

간헐적 컴퓨팅 환경을 지원하는 저전력 에너지 체커 구현

곽준호*, 조정훈*

*경북대학교 전자전기공학부

junho7513@gmail.com, jcho@knu.ac.kr

Implementation of Low-power Energy Checker Supporting Intermittent Computing Environment

Junho Kwak*, Jeonghun Cho*

*School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University

요 약

최근 에너지 하베스팅 기술이 발전하여 배터리 교체가 어려운 환경에서 동작하는 엣지 장치들에 많이 적용되고 있다. 하지만 해당 기술이 적용된 에너지 하베스팅 장치는 간헐적으로 동작하는 문제를 가진다. 이를 해결하기 위해 에너지 체커로 실시간 에너지 상태를 파악하고 에너지 상태에 따라 프로그램을 제어하는 JIT (Just-In-Time) 기반 모델이 많이 연구되고 있다. JIT 기반 모델에서 에너지 체커는 필수적이지만 상당한 에너지 오버헤드를 가지고 있다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 에너지 체커의 에너지 오버헤드를 최소화하기 위해 저전력 에너지 체커 구현에 대한 실험을 진행했다. 내부 ADC (Analog-to-Digital Converter) 기반 에너지 체커, 내부 비교기 기반 에너지 체커, 그리고 외부 비교기 기반 에너지 체커 등 다양한 에너지 체커를 구현했고 각 에너지 체커에 대한 에너지 오버헤드를 측정 및 비교했다. 그 결과, 저전력 외부 비교기를 사용한 외부 비교기 기반 에너지 체커가 가장 작은 에너지 오버헤드를 가지는 것을 확인했다. 또한, ADC의 측정 주기를 최적화하여 ADC 기반 에너지 체커의 에너지 오버헤드를 더욱 줄일 수 있는 가능성도 확인했다.

1. 서론

최근 에너지 하베스팅 기술이 크게 발전함에 따라 장치가 동작하기에 충분한 에너지를 수확하여 수확한 에너지만으로 프로그램을 동작시킬 수 있게 되었다 [1]. 이러한 에너지 하베스팅 기술의 발전은 장치가 배터리 없이 동작할 수 있게 하여 배터리 교체의 필요성을 없앤다. 그 결과, 배터리 교체가 어려운 환경에서 동작하는 엣지 장치들에 에너지 하베스팅 기술이 많이 적용되고 있다.

하지만 에너지 하베스팅 기술이 적용된 에너지 하베스팅 장치는 간헐적으로 동작할 수 있다. 수확되는 에너지양이 주변 환경에 따라 달라질 수 있기 때문에 충분한 에너지가 수확되지 못할 때에는 장치가 꺼질 수 있다. 이후, 충분한 에너지가 수확되어 장치가 켜지고 다시 동작하더라도 이러한 상황이 반복되면 장치는 꺼졌다 켜지기를 반복하며 간헐적으로 동작한다. 간헐적 컴퓨팅 환경에서의 문제점은 프로그램이 정상적으로 수행되지 못할 수 있다는 것이다 [2]. 프로그램이 순방향으로 진행하지 않으면서 같은 동작만을 반복할 수 있고, 데이터 일관성이 깨져 부정확한 동작 혹은 결과를 유발할 수 있다.

이러한 간헐적 컴퓨팅 환경에서의 문제점을 해결하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다. 연구에서 제

안하는 다양한 모델 중 대표적인 모델은 JIT (Just-In-Time) 기반 모델이다. 간헐적 컴퓨팅 환경에서 JIT 기반 모델은 장치의 에너지 상태를 실시간으로 측정하고 에너지 상태에 따라 프로그램을 제어한다. 대표적인 JIT 기반 모델으로는 Mementos 와 Hibernus 등이 있다 [3, 4]. JIT 기반 모델은 에너지 상태를 바탕으로 동작하기 때문에 에너지 상태를 측정하는 에너지 체커를 필수적으로 가지고 있다.

