

# 16 비트 고정소수점 연산기를 이용한 고음질 MPEG-2 Layer-III 오디오 복호화 알고리즘

이근섭\*, 이규하\*, 오현오\*, 황태훈\*, 박영철\*\*, 윤대회\*  
\*연세대학교 전기·컴퓨터공학과, \*\*연세대학교 신호처리연구센터

## High Quality MPEG-2 Layer-III Audio Decoding Algorithm Using 16-bit Fixed-point Arithmetic

Keun-Sup Lee\*, Kyu-Ha Lee\*, Hyen-O Oh\*, Tae-Hoon Hwang\*,  
Young-Cheol Park\*\* and Dae-Hee Youn\*

\*Dept. of Elect. & Computer Eng., Yonsei Univ., \*\*Center for Signal Processing Research, Yonsei Univ.

Email : taraji@cyclon.yonsei.ac.kr

### Abstract

2 채널의 MPEG-2 Layer-III 오디오 복호화 알고리즘이 16 비트의 고정소수점 연산기로도 고음질의 오디오 출력을 얻을 수 있도록 최적화를 수행하였다. 고음질을 얻기 위하여 고정소수점 연산기에서 발생하는 양자화 오차를 최소화 하였으며 각 복호화 과정 별로 최소의 오차를 발생시키는 알고리즘을 제안하고 사용하였다. 고정소수점 모의실험은 C-언어를 사용하여 수행되었으며, ISO-IEC 13818-4 Compliance Test 를 수행하여 최적화된 복호화기가 ISO/IEC 13818-4 audio decoder 의 기준을 만족함을 보였다.

### I. 서론

최근 오디오 복호화기 구현에 많이 사용되는 16 비트 고정 소수점 DSP 는 낮은 해상도와 그로 인한 복호화 오차로 고음질을 얻는데 어려움을 가지고 있다. 16 비트 이상의 긴 워드 길이를 갖는 DSP 를 이용하면 보다 나은 음질의 오디오 출력을 얻을 수 있지만 일반적으로 워드 길이가 길어지면 DSP 의 크기도 커지고 전력 소모 또한 증가하게 된다. 따라서 긴 워드길이의 DSP 는 휴대용 기기와 같이 소형의 저전력 구조가 요구되는 응용 분야에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 2 채널의 MPEG-2 Layer-III 오디오 복호화 알고리즘[1][2]이 16 비트의 고정소수점 연산기로도 ISO/IEC 13818-4 audio decoder 의 기준을 만족하는

고음질을 얻을 수 있도록 최적화를 수행하였다. 고음질을 얻기 위하여 고정소수점 연산기에서 발생하는 양자화 오차를 최소화하였으며 각 복호화 과정 별로 최소의 오차를 발생시키는 알고리즘을 제안하고 사용하였다. 16 비트 고정소수점 연산기는 모토로라의 DSP56600 프로세서 패밀리인 DSP56654 프로세서의 Data ALU 를 모델링하여 최적화에 사용하였다. 또한 고정소수점 모의실험은 C-언어를 사용하여 수행되었으며, 모의실험의 출력 PCM 샘플을 이전에 수행한 부동소수점 모의실험 결과와 비교하여 RMS(Root Mean Square) 값으로 나타내었다. 최종적으로 ISO/IEC 13818-4 Compliance Test 를 수행하여 최적화된 복호화기의 성능을 측정하였다[3]. 또한 모든 모의실험에는 Compliance Test 용 비트열인 'compl.bit'이 사용되었다.

### II. DSP56654 프로세서의 ALU 구조

모토로라의 DSP56654 프로세서는 16 비트 DSP 로서 저전력의 디지털 셀룰러 어플리케이션의 용도로 설계되었으며, 다양한 고정 소수점 DSP 알고리즘을 구현할 수 있다[4]. DSP56654 프로세서의 DATA ALU 구조는 그림 1과 같다.

