

구조 기술자를 위한 고무기술의 이해



서 사 범

한국철도시설공단
일반철도궤도처장/
공학박사 · 철도기술사

1. 머리말

고무(rubber)는 100년 간에 걸쳐 오랫동안 공학적으로 응용되어서 사용되어 왔다. 천연고무와 합성고무는 제조자가 시방서를 엄밀하게 충족시켜야 하는 타이어, 벨트 및 호스의 공학 재료로서 수십 년 동안 사용되어 왔다. 그러나, 시방서는 일반적으로 고무 합성물의 설계기술에 숙련된 고무 기술자들이 선택하고 컨트롤하여 왔다. 특히, 자동차 산업계에 의한 고성능 합성 엘라스토머의 도입과 승인은 구조기술자와 설계자가 난해한 고무 기술을 더 좋게 이해할 필요가 있게 만들었다. 이 지식이 없이는 구조기술자와 설계자가 합리적인 비용으로 고성능 합성 엘라스토머의 엄격한 요구 조건을 충족시키는 생산 시방서를 준비하는 것이 불가능하다.

고무는 흔히 동적 조건에서 사용하는 재료이며 응력과 스트레인간의 관계 및 응력 릴랙세이션, 피로와 파괴(fracture)를 컨트롤하는 메커니즘의 이해는 상당히 진보

되었다. 시방서를 준비할 때 경도, 절손시의 신율 및 극한 인장강도와 같은 단순한 성질만을 고려하는 것은 더 이상 충분하지 않다. 고무가 실제 사용되는 조건 하에서의 고무의 거동도 또한 고려하여야만 한다. 이 요구 조건은 더 세련된 최종 사용자가 생산 제조자에게 전적으로 의지하기 보다는 오히려 최종 사용자의 자체 실험실에 동적 시험 설비를 설치하도록 이끌었다.

고무 기술자들은 그들 자신의 용어와 표현법을 사용하기 때문에 구조 기술자들과 구조 설계자들은 고무 기술자들이 사용하는 용어와 표현법을 상호 관련시킴에 있어 아직도 여전히 어려움을 갖고 있다. 예를 들어, 인장강도, 경도, 신율 및 크리프는 구조 기술자들에게 친숙한 용어이지만, 고무 생산 기술에서는 그들의 의미가 흔히 아주 다를 수 있다. 본고는 상기의 차이를 설명하고 고무로 만든 구성요소를 만족스럽게 설계하는데 도움을 주게 될 기본정보를 마련하기 위한 시도이다. 본고는 특히 고무 기술자와 구조기술자가 사용하는 기술의 차이를 설명하는 것에 가치가 있다.

2. 고무는 단순한 재료가 아니다.

고무는 대충 '탄성(elastic)'의 성질을 나타내는 재료로서 묘사된다. 일반적으로, 그러한 재료는 '엘라스토머(elastomer)'란 대안의 이름으로 이끈 '폴리머(polymer, 중합체)' 및 탄성(elastic)과 폴리머의 결합으로 알려진 긴 연쇄 분자(long chain molecule)이다.

고무나 엘라스토머의 이해하기 쉬운 정의는 실내 온도에서 적어도 원래 길이의 두 배까지 반복하여 잡아 늘릴 수 있고 응력의 즉각적인 이완과 동시에 대략 최초 길이로 되돌아가는 재료이다.

고무는 단순한 재료(simple material)가 아니다. 게다가, 고무는 시간이 흐름에 따라 성질이 변화하고, 사용하려고 하는 환경의 영향을 받는 재료이다. 금속은 부식을 받게 되지만 고무는 열, 기름, 화학제품, 햇빛 및 날씨와 접촉하여 열화될 수 있다. 실험실 시험으로부터 외관상으로 적절한 고무 합성재가 사용 조건에 수개월 동안 노출된 후에 아주 불만족스럽게 될 수도 있다. 예를 들어, 만일 신발이 보통의 조건 하에서 마모되는 것으로 되어 있다면 표준 마모시험은 고무 힐과 밑창에 대한 마모 성질의 아주 확실한 지표이다. 그러나, 신발이 얼마 동안 기계 공장, 주유소 또는 기타 오일 취급소에서 마모된 후에는 동일 시험이 전적으로 다른 결과를 제공할 것이다.

