 조상진, 정의필, "물리적 모델링 합성법에 기반을 둔 줄 없는 기타 구현", *한국음향학회지*, 28권, 2호, 119-126쪽, 2008.
2. D. Overholt, "The Overtone Violin," *Proceedings of the 2005 International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pp. 34-37, 2005.
3. G. Wang, "Designing Smule's Ocarian: the iPhone's Magic Flute," *Proceedings of the 2009 International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pp. 202-209, 2009.
4. J. Oh, J. Herrera, J. N. Bryan, L. Dahl, and G. Wang, "Evolving the Mobile Phone Orchestra," *Proceedings of the 2010 International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pp. 82-87, 2010.
5. 조상진, 정의필, "산조가야금의 물리적 모델링", *한국음향학회지*, 23권, 7호, 521-531쪽, 2004.
6. M. Karjalainen, J. Backman, and J. Polkki, "Analysis, Modeling, and Real-time Sound Synthesis of the Kantele, a Traditional Finnish String Instrument," in *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 229-232, 1993.
7. 강명수, 조상진, 권순덕, 정의필, "범용 디지털 신호처리를 이용한 국악기 사운드 엔진 개발", *한국음향학회지*, 28권, 3호, 229-238쪽, 2009.
8. L. V. Huynh, 김철홍, 김종면, "퍼지 백터 양자화를 위한 대규모 병렬 알고리즘", *한국정보처리학회논문지*, 16-A권, 6호, 411-418쪽, 2009.
9. S. T. Verma, and T. H. Y. Meng, "Extending Spectral Modeling Synthesis with Transient Modeling Synthesis," *Comput. Music J.*, vol. 24, no. 2, pp. 47-59, 2000.
10. M. Coodwin, "Residual Modeling in Music Analysis-Synthesis," in *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pp. 1005-1008, 1996.
11. V. Valimaki, J. Juopaniemi, M. Karjalainen, and Z. Janosy, "Physical Modeling of Plucked String Instruments with Application to Real-time Sound Synthesis," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 44, no. 5, pp. 331-353, 1996.
12. V. Valimaki, and C. Erkut, "Commutated waveguide synthesis of the clavichord," *Comput. Music J.*, vol. 27, no. 1, pp. 71-82, 2006.
13. T. I. Laakso, V. Valimaki, M. Karjalainen, and U. K. Laine, "Splitting the Unit Delay - Tools for Fractional Delay Filter Design," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 13, no. 1, pp. 30-60, 1996.
14. S. M. Chai, T. Taha, D. S. Wills, and J. D. Meindl, "Heterogeneous Architecture Models for Interconnect-Motivated System Design," *IEEE Trans. VLSI Syst.*, vol. 8, no. 6, 660-670, 2000.
15. S. Nugent, D. S. Wills, and J. D. Meindl, "A Hierarchical Block-based Modeling Methodology for SoC in GENESYS," *15th Annual IEEE International ASIC/SOC Conference*, pp. 239-243, 2002.
16. A. Gentile, S. Sander, L. Wills, and D. S. Wills, "The Impact of Grain Size of the Efficiency of Embedded SIMD Image Processing Architectures," *J. Parallel Distributed Computing*, vol. 64, pp. 1318-1327, 2004.
17. 강명수, 조상진, 정의필, "음질 열화를 줄이고 공격에 강인한 오디오 워터마킹 알고리즘", *한국음향학회지*, 28권, 7호, 653-655쪽, 2009.
18. *International Technology Roadmap for Semiconductors 2007 Edition*, http://www.itrs.net/links/2007itrs/2007_chapters/2007_PIDS.pdf

저자 약력

•강 명 수 (Myeongsu Kang)

한국음향학회지 제28권 2호 참조

•최 지 원 (Jiwon Choi)

한국음향학회지 제29권 3호 참조

•김 용 민 (Yongmin Kim)

한국음향학회지 제29권 3호 참조

•김 중 면 (Jong-Myon Kim)

한국음향학회지 제28권 6호 참조