



1. 서론

레이저가 매우 강력한 전기장을 가지고 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 강력한 레이저의 전기장의 세기는 인간들이 발생시킬 수 있는 다른 파장영역의 전자기와, 예를 들어 마이크로파 (microwave)나 라디오파 (RF) 등이 가지고 있는 전기장의 세기보다 훨씬 강력하다. 따라서, 고출력 레이저가 가지고 있는 초강력 전기장을 이용하여 전자나 이온과 같은 하전입자들을 매우 짧은 거리에서 상대론적 고에너지로 가속하려고 하는 연구를 20 여년 전부터 과학자들은 생각하게 되었다. 그러나, 레이저도 횡파인 빛의 일종인 관계로 전기장의 방향이 레이저가 진행하는 방향과 수직이므로 횡파인 레이저의 전기장을 그대로 사용하면 하전입자들을 효율적으로 가속할 수 없다. 효율적인

으므로 섭동에 의하여 밀려난 전자들과의 사이에 공간적으로 전하분리가 발생한다. 이러한 전자밀도의 공간적 섭동은 준중성을 유지하려는 플라즈마의 특성에 의하여 레이저 펄스 뒤로 플라즈마 파동이 형성되고 레이저 펄스의 뒤를 따라가며 진행한다. 이 현상은 호수에서 배가 지나가면 그 뒤에 물결파가 만들어지고 그 파동은 배의 뒤를 따라가며 진행되는 것과 매우 유사하다. 이때 플라즈마 파동에 의하여 발생하는 전기장은 레이저 펄스의 진행방향, 즉 종방향이고 그 세기는 대략

$$E[V/m] \approx 100\sqrt{n_p[cm^{-3}]}$$

로 주어진다. 여기서, n_p 는 플라즈마 밀도이다. 예를 들어 만약 $n_p = 10^{16} cm^{-3}$ 인 플라즈마를 이용하면 100

특집 | 펨토 과학 I

고출력 레이저를 이용한 입자 가속

김광훈, 이해준, 석희용*

가속을 위해서는 마이크로파를 사용하는 기존의 가속기들 처럼 전기장의 방향이 입자의 진행방향과 같아야 한다. 이와 같이 횡파인 레이저의 전기장을 종파로 변환시켜 주는 것은 레이저를 플라즈마 속에 보내 줌으로써 가능하다.

1979년 미국 UCLA 물리학과에 있던 Tajima와 Dawson은 레이저 펄스를 플라즈마 속으로 진행시키면 플라즈마 파동에 의하여 종방향의 초강력 전기장을 발생시킬 수 있다는 기본 아이디어를 제안하였다.^[1] 레이저 펄스는 세기의 변화에 따른 압력으로서 판드로모티브 힘 (ponderomotive force) 이라는 것이 발생하는데 레이저 펄스가 플라즈마 속을 진행하면 이온들에 비하여 상대적으로 가벼운 전자들이 밀려나면서 균일한 밀도를 갖고 있던 플라즈마 내에 전자들의 섭동이 생긴다. 상대적으로 무거운 이온들은 레이저 펄스가 지나가는 짧은 시간동안에 거의 움직이지 않고 플라즈마 내에 균일하게 분포되어 있

GV/m의 초강력 전기장을 얻을 수 있는데 이것은 기존 가속기의 근본적인 물리적 한계인 100 MV/m와 비교하면 1000 배에 해당한다.

