

제 17 권 제 1 호

ISSN 2288-050X

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

2020년 12월

우주소립자연연구소

INSTITUTE FOR UNIVERSE AND ELEMENTARY PARTICLES

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

우주소립자연연구소 연구원 (2020-2021)

소 장	문동호(전남대)	Dong Ho Moon (Chonnam National University, Gwangju)
참여교수	김재률(전남대)	Jae Yool Kim (Chonnam National University, Gwangju)
	이강석(전남대)	Kang Seog Lee (Chonnam National University, Gwangju)
	임인택(전남대)	In Taek Lim (Chonnam National University, Gwangju)
	이재식(전남대)	Jae Sik Lee (Chonnam National University, Gwangju)
	주경광(전남대)	Kyung Kwang Joo (Chonnam National University, Gwangju)
	연구원	박주빈(전남대)
신창동(전남대)		Chang Dong Shin (Chonnam National University, Gwangju)
김현철(전남대)		Hyun Chul Kim (Chonnam National University, Gwangju)

우주소립자 연구지 논문 투고 안내

- 본 연구지는 매년 12월 27일자로 발행되고 있습니다.
- 본 연구지의 논문 투고는 본 연구소 홈페이지의 논문 투고 게시판을 이용하거나 전자우편 (dhmoon@chonnam.ac.kr)을 통해 할 수 있습니다.
- 논문작성에 관한 상세한 사항은 우주소립자 연구소 홈페이지의 논문 투고 규정을 참조하시기 바랍니다.
- 투고한 논문에 대한 기타 사항은 우주소립자 연구소로 문의하시기 바랍니다.

(61186) 광주광역시 북구 용봉로 77 (용봉동)
전남대학교 자연과학대학 4호관 우주소립자연연구소
전화 : 062-530-3354

Website : <http://iuep.jnu.ac.kr>

제 17 권 제 1 호

ISSN 2288-050X

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

2020년 12월

우주소립자연연구소

INSTITUTE FOR UNIVERSE AND ELEMENTARY PARTICLES

목 차

Cross-Section Study for W boson in pp collision at $\sqrt{s} = 8.16$ TeV	Ryeong Gyoon Park	01
Slow Control and Motioning programming for JSNS ²	Piljun Gwak	15

Cross-section Study for W boson in pp collision at $\sqrt{s} = 8.16$ TeV

Ryeong Gyoon Park

Department of Physics, Chonnam National University, Gwangju 61186

LHC group experimentally measured the differential cross section of the W boson in the pp collision and PbPb collision at the various collision energies. Also, LHC group measured the data in pPb collision at $\sqrt{s} = 8.16$ TeV to investigate the CNM effects. To calculate the nuclear modification factor R_{pPb} , it is necessary to the cross section of the W boson in pp collision at the same collision energy. We extrapolated the differential cross section in the transverse momentum of the W boson and in the absolute pseudorapidity of the decayed muon from the W boson with a power-law function to fit to data at CMS and ATLAS experiments. And we modified the acceptance of each experiment by using PYTHIA monte-carlo. As comparing the extrapolated results and experimental data, the results successfully predict the cross section of W boson at $\sqrt{s} = 8.16$ TeV. So, we can conclude that these extrapolated results will be helpful in investigating the CNM effect by providing the cross section in pp collision to measure the R_{pPb} at $\sqrt{s} = 8.16$ TeV.

.

Keyword : Particle physics, Quark-Gluon-Plasma, W boson, Cross-section

투고일자 : 2020. 12. 06

심사일자 : 2020. 12. 15

확정일자 : 2020. 12. 23

1. 서론

극도로 높은 온도와 에너지 밀도 상태일 때 생성되는 QCD 물질은 초기 우주의 상태라고 알려진 쿼크와 글루온이 분리된 상태라고 알려져 있다. 이 상태를 쿼크-글루온-플라즈마(Quark-Gluon-Plasma, QGP) 상태라고 한다[1, 2]. QGP 상태를 이해하기 위해, 대형 강입자 가속기(Large Hadron Collider, LHC) 그룹에서는 여러 충돌에너지에 대해 PbPb 충돌과 pp 충돌 같은 실험들을 실행해왔다.

QGP 상태의 증거로서 제트 쿼칭 현상이 있다. 충돌 초기 단계에서 생성된 강입자는 AA 충돌에 의해 생성된 QCD 물질에서 분리되며, 강입자의 구성 요소인 파톤은 QGP 상태에서의 물질을 통과 할 때, 글루온 방사선에 의해 에너지를 잃는다. 그렇기 때문에 최종 단계에서 강입자는 제트가 줄어든 상태로 나타난다[3-6].

이러한 제트 쿼칭 현상과 같은 QGP 효과는 아래처럼 정의한 핵 수정 인자(Nuclear Modification factor) $R_{AA(pA)}$ 로 정량화 할 수 있다.

$$R_{AA(pA)} = \frac{1}{\langle N_{\text{충돌}} \rangle} \frac{\sigma_{AA(pA)}}{\sigma_{pp}} \quad (1)$$

여기서 $\langle N_{\text{충돌}} \rangle$ 은 핵자-핵자 충돌의 평균 충돌 횟수이고, $\sigma_{AA}, \sigma_{pA}, \sigma_{pp}$ 는 각각 AA, pA, pp 충돌에서 생성된 입자의 생성율이다. 이 때, R_{AA} 가 1일 경우, AA 충돌에서 입자의 생성율은 pp 충돌에서의 생성율과 동일하다. 하지만 만약 R_{AA} 가 1이 아니라면, 그것은 QGP의 영향 때문이라고 생각할 수 있다. LHC 그룹의 실험 결과에 따르면, 강입자의 R_{AA} 값은 횡방향 모멘텀(p_T)의 함수로서 약 0.2 ~ 0.5이다[4-6].

이러한 에너지 감소 현상은 QGP 뿐만이 아니라, 충돌 핵자로서 핵 안의 양성자와 중성자의 차이로 인해 파톤 분포 구조가 달라지는 것처럼 핵 효과 자체만으로도 일어날 수 있다. 이를 핵 파톤 분포 함수(Nuclear Parton Distribution Function, nPDF)라고 한다[7]. 글루온의 분포는 낮은 x 원도우에서 포화되고(Shadowing effect), 높은 x 원도우에서 강화된다(Anti-shadowing effect). 또한 핵의 다중 산란이나 코무버 깨짐은 강입자의 생성을 변화시킬 수 있다. 이 모든 효과를 냉핵물질(Cold Nuclear Matter, CNM) 효과라고 한다. QGP 효과를 제대로 이해하기 위해서는 AA 충돌 결과에 대해 CNM 효과에 대한 영향을 구별하는 것이 중요하다. 이것은 핵 효과만 일어날 것이라고 생각되는 pA 충돌 실험을 통해 조사할 수 있다. 또 다른 방법으론, 광자나 W 보손, Z 보손과 같은 중이온 충돌에서 강력에 의해 영향을 받지 않는 입자들로 초기 상태 정보를 전달받는 것으로 연구할 수 있다.

CMS와 ATLAS 실험에서 다양한 충돌 에너지에서 W 보손의 포괄적 및 차등적 산란단면적을 pp 충돌과 pPb 충돌에 대해 측정했다. 또한 LHC 그룹은 CNM 효과에 대한 연구를 위해 $\sqrt{s} = 8.16$ TeV에서의 pPb 충돌에 대한 데이터도 발표했다. R_{pA} 를 계산하려면 같은 충돌 에너지에서 식 (1)의 분모인 pp 충돌에 대한 산란단면적이 필요하지만, 아직 그런 실험은 실행되지 않았다.

그렇기 때문에 이 연구에서는 LHC 그룹에서 기존에 발표된 $W \rightarrow \mu\nu$ 채널의 실험 결과를 통해 $\sqrt{s} = 8.16$ TeV에서의 W 보존의 포함 산란단면적과 p_T 에 대한 차등적 산란단면적, 그리고 W 보존에서 붕괴된 뮤온의 절대 유사신속도에 대한 차등적 산란단면적을 추론하여 제공하는 것을 목표로 한다.

\sqrt{s} (TeV)	Expt.	p_T^μ (GeV/c)	$ \eta^\mu $	MET (GeV/c)	σ_{diff}
7	CMS	25	2.1	0	p_T
8	ATLAS	20	2.4	25	p_T
5.02	ATLAS	25	2.5	25	$ \eta^\mu $
7	ATLAS	20	2.4	25	$ \eta^\mu $
8	ATLAS	25	2.4	25	$ \eta^\mu $

표 1. 각 실험에 대한 검출기 수용 조건.

2. 수용치

산란단면적을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{N_{\text{생성}}}{L} = \frac{N_{\text{검출}}}{\text{수용치} \times \text{복원 효율} \times L} \quad (2)$$

여기서 수용치는 최종적으로 생성된 입자에 대해 검출기가 검출할 수 있는 비율이고, 복원 효율은 검출된 데이터로부터 복원해낼 수 있는 입자의 비율이다. 또한 L은 단위 시간 당 단위 면적에 입사해오는 입자의 개수이다.

