

고온주변에서 사용되는 에틸렌-프로필렌-디엔 합성고무 봉인물질을 가진 솔레노이드구동밸브의 작동실패 사례 및 원인 분석

이준, 서재광, 박천태, 김영인, 윤주현
한국원자력연구소
e-mail : jlee@kaeri.re.kr

The Investigation for the Cases and Cause of the Failures of the EPDM Sealed SOVs Used in the High Temperature Circumference

J. Lee, J. K. Seo, C. T. Park, Y. I. Kim and J. Yoon
Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

EPDM 봉인물질을 가진 SOV의 작동실패 사례 및 원인을 분석해보면 많은 SOV 고장(SOV failures)은 결국 EPDM 봉인물질이 원인인 것으로 나타났다. SOV 고장은 SOV가 그것의 설계 범위를 초과하는 주위 온도(ambient temperature)에 노출되어 있었기 때문에 발생되었다. 그러한 SOV 고장은 증기 누설, 주위 온도의 부정확한 평가 등의 원인에 의해 발생되었다. 또한 SOV 고장은 연속적인 coil의 여기시 발생하는 가열(heatup from energization)로 인해 수명이 단축되는 영향이 서비스 수명 기간에 적절하게 포함되지 않았기 때문에 발생되었다. 많은 발전소 운영자는 이러한 사실을 알고 있지 못하였으며 결과적으로 서비스 수명 기간이 과도 예측되는 결과가 초래되었다. SOV의 또 다른 연성(Soft) 봉인물질로, 열저항 특성이 EPDM에 비해 약 50°C 정도 우수한 Viton 봉인물질에 대한 특성이 제시되었다. 더불어 현재 많은 국의 솔레노이드구동밸브 전문 생산업체들이 Viton 재료를 옵션으로 채택하고 있는 추세이다. 그러나 고온주변에서 지속적으로 노출되어 있는 환경에서 Viton이 EPDM의 문제점을 어느 정도 해결할 수 있는지의 여부는 현재 결론내리기 어려울 것으로 판단되며, 향후 이를 채택한 SOV의 운전경험을 계속 주시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

1. 서론

일반적으로 SOV(Solenoid Operated Valve)는 타 구동자로 구동되는 밸브(MOV, POV 등)에 비해 많은 장점을 지니고 있으며 그 내용은 아래와 같다.

- o No motor control center or power cable
- o No pneumatic system to build and maintain (No instrument air or backup nitrogen supply)
- o Zero emission applications (Leakless to the environment)
- o Fail safe (Failed to either the open or close position upon loss of electrical power) or fail as is
- o No packing or bellows to fail (All moving parts

are inside the valve's pressure boundary. No stem - no packing to wear, no bellows to break)

- o High reliability (Few moving parts to wear)
- o Small size and weight for large flow
- o Minimal power draw

그러나 많은 장점을 지니고 있음에도 불구하고, SOV가 타 구동자로 구동되는 밸브에 비해 고온 환경의 산업용분야에서는 널리 사용되고 있지 않으며 이러한 사실은 주목할 만 하다.

일반적으로 SOV는 연성(Soft) 봉인물질로는 폴리머(Polymer)의 일종인 Silicon이나 EPDM(Ethylene-Propylene-Diene rubber)이 사용되며 FPM(Fluoro

Rubber)이 사용되는 경우도 있다. 본 논문에서는 상기 봉인물질의 특성을 검토하고 나아가 EPDM 봉인물질로 인한 SOV의 작동실패 사례 및 원인을 분석하고자 한다.

2. SOV의 연성(Soft) 봉인물질의 특성

일반적으로 SOV는 연성(Soft) 봉인물질로는 폴리머(Polymer)의 일종인 Silicon이나 EPDM이 사용되며 FPM이 사용되는 경우도 있다. Table 1은 국내 특수고무 전문 생산업체에서 제공되는 Silicon 및 EPDM, FPM의 주요 특성을 나타낸다.

