

수소용 나사 밀봉 솔루션 및 누출 방지

SIMONE ZANETTI, Henkel Italy 응용 분야 엔지니어링 분야

MIKE FEENEY, Henkel Canada 응용 분야 엔지니어링 분야

DAVID CONDRON, Henkel Ireland 제품 개발 분야

• 자료집

목차

요약 정보



소개
수소: 미래
지적인향에너지 솔루션



테스트 방법
수소 가스 누출 방지용
나사 실런트 테스트



결과



결론



참고



요약 정보

지속 가능성과 청정 에너지 대안의 추구가 점점 더 강조되는 시대에 그린 수소는 특히 강력한 솔루션으로 떠오르고 있습니다. 그러나 생산에서 유통까지 전체 수명 주기 전반에 걸쳐 누출을 최소화 또는 근절해야 할 필요성이 커지면서 잠재적인 안전 위험은 물론 경제적 부담도 커지고 있습니다.

수소 분자의 미세한 크기로 인해 발생하는 문제를 해결하면서 밀봉 상태를 유지하면서 연결하는 작업은 대단히 부담스럽습니다. 수소 관련 장비에서 나사형 연결부는 일반적으로 사용하지 않습니다. 대신 엔지니어는 밀봉 용접이나 더 비싼 연결 방법 채택과 같은 비용이 많이 드는 조립 프로세스에 의존하는 경우가 많습니다. 이 연구에서 당사는 나사 연결부의 누출을 효과적으로 방지하기 위한 탁월한 솔루션으로서 혐기성 나사 실런트와 나사 밀봉 코드의 효과를 보여주며, 지속 가능한 에너지 솔루션을 추구하는 과정에서 그린 수소를 원활하게 통합하는 데 핵심적으로 기여합니다.



소개

수소: 미래 지향인적에너지 솔루션

수소는 에너지를 저장하고 운반하는 유용한 수단입니다. 순수 분자 형태(H₂)의 수소는 지구상에서 드물기 때문에 전기 분해로 물에서 생산하거나 천연가스 및 석탄에서 생산해야 합니다. 생산 방법에 따라 달라지는 특정 조건에서 수소가 지속 가능한 에너지 솔루션이 될 수 있으며 환경에 더 큰 영향을 미치는 에너지원을 대체할 수 있습니다.

RSE 보고서 'Hydrogen. An Energy Carrier for Decarbonization'에 따르면, 그린 수소는 2050년까지 에너지 시스템의 완전한 탈탄소화를 위한 주요 옵션 중 하나입니다. 유럽연합 집행위원회(European Commission)는 그린 수소 사용이 2050년까지 에너지 경제의 13~14%로 증가할 것으로 예상하고 있으며, 국제에너지기구(International Energy Agency)는 2030년까지 전 세계적으로 약 250만 대의 수소차가 보급될 것으로 전망하고 있습니다.

이 부문의 개발은 다음과 같이 요약할 수 있는 수소의 내재적 특성으로 인해 확실히 선호됩니다.

- > 이는 자연에서 가장 풍부한 원소이며(우주 물질의 90% 이상이 수소로 이루어져 있음) 지구에는 이 요소가 매우 풍부합니다. 물의 모든 분자가 두 개의 수소 원자를 포함하고 있다는 사실을 생각해 보십시오.
- > CO₂를 방출하지 않고 인화성이 매우 뛰어나며, 연소 생성물이 물과 열인 기체입니다.
- > 에너지 밀도가 높습니다(수소 120 MJ/kg, 메탄 55.6 MJ/kg, 휘발유 47.3 MJ/kg, 경유 44.8 MJ/kg).
- > 대용량으로 장기간 보관할 수 있습니다.

수소는 중공업(주조, 철강, 화학, 석유화학, 비료 및 금 회사)



의 시약으로 사용되는

전통적인 용도부터, 탄소 배출량을 줄이기 어려운 부문(예: 섬유 또는 제지 공장)에서 산업용 열을 생성하고 전기를 생성 및 저장하며, 무거운 운송 수단에 동력을 제공하는 데 사용되기까지 활용 잠재력이 엄청납니다. 위에 언급된 RSE 보고서는 2050년까지 기존과 다른 용도로 수소가 점점 더 많이 도입될 것이라고 예측합니다.

