

X-ray PIV 기법

김 국 배 · 포스텍 SBD-NCRC, 박사후연구원
이 상 준 · 포스텍 기계공학과, 교수

_e-mail : beat@postech.ac.kr
_e-mail : sjlee@postech.ac.kr

이 글에서는 불투명한 물체 내부유동이나 비가시영역의 유체유동을 해석할 수 있는 X-ray PIV 기법의 개발과 혈액유동, 미세기포 유동, 식물 내부 수액거동 등에서의 적용사례를 소개하고자 한다.

PIV (Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계) 기법은 유동과 함께 흘러가는 입자들의 연속영상을 짧은 시간 간격으로 두 장 획득한 후, 이에 여러 가지 알고리즘을 적용하여 유동의 정량적 속도장 정보를 측정하는 유동가시화 기법이다. 지금까지 다양한 PIV 기법들이 유체역학분야에서 널리 사용되어 왔으며, 기술적으로는 3차원 계측 및 공간·시간적 분해능을 향상시키는 방향으로 기술개발이 이루어지고 있다.

한편, 최근 BT(Bio Technology)분야에 관한 관심이 높아짐에 따라, 생체유체에 유동에 대한 연구도 활발해지고 있으며, 이에 따라 생체 내부 유동을 in-vivo 방식으로 측정하고자 시도가 이

루어지고 있다. 하지만 가시영역의 광원을 사용하는 기존의 유동가시화 기법들을 생체유체 유동에 바로 적용하기에는 많은 한계를 가진다. 이에 따라, 비가시영역의 유체유동을 측정할 수 있는 새로운 첨단 유동가시화 기법 개발에 대한 요구가 있어 왔다. 이 글에서는 이러한 요구를 충족시키기 위해 개발된 X선을 광원으로 이용한 첨단 유동가시화 기법을 소개하고자 한다.

방사광 X선 vs 의료용 X선

이 글에서 소개하고자 하는 X-ray PIV 기법은 레이저와 같은 가시영역의 광원 대신 투과성이 우수한 X선을 광원으로 사용하는 새로운 개념의 PIV 기법이다.

X-ray PIV 기법을 개발하기 위해서는 X선 특성에 대한 이해, X선 영상기법의 원리, 적절한 추종 입자의 선정, 선명한 X선 입자영상을 얻기 위한 영상화 메커니즘, PIV 기법 적용에 필요한 동기시스템 개발 등에 관한 많은 고찰이 요구된다.

여기서 소개하는 X-ray PIV 기법은 방사광(synchrotron) X선을 광원으로 사용하고 있다. 방사광 X선은 약 정도의 파장을 가지며, 현재 임상장비에서 사용되고 있는 의료용 X선(X-ray tube)에 비해 코히어런스(coherence) 특성이 매우 우수하며, 거의 점광원(point source)에 가깝다. X선 영상기법에 관련하여 방사광 X선과 의료용 X선은 큰 차이를 보인다. 의료용으로 사

용되는 임상용 X선 장비들은 X선의 흡수대비(absorption contrast) 영상법을 사용하고 있는데, 이는 샘플을 구성하는 내부 물질들의 X선 흡수율 차이를 이용하여 대조(contrast)영상을 유도하는 영상기법이다. 이러한 흡수대비 영상법은 가시화하고자 하는 대상이 주위 구조물에 비해 X선 흡수도의 차이가 큰 경우에 적용이 가능하다. 실제 임상에서도 뼈나 기관처럼 흡수도 차이가 큰 구조물들을 가시화하는 데 주로 사용되고 있다.

그러나 혈액과 같은 생체 물질의 경우, X선 흡수도가 주위 조직(ex. 혈관)과 차이가 크게 나지 않기 때문에, 흡수대비 영상기법

으로 생체유체를 가시화한다는 것은 매우 어려운 일이다. 현재 심혈관질환의 진단기법으로 주로 사용 중인 혈관조영술(Angiography)의 경우에도, X선에 대한 흡수대비가 매우 높은 조영제(contrast material)를 혈관 내에 주사하여 주위 조직과의 흡수 대비도를 높인 상태에서 angiogram을 찍고 이로부터 혈관형상에 대한 정보를 얻게 된다. 즉, 혈관조영술로는 혈관 형상만을 관측할 수 있을 뿐 혈액유동을 가시화할 수는 없는 것이다.

