

한국 코로나19 데이터 분석

4부. 더 많은 사람을 검사할 수 있는 취합 검사

윤복원

조지아 공대 물리학과

email: bwyoona@gmail.com, bokwon.yoon@physics.gatech.edu,

facebook: facebook.com/bwyoona68

4-1. 여러개의 검체를 섞어 검사하는 취합 검사

취합 검사 검체 여러 개를 섞어 마치 한 개의 검체처럼 검사하는 방법

감염자 비율이 낮을 때는 취합 검사 방식으로 더 많은 사람을 검사할 수 있지만,

감염자 비율이 높으면 취합 검사가 비효율적이다.

여러 개의 검체를 섞어 한 검체처럼 검사하는 취합 검사

코로나19 바이러스에 감염됐는지를 판단하기 위한 검사방법에는 크게 PCR검사, 항원검사, 항체검사등의 방법이 있다. 그중에 PCR(polymerase chain reaction)검사는 지금 현재 감염된 상태인지를 가장 정확하게 판단할 수 있는 진단 검사 방법의 하나로 알려져 있다. 하지만 한정된 수의 PCR검사 장비로 인해 검사수를 쉽게 늘릴 수 없다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 여러 개의 검체를 섞어 하나의 검체처럼 검사해 PCR 검사 장비를 돌리는 횟수를 줄이는 취합 검사 방식을 사용한다. 같은 수의 검체를 검사하는 데 PCR 검사 장비를 돌리는 횟수가 줄어든다는 것은 PCR 검사 장비를 돌리는 횟수가 같다면 더 많은 수의 검체를 검사할 수 있다는 것을 의미한다.

다섯 개의 검체를 섞는 취합 검사를 예로 들어 보자. 다섯 명으로부터 채취한 다섯 개의 검체를 섞어 하나의 취합 검체를 만든다. 취합 검체를 대상으로 PCR검사를 한다. 일반적으로 PCR검사 장비 한 대가 한번에 처리하는 검체의 갯수가 96개이므로 다섯 개의 검체를 섞는 취합 검사를 할 경우 한 대의 PCR검사 장비로 $96 \times 5 = 480$ 개의 검체를 한 번에 검사할 수 있다. 검체를 섞지 않고 PCR검사를 하는 개별 검사의 경우는 PCR 검사 장비 한 대로 한 번에 96개의 검체를 검사할 수 있으니 같은 PCR 장비로 같은 시간에 훨씬 많은 검사를 할 수 있다.

취합 검사에서 바이러스가 없다고 판정하는 음성이 나온 취합 검체의 경우, 이 검체에 섞은 다섯 개의 검체는 모두 음성으로 판정하고 해당 검체들에 대한 검사는 종료한다. 바이러스를 지니지 않은 다섯 개의 검체 묶음에 대해서는 한 번의 취합 검사만으로 음성을 판단할 수 있는 경우이다. 개별 검사 방식으로 검사하면 다섯 번의 PCR검사를 해야하므로, 취합 검사 방식으로 검사하면 PCR 검사 횟수를 다섯 번에서 한 번으로 줄이는 효과가 있다.

하지만 취합 검사에서 양성 나오면, 취합 검체에 섞은 다섯 개의 검체 중에 어느 검체가 바이러스를 지니고 있는지 알 수 없다. 이 경우에는 다섯 개의 검체 각각을 섞지 않고 개별

검사 방식으로 PCR검사를 다시 실시해 어느 검체가 바이러스를 지니고 있는지 판단한다. 처음 한 번의 취합 검사와 다섯 번의 개별 검사를 더해 총 여섯 번의 PCR검사가 필요한 경우이다. 개별 검사보다 PCR 검사 횟수가 오히려 더 많다. 하지만 검사를 받는 사람들 중에 감염자가 차지하는 비율이 충분히 적으면 양성이 나오는 취합 검체의 수가 적으므로 전체적으로는 개별 검사를 했을 때 보다 더 적은 검사 횟수로 검사를 마칠 수 있다.

구체적인 예로 취합 검사 방식으로 검사할 때 ‘총 검사 횟수’를 어떻게 되는지 알아보자. 예를 들어 10,000명이 검사한다고 하자. 개별 검사방식으로 하면 총 10,000번의 검사를 해야 감염자가 누구인지를 찾을 수 있다. 다섯 개의 검체를 섞는 취합 검사방식으로 검사를 하면 1차로 하는 취합 검사 횟수는 $10,000 \div 5 = 2,000$ 이다. 이 중 100개의 결과가 양성이라고 하면, 100개의 취합 검체에 섞은 검체 $100 \times 5 = 500$ 개의 검체를 하나 하나 개별 검사를 해야 하므로 개별 검사 횟수는 500이다. 결국 총 검사 횟수는 이 두 숫자를 합한 2,500이 된다. 검사받는 사람수 10,000의 4분의 1에 불과하다.

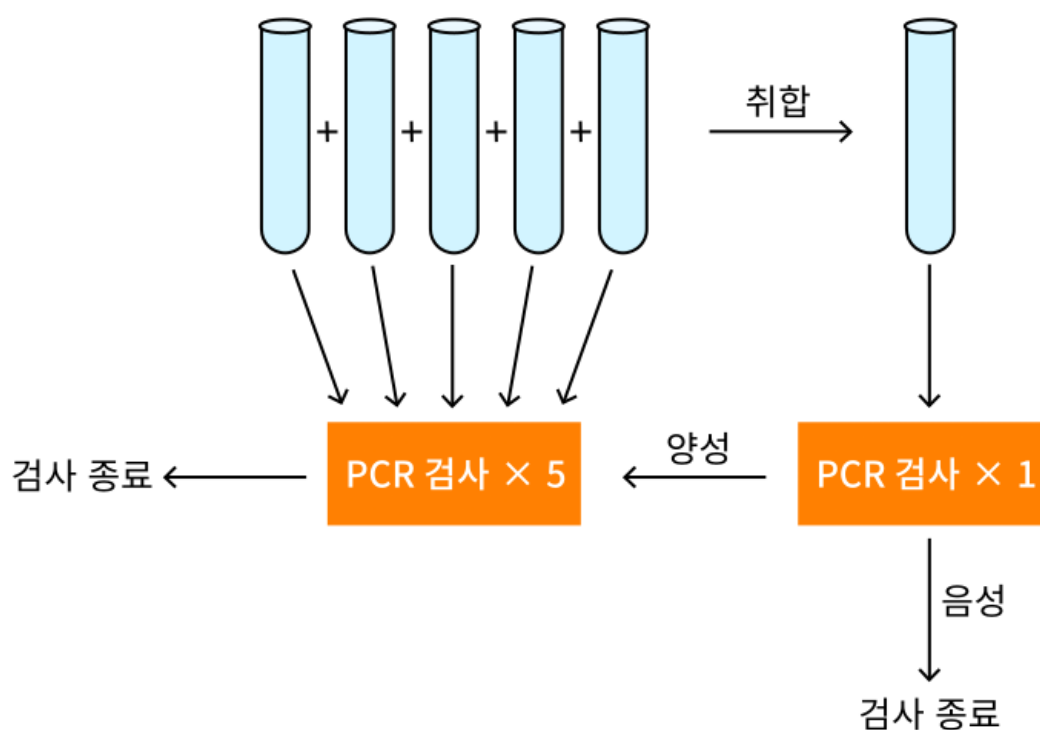


그림 4-1. 검체 다섯 개를 섞는 취합 검사의 예. 다섯 개의 검체 모두 감염되지 않은 사람의 검체이면 취합 검사의 결과는 음성이 나온다. 이 경우에는 한 번의 PCR검사로 검사가 종료되며 다섯 검체 모두 음성 판정을 받는다. 다섯 검체 중 하나라도 감염된 사람의 검체이면

취합 검사의 결과는 양성이 나온다. 이 경우에는 다섯 개의 검체 하나 하나에 대해 개별 검사를 다시 실시해 각각의 검체가 양성인지 음성인지를 판정하므로, 총 여섯 번의 검사를 한다.

취합 검사가 항상 더 많은 사람을 검사할 수 있는 것은 아니다.

