

SNG 화염구조 가시화를 위한 OH* 자발광 이미지 역변환에서 전처리 효과

안 광 호*, 송 원 준**, 차 동 진**

Effect of a preprocessing method on the inversion of OH* chemiluminescence images acquired for visualizing SNG flame structure

Kwang Ho Ahn*, Won Joon Song**, Dong Jin Cha**

액화천연가스(LNG)를 대체하기 위해 석탄가스 등 합성천연가스(SNG)를 발전용 연료로 사용하기 위한 노력이 기울여지고 있다. 이러한 연료 유연성(fuel flexibility), 저 공해물질 배출 가스터빈 등의 주제에서, 실제적인 연소시스템에서의 연소불안정(combustion instability)은 여전히 관심있는 주제이다.

이 현상은 연소실 내 음향파에 의한 속도 또는 당량비 변동이 연소열방출율의 변동을 야기하여 이로 인한 피드백에 의해 불안정 진폭이 증가하며 발생하고, 비선형 효과가 지배적이 되어 한계 사이클이 형성된다. 대부분의 이론적인 접근법은 선형적인 해석법을 토대로 하며 비선형적인 화염 역학(flame dynamics) 모델링이 요구된다. 화염 전달함수(flame transfer function) 또는 화염묘사함수(flame describing function)가 대표적인 예이며,[1,2] 가진 주파수 및 진폭에 대한 연소열방출률 값으로 CH* 또는 OH* 자발광(chemiluminescence)을 측정하여 비선형적인 응답을 평가한다. 또는 보다 정확히 화염 역학을 이해하기 위해 2차원적인 분포 측정이 가능한 PLIF(planar laser-induced fluorescence)이 사용되기도 한다.

Lee 및 Santavicca(2003)는 예혼합 화염에 대해 OH PLIF 기법으로 화염 표면을 추정할 수 있는 순시적인 화염면 위치를 정확히 제공할 수 있음을 보고하였다.[3] 또한 이 기법을 활용하여 연소열방출의 비선형적인 응답이 대규모 와류 구조와 관련됨도 입증된 바 있다.[1,4] 그러나 PLIF 기법은 펌프 및 염료 레이저 등 다수의 레이저의 사용과 복잡하고 정교한 광학시스템 및 측정을 요구하여 사용이 제한적이고, 2차원 화염에 적용되는 한계를 갖고 있다.

반면, 자발광 기법은 별도의 광원이 필요하지 않아 경제적이고 편리하다. 기록된 이미지가 선

적분된 결과이어서 측정하고자 하는 화염성상의 분포를 역변환(재현)하기 위해서는 축대칭임을 가정하여야 한다는 제약이 있으나, 최근 토모그래피 기법을 도입하여 3차원적인 화염 역학 연구에 활용이 시도되고 있다.[5]

자발광 기법에서 기록된 투영 이미지 데이터는 재현하고자 하는 화염성상의 선적분된 결과이다. 그러므로 선적분된 데이터를 이용하여 해당 화염성상의 공간적인 분포를 재현하는 것이 필수적이며, 공간적인 분포가 축대칭인 경우 아벨역변환을 일반적으로 사용한다.[6]

본 연구에서는 SNG 가스터빈 연소불안정 연구에서 기록된 제트 화염[7] 및 선회안정화 화염[8]의 순시 OH* 자발광 이미지를 이용하여 시간 평균된(time-averaged) 각 화염의 구조를 재현함에 있어 잡음을 제거하기 위한 전처리 기법의 특성을 조사한다. 이를 위해 자발광 이미지와 동시에 기록된 OH PLIF 결과와 비교하여 제안된 전처리 기법의 성능을 평가한다.

Figure 1은 H₂/CO/CH₄ SNG에 대해 모델 가스터빈 연소기 내의 부분 예혼합 선회안정화 화염에 대한 실험 연구[7]와 난류 비 예혼합 제트 화염의 NO_x 스케일링과 안정성 특성을 조사하기 위해 수행한 실험[8]에서 얻어진 OH* 자발광 및 PLIF 결과이다. 두 참고문헌에는 방대한 실험결과가 수록되어 있으나, 본 연구에서는 비교적 뚜렷한 화염구조 특징을 갖는 일부 케이스의 결과만을 차용하였다.

