

한·불입자물리연구소 구축 및 활용 연구

조기현 · 황순욱*

한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨팅본부, 대전 305-806

(2009년 5월 22일 받음)

한·불입자물리연구소는 한국과 프랑스사이에 입자물리와 e-Science 분야사이의 프레임 워크를 제 공하기 위한 국제 공동연구소이다. 이 프로젝트에는 ALICE(A Large Ion Collider Experiment) 실험, CDF(Collider Detector at Fermilab) 실험, ILC(International Linear Collider) 전자회로, ILC 칼 로리미터, 바이오인포메틱스 (Bioinformatics)와 그리드 컴퓨팅이 있다. 그 목적은 한·불간의 사이버 인프라를 활용한 연구 환경을 구축하며, 그 활용 연구 기회를 강화하는 것이다. 한·불입자물리공동연 구소의 사이버인프라를 구축하여 고에너지물리 분야에 활용한 연구 결과를 소개한다.

PACS numbers: 28.85.+c, 07.05.Bx, 14.40.Nd

Keywords: 그리드, 이사이언스, 사이버인프라, B 물리, 양성자가속기

I. INTRODUCTION

입자물리 실험은 여러 나라의 여러 기관에서 모인 수 백 명 내지 수천 명의 연구 인력이 공동으로 연구를 수행 하는 동시에, 실험시설인 가속기, 검출기, 데이터 처리 센 터도 하나의 나라에서 단독으로 짓지 못하고 여러 나라 가 국제 협력을 통하여 비용, 노동력, 기술, 장비를 공동 으로 부담하여 건설한다. 요컨대 입자물리학의 실험 분 야는 처음부터 끝까지 국제협력을 바탕으로 연구를 수행 한다. 한·불입자물리공동연구소(FKPPL, France-Korea Particle Physics Laboratory)는 한-프랑스간 입자물리와 e-Science 분야 [1] 연구자들이 초고속연구망을 통해 지 역적으로 분산된 슈퍼컴퓨터 등의 첨단 장비, 연구인력, 대용량 데이터를 실시간으로 공유하며 공동연구를 할 수 있는 국내 최초의 사이버 공동연구소로서, 시공을 초월 한 첨단 연구인 e-Science 연구 환경이 국제적으로 구현 되었다는데 큰 의의가 있다. 담벼락 없는 연구소를 모토 로 하는 LIA(Laboratoire International Associe) 협정을 통해 고에너지물리 연구에 관한 한·불 공동연구 네트워 크를 형성함으로 양국간의 시너지를 극대화한다.

한국에서는 KISTI를 비롯하여 한국원자력의학원, 포 향가속기연구소, 이화여자대학교, 성균관대학교, 강릉 대학교, 전남대학교가 참여하고, 프랑스에서는 프랑스 국립과학연구소(CNRS)를 비롯하여 산하 핵입자물리

Table 1. The project list and the leaders of project in FKPPL (France-Korea Particle Physics Laboratory).

Programs	France (IN2P3)	Korea (KISTI)
Co-directors	Vincent Breton (LPC-Clermont Ferrand)	Ok-Hwan Byeon (KISTI)
Grid Computing	Dominique Boutigny (CC-IN2P3)	Soonwook Hwang (KISTI)
ILC Detector R&D	Jean-Claude Brient (LLR-Ecole Polytechnique)	Jongman Yang (Ewha University)
Bioinformatics	Vincent Breton (LPC-Clermont Ferrand)	Doman Kim (Chonnam National Univ.)
ILC Electronics	De La Taille Christophe (LAL-IN2P3)	Jongseo Chai (Sungkyunkwan Univ.)
ALICE	Pascal Dupieux (LPC-Clermont Ferrand)	Yongwook Baek (Kangnung National Univ.)
CDF	Aurore Savoy-Navarro LPNHE / IN2P3-CNRS	Kihyeon Cho (KISTI)

연구소(IN2P3), 에콜폴리테크닉(The Ecole Polytech- nique), 블레즈파스칼대학교(The Universite Blaise Pas- cal Clermont Ferrand 2), 파리11대학교(The Universite Paris Sud 11)가 FKPPL LIA 파트너로 참여하고 있다. Table 1은 한·불입자물리연구소와 관련된 프로젝트의 목 록과 각 책임자들이다.

