

생물학적 폐·하수처리



이문호 이호환경건설링 대표이사 ☎ 031-407-8001
leehojamun@hanmail.net

<필자약력>

- 한국과학기술원 생물공학과 이학석사 ○ 국립환경과학원 12년 근무
- 1995년~현재 이호환경건설링 대표

:: 연재

하수, 폐수, 활성슬러지 시험법

3. 활성슬러지의 지표미생물

활성슬러지에 증식할 수 있는 미생물은 단세포로서 현미경을 통해서만 볼 수 있는 세균을 위시하여 곰팡이, 효모, 조류, 방선균이 증식할 수 있고 포식자로서는 원생동물(육질충류, 편모충류, 섬모충류)과 후생동물이 증식할 수 있다. 이미 후생동물은 분류상 미생물그룹에 속하지 않지만 활성슬러지에 출현되는 후생동물을 미소후생동물이라고 부르며 일반적으로 미생물과 함께 다루고 있다. 미소후생동물보다도 더 상위의 생물도 종종 활성슬러지에 나타나는 데 갑각류나 곤충의 유충 등 맨눈으로도 볼 수 있는 것들이다. 활성슬러지에 증식되는 모든 생물이 전부 지표로서의 가치는 있다. 생물은 살 수 있는(can) 환경에서만 살기 때문이다. 즉 모든 생물은 각자 살아갈 수 있는 내성에 한계(tolerance limits)가 있다. 생물에 따라서 이 내성의 범위가 다르기 때문에 지표로 활용이 가능하다.

생물을 지표로 활용하기 위해서는 현미경 관찰로 쉽게 동정(同定, identification, 이름을 아는 것)이 가능한 것이라야 한다. 그래서 형태적 특징과 함께 운동성 등을 관찰하여 동정이 가능한 생물을 지표

로 많이 이용한다. 그래서 활성슬러지에서 원생동물이 가장 많이 지표로 이용되고 있다.

생물의 종을 밝혀 활성슬러지를 진단할 수도 있겠으나 때로는 미생물 그룹별 조성을 기준으로 활성슬러지를 진단하기도 한다. 생물의 종을 기준으로 할 때는 그 생물종의 지표성이 확실해야 한다. 한편 생물의 조성을 통해 진단할 때는 생물의 양까지 조사해야 된다.

생물학적 진단으로서 지표생물을 이용할 때 어디까지나 생물의 증식은 단지 한가지 환경에만 좌우되는 것이 아니라는 사실을 항상 염두에 두어야 한다. 활성슬러지의 생물은 물리적, 화학적 환경(영양분과 영양염류, 수온, DO, pH, 독성물질 등)에 영향을 받는다. 그러나 활성슬러지 폭기조에는 이러한 환경외에도 생물학적인 환경(먹이원이 있는가? 먹이를 서로 차지하려는 경쟁, 경쟁자가 못 자라게 하는 저해작용, 포식 등)도 있어서 증식에 영향을 준다. 결국 활성슬러지 폭기조내에는 복잡하게 얽혀있는 생태계라고 볼 수 있다. 활성슬러지 미생물과 물리적, 화학적 환경과의 상관, 생물과 생물간의 상호작용 등 완벽한 먹이연쇄가 형성되고 있다고 볼 수 있다. 따라서 출현되는 생물은 바로 이 복잡한 폭기조생태계의 결과물인 것이다.

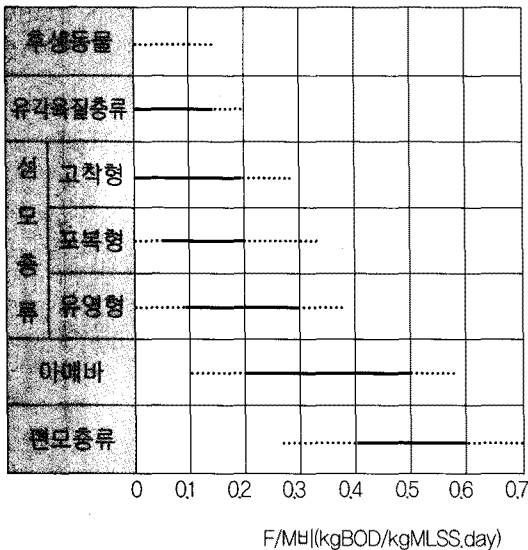
폭기조의 생물을 조사함은 활성슬러지의 안정성

이나 처리수의 수질을 진단하는 목적뿐 아니라 앞으로 일어날 어떤 트러블을 예측하는 데도 큰 도움이 될 수 있어 트러블을 사전에 예방하는 차원에서도 필요하다.