에너지 체커는 프로그램 동작 이외에 에너지 상태를 측정하는 동작을 수행하기 때문에 추가적인 에너지 오버헤드를 발생시킨다. 장치의 에너지 상태를 감시하기 위한 에너지 체커의 지속적인 동작으로 인해 에너지 체커의 에너지 오버헤드는 무시하지 못할 정도의 크기를 가진다. 수확한 에너지만을 사용하는 에너지 하베스팅 장치는 효율적인 에너지 사용이 매우 중요한데 에너지 체커의 에너지 오버헤드는 에너지 효율성을 낮춘다. 따라서 에너지 체커의 에너지 오버헤드를 최소화시키는 것이 필요하다.

JIT 기반 모델에 관한 기존 연구들은 프로그램을 제어하는 동작을 설계하고 최적화시키는 것에 집중했다. 기존 연구들에서 에너지 체커는 에너지 오버헤드에 대한 고려 없이 에너지 상태를 측정하도록 구현되기만 하였다. 그 결과, 각 모델에서의 에너지 체커는

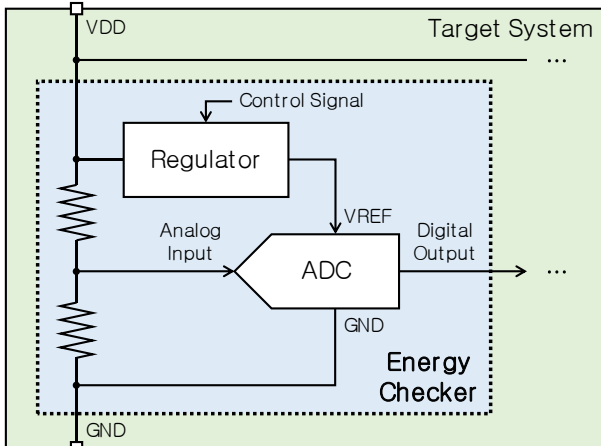
ADC (Analog-to-Digital Converter), 비교기 등 서로 다르게 구현되었다. 하지만 에너지 체커의 에너지 오버헤드가 에너지 효율성에 큰 영향을 미치기 때문에 이를 고려할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 저전력 에너지 체커의 구현을 위해 다양한 에너지 체커에 대한 실험을 진행한다. 우선, 내부 ADC 기반의 에너지 체커, 내부 비교기 기반의 에너지 체커, 그리고 외부 비교기 기반의 에너지 체커 등 다양한 에너지 체커를 구현한다. 다음으로, 각 에너지 체커의 에너지 오버헤드를 측정한다. 그후, 측정된 에너지 체커의 에너지 오버헤드를 비교하여 최소 에너지 오버헤드를 가지는 저전력 에너지 체커를 확인한다.

2. 에너지 체커

에너지 체커는 장치의 에너지 상태를 측정하기 위해 다양한 방법으로 구현될 수 있다. 현재 연구되고 있는 JIT 기반 모델들의 에너지 체커는 대부분 ADC 또는 비교기로 구현되어 있다. 따라서 본 논문에서도 ADC와 비교기를 사용해 에너지 체커를 구현한다. 구현된 에너지 체커의 종류는 내부 ADC 기반 에너지 체커, 내부 비교기 기반 에너지 체커, 그리고 외부 비교기 기반 에너지 체커이다.

2-1. 내부 ADC 기반 에너지 체커



(그림 1) 내부 ADC 기반 에너지 체커의 구조.

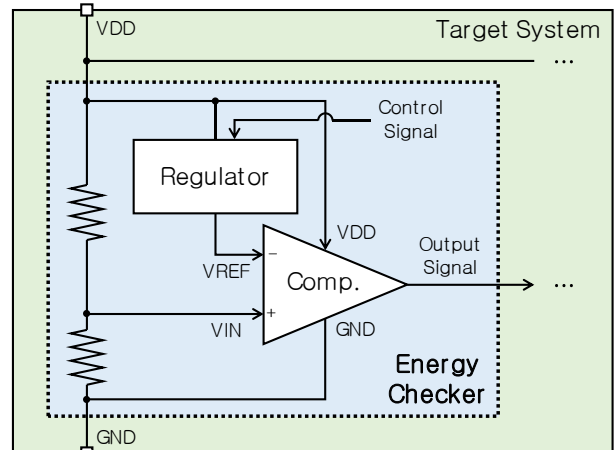
내부 ADC 기반 에너지 체커는 시스템 내부의 ADC를 통해 장치의 에너지 상태를 측정한다. 해당 에너지 체커의 구조는 그림 1과 같다. 내부 ADC 기반 에너지 체커는 ADC뿐만 아니라 시스템 내부의 정류기와 분기 저항을 사용하며 에너지 체커가 시스템 내부에 포함된다. 시스템에 입력되는 전압 VDD가 에너지 상태를 나타내기 때문에 에너지 체커는 이를 측정함으로써 에너지 상태를 측정한다.

