

국제선형가속기 (ILC)

최진혁
포항가속기연구소

1. 서론

원자구조 및 핵 구조를 알기 위한 핵물리 연구에 자연 상태의 방사능 물질을 이용하다가 인위적으로 입자를 가속시키는 입자 가속기가 출현한 1930년대 이후 핵 및 입자물리의 중요한 도구로 자리 잡은 입자 가속기는 더욱 근원적인 입자를 찾아 그 에너지를 높여 갔으며 그에 따라서 가속 방식의 진화와 함께 규모도 커져왔다. 이렇게 대형화되어가는 가속기 건설과 그것을 이용한 실험에서의 정보 교환 및 국제 협력의 필요성을 느껴 1976년 당시 주요 가속기 연구소들은 ICFA (International Committee for Future Accelerator)를 구성하였으며 이후 ICFA는 가속기 기술 향상에 기여함은 물론 건설 방향 등을 결정하는 협의체로서의 역할을 하고 있다.

12년간의 실험을 끝낸 유럽핵물리연구소 (CERN)의 원주 27 km인 LEP (Large Electron Positron Collider) 와 최대 충돌 에너지가 1.8 TeV인 미국 Fermilab의 양성자 반양성자 충돌 가속기인 Tevatron 등의 대형 가속기를 비롯한 많은 가속기들이 입자물리학에서 표준모형(1)이 예측하는 입자를 발견하는 등의 좋은 성과를 거두었지만 아직 발견되지 않은 Higgs 입자의 발견 등을 위하여서는 조금 더 높은 에너지 수준에서의 실험이 가능한 가속기의 필요성이 대두되었다. 즉, 지금까지의 정밀한 입자물리 실험 데이터를 분석한 결과 Higgs 입자가 좀더 낮은 질량($< 1\text{TeV}$)을 가질 것이라는 예측이 나오고, 또 electroweak 대칭깨짐의 이해와 초대칭의 실재 여부를 가리기 위해서는 전자 양전자 충돌을 기준으로 TeV 에너지 수준에서 성과를 가질 수 있으리라는 기대를 갖게 되었다. 이러한 차세대 목적을 위한 첫 가속기는 2007년 완공을 목표로 LEP 자리에 건설 중인 LHC (Large Hadron Collider)이다.

LHC는 양성자를 14 TeV로 충돌시키고 납 (Pb) 핵을 1150 TeV로 충돌시켜 새로운 영역에서의 입자물리 실험을 실현시킬 것이다. 입자물리학계에서는 2001~2년 LHC 이후의 가속기에 대한 논의가 있었고 결론은 전자 양전자 충돌 가속기로 의견이 모아졌다. LHC로도 많은 정보를 얻을 수 있지만 전자를 0.5 TeV 이상의 영역에서 충돌시키는 가속기로 실험을 한다면 LHC로 부터의 데이터와 서로 보완적인 역할을 하여 보다 완벽한 자료를 얻을 수 있다. 예를 들어 Higgs입자의 spin은 0여야 하는데 LHC로 Higgs를 발견하고 전자 가속기로 그것의 spin을 측정하여 Higgs임을 확인하는 것이다. 하지만 질량이 작은 전자는 어느 정도 에너지를 얻은 후 양성자와는 달리 방향을 바꿀 때마다 많은 에너지를 방사광으로 잃기 때문에 TeV 에너지를 얻으려면 선형가속기를 이용하여야 한다.

