한국정보전자통신기술학회논문지(jkiiect)'18-10, Vol.11 No.5
논문 18-11-05-572 http://dx.doi.org/10.17661/jkiiect.2018.11.5.572

그룹검사 문제에 대한 성능 하한치

성진택*

A Lower Bound for Performance of Group Testing Problems

Jin-Taek Seong*

요 약 본 논문은 조합 문제의 하나로써 그룹검사(Group Testing)의 성능 하한치를 유도한다. 그룹검사는 2차 세계대전 동안 군인들의 매독 감염을 검진하기 위해 시작되었고 지금까지 오랫동안 학문적 기초를 마련하였다. 최근 들어 그룹검사의 활용가치가 증대되어 재발견됨으로써 학계에서 큰 관심을 받고 있다. 그룹검사는 다수의 샘플 중에서 극소수의 결함 샘플을 찾는 문제와 동일하며, 이것은 압축센싱(Compressed Sensing)의 선형 역문제(inverse problem)와 유사하다. 본 논문에서는 그룹검사가 무엇인지 살펴보고 그룹검사의 관련 연구내용을 알아본다. 정보이론에서 사용한 조건부 엔트로피와 에러율 간의 관계를 밝히는 정리를 이용하여 결함 샘플을 찾기 위해 필요한 검사 수에 대한 최소 에러율의 경계값을 도출할 뿐만 아니라 기존 연구와 어떠한 차이점이 있는지 살펴본다.

Abstract This paper considers Group Testing as one of combinatorial problems. The group testing first began to inspect soldier's syphilis infection during World War II and have long established an academic basis. Recently, there has been much interest in related areas because of the rediscovery of the value of the group testing. The group testing is the same as finding a few defect samples out of a large number of samples, which is similar to the inverse problem of Compressed Sensing. In this paper, we introduce the definition of the group testing, and specify the classes of the group testing and the bounds on performance of the group testing. In addition, we show a lower bound for the number of tests required to find defective samples using the theoretical theorem which is mainly used for relationship between conditional entropy and the probability of error in the information theory. We see how our result can be different from other related results.

Key Words : Compressed Sensing, Fano's Inequality, Group Testing, Lower Bound, Probability of Error

1. 서론

그룹검사(Group Testing)은 1943년 Dorfman [1]에 의해 소개되었던 조합 문제이며, 이후 조합 문제의 해를 찾기 위해 수많은 알고리즘들이 등장하였다. 그리고 최근 들어 그룹검사는 확률론적 방법을 비롯한 비-조합적인 문제들까지 관심의 대상이 되었다. 2006년 Donoho[2]에 의해 소개된 압축센싱(Compressed Sensing)은 희소 신호(sparse signal)를 찾는 문제이기 때문에 그룹검사의 재발견을 불러왔다[3]. 본 논문은 그룹검사가 무엇인지 그리고 얼마만큼의 성능을 보장하는지, 더 나아가서는 에러율(probability of error)의 하한치(lower bound)가 어느 정도인지 등을 알아본다.

먼저 그룹검사의 시작은 Dorfman에 의해 발표된 보고서에서 찾아 볼 수 있다[1]. 제2차 세계대전 동안

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the korean government (NRF-2017R1C1B5075823).
*Department of Convergence Software, Mokpo National University (jtseong@mokpo.ac.kr)
Received September 19, 2018 Revised October 02, 2018 Accepted October 15, 2018

미국 공중 보건국에서는 모든 매독 남성을 찾기 위해 프로젝트를 착수한다. 이때 개별적인 매독 검사는 혈액 샘플을 채취하여 그 샘플을 분석하여 매독의 유무를 판별하는 것이다. 당시에는 위의 개별적 매독 검사는 비용이 많이 들뿐만 아니라 모든 군인들을 대상으로 한 명씩 검사를 하는 것은 비용과 검사시간이 많이 소요되어 비효율적이었다[3].