3-1. 미생물그룹별 지표성

우점으로(숫자가 많은 중) 출현되는 미생물그룹을 보고 F/M비를 추정하는 것이 일반적으로 이용되고 있다.

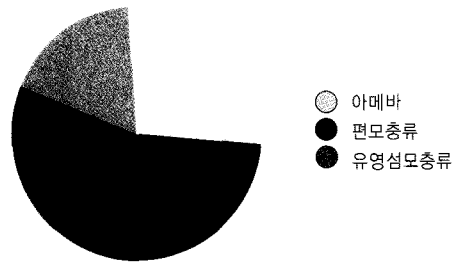
F/M비에 따라 우점으로 출현되는 미생물그룹



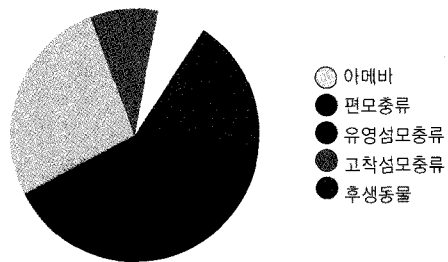
편모충류는 F/M비 0.4~0.6범위에서, 섬모충류는 0.05~0.3의 범위에서 주로 출현되고 유각육질충류는 F/M비 0.15이하에서 우점될 수 있다. 그러므로 편모충류, 아메바가 우점되면 부하량이 높고 섬모충류가 출현되면 부하량이 적정범위에 가깝다. 유각육질충류나 후생동물이 나타나면 부하량이 낮다고 볼 수 있다. 미생물그룹별 출현 F/M비 범위를 너무 명확하게 할려고 하는 것보다는 F/M비 증가에 따라 미생물그룹별로 편모충류 → 아메바 → 유영, 포복형 섬모충류 → 고착형섬모충류 → 유각육질충류, 후생동물 순서로 출현된다는 것으로 보면 될 것이다.

3-2. 활성슬러지의 미생물조성에 의한 진단

그림A는 아메바와 편모충류가 우점하고 있다. 반면에 고착형섬모충류와 후생동물은 거의 출현되지 않는다. 앞서 살펴본 F/M비와 지표미생물그룹과의 관계에서 판단하건데 F/M비가 높음을 알 수 있다. 그리하여 슬러지 침강후 상등액이 혼탁해지는 경우가 많다. 뿐만 아니라 생물의 양(biomass)은 많을지라도 출현되는 원생동물의 종이 적어 안정된 생물계라고 볼 수 없다.



그림A : 편모충류 우점, 상등액 혼탁



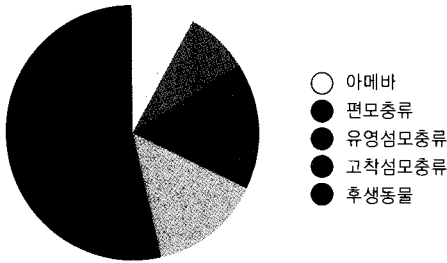
그림B : 섬모충류 우점, 침전성이 양호, 상등액 맑음

그림B는 섬모충류가 우점되고 있으며 아메바와 편모충류도 소량 나타나고 후생동물 역시 일부 나타난다. 아울러 출현되는 원생동물의 종이 다양하다. 따라서 적절한 F/M비로서 생물계가 안정되고 슬러지 침강성이 좋고 상등액 역시 맑다.

그림B처럼 여러종류의 미생물이 출현된다는 것은 그만큼 활성슬러지 환경이 미생물들에겐 '파라다이스' 또는 '유토피아'로 불릴 정도로 좋다는 이야기다. 즉 활성슬러지의 미생물들이 행복할 때

(happy) 그들은 증식하고 활성이 왕성해진다. 그래서 우리가 보는 오염물질도 잘 제거해 주고 슬러지 침강성도 좋아 침전조에서 고액분리도 잘 이루어져 맑은 처리수를 얻을 수 있다. 그래서 우리는 활성슬러지내의 미생물들이 happy해지도록 환경을 만들어주어야 하는데 물론 happy한 환경을 만들어준다는 게 그리 쉬운 일은 아니다.

