

# 한국 코로나19 데이터 분석

## 5부. 진단 검사의 정확도

윤복원

조지아 공대 물리학과

email: [bwyoona@gmail.com](mailto:bwyoona@gmail.com), [bokwon.yoon@physics.gatech.edu](mailto:bokwon.yoon@physics.gatech.edu),

facebook: [facebook.com/bwyoona68](https://facebook.com/bwyoona68)

## 5-1. ‘거짓 양성’이 사라지는 취합 검사

민감도와 특이도로 알 수 있는 진단 검사의 정확도

감염자 비율이 충분히 낮으면 위양성이 많이 나와 검사의 정확도가 떨어질 우려가 있다.

하지만 취합 검사 방식을 사용하기 때문에 위양성은 거의 나오지 않는다.

### 민감도와 특이도는 무엇인가?

민감도와 특이도는 진단검사의 정확도에 대해 말할 때 등장하는 용어이다. 민감도는 감염자를 감염됐다고 양성으로 판정하는 비율이다. 감염된 사람이 100명이 있는데 100명 모두 양성 나오면 민감도는 100%이다. 98명을 양성으로 판정하고 나머지 감염자 2명을 음성이라고 잘못 판정하면 민감도는 98%이다. 음성이라고 판정한 2명을 감염된 사람임에도 불구하고 음성으로 판정한 것이니 잘못 판정한 것이다. 만약에 민감도가 80%라면 감염된 사람 100명중에 20명은 감염이 되지 않았다고 잘못 판정한다.

특이도는 비감염자를 감염되지 않았다고 음성으로 판정하는 비율이다. 감염되지 않은 사람들 100명을 검사했는데 모두 음성이 나오면 특이도는 100%이다. 100명 중 99명은 감염되지 않았다고 음성으로 판정하고 1명은 감염됐다고 양성으로 잘못 판정할 경우 특이도는 99%이다.

유전자를 증폭해서 검사하는 PCR 검사는 민감도와 특이도 모두 거의 100%에 가까운 검사 방법으로 알려져 있다. 감염된 사람은 거의 다 양성으로 감염되지 않은 사람은 거의 다 음성으로 판정한다는 것을 의미한다.

민감도: 감염자를 감염됐다고 양성으로 판정하는 비율



특이도: 비감염자를 감염이 안됐다고 음성으로 판정하는 비율

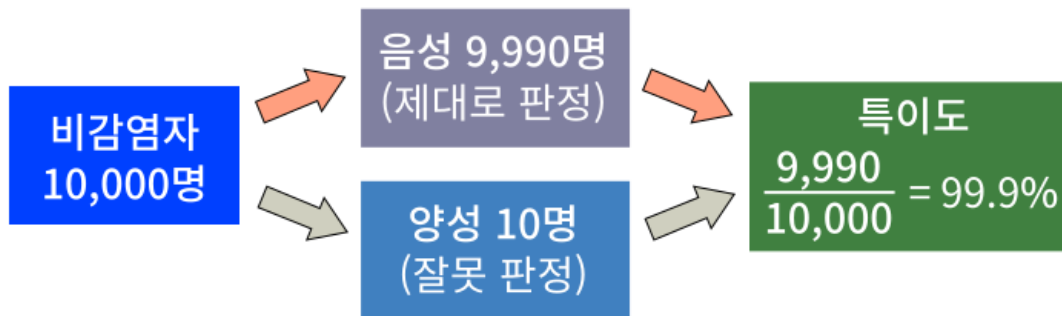


그림 5-1. 민감도와 특이도를 설명하는 그림. 민감도는 감염자를 감염됐다고 양성으로 판정하는 비율이고 특이도는 비감염자를 감염되지 않았다고 음성으로 판정하는 비율이다.

낮은 감염자 비율에서 PCR검사 정확도도 낮아진다.

그런데 민감도와 특이도만 검사의 정확도에 영향을 끼치는 것이 아니다. 검사를 받는 사람들 중에 감염된 사람들이 차지하는 비율, 다시 말해 감염자 비율도 검사의 정확도에 영향을 끼친다.

극단적인 예로 감염자가 전혀 없는 집단을 100,000명을 대상으로 PCR 검사 방식으로 전수 검사를 한다고 하자. PCR 검사의 민감도는 99%이고 특이도는 99.9%라고 하자. 감염자가 없으니 감염자를 양성을 판정하는 정확도인 민감도는 영향을 끼치지 않는다. 특이도가 99.9%이니 감염자가 전혀 없는 100,000명 중에 99.9%인 99,900명은 정확하게 음성으로

판정하지만 나머지 0.1%인 100명은 양성으로 판정한다. 감염자가 없음에도 불구하고 나온 100명의 양성은 모두 거짓 양성을 의미하는 '위양성'이다. 양성인 사람들만 따로 보면 양성 정확도는 0%로 매우 부정확하다. 그렇다고 걱정할 필요는 없다. 이들 100명을 다시 한번 재검사를 하면 99.9%의 확률로 음성이 나오므로 거의 다 음성이 나온다.

감염자 비율이 0.1%인 집단을 PCR 검사로 전수 검사 한다고 하자. 이번에도 검사하는 사람수가 100,000명이라면 그중 100명이 감염자인 경우다. 민감도가 99%이므로 100명의 99%인 99명은 정확하게 양성으로 판정하고 나머지 1%인 1명은 음성으로 잘못 판정한다. 이 1명은 거짓 음성을 의미하는 '위음성'이다. 감염자의 1%를 놓친다. 감염되지 않은 나머지 99,900명중의 99.9%인 99,800명은 정확하게 음성으로 판정하고 나머지 0.1%인 100명은 양성으로 판정한다. 이들은 거짓 양성인 위양성이다. 양성인 나오는 사람수는 총 199명이다 그중 99명만 진짜 양성이므로, 양성인 사람들만 따로 보면 정확도는 49.75%이다. 정확도가 높아지기는 했지만 여전히 낮은 값이다. 이 경우도 낮은 정확도를 걱정할 필요가 없다. 양성인 나온 199명만 다시 검사를 하면 이들 중 누가 거짓 양성인지 거의 정확하게 판정할 수 있다.

감염자 비율이 1%인 집단의 전수 검사 결과는 어떨까? 검사하는 사람수 100,000명 중에 1%인 1000명이 감염자인 경우다. 민감도가 99%이므로 1,000명 중에 99%인 990명은 양성으로 제대로 판정하고 10명은 음성으로 잘못 판정한다. 이들은 위음성이다. 감염자의 1%를 놓친다. 감염되지 않은 99,000명에서는 99.9%인 98,900명은 음성으로 제대로 판정하고, 나머지 0.1%인 100명은 양성으로 잘못 판정하는 '위양성'이다. 총 990+100=1,090명의 양성중에 990명만 진짜 양성이므로 양성인 나온 사람들만으로 따진 정확도는 90.8%이다. 정확도가 상당히 높아졌다. 거짓 양성인 9.2%도 재검사로 걸러낼 수 있다. 9.2%의 위양성을 용인하고 재검사를 안 할 것인지는 방역 당국의 결정에 달려 있다.

정확한 PCR검사라고 해도 감염자 비율이 낮으면 양성 판정을 내린 사람들 중에 거짓 양성인 차지하는 비율이 커지며면서 정확도가 상당히 떨어질 수도 있다. 하지만 특이도가 충분히 높으면 적은 수의 재검사만으로 거짓 양성을 대부분 걸러낼 수 있기 때문에 큰 문제는 아니다. 그리고 감염자 비율이 낮은 상황에서는 위양성이 거의 나오지 않는 검사 방식을 사용한다는 것에 주목할 필요가 있다.