국제에너지기구(International Energy Agency)의 데이터에 따르면 매년 7천만 톤의 수소가 생산됩니다.

천연가스에서 76%, 석탄에서 22%, 물 전기 분해로 2%가 생산됩니다(IEA, 2019). 따라서 모든 수소가 동일하지는 않으며, 생산 방식에 따라 일반적으로 다른 색을 띠게 됩니다. 따라서 화석 연료의 연소를 통해 생성되어 이산화탄소를 배출하는 경우 그레이 수소라고 하며, 화석 연료에서 생산되지만 탄소 포집 시스템을 통해 공해를 일으키는 공장의 온실가스 배출을 줄이거나 대기에서 직접 제거할 수 있는 경우는 블루 수소, 재생 에너지(예: 태양광 및 풍력)로 생산된 경우 그린 수소, 원자력 에너지로 생산된 경우 퍼플 수소라고 합니다. 그러므로 수소에 대해 일반적으로 말할 수는 없지만 생산 사슬을 연구하고 추적해야 합니다.

유럽 수소 전략에서는 2050년까지 탄소 중립 목표를 달성하기 위해 장기적으로는 통합 에너지 시스템을 육성하는 그린 수소를, 단기 및 중기 전환 단계에서는 수소 생산으로 인한 배출량을 빠르게 줄일 수 있는 블루 수소를 개발하며, 대규모의 지속 가능한 시장 개발을 추구하는 것을 최우선 과제로 삼고 있습니다. 이 프로세스에서 재생 가능 자원을 수소 생산에 통합하는 것이 중요한 역할을 하는 것은 분명합니다. 재생 에너지, 특히 풍력과 태양광은 예측 및 프로그래밍이 불가능합니다. 예를 들어 태양광 패널은 낮과 여름철에만 효율적

으로 작동하며 풍력 터빈은 바람이 있을 때만 가동됩니다. 따라서 특정 기상 조건이 없는 경우 시스템이 정지하고 에너지를 생산하지 않습니다. 에너지 생산량이 과도하게 발생하는 경우도 있고, 에너지 저장 용량이 부족해서 에너지 생산을 제한해야 하는 경우도 종종 있습니다. 따라서 수소는 재생 가능 에너지 생성을 완벽하게 보완하여 나중에 사용할 수 있도록 이 과잉 에너지를 저장할 수 있는 수단을 제공할 수 있습니다.

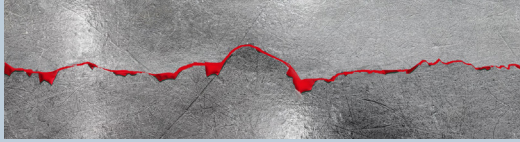
계절별 저장 문제를 해결하기 위해 가장 깨끗하고 효율적인 솔루션은 재생 가능한 에너지원을 사용하여 전기를 생산하고 전해조에서 물을 수소와 산소로 변환하는 데 사용하는 것입니다. 생성된 수소는 천연가스 네트워크를 통해 즉시 분배하거나 탱크에 저장했다가 필요할 때 전기뿐만 아니라 열 에너지로 다시 변환될 수 있습니다. 이는 자체 전력이 공급되는 폐쇄형 루프이며 산업 단계는 물론 스마트 시티 단계에도 적용할 수 있습니다.

수소 저장과 관련된 문제와 더불어, 운송은 수소 전환에서 중요한 문제 중 하나이기도 합니다.

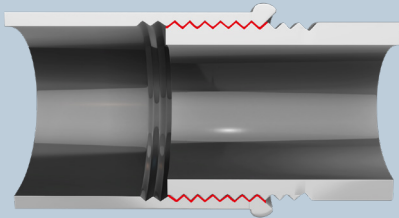
그 주된 이유는 지속 가능성을 보장해야 하기 때문입니다. 요즘 수소는 실린더 내의 압축 가스 형태, 극저온 탱크의 액화 형태 및 파이프라인에서 운송되는 형태로 수소 파이프라인을 통해 운송됩니다. 전용 파이프라인이나 천연가스와 혼합하여 운송하는 것이 최소한 서류상으로 가장 합리적인 옵션으로 보입니다.