PLIF 기록 시 레이저 광원 인텐시티의 공간적 불균일성이 실험적으로 보정되지 않아, 정규분포를 가정하여 보정한 후 활용하였다. 역변환에 사용된 이미지는 축대칭을 가정하여 좌측 반쪽만을 ROI(region of interest)로 설정하였다.

자발광 이미지는 대개 잡음을 수반하여 유연화하는 과정이 필요하다. 또한 3차원적인 화염 구조를 2차원적인 (준)축대칭으로 가정하여 중심축을 기준으로 좌우 이미지를 평균하게 된다. 이러한 전처리 과정에서 일반적으로 다항식을 이용한 곡선접합(curve-fitting)을 이용한다.

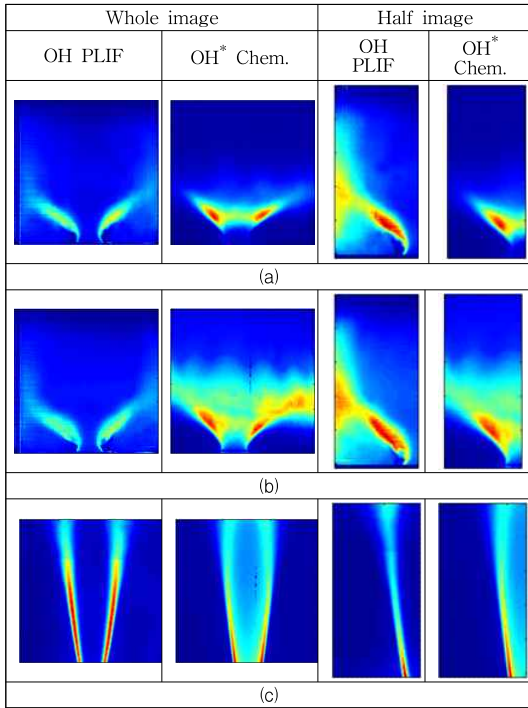


Fig. 1 OH PLIF and OH* chemiluminescence images of (a) swirl-stabilized(SS) flame of 40 kW, (b) SS flame of 50 kW, and (c) jet flame.[7,8]

Figure 2는 비교 목적 상, 전처리없이 역변환한 결과, 전 구간을 8차 다항식의 곡선접합한 후 역변환 결과를 나타낸다. 그림 왼쪽의 OH PLIF 결과와 비교할 때, 가운데의 전처리하지 않은 역변환 결과는 잡음의 영향으로 화염 구조를 확연히 식별하기 어렵고 화염 두께도 얇게 나타난다. 반면 전 구간을 다항식으로 곡선접합한 오른쪽 결과는 선화 화염에서 화염 구조가 타원형 형태로 왜곡되며 화염 두께도 넓게 나타내고 있다. 또한 비화염 영역에서 아티팩트가 다수 존재하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 기존 아벨 역변환 알고리즘의 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 다구간 전처리 기법을 제안한다. 즉 Fig. 3과 같이 투영 데이터의 크기가 큰 화염 영역과 작은 비화염 영역을 구분하고, 화염 영역에서는 다항식 곡선접합을, 비화염 영역에서는 이동평균, 스플라인, 2차원 컨볼루션 등의 부분(piecewise) 곡선접합으로 전처리한다.

구간 경계는 디지털 영상기법을[9] 활용하였다. Default(Sobel), PreWitt, Robert, Canny, Laplacian법 등을 검토한 결과, 처음 세 기법은 화염 영역을 비교적 좁게, 나머지 두 기법은 상대적으로 넓게 설정하였다.

