

암세포의 대사 과정은 정상 세포와 다른 것으로 알려져 있다. 오토 바르부르크가 발표한 '바르부르크 효과'에 따르면 암 세포는 '해당작용'을 주된 에너지 획득 기전으로 수행하고 또 다른 에너지 획득 방법인 '산화적 인산화'는 억제한다.

세포는 영양분으로 섭취한 큰 분자를 작은 분자로 쪼개는 과정을 통해 ATP를 생성하는데 이 과정은 '이화작용'이라고 한다. 또한 ATP와 같은 고에너지 분자의 에너지를 이용하여 세포의 성장과 분열을 위해 작은 분자로부터 단백질, 핵산과 같은 거대 분자를 합성하는 과정을 '동화작용'이라고 한다. 이 화작용을 통해 ATP를 생산하기 위해 세포는 영양 물질을 내부로 수송하는데, 가장 대표적인 영양 물질인 포도당은 세포 내부로 이동하여 해당작용과 산화적 인산화를 통해 작은 분자로 분해된다. 이론적으로 포도당 1개가 가지고 있는 에너지가 모두 ATP로 전환될 경우 36개 또는 38개의 ATP가 만들어진다. 이 중 2개의 ATP는 세포질에서 일어나는 해당작용을 통해, 나머지는 미토콘드리아에서 대부분 산화적 인산화를 통해 만들어진다.

해당작용과 산화적 인산화는 수행되는 장소도 다르지만 요구조건도 다르다. 해당작용에는 산소가 필요하지 않지만, 산화적 인산화에는 필수적이다. 세포 내부에 산소가 부족하면 산화적 인산화는 일어나지 못하고 해당작용만 진행되며, 이 경우에는 해당작용의 최종 산물인 피루브산이 젖산으로 바뀌는 젖산 발효가 일어난다. 심폐 기능에 비해 과격한 운동을 하였을 때 근육 세포에서 생성된 젖산이 근육에 축적된다. 젖산 발효 과정은 해당작용에 필요한 조효소 NAD<sup>+</sup>의 재생산을 위해 필수적이다. NAD<sup>+</sup>로부터 해당작용의 또 다른 생성물인 조효소 NADH가 생성되기 때문이다. 해당작용에서 포도당 1개가 2개의 피루브산으로 분해될 때 NADH가 2개 만들어지고, NADH 1개당 3개의 ATP를 산화적 인산화를 통해 만들 수 있는데, 젖산 발효를 하는 세포는 NADH를 에너지가 낮은 상태인 NAD<sup>+</sup>로 전환하는 손해를 감수한다.

바르부르크 효과는 산소가 있어도 해당작용을 산화적 인산화에 비해 선호하는 암세포 특이적 대사 과정인 '유산소 해당작용'을 뜻한다. 암세포가 더 빨리 분열하는 악성 암세포로 변하면 산화적 인산화에 대한 의존을 줄이고 해당작용에 대한 의존이 증가한다. 약물 처리 등으로 그 반대의 경우가 되면, 해당작용에 대한 의존이 줄고 산화적 인산화에 대한 의존이 증가한다. 유산소 해당작용을 수행하는 암세포는 포도당 1개당 ATP 2개만을 생산하는 효율이 떨어지는 해당작용에 에너지 생산을 대부분 의존하므로 정상세포에 비해 포도당을 더 많이 세포 내부로 수송하고 젖산을 생산한다.