여기에서 질문이 하나 나올 수 있다. 섞은 검체에서 양성이 자주 나오면 어차피 개별 검사를 한번 더 해야 하는데 취합 검사의 의미가 별로 없지 않을까? 감염된 사람의 검체와 감염되지 않은 사람의 검체를 무작위로 섞는 상황에서는, 검사를 받는 사람들 중에 감염자의 비율이 높아지면 취합 검체에 감염된 사람의 검체가 섞일 가능성이 커진다. 그 만큼 추가로 해야 하는 개별 검사 횟수가 많아지고 이를 포함한 총 검사 횟수도 많아진다. 경우에 따라서는 취합 검사의 총 검사 횟수가 검사 받는 사람수보다 더 많이 나올 수도 있다. 그러면 개별 검사로 했을 때보다 취합 검사로 했을 때 총 검사 횟수가 더 많아지는 안 좋은 상황이 만들어진다.

검사를 받는 사람이 대부분 감염이 되지 않은 상태라면 얘기는 달라진다. 감염자 비율이 적은 만큼 취합한 검체에 감염된 사람의 검체가 섞일 확률이 낮기 때문에, 대부분의 취합 검사에서 음성이 나오고 추가적인 개별 검사는 별로 하지 않는다. 어쩌다 한 번씩 양성 나오는 취합 검체에 대해서만 따로 추가적인 개별 검사를 하면 되기 때문에 전체적으로는 훨씬 적은 검사 횟수로 전체 검체에 대한 검사를 마칠 수 있다. 감염자 비율이 매우 낮을 경우 사실상 한 번의 검사로 다섯 명의 검체를 검사하는 효과를 볼 수 있다.

검사를 받는 사람들 중에 감염된 사람들이 적지도 않고 많지도 않은 경우도 있을 수 있다. 1차 취합 검사에서 양성 나오면 그 취합 검체에 섞은 검체들을 분류해 다시 개별 검사를 준비하는 과정을 거쳐야 한다. 이 과정을 수행하기 위한 인적 물적 자원이 필요하고 시간도 소요된다. 이런 내용들도 고려해 취합 검사가 개별 검사보다 더 효율적인가를 판단해야 한다.

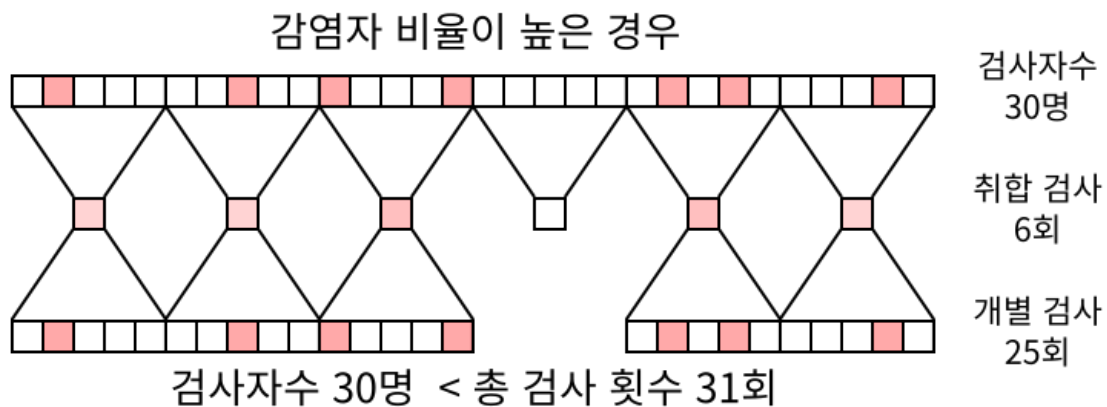
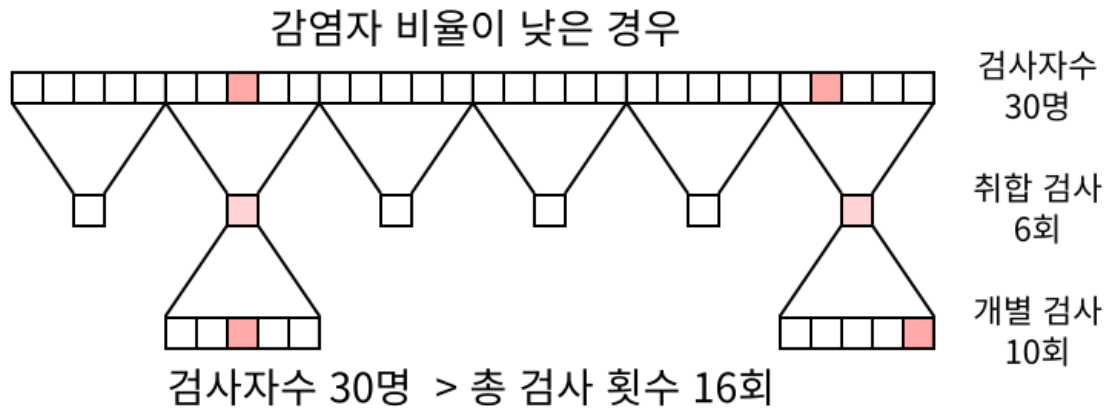


그림 4-2. 감염자 비율에 따라 총 검사 횟수가 달라지는 것을 보여주는 그림. 같은 취합 크기라도 감염자가 많으면 총 검사 횟수가 늘어난다. 감염자 비율이 상당히 높은 경우 같은 수의 사람들을 검사하는 데 더 많은 검사 횟수가 필요해, 취합 검사 방식이 개별 검사 방식보다 오히려 더 비효율적일 수 있다.

하나의 취합 검체에 몇개의 검체를 섞는가를 의미하는 ‘취합 크기’도 따져야 할 부분이다. 취합 크기가 클수록 취합 검체에 감염된 사람의 검체가 섞일 가능성이 커진다. 양성이 나온 취합 검체에 감염자의 검체는 한 개만 섞일만큼 감염자 비율이 낮으면, 2차로 하는 개별 검사 횟수는 취합 크기에 비례해 증가한다. 반면 취합 크기가 커지면 1차 취합 검사의 검사 횟수가 취합 크기에 반비례해서 감소한다.

감염자 비율이 충분히 낮아 2차 개별 검사의 검사 횟수가 1차 취합 검사의 검사 횟수보다 훨씬 적은 경우를 보자. 이런 경우 취합 크기가 커지면 1차 취합 검사 횟수는 취합 크기에 비례해 줄어든다. 2차 개별 검사 횟수는 거의 취합 크기에 비례해 증가한다. 하지만, 원래 2차

개별 검사 횟수가 훨씬 적었기 때문에 개별 검사 횟수가 늘어난 절대 수치는 1차 취합 검사 횟수가 줄어든 절대 수치보다 훨씬 적다. 따라서 총 검사 횟수는 감소한다.

하지만, 2차 개별 검사 횟수가 1차 취합 검사 횟수와 비슷하거나 더 많을 만큼 감염자 비율이 높으면, 취합 크기가 커져도 총 검사 횟수가 별로 줄어들지 않거나 오히려 더 늘어날 수도 있다. 취합 크기를 늘려서 줄어드는 1차 취합 검사 횟수와 비교해 취합 크기를 늘려서 늘어나는 2차 개별 검사 횟수가 비슷하거나 더 많아지기 때문이다. 결국 취합 검체에 얼마나 많은 검체를 섞는지를 의미하는 ‘취합 크기’와 검사를 받는 사람들 중에 감염자들이 얼마나 많은지를 의미하는 ‘감염자 비율’이 총 검사 횟수를 결정하는 중요한 변수이다.