이 식에서 수용치와 복원 효율은 검출기로부터 측정된 데이터를 통해서만 계산할 수 있다. 하지만 CMS와 ATLAS가 제공하는 차등적 산란단면적은 모두 다른 기하학적 및 운동학적 검출기 수용 조건을 갖는 기준 산란단면적이다. 그 수용 조건은 표 1과 같다. 그렇기 때문에 모든 검출기 공간에 대한 수용치를 비교하려면 수용 조건에 따라 수정해야 한다.

이 연구에서는 이 수용치를 계산하기 위해 PYTHIA 6.4 그룹이 제공하는 $W \rightarrow \mu\nu$ 채널의 백만 개 이벤트를 사용하였다. 그 계산 결과는 그림 1에서 제시되었으며, 이는 $\sqrt{s} = 8.16$ TeV에서 기준 산란단면적을 계산할 때, 최종 수정 시에 적용될 것이다.

3. 데이터세트

여기서 수용치는 최종적으로 생성된 입자에 대해 검출기가 검출할 수 있는 비율이고, 복원 효율은 검출된 데이터로부터 복원해낼 수 있는 입자의 비율이다. 또한 L은 단위 시간 당 단위

면적에 입사해오는 입자의 개수이다.

연구를 위한 데이터로서 $\sqrt{s} = 8.16$ TeV 에서 포괄적 산란단면적을 계산하고, 멱법칙함수가 데이터의 함수를 잘 설명하는지 블라인드 테스트로 검증하기 위해, CMS의 2.76 TeV[8], 5.02 TeV[9], 7 TeV[10], 8 TeV[11], 13 TeV[12] 실험의 데이터셋이 사용되었다. 횡방향 모멘텀에 대한 차등적 산란단면적을 계산하기 위해서 D0의 1.8 TeV[13], ATLAS의 7 TeV[14], CMS의 8 TeV[15] 실험의 데이터가 사용되었고, W 보존에서 붕괴된 뮤온의 절대 유사신속도에 차등적 산란단면적을 계산하기 위해 CMS의 5.02 TeV[16], 7 TeV[17], 8 TeV[18] 실험의 데이터가 사용되었다.

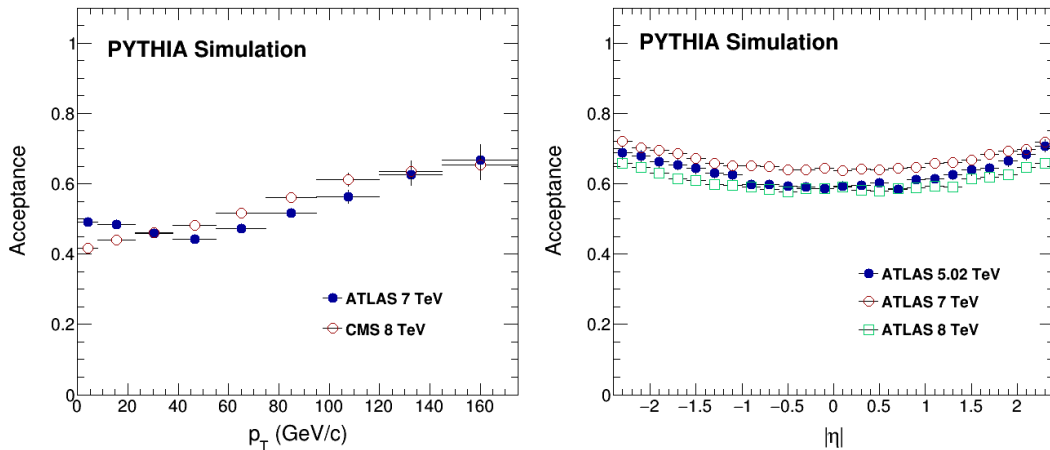


그림 1. PYTHIA 시뮬레이션을 이용하여 계산된 p_T 에 대한 검출기 수용치(왼쪽), 절대 유사신속도에 대한 검출기 수용치(오른쪽).

4. W 보존의 포괄적 산란단면적

참고문헌 [19]로부터 Z 보존의 산란단면적에 대한 데이터는 멱법칙함수로 잘 설명할 수 있다는 것이 확인되었다. 하지만 확증을 위해 W 보존에 대해서도 확인이 필요하다. 그래서 표 2에 요약한 LHC 그룹의 여러 충돌 에너지 실험에 대한 포괄적 산란단면적을 사용하여 외삽 기법의 신뢰성을 다시 검증했다.

이 절에서는 멱법칙함수가 최적의 피팅 함수인지 검증하기 위해 블라인드 테스트를 실시했다. 처음에는 그림 2의 왼쪽 패널에서 검은 점으로 표시된 CMS 2.76 TeV, 5.02 TeV, 8 TeV, 13 TeV 실험의 포괄적 산란단면적 데이터를 사용하여 피팅하였다. 이 데이터를 통해 멱법칙함수가 최적의 피팅 함수라는 것을 확인할 수 있었다. 그에 대한 매개 변수는 표 3에서 확인할 수 있다. 다음으로 이 함수를 통해 왼쪽 패널의 파란색 삼각형으로 표현된 7 TeV의 산란단면적을 외삽으로 계산해 파란색 십자가로 표현된 CMS 7 TeV 실험 데이터와 비교하였다. 그 결과 7.34% 내에서 일치하는 것을 확인하였다.

Expt.	\sqrt{s} (TeV)	$Br \times \sigma$ [nb]	
CMS	2.76	3.86 ± 0.18	데이터
CMS	5.02	7.23 ± 0.04	데이터
CMS	7	10.31 ± 0.42	데이터
CMS	7	10.34 ± 0.76	외삽
CMS	8.16	12.17 ± 0.78	외삽 (CMS 2.76 TeV-8TeV- 13TeV)
CMS	8	11.79 ± 0.59	데이터
CMS	8	11.92 ± 0.84	외삽
CMS	8.16	12.17 ± 0.85	외삽 (CMS 2.76 TeV-7TeV- 13TeV)
CMS	13	19.95 ± 0.52	데이터

표 2. W 보존의 포괄적 산란단면적에 대한 각 실험 데이터와 외삽 결과

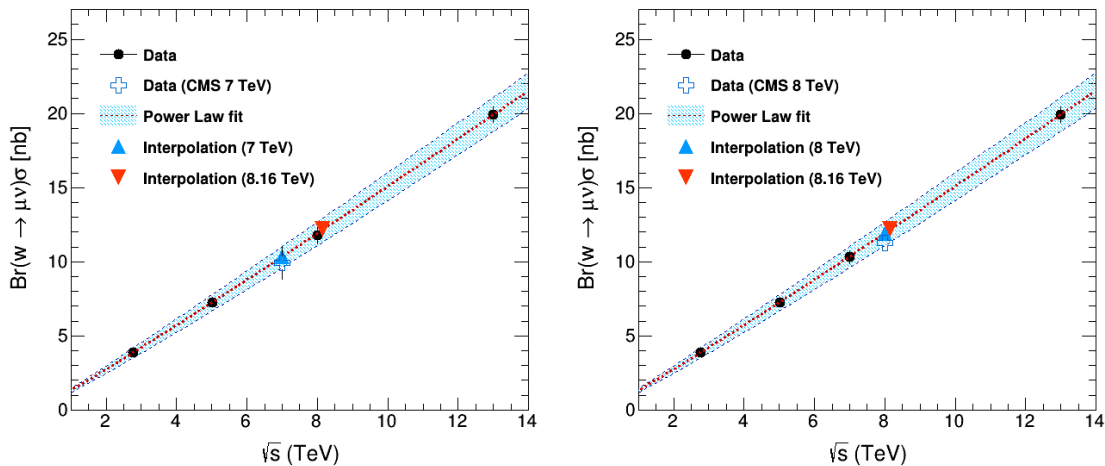


그림 2. W 보존의 포괄적 산란단면적 피팅 결과. 검은색 점은 각각 CMS 2.76 TeV, 5.02 TeV, 7 TeV, 8 TeV, 13 TeV 실험의 포괄적 산란단면적 데이터이고, 파란색 정삼각형은 왼쪽 패널에서는 7 TeV, 오른쪽 패널에서는 8 TeV에서 외삽한 결과이다. 파란색 십자가는 각각에 대한 실험 데이터이며, 빨간색 역삼각형은 8.16 TeV에서 외삽한 멱법칙함수로 계산한 결과이다.

또한 오른쪽 패널에서는 CMS 2.76 TeV, 5.02 TeV, 7 TeV, 13 TeV 실험 데이터를 사용하여 8 TeV에 대해 동일한 절차를 반복하여 계산하였다. 그 결과 7.05% 내에서 일치함을 확인하였다. 이를 통해 최적의 피팅 함수로서 멱법칙함수가 적절하다고 판단하여 $\sqrt{s} = 8.16$ TeV에서의 포괄적 산란단면적을 외삽한 값은 12.17 ± 0.85 로 계산되었다. 이 값은 두 값의 평균값이고, 최대 편차를 최대 오차로 정의하였다.

p_T bins (GeV/c)	Parameter A	Parameter b
0.0 - 8.0	137.820 \pm 24.049	2.207 \pm 0.189
8.0 - 23.0	26.071 \pm 5.446	2.961 \pm 0.224
23.0 - 38.0	5.288 \pm 1.031	3.491 \pm 0.221
38.0 - 55.0	1.570 \pm 0.425	3.704 \pm 0.291
55.0 - 75.0	0.476 \pm 0.278	3.868 \pm 0.607
75.0 - 95.0	0.140 \pm 0.084	4.180 \pm 0.628
95.0 - 120.0	0.040 \pm 0.024	4.555 \pm 0.622
120.0 - 145.0	0.013 \pm 0.012	4.767 \pm 0.974
145.0 - 175.0	0.005 \pm 0.008	4.890 \pm 1.688

표 3. W 보존의 횡방향 모멘텀에 따른 산란단면적의 외삽에 대한 멱법칙함수의 피팅 매개변수.