아무튼 활성슬러지내에 섬모충류가 우점하고(유영형섬모충류가 고착형섬모충류보다 약간 더 많은 조성)여러 그룹의 미생물들이 함께 출현될 때 활성슬러지의 안정성과 침강성이 양호하다.



그림C : 후생동물 우점, 미세플라스틱

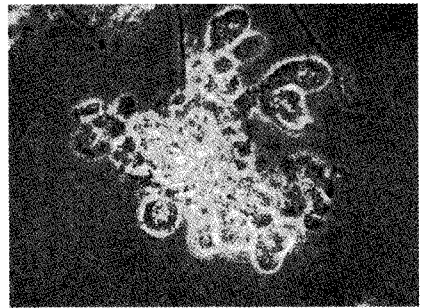
그림C는 후생동물이 우점하고 있다. 그러나 원생동물과 후생동물의 양(biomass)은 많지 않다. 그 많지 않은 생물량중에서 후생동물이 우점한다는 것이다. F/M비가 낮고 슬러지체류시간(SRT)이 길어 슬러지 플럭은 작아지고 얇아지게 된다. 상대적으로 세균의 양이 적다. 따라서 이런 슬러지상태에서 부하가 약간 증대되면 1차분해자인 세균량이 적어 갑자기 F/M비가 높은 환경으로 변한다. 그러면 높은 F/M비에서 DO가 부족되어 슬러지는 검게 부패되기 쉽다. 그러나 부하가 일정하게 현재의 상태로 유지되면 별 트러블은 일어나지 않는다. F/M비가 낮아 SRT가 길어졌든, 어쨌거나 SRT가 길다는 것을 후생동물이 우점하는 것으로 진단이 가능하다.

3-3. 활성슬러지에서 지표성이 높은 미생물

3-3-1. F/M비 지표성이 높은 미생물

▶ Zoogloea

활성슬러지에서 가장 확실하게 높은 F/M비를 지표해주는 미생물로 Zoogloea가 있다. Zoogloea는 세균이지만 활성슬러지에서 마침 특징적인 군체를(손가락모양, 구름모양, 나뭇가지모양 등) 형성하므로 현미경으로 쉽게 판별이 가능하다. 활성슬러지에 Zoogloea가 있으면 단연 F/M비가 높다고 판단하지만 계산상으로는 F/M비가 높지 않는데 Zoogloea가 나타난다면 하루중 어느 시기에 F/M비가 높았다든지 또는 폭기조 어디에 F/M비가 높은 부분이 있다는(예 ; 폭기조 제일 앞단) 것을 의심해 볼 수 있다.



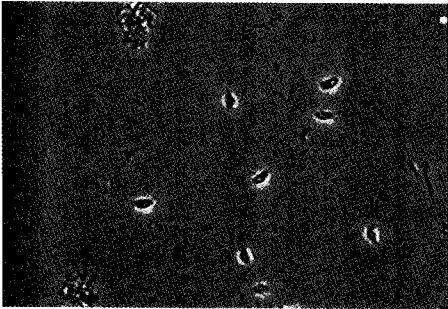
Zoogloea, F/M비가 높을 때

▶ 편모충류(Bodo, Pleuromonas, Monas)

편모충류는 크기가 아주 작으므로 형태를 정확히 관찰하기 어렵다. 그러므로 운동성을 보고 판단하는 것이 더 편리하다. 현미경 관찰에서 400배~600배정도의 배율에서 개개의 세균을 볼 수 없으므로 이 배율로 봤을 때 일단 움직이는 것은 편모충류라고 볼 수 있다. 편모충류는 F/M비가 높을 때(표준활성슬러지법의 적정F/M비 상한인 0.4이상) 다수로 증식하므로 편모충류는 운동성이 매우 높다. 위에 열거한 3종류의 편모충류를 굳이 구분하여 F/M비를 비교하기는 어려우므로 편모충류가 나타나면 일단 F/M비가 0.4이상이라고 보면 될 것이다.