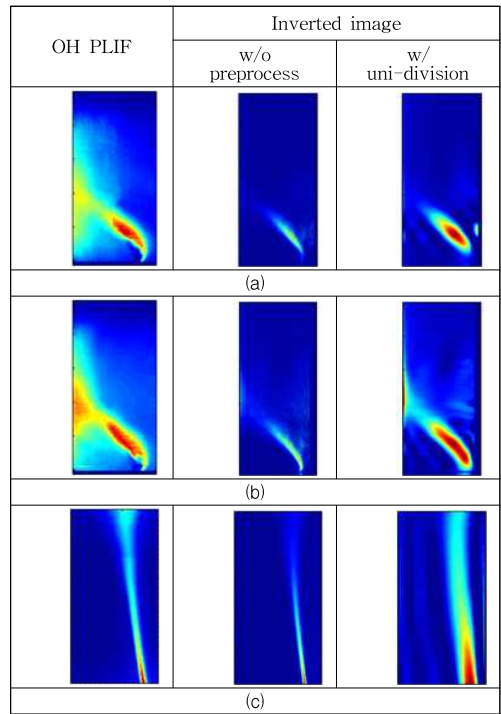


Fig. 2 Comparison of OH PLIF, inverted without preprocessing, and inverted with uni-division preprocessing images of (a) SS flame of 40 kW, (b) SS flame of 50 kW, and (c) jet flame.

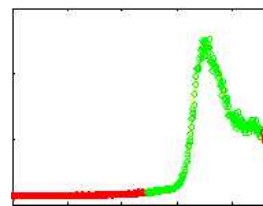


Fig. 3 Multi-division of a projection data profile.

따라서 본 연구에서는 대표적으로 Default와 Canny 두 기법을 적용하여 경계 검출 알고리즘의 효과를 비교하였고, 이 결과는 곧 기술한다.

또한, 제안된 다구간 전처리 기법은 다항식 곡선접합 구간의 최적 다항식 차수를 결정한다. 화염 구조의 복잡성을 위해서는 공간 분해능이 높은 고차 다항식을 선택하는 것이 합당하겠지만, 인접 구간과의 경계에서 불연속성을 줄여야 하는 점도 다항식 차수 결정에 고려하였다. 이를 위해 Fig. 4와 같이 오차 e 를 정의하였고, Eq. 1과 같이 오차의 합이 최소가 되는 다항식 차수를 최적으로 선택하여 화염 구간에 적용하였다.

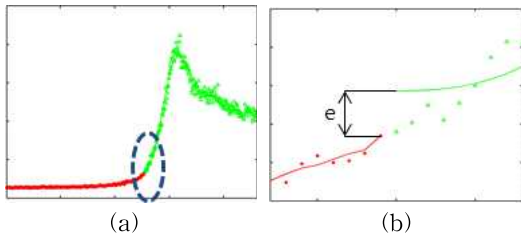


Fig. 4 Definition of error for optimizing the degree of polynomial fitting; (a) interface and (b) definition.

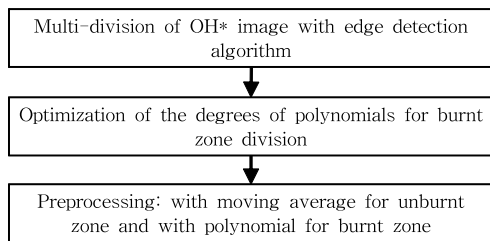


Fig. 5 Flow chart for multi-division preprocessing algorithm.

$$\left(\sum_{i=1}^{NR} \sum_{j=1}^{NE} |e| \right)_{\min} \quad (1)$$

여기서, NR 는 전체 행의 수, NE 는 전체 경계의 수이다.

Figure 5은 제안한 다구간 전처리 기법을 Matlab으로 구현할 때 사용한 흐름도이다.

다구간 전처리 기법에 의한 세 OH^* 자발광 이미지의 전처리 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 경계 검출 알고리즘의 효과를 비교하기 위해 Default와 Canny의 결과를 동시에 수록하였다. 또한, 참고로 전처리되지 않은 결과와 전 구간을 8차 다항식으로 전처리한 결과도 포함되었다.(이 들 결과는 Fig. 2의 역변환 결과에 활용되었음.) 전술한 바와 같이, Default 결과가 화염 크기를 줄게, Canny 결과가 상대적으로 넓게 전처리하였음을 알 수 있다. 보다 상세한 비교를 위해, 최대 투영 데이터 점에서 프로파일을 비교한 결과가 Fig. 7이다.