내부 ADC 기반 에너지 체커는 에너지 상태에 따라 변하는 VDD로부터 일정한 전압을 얻기 위해 정류기를 사용한다. 정류기를 통해 생성된 일정한 전압은 ADC의 참조 전압으로 사용된다. ADC는 참조 전압을 바탕으로 아날로그 전압을 디지털 데이터로 변환하기 때문에 일정한 참조 전압이 필요하다. 이때,

내부 제어 신호를 통해 정류기가 생성하는 전압을 제어할 수 있어 에너지 상태에 따라 참조 전압을 동적으로 설정할 수 있다. 정류기가 생성하는 참조 전압이 VDD보다 작기 때문에 측정할 전압 또한 이에 맞게 스케일링할 필요가 있다. 이를 위해 분기 저항을 사용하며 분기 저항을 통해 VDD를 스케일링하여 ADC에 입력한다. ADC의 출력은 참조 전압과 입력 전압에 따라 변환된 디지털 데이터이다. 제어 신호를 통해 설정한 참조 전압과 VDD의 스케일링 비율을 모두 알고있기 때문에 이를 바탕으로 변환된 데이터가 나타내는 에너지 상태를 파악할 수 있다.

내부 ADC 기반 에너지 체커는 ADC의 설정에 따라 동작이 달라질 수 있다. 먼저, ADC의 해상도 설정에 따라 에너지 상태 측정의 정확도가 달라질 수 있다. ADC의 해상도가 높을수록 변환 시간이 더 소모되지만 입력 전압을 더욱 세밀하게 측정하기 때문에 에너지 상태를 더욱 정확하게 측정한다. 반대로, ADC의 해상도가 낮을수록 변환 시간은 더 짧게 소모되지만 에너지 상태 측정의 정확도가 낮아진다. ADC의 해상도는 에너지 상태 측정의 요구 정확도에 따라 다르게 설정할 수 있다. 다음으로, ADC의 측정 주기 설정에 따라 에너지 상태 측정의 빈도가 달라질 수 있다. ADC의 측정 주기를 길게 설정하면 에너지 상태 측정 빈도가 낮아진다. 이 경우, ADC의 동작 횟수를 줄일 수 있지만 에너지 상태의 급격한 변화를 놓칠 수 있다. 반면, ADC의 측정 주기를 짧게 설정하면 에너지 상태 측정 빈도가 높아진다. 이 경우에는 ADC의 동작 횟수가 증가하지만 에너지 상태를 안정적으로 측정할 수 있다. ADC의 측정 주기는 주변 환경에 따른 에너지 상태의 변화율에 따라 다르게 설정할 수 있다.

2-2. 내부 비교기 기반 에너지 체커



(그림 2) 내부 비교기 기반 에너지 체커의 구조.

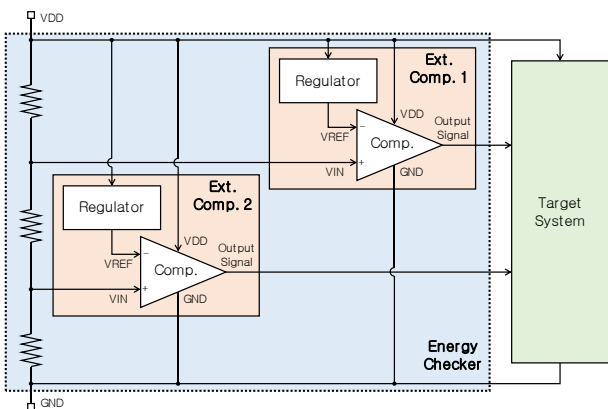
내부 비교기 기반 에너지 체커는 시스템 내부의 비교기를 통해 장치의 에너지 상태를 측정한다. 그림 2는 해당 에너지 체커의 구조를 보여준다. 내부 비교기 기반 에너지 체커 또한 시스템 내부의 정류기와 분기 저항을 함께 사용하며 에너지 체커가 시스템 내부에 포함된다. 그리고 VDD를 측정함으로써 에너지

상태를 측정한다.