▶ Bodo

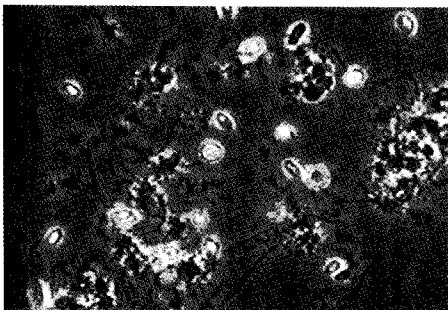
편모가 2개이고 몸을 심하게 흔들며 빠르게 돌아다닌다. 너무 빠르기 때문에 현미경 관찰에서 처음엔 형태를 알아보기 힘들다. 그러나 조금 지나면 운동성이 급격하게 떨어져 모양을 볼 수 있다. Bodo는 플럭 외부에 자유롭게 돌아다니므로 Bodo가 많이 증식되면 상등액이 뿌옇게 혼탁된다.



Bodo, F/M비가 높을 때

▶ Pleuromonas

편모를 2개 가졌지만 하나는 슬러지플럭에 고착하고 있다. 따라서 Pleuromonas는 플럭 외부에 돌아다니지 않고 플럭에 붙은채 툭툭 튀는 운동을 할 뿐이다. 플럭에 고착되어 있으므로 Pleuromonas가 증식하여도 상등액은 맑다. 그러나 F/M비는 높다(Bodo보다는 약간 낮은 것으로 보고 있다).



Pleuromonas, F/M비가 높을 때

▶ Monas

편모를 한 개 가지고 있으며 편모가 있는 방향으로 미끄러지듯 나아간다. Monas는 대체로 공모양이다. 흡입을 통해 세균을 잡아먹는다. Monas 역시 F/M비가 높을 때 잘 증식한다.

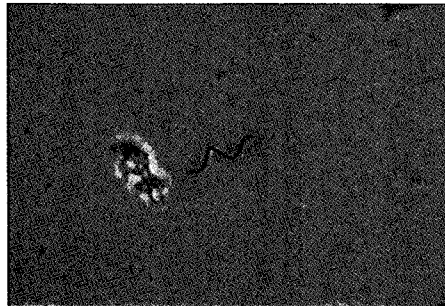
3-3-2. DO 지표성이 높은 미생물

▶ 나선균(spirillum, spirochaeta)

DO가 매우 낮을 때(0.5mg/L미만) 증식한다. 대체로는 F/M비가 극히 높을 때 증식하거나(이 경우에는 많은 수의 편모충류와 함께 나타나기 쉽다) 활성슬러지시료를 정치시켜두었을 때 슬러지부패가 일어나면서 나선균이 많이 증식할 수 있다.

▶ spirillum

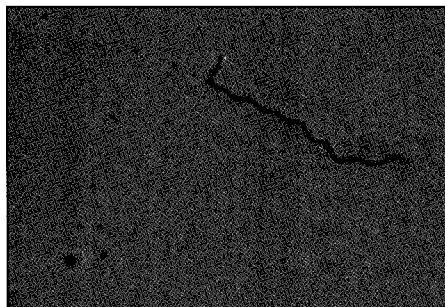
spirillum은 모양도 나선상이지만 운동도 나선상으로 하여 마치 뱀이 기어가는 듯이 보인다. 주로 F/M비가 높을 때 증식하므로 운동성이 매우 빠르다. DO가 높거나 DO가 전혀 없는 곳에서는 증식하지 못한다.



spirillum, DO가 낮을 때

▶ spirochaeta

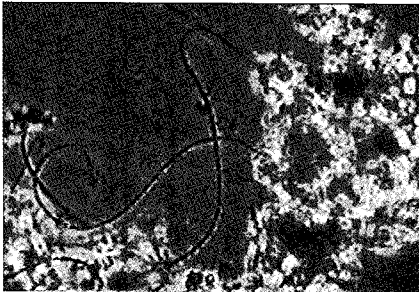
spirochaeta는 spirillum보다 훨씬 길며 더 꼬불꼬불하다. 앞으로 나아가는 운동은 그렇게 빠르지 않으며 꿈틀거리며 조금씩 전진한다.



spirochaeta, DO가 낮을 때

▶ Beggiatoa

DO가 매우 낮고 슬러지부패가 일어났을 때 증식한다. H₂S를 S로 산화시킬 때 나오는 에너지를 이용하는 황세균(활성슬러지에는 Beggiatoa, Thiothrix, Type O21N 3종류가 있다)이다. 따라서 슬러지부패에 의해 H₂S가 생성될 때 증식하는 지표종이라 볼 수 있다.