다음과 같이 N명의 군인이 있다고 가정하면, 위의 개별적 매독 검사를 실시할 경우, N번의 매독 검사를 실시하게 된다. 다수의 군인이 매독에 감염이 된 경우라면 개별적 매독 검사가 효율적이지만, 반면 매우 적은 수의 군인들만이 매독에 감염된 경우라면 개별적 매독 검사가 효율적이지 않으며 다른 방법을 고려할 필요가 있다.

다음과 같은 방법으로 매독 검사를 실시한다고 생각해 보자. 여러 명의 군인들의 혈액 샘플을 모아서 그 반응 결과가 양성(positive)인지 또는 음성(negative)인지 확인한다. 이때 하나의 매독 검사를 하기 위해 섞어 놓은 군인들의 혈액 샘플을 하나의 그룹이라고 말한다. 그리고 그 그룹의 반응 결과가 양성이면, 적어도 한 명 이상의 군인은 매독에 감염되었음을 말해 준다. 반면에 그 반응 결과가 음성이면, 그 그룹 내의 모든 군인들은 매독에 감염되지 않았음을 의미한다. 이와 같은 검사 방법을 그룹검사라고 말한다[3]. 그룹검사의 핵심기술은 몇 개의 샘플을 모아서 한 번에 결과를 확인하여 개별적인 검사보다 훨씬 적은 검사 수만으로도 매독에 감염된 군인들을 찾고자 하는 것이다.

그룹검사의 문제를 보다 간단히 말하면, N개의 샘플 중에서 D개의 샘플이 결함(defect)을 갖고 있을 때, 모든 결함 샘플을 찾기 위해 필요한 검사 수 T가 얼마만큼 이상이 되어야 하는지를 찾고자 하는 것이다. 개별검사 방법을 이용하여 모든 샘플 N을 검사를 하게 된다면 검사 수 T는 N과 같게 된다, $T=N$. 그러나 그룹검사를 하게 될 경우 T는 N보다 훨씬 적은 수를 갖게 된다, $T \ll N$. 위의 그룹검사에 대한 보다 구체적인 경계값에 대한 내용은 3장과 4장에서 다루고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 그룹검사와 관련된 연구결과를 살펴본다. 3장에서는 그룹검사의 정확한 정의를 비롯하여 수학적인 표현방법을 구체적으로 설명하고 있으며, 본 연구와 관련된 경계값 결과를 살펴보고자 한다. 그리고 4장에서는 그룹검사의 최소 에러율을 유도하고 그 의미를 살펴본다. 마지막으로 결론에서 그룹검사의 결언과 맺는말로 마무리 짓고자 한다.

2. 관련 연구

본 장에서는 그룹검사의 관련 연구내용을 살펴본다. 그리고 그룹검사 문제에 대한 분류를 통해 각각의 종류를 알아본다. 최초로 그룹검사의 개념은 1943년 Robert Dorfman이 Annals of Mathematical Statistics에 소개하면서 시작되었다[1]. Dorfman의 보고서에서는 확률적인 접근법을 이용하여 매독에 감염된 군인들을 모두 찾기 위해 필요한 검사 수 T를 최소화 하고자 했다.

Dorfman은 다음과 같이 간단한 방법을 이용하여 제안하였다. 먼저 매독 검사를 하기 위해 N명의 군인들을 일정한 크기를 갖는 그룹으로 나누고, 각 그룹의 검사 결과에서 양성 반응을 보인 그룹에 대해서만 개별검사를 수행하여 매독에 감염된 모든 군인들을 찾았다. Dorfman은 총 샘플 수 N과 결함률(D/N)에 따라 최적의 그룹 크기를 표로 제시했다[1].

1957년 Sterrett는 Dorfman 방법을 보다 개선하였다[5]. Sterrett이 제안한 방법은 양성 반응을 보인 그룹에 대해서는 순서대로 개별검사를 하는 것은 Dorfman 방법과 동일하지만, 최초로 양성 샘플을 찾게 되면 남아 있는 나머지 샘플들을 그룹으로 다시 묶어서 그룹검사를 하게 된다. Sterrett의 방법은 조금 더 효율적이다. 그 이유는 양성 결과를 보인 그룹은 대부분 한 명 정도만이 매독에 감염되었을 것이다라는 가정을 뒷받침하기 때문이다.

