

중성 미립자의 무게가 얼마입니까?

파이퍼 베큘과 KATRIN

중성 미립자는 가장 환상적인 소립자 종류 중 하나입니다. 이는 우주에서 가장 가벼운 입자입니다. 이의 질량을 알아내는 일은 수십 년 동안 물리학 연구의 한계를 확장해왔습니다. 사실 중성 미립자는 소립자의 소우주에서 우주의 가장 큰 구조에 이르기까지 아직 풀리지 않은 많은 과학적 질문을 풀 수 있는 열쇠와 같습니다. 왜냐하면 중성 미립자는 우주의 건축자들이라고 설명할 수 있기 때문입니다. 즉, 이는 우주의 가시적인 구조를 형성하는 역할을 하며 또한 은하계의 형성과 분포에 영향을 미치기 때문입니다.

우리가 소립자를 이해할 수 있도록 천체 물리학과 우주론에 관한 이러한 근본적인 질문에 답하고 가치있는 정보를 획득하려면, 중성 미립자 질량을 정밀하게 알아내는 게 결정적으로 중요합니다. 카를스루에 3중 수소 중성 미립자 실험, 약어로 KATRIN은 이러한 목적을 달성하기 위해 시작되었습니다.

현재 150명 이상의 국내 및 해외 전문가들이 10년 이상 동안 3중 수소의 베타 붕괴 중 전자의 운동학에 대한 독립적인 모델 고정밀 측정을 통해 중성 미립자의 질량을 알아내기 위해 KATRIN 프로젝트를 함께 추진해오고 있습니다. 이 목적을 위해 필요한 실험 설비가 현재 카를스루에 공과대학(KIT) 캠퍼스에 조립 중입니다. 고정밀 실험에서 사용되는 테스트 장비에 요구되는 조건은 매우 어려운 문제입니다.



그림 1: 인상적인 KATRIN 메인 분광분석기 탱크

카를스루에 공과대학(KATRIN)의 실험 설비

KATRIN은 총 길이가 70미터에 달하고 다음과 같은 5개의 필수 구성품이 포함된 몇 개의 섹션으로 구성되었습니다.

- 창이 없는 3중 수소 소스
- 터보 펌프와 저온 트랩으로 3중 수소가 제거되고 전자를 분광분석기로 유도하는 운송 섹션
- 정전기 프리 분광분석기
- 거대한 정전기 메인 분광분석기
- 전자 검출기

메인 분광분석기 내부에는 23,000개 이상의 가는 와이어가 정밀하게 배치된 네트워크가 전자 에너지 측정을 위한 고해상도의 정전기 필터를 형성합니다. 메인 분광분석기의 형태는 실린더형 중간 섹션이 끝부분 방향으로 가늘어지면서 필터 형상의 영향을 받았습니다. 직경이 9.80미터이고 길이가 23.28미터로 측정된 메인 분광분석기의 치수는 필요한 에너지 해상도에 의해 정의됩니다.

진공 기술에 요구되는 높은 조건

메인 분광분석기의 설계 및 제조는 초고진공 시스템에 요구되는 높은 기준을 충족해야 합니다. 분광분석기에 10^{-11} mbar의 전체 압력이 요구됩니다. 영역과 관련된 수소의 탈기체율은 10^{-12} mbar l s⁻¹ cm⁻² 미만이어야 합니다. 이는 약 1시간 동안 펌핑한 후 청정한 표면의 탈기체율과 비교할 때 1만 분의 1 정도로 낮습니다.

고품질 표준 및 관리

전세계에 걸쳐, 이러한 종류의 용기를 구축할 수 있는 회사는 몇 개에 불과합니다. 다뉴브 강변의 데겐도르프에 소재한 MAN DWE GmbH(현재 MAN Diesel & Turbo SE의 회사)가 화학 반응기 및 대용량 용기를 갖춘 우수한 회사 중 하나입니다. 이 회사는 메인 분광분석기의 제조로 시작했습니다.

이 크기의 용기에서 비교적 얇은 벽은 스테인레스강 EN 1.4429로 만들어집니다. 많은 노즐은 특히 펌프 시스템은 물론 가열 및 냉각 시스템에서도 외양이 독특합니다. 아마도 이전에는 어떠한 다른 대용량 용기도 조립 중 용접 기술과 청정도에 대해 이렇게 까다로운 조건을 요구한 적이 없습니다. 예를 들어 누출을 확인함으로써 이러한 정밀 작업을 지속적으로 모니터링하고 포괄적인 진공 테스트로 검증했습니다. 이 목적을 위해 파이버 베큘의 누출 감지 솔루션을 사용했습니다. 분광분석기 탱크가 최초의 핵심적인 응력 테스트에 합격해야 했던 2006년 처음으로 누출 감지 테스트를 실시했습니다.