2. ILC 배경

이와 같은 전자 선형가속기에 대한 계획이 유럽, 미국, 일본에서 있었으며 그 각각은 TESLA(2), NLC(3), GLC(4)라 불리었다. 이중에 TESLA는 초전도 기술에 기반하였고 NLC와 GLC는 상온기술에 기반하였기 때문에 NLC/GLC라 불리우며 공동연구가 진행되었다(예를 들어 [5]). 그러나 선형가속기를 건설하는 것은 일반적으로 같은 에너지의 원형가속기 건설 보다 비용이 훨씬 많이 들기 때문에 ICFA는 국제적으로 힘을 합쳐 1 TeV 급의 하나의 선형가속기, 즉 ILC (International Linear Collider) 건설을 추진하기로 하고 ILCSC (ILC Steering Committee)를 구성하였다. 그림 1은 여태까지의 전자 양전자 충돌 가속기의 충돌 에너지를 ILC와 비교하여 보여준다. 당시 추진 중이던 TESLA는 전자를 가속하는 방법으로 초전도 가속관을 선택하였고 NLC/GLC는

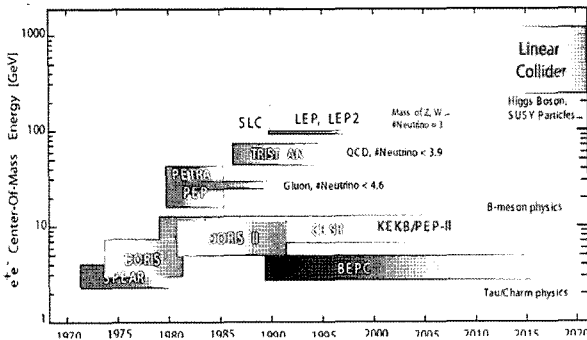


그림 1. 현재까지의 전자 양전자 충돌가속기 에너지와 ILC

상은 가속관을 선택하였으므로 ILCSC는 어느 방법으로 국제 선형 가속기를 건설하는 것이 합당할 것인가에 대한 결정이 우선 필요하였다.

이를 결정하기 위하여 2001년 2월 ILC-TRC (Technical Review Committee)에 각국에서 연구되고 있는 전자-양전자 충돌 선형가속기 기술을 평가를 위탁한 결과 두 가지 기술 모두 몇 년 안에 가속기를 건설할 수 있을 정도의 수준을 갖추었다는 결론을 얻었다. ICFA는 이에 다시 2003년 가을 ITRP (International Technology Review Panel) 구성하고 2004년 말 까지 기술 선택에 대한 권고안을 만드는 임무를 주었다.

2004년 8월 19일 미국, 유럽, 아시아에서 각 4인이 참석하여 12인으로 구성된 ITRP는 대한민국 포항에서 마지막 회의를 하고 국제 선형 가속기의 기본 기술을 초전도 고주파 (RF) 기술로 한다는 권고안을 결의하였다. 초전도 고주파 기술을 권고한 이유에 대하여서는 1. Cavity의 내경이 비교적 크고 빔 번치 사이가 길기 때문에 운전과 Feedback이 좀더 용이하며 지표면의 움직임에 덜 민감하다. 2. 단일 시스템으로 가장 비용이 많이 드는 Main Linac의 RF 시스템에 대한 실패 위험도가 상대적으로 낮다. 3. 초전도 Free Electron Laser의 건설로 많은 기술이 검증될 것이다. 4. 주요부품들에 대한 산업화가 이루어지고 있다. 5. 초전도 사용으로 전력료를 대폭 절감할 수 있다. 와 같이 설명하였다.

ITRP의 권고안이 나온 후 국제선형가속기 건설을 위한 노력은 더욱 구체적으로 동력

을 얻어 2004년 11월 13-15일 일본 KEK (고에너지연구소)에서 첫 워크숍을 갖는다 [6]. 워크숍은 가속기의 부분을 담당하는 워크그룹 (WG: Work Group) 별로 회의를 진행하여 연구 결과를 발표하고 그에 대한 토론을 진행하여 결론을 도출하였는데 1회 워크숍의 Work Group 별 담당은 다음과 같았다.

- WG1 - Overall Design
- WG2 - Main linacs
- WG3 - Injector
- WG4 - Beam Delivery
- WG5 - High Gradient Cavities

여기서 Beam Delivery란 Main Linac에서 실험 장치까지의 모든 장치를 일컫는다.