다구간 기법의 결과는 색채로 구간을 구분하여 표현하여 화염 영역 구간의 넓이를 비교할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 모든 화염에서 Canny 결과가 Default 결과에 비해 넓게 화염 영역 구간을 나타냄을 알 수 있다. 참고로 전처리를 하지 않은 결과는 잡음이 수반됨을 알 수 있고, 단일 구간으로 곡선접합한 결과는 비화염 영역에서 아티팩트가 발생함을 알 수 있다.

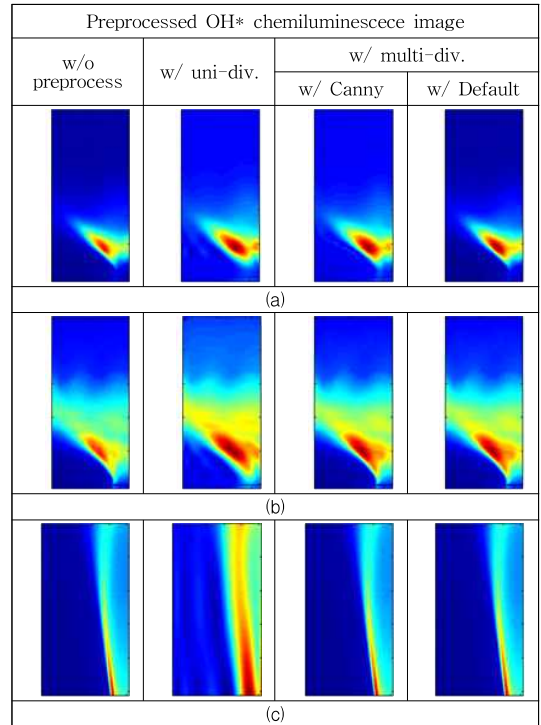


Fig. 6 Comparison of preprocessed OH* chemiluminescence images without preprocess, with uni-division preprocess, with multi-division & Canny edge detection, and with multi-division & Default edge detection of (a) SS flame of 40 kW, (b) SS flame of 50 kW, and (c) jet flame.

Figure 6의 전처리된 자발광 투영데이터를 토대로 역변환한 결과가 Fig. 8이다. 비교를 위해 OH PLIF 결과도 수록하였다. 역변환 결과의 우수성을 판단하기 위해 OH PLIF 결과와 비교하며, (1) 전체적인 역변환된 화염 구조, (2) 아티팩트의 발생 정도, 그리고 (3) 화염 중심(MIP, maximum intensity point)[10]의 좌표를 비교하였다.

우선 선회 화염의 경우, 전처리하지 않은 결과와 단일 구간으로 전처리한 결과는 전체적인 화염 구조 면이나 아티팩트 발생 면에서 본 연구에서 제안한 다구간 전처리 결과 보다 부정확함을 확인할 수 있다. 반면, 제트 화염에서는 전술한 바와 같이 단일 구간으로 전처리한 결과는 뚜렷이 상대적으로 왜곡된 역변환 결과를 보인다고 판단되나, 전처리하지 않은 결과와 다구간 전처리 결과는 육안으로 식별할 정도의 큰 차이는 보이지 않는다. (수록하지 않았으나) 확대된 역변환 결과를 비교하면 다구간 전처리에 의한 결과가 잡음 특성 등이 개선된 것을 알 수 있다.

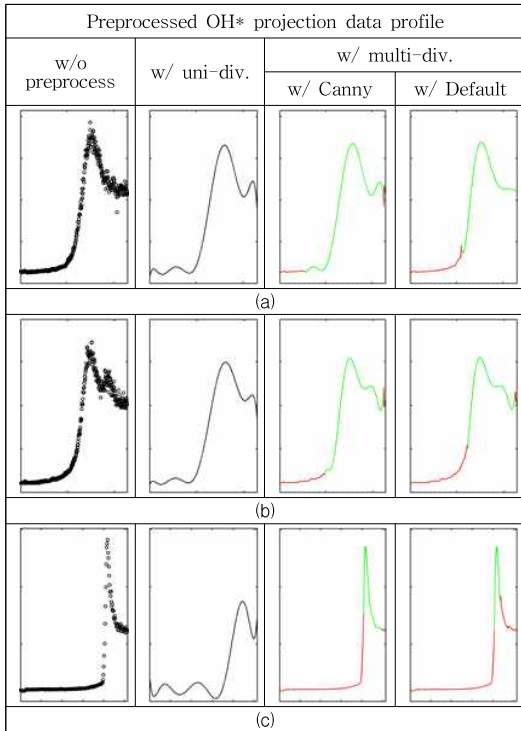


Fig. 7 Comparison of preprocessed OH* projection data profile along a line containing its maximum point without preprocess, with uni-division preprocess, with multi-division & Canny edge detection, and with multi-division & Default edge detection of (a) SS flame of 40 kW, (b) SS flame of 50 kW, and (c) jet flame.

