공개키 기반 안전한 센서네트워크 플랫폼 구현

오경희*, 이신경*, 김주한*, 최두호*
*한국전자통신연구원
e-mail : khoh@etri.re.kr

Implementation of Secure Wireless Sensor Network Based on Public Key Cryptography

Kyunghee Oh*, Shinkyung Lee*, Juhan Kim*, Duho Choi*
*Electronics and Telecommunications Research Institute

요 약

센서네트워크는 넓은 지역에 무선 네트워크로 설치된 센서들을 사용하여, 상황 인지로 감지된 데이터를 응용서비스 서버와 연동하는 기술이다. 이는 환경 감시, 대상 추적, 환자 모니터링, 군사적 목적 등 매우 다양한 분야에 사용될 수 있다. 센서네트워크 역시 기존 네트워크에서 필요로 하는 보안 기능을 요구한다. 그러나 센서네트워크에 사용되는 노드들이 사용할 수 있는 자원에 제약이 있어, 기존의 공개키 암호기술을 적용하는데 어려움이 있다. 그런데 최근의 연구결과들은 경량화 구현 기술을 적용하여 공개키를 이용한 키 분배 기법을 센서네트워크에 적용하는 것이 실효성이 있다는 것을 보여준다. 본 논문에서는 TinyOS 환경에서 공개키를 이용하여 센서 노드 간 상호 인증 및 세션키를 생성하여 암호 데이터 통신을 수행하는 안전한 센서네트워크 플랫폼을 구현한 결과를 제시한다.

1. 서론

센서네트워크는 넓은 지역에 무선 네트워크로 설치된 센서들을 통하여 상황 인지를 하여 감지된 데이터를 응용서비스 서버와 연동하는 기술로서, 환경 감시, 대상 추적, 환자 모니터링, 군사적 목적 등 매우 다양한 분야에 사용될 수 있다.

센서네트워크 역시 기존 네트워크에서 필요로 하는 보안 기능이 요구됨은 물론, 센서네트워크 고유의 특성으로 인하여 보안 기능 구현에 있어 고려해야 할 사항들이 있다. 우선 센서네트워크에 사용되는 노드들의 하드웨어들은 주로 작은 메모리를 가지고 전력 사용에 제한을 가지고 있어, PKI와 같은 고급 보안 기능을 사용하는데 제한이 있으며 기존의 암호기술을 경량화하여 구현하여야 한다. 또한 노드들이 공개된 장소에 배치될 수 있으므로, 네트워크에 대한 물리적 보호가 불가능한 경우들이 많다. 따라서 노드 캡처에 의한 공격에 쉽게 노출될 수 있으며, 이를 대비하여 물리적 침입을 방어할 수 있는 하드웨어를 구현하고, 노드 캡처에 의한 내부자 공격을 방어할 수 있는 체계가 필요하다.

센서네트워크에서의 암호화 통신을 위하여 암호화 키를 분배하는 것은 센서네트워크에서 선결되어야 할 문제들 중 하나이다. 센서네트워크에서의 키 분배 문제를 해결하기 위한 다양한 방법들이 제안되어 있는데, 본 논문에서는 공개키 기법을 사용하여 센서 노드들이 서로 인증하고 키를 분배하는 방법을 제시하고, 구현한 결과에 대하여 논의한다.

†본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 핵심기술개발사업[2005-S-088-04, 안전한 RFID/USN 을 위한 정보보호 기술] 사업의 일환으로 수행하였음

2. WSN 보안과 키 분배

센서네트워크에 대한 공격 유형을 살펴보면, 우선 단순히 센서 노드간의 통신을 도청하는 공격이 있다. 이러한 공격은 데이터를 암호화하여 전송함으로써 대처할 수 있다. 그러나 먼저 노드 간 암호화 키 분배의 문제가 해결되어야 한다.

노드 캡처는 물리적으로 노드를 침입하여 암호키와 같은 비밀 정보를 획득하거나, 노드의 기능을 장악하여 내부자 공격에 활용하는 공격이다. 이에 대비할 수 있는 하드웨어 및 소프트웨어 설계가 필요하며, 또한 물리적인 침입을 감지하고, 비밀 정보가 포함된 메모리를 삭제하는 등의 대비책도 가능하다.

센서네트워크 내에 허위 노드가 침입하게 되면, 공격자는 이 노드를 통하여 허위 정보를 유발하거나 실제 데이터의 전송을 방해할 수 있다. 침입한 허위 노드를 통하여 라우팅 경로 조작 등으로 여러 가지 공격들을 수행할 수 있다.