이 후 전 세계적 사업인 만큼 구심점을 갖고 조직적으로 일을 진행시키기 위하여 GDE (Global Design Effort) [7] 를 조직하여 실무적인 구심점을 만들었다. GDE 대표는 Caltech 의 연구소인 LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory)의 Barry Barish 박사가 맡았으며 Barish 박사는 다시 각 지역별로 미국에는 Gerald Dugan Cornell 대학 교수를, 일본에는 KEK의 Fumihiko Takasaki 박사를, 또 유럽에는 영국 물리학자 Brian Foster 박사를 대표로 임명하였다. GDE의 위상을 도표로 보여주면 그림 2와 같다.

ILC Organization Chart

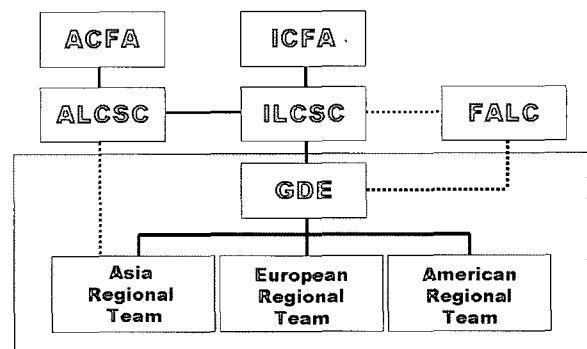


그림 2. 국제 선형가속기 가속기 관련 협회 조직도

여기서 ACFA는 Asian Committee of Future Accelerator로 ICFA의 아시아 협

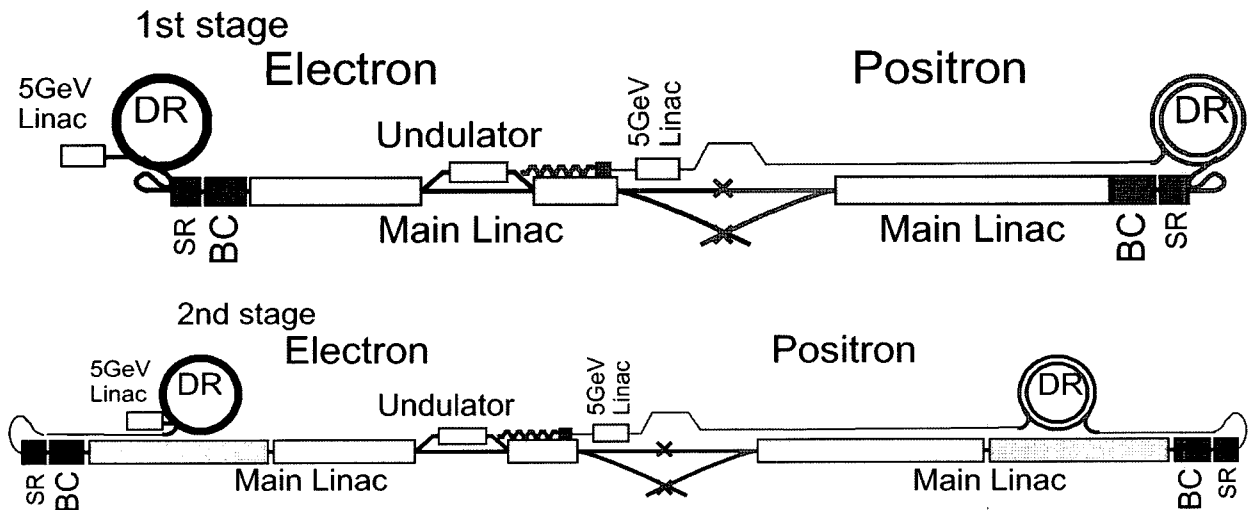


그림 3. 국제 선형가속기의 개념도

의체이고 FALC는 Funding Agencies for Linear Collider로 ILC 건설 비용에 대해 협의하고 결정하는 조직이다. GDE를 중심으로 2005년 8월 14일에서 27일까지 미국 Colorado 주 휴양지인 Snowmass에서 제 2차 ILC 워크숍을 개최하였다 [8]. 이번에는 Work Group의 성격을 좀더 명확히 정의하며 확장하였고 또 연구 개발 성격에 따르는 업무를 별도로 분담하여 6개의 Global Group (GG)을 정의하여 WG와 병행하여 ILC 사업을 진행하도록 하였다 (표 1). 그리하여 2차 워크숍에서는 실제 ILC 설계 파라미터 등을 제시하는 등 구체적인 설계 결과에 대한 토론과 요약이 있었으며 이를 토대로 BCD (Basic Configuration Design)를 2005년 말까지

정리하기로 하였다. BCD는 BC (Baseline Configuration)와 AC (Alternative Configuration)을 포함하는데 BC는 2006년 말까지의 실현 가능한 기술과 예산으로 우선 추진하는 기본설계이고 AC는 그 이후 성능 향상과 예산 절감을 줄 수 있는 기술발달 등을 염두에 두고 선택할 여지를 남겨 두는 차선택에 대한 설명이다. 이후 이탈리아 Frascati의 INFN에서 2005년 12월 7일에 열린 GDE 회합에서 BCD에 대해 일단 정리하였다 [9].

3. Baseline Configuration