Silicon의 경우 어떤 형태의 다른 탄성체보다도 일반 범용으로 널리 쓰이고 있으며 고도의 신뢰성과 안정성을 요하는 방위 산업 및 항공산업, 자동차와 그 응용분야에서 널리 쓰이고 있다. 또한 자체의 우수한 전기적 특성으로 고도의 전기전자 산업에서도 널리 응용되어 쓰이고 있다. 우수한 탄성을 갖고 있어 탄성을 요하는 부품에 사용될 경우에 탄성을 고려해서 설계하지 않아도 좋은 만큼 우수하다. 조건에 따라서는 230~250℃까지 사용할 수 있다. 다수의 다른 고무와 비교해서 최고의 전기적 성질을 가지며, 전기절연재료로써 뛰어난과 함께, 탄성, 뒤틀림, 내후성, 내오존성 등도 좋다. 그러나 기계적 강도가 작기 때문에, 까다로운 동적 조건에서는 고강도 Silicon 고무를 사용하는 것이 바람직하다. 또한, 고온의 밀봉상태나 증기 중에서는 가수분해를 일으키기 쉬운 점, 가스투과성에서는 고무 중에서 가장 통풍성이 크다는 점^[2] 등이 단점(또는 용도에 따라 장점)이다. 따라서 SOV가 저압의 물이나 가스 환경에서 사용되는 경우에는 SOV의 연성 봉인물질로서

Silicon이 사용되고 있다.

EPDM의 경우 내오존성, 내후성, 내열성, 내용제성 등이 뛰어나고 다른 합성고무에 비하여 비중이 작으며, 충전제, 오일 등의 고충전이 가능하여 경제성이 매우 뛰어난 합성고무이다.^{[2][3]} 그러나 Table 1에서 볼 수 있듯이 내열성이 3가지 재료 중 가장 낮은 점이 단점이다.

FPM의 경우 Fluoro Rubber라는 합성고무인데 일명 Viton rubber라고 한다. FPM은 특수한 물성으로 내열성, 내한성, 내유성, 내약품성이 가장 우수하여 국방병기, 고도의 산업기계, 인공위성 등 특수하게 사용되는 합성고무이다. 불소원자를 50%이상 함유하고 있는 고무로 내열성으로는 200℃에서도 물성의 저하가 적고, 장시간의 사용에 견디며, 조건에 따라서는 300℃ 이상에서도 단시간이면 사용할 수 있다.^{[2][4]}

Viton을 최초 개발한 DuPont사의 자료에 의하면 Viton의 열저항 특성은 Figure 1에서 볼 수 있다.

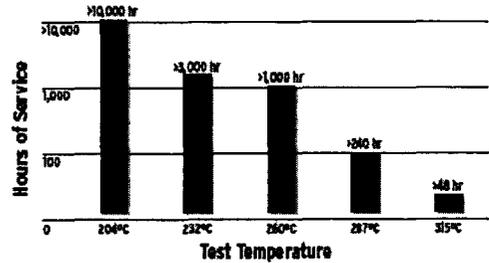


Figure 1 Heat Resistance of Viton^[5]

또한 DuPont사의 3가지 재료에 대한 비교표에 의하

Table 1 Properties of Silicon, EPDM, and FPM

| Silicon | EPDM | FPM | | Silicon | EPDM | FPM |
|------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 고도의 내열성과 내한성, 내유성이 좋다. | 내노화성, 극성액체에 대한 전기적 성질이 좋다. | 최고의 내열성과 내약품성이 좋다. | 주요특징 | '좌동' | '좌동' | '좌동' |
| 0.96-0.98 | 0.86-0.87 | 1.80-1.82 | 비중 | 0.95-0.98 | 0.86-0.87 | 1.80-1.82 |
| 40-100 | 50-200 | 70-200 | 인장강도(kg/cm ²) | 30-110 | 50-200 | 70-150 |
| 50-500 | 100-800 | 100-500 | 신장률(%) | 100-500 | 100-500 | 100-300 |
| A | B | C | 반발탄성(%) | A | B | C |
| D | B | A | 내마모성 | C | C | B |
| 280 | 150 | 300 | 최고 온도(°C) | 250 | 140 | 200 |
| D | B | B | 내굴곡연성 | B | B | B |
| A | A | A | 내노화성 | | | |
| C | A | A | 내가스투과성 | D | C | B |