이와 같이 고출력 레이저와 플라즈마를 사용하면 기존의 방법으로는 도저히 얻을 수 없을 정도의 강력한 전기장을 생성시킬 수 있으므로 이것을 이용하면 전자나 이온 등과 같은 하전입자들을 아주 짧은 거리에서 상대론적 고에너지로 가속할 수 있게 되는 것이다.^[2,3] 또한, 레이저에 의해 생성된 플라즈마 파동을 사용하면 전하를 띠지 않은 광자 (photon)의 군속도도 증가시킬 수 있음이 알려져 있다.^[4] 이 글에서는 고출력 레이저와 플라즈마 파동을 이용하여 전자, 이온, 광자 등을 가속하는 연구에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

* 한국전기연구원 플라즈마가속기 연구단

고출력 레이저를 이용한 입자 가속

2. 레이저와 플라즈마를 이용한 전자 가속

Tajima와 Dawson의 아이디어가 발표될 당시에는 플라즈마 파동을 효율적으로 발생시키기 위해 필요한 1 psec (10^{-12} sec) 이하의 극히 짧은 레이저 펄스를 발생시킬 수 있는 방법이 없었다. 그래서 그 대안으로 제안한 것이 파장이 조금 다른 두 레이저 펄스에 의한 맥놀이파 (beat wave)를 사용하는 것이었다 (그림 1 참조). 맥놀이파를 플라즈마의 자연진동수와 공진시켜 주면 플라즈마 파동의 진폭은 계속 증가하게 되어 아주 강력한 상대론적 플라즈마 파동이 만들어지고 이에 의하여 종방향의 초강력 전기장이 형성된다. 이렇게 생성된 전기장에 외부에서 가속할 전자들을 입사시켜 주면 전자들을 상대론적 에너지로 가속시킬 수 있다.

한편, 1980년대 후반에 레이저의 역사에서 중요한 발명이 이루어졌다 (그림 2 참조). 이것은 CPA (chirped pulse amplification)이라는 기술로 극히 짧으면서도 고출력의 레이저 펄스를 가능하게 한 획기적인 발명이다.^[5] CPA 기술에 의하여 1 psec 이하의 짧은 펄스폭에 1 TW 이상의 출력을 갖는 Nd:glass 레이저와 Ti:sapphire 레이저가 비로소 가능하게 되었다. 이러한 레이저를 이용하면 플라즈마 파장 정도로 짧은 펄스폭을 가진 고출력 레이저 펄스를 만들 수 있어서 강력한 플라즈마 파동을 효율적으로 발생시킬 수 있다. 이렇게 발생시킨 초강력 전기장에 외부의 가속기를 이용하여 가속할 전자들을 입사하거나 플라즈마 내부의 전자들을 자체포획하면 전자들을 아주 짧은 거리에서도 상대론적 고에너지로 가속할 수 있게 되

는 것이다.

이렇게 레이저와 플라즈마를 이용한 차세대 가속기의 연구는 현재 미국, 영국, 프랑스, 일본 등의 여러 선진국들에서 활발히 진행되고 있다. 아래에서는 여러 가지 방식들에 대한 국내외의 연구를 간단히 소개하고자 한다.

2.1 플라즈마 맥놀이파에 의한 전자 가속

앞에서 언급한 바와 같이 플라즈마를 이용하여 기존의 가속기에 비하여 비교할 수 없이 강력한 세기의 전기장으로 하전입자들을 가속할 수 있다는 기본 아이디어는 미국 UCLA에서 나왔으며 UCLA 및 UCLA에서 배출된 과학자들이 이론 및 실험 분야에서 세계적으로 연구를 주도해 가고 있다. UCLA에서는 1980년대 초반에 이미 10.3 μm 와 10.6 μm 의 두 파장을 가진 고출력 이산화탄소 레이저로 플라즈마 맥놀이파를 만든 후에 이것을 이용하여 외부에서 입사한 전자들을 고에너지로 가속하는데 성공하였다.^[6] UCLA 그룹은 기존 가속기보다 약 100배나 강력한 세기의 전기장으로 전자들을 가속하여 30 MeV의 에너지를 얻음으로써 Tajima와 Dawson의 아이디어를 실험적으로 검증했을 뿐만 아니라 레이저와 플라즈마를 이용한 차세대 가속기의 가능성을 확인시켜 주었다. 현재 UCLA 그룹은 외부의 photocathode RF gun에서 생성된 전자빔을 플라즈마 맥놀이파에 입사시켜 3 GV/m의 가속 전기장에 의하여 전자의 에너지를 100 MeV로 증가시키고 에너지 분산을 5% 이내로 줄여서 좋은 품질의 전자빔을 얻는데 연구를 집중하고 있다.