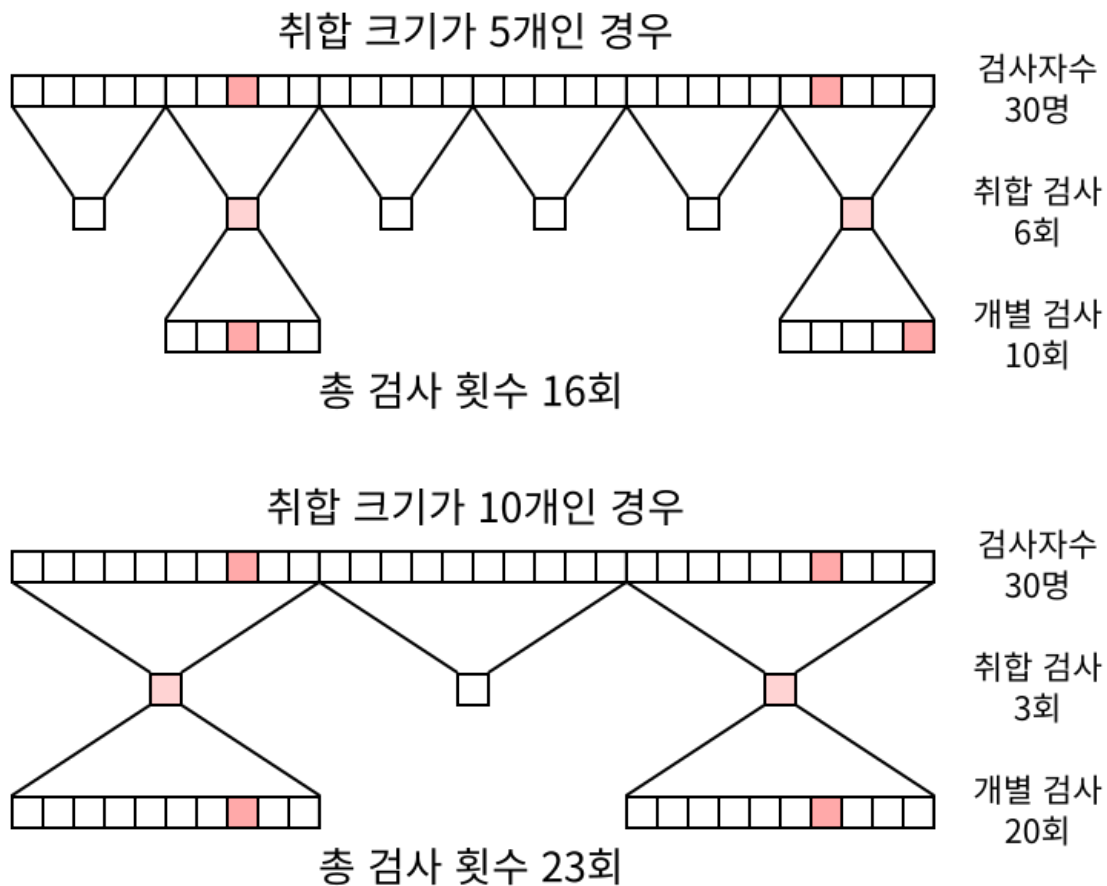


그림 4-3. 취합 크기가 달라지면 총 검사 횟수가 달라진다는 것을 보여주는 그림. 감염자 비율이 충분히 낮은 경우, 취합 크기를 늘리면 더 적은 검사 횟수로 같은 수의 사람들을 검사할 수 있다. 하지만 그림과 같이 감염자 비율이 충분히 높은 경우에는 취합 크기를 늘리면 오히려 더 많은 검사 횟수가 필요할 수 있다.

4-2. 취합 검사에서의 총 검사 횟수

취합 검사에서 총 검사 횟수가 취합 크기와 감염자 비율에 따라 달라진다.

취합 검사는 감염자 비율이 적을 때 효과적이다.

취합 크기를 정하려면 검사의 정확도도 따져야 한다.

취합 검사에서 총 검사 횟수를 가장 작게 하는 최적의 ‘취합 크기’가 있다. 최적의 취합 크기로 취합 검사를 하면 정해진 수의 PCR검사 장비로 최대한 많은 사람을 검사할 수 있기 때문이다. 검체를 많이 섞을수록 PCR검사의 정확도가 낮아진다는 문제가 있는데 이 문제는 뒤에 알아보기로 하고, 먼저 최적의 ‘취합 크기’에 대해 알아보자.

총 검사 횟수를 계산하는 수식

검사를 받는 사람수를 의미하는 검사자수는 N 이라고 하고, 검사를 받는 사람들 중에 감염된 사람들이 얼마나 차지하는지를 나타내는 감염자 비율을 r 이라고 하자. 그리고 한 취합 검체에 섞는 개별 검체의 갯수를 의미하는 취합 크기는 x 라고 하자.

1차 취합 검사 과정은 개별 검체를 취합 크기만큼 섞어 검사하는 과정이다. x 개의 검체를 섞어 마치 하나의 검체처럼 검사한다. 1차 취합검사에서 양성인 나온 검체는 2차 개별 검사 과정을 거친다. 양성인 나온 취합 검체에 섞은 개별 검체 하나 하나를 다시 검사해서 누가 감염됐는지를 최종 판단하는 과정이다. 1차 취합 검사 과정에서 해야 하는 검사 횟수와 2차 개별 검사 과정에서 해야 하는 검사 횟수, 두 값을 더한 총 검사 횟수, 그리고 총 검사 횟수를 다시 검사자수로 나눈 ‘검사자수 대비 총 검사 횟수’는 그림 4-4에서 확인할 수 있다.[1]

취합 검사에서 총 검사 횟수

검사자수: N

감염자 비율: r

취합 크기: x

개별 검사로 할 경우 N 번의 검사를 해야한다.

취합 검사로 할 경우

$$\text{1차 취합 검사 횟수} = \frac{N}{x}$$

$$\text{2차 개별 검사 횟수} = N(1 - (1 - r)^x)$$

$$\text{총 검사 횟수} = \frac{N}{x} + N(1 - (1 - r)^x)$$

검사자수 대비 총 검사 횟수 = 총 검사 횟수 ÷ 검사자수

$$n(r, x) = \frac{1}{x} + 1 - (1 - r)^x$$

그림 4-4. N 명을 검사하고 그중 감염자가 차지하는 비율이 r 이고 취합 크기가 x 라고 했을 때 취합 검사 방식으로 하는 총 검사 횟수는 수식으로 정확하게 계산할 수 있다. 실제 상황에서의 총 검사 횟수는 통계적 요동 때문에 약간의 차이가 있을 수 있다. 개별 검사 방식으로는 검사를 받는 사람수 만큼 검사를 해야한다.

총 검사 횟수를 가장 적게 만드는 최적의 취합 크기

수식으로 계산한 검사자수 대비 총 검사 횟수는 그림 4-5에서 볼 수 있다. 같은 색깔의 동그라미는 감염자 비율을 고정하고 취합 크기를 바꿔가며 계산한 결과이다. 취합 크기가 1인 경우는 취합 검사가 아닌 개별 검사 결과이다. 이 경우 총 검사 횟수는 검사자수와 같으므로 검사자수 대비 총 검사 횟수는 1이다. 검사자수 대비 총 검사 횟수가 더 적을수록 같은 검사 횟수로 더 많은 사람을 검사할 수 있다는 것을 의미한다.

검사를 받는 사람들중에 감염자가 차지하는 비율이 5%인 경우를 보자. (빨간색 동그라미) 총 검사 횟수는 취합 크기가 5일 때 최저이다. 이 취합 크기에서는 개별 검사를 할 때 검사

횃수의 42.62%만으로 검사를 마칠 수 있다. 100만명을 검사하려면 약 42만 6,200번의 검사만 하면 된다. 개별 검사로 42만 6,200개의 검체를 검사할 수 있는 검사 역량으로 100만개의 검체를 검사할 수 있으므로, 2.346배 더 많은 사람을 검사할 수 있는 것이다.