*국내 D1사 자료(A:우수 B:양호 C:별로좋지않음 D:나쁨.) *국내 D2사 자료(A:우수 B:양호 C:가 D:불가)

면 최대 연속 서비스 온도가 Silicon은 204℃, EPDM은 150℃, Viton은 204℃로 나타나 있다. EPDM과 Viton의 온도차는 약 50℃ 정도이다. 참고로 비교표의 주석에는 일반 안내 자료이며 설계 결정 자료로 이용하지 말 것을 언급하고 있다.

한편 이들 재료를 사용하는 국외 솔레노이드구동밸브 전문 생산업체인 영국 A사의 자료에 의하면 연성 봉인물질로 EPDM이나 Viton을 사용하는 경우 미디어의 최대온도를 80℃ 정도로 제시하고 있다. 일부를 제외한 대부분의 국외 솔레노이드구동밸브 전문 생산업체에서는 상기 경우의 최대온도를 공개 자료에서는 제시하고 있지 않는 실정이다.

3. EPDM 봉인물질을 가진 SOV의 작동실패 사례 및 원인⁶⁾

SOV의 운전경험으로부터 얻어진 온도와 관련된 작동실패 사례를 원인별로 분류하면 주위 온도(ambient temperature), 여기서 가열(heatup from energization) 등 크게 2가지 경우이다. 원인별로 작동실패 사례를 1개씩 살펴보면 다음과 같다.

첫 번째, 주위 온도(ambient temperature)로 인한 작동실패 사례를 살펴보면 미국 Perry plant에서 있었던 사건으로, 발전소 이차측 주증기격리밸브(MSIV) 개방 시간 시험을 수행하던 중에 8개의 밸브 중 3개가 기술사양서에서 정해져 있는 5초 이내에 닫히는데 실패하였다. 계속되는 재시험 동안에 3개의 밸브는 모두 5초 이내에 닫혔으며 기술사양서를 만족하였다. 그러나 다시 재시험이 수행되었으며 재수행 결과 2개의 밸브가 5초 이내에 닫히는데 실패하였으며 그 밸브들은 상기 처음 시험시 닫히는데 실패했던 밸브들이었다. 1개는 2분 49초가 지나 닫혔으며 다른 1개는 18초가 지나 닫혔다. 추가적으로 재시험이 또 수행되었으며 이때는 다시 모두 정상적인 결과가 나타났다.

MSIV의 고장에 대한 근원적인 원인을 추적한 결과, 상기 MSIV의 고장은 SOV(xx co. dual-coil Model NP8323)가 비여기시 위치를 이동시키는데 실패하였기 때문인 것으로 나타났다. 위치를 이동시키는데 실패한 이유는 EPDM 시트 및 디스크의 기능퇴화인 것으로 나타났으며, 이 기능퇴화 이유는 증기 누수의 결과로서 SOV 주위에 가해진 고온의 영향 때문인 것으로 나타났다(excessive heat from steam leaks).

두 번째, 여기서 가열(heatup from energization)

로 인한 작동실패 사례를 살펴보면 미국 Grand Gulf 1 plant에서 있었던 사건으로, 발전소 정지시 1개의 MSIV가 닫히는데 실패한 사건이 발생되었다. 이 밸브는 약 30분이 지나 닫혔다. MSIV의 고장은 SOV(xx co. dual-coil Model NP8323)의 고장 때문인 것으로 나타났다. 발전소 운영자는 SOV 출구 포트에 위치하고 있는 SOV 디스크에서 EPDM의 1조각을 발견하였으며, 그 조각은 SOV 내부부품 내에 위치하고 있었고 그로 인해 SOV가 제어 공기를 배기하지 못하였으며 결국 MSIV가 닫히지 않았다고 결론지었다.

