상대론적 레이저와 기체의 상호작용과 전자 가속

DOI: 10.3938/PhiT.22.043

김 형 택

Relativistic Laser-matter Interactions in an Underdense Plasma and the Electron Acceleration

Hyung Taek KIM

Recent progress in intense laser technology has been providing new opportunities to explore extreme physical conditions in relativistic laser-matter interactions. Here, we will describe the basics of the interactions between an intense laser pulse and an underdense plasma in the relativistic region. In particular, we will discuss the recent progress and the current status for laser wakefield electron acceleration, which is the most prominent topic in relativistic underdense laser plasma interactions.

1960년대 레이저가 개발되면서부터 레이저의 출력은 획기적으로 증대되어 왔다. 특히 Q-스위칭과 모드잠금 기술 등이 개발되면서 짧은 펄스 형태로 세기가 강한 레이저 펄스를 발생시킬 수 있게 되면서, 레이저를 이용한 새로운 학문들이 대두되었다. 특히 초고출력 레이저의 전기장의 세기가 원자 내의 전자를 구속하고 있는 쿨롱 힘을 넘어서게 되면서, 강력한 레이저 장에 의해 물질을 플라스마 상태 (물질의 제4의 상태, 원자가 이온화되어 전자와 이온이 분리되어 있으나 거시적으로는 전기적 중성을 띠는 물질의 상태)를 만들 수 있게 되었다. 이와 같이 레이저를 이용하여 물질을 플라스마 상태로 만들고, 여기에서 일어나는 여러 가지 현상을 탐구하는 영역을 레이저 플라스마 연구라고 할 수 있다. 레이저 플라스마의 연구 분야는 레이저 플라스마의 전자의 밀도에 따라 고밀도 레이저 플

라스마와 저밀도 레이저 플라스마로 나눌 수 있다. 고밀도 레이저 플라스마는 임계밀도 (특정 파장의 빛이 높은 전자 밀도에 의해 투과하지 못하고 흡수 반사되는 전자의 밀도) 이상의 높은 전자 밀도를 가지는 플라스마를 생성하고 연구하는 분야이고, 저밀도 플라스마는 임계밀도 이하의 플라스마에서 레이저 빔이 매질을 통과하면서 생기는 여러 가지 현상을 연구하는 학문이다. 레이저의 세기가 10^{13} W/cm² 이상이 되면 레이저와 기체의 상호작용으로 플라스마 상태가 형성되기 시작하고, 고차조화파 발생, 필라멘테이션, 광학장 이온화(Optical Field Ionization) 엑스선 레이저 발진 등을 일으킬 수 있다. 레이저의 세기가 10^{18} W/cm²이 넘어서게 되면, 전자의 움직임이 상대론적인 영역에 들어서게 되면서 상대론적 자기 집속(relativistic self-focusing), 항적장 가속(wake field acceleration) 등의 현상이 일어나게 된다. 최근 초강력 레이저 기술의 개발로 페타와트급 레이저들이 개발되면서 이와 같은 상대론적 영역의 레이저 플라스마 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 상대론적 영역의 저밀도 플라스마 연구에서는 레이저를 이용한 항적장 전자 가속 연구가 최근 각광을 받고 있다. 항적장 레이저 가속은 기존의 가속 기술보다 1000배나 큰 100 GV/m의 가속 기울기를 만들어 낼 수 있어, 입자 가속기의 규모를 획기적으로 줄이고, 최대 가속 에너지를 높일 수 있는 새로운 기술로 대두되고 있다. 이번 특집에서는 상대론적 저밀도 레이저 플라스마 연구에서 최근 각광을 받고 있는 항적장 가속 기술의 개요와 최근 연구 현황 등을 소개하려고 한다.