공격 노드가 라우팅 메시지의 경로 비용을 조작하여 주위 노드들의 라우팅 경로가 공격 노드로 향하게 한다면, 주위에서 센싱된 정보들을 도청할 수 있을 뿐만 아니라, 조작도 가능하다. 또한 공격 노드가 여러 개의 ID를 가장하는 공격도 가능하다. 만약 공격 노드로 노트북 컴퓨터와 같은 일반 노드 보다 강력한

장비를 사용한다면, 다른 노드들에 비하여 강한 전파를 사용하여 공격할 수도 있다. Hello flood attack이 그러한 공격의 한 예이다. 이러한 공격들은 허위 노드의 침입이나 노드 캡처 공격에 의하여 이루어지므로, 센서네트워크는 노드 인증 등의 과정과 같은 접근제어를 통하여 허위 노드의 침입을 방지하여야 하며, 제어 메시지를 암호화하고, 노드 캡처를 막기 위한 tamper-proofing을 통하여 방지하여야 한다. 또한 침입을 탐지하기 위하여 라우팅 경로를 다변화 하는, 비대칭 라우팅 경로 설정이나 다중 경로 설정 기법을 사용할 수 있다.

이러한 센서네트워크에서의 보안 위협 특성을 고려할 때, 이에 특화된 보안 기법이 필요하다. 노드 인증과 암호화 통신을 위해 노드들이 사용할 키를 분배하는 기능은 꼭 필요하다.

센서 노드의 자원제약 특성으로 인하여 비대칭 키의 사용 보다는 임의의 두 노드 사이에 대칭키를 분배하기 위한 연구들이 많이 이루어졌다. 만약 동일한 키를 여러 노드에서 같이 사용한다면, 노드 캡처 공격에 의하여 센서네트워크 전체의 비밀 정보들이 유출될 수 있는 위험에 처해질 수 있다. 반대로 임의의 두 노드 간 통신에서 모두 다른 키를 사용한다면 센서네트워크 전체에서 모든 노드 수의 제곱에 해당하는 키가 필요하며, 센서네트워크와 같이 많은 수의 노드가 사용되는 환경에서 각 노드에서 필요한 모든 키들을 노드들이 저장하고 관리한다는 것은 불가능하다. 이를 해결하기 위한 방법들을 살펴보면 다음과 같다.

임의 키 사전 분배 기법은 모든 가능한 키 공간에서 매우 큰 대칭키 풀을 임의로 선택하고, 각 노드들마다 여기서 일정한 개수의 키를 임의로 선택하여 노드의 키 저장 공간에 저장한다. 이후 두 노드가 키를 공유하기 위해서, 자신의 키 저장 공간에 있는 키들의 ID를 이웃 노드들에게 브로드캐스트하고, 이웃 노드들에서 받은 키 ID 값과 자신이 가진 키들의 ID를 비교하여 공통된 키를 찾는다. 만약 동일한 키가 발견되면, 이 키를 사용하여 challenge response 과정을 거쳐 세션키를 생성한다. 만약 공통된 키를 발견하지 못한다면, 이미 세션키를 생성한 다른 이웃 노드로 우회하여 경로키를 생성할 수 있다[1]. 이러한 방법은 birthday paradox 개념을 응용한 것으로, 완벽하지는 않더라도 임의의 두 노드 사이에 성공적으로 키를 생성할 확률이 매우 높다.

그러나 이러한 방법은 어느 한 노드가 공격자에게 노출되었을 때, 센서네트워크의 키 풀 일부가 공격자에게 누출되고, 따라서 노출된 키 풀의 양에 따라 센서네트워크 내의 다른 통신 내용들도 공격자에게 노출되는 단점이 있다. 이를 보완하기 위한 방법들 중 하나로, q-합성수 임의 키 사전 분배 기법이 있다. 위의 임의 키 사전 분배 기법에서 두 노드 사이에 단 하나의 공통키를 사용하여 세션키를 생성했던 것과는 달리, q개의 공통키를 찾은 다음 이를 조합하여 세션키를 생성한다. 만약 공격자가 어느 정도의 키들을 알고 있다 하더라도, 두 노드 사이에 사용된 q개의 공통키들을 모두 알고 있어야만 도청이 가능하게 된다[2]. 그러나 두 노드 사이에 공통키가 q개 미만이라면 세션키를 생성하는 것이 불가능하다는 단점이 있다.