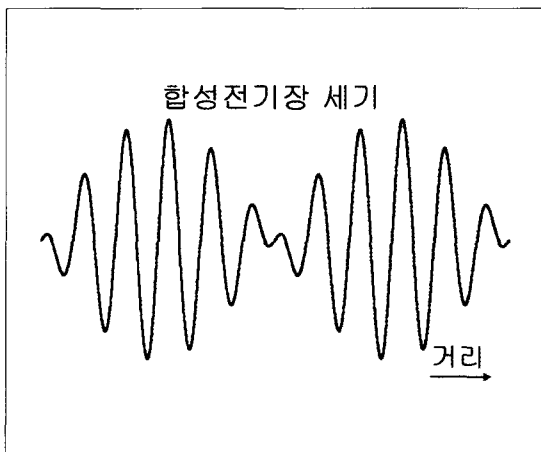


그림 1. 파장이 조금 다른 두 파동에 의한 맥놀이파의 예

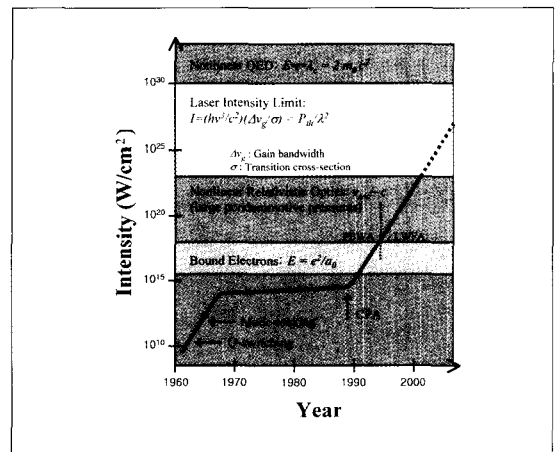


그림 2. 레이저 출력 증가 곡선



일본에서도 이 분야의 연구는 활발하게 수행하고 있다. 이미 1992년에 이산화탄소 레이저를 이용하여 플라즈마 맥놀이파를 만들고 이를 이용하여 전자들을 10 MeV의 에너지로 가속하였다. 유럽에서도 이 분야의 연구는 활발한 상황이며 프랑스가 대표적이다. 프랑스에서는 1.05 μm 와 1.06 μm 의 네이디뮴 유리 레이저로 플라즈마 맥놀이파를 만들어 전자들을 상대론적 에너지로 가속하였다.

2.2 레이저 항적장에 의한 가속

레이저 항적장 (wake field) 가속에서는 1 psec 이하의 짧은 초강력 세기의 레이저 펄스를 이용하여 플라즈마 파동을 발생시킨다. 플라즈마 파동은 레이저 펄스폭이 플라즈마 파장과 비슷할 때 가장 효율적으로 발생된다. 이 방법은 Tajima와 Dawson이 초기에 제안한 전자가속 방법으로서 CPA 기술의 발명으로 1 psec 이하의 짧은 펄스폭을 가진 TW급 레이저가 개발되면서야 실험적인 연구가 가능해졌다. 그림 4는 TW 레이저 펄스가 플라즈마 속을 진행해 갈 때 생성되는 레이저 항적장을 보여 주는 컴퓨터 모의실험의 한 결과를 보여 주고 있다. 그림에서 검게 보이는 가속위상에 입사가속기로 외부의 전자들을 입사시켜 주면 고에너지로 가속될 수 있다. 이와 같은 방식은 이미 1995년에 일본의 KEK에서 실험적으로 증명하였다.⁷ CPA 기술을 이용한 극초단 고출력 테이블탑 레이저의 발전과 더불어 레이저 항적장을 이용한 전자 가속 방법에 대한 연구는 최근에 많은 진척을 보이고 있어서 유용한 방법으로 기대된다.