ILC는 길이 약 50km의 선형충돌 가속기로 그 개념도는 그림 3과 같다. 전체 가속기는 전자 선형 가속기와 양전자 선형가속기로 구성되어 있으며 각각은 전자와 양전자 Source, Main Linac, 빔의 단면적을 줄이는 Damping Ring (DR), 빔의 길이를 줄이는 Bunch Compressor (BC), 입자의 spin을 조절하는 Spin Rotator (SR) 등으로 구성되어 있다. 전자는 직접 전자 총에서 만들어내지만 양전자는 전자를 이용하여 만들어 내야 하므로 생성 부분은 달라진다. 빔의 크기를 줄이는 것은 실험의 효율을 높이기 위하여, 즉 단위 시간당 유효충돌 횟수를 높여, 주어진 실험의 기간을 줄이는 것을 목적으로 하는 것이다.

그림 3에서 1st stage는 충돌 에너지 500 GeV 가속기로 처음 가동을 목표로 하는

표 1. Snowmass 회의에서 정의된 Work Group과 Global Group

WG1	LET (Low Emittance Transport) and Beam Dynamics
WG2	Linac Design
WG3a	Sources
WG3b	Damping Rings
WG4	Beam Delivery
WG5	Cavities and Couplers
WG6	Communications

GG1	Parameters
GG2	Instrumentation and Controls
GG3	Operations and Availability
GG4	Civil and Siting
GG5	Cost and Schedule
GG6	Physics Options

것이고 2nd stage는 최종 목표로 충돌 에너지 1 TeV이다. 가속기의 주요 파라미터는 표 2와 같다. 표에 이어서 ILC의 공식 BSD에 정의되어 있는 대로 각 구성 장치들에 대한 현재까지의 Configuration에 대해 설명하였다.

표 2. 국제 선형가속기의 주요 파라미터

충돌에너지	500GeV	1TeV
Luminosity	$2.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$2.8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
번치내입자수	2.0×10^{10}	2.0×10^{10}
번치 갯수	2,820	2,829
번치 간격	307.7 ns	307.7 ns
충돌점빔크기	655nm x 5.7nm	554nm x 3.5nm
빔 Power	11.3MW/beam	22.6MW/beam

Sources

전자 입사기로는 Ti:Sapphire drive laser를 쬐어 전자를 발생시키는 Photocathode를 이용하는 DC Gun을 사용한다. 이 전자는 2ns의 비교적 긴 번치로 뭉쳐진 다음 상온 가속장치를 이용하여 약 100 MeV로 가속된다. 이후 Main Linac에서 쓰이는 초전도 가속장치를 이용해 5 GeV까지 가속되며 이 후 Damping Ring에 입사된다. 양전자는 직접 만들어 내지는 못하며 undulator를 기반한 기술로 만들어낸다. 즉, 150 GeV로 가속된 전자를 길이 약 100m의 helical undulator에 통과시켜 만들어지는 방사광을 비교적 얇은 티타늄 합금에 충돌시켜 생기는 pair-production을 이용한다. 여기서 생긴 양전자는 전자의 경우와 마찬가지로 5 GeV로 가속시켜 Damping Ring에 입사된다.