검사자 100,000명 중 100명이 감염 (감염자 비율 0.1%)  
PCR 검사 (개별 검사) : 민감도 99% 특이도 99.9%

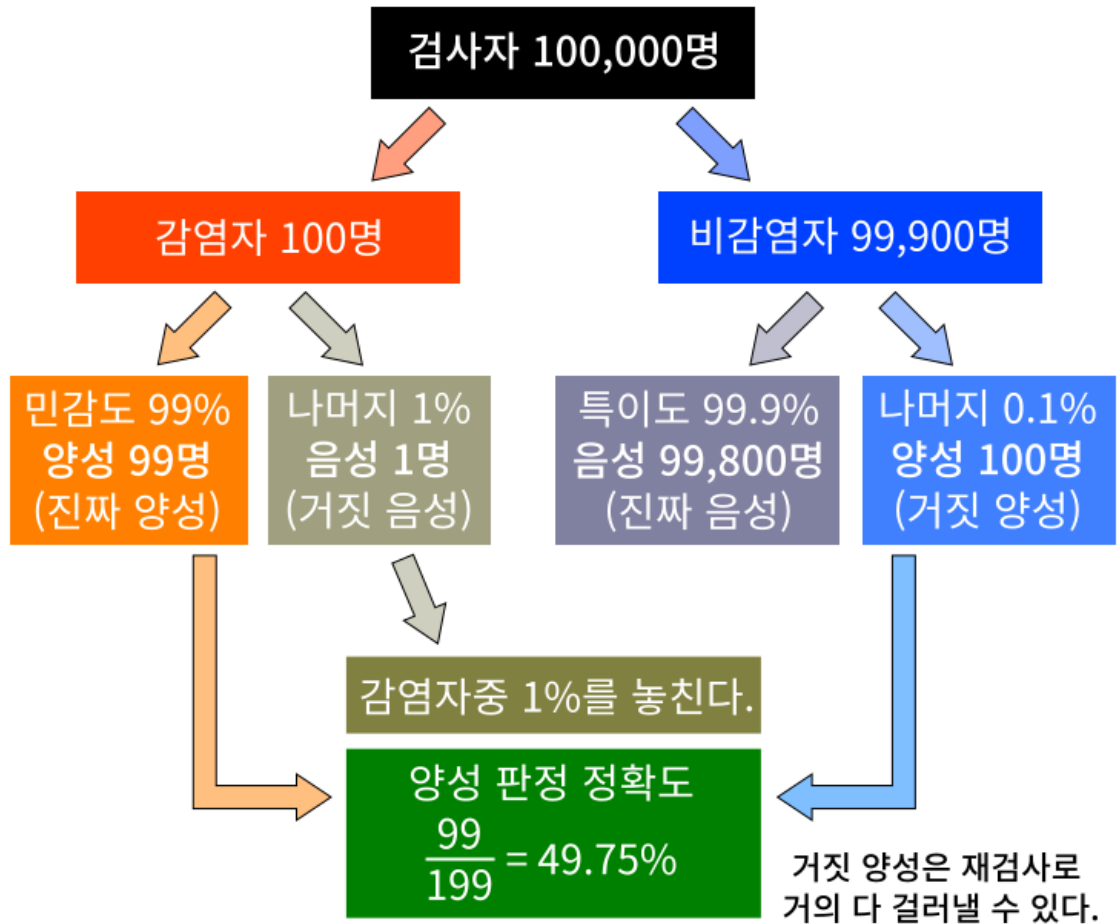


그림 5-2. 감염자 비율이 0.1%인 100,000명을 개별 검사 방식의 PCR검사로 했을 때의 결과. 검사의 민감도는 99%, 특이도는 99.9%로 가정했다. 감염자 100명중에 99%인 99명은 양성으로 제대로 판정하고 나머지 1%인 1명은 음성으로 잘못 판정한다. 감염자 100명 중 1명을 놓치는 셈이다. 감염자가 아닌 99,900명중 99.9%인 99,800명은 양성으로 제대로 판정하고 나머지 0.1%인 100명은 양성으로 잘못 판정한다. 양성 나온 사람들은 모두 99+100=199명이고 이들 중 거짓 양성을 제외한 진짜 양성 99명으로 양성 판정의 정확도는 49.75%이다.

취합 검사에서는 감염자 비율이 적어도 위양성이 거의 나오지 않는다.

그런데 신규 확진자수가 많지 않은 상황에서 한국의 임시선변검사소에서는 취합 검사 방식으로 검사를 한다는 점에 주목해야 한다. 이미 이전에 설명한 바와 같이 취합 검사는 검체 여러개를 섞어 마치 하나의 검체처럼 검사하는 방식이다. 1차 취합 검사에서 양성인 취합 검체에 섞인 검체들은 하나 하나 따로 재검사 과정을 거친다. 이렇게 양성인 사람은 두 번의 검사 과정을 거치기 때문에, 취합 검사 방식을 사용하는 검사에서는 위양성이 거의 나오지 않는 특징이 있다.

예를 들어 감염자 비율이 0.1%인 100,000명을 검체 5개를 섞는 취합 검사로 검사한다고 하자. 감염자 비율이 0.1%이니 100,000명중에 100명이 감염된 사람들이다. 1차로 하는 취합검사의 민감도는 98%이고 2차로 하는 개별 검사의 민감도는 99%라고 하자. 특이도는 1차 취합 검사와 2차 개별 검사 모두 99.9%라고 하자.

감염자 비율 0.1%는 이 비교적 낮기 때문에 감염자의 검체가 섞여있는 취합 검체는 거의 대부분 감염자 검체 한 개만을 포함한다. 드물게 취합 검체에 감염자 검체 두개가 섞일 수 있다. 5개씩 검체를 섞으니 1차 검사에서는 총  $100,000 \div 5 = 20,000$ 의 취합 검체를 검사한다. 이중에 약 100개의 취합 검체는 감염자의 검체를 포함하고 있고, 나머지 19,900개의 취합 검체는 감염자의 검체를 포함하지 않는다.

취합 검사 민감도가 98%이므로 감염자의 검체가 섞여있는 취합 검체 100개중에 98개는 양성이라고 제대로 판정하고, 두 개는 음성으로 잘못 판정한다. 5개의 검체를 섞어 취합 검체 하나를 만들었으므로, 양성인 98개의 취합 검체에는 총  $98 \times 5 = 490$ 개의 검체가 섞여 있다. 이 490개의 검체중 98개는 감염자의 검체이다. 이 490개의 검체에서 어느 것이 감염자의 검체인지를 가리기 위해 개별 검사 방식으로 2차 검사를 한다. 음성으로 잘못 판정한 나머지 두 개의 취합 검체에 대해서는 더 이상 아무 것도 하지 않기 때문에, 이 취합 검체에 섞인 대략 두 명의 감염자는 1차 취합 검사 과정에서 놓친다.

감염자의 검체가 전혀 섞여있지 않은 취합 검체 19,900개를 취합 검사를 하면 특이도 99.9%로 인해 19,900개의 99.9%인 19,880개의 취합 검체를 음성이라고 제대로 판정하고, 나머지 20개의 취합 검체는 양성이라고 잘못 판정한다. 음성으로 판정한 취합 검체는 더 이상 아무것도 할 필요가 없다. 양성으로 판정한 취합 검체 20개에는 총  $20 \times 5 = 100$ 명의 검체가 섞여있다. 이들 검체는 누가 양성인지 알아보기위해 개별 검사 방식으로 2차 검사를 한다.

이제 2차 개별 검사 단계를 보자. 감염자의 검체가 섞여 있어서 양성인 취합 검체에 섞인  $98 \times 5 = 490$ 개의 검체가 있고, 감염자가 없음에도 특이도가 100%가 아니라서 양성인 취합 검체에 섞인  $20 \times 5 = 100$ 개의 검체가 있다. 이렇게 총  $490 + 100 = 590$ 개의 검체를 다시 개별

검사로 검사하는 과정이 2차 개별 검사 과정이다. 총 590개의 검체 중에 감염자의 검체는 98개이다. 개별 검사의 민감도는 99%이므로 감염자의 검체 98개 중 99%인 97개를 양성으로 제대로 판정하고 나머지 1개는 음성으로 잘못 판정한다. 나머지 비감염자의 검체  $590-98=492$ 개를 개별 검사하면 특이도가 99.9%이기 때문에 거의 다 음성이 나오고 양성으로 잘못 판정하는 것은 0.492개로 1개가 채 안된다. 거의 다 음성으로 제대로 판정한다고 볼 수 있다.

최종적으로 100,000명중에 섞여있는 감염자 100명중에 97명을 양성으로 찾아내고 3명을 음성으로 잘못 판정한다. 최종 민감도는 97%이다. 1차 취합 검사의 민감도 98%와 2차 개별 검사의 민감도 99%보다 약간 더 낮아졌다. 비감염자를 양성으로 판정하는 경우는 없거나 기껏해야 한 명 정도이다. 100,000명중에 0.5명 정도이므로 특이도는 99.9995%까지 높아졌다. 취합 검사를 하면 양성으로 판정한 사람 중에는 거짓 양성인 사람이 거의 없기 때문에, 양성으로 판정한 경우에 한정해서 계산한 정확도도 거의 100%이다. 하지만 감염자중에 음성으로 잘못 판정하는 경우가 3개이기 때문에 감염자를 기준으로 보면 정확도는 97%이다.