또 다른 문제는 고무 합성재의 물리적 성질이 강(鋼)이나 시험조건에 따라서 콘크리트 성질 시험보다도 훨씬 더 많이 변한다는 점이다. 예를 들어, 온도의 영향을 고려하자. 100°C에서의 고무 합성재의 인장강도는 28°C에서 시험한 동일 합성재의 10 내지 20% 만큼이나 작을 수도 있다. 하중의 적용 시간도 또한 영향을 준다. 빠른 재하의 조건 하에서 고무 합성재의 주어진 신장을 산출하기 위하여 필요한 하중은 저속의 재하에서 시험할 때에 필요한 것보다 세 배만큼이나 클 수도 있다. 더욱이, 또 다른 요인은 이전의 응력 이력(history)이다. 반복된 재하 사이클은 측정된 성질 값의 상당한 변화로 귀착될 수도 있다.

고무 성질간의 상호관계도 혼동될 수 있으며, 예를 들어

강(鋼)에서 친숙한 관계의 반대일 수도 있다. 예를 들어, 강(鋼)의 경도 증가는 인장강도의 증가에 수반된다. 두 가지의 상호관계는 아주 밀접하며, 잘 알려져 있다. 그러나, 고무에서는 이 관계가 전혀 유지되지 않는다. 경도가 증가함에 따라 고무의 인장강도는 최대까지 증가하고 그 다음에 감소할 수도 있으며, 또는 합성재의 공식화에 좌우되어 처음부터 감소될 수도 있다.

3. 실험실 시험

고무 산업에서 실험실 시험(laboratory test)은 일반적으로 설계 정보를 마련하기 위해서라기보다는 만족스럽고 재현할 수 있는 제품을 확보하기 위하여 사용한다. 예를 들어, 실험실 시험으로 측정된 고무의 인장 성질은 실제 사용성에 대한 직접의 관계가 설사 있더라도 조금밖에 없으며 설계 계산에 거의 영향을 주지 않는다. 유사하게, 고무의 샘플을 이동 연마재 표면(샌드페이퍼, 또는 금강사 휠)에 닿게 하는 마모의 표준 실험실 시험은 모래 뿜기(噴砂)용 호스로 사용하는 고무에 대하여 완전히 잘못된 결과를 준다. 모래 뿜기 호스는 단단한 연마재 표면에 대한 것보다는 오히려 연마재 흐름을 겪으며, 실제 사용에 가장 좋은 것으로 입증된 그들의 합성재는 표준 실험실 시험에서는 확실히 열등하다.

이들의 어려움은 실험실 시험이 불필요하다고는 의미하지 않는다. 이해를 함으로써 함정을 피할 수 있으며, 믿을 수 있고 유용한 정보를 얻을 수 있다. 시험은 합성재가 현장 시험의 비용을 정당화하는지를 결정하기 위하여, 그리고 심히 부적당한 것들을 제거하기 위하여 사용할 수 있다. 또한, 합성재가 쓸모 있는 것으로 일단 입증되었다면, 상업 제품의 균일성을 보장하기 위해서는 물리적 시험 데이터가 필요하다.

본고는 필요한 기초 지식을 제공하려고 시도할 것이다. 그러나, 고무 제품의 실제사용성은 실제의 사용에 의하여, 또는 좋게 모의 실험한 실제사용 시험에 의하여만 정밀하게 예측할 수 있다.

4. 경도

경도는 가장 유용하고 흔히 인용되는 고무 성질의 하나이지만 사실상, 숫자가 아주 오해하도록 이끌 수 있다. 첫째로, 특히 듀로미터로 측정된 값은 기구의 기계적 한계 때문에, 그리고 조작자의 실수 때문에 종종 신뢰할 수 없다. 그러므로, 경도는 결코 5도(度)보다 더 좋게 인용되지 않을 것이다. 둘째로, 측정되는 특성, 표면의 움푹 들어감은 적당한 기능에 대한 고무 제품의 능력과 아무런 관계가 없다.