이 테스트를 위해 2,600-l/s 터보 펌프를 사용하여 분광분석기를 10^{-7} 로 진공 배기했습니다. 불과 2일간의 펌핑 후에 최종 압력으로 3가지 크기가 획득되었는데, 이는 누출 테스트에 필요한 테스트 압력의 예상값보다 높았습니다.



그림 2: 포일로 감싼 분광분석기 탱크를 보면 엔지니어가 포장에 얼마나 신경을 써야 했는지 알 수 있습니다.

누출 감지 솔루션에 의해 충족시킬 요구조건

누출 테스트 동안, 가능한 모든 오염을 방지하는 게 필수적입니다. 염료 침투 테스트 또는 기포제의 사용과 같이 심지어 가장 미미한 오염 위험이라도 포함된 모든 테스트 방법은 배제했습니다.

누출 테스트를 실시하기 위한 전반적인 컨셉트는 카를스루에 공과 대학(KIT)의 전문가와 함께 MAN DWE에서 개발했습니다. 이 목적을 위해 파이버 베콤의 제품도 사용했습니다. 누출 테스트에 필요한 최종 압력은 설치할 펌프 용량에 의해 결정했습니다.

미리 조립된 메인 분광분석기를 사용한 종합 헬륨 누출 테스트에 지정된 값은 $5 \cdot 10^{-9}$ mbar l/s 미만이었습니다. 헬륨 백그라운드 신호가 $5 \cdot 10^{-10}$ mbar l/s 미만이어야 했습니다. 초기 계산에 의하면, 필요한 헬륨 백그라운드를 획득하려면 체적이 1,240 m³인 챔버의 경우 펌프 다운 시간이 약 3일이라는 게 밝혀졌습니다.

따라서 공칭 헬륨 펌프 속도가 약 2,600 l/s인 강력한 터보 펌프를 사용할 때조차 누출 테스트 동안의 응답 시간은 약 20분에 불과합니다. 약 1시간 30분이 지날 때까지 신호 최대값에 이르지 못하고, 신호 감쇠에 상당히 긴 시간이 걸립니다.

이러한 관점에서, 여러 누출의 위험이 있기 때문에 단 하나의 종합 테스트를 실시하는 게 실용적이지 않은 듯했습니다. 따라서 상당수의 개별 테스트를 포함하면서도 가능한 한 적은 수 종합 테스트로 구성된 생산 중 누출 테스트 절차를 정했습니다. 이러한 방법의 목적은 예를 들어 나중에 표면 또는 용접 이음매의 실링 작업을 다시 해야 하는 위험을 방지하는 데 있습니다. 생산 중 테스트를 하게 되면 생산하는 동안 모든 누출을 검출할 수 있고, 품질 편차를 조기에 정밀하게 바로잡을 수 있습니다. 이런 식으로 시간이 많이 소요되는 반복 테스트와 마무리된 표면에 발생 가능한 손상을 방지할 수 있습니다.

개별적인 테스트

개별 루트 용접 이음매를 테스트하기 위해, 벽의 곡선부에 사용할 수 있는 캐스트 탄성 중합체로 소형 챔버를 만들었습니다. 챔버는 추적 가스 탱크 또는 누출 감지기 자체의 진공 챔버로 사용했습니다.

크기와 무게가 동일하고 하나의 워크스테이션에서 테스트할 수 있는 개별 플랜지와 구성품을 영구적으로 고정된 테스트 벤치에서 테스트했습니다.

용접 이음매의 모바일 테스트에는 헬륨 스니퍼 누출 감지 방식이 사용되었습니다. 이는 냉각 회로에서와 같이 낮은 수준의 누출 기밀성 요구조건이 적용되는 경우에 해당합니다.