결국 감염자 비율이 낮아 취합 검사로 감염자를 찾아내는 경우, 감염자들은 1차 취합 검사와 2차 개별 검사, 이렇게 두 번의 검사 과정을 거치면서 거짓 양성은 대부분이 사라진다. 취합 검사에서는 사실상 위양성 문제가 발생하지 않는다.

감염자 비율 0.1%인 100,000명을 검체 5개 섞는 취합 검사  
민감도 98%(1차 취합 검사) 99%(2차 개별 검사), 특이도 99.9%

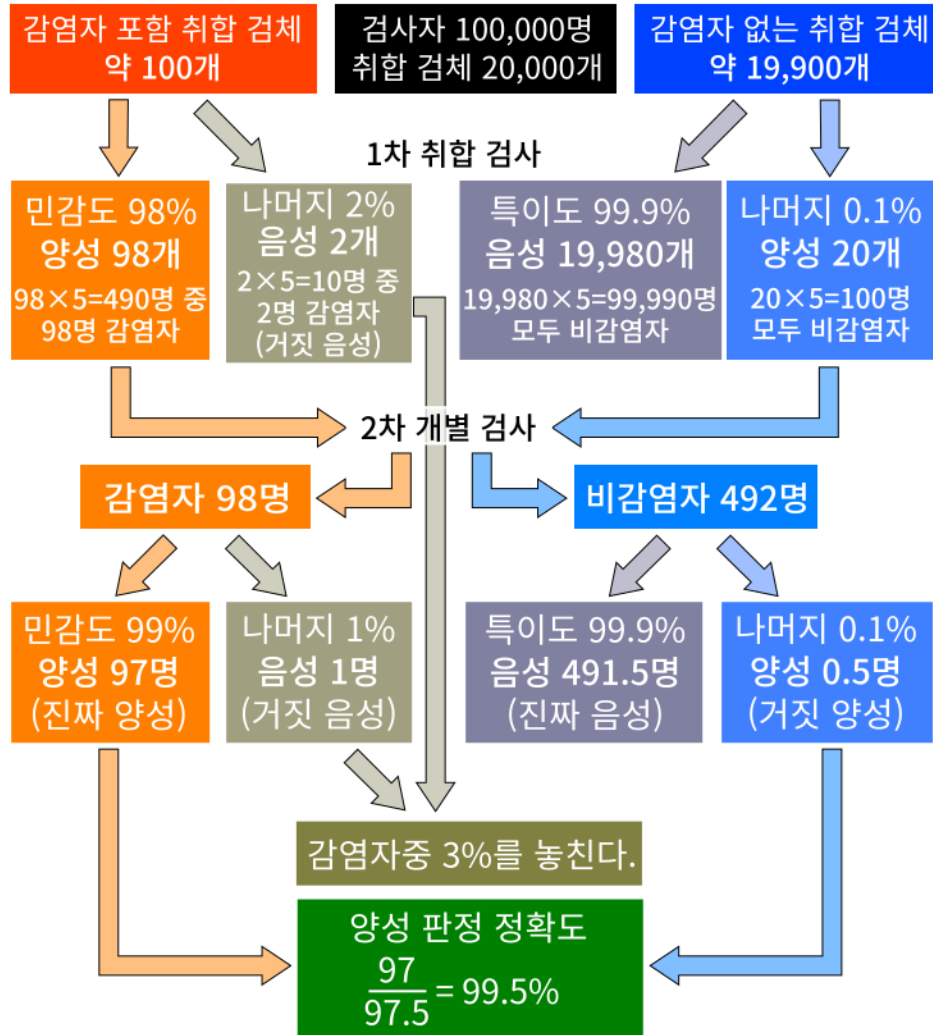


그림 5-3. 감염자 비율이 0.1%인 100,000명을 취합 검사 방식의 PCR검사로 했을 때의 결과. 검사의 민감도는 1차 취합 검사 98% 2차 개별 검사 99%, 특이도는 모두 99.9%로 가정했다. 1차 1차 취합 검사에서 거짓 음성이 2명, 2차 개별 검사에서 거짓 음성이 1명 나오면서 감염자 100명중 3명을 놓친다. 거짓 양성도 1차 취합 검사와 2차 개별 검사를 거치면서 대부분이 걸러진다.



## 감염자 비율이 상당히 낮은 경우의 실제 예: 포항시 ‘1가구 1인’ 검사

2021년 1월 말에서 2월 초까지 포항시에서는 ‘1가구 1인 진단 검사’를 시행했다.[1] 거의 의무적으로 검사를 한 경우라서 검사를 받는 사람 입장에서는 대부분이 감염이 의심될 만한 특별한 이유가 없었다. 임시 선별 검사소에서 검사를 받는 경우 최근에 확진된 사람과 가까이 있었거나, 감염 위험이 높은 곳에서 일하거나, 미미한 증상이 있는데 혹시 코로나-19에 감염된 것은 아닌가 하는 등의 이유가 있어서 검사를 받는 사람들이다. 2021년 1월 20일부터 2월 2일까지 2주동안 임시 선별 검사소에서 검사를 받는 사람은 287,672명이고 이중 662명이 확진되어 감염자 비율이 0.23%였다.

하지만 의무적으로 검사를 받는 사람들은 감염이 의심될만한 이유가 없는 사람들이 거의 대부분이기 때문에 감염자 비율이 낮다. 실제 포항시의 결과는 196,410명을 검사해서 39명의 감염자를 찾아내어 감염자 비율은  $39 \div 196,410 = 0.00020 = 0.020\%$ 였다. 비슷한 시기에 임시 선별 검사소에서 검사를 받은 사람들의 감염자 비율 0.23%보다 10배 이상 낮은 비율이다.

만약에 19만 6410명을 모두 개별 검사 방식으로 PCR 검사를 했다면 어떤 결과가 나왔을까? PCR검사의 민감도와 특이도가 각각 99%와 99.9%라고 하면, 감염자 39명은 99%의 민감도로 거의 다 찾아낸다고 볼 수 있다. 하지만 특이도 99.9%로 인해 비감염자인  $196,410 - 39 = 196,371$ 명의 0.1%인 196명의 위양성이 나온다. 양성인 나온 사람 합계는 진짜 양성 39명과 위양성 196명을 더한 235명이다. 이 중 39명만 진짜 양성이므로 정확도는 16.6%에 불과하다.

하지만 취합 검사로 하는 실제 상황에서는 위양성이 거의 안나온다. 1차 취합검사에서 양성인 나온 취합 검체에 섞인 검체들에 대해 2차로 개별 검사를 하는 과정을 거치게 되는데 이 과정이 재검사와 비슷한 역할을 하면서 위양성은 거의 사라진다. 취합 검사의 경우 민감도가 개별 검사보다 약간 낮기 때문에, 취합 검사에서는 감염자임에도 음성이 나오는 경우가 개별 검사에 비해 약간 더 높다. 취합 검사의 민감도가 97%라고 하면 포항시의 경우에서 놓친 감염자수는 한 명 정도일 것으로 추정된다. 하지만 감염되지 않았음에도 양성으로 판정하는 위양성은 없었다고 봐도 된다.

## 5-2. PCR 검사의 민감도와 항원 검사의 정확도 비교

PCR 검사와 항원 검사를 비교해 보자.

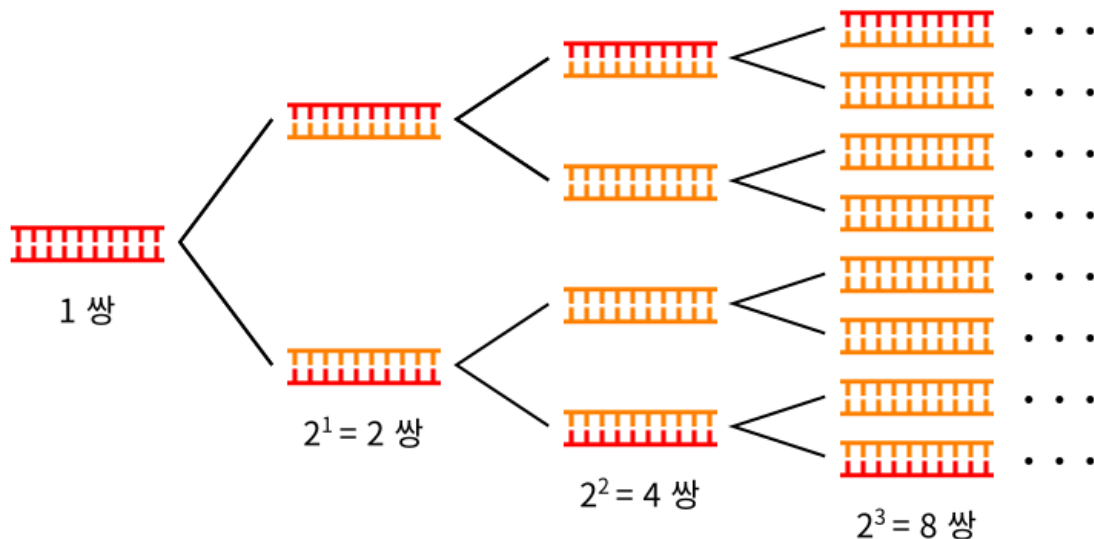
항원 검사는 민감도가 낮다는 단점이 있지만, 검사량을 많이 늘릴 수 있는 장점이 있다.

