情報保護學會論文誌
第17卷 第4號, 2007. 8

# 향상된 사용자 편의성을 갖는 안전한 전자 투표 영수증 발급 방식*

이 윤 호,† 이 광 우, 박 상 준, 김 승 주, 원 동 호‡
성균관대학교 정보통신공학부 정보보호연구소

# A Secure Receipt Issuing Scheme for e-Voting with Improved Usability

Yunho Lee,† Kwangwoo Lee, Sangjoon Park, Seungjoo Kim, Dongho Won‡
Information Security Group
School of Information and Communication Engineering
Sungkyunkwan University

요 약

현재의 전자투표 시스템은 투표자로 하여금 일방적인 신뢰를 강요하고 있으며, 투표자의 의도대로 기록되었음을 입증하지도 않는다. 전자투표가 종이투표 방식보다 많은 장점을 제공할 것이라고 기대하고 있음에도 불구하고 이러한 신뢰성 결여는 전자투표 실시를 막는 주요 요인이 되고 있다. 많은 전문가들은 투표자에게 투표기가 정확하게 동작하고 있음을 확신시키기 위해 영수증을 발급하는 방안을 긍정적으로 고려하고 있다. 본 논문에서는 이미 잘 알려진 cut-and-choose 방식을 응용한 영수증 발급 방식을 제안한다. 제안하는 방식은 특수한 영수증 출력 장치나 제삼자에 의한 투표기 검증 등이 필요없으며, 기존 방식보다 높은 안전성을 제공한다.

ABSTRACT

Current electronic voting systems are not sufficient to satisfy trustworthy elections as they do not provide any proof or confirming evidence of their honesty. This lack of trustworthiness is the main reason why e-voting is not widespread even though e-voting is expected to be more efficient than the current plain paper voting. Many experts believe that the only way to assure voters that their intended votes are casted is to use paper receipts. In this paper, we propose an efficient scheme for issuing receipts to voters in an e-voting environment using the well-known cut-and-choose method. Our scheme does not require any special printers or scanners, nor frequent observations of voting machines. In addition, our scheme is more secure than the previous schemes.

**Keywords** : *Electronic Voting, Receipt, Voter Verifiable Receipt*

접수일: 2007년 5월 2일; 채택일: 2007년 5월 31일
* 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 육성·지원사업의 연구결과로 수행되었음.
† 주저자, leeyh@security.re.kr
‡ 교신저자, dhwon@security.re.kr

## Ⅰ. 서 론

세계적으로 전자 투표 실시에 대해 관심이 고조된 지금, 우리나라에서도 전자 투표 실시를 적극 검토하고 있

다[15]. 전자 투표를 실시할 경우 비용적인 측면에서 여러 장점이 있을 것으로 기대하고 있지만 한편으로는 안전성에 대한 의문이 제기되고 있는 실정이다[6]. 특히, 전자 투표기는 투표자의 선택을 기록, 저장하는 핵심적인 역할을 하고 있는 상황에서 전자 투표기를 신뢰할 수 있는지가 중요한 문제로 부각되고 있는데, 이는 전자 투표기의 동작을 검증하는 것이 현실적으로 매우 어렵기 때문이다. 즉, 투표 과정에서 투표기가 화면에 표시하는 투표값과 개표에 사용하는 투표값이 같지 않을 수 있다는 근본적인 문제 제기로서 이를 해결하지 않으면 전자 투표를 실시하는 것이 불가능하다고 할 수 있다. 전자 투표기에 대한 신뢰성 문제를 제기한 R.Mercuri는 투표값에 대한 전자적인 기록과 병행하여 용지 등의 물리적인 매체에 암호화하지 않은 투표값을 기록하여 투표 기록 검증 및 재검표에 이용할 수 있도록 해야 한다고 주장하기도 하였다[8].

하지만, R.Mercuri 방식의 경우 전자적인 개표 결과를 신뢰할 수 없어 종이 기록으로 재검표를 요구할 경우 현재의 종이 투표 방식과 차이가 없기 때문에 전자 투표 실시에 따른 장점을 기대하기 어렵다. 더욱이 빠른 개표를 위해 릴 형태의 종이 테이프에 투표자의 투표 순서에 따라 암호화하지 않은 투표값을 순차적으로 기록한다면 이로 인해 투표의 익명성 원칙이 훼손될 수도 있다. 따라서, 투표 내용은 암호화된 형태로만 기록하고 암호화된 투표 내용이 정확함을 투표기가 증명하도록 하는 방안이 필요한데, 이를 해결하기 위해 연구되고 있는 것이 투표값 기록에 대한 영수증을 발급하는 것이다[9,10,12-14]. 물론 이 때 발급된 영수증을 통해 투표자는 자신의 투표가 정확하게 기록되었음을 높은 확률로 확신할 수 있지만 다른 사람에게 투표 내용을 증명하는 용도로는 사용될 수 없어야 한다.

2002년과 2004년 D.Chaum에 의해 제안된 영수증 발급 방식은 시각적 암호화(visual cryptography)[4]를 응용한 방식으로서 투표자는 투표 후 직관적으로 기록된 내용을 검증할 수 있지만, 다른 사람에게 투표 내용을 증명하는 것은 불가능하도록 구성한 방식이다[12]. 즉, 전자 투표기는 특수한 프린터와 두 장의 투명한 용지를 이용하여 투표 결과를 출력하는데, 두 장이 겹쳐진 상태로는 투표 결과를 육안으로 확인할 수 있지만 용지를 서로 분리하면 각각의 출력물로는 투표 결과를 확인하는 것이 불가능하다. 투표자는 이 가운데 한 장을 임의로 선택하여 영수증으로 간직하고 나머지 한 장은 참관인이 보는 상태에서 폐기해야 한다. 이 방식의 경우 투표기가 투표자의 선택을 예측할 수 있다면 투표 기록을 조작하는 것이 가능하므로 안전성은 ½이라고 할 수 있다. D.Chaum 방식의 단점은, 영수증 발급에 특수한 프린터와 용지를 필요로 한다는 점과 투표기의 부정 행위 확률이 ½로 비교적 높다는 점이다.

2003년 A.Neff에 의해 제안된 영수증 발급 방식은 코드북을 기반으로 하는 방식으로서, 투표기는 투표자의 선택에 따라 사전에 저장된 코드북을 참조하여 암호화된 투표값을 기록한다[9]. 만약 코드북을 참조하여 기록하지 않고 임의로 다른 값을 기록하거나 순서를 바꿔 출력함으로써 투표 기록을 조작할 수 있는데, 이를 막기 위해 동일한 코드북을 가지고 있는 감시자가 수시로 투표 과정을 거쳐 감시하도록 하고 있다. 이 방식의 안전성은 전체 투표자의 수를 이라고 하고, 감시 횟수를 라고 했을 때 가 된다. A.Neff 방식의 단점은 투표기의 동작을 검증하기 위해 감시자를 신뢰해야 한다는 점과 감시자의 감시 횟수가 투표자의 수만큼 되었을 때 비로소 안전성이 ½이 된다는 점 등이다.

2005년 D.Chaum은 현재의 종이 투표 방식과 유사한 영수증 발급 방식을 제안하였다[14]. 이 방식을 이용할 경우 투표 과정이 현재의 종이 투표 방식과 유사하기 때문에 투표자에 대한 별도의 교육이 필요 없고, 투표기조차도 투표값을 알지 못하는 장점이 있다. 하지만 암호문이 기록된 투표 용지를 사전에 투표자 수보다 훨씬 많이 제작해야 하고, 투표자는 투표 용지에 기록된 암호문이 정당한지를 투표하기 전 검증해야 하는데, 투표자가 직접 투표 용지를 검증하는 것은 불가능하기 때문에 투표 용지 검증을 담당하는 검증자를 신뢰해야 하는 문제가 있다. 또한, D.Chaum의 이전 방식과 마찬가지로 투표 용지를 분리하여 후보자 목록 부분을 폐기해야 하는데, 폐기 과정에서 비밀 투표의 원칙이 훼손될 수 있는 문제가 있다.