*E-mail: hwang@kisti.re.kr; Fax: +82-2-869-0789

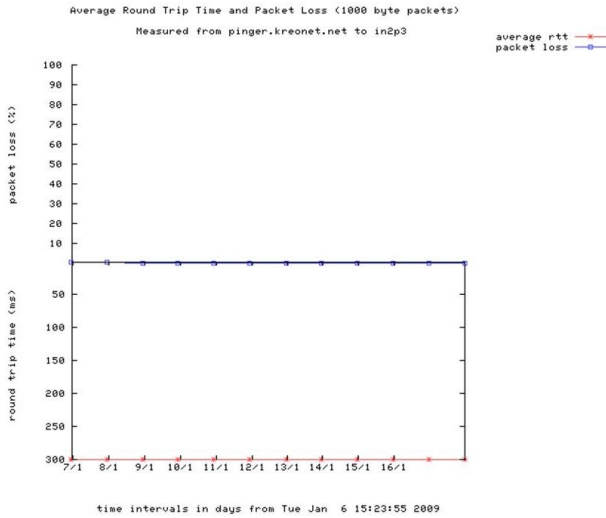


Fig. 1. The current status of network between KISTI in Korea and IN2P3 in France (Jan. 7 ~ Jan. 18, 2009). There is no packet loss and RTT (Round Trip Time) is about 300 ms, which shows that the network between KISTI and IN2P3 seems to be quite stable.

그 중 KISTI(Korea Institute of Science and Technology Information)와 관련 있는 ALICE(A Large Ion Collider Experiment) 실험, CDF(Collider Detector at Fermilab) 실험, Grid computing 등의 고에너지물리 분야의 사이버인프라 연구 환경 구축과 그 활용 연구를 소개한다.

II. ALICE EXPERIMENT

유럽입자물리연구소(CERN)에서는 7×7 TeV의 양성자 강입자충돌 가속기를 이용하여 ALICE 실험을 수행하고 있다. ALICE 실험은 핵 간의 충돌로 인해 우주 초기의 빅뱅 상태를 만들어 쿼크-글루온 플라즈마 상태에서 강한 상호작용에 관한 물리적 현상을 연구하는 것이다. 이러한 도구로서 ALICE 실험에서 하드론(hadron), 광자, 그리고 경입자를 측정한다. 그 중에서 Quarkonia로부터 두 개의 뮤온을 측정하여 J/ψ , ψ' , $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$ 등을 측정한다. 이러한 것들을 측정하기 위하여 뮤온 검출기가 필요로 한다. 한국 그룹은 프랑스 그룹과 함께 뮤온 검출기를 연구하고 있다.

또한 ALICE 실험 연구 수행 시 생산되는 데이터는 연간 1.5 PB에 해당된다. 이러한 방대한 양의 데이터는 기존의 컴퓨팅 개념으로는 처리할 수 없으므로 LCG(LHC Computing Grid)팜을 구축 활용하고 있으며, 데이터 처리의 계층적 구조(Tier0, 1, 2)의 개념으로 데이터를 처리하고 있다. 프랑스의 IN2P3에서는 LCG팜을 활용한 ALICE Tier1 센터를, 한국은 KISTI에서 ALICE

Tier2 데이터 센터를 구축하여 데이터를 처리하고 있으며, 프랑스의 Tier1에서 처리된 실제데이터는 KISTI의 Tier2로 전송이 된다. KISTI에서 생산된 모의시뮬 데이터는 프랑스의 Tier1 센터에 저장된다. Fig. 1은 한국과 프랑스간의 파일 전송에 따른 packet loss와 RTT(Round Trip Time)을 보여준다.