항원 검사를 시차를 두고 반복 사용함으로써 단점을 일부 극복할 수 있다.

### PCR 검사의 기본 원리

PCR검사의 원리를 살펴자. PCR 검사는 DNA(DeoxyriboNucleic Acid, 디옥시리보핵산)가 있으면 특정 DNA 부위를 여러개의 똑같은 DNA 조각으로 복사해 이를 감지하는 검사이다. 수십억배 이상으로도 복사할 수 있기 때문에 DNA가 조금만 있어도 DNA의 일부를 많으면 수십억배 이상으로 복사해서, 마치 엄청나게 많은 DNA를 감지하는 효과를 얻을 수 있는 방식이다. 설탕 가루 한 알갱이만 넣은 물 한 컵을 맛보면 단맛을 느끼지 못하지만, 이 물속의 설탕 알갱이 하나를 밥 수저 한 숟가락 만큼으로 복사해 양을 늘리면 그 물은 단맛을 느낄 수 있게 되면서 물에 설탕이 있음을 알 수 있는 것을 생각하면 되겠다.

PCR검사의 유전자 증폭 과정에서는 검체의 온도를 높이고 다시 내리는 과정을 반복할 때마다 감지하려고 하는 DNA의 갯수가 늘어난다. 높은 온도를 유지하는 동안에는 달라붙어있는 두 가닥의 DNA를 떨어뜨리고, 낮은 온도를 유지하는 동안에는 떨어뜨린 각각의 DNA 가닥에 DNA를 구성하는 핵 염기를 붙여 두 가닥의 DNA가 달라붙는 쌍으로 만들어서 복사한다. 이런 증폭 과정을 반복할 때마다 DNA 조각의 갯수는 두 배로 늘어난다. 100개의 DNA가 있으면 이를 복사하는 증폭 과정을 한 번 거치면 2배인 200개로 늘어나고, 한 번 더 증폭 과정을 거치면 200개의 두 배인 400개로 늘어난다. DNA 하나 하나가 모두 똑같은 DNA를 새로 복사하는 복사기가 되는 것이다.



**n 번 증폭하면  $2^n$  배 늘어난다.**

10번 증폭하면  $2^{10} = 1024 \approx 1$ 천배 늘어나고,  
20번 증폭하면  $2^{20} = 1,048,576 \approx 1$ 백만배 늘어난다.

그림 5-4. PCR 기본 원리. PCR검사는 검체속에 들어있는 RNA를 DNA로 변환한후 DNA를 복제하는 과정을 거친다. 온도를 높이고 낮추는 사이클을 반복할때마다 DNA 이중가닥이 열리면서 두개의 가닥이 만들어지고 각 가닥은 다시 새로운 DNA 이중가닥을 만들면서 DNA갯수가 2배로 증가한다.

코로나 바이러스는 DNA가 아닌 RNA(Ribonucleic acid, 리보핵산)을 지니고 있다. PCR검사를 하려면 RNA를 DNA로 변환하는 역전사(Reverse Transcription)과정이 필요하다. 이러한 이유때문에, 코로나 바이러스를 검사하는 PCR검사는 RT-PCR(Reverse Transcription Polymerase Chain Reaction)이라고 부른다.

실시간 PCR (Real-Time PCR 또는 Quantitative PCR)은 특정 DNA 부위를 증폭하는 동안 형광 물질을 이용해 DNA 양 만큼 밝은 형광이 나오게 하고 이를 감지한다. 증폭 초기에는 DNA양이 적어 감지할 수 있을 만한 형광의 밝기가 안되지만, 증폭 과정을 반복해 DNA 양이 충분히 많아지면 형광의 밝기가 감지할 수 있는 만큼 충분히 커진다. 이렇게 형광의 밝기가 감지할 수 있을 만큼 커지면 그 검체는 검사하려고 하는 특정 DNA가 있다고 판정한다. 검체에서 형광의 밝기가 감지할 수 있는 수준만큼 DNA 양이 많아지도록 DNA를 증폭한 횟수가

Ct(cycle threshold)값이다. 검체에 원래 바이러스가 많았으면 적은 횟수의 증폭만으로도 감지할 수 있을 만큼 DNA가 많아지지만, 원래 바이러스가 적으면 더 많은 횟수의 증폭을 해야 감지할 수 있을 만큼 DNA양이 많아진다. 다시 말해 Ct값이 작으면 원래 바이러스 양이 많았다는 것이고 Ct값이 크면 원래 바이러스양이 적었다는 것을 의미한다.

코로나 바이러스의 경우 증폭 과정을 35회 반복해도 특정 DNA가 감지되지 않으면 음성으로 판정하는 것으로 알려졌다. 이상적인 상황에서 특정 DNA 조각을 최대 2의 35제곱인 약 340억배로 복사 증폭해도 감지할 수 없다는 것을 의미한다. PCR검사를 했는데 어떤 사람은 Ct값이 30이 나왔고 어떤 사람은 Ct값이 20이 나왔다고 하자. Ct값이 30이 나온 사람은 DNA 증폭과정을 30회 반복해서 복사한 DNA양이 감지할 수 있는 양에 도달한 것으로 2의 30 제곱인 약 10억배 많아져야 감지할 수 있는 DNA양이 된 것이다. Ct값이 20이 나온 사람은 DNA증폭과정을 20번 반복해서 복사한 DNA양이 감지할 수 있는 양에 도달한 것이므로, 2의 20 제곱인 약 100만배 많아져야 감지할 수 있는 DNA양이 된 것이다. 따라서 원래 검체속에 있었던 바이러스 양은 Ct값이 20인 검체가 Ct값이 30인 검체보다  $2^{30} \div 2^{20} = 2^{10} \approx 1,000$ 배 더 많았다는 것을 의미한다. 정리하면 PCR 검사 결과에 나온 Ct값이 작을수록 몸에 더 많은 바이러스를 지닌 것이다.