Damping Ring

Damping Ring은 여러 가지 조건, 목표, 각 목표의 중요성, 빔 물리학적 측면, 비용 등을 고려하여 BC, AC안을 만들었다. Baseline으로는 하나의 6 km ring 이 전자를, 그리고 한 터널 안의 두개의 6 km ring 이 양전자를 Damping 하는 것이다. 그리고 Damping Wiggler는 초전도 기술에 기반한 것을 권하고 있으며 RF 장치 역시 초전도 시스템을 권하고 있으며 그 주파수는 500

MHz이다. 그 위치와 모양은 그림 3에서 볼 수 있다.

Damping Ring에서의 입자 에너지는 5GeV 정도 되어야 하며 한번에 입사되는 입자는 ion 효과 등을 고려하여 6km Ring의 반을 채우는 2800 번치로 하였다. 입사되는 빔은 위상공간에서 약 0.09 m-rad의 크기를 갖고 1%이하의 에너지퍼짐을 갖는다. Damping Ring을 나오는 빔은 번치 길이가 약 9mm가 되도록 한다.

RTML

Damping Ring에서 나온 입자가 Main Linac에 들어가기까지의 구간을 Ring To Main Linac 즉 RTML이라고 부른다. 이 구간은 Damping Ring에서 나오는 입자를 잘 받아들여 모으고 입자의 궤적과 스핀방향을 조절하며 또 여러 특성들을 측정하여 Damping Ring에서 나오는 입자를 분석하고 Main Linac 입사에 적합한 특성을 갖도록 하는데 현 설계에서 전체 길이는 2015m이다. 그리고 여기에 Bunch Compressor가 위치해 있으며 Main Linac으로 조건을 잘 맞추어 입자를 입사시켜 준다.

그림 3에서 SR로 표현되어 있는 Spin Rotator는 스핀방향을 실험목적에 맞추도록 해주는 장치로 4개의 강력한 Solenoid 자석으로 되어 있다.

Damping Ring에서 나오는 입자 번치 길이는 6 mm 정도인데 선형가속기로 가속되기 전 정상 운전 시 요구되는 번치의 길이는 0.3 mm 정도이다. 이는 단일 단계의 Compression으로 달성할 수 있으나 짧은 번치 모드 (0.15mm) 운전 등을 고려하여야 하므로 Bunch Compressor는 1.4 km의 2 단계가 권고되었다.

여기서 1단계는 400m로 32개의 9-cell 초전도 Cavity가 4개의 Cryomodule에 위치한 RF section과 wiggler등이 위치한다. 2 단계는 1 km로 456개의 9-cell 초전도 Cavity가 57개의 Cryomodule에 위치한 RF section이 있고 1단계와 동일하지만 자장이 약간 약한 wiggler가 있다.

Main Linac

전자가속을 위하여서는 ITRP의 권고대로 초전도 방식을 사용한다. 500 GeV stage에

서의 가속 Baseline은 TESLA-type Cavity를 이용한 31.5 (35) 즉, 시험 값 35MV/m 이상 (평균 37 MV/m), 실제 운전 31.5 MV/m이다. 이 stage에서의 Alternative Configuration과 1 TeV stage에서의 Baseline은 는 36 (40)으로 Low-Loss (LL) 또는 Re-Entrant (RE) 형태의 super-structure이다. 이 Baseline에 의하면 1 TeV 가속기의 Main Linac의 길이는 약 41 km이어서 전체 터널 길이는 50 km 정도 될 것이다.