Beggiatoa, 슬러지부패가 일어났을 때

Beggiatoa는 실처럼 생긴(絲狀體, filament) 세균으로서 천천히 미끄러지듯 움직인다. 그러면서 한번씩 탁 떠는듯한 움직임을 보이기도 한다. 활성슬러지에 나타나는 사상체중에서 이처럼 움직이는 종은 Beggiatoa밖에 없으므로 현미경 관찰로서 쉽게 알아볼 수 있다. 높은 배율(600~1,000배)로 봤을 때 사상체내에 밝게 빛나는 동그란 황과립을 볼 수 있다.

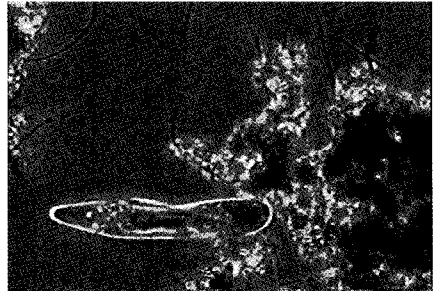
만약 폭기조 활성슬러지에 Beggiatoa가 나타난다면 원수를 통해 유입된 것이거나 아니면 폭기조 어디에 슬러지부패가 일어나고 있다는 것을 예상할 수 있다.

▶ Paramecium

모양이 짚신을 닮았다고 하여 짚신벌레라고 부른다. 활성슬러지에 나타나는 원생동물중에서 상당히 큰 원생동물에 해당한다. Paramecium은 앞으로 뒤로 움직이지만 몸을 구부리지는 않는다. 자동차 방향을 반대로 할려면 차를 뒤로 후진시킨 다음 방향을 바꿔야 되듯이 Paramecium도 방향을 바꿀려면 후진하여 방향을 바꾸되 몸을 구부리거나 접어서 곧바로 돌아나오지는 못한다.

DO가 낮을 때(1.0mg/L이하) 출현하는 데 활성슬러지에서 충격부하의 경우외에는 좀처럼 우점종으로

나타나지는 않는다. 대신 활성슬러지를 정지시켜두어 슬러지가 부패되었을 때 Beggiatoa, spirillum, 편모충류와 함께 이 Paramecium이 나타난다.

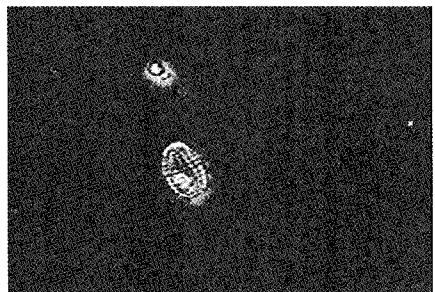


Paramecium, DO가 낮을 때

▶ Coleps

DO가 높을 때 나타난다.모양은 마치 양주 숙성통(오크통)모양이며 몸 뒤에 긴 편모가 하나 있다. 자기 스스로 빙글빙글 돌면서 아주 빠르게 전진한다. 현미경관찰 초기에는 너무나 빠르게 달아나므로 현미경 시야에 잡기도 힘이 들 정도이다. 그러나 역시 DO에 민감한 종이므로 조금만 지나면 카바글라스 아래에 DO가 감소하면서 Coleps의 운동성은 급격하게 떨어진다. 그러면 몸에 있는 줄무늬와 편모까지 볼 수 있다.

활성슬러지를 메스실린더에 담아두면 Coleps는 DO가 낮은 바닥의 슬러지에서 DO가 높은 수면으로 올라간다. Coleps가 많이 증식되어 있으면 이 Coleps가 수면으로 줄을 지어 올라가는 모양을 볼 수도 있다. 그만큼 많은 수가 활성슬러지에 증식될 수도 있다는 이야기다.