2.3 자체변조된 (Self-Modulated) 레이저 항적장에 의한 전자 가속

레이저의 펄스폭이 플라즈마 파장보다 매우 긴 경우에는 플라즈마 파동의 마디마디가 레이저의 중간 중간에 놓이게 되고 그 마디마디에서 발생하는 플라즈마와 레이저 펄스의 상호작용으로 인하여 레이저 펄스가 여러 개의 짧은 펄스들로 끊어지는 현상이 발생한다. 그 짧은 펄스들의 폭은 플라즈마 파장과 같은 길이로 주어지게 된다. 레이저가 이와 같이 여러 개의 펄스로 끊어지게 되면서 플라즈마 파동의 모양이 부드러운 곡선에서 점점 가파른 모양으로 바뀌게 되고 마침내는 플라즈마 속의 입자들이 파동을 따라가지 못하고 파동이 깨어져버리게 된다. 이때 플라즈마 내에 있던 전자들이 플라즈마 파동의 내부로 포획되어 높은 에너지로 가속되게 된다. 이러한 방법으로 전자를 가속하는 것을 자체변조 레이저 항적장 가속법 (Self-Modulated Laser Wakefield Acceleration: SM-LWFA)이라 한다.⁸ 이러한 방법을 사용하여 세계의 여러 연구그룹들에서 전자들을 상대론적 고에너지로 가속하였으며 최근에 프랑스 그룹에서는 200 MeV 정도까지 전자들을 가속시켰다는 보고를 하였다.

펄스폭이 긴 레이저를 이용한 자체변조 레이저 항적장 가속법은 플라즈마 내부에 있는 전자를 포획하고 이를 가속하므로 별도의 가속기가 필요없다. 그러나 포획된 전자들이 플라즈마 파동의 가속위상에 정확하게 입사되는 것이 아니라 플라즈마 파동이 깨어지면서 전자들이 가속위상에 무작위로 놓이기 때문에 가속되는 전자들과 감속되