전자 투표 시스템에 대한 검증 과정은 크게 다음 두 가지로 생각할 수 있다[9,18].

**검증 1)** *cast-as-intended* 투표자 개개인은 자신의 투표가 의도한 대로 기록되었음을 비교적 높은 확률로 확신할 수 있어야 한다.

**검증 2)** *counted-as-cast* 모든 투표자는 기록된 투표 결과로부터 개표 결과가 나왔음을 검증할 수 있어야 한다.

여기서 두 번째 검증의 경우는 암호화된 투표값을 저

〔표 1〕 장단점 비교

| 비교항목 | A.Neff (2003) | D.Chaum(2002) | D.Chaum(2005) | 제안한 방식 |
|---|---|---|---|---|
| 안전성[1] | $\frac{c}{l+c}$ [2] | $\frac{1}{2}$ | $\frac{b-1}{b}$ [3] | $1-\frac{1}{2^{n-1}}$ [4] |
| 사전 준비 | 코드북 생성 | 없음 | 암호화된 투표 용지 제작 | 없음 |
| 추가 장비 | 없음 | 특수 프린터 및 용지 | 없음 | 없음 |
| 추가적인 신뢰 가정 | 검증자에 대한 신뢰 필요 | 없음 | 검증자에 대한 신뢰 필요 | 없음 |
| 투표자 본인이 직접 검증 | 불가능 | 가능 | 불가능 | 가능 |

1) 투표자 한 명이 전자 투표기를 신뢰할 수 있는 확률.
2) $c$는 검증자의 검증 횟수, $l$은 전체 투표자 수.
3) 투표 용지의 사전, 사후 검증을 제외하고 투표자 한 명이 $b$장의 투표 용지에서 한 장을 선택할 경우.
4) $n$은 후보자 수.

장한 이후 개표 과정에 해당되는데, 믹스넷 등을 이용하여 누구나 검증할 수 있는 여러 방식〔1,7,11,19〕이 이미 제안되어 있으며 이에 대한 자세한 설명은 본 논문의 범위에서 벗어나기 때문에 생략하도록 하겠다. 이에 비해 첫 번째 검증은 전자 투표기에 대한 신뢰성의 문제로서 아직 해결해야 할 과제가 많은 상태이다.

본 논문에서는 첫번째 검증 과정에서 전자 투표 시스템이 만족시켜야 할 두가지 요구 사항을 제시한다.

**Req. 1)** 투표자는 투표기 또는 감시자 등 투표소 내의 어떠한 기기나 사람에 대해서도 신뢰해서는 안된다.

**Req. 2)** 투표 기간 동안에는 암호화된 투표값을 복호화하는 행위 또는 투표값을 유추하는데 사용될 수 있는 어떠한 동작도 실행되어서는 안된다.

투표기를 신뢰하지 못하는 상황에서 다른 기기나 사람에 대한 신뢰를 요구하는 것이 바람직하지 않음은 자명하기 때문에 첫번째 조건은 반드시 필요하다. 전자 투표 시스템 상에서 복호화 키는 안전성을 위해 하나 이상의 관리 기관만 소유하도록 되어 있고, 개표 과정에서의 복호화도 비밀 투표 원칙을 위해 투표 결과에 익명성을 부여한 후 이루어져야 한다. 만약 투표 기간 중 복호화가 가능하다면 매표나 중간 결과 노출로 인해 선거에 부정적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 두번째 조건 역시 반드시 만족해야 한다.

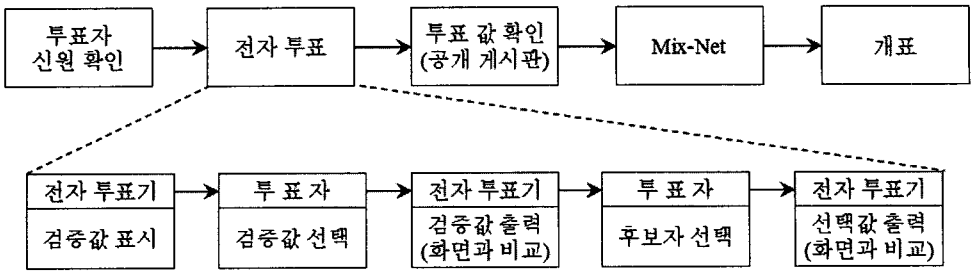
2003년 제안된 A.Neff의 방식은 감시자를 신뢰해야 하는 문제가 있기 때문에 첫번째 조건을 만족시키지 못하며, 2005년 제안된 D.Chaum의 방식은 투표하기 전 투표 용지의 검증을 위해 검증자를 신뢰해야만 하고, 이 과정에서 투표값을 유추할 수 있는 연산이 사용되기 때문에 첫번째와 두번째 조건을 만족시키지 못한다.

본 논문에서는 이 두가지 조건을 모두 만족시킬 수 있는 전자 투표 영수증 발급 방식을 제안한다. 제안하는 방식의 안전성은 최소 ½이상으로 기존 방식 이상의 안전성을 가지며, 투표자 본인은 자신의 투표 결과가 정확하게 기록되었음을 높은 확률로 확신할 수 있지만 다른 사람에게 이를 증명하는 불가능한 방식이다. 또한, 널리 알려진 cut-and-choose 또는 divide-and-choose 기법을 응용한 것으로서, 구현이 용이하며 D.Chaum의 방식과는 달리 특수한 프린터/용지를 필요로 하지 않고, 영수증의 일부를 안전하게 폐기해야 할 필요도 없으며, A.Neff의 방식처럼 감시자를 둘 필요도 없다. 제안한 방식과 기존 방식의 장단점을 요약하면 다음 〔표 1〕과 같다.

하지만 제안한 방식은 사용자에게 여러 번의 무작위 선택을 요구하며, 전자 투표기 화면과 영수증에 기록된 비교적 긴 문자열을 육안으로 비교해야 하는 문제가 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 무작위 선택에 대한 인터페이스 개선 방안과 안전성은 유지하면서 비교해야 할 문자열의 길이를 획기적으로 줄일 수 있는 방안을 함께 제시한다.

## Ⅱ. Cut-and-choose 기반 영수증 발급 방식

전자 투표의 전체 흐름과 그 가운데 제안하는 방식을 그림으로 나타내면 〔그림 1〕과 같다.




〔그림 1〕 전자 투표 전체 과정

### 2.1. 영수증 발급 과정

투표 과정에서 사용되는 파라미터 및 표기법은 다음과 같다.

- $n$ : 후보자의 수
- $E(m,r)$ : 평문 $m$과 임의의 난수 $r$에 대한 ElGamal 암호화 연산
- $E^{-1}(c)$ : 암호문 $c$에 대한 복호화 연산 $(E^{-1}(E(m,r))=m)$

전자 투표기에서 사용하는 암호화 방식은 ElGamal 암호 방식과 같은 확률적 암호화(probabilistic encryption)〔2,3〕가 필수적이다. 왜냐하면, 전자 투표의 경우 평문 공간의 크기가 극히 작아서 난수를 이용하는 확률적 암호화를 사용하지 않으면 특정 암호문에 대한 평문을 찾는 것이 매우 쉽기 때문이다.

이제 신원 확인 과정을 마친 투표자 $i$가 $n$ 명의 후보자에 대해 실시하는 전자 투표 과정을 자세히 설명하면 다음과 같다.

1. 투표기는 $j=1,...,n$를 암호화한 값 $e_j'$와 $e_j''$를 계산한다. (즉, $E^{-1}(e_j')=E^{-1}(e_j'')$) $(e_j', e_j'')=(E(j,w_j'), E(j,w_j''))$ $(w_j', w_j''$는 투표기가 생성한 임의의 난수)
2. 투표자는 $j=1,...,n$에 대해 검증값으로 사용할 $e_j\in\{e_j', e_j''\}$를 임의로 선택한다.
3. 투표기는 투표자가 선택한 $n$ 개의 $e_j$와 함께, $e_j$를 생성할 때 사용한 난수 $w_j\in\{w_j', w_j''\}$를 영수증에 출력한다.
4. 투표자는 출력된 $e_j$가 투표기 화면에 표시된 것과 동일한지 검증한다.
5. 투표자는 검증을 마친 후, 원하는 후보자 $v_i$를 선택한다. (단, $1\le v_i\le n$)
6. 투표기는 $e_{v_i}'$와 $e_{v_i}''$ 가운데 2 단계에서 검증값으로 선택되지 않은 $e_{v_i}'$ 또는 $e_{v_i}''$을 투표값 $e_{v_i}^*$로 하여 영수증에 출력한다. $(e_{v_i}^*\in\{e_{v_i}', e_{v_i}''\})$
7. 투표자는 출력된 $e_{v_i}^*$가 투표기 화면에 표시된 것과 동일한지 검증한다.
8. 투표기는 투표자의 검증이 완료되면 $e_{v_i}^*$를 투표자 $i$에 대한 투표 결과로 공개 게시판에 등록한다.