수소 누출은 천연가스 파이프라인의 심각한 문제입니다. 수소는 가장 작은 구멍, 균열, 용접 이음매를 통해 메탄보다 훨씬 더 쉽게 누출될 수 있기 때문에, 이 가스의 운송 및 최종 저장은 연료 및 공급 원료로 더 널리 채택되는 데 주요 장애물로 작용하고 있습니다. 수소 투과 및 취화는 문제를 악화시킬 뿐입니다.

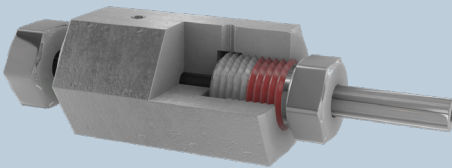




모든 금속 소재는 아무리 미세하게 가공되어도 표면 거칠기가 있습니다. 따라서 간섭 피팅과 같은 정확한 피팅에서도 부품 사이에 점점과 빈 공간이 생깁니다. 이는 특히 수소 분자와 같은 작은 분자의 탈출 경로를 만들 수 있습니다. 혐기성 접착제는 적용 후 고르게 분산되어 모든 공간을 채우고 부품 간 100% 접촉을 만들어 완벽하고 안정적인 밀봉을 보장합니다.



금속 피팅에서는 부품 간에 완전한 접촉이 이루어지지 않으면 피팅을 조립하는 것이 불가능합니다. 이러한 이유로, 공간을 채우고 완벽한 밀봉을 만들어 누출을 예방할 수 있는 제품을 고르게 도포하는 것이 필수적입니다. 혐기성 솔루션과 LOCTITE 55는 수소와 같이 가장 작은 분자를 밀봉할 수 있는 안정적이고 내구성이 뛰어난 솔루션을 제공합니다.



혐기성 접착제를 나사형 피팅에 적용하면 조립하는 동안 고르게 분산되어 완전하고 균일한 접촉 면적이 만들어지므로 안전하고 신뢰할 수 있는 밀봉이 보장됩니다.

천연 가스 누출률은 이미 미국환경보호청(Environmental Protection Agency)에서 추정된 것보다 높습니다. 미국 과학 저널(American Journal of Science)에 발표된 연구에 따르면 2015년 미국 메탄 공급망의 손실이 총 생산량의 2.3%로, EPA 재고 추정치보다 약 60% 더 높은 것으로 나타났습니다(Alvarez 외, 2018). 영국 정부의 의뢰와 케임브리지 대학교와 레딩 대학교의 과학자들이 작성한 백서 'Atmospheric implications of increased hydrogen use'(2022년 4월)에 따르면 H₂ 분자가 CH₄ 분자보다 작기 때문에 수소 누출률이 더 높을 가능성이 있습니다.



수소 배관의 나사 연결을 위한 비용 효율적인 밀봉 솔루션

이러한 이유로 나사 연결부는 밀봉 용접하거나 아예 사용하지 않는 것이 좋습니다. 이로 인해 나사 연결의 대안으로 더 비싼 부품을 사용하거나 밀봉 용접을 수행하는 데 필요한 숙련된 인력으로 인해 시스템에 상당한 비용이 발생합니다. 적절한 실린트를 사용하여 표준화되고 쉽게 구할 수 있는 나사 연결을 안정적으로 밀봉하면 이러한 비용을 피하거나 줄일 수 있습니다. 수소 배관 및 파이프라인에 대한 미국기계학회(ASME) 코드(B31.12-2023)에서 제공하는 가이드라인에 따라 나사 연결이 가능합니다. 테이퍼 나사 조인트(ASME B1.20.1에 따른 NPT)는 엔지니어링 설계에서 지정한 경우 설계 압력이 20,670kPa(3,000psig) 미만에서 최대 48,280kPa(7,000psig)인 시스템에서 사용할 수 있습니다(ASME, 2023).

혐기성 접착제 및 실린트는 수소 가스 밀봉 솔루션을 제공하기 위해 잘 배치되어 있습니다. 이 접착제는 공기가 없는 상태에서 금속 표면과 접촉했을 때 열경화성 플라스틱에 빠르게 경화되는 반응성 접착제입니다.