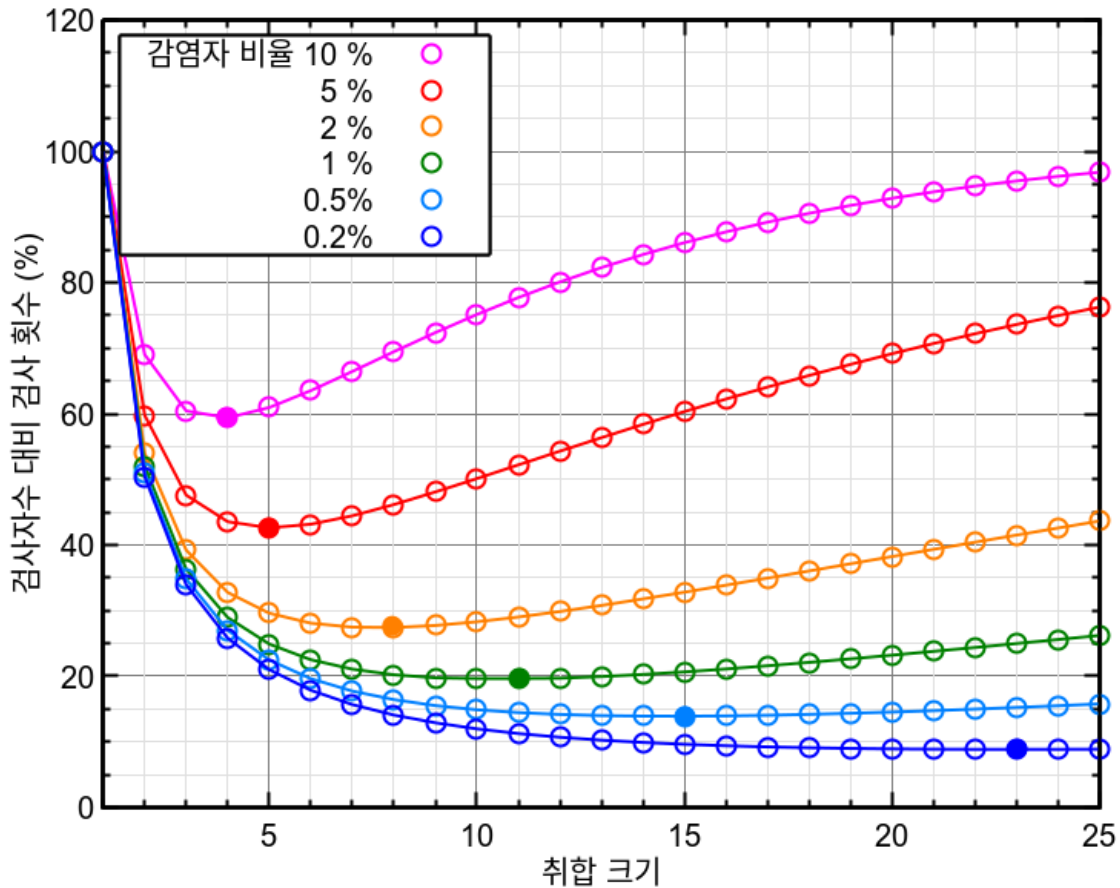


그림 4-5. 취합 크기가 변하면 총 검사횃수가 어떻게 변하는지를 보여주는 그래프. 검사를 받는 사람들 중에 감염자가 얼마나 많은지를 나타내는 감염자 비율에 따라 총 검사횃수는 다른 모양의 증감 패턴을 보인다. 그래프에서는 총 검사 횃수를 검사자수로 나눈 값으로 나타냈다. 최적의 취합 크기에 해당하는 결과는 속을 채운 동그라미로 그렸다. 계산 결과로 나온 취합 크기를 실제 상황에서 항상 쓸 수 있는 것은 아니다. 검사의 정확도 문제가 있기 때문이다. 취합 크기가 너무 크면 감염된 사람의 검체가 섞여있는 취합 검체가 음성이라고 판정할 확률이 커진다.

검사를 받는 사람들중에 감염자가 차지하는 비율이 0.2% 밖에 안되는 경우(파란색 동그라미)는 취합 크기가 23일 때 최적이다. 100만명을 검사하는 데 88,480번의 검사만으로 충분하다. 개별 검사방식으로는 88,480명을 검사할 수 있는 검사 역량만으로도 취합 검사 방식으로는 11배 이상 더 많은 100만명을 검사할 수 있다는 것을 의미한다. 그런데 이렇게 취합크기를 크게 하기 어렵다는 문제가 있다. 취합 크기가 커지면 검사의 정확도가 낮아지기 때문이다. 반대로 취합 크기를 줄이면 검사의 정확도는 높아진다. 검사의 정확도를 충분히 높게 유지하면서 총 검사 횟수도 충분히 적은 적절한 취합 크기를 결정하는 것이 중요하다. 2차 개별 검사를 하려면 1차 취합 검사에서 양성인 나온 취합 검체에 섞인 검체를 재분류하는 과정이 필요하다. 이러한 검체 재분류 과정에 들어가는 비용과 시간도 고려해야 한다.

그림 4-6은 감염자 비율에 따라 최적의 취합 크기와 그에 해당하는 총 검사 횟수를 그래프로 나타낸 그림이다. 감염자 비율이 낮으면 취합 검사에서 섞는 검체의 갯수를 늘릴 수 있고 총 검사 횟수도 줄일 수 있다. 감염자 비율이 높으면 반대로 섞는 검체의 갯수를 줄여야 하고 총 검사횟수도 늘어난다. 검사받는 사람들 중에 감염자가 차지하는 비율이 취합 검사를 준비하는데 중요한 변수라는 것을 의미한다. 이를 기반으로 검사의 정확도에 문제가 없고 검체 재분류 과정에 들어가는 비용과 시간을 감당할 수 있는 수준에서 취합 크기를 정해야 한다.

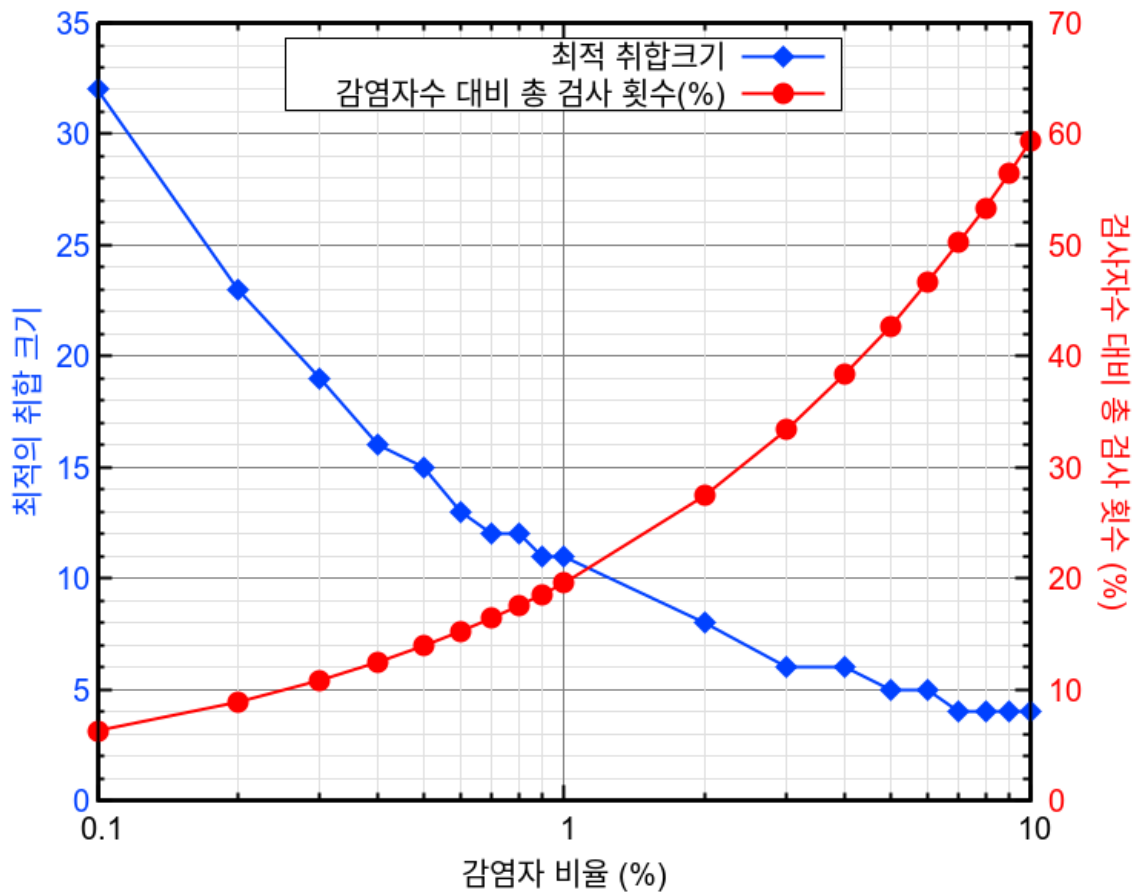


그림 4-6. 취합 검사에서 총 검사 횟수가 가장 작아지는 최적의 취합 크기와 그에 해당하는 총 검사횟수. 검사를 받는 사람들 중에 감염된 사람들이 차지하는 비율이 클 수록 최적의 취합 크기는 작아지고 총 검사 횟수는 늘어난다.

