

기술자료

## 필터 기반 블랙카본 측정에서의 보정과 불확실성에 대한 고찰

# Corrections and Artifacts Regarding Filter-based Measurements of Black Carbon

이정훈\*

한국기술교육대학교 기계공학과

Jeonghoon Lee\*

School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

접수일 2018년 8월 6일  
수정일 2018년 8월 10일  
채택일 2018년 8월 10일

Received 6 August 2018  
Revised 10 August 2018  
Accepted 10 August 2018

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)41-560-1151

E-mail : jlee@koreatech.ac.kr

**Abstract** A filter-based optical technique is one of the representative ways for the measurement and quantification of black carbon (BC). Since the filter-based technique adopts a simple principle, it is easy to put into practical use and instrumental products have already been commercialized. In this study, however, the absorption coefficients of BC after the correction process was estimated to be approximately 3 times lower than those before the correction process. In addition, the difference between before and after corrections was also evident for the trend of increasing and decreasing absorption coefficient. When BC concentration is low, uncertainty may increase regardless of corrections due to the artifacts of filter. In this sense, techniques without using a filter are required, and uncertainties will be minimized if these techniques are used to further complement the filter-based black carbon measurements. Finally, this study is believed to help understand the uncertainty and correction of filter-based black carbon measurements.

**Key words:** Black carbon, Uncertainty, Artifact, Filter-based technique

### 1. 서 론

블랙카본(Black carbon, BC)은 화석연료의 불완전 연소에 의해 발생되며 대기 중으로 배출되었을 때 태양광을 흡수하여 지구복사강제력을 변화시킬 뿐만 아니라 가시거리를 짧게 할 수 있는 등 인간 생활 전반에 직간접적으로 지대한 영향을 준다. 블랙카본은 흑색을 띠고 있어 빛을 흡수하는 능력이 탁월하다. 이를 기반으로 블랙카본을 측정하는 기술이 개발되어 왔다. 블랙카본을 깨끗한 필터에 포집하면 할수록 필터는 흑색으로 변색되고 흑색 필터에 빛을 조사한

다면 투과되는 빛의 강도는 점점 약해진다. 필터에 블랙카본을 포집하면서 블랙카본이 포집되는 필터 표면과는 반대편에 설치된 광량측정기로부터 측정되는 투과광의 세기를 연속적으로 모니터링하면 투과광의 세기가 감쇠되는 양으로부터 블랙카본의 농도를 산출할 수 있다. 이때, 필터에 포집되는 블랙카본의 양에 따라 필터와 블랙카본 사이의 다중 산란 및 필터 재질의 산란 특성으로 인해 투과광 세기가 영향을 받게 된다. 산란효과와 더불어, 필터에 포집되는 블랙카본에 의한 투과광의 감소량과 블랙카본 농도 사이의 비선형관계로 인한 블랙카본 저평가를 보정



PARAMETER	VALUE
Sample flow rate	2 lpm
Wavelengths	467, 528, 652 nm
Filter media	Glass fiber, 47 mm
Noise (60 sec avg)	$0.2 \text{ Mm}^{-1}$ ( $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )
# of sample spots	8
# of reference spots	2
Power consumption	36W
Dimensions	$16 \times 11 \times 11.5 \text{ cm}$
Weight	1.6 kg

Fig. 1. Photo and specification of TAP used in this study.

한 연구들이 국내에서도 진행되었다 (Jung and Park, 2010; Park *et al.*, 2009). 뿐만 아니라, 질량감쇠단면적 (Mass attenuation cross-section) 또는 질량흡수단면적 (Mass absorption cross-section)을 정량화할 수 있어야 블랙카본 질량농도를 산출할 수 있는데, 이에 대한 문제점이 제기되어 왔다. 본 연구에서는 필터 기반 블랙카본 측정의 문제점들에 대하여 실례를 통하여 살펴보고 문제점을 해결할 수 있는 방안에 대해 고찰해보고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 필터 기반 블랙카본 측정