의미의 부족은 호스커버, 세공하지 않은 플랜지간에 사용하려는 가스켓 및 자동차 마운팅 등 세 가지 제품을 고찰함에 의하여 가장 잘 이해할 수 있다. 호스커버 표면을 움푹 들어가게 함의 쉬움이나 어려움은 유용성을 주는 것이 아무 것도 없다는 점이 아주 명백하다. 호스커버의 중요한 성질은 마모 저항과 기름, 기후 및 실제사용에 관련되는 기타 조건에 대한 저항이다. 가스켓의 경우는 표면의 움푹 들어감이 어떤 중요성을 가지기 때문에 별나다. 시험 기구의 포인트에 의한 움푹 들어감은 가스켓이 실링 표면상의 돌출로부터 받게 될 움푹 들어감과 어느 정도까지는 유사하다.

상기의 경우에 경도에서 생기는 그릇된 중요성의 위험은 많지 않지만, 모터 마운팅의 경우에는 위험이 아주 현실적이다. 모터 마운팅은 하중을 받치기 위하여 필요한 수많은 고무제품의 전형이며 강성(stiffness)이라 부르는 하중과 변형간의 관계가 크리티컬 설계 요소이다. 경도는 강성의 정밀한 척도인 것으로 가정할 수 없다. 경도와 강성은 둘 다 응력-스트레인의 관계이지만 두 개의 전혀 다른 종류의 변형에 대한 상호관계가 성립된다. 경도 측정은 표면의 작은 변형으로부터 도출한다. 강성 측정은 전체질량의 총 변형에서 도출한다. 이 차이 때문에 경도는 신뢰할 수 있는 강성의 척도가 아니다. 비록 경도와 강성이 더 좋은 상호관계를 가졌을지라도, 듀로미터 읽기의 바꿀 수 없는 5도(度) 변동은 예를 들어 압축 변형시험으로 측정된 강성의 15~20% 변동에 상당할 것이다. 그러므로, 경도 측정

은 설계목적으로는 충분히 정밀하지 않을 것이다.

강성의 측정에 대한 경도의 오용은 아주 흔하며 많은 혼동을 일으킨다. 가능하면 언제나 경도시험기보다는 오히려 모의실험의 실제사용 시험을 이용하여야 한다.

5. 인장 응력—스트레인

고무산업에서 사용하는 인장강도, 신율 및 탄성률(modulus)의 정의는 다음과 같다.

인장강도(tensile strength)는 시편, 통상적으로 평평한 아령형을 잡아당겨 파손 점까지 도달한 최대인장 응력이다. 요구된 힘은 관습에 의하여 시험길이의 원래 횡단면의 단위 면적당 힘으로 나타낸다.

신율(elongation), 또는 스트레인(strain)은 시편에 가해진 인장력에 의하여 생긴 기준점간의 신장이며 기준점간의 원래 길이의 백분율로서 나타낸다. 파손시의 신율, 또는 최종 신율은 절단 순간의 신율이다.

인장응력(tensile stress), 또는 탄성률(modulus)은 어떤 신율을 생기게 하기 위하여 필요로 하는 응력이다. 따라서, 만일 7MPa의 응력이 200%의 신율을 생기게 한다면 고무는 7MPa의 200% 탄성률을 갖고 있다고 말한다.

고무의 응력은 금속과 달라서 스트레인에 직접 비례하지 않으며, 그러므로 탄성률은 어떤 스트레인에서의 응력이다. 그것은 비율도 상수도 아니며 단지 응력-스트레인 곡선상에서 한 점의 좌표이다.

강과 기타 금속에 대한 탄성률은 응력을 스트레인으로 나눈 것(영률, Young's modulus)이며 비율일 뿐만 아니라 상수이다.