4-3. 오미크론 변이가 우세종이 되기 시작할 때 취합 검사 논란

취합 크기는 검사의 정확도 문제로 마음대로 늘릴 수 없다.

감염자 비율을 고려해 적절한 효율적으로 검사할 수 있는 취합 크기를 찾아야 한다.

2022년 1월말 취합 크기를 5에서 10으로 늘리자는 제안은 시기상으로 적절하지 못했다.

취합 크기가 커질수록 감염자의 검체가 섞인 취합 검체의 바이러스 농도는 낮아진다. 바이러스의 농도가 낮아질수록 PCR검사에서 음성이 나올 가능성이 커진다. 이런 경우 검사를 했음에도 불구하고 감염자를 감염되지 않았다고 판단하는 오류가 생길 가능성이 커진다. 검사의 정확도가 낮아지는 것이다. 이런 정확도 문제를 고려해, 한국에서는 취합 크기가 5개인 취합 검사를 시행했던 것으로 알려져 있다.[2]

오미크론 점유율이 증가하던 때의 취합 검사 논란

2022년 1월 하순 한국에서는 오미크론 변이의 점유율이 증가하면서 앞으로 신규 확진자수가 훨씬 더 많이 늘어날 것으로 예상하던 시기였다. PCR 검사 위주의 검사 방식에서 항원 검사 위주의 검사 방식으로의 전환을 예고하고 있었다. 이런 상황에서 1일 20일에 진단의학과 모 교수는 언론인과의 인터뷰에서 항원 검사의 정확도에 우려를 표하면서 취합 크기를 10개까지 늘리는 것을 고려해야 한다는 의견을 제안했다.[3]

당시 감염 확산 상황을 수치를 보면, 2022년 1월 20일은 임시선별검사소의 검사자수 대비 확진자수, 다시 말해 감염자 비율이 1%를 넘어 2%를 향해 가고 있었다.[4] 1월 20일에 발표된 전날 임시선별검사소에서 검사를 받은 검사자수는 132,276명이었고 그 중 2,178명이 확진되었다. 검사자중 감염자 비율이 1.65%였다. 이 검사자수와 감염자 비율에서 검체 5개를 섞는 취합 검사 방식으로 검사하면 총 37,000번 정도의 검사를 해야 한다. 검사자수 대비 총 검사 횟수는 28.0%이다. 1차 취합 검사에서는 $132,276 \div 5 = 26,500$ 번의 검사를 하므로, 2차 개별 검사에서는 $37,000 - 26,500 = 10,500$ 번의 검사를 한다고 볼 수 있다.

감염자 비율이 1.65%이고 취합 크기가 10개이면 총 검사 횟수는 33,500번 정도이고, 검사자수 대비 총 검사 횟수는 25.3%이다. 취합 크기가 5개였을 때 했을 것으로 추정된 총 검사 횟수 37,000번을 그대로 유지하고 취합 크기를 10개로 늘려 검사하면, 검사 할 수 있는 사람수는 $37,400 \div 0.253 = 146,000$ 명 정도이다. 약 10% 더 많은 사람을 검사할 수 있는 수준이다. 취합 크기를 5개에서 10개로 두 배 늘리면, 검사할 수 있는 사람수가 2배 가까이 늘어나는 것이 아닌, 10% 정도만 더 늘어나는 정도에 불과하다.

취합크기가 10인 취합 검사 방식으로 146,000명을 검사하면, 1차 취합 검사에서는 $146,000 \div 10 = 14,600$ 번의 검사를 한다. 2차 개별 검사 과정에서 총 검사 횟수에서 이 숫자를 뺀 $37,000 - 14,600 = 22,400$ 번의 검사를 한다. 취합 크기가 5일 때의 10,500번보다 2배 이상 많다. 2차 개별 검사를 위한 재분류 작업에 소모되는 인적 물적 자원과 시간을 따져봐야 하는 수준이다.

1주일 전인 1월 13일 임시선별검사소의 검사자수는 102,512명이었고 그 중 1,329명이 확진되어서, 검사자중 감염자 비율이 1.30%였다.[5] 이 감염자수와 감염자 비율에서 취합 크기가 5이면 총 검사 횟수는 27,000번 정도이다. 취합 크기를 5개에서 10개로 늘리면 같은 총 검사 횟수로 검사할 수 있는 사람수는 121,000명으로 18% 더 증가하는 정도이다. 이 경우도 2차 개별 검사를 위해 재분류해야 하는 검체수는 두 배 이상 늘어난다.

1주일 후인 1월 27일에는 임시선별검사소에서 검사받은 사람 199,860명 중 5,451명이 확진되어, 검사자중 감염자 비율이 2.73%였다.[6] 이 감염자수와 감염자 비율에서 취합 크기가 5이면 총 검사 횟수는 65,800번 정도이다. 취합 크기를 5개에서 10개로 늘리면 같은 총 검사 횟수로 검사할 수 있는 사람수는 192,000명으로 오히려 더 줄어든다. 취합 크기를 10개로 늘리는 것이 전혀 의미가 없는 경우다.

감염자 비율이 수도권과 비수도권이 다른 점도 고려해야 한다. 2022년 1월 20일 국내 발생 신규 확진자 6,357명 중에 서울, 경기도, 인천을 포함하는 수도권에서 4,063명이 나왔고 비수도권에서는 2,294명이다. 2021년 인구 분포를 보면 수도권의 인구는 약 26,055,000명이고 비수도권은 25,690,000명으로 거의 비슷하다.[7] 인구 대비 신규 확진자수를 계산하면 수도권이 비수도권에 비해 1.75배 많다. 임시 선별 검사소에서 검사를 받는 사람중에 감염자가 차지하는 비율도 수도권이 전국 평균보다 더 컸을 가능성이 있고, 이는 취합 크기에도 영향을 끼친다.

표 4-1. 2021년 1월 13일, 20일, 27일 임시 선별 검사소 결과로 추정된 취합 크기의 영향

	2021년 1월 13일	2021년 1월 20일	2021년 1월 27일
임시 선별검사소 검사자수	102,512명	132,276명	199,860명
임시 선별검사소 확진자수	1,329명	2,178명	5,451명
감염자 비율	1.30%	1.65%	2.73%

추정 총 검사 횟수 1차 취합 검사 횟수 2차 개별 검사 횟수 (취합 크기가 5개)	27,000번 20,500번 6,500번	37,000번 26,500번 10,500번	65,800번 40,000번 25,800번
취합 크기를 10개로 늘렸을 때 검사할 수 있는 사람수	121,000명 (18% ↑)	146,000명 (10% ↑)	193,000명 (3.4% ↓)
취합 크기 10개일 때 총 검사 횟수 1차 취합 검사 횟수 2차 개별 검사 횟수	27,000번 12,100번 14,900번	37,000번 14,600번 22,400번	65,800번 19,300번 46,500번

감염자 비율이 1.30%, 2.65%, 2.73%인 경우 취합 크기에 따라 총 검사횟수가 어떻게 변하지는 그림 4-7에서 볼 수 있다. 감염자 비율이 1.30%이면 취합 크기가 9인 경우가 검사자수 대비 총 검사횟수가 22.22%로 가장 낮다. (파란색 동그라미) 취합 크기가 8이거나 10이어도 22.44%와 22.27%로 거의 차이가 없다. 취합 크기가 5인 경우의 26.33%와는 약간의 차이가 있기는 하지만 큰 차이는 아니다. 감염자 비율이 1.65%이면 최적의 취합 크기가 8인 경우가 검사자수 대비 총 검사횟수가 24.96%로 가장 낮다.(초록색 동그라미) 이 경우도 마찬가지로 취합 크기가 7이거나 9이어도 25.28%와 25.02%로 거의 차이가 없다. 취합 크기가 5인 경우의 27.98%와는 큰 차이가 나지 않는다. 감염자 비율이 2.73%이면 취합 크기가 7인 경우가 검사자수 대비 총 검사횟수가 31.90%로 가장 낮다.(빨간색 동그라미) 취합 크기가 5인 경우의 32.93%와의 차이도 상당히 좁혀졌다.

