

라만 백스캐터링을 이용한 플라즈마에서의 레이저 펄스 증폭 Raman backward pulse amplification in plasma

허민섭*, 석희용, 배기홍, 김광훈, 김창범, Victor Kulagin, Nasr Hafz
플라즈마 가속기 연구 센터, 한국전기연구원 (KERI)
* mshur@keri.re.kr

고출력 레이저 펄스 증폭 기술은 1980년 중반 Chirped-pulse-amplification (CPA)의 발명을 계기로 비약적인 발전을 해와서, 현재는 페타와트급의 출력에 펄스 폭이 50 fs 이하인 레이저 펄스를 발생 시키는 단계에 이르렀다. CPA는 펄스 확장, 증폭, 재압축의 기본 과정으로 이루어진다. 최종 펄스 출력을 높이기 위해서는 펄스 확장 및 재압축에 필요한 grating 의 크기와 비용이 엄청나게 증가하기 때문에, 페타와트급 이상, 즉, 엑사와트급의 레이저 기술로 도약하는데 큰 장애가 되고 있다. 또한, 페타와트급의 레이저를 발생시키는 데에 조차도 대규모의 시설과 그에 따르는 고비용이 요구되므로, 소규모 저비용의 고출력 펄스 발생에 대한 새로운 아이디어가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

CPA에 의한 증폭 출력에 한계를 지우는 매질 손상을 극복하기 위하여 플라즈마에서의 Raman backscattering을 이용한 펄스 증폭 및 압축⁽¹⁾에 대한 아이디어가 최근 제시되어 현재까지 이론, 시뮬레이션, 실험적 연구가 몇몇 그룹에서 수행되어 왔다. 그 중 3-wave 모델에 대한 이론적 연구⁽²⁾가 깊이 이루어져 왔는데, 3-wave 모델은 기본적으로 유체 모델이므로 kinetic 효과를 제대로 반영할 수 없다는 단점이 계속 지적되어, particle-in-cell(PIC)를 이용한 시뮬레이션 연구가 이를 보완하고 있고 소수 그룹에서 실험적 연구가 병행되고 있다. 여기서 PIC 시뮬레이션은 kinetic 효과를 포함한 실제 상황을 정확하게 구현해낸다는 장점은 있으나 지나치게 느린 계산 속도가 문제였다. 이에 PIC 코드를 대체할만한 하이브리드 타입의 kinetic 코드인 averaged-PIC (aPIC)⁽³⁾에 대한 기본 이론과 시뮬레이션 벤치마킹 결과가 최근에 발표되었다.

aPIC 코드는 레이저 펄드 계산을 위한 envelope 방정식과 플라즈마 운동을 묘사하기 위한 일반 PIC 방식으로 이루어지는 하이브리드 타입 모델을 기반으로 한다. PIC 으로 기술되는 플라즈마와 envelope으로 기술되는 레이저 펄드 사이의 커플링은 canonical 모멘텀 보존과 레이저의 빠른 시간 스케일을 average-out 해버리는 방식으로 결정된다. 현재까지는 1D 모델과 semi-2D 모델이 완성되었다. 그림 1은 1D aPIC 의 결과와 같은 파라미터를 사용하여 얻은 PIC (Xoopic)결과, 그리고 3-wave 모델의 결과를 보여주고 있다. Xoopic의 결과는 일반 PIC 계산이므로 벤치마킹 대상이 된다고 할 때, 3-wave 모델은 실제보다 큰 증폭율을 보여주는 반면 aPIC 모델은 10배 이상 빠른 계산 시간만으로 Xoopic과 거의 같은 결과를 산출하였음을 알 수 있다.

여기서, 한가지 의문은 PIC 또는 aPIC에서 얻어진 결과가 3-wave 모델의 결과와 많이 다른 이유가 무엇인가 하는 것인데, 이는 전자 trapping 또는 wave-breaking과 같은 kinetic 효과에서 그 원인을 찾을 수 있다. 그림 2는 그림 1의 시뮬레이션에 대해 여러 위치에서의 전자 phase space를 집어낸 것인데, 펄스의 peak 위치 근처로 갈수록 전자의 trapping이 심해짐을 알 수 있다. 본 논문 발표에서는 kinetic 효과의 정량적 분석을 위한 새로운 kinetic 항에 대한 논의가 이루어질 것이다.

