

푸리에 변환 분광기 (Fourier Transform Spectrometer)

해설자: 박수종 (경희대학교 우주과학과, 2007.06.29)

광학 및 적외선 파장대에서 사용하는 분광기는 작동 원리에 따라 (1) 빛의 파장에 따른 굴절차이를 이용하는 프리즘 분광기; (2) 빛의 회절과 간섭 효과를 이용하는 격자 분광기; (3) 빛의 간섭 효과를 이용하는 푸리에 변환 분광기 (Fourier Transform Spectrometer; FTS)와 페브리-페로 간섭계 (Fabry-Perot Interferometer; FPI) 등으로 나눌 수 있다. 여기에서 FTS는 빛다발 둘이 간섭하고 (double-beam interference) FPI는 빛다발 여럿이 간섭한다(multi-beam interference).

광학 파장대에서 가장 많이 관측되는 항성은 광구의 연속 스펙트럼에 나타나는 항성대기의 흡수선을 연구하는 것이 주목적이다. 이 경우 연속 스펙트럼에 대한 상대적인 흡수량인 등가폭을 측정하므로, 복사에너지의 절대 값과 운동학적 성분은 구할 필요가 없다. 그래서 대부분의 전통적인 광학 분광기는 슬릿과 격자를 사용한다. 그런데, 복사에너지의 절대 값을 측정하거나 분광 분해능이 높은 관측을 필요로 하는 연구, 또는 점광원이 아닌 천체의 관측에서는 이러한 격자 분광기가 적절하지 않을 수 있다. 천체의 빛은 망원경의 초점에 위치한 슬릿을 통과하고 격자에 의해 슬릿의 길이 방향과 수직으로 분산된다. 따라서 분광기의 분광 분해능을 높이려면 슬릿의 폭을 줄여야 하고, 따라서 천체의 복사 에너지의 많은 부분이 차단된다.

간섭 분광기의 종류인 FTS와 FPI는 슬릿을 사용하지 않으므로 2차원 이미지의 직접적인 분광 데이터를 구할 수 있어서 전통적으로 영상분광기로 분류한다. 이 분광기는 넓은 시야 뿐만 아니라 높은 분광 분해능 데이터 ($R > 10,000$)를 비교적 쉽게 얻는 장점이 있다. 그러나 파장 단위의 초정밀 제어를 해야 하고 데이터 분석이 수치적으로 복잡하다는 단점이 있어서 천문 관측에서는 널리 사용되지 못했다. 최근의 컴퓨터 산업의 발달로 초정밀 제어 기술과 빠른 계산이 가능하여 앞으로는 FTS와 FPS가 더 널리 사용되리라 기대한다(Connes 1970; Ridgway & Brault 1984).

FTS의 기본 원리

FTS는 마이켈슨 간섭계 (Michelson interferometer)의 원리를 이용한다. 그림 2에서 분광기의 왼쪽으로 입사한 빛은 중간에 있는 광분해기 (beamsplitter)에 의해 위로 반사되거나 오른쪽으로 투과되어 각각 거울에 반사되어 광분해기에서 다시 만난다. 이 때 아래쪽으로 반사되거나 투과되는 두 빛다발은 각각의 광경로차 (optical path difference;

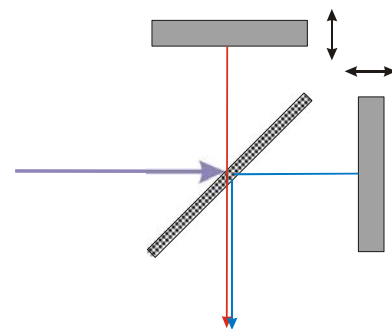


그림 1. FTS의 기본 구조. 고정된 광분해기와 두 개의 움직이는 거울로 구성되어 있다.

OPD)에 의해 서로 간섭현상이 생기고, 아래의 검출기에서 복사 세기를 측정한다. 하나의 거울을 조금씩 움직이면서 변화하는 복사 세기의 함수를 인터페로그램(interferogram)이라 한다.

