

# 슈퍼스칼라 프로세서에서 모험적 갱신을 사용한 하이브리드 값 예측기

신영호, 윤성룡, 박홍준, 이원모, 김주익, 조영일  
수원대학교 전자계산학과  
e-mail : vicho@mail.suwon.ac.kr

## A Hybrid Value Predictor using Speculative Update in Superscalar Processors.

Young-Ho Shin, Sung-Lyong Yoon, Hong-Jun Park,  
Won-Mo Lee, Ju-Ik Kim, Young-Il Cho  
Dept of Computer Science, The University of Suwon

### 요약

슈퍼스칼라 프로세서는 성능향상을 위해 명령어 반입 폭과 이슈 폭을 증가시키고 있다. 최근 여러 논문들에서 데이터 종속성을 제거하기 위해서 명령어의 결과 값을 예상하는 메커니즘이 연구되었다. 그러나 그러한 예측기들은 예상한 명령어의 실제 결과 값으로 예상 테이블을 갱신하기 전에 그 명령어를 다시 예상할 때 예상 실패율이 증가하여 프로세서의 성능을 감소시킨다.

본 논문에서는 비 순서적(out-of-order)으로 이슈 및 실행하는 프로세서에서 예상 적중율을 향상시키기 위해 명령어 반입 시 결과 값을 예상하는 동시에 예측기 테이블을 모험적으로 갱신(Speculative update)하는 하이브리드 결과 값 예측기를 제안한다.

본 논문에서 제안한 모험적 갱신이 예상 적중률을 향상시킬 수 있음을 보이기 위해 SimpleScalar 3.0 툴 셋을 사용하여 SPECint95 벤치마크 프로그램에서 명령어를 예상한 후 결과가 구해져서 예상테이블을 수정하기 전에 그 명령어를 다시 예상하는 빈도수를 측정하였다.

## 1. 서론

현재 고성능 마이크로프로세서의 성능을 향상시키기 위해서는 명령어 수준 병렬성(Instruction Level Parallelism : ILP)을 최대한 이용하는 것이 중요하다. 명령어 수준 병렬성을 저해시키는 주요 장애 요소로는 제어종속과 데이터 종속이 있다. 제어종속은 조건분기 명령어 반입될 때 분기 방향과 다음에 수행할 명령어 주소를 예상하는 분기 예상기법으로 해결할 수 있다. 데이터 종속에는 false-data 종속과 true-data 종속이 있으며, false-data 종속에 의한 장애는 재명명(rename) 방법으로 제거될 수 있다. 그러나 선행 명령어의 결과를 입력으로 사용하는 true-data 종속관계의 명령어들은 병렬로 수행할 수 없다. 이러한 true-data 종속성을 제거하기 위해 선행 명령어의 결과를 예상하고, 종속적인 명령어가 예상 결과를 사용하도록 하는 결과값(value) 예상기법을 사용하게 된다[1-7].

결과값 예상기법으로는 Last 예측기[1,2], Stride-based 예측기[5,6], Two-level 예측기[5], 다양한 형태의 하이브리드 예측기[5,7,10] 등이 제안되었다. 여러 예측기를 혼

합한 하이브리드 예측기는 하나의 예측기를 사용하는 것보다 높은 예상 정확성을 갖는다.

고성능 프로세서에서 명령어의 반입 폭과 이슈 폭이 계속해서 증가되는 추세이다. 이로 인해 명령어가 예상된 후 실제 결과값으로 예상 테이블을 수정하기 전에 다시 그 명령어를 예상하면 stale 데이터를 사용하게 됨으로서 틀린 예상이 발생하게 된다. 특히 stride-based 값 예측기와 two-level 값 예측기에서는 그러한 예상 실패로 인해 성능에 미치는 영향이 심하다.

본 논문은 예상 시 stale 데이터를 사용함으로써 발생하는 예상실패를 최소화하기 위해 명령어의 결과값 예상 시 예상테이블을 모험적으로 갱신하여, 결과값이 구해지기 전에 동일 명령어의 값을 예상할 때 예상정확도를 향상시킬 수 있는 하이브리드 예측기를 제안한다.