Coleps, DO가 높을 때

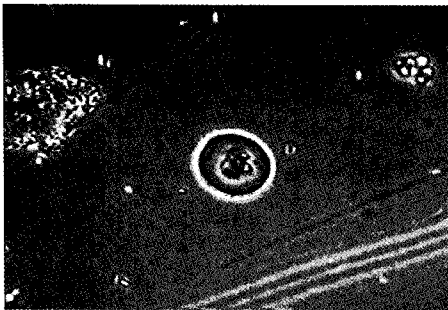
3-3-3.SRT 지표성이 높은 미생물

▶ 유각육질충류(Arcella, Euglypha, Centrophyxis, Trinema)

육질충류 중에 일정한 모양의 껍질을 가지고 있는 것들을 유각육질충류라고 한다. 이들은 앞서 F/M비와 미생물그룹과의 관계에서 봤듯이 매우 낮은 F/M비에서 잘 증식한다. 그러므로 자연히 SRT가 길 때 나타나는 미생물종이기도 하다. 따라서 이들 유각육질충류가 활성슬러지에 점점 우점되어 그 수가 아주 많아지게 되면 지나치게 낮은 F/M비와 지나치게 긴 SRT로 인해 슬러지는 자기분해가 많이 일어나 거의 플러렉체에 가까울 때도 있다.

▶ Arcella

모양은 마치 찐빵모양이다. 평면으로 보면 원형에 가깝고 측면으로 보면 반구형에 가깝다.



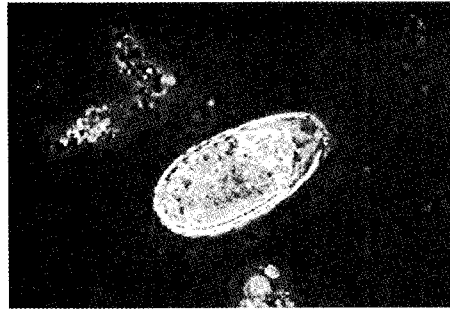
Arcella(평면), SRT가 길 때

조개가 살을 내미는 모양으로 허족을 뺀 허족이 있는 방향으로 천천히 이동한다. 배쪽에 입이 있어 편모충류 등을 잡아먹는다. 때로는 Fe가 몸에 침착되어 붉게 보이는 Arcella도 있고 슬러지가 부패될 때 검게 보이는 Arcella도 있다.

폐수유입이 거의 없을 때 특히 Arcella가 크게 증가하면서 슬러지해체가 일어나기도 한다. 그러므로 이 Arcella가 점점 증가하기 시작하면 주의깊게 관찰하면서 대책을 세워야 한다.

▶ Euglypha

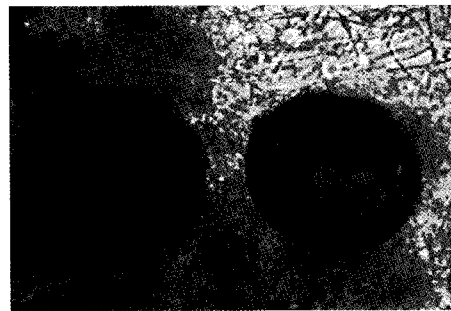
광학현미경으로는 명확히 보기 힘들지만 Euglypha 표면은 전체가 비늘로 덮여있는 것처럼 보인다. SRT가 길때 Arcella와 함께 나타나는 경우가 많다.



Euglypha, SRT가 길 때

▶ Centrophyxis

Arcella보다 세포가 훨씬 크다. 정중앙에서 약간 비껴 입이 보인다. 그리고 세포에 마치 빨처럼 2개의 돌기가 돌아나 있다. SRT가 길 때 나타난다.



Centrophyxis, SRT가 길 때

▶ 후생동물(Diplogaster, Macrobiotus, Chaetonotus, Aelosoma)

후생동물 역시 F/M비가 매우 낮을 때 나타나는 데 특히 SRT가 길 때 즉 슬러지 나이가 많은 오래된 슬러지일 때 후생동물이 나타난다. 후생동물은 덩치가 큰만큼 원생동물과는 비교가 안될만큼 증식속도가 느리다. 따라서 당연히 SRT가 아주 길지 않으면 후생동물은 증식이 불가능하다. 후생동물이 우점화되었다고해서 그것이 곧바로 트러블로 이어지는 경우는 많지 않다.

어느 후생동물이 과잉으로 번창하는 경우가 드물지만 만약 번창했다 하더라도 미세고형물의 증가로 거품이 나는 트러블정도이다. 반면에 후생동물의 증식은 슬러지감량이라는 측면에서는 그 역할이 아주 큰 편이다.