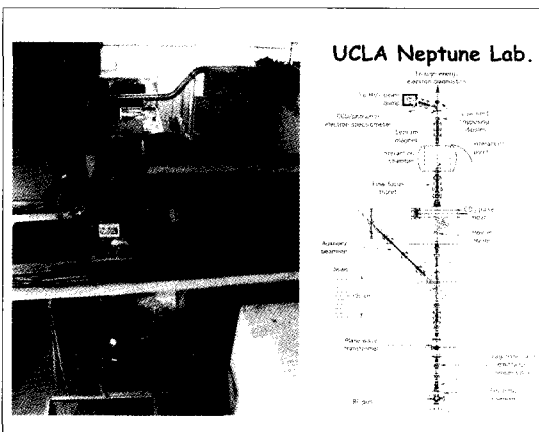


그림 3. 미국 UCLA 대학교의 플라즈마 맥놀이파 가속을 위한 이산화탄소 레이저 및 가속장치

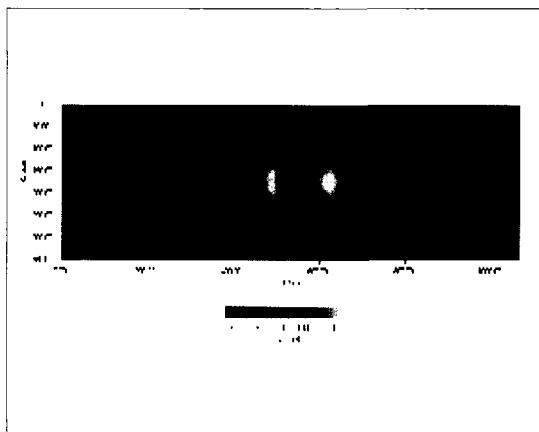


그림 4. 플라즈마 속을 진행해 가는 고출력 레이저 펄스에 의한 레이저 항적장

고출력 레이저를 이용한 입자 가속

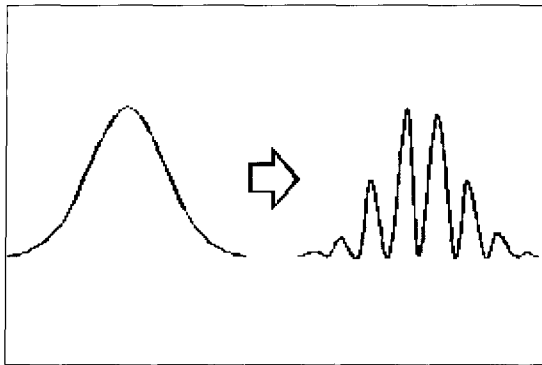


그림 5. 자체변조 과정의 레이저 펄스

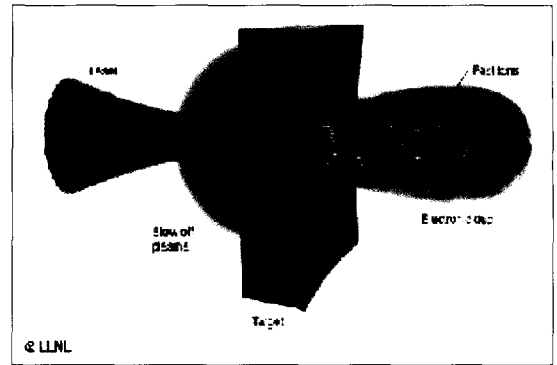


그림 6. 이온 가속의 개략도

는 전자들이 혼재하게 된다. 따라서 가속된 전자들은 100%의 에너지 분산을 갖게 되어서 좋은 품질의 전자빔을 얻을 수 없다는 단점이 있다.

3. 이온 및 광자 가속

앞서 기술된 고출력 레이저를 이용한 전자 가속과 더불어 고출력 레이저를 이용한 이온 및 광자의 가속 또한 가능하다. 이는 실험적으로, 그리고 이론적으로 밝혀졌다.¹⁹⁾

전자에 비해서 이온은 질량이 무겁기 때문에 가속이 훨씬 어렵다고 알려져 있으나, 고출력 레이저를 이용하면 비교적 쉽게 수 내지 수십 MeV에 이르는 에너지를 가지는 이온을 얻을 수 있음이 이미 실험적으로 검증되었다. 상세한 원리에 대해서는 아직도 다양한 이론이 학계에서 제기되고 있으나, 그 개략적인 원리는 다음과 같다.

그림 6에서 보이는 바와 같이 고출력 레이저를 아주 얇은 두께의 금속 물질에 쏘면 강한 레이저 파워로 인해서 순식간에 고체 상태의 금속이 플라즈마 상태로 변환되어 레이저와 상호작용을 일으키게 된다. 이때 Target의 전반부 혹은 후반부에서 전자와 이온의 분리에 의해 생기는 Coulomb force에 의해서 이온이 가속된다. 이러한 이온 가속에 관해서 그 정확한 원리를 규명하고자 하는 연구가 계속되어지고 있으며, 최근의 연구 추세는 Multilayer가 있는 경우의 이온 가속의 특성 등을 포함한다.

이온 가속과 더불어 강한 레이저 펄스를 이용한 광자 가속 또한 가능하다.¹⁴⁾ 광자 가속의 원리는 빛의 속도는 진공 중에서 항상 일정하지만 매질 속에서는 매질의 굴절률에