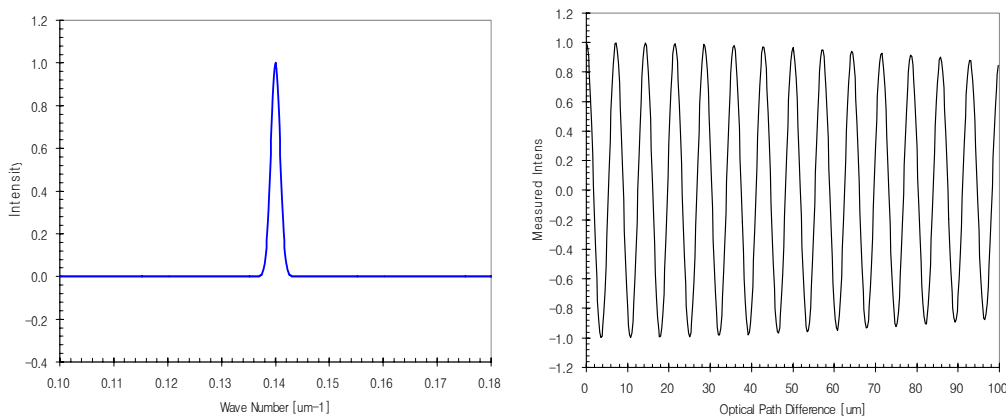


그림 2. 입사광이 단색선인 경우 (왼쪽 스펙트럼) 측정되는 FTS의 인터페로그램 (오른쪽 그림).

입사한 빛의 스펙트럼 $I(\sigma)$ 와 인터페로그램 $F(p)$ 는 다음과 같이 푸리에 변환 관계가 있다:

$$F(p) = \frac{1}{2} \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} I(\sigma) [1 + \cos(2\pi\sigma p)] d\sigma$$

여기에서 p 는 변화하는 거울의 상대적 위치이고, σ 는 빛 파장의 역수 (wave number, $1/\lambda$)이다. σ_{\min} 와 σ_{\max} 는 투과한 빛의 파장대 범위를 의미한다. 실제 관측에서는 광학 필터가 투과 파장대를 제한한다. 그림 2의 왼쪽 스펙트럼과 같이 입사한 빛 $I(\sigma)$ 이 델타함수에 가까운 단색선 (monochromatic line) 이라면, 측정된 인터페로그램은 정현파 (sinusoidal function) 가 된다.

그리고 인터페로그램을 다음과 같이 역 푸리에 변환 (inverse Fourier Transform) 하면,

$$I_{FTS}(\sigma) = \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} F(p) \cos(2\pi\sigma p) dp$$

FTS 스펙트럼 $I_{FTS}(\sigma)$ 을 구할 수 있다 (그림 3 참조). 여기에서 p_{\max} 와 p_{\min}

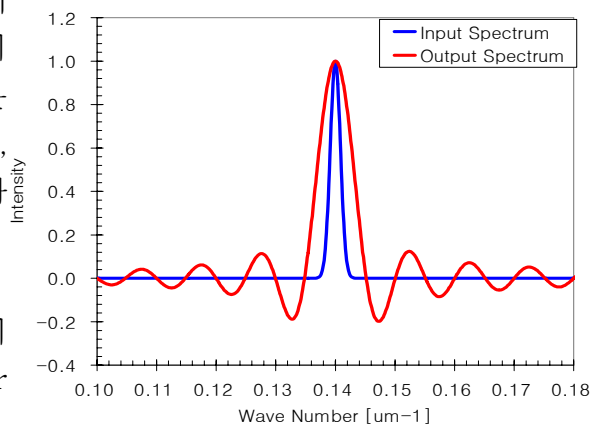


그림 3. 인터페로그램을 역 푸리에 변환하여 구한 FTS 스펙트럼. 인터페로그램 데이터의 가장자리 처리 (apodization)를 하지 않아서 기기 스펙트럼에 파형이 보인다.

는 FTS 거울의 스캔 범위를 나타내고 이 범위가 클 수록 FTS의 분광 분해능이 커진다. 즉 FTS 기기스펙트럼의 FWHM (Full Width at Half Maximum) σ_{FWHM} 을 얻기위한 거울의 스캔 범위는 다음의 식으로 표시 된다.

$$P_{\min} = \frac{-1.22}{\sigma_{FWHM}}$$

$$P_{\max} = \frac{1.22}{\sigma_{FWHM}}$$

초기에는 인터페로그램 데이터를 아날로그스 시그널로 연속적으로 측정하였는데, 최근 컴퓨터 기술의 발전으로 디지털 신호처리 시스템으로 바뀌면서, 스캔 범위 안에서 측정 점의 수 N_p 는 Nyquist 샘플링 원칙으로 다음과 같이 구한다.

$$N_p = P_{\max} \cdot (2\sigma_{\max}) \cdot S$$

여기에서 숫자 2는 Nyquist 샘플링을 위한 상수이고, S 는 경험적으로 추가하는 상수 (over sampling factor)이다.