KISTI에 구축된 ALICE Tier2 센터는 이론적 예측을 검증할 수 있는 시뮬레이션 환경을 국내 실험 연구자들에게 제공한다. 또한 ALICE 실험에서 생산된 데이터를 보관 및 전송, 운영, 처리하는 ALICE 컴퓨팅 참여를 통해서, 데이터 집약형 응용연구를 위한 데이터 팜 구축, 운영 및 필요한 기술을 개발하고 있다.

III. CDF EXPERIMENT

미국 페르미연구소 CDF 실험은 미국, 프랑스, 이탈리아, 일본, 영국, 독일, 한국, 대만 등 15개국의 약 625명의 물리학자들이 참여하는 대규모의 국제적인 가속기 실험이다. 한국에서는 경북대, 서울대, 성균관대, KISTI, 전북대, 전남대 등에서 30여 명의 연구자가 참여하고 있다. 이 실험은 2001년에 시작되어 2010년까지 수행될 예정인데, 그 목적은 각각 1×1 TeV 에너지로 가속시킨 양성자와 반양성자들을 정면 충돌시켜 새로운 입자와 물리현상들을 탐구하는 것이다. FKPPL LIA 프레임워크 안에서 KISTI는 프랑스 그룹과 CDF 그리드 컴퓨팅과 B physics를 연구한다.

먼저 2009년 5월 현재까지 Run II에서 모은 CDF 실험 데이터량은 약 6 fb^{-1} 이다. 이것은 90억 개의 사건수에 해당되며, 그 사이즈는 수 PB이다. 이러한 방대한 양을 처리하기 위하여 컴퓨팅 그리드 기술이 필요하다. CDF 실험에는 여러 가지 컴퓨팅 프로세싱 방법이 활용되고 있다. KISTI는 KISTI LCG 팜의 자원을 활용하여, Condor Glide-in 기법을 이용하여 Globus 기반의 데이터 팜을 구축하였다. 이렇게 구축된 데이터 팜의 장점은 아주 유연하다는 것이다 [2]. 한편 IN2P3는 gLite 기반의 LCG 팜을 활용하여 WMS(Workload Management System)을 구현하였다. 이러한 시스템의 구현은 LHC 실험이 시작되기 전에 CDF 실험을 위한 CPU를 확보할 수 있으며, 전 세계 고에너지물리 연구가 그리드 팜을 활용하는 추세에 부합된다. Table 2는 전세계 CDF 그리드 팜 중의 한국과 프랑스의 CDF 그리드 팜을 비교 분석하였다.

이러한 그리드 팜을 활용하여 B physics를 연구한다. 입자물리학에서 지금까지의 발견을 집대성한 것을 표준 모형(Standard Model)이라고 부르는데, 한국 그룹과 프

Table 2. The comparison of CDF Farms in Korea and in France.

	Farm Name	Head Node	Work Node	Grid Middleware	Method
France	European CDF Analysis Farm	CNAF (Italia)	IN2P3 (France) etc	LCG	WMS (Workload Management System)
Korea	Pacific CDF Analysis Farm	Academia Sinica (Taiwan)	KISTI (Korea) etc	LCG, OSG	Condor over Globus