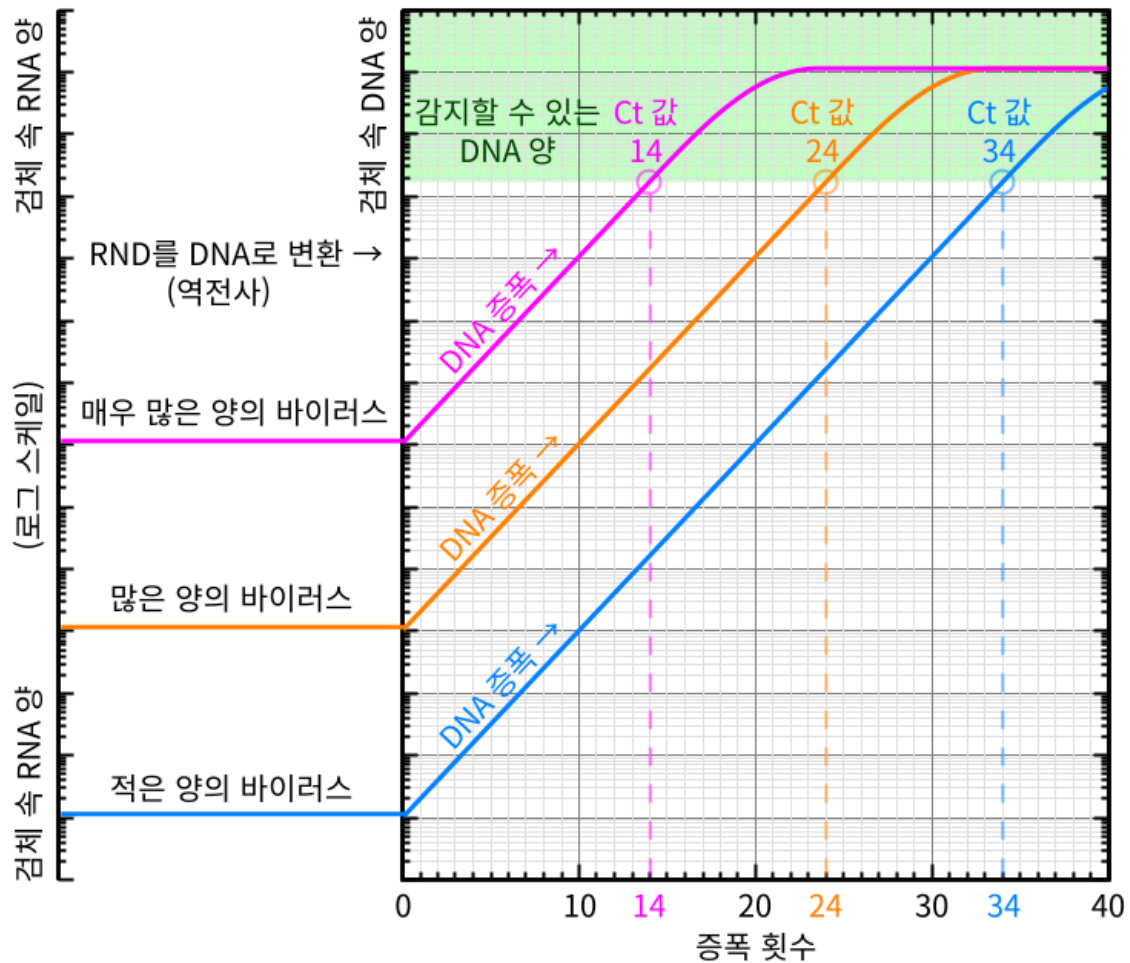


그림 5-5. Ct값은 DNA를 감지할 수 있을 만큼 증폭하는 횟수. 검체 속에 DNA가 많으면 적은 횟수의 DNA 증폭으로도 DNA를 감지할 수 있을 만큼 DNA가 많아지므로 Ct값이 작다. 검체 속에 DNA가 적으면 더 많은 횟수의 DNA 증폭을 해야 하므로 DNA를 감지할 수 있을 만큼 DNA가 많아지므로 Ct값이 크다. 세로 축의 큰 눈금 사이는 10배씩 증가하는 로그 스케일로 그렸다. 코로나 바이러스는 DNA가 아닌 RNA를 지니고 있으므로 RNA를 DNA로 변환하는 역전사(reverse transcription) 과정을 미리 거쳐야 한다.

## PCR검사와 항원검사 비교

한 동안 언론에서 신속항원검사의 민감도에 대한 논란이 있었다. 2021년 2월에 제출되었고 4월에 발표된 논문에서는 특정 신속 항원 검사 키트의 민감도가 17.5%로 나왔다.[2] 이 때문에 2021년 4월에는 신속 항원 검사를 사용하지 말아야 된다는 내용의 의견이 전문가들 사이에서

나왔다.[3] 어떤 논문에서는 90% 이상의 민감도가 나오는 등 제품에 따라 편차가 상당히 컸다.[4] 좀 더 체계적이고 정확한 방식으로 제품별 민감도를 평가하고 비교하는 과정이 필요했던 시기였다.

먼저 PCR 검사와 항원 검사의 기본 원리를 비교해 보자. PCR 검사는 바이러스가 지닌 RNA를 DNA로 변환한 다음에, 특정 DNA 부위를 복사해 증폭하는 과정을 거친다. 검체에 바이러스가 조금 밖에 없어도 DNA를 증폭해 감지할 수 있는 DNA 양으로 늘릴 수 있다. 적은 양의 바이러스를 지닌 검체도 양성으로 판정할 수 있을 만큼 정확한 검사 방법이다. 반면 항원 검사는 증폭하는 과정없이 바이러스를 직접 감지하는 검사 방식이다. 바이러스 양이 많으면 양성으로 판정할 가능성이 크지만, 바이러스 양이 적으면 음성으로 잘못 판정할 가능성이 큰 검사 방식이다.

항원 검사의 민감도를 따질 때 기준이 되는 것은 PCR검사에서 양성인 경우이다. PCR 검사는 바이러스 속의 RNA를 DNA로 변환한 후 최대 수백억배까지 복사 증폭해서 감지하기 때문에, 검체 속에 아주 적은 양의 바이러스가 있어도 감지할 수 있을 만큼 정확한 검사이다. 바이러스에 노출된지 얼마 안됐거나, 감염 후 회복되어 몸에 바이러스가 적을 때도 양성으로 판정할 만큼 매우 정확한 검사 방식이다.

PCR검사에서 양성인 나오는 기간은 어느 정도일까? 2020년 6월 24일까지 한국에서 코로나-19에 확진된 사람들은 PCR검사에서 이를 연속 음성이 나와야 격리에서 해제됐다. 2020년 2월 18일 부터 시작된 확진자 폭증이 진정된 후 확진된 사람들은 평균 35일 후에 격리에서 해제됐다. 확진된 후 평균 35일 동안 PCR검사에서 양성인 나왔다는 것을 의미한다. 확진 전에도 며칠간 더 양성인 나올 수 있으므로 PCR검사는 평균 35일 이상 양성인 나온다고 볼 수 있다. 확진된지 10일이 지나면 감염 전파 위험이 거의 없는 것을 감안하면, PCR 검사에서 양성인 나오는 기간 중에 25일 이상은 감염 전파 위험이 거의 없음에도 불구하고 양성인 나온다고 볼 수 있다.

항원 검사에서 양성인 나오는 기간은 상대적으로 짧다. 바이러스 양이 많은 7일 정도의 기간 동안에만 양성으로 판정한다. 항원 검사는 PCR 검사에서 양성인 판정하는 기간의 5분의 1인 짧은 기간동안만 양성으로 판정하는 셈이다.

Ct값과 상관없이 PCR 검사에서 양성인 나온 모든 사람을 대상으로 항원 검사를 한다고 하자. 그러면, Ct값이 25를 넘을 만큼 바이러스가 적은 사람들도 있고 이들은 항원 검사에서 음성인 나올 가능성의 훨씬 크다. 감염자를 양성으로 판정하지 않는 경우가 많아지는 만큼 항원 검사의 민감도는 낮아진다. 항원 검사에서 음성인 나온 사람들 중에는 이전에 바이러스가 많았던 시기에 나타난 증상이 충분히 사라지지 않아 유증상 확진자로 분류되는 사람들도 있다.

따라서 유증상 감염자만을 따로 놓고 항원 검사의 민감도를 계산해도 Ct값이 25이하인 경우만으로 계산한 민감도보다 낮을 가능성이 크다.

결국 항원 검사의 민감도를 결정하는 데 중요한 영향을 끼치는 것은 항원 검사를 받은 사람들이 어떤 사람들이었냐 라는 것이다. PCR검사와 항원 검사를 동시에 한다고 했을 경우, 항원 검사의 민감도는 PCR검사에서 어떤 Ct값이 나온 사람들을 대상으로 했는지가 결정적인 영향을 끼친다. 따라서 항원 검사의 민감도는 그 기준이 되는 PCR검사의 Ct값과 연관해서 봐야한다. 특히 감염 전파 위험이 있을 만큼 바이러스 양이 많은 Ct값 25이하에서의 항원 검사 민감도를 잘 살펴 볼 필요가 있다.