Blom 스킴은 네트워크상의 어떤 임의의 두 쌍이라도 두 노드 사이의 비밀키 생성이 가능하며 노드 캡처에 대해서도 이전의 방법보다 우수한 저항력을 가진다. $(\lambda+1)\cdot N$의 공개 행렬 G와 $(\lambda+1)\cdot(\lambda+1)$의 개인 행렬 D를 기본으로, $A=(DG)^T$를 비밀 행렬로 한다. 이때 D는 대칭행렬이어서, $AG=(AG)^T$의 특성을 가진다. 각 노드i는 A의 i번째 열과 G의 i번째 행을 저장하고, 노드 배치 후 노드i와 노드j가 키를 생성하고자 할 때, 서로 G의 행을 교환한 후, 각각 Kij=AiGj, Kji=AjGi 를 계산한다. Kij = Kji 이므로 두 노드는 동일한 키를 가지게 된다. Blom 스킴은 λ-security의 특성을 갖는다. 이는 개인 행렬에서 노출되는 열의 수가 λ 이하이면 행렬 D를 기반으로 생성된 다른 키들의 안전이 보장됨을 의미한다[3].

이러한 방법 이외에도 노드의 배치 정보를 적용하여 메모리 효율과 연결성을 높인 방법들도 제안되었다[4,5].

IEEE 802.15.4 LR-WPAN을 기반으로 하는 ZigBee[6]의 경우, Trust Center를 사용하여 키를 분배한다. 새로운 노드가 네트워크에 결합하기 위해서는 노드가 라우터에 association을 맺은 후, 이를 경유하여 Trust Center로부터 인증 및 링크키를 분배 받는 방식이다. 그리고 두 노드 사이의 링크키를 생성하는 경우에도 Trust Center가 개입한다. 이렇게 Trust Center를 사용한 인증 및 키 분배 방법은 인증 과정에서 아직 인증 받지 않은 노드로부터 여러 홉의 라우터를 거쳐 Trust Center까지 통신이 이루어져야 한다는 점에서, 노드의 수가 많은 센서네트워크에서는 인증 비용이 많이 소요되며, 공격 노드가 다수의 노드 ID를 가장하는 것과 같은 방법의 서비스 거부 공격을 할 수 있다는 점에 취약하다.

3. 안전한 센서네트워크 플랫폼

공개키 암호 알고리즘을 사용하면 Trust Center와 같은 제3자의 개입 없이 두 노드가 직접 안전하고 신뢰성 있게 키를 생성할 수 있다. 타원곡선 암호 알고리즘 ECC를 사용하여 키를 분배하는 ECDH의 경우, 노드 A가 비밀키 a와 공개키 a*G를, 노드 B가 비밀키 b와 공개키 b*G를 가지고 있을 때, 서로 공개키를 알려준 후, 각각 자신의 비밀키를 사용하여 두 노드 사이에 공유되는 키 a*(b*G) = b*(a*G)를 연산할 수 있으므로, 공유키 a*b*G가 생성된다.

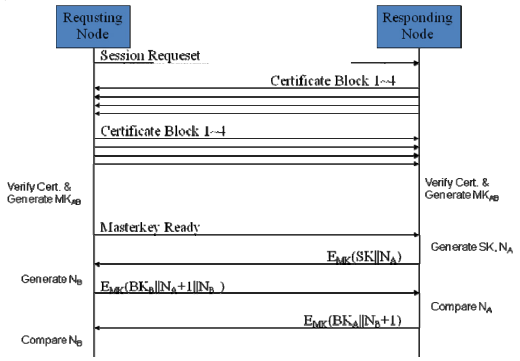
이러한 방법이 기존 컴퓨팅 환경에서 널리 사용되어 왔으나, 센서네트워크에 사용되는 디바이스들의 자원제약으로 인하여 연산량이 많은 공개키 암호화 방식이 적합하지 않으리라 여겨졌다. 그러나 최근의 연구결과들은 공개키 암호화 방식이 센서네트워크 보안에서도 여전히 유효함을 보여준다. TinyOS 기반에 ECC 알고리즘을 구현한 TinyECC의 경우, ECDSA를 이용하여 전자서명에 1.6초, 검증에 2.0초가 소요된다

[7]. 이는 대칭키 기반의 연산시간에 비하면 여전히 긴 시간이지만, 실재 응용에 키 분배 방법으로 구현되어 사용되더라도 충분히 실효성이 있는 시간으로 볼 수 있다.

또한, Truster Center를 이용하는 Kerberos 기반의 노드 키 분배 방법과 타원곡선 암호 알고리즘을 이용한 공개키 암호 프로토콜 ECDH/ECMQV 기반 키 분배 방법의 비교에서, Trust Center와 노드간의 연결 홉수가 3홉 이상이 되면 오히려 공개키 기반의 방식에 비하여 에너지 소모가 더 많아짐을 보여준다[8].

그런데 TinyOS가 단일 쓰레드 운영체제이기에, TinyECC에서 공개키 연산을 처리하는 중에는 센서 노드가 다른 작업을 전혀 수행하지 못하는 문제점이 있다. 본 연구에서는 TinyECC 1.0을 기반으로, 공개키 연산 과정을 태스크 기반으로 수정하여, 공개키 연산 중에도 센서 노드가 수행하여야 할 다른 작업들을 수행할 수 있도록 수정하였다.