반면, 방사광 X선의 경우 흡수 대비 영상법뿐만 아니라 위상대비(phase contrast) 영상법을 이용할 수 있다. 위상대비 영상기

법은 측정하고자하는 물체 내부 구성 물질들의 경계(interface) 부분을 X선이 지나가면서 발생하는 X선의 위상차를 이용하여 영상대비를 획득하는 방법으로, 흡수대비 영상법에 비해 보다 적은 X선 선량(dose)으로 보다 선명한 영상을 얻을 수 있다. 이러한 위상대비 영상법은 X선의 굴절(refraction) 및 Fresnel 회절(diffraction) 메커니즘을 이용하고 있으며, 굴절과 회절의 상대적인 비중은 실험조건 및 샘플의 종류에 의해 결정된다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 샘플(sample)과 디텍터(detector) 사이의 거리를 조절함에 따라 샘플에 대한 흡수 대비 영상과 위상 대비 영

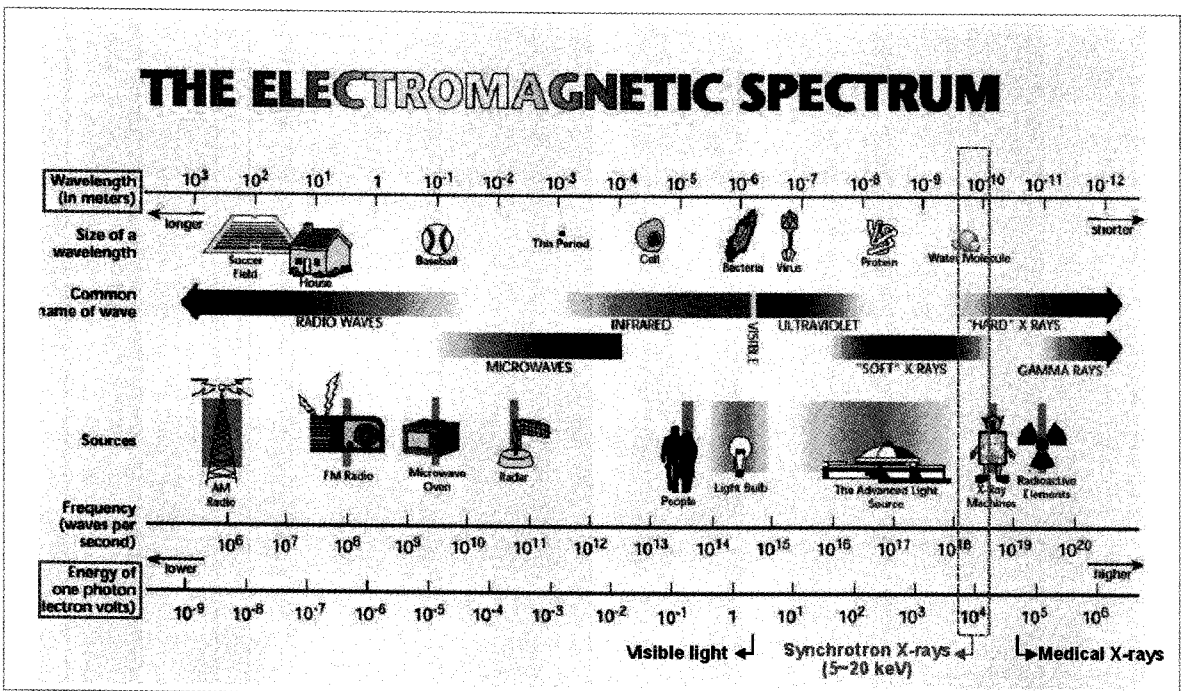
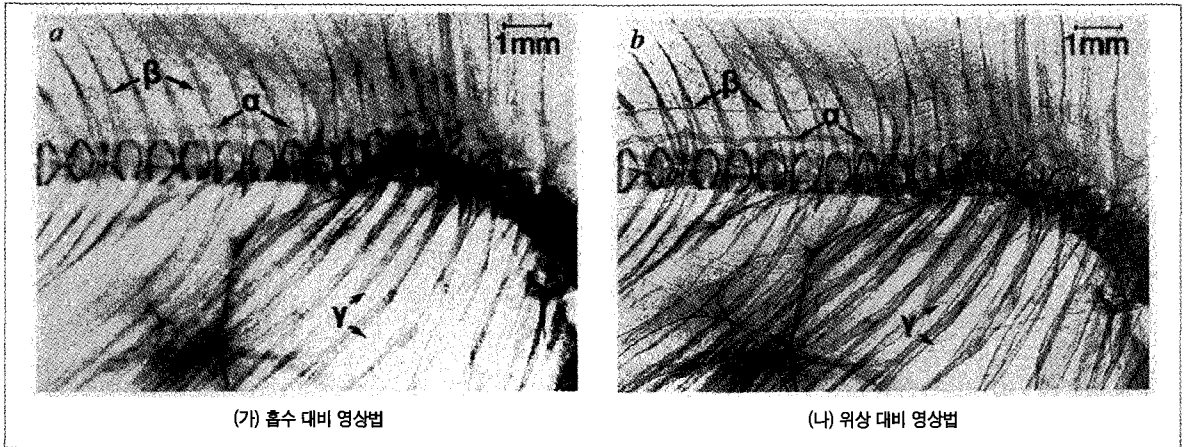