위의 과정을 마치면, 투표자는 $n$ 개의 검증값으로 $e_j$와 함께 $e_j$에 대응되는 $w_j$, 그리고 투표값 $e_{v_i}^*$가 표시된 영수증을 받게 되는데, 공개 게시판에 등록되어 있는 자신의 투표값과 영수증에 표시된 투표값($e_{v_i}^*$)이 일치하는지 검증한다. 그리고, 다음과 같이 $n$ 개의 검증값 $e_j$를 검증하여 $e_{v_i}^*$의 유효성을 확인한다.

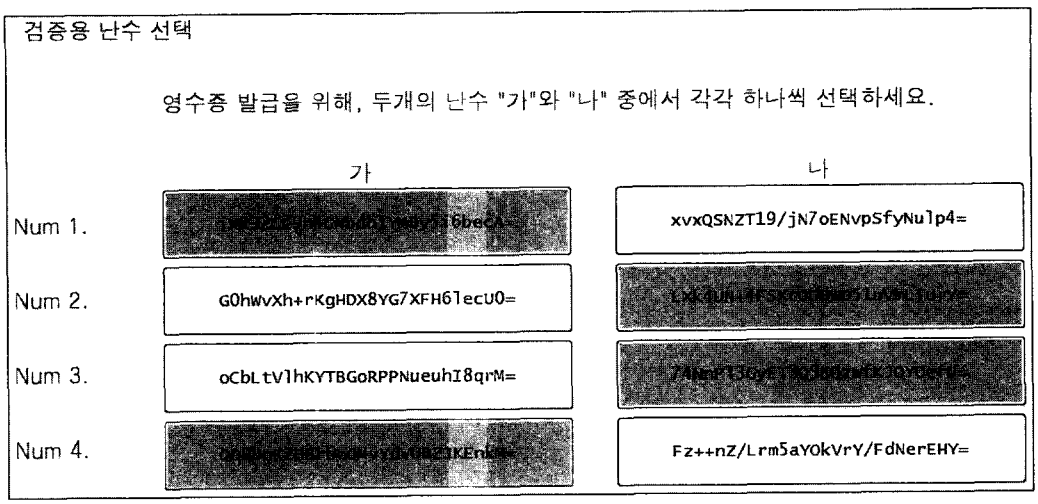
$j=1,...,n$에 대해 $E(j,w_j)=e_j$인지 검증

$n$ 개의 검증값 모두에 대해 위의 검증 과정을 확인하였으면 $e_{v_i}^*$가 유효함을 $1-\frac{1}{2^{n-1}}$의 확률로 확신할 수 있다. 공개 게시판에 등록된 투표값에 대한 암호문은 개별 투표자의 검증을 마친 후 믹스넷을 거쳐 익명성을 만족시킨 다음 개표에 사용된다. 믹스넷을 이용한 개표는 이미 많은 연구를 통해 누구나 검증할 수 있는 안전한 방법이 제안되어 있다〔1,7,11〕.

### 2.2. 투표자 관점에서 본 문제점

제안한 방식의 경우 투표자의 관점에서 본 문제점은 크게 두가지이다. 하나는 무작위 선택의 횟수가 후보자의 수인 $n$ 회로서 매우 많다는 점이고, 다른 하나는 육안으로 비교해야 할 투표기 화면의 내용과 영수증에 출력된 내용이 너무 길다는 것이다.

일반적으로 사람이 무작위 선택에 취약하다는 것은




(a) 투표기 화면

| | 비교값(암호화->해쉬값) | 난수 |
|---|---|---|
| Num 1. | ixK32CE9h4CNbdhlYMBy5i6becA= | pUa+VoiJckWMNIXzyyaBGRYRsUJhnk9+u9n5YcBVHa9GHWt83pPCty f5uPR6Mykk3BKoy2KhLKI8sucWW47NbM+yHk8X+szUP6DTyO2WHF3W KtntWt2axOUWtJdfOw1UyHXHFZMgjEdtiSMU8AGZXULZRpKefyjFmm 9rKUYgcUE= |
| Num 2. | LXk4UN+4FSXcOODWD51uVmLTu+Y= | w5kwXoHuTyuw7XUHpY3qjUWPdhRDQY8whqpyAzGuC3y318YlHadnEJ meUnXkUPLNP8612H32QaCidvfn7ESIhRGyC6CiSb+Hm83O54c+HdN2 LcPmOVRgchF5s8LJCqWtU4+iNoKmaV+8NAKjH3WEQF4yuqSofX3zcn SbHG7nEmO= |
| Num 3. | 74NnPl3GyET3Q3BQzWfKJQYOefU= | jnjK9H2EfYqNKAlhJQiEBESjsPimCCSbUbA3lCqq6LQf4VRsezGnAG UDATYKiCi6XGhJDBKvMARTV2OkIcbqrDKhV6o7WNvuIHvulIYqujnA 5BmrTZsoxioFfzDWqwodFWBZ2DNOK9pCUIL6l5H4Z63DWDP22zxLA3 VYGPah+lk= |
| Num 4. | QD9UnK2HBrboQMvYdVUBZJKEnkM= | xrIXaAowtCg+1Jm6TqfFkPQXOnPRrt8flsl0+WWuNYKFSCYZ4fKRwy kgFO5LAMEmcBxUdB7EJpIrSk+Q7XFqgXBR50y32bCRW8W+0j/kTppg eN2EqLsFI+zGLPM152j2vRbOhxCi7+qOwTzHtfaZrxuWy8h5Kky+QQ HKKtxKrak= |

(b) 출력된 영수증

〔그림 2〕 후보자가 4 명인 경우 검증값을 선택한 화면과 그에 따라 출력된 영수증

이미 알려진 사실이다. 따라서, 무작위 선택은 가능한 최소로 줄이는 것이 바람직하다. 시각적 암호화를 이용한 D.Chaum의 영수증 발급 방식의 경우 투표자의 무작위 선택은 1 회이다. 따라서, $n$ 회를 1 회로 줄이는 방안이 필요하다.

영수증에 출력되는 검증값 비교는 보다 심각한 문제를 안고 있다. 만약 ElGamal 암호 방식에서 소수 $p$가 1,024 비트라면, 암호문은 2,048 비트의 길이를 갖게 된다. 사람이 육안으로 짧은 시간 내에 $n$ 개의 2,048 비트 문자열 쌍을 비교한다는 것은 사실상 불가능하다. 암호학적으로 안전한 해쉬 함수를 적용하여 해쉬값을 비교하는 방법을 생각할 수 있지만, 해쉬 함수의 출력도 160 비트 이상으로서 Base64 인코딩을 적용하여 사람이 인지하기 쉬운 알파벳으로 인코딩한다고 가정해도 28 자 이상의 알파벳을 비교해야 하기 때문에 무리가 있다. 아래 그림은 후보자가 4 명인 경우 검증값을 출력한 예로서, ElGamal 암호화 결과값에 SHA-1 해쉬 함수와 Base64 인코딩을 적용하였다. 이렇게 하여도 각 검증값은 28 자의 알파벳으로 구성되어 있어 짧은 시간 내에 정확하게 검증하는 것이 사실상 불가능하다. 위 〔그림

2]는 제안한 방식을 구현한 결과인데, (a)의 투표기 화면에서 모두 4 번의 무작위 이진 선택을 하였으며, 그 결과 출력된 (b)의 영수증과 (a) 화면을 비교하여 값이 일치하는지 검증해야 한다.