밀착된 피팅 금속 나사는 거의 완벽한 경화 조건을 만들기 때문에 기존 밀봉 방법의 여러 한계를 극복하는 이상적인 나사 밀봉 컴파운드가 될 수 있습니다. 액체 상태로 나사에 적용되므로 결합 나사 사이의 빈 공간 또는 불완전한 부분이 채워질 수 있습니다. 금속 나사 사이에 차단되었을 때 산소가 부족하여 재료가 액체 상태로 안정적으로 유지되지 않고 빠른 중합 후 두 구성품 사이에 기계적 결합을 제공하는 열경화성 플라스틱을 생성합니다. 밀봉 성능은 나사 사이의 압축에 따라 달라지지 않으므로, 어셈블리는 처음에 어떤 방향으로든 정렬될 수 있으며 조인트에서 압착된 여분의 재료는 닦아낼 수 있습니다. 즉, 조인트의 외관이 깨끗하고 대부분의 시스템에서 진동에 의한 풀림, 200° C의 높은 온도 및 최대 파열 압력 등급의 압력에 대한 저항을 제공합니다. 혐기성 나사 실린트와 가스 및 액체에 대한 밀봉 솔루션을 제공하는 기능에 대한 자세한 논의는 McGurk 외 백서에 나와 있습니다. [7].



테스트 방법

수소 가스 누출 방지용 나사 실린트 테스트

밀봉 솔루션의 호환성과 효과를 입증하기 위해 Henkel은 실험을 설계하고 외부 연구소와 계약하여 압력 강하 방법을 사용하는 세 가지 나사 실린트 재료에 대한 저압 수소 가스 누출 테스트를 수행했습니다. 또한 실린트는 전 세계적으로 가장 일반적인 파이프 나사 유형인 미국 표준 테이퍼 파이프(NPT) 나사와 영국 표준 파이프 테이퍼(BSPT) 나사를 모두 사용하는 어셈블리에 사용되었습니다. 300 시리즈 합금이 가스 전송 배관 시스템에서 가장 많이 사용되기 때문에 모든 어셈블리는 304 스테인리스 스틸 부품으로 만들어졌습니다(유럽 산업용 가스 협회(EIGA), 2014).

수소 실린트 테스트에 관한 참고 표준이 없기 때문에 다음과 같이 사용 가능한 표준을 기반으로 테스트 설정을 만들었습니다. ASTM D6396(파이프 티의 파이프 나사 실린트 테스트를 위한 표준 시험 방법), ASTM D1599(플라스틱 파이프, 튜브 및 피팅의 단시간 유압 압력에 대한 저항 표준 시험 방법), LOCTITE STM 772(이전의 두 가지 ASTM 기반), EN 751-1(1, 2, 3등급 가스 및 온수와 접촉하는 금속 나사 조인트용 밀봉 재료 - 파트 1: 혐기성 조인트 컴파운드).

이러한 표준을 기반으로 도구를 만들고 테스트를 위한 매개변수를 정의했습니다.

한 가장 일반적인 혐기성 실린트이며, LOCTITE 567은 NPT 테이퍼-테이퍼 나사 연결을 위한 가장 일반적인 혐기성 실린트입니다.

LOCTITE 55는 가장 일반적인 비경화 밀봉 원사로, 사용하기 전에 약간의 조정이 필요한 작업에 주로 사용됩니다. 세 가지 실린트 모두 천연가스에 대한 최소 한 가지 이상의 지역 승인에 따라 이미 인증을 받았습니다. 수소를 기존 천연가스 인프라에 혼합하는 방안이 모색되고 있기 때문에 이것은 중요한 고려 사항이었습니다.

테스트에는 두 가지 압력 단계가 포함되었습니다. 구체적으로 LOCTITE 55는 테스트 압력이 9bar(131psi)에서 10.3bar(150psi)로 증가한 반면 LOCTITE 567과 577은 20bar(300psi)에서 31bar(450psi)로 증가했습니다.