필터 기반 블랙카본 측정 장비로는 에살로미터 (Aethalometer), 입자매연흡수광도계 (Particle Soot Absorption Photometer, PSAP), 블랙카본모니터 (Black Carbon Monitor, BCM), 다중각도흡수광도계 (Multi Angle Absorption Photometer, MAAP) 그리고 삼색흡수광도계 (Tricolor Absorption Photometer, TAP) 등이 있다. 본 연구에서 필터 기반 블랙카본 측정기로 사용된 기기는 TAP이다. 무게가 2 kg 이하의 소형임에도 불구하고 3개 파장에 대한 광흡수계수를 도출시키기 때문에 브라운 카본 연구 등에 사용될 수 있다. 다만, 롤타입 테이프형 필터를 사용하지 않고 직경 47 mm 단일 필터를 사용하므로 블랙카본 농도

에 따라 8시간~30시간마다 필터를 수동으로 교체해야 하기 때문에 장기간 모니터링에는 제한적일 수 있다. TAP도 위에서 언급한 필터 기반 블랙카본 측정기로서, 서론에서 제시된 필터 관련 인위적 불확실성에서 자유로울 수는 없다. 그림 1에 실제 본 연구에서 사용된 TAP의 사진과 사양을 나타냈다. 흡입 샘플 유량은 2 lpm이다. 사용된 세 가지 광원의 파장은 각각 467 nm, 528 nm 그리고 652 nm이다. 직경 47 mm의 유리섬유 재질 필터를 사용하였다. 직경 47 mm의 필터 중심으로부터 등간격으로 회전하면서 블랙카본이 포집된다. 하나의 필터에 기준 스폿 2개와 샘플 스폿 8개 총합 10개의 스폿이 형성된다. 샘플 스폿의 투과도가 0.5 이하로 내려가면 회전하여 새로운 스폿에 블랙카본이 포집되며, 스폿 크기는 대략 직경 5 mm이다. 사용자 설명서에 의하면, 여과된 깨끗한 공기를 주입했을 때의 노이즈 레벨은 60초 평균 기반으로 했을 때  $0.2 \text{ Mm}^{-1}$ 로서 BC의 질량농도로 환산하면 대략  $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 크기는 가로, 세로 높이 모두 20 cm 이내이고 무게는 1.6 kg이기 때문에 차지하는 체적도 작고 가벼워 휴대가 가능하다.

### 2.2 필터 기반 측정기의 감쇠 계수 및 블랙카본 질량 농도

충청남도 천안시 병천면에 위치한 한국기술교육대학교 (KOREATECH) 공학1관 옥상에서 TAP을 이용하여 대기 에어로졸에 포함된 블랙카본 흡수계수를

연속 측정하였다. 연속 측정된 데이터의 보정 전 원 데이터는 필터 교환 직후의 깨끗한 상태에서의 투과광신호값  $I_0$ 와 블랙카본이 필터 위에 포집되었을 때의 투과광신호값  $I$ 이며, 이들로부터 감쇠값(Attenuation, ATN)이 계산된다. 이후에 시간  $\Delta t$  동안 포집된 블랙카본에 의해 투과광이 감소된 신호량으로부터 감쇠값변화량( $\Delta ATN$ )이 계산된다. 이렇게 계산된  $\Delta ATN$ , 유량( $Q$ ), 필터 스폿 면적( $A$ ) 및 포집시간( $\Delta t$ )을 이용하여 감쇠 계수( $b_{ATN}$ )가 계산될 수 있다. 이렇게 계산된 감쇠 계수로부터 질량감쇠단면적(mass attenuation cross-section, MAC)을 도입하여 질량농도로 환산한다. 다만, 질량감쇠단면적은 사용되는 빛의 파장에 의존하며 측정기 제작사의 노하우에 의존하는 등 불확실성이 크지만 대체할 수 있는 대안이 없기 때문에 제작사에서 제시한 값을 받아들여 사용되고 있다. TAP의 경우 질량농도를 표출하는 기능이 없으며 제작사에서 추천하지도 않지만, 에살로미터에서는 파장에 따라 다양한 MAC값이 사용된다.

$$ATN = -100 \ln \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (1)$$

$$b_{ATN} = \frac{A}{Q \Delta t} \frac{\Delta ATN}{100} \quad (2)$$

$$C_{mass} = \frac{b_{ATN}}{MAC} \quad (3)$$

### 2.3 필터 기반 블랙카본 측정기에 활용

#### 가능한 감쇠 계수 보정식

필터 기반 블랙카본 측정기로 가장 많이 사용되고 있는 기기는 에살로미터이다. 에살로미터를 보정하기 위한 방법들이 Collaud Coen *et al.* (2010)에 자세히 소개되었으며, 그 내용을 아래에 소개하고자 한다.