항적장 레이저 전자 가속 기술 개요

레이저 전자 가속은 1979년 T. Tajima 박사와 J. M. Dawson 박사가 처음으로 그 가능성을 제기하면서 관련 연구가 시작되었다.^[1] 그러나 펄스초 초강력 레이저가 개발되기 전

저자약력

김형택 박사는 한국과학기술원 물리학과에서 2004년 박사학위를 취득하였으며, 한국과학기술원에서 연수 연구원으로 재직하다 2005년부터 광주과학기술원 고등광기술연구소의 선임연구원으로 재직하고 있다. 현재 초강력레이저 연구단에서 저밀도 레이저 플라스마 연구에 참여하고 있다.(htkim@gist.ac.kr)

REFERENCES

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. **43**, 267 (1979).

에는 레이저로 가속할 수 있는 전자의 품질이 기존의 가속기에 비해 현저히 떨어져서 크게 주목을 받지 못하였다. 그러나 1990년대 후반 펨토초 초강력 레이저가 개발되면서, 2004년 거품 영역(bubble regime)에서 준단일 에너지와 좋은 공간적 품질을 가지는 100 MeV 이상의 고에너지 전자빔 발생이 성공하여, Nature지에 발표되어 세계적인 주목을 받게 되었다.^[2-4] 2006년에는 LBL의 연구진이 Capillary discharge medium을 이용하여 1 GeV 에너지의 단일 에너지 전자빔 발생을 보고하였으며,^[5-8] 그 이후 Multi-GeV 영역의 전자빔 개발 연구와 전자빔의 특성을 제어하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

그림 1은 극초단 초강력 레이저를 이용한 항적장 전자 가속의 원리를 보여주고 있다. 플라스마 내의 전자는 레이저 세기가 강한 부분에서 약한 부분으로 빛 세기의 변화에 따라 밀려나는 힘을 받게 되는데 이를 폰더모티브 힘이라고 한다. 강력한 폰더모티브 힘에 의해 전자는 레이저 진행 축에서 바깥쪽으로 밀리게 되고, 레이저가 지나간 후에는 레이저 축 방향으로 다시 모이게 되는 운동을 반복하면서 플라스마 파동이 발생하며, 이 플라스마 파동은 레이저를 따라 진행하게 된다. 이 플라스마 파동 안쪽으로 전자 뭉치가 파동 붕괴(wave breaking)에 의해 유입되면, 플라스마 파동 중심 쪽으로 강한 힘을 받게 되어 가속되는 현상을 항적장 가속이라고 한다. 그림 1의 오른쪽에 보는 것과 같이, 플라스마 파동은 빠르게 움직이는 배에 의해서 생성되는 파도로 생각할 수 있고, 플라스마 파동에 의한 전자 가속은 파도에서 서핑을 하여 속도를 얻는 것과 유사한 과정으로 쉽게 이해할 수 있다.

레이저 전자 가속 기술은 플라스마 파동의 생성과 파동 붕괴, 상대론적 자기집속 등의 매우 비선형적인 플라스마 현상을 이용한다. 가속된 전자빔의 에너지를 높이기 위해서는 가속 길이를 늘려야 한다. 레이저-플라스마 전자 가속의 가속 길이는 두 가지 변수에 의해 제한될 수 있다. 첫 번째는 반위상 거리(Dephasing length)로 플라스마 파동에 유입된 전자 뭉치가 파동 내에서 플라스마 파동의 중심 방향으로 가속력을 받으면서 진행할 수 있는 최대 거리를 의미한다. 그리고 여기 고갈 길이(Pump depletion length)는 레이저의 에너지가 플라스마 흡수되어 가속을 일으킬 수 있는 플라스마 파동을 일으킬 수 없는 상태까지 진행한 거리를 나타낸다. 이와 같은 반위상 거리와 여기 고갈 길이를 늘리기 위해서는 매질의 밀도를 낮게 하여 플라스마 파동의 주기를 길게 하고, 플라스마의 흡수를 줄이는 방법을 사용할 수 있다. 그러나 매질의 전자 밀도를 낮게 하면, 파동 붕괴에 의한 전자 뭉치 유입이 제한되어 전자빔 발생 자체를 방해할 수 있다. 따라서 높은 에너지의 좋은 품질의 전자빔을 얻기 위해서는 낮은 전자 밀도를 가지는 가속 매질에서 전자 뭉치 유입을 향상시키는 방법을 사용할 수 있어야 한다.

