

가상화 I/O 성능 향상을 위한 인터럽트 전용 가상 프로세서 기술

이동우, 엄영익
성균관대학교 정보통신대학
{lightof, yieom}@skku.edu

Virtual Processor for Interrupt Handling to Improve I/O Performance in Virtualization

Dongwoo Lee and Young Ik Eom
College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

요 약

가상화 기술의 발전과 더불어 산업 전반에서 가상화 기술이 널리 사용되고 있지만 여전히 높은 장치 처리량을 요구하는 워크로드의 경우 가상화 환경에서 사용되지 못하고 있다. 가상머신의 I/O는 가상 장치를 에뮬레이션 하는 가상화 오버헤드에 의해 장치 성능을 제약받고 있기 때문이다. 최근 가상머신에서 직접접근을 지원하는 장치의 등장으로 I/O 요청 중 발생하는 가상화 비용을 효과적으로 제거 하였지만, 장치 요청이 끝난 후 발생하는 인터럽트를 가상머신이 처리하는 과정에서 발생하는 비용이 여전히 성능을 제약하고 있다. 이에 본 논문에서는 인터럽트 과정의 비용을 줄이기 위한 인터럽트 전용 가상 프로세서 기법을 제안한다.

1. 서론

가상화 기술은 Green IT를 위한 데이터센터의 서버 통합에 뿐만 아니라 다양한 형태의 클라우드 서비스에 적용되어 기업과 개인에게 널리 사용되고 있다. 이 같은 결과는 최근의 하드웨어 수준의 가상화 지원과 더불어 가상화 환경에서의 프로세서와 메모리가 물리적 하드웨어에 근접한 성능을 보여주고 있기 때문이다. 그러나 여전히 높은 수준의 장치 처리량을 요구하는 I/O 기반의 워크로드는 가상화 환경에서 사용되지 못하고 있다. 그 이유는 가상머신의 I/O를 처리하는 과정에서 발생하는 지연(latency)으로 인해 장치의 성능저하가 발생하기 때문이다.

전통적인 가상화 방식은 가상머신의 I/O 요청을 하이퍼바이저(hypervisor)로의 모드전환을 통해 호스트머신에 전달하고 호스트머신에서 이를 실제 물리적 장치에 전달하는 복잡한 과정을 통해 이루어졌다. 이러한 복잡한 과정에 의한 성능저하를 해결하기 위해 가상머신이 직접 물리적 하드웨어에 접근 할 수 있도록 하는 I/O 가상화 기법[1]이 제안되었다. 해당 기술이 제안되었을 때는 해당 기술을 지원하는 장치의 높은 비용 때문에 널리 쓰이지 못하였으나 최근 이러한 장치의 비용이 많이 낮아져 많은 가상화 서버에서 해당 기술이 사용되고 있다.

이렇게 가상머신에서 하드웨어에 직접 I/O 요청할 수 있도록 하여 복잡한 I/O 요청과정을 제거했음에도 불구하고 여전히 가상화 환경에서의 I/O 성능 저하가 발생되었는데,

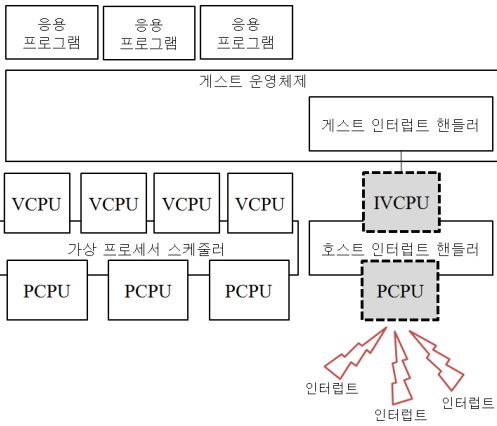
이는 장치의 I/O 요청에 대한 처리가 끝났을 때 발생하는 인터럽트에 대한 고려가 되지 않았기 때문이다. 전통적인 가상화 방식에서 I/O 요청 시에는 한 번의 모드전환이 발생한다. 그러나 I/O 요청이 끝난 후 발생하는 물리적 인터럽트를 다시 가상머신에 전달하는 과정에서는 최대 두 번의 모드전환이 발생하게 된다. 여러 연구[3][4]에서도 이러한 문제를 인식하고 게스트에서 직접 인터럽트를 처리할 수 있도록 하는 방법을 제안 하였으나 이러한 기술은 새로운 하드웨어 기능[2]을 요구하거나 아키텍처에 종속적인 해결방법[3]을 사용하는데 그쳤다.