Weingartner *et al.* (2003)은 필터 로딩에 의한 감쇠 효과에 대한 실험적 보정식을 제안하였고, 서로 다른 에어로졸 타입에 대한 보정 상수를 식(4)와 같이 결정하였다.

$$b_{abs,n} = \frac{b_{ATN,n}}{C_{ref} R_{w,n}}$$

$$= \frac{b_{ATN,n}}{C_{ref} \left[ \left( \frac{1}{f} - 1 \right) \frac{\ln ATN_n - \ln(10\%)}{\ln(50\%) - \ln(10\%)} + 1 \right]} \quad (4)$$

즉,  $C_{ref}$ 를 상수로 간주하여, 기준장비와 에살로미터와의 첫번째 보정값  $b_{ATN}$ 으로부터 구하였다. 기준장비는 MAAP을 사용하였다.  $f$ 는 단산란알베도의 함수로 구할 수 있는 값이다.  $ATN=10\%$ 일 때를 기준으로 설정하여  $R_w$ 값을 정한 것이 식(4)의 분모의 자연로그식 부분에 표현되어 있다.

Arnott *et al.* (2005)는 PSAP에 일반적으로 적용되는 보정식과 유사하게 명확한 산란 보정을 포함하는 보정식을 식(5)와 같이 제안하였다.

$$b_{abs,n} = \frac{b_{ATN,n} - \alpha b_{scat,n}}{C_{ref}} \sqrt{1 + \frac{\left( \frac{V \Delta t}{A} \right) \sum_{i=1}^{n-1} b_{abs,i}}{\tau_{a,fx}}} \quad (5)$$

식(5)의 특징은  $\alpha$ 의 가중치를 갖는 산란계수( $b_{scat,n}$ )를 도입한다는 것이다. 산란을 직접 측정하지는 않지만, 암모늄황산염 등을 주입하였을 때 측정된 값을 이용한다.

Schmid *et al.* (2006)은 Weingartner *et al.* (2003)에 의해 개발된 다중산란보정( $C_{ref}$ )과 필터 로딩 보정을 하고, Arnott과 Weingartner 방법을 비교하여 새로운 산란 보정식을 아래와 같이 도출하였다.

$$b_{abs,n} = \frac{b_{ATN,n}}{(C_{ref} + C_{scat,n}) R_{w,n}} = \frac{b_{ATN,n}}{\left( C_{ref} + \alpha \frac{\omega_{0,n}}{1 - \omega_{0,n}} \right) \left[ \left( \frac{1}{f} - 1 \right) \frac{\ln ATN_n - \ln(10\%)}{\ln(50\%) - \ln(10\%)} + 1 \right]} \quad (6)$$

식(6)의 특징은 기준장비로 Photoacoustic spectrometer (PAS)를 사용한다는 점이다.

Virkkula *et al.* (2007)은 PSAP의 보정에 사용되는 것과 매우 유사한 필터 로딩 보정식을 제안하였고,  $i$ 번째 필터 상에 마지막 세 값들이  $i+1$ 번째 필터의 처음 세 값들과 같아야 한다는 가정하에 실제 농도에 가장 가까운 값을 나타내는 보정식을 식(7)과 같이

소개하였다.

$$b_{ATN, R_{corrected}, n} = \frac{b_{ATN, n}}{R_V} = (1 + k_i ATN) b_{ATN, n} \quad (7)$$

$$k_i = \frac{BC_0(t_{i+1, first}) - BC_0(t_{i, last})}{ATN(t_{i, last})BC_0(t_{i, last}) - ATN(t_{i+1, first})BC_0(t_{i+1, first})} \quad (8)$$

식(7)의 특징은 에살로미터 사용자가 산란 측정을 동시에 수행하지는 않는 것이 일반적이기에 산란 측정 없이 보정하는 것으로 사용자 편의적인 관점에서 보정식이 이루어져 있다.