주 증기 라인에 있는 8개의 MSIV를 검사한 결과 모든 SOV의 시트가 갈라진 틈을 가지고 있었으며 기능퇴화 상태인 것으로 나타났다. 그러나 8개 중 6개의 SOV에서 배기 포트(exhaust port) 시트의 높아져 있는 부분이 보이지 않았으며 시트로부터 물질이 벗겨져 있는(sloughing) 것처럼 보였다.

이 고장은 SOV의 배기 포트의 배기 홀(vent hole) 속으로 밀어내져 들러붙은 1조각의 EPDM 디스크 물질에 의해 야기된 것으로 여겨졌다. 또한 정상상태시 여기 되어 있는 SOV가 비여기 되었을 때 상기 밀어내져 들러붙은 물질이 접착력과 마찰력으로 인해 디스크에서 떨어져 나오게 되고 결국 그 부분이 찢겨져 나가게 되었다(thermal aging by self-heating from energization).

그러나 상기 찢겨져 나가는 현상은 이전에 발견된 적이 없었던 사건이었다. 찢겨져 나가는 현상과 전반적인 기능퇴화 현상은 EPDM 물질이 고온에 과도하게 노출되어 있을 때 발생하는 열적 기능퇴화의 징후를 나타내는 현상이다. EPDM 디스크는 dual coil의 여기로 인해 높아진 온도에서 운전되고 있었다. EPDM 디스크 주위의 SOVs내의 국부적인 온도는 약 152~163℃이었다. SOVs는 약 4년 반 동안 운전되고 있었다.

그러나 기능퇴화 된 EPDM 디스크의 품질 보증 기간은 환경온도 52~57℃에서 약 2.2~3.2년인 것으로 평가되었다.

4. 결론

EPDM 봉인물질을 가진 SOV의 작동실패 사례 및 원인을 분석해보면 많은 SOV 고장(SOV failures)은 결국 EPDM 봉인물질이 원인인 것으로 나타났다.

SOV 고장은 SOV가 그것의 설계 범위를 초과하

는 주위 온도(ambient temperature)에 노출되어 있었기 때문에 발생되었다. 그러한 SOV 고장은 증기 누설, 주위 온도의 부정확한 평가 등의 원인에 의해 발생되었다. 또한 많은 SOV 고장은 연속적인 coil의 여기서 발생하는 가열(heatup from energization)로 인해 수명이 단축되는 영향이 서비스 수명 기간에 적절하게 포함되지 않았기 때문에 발생되었다. 많은 발전소 운용자는 이러한 사실을 알고 있지 못하였으며 결과적으로 서비스 수명 기간이 과도 예측되는 결과가 초래되었다.

SOV의 또 다른 연성(Soft) 봉인물질로, 열저항 특성이 EPDM에 비해 약 50℃ 정도 우수한 Viton 봉인물질에 대한 특성이 제시되었다. 더불어 현재 많은 국외 솔레노이드구동밸브 전문 생산업체들이 Viton 재료를 옵션으로 채택하고 있는 추세이다. 그러나 고온주변에서 지속적으로 노출되어 있는 환경에서 Viton이 EPDM의 문제점을 어느 정도 해결할 수 있는지의 여부는 현재 결론내리기 어려울 것으로 판단되며, 향후 이를 채택한 SOV의 운전경험을 계속 주시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 동광특수고무 자료
- [2] 대성특수고무 자료
- [3] 평화약품 자료
- [4] 동진산업 자료
- [5] DuPont사 자료
- [6] NUREG-1275, Vol. 6, "Operating experience feedback report, solenoid-operated valve problems", NRC, February, 1991.