## Ⅲ. 안전성을 저해하지 않는 사용자 편의성 향상 기법

### 3.1. 비교 문자열의 길이 최소화

투표기 화면과 영수증 출력 내용에서 비교해야 할 문자열의 길이가 길다는 것은 매우 심각한 문제이다. 이를 해결할 수 있는 방안으로 보다 짧은 길이의 출력을 갖는 축약 함수를 이용하는 것을 제안한다. 즉, 160 비트의 길이를 갖는 SHA-1의 해쉬값을 8~10 비트로 다시 축약하는 것이다.

SHA-1보다 짧은 길이의 출력을 갖는 축약 함수를 사용함으로써 발생되는 문제는 다음과 같다.

- $M \neq M'$인 $M$과 $M'$에 대해 $H(M) = H(M')$일 확률이 높다.
- $H(M) = H(M')$, $M \neq M'$을 만족하는 $M$과 $M'$을 쉽게 찾을 수 있다.

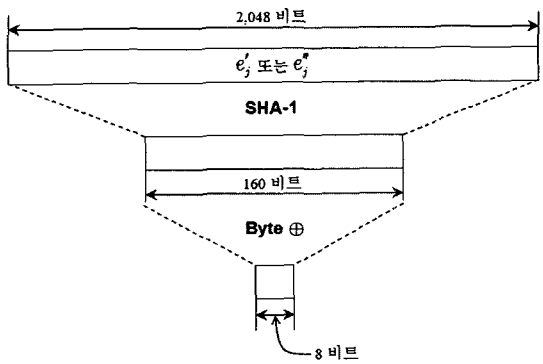
첫번째의 경우 투표기가 암호화한 결과가 서로 다르더라도 투표자가 육안으로 비교해야 하는 축약 함수 결과값이 서로 같을 확률이 비교적 높다는 것으로서 결과값이 같을 경우 영수증과 화면 출력을 비교하는 것이 무의미하기 때문에 투표기는 축약 함수의 결과를 사전에 비교하여 충돌값이 없도록 해야 한다. 이 과정은 암호화에 사용하는 난수값을 바꿔가면서 손쉽게 처리할 수 있다.

두번째의 경우는 같은 축약 함수 결과값을 갖는 입력을 찾는 것이 매우 쉽다는 것인데, 이것을 이용하면 육안 검증 절차를 모두 마친 후 최종적으로 암호화된 투표값을 기록할 때 투표자의 선택이 아닌 다른 후보자로 얼마든지 바꿀 수 있음을 의미하기 때문에 매우 심각한 문제가 될 수 있다.

두번째 문제는 투표기로 하여금 화면에 검증값을 표시하기 전, 전체 후보자에 대한 암호화 값을 무작위 순서로 영수증에 먼저 출력하도록 하면 해결할 수 있다. 무작위 순서로 출력하지 않으면 기록 순서에 의해 투표자가 자신의 투표값을 증명할 수 있기 때문에 반드시 무작위 순서로 출력해야 한다. 무작위로 출력했음을 확인하는 가장 간단한 방법은 검증값을 크기 순서대로 정렬하여 출력하는 것이다.

소수 $p$가 1,024 비트인 ElGamal 암호 방식과 축약 함수 $H(\cdot)$를 이용하는 수정된 투표 과정은 다음과 같다. 단, $H(\cdot)$는 축약 함수로서 사전에 공개된다.

1. 투표기는 $j=1,\ldots,n$를 ElGamal 암호화한 값 $e_j'$와 $e_j''$를 계산한다.
   $(e_j', e_j'') = (E(j, w_j'), E(j, w_j''))$ ($w_j', w_j''$는 투표기가 생성한 임의의 난수)
2. 투표기는 모든 $e_j'$과 $e_j''$을 크기 순서대로 정렬하여 영수증에 출력한다.
3. 투표기는 축약 함수 $H(\cdot)$를 이용하여 2,048 비트 문자열인 $e_j'$와 $e_j''$를 각각 8 비트로 축약하여 화면에 표시한다.
   $\overline{e_j'} = H(e_j'),\ \overline{e_j''} = H(e_j'')$
4. 투표자는 $j=1,\ldots,n$에 대해 검증값으로 사용할 $\overline{e_j} \in \{\overline{e_j'}, \overline{e_j''}\}$를 임의로 선택한다.
5. 투표기는 투표자가 선택한 $n$ 개의 $\overline{e_j}$와 그에 대응되는 $e_j$를 생성할 때 사용한 난수 $w_j \in \{w_j', w_j''\}$를 영수증에 출력한다.
6. 투표자는 출력된 $\overline{e_j}$가 투표기 화면에 표시된 것과 동일한지 검증한다.
7. 투표자는 검증을 마친 후, 원하는 후보자 $v_i$를 선택한다. (단, $1 \le v_i \le n$)
8. 투표기는 $\overline{e_{v_i}'}$와 $\overline{e_{v_i}''}$ 가운데 2 단계에서 검증값으로 선택되지 않은 $\overline{e_{v_i}^*} (\in \{\overline{e_{v_i}'}, \overline{e_{v_i}''}\})$와 축약하기 전 암호화 결과인 $e_{v_i}^*$를 영수증에 출력한다.




[그림 3] 축약 함수 $H(\cdot)$

〔표 2〕 4 비트의 문자 대체표

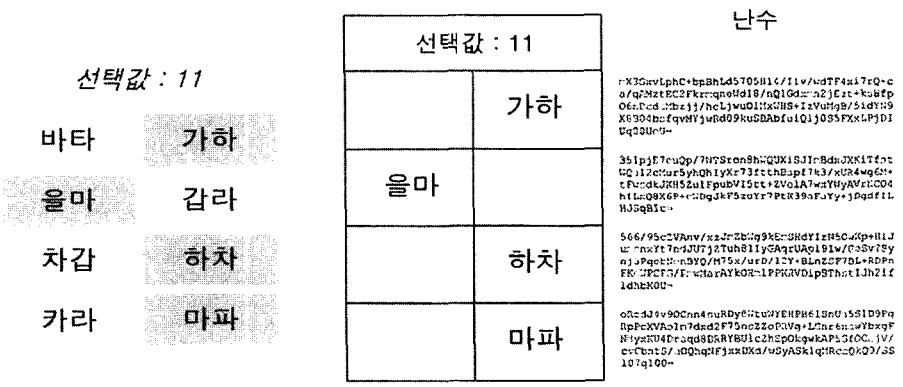
| 비트열 | 대체 문자 | 비트열 | 대체 문자 |
|---|---|---|---|
| 0 0 0 0 | 가 | 1 0 0 0 | 자 |
| 0 0 0 1 | 나 | 1 0 0 1 | 차 |
| 0 0 1 0 | 다 | 1 0 1 0 | 카 |
| 0 0 1 1 | 라 | 1 0 1 1 | 타 |
| 0 1 0 0 | 마 | 1 1 0 0 | 파 |
| 0 1 0 1 | 바 | 1 1 0 1 | 하 |
| 0 1 1 0 | 사 | 1 1 1 0 | 갑 |
| 0 1 1 1 | 아 | 1 1 1 1 | 을 |

〔표 3〕 5 비트의 문자 대체표

| 비트열 | 대체 문자 | 비트열 | 대체 문자 | 비트열 | 대체 문자 | 비트열 | 대체 문자 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 00000 | A | 01000 | I | 10000 | Q | 11000 | Y |
| 00001 | B | 01001 | J | 10001 | R | 11001 | Z |
| 00010 | C | 01010 | K | 10010 | S | 11010 | 1 |
| 00011 | D | 01011 | L | 10011 | T | 11011 | 2 |
| 00100 | E | 01100 | M | 10100 | U | 11100 | 3 |
| 00101 | F | 01101 | N | 10101 | V | 11101 | 4 |
| 00110 | G | 01110 | O | 10110 | W | 11110 | 5 |
| 00111 | H | 01111 | P | 10111 | X | 11111 | 6 |

<투표기 화면>

<출력된 영수증>




〔그림 4〕 축약 함수를 적용하여 구현한 예

9. 투표자는 출력된 $\overline{e_{v_i}^*}$가 투표기 화면에 표시된 것과 동일한지 검증한다.
10. 투표기는 투표자의 검증이 완료되면 $\overline{e_{v_i}^*}$와 $e_{v_i}^*$를 투표자 $i$에 대한 투표 결과로 공개 게시판에 등록한다.