#### 2.4 본 연구에서 사용된 감쇠 계수 보정

TAP을 이용하여 획득된 ATN의 원 데이터로부터 계산된 흡수계수와 보정된 흡수계수를 비교하였다. TAP 사용자 매뉴얼에 의하면 원 데이터는 Ogren (2010)에 의해 제시된 Bond *et al.* (1999)의 절차를 거쳐 블랙카본 흡수계수로 환산되어 TAP 기기 화면에 표출된다. 본 연구에서는 ATN의 원 데이터로부터 구해진 흡수계수와 Ogren (2010)에 의해 제시된 Bond *et al.* (1999)의 절차를 거쳐 보정된 흡수계수를 비교하였다. 필터에 의한 왜곡을 보정하기 위해 투과도 (Transmittance)에 따른 보정함수를 적용하게 되는데 Bond *et al.* (1999)에 제시된 보정함수식을 사용하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 투과도에 따른 필터 왜곡 보정

필터에 에어로졸 입자가 누적되어 쌓이게 되면 필터의 광학적 특성이 바뀌게 되므로 투과도가 변화한다. 필터 위의 블랙카본 누적량이 증가할수록 투과도는 과다하게 감소하는데 이러한 비선형성을 보정하기 위해 보정식  $f(Tr)$ 을 도입한다. 여기서  $Tr$ 은 투과도로서, 깨끗한 새 필터일 때 1의 값을 갖고 블랙카본이 필터 위에 누적될수록 그 값이 1보다 작아진다. 기

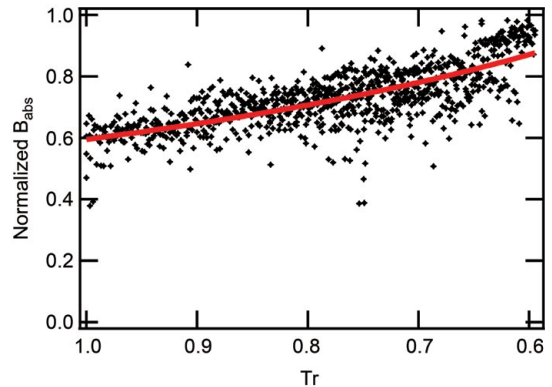


Fig. 2. Normalized absorption coefficient as a function of transmittance and regression graph.

존에는  $Tr$ 에 반비례하는 실험적 경험식을 사용해왔다. 그 실험적 경험식은 해당 식을 도출하기 위해 설정되었던 특정 실험 조건에 대해서는 정확하게 맞겠지만, 성분 및 조성이 특정 실험 조건과 다른 에어로졸이 누적된 필터에 적용하였을 때에는 새로운 경험식이 필요할 것이다. 따라서 본 연구에서는 새로운 경험식을 도출하기 위하여 정규화된 흡수계수를 투과도의 함수로 표현하였으며 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 분산된 흑색 점들은 투과도에 따른 정규화된 흡수계수이며 적색 선은 정규화된 흡수계수와 투과도 사이의 함수관계를 획득하기 위한 곡선접합선 (Curve fitting line)을 나타낸다.

#### 3.2 흡수계수에 대한 보정의 영향

대략 15시간 동안 TAP에 의해 연속 측정된 원 데이터에 대하여, 필터 보정, 유량 보정, 파장 보정 및 산란 보정을 거친 이후에 흡수 계수가 어떻게 나타나는지를 그림 3에 표시하였다. 보정 전에는 매우 높은 값으로 나타났던 흡수계수는 보정을 거친 이후에는 낮은 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 가장 큰 차이를 나타내는 구간에서는 보정 전후 흡수계수가 3배 이상의 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 특이한 사항으로는 첫째, 08시 경에서 13시 경까지, 보정 전에는 감소하는 경향을 보이지만 보정 후에는 감소하는

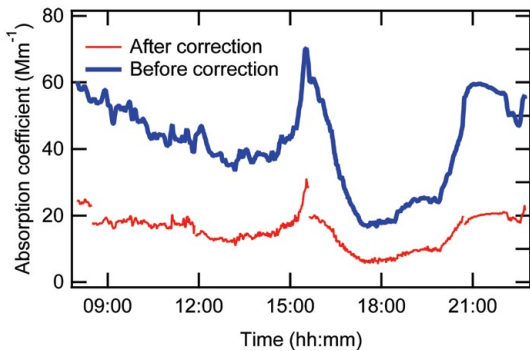


Fig. 3. Comparison of absorption coefficient between before correction and after correction.