랑스 그룹은 아직까지 잘 맞고 있는 표준 모형을 정말 검증한다. 특히 표준모형에서는 B 중간자의 붕괴에서 CP (Charge-Parity Conjugate) 대칭성이 깨지는 현상을 실험하고, 이를 통해 쿼크 섞임의 행렬, 즉 CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) 행렬 [3]을 측정하며 희귀 붕괴의 탐색을 통하여 표준 모형을 벗어나는 새로운 물리 법칙인 BSM (Beyond Standard Model)의 존재여부에 많은 관심이 있다. B 중간자는 현재 일본 KEK Belle 실험, 미국 SLAC의 BaBar 실험 및 미국 페르미연구소 CDF 실험에서 생산이 된다. 미국 페르미연구소 CDF 실험에서 생산되는 B 중간자의 생산 단면적(cross-section)이 $150 \mu\text{b}$ 으로 Belle과 BaBar 실험의 1 nb 에 비하여 15만 배 크며, 질량 중심 (Center of Mass) 에너지가 2 TeV 이기 때문에 s 쿼크와 c 쿼크를 포함한 B 중간자와 바리온을 만들어냄으로 미국 Tevatron 실험을 “Full Service B factory”라 부른다. B 중간자의 희귀 붕괴를 연구하는데 보다 유리한 조건을 제공한다. 특히 B_s 는 물질과 반물질의 미스터리를 탐험하는 좋은 도구가 된다. CDF 실험에서는 B_s 의 물질-반물질 진동주기를 측정하였으며 [4], 프랑스 그룹은 B -수명의 차이와 CP 붕괴의 위상차를 측정하여 표준모형과의 차이를 탐색하였다 [5]. $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ 는 CP violation 연구와 관련하여 아주 중요하다. 프랑스 그룹은 $\sin 2\beta_S$ 를 측정함으로써 CP even과 CP odd를 측정한다 [5]. 한국 그룹은 붕괴 메커니즘을 알기 위하여 $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ 붕괴와 유사한 $B_s \rightarrow \psi(2S)\phi$ 를 연구한다. CDF 실험은 B_s 혼합 측정 연구결과를 선도하고 있으며, 혼합주기를 결정하였다. 그러나 아직도 $\Delta\Gamma_S$ 와 위상차 측정 등과 같은 연구들이 남아있으며, 또한 시간 의존 측정 등이 수행되어야 한다. 그러므로 충분한 데이터와 아주 정밀한 측정만 BSM을 볼 수 있다. 이를 위하여 한국 그룹과 프랑스 그룹은 dimuon 트랙과 두개의 트랙의 공통된 데이터 파일을 사용하여 연구를 수행한다.

IV. GRID COMPUTING

FKPPL LIA 프레임워크안에서 한국의 KISTI 컴퓨팅 센터와 프랑스의 IN2P3 컴퓨팅 센터(CC-IN2P3)간의 그

리드 컴퓨팅 분야에 있어서 공동 연구를 추진해 오고 있다. KISTI는 지난 2002년부터 2008년까지 국가 그리드 사업인 K*Grid 사업을 선도하였고 2005년부터 현재까지 e-Science 사업을 추진해오고 있음으로써 그리드 컴퓨팅 기술과 그리드 응용 기술 개발에 경험이 풍부하다 [6]. 프랑스의 IN2P3 컴퓨팅 센터는 LHC 실험 4개 (CMS, ATLAS ALICE, LHCb) 모두의 Tier1 센터 역할을 하고 있는 유럽에서 제일 규모가 큰 Tier1 센터 중의 하나로서 LCG 팜 운영에 풍부한 경험을 가지고 있고, 또한 그리드 모니터링 기술력도 보유하고 있다.

KISTI와 CC-IN2P3간의 그리드 컴퓨팅 프로젝트의 첫 번째 협력으로서 “FKPPL VO(Virtual Organization)”라고 불리는 FKPPL 그리드 테스트베드를 구축하여 2008년 10월에 FKPPL VO 서비스를 공식적으로 시작하였다. FKPPL VO 팜의 원래 목적은 FKPPL LIA 참여 연구자들을 대상으로 응용 연구 수행에 필요한 컴퓨팅 및 스토리지 자원 및 그리드 포팅 기술 지원에 있다. 현재는 FKPPL VO 팜의 사용은 FKPPL LIA 참여 연구자들로 국한되어 있지 않고 한국과 프랑스의 연구자이면 누구든지 FKPPL VO 그리드 팜의 계정을 신청할 수 있도록 되어 있다. FKPPL VO 그리드 팜은 KISTI와 CC-IN2P3 센터에서 제공하는 자원으로 구축되어 있다. 현재 FKPPL VO 자원의 규모는 컴퓨팅 자원은 최대 약 5000 CPU까지 가용하고, 저장 장치는 약 3 TB 정도이다.