그림 1과 같이 DSP56654 Data ALU 는 MAC (Multiplier-Accumulator) 유닛을 가지고 있어서 MAC 연산을 1 클럭 사이클 안에 수행할 수 있다. 그리고 8 비트의 가드 비트를 갖는 두개의 어큐뮬레이터를 가지고 있다. 또한 어큐뮬레이터 쉬프트 뿐만 아니라 40 비트

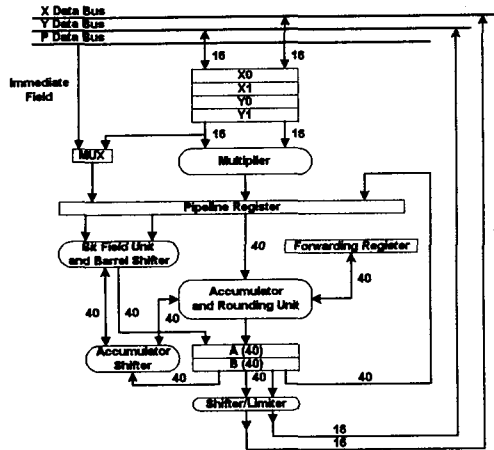


그림 1. DSP56654 프로세서의 DATA ALU

의 배럴 쉬프터도 가지고 있어서 쉬프트 연산을 수행하기도 편리하다. Data ALU 마지막 단계는 두개의 데이터 버스 쉬프터와 리미터가 있어서 연산 결과에서 발생할 수 있는 오버플로우나 언더플로우를 막을 수 있다. 특히 ALU가 가지고 있는 반올림 유닛은 Two's complement round와 함께 Convergent round도 가능하기 때문에 반올림 시 발생하는 바이어스를 없앨 수 있다.

### III. 복호화 과정 별 알고리즘 최적화

MPEG-2 Layer-III 오디오 복호화 알고리즘은 부가정보 추출, 스케일 팩터 추출, 허프만 복호화, 역 양자화, 조인트 스테레오, 스펙트럼 재정렬, 에일리어징 감소, IMDCT(Inverse MDCT), 그리고 합성 필터의 순서로 이루어져있다[1]. 이들 복호화 과정 중 역 양자화 과정은 정수형태의 스펙트럼 계수값을 실수형태로 바꾸어주는 과정으로 이후의 과정에서는 실수 연산이 수행되므로, 역 양자화 과정 이후부터 고정소수점 오차가 발생하게 된다. 따라서 이들 루틴 중 비교적 연산량이 많으며 고정소수점 오차를 주로 발생시키는 연산인 곱셈이 많은 역 양자화, IMDCT, 그리고 합성 필터 과정에 대해 최적화를 수행하였다.

#### 3.1 역 양자화 과정 최적화

역 양자화 과정은 비선형 양자화기로 양자화되어 정수 형태로 표현되어있는 스펙트럼 계수들을 원래의 실수 값으로 되돌리는 과정으로 식은 다음과 같다[1].

$$x_i = \text{sign}(is_i) \times |is_i|^{\frac{4}{3}} \dots\dots\dots(1)$$

위의 식을 고정소수점 연산기로 구현하기 위해서는 미리 값을 계산해 놓은 테이블로 구현하는 것이 적합하다[5]. 그러나  $is$ 가 가질 수 있는 값의 범위는

$|is_i| \leq 8206$ 으로 모든  $is$  값에 대해 테이블을 만들기에 너무 범위가 넓다. 따라서  $|is_i| \leq 256$ 에 해당하는 256개의 테이블만을 만들고 그 이상의 범위는 선형보간법을 사용하여 근사화하는 방법을 사용하였다.

그렇지만 이러한 방법은 테이블에 사용되는 메모리량을 줄일 수 있는 장점이 있지만, 근사화 과정에서 오차가 발생하는 단점도 있다. 일반적으로 이 근사화 오차는 고정소수점 연산에서 발생하는 오차에 비해 크기 때문에 바로 이 근사화 오차를 줄일 수 있는 방법이 필요하다.

근사화 오차를 줄이는 방법으로 위의 식 (1)을 다음 식 (2)와 같이 바꾸어 보았다.

$$x_i = \text{sign}(is_i) \times |is_i|^{\frac{1}{3}} \times |is_i| \dots\dots\dots(2)$$