것이 아니라 일정하게 유지되는 것으로 나타나는 구간이 있다. 즉, 블랙카본의 흡수계수가 감소하는 것처럼 보이지만 실제로는 감소하는 것이 아니라는 사실이다. 이렇듯, 보정과정을 거치지 않았더라면 감소했다고 왜곡되어 판단되었을 수도 있었을 텐데, 보정과정을 거쳐 실제로는 흡수계수가 감소한 것이 아니라는 사실을 알게 해준다. 이는 또한 흡수계수의 감소율에 있어서도 큰 차이를 나타내는 결과를 보여줄 수 있다. 다시 말해서, 실제로는 완만하게 감소하거나 증가하는데도 불구하고, 보정 과정을 거치지 않는다면 급격히 증가하거나 감소하는 것으로 오인될 수도 있다는 사실이다. 이는 그림 3의 15시에서 17시 사이에 나타나 있다. 보정과정을 거치지 않고 도출된 흡수계수는 실제 상황을 반영하지 못할 수도 있다. 대략  $10 \text{ Mm}^{-1}$  이하의 낮은 흡수계수에서는 흡수계수의 증감뿐만 아니라 절대값에 대하여 신뢰할 수준의 값이 도출될 수 없을 수도 있다(Weingartner, 2015, personal communication, June 28-30). 따라서 반드시 보정과정을 거쳐야만 데이터로서의 의미가 있을 것이다. 이때, 주의할 점은, 보정 과정과 방법이 정해져 있는 것이 아니라는 점이다. 즉, 제작사마다 제작사 나름대로의 보정 과정, 절차 및 방법이 정해져 있으며 일반적으로 이것들은 외부로 공개되지는 않는다. 따라서 실험자의 과학적 판단에 따라 수치값이 바뀔 수도 있는 것이다. 블랙카본의 농도가 낮을 때, 즉, 앞에서 언급했듯이 블랙카본의 흡수계수가 낮게 나타날 때, 필터

기반 블랙카본 측정기기로 계속된 값들은 불확실성이 매우 크다는 것이다. 이러한 불확실성을 줄이기 위해 보정 방법이 동원된 것이다. 이 보정 방법도 표준화된 방법이 있는 것이 아니기 때문에 블랙카본 측정이 매우 힘들고 정량화하기 쉽지 않은 실정이다.

필터를 사용하지 않고 블랙카본을 측정할 수 있는 기술은 필터에 의한 왜곡을 최소화할 수 있기 때문에 적극 추천된다. 다만, 필터를 사용하지 않는 점에 대해서는 필터 왜곡에 대한 이슈를 해소할 수 있지만, 또 다른 문제점(민감도 및 진동 영향 등)을 유발할 수도 있다. 따라서 이에 대한 면밀한 실험이 요구된다고 하겠다.

#### 4. 결 론

블랙카본을 측정할 수 있는 대표적인 기술로서 필터 기반 광학 측정을 통한 블랙카본 정량화 기술이 있다. 이 기술은 이해하기 쉬운 단순한 원리를 적용하는 기술이기 때문에 실용화가 용이하게 진행되어서 이미 상용화된 제품이 나오고 있다. 하지만, 보정이 요구되며 그에 상응하는 불확실성이 존재하기 때문에 측정된 데이터에 대한 가치 평가가 항상 수반된다. 보정 과정 없이 데이터를 분석하는 경우 물리적 타당성이 훼손되기 때문에 데이터 분석시 반드시 보정 과정에 대한 이해가 요구된다. 보정 과정을 거친 이후의 흡수계수 데이터는 보정 과정을 거치기 이전보다 크게는 3배 이하로 낮아진 것을 관찰하였다. 뿐만 아니라 흡수계수의 증가 및 감소 경향에도 보정 전후의 차이가 극명하였다. 이렇듯, 보정이 중요한 과정임에는 틀림없지만 블랙카본의 농도가 낮은 저농도 환경에서는 보정과는 무관하게 흡수계수 데이터의 불확실성은 대단히 높을 수 있다. 따라서 필터를 사용하지 않고 흡수계수를 측정할 수 있는 기술이 요구되며, 일부 연구자들에 의하여 이러한 기술들이 시도되었다. 일례로 SP2 (Single Particle Soot Photometer)는 기존의 광학기반 블랙카본 측정이 아닌, 블랙