이후 그룹검사에 대한 일반적인 검사 방법이 1959년 Sobel과 Groll에 의해 소개된다[6]. 이 논문에서는 결함률(defective rate)을 모를 경우를 포함한 다섯 가지의 새로운 방법을 제안하고 있다. 논문 [6]에서는 그룹검사의 새로운 응용분야를 소개하고 그룹검사의 일반화에 관해 논의할 뿐만 아니라 정보이론과 그룹검사 사이의 연결고리를 찾는 첫 번째 시도였다.

그룹검사 문제는 적응형(adaptive)과 비적응형

(non-adaptive), 또는 확률형(probabilistic)과 조합형(combinatorial)으로 분류된다. 먼저 확률형 모델에서는 결함 샘플이 확률분포를 따른다고 가정하여, 하나의 샘플 결함을 구분하기 위해 필요한 검사 수 T를 최소화하고자 한다. 그러나 조합형 모델에서는 결함 샘플의 확률분포는 모른다는 가정 하에 오류 없이 모든 결함 샘플을 찾기 위해 필요한 검사 수 T를 최소화하는 것이 확률형과는 다르다[8]-[12]. 즉, minmax 알고리즘을 찾는 문제와 동일하다[13]. 최근 연구에서는 이 경계치가 더욱 개선되었다[14].

다른 분류로써 적응형 모델은 하나의 검사에 포함할 샘플을 선택할 때 어떤 정보를 이용할 것이지에 관한 것이다[8]. 일반적으로 하나의 검사에 포함할 샘플은 이전에 검사를 했던 결과에 따라 달라질 수 있다. 즉 적응형이라는 것은 이전 검사에서 얻은 결과를 다음에 수행할 검사에 이용하는 작업을 말한다.

반대로 비적응형 알고리즘은 각 검사에 포함할 샘플들을 독립적으로 선택하여 미리 결정할 수 있다. 그래서 비적응형 알고리즘은 검사의 순서에 상관없이 동시에 검사를 수행할 수 있는 이점을 제공한다. 비적응형 알고리즘은 검사가 여러 단계로 구성되고 매 검사가 미리 결정되어진 경우라면 다단계 알고리즘으로 일반화 된다[15], [16]. 적응형 모델이 좀 더 설계의 유연함을 제공하고 있지만, 적응형 그룹검사 알고리즘은 결함이 있는 샘플을 찾는데 필요한 검사 수 T가 일정한 값 이상으로 비적응형 그룹검사 알고리즘보다 크게 개선하지 못한다[3], [7]. 이 밖에도 비적응형 그룹검사 방법은 사전에 모든 검사를 결정해야만 하는 경우라면 더 효율적이다.

3. 그룹검사

3.1 그룹검사 문제정의

본 장에서는 그룹검사의 수학적인 표현과 관련된 정의를 구체적으로 알아본다. 찾고자 하는 입력 $X=(x_1,x_2,\cdots,x_N)$는 크기가 N인 이진 벡터이다, 즉, $X\in\{0,1\}^N$. 이때 j번째 샘플이 결함이 있다면, $x_j=1$로 표현되며, 그렇지 않은 경우 $x_j=0$으로 정의된다. 본 논문에서는 이진 벡터 $X=(x_1,x_2,\cdots,x_N)$의 각 원소는 다음과 같이 동일하며 독립적인(i.i.d.) 베르누이 확률분포를 갖는다,

$$P(x_j=\theta)=\begin{cases}1-\delta & \text{if } \theta=0\\ \delta & \text{if } \theta=1\end{cases} \tag{1}$$

여기서 $\delta:=D/N$는 희소율을 말하며 θ는 임의의 이진 변수이다. 또한 희소율 δ는 다른 말로 표현하면 감염률이다. 그리고 희소율은 다음의 $0<\delta<0.5$ 범위를 갖는 것으로 본 논문에서 사용한다.