## 2. 관련 연구

Last 결과 값 예측기[1,2]는 명령어의 마지막 수행 결과 값을 사용하여 명령어의 결과 값을 예상한다. Last 예측기는 적은 하드웨어 비용을 요구하나, 예상 정확도

는 40~50%로 낮다는 단점을 갖는다.

Stride-based 결과 값 예측기[5,6]는 명령어의 마지막 수행 결과 값에 마지막 두 번의 수행 결과 값의 차(stride)를 더하여 명령어의 결과값을 예상한다.

Two-level 결과 값 예측기[5]는 명령어에 의해 생성된 4개의 다른 결과 값을 저장하고 이전 수행 패턴을 사용하여 결과 값을 예상하는 방법이다. Two-level 예측기는 높은 예상 정확성을 갖지만 많은 하드웨어 비용을 요구한다는 단점이 있다.

Stride-based 결과 값 예측기와 Two-level 결과 값 예측기를 결합한 하이브리드 결과 값 예측기[5,7]는 신뢰성 카운터(Confidence Counter)에 의해 한 예측기의 예상 값을 선택하는 방법이다. 명령어가 두 개의 예측기에서 모두 엔트리를 갖고 있다면, 높은 신뢰성 카운터 값을 갖는 예측기의 예상 값을 선택하여 예상 정확성을 높일 수 있다. 그러나 프로세서의 명령어 반입 폭과 이슈 폭이 증가함에 따라 동일 명령어가 예상 테이블 엔트리를 갱신하기 전에 다시 접근하는 경우가 발생하게 된다. 이런 경우 stale 값 사용으로 부정확한 값을 예상하게 되고, misprediction 페널티가 증가하여 프로세서의 성능을 낮아지게 된다.

### 3. 제안된 하이브리드 결과 값 예상방법

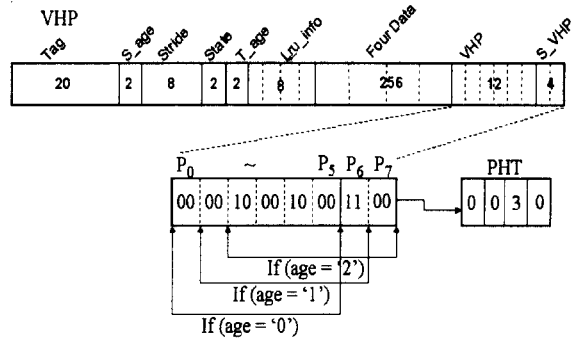
이 장에서는 본 논문에서 제안한 메커니즘의 구조와 예측기의 예상 메커니즘에 대해 알아본다.

#### 3.1 제안된 예측기 구조

슈퍼스칼라 프로세서에서는 명령어의 예상은 명령어가 반입될 때 이루어지며, writeback 때 예상한 결과 값과 실제 결과 값을 비교하여 올바른 결과 값으로 갱신된다. 명령어 반입 때 예상과 갱신을 동시에 수행하는 제안된 하이브리드 결과 값 예측기의 엔트리 구조는 [그림 1]과 같다.

태그(Tag)필드는 유효한 엔트리를 표시하기 위해서 명령어 주소의 상위 비트 일부를 저장해 놓은 부분이고, 결과 값(Four Data)필드는 최근에 사용된 결과 값들 중에서 중복되지 않은 서로 다른 네 개의 결과 값을 저장한다. Lru\_info 필드는 결과 값 필드에 저장된 값들의 사용된 순서에 대한 정보를 갖는다. 상태(State)필드는 2비트로 되어있으며 세 개의 상태(Init, Transient, Steady)를 가진다. 상태필드가 Init('00'), Transient('01') 상태를 나타내는 경우는 예상을 위해 준비중인 단계를 나타내며 예상을 수행하지 않으며, Steady('10') 상태일 때만 예상을 수행한다.