5. $\sqrt{s} = 8.16$ TeV에서 W 보존의 횡방향 모멘텀에 대한 차등적 산란단면적

이 절에서는 W 보존의 횡방향 모멘텀에 대한 차등적 산란단면적에 대하여 분석한 결과를 기술한다. 횡방향 모멘텀에 대한 산란단면적은 9개 빈인 0 - 8, 8 - 23, 23 - 38, 38 - 55, 55 - 75, 75 - 95, 95 - 120, 120 - 145, 145- 175 GeV/c으로 나뉘 계산된다. 계산된 p_T 빈에 대한 피팅 결과는 그림 3에서 보여준다. 파란색 점선은 표 4에서 나열된 매개변수 세트에 나타낸 피팅 함수이다. 검은색 점은 각각 D0 1.8 TeV 실험과 ATLAS 7 TeV 실험의 산란단면적 데이터이고, 녹색 다이아몬드는 8.16 TeV에서 외삽한 결과이다. 그에 대한 결과는 표 4에서 수치화 되어 보여준다. 계통적 불확정도를 계산하기 위해서 선형함수와 지수함수를 사용하였고, 그 결과가 그림 4에 나와 있다. 여기에서 멱법칙함수와 최대 편차를 계통적 불확정도로 간주한다. 그림 5의 왼쪽 패널에서는 그림 3과 그림 4의 8.16 TeV에 대한 차등적 산란단면적의 외삽한 결과를 합쳐 보여준다. 피팅 결과가 적절한지 확인하기 위해 $\sqrt{s} = 8$ TeV에서의 데이터와 외삽한 결과를 비교하는 블라인드 테스트를 실시했다. 그림 5의 오른쪽 패널이 각 p_T 빈에 대한 $\sqrt{s} = 8$ TeV에서의 차등적 산란단면적을 모두 합쳐 데이터와 외삽한 결과를 비교한 그림이다. 파란색 점은 데이터이고, 파란 밴드 영역은 외삽한 결과와 그에 대한 계통적 불확정도를 나타낸다. 이 결과로부터 이 두 값은 22.3%의 오차 범위 내에서 일치함을 보였다.

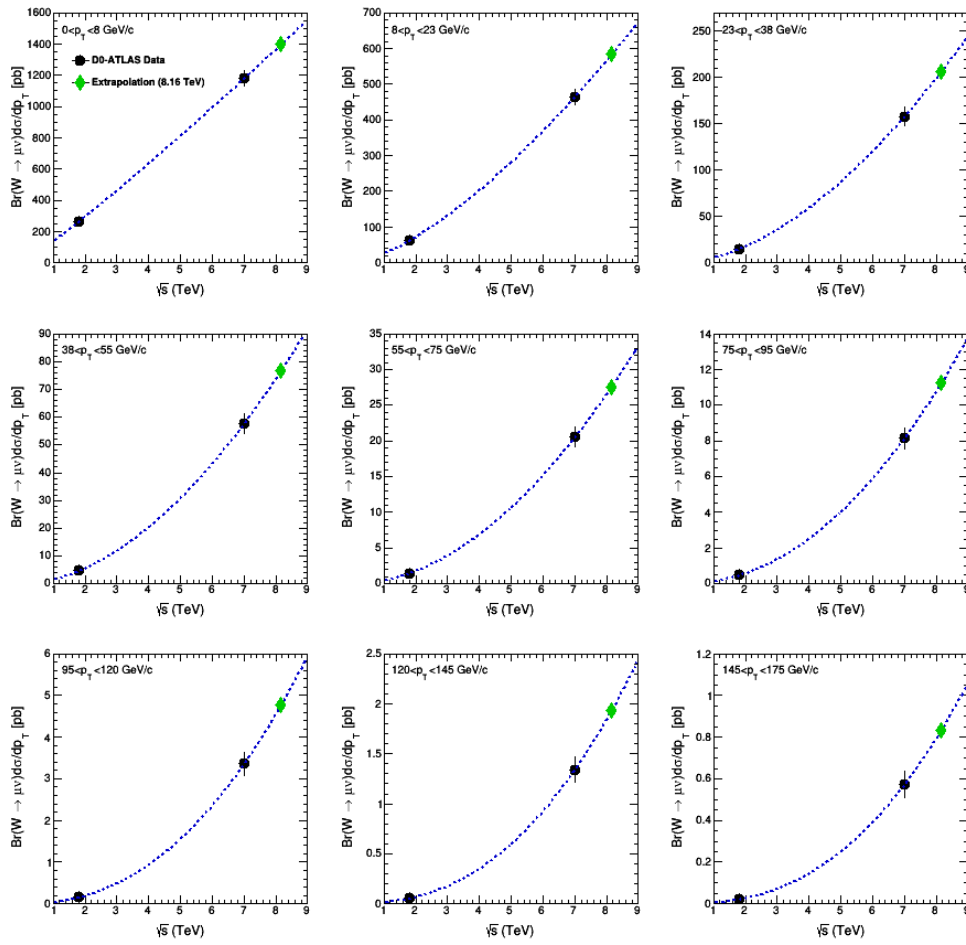


그림 3. 각 p_T 빈에 따른 W 보손의 외삽된 산란단면적. 검은색 점은 각각 D0 1.8 TeV, ATLAS 7 TeV 실험의 산란단면적 데이터이고, 녹색 다이아몬드는 8.16 TeV에서 외삽한 결과이다.

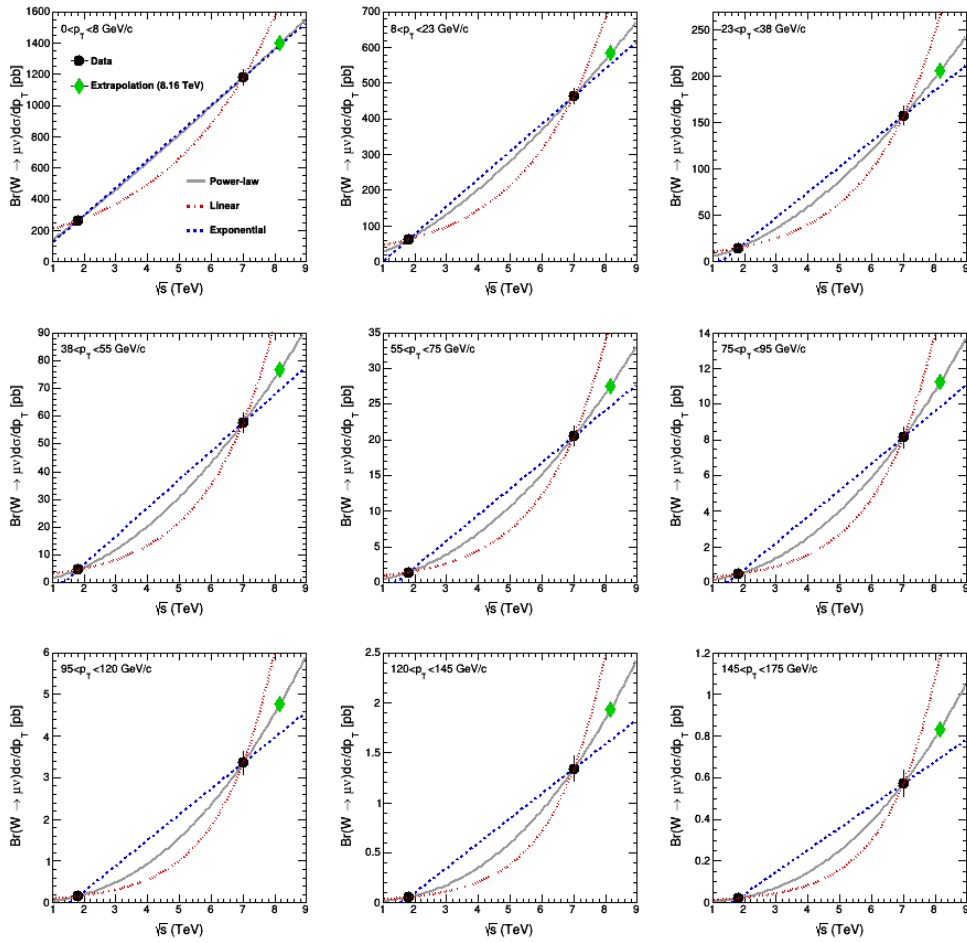


그림 4. 각 p_T 빈에 따른 W 보존의 산란단면적에 대한 계통적 불확정도 연구. 각각 검은색 선은 멱법칙 함수로, 빨간색 점선은 지수함수로, 파란색 점선은 선형함수로 피팅한 결과이다.