FKPPL VO 데이터 팜은 유럽의 EGEE 프로젝트에서 개발한 gLite 그리드 미들웨어를 기반으로 구축되어 있다. 서비스 노드로서 UI (User Interface), VOMS (Virtual Organization Membership Service), WMS (Workload Management Service), CE (Computing Element), SE (Storage Element)가 KISTI와 CC-IN2P3 컴퓨팅 센터에 설치되어 있고 서비스를 제공하고 있는 중이다. UI는 그리드 사용자가 실제로 로그인하여서 그리드 작업을 실행할 수 있도록 하는 서비스이다. VOMS는 사용자의 특정 VO의 멤버십을 관리해 주는 서비스이다. 사용자가 FKPPL VO 자원을 접근하기 위해서는 먼저 FKPPL VO 멤버십에 가입이 되어 있고, VOMS에 사용자 정보

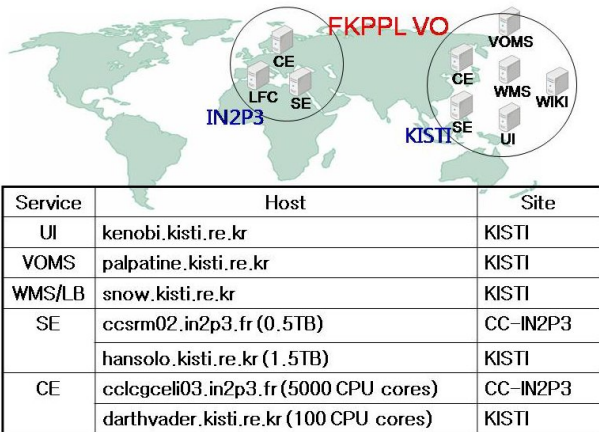


Fig. 2. The overview of the FKPPL VO (Virtual Organization) Farm.

가 등록되어 있어야 한다. WMS는 RB (Resource Broker)라고도 불리는데 사용자의 그리드 작업을 실제 작업을 실행할 WN (Worker Node) 노드를 자동적으로 찾아서 작업을 실행시키는 서비스를 제공한다. 따라서 사용자는 그리드 작업을 실행할 때 특정 워크 노드를 지정할 필요 없이 WMS가 적합한 그리드 자원을 찾아서 작업을 실행시켜준다. CE는 그리드 컴퓨팅 사이트의 작업 큐 서비스를 하며 WN노드에 작업을 분배하는 서비스를 제공한다. SE는 그리드 상에 파일을 저장할 수 있는 저장 장치 서비스를 제공한다.

FKPPL VO 그리드 작업 노드인 WN는 현재에는 CC-IN2P3 컴퓨팅 센터에만 구축되어 있고 서비스 중이다. CC-IN2P3의 최대 5000 CPU 코어를 FKPPL VO 데이터 팜의 WN 노드로서 활용할 수 있게 구축되어 있지만 실제로는 다른 VO 팜들과 CPU 코어를 공유하도록 되어 있기 때문에 실제로는 5000 CPU 코어를 FKPPL VO 그리드 사용자가 전용으로 활용하기는 쉽지 않다. 향후에 KISTI 컴퓨팅 센터에도 CPU 128 코어 규모로 FKPPL VO 팜 전용 WN를 설치할 예정이고 현재 우선 CPU 64 코어 규모의 WN 노드로 구축 중에 있다.

V. RESULTS

FKPPL VO 팜을 활용한 대표적인 응용으로서 국립암센터에서 양성자 가속기를 이용하여 암 치료를 위해 개발한 GTR2.com이라 불리는 Geant4 시뮬레이션 코드가 있다. GTR2.com 코드는 노즐의 각도 등의 노즐 Configuration을 기술한 매크로 파일을 입력으로 받아서 양성자 빔의 선량 분포를 3D 히스토그램을 ROOT 파일로 출력해주는 Geant4 모의 시뮬 코드이다(Fig. 3 참

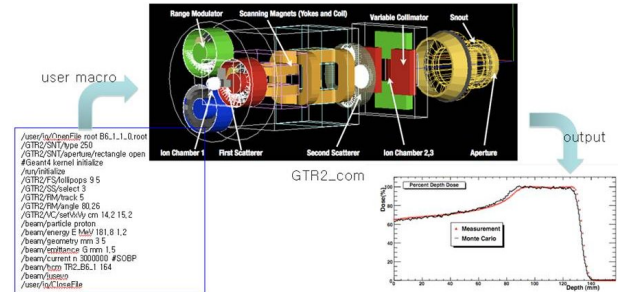


Fig. 3. The scheme of GTR2.com simulation for proton accelerator using Geant4.