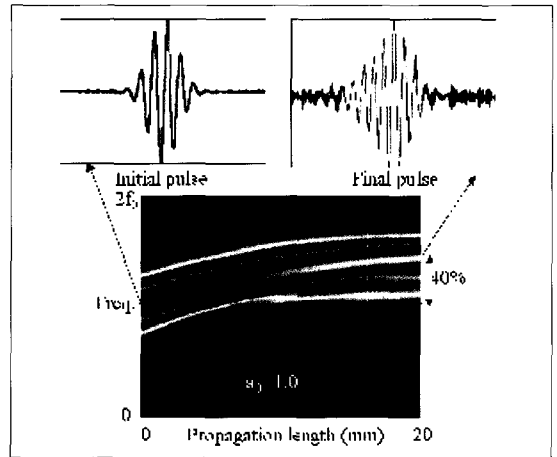


그림 7. 광자 가속의 예

따라서 달라진다는 성질을 이용한다. 플라즈마 내부에서는 빛의 군속도는 감소하고 위상 속도는 증가하게 되는데, 이 현상은 플라즈마의 밀도가 증가할수록 더욱 커진다. 만약 플라즈마의 밀도가 급속히 감소하는 부분에 레이저 펄스가 위치하게 된다면 레이저 펄스의 앞부분은 플라즈마 밀도가 작기 때문에 위상속도가 조금만 증가하고 뒷부분은 플라즈마 밀도가 크기 때문에 위상 속도가 크게 증가한다. 이와 같은 위상속도의 차이로 인해서 레이저의 파장은 짧아지게 되며 빛의 파장 변조가 가능하다.

이와 같이 빛의 파장이 짧아지면 빛의 군속도는 증가하기 때문에 이를 일러 광자 가속이라고 한다.

즉, 고출력 레이저를 플라즈마 내부에 입사시켜서 플라즈마 항적장에 의한 밀도 전이를 만들고, 이 레이저 펄스에 적당한 시간 간격을 두어서 우리가 파장을 변조하고자 하는 낮은 출력의 레이저 펄스를 적당한 위치에 입사시키

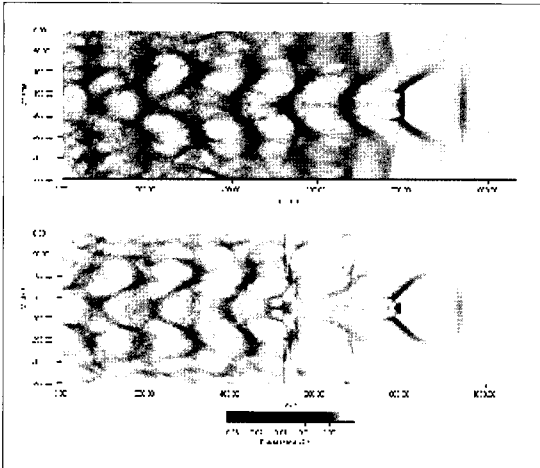
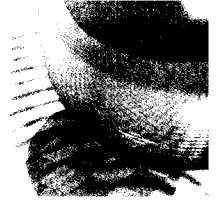


그림 8. 플라즈마 내의 전자들을 자체포획하여 고에너지로 가속하는 것을 보여 주고 있는 컴퓨터 모의실험 결과



그림 9. 한국전기연구원 플라즈마가속기연구단의 2 TW 레이저 시스템 전경

면 그림 7에서 보이는 바와 같이 진행한 거리에 따라서 거의 선형적으로 변조된 파장의 빛을 얻을 수 있다.

4. 국내의 연구 현황

위에서 살펴본 바와 같이 여러 선진국에서는 레이저와 플라즈마를 이용한 차세대 가속기 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 그 동안에 이 분야의 연구가 거의 전무하다시피 하였다. 연구 설비 면에서는 한국과학기술연구원 물리학과에 있는 TW급 티타늄 사파이어 레이저가 가장 관련이 깊다고 할 수 있으나, 이 레이저는 원자로부터 고차 조화파를 발생시켜서 결맞은 X-선 발생 연구에 주로 사용되어 왔다. 그러다가 2001년 여름 과학기술부의 창의적연구진흥사업으로 지원받는 한국전기연구원 플라즈마가속기연구단이 창단되면서 우리나라에서도 레이저와 플라즈마를 이용한 차세대 가속기 연구가 본격적으로 시작되었다.