카본의 백열특성을 이용하여 블랙카본을 실시간으로 측정하는 기술이다. 또한 광음향분광법(Photoacoustic Spectrometry, PAS)이나 광열간섭법(Photothermal Interferometry, PTI)도 필터를 사용하지 않고 블랙카본을 측정하는 기술이라고 알려져 있다. 이러한 기술들을 사용하여 필터 기반 블랙카본 측정 기술이 좀 더 보완된다면 향후 블랙카본 측정 기술에 대한 불확실성은 해소될 것이라 판단된다. 본 연구가 필터 기반 블랙카본 측정 기술의 불확실성 및 보정 기술에 대한 이해를 돕기 위한 기초 자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

### 감사의 글

데이터를 수집한 Mr. HM Kwon에게 감사드립니다. TAP을 대여해주신 (주)파코코리아인더스 안정언 부장에게도 감사드립니다. 본 연구는 한국연구재단의 기초연구사업(2016R1D1A1B03931654) 및 한국기술교육대학교 교육연구진흥비의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

### References

- Arnett, W., Hamasha, K., Moosmuller, H., Sheridan, P.J., Ogren, J.A. (2005) Towards aerosol light-absorption measurements with a 7-wavelength aethalometer: Evaluation with a photoacoustic instrument and 3-wavelength nephelometer, *Aerosol Science and Technology*, 39(1), 17-29.
- Bond, T.C., Anderson, T.L., Campbell, D. (1999) Calibration and intercomparison of filter-based measurements of visible light absorption by aerosols, *Aerosol Science & Technology*, 30(6), 582-600.
- Collaud Coen, M., Weingartner, E., Apituley, A., Ceburnis, D., Fierz-Schmidhauser, R., Flentje, H., Henzing, J.S., Jennings, S.G., Moerman, M., Petzold, A., Schmid, O., Baltensperger, U. (2010) Minimizing light absorption measurement artifacts of the Aethalometer: evaluation of five correction algorithms, *Atmospheric Measurement Techniques*, 3, 457-474.
- Jung, J.H., Park, S.S. (2010) Characteristics of black carbon in PM2.5 observed in Gwangju for Year 2008 and examination of filter loading effect, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(4), 392-402. (in Korean with English abstract)
- Ogren, J.A. (2010) Comment on "Calibration and intercomparison of filter-based measurements of visible light absorption by aerosols", *Aerosol Science and Technology*, 44(8), 589-591.
- Park, S.S., Jung, J.H., Cho, S.Y., Kim, S.J. (2009) Comparison of aethalometer black carbon data observed at a Gwangju site, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(6), 571-578. (in Korean with English abstract)
- Schmid, O., Artaxo, P., Arnott, W.P., Chand, D., Gatti, L.V., Frank, G.P., Hoffer, A., Schnaiter, M., Andreae, M.O. (2006) Spectral light absorption by ambient aerosols influenced by biomass burning in the Amazon Basin. I: Comparison and field calibration of absorption measurement techniques, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3443-3462.
- Virkkula, A., Makela, T., Hillamo, R., Yli-Tuomi, T., Hirsikko, A., Hameri, K., Koponen, I.K. (2007) A simple procedure for correcting loading effects of aethalometer data, *Journal of Air & Waste Management*, 57(10), 1214-1222.
- Weingartner, E., Saathof, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B., Baltensperger, U. (2003) Absorption of light by soot particles: Determination of the absorption coefficient by means of aethalometers, *Journal of Aerosol Science*, 34, 1445-1463.