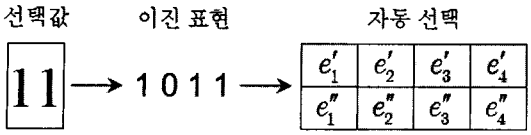
투표자는 투표소를 나온 후 $e_{v_i}^*$가 $v_i$를 암호화한 값임을 다음 과정을 거쳐 확률적으로 검증한다. 단, 아래의 검증 절차는 투표자가 직접 소프트웨어를 개발하여 검증할 수도 있고 별도의 공인 검증 기관에 위탁하여 검증할 수도 있다.

위의 과정 2에서 사전에 출력된 $2n$ 개의 암호문을 검증용 암호문 집합 $S$라고 할 때 검증 과정은 다음과 같다.

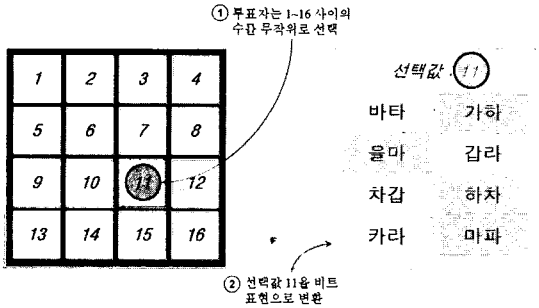
1. 모든 $j=1,\ldots,n$에 대해, 영수증에 출력된 $w_j$를 이용하여 $e_j = E(j, w_j)$를 계산하고, $H(e_j)=\overline{e_j}$인지 검증하고, $e_j \in S$ 인지 검증한다.
2. 공개 게시판에 등록된 $\overline{e_{v_i}^*}$와 $e_{v_i}^*$를 이용하여 $\overline{e_{v_i}^*}=H(e_{v_i}^*)$인지 검증하고, $\overline{e_{v_i}^*}$가 영수증에 출력된 것과 일치하는지 검증하며, $e_{v_i}^* \in S$ 인지 검증한다.

2,048 비트 입력을 받아 8 비트 출력을 내는 축약 함수 $H(\cdot)$는 〔그림 3〕과 같이 구성하였다. 여기서 Byte $\oplus$ 연산은 전체 바이트에 대한 X-OR 연산을 의미한다. 예를 들어, SHA-1 해쉬 출력 결과가 "64E0D79D7AC8DD90CF7FDC6BFA0B4F0978C7B933"이었다면 이에 대한 한 바이트 축약 결과는 64 $\oplus$ E0 $\oplus$ $\cdots$ $\oplus$ 33 = B4가 된다.

축약된 8 비트는 4 비트씩 분리하여 보다 비교하기 쉽도록 다음 표에 의해 두 글자로 대체된다. 예를 들어, B4(10110100)는 "타마"로 대체하여 화면과 영수증에




〔그림 5〕 4 번의 무작위 이진 선택을 [1, 16] 사이의 난수 선택으로 변환한 예




〔그림 6〕 4 번의 이진 선택을 한 번의 숫자 선택으로 변환한 인터페이스의 예

출력한다.

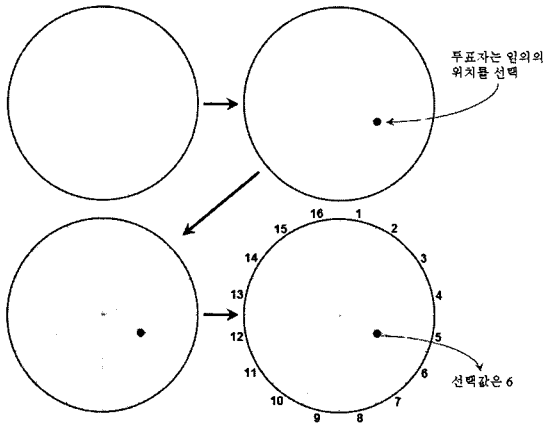
앞의 〔그림 4〕는 위에서 설명한 축약 함수를 적용하여 구현한 예로서, 왼쪽은 투표기 화면에 표시된 내용이고, 오른쪽은 이에 대응되는 영수증 출력 결과이다.

### 3.2. 무작위 선택 횟수 최소화

제안한 방식에서의 무작위 선택은 모두 이진(binary) 선택이다. 따라서, 번의 이진 선택은  사이의 수를 한 번 선택하는 것과 같다. 다음 그림은 후보자가 4명인 경우 한 번의 난수 선택을 4번의 이진 선택으로 변환하는 예이다.

따라서, 〔그림 2-a〕의 투표기 화면에 다음의 〔그림 6〕과 같은 인터페이스를 추가하여 한 번의 난수 선택으로 대체할 수 있다. 예를 들면, 아래와 같이 1~16 사이의 수를 표시하고 투표자는 이 가운데 하나를 임의로 선택하도록 한다. 투표자가 11을 선택했다면, 11에 대한 비트 표현인 1011을 이용하여 검증값을 자동 선택하도록 할 수 있다(단, 16은 0을 선택한 것과 같다).

이 경우 문제가 될 수 있는 것은 1~16 사이에서 임의로 숫자를 선택하도록 하는 것이 난수 발생기를 통해 1~16 사이의 난수를 발생한 것과 동일한 분포를 갖는가 하는 점이다. 왜냐하면 사람들이 위의 〔그림 6〕과 같은 인터페이스를 대했을 때 심리학적으로 선호하는 위치나 숫자가 거의 비슷하다면 이는 전자 투표기의 부정 확률을 높일 수 있기 때문이다.




〔그림 7〕 원형 인터페이스를 구성한 예

또 다른 인터페이스 구성으로 생각할 수 있는 것이 아래 〔그림 7〕과 같은 원형 선택이다. 투표자는 원형 선택 내에서 임의의 위치를 선택하면 되고, 선택된 지점은 계산을 거쳐 숫자로 변환된다. 〔그림 7〕은 투표자의 선택에 따라 1~16 사이의 숫자로 변환하는 과정을 나타낸다.

원형 인터페이스가 〔그림 6〕의 인터페이스에 비해 갖는 장점은 보다 많은 후보자를 수용할 수 있다는 것이다. 이와 함께 투표자의 선택에 따라 생성된 숫자열은 난수열과 유사한 확률 분포를 가질 것으로 기대되지만, 이는 많은 사람이 심리학적으로 원형 선택판의 가운데를 선호할 것이라는 가정이 있어야 한다. 따라서, 무작위 선택을 위한 효율적인 인터페이스는 심리학적인 면까지 고려하여 선택의 결과가 최대한 난수와 유사하도록 구성해야 한다. 물론 이러한 원형 인터페이스를 이용할 경우 선택 결과를 그림으로 나타낸 후 영수증에 함께 출력해야 한다.

## Ⅳ. 안전성 분석 및 효율성 비교

본 논문에서 제시한 영수증 발급 방식에 대한 안전성을 분석하기 위해 다음과 같이 가정한다.

**가정 1)** 투표기는 투표자를 식별할 수 없다.
**가정 2)** 투표기와 투표자의 공모 공격은 없다.

가정 1은 투표기가 투표자의 신원을 알 수 없다는 것으로서 투표소 입구에서 유권자의 신원을 확인하고 스

마트카드를 발급하는 것이 일반적인 절차이다. 또한 스마트카드에는 투표자의 개인 정보가 입력되지 않고 투표구(후보자 목록 등) 정보가 입력되기 때문에 투표기는 투표자의 신원을 확인할 수 없다. A.Neff의 영수증 발급 방식도 이러한 가정을 기반으로 한다.

투표기와 투표자가 공모한다는 것은 투표자의 의도대로 투표기가 동작한다는 것과 같다. 따라서 투표기와 투표자의 공모는 공격이라고 할 수 없으므로 가정 2도 성립한다.