p_T bins (GeV/c)	외삽된 산란단면적 (pb)
0.0 - 8.0	1396.700 ± 250.610
8.0 - 23.0	583.556 ± 144.736
23.0 - 38.0	206.438 ± 61.628
38.0 - 55.0	76.596 ± 24.458
55.0 - 75.0	27.611 ± 9.267
75.0 - 95.0	11.238 ± 4.127
95.0 - 120.0	4.762 ± 1.934
120.0 - 145.0	1.934 ± 0.829
145.0 - 175.0	0.834 ± 0.368

표 4. 8.16 TeV에서 외삽한 각 p_T 빈에 따른 W 보존의 차등적 산란단면적

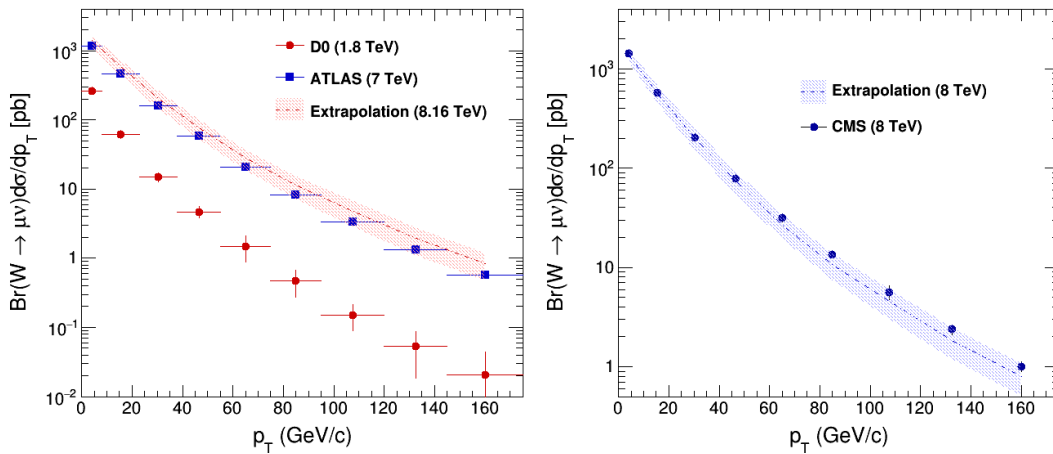


그림 5. W 보존의 횡방향 모멘텀에 대한 차등적 산란단면적(왼쪽), 8 TeV에서의 데이터와 외삽한 결과를 비교한 블라인드 테스트 연구(오른쪽). 왼쪽 패널의 빨간 원점은 D0 1.8 TeV의 실험 데이터이고, 파란 네모점은 ATLAS 7 TeV의 실험 데이터이다. 그리고 빨간 밴드는 8.16 TeV에서 외삽한 결과이다. 또한 오른쪽 패널의 파란 점은 CMS 8 TeV의 실험 데이터이고, 파란 밴드는 8 TeV에서 외삽한 결과이다.

6. $\sqrt{s} = 8.16$ TeV에서 W 보존의 횡방향 모멘텀에 대한 차등적 산란단면적

이 절에서는 W 보존으로부터 붕괴된 뮤온의 절대 유사신속도에 대한 차등적 산란단면적을 5절과 동일한 방법으로 계산한 결과를 보여줄 것이다. 절대 유사신속도에 대한 산란단면적은 11개 빈인 0 – 0.21, 0.21 – 0.42, 0.42 – 0.63, 0.63 – 0.84, 0.84 – 1.05, 1.05 – 1.37, 1.37 – 1.52, 1.52 – 1.74, 1.74 – 1.95, 1.95 – 2.18, 2.18 – 2.4로 나눠 계산했다. 그림 6에서 검은 점은 ATLAS 5.02 TeV와 7 TeV 실험의 차등적 산란단면적 데이터를 나타내고, 녹색 다이아몬드는 8.16 TeV에서 외삽한 결과를 나타낸다. 파라미터 세트는 표 5에 정리되어 있다. 또한 그에 대한 결과는 표 6에서 수치화되어 나타낸다. 계통적 불확실성의 경우, 앞 절에서 설명한 것과 같이 지수함수와 선형함수를 이용하여 계산되었다. 그림 8의 왼쪽 패널에서는 그림 5와 그림 7의 8.16 TeV에 대한 차등적 산란단면적의 외삽한 결과를 합쳐 보여준다. 또한 앞 절과 마찬가지로 피팅 결과가 적절한지 확인하기 위해 $\sqrt{s} = 8$ TeV에서의 데이터와 외삽한 결과를 비교하는 블라인드 테스트를 실시했다. 그림 8의 오른쪽 패널이 각 절대 유사신속도 빈에 대한 $\sqrt{s} = 8$ TeV에서의 차등적 산란단면적을 모두 합쳐 데이터와 외삽한 결과를 비교한 그림이다. 파란색 점은 데이터이고, 파란 밴드 영역은 외삽한 결과와 그에 대한 계통적 불확정도를 나타낸다. 이 결과로부터 이 두 값은 8.7%의 오차 범위 내에서 일치함을 보였다.

$ y $	Parameter A	Parameter b
0.0 - 0.21	3.211 ± 0.067	1154.880 ± 63.731
0.21 - 0.42	3.182 ± 0.073	1146.860 ± 57.643
0.42 - 0.63	3.171 ± 0.076	1148.240 ± 57.538
0.63 - 0.84	3.227 ± 0.066	1092.840 ± 58.603
0.84 - 1.05	3.242 ± 0.065	1083.290 ± 60.018
1.05 - 1.37	3.250 ± 0.055	1034.800 ± 51.049
1.37 - 1.52	3.209 ± 0.080	1008.410 ± 68.159
1.52 - 1.74	3.131 ± 0.077	997.362 ± 54.139
1.74 - 1.95	3.221 ± 0.064	910.510 ± 51.610
1.95 - 2.18	3.178 ± 0.066	858.371 ± 49.801
2.18 - 2.4	3.325 ± 0.044	628.830 ± 43.284

표 5. W 보손으로부터 붕괴된 뮤온의 절대 유사신속도에 따른 산란단면적의 외삽에 대한 역법칙 함수 피팅 파라미터.

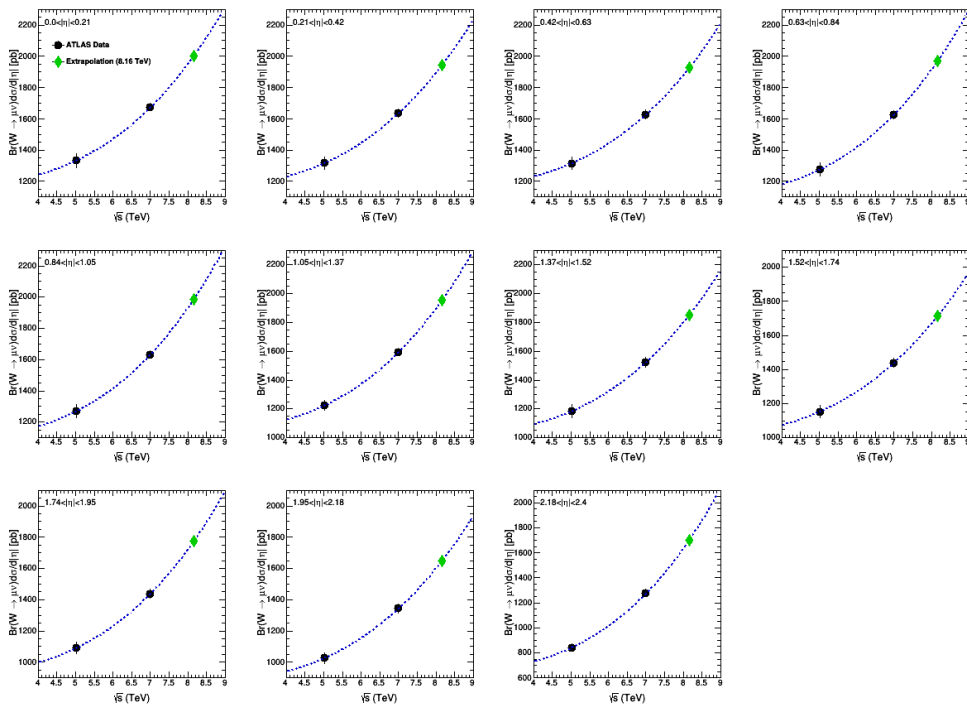


그림 6. 각 절대 유사신속도 bin에 따른 W 보손으로부터 붕괴된 뮤온의 외삽된 산란단면적. 검은색 점은 각각 CMS 5.02 TeV와 7 TeV 실험의 데이터이고, 녹색 다이아몬드는 8.16 TeV에서 외삽한 결과이다.

$ \eta $	외삽된 산란단면적 (pb)
0.0 - 0.21	2001.68 \pm 130.34
0.21 - 0.42	1942.86 \pm 120.42
0.42 - 0.63	1926.27 \pm 116.97
0.63 - 0.84	1967.81 \pm 135.86
0.84 - 1.05	1986.70 \pm 141.51
1.05 - 1.37	1953.26 \pm 144.51
1.37 - 1.52	1850.59 \pm 129.42
1.52 - 1.74	1713.14 \pm 105.08
1.74 - 1.95	1774.66 \pm 133.72
1.95 - 2.18	1648.07 \pm 119.22
2.18 - 2.4	1703.21 \pm 176.21

표 6. 8.16 TeV에서 외삽한 각 절대 유사신속도 bin에 따른 W 보존으로부터 붕괴된 뮤온의 차등적 산란단면적.