인장강도와 신율은 합성재의 개발, 제작 컨트롤을 위하여, 그리고 각종 화학제품의 공격에 대한 합성재의 저항을 사정하기 위하여 고무 기술자에게 유용하다.

인장시험은 각종 합성성분의 효과를 사정하는 수단으로서 보편적으로 사용하며, 그러한 성분이 고무 가황의 율과 상태에 영향을 줄 때 특히 유용하다.

마찬가지로, 일단 합성재가 선택되었다면 생산품질을

컨트롤함에 있어 인장시험이 유용하다. 시험은 제조조건
의 변화에 민감하며 가황 이상, 또는 가황 미만, 불량혼합
및 이물질의 존재를 확인하기 위하여 사용한다.

인장시험은 또한 열, 기름, 오존, 기후, 화학제품 등에
기인하여 열화되기까지 합성재 그룹의 상대 저항력을 사
정하기 위하여 노출시험 전과 후에 행한다. 작은 양의 변
형조차 인장 성질에서 감지할 수 있을 만큼의 변화를 일으
킨다. 그러나, 인장성질의 '유지'는 폭로 시험 전과 후에
절대값보다 훨씬 더 의의가 있다는 점에 유의하여야 한다.
예를 들어, 만일 어떤 고무의 인장강도가 기름에 노출된
후 21에서 14MPa로 떨어지고 두 번째 고무에 대한 하강이
12에서 11MPa까지이라면, 두 번째의 것이 실제 문제로서
더 성공적임직하다. 인장강도의 뛰어난 유지는 또한 두 번
째의 고무가 그것의 다른 성질 대부분을 계속 유지할 것이
라도 좋은 지표이다.

인장 성질은 고무기술자에게 유용함에도 불구하고 설계
나 적용 기술자에 대해서는 제한된 사용의 것이다. 실제
문제로서 인장 성질을 설계계산에 사용할 수 없으며, 인장
성질은 성능과의 관계를 거의 갖지 않는다. 고무 구성요소
는 좀처럼 인장으로 재하되지 않으며 결코 그들의 극한 강
도나 신율에 접근할 정도로 재하되지 않는다. 벨트, 호스,
O링, 마운팅, 패키 등은 1MPa 이상의 인장 응력을 받는
일이 드물며, 그러므로 그들의 극한 인장강도가 10MPa인
지 20 MPa인지는 그들의 기능을 수행하는 능력에 거의
영향을 줄 수 없다.

인장 성질의 어떤 것도 신뢰할 수 있는 고무 품질의 지
표가 아니다. 7MPa 아래의 인장강도를 가진 합성재는 통
상적으로 대부분의 기계적 성질에서 다소 열등하며 인장
강도가 21MPa보다 큰 것들은 좋은 기계적 성질을 갖고 있
는 것이 진실이다. 그러나, 고무제품의 대부분을 포함하는
중간 범위, 이를테면 10에서 20MPa까지의 인장강도와 탄
성, 마모저항, 압축변형 및 굴곡수명 등의 성질간 상호관
계는 기껏해야 우연한 일이다.

중양 범위에서 동일한 인장 강도와 신율을 가진 두 원료
를 합성하는 것은 가능하지만, 실제사용 수명에서 아직 유

사성을 발견하지 못하였다. 이것은 특히 다른 고무들은 비
교하는 경우에 사실이다. 예를 들어, 천연고무에 바탕을
둔 타이어의 접지면은 흔히 31과 34.5MPa 사이의 인장강
도를 가지며, 반면에 합성고무로 만든 동등한 실제사용 수
명을 가진 접지면은 17 MPa 이하의 인장 강도를 가질 수
도 있다.