총 검사 횟수가 10만번인 검사 역량으로 취합 검사를 할 경우 얼마나 많은 사람을 검사할 수 있는지는 표 4-2에 정리했다. 검사 받는 사람들 중 감염자가 차지하는 비율이 0.1%이면 취합 크기가 5일 때 검사 횟수보다 4.878배 많은 사람을 검사할 수 있고 취합 크기가 10일 때는 검사 횟수보다 9.095배 많은 사람을 검사할 수 있다. 취합 크기를 5에서 10으로 늘리면 거의 두 배 더 많은 사람을 검사할 수 있다.

하지만 2021년 1월 20일에서 1월 27일 사이 즈음에 임신 선별 검사소에서 검사 받은 사람들의 감염자 비율과 거의 비슷한 2%의 감염자 비율에서는 취합 크기를 5에서 10으로 늘려도 겨우 4.65% 더 많은 사람을 검사할 뿐이다. 이런 수치들을 고려하면, 결국 취합 크기를 5개에서 10개로 늘리자는 1월 20일의 제안은 시기상 부적절했음을 알 수 있다.

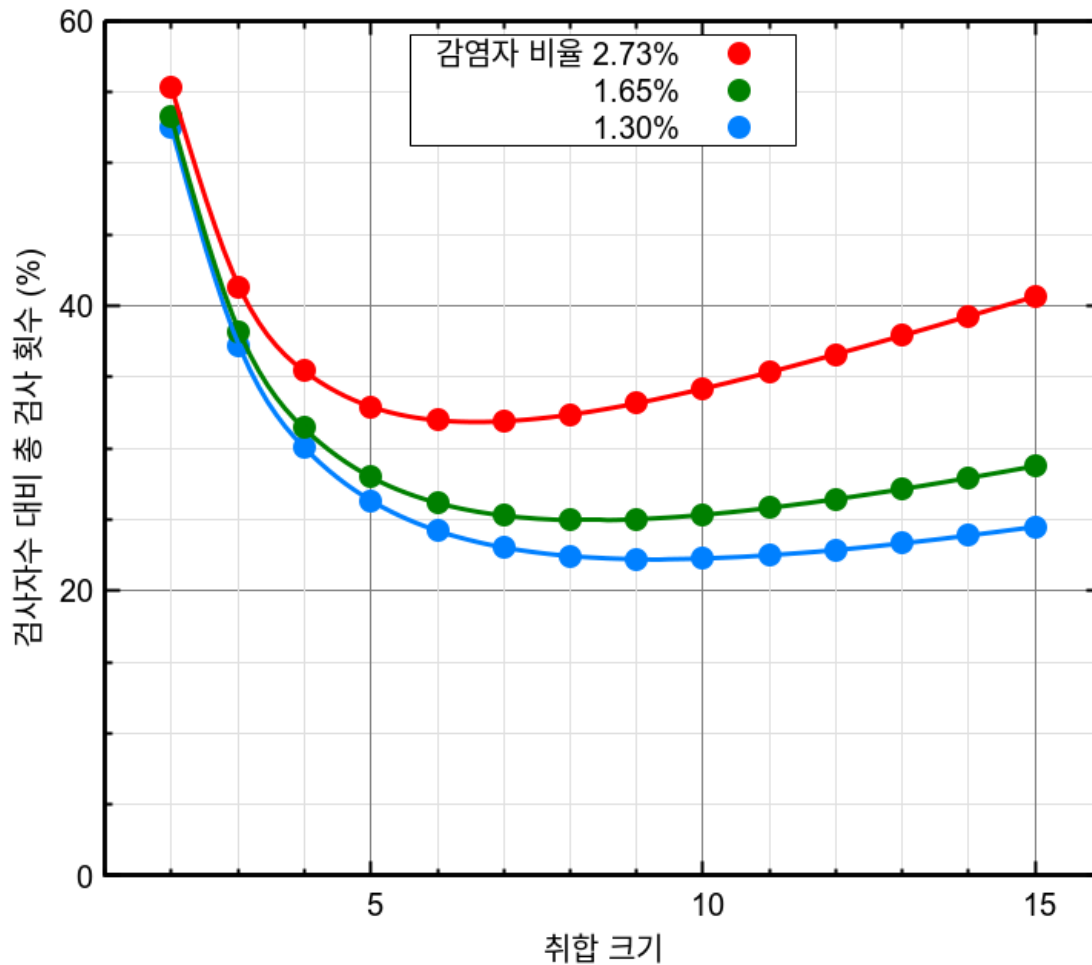


그림 4-7. 감염자 비율이 2022년 1월 13일, 1월 20일, 1월 27일에 임시선별검사소에서 검사한 사람들의 감염자 비율인 경우, 취합 검사의 취합 크기에 따라 검사자수 총 대비 검사 횟수가 어떻게 변하는지 보여주는 그래프. 검사자수 대비 총 검사 횟수가 작을수록 더 효과적이다. 1월 13일 감염자 비율 1.30%와 20일 감염자 비율 1.65%에서는 취합 크기를 5개에서 10개로 늘리면 약간의 긍정적인 효과를 볼 수 있지만 27일 감염자 비율 2.73%에서는 취합 크기를 5개에서 10개로 늘리면 오히려 더 효과가 안 좋아지는 상황이었다.

표 4-2 10만번 검사할 수 있는 검사역량으로 취합 검사를 할 때 검사할 수 있는 사람수.

감염자 비율	최합 크기가 5 인 경우 검사할 수 있는 사람수	최합 크기가 10 인 경우 검사할 수 있는 사람수	증가 비율
0.1%	487,800명	909,500명	+86.4%

0.2%	476,300명	834,600명	+75.2%
0.5%	444,900명	671,600명	+51.0%
1%	401,600명	511,200명	+27.3%
2%	337,700명	353,400명	+4.65%
5%	234,600명	199,500명	-15.0%
10%	164,100명	133,100명	-18.9%

언제 취합 크기를 늘리는 제안을 했어야 했을까?

2021년 11월 초 한국에서는 단기 확진자 치명률이 1%를 넘었다. 3부에서 다룬 바와 같이 델타 변이가 지배하던 시기에 영국의 단기 확진자 치명률이 0.4%를 밑돌던 상황과 비교하면, 2021년 11월 초 한국은 영국보다 2.5배 이상 감염자를 못 찾았다. 이 시기가 감염자를 더 많이 찾아내 격리함으로써 감염확산을 줄여야 했던 시기로, 적극적인 검사 전략을 시행했어야 했던 시기이다. 11월 1일 부터 11월 7일까지 임시 선별 검사소에서 검사를 받은 사람수는 656,243명이었고, 그 중 확진자는 4,791명이었다. 감염자 비율은 0.730%이었다.[9]

감염자 비율이 0.730%이고 취합 크기가 5개이면 검사자수 대비 총 검사 횟수는 23.6%이다. 11월1일부터 11월 7일까지 임시 선별 검사소에서 검사한 사람수가 656,243명을 취합 크기 5로 취합 검사를 했으면 총 $656,243 \times 23.6\% = 155,000$ 번의 검사를 했을 것으로 추정할 수 있다. 만약에 취합 크기를 10개로 늘리면 검사자수 대비 총 검사 횟수는 17.1%이다. 총 검사 횟수가 155,000번으로 같으면, 검사할 수 있는 사람수는 $155,000 \div 17.1\% = 908,000$ 명이다. 취합 크기를 5개에서 10개로 두 배 늘리면 검사할 수 있는 사람수는 38.3% 늘어난다. 취합 크기가 2배로 커진 것에 비하면 증가하는 정도가 크지 않지만, 상당히 효과가 있는 수준이다. 비수도권 임시 선별 검사소에서의 감염자 비율이 더 낮았다는 것을 감안하면 비수도권에서 취합 크기를 늘림으로써 볼 수 있는 효과가 더 컸을 것으로 추측할 수 있다

이보다 한 달 전인 2021년 10월초에도 단기 확진자 치명률이 0.4%를 넘으면서 상승하는 추세였다. 2021년 7월말과 8월초의 0.2%에 비하면 두 배 이상으로 높아지는 시기였다. 젊은 층의 백신 접종률이 올라가면서 단기 확진자 치명률이 높아지는 시기였지만, 하루 신규 확진자수가 2천명을 넘으면서 절대적인 수치 자체가 일시적으로 늘어나는 시기였다. 이후에

신규 확진자수가 줄기는 했지만 줄어든 신규 확진자수는 감염자가 줄어들었다기 보다는 감염자를 잘 찾지 못해서 확진자수가 줄어들었을 가능성이 컸던 때이다.