그림 1은 두 노드가 상호 인증 후 키를 생성하는 과정을 보여준다. 두 노드가 전자 서명이 포함된 공개키를 주고 받은 후, 서명을 검증하고 ECDH 키 교환 기법에 따라 마스터키 MK_{AB}를 생성한다. 다시 MK_{AB}를 사용하여 실제 데이터 암호화에 사용될 대칭키 SK를 생성하기 위한 키 생성 과정을 수행하게 된다.



(그림 1) ECC 기반 인증 및 키 분배 수행 절차

MSP430 MCU를 탑재한 TmoteSKY 노드에서 구현한 결과에 의하면, 이러한 인증 및 키 교환에 7.5초가 소요되었다. 표 1은 각 과정에서 소요된 시간을 보여준다.

<표 1> ECC 기반 인증 및 키 분배 소요 시간

	누적 시간	소요 시간
인증서 교환	0.4	0.4
서명 검증 및 ECDH	7.0	6.6
세션키 생성	7.5	0.5

또한 본 연구에서, 센서 노드에서 게이트웨이까지 응용 데이터인 센싱 정보들에 대하여 단대단 암호화 보안을 수행하여, 만일 존재할 수 있는 내부자 공격으로부터 데이터 유출 및 위변조를 방지하는 기능을 구현하였다.

4. 결론

공개키 기반의 키 분배 기법은 랜덤 키 사전 분배 기법과 Blom 스킴에 비하여 노드 캡처에 의한 비밀정보 유출 공격에 강하다는 장점이 있으나, 많은 연산량이 필요하다는 단점이 있다. 기존의 컴퓨팅 환경에 비하여 센서 노드에 사용되는 MCU가 공개키 암호 알고리즘의 많은 연산량을 처리하기에 부담이 전혀 없는 것은 아니다. 그러나 구현 결과에서 볼 수 있듯이 노드 사이에 키를 생성하는데 필요한 시간이 7.5초 정도로 그리 길지 않고, 키 생성이 센서네트워크의 초기화 과정에서만 필요한 점을 고려할 때, 공개키 암호 알고리즘을 사용한 센서네트워크 키 분배 기법도 충분히 실효성이 있다고 볼 수 있다. 또한 연결을 맺고자 하는 두 노드간의 통신 이외의 별도 통신 없이 키 분배가 이루어지므로, Trust Center 기반의 키 분배 방식과 비교하여 확장성이 있다. 단지 시험에 사용된 MSP430에서 제공하는 48Kbyte 프로그램 영역 중 공개 암호 알고리즘 관련 코드가 약 15Kbyte를 사용하여, 상대적으로 비중이 컸다.

센서네트워크는 건축물 관리나 환경 감시 등을 위하여 공개된 장소에 배치될 가능성이 매우 높다. 따라서 외부 위협에 대한 노출도 많아 이에 대한 대비가 꼭 필요하다. 전통적인 정보보호 기술들을 센서네트워크에 적용하는 방법 중 하나로, 기존의 네트워크 환경에 널리 사용되고 있는 공개키 기반의 정보보호 기법도 센서네트워크에 적용할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

[1] L. Eschenauer and V. D. Gligor. "A key-management scheme for distributed sensor networks," In Proceedings of the 9th ACM Conference on Computer and Communication Security, pages 41--47, Nov. 2002

[2] H. Chan, A. Perrig, and D. Song. "Random key predistribution schemes for sensor networks," In IEEE Symposium on Security and Privacy, May 2003

[3] R. Blom, "optimal class of symmetric key generation systems,"EUROCRYPT 84 workshop on advances in cryptology: theory. and application of cryptographic techniques, pp. 335-338, Dec. 1985, Paris

[4] W. Du, J. Deng, Y. S. Han, S. Chen, and P. Varshney, "A Key Management Scheme for Wireless Sensor Networks Using Deployment Knowledge," IEEE INFOCOM 04, Hong Kong. March, 2004

[5] D. Huang, M. Mehta, D. Medhi, L. Harn. "Location-aware Key Management for Wireless Sensor Networks," 2nd ACM Workshop on Security of Ad Hoc and Sensor Networks, 2004

[6] ZigBee Specification, ZigBee Document 053474r06, Version 1.0, ZigBee Alliance, June 27, 2005

[7] TinyECC: A Configurable Library for Elliptic Curve Cryptography in Wireless Sensor Networks, Ver 1.0, http://discovery.csc.ncsu.edu/software/TinyECC/, 11-02-2007.

[8] J. Johann Großschadl, A. Szekely, and S. Tillich, "The Energy Cost of Cryptographic Key Establishment in Wireless Sensor Networks," ASIACCS 2007, pp. 380-382. ACM Press, 2007.