다음으로 T개의 행과 N개의 열을 갖는 그룹행렬 $A\in\{0,1\}^{T\times N}$를 정의한다. i번째 검사에서 j번째 샘플을 포함할 경우 그룹행렬의 원소 $A_{ij}=1$로 표현되며, 그렇지 않은 경우 $A_{ij}=0$으로 표현된다. 다시 말하면, 그룹행렬의 원소가 1의 값을 갖는다면 이에 대응하는 열은 그룹검사에 참여하는 이진 벡터 원소를 말한다.

간단한 예로 그룹검사의 수학적인 표현을 설명하고자 한다. 우리는 앞서 말한 이진 벡터 X와 그룹행렬 A를 이용하여 다음과 같은 그룹검사의 수학적 표현을 사용한다.

$$Y=A\oplus X \tag{2}$$

여기서 Y는 결과 벡터이며, $\oplus$ 심볼은 원소기반(element-wise)의 논리연산(logical operation)을 의미한다. 다음의 간단한 그룹검사에 대한 예로 수학적인 표현을 설명한다.

$$\begin{bmatrix}1\\0\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1\,1\,0\\0\,1\,1\\1\,0\,1\end{bmatrix}\oplus\begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix} \tag{3}$$

위의 예제에서 보여준 바와 같이 첫 번째 행은 (1 1 0)$\oplus$(1 0 0) = (1 AND 1) OR (1 AND 0) OR (0 AND 0) = 1 으로 표현된다. 다른 행도 같은 방법을 이용하여 얻어진다. 예제에서와 같이 각각의 그룹검사에 참여하는 이진 벡터 원소가 한 개라도 1을 갖게 되면 대응하는 결과 벡터의 값은 1이다. 반대로 그룹검사에 참여하는 이진 벡터의 모든 원소들이 모두 0이면 그 결과도 0을 갖게 된다.

일반적으로 그룹검사는 Dorfman에 의해 수행한 매독 검사와 같이 입력 벡터의 일부 원소들을 섞어 검사의 결과를 확인한다. 이것을 수학적으로 표현하면 다음과 같다. 입력 벡터 X에 대한 집합 $S \subseteq \{1,2,3,\cdots,N\}$를 검사라 부른다. 그리고 무손실(noiseless) 검사에서 $j \in S$인 $x_j = 1$가 검사 집합 S에 존재할 경우 검사 결과는 양성이다. 다시 말하면, 검사 집합 S에 한 개 이상의 결함 샘플이 존재하면 그 검사는 양성임을 의미한다. 그렇지 않다면 검사 결과는 음성이다 [3].

그룹검사의 목표는 가능한 검사 수 T를 최소화 하면서 오류 없이 정확히 결함 샘플을 찾는 것이다. 그러나 실제 구현 측면에서 살펴보면, 정상 샘플인데 결함이 있다고 판단하거나 결함 샘플인데 정상이라고 판단할 수 있으므로 알고리즘 오류가 존재한다. 그렇다고 하여 이것을 그룹검사의 결과가 잘못 되었다라고 말하는 것은 아니다.

3.2 그룹검사 경계치

본 논문에서는 에러율이 0인 그룹검사 알고리즘을 이용하여 N개의 샘플 중에 D개의 결함 샘플을 찾기 위해 필요한 최소의 검사 수를 $t(D,N)$이라 정의하고, 제약사항을 갖는 비적응형 알고리즘을 이용한 경우 그 검사 수를 $\bar{t}(D,N)$라고 정의한다.