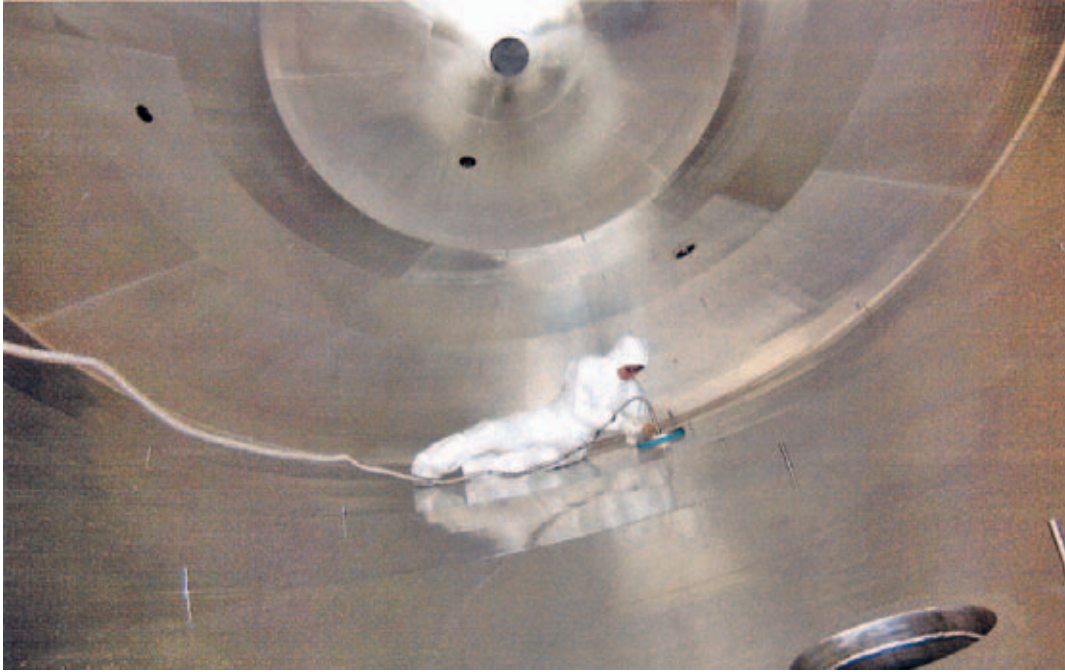


그림 3: 메인 용기에서 소켓으로 넘어가는 부분의 용접 이음매 테스트

이미 조립된 개별 플랜지를 테스트하기 위해 고객맞춤형 테스트 후드를 개발했습니다. 후드를 헬륨 누출 감지기에 직접 연결하여 진공 배기했습니다.

종합 테스트 준비

종합 테스트를 위해, 용기를 헬륨에 대한 침투율이 최소인 포일로 둘러쌌습니다. 커버를 만들 때 모든 플랜지와 용기의 돌출부에 패드를 대서 포일 손상을 방지했습니다. 회전자에서 포일 시트로 감싼 구성품을 함께 회전시키기 전에 마지막 포일 시트를 분광분석기에 부착했습니다. 회전자를 한 바퀴 돌리면, 포일의 끝이 생산실의 바닥에 고착되고 하나만 자유롭게 트인 채로 남습니다.

주변 공기에서 용기로의 누출률을 알아내는 것 외에, 가열/냉각 시스템에서 나와 용기로의 누출률을 측정했습니다. 테스트하기 전에, 모든 누출 감지기 어셈블리의 응답 시간 및 정량화를 정밀하게 보정했습니다.

파이퍼 베큘에서 개발한 솔루션

매우 까다로운 측정 작업, 분광분석기 탱크의 종합 테스트, 가열/냉각 시스템에서 분광분석기 탱크로의 누출 테스트를 위해, ASM 122 D(*) 건식 누출 감지기를 사용했습니다. 이 누출 감지기의 특별한 기능:

- 펌프 다운 동안 백그라운드 신호의 고속 감소
- 측정 동안 최상의 장기적인 안정성
- 최대 감도
- 초고속 응답 시간
- 누출 감지 후 매우 빠른 신호 감소
- 주변 공기에서 변동하는 추적 가스 농도에 의해 영향을 받지 않는 백그라운드 신호
- 탁월한 휴대성 및 간편한 취급

예를 들어 가열/냉각 회로의 누출 테스트에 오일 윤활식 배압 펌프가 장착된 HLT 550(*) 누출 감지기가 사용되었습니다. 진공 탱크에서 실시한 측정과 달리, 이 어플리케이션은 배압 펌프의 작동 유체에 의한 오염에 둔감합니다.

KATRIN 진공 실험실에는 또한 파이퍼 베큘의 ASM 142 D*가 설치되었습니다. 이 누출 감지기로 단일 구성품들을 테스트할 수 있습니다. 비교적 까다로운 작업의 경우, ASM 122 D 및 ASM 192 T2D+ 고성능 건식 누출 감지기를 이동식 및 고정식으로 사용할 수 있습니다.

* 참고: 이러한 측정을 실시한 후, 위에서 설명한 ASM 122 D 누출 감지기를 신제품인 고성능 ASM 380 누출 감지기로 교체했습니다. 한편 위에서 언급한 HLT 550 및 ASM 142 D 누출 감지기도 신세대 ASM 340으로 교체했습니다. 이들은 오일 윤활식 건식 버전에서 사용할 수 있습니다. 파이퍼 베큘 헬륨 누출 감지기에 대한 자세한 내용은 당사 웹사이트 www.pfeiffer-vacuum.com을 참조하십시오.