테스트를 위해 혐기성 나사 실린트(LOCTITE 577 및 LOCTITE 567)와 비경화성 나사 밀봉 코드(LOCTITE 55) 등 두 가지 유형의 나사 실린트를 선택했습니다. LOCTITE 577은 BSPT나 기타 직선(평행)-테이퍼 연결을 위

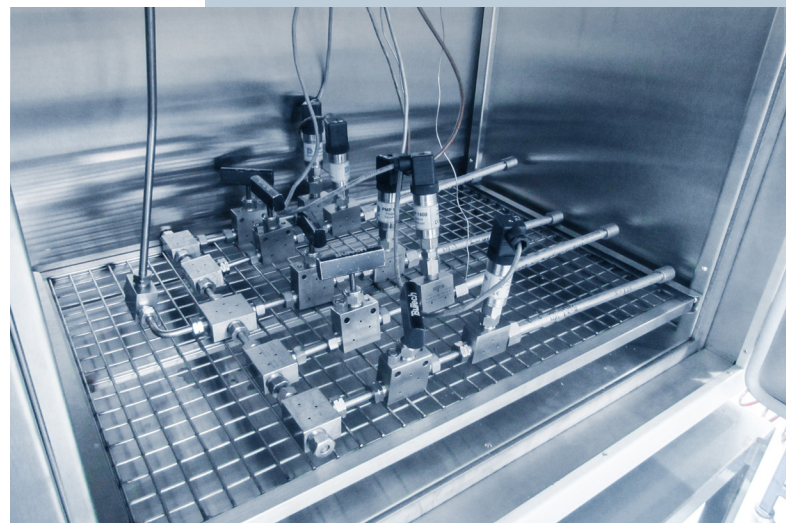


그림 1: 테스트

결과

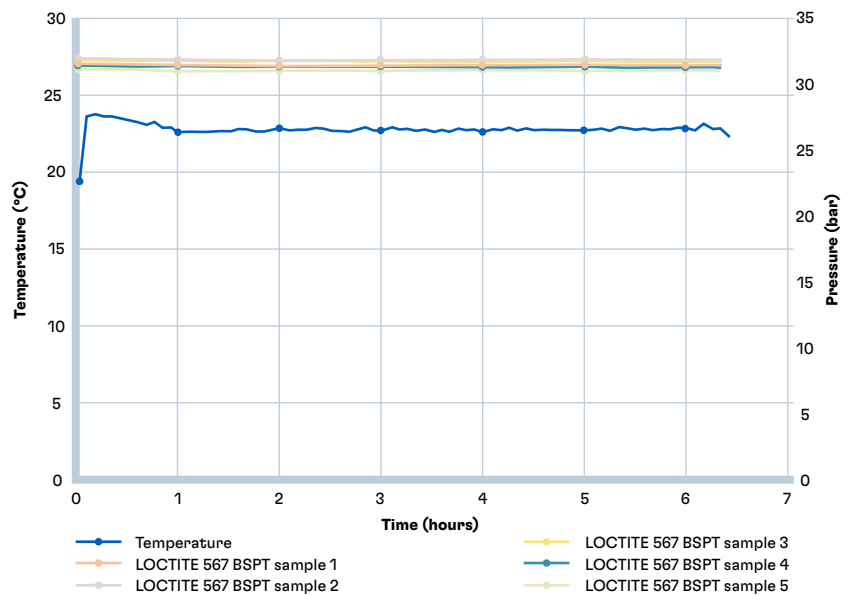
온도 및 압력은 각 테스트 전체에 걸쳐 기록되었습니다. 각 나사 실린트 재료에 대한 누출을 식별하기 위해 지점을 표시했습니다. 시스템 내의 가스량이 매우 작아서 압력 강하가 눈에 띄게 나타났습니다.



LOCTITE 567

그림 2에는 한 가지 압력 테스트 조건에서 LOCTITE 567에 대해 얻은 결과를 요약했습니다. 구체적으로 그래프는 BSPT 피팅 샘플에 대한 31bar 수소 압력 누출 테스트와 비교한 압력과 온도를 보여줍니다. 압력 감소가 관찰되지 않았으므로 누출이 발생하지 않았습니다.