Fig. 1. Principle of laser wakefield acceleration.

전자 뭉치 유입 조절 기술

레이저-플라스마 전자 가속에 있어 파동 붕괴에 따른 전자 뭉치 유입은 가속된 전자가 생성되는 매우 중요한 과정으로 이 과정에 의해 전자빔의 특성이 많은 영향을 받게 된다. 통상 전자 뭉치 유입은 플라스마 파동의 비선형성이 급격히 증가하면서 저절로 파동 붕괴가 일어나는 과정에서 발생하므로 이를 자가 유입(Self injection)이라고 한다. 이러한 파동 붕괴는 파도가 점점 심해지면 파도의 끝에서 파형이 깨지면서 하얀 물보라가 생기는 현상과 매우 유사한 과정으로 일어난다. 전자 뭉치 유입의 시점과 위치는 전자빔 성질에 매우 큰 영향을 미치지만, 자가 유입 과정을 제어하기가 매우 어려워 레이저-플라스마 가속에 의해 안정적으로 좋은 성질을 가지는 전자빔을 발생시키는 것이 어려웠다. 특히 레이저의 출력이 증가하고,

REFERENCES

- [2] S. P. D. Mangles, C. D. Murphy, Z. Najmudin, A. G. R. Thomas, J. L. Collier, A. E. Dangor, E. J. Divall, P. S. Foster, J. G. Gallacher, C. J. Hooker, *et al.*, Nature **431**, 535 (2004).
- [3] C. G. R. Geddes, Cs. Toth, J. van Tilborg, E. Esarey, C. B. Schroeder, D. Bruhwiler, C. Nieter, J. Cary and W. P. Leemans, Nature **431**, 538 (2004).
- [4] J. Faure, Y. Glinec, A. Pukhov, S. Kiselev, S. Gordienko, E. Lefebvre, J.-P. Rousseau, F. Burgy and V. Malka, Nature **431**, 541 (2004).
- [5] W. P. Leemans, B. Nagler, A. J. Gonsalves, Cs. Tóth, K. Nakamura, C. G. R. Geddes, E. Esarey, C. B. Schroeder and S. M. Hooker, Nature Phys. **2**, 696 (2006).
- [6] N. A. M. Hafz, T. M. Jeong, I. W. Choi, S. K. Lee, K. H. Pae, V. V. Kulagin, J. H. Sung, T. J. Yu, K.-H. Hong, T. Hosokai, J. R. Cary, *et al.*, Nature Photon. **2**, 571 (2008).
- [7] H. Lu, M. Liu, W. Wang, C. Wang, J. Liu, A. Deng, J. Xu, C. Xia, W. Li, H. Zhang, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **99**, 091502 (2011).
- [8] X. Wang, R. Zgadzaj, N. Fazel, Z. Li, S. A. Yi, X. Zhang, W. Henderson, Y.-Y. Chang, R. Korzekwa, H.-E. Tsai, *et al.*, Nat. Commun. **4**, 1988 (2013).

Fig. 2. Techniques for controlling electron-bunch injection (a) beat-wave injection method (b) inner-shell ionization injection (c) Injection controlling by density tailoring (d) Staged acceleration method.

이에 따라 전자 가속 에너지가 증가하면서, 전자 가속의 불안정성은 증가하여, 자가 유입 과정을 제어하는 것이 절실히 필요하게 되었다.