이에 본 논문에서는 멀티코어 시스템에서 운영체제의 인터럽트 요청을 담당하는 가상프로세서를 사용하여 불필요한 모드전환을 발생시키지 않고 인터럽트를 게스트에 전달하는 새로운 기법을 제안한다. 본 기법은 하드웨어 아키텍처에 비 종속이므로 현재 가상화 환경에 널리 쓰이는 시스템 아키텍처뿐만 아니라 추후 가상화를 지원하게 될 어떠한 프로세서에도 적용하여 인터럽트로 인한 가상화 I/O 성능 저하 문제를 해결 할 수 있다.

2. 인터럽트 전용 가상 프로세서

가상화를 지원하는 하드웨어[1]를 사용하거나 FIFO 큐를 이용한 I/O 전달 방식[3]으로 가상머신의 I/O 요청으로 인한 모드전환을 제거 가능하다. 그러나 이러한 기법을 적용하여 I/O 요청 중에 발생하는 지연을 감소시키더라도 여전히 가상머신의 I/O의 성능은 실제 물리적 장치에 미치지 못한다. 이러한 성능 저하는 I/O 요청을 받은 장치가 해당 요청을 완료했을 때 발생하는 인터럽트를 처리하는 과정에서 발생한다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-차세대정보컴퓨팅기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0006423).



(그림 1) 제안 시스템 아키텍처

이전의 연구에서도 가상화 환경에서의 인터럽트 처리가 가상화 I/O 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 인식하였다. 해당 연구[4]는 인터럽트를 처리하는 가상 프로세서의 스케줄링 우선순위를 조절하여 인터럽트가 가상 프로세서 스케줄링에 의해 처리가 미루어지지 않도록 하였다. 그러나 가상머신의 I/O 완료 알림은 I/O 요청과 마찬가지로 처리 과정에서 모드전환이 발생하게 되는데 이러한 모드전환은 인터럽트를 가상머신에 전달하는 경우와 가상머신이 인터럽트를 확인하기 위해 APIC에 접근하는 경우 두 번 발생하게 되므로 I/O 성능에 큰 영향을 미친다.

본 논문에서 제안하는 인터럽트 전용 가상 프로세서 기술은 인터럽트를 가상프로세서가 빨리 처리할 수 있게 할 뿐만 아니라 특별한 하드웨어 기능의 도움 없이 인터럽트로 인한 모드 전환을 줄일 수 있다. 그림 1과 같이 멀티코어 시스템 환경에서 IRQ 할당(affinity)를 이용해 물리 코어 하나에 모든 IRQ를 할당하면 다른 프로세서가 가상모드에서 동작할 때 인터럽트를 받아 모드전환이 발생하는 것을 방지 할 수 있다. 그리고 가상머신의 인터럽트 처리를 담당하는 별도의 IVCPU를 추가한 후 게스트의 IRQ도 모두 IRQ를 IVCPU에 할당한다. 이러한 IVCPU는 평소에는 가상 프로세서 스케줄러에 의해 스케줄링 되지 않고 중단되어 있다가, 호스트 인터럽트 핸들러에서 IVCPU에 인터럽트를 전달하게 되면 실행을 재개하여 게스트의 인터럽트 핸들러를 수행하게 된다. 이러한 방법은 인터럽트를 처리하는 물리 프로세서와 가상 프로세서 모두 유저모드의 응용프로그램의 동작과 독립적으로 수행되기 때문에 장치 인터럽트로 인한 잦은 모드전환을 방지하여 가상화 장치 성능을 효율적으로 향상 시킬 수 있다.