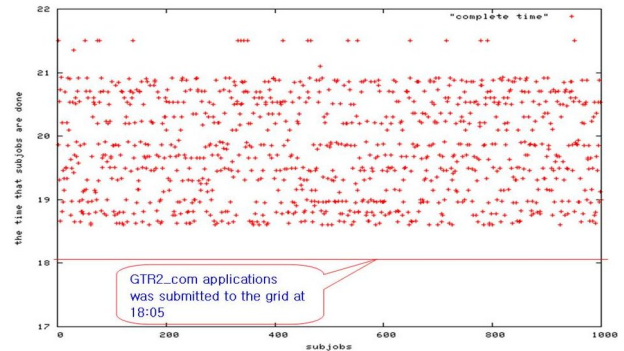


Fig. 4. The result of the execution of 1000 GTR2.com simulation jobs on the FKPPL VO Farm.

조). 국립암센터의 Geant4 응용은 수 많은 다른 파일을 입력으로 같은 코드로 실행하는 전형적인 HTC (High Throughput Computing) 응용으로서 FKPPL VO 팜과 같이 그리드 상에 실행하기에 적합하다. GTR2.com 코드의 실행 시간은 약 5분 정도이다. 모의 시뮬을 하여야 할 입력 파일이 1000개가 있을 경우 CPU 하나만으로 실행할 경우 5000분, 3일도 더 걸리는 작업이다. 10000개의 입력 매크로 파일의 경우에는 한 달도 더 걸리는 작업이다.

국립암센터의 경우에 자체 대규모 컴퓨팅 장비가 없으므로 이처럼 대규모 Geant4 모의시뮬은 할 수 없으며, 그 동안 소규모의 모의시뮬만 수행하고 있는 실정이었다. 위의 Fig. 4에서 보는 것처럼 1000개의 GTR2.com 코드를 FKPPL VO 팜을 활용하여 수행할 경우 약 3시간 만에 1000개 모든 작업을 마칠 수 있었다. 재미있는 현상은 FKPPL VO 팜에 1000개 모든 작업의 제출이 완료된 시간이 18:05인데 실제적으로 18:40 무렵부터 작업 실행을 마치기 시작하여 최종적으로 21:55에 모든 작업이 끝나는 것을 볼 수 있었다. 이처럼 5분 밖에 안 걸리는 작업이 제출한지 거의 35분 이후부터 작업 실행을 마치기 시작하는 것은 그리드의 오버헤드 때문이다. FKPPL VO 팜에서 작업을 실행하려면 일단 FKPPL VO의 UI 노드에 로그인해서 작업을 제출해야 한다. UI에서 제출

된 작업은 일단 FKPL VO의 WMS로 전달되고 WMS가 작업을 실행하기 제일 적합한 CE를 먼저 찾고 그렇게 찾아진 CE에 그 작업을 제출한다. 이렇게 CE에 제출된 작업은 해당 CE의 작업 큐에서 대기하고 있게 되고 해당 CE의 스케줄러에 의해서 실제 WN로 보내져서 실행될 때까지 기다리고 있어야 한다. 이처럼 어쩔 수 없는 그리드 오버헤드 때문에 FKPL VO에 제출된 첫 작업이 실행을 끝마치는데 30분이 소요되었지만 대규모 그리드 자원 덕분에 그리드 오버헤드에도 불구하고 총 실행 시간을 획기적으로 단축시킬 수 있었다.