즉,  $|is_i|^{\frac{4}{3}}$ 에 대한 테이블 대신  $|is_i|^{\frac{1}{3}}$ 에 대한 테이블을 만들고  $|is_i|^{\frac{1}{3}}$  값에 대해 선형보간법을 수행하였다. 두 테이블의 선형보간법에 의한 근사화 오차는 다음 그림 2와 같다. 그림과 같이  $|is_i|^{\frac{1}{3}}$ 의 테이블을 이용한 선형보간법이  $|is_i|^{\frac{4}{3}}$ 의 경우에 비해 절반의 근사화 오차를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 그림 3으로 설명할 수 있다. 즉,  $|is_i|^{\frac{1}{3}}$ 의 선형보간에 사용된 직선이  $|is_i|^{\frac{1}{3}}$ 에  $|is_i|$ 이 곱해지는 과정에서  $|is_i|^{\frac{4}{3}}$ 의 곡선의 형태를 따라가기 때문에 그림 3(c)와 같이 근사화 오차는 더 줄어들게 되는 현상이 나타난다. 이렇게 줄어든 오차는 그림 2에서와 같이  $|is_i|^{\frac{4}{3}}$ 의 선형보간 오

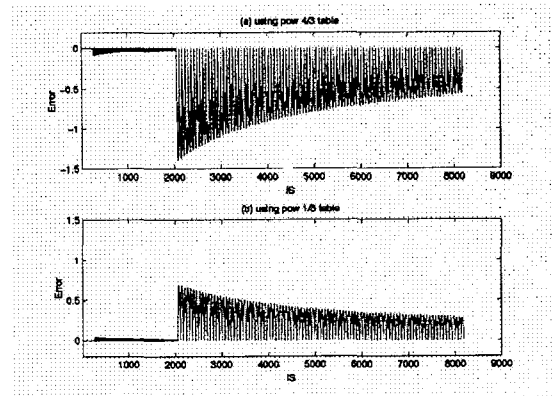


그림 2. 4/3 테이블(a)과 1/3 테이블(b)을 이용한 선형보간법 근사화 오차 비교

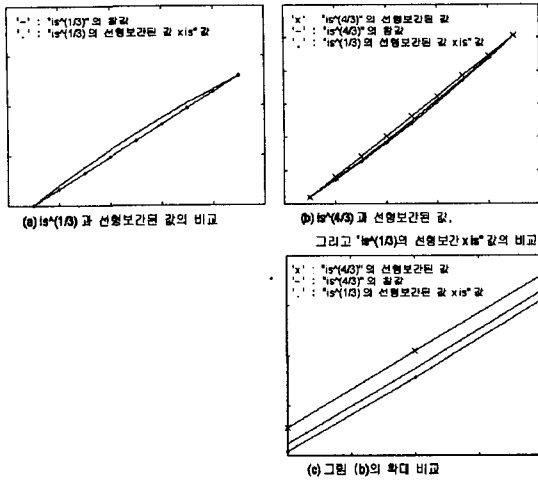


그림 3. 선형보간법의 근사화 오차 분석

차의 1/2 이 되는 것으로 나타났다. 따라서 식 (2)를 선택하는 것 만으로 역 양자화 과정에서 발생하는 근사화 오차의 최대값을 절반으로 줄일 수 있다. 그렇지만  $|s_i|^{1/3}$  테이블을 이용하는 방법은 근사화 오차를 줄일 수 있는 장점이 있지만 곱셈을 한번 더 해야 하므로 그만큼의 연산량이 추가로 더 필요한 단점도 있다.

### 3.2 IMDCT, 합성필터 알고리즘 선택

IMDCT 과정과 합성필터 과정은 복호화 과정들 중에서도 많은 연산량을 요구하기 때문에 일반적으로 구현 시에 고속 알고리즘이 사용되는 과정들이다. 그렇지만 만약 고속 알고리즘이 기존의 알고리즘에 비해 더 많은 고정소수점 오차를 발생시킨다면 고음질 복호화기에는 적합하지 않을 수도 있다. 따라서 고속 알고리즘과 기존의 알고리즘에서 발생하는 고정소수점 오차를 측정하여 비교할 필요가 있다.

비교에 사용된 고속 알고리즘은 다음과 같다. IMDCT 과정에서는 long 블록의 경우 Lee's 고속 DCT 알고리즘[6]을 9-포인트 IDCT 로 변형하여 사용하였으며, 합성필터 과정에서도 Lee's 고속 알고리즘을 매트릭싱 과정에 적용하였다.