바르부르크 효과의 원인에 대해 다음 세 가지 설명이 있다. 첫 번째는 암세포의 빠른 성장 때문에 세포의 성장에 필요한 거대 분자를 동화작용을 통해 만들기 위해 해당작용의 중간 생성 물질을 동화작용의 재료로 사용하려고 해당작용에 집중한다는 것이다. 두 번째는 체내에서 암세포의 분열로 암

조직의 부피가 커져서 산소가 그 내부까지 충분히 공급되지 못하기 때문에 암세포가 산소가 없는 환경에 적응하도록 진화했다는 것이다. 세 번째는 미토콘드리아의 기능을 암세포가 억제하여 미토콘드리아에 의해 유발되는 세포 자살 프로그램의 실행을 방해함으로써 스스로의 사멸을 막으려 한다는 이론이다. 바르부르크는 이러한 암세포 특이적 대사과정의 변이를 발암의 원인으로 설명하였다. 그러나 최근의 연구에서는 발암 유전자의 활성화와 암 억제 유전자에 생기는 돌연변이가 주된 발암 원인이고, 바르부르크 효과는 암의 원인이 라기보다는 그러한 돌연변이에 의한 결과로 발생하는 것으로 밝혀졌다.

01  
윗글과 일치하는 것은?

정답 ④

- ① 해당작용의 산물 중 NADH는 미토콘드리아에서 ATP를 추가로 생산하는 데 **사용되지 않는다.**  
해당작용의 생성물인 조효소 NADH는(3문단), 미토콘드리아에서 일어나는 산화적 인산화(2문단)를 통해 ATP를 생산하는 데 사용된다(3문단).
- ② 해당과정 중 소비되는 NADH의 재생산은 해당작용의 지속적 수행에 필수적이다.  
NADH는 해당작용으로 생성되며(3문단), 그 이후에 산화적 인산화 과정에서 사용된다(3문단). 즉 NADH는 해당과정이 끝난 이후에 소비된다.
- ③ 심폐기능에 비해 과격한 운동을 하면 근육에서 젖산은 늘어나고 NAD<sup>+</sup>는 **줄어든다.**  
과격한 운동으로 세포 내부에 산소가 부족해지면 해당작용이 진행되어 젖산 발효가 일어나고(3문단), 이때 해당작용에는 NAD<sup>+</sup>가 필요하므로 NAD<sup>+</sup>가 줄어들지만(3문단), 젖산 발효를 하는 세포는 NADH를 NAD<sup>+</sup>로 변환하여 NAD<sup>+</sup>가 다시 늘어나므로(3문단), 결과적으로 NAD<sup>+</sup>가 줄어든다고 볼 수 없다.
- ④ 동화작용에서 거대 분자를 만들 때 해당작용의 중간 생성물이 사용된다.  
동화작용을 통해 거대 분자를 만들 때, 해당작용의 중간 생성 물질을 재료로 사용한다(5문단).
- ⑤ 바르부르크 효과에 의해 암 억제 유전자의 돌연변이가 **유발된다.**  
바르부르크 효과는 암 억제 유전자의 돌연변이를 유발하는 원인이 아니라, 돌연변이로부터 발생하는 결과이다(5문단).

02

윗글에서 추론한 것으로 적절하지 않은 것은?