이러한 가정을 바탕으로 가능한 공격 모델을 정리하면 다음과 같다.

**공격 1)** 투표기가 투표자의 의도와는 무관하게 투표값을 조작

**공격 2)** 투표자가 영수증을 이용하여 타인에게 자신의 투표값을 증명

공격 1에 대한 안전성은 일반적으로 투표기가 발각되지 않고 투표값을 조작할 수 있는 확률로 나타낸다. 공격 2는 매표 등을 하기 위해 자신의 투표값을 증명하려는 것으로 비밀투표의 원칙을 훼손할 수 있는 공격이다.

### 4.1. 투표값 조작에 대한 안전성 분석

공격 1에 대한 안전성은 축약 함수 를 사용하지 않은 경우와 사용한 경우로 구분하여 설명하도록 한다.

축약 함수를 사용하지 않은 경우

후보자의 수를 $n$ 이라고 하고, 투표기가 생성하는 전체 암호문 집합을 $S(|S|=2n)$ 라고 하자. 그리고 $i$ 번째 후보자에 대한 암호문 집합(즉, 후보자 기호 $i$ 에 대한 암호문 집합)을 $S_i$ 라고 했을 때

$$S=\bigcup_{i=1}^{n} S_i \ (|S|=2n, |S_i|=2)$$

가 된다. 집합 $S_i'$를 $S_i'=\{e|e=E(i,\cdot)\wedge e\in S_i\}$와 같이 정의했을 때 투표기가 투표값을 조작하지 않았다면 $|S_i'|=|S_i|=2$ 가 되지만, 투표값을 조작하고자 할 경우 $|S_i'|\neq 2$ 인 $i$ 가 반드시 존재하게 된다. 하지만, 투표자는 투표를 마친 후 모든 $S_i$ 에 대해 $e_i'$ 또는 $e_i''$를 임의로 선택하여 검증하기 때문에 투표자의 검증 조건을 만족하면서 투표값을 조작하기 위해서는 집합 $S_i$ 에서 투표

| | |
|---|---|
| $e_1''=E(1,w_1)$ | $e_1'=E(1,w_1)$ |
| $e_2''=E(2,w_2)$ | $e_1'=E(1,w_2)$ |
| $e_3''=E(1,w_3)$ | $e_3'=E(3,w_3)$ |
| $e_4'=E(1,w_4)$ | $e_4'=E(4,w_4)$ |

〔그림 8〕 투표자의 선택을 1011로 예측한 경우

자가 $e_i'$ 와 $e_i''$ 가운데 어느 것을 선택할지 예측해야 한다. 이 때 투표기가 $n$ 개의 이진 선택을 예측할 확률은 $2^{-n}$이지만, 투표자의 선택과 무관하게 투표값을 조작하더라도 조작된 결과는 $[1,n]$ 범위에 있으므로 $n-1$ 개의 이진 선택만 예측하면 된다. 따라서, 안전성은 $1-2^{-n}$이 아닌 $1-2^{-(n-1)}$이며, 최소값은 $2^{-1}$이다. 예를 들어, $n=4$이며 투표자의 선택과는 무관하게 투표값을 1 번으로 조작하는 경우를 보자(〔그림 8〕 참조). 만약 투표자의 검증값 선택을 1011로 예측했다면 해당 위치의 값만 정확하게 1부터 4를 암호화하고 나머지는 모두 1을 암호화하면 된다. 하지만, 조작하고자 하는 1 번의 경우는 어느 쪽을 선택하더라도 1을 암호화하기 때문에 예측해야 하는 이진 선택은 4 개가 아니라 3 개가 되며, 따라서 예측 확률은 $2^{-4}$이 아닌 $2^{-3}$이다.

축약 함수를 사용한 경우

암호문 집합 $S$에 대한 축약 결과 집합을 $\overline{S}$라고 하고 축약 결과가 중복되지 않도록 집합 $S$를 생성했다면 $S$와 $\overline{S}$는 전단사(bijection) 관계가 성립한다. 따라서 $S$와 $\overline{S}$를 모두 투표자에게 제공한다면 축약 함수를 사용하더라도 안전성에는 변함이 없다. 단, 이 때 $S$와 $\overline{S}$는 투표자가 투표하기 전 제공되어야 하며, 집합 $S$는 무작위 순서로 제공되어야 순서를 이용한 투표값 유추를 막을 수 있다.

### 4.2. 투표값 증명에 대한 안전성 분석

투표값 증명에 대한 안전성을 분석하기 위해서는 먼저 다항식 안전성(polynomial security) 또는 어의적 안전성(semantic security)에 대한 내용을 살펴볼 필요가 있다. $G(k)$는 안전성 파라미터 $k$를 입력받아 키를 생성하는 알고리즘, $E$와 $D$는 각각 암호화/복호화 알고리즘, 그리고 O 를 오라클이라고 하자. 이 때 다음과 같

이 World 0와 World 1이 있다고 가정한다.

(World 0) 안전성 파라미터 $k$는 공격자 $A$와 O에게 입력된다. O는 $G(k)$를 실행하여 공개키 $k_e$, 개인키 $k_d$, 평문 공간 P, 암호문 공간 C를 생성한 후 $A$에게 $k_e$, P, C를 전달한다. $A$는 x∈P인 평문 x를 선택하여 O에게 전달한다. O는 P에서 임의로 $r$을 선택한 후 $E_{k_e}(r)$을 $A$에게 반환한다. $A$는 최종적으로 한 비트 $b$를 출력한다.

(World 1) 안전성 파라미터 $k$는 공격자 $A$와 O에게 입력된다. O는 $G(k)$를 실행하여 공개키 $k_e$, 개인키 $k_d$, 평문 공간 P, 암호문 공간 C를 생성한 후 $A$에게 $k_e$, P, C를 전달한다. $A$는 x∈P인 평문 x를 선택하여 O에게 전달하고 O는 P에게 $E_{k_e}(x)$를 반환한다. $A$는 최종적으로 한 비트 $b$를 출력한다.

$A$가 (World $i$)에서 1을 출력할 확률을 $p_{A,i}(k)$라고 하면, 공격자 $A$에 대한 advantage $Adv_A(k)$는

$$|p_{A,1}(k)-p_{A,0}(k)|$$

로 나타낼 수 있으며 $Adv_A(k)$가 무시할 수 있을 정도로 작다면 암호 방식 $(G, E, D)$는 어의적으로 안전하다고 정의한다.

**〔Theorem 1〕 (ElGamal 암호 방식의 어의적 안전성)** 만약 Decision Diffie-Hellman(DDH) 가정이 성립한다면 ElGamal 암호 방식은 어의적으로 안전하다〔16〕.

〔Proof〕 〔16〕 참조.

제안한 방식에서 후보자가 $n$ 명일 때, 투표자는 영수증을 통해 무작위 순서로 인쇄된 검증용 암호문 집합 $S(|S|=2n)$, $n$ 개의 난수, $n$ 개의 암호문에 대한 축약 결과(검증값), 그리고 투표자가 선택한 $v_i(1 \le v_i \le n)$에 대한 암호문 $e^*_{v_i}$ 및 $\overline{e^*_{v_i}}\left(=H\left(e^*_{v_i}\right)\right)$ 등에 대한 정보를 얻게 된다.

**〔Lemma 1〕 (제안한 방식의 투표 증명 불가능성)** 만약 암호학적으로 안전한 난수 발생기(CSPRNG : Cryptographically Secure Pseudo-Random Number Generator)가 존재하고 투표기가 CSPRNG를 이용하여 ElGamal 암호화에 사용하는 난수를 생성하였다면, 투표자는 영수증에 출력된 암호문인 $e^*_{v_i}$에 대응되는 평문의 어떠한 부분 정보도 얻을 수 없다.