Stride 필드는 마지막 수행된 결과 값과 마지막 두 번의 수행된 결과 값의 차를 갖는다. VHP(Value History Pattern) 필드는 결과 값이 중복되는지에 상관없이 단순히 결과가 나타난 순서대로 Four Data 필드에 대응하는 위치가 저장된다. Stride Age 필드(S\_age)와 Two Age



[그림 1] 제안된 예측기의 테이블 엔트리 구조

필드(T\_age)는 각각 2 비트 카운터로 구성되며, 초기 값은 '0'이다. 그리고 명령어 반입 때 결과 값 예측기를 lookup할 때 예상된 예측기의 Age 카운터 값을 '1'씩 증가하고, writeback 때 '1'씩 감소한다. S\_VHP 필드는 6비트로 되어있으며, 모험적 갱신 시 예상된 값의 Four Data 필드에 대응하는 위치를 저장한다.

Kai-Wang의 하이브리드 결과 값 예측기에 새로이 추가된 세 개의 필드(S\_age 카운터 필드, T\_age 카운터 필드, S\_VHP 필드)는 제안된 결과 값 예측기가 모험적 갱신을 할 수 있게 하여 Stale 값에 인한 예상 실패율을 감소시키는데 사용된다.

#### 3.2 제안된 예측기의 예상 메커니즘

제안한 예측기의 메커니즘은 위에서 설명한 두 개의 Age 카운터와 S\_VHP를 이용하여 이루어진다. 제안된 메커니즘의 설명을 위해 하이브리드 결과 값 예측기에서 Two-Level 결과 값 예측기 부분만 설명하고자 한다.

반입된 명령어가 결과 값 예측기를 lookup할 때 Age 카운터가 '1'이상이면 이전에 반입된 명령어가 갱신(update)되기 전에 lookup한 경우이다. 즉 stale 결과 값을 사용하게 되는 경우가 발생한다. 그러나, S\_VHP를 사용하여 PHT를 인덱스하면 문제를 해결할 수 있다. [그림 1]에서 보듯이 Age 카운터의 값에 따라 올바른 VHP를 사용하여 PHT(Pattern History Table)를 인덱스함으로써 Stale 결과 값을 사용하지 않을 수 있다. 즉 Age 카운터가 '0'일 경우는 예상한 후 실제 결과값으로 예상 테이블이 갱신된 다음 명령어가 반입된 경우이므로 VHP값( $P_0 \sim P_5$ )을 사용하고, 예상된 값의 위치를  $P_6$ 에 저장하여 결과값이 구해지기 전에 그 명령어를 다시 예상시 stale 데이터를 사용하여 예상되는 것을 방지한다. Age 카운터가 '1'일 경우는 반입된 명령어가 한 번 수정되기 전에 명령어가 다시 반입된 경우이므로 VHP값( $P_1 \sim P_6$ )을 사용하고, 예상된 값의 위치를  $P_7$ 에 저장한다. Age 카운터가 '2'일 경우는 반입된 명령어가 두 번 수정되기 전에 명령어가 반입된 경우이므로 VHP값

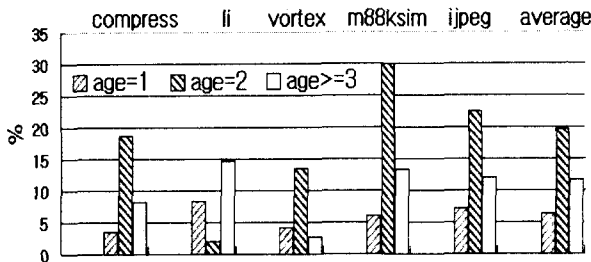


그림 2 (a) 8-이슈 실험결과

( $P_2 \sim P_7$ )을 사용하여 PHT를 인덱스 한다.

#### 4. 실험 결과

이 장에서는 제안된 모험적 갱신을 사용한 하이브리드 값 예측기가 얼마나 예상 정확도를 향상시킬 수 있는지 잠재력을 확인해 보기 위해 명령어를 예상한 후 예상테이블을 수정하기 전에 동일 명령어를 다시 예상하는 빈도수를 알아보기 위해 SimpleScalar 3.0 툴 셋을 사용하여 SPECint95 벤치마크 프로그램에서 시뮬레이션을 수행한다.