모듈레이터는 Pulse Transformer가 Baseline으로 선택되었으며 여타 Marx [10], switch, HV converter modulator 들은 AC 목록에 올려져 있다. Klystron은 독일 DESY 연구소 [11]에서 경험이 많은 10MW MBK (Multi Beam Klystron) 가 추천되었으며 IOT (Inductive Output Tube) [12] 등이 Alternative 로 등록되었다. 하나의 Klystron은 3개의 초전도 Cryomodule에 에너지를 공급하는데 각 Cryomodule에는 8개의 Cavity가 들어있다. 500 GeV 운전시 이러한 RF unit이 328개 필요하다.

선형가속기의 직선거리만 수십 km에 달하기 때문에 지구표면의 곡률을 고려하여 어떻게 건설하느냐를 결정하여야 한다. 그 방법에는 다음 그림과 같이 curved, kinked, laser-straight 방법이 있을 수 있다.

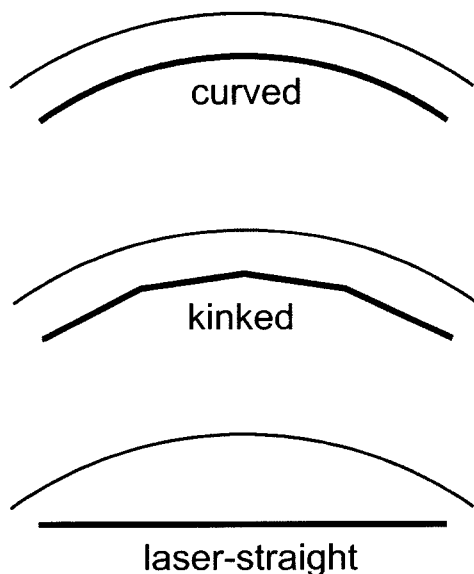


그림 4. 선형가속기의 지표면에 대한 세 가지 배치 방법

이 중 어느 방식을 택하는 가는 최종적으로 확정되었다고는 할 수 없고 Beam Dynamics 측면 등 좀 더 연구가 있어야 하겠지만 현 단계에서는 site 선정에 유리한 curved 방법이 Baseline 으로 선택되었다. Cryogenic 시스템에 추가 비용이 요구되는 laser-straight와 bending section에 추가 비용이 요구되는 kinked는 Alternative로 계속 연구될 것이다.

그리고 터널을 하나로 할 것인가 두개의 터널 형태로 건설할 것인가도 논의되었는데 유지보수의 편의성 등이 유리한 두개의 터널 안이 현재는 Baseline으로 선택되었다. (그림 5)