플라즈마가속기 연구단에서 구현하고자 하는 핵심 아이디어는 레이저 펄스로 플라즈마 파동을 만들고 이 플라즈마 파동이 플라즈마 밀도가 급격히 낮아지는 밀도전이 지점을 통과하게 함으로써 플라즈마 내의 전자들을 포획하여 가속한다는 것이다 (그림 8 참조).¹¹⁰⁾ 이 방법은 그동안 세계적으로 연구되어 왔던 여러 유형의 가속방법들과는 다른 새로운 아이디어로서 이 방법을 이용하면 다른 가속

방법들에 비해 가속기의 전체적인 크기가 작고 좋은 품질의 고에너지 전자빔을 만들어 낼 수 있을 것으로 기대된다. 이 아이디어를 실험적으로 검증하기 위하여 티타늄 사파이어와 네오디뮴 유리 레이저가 융합된 출력 2 TW의 레이저 시스템을 확보하여 본격적인 연구에 들어갈 준비를 하고 있다 (그림 9 참조).

5. 맺음말

고출력 레이저와 플라즈마를 이용한 하전입자 가속에 대한 연구는 그동안 큰 진전이 있어 왔다. 그러나 차세대 가속기 기술로서 실용화를 위해서는 아직도 해결해야 할 문제점들이 몇 가지 남아 있다. 먼저, 가속할 전자들을 플라즈마 파동의 가속위상에 정확하게 입사시켜 주는 문제이다. 가속위상에 정확하게 입사시켜 주기 위해서는 1 psec 이하의 정밀성이 요구된다. 하지만, 한국전기연구원 플라즈마가속기 연구단이 제안한 자체포획법은 이러한 문제를 원천적으로 피할 수 있는 방법이라 할 수 있다. 또 다른 문제점은 가속된 하전입자의 최종 에너지가 아직 낮다는 것이다. 플라즈마 파동을 발생시켜 얻은 전기장의 세기는 기존 가속기에서 사용되고 있는 것보다 1000배 이상 큰 것이지만 하전입자가 가속되는 거리가 매우 짧기 때문에 최종에너지가 낮다. 이는 플라즈마 파동을 발생시키기 위하여 레이저 빔을 아주 작은 크기로 집속시키기 때문에 빛의

고출력 레이저를 이용한 입자 가속

회절현상에 의해 레이저 빔이 집속된 구간, 즉, 레이라이 길이의 2배 정도의 구간에서만 입자들이 가속되기 때문이다. 이를 해결하기 위해서는 집속된 강력한 세기의 레이저 빔이 먼 거리를 진행하는 동안에도 퍼지지 않게 하는 광가이딩 (optical guiding) 방법을 고안하는 것이다. 플라즈마에서는 빔의 중심에서 멀어지면서 플라즈마 밀도가 증가하는 플라즈마 채널을 만들어 주면 광가이딩이 가능하므로 가속되는 입자들의 에너지를 현저히 증가시키기 위해서는 광가이딩에 대한 연구가 많이 이루어져야 한다. 그리고 가속된 입자들이 플라즈마 파동과 위상부정합이 발생하면서 더 이상 높은 에너지로 가속되지 못하는 문제, 플라즈마 파동을 발생시키는 레이저 펄스의 에너지가 감소하는 문제, 그리고 레이저와 플라즈마의 상호작용으로 발생하는 여러 가지 불안정성 문제 등이 있다.

레이저와 플라즈마를 이용한 차세대 가속기 연구는 비교적 역사가 짧으면서도 비약적 발전을 이룩해 왔다. 기존의 가속기와 비교하여 수 천 배나 강력한 세기의 전기장으로 하전입자들을 가속할 수 있다는 것이 이미 실험적으로 검증되었다. 지난 10여 년간 고출력 레이저의 비약적인 발전으로 인하여 이제는 TW급 레이저가 실험실의 테이블 위에 올라갈 수 있게 됨으로써 이 분야의 연구는 앞으로 더욱 활성화 될 것이다. 가속구간을 늘이기 위한 광가이딩 연구가 좋은 결실을 얻어 기존 가속기 또는 그 이상의 에너지를 갖는 하전입자 빔을 발생시킬 수 있다면 현재의 거대한 가속기들은 획기적으로 작아져서 멀지 않은 장래에 테이블탑 고에너지 입자 가속기의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