인장 성질을 과다 명시하는 고무 제품의 구매자는 그들
이 지불하는 가격이 불필요하게 높다는 점이나 더 중요할
지도 모르는 다른 성질을 그들이 희생시키고 있다는 점을
깨달을지도 모른다. 만일, 원래 사양보다 더 낮은 인장강
도와 신율을 갖는 일이 일어난다면, 구매자는 확정된 제품
에 대하여는 흔히 새로운 합성을 고려하지 않을 것이며,
그것은 그들의 적용에 관해서는 실제로 더 좋다. 다시 한
번, 고무 사양은 독단적인 물리적 시험보다는 오히려 성능
에 기초하여야 한다는 점을 강조하는 것이 필요하다.

6. 영구변형

고무는 하중을 받으면 변형되며 하중이 제거되었을 때
최초의 치수로 좀처럼 완전히 되돌아가지 않는다. 여러 가
지 방법으로 나타낸, 최초와 최종 치수간의 차이는 '영구변
형(permanent set)'으로 알려져 있으며 인장, 압축 또는
전단으로 측정할 수 있다. 그러나, 전단의 영구 변형은 흔
히 요구되지 않으며 그 측정에 대하여 권고된 규격이 없다.

실제 문제로서 영구 변형의 측정은 시험의 조건, 시험이
다루어지는 시간 및 시편이 원상태로 복구되도록 허용되
는 시간을 신중하게 한정하는 것에 좌우된다. 이들의 조건
은 표준화되었을지라도 임의적이며, 재현할 수 있는 결과
를 얻기가 때때로 어렵고 고무가 실제 사용조건 하에서 어
떻게 작동될 것인가에 대해 이들의 조건을 관련시키기
때때로 어려움이 있다.

영구변형의 측정은 발생된 가황의 정도에 대한 지표이
기 때문에 생산 관리에 유용할 수가 있다. 영구변형의 측
정은 또한 다수 대안의 고무로부터 합성재를 선택할 때 도
움이 될 수 있다. 영구 변형이 높은 범위로 되는 경우에는

부적합한 합성재를 흔히 확인할 수 있다. 다른 한편, 영구 변형이 낮은 범위에 있는 경우에는 값의 차이가 심중팔구 실제사용에서 변형의 참된 지표를 나타내지 않을 것이다.

영구변형 측정의 해석에서 주된 어려움은 시험 시간이 실제사용 시간에 비하여 대단히 짧다는 점이다. 예를 들어, 수도 본관용 가스켓은 수십 년간 밀폐 성질을 계속 유지하여야 하는 반면에, 시험은 수시간 동안만 행한다. 또한, 표준 시험은 하중의 제거 후에 30분만의 회복시간을 요구한다. 많은 경우에, 상당히 큰 회복은 이 시간 후에 일어나고, 얼마간의 경우에 24 시간 후의 압축 변형이 30분 후 압축 변형의 1/6만큼이나 적을 수 있다는 점을 나타내었다.

비록 많은 시방서가 영구 변형에 대한 요구사항을 포함하고 있을지라도, 그것은 흔히 명시되어야 하는 응력 릴랙세이션이나 스트레인 릴랙세이션(통상적으로 '크리프(creep)' 라고 알려져 있다)이다. 이 주제는 다음 장에서 더 상세히 고찰할 것이지만 영구 변형을 다른 물리적 성질에 관련시키는 다수의 잘못된 생각이 있다는 점에 주의하여야 한다. 예를 들어, 낮은 압축 변형은 높은 탄성과 낮은 크리프가 수반된다고 때때로 주장하지만 이것이 반드시 진실인 것은 아니다. 합성 엘라스토머가 천연 고무보다 더 높은 영구변형을 항상 가진다고 말하는 어떠한 것도 이미 진실이 아니다. 기초 폴리머(base polymer)의 넓은 다양성과 공식화의 개량은 합성재가 영구 변형에 대한 대부분의 요구사항에 적합할 수 있게 할 것이다.

7. 영구변형, 크리프 및 응력 릴랙세이션간의 관계

제6장에서 논의한 것처럼, 가해진 응력이나 스트레인의 제거 후에 엘라스토머에 남아 있는 변형, 즉 엘라스토머의 영구변형(permanent set)은 실제 문제로서 엘라스토머가 어떻게 변형될 것인가의 좋은 지표를 반드시 제공하는 것은 아니다. 더 크게 중요한 것은 장기간 동안 일정한 응력이나 스트레인의 상태로 유지되는 동안에 엘라스토머가 어떻게 거동하는가 이다.