그림 4: KATRIN 연구진은 메인 분광분석기 탱크에 대한 연구에 커다란 노력을 기울이지 않을 수 없었습니다.

모든 측정은 고품질 표준을 준수하면서 엄격한 테스트 조건에 따라 실시했습니다. 측정하는 동안에는 용기에 특정한 중합 누출률을 초과한 적이 없습니다. 누출 테스트가 성공적으로 완료되자, KATRIN의 메인 분광분석기에 공기를 주입한 후 이를 데겐도르프의 타운에 있는 생산 현장에서 카를스루에 공과대학으로 장관을 이루며 운송되었습니다. 이는 일직선으로 약 330 km의 거리에 불과하지만, 무게가 200톤에 길이 24미터와 폭 10미터에 달하는 이 거대한 분광분석기를 육로로 최종 목적지까지 운송하는 것은 불가능했습니다.

따라서 2006년 9월 28일 데겐도르프의 바바리안 타운에서 독일 바덴 지역의 레오폴트샤펜 타운에 있는 목적지까지 작은 만과 강을 따라가는 8,800 km의 여정이 시작되었습니다. 평상형 트럭을 타고 라인강을 옆에 끼고 "NATO 램프"에서 에겐슈타인 타운의 레오폴트샤펜 근처에 이르는 여정의 마지막 구간은 7 km에 불과했을지 모르지만 운송상 가장 힘든 구간이었습니다. 에겐슈타인-레오폴트샤펜의 좁은 도로를 지나는 데 세심한 계획이 필요했습니다. 이 때문에 2006년 11월 29일이 되어서야 마침내 유럽 최대의 크레인 중 하나로 분광분석기를 들어올려 상기 목적을 위해 지은 실험실의 지붕을 통해 제자리에 집어넣을 수 있었습니다.

전망

전용 실험실에 설치된 분광분석기 탱크가 최종 사용 준비를 마쳤습니다. 청정도 요구조건 때문에 클린룸 조건에서 작업해야 했습니다.

2007년과 2012년 사이에 약 120,000개 정도의 구성요소로 이루어진 복잡한 전자 내부 시스템이 클린룸 조건에서 맞춰졌는데, 실제 프로세스에서 내부 표면적이 두 배로 증가했습니다. 분광분석기 및 검출기 시스템이 2013년 최초로 가동되었으며, 단색 전자 소스를 가지고 초기 테스트를 실시했습니다. 이 테스트 동안, 10^{-11} mbar 상단 범위의 압력을 획득했습니다.

3중 수소 소스의 연결부 및 운송부의 설치가 완료되는 2016년 말에 KATRIN 실험이 시작되어 마침내 중성 미립자의 무게가 얼마인 니까라는 질문에 답하게 될 것입니다.

저자:

루돌프 콘비츠니, 파이버 베콤, 아슬라;
베르너 헤르츠, 카를스루에 공과대학 기술 물리학 연구소;
우베 푸르만, 카를스루에 공과대학 기술 물리학 연구소;
라이너 헤거, 카를스루에 공과대학 기술 물리학 연구소;
프란츠 란징거, MAN DWE GmbH(현재 MAN Diesel & Turbo SE), 데겐도르프;
요하임 볼프, 카를스루에 공과대학 실험 핵물리학 연구소

원스톱으로 제공되는 진공 솔루션

파이버 베콤은 전세계에 걸쳐 혁신적인 고객 맞춤형 진공 솔루션, 기술적인 완벽성, 역량 있는 조언, 신뢰성 있는 서비스를 제공합니다.

완전한 제품군

간단한 구성품에서 복잡한 구성품까지:
당사는 종합적인 제품 포트폴리오를 제공하는 유일한 진공 기술 공급업체입니다.

이론과 실재를 바탕으로 갖춰진 뛰어난 역량

당사의 노하우와 교육 기회의 포트폴리오에서 얻을 수 있는 이점!
당사는 전세계에 걸쳐 플랜트 레이아웃을 지원하고 최고의 현장 서비스를 제공합니다.

완벽한 진공 솔루션을 찾고 계
십니까 당사로 문의하십시오.

파이버베콤 GmbH
본사 · 독일
전화: +49 6441 802-0
info@pfeiffer-vacuum.de

www.pfeiffer-vacuum.com

PFEIFFER  VACUUM

125
YEARS
NOTHING
IS BETTER