3. 제안 기법의 평가

가상화 환경에서 인터럽트가 I/O성능에 미치는 영향을 살펴보고 본 논문의 제안기법을 적용 하였을 경우 얻을 수 있는 성능 향상을 확인하기 위해 네트워크 성능 실험을 진행하였다. 실험 환경은 가상화 호스트는 Intel i5-3570 쿼드코어 프로세서를 사용하고 SR-IOV[1]를 지

<표 1> 네트워크 I/O 수행 중 모드 전환 수행횟수

	PCPU1	PCPU2	PCPU3	PCPU4
IO_INSTRUCTION	17	21	19	0
EXTERNAL_INTR	3972	4005	3798	1275323
APIC_ACCESS	5788	6102	5511	1459550
HLT	1123	1376	1221	17217
EPT_VIOLATION	281	213	307	115

원하는 Intel X520 NIC카드를 사용하였다. 가상머신은 두 개의 VCPU를 사용하고 각각의 VCPU는 3개의 물리코어만을 사용하도록 하고 나머지 1개는 인터럽트 가상 프로세서에 사용하도록 했다. 가상머신에서 SR-IOV를 이용해 10Gbit 네트워크에 연결하고 이를 통해 Netperf 네트워크 벤치마크를 수행 하였다.

표 1 은 네트워크 벤치마크 수행 중 하드웨어 성능 카운터(HPC)를 통해 모드전환의 수행횟수를 측정된 결과이다. 본 실험에서는 네트워크 장치에 대한 IRQ만을 인터럽트 가상 프로세서에 할당 하였기 때문에 기타 장치와 타이머 인터럽트에 의해 모드전환이 발생하였지만 거의 대부분의 모드전환이 PCPU4에서 발생하고 있으므로 나머지 PCPU들에서 동작하는 가상 머신의 성능저하가 최소화 되었다.

4. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 가상화 I/O에서 인터럽트 처리가 미치는 영향을 확인하고, 이를 해결하기 위한 인터럽트 전용 가상 프로세서 기술을 제안하였다. 해당 기법은 가상머신에게 인터럽트를 전달하는 과정을 가상머신의 응용프로그램 동작과 분리함으로써 I/O 가상화로 인한 Latency가 가상머신에 주는 영향을 최소화 하였다.

향후 가상화 지원 하드웨어뿐만 아니라 소프트웨어 기반 가상화 I/O 가상화 기술에 인터럽트 전용 가상 프로세서를 도입하여 저비용 고효율 가상화 환경 구축에 기여 할 수 있도록 연구를 진행해 나가야 할 것이다.

참고문헌

[1] Y. Dong, X. Yang, X. Li, J. Li, K. Tian, and H. Guan. High performance network virtualization with SRIOV. In 16th Intl. Symp. on High Performance Computer Architecture. pages 1 - 10, jan. 2010.

[2] A. Landau, M. Ben-Yehuda, and A. Gordon. SplitX: split guest/hypervisor execution on multi-core. In Proc. of the 3rd Conf. on I/O virtualization, pages 1 - 1, 2011.

[3] A. Gordon, N.Har'El, A. Landau, M. Ben-Yehuda, and A. Traeger. Towards exitless and efficient paravirtual I/O. In Proc. of the 5th Annual International Systems And Storage Conference, pages 4, 2012.

[4] L. Cheng, and C. Wang. vBalance: using interrupt load balance to improve I/O performance for SMP virtual machine. In Proc. of the 3th ACM Symp. on Cloud Computing, pages 2, 2012.