그림 1 전자기 스펙트럼에서 방사광 X선의 파장과 에너지 레벨



(가) 흡수 대비 영상법

(나) 위상 대비 영상법

그림 2 두 가지 X선 영상법으로 취득한 물고기 뼈의 X선 영상

상을 모두 얻을 수 있다.

X-ray PIV 기법

X-ray PIV 실험은 방사광가속기의 imaging 빔라인(beam-line)을 사용하여 수행할 수 있으며, 국내의 경우 3세대 방사광가속기인 포항가속기연구소의 1B2와 7B2 빔라인이 이에 해당한다. 이들 빔라인에서는 propagation-based 위상 대비 영상시스템을 제공하고 있는데, 이들 영상시스템의 기본원리를 요약하면 다음과 같다. 가속기 저장링(storage ring)에서 나오는 방사광 X선은 샘플을 투과한 후 신틸레이터(scintillator)에 도달하게 된다. 신틸레이터는 비가시영역의 파장을 가진 X선을 가시영역의 빛으로 바꾸어주는 역할을 하는 형광 결정체(crystal)로 여기에 맺힌 가시영역의 샘플 영상을 CCD 카메라로 취득하게 된다. 샘플에 도달하는 방사광 X선 광원의 크기는 직경 2~3mm 이내

방사광 X선의 경우 의료용 X선에 비해 X선 노출이 적고 보다 선명한 영상을 획득할 수 있으며, 광량이 매우 크기 때문에 실시간 비침습적인 방법으로 미세한 유동현상을 가시화할 수 있다.

에 불과하기 때문에, 실제 관측영역의 크기는 이보다 작게 된다. 작은 물체를 가시화할 경우에는 CCD 카메라 전방에 대물렌즈를 장착하여 샘플을 확대하여 보게 된다. 빔라인에 삽입장치(insertion device) 등을 사용하지 않을 경우, 취득하게 되는 X선 영상의 공간분해능은 1~2 μ m 정도이다.

연속적으로 공급되는 방사광 X선을 PIV 기법에 적용하기 위해서는 셔터를 사용하여 원하는 순간에 펄스형태의 X선이 샘플에 도달하도록 시스템을 구성하여야 한다. 즉, CCD 카메라와 셔터를 동기시켜 상호 상관(cross-correlation) 방식의 PIV 알고리즘을 적용하기에 적합한 연속된

두 장의 X선 입자영상을 취득하여 X-ray PIV 기법을 구현하게 된다. X-ray PIV 기법을 사용함에 있어 가장 중요한 요소 중 하나는 X선 영상기법과 PIV 기법에 필요한 요구조건을 동시에 만족시키는 적절한 추적입자를 선정하는 일이다. X-ray PIV용 추적입자에 요구되는 사항으로는 먼저 선명한 X선 입자영상을 제공하여야 하며, 조사되는 X선에 대해 높은 안정성을 가져야 하고, 유체흐름에 대한 추종성이 우수하여야 한다. 이러한 조건을 충족하는 입자로는 폴리스티렌(polystyrene) 입자, 유리구슬(glass bead), 미세 기포, 폴리머(polymer) 입자, 알루미늄(Al_2O_3) 입자 등이 있으며, 샘플

포항방사광가속기를 사용하는 X-ray PIV 기법은 미세유동이나, 생체유체 유동을 다루는 연구자들에게 크게 도움이 될 수 있을 것이다.