다음으로 앞서 정의한 그룹검사 표현을 이용하여 $t(D,N)$와 $\bar{t}(D,N)$의 경계치(bound)을 알아본다. 개별검사를 이용하여 결함을 찾게 된다면 다음의 조건을 만족한다, $\bar{t}(D,N) \le N$. 적응형은 앞선 검사 결과를 이용하여 다음의 검사를 수행하기 때문에 비적응형 그룹검사는 적응형에 비해 항상 크거나 같은 검사 수를 갖게 된다, $t(D,N) \le \bar{t}(D,N)$. 결함 샘플의 수가 최소 하나 이상이라면 다음과 조건을 만족한다, $1 \le t(D,N)$. 결과적으로 검사 수는 다음과 같은 조건을 만족한 결과를 얻게 된다.

$$1 \le t(D,N) \le \bar{t}(D,N) \le N \qquad (4)$$

또한 정보 하한치(information lower bound) [3] 해석을 통한 에러율이 0인 그룹검사 알고리즘을 이용한다면 N개의 샘플 중에 D개의 결함 샘플을 찾기 위해 필요한 최소의 검사 수 T는 다음과 같은 같다.

$$T \ge \log_2 |S|, \qquad (5)$$

여기서 S는 샘플 공간를 말하고, $|S|$은 집합 S의 cardinality를 말한다. 더 나아가서는 에러 오율이 있는 알고리즘에 대해서도 정보 하한치를 얻을 수 있다. 그리고 검사 수에 따라 성공 확률에 대한 상항치(upper bound)를 보여 준다. 검사 수 T만큼 수행한 그룹검사 알고리즘은 다음의 결함 샘플을 찾을 성공 확률 P_s의 조건을 만족한다[4].

$$P_s \le T \log_2 \binom{N}{D}^{-1} \qquad (6)$$

4. 그룹검사 성능 평가

4.1 성능 하한치 유도

본 절에서는 그룹검사의 에러율 하한치를 찾고자 한다. 이를 위해서 우리는 정보이론(information theory)에서 사용한 Fano's inequality 정리를 이용한다 [5]. Fano's inequality 정리는 주로 채널코딩 이론에서 이용하여 에러율과 조건부 엔트로피(conditional entropy)와의 관계를 설명하는 것으로 쓰인다. 본 논문에서는 Fano's inequality 정리를 이용하여 에러율의 하한치를 찾고자 한다.

명제 1(Fano's inequality [5]): 유한한 크기의 랜덤변수 A와 B가 있다고 가정하자. B를 측정하여 A를 찾는 디코더 함수 Ω를 이용하고자 한다면 다음의 부등식이 성립한다,

$$1 + P(\Omega(B) \ne A)\log_2 |A| \ge H(A|B) \qquad (7)$$

여기서 확률 $P(\Omega(B) \ne A)$은 디코더 함수의 에러율을 말한다. 그리고 조건부 엔트로피는 다음과 같이 정의된다,

$$H(A|B) = -\sum_{\alpha \in A}\sum_{\beta \in B} P_{AB}(\alpha,\beta)\log P_{A|B}(\alpha|\beta) \quad (8)$$

여기서 P_{AB}와 $P_{A|B}$는 각각 결합 확률(joint probability)과 조건부 확률(conditional probability)을 말한다. 우리는 무손실 시스템에 대한 에러율의 하한치를 유도하고자 한다. 이때 그룹행렬과 디코더는 각각 독립적이다.

정리 1: 어떠한 그룹행렬과 디코더에 대해서 희소율이 0보다 크고 1/2보다 작다면, 에러율 P_e은 다음의 값보다 작다,

$$P_e \geq H_b(\delta) - \frac{T}{N} - \frac{1}{N} \quad (9)$$

여기서 $H_b(\delta)$는 δ 값을 갖는 이진 엔트로피를 말한다.

증명: 임의의 디코더를 이용한 에러율은 다음과 같이 전개된다,

$$\begin{aligned} H(X) &= I(X;Y) + H(X|Y) \\ &\leq I(X;Y) + 1 + P_e \log_2 |X| \\ &= H(Y) - H(Y|X) + 1 + NP_e \\ &= H(Y) + 1 + NP_e \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $I(\bullet)$는 mutual information을 말한다. 그리고 첫 번째 줄은 mutual information의 정의로부터 얻는다: $I(X;Y) = H(Y) - H(X|Y)$. 두 번째 줄은 Fano's inequality을 적용하여 얻고, 세 번째 줄은 이진 벡터 X의 크기를 이용하여 전개된다. 무손실의 경우 결과 벡터 Y는 이진 벡터 X의 함수이므로 우리가 X를 알게 된다면 결과 벡터 Y는 더 이상 랜덤변수가 아니다. 그러므로 조건부 엔트로피 $H(Y|X) = 0$을 얻을 수 있다.