내부 비교기 기반 에너지 체커는 비교기에 전원을 공급하기 위해 VDD 를 비교기에 연결한다. 그리고 정류기를 사용해 VDD 로부터 일정한 전압을 생성한다. 정류기가 생성하는 전압은 기준이 되는 에너지 상태를 나타내는 전압으로 비교기에 입력된다. 이때, 내부 제어 신호를 통해 정류기가 생성하는 전압을 제어할 수 있어 기준이 되는 에너지 상태를 동적으로 설정할 수 있다. 정류기가 생성하는 기준 전압이 VDD 보다 작기 때문에 비교할 전압 또한 스케일링할 필요가 있다. 분기 저항을 사용해 VDD 를 스케일링하고 이를 비교기에 입력한다. 비교기의 출력은 비교기의 두 입력 전압에 따라 달라진다. 정류기가 생성하는 전압과 스케일링 비율을 제어함으로써 현재의 에너지 상태가 기준이 되는 에너지 상태에 도달했는지 파악할 수 있다.

내부 비교기 기반 에너지 체커는 기준이 되는 에너지 상태와의 비교를 수행하기 때문에 정밀한 에너지 상태 파악을 하지 못한다. 하지만 내부 제어 신호를 통해 정류기가 생성하는 전압을 제어할 수 있기 때문에 기준이 되는 에너지 상태를 동적으로 바꿀 수 있다. 이를 통해 내부 비교기 기반 에너지 체커는 하나의 비교기를 통해 현재의 에너지 상태를 여러 기준과 비교할 수 있다.

2-3. 외부 비교기 기반 에너지 체커



(그림 3) 외부 비교기 기반 에너지 체커의 구조.

외부 비교기 기반 에너지 체커는 시스템 외부의 비교기를 통해 장치의 에너지 상태를 측정한다. 그림 3 은 해당 에너지 체커의 구조를 보여준다. 외부 비교기 기반 에너지 체커는 정류기를 포함하는 외부 비교기와 분기 저항을 사용하며 에너지 체커가 시스템 외부에 존재한다. 외부 비교기 기반 에너지 체커는 시스템과 동일한 에너지 버퍼로부터 에너지를 공급받지만 시스템에 입력되는 전압인 VDD 를 외부에서 측정함으로써 에너지 상태를 측정한다.

외부 비교기 기반 에너지 체커에서 사용되는 외부 비교기는 내부 비교기와 구조가 유사하다. 외부 비교기 또한 VDD 를 통해 전원을 공급받으며 일정한 전압을 생성하기 위해 VDD 가 정류기에도 입력된다. 이때, 외부 비교기의 정류기는 제어 신호를 받지 않기

때문에 고정된 일정한 전압만을 생성한다는 차이가 있다. 정류기가 생성하는 전압은 비교기에 입력된다. 정류기가 생성하는 전압이 VDD 보다 작기 때문에 비교할 전압을 스케일링하여 비교기에 입력한다. 비교기의 출력은 두 입력 전압을 비교한 결과에 의해 결정되고 이는 대상 시스템에 전달된다.

외부 비교기 기반 에너지 체커는 내부 비교기 기반 에너지 체커와 유사하지만 정류기에 입력되는 제어 신호가 없다. 그렇기 때문에 하나의 외부 비교기는 하나의 기준에 대한 비교만 가능하다. 기준이 되는 에너지 상태가 많을 경우, 에너지 상태와 동일한 갯수의 비교기가 필요하다. 이때, 외부 비교기가 동일하다면 정류기가 생성하는 전압도 동일하기 때문에 서로 다른 기준과 비교하기 위해서는 현재 에너지 상태를 나타내는 전압의 스케일링 비율을 다르게 해야한다. 그림 3 의 에너지 체커는 2 개의 동일한 외부 비교기를 사용하여 기준이 되는 2 개의 에너지 상태와 현재의 에너지 상태를 비교한다.