그림 2는 플라스마 파동 내로 전자 뭉치 유입을 제어하기 위해 개발된 방법들의 개략도 및 개념을 보여주고 있다. 첫 번째 방법은 강력한 펌프 레이저와 반대 방향으로 2차 조화파 펄스를 보내주어 맥놀이 파동을 시공간적으로 조절하여 전자 뭉치 유입을 제어하는 방법이다.^[9] 두 번째 방법은 헬륨 매질에 소량의 산소 등의 가스를 혼합하여 이들 혼합 원자의 내각에서 이온화되는 전자의 발생 시점을 조절하여 전자 뭉치 유입을 일으키는 방법이다.^[10] 세 번째는 기체 매질 입구 쪽에 밀도가 높은 부분을 형성해 줌으로써 플라스마 파동의 주기를 변조하여 그 부분에서 전자 뭉치 유입이 일어나도록 조절하는 방법이다.^[11] 마지막으로 소개할 방법은 전자 가속의 여러 가지 특성을 조절할 수 있으며, 에너지를 단계적으로 증대시킬 수 있는 방법으로 대두되고 있는 방법인 다단 가속 기술이다.^[12] 다단 가속 기술은 첫 번째 가속 단계에서는 짧고 밀도가 높은 매질에서 전자 뭉치를 발생시키고, 이를 다음 단계 가속 구간으로 넣어주는 방식이며, 이는 기존의 가속기에서도 에너지를 순차적으로 증가시키는 데에 이용하고 있는 방법이다. 특히 다단계 가속 방식은 전자 뭉치 유입을 제어하는 다른 방법들과 병용해서 사용할 수도 있으며, 향후 여러 단계의 가속을 통해 발생되는 전자빔의 에너지를 증대시킬 수 있어 주목을 받고 있다. 이와 같은 전자 뭉치 제어 기술은 전자빔의 에너지, 에너지 분산, 전하량, 퍼짐각 등의 특성을 향상시키는 결과들을

도출하고 있으며, 레이저-플라스마 가속 기술의 고질적인 문제인 가속 안정성도 점차적으로 향상시켜 나가고 있다.

2단 가속을 이용한 Multi-GeV 전자빔 개발

국내의 레이저-플라스마 항적장 가속 기술은 2005년 광주과학기술원 고등광기술연구소에 100 TW급 극초단 광양자빔 시설이 구축되면서 본격적으로 시작되었다. 고등광기술연구소의 연구진은 100 TW 레이저 펄스를 이용하여 2008년 1 GeV 급 전자빔 발생에 성공하여, 저명 과학 저널인 네이처 포토닉스 2008년 9월호에 논문이 게재되었다.^[6] 그후 페타와트급 극초단 광양자빔 시설이 2010년에 구축되면서,^[13] 1 GeV를 넘어서는 에너지를 가지는 전자빔 개발 연구가 시작되었다.

이론적으로는 페타와트 레이저를 이용하면 Multi-GeV에서 10 GeV 영역의 전자빔 발생이 가능한 것으로 예측되었다. 그러나 레이저의 펌핑 에너지를 늘리더라도, 전자 뭉치 유입 및 가속 거리 확보 등의 문제를 해결해야만 Multi-GeV 영역의 전자빔 개발이 가능하다. 최근 텍사스 대학의 연구진은 150 fs, 120 J의 성능을 가지는 페타와트급 Ti:S Nd:Glass 하이브리드 레이저 시스템과 7 cm 가스셀을 이용하여 2 GeV 에너지를 가지는 전자빔 개발에 성공한 바 있다.^[8] 이 실험에서는 $4.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 매우 낮은 전자 밀도의 매질을 사용하였으며, 이렇게 낮은 밀도의 매질에서 레이저빔이 진행하면서 자가 유입이 일어나는 방법으로 고에너지 전자빔을 개발하였다. 그러나 이 실험에 사용한 페타와트 레이저의 반복률은 매우 낮아서 실제적인 전자빔 응용 연구에는 한계를 가지고 있다.