일정한 하중(응력)이 엘라스토머에 가해질 때 변형이 일

정하지가 않고 시간이 흐름에 따라 점차로 증가한다. 이 거동은 '스트레인 릴랙세이션(strain relaxation)' 으로, 또는 더 일반적으로는 '크리프(creep)' 라고 알려져 있다. 역으로, 엘라스토머가 일정한 스트레인을 받을 때 시간이 흐름에 따라 응력의 감소가 발생되며, 이 거동은 '응력 릴랙세이션(stress relaxation)' 이라 부른다. 양쪽 현상은 큰 중요성을 가진다. 예를 들어, 크리프는 설비의 부분들 사이에서 공간 관계에 영향을 주기 때문에 엔진 마운팅에서 중요하며, 응력 릴랙세이션은 플랜지 사이에서 유지되는 파이프 가스켓과 같은 정적 밀폐(seal)의 유효성을 컨트롤 하는 인자이다.

영구변형, 크리프 및 응력 릴랙세이션의 현상은 엘라스토머의 물리적 및 화학적 변화의 결과이며, 양쪽은 동시에 일어날 수 있다. 물리적 변화는 엘라스토머의 점탄성(viscoelastic) 성질에 기인하며, 화학적 변화는 노화, 산화 작용 또는 유사한 프로세스에 의하여 분자 구조의 변화에 영향을 준다. 일반적으로, 물리적 영향은 보통 온도나 낮은 온도 및/또는 짧은 시간에서 가장 중요하며, 화학적 영향은 높은 온도 및/또는 긴 시간에서 중요하다.

불행하게도, 크리프와 응력 릴랙세이션은 시간에 좌우되어, 그리고 온도에 좌우되어 변화하며, 그들은 엘라스토머가 접촉하여 있는 매개물의 영향을 심하게 받는다. 크리프와 응력 릴랙세이션에 관한 다수의 독특한 방법이 개발되어 왔지만 어떤 방법으로 얻은 결과는 또 다른 방법으로 얻은 결과와 직접 비교하기가 어려울 수도 있다. 실제 문제로서, 크리프와 응력 릴랙세이션간의 관계설정은 드물게 시도되었다. 시험의 선택은 통상적으로 적용에 좌우되며, 몇 개의 방법은 다소의 조건에 더 관련되고 있다. 게다가, 모의실험의 실제사용 시험을 실행할 수 있을 때는 언제나 이 시험이 권고된다.

더욱이, 짧은 시간의 시험으로 얻은 결과를 상당히 긴 기간에 대해 추정하려고 시도하기에 앞서, 또는 더 낮은 온도에 대한 정보를 마련하기 위하여 가속된 시험과 같이 더 높은 온도에서 얻은 결과를 사용하기에 앞서 극도로 주의하여야 한다.

8. 크리프

크리프(creep)는 통상적으로 일정한 힘을 가하는 동안의 명시된 시간 간격 후에 생기는 변형의 증가로 정의되며, 그 시간 간격 시초의 시편 변형의 백분율로 나타낸다. 이 정의는 금속과 플라스틱에 보통 사용되는 정의와 다르다는 점에 유의하여야 한다. 그들의 경우에 크리프는 시편의 최초 두께에 관련하여 백분율 변형, 즉 임의의 주어진 시간에서 백분율 스트레인이다.

보통, 또는 낮은 온도, 및/또는 짧은 시간에서는 물리적 프로세스가 지배적이며 크리프는 대수 스케일에 도시된 시간과 함께 일직선으로 변화함을 알게 되었다. 높은 온도 및/또는 긴 시간에서는 화학적 프로세스가 지배적이며 화학적 크리프는 흔히 시간과 함께 일직선으로 변화함을 알게 되었다.