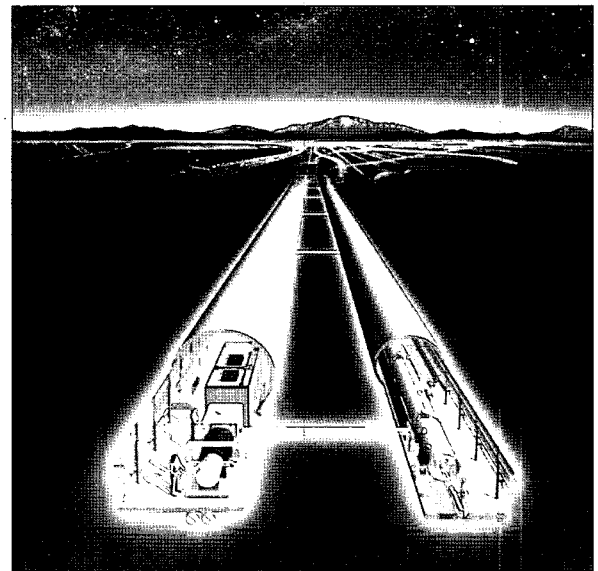


그림 5. 두개의 터널로 건설되었을 때의 선형 가속기 모습

Beam Delivery

Beam Delivery는 Main Linac의 출구에서 실험 장치까지의 모든 구성요소들, Collimators, machine protection, final focus, machine detector interface, beam dumps를 포함한다. 이 장치들은 실험을 위한 최적 환경을 만들어 주는 역할을 해야 한다. 실험을 위한 충돌 장치(IR: Interaction Region)는 2개가 권고 되었으며 각각은 20 mrad과 2mrad의 충돌 각도를 가지게 되어 독립적인 실험을 수행하게 된다. 지금까지 각 부문별로 2005년까지 BCD에 정리되어 있는 사항들을 간단히 살펴보았다. 이들이 결정되었다고는 할 수 없고 지금도 계

속되는 여러 회의들과 네트워크를 통해 담당자들이 수정, 보완을 계속하고 있다. 예를 들어, 특히 Damping Ring의 경우 많은 사람들이 현재 Baseline으로 결정된 안에 만족하지 않고 있고 500GeV에서 1TeV로 업그레이드하는 방안에 대해서도 현재는 500GeV에 필요한 터널공사를 하고 설치를 하며 차 후 확장한다는 것이 Baseline이지만 미리 모든 터널 공사를 하고 1TeV의 부분으로 500GeV를 건설해야 한다는 안도 상당히 호응을 얻고 있다.

2006년부터 작성되는 문서를 RDR (Reference Design Report)이라고 부르는데 여타 내용은 BCD와 대동소이 하지만 예산에 대한 항목이 추가되는 보고서로 각 부분의 설계에 대한 예산을 추정하여 보고서에 첨가하여 2006년 11월까지 완료를 목표로 하고 있다. 그러므로 BCD에 관한 부분은 2006년 3월 인도 벵갈로에서 열리는 GDE 회의 시 결정된 이후 예산에 큰 영향을 주는 변화는 없는 것을 원칙으로 하고 있다.

4. 전망과 참여

국제선형가속기는 그 규모도 엄청나고 예산은 50억불이상 소요될 것으로 예상되며 요구되는 기술도 첨단이어서 결코 순탄한 사업이라고 볼 수는 없다. 더구나 부지가 아직 선정되지 않았으며 예산 배정도 정해지지 않았으므로 건설에 대한 청사진이 준비된 상태가 아니다. 미국, 일본, 유럽이 모두 유치를 희망하고 있으며 자국에 유치되지 않을 경우 그 정부가 배정된 투자를 기꺼이 할 것인가도 확실하게 보장할 수는 없다.

그러나 전 세계 입자 물리학자들은 ILC가 앞으로 나아가야 할 길이라는 것을 확신하고 있으며 가속기 건설 역시 GDE를 중심으로 모든 지식과 노력을 집중하고 있다. 현재 FALC에서 각국 정부의 위임을 받았다고 볼 수 있는 대표들이 경비에 대해 협상하고 있으며 부지 선정도 약간의 논란은 예상되지만 객관적으로 진행되리라고 낙관되고 있다.

이러한 모든 면을 고려하여 GDE는 그림 6과 같은 ILC 건설 일정을 설정을 해 놓고 있다. 아직 건설 완료 시점은 GDC 출범 직후 2015년 경이라고 발표된 적이 있었지만 추진

상황을 보고 결정한다는 의미에서 명확한 시기를 그림에서는 표시하지 않고 있다. 참고로 그림 6에서 CLIC은 CERN에서 추진 중인 차세대 선형가속기이다.