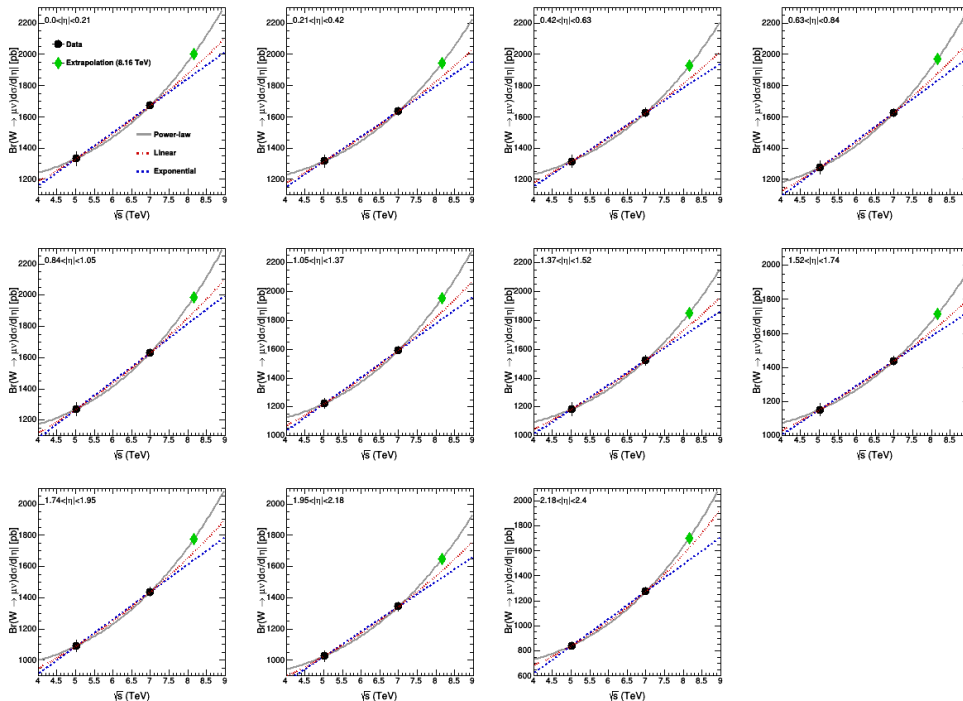


그림 7. 각 절대 유사신속도 bin에 따른 W 보존으로부터 붕괴된 뮤온의 산란단면적에 대한 계통적 불확정도 연구. 각각 검은색 선은 멱법칙 함수로, 빨간색 점선은 지수함수로, 파란색 점선은 선형함수로 피팅한 결과이다.

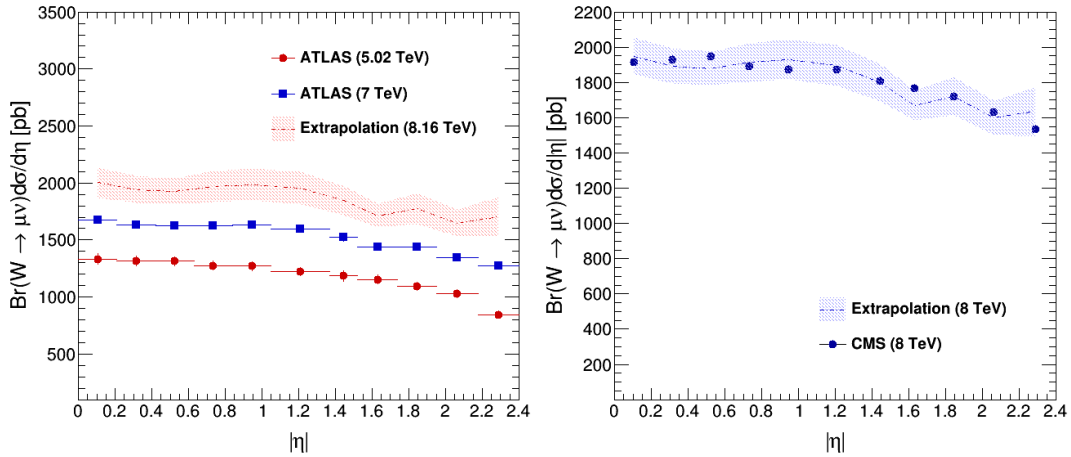


그림 8. W 보손으로부터 붕괴된 뮤온의 절대 유사신속도에 대한 차등적 산란단면적(왼쪽), 8 TeV에서의 데이터와 외삽한 결과를 비교한 블라인드 테스트 연구(오른쪽). 왼쪽 패널의 빨간 원점은 ATLAS 5.02TeV의 실험 데이터이고, 파란 네모점은 ATLAS 7 TeV의 실험 데이터이다. 그리고 빨간 밴드는 8.16 TeV에서 외삽한 결과이다. 또한 오른쪽 패널의 파란 점은 CMS 8 TeV의 실험 데이터이고, 파란 밴드는 8 TeV에서 외삽한 결과이다.

7. 신뢰도 체크

이 연구의 신뢰도를 확립하기 위해, 추산된 결과로 PYTHIA 시뮬레이션을 이용한 비교 연구를 수행하였다. 그 결과는 그림 9에서 W 보손의 횡방향 모멘텀에 대해 보여주고, 그림 10에서는 W 보손으로부터 붕괴된 뮤온의 절대 유사신속도에 대해 보여준다. 또한 시뮬레이션으로 계산한 결과에 대한 추산된 결과의 비율은 각각 그림 9와 그림 10의 오른쪽 패널에서 보여준다. 결과는 W 보손의 횡방향 모멘텀에 대해 25%, W 보손으로부터 붕괴된 뮤온의 절대 유사신속도에 대해 7% 내에서 일치한다.

8. 결론

이 연구에서는 $\sqrt{s} = 8.16$ TeV에서의 pp 충돌로부터 생성된 W 보손의 산란단면적을 LHC 그룹에서 제공한 기존의 데이터를 활용하여 연구되었다. 그 방법으로 적절한 피팅 함수라고 생각되는 멱법칙 함수를 사용하여 외삽 기법으로 계산했다. 또한 계통적 불확정도를 계산하기 위해 선형함수와 지수함수를 사용하였다. 이로부터 계산된 결과의 신뢰도를 입증하기 위해서 외삽된 결과와 실험 데이터를 비교하였다. 추가로 PYTHIA 시뮬레이션을 이용하여 외삽된 결과와 비교함으로써 신뢰도를 확장하였다.

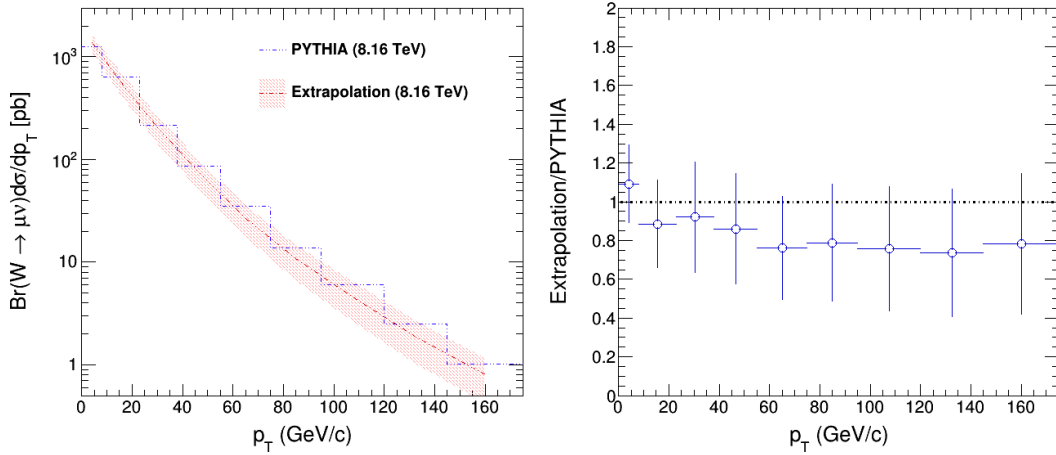


그림 9. W 보존의 횡방향 모멘텀에 대한 차등적 산란단면적의 신뢰도 체크. 왼쪽 패널에서 파란색 점선은 PYTHIA 시뮬레이션을 이용한 계산 결과이고, 빨간색 밴드는 외삽으로 계산된 결과이다. 오른쪽 패널은 시뮬레이션과 연구 결과의 차이를 나타낸다.