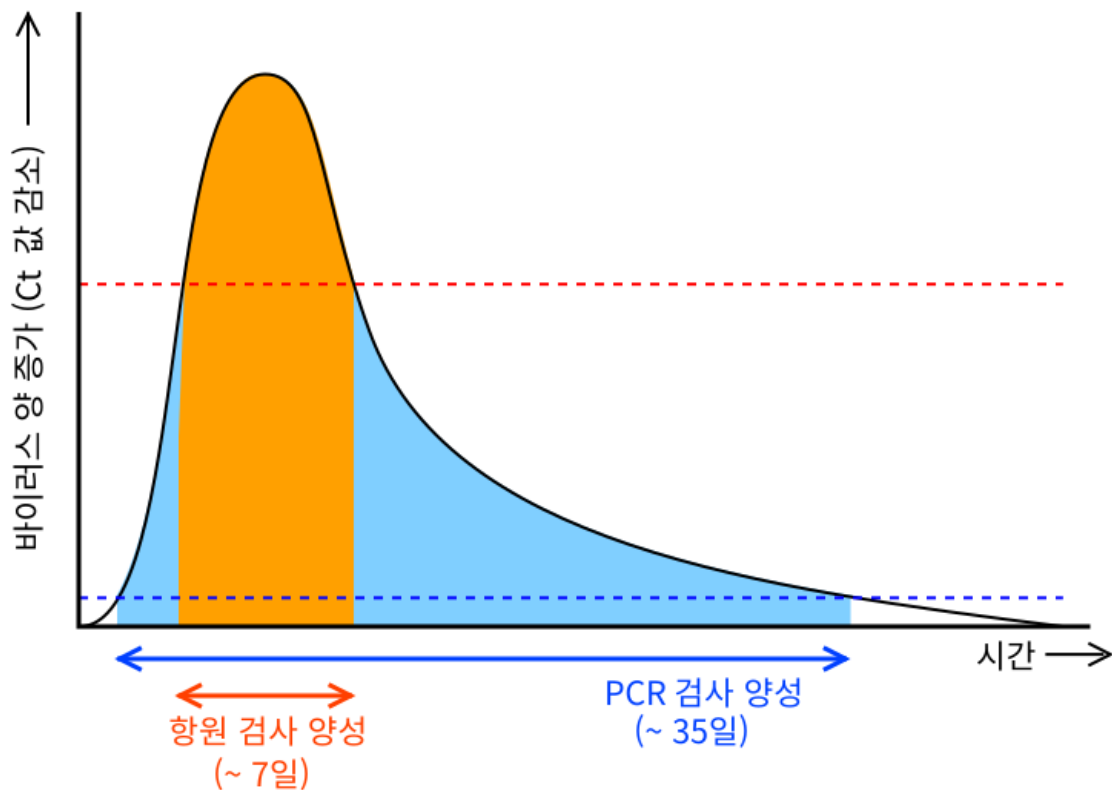


그림 5-6. PCR 검사에서 양성이 나오는 기간과 항원 검사에서 양성 나오는 기간 비교. 항원 검사에서 양성 나오는 기간은 PCR 검사에서 양성 나오는 기간에 비해 훨씬 짧다.[5]

표 5-1 항원 검사 민감도 변화. 항원 검사 민감도가 90%가 나오는 기간은 5~9일까지이고, PCR 검사에서 양성인 나오는 기간은 15-40일까지인 경우, PCR 검사에서 양성인 나온 사람을 무작위로 선택해서 항원 검사를 했을 때의 항원 검사의 민감도

항원 검사에서 양성인 나오는 기간 PCR 검사에서 양성인 나오는 기간	5일	6일	7일	8일	9일
15일	30.0%	36.0%	42.0%	48.0%	54.0%
20일	22.5%	27.0%	31.5%	36.0%	40.5%
25일	18.0%	21.6%	25.2%	28.8%	32.4%
30일	15.0%	18.0%	21.0%	24.0%	27.0%
35일	12.9%	15.4%	18.0%	20.6%	23.1%
40일	11.2%	13.5%	15.8%	18.0%	20.3%

## 감염 전파 위험이 높은 사람을 항원 검사로 얼마나 찾을 수 있을까?

무작위로 사람을 선택해 PCR 검사를 해서 양성인 나오는 검체를 다시 항원 검사를 해서 항원 검사의 민감도를 측정한다고 하자. 이 경우 항원 검사에서 양성인 나오는 기간과 PCR 검사에서 양성인 나오는 기간에 따라 항원 검사의 민감도가 달라진다. 항원 검사에서 양성인 나올 만큼 바이러스 양이 많을 때는 90%의 확률로 양성인 나오고, 바이러스 양이 적을 때는 100% 음성이 나온다고 가정한 아주 간단한 모델을 적용해 계산한 항원 검사의 민감도는 표 5-1에서 확인할 수 있다. PCR 검사에서 양성인 나오는 기간이 35일이고 항원 검사에서 양성인 나오는 기간이 7일일 경우, 무작위로 선택한 PCR 검사 양성인 검체에 대한 항원 검사 민감도는 18%까지 내려간다.

같은 모델에서 PCR 검사에서 양성인 나온 사람들 중에 감염 전파의 위험성이 있는 사람의 비율을 계산해 보자. 감염된 후 PCR 검사에서 양성인 나오는 기간이 35일이고, 감염 후 바이러스 양이 많은 10일 동안 감염 위험성이 있다고 가정한 모델을 보자. 무작위로 PCR 검사를 해서 양성인 나온 사람들 중에 감염 전파 위험성이 있는 사람의 비율은  $10 \div 35 = 28.6\%$ 이다.

PCR 검사에서 양성인 나온 사람들 검체를 모두 항원 검사를 한다고 하자. 항원 검사에서 양성인 나오는 기간은 7일이고 그중 90%의 확률로 양성인 나온다고 하면, PCR 검사와 항원



검사 모두 양성이 나오는 사람의 비율은  $(7 \div 35) \times 0.9 = 18\%$ 이다. 항원 검사에서 양성이 나온 검체는 모두 감염 전파 위험이 있는 사람들의 검체라고 하면, 감염 전파 위험이 있는 사람들 중에 항원 검사에서 양성이 나오는 사람의 비율은  $((7 \div 35) \times 0.9) / (10 \div 35) = 63\%$ 이다. 항원 검사를 딱 한 번만 하면 감염 전파 위험이 있는 감염자의 63%를 항원 검사로 찾을 수 있다.

- PCR 검사만 양성이 나오고 감염 전파 위험이 없는 사람.
- PCR 검사만 양성이 나오고 감염 전파 위험이 있는 사람.
- 항원 검사도 양성이 나오고 감염 전파 위험이 있는 사람.
- PCR 검사 양성    ● 항원 검사 양성    ○ 항원 검사 음성

1일차: 첫 PCR 검사와 항원검사



3일차: 항원 검사 반복



5일차: 항원 검사 반복



7일차: 항원 검사 반복



9일차: 항원 검사 반복



11일차: 항원 검사 반복



그림 5-7 항원 검사를 이틀에 한 번씩 반복해 감염 전파 위험이 있는 사람들을 찾아내는 것을 설명하는 그림. PCR 검사에서 양성이 나온 사람들의 감염 시점이 골고루 퍼져 있다고 하면, 그 중의 바이러스 양이 많은 일부만 첫 항원 검사에서 양성이 나온다. (내부를 채운 주황색 동그라미) 이틀 후에는 감염된지 얼마 안된 순서로 항원 검사에서 양성이 나온다. 이를

간격으로 총 세번의 항원 검사를 하면 감염 전파 위험이 있는 감염자 대부분을 항원 검사로 찾아낼 수 있다.

항원 검사를 시차를 두고 반복하면 감염 전파 위험이 있는 감염자를 더 높은 비율로 찾아낼 수 있다. 모델을 좀 더 구체화해서 알아보자. 추가되는 설정은 다음과 같다.

- (1) 감염된 후 바이러스가 많아지기 시작하는 처음 3일 동안은 바이러스 양이 충분하지 못해 PCR검사에서만 양성이 나오고, 그중 1일차는 감염 전파 위험이 없고 그 후 2-3일차 이틀동안은 감염 전파 위험이 있다.
- (2) 4일차부터 10일차까지 7일 동안은 바이러스 양이 충분히 많아 PCR검사와 항원 검사에서 모두 양성이 나온다.
- (3) 11일차는 감염 전파 위험은 있지만 항원 검사에서는 음성이 나오고 PCR 검사에서는 양성이 나온다.
- (4) 12일차부터 35차까지는 감염 위험이 없고 PCR검사에서만 양성이 나온다.

신규 확진자가 일정하게 나오는 상황이라고 하고 이 모델을 적용하자. 무작위로 사람을 선택해 PCR검사를 해서 양성이 나온 사람들 중에서 35명에 11명의 비율로 감염 전파 위험이 있거나 앞으로 감염 전파 위험이 있을 사람들이다. 나머지 35명에 24명의 비율로 PCR검사에서만 양성이 나오지만 이들은 감염 전파 위험이 없고 앞으로도 없는 사람들이다.

PCR 검사를 해서 양성이 나온 사람들은 바로 항원 검사를 한다고 하자. PCR검사와 동시에 항원 검사를 한다고 하자. 그러면 35명에 7명은 90%의 확률로 항원 검사에서 양성이 나온다. PCR검사서 양성이 나온 사람들 중 감염 전파 위험이 있거나 있을 사람 수와 비교하면,  $((7 \div 35) \times 0.9) / (11 \div 35) = 57.3\%$ 의 비율이다. 한 번의 항원 검사로 감염 전파 위험이 있거나 있을 사람들 중 57.3%를 한 번의 항원 검사만으로 찾아낼 수 있다.