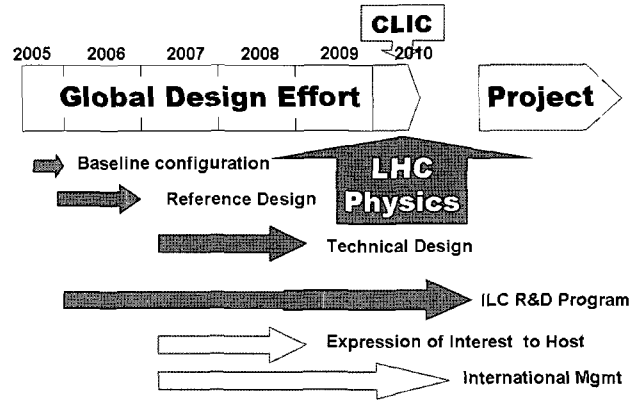


그림 6. ILC 추진에 대한 GDE의 계획과 일정

국제 선형가속기에 대한 국내의 관심도 많아 이미 포항가속기연구소, 경북대학교 등에서 참여하고 있으며 특히 포항가속기연구소는 가속기 건설에 대한 참여 가능성을 타진하고 있다. 초전도 RF 장치에 필요한 9-cell Cavity가 2만 개 이상에 이르기 때문에 그 제작과 검증에 여러 국가의 참여가 필요할 것이고 여기에 필요한 기술력을 갖추어 놓으면 어느 정도의 국내 배정은 어렵지 않을 것이다. 포항 가속기 연구소는 현재의 방사광 가속기의 범 안정화를 위하여 이미 초전도 Cavity 제작 사업을 하고 있으며 진행 중인 4세대 방사광가속기에 응용하는 것도 고려하고 있으므로 적절한 투자가 되리라고 생각한다.

이를 위해서 현재 첨단 기술인 초전도 기술을 보유한 일본 KEK와 기술 교류를 추진 중에 있으며 미국 Fermilab, 독일 DESY와의 기술교류도 계획하고 있다. 초전도 관련 장치뿐만 아니라 가속기 건설과 운영으로 보유하게 된 Klystron, Modulator 관련 기술, 또 진단 제어 기술 등도 충분히 ILC 건설에 적용할 수 있으므로 더욱 적극적으로 참여하고자 한다.

참고문헌

저자이력

- [1] S.L.Glashow, Nucl. Phys, 22, 579 (1961); S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 19, 1264 (1967); A. Salam, in Proceedings of the Eighth Nobel Symposium on Elementary Particle Theory, Relativistic Groups and Analyticity, Stockholm, Sweden, 1968, edited by N. Savartholm (1968); M. Gell-Mann, Acta Phys. Austr. Suppl. IX, 733 (1972)
- [2] <http://tesla.desy.de/TTFHome.html>;
<http://www.desy.de/pr-info/desyhome/html/presse/hginfos/tesla/was.en.html>;
R. Brinkmann, "TESLA Linear Collider Design and R&D Status," Proceedings of 20th International Linac Conference 11 (2000)
- [3] <http://www-project.slac.stanford.edu/lc/nlc.html>
- [4] <http://lcdev.kek.jp/GLC/overview/>;
<http://lcdev.kek.jp/RMdraft/>
- [5] S. Döbert, C. Adolphsen, "High Gradient Performance of NLC/GLC X-Band Accelerating Structures," Proceedings of PAC2005 372 (2005)
- [6] <http://lcdev.kek.jp/ILCWS/>
- [7] <http://www.linearcollider.org/>
- [8] <http://alcp2005.colorado.edu:8080/alcp2005/>
- [9] http://www.linearcollider.org/wiki/doku.php?id=bcd:bcd_home
- [10] A. Jeffrey, et al., "Solid-State Marx Bank Modulator for the Next Linear Collider," Proceedings of EPAC2004, 1783 (2004)
- [11] <http://www.desy.de/>
- [12] H. Bohlen, Y. Li, R. Tornoe, "IOT RF Power Sources for Pulsed and CW Linacs," Proceedings of LINAC2004, 574 (2004)



최진혁(崔辰赫)
1977-1981년 서울대학교 물리학과, 1981-1983년 서울대학교 자연대학원 물리학과 석사, 1985-1988년 서울대학교 자연대학 물리학과 박사, 현재 포항가속기연구소 책임연구원