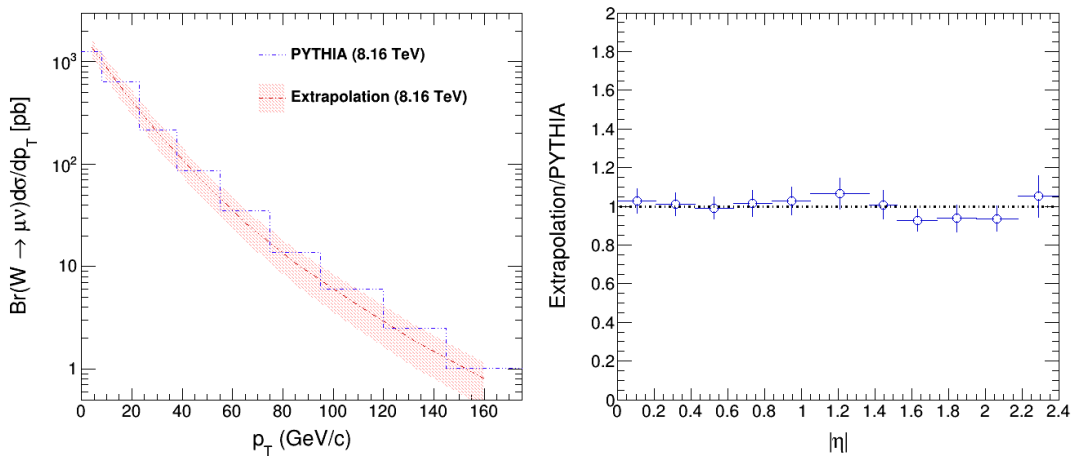


그림 10. W 보존으로부터 붕괴된 뮤온의 절대 유사신속도에 대한 차등적 산란단면적의 신뢰도 체크. 왼쪽 패널에서 파란색 점선은 PYTHIA 시뮬레이션을 이용한 계산 결과이고, 빨간색 밴드는 외삽으로 계산된 결과이다. 오른쪽 패널은 시뮬레이션과 연구 결과의 차이를 나타낸다.

이러한 결과로부터 멱법칙을 이용한 외삽 기법이 W 보존의 포괄적 산란단면적과 횡방향 운동량과 붕괴된 뮤온의 절대 유사신속도에 대한 차등적 산란단면적을 충돌 에너지에 대해 성공적으로 예측했다고 결론내릴 수 있다. 그렇기 때문에 이 결과를 이용하여 $\sqrt{s} = 8.16$ TeV에서 pPb 충돌에서의 핵 수정 인자(R_{pPb})를 측정하여 CNM 효과를 조사하는데 도움이 될 것이다.

References

- [1] F. Karsch and E. Laermann, in Quark-Gluon Plasma III, R. C. Hwa and X.-N. Wang, eds. (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004), arXiv:hep-lat/0305025.
- [2] E. V. Shuryak, Sov. Phys. JETP 47, 212 (1978).
- [3] Y. Mehtar-Tani, J. G. Milhano and K. Tywoniuk, Int. J. Mod. Phys. A 28, 1340013 (2013).
- [4] PHENIX Collaboration, Phys. Rev. C 69, 034910 (2004).
- [5] ATLAS Collaboration, JHEP 09, 050 (2015).
- [6] CMS Collaboration, Eur. Phys. J. C 72, 1945 (2012).
- [7] E. G. Ferreira, F. Fleuret et al, Phys. Rev. C 81, 064911 (2010).
- [8] CMS Collaboration, Phys. Lett. B 715, 66 (2012).
- [9] CMS Collaboration, Phys. Lett. B 750, 565 (2015).
- [10] CMS Collaboration, Phys. Rev. D 90, 032004 (2014).
- [11] CMS Collaboration, JHEP 02, 096 (2017).
- [12] CMS Collaboration, CMS-PAS-SMP-15-004, (2015).
- [13] D0 Collaboration, Phys. Lett. B 513, 292 (2001).
- [14] ATLAS Collaboration, Phys. Rev. D 85, 012005 (2012).
- [15] CMS Collaboration, JHEP 02, 096 (2017).
- [16] ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 79, 128 (2019).
- [17] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B 701, 31 (2011).
- [18] ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 79, 760 (2019).
- [19] D. H. Moon and Y. Kim, JKPS 75, 547 (2019).

Slow Control and Monitoring programming for JSNS²

Piljun Gwak

Department of Physics, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

The JSNS² (J-PARC Sterile Neutrino Search at J-PARC Spallation Neutron Source) is designed to study the neutrino oscillations over a 24 m short baseline. The collisions of proton beams and mercury target provide the pions and their decayed muons at rest. It is expected to investigate the existence of sterile neutrino by observing $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ oscillation through these events. The JSNS² inner detector is filled with 30 tons of un-doped liquid scintillator (LS) and 17 tons of gadolinium-doped (Gd)LS and surrounded by 120 photomultiplier tubes (PMT). Because one of the most important tasks in JSNS² experiment is keeping the state of LS constantly, it is necessary to monitor the environmental factors such as temperature, pressure, humidity, and the level of LS. For this purpose, we installed 4 sensors at the detector. In this paper, we introduce how to get the signals from the 4 sensors by LabVIEW and manage them. In particular, long-term collected data will be used for understanding the relations between the experimental results and environmental factors.

Keywords : JSNS², LabVIEW, Sterile neutrino, J-PARC, Slow control, Monitoring program

투고일자 : 2020. 12. 08

심사일자 : 2020. 12. 15

확정일자 : 2020. 12. 23

1. 서론

중성미자는 표준 모형을 구성하는 입자로서 그 성질을 이해하는 것은 표준 모형의 이해를 위해 중요하다. 하지만 중성미자의 검출과 그 성질을 이해하기 위한 여러 실험에도 불구하고 중성미자의 질량과 진동 변환에 대해서 확정되지 않은 값들이 존재한다.

중성미자 연구는 베타 붕괴에서 발생한 이상 현상에서 출발하였고 1956년 전자 중성미자 (ν_e)가 관측된 후 뮤온 중성미자 (ν_μ)와 타우 중성미자 (ν_τ)가 추가로 발견되어 현재 총 3 세대의 중성미자가 발견되었다. 그리고 SuperK (Super Kamiokande) 실험과 서드베리 중성미자 관측소 (Sudbury Neutrino Observatory)에서 중성미자의 진동 변환을 관측함으로써 중성미자의 질량이 0이 아니라는 것이 밝혀졌다 [1] [2].

그런데 중성미자의 진동을 연구하던 중 LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector) 실험에서 이론적 예측보다 더 많은 중성미자를 관측했다 [3]. 그 외의 페르미 국립 가속기 연구소(Fermi National Accelerator Laboratory)의 MiniBooNE (Mini Booster Neutrino Experiment) [4][5]와 GALLEX/SAGE와 원자로 실험들에서 예측과 다른 결과를 얻었다 [6].

이러한 불일치를 설명하기 위한 접근법 중 하나가 새로운 세대의 중성미자를 도입하는 것이다. 이러한 중성미자를 비활성 중성미자 (sterile neutrino)라고 부른다. JSNS² (J-PARC Sterile Neutrino Search at J-PARC Spallation Neutron Source) 실험은 비활성 중성미자의 존재를 확인하는 것을 주요 목적으로 설계되었다. 이를 통해 표준 모형의 이해에 기여할 수 있을 것이라 예상된다.

2. JSNS² Experiment

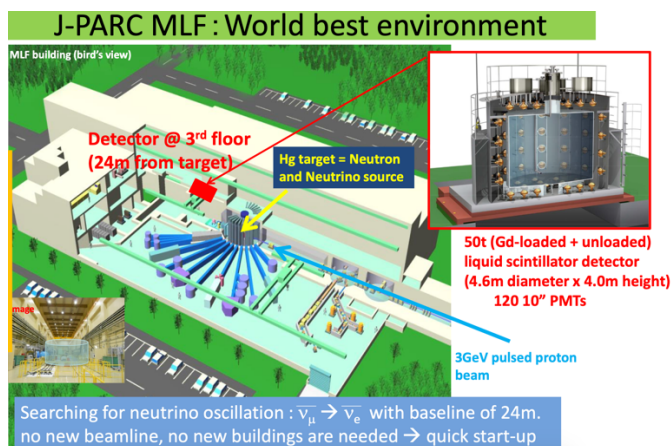


그림 1. Schematic view of MLF에 있는 JSNS² 검출기의 개념도

JSNS²는 비활성 중성미자의 관측이 주목적이고 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 진동 변환을 관찰한다. 측정 영역대는 $\Delta m^2 = 1 \text{ eV}^2$ 이다. 이 실험의 검출기는 일본의 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 연구소의 MLF (Material and Life Science Experimental Facility)에 설치된다 (그림 1).

J-PARC의 가속기에서 가속된 양성자 빔이 MLF 중앙의 수은 표적에 부딪히면서 π^+ 가 생성된다. 그리고 π^+ 의 붕괴에서 μ^+ 가 나오고, 다음으로 정지 상태의 μ^+ 가 붕괴하면서 반뮤온 중성미자가 만들어진다($\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$). 반뮤온 중성미자($\bar{\nu}_\mu$)는 수은 표적에서 약 24 m를 떨어진 JSNS²의 검출기로 이동한다. 그리고 이동 과정에서 반뮤온 중성미자가 반전자 중성미자($\bar{\nu}_e$)로 진동 변환할 것이라고 예측된다.