이틀 후에 같은 사람들 중 항원 검사에서 음성이 나온 사람들만 다시 한 번 항원 검사를 한다고 하자. 첫 항원 검사 때와는 몸에 있는 바이러스 양이 달라진다. 감염된지 얼마 안된 사람은 바이러스 양이 더 늘어나고 감염된지 시간이 충분히 지난 사람은 바이러스 양이 줄어든다. 바이러스 양이 늘어나는 사람들은 항원 검사로 양성이 나올 수 있는 사람들이 되고 바이러스 양이 줄어드는 사람의 일부는 항원 검사로 음성이 나오는 사람이 된다. 1차 항원 검사에서 90%의 확률에 들지 못해 음성이 나온 사람들 중에 바이러스 양이 많은 경우는 2차

항원 검사에서 다시 **90%**의 확률로 양성이 나온다. 그 만큼 감염 전파 위험이 있으면서 1차 항원 검사에서 놓친 사람들 중에 항원 검사 양성이 나온다.

이전 항원 검사에서 음성이 나온 사람들을 대상으로 항원 검사를 이틀마다 반복하면 감염 전파 위험이 있는 사람들을 더 많이 찾아낼 수 있다. 계산 결과를 표 5-2에 정리했다. 이틀에 한번씩 항원 검사를 반복할 경우 총 세 번의 항원 검사를 하면 항원 검사로 찾을 수 있는 감염자 대부분을 찾을 수 있다. **PCR** 검사에서 양성인 사람 전체에 대한 비율은 **30%**에 못 미치지만, 다른 사람에게 감염을 전파할 위험이 있거나 앞으로 감염을 전파할 위험이 있을 사람들을 대상으로 한정하면 **90%**에 가까운 사람을 항원 검사로 찾을 수 있다.

항원 검사로 감염 전파 위험이 있는 사람을 높은 확률로 찾을 수 있지만, 문제는 **PCR** 검사에 비해 더 늦게 양성인 나온다는 점은 단점이 될 수 있다. 항원 검사에서 음성이 나왔다고 방역에 소홀할 경우 위음성으로 인한 감염 전파 가능성이 충분히 있기 때문이다. 대신 **PCR** 검사와는 달리 항원 검사는 훨씬 더 많은 사람을 검사할 수 있다는 것은 장점으로 볼 수 있다.

표 5-2. **PCR** 검사에서 양성인 사람들을 대상으로 항원 검사를 했을 때 양성인 나오는 비율. **PCR** 검사는 신규 확진자수가 일정하게 유지되는 상황에서 무작위로 선택한 사람들을 대상으로 한다고 가정했다. 항원 검사를 반복할 때마다 감염 전파 위험이 있는 사람들 중에서 양성인 나오는 비율이 높아진다.

	검사 받은 모든 사람들 중에서 항원 검사 양성인 나오는 비율	감염 전파 위험이 있는 사람들 중에서 항원 검사 양성인 나오는 비율
1일차	18.00%	57.27%
3일차	24.43%	77.73%
5일차	27.59%	87.79 %
7일차	27.90%	88.78 %
9일차	27.93%	88.87%
11일차	27.93%	88.87%

코드 5-1. 항원 검사 양성 비율을 계산하는 파이썬 코드

```

# 양성 종류
# 0: PCR 검사 음성, 항원 검사 음성, 감염 전파 위험 없음
# 1: PCR 검사 양성, 항원 검사 음성, 감염 전파 위험 없음
# 2: PCR 검사 양성, 항원 검사 음성, 감염 전파 위험 있음
# 3: PCR 검사 양성, 항원 검사 양성, 감염 전파 위험 있음
Category = [1, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 2]
Category += [1 for k in range(24)]
Category += [0 for k in range(10)] # 0 충전 (padding)

# 항원 검사 민감도 90%
RATsensitivity = 0.9

# 항원 검사 양성 비율
RAT_PRate = [0.0 for k in range(35)]
RAT_PRateSum = 0.0

# 감염 전파 위험이 있거나 있을 사람 비율
IRate = 11/35

for n in range(0, 11, 2):
    # 시간이 지나면서 바이러스 양이 변한다
    Cs = Category[n:35+n]
    for m, c in enumerate(Cs):
        # 항원 검사에서 양성 나올 수 있는 경우만
        # 90%의 확률로 항원 검사 양성
        if c == 3:
            RAT_PRateSum += (1.0-RAT_PRate[m])*0.9
            RAT_PRate[m] += (1.0-RAT_PRate[m])*0.9

    pr1 = float('{:.5e}'.format(RAT_PRateSum/35))
    pr2 = float('{:.5e}'.format(RAT_PRateSum/35/IRate))

    print(f'{n+1}일차:', pr1, pr2)

```

## 5-3 PCR 검사와 항원 검사를 효과적으로 쓰려면?

감염자 비율이 낮고 신규 확진자수가 적을 때는 PCR검사를 하는 것이 더 효과적이다.

감염자 비율이 높으면 항원 검사를 병용하는 것이 효과적이다.

항원 검사는 격리 해제 유무를 판단하는데 도움이 될 수 있다.

### PCR 검사와 항원 검사의 장단점

PCR검사와 항원 검사의 장단점을 보자. 먼저 PCR 검사는 매우 정확하다는 장점이 있다. 검체에 조금이라도 바이러스가 있으면 양성으로 판정한다. 감염된지 2-3 달이 지나도 검사 결과가 양성인 나오는 경우가 있을 정도이다. 2020년 2월 확진자 폭증의 첫 신호였던 31번 확진자의 경우 70이상 격리할 만큼 PCR검사에서 양성인 오랫동안 나왔다.[6] 미국 질병관리센터에 의하면 감염에 노출된 후 3개월동안 PCR검사서 양성인 나올 수도 있다고 전한다.[7] 사실상 PCR검사는 몸에 바이러스가 조금만 있어도 무차별적으로 양성판정을 내린다.

하지만 PCR 검사는 검사 역량을 마음대로 늘릴 수 없다는 단점이 있다. 보유하고 있는 DNA를 증폭하고 감지하는 PCR 장비의 갯수가 한정되어 있기 때문이다. 여러 사람의 검체를 섞어 하나의 검체 처럼 검사하는 취합 검사 방식을 이용해 검사할 수 있는 사람수를 늘리기도 한다. 하지만, 취합 크기를 늘리는데 한계가 있기 때문에 취합 검사 방식으로 검사할 수 있는 사람수를 늘리는 것도 한계가 있다. 취합 검사는 감염자 비율이 충분히 낮을 때는 효과적이지만, 감염자 비율이 높아지면 검사할 수 있는 사람수도 줄어든다. 감염자 비율이 지나치게 높으면 취합 검사도 사용할 수 없게 되면서 검사할 수 있는 사람수는 더 줄어든다.

항원 검사는 바이러스 양이 많은 사람은 양성인 나올 확률이 크지만, 바이러스 양이 적은 사람은 음성인 나올 확률이 크다는 것이 단점이다. PCR검사서 Ct값이 25보다 작은 검체, 다시 말해 원래 바이러스 양이 많았던 검체만을 대상으로 하면 항원 검사의 민감도는 90%이상 나온다.[4] 하지만 PCR 검사 Ct값이 25를 넘을만큼 바이러스 양이 적은 검체로 한정하면, 항원 검사의 민감도는 30%가 안될만큼 상당히 낮다. 바이러스 양이 적을 때는 감염자와 접촉한지 얼마 되지 않았을 때와 감염된 후 시간이 충분히 지난 때이다.

항원 검사의 장점으로 검사 결과가 매우 빨리 나오고 PCR검사에 비해 훨씬 많은 사람을 검사할 수 있다는 것이다. PCR장비와 같은 특별한 장비 없이 검체를 채취한 현장에서 검사 결과가 15분 정도면 나온다. 진단 키트와 검체 채취 의료 인력이 충분하면 검사량을

PCR검사보다 훨씬 더 많이 늘릴 수 있다. 경우에 따라서는 검사 받는 사람 본인이 직접 검체를 채취해 검사 키트로 결과를 볼 수도 있다. 전문 인력이 아닌 검사 당사자 본인이 직접 검체를 채취하기 때문에 항원 검사의 정확도가 낮아질 수 있다는 점은 고려해야 한다.