3. 에너지 오버헤드 측정 실험

앞서 구현한 다양한 에너지 체커의 에너지 오버헤드를 측정하기 위한 실험을 진행했다. 대상 시스템으로는 TI 사의 MSP-EXP430FR5994 LaunchPad Development Kit 를 사용했다. 해당 시스템은 비교기와 최대 12-bit 의 해상도를 가지는 ADC 를 모두 포함하고 있다. 또한, 이들과 연결된 정류기를 내장하고 있기 때문에 해당 시스템 내에서 내부 ADC 및 비교기 기반 에너지 체커를 모두 구현했다. 외부 비교기로는 Maxim Integrated 사의 MAX49017EVKIT 을 사용했다. 이는 저전력으로 동작하는 2 개의 비교기와 정류기를 포함하고 있다. 따라서, 해당 외부 비교기를 사용해 외부 비교기 기반 에너지 체커를 구현했다.

에너지 체커의 에너지 오버헤드를 측정하기 위해 각 에너지 체커의 평균 소모 전류를 먼저 측정하였다. 평균 소모 전류를 측정한 이유는 전압이 변하는 간헐적 컴퓨팅 환경에서도 대상 시스템의 소모 전류는 거의 일정하기 때문이다. 평균 소모 전류는 전력 분석 프로그램인 EnergyTrace 를 통해 측정되었으며 측정 결과는 표 1 과 같다.

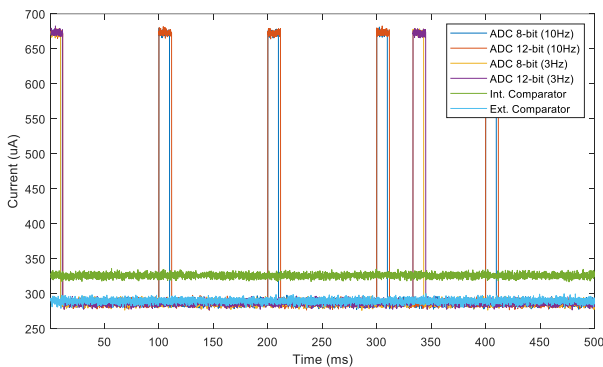
<표 1> 에너지 체커의 평균 소모 전류.

Energy Checker	ADC (8-bit / 12-bit)	Internal Comparator	External Comparator
Average Current Consumption	386uA	39uA	2.7uA

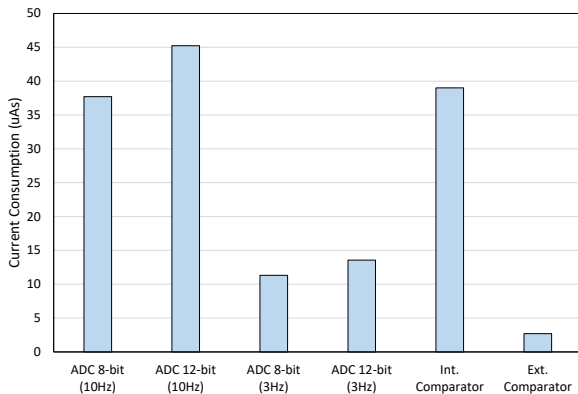
대상 시스템인 MSP-EXP430FR5994 LaunchPad Development Kit 는 활성화 모드 (active mode)에서 기본적으로 287uA 의 전류를 소모한다. 표 1 의 측정 결과는 대상 시스템이 기본적으로 소모하는 전류 외에 에너지 체커가 추가적으로 소모하는 전류이다.

내부 ADC 기반 에너지 체커의 다양한 동작에 대한 에너지 오버헤드를 측정하기 위해 ADC 의 해상도를 8-bit 와 12-bit 로 각각 설정하였다. 하지만, 측정

결과와 같이 두 해상도에 대한 내부 ADC 기반 에너지 체커의 평균 소모 전류는 동일했다.



(그림 4) 시간에 따른 전류 소모 측정 결과.



(그림 5) 전체 전류 소모량 측정 결과.

그림 4 는 EnergyTrace 를 통해 측정된 각 에너지 체커의 시간에 따른 소모 전류를 보여준다. 내부 ADC 기반 에너지 체커에 대해서는 다양한 동작에 대한 실험을 수행하기 위해 측정 주기를 다르게 설정하였다. 내부 ADC 기반 에너지 체커의 각 해상도에 대해 측정 주기가 10Hz 일 때와 3Hz 일 때의 소모 전류를 측정하였다.