앞서 우리는 이진 벡터 X는 i.i.d. 확률분포를 갖는다라고 정의했기 때문에 다음의 엔트로피를 얻는다: $H(X) = NH_b(\delta)$. 위의 식 (10)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다,

$$NH_b(\delta) \leq H(Y) + 1 + NP_e \quad (11)$$

다음으로 우리는 결과 벡터 Y의 엔트로피를 구하고자 한다: $H(Y) = H(y_1, y_2, ..., y_T)$. 벡터 Y의 각 원소는 이진값이다. 그리고 다음의 chain rule를 이용하여 결과 벡터 Y의 엔트로피를 다음과 같이 얻게 된다.

$$\begin{aligned} H(Y) &= H(y_1) + H(y_2|y_1) + H(y_3|y_2, y_1) + \\ &\quad \cdots + H(y_T|y_{T-1}, \cdots, y_2, y_1) \\ &\leq H(y_1) + H(y_2) + H(y_3) + \cdots + H(y_T) \\ &\leq TH_b(P(y_1 = 0)) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 조건부 엔트로피의 대소관계와 랜덤변수의 독립조건을 이용하여 식 (12)를 유도한다.

확률 $\epsilon := P(y_1 = 0)$를 정의하여 식 (11)은 다음과 같이 정리된다,

$$NH_b(\delta) \leq TH_b(\epsilon) + 1 + NP_e \quad (13)$$

여기서 에러율 P_e의 하한치를 최소화하기 위해서는 $H_b(\epsilon) = 1$일 경우 얻게 된다. 그래서 식 (13)은 식 (9)와 같이 정리된다.

에러율 P_e이 0으로 다가가기 위해서 식 (9)의 우변값이 0보다 작아야 한다. 이를 위해 다음의 조건을 만족해야 한다,

$$T > NH_b(\delta) - 1 \quad (14)$$

식 (14)는 그룹검사 문제에서 지속적으로 제기되어 온 얼마만큼의 검사 수를 수행해야 N개 중에서 D개의 결함 샘플을 찾을 수 있는지를 말해 주고 있다.

4.2 성능 비교

본 절에서는 그룹검사의 주요 알고리즘 성능 결과를 분석하고 본 연구결과와는 어떻게 관련이 있는지 비교하고자 한다.

이진 분할 알고리즘[11]은 N과 D의 크기에 따라 다음과 같은 검사 수 T를 요구한다,

$$T = \begin{cases} N & N \leq 2D-2 \\ (\alpha+2)D + p - 1 & N \geq 2D-1 \end{cases} \quad (15)$$

여기서 α는 각 검사당 필요한 샘플 수를 말한다. 또한 COMP 알고리즘[15]은 평균 에러 오율 $N^{-\delta}$보다 작거나 같도록 하기 위해 필요한 검사 수 T는 다음과 같다,

$$T \geq eD(1+\delta)\ln(N) \tag{16}$$

여기서 검사 수는 평균 에러율에 대해 하한치의 상수배를 말한다. 그리고 최근 제안한 DD 알고리즘[16]에서 ϵ-에러율을 갖는다고 할 경우의 검사 수 T에 대한 하한치는 다음과 같다,

$$T \geq (1-\epsilon)\log_2\binom{N}{D} \tag{17}$$

식 (14)과 (17)을 살펴보면 에러율이 0에 근접할 경우 두 식은 같은 값에 수렴함을 알 수 있다. 결론적으로 본 연구에서 얻은 정보 하한치는 앞선 연구결과와 다르지 않음을 재확인한 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 최근 학계에서 재발견된 그룹검사 기술에 대해 살펴보았다. 그룹검사는 2차 세계대전에 소개되었지만, 최근에 관련 연구의 재조명으로 그룹검사의 이론적인 아이디어를 활용하려는 움직임이 일어나고 있다. 앞서 소개한 그룹검사는 적응형과 비적응형으로 분류되며, 최근에는 처리속도가 빠른 비적응형 그룹검사에 대한 관심이 많다. 그리고 그룹검사의 최소 에러율은 Fano's inequality 정리를 이용하여 유도하였다. 본 연구에서는 샘플의 결함율을 이용하여 최소 검사 수에 대한 하한치를 얻을 수 있었으며 기존 연구결과를 정보이론적인 접근법을 이용하여 재확인할 수 있었다.