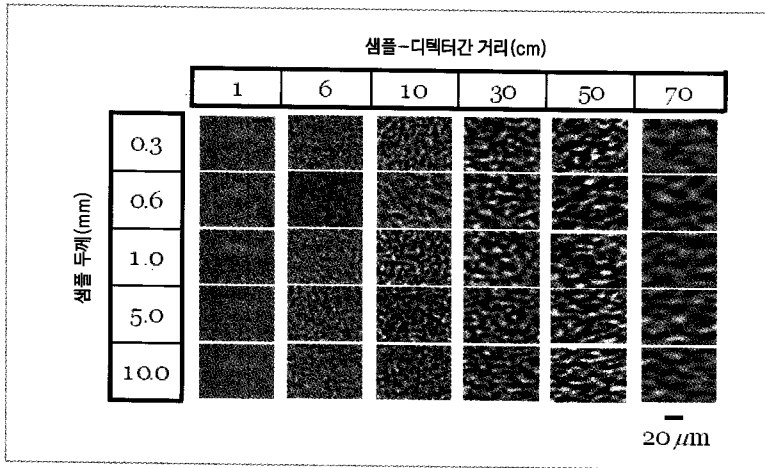


그림 3 샘플-카메라 사이 거리 및 샘플 두께 변화에 따른 혈액의 스펙클 패턴링 현상

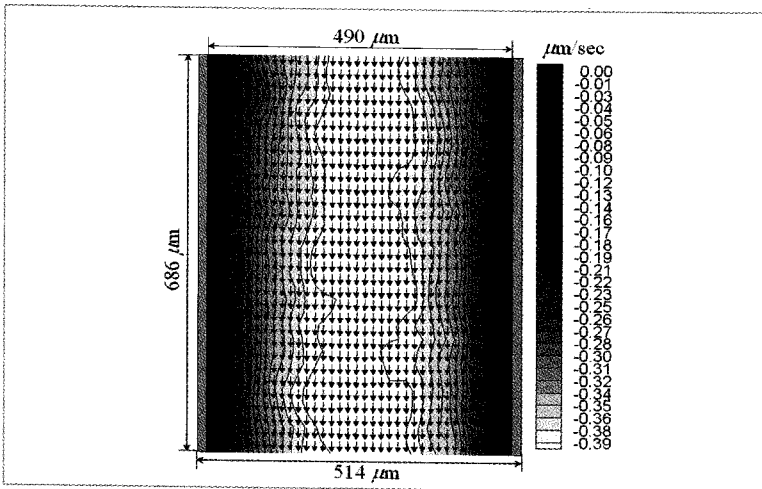


그림 4 불투명한 미세관 내부 혈액유동의 정량적 속도장 결과

및 실험조건에 따라 입자의 선택이 달라지게 된다.

적용사례 I : 불투명한

관 내부의 혈액유동

본 적용연구를 통해 X선 회절 및 간섭 기반의 영상 메커니즘들을 이용하여 혈액의 스펙클 패턴

(speckle pattern)을 유도할 수 있으며, 추적입자를 사용하지 않고도 혈액유동을 가시화하고 가시화된 혈액유동에 PIV 알고리즘을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 최적의 가시화 조건을 찾아내어 불투명한 혈액유동의 정량적 속도장 정보를 추출하였다.

혈액유동 가시화의 영상원리는 다음과 같다. 먼저, 코히어런스 특성이 우수한 방사광 X선은 샘플의 경계에서 Fresnel 회절 패턴이 발생하는데, 이러한 패턴은 샘플을 투과하면서 발생하는 파동들 사이의 위상 차이에 기인해 유도된다. Fresnel 회절 패턴은 샘플과 카메라 사이의 거리가 증가함에 따라 점차 뚜렷해지는데, 본 연구에서는 먼저 샘플과 카메라 사이의 거리를 조절함으로써 이러한 회절 기반의 패턴을 최적화하였다. 다음으로 혈액샘플이 혈구들 사이의 간섭이 증대되면서 X선 스펙클 패턴링 현상도 커지게 되는데, 혈액 샘플의 두께를 조절함으로써 간섭에 의해 유도되는 패턴링 조건을 최적화할 수 있었다. 최종적으로 샘플-카메라 사이 거리가 10~50cm이고, 샘플의 두께가 1mm 이상인 조건에서 취득한 혈액유동의 X선 영상이 PIV 기법 적용에 최적 조건임을 확인할 수 있었다.