고정소수점 모의실험은 다음과 같이 수행되었다. 복호화 과정 중 IMDCT 과정과 합성필터 과정에서 발생하는 고정소수점 오차만을 측정하기 위해 그 이전에 있는 복호화 과정들은 모두 부동소수점 연산으로 처리하였다. 또한 고정소수점 오차를 줄이기 위해서 두 경

표 1. 고속 알고리즘의 고정소수점 오차 비교 (RMS)

	기존 알고리즘 (dB)	고속 알고리즘 (dB)
IMDCT	1.0034	1.3251
합성필터	4.3488	4.4123

우 모두 코사인 계수는 무부호형(unsigned) 값을 사용하였다.

표 1은 위의 고정소수점 모의실험을 통해 얻어진 결과이다. 이 결과는 부동소수점과 고정소수점 모의실험을 각각 수행하고 두 16 비트 PCM의 차이값을 RMS 값으로 나타낸 것이다. 따라서 이 값들은 고정소수점 모의실험 결과의 평균적인 오차를 나타낸다.

일반적으로 고속 알고리즘은 몇 개의 단계로 나누어져서 각 단계마다 연산결과를 메모리에 저장하는 식으로 구현이 된다. 따라서 이처럼 메모리에 저장될 때마다 연산 결과값에 반올림에 의한 오차가 더해지게 된다. 결국 하나의 변수에 연산 결과값이 계속 누적되는 기존의 알고리즘에 비해 고정소수점 오차가 큰 것이 일반적이다. 위의 표 1에서도 고속 알고리즘의 경우가 더 큰 오차를 갖는 것으로 나타났지만 그 차이는 1dB 가 넘지 않을 정도로 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 이 정도의 고정소수점 오차 차이를 감당할 수 있는 경우에는 고속 알고리즘을 적용하는 것이 더 유리하다.

### 3.3 복호화 과정 별 데이터 길이 최적화

DSP56654 프로세서는 기본적으로 16 비트의 데이터를 처리한다. 데이터의 길이는 연산 결과의 정확성에 직접적인 영향을 끼치므로, 만약 16 비트 데이터 형식으로 얻을 수 있는 출력 PCM의 정확성이 낮을 경우 더 많은 비트를 사용하여야 한다. 그러나 일반적으로 데이터에 레지스터의 길이보다 더 많은 비트를 사용하게 되면 그 데이터 형식을 사용한 연산은 좀더 복잡해지며 또한 더 많은 연산량을 요구한다. 따라서 데이터 길이를 결정할 때는 고정소수점 오차 외에도 연산량을 고려하여야 한다.

데이터 길이를 결정하기 위해서 그림 4와 같이 복호화 과정 별로 데이터 길이를 다르게 하여 5 가지 경우로 나누고 각각에 대해 부동소수점과 고정소수점 모의실험 간 오차의 RMS 값을 구하였다. 이 모의실험에서는 연산량을 고려하여 ROM 테이블의 데이터 길이는 16 비트로 고정하였다. 아래 그림에서 경우-IV는 합

	Requant	Stereo	Anti-aliasing	IMDCT	Synthesis filter
I	16 bits				
II	32 bits			16 bits	
III	32 bits			16 bits	
IV	32 bits			16	
V	32 bits				

그림 4. 데이터 길이 결정을 위한 5 가지 모의실험

표 2. 복호화 과정 별 데이터 길이 모의실험 결과

	RMS (dB)	최대 오차
I	43.0324	± 36
II	15.3565	± 14
III	7.7502	± 5
IV	6.3585	± 3
V	4.3635	± 2

성필터의 매트릭싱 과정 이후에만 16 비트의 데이터 형식을 사용한 것을 나타낸 것이다. 또한 역 양자화 과정에서 나온 데이터는 에일리어징 감소 과정에 이를 때까지 같은 메모리 영역에 위치하므로 역 양자화 과정부터 에일리어징 감소 과정까지는 같은 데이터 형식으로 고정하였다.

각각의 5 가지 경우에 대한 모의실험 결과를 표 2에 나타내었다. 모의 실험 결과에 의하면 32 비트의 데이터를 많이 쓸수록 고정소수점 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 표 2에 의하면 경우-IV와 경우-V에서 1 비트 내외의 평균적인 오차와 2 비트의 최대 오차를 보이고 있다. 두 경우의 차이는 결국 합성필터 과정에서 사용되는 V-버퍼의 용량 차이로 나타나는데, 경우-IV는 경우-V에 비해 1k 워드(1 워드=16 비트)에 해당하는 메모리 사용량을 줄일 수 있다. 따라서 메모리 사용량과 고정소수점 오차를 고려하여 두가지 경우 중 하나를 선택할 수 있다.