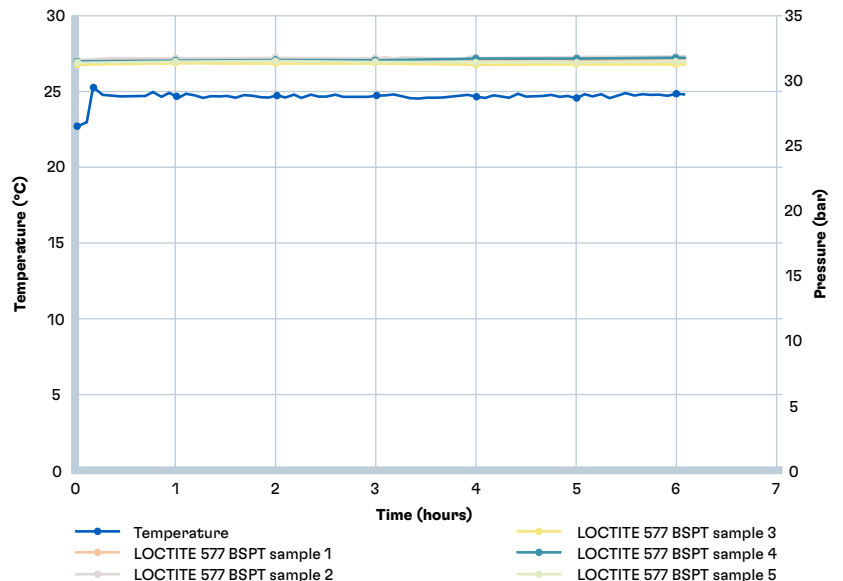
그림 2: 31bar 압력에서 LOCTITE 567 BSPT 피팅의 온도 및 압력 플롯



LOCTITE 577

그림 3에는 한 가지 압력 테스트 조건에서 LOCTITE 577에 대해 얻은 결과를 요약했습니다. 구체적으로 그래프는 BSPT 피팅 샘플에 대한 31bar 수소 압력 누출 테스트와 비교한 압력과 온도를 보여줍니다. 압력 감소가 관찰되지 않았으므로 누출이 발생하지 않았습니다.

그림 3: 31bar 압력에서 LOCTITE 577 BSPT 피팅의 온도 및 압력 플롯

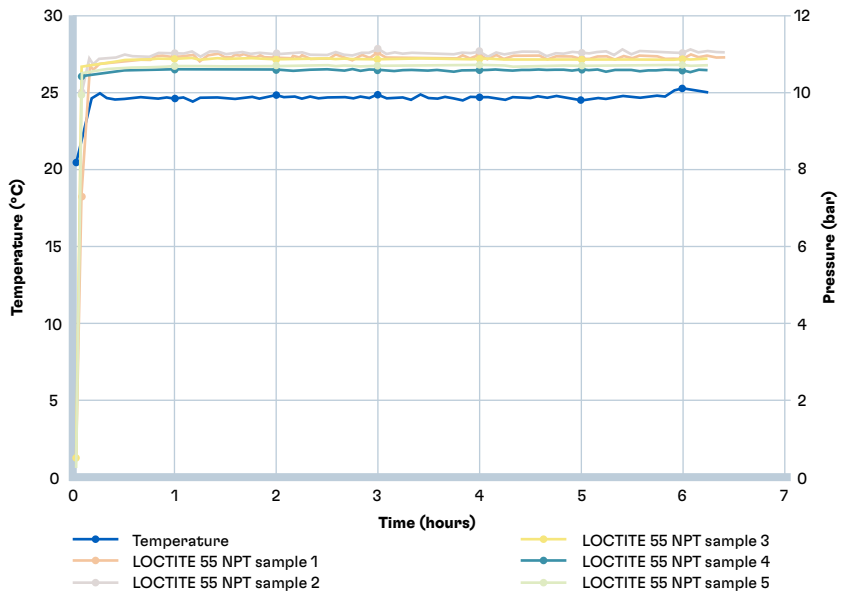




LOCTITE 55

그림 4에는 한 가지 압력 테스트 조건에서 LOCTITE 55에 대해 얻은 결과를 요약했습니다. 특히 NPT 피팅에 대한 두 번째 압력 테스트 조건인 10.3bar에서의 온도 및 압력 그래프를 보여줍니다. 큰 압력 감소가 없었으므로 누출이 없었다고 결론지을 수 있습니다.