위 실험 조건을 바탕으로, 불투명한 관 내부를 흘러가는 혈액 유동에 대해서 X-ray PIV 기법을 적용하였다. 사용된 관은 폭

0.49mm, 깊이 0.14mm, 길이 20mm이며, 샘플과 카메라 사이의 거리는 40cm로 조절하였다. 관측영역의 크기는 $686\mu\text{m} \times 514\mu\text{m}$ 이며, 작동유체인 전혈(whole blood)에는 어떠한 추적 입자도 사용하지 않았다. 그림 4는 X-ray PIV 기법을 적용하여 200장의 순간 속도장을 구한 후, 이들을 앙상블 평균하여 구한 주유동 방향의 평균 속도장 결과를 보여주고 있다. 전체적으로 벽면 근처에서 유속이 느리고 중앙 부분에서 빠른 관 유동의 전형적인 속도분포를 보여주고 있다. 본 적용 연구는 X-ray PIV 기법을 사용하여 불투명한 혈액 유동을 정량적으로 가시화할 수 있다는 점에서 큰 의미를 가진다고 할 수 있다.

적용사례 II : 미세기포의 크기 및 속도의 동시측정

일반적으로 가시광선을 이용한 기포의 크기 측정에서는, 기포의 중심으로부터 산란 빛의 일정 부분까지를 기포의 크기로 가정하거나 기포나 액적 주위의 회절무늬를 이용하여 그 크기를 측정해 오고 있다. 따라서 기포의 크기 측정에는 오차가 존재하며 기포의 크기가 작아질수록 측정오차는 커지게 된다. 하지만, X선 영상기법에서는 미세기포의 경계에서 발생하는 선명한 회절무늬를

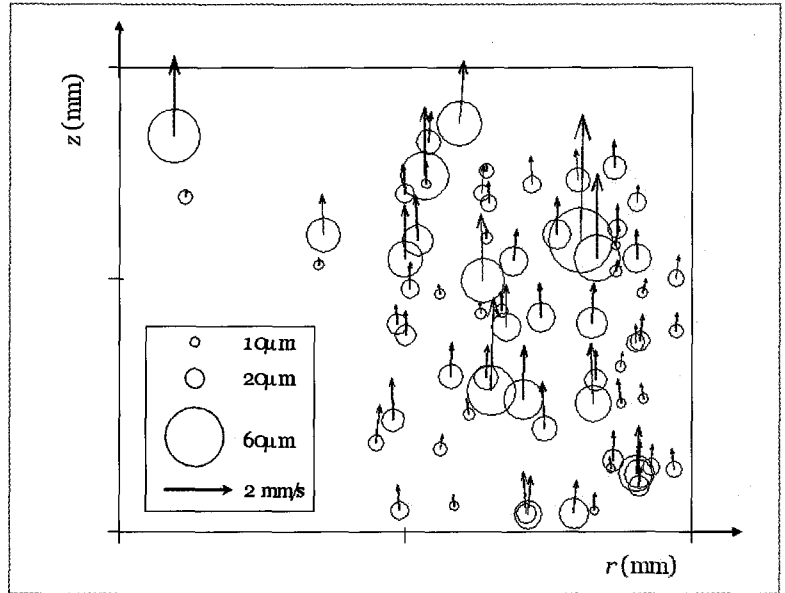


그림 5 X선 PTV 기법으로 동시에 측정된 미세기포의 크기 및 속도분포

이용하여 겹쳐진 미세기포라도 그 경계를 뚜렷하게 구분할 수 있다. 본 적용연구에서는 X-ray PTV(Particle Tracking Velocimetry)기법을 이용하여 미세기포의 크기와 속도장을 동시에 정량적으로 측정하였다.

미세기포의 발생은 가나다란 니켈 선 양단에 전압을 걸어 열을 가함으로써 구현하였고, 발생된 미세기포는 부력에 의해 수직 방향으로 상승하게 된다. 그림 5는 임의 순간에 측정된 미세기포의 크기와 그들의 속도벡터를 동시에 나타낸 결과로 미세기포의 크기는 $10 \sim 50\mu\text{m}$ 이며 여러 개의 미세기포가 겹쳐진 경우에도 그 크기와 속도를 정확하게 측정할 수 있었다.