#### IV. 실험 및 결과

알고리즘 최적화 과정을 통해 고정소수점 오차를 최소화시킨 복호화기의 음질 손실이 허용범위 안에 있는지를 확인하기 위하여 ISO/IEC 13818-4 Compliance Test를 수행하였다. 테스트 과정은 다음과 같다. 먼저 테스트 비트열로 복호화된 24 비트의 오디오 PCM을 얻고, 이것과 Reference 오디오 PCM의 차이값으로 RMS 값을 구한다. 이렇게 구한 차이의 최대 절대값(Max. abs. diff.)과 RMS 값(Max. diff. RMS)을 기준 값들과 각각 비교하는 것이다[3].

ISO/IEC 13818-4 Compliance Test의 결과를 표 3에 나타내었다. 테스트 결과 경우-IV는 두개의 기준값을 모두 넘어서는 반면, 경우-V는 두 최대값을 모두 넘지 않고 있다. 따라서 최적화 과정을 거친 경우-V의 복호화기가 ISO/IEC 13818-3 audio decoder의 기준을 만족할

표 3. ISO/IEC 13818-4 Compliance Test 결과

	Max. diff. RMS	Max. abs. diff.
ISO/IEC 13818-3 audio decoder	8.8097 e-6	6.1035 e-5
경우-IV	2.4968 e-5	7.9155 e-5
경우-V	3.9479 e-6	1.6332 e-5
경우-V(고속)	4.4954 e-6	2.7895 e-5

만큼 고음질의 오디오 PCM을 얻을 수 있음을 증명한다. 그리고 경우-IV와 경우-V는 모두 IMDCT와 합성필터에 고속 알고리즘을 사용하지 않은 경우이다. 표 3에 의하면 기준을 만족하는 경우-V에 대해 고속 알고리즘을 적용시킨 결과(경우-V(고속))도 역시 ISO/IEC 13818-3 audio decoder의 기준을 만족하는 것을 알 수 있다. 따라서 복호화기의 음결과 연산량을 고려하였을 때 경우-V와 같이 모든 복호화 과정에 32 비트의 워드 길이를 사용하고 IMDCT와 합성필터 과정에 고속 알고리즘을 사용하는 것이 고음질의 MPEG-2 Layer-III 오디오 복호화 알고리즘으로 적합하다.

#### V. 결론

2 채널의 MPEG-2 Layer-III 오디오 복호화 알고리즘이 16 비트의 고정소수점 연산기로도 고음질의 오디오 출력을 얻을 수 있도록 알고리즘 최적화를 수행하였다. 고정소수점 연산기에서 발생하는 음질 손실을 줄이기 위해 적은 근사화 오차를 발생시키는 역 양자화 알고리즘을 제안하였으며, 복호화 과정 별 데이터 길이에 따른 오차를 다양한 경우에 대하여 분석하였다.

ISO/IEC 13818-4 Compliance Test를 통하여 모든 복호화 과정에 32 비트의 워드 길이를 사용하고 IMDCT와 합성필터 과정에 고속 알고리즘을 사용한 MPEG-2 Layer-III 오디오 복호화 알고리즘이 ISO/IEC 13818-3 audio decoder의 기준을 만족시키는 고음질의 복호화 알고리즘임을 증명하였다.

#### 참고 문헌

- [1] ISO/IEC 11172-3 "Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media at up to about 1.5 Mbit/s (Part 3: MPEG-Audio)"
- [2] ISO/IEC 13818-3 "Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio (Part 3: MPEG-Audio)", 2nd Edition, Feb., 1997
- [3] ISO/IEC 13818-4 "Generic coding of moving pictures and associated audio information (Part 4: Compliance testing)"
- [4] Motorola, *DSP56600 16-bit Digital Signal Processor Family Manual*, 1996
- [5] 김진원, 정남훈, 김준석, 이근섭, 이충용, "MPEG-1 계층 III 오디오 복호화기의 VLSI 설계," 제 12 회 신호처리합동학술대회, pp.847-850, 1999
- [6] Byoung Gi Lee, "A New Algorithm to Compute the Discrete Cosine Transform," IEEE Trans. on Acoustic, Speech and Signal Processing, Vol. ASSP-32, No.6, pp.1243-1245, 1984