10월 1일부터 10월7일까지 임시 선별 검사소에서 검사를 받은 사람수는 694,432명이었고 이중 4,218명이 확진됐다. 감염자 비율은 0.607%였다. 이 감염자 비율에서 취합크기를 5개에서 10개로 늘렸으면 같은 총 검사 횟수로 45% 더 많은 사람을 검사할 수 있었다. 이 때도 취합 크기를 5개에서 10개로 늘리면 검사할 수 있는 사람수도 상당히 늘릴 수 있던 시기였다.[8]

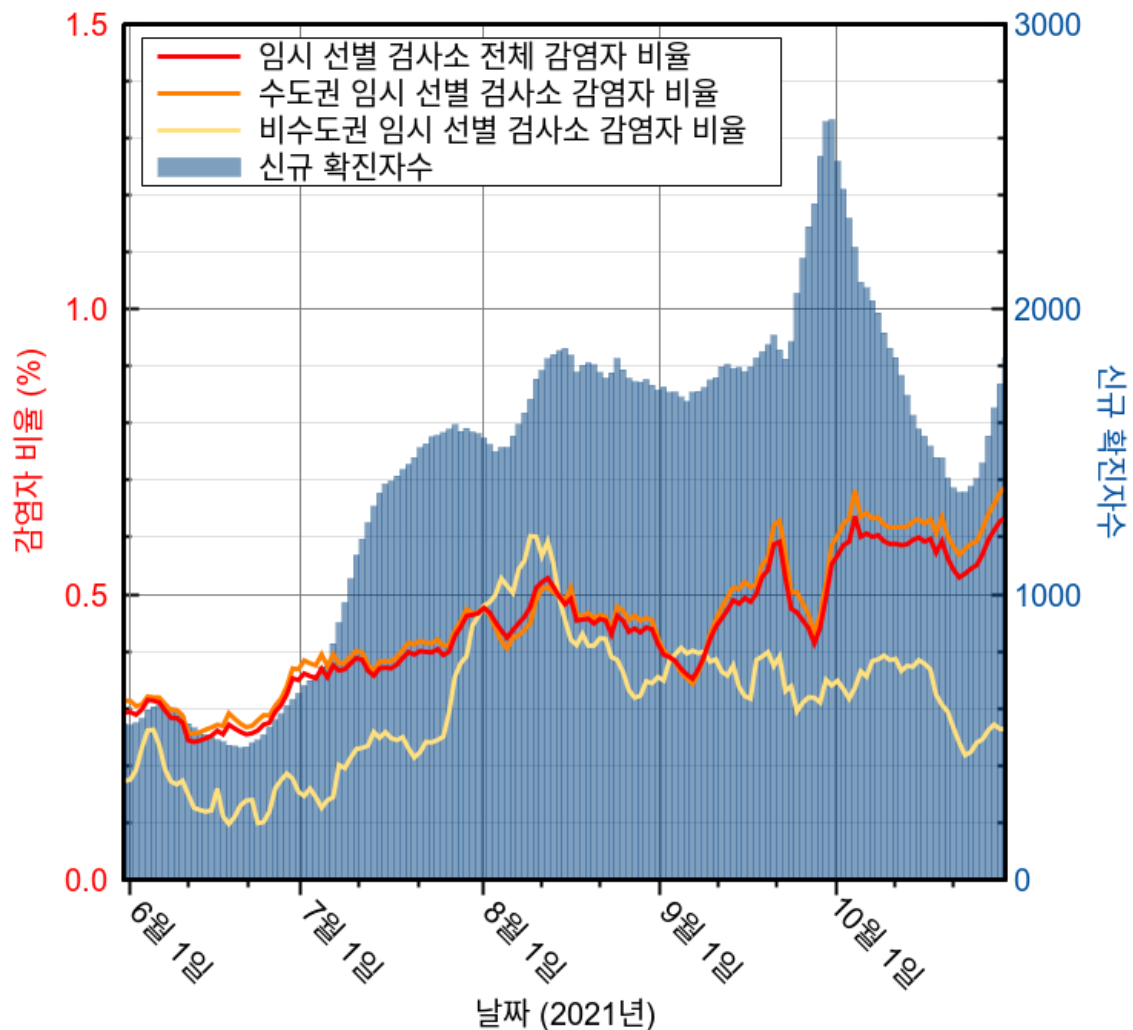


그림 4-8. 2021년 6월부터 델타 변이로 인해 신규 감염자가 폭증하기 전이 10월 말까지의 신규 확진자수(파란색 막대), 임시 선별 검사소에서 검사 받은 사람들 중 감염자가 차지한 비율(수도권: 주황색 곡선, 비수도권: 노란색 곡선, 전체: 빨간색 곡선) 021년 10월 이전

임시선별검사소에서 검사받은 사람들 중 감염된 사람들이 차지하는 비율은 0.5% 수준이었다. 이 시기에 취합 크기를 5개에서 10개로 늘렸으면 검사할 수 있는 사람수를 50%이상 늘릴 수 있던 시기였다.

표 4-3. 2021년 11월 1일에서 2022년 1월 1일까지 주간 하루 신규 확진자수 평균, 임시 선별 검사소에서 검사 받은 사람들중 감염자 비율, 취합 크기를 5개에서 10개로 늘렸을 때 더 검사할 수 있는 사람수를 정리한 표.

	하루 신규 확진자 1주일 평균	임시 선별 검사소 감염자 비율	취합 크기를 5개에서 10개로 늘렸을 때 늘어나는 검사자수 (%)
2021년 11월1일 ~ 11월7일	2254	0.730%	+38.3%
2021년 11월8일 ~ 11월14일	2218	0.793%	+35.4%
2021년 11월15일 ~ 11월21일	2853	0.886%	+32.3%
2021년 11월22일 ~ 11월28일	3689	0.972%	+28.3%
2021년 11월29일 ~ 12월4일	4421	1.05%	+25.6%
2021년 12월5일 ~ 12월11일	6097	1.18%	+21.6%
2021년 12월12일 ~ 12월18일	6898	1.27%	+19.1%
2021년 12월19일 ~ 12월25일	6170	1.14%	+22.7%
2021년 12월26일 ~ 2022년 1월1일	4746	1.08%	+24.6%

표 4-3은 2021년 11월 1일부터 2022년 1월 1일까지 일주일 간격을 나눠 하루 신규 확진자수 평균과 임시 선별 검사소에서 검사 받은 사람들 중 감염자 비율, 그리고 이로 부터 취합 검사의

취합 크기를 5개에서 10개로 늘렸을 경우 얼마나 더 검사할 수 있는지를 정리한 표이다. 신규 확진자수가 정점이었던 12월 12일에서 18일 사이에 취합 크기 5개에서 10개로 늘렸으면 검사량은 19.1% 늘었겠지만, 이 보다 5주 전인 11월 8일에서 11월 14일 사이에 취합 크기 5개에서 10개로 늘렸으면 검사량은 35.4% 늘릴 수 있었다.