그림 4: 10.3bar 압력에서 LOCTITE 55 NPT 피팅의 온도 및 압력 플롯



요약 표

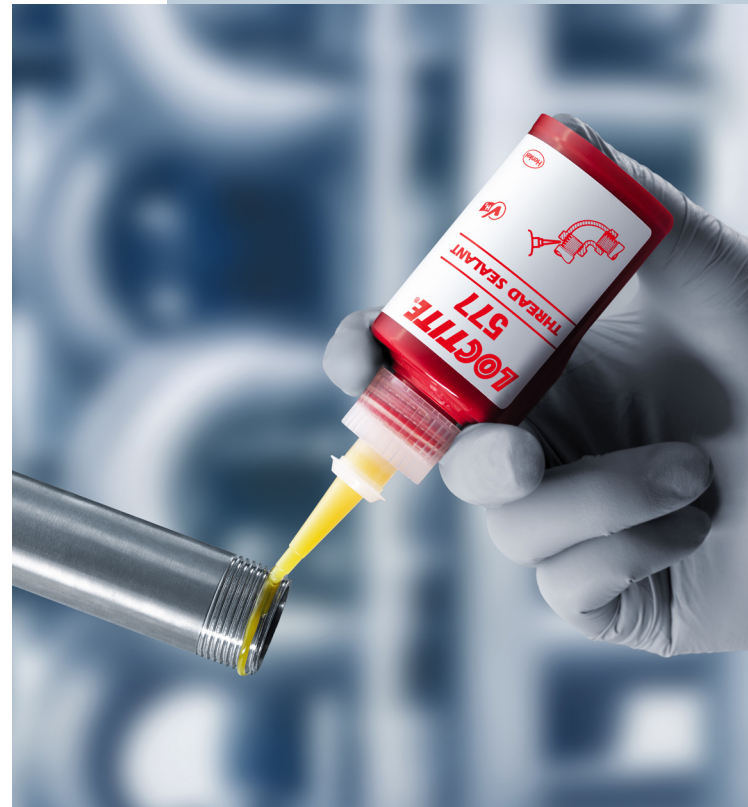
그림 5는 서로 다른 압력 및 다양한 유형의 NPT 및 BSPT 피팅에 대한 테스트에서 얻은 모든 결과를 보여줍니다.

어셈블리 테스트	실런트	테스트 압력(1 단계)	테스트 결과	테스트 압력(2 단계)	테스트 결과	가스 테스트
¼인치 NPT - 304 스테인리스 스틸	LOCTITE 55	131psi(9bar)	✓	150psi(10.3bar)	✓	수소
• 파이프 니플(길이 10인치)	LOCTITE	300psi(20bar)	✓	450psi(31bar)	✓	
• 커넥터	LOCTITE	300psi(20bar)	✓	450psi(31bar)	✓	
• 플러그	LOCTITE	300psi(20bar)	✓	450psi(31bar)	✓	
¼인치 BSPT - 304 스테인리스 스틸	LOCTITE 55	131psi(9bar)	✓	150psi(10.3bar)	✓	
• 파이프 니플(길이 12인치)	LOCTITE	300psi(20bar)	✓	450psi(31bar)	✓	
• 커넥터	LOCTITE	300psi(20bar)	✓	450psi(31bar)	✓	
• 플러그(316 스테인리스 스틸)	LOCTITE	300psi(20bar)	✓	450psi(31bar)	✓	