REFERENCES

[1] Dorfman, Robert, "The Detection of Defective Members of Large Populations," The Annals of Mathematical Statistics, vol. 14, no. 4, pp. 436-440, Dec. 1943.

[2] D. L. Donoho, "Compressed Sensing," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 4, pp. 1289-1306, Apr. 2006.

[3] D.-Z. Du and F. K. Hwang, Pooling Designs and Nonadaptive Group Testing: Important Tools for DNA Sequencing, World Scientific, 2006.

[4] L. Baldassini, O. Johnson, M. Aldridge, "The capacity of adaptive group testing," IEEE International Symposium on Information Theory, pp. 2676-2680, Oct. 2013.

[5] A. Sterrett, "On the Detection of Defective Members of Large Populations," The Annals of Mathematical Statistics, vol. 28, no. 4, pp. 1033-1036, Dec. 1957.

[6] M. Sobel, P. A. Groll, "Group testing to eliminate efficiently all defectives in a binomial sample," Bell System Technical Journal, vol. 38, no. 5, pp. 1179-1252, Sep. 1959.

[7] G. K. Atia and V. Saligrama, "Boolean Compressed Sensing and Noisy Group Testing," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 58, no. 3, pp. 1880-1901. Mar. 2012.

[8] C. H. Li, "A Sequential Method for Screening Experimental Variables," Journal of the American Statistical Association, vol. 57, no. 298, pp. 455-477. Jun. 1962.

[9] J. N. Srivastava, A Survey of Combinatorial Theory, North-Holland, pp. 285-308, 1973.

[10] F. K. Hwang, "A Method for Detecting All Defective Members in a Population by Group Testing," Journal of the American Statistical Association, vol. 67, no. 339, pp. 605-608, Sep. 1972.

[11] A. Allemann, "An Efficient Algorithm for Combinatorial Group Testing," Information Theory, Combinatorics, and Search Theory, pp. 569-596, 2013.

[12] M. C. Hu, F. K. Hwang, and J. K. Wang, "A Boundary Problem for Group Testing," SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods, vol. 2, no. 2, pp. 81-87, Jun. 1981.

[13] L. Riccio and C. J. Colbourn, "Sharper bounds in adaptive group testing," Taiwanese Journal of Mathematics, vol. 4, no. 4, pp. 669-673, Jan. 2000.

[14] M.-G. Leu, "A note on the Hu-Hwang-Wang conjecture for group testing," The ANZIAM Journal, vol. 49, no. 4, pp. 561-571, Apr. 2008.

[15] C. L. Chan, P. H. Che, S. Jaggi, and V. Saligrama, "Non-adaptive probabilistic group testing with noisy measurements: near-optimal bounds with efficient algorithms," 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, pp. 1832-1839. Sep. 2011.

[16] M. Aldridge, L. Baldassini, and O. Johnson,

"Group Testing Algorithms: Bounds and Simulations," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 60, no. 6, pp. 3671-3687, Jun. 2014.

저자약력

성 진 택(Jin-Taek Seong) **[정회원]**

- 2014년: 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)
- 2008년 ~ 2010년: LG전자
- 2014년 ~ 2016년: 대구경북첨단의료산업진흥재단
- 2016년 ~ 2017년: 방위사업청
- 2018년 3월 ~ 현재: 목포대학교 융합소프트웨어학과 조교수

<관심분야> 정보이론, 압축센싱, 통신이론, 딥러닝