[그림 2(a), (b)]는 각각, 8-이슈 폭과 16-이슈 폭에서 stale 데이터로 예상하는 결과이다. "age=1"은 전체 예상한 명령어중 명령어가 예상된 후 결과가 구해지기 전에 그 명령어를 한 번 다시 예상하는 비율을 나타낸다. "age=2"는 전체 예상한 명령어 중 명령어가 예상된 후 결과가 구해지기 전에 그 명령어를 두 번 다시 예상하는 비율을 나타내고, "age>=3"은 명령어가 예상된 후 결과가 구해지기 전에 그 명령어를 세 번 이상 다시 예상하는 비율을 나타낸다.

시뮬레이션 결과를 보면 전체 예상 명령어중 stale 데이터로 예상되는 비율이 8-이슈 폭에서는 37%, 16-이슈 폭에서는 33%를 차지하므로 제안된 모험적 갱신을 사용한 하이브리드 값 예측기를 사용 시 예상 정확도가 개선될 것이 기대된다.

#### 5. 결론

본 논문은 슈퍼스칼라 프로세서에서 비순서적(out-or-order)으로 명령어가 이슈 및 수행할 때 반입된 명령어의 결과값을 예상 후 명령어가 수행을 완료시켜 예상테이블을 수정하기 전에 다시 그 명령어를 예상시 Stale 결과값에 인한 예상 실패를 방지하는 하이브리드 결과값 예상 메커니즘을 제안한다. 제안한 예측기는 명령어 반입시 예상과 예측기의 갱신을 동시에 수행함으로써 예상 정확도를 향상시킬 수 있다.

실험 결과 SPECint95 벤치마크 프로그램에서 명령어를 예상 후 결과값이 구해지기 전에 그 명령어를 다시 예상하는 비율이 8-이슈 폭에서는 평균 37%, 16-이슈

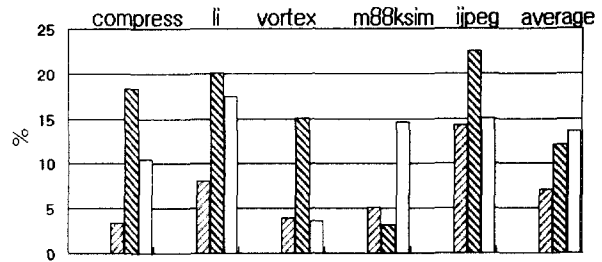


그림 2 (b) 16-이슈 실험결과

폭에서는 평균 33%로서, 이는 제안된 예측기를 사용하면 예상 정확도가 향상될 것을 증명해준다.

앞으로, 제안된 메커니즘이 실제로 얼마나 예상적중율을 향상시키고, 프로세서의 성능을 얼마나 향상시킬 수 있는지 시뮬레이션하는 것이 향후 연구과제이다.

#### 6. 참고문헌

- [1] M. H. Lipasti, C. B. Wilderson, J. P. Shen, "Value Locality and Load Value Prediction," ASPLOS-VII, pp. 138-147, October 1996.
- [2] M. H. Lipasti and J. P. Shen, "Exceeding the Dataflow limit via Value Prediction," MICRO-29, pp. 226-237, December 1996.
- [3] Y. Sazeides and J. E. Smith, "The Predict-ability of Data Values," MICRO-29, pp. 226-237, December 1996.
- [4] F. Gabbay and A. Mendelson, "Can Program Profiling Support Value prediction?," MICRO-30, pp. 270-280, December 1997.
- [5] K. Wang and M. Franklin, "Highly Accurate Data Value Prediction using Hybrid Predictors," MICRO-30, pp. 281-290, December 1997.
- [6] J. Gonzalez and A. Gonzalez, "The potential of data value speculation to boost ilp," ICS-12, 1998
- [7] G. Reinman and B. Calder, "Predictive techniques for aggressive load speculation," MICRO-31, 1998
- [8] T. Nakra, R. Gupta and M.L. Soffa, "Global Context-Based Value Prediction", HPCA-5, January 1999.
- [9] D.C. Burger and T.M. Austin, "The simplescalar tool set, version 2.0" Technical Report CS-TR-97-1342, University of wisconsin, Madison, June 1997.
- [10] 윤성룡 외 5인, "A Hybrid Value Predictor using Dynamic Classification in Superscalar Processors" 정보처리학회 춘계학술대회 논문집, 2000.