그림 3의 FTS 스펙트럼에 보이는 파형은 인터페로그램을 역 푸리에 변환을 할 때 인터페로그램 데이터 가장자리 처리 (apodization) 를 하지 않아서 나타난다. 이 파형이 나타나지 않도록 하려면 인터페로그램에 창함수 (Window Function or Apodization Function)를 곱하고 역 푸리에 변환을 하면 된다. 창함수로는 Hamming 함수 또는 Gauss 함수를 많이 사용한다.

FTS의 장점과 단점

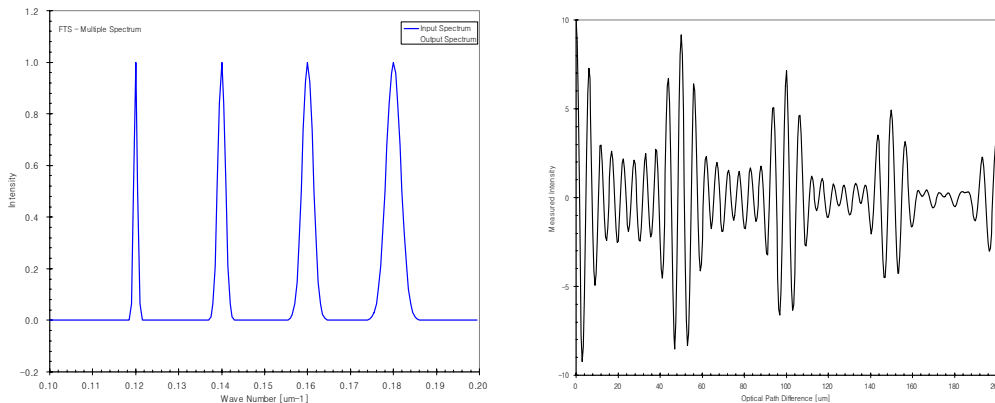


그림 4. 입사광에 여러 개의 방출선이 있는 경우 (왼쪽)의 인터페로그램 모습 (오른쪽).

FPI는 한 번 관측에 한 파장 채널의 정보만 알 수 있지만, FTS의 관측을 통해 얻은 인터페로그램 데이터에는 투과 파장대의 모든 분광 정보가 복합적으로 포함되어 있다. 예를 들면 입사광이 그림 4의 왼쪽 스펙트럼과 같이 4 개의 방출선이 있

다면, FTS로 측정된 인터페로그램은 오른쪽과 같이 주기가 다른 정현파가 중첩된 형태로 보인다. 이 인터페로그램을 역 푸리에 변환하면 그림 5과 같은 스펙트럼을 얻을 수 있다.

FPI는 투과 과장을 변화시키면서 전체 스펙트럼을 얻는 동안에 날씨 또는 기기 상태가 변한다면 올바른 스펙트럼을 구할 수 없다. 그렇지만 FTS는 전체 스펙트럼을 포함하는 인터페로그램을 구하므로 관측 도중의 상태 변화에 덜 민감하다.

격자 분광기는 슬릿의 폭 방향으로 회절 간섭하여 분산된 스펙트럼을 얻는다. 따라서 분광 분해능과 슬릿의 시야는 서로 상쇄하여, 분광 분해능을 높이면 시야가 줄어들 수밖에 없다. 그러나 FTS와 FPI와 같은 간섭 분광계는 회절 현상을 이용하지 않아서 분해능과 시야가 서로 제한하지 않는다.

그리고, 격자 분광기의 분광 분해능을 높이기 위해서는 격자 등의 광학계가 비례하여 커져야 하지만, FTS의 분광 분해능은 거울의 스캔 범위 (ρ_{max} 와 ρ_{min})를 넓게 하면 쉽게 높일 수 있다. 따라서 하드웨어의 구조 변화 없이 원하는 분광 분해능을 구현할 수 있다. FTS의 광학 장치 크기는 고분광 분해능 격자 분광기와 비교하여 작고 간단한 구조이다. 또한 고분광 분해능 모드에서도 정확한 과장을 구할 수 있다는 장점도 있다.