진동 변환이 발생하여 반전자 중성미자가 검출기로 들어올 경우 역베타붕괴 (IBD, Inverse Beta Decay, $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$) 과정을 이용해 반전자 중성미자를 관측할 수 있다. JSNS²의 검출기는 30톤의 액체 섬광체 (LS, Liquid Scintillator)와 17톤의 가돌리늄 첨가 액체 섬광체 (Gd-LS)로 채워진다 [7]. 반전자 중성미자가 검출기에 도달한다면 검출기 안에 채워진 LS와 Gd-LS의 양성자와 만나 역베타붕괴를 통해 중성자와 양전자로 붕괴할 것이다. 양전자는 곧 전자와 쌍소멸하면서 감마선을 만든다. 그리고 평균적으로 대략 $\sim 26 \mu s$ 후에 중성자가 가돌리늄 원자핵에 흡수되면서 감마선을 방출한다. 감마선은 검출기 안에 설치된 120개의 PMT를 통해 관측된다. 그렇기 때문에 JSNS²의 검출기에서 하나의 역베타붕괴 사건은 시간 간격이 대략 $\sim 26 \mu s$ 인 두 개의 감마 신호를 생성한다 [8]. 이 시간 조건(trigger)을 이용해 역베타붕괴에 의해 발생한 신호와 우주선 (cosmic ray)이나 주변 환경이 만들어낸 신호(background signal)를 구별할 수 있다 [9].

3. 저속제어 (slow control) 및 감시 (monitoring) 프로그램

(1) 목적

역베타붕괴를 이용하여 중성미자 검출에서 가장 중요한 역할을 하는 액체 섬광체의 안정적 관리는 매우 중요하다. 기존의 실험들에서는 지하에서 주로 수행되었기 때문에 비교적 안정적으로 낮게 유지되었기 때문에 액체 섬광체가 온도에 민감하게 변하지 않았으나 JSNS² 실험의 경우 지상에서 수행되기 때문에 온도 변화에 액체 섬광체의 화학적 변화가 어떻게 일어날 것인지 관심 있게 지켜보고 있다. 그리고 보호벽으로 감싸고 있는 액체 섬광체가 외부 환경적 요인에 의해 새어 나갈 경우 검출 효율에 큰 영향을 줄 것으로 판단되기 때문에 액체 섬광체 주변의 환경 변화를 항시적으로 관찰할 필요가 있다. 이를 위해 온도, 습도, 압력, 용액 높이를 관찰하는 4개의 계측기 (Sensor)를 설치하고 그 신호들을 읽어 들이고 조절하기 위해 LabVIEW를 이용하였다. 이 정보들은 MySQL을 통해 데이터 베이스에 저장되고 Grapana를 사용하여 실험 감독자 (shifter)에게 보여지게 된다. 본 논문은 그 중에서도 액체 섬광체 주변 환경을 감시할 4개의 계측기로 부터 LabVIEW를 통해 어떻게 신호를 얻어 관리하는가에 대해 보고 하고자 한다.

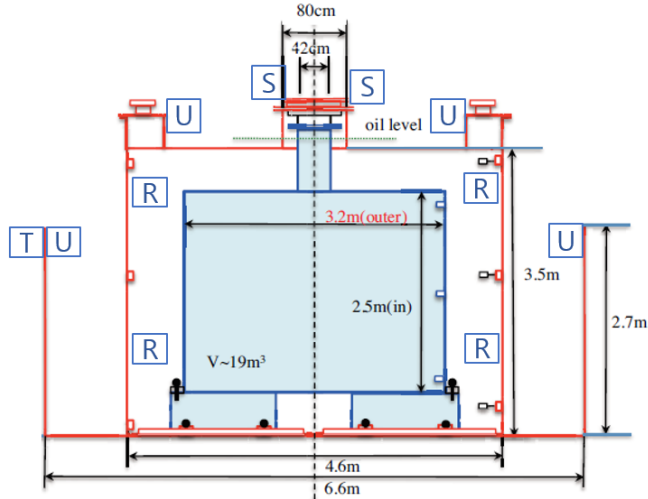


그림 2. JSNS²'s detector 검출기의 레이아웃, 그림에서 R: RTD sensor, T: TR-73U, S:SICK sensors, U: US-015 sensor를 의미한다.

저속제어 시스템을 통해 먼저 살펴볼 것은 검출기 안의 LS가 유출되는 현상이다. 온도 변화로 인해 LS의 부피가 팽창하거나 검출기 벽이 충격을 받는 등의 돌발 상황으로 LS가 유출될 경우 MLF 안을 오염시킬 수 있다. 이런 상황을 방지하기 위해 검출기 주위에 기름 유출 방지를 위한 벽이 설치되었다. 그리고 검출기 안과 밖의 온도 변화, 검출기 내부의 수위 변화, 기름 유출 방지벽의 수위 변화를 측정한다.

JSNS²의 저속제어 및 감시 프로그램에서 측정하는 값의 종류는 수위, 온도, 습도, 기압이다. 같은 종류의 값을 측정하더라도 측정 대상의 위치나 측정 목적에 따라서 필요한 계측기 (sensor)의 성능이 달라진다. 예를 들어 SICK 회사에서 만든 두 계측기 (SICK 계측기)와 아두이노에 설치된 US-015 계측기는 모두 초음파를 이용해 대상과 계측기 사이의 거리를 측정하지만 검출기 내부의 수위를 측정할 때는 SICK 계측기를 사용하고 검출기 외부에는 US-015 계측기를 사용한다. 그 이유는 검출기 내부 구조물에 초음파가 반사되는 것을 방지하기 위해 관 (pipe)을 검출기에 삽입하는데 관의 크기를 SICK 계측기에 맞게 설계 했기 때문이다. 그리고 SICK UM30-213113과 UM30-215113은 측정할 수 있는 범위가 다르기 때문에 검출기에 상황에 맞는 계측기를 사용한다. 검출기에 LS를 채울 때는 검출기의 바닥부터 상판까지의 높이인 3.5 m 이상의 거리를 측정할 수 있어야 하므로 UM30-215113 계측기 2개를 사용한다. LS를 채운 후에는 60 cm 미만의 거리를 측정할 수 있는 UM30-213113 계측기 2개를 사용한다.

검출기 외부에는 측정에 방해되는 요인이 없기 때문에 설치가 간편한 US-015 계측기를 사용한다. US-015 계측기는 검출기 외부의 상판과 기름 유출 방지벽에 설치된다. 상판에 설치된 US-015 계측기는 검출기 내부의 LS가 팽창하여 위로 흘러 넘치는 것을 감지한다. 기름 유출 방지벽에 설치된 계측기는 검출기 옆면에 파손이 생겼을 때 발생할 수 있는 LS 유출을 감지한다. 사용된 계측기의 종류와 목적, LabVIEW와의 통신 방법 및 사용된 개수가 표 1에 요약되어 있다.

Name	Type	Method	Numbers
RTD	temperature	NI 9216	8
TR-73U	temperature, humidity and pressure	Serial	1
SICK UM30-213113	height	NI 9201	2
SICK UM30-215113	height	NI 9201	2
US-015	height	Serial	6

표 1. 센서들에 대한 요약

(2) 프로그램 알고리즘 작성

계측기의 출력값을 LabVIEW로 읽기 위한 코드를 작성했다. National Instrument (NI) 모듈을 사용해 연결한 계측 장비는 LabVIEW에서 지원하는 DAQmx 기능을 이용해 간단히 연결할 수 있다. 시리얼 통신 방법을 이용하는 장비는 읽어올 데이터의 유형과 크기를 고려하여 코드를 작성했다. LabVIEW가 그래픽 기반의 프로그래밍 언어이기 때문에 소스 코드가 그림으로 표시되는 함수와 함수들을 연결하는 선으로 구성된다. 그림 3에 RTD와 SICK 계측기에 사용한 코드 일부를 표시했다.

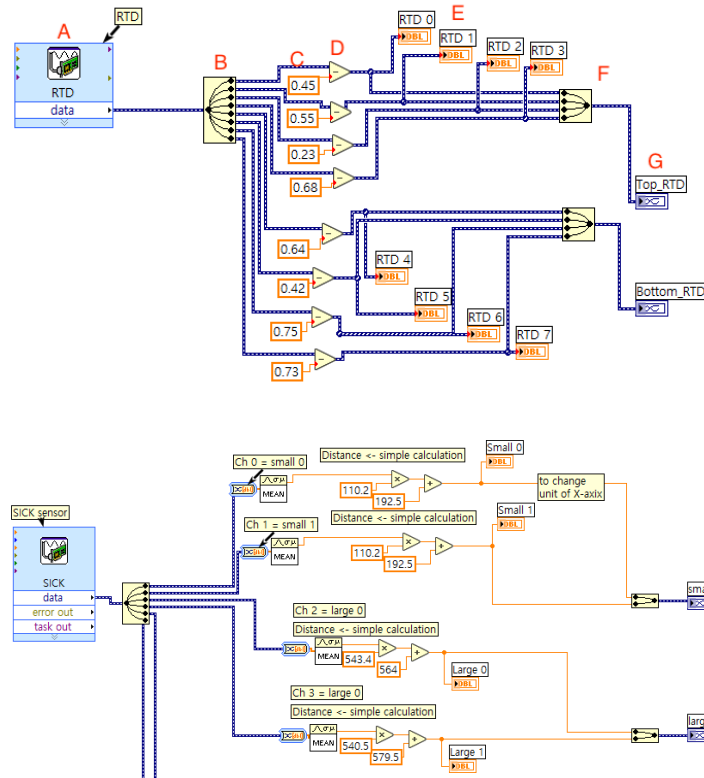


그림 3. Sensor read-out algorithm, (a) Program of RTD (Resistance Temperature Detector) with NI 9216, (b) Programs of UM30-213113 and UM30-215113

계측기의 입출력 (read-out)을 확인한 후에는 계측기의 출력값을 데이터베이스 (MySQL 5.6.38)에 저장했다. 그리고 저장된 데이터로 그래프를 그려서 계측기가 안정적으로 작동하는지와 시간에 따른 값의 변화가 합리적인지 분석했다. 그림 4는 약 12시간 동안의 UM30-213113 계측기의 출력값을 기록한 것이다. 이 그래프에서 지속적으로 계측기의 값을 읽을 수 있음과 56.9 cm와 57.2 cm 사이에서 값의 변동이 있음을 알 수 있다.