이미 11월 초에 단기 확진자 치명률이 1%를 넘는 위험 징후가 있었기 때문에, 11월 10일 전후에 감염자를 더 찾아내기 위한 조치가 필요한 시기였다. 이때 취합 크기를 5개에서 10개로 늘려 검사역량을 확충하고, 감염 전파 위험이 큰 집단에 대한 검사를 더 강화했으면 이후 12월 15일 전후에 나타났던 한국의 의료 위기 상황을 좀 더 완화할 수 있었지 않았나 하는 생각을 해 볼 수 있다.

감염자 비율이 달라지면 검사 역량도 달라진다.

델타 변이로 하루 신규 확진자수가 정점에 이르렀던 시기에 임시 선별 검사소에서 검사를 받은 사람들중에 감염자가 차지하는 비율은 약 1.3%였다. 이 기간동안 임시 선별 검사소에서 검사받은 사람수는 20만명 수준이었다. 취합 크기 5인 취합 검사 방식으로 감염자 비율이 1.3%인 20만명을 검사하려면 1차 취합 검사와 2차 개별 검사를 합쳐 모두 친 총 검사 횟수는 5만 2,700번의 검사를 해야 한다.

검사를 받는 사람들중에 감염자가 차지하는 비율이 3%로 높아졌다고 하자. 취합 크기를 5로 유지하면서 임시 선별 검사소에서 하루에 할 수 있는 검사 횟수 5만 2,700번으로 검사할 수 있는 사람 수는 15만 4,000명이다. 검사할 수 있는 사람수가 감염자 비율이 1.3%일 때보다 4만 6,000명 줄어든다. 감염자 비율이 3.0%일 때 최적의 취합 크기는 6인데, 이 취합 크기로 검사하면 15만 8,000명을 검사할 수 있을 뿐이다. 취합 크기를 더 늘리거나 줄이면 검사할 수 있는 사람 수는 더 줄어든다.

만약에 감염자 비율이 훨씬 커져서 더 이상 취합 검사를 하지 못하고 개별 검사 방식으로 검사를 해야 하는 상황이라고 하자. 그러면 같은 수의 PCR 장비로 검사할 수 있는 사람수는 20만명에서 5만 2,700만명으로 줄어든다. 임시 선별 검사소에서 할 수 있는 검사 역량이 감염자 비율이 3%일 때와 비교하면 거의 3분의 1 수준으로 낮아지고, 감염자비율이 1.3%일 때와 비교하면 거의 4분의 1 수준으로 낮아진다.

반대로 감염자 비율이 0.5%로 낮아졌다고 하자. 취합 크기를 5로 유지하면서 임시 선별 검사소에서 하루에 할 수 있는 검사 횟수 5만 2,700번으로 검사할 수 있는 사람 수는 23만

4,000명으로 3만 4,000명 더 검사할 수 있다. 취합 크기를 10으로 늘리면 35만 4,000명을 검사할 수 있다. 15만 4,000명을 더 검사할 수 있다.

만약에 감염자 비율이 0.1%로 훨씬 낮아졌다고 하자. 임시 선별 검사소에서 하루에 할 수 있는 검사 횟수 5만 2,700번으로 검사할 수 있는 사람 수는 25만 7,000명으로 늘어난다. 감염자 비율이 1.3%일때 보다 5만7,000명 더 많은 사람을 검사할 수 있다. 만약에 취합 크기를 5에서 10으로 늘릴 수 있으면 검사할 수 있는 사람수는 47만 9,000명으로 거의 28만명을 더 검사할 수 있다. 개별 검사 방식보다는 9배 이상 더 많은 사람을 검사할 수 있다.

PCR검사 역량은 결국 검사를 받는 사람들 중에서 감염자가 차지하는 비율과 취합 크기에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 감염자 비율이 낮을 때는 허용할 수 있는 검사의 정확도까지 취합 크기를 늘리고 감염 위험이 높은 집단을 찾아 적극적으로 더 많은 사람을 검사할 필요가 있다. 무증상 감염자를 더 많이 찾아낼수록 이들을 격리함으로써 감염 확산 규모도 줄이는 이득이 있기 때문이다.

표 4-4. 2021년 12월 중순 감염자 비율 1.3%일 때 한국의 임시 선별 검사소에서 하루에 검사한 사람수 20만명을 기준으로 감염자 비율과 취합 크기에 따라 검사 역량이 어떻게 변하는지를 정리한 표. 검사자수 증가율을 감염자 비율이 1.3%이고 취합 크기는 5일 때 검사자수 20만명이 기준이다. 총 검사 횟수는 같다고 가정하고 계산했다.

감염자 비율	총 검사 횟수	취합 크기 5		취합 크기 10	
		검사자수	검사자수 증가율	검사자수	검사자수 증가율
1.3%	52,700	200,000명		236,000명	+18%
3.0%	52,700	154,000명	-23%	146,000명	-27%
10%	52,700	86,400명	-57%	70,000명	-65%
0.5%	52,700	234,000명	+17%	354,000명	+77%
0.1%	52,700	257,000명	+29%	479,000명	+140%

주

- [1] "Optimization of group size in pool testing strategy for SARS-CoV-2: A simple mathematical model", D. Aragón-Caqueo, J. Fernández-Salinas, & D. Laroze, Journal of Medical Virology, 92, 1988 (2020), doi: <https://doi.org/10.1002/jmv.25929>
- [2] "코로나19 단기 대량 검사 위한“취합검사법”프로토콜 제작", 질병관리청, 2020년 4월 9일, <http://ncov.mohw.go.kr/tcmBoardView.do?contSeq=353999>
- "코로나19 국내 첫 환자 발생 100일...진단검사법도 진화 中", 동아사이언스, 2020년 4월 28일, <http://www.dongascience.com/news.php?idx=36353>
- "수원·부천 등 4개시 요양병원 60곳 7천781명 검사...전원 '음성'", 이우성, 연합뉴스, 2020년 6월 2일, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20200602037500061>
- "원주 코로나19 확진자 증가...지역사회 불안 고조", 김영인, 연합뉴스, 2020년 11월 2일, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20201102102600062>
- "방역당국 “하루 검사 가능량 40~50만 건...진단키트 안 부족해”", KBS News, 2021년 7월 8일, <https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=5228671>
- [3] "신속항원검사로 ‘놓친 감염자’, 오미크론 확산 증폭제 될 수도", 송수연, 청년의사, 2022년 1월 24일, <http://www.docdocdoc.co.kr/news/articleView.html?idxno=2019067>
- "오미크론 확산, 신속항원검사 도입의 득과 실은?", K-헬스로그, <https://www.youtube.com/watch?v=zFdk6l7sEJ4>
- [4] "코로나19 예방접종 및 국내 발생 현황(1.20., 0시 기준)", 보도자료, 질병관리청, 2022년 1월 20일, http://ncov.mohw.go.kr/tcmBoardView.do?brdId=3&brdGubun=31&ncvContSeq=6303&board_id=312
- [5] "코로나19 예방접종 및 국내 발생 현황(1.13., 0시 기준)", 보도자료, 질병관리청, 2022년 1월 13일, http://ncov.mohw.go.kr/tcmBoardView.do?brdId=3&brdGubun=31&ncvContSeq=6283&board_id=312
- [6] "코로나19 예방접종 및 국내 발생 현황(1.27., 0시 기준)", 보도자료, 질병관리청, 2022년 1월 27일, http://ncov.mohw.go.kr/tcmBoardView.do?brdId=3&brdGubun=31&ncvContSeq=6320&board_id=312

[7] “지역별 인구 및 인구밀도”, e-나라지표,
https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1007

[8] "코로나19 예방접종 및 국내 발생 현황(10.07., 0시 기준)", 보도자료, 질병관리청, 2021년 10월 7일,
http://ncov.mohw.go.kr/tcmBoardView.do?brdId=3&brdGubun=31&ncvContSeq=5986&board_id=312

[9] "코로나19 예방접종 및 국내 발생 현황(11.07., 0시 기준)", 보도자료, 질병관리청, 2021년 11월 7일,
http://ncov.mohw.go.kr/tcmBoardView.do?brdId=3&brdGubun=31&ncvContSeq=6077&board_id=312