광주과학기술원 극초단 광양자빔 시설의 연구진은 30 펨토초의 펄스폭을 가지는 페타와트 레이저 시스템을 이용하여, 2 GeV 이상의 고에너지 전자빔을 발생시키는 연구를 수행하였다. 그림 3은 페타와트 레이저를 이용한 항적장 전자 가속 실험의 개략도를 보여준다. 본 실험에서는 25 J의 에너지와 레이저 펄스를 집속거리 4 m ($f\# = 18$)의 오목 거울을 이용하여

REFERENCES

- [9] J. Faure, C. Rechatin, A. Norlin, A. Lifschitz, Y. Glinec and V. Malka, *Nature* **444**, 737 (2006).
- [10] A. Pak, K. A. Marsh, S. F. Martins, W. Lu, W. B. Mori and C. Joshi, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 025003 (2010).
- [11] A. J. Gonsalves, K. Nakamura, C. Lin, D. Panassenko, S. Shiraishi, T. Sokollik, C. Benedetti, C. B. Schroeder, C. G. R. Geddes, J. van Tilborg, *et al.*, *Nature Phys.* **7**, 862 (2011).
- [12] J. S. Liu, C. Q. Xia, W. T. Wang, H. Y. Lu, Ch. Wang, A. H. Deng, W. T. Li, H. Zhang, X. Y. Liang, Y. X. Leng, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 035001 (2011).
- [13] J. H. Sung, S. K. Lee, T. J. Yu, T. M. Jeong and J. Lee, *Opt. Lett.* **35**, 3021 (2010).

Fig. 3. Experimental layout for Multi-GeV electron beam generation using PW laser pulses.

기체 매질에 집속하였다. 실험에서는 펄스 압축기의 회절격자 간의 간격을 조절하여 전자빔의 발생이 최적화되는 양의 초 펄스 60 fs의 펄스폭을 가지도록 하였다. 레이저 빔의 집속은 변형 거울을 이용하여 최적화하였으며, 집속된 빔의 크기는 25 μm 였다. 레이저 빔 집속 위치에서의 레이저의 세기는 $3 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ 였다. 발생된 고에너지 전자는 이극 자석을 이용하여 에너지를 분해하여 LANEX 필름(전자 및 엑스선 검출용 fluorescence film)과 ICCD(Intensified CCD)를 이용하여 측정하였으며, 이극자석 앞에 LANEX 필름을 설치하여 전자빔의 방향과 빔 모양을 측정하였다. 가스 매질로는 4 mm와 10 mm의 초음속 가스 노즐을 연달아 설치하여, 2단 헬륨 가스 젯 매질을 구성하여 사용하였다. 또한 가스 매질과 이극자석 전자 분광기 사이에 ICT(Integrating Current Transformers)를 설치하여, 전자빔의 전하량을 측정하였다.

본 연구에서는 전자빔을 발생시키고 수백 MeV까지 가속시키는 1단 가속 부분과 전자빔의 에너지를 3 GeV 영역까지 가속시키는 2단 가속 부분을 구분하여 2단계 가속 기술을 구현하였다.^[14] 2단계 가속은 전자의 발생 단계와 가속 단계를 구별하여 조정함으로써 전자 뭉치 유입과 가속 부분 특성을 각각 조절할 수 있어, 전자 가속의 품질을 적절하게 조절할 수 있는 장점이 있다. 그림 4는 2단계 전자가속 기술을 구현한 결과를 보여주고 있다. 그림 4 위쪽 그림은 2단 전자 가속의 개념도를 보여주고 있다. 실험에서는 1단 가속 부분에는 $2.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 비교적 높은 밀도의 4-mm 헬륨 가스 젯을 사용하여 전자뭉치의 자가 유입이 원활하게 일어나도록 하였다. 1단 가속부에서 나온 전자빔은 400 MeV의 에너지를 가지고 있었다. 2단 가속 부분은 $0.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 낮은 밀도의 매질을 사용하여 추가적인 전자뭉치의 유입이 없이 균일한 가속이 가능하도록 하였

Dual-stage acceleration

Double He gas jet : $d_e = 2.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (4 mm) $d_e = 0.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (10 mm)

Fig. 4. Concept of dual-stage acceleration (up) and the result of 3-GeV electron beam generation from the dual-stage acceleration (down).