내부 ADC 기반 에너지 체커의 경우, 측정 주기에 따라 에너지 체커가 동작할 때에만 전류를 소모하고 그 외에는 전류를 소모하지 않았다. 해상도가 높을수록 동작 시간이 약간 증가하기는 했지만 차이가 거의 없었다. 그렇기 때문에 내부 ADC 기반 에너지 체커의 소모 전류는 측정 주기의 영향을 크게 받았다.

내부 및 외부 비교기 기반 에너지 체커의 경우, 계속해서 동작하기 때문에 지속적으로 전류를 소모하였다. 사용된 비교기의 갯수는 외부 비교기가 더 많았지만 외부 비교기가 내부 비교기에 비해 훨씬 저전력으로 동작하기 때문에 훨씬 적은 전류를 소모했다. 따라서, 내부 및 외부 비교기 기반 에너지 체커는 비교기 자체의 소모 전류에 큰 영향을 받았다.

그림 5 는 각 에너지 체커가 1 초동안 소모한 총 소모 전류량을 보여준다. 내부 ADC 기반 에너지 체커는 동일한 측정 주기에서 해상도가 높을수록 소모 전류량이 약간 증가했다. 하지만 측정 주기가 길수록 소모 전류량은 크게 감소했다. 내부 및 외부 비교기 기반 에너지 체커는 비교기 자체의 소모 전류가 적을

수록 소모 전류량이 더 작았다. 이때, 외부 비교기 자체의 소모 전류가 매우 적었기 때문에 외부 비교기 기반 에너지 체커의 전류 소모량이 3Hz 의 측정 주기를 가지는 내부 ADC 기반 에너지 체커의 전류 소모량보다도 약 76% 더 작았다.

4. 결론

본 논문에서는 저전력 에너지 체커를 구현하기 위한 실험을 수행했다. 먼저, 에너지 상태를 측정하는 다양한 에너지 체커를 구현했다. ADC 와 내부 및 외부 비교기를 사용해 내부 ADC 기반 에너지 체커, 내부 비교기 기반 에너지 체커, 그리고 외부 비교기 기반 에너지 체커를 구현했다. 다음으로, 각 에너지 체커의 에너지 오버헤드를 측정하고 비교했다. 측정 결과는 저전력 외부 비교기를 사용한 외부 비교기 기반 에너지 체커의 에너지 오버헤드가 가장 작다는 것을 보여줬다. 이를 통해 외부 비교기 기반 에너지 체커를 통해 저전력 에너지 체커를 구현할 수 있음을 확인했다.

또한, 내부 ADC 기반 에너지 체커는 측정 주기에 따라 에너지 오버헤드를 더욱 줄일 수 있는 가능성을 보여줬다. 따라서, 앞으로 에너지 오버헤드를 최소화하기 위해 ADC 기반 에너지 체커의 측정 주기를 최적화하는 연구를 진행할 예정이다.

감사의글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2020R1A2C1013836).

참고문헌

- [1] A.P.Sample, D.J.Yeager, P.S.Powledge, A.V.Mamishhev, J.R.Smith “Design of RFID-Based Battery-Free Programmable Sensing Platform,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 11, pp. 2608-2615, 2008.
- [2] B.Lucia, V.Balaji, A.Colin, K.Maeng, E.Ruppel “Intermittent Computing: Challenges and Opportunities,” 2nd Summit on Advances in Programming Languages, Dagstuhl Germany, 2017, pp. 8:1-8:14.
- [3] Ransford, Benjamin, Sorber, Jacob, Fu, Kevin “Mementos: System Support for Long-Running Computation on RFID-Scale Devices,” Proceedings of the Sixteenth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, California USA, 2011, pp. 159-170.
- [4] D.Balsamo, A.S.Weddell, G.V.Merrett, B.M.Al-Hashimi, D.Brunelli, L.Benini “Hibernus: Sustaining Computation During Intermittent Supply for Energy-Harvesting Systems,” IEEE Embedded Systems Letters, Vol. 7, No. 1, pp. 15-18, 2015.