그림 5: 테스트 결과 요약 표

결론

- > 이 백서에 설명된 밀봉 테스트는 혐기성 나사 실런트와 LOCTITE 55 나사 밀봉 코드 제품이 나사 피팅의 수소 누출 방지를 위한 효과적인 밀봉 솔루션을 제공하는 방법을 보여주기 위해 수행되었습니다.
- > 압력 변환기는 압력을 측정하는 데 사용되었고, 0.05~0.1bar의 정확도로 압력 판독을 제공하기 위해 보정된 전기 출력을 제공합니다.
- > 모든 샘플을 성공적으로 테스트했습니다. 고려된 모든 압력에서 검사된 샘플 중 어떤 것에서도 유의미한 압력 강하가 발생하지 않았습니다.
- > LOCTITE 55 비경화 나사 밀봉 코드는 NPT 및 BSPT 피팅에서 최대 10bar(150psi)의 낮은 압력에서 수소 가스를 밀봉할 수 있는 솔루션을 제공한다는 결론을 내릴 수 있습니다.
- > 혐기성 경화 나사 실런트는 NPT 및 BSPT 피팅에서 31bar(450psi)의 압력으로 수소 가스를 성공적으로 밀봉했습니다. 사용 가능한 테스트 장비를 사용할 수는 없었지만, 이러한 제품은 경화되어 열경화성 폴리머를 형성하므로 훨씬 더 높은 압력에서 밀봉될 수 있을 것으로 예상됩니다.
- > 여기에서 테스트한 모든 제품은 LOCTITE 570 및 LOCTITE 638과 함께 AR 214에 따라 수소 밀봉 적용에 대한 Kiwa의 테스트와 인증을 받았습니다. 유럽에 소재한 Kiwa NV는 테스트, 검사, 인증 시장의 기관입니다.
- > 이 보고서에서 평가된 실런트는 수소 가스와 함께 사용하기 위해 나사형 피팅에 대한 편리하고 신뢰할 수 있으며 비용 효율적인 방법을 제공합니다. 또한 혐기성 나사 실런트는 중요한 자체 풀림을 방지하여 나사가 있는 연결부의 밀봉에 대한 추가적인 보안 층을 제공하는데, 이는 수소 가스와 관련된 인화성 위험을 고려하면 중요합니다.
- > 혐기성 나사 실런트 솔루션은 고압 수소 애플리케이션에도 사용되었습니다. 당사는 수소 나사 밀봉 작업에 최대 1,000bar의 혐기성 실런트를 사용하는 고객들을 알고 있습니다. Henkel은 이 문서를 작성하는 시점에 유사한 조건에서 실험실 테스트를 수행하여 고압 수소 환경에서 이러한 제품의 전반적인 적용 가능성을 검증하고 있습니다. 해당 테스트 결과에 관심이 있거나 작업을 위한 이러한 제품에 대해 자세히 알고 싶다면 이 문서의 작성자 또는 현지 Henkel 담당자에게 문의하시기 바랍니다.



참고

- [1] RSE 보고서 'Hydrogen. An Energy Carrier for Decarbonization', 2021년 1월
- [2] 국제에너지기구(IEA) 'The Future of Hydrogen' 2019년 6월
- [3] Ramón A. Alvarez, Daniel Zavala-Araiza, David R. Lyon, David T. Allen, Zachary R. Barkley, Adam R. Brandt, Kenneth J. Davis, Scott C. Herndon, Daniel J. Jacob, Anna Karion, Eric A. Kort, Brian K. Lamb, Thomas Lauvaux, Joannes D. Maasakkers, Anthony J. Marchese, Mark Omara, Stephen W. Pacala, Jeff Peischl, Allen L. Robinson, Paul B. Shepson, Colm Sweeney, Amy Townsend-Small, Steven C. Wofsy and Steven P. Hamburg, 'Assessment of methane emissions from the U.S. Oil and gas supply chain', 미국 과학저널(American Journal of Science), 2018년 6월
- [4] Nicola Warwick, Paul Griffiths, James Keeble, Alexander Archibald, John Pyle, 케임브리지 대학교 및 NCAS, Keith Shine, 레딩 대학교, 'Atmospheric Implications of increased hydrogen use', 영국 정부, 2022년 4월
- [5] 유럽 산업용 가스 협회(EIGA), 'Hydrogen Pipeline Systems', IGC 문서 121/14, 2014
- [6] 미국기계학회(American Society of Mechanical Engineers), 'Hydrogen Piping and Pipelines', B31.12-2023
- [7] GED McGurk, Mike Feeney, Siva Ayadurai, Oliver Droste, 백서 'High pressure leak prevention – improved performance and reliability from anaerobic thread sealing compounds', 2016년 3월



문의

Henkel AG & Co. KGaA

Henkelstraße 67
D-40589 Düsseldorf
전화번호: (+49) 211 797 0
팩스: (+49) 211 798 4008

www.henkel-adhesives.de
www.henkel.de

Henkel AG & Cie. AG

Salinenstr. 61
CH-4133 Pratteln
전화번호: (+41) 61 825 70
00
팩스: (+41) 61 825 73 03

www.henkel-adhesives.de
www.henkel.com

Henkel Central Eastern Europe GmbH

Erdbergstraße 29
A-1030 Wien
전화번호: (+43) 1 711 04 0
팩스: (+43) 1 711 04 4194

www.henkel-adhesives.de
www.henkel.at