적용사례 III : 식물 내부 수액거동

X-ray PIV 기법을 이용한 또 다른 적용연구로 식물 내부의 물관에서 물이 충전되는 과정을 가시화하였다. 식물 내부 유동을 관측하는 기존의 방법으로는 염료(dye)를 수액에 첨가하여 가시화하거나 MRI(Magnetic Resonance Imager) 기법을 사용해 오고 있으나, 공간분해능이 떨어지고 실시간 영상취득이 어렵다는 단점이 있다. 하지만, X-ray 영상대비 영상법을 사용하게 되면, 물관과 수액의 계면을 선명하게 가시화 할 수 있으며, 이를 실시간으로 관측함으로써 식물도관 내부에서의 수액전달과정을 해석할 수도 있다.

지금까지의 적용사례에서 살펴보았듯이, X-ray PIV 기법은 동·식물과 같은 생체내부 유체유동뿐만 아니라 비가시영역에서 발생하는 다양한 유동현상을 관측할 수 있는 유용한 첨단 유동가시화 기법이다.

고 연속적으로 취득한 X선 영상 정보를 통해 물관의 모양, 선단(water front)의 메니스커스(meniscus)의 거동에 관한 자세한 유동정보를 얻을 수 있었으며, 이로부터 수액의 이동속도와 유동특성을 파악할 수 있었다.

또 다른 적용사례로 위험한 중금속 중 하나인 비소(arsenic)에 대한 흡수율이 높다고 알려진 고사리류 식물인 Pteris를 대상으로 도관 내부 수액 거동을 관측하였다. X선 가시화 실험 결과, 비소 환경에서 성장한 고사리가 정상 환경에서 성장한 고사리보다 수액의 상승속도가 약 20% 정도 높은 것으로 나타났다. 수액의 상승속도가 높다는 것은 비소 환경에서 자란 고사리의 성장속도가 보다 빠르다는 것을 의미한다. 이러한 X-ray 영상기법은 식물 내부 수액 거동 관측에 유용하며 향후 식물학 연구에 있어서 많은 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

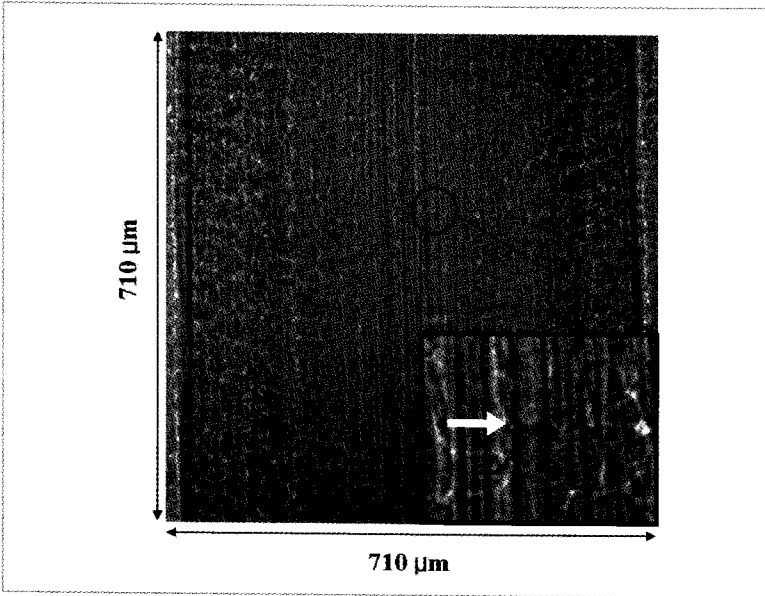


그림 6 고사리 내부 물관에 충전되고 있는 수액의 거동

적용사례로 대나무 잎 내부를 수액의 재충진(refilling) 과정을 관측하였는데, 대나무 잎 내부 물

관 조직에 대한 정보와 함께 물관을 채워나가는 수액 거동을 실시간으로 관찰할 수 있었다. 그리

기계용어해설

바이패스(側管; bypath)

(1) 분기로, 분기로관 등 주로 측로에서 갈라져 주로와 병행하고, 재차 주로에 연결되는 길. (2) 주관에서 분기되어 다시 주관으로 되돌아오는 분기관.

맷댄 용접(butt welding)

막대모양의 재료 두 개의 끝을 직선 또는 임의의 각도로 맞대고 압력을 가하여 접촉시킨 2편을 용접하는 전기저항 용접의 일종.

버일 리머(burring reamer)

파이프를 파이프 커터 등으로 절단할 때 생기는 내측의 끝말림을 연삭하기 위한 리머.