다. 이렇게 2단 가속을 통하여 전자의 에너지는 획기적으로 증가하여 3 GeV 영역까지 전자빔의 에너지가 증가한 것을 그림 4에서 확인할 수 있다.

본 연구 결과는 펨토초 페타와트 레이저를 2단계 가속에 적용하여 레이저-플라즈마 기반 전자 가속기로부터 얻은 세계 최대 에너지를 가지는 전자빔을 개발한 결과이다. 특히 페타와트 레이저 시설을 2단계 가속에 적용하여 에너지를 증대하는 것에 성공함으로써, 본 결과는 향후 다단계 가속을 이용한 10 GeV 급 전자빔 개발의 기반 연구가 될 것으로 기대된다. 이와 같이 펨토초 페타와트 레이저를 이용한 3 GeV 전자빔 발생에 성공함으로써, 광양자빔 시설을 기반으로 추진되는 기초과학연구원 광과학기술원 캠퍼스 연구단의 연구진은 향후 10 GeV 전자빔 개발 연구, 펨토초 감마선원 개발 등 관련 분야를 주도하는 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

요약 및 향후 전망

이제까지 상대론적 저밀도 플라즈마의 핵심 연구 주제인 항적장 가속의 원리와 연구 현황에 관하여 알아보았다. 레이저

REFERENCES

[14] Arxiv 1307.4159; accepted in Phys. Rev. Lett.

항적장 가속 연구는 1990년대 말 펨토초 초강력 레이저가 개발되면서, 2000년대 초반부터 본격적으로 연구가 시작되었다. 지난 10년간 본 연구는 비약적인 발전을 하여, 1 GeV 이상의 에너지를 가지는 전자빔 개발 및 전자빔 특성 제어 연구 등에서 괄목할 만한 연구 결과들이 보고되었다. 국내에서는 2006년 광주과학기술원 고등광기술연구소에 100 TW 출력의 극초단광양자빔 시설이 가동되면서 본격적으로 항적장 레이저 가속 연구가 시작되었다. 특히 2008년도에는 고등광기술연구소 연구진은 1 GeV급 전자빔 발생과 안정화 기술 개발이 성공하여 Nature photonics 저널에 보고한 바가 있으며, 최근 3 GeV 전자빔 개발에 성공하여 세계적인 주목을 받고 있다.

레이저 항적장 가속은 짧은 거리에서 매우 높은 에너지의 전자 빔을 얻을 수 있어, 기존의 전자 가속기를 소형화하거나, 아니면 기존의 가속기 기술을 뛰어넘어 더 높은 에너지의 전

자빔을 얻는 것이 가능할 것으로 기대되고 있다. 그러나 기존의 선형 가속기에 비하여 반복률, 안정성, 평균 전류량 등이 아직 미치지 못하는 한계를 가지고 있다. 그러나 레이저 항적장 가속은 10년 정도의 짧은 기간에 많은 발전을 이루어나가고 있는 새로운 연구 분야로 앞으로의 발전 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 특히 레이저의 출력이 높아지고, 다단계 가속 등의 기술이 개발되면서 수년 내에 10 GeV 에너지를 가지는 레이저 기반 전자 가속기를 구현할 수 있을 것으로 예상되며, 최종적으로는 기존의 가속기 기술을 넘어 100 GeV가 넘는 에너지를 가지는 초고에너지 전자빔을 구현할 가능성을 가지고 있다. 이와 같은 레이저 항적장 전자 가속 기술의 개발은 앞으로 기초입자 연구용 레이저 기반 전자 충돌기 개발, 핵물리 연구용 극초단 고휘도 감마선원, 탁상형 방사광 가속기 등을 실현할 수 있을 것으로 기대된다.