[1] T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. 43, 267 (1979).
 [2] E. Esarey, P. Sprangle, J. Krall, and Antonio Ting, IEEE Trans. Plasma Sci. 24, 252 (1996).
 [3] D. Umstadter, Phys. Plasmas 8, 1774 (2001).
 [4] S. C. Wilks, J. M. Dawson, W. B. Mori, T. Katsouleas, and M. E. Jones, Phys. Rev. Lett. 62, 2600 (1989).
 [5] D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. 56, 219 (1985); P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot, G. Mourou, IEEE J. Quantum Electron. 24, 398 (1988).
 [6] C. Joshi, W. B. Mori, T. Katsouleas, J. M. Dawson, J. M. Kindel, and D. W. Forslund, Nature 311, 525 (1984); C. E. Clayton, C. Joshi, C. Darrow, and D. Umstadter, Phys. Rev. Lett. 54, 2343 (1985).
 [7] K. Nakajima, T. Kawakubo, H. Nakanishi, A. Ogata, Y. Kitagawa, R. Kdama, K. Mima, H. Shiraga, K. Suzuki, K. Yamakawa, T. Zhang, Y. Kato, D. Fisher, M. Downer, T. Tajima, Y. Sakawa, T. Shoji, N. Yugami, and Y. Nishida, Proc. AIP Conf. Advanced Accelerator Concepts P. Schoessow, Ed. New York: Ameri. Inst. Phys. 335, 145 (1995).
 [8] K. Nakajima, D. Fisher, T. Kawakubo, H. Nakanishi, A. Ogata, Y. Kato, Y. Kitagawa, R. Kodama, K. Mima, H. Shiraga, K. Suzuki, K. Yamakawa, T. Zhang, Y. Sakawa, T. Shoji, Y. Nishida, N. Yugami, M. Downer, and T. Tajima, Phys. Rev. Lett. 74, 4428 (1995).
 [9] A. Maksimchuk, S. Gu, K. Flippo, D. Umstadter, and V. Y. Bychenkov, Phys. Rev. Lett. 84, 4108 (2000).
 [10] H. Suk, N. Barov, J. B. Rosenzweig, and E. Egarey, Physical Review Letters 86, 1010 (2001); H. Suk, Journal of Applied Physics 91, 487 (2002).



현재 근무처 :
한국전기연구원 (창원) 선임연구원 재직중
최종학력 :
1998. 2. 서울대학교 물리학과 박사

1993. 2. 서울대학교 물리학과 석사
1991. 2. 서울대학교 물리학과 학사
주요 경력 :
1998. 2. ~ 현재 한국전기연구원 근무



현재 근무처 :
한국전기연구원 (창원) 선임연구원 재직중
최종학력 :
1998. 8. 포항공대 물리학과 박사

1996. 2. 포항공대 물리학과 석사
1994. 2. 서울대학교 원자핵공학과 학사
주요 경력 :
2001. 12. 1. ~ 현재 한국전기연구원 근무
2001. 6 ~ 2001. 11 포항공대 기초과학연구소 연구원
2000. 2 ~ 2001. 5 미국 UC Berkeley Post Doc. 연구원
1998. 9 ~ 2000. 1 포항공대 기초과학연구소 연구원



현재 근무처 :
한국전기연구원 선임연구원 재직중
최종학력 :
1998. 12. University of Maryland at College Park 물리학과 박사

1989. 2. 서울대학교 물리학과 석사
1986. 2. 서울대학교 물리학과 학사
주요 경력 :
2001~ 현재: 한국전기연구원 플라즈마가속기 연구단 단장
1999.1~2000.12: UCLA 물리학과 research scientist