다구간 전처리기법 중 경계 검출 알고리즘 효과를 살펴보면, Canny 결과가 Default 결과에 비해 전체적인 화염 구조를 보다 낮게 재현하고 있다고 판단된다. 다만 아티팩트 발생 면에서는 Default 결과가 비교적 나은 결과를 보인다.

마지막으로 화염 중심(MIP)을 찾아 역변환 결과에 "X"로 표시하였으나, 육안으로 식별하기는 용이하지 않다. Figure 9은 화염 중심(MIP)의 좌표를 효과적으로 비교하기 위해 Fig. 8에서 역변환한 화염 이미지는 배제하고 MIP만 데이터 점으로 표시한 결과이다. Figure 8의 다섯 역변환 결과의 각 값을 구하였으나, 비교 목적상 OH PLIF과 다구간 전처리 결과(Canny 및 Default)만을 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 선화 화염에서 Canny MIP 결과가 Default 결과에 비해 OH PLIF 결과에 근접함을 확인할 수 있다. 반면 제트 화염에서는 유사한 결과를 보였다.

기존의 전 구간을 다항식 곡선적합으로 전처리하는 방법과 달리, 전 구간을 화염 영역과 비화염 영역으로 구분한 여러 구간으로 나누어 이동

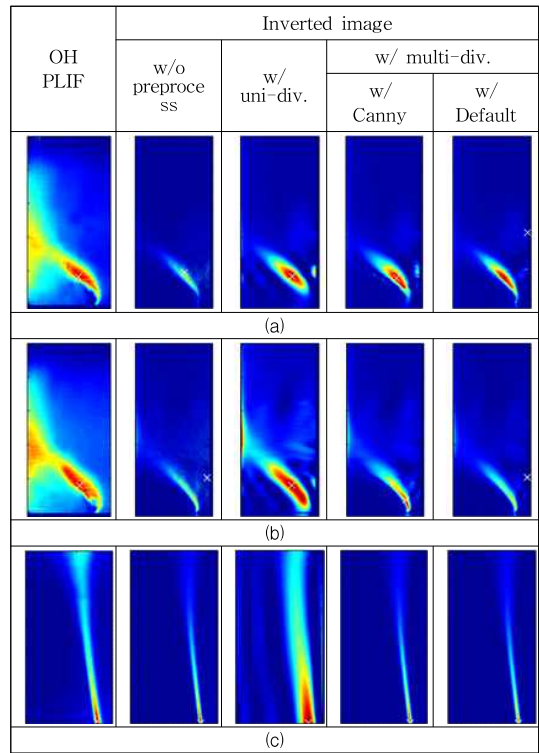


Fig. 8 Comparison of inverted images without preprocess, with uni-division preprocess, with multi-division & Canny edge detection, and with multi-division & Default edge detection of (a) SS flame of 40 kW, (b) SS flame of 50 kW, and (c) jet flame.

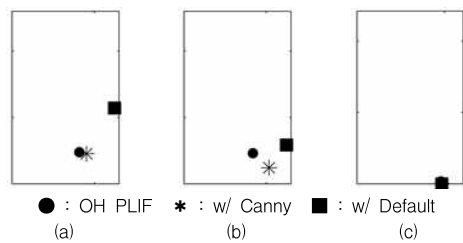


Fig. 9 Comparison of MIPs of OH PLIF image, inverted image with multi-division & Canny edge detection, and inverted image with multi-division & Default edge detection of (a) SS flame of 40 kW, (b) SS flame of 50 kW, and (c) jet flame.

평균으로 대표되는 부분 곡선적합과 다항식 곡선적합을 병용하는 다구간 전처리 기법을 제안하였다. 구간을 구분할 때 디지털 영상 처리법을 차용하여 경계 검출 알고리즘에 따른 아벨 역변환

결과의 변화를 조사하였다.