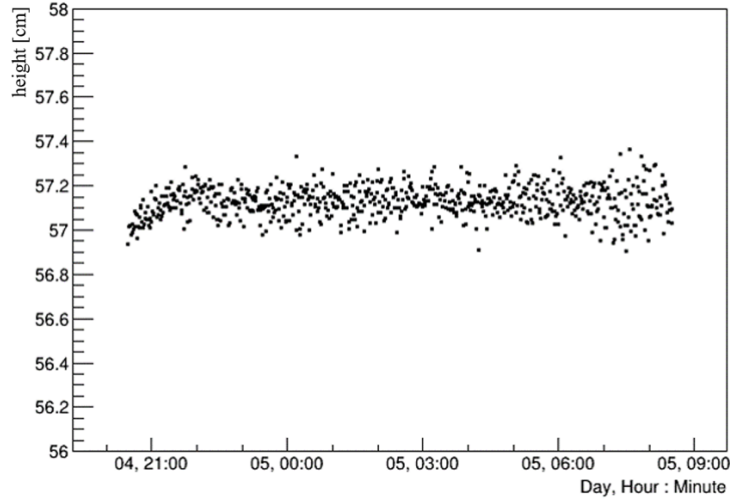


그림 4. 시간에 따른 floor와 센서 사이의 거리의 변화를 UM30-213113 센서를 이용하여 얻은 그래프

(3) 사용자 화면 (User Interface, UI)

검출기 환경을 감독하는 실험 감독자가 검출기의 주변의 현재 상황과 이전 상황을 파악할 수 있도록 사용자 화면을 구성했다. 각 계측기는 출력값을 숫자로 표시하는 화면과 최근 8시간 동안의 값 변화를 표시하는 그래프 화면을 갖는다. 그래프는 유사한 항목들을 묶어서 한 화면에 여러 개의 선을 그려서 공간을 절약했다. 그림 5는 저속제어 및 감시 프로그램의 사용자 화면을 보여준다. 각각의 그래프가 나타내는 신호의 종류를 표 2에 요약했다.

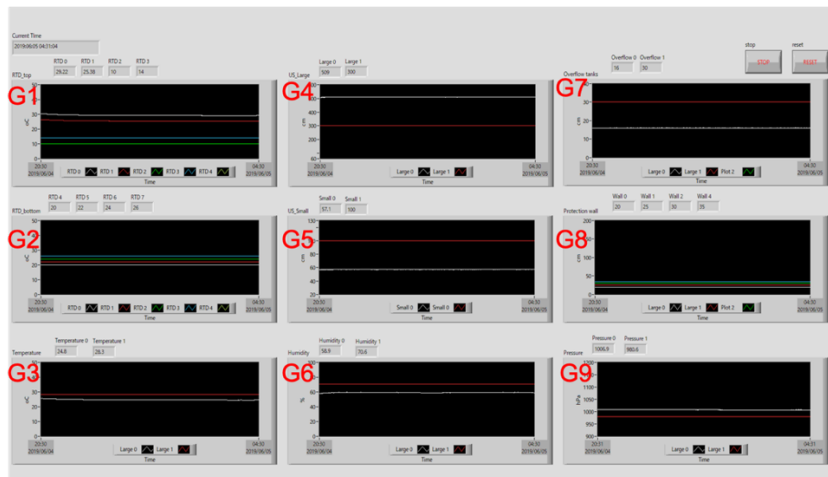


그림 5. Slow Control and Monitoring program의 사용자 인터페이스

Graph	Sensor	Purpose
G1	RTD	LS temperature (top in detector)
G2	RTD	LS temperature (bottom in detector)
G3	TR-73U	Temperature outside detector
G4	UM30-215113	LS level inside detector
G5	UM30-215113	LS level inside detector
G6	TR-73U	Humidity outside detector
G7	US-015	Oil leakage on the cover of detector
G8	US-015	Oil leakage near detector walls
G9	TR-73U	Pressure outside detector

표 2. 그림 5에 나오는 그래프들에 사용된 센서와 목적

검출기 환경을 감독하는 실험 감독자가 검출기의 주변의 현재 상황과 이전 상황을 파악할 수 있도록 사용자 화면을 구성했다. 각 계측기는 출력값을 숫자로 표시하는 화면과 최근 8시간 동안의 값 변화를 표시하는 그래프 화면을 갖는다. 그래프는 유사한 항목들을 묶어서 한 화면에 여러 개의 선을 그려서 공간을 절약했다. 그림 5는 저속제어 및 감시 프로그램의 사용자 화면을 보여준다. 각각의 그래프가 나타내는 신호의 종류를 표 2에 요약했다.

사용자 화면에는 일시 중지와 정지 버튼이 있다. 만약 검출기의 환경 변화가 기준치를 넘어가면 프로그램은 경고음과 배경색의 변화로 실험 감독자에게 상황을 알린다. 사용자는 상황을 확인하고 일시 정지 버튼을 눌러서 경고 기능을 일시적으로 중단할 수 있어 알람 기능을 갖는다. 그리고 필요할 경우 정지 버튼을 눌러서 계측기로부터 값을 얻는 것을 멈출 수도 있는 기능을 추가하였다.

4. 결론

J-PARC에서 비활성 중성미자 연구를 진행할 JSNS² 실험의 저속제어 및 감시 프로그램을 제작했다. 검출기 주변에 설치된 계측기들의 신호를 LabVIEW를 이용해 읽고 데이터베이스에 저장할 수 있었다. 그리고 저장된 출력값을 이용해 계측기의 성능을 점검했다. 그리고 계측기에서 얻은 신호를 사용자가 확인할 수 있도록 사용자 화면을 구성하였으며 필요에 따라 사용자가 프로그램 전체나 일부를 종료할 수 있는 기능을 제공하였다. 이 사용자 화면은 Grapana 프로그램과 연동하여 실험 감독자들에게 보여질 것이다. 앞으로 이 정보들을 장시간 기록하여 중성미자 검출 신호와의 연관성을 찾는데 사용될 것이며 만약 외부 환경 요소들 (온도, 습도, 압력, 용액의 높이)과 상관관계가 밝혀지면 이를 보정하는데 중요한 기반 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국 연구재단 (NRF-2017K1A3A7A09016426, NRF-2017K1A3A7A09016125)의 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

References

- [1] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett. 81, 1562 (1998).
- [2] Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration) Phys. Rev. Lett. 87, 071301 (2001).
- [3] A. Aguilar-Arevalo et al. (LSND Collaboration), Phys. Rev. D 64, 112007 (2001) [hep-ex/0104049].
- [4] A. A. Aguilar-Arevalo et al. (MiniBooNE Collaboration), arXiv:1805.12028 [hep-ex].
- [5] A. A. Aguilar-Arevalo et al. (MiniBooNE Collaboration), Phys. Rev. Lett. 110, 161801 (2013) [arXiv:1303.2588 [hep-ex].
- [6] S. Ajimura et al., "Technical Design Report (TDR): Searching for a Sterile Neutrino at J-PARC MLF (E56, JSNS²)," arXiv:1705.08629 [physics.ins-det].
- [7] Y. Hino et al., JINST 14 (2019) no.09 T09001.
- [8] G. Bak et al., Measurement of Reactor Antineutrino Oscillation Amplitude and Frequency at RENO, Phys. Rev. Lett. 121, 201801 (2018).
- [9] G. Ranucci, Pulse Shape Discrimination of Liquid Scintillators Nucl. Instrum. Meth. A 354, 389 (1995).

우주소립자연구지

Journal of Universe and Elementary Particles

Volume 17, No. 1

ISSN 2288-050X

2020년 12월 24일 인쇄	(비매품)	발행인	문 동 호
2020년 12월 27일 발행		편집인	문 동 호
		인쇄처	전대 자연대 복사 / 운화복사
		발행소	전남대학교 우주소립자연연구소

(61186) 광주광역시 북구 용봉로 77 (용봉동)
전남대학교 자연과학대학 4호관 우주소립자연연구소
전화 : 062-530-3354

Website : <http://iuep.jnu.ac.kr>

CONTENTS

Volume 17, No. 1

Journal of Universe and Elementary Particles December 2020

Cross-Section Study for W boson in pp collision at $\sqrt{s} = 8.16$ TeV	Ryeong Gyoon Park	01
Slow Control and Motioning programming for JSNS ²	Piljun Gwak	15