〔Proof〕 공개키 암호 방식에서는 공개키가 공개되기 때문에 공격자 $A$를 포함하여 누구라도 암호문을 생성할 수 있기 때문에 어의적으로 안전한 암호 방식은 선택 평문 공격(CPA : Chosen Plaintext Attack)에도 안전하다. 즉, 공격자 $A$가 스스로 암호문을 만들어 보더라도 이와는 독립적으로 생성된 암호문으로부터 평문에 대한 정보를 얻을 수 없다는 의미이다. 따라서, 투표기가 암호화에 사용하는 난수를 CSPRNG로부터 생성하였다면 영수증을 통해 $n$개의 암호문 및 난수가 공개되더라도 독립적이며 별개의 암호문인 $e^*_{v_i}$로부터 어떠한 정보도 얻을 수 없음은 자명하다.

### 4.3. 난수 발생에 따른 안전성과 선택 암호문 공격 하에서의 안전성

ElGamal 암호 방식이 어의적 안전성을 만족하기 위해서는 난수를 안전하게 생성할 필요가 있다. 즉, 투표기가 안전하지 않은 방법으로 난수를 생성하였다면 투표자는 자신의 투표값을 증명할 수도 있다. 예를 들어, 난수 대신 $r, 2r, 3r, \ldots$과 같이 선형성을 갖는 수열을 암호화에 사용하여 다음과 같이 영수증을 출력했다고 가정하자.

- 1번 후보에 대한 암호문 $E(1,r), E(1,2r)$
- 2번 후보에 대한 암호문 $E(2,3r), E(2,4r)$

투표자가 검증용으로 1, 2를 선택했고 2번 후보자를 선택했다면 영수증에는 검증값 $r, 4r$이 출력되고 투표값으로 $E(2,3r)$이 출력된다. 투표자는 영수증을 이용하여 $E(1,r)=(g^r, 1y^r)$을 계산할 수 있고, 난수의 관계를 이용하여 $E(2,3r)=(g^{3r}, 3y^{3r})$에 대한 평문이 2임을 증명할 수 있다. 물론 투표자로 하여금 투표값을 증명할 수 있도록 투표기가 동작한다고 가정하는 것이 타당한지와 이를 공격의 범위에 포함시킬 것인지는 논란의 여지가 있지만 투표기가 생성한 난수에 대한 안전성을 증명할 수 있는 방안은 현재로서는 없으며, 이 부분은 "open problem"임을 밝혀둔다.

ElGamal 암호 방식이 암호문 선택 공격(CCA : Chosen Ciphertext Attack) 하에서 안전하지 않음은 이미 밝혀진 사실이다. 하지만, 전자 투표와 같이 복호화 환경이 극히 제한된 경우 Decryption Oracle을 가정하는 것이 타당한지는 보다 면밀한 검토가 필요할 것이다. 물론 제안한 방식은 ElGamal 암호 방식과는 독립적이

〔표 3〕 안전성 비교

| A.Neff (2003)[1] | D.Chaum (2002) | D.Chaum (2005)[2] | 제안한 방식[3] |
|---|---|---|---|
| $\frac{c}{l+c}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{b-1}{b}$ | $1-\frac{1}{2^{n-1}}$ |

1) $c$는 검증자의 검증 횟수, $l$은 전체 투표자 수.
2) 투표 용지의 사전, 사후 검증을 제외하고 투표자 한 명이 $b$ 장의 투표 용지에서 한 장을 선택한 경우.
3) $n$은 후보자 수.

기 때문에 이미 CCA 하에서 안전함이 증명된 〔17〕과 같은 암호 방식을 이용할 수도 있다.

### 4.4. 안전성 및 효율성 비교

일반적으로 전자 투표 영수증 발급 방식의 안전성은 투표자 한 명이 전자 투표기를 신뢰할 수 있는 확률로 나타내는데, 기존 방식과 제안한 방식의 안전성을 비교하면 위 〔표 3〕과 같다.

2004년 D.Chaum이 제안한 방식의 안전성은 ½이며, A.Neff 방식은 검증 횟수와 투표자 수에 따라 결정되는데, 안전성이 ½이 되기 위해서는 검증 횟수가 투표자 수만큼 많아야 하기 때문에 비효율적이다. D.Chaum의 2005년 방식의 안전성은 투표 용지의 사전, 사후 검증을 제외하고 투표자가 $b$ 장의 투표 용지에서 한 장을 선택하여 투표한다고 가정했을 때 $\frac{b-1}{b}$이 된다. 즉, 두 장의 용지에서 하나를 선택한다면 ½이 되는데, 사전에 제작해야 하는 투표 용지의 수가 전체유권자수×$b$ 장 이상이 되어야 하기 때문에 $b$를 크게 하는데는 한계가 있다.

이에 비해 제안한 방식의 안전성은 후보자의 수에 의해 결정되기 때문에 안전성은 최소한 ½ 이상이다. 하지만, $n=2$인 경우에도 후보자 한 명에 대해 생성하는 암호문을 2 개에서 $t$ 개로 확장한다면 추가적인 부담없이 $1-t^{-1}$으로 신뢰 확률을 높일 수 있다. 또한 A.Neff 방식과 2005년 D.Chaum 방식의 경우 투표기 검증이나 투표 용지 검증을 위해 별도의 검증자나 검증기를 신뢰해야 하는 문제가 있다.

〔표 4〕 효율성 비교

| 비교항목 | A.Neff (2003) | D.Chaum (2002) | D.Chaum (2005) | 제안한 방식 |
|---|---|---|---|---|
| 사전 준비 | 코드북 생성 | 없음 | 암호화된 투표 용지 | 없음 |
| 특수 장비 | 없음 | 프린터 및 용지 | 없음[1] | 없음 |
| 검증자[2] | 필요 | 없음 | 필요 | 없음 |
| 투표 절차 친숙도[3] | 낮음 | 중간 | 높음 | 중간 |
| 투표소 외부에서 검증 | 불가능 | 불가능 | 불가능 | 가능 |
| 대리자를 통한 검증[4] | 예 | 아니오 | 예 | 아니오 |

1) 투표 용지를 읽기 위한 스캐너가 필요하지만, 스캐너가 전자 투표기를 대신한다.
2) 투표소 내에서 전자 투표기를 제외하고 투표자가 신뢰해야 하는 기기 또는 사람을 말한다.
3) 2005년 D.Chaum 방식은 현재의 종이 투표 방식과 같은 형태의 투표 용지에 물리적으로 기표하는 방식이다. 따라서, 투표자 친숙도가 가장 높고 투표 방법에 대한 교육의 필요성이 가장 낮다.
4) 투표소 밖이나 내부에서 투표자 본인이 아닌 대리인 또는 기기를 통해 검증해야 하는 것을 말하며, 이러한 대리인이나 기기는 신뢰할 수 있다는 가정이 필요하다.

〔표 4〕는 2003년 제안된 A.Neff 방식, 2002년 및 2005년 제안된 D.Chaum 방식과 제안한 방식의 효율성을 비교한 것이다.

효율성 비교 결과를 보면, 제안한 방식은 사전 준비, 특수 장비, 검증자, 투표소 외부 검증 및 대리자 검증에서 장점을 갖는 반면, 2005년 D.Chaum 방식은 투표 절차 친숙도에서, 2004년 D.Chaum 방식은 대리자 검증 항목에서 장점을 갖는다. 따라서, 제안한 방식이 안전성 및 효율성에서 기존 방식에 비해 우수하다고 할 수 있다. 다만, 투표 절차 친숙도 측면에서는 기존 D.Chaum의 2005년 방식보다 낮은 것으로 평가할 수 있는데, 이는 DRE를 이용하는 모든 시스템에 해당되는 것으로서 DRE를 이용하는 시스템을 비교한다면 그렇게 낮은 친숙도를 갖는다고 할 수는 없을 것이다. 하지만, 제안한

전자 투표 시스템을 실제로 구현하여 일반인에게 시연한 결과, 검증값을 왜 선택해야 하는지 모르는 경우가 많았고, 검증값 선택과 투표값 선택을 혼동하는 경우도 많았다. 물론 새로운 시스템에 대한 교육이 불가피한 측면이 있지만, 향후 보다 직관적인 사용자 인터페이스 구성에 관한 연구도 함께 진행되어야 할 것이다.