다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 본 연구에서 제안한 다구간 전처리 기법은 OH PLIF 이미지와 비교하였을 때, 기존의 단일 구간 전처리 기법에 의한 결과에 비해 전체적인 화염 구조와 아티팩트 발생 관점에서 우수한 결과를 제공함을 확인하였다. 전처리하지 않은 결과와 비교하였을 때 선회 화염에서는 분명한 개선 효과를 보였으나, 제트 화염에서는 화염 구조나 아티팩트 면에서는 뚜렷한 차이를 보기 어려웠고 다만 잡음 개선 효과는 있는 것으로 조사되었다.

(2) 다구간 전처리 기법 중 구간 경계를 찾는 경계 검출 알고리즘에 관해서는 Canny 알고리즘이 화염 구조 면에서 OH PLIF 결과에 보다 근접한 결과를 보였으나, 아티팩트 면에서는 Default 알고리즘이 보다 나은 결과를 보였다.

(3) 화염 중심 MIP의 좌표를 비교하였을 때, Canny 알고리즘이 Default 알고리즘에 비해 조금 더 나은 정확도를 보여주었다.

(4) 경계 검출 알고리즘은, 제트화염의 경우 Canny가 상대적으로 우수한 것을 알 수 있었으나, 선회 화염에서는 Canny와 Default 알고리즘이 조사한 화염 형상, 아티팩트 관점에서는 뚜렷한 상대적인 우수성을 보여주지 못하였으나, MIP 좌표에서는 Canny의 결과 정확도가 Default의 결과보다 나은 특성을 보였다.

이상의 결론을 종합하여 평가하면, 기존의 전처리 기법에 결과에 비해 본 연구에서 제안한 다구간 전처리 기법이 더욱 나은 결과를 보여주었다. 또한 경계 검출 알고리즘인 Canny와 Default를 비교한 결과에서는 Canny 옵션이 더 나은 역변환 결과를 보여주는 것으로 판단되었다.

후 기

본 연구는 2013년도 한밭대학교 교내학술연구사업의 지원을 받았다. 실험데이터를 제공해주신 서울대학교 이민철박사 및 황정재박사께 감사드립니다.

참고문헌

[1] R. Balachandran, B. O. Ayoola, C. F. Kaminski, A. P. Dowling, and E. Mastorakos, "Experimental investigation of the nonlinear response of turbulent premixed flames to imposed inlet velocity oscillations," *Combust. Flame*, Vol. 143, 2005, pp. 37-55.

[2] P. Palies, D. Durox, T. Schuller, and S. Candel, "The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames," *Combust. Flame*, Vol. 157, 2010, pp. 1698-1717.

[3] J. G. Lee and D. A. Santavicca, "Experimental diagnostics for the study of combustion instabilities in lean premixed combustors," *J. Propul. Power*, Vol. 19, 2003, pp. 735-750.

[4] S. K. Thumuluru and T. Lieuwen, "Characterization of acoustically forced swirl flame dynamics," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 32, 2009, pp. 2893-2900.

[5] N. A. Worth and J. R. Dawson, "Tomographic reconstruction of OH* chemiluminescence in two interacting turbulent flames," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 24, 2013, 024013(11pp).

[6] C. J. Dasch, "One-dimensional tomography: a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered backprojection methods," *Applied Optics*, Vol. 31, No. 8, 1992, pp. 1146-1152.

[7] Hwang J., 2014, NO_x scaling and stability characteristics of turbulent non-premixed jet flames of H₂/CO syngas, Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul.

[8] Lee, M. C., 2014, An experimental study on combustion instability and NO_x emission characteristics of H₂/CO/CH₄ syngas in a gas turbine combustor, Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul.

[9] 장동혁, "디지털 영상처리의 구현", 정보게이트, 2001, pp. 168-190.

[10] Kim, K. T., Lee, J. G., Lee, B. D., Quay, B. D., and Santavicca, D. A., 2010, "Characterization of forced flame response of swirl-stabilized turbulent lean-premixed flames in a gas turbine combustor," *J. of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 132, No. 4, 041502.