FTS는 입사광 에너지의 50%가 검출된다. 배경 복사가 크고 천체의 신호가 작은 관측에서는 관측 과장대 전체에 의한 광자 잡음 (photon noise)이 커져서 감도가 낮아질 수 있다. 특히 열복사가 큰 적외선 관측에서는 치명적인 단점이다.

FTS는 넓은 관측 시야를 가지고 있어서, 픽셀이 많은 CCD 또는 적외선 어레이 (infrared array)를 사용할 수 있다. 그렇지만 인터페로그램을 얻기 위해서는 검출기 프레임의 각각의 픽셀을 빠르게 읽고, 저장하여 역 푸리에 변환 계산을 해야 한다. 현대의 관측기기는 픽셀이 많은 검출기를 선호하므로, 천문학에서 FTS의 제작을 제한하는 가장 심각한 문제가 될 수 있다.

FTS의 사용 예

FTS는 간단한 광학 구조로 분광관측을 할 수 있어서, 적외선 우주망원경의 탑재체로 널리 사용

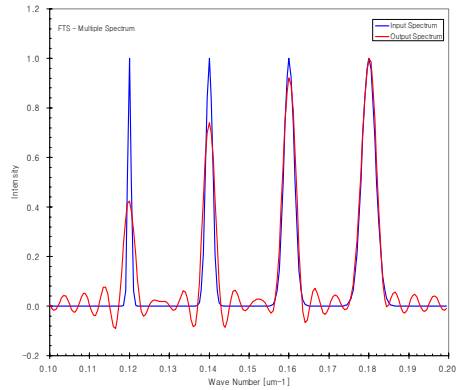


그림 5. 그림 4의 인터페로그램을 역 푸리에 변환하여 구한 스펙트럼. 인터페로그램의 가장자리 처리를 하지 않아서 파형이 남아있다.



그림 6. 일본의 적외선 천문위성 AKARI의 FIS (Far-Infrared Surveyor) 내부에 장착된 FTS의 모습 (Kawada et al. 2004, Takahashi et al. 2002).

된다. 특히 원적외선 파장대를 관측하는 검출기는 픽셀의 수가 적어서 데이터 계산이 문제되지 않는다. 현재 일본의 적외선 천문위성 AKARI 의 FIS (Far-Infrared Surveyor; Kawada et al. 2004, Takahashi et al. 2003)에 장착된 FTS가 위성궤도에서 테스트 관측을 하고 있고(그림 6, 2007년 현재), 유럽의 적외선 천문위성 Herschel 의 SPIRE에 장착할 FTS를 제작 중이다 (Swinyard et al. 2003).

결론

FTS는 화학 분야의 실험실 분광 측정에는 널리 사용되고 있지만, 천문 관측에서는 많이 사용하지 않는다. 천문 관측은 실시간 데이터 처리를 해야 하므로 컴퓨터가 없던 시절에는 사용이 제한되었는데 컴퓨터가 상용화된 1970년 대 부터 활발히 FTS의 제작과 관측을 시작했다. 그런데, 현대에는 전자 공학이 발전하여 많은 픽셀을 가진 검출기를 사용하여 오히려 데이터 처리의 문제가 다시 나타났다. 그래서 현재 FTS는 픽셀이 적은 원적외선 관측에서 많이 사용된다.

FTS는 작고 간단한 구조로 제작할 수 있고, 고 분광 분해능과 넓은 시야의 관측이 가능하다. 특히 성단, 은하단, 성운의 별탄생 지역 등의 분광 관측에 적합하다. 데이터 처리 속도를 향상시키는 노력을 하면 앞으로 발전가능성이 높다고 기대된다.

참고 문헌

- Connes, P. 1970, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 8, 209
- Kawada, M., Shibai, H., Kaneda, H., & Nakagawa, T. 2004, *Proceedings of the SPIE*, 5487, 359
- Ridgway, S. T., & Brault, J. W. 1984, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 22, 291
- Swinyard, B. M., et al. 2003, *Proceedings of the SPIE*, 4850, 698
- Takahashi, H., Kawada, M., Murakami, N., Ozawa, K., Shibai, H., & Nakagawa, T. 2003, *Proceedings of the SPIE*, 4850, 191