## V. 결 론

전세계적으로 전자 투표 실시에 따른 장단점 분석과 안전성에 대한 우려가 높은 것이 현실이다. 하지만, 안전성 문제만 해결된다면 전자 투표 실시가 현재의 종이 투표 방식이 갖는 한계를 극복할 것이라는 점에는 대체로 공감하고 있다. 안전성 문제의 핵심은 전자 투표기에 대한 신뢰성 문제이고, 영수증 발급은 이를 해결할 수 있는 최선의 방안이다.

본 논문에서는 기존 영수증 발급 방식이 갖는 문제점과 한계를 해결할 수 있는 새로운 영수증 발급 방식을 제안하였다. 잘 알려진 cut-and-choose 방법을 응용한 제안 방식은 투표소 내의 어떠한 기기나 사람에 대한 신뢰도 요구하지 않는다는 장점이 있으며, 안전성 측면에서도 기존 방식보다 뛰어나다고 할 수 있다. 또한, 본 논문에서는 제안한 방식의 구현상 문제점을 살펴보았고 이를 해결하여 보다 사용자 편의성을 높인 개선 방식에 대해 설명하였다. 향후에는 효율성 비교에서 지적했듯이 투표 절차를 보다 직관적이고 알기 쉽게 표현할 수 있는 사용자 인터페이스에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌


[1] D.Chaum, "Untraceable Electronic Mail, Return Addresses, and Digital Pseudonyms", *Comm. of the ACM*, vol. 24, no. 2, pp.84-88, Feb. 1981.

[2] S.Goldwasser and S.Micali, "Probabilistic Encryption", *Journal of Computer System Sciences(JCSS)*, vol. 28, no. 2, pp.270-299, Apr. 1984.

[3] T.ElGamal, "A Public-Key Cryptosystem and a Signature Scheme Based on Discrete Logarithms", *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. IT-31, no. 4, pp.469-472, 1985.

[4] M.Naor and A.Shamir, "Visual Cryptography", *Proc. of Advances in Cryptology (Eurocrypt'94)*, LNCS 950, pp.1-12, 1995.

[5] P.Paillier, "Public-Key Cryptosystems Based on Composite Degree Residuosity Classes", *Proc. of Advances in Cryptology(Eurocryp'99)*, LNCS 1592, pp.223-238, 1999.

[6] R.Mercuri, "Rebecca Mercuri's Statement on Electronic Voting," http://www.notablesoftware.com/RMstatement.html, 2001.

[7] C.A.Neff, "A Verifiable Secret Shuffle and Its Application to E-Voting", *Proc. of the 8th ACM Conference on Computers and Communications Security(CCS-8)*, pp.116-125, 2001.

[8] R.Mercuri, "A Better Ballot Box?", *IEEE Spectrum Online*, pp.46-50, Oct. 2002.

[9] C.A.Neff and J.Adler, "Verifiable e-Voting: Indisputable Electronic Elections at Polling Places", http://www.votehere.net/vhti/documentation/VH_VHTi_WhitePaper.pdf, VoteHere Inc., 2003.

[10] D.Chaum, P.Y.A.Ryan, and S.Schneider, "A Practical, Voter-Verifiable Election Scheme", *Technical Report CS-TR-880*, University of Newcastle upon Tyne, 2004.

[11] P.Golle, M.Jakobsson, A.Juels, and P.Syverson, "Universal Re-encryption for Mixnets", *CT-RSA 2004*, LNCS 2964, pp.163-178, 2004.

[12] D.Chaum, "Secret-Ballot Receipts: True Voter-Verifiable Elections", *IEEE Security and Privacy Magazine*, vol. 2, no. 1, pp.38-47, Jan. 2004.

[13] D.Evans and N.paul, "Election Security: Perception and Reality", *IEEE Security and Privacy Magazine*, vol. 2, no. 1, pp.24-31, Jan. 2004.

[14] D.Chaum, P.Y.A.Ryan, and S.Schneider, "A Practical Voter-Verifiable Election Scheme", *Proc. of 10th European Symposium on Research in Computer Security(ESORICS2005)*, LNCS

3679, pp.118-139, 2005.

〔15〕 "전자선거추진협의회 공식 출범", http://www.nec.go.kr/notice/report/, 중앙선거관리위원회, 2005.

〔16〕 Y.Tsiounis and M.Yung, "On the Security of ElGamal Based Encryption", *Public Key Cryptography 98(PKC'98)*, LNCS 1431, pp.117-134, 1998.

〔17〕 R.Cramer and V.Shoup, "A Practical Public Key Cryptosystem Provably Secure Against Adaptive Chosen Ciphertext Attack", *Crypto'98*, LNCS 1462, pp.13-25, 1998.

〔18〕 C.Karlof, N.Sastry and D.Wagner, "Cryptographic Voting Protocol : A Systems Perspective", *Proc. of 14th USENIX Security Symposium(USENIX2005)*, pp.33-50, 2005.

〔19〕 D.Boneh and P.Golle, "Almost Entirely Correct Mixing with Applications to Voting", *Proc. of 9th ACM conference on Computer and Communications Security(CCS)*, 2002.

## 〈著者紹介〉


**이 윤 호 (Yunho Lee) 학생회원**

1993년 2월 : 성균관대학교 대학원 정보공학과(공학석사)
1993년 3월-2000년 4월 : 한국통신 연구개발본부 전임연구원
2000년 5월-2005년 1월 : KBS인터넷(주) 기술지원팀장
2006년 6월-현재 : (주)애니온소프트 기술이사
2005년 3월-현재 : 성균관대학교 컴퓨터공학과 박사과정 재학중
<관심분야> 암호이론, 정보보호 응용, 전자투표, 워터마킹

**이 광 우 (Kwangwoo Lee) 학생회원**

2005년 2월 : 성균관대학교 정보통신공학부(공학사)
2007년 2월 : 성균관대학교 대학원 정보통신공학부(공학석사)
2007년 2월-현재 성균관대학교 대학원 컴퓨터공학과 박사과정 재학중
<관심분야> 암호이론, 정보보호, 네트워크 보안, 전자투표, 워터마킹

**박 상 준 (Sangjoon Park) 정회원**

1986년 2월 : 한양대학교 수학과(이학석사)
1999년 2월 : 성균관대학교 정보공학과(공학박사)
1986년 1월-1999년 12월 : 한국전자통신연구소 부호기술부 선임연구원
2000년 1월-2000년 10월 : 국가보안기술연구소 책임연구원
2000년 11월-2005년 5월 : (주)비씨큐어 부사장
2005년 7월-현재 : 성균관대학교 정보보호연구소 연구교수
<관심분야> 암호 알고리즘, 키분배, 인증 및 서명, 암호 분석

**김 승 주 (Seungjoo Kim) 종신회원**

1994년 2월-1999년 2월 : 성균관대학교 정보공학과 (학사, 석사, 박사)
1998년 12월-2004년 2월 : 한국정보보호진흥원(KISA) 팀장
2004년 3월-현재 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수
2001년 1월-현재 : 한국정보보호학회, 한국인터넷정보학회, 한국정보과학회, 한국정보처리학회 논문지 및 학회지 편집위원
2002년 4월-현재 : 한국정보통신기술협회(TTA) IT 국제표준화 전문가
2005년 6월-현재 : 교육인적자원부 유해정보차단 자문위원
<관심분야> 암호이론, 정보보호표준, 정보보호제품 및 스마트카드 보안성 평가, PET

**원 동 호 (Dongho Won) 종신회원**

1976년-1988년 : 성균관대학교 전자공학과(학사, 석사, 박사)
1978년-1980년 : 한국전자통신연구원 전임연구원
1985년-1986년 : 일본 동경공업대 객원연구원
1988년-2003년 : 성균관대학교 교학처장, 전지전자 및 컴퓨터공학부장, 정보통신대학원장, 정보통신기술연구소장, 연구처장.
1996년-1998년 : 국무총리실 정보화추진위원회 자문위원
2002년-2003년 : 한국정보보호학회장
현재 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수, 한국정보보호학회 명예회장, 정보통신부지정 정보보호인증기술연구센터 센터장
<관심분야> 암호이론, 정보이론, 정보보호