	PCR 검사	항원 검사
장점	<p>바이러스 양과 관계없이 매우 정확하다.</p> <p>감염자를 일찍 찾을 수 있다.</p>	<p>검사할 수 있는 사람수를 원하는대로 늘릴 수 있다.</p> <p>비용이 적게 든다.</p>
단점	<p>검사할 수 있는 사람수를 원하는대로 늘릴 수 없다.</p> <p>비용이 많이 든다.</p>	<p>바이러스 양이 많을때만 정확하다.</p> <p>감염자를 일찍 찾기 어렵다.</p>

그림 5-8. PCR 검사와 항원 검사의 장단점

## PCR 검사 위주로 검사해야할 때와 항원 검사 위주로 검사해야할 때

한국의 임시 선별 검사소에서는 오미크론 변이가 우세하기 전까지 취합 검사 방식으로 검사한 것으로 알려졌다. 하루에 임시 선별 검사소에서 검사할 수 있는 사람수는 감염자 비율과 취합 검사에서의 취합 크기에 따라 다르다. 감염자 비율이 낮으면 더 많은 사람을 검사할 수 있고 감염자 비율이 높으면 검사할 수 있는 사람수가 줄어든다. 감염자 비율이 낮으면 취합 크기를 더 크게 할 수 있는데, 민감도가 보장된다면 이런 경우 검사할 수 있는 사람 수는 더 늘어난다.

임시 선별 검사소에서 검사받고 양성인 나오는 감염자의 비율이 1% 정도 또는 그 이하로 유지되면 PCR검사를 이용한 취합 검사 방식을 사용하는 데 무리가 없다. 문제는 하루에 얼마나 많은 신규 확진자가 나오는지이다. 한국에서 델타 변이로 인한 감염확산이 정점이었던 12월 중순 하루 신규확진자는 약 6,000명 이상 나왔고 그중 3분의 1은 임시 선별 검사소에서 검사를

받고 확진된 사람들이다. 임시 선별 검사소에서 검사한 사람수는 하루에 20만명 또는 그 이하였다.

감염자 비율이 1%보다 충분히 낮으면 임시 선별 검사소에서 취합 검사 방식으로 검사할 수 있는 사람수는 더 늘어난다, 감염자 비율이 낮을 때는 하루 신규 확진자수도 적다. 하지만 한국에서 낮은 감염자 비율로 늘어난 검사 역량을 충분히 활용한 기간은 별로 없었던 것으로 보인다. 만약에 감염자 비율이 충분히 낮을 때 감염자가 있을 확률이 높은 집단을 찾아 적극적으로 검사를 하면 더 많은 무증상 감염자를 찾을 수 있다. 그리고 찾은 무증상 감염자를 격리함으로써 감염 확산 규모를 줄일 수 있다. 감염자 비율이 충분히 낮을 때는 늘어나는 검사 역량을 적극적으로 활용할 필요가 있는 것이다.

감염자 비율이 1%를 훌쩍 넘으면 점점 더 취합 검사를 하는 것이 비효율적이 된다. 이런 경우에는 개별 검사 방식의 PCR 검사와 병행해 항원 검사를 적극적으로 사용하는 것이 불가피하다. 항원 검사가 모든 감염자를 다 찾아낼 수는 없지만, 적극적으로 반복 검사를 하면 감염 전파 위험이 있는 감염자 대부분을 찾아낼 수 있다. 감염된지 얼마 안돼 바이러스 양이 적은 감염자는 항원 검사로 찾기 어렵다는 문제 때문에, 항원 검사에서 양성 판정을 받기 이전에는 감염 확산을 막기 어렵다는 문제가 있다. 하지만 항원 검사는 PCR 검사에 비해 훨씬 많은 사람을 검사할 수 있는 장점이 있기 때문에, 최대한 많이 검사해 감염자를 더 많이 격리함으로써 감염 확산 규모를 조금이라도 낮추는 방향으로 나아갈 필요가 있어 보인다.

## 항원 검사를 격리 해제 유무를 판단 기준으로 사용할 수 있을 가능성

항원 검사는 감염된지 시간이 많이 지나 바이러스양이 다시 적어지는 경우에도 음성으로 판단한다. PCR검사는 감염된지 오래 되어도 몸에 바이러스가 있으면 양성으로 판정한다. PCR 검사의 이런 높은 정확도는 감염 초기 바이러스양이 증가할 때 바이러스를 조금만 지닌 사람들을 양성으로 판정해 이들을 격리함으로써 감염 전파를 막을 수 있다는 잇점이 있다. 하지만 무증상 감염자이면서 바이러스 양이 적어 Ct값이 큰 경우는 한 번의 PCR검사만으로 감염된지 얼마 안된 사람인지 감염된지 시간이 많이 지난 경우인지를 판단하기 어렵다는 문제가 있다.

이런 경우는 언제 감염됐는지에 대한 정보를 얻는 데 항원 검사가 유용하게 사용될 수 있다. 바이러스 양이 많아 PCR검사에서의 Ct값이 낮게 나온 경우라면 감염 전파 위험이 큰 사람이기 때문에 바로 격리에 들어간다. 하지만 바이러스 양이 적어 Ct값이 높게 나오면 이 확진자가 감염된지 얼마 안돼 앞으로 바이러스 양이 늘어나는 사람인지 아니면 감염된지 오래되어 서 앞으로 바이러스 양이 줄어드는 사람인지를 판단할 필요가 있다. 후자의 경우라면 격리가 필요

없을 수도 있기 때문이다. 바이러스 양이 적어 Ct값이 높은 경우 감염 초기여서 그런지 아니면 감염된지 한참 지나서 그런지는 항원 검사를 반복하면 알 수 있다.

예를 들어 바이러스 양이 적어 PCR검사에서 Ct값이 큰 사람들만 따로 항원 검사를 2일 후, 4일 후, 6일 후에 하는 것을 생각해 볼 수 있다. 만약에 감염 초기라면 바이러스 양이 증가하기 때문에 이 후 항원 검사에서 양성이 나올 가능성이 크다. 하지만 감염된지 한참 지난 경우라면 바이러스 양이 더 줄어들기 때문에 항원 검사에서 계속 음성이 나올 가능성이 크다. 항원 검사에서 계속 음성이 나오는 무증상 확진자라면 감염된지 오래된 감염자로 간주해 격리를 해제하는 것을 생각해 볼 수 있다.

검체를 전문 의료인력이 아닌 검사받는 사람 본인이 채취하는 자가진단의 경우 항원 검사의 민감도가 낮아지는 것을 간과해서는 안된다. 성능이 좋은 자가진단키트를 적절한 가격에 충분히 공급하고 어떻게 자가 검사하는지 그리고 얼마나 자주 반복해서 검사해야 하는지에 대한 교육도 충분히 해야 한다. 그러면 감염 전파 위험이 있을 만큼 바이러스 양이 많은 감염자를 찾아내는 비율이 논문에서 발표된 수치만큼은 아니더라도 더 높일 여지는 충분히 있다.



[1] "포항시 "1가구 1명 진단검사로 확진자 39명 찾아"" , 김일우, 한겨레, 2021년 2월 5일, <https://www.hani.co.kr/arti/area/yeongnam/982002.html>

[2] "Clinical Application of the Standard Q COVID-19 Ag Test for the Detection of SARS-CoV-2 Infection", S. Oh, et al., Journal of Korean Medical Science, <https://doi.org/10.3346/jkms.2021.36.e101>

[3] "정치화된 코로나 검사, K방역이 흔들린다", 김연희, 시사인, 2021년 4월 13일, <https://www.sisain.co.kr/news/articleView.html?idxno=44323>

"코로나 자가진단키트 활용 공론화...전문학회는 난색", 최선, 메디칼타임즈, 2021년 4월 14일, <https://www.medicaltimes.com/Users/News/NewsView.html?mode=view&ID=1139989&REFERER=NP>

"[기고] 코로나 '자가검사키트'가 필요하다", 최재욱, 세계일보, 2021년 4월 23일, <https://www.segye.com/newsView/20210422519899?OutUrl=naver>

[4] "Validation of a rapid antigen test as a screening tool for SARS-CoV-2 infection in asymptomatic populations. Sensitivity, specificity and predictive values", A. Fernandez-Montero, J. Argemi, J. A. Rodríguez, A. H. Ariño, and L. Moreno-Galarraga, EClinicalMedicine, 37, 100954 (2021). doi: <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2021.100954>

[5] "Viral kinetics of SARS-CoV-2 over the preclinical, clinical, and postclinical period", S. Jang, J. Rhee, Y. Wi, and B. Jung, International Journal of Infectious Diseases, 102, 561 (2021), doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.10.099>

[6] "코로나19 최장 입원 대구 31번 확진자 완치 후 퇴원", 이강일, 연합뉴스, 2020년 4월 26일, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20200426038700053>

[7] "Ending Isolation and Precautions for People with COVID-19: Interim Guidance", CDC, <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/duration-isolation.html>