정답 ⑤

- ① 미토콘드리아의 기능이 상실되면 NADH로부터 ATP를 만들지 못한다.  
NADH로부터 ATP를 만드는 것은 산화적 인산화이며(3문단), 산화적 인산화는 미토콘드리아에서 발생한다(2문단). 따라서 미토콘드리아의 기능이 상실되면 NADH로부터 ATP를 만들지 못한다.
- ② 유산소 해당작용을 수행하는 암세포는 산소가 충분히 존재할 때도 해당과정의 산물을 NAD<sup>+</sup>와 젖산으로 전환시킨다.  
유산소 해당작용을 수행하는 암세포는 산소가 충분히 존재하더라도 해당작용을 수행한다(4문단). 이 암세포는 해당과정의 산물인 피루브산을 젖산으로 전환하고(2문단), 또 다른 산물인 NADH를 NAD<sup>+</sup>로 전환한다(3문단).
- ③ 포도당 1개가 가지고 있는 에너지가 전부 ATP로 전환될 때 미토콘드리아에서 34개 또는 36개의 ATP가 만들어진다.  
포도당 1개가 가지고 있는 에너지가 전부 ATP로 전환될 경우 36개 또는 38개의 ATP가 만들어지는데, 이들 중 2개는 세포질에서 해당작용을 통해 만들어진다(2문단). 따라서 미토콘드리아에서 만들어지는 ATP는 34개 또는 36개이다.
- ④ 포도당 1개가 피루브산 2개로 분해되었고 이때 생성된 조효소의 에너지도 모두 미토콘드리아에서 ATP로 전환되었다면, 이 과정에서 생성된 ATP는 모두 8개이다.  
해당작용을 통해 포도당 1개가 피루브산 2개로 분해될 때 ATP는 2개 만들어지고(2문단), NADH는 2개 만들어진다(3문단). 이때 NADH 2개는 산화적 인산화를 통해 미토콘드리아에서 ATP 6개로 전환되므로(3문단), 이 과정에서 생성된 ATP는 도합 8개이다.
- ⑤ 암세포의 유산소 해당작용 과정 중 포도당 1개당 생산되는 ATP의 개수는 정상세포의 산소가 있을 때 수행되는 해당작용의 과정 중 포도당 1개당 생산되는 NADH의 개수보다 많다.  
암세포가 해당작용을 수행할 때 포도당 1개당 생산되는 ATP의 개수는 2개이고(3문단), 정상세포가 해당작용을 수행할 때 포도당 1개당 생산되는 NADH의 개수 또한 2개이다(3문단).

03

윗글과 <보기>를 바탕으로 한 설명으로 가장 적절한 것은?

정답 ④

<보기>

암을 진단하기 위해 사용되는 PET(양전자 방출 단층촬영)는 방사성 포도당 유도체를 이용하는 핵의학 검사법이다. 방사성 포도당 유도체는 포도당과 구조적으로 유사하여 암 조직과 같은 포도당의 흡수가 많은 신체 부위에 수송되어 축적되므로 단층촬영을 통해 체내에서 양전자를 방출하는 방사성 포도당 유도체의 분포를 추적할 수 있다.

- ① 피루브산이 젖산으로 전환되는 양이 증가하면 방사성 포도당 유도체의 축적이 줄어들 것이다.  
피루브산이 젖산으로 전환되는 양이 증가하면 해당작용의 빈도가 증가한 것이므로, 정상세포에 비해 포도당을 더 많이 흡수하여(4문단) 축적은 늘어날 것이다.
- ② 포도당이 피루브산으로 전환되는 양이 감소하면 방사성 포도당 유도체의 축적이 늘어날 것이다.  
피루브산이 젖산으로 전환되는 양이 감소하면 해당작용의 빈도가 감소한 것이므로, 정상세포에 비해 포도당을 더 적게 흡수하여(4문단) 축적은 줄어들 것이다.
- ③ 세포 내부의 산소가 줄어들어도 동일한 양의 ATP를 생성하려면 방사성 포도당 유도체의 축적이 늘어날 것이다.  
산화적 인산화에는 산소가 필수적으로 요구되므로(3문단), 세포 내부의 산소가 줄어들면 산화적 인산화에 대한 의존이 줄고 해당작용에 대한 의존이 늘어난다. 해당작용은 산화적 인산화에 비해 효율이 낮으므로(4문단), 산소가 줄어들기 전과 동일한 양의 ATP를 생성하려면 포도당을 더 많이 필요로 하여(4문단) 축적이 늘어날 것이다.
- ④ ATP의 생성을 해당작용에 좀 더 의존하도록 대사 과정의 변화가 일어난다면 방사성 포도당 유도체의 축적이 줄어들 것이다.  
해당작용에 대한 의존이 늘어나면 포도당을 더 많이 필요로 하여(4문단) 축적은 늘어날 것이다.
- ⑤ ATP의 생성을 산화적 인산화에 좀 더 의존하도록 대사 과정의 변화가 일어난다면 방사성 포도당 유도체의 축적이 늘어날 것이다.  
산화적 인산화에 대한 의존이 늘어나면 해당작용에 대한 의존도가 줄어드므로, 포도당을 더 적게 필요로 하여(4문단) 축적은 줄어들 것이다.