그림 3은 semi-2D aPIC 시뮬레이션 결과이다. 여기서 semi-2D라는 것은 플라즈마의 운동은 종방향만 고려되고, 횡방향의 커플링은 펄스의 diffraction에 의해서만 주어진다라는 의미이다. 이는 종방향의 ponderomotive force가 크게 dominant한 본 시스템의 특성상 별 무리가 없는 가정이다. 아직까지 2D 시뮬레이션 연구는 초기 단계인데, 차후 완전한 형태의 2D 코드 개발과 이를 이용한 pulse의 focusing phase 보존 등에 대한 자세한 연구가 이루어질 전망이다.

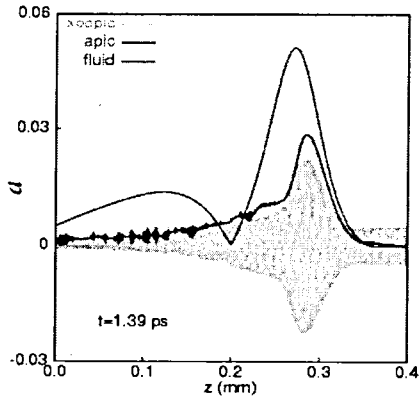


그림 1. aPIC, Xoopic, 3-wave 모델의 시뮬레이션

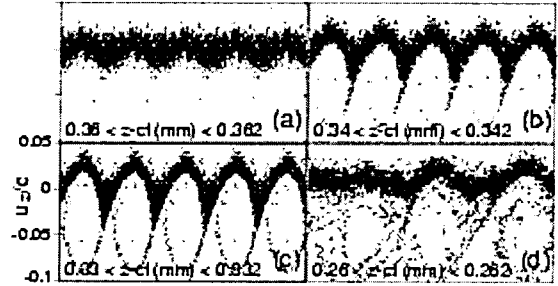


그림 2. aPIC 시뮬레이션에서의 전자 phase space

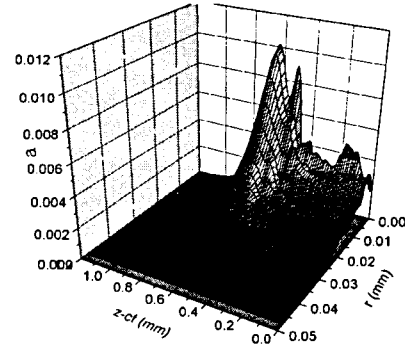
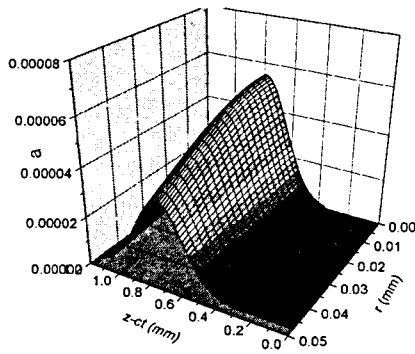


그림 3. semi-2D aPIC 시뮬레이션. t=0 (왼쪽), t= 7 ps

1. V.M. Malkin, G. Shvets, and N.J. Fisch, "Fast Compression of Laser Beams to Highly Overcritical Powers", Phys. Rev. Lett. 82, 4448-4451 (1999).
2. V.M. Malkin, G. Shvets, and N.J. Fisch, "Ultra-powerful compact amplifiers for short laser pulses", Phys. Plasmas 7, 2232-2240 (2000).
3. M.S. Hur, G. Penn, J.S. Wurtele, and R. Lindberg, "Slowly varying envelope kinetic simulations of pulse amplification by Raman backscattering", Phys. Plasmas 11, 5204-5211 (2004).