클러스터와는 달리 그리드 상에서는 작업을 제출한 곳에서 작업실행이 되는 것이 아니라 지리적으로 떨어져 있는 원격 컴퓨팅 자원에서 작업이 실행되기 때문에 실제 작업이 실행되는 원격 컴퓨팅 자원에 실행에 필요한 라이브러리 등이 설치가 되어있지 않는 경우에는 작업 실행이 아예 안되거나 실행이 되더라도 실행 도중에 중단될 경우가 많다. 어떤 그리드 사이트에서는 잘 실행되는 작업이 다른 그리드 사이트에서는 실행이 되지 않는 경우가 많다. 이와 같이 클러스터에서 실행되는 응용프로그램을 그리드 상에서 실행되게 하는 작업을 그리드 포팅이라고 한다. GTR2.com 코드도 원래는 클러스터 응용 프로그램으로 개발했기 때문에 FKPL VO 그리드 상에서 실행시키기 위해서 그리드 포팅 작업이 필요했다. FKPL VO 그리드 포팅 작업의 한 예로 GTR2.com 코드는 ROOT 라이브러리를 호출하도록 되어있다. IN2P3의 WN노드에서 GTR2.com 코드는 실행 도중에 ROOT 라이브러리를 호출하는 부분에서 ROOT 라이브러리를 찾지 못하기 때문에 작업실행이 실패하였다. 그러나, CERN의 AFS 상에 설치된 ROOT 라이브러리가 그리드의 WN 노드에서 실행 도중 동적 연결(dynamic linkage)이 가능하다는 사실을 나중에 알게 되어 GTR2.com의 환경변수를

“/afs/cern.ch/sw/lcg/release/ROOT/5.20.00/slc4_ia32_gcc34/root” 라고 지정함으로써 이 문제를 해결하였다.

VI. CONCLUSION

한국과 프랑스는 사이버인프라 위에서 공동연구를 수행하는 한·불입자물리연구소를 구축하였다. ALICE 실험, CDF 실험에서 활용하여 고에너지물리 연구를 수행하고 있으며, 그리드 컴퓨팅 분야의 FKPL VO를 구축하여 입자물리 분야에서 수행한 연구결과는 기존의 연구 방법보다 탁월한 효율을 가져다 줄을 보여 준다.

감사의 글

한국암센터의 신정욱씨에게 FKPL VO 팜 활용 관련 감사 드린다.

참고 문헌

- [1] K. Cho, J. Korean Phys. Soc. **53**, 1187 (2008).
- [2] I. Sffligoi, Comp. Phys. Comm. **177**, 235 (2007).
- [3] M. Kobayashi and T. Maskawa, Progress in Theoretical Physics **49**, 652 (1973).
- [4] A. Abulencia *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 242003 (2006).
- [5] T. Aaltonen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 161802 (2008).
- [6] K. Cho, Comp. Phys. Comm. **177**, 247 (2007).

High-energy Physics Based on the FKPPL (France-Korea Particle Physics Laboratory)

Kihyeon CHO and Soonwook HWANG*

Supercomputing Center, KISTI (Korea Institute of Science and Technology Information), Daejeon 305-806

(Received 22 May 2009)

The FKPPL (France-Korea Particle Physics Laboratory) is an International Associated Laboratory that provides a framework to develop collaborations between Korean and French laboratories in the field of particle physics and e-science. The project includes ALICE (A Large Ion Collider Experiment), CDF (Collider Detector at Fermilab), ILC (International Linear Collider) Electronics, ILC Calorimeter, Bioinformatics and Grid Computing. Its goal is to strengthen the existing initiatives and to stir-up new opportunities using the cyber infrastructure in France and Korea. We present the current activities on high-energy physics at KISTI (Korea Institute of Science and Technology Information) in Korea and IN2P3 (National Institute of Nuclear Physics and Particle Physics) in France based on the FKPPL.

PACS numbers: 28.85.+c, 07.05.Bx, 14.40.Nd

Keywords: Grid, e-Science, Cyberinfrastructure, B physics, Proton accelerator

*E-mail: hwang@kisti.re.kr; Fax: +82-2-869-0789