화학적 영향이 없을 때는 릴랙세이션 프로세스가 더 길게 계속될수록 크리프가 더 늦게 되어 간다. 예를 들어 말하자면, 재하 후의 1분에서 10분까지 시간의 10단위에 일어나는 크리프의 양은 재하 후 1주에서 10주까지 훨씬 더 긴 10단위의 양과 같을 수 있다. 그러한 경우에, '크리프율(creep rate)'로서 시험결과를 나타내는 것이 보통이며, 그것은 크리프가 측정되는 시간 간격의 상용 대수 대 크리프의 비율로서 정의되고 10단위당 퍼센트로서 나타낸다. 실제로는, 변형이 부과되고 나서 1분 후의 크리프를 기초로서 취하는 것이 통례이다.

크리프는 엘라스토머의 조직과 유형에 따라 상당히 변화하지만 일반적으로 초기 스트레인이 더 높을수록 크리프가 더 높다는 점과 크리프가 온도와 함께 증가한다는 점이 입증되어 왔다. 크리프는 동일한 전단 스트레인 하에서 보다 인장 스트레인 하에서가 더 크며, 동일한 압축 스트레인 하에서보다 전단 스트레인 하에서가 더 크다 또한, 정적 재하 하에서보다 동적 재하 하에서가 더 크다. 크리프는 또한 존재하는 충전제(filler)의 양과 함께 증가한다.

화학적 영향은 단기간 시험 예측보다 더 빠르게 크리프가 일어나게 할 수 있다. 예를 들어, 높은 습기는 크리프

율을 2배로 할 수 있다. 산화도 또한 영향을 가지지만 이것은 적당한 산화 방지제를 사용하여 줄일 수 있다. 그러나, 교량 받침(bearing)과 같은 큰 고무 구성요소는 단지 그들의 크기만으로 내부로의 산소의 확산을 쉽게 방지하기 때문에 통상적으로 산화로부터 보호된다.

공학적 적용에서, 크리프는 하중 하에서 처음의 수 주 동안이 가장 빠르지만 이 기간 동안 최초 변형의 20%(70 IRHD)를 넘지 않아야 한다. 설계에서는 이것을 참작할 수 있다. 그 후에, 정확하게 합성된 고무에서 많은 해의 기간에 걸쳐 그 이상의 변형이 5 내지 10%만 일어나야 한다.

9. 응력 릴랙세이션

제7장에서 언급한 것처럼 응력 릴랙세이션(stress relaxation)은 고무가 일정한 스트레인을 받는 상태로 될 때 시간의 흐름에 따른 응력의 변화이다. 응력 릴랙세이션은 크리프의 역이며, 크리프는 일정한 힘을 받고 있을 때 시간의 흐름에 따른 스트레인의 증가이다.

응력 릴랙세이션 측정은 압축, 전단 및 인장에서 측정할 수 있다. 압축은 실(seal)과 가스켓과 같은 제품에 사용되는 재료를 시험함에 있어 가장 중요하게 된다. 응력 릴랙세이션 시험은 또한 노화에 대한 일반적인 가이드를 마련하기 위하여 사용할 수 있고 특히 화학제품이 포함될 때 그러하며, 그 때에 통상적으로 인장에서 시험한다. 이들은 노화를 다루게 될 제14장에서 설명할 것이다.

제8장에서 설명한 크리프 해설의 대부분은 응력 릴랙세이션에도 또한 적용된다. 그럼에도 불구하고, 응력 릴랙세이션 시험에서 얻은 결과는 실제 문제로서 실(seal)이 어떻게 수행될 것인가에 대하여 압축 변형, 체적 팽윤, 또는 유사한 성질을 측정하여 얻은 것보다 훨씬 더 좋은 아이디어를 제공한다. 게다가, 확실하게 어떤 정밀도를 가지고 응력 릴랙세이션 결과를 외삽법으로 추정하는 것이 불가능할지라도, 이 시험은 다른 고무의 성능을 비교하는데 대단히 유용한 방법일 수 있다.

엘라스토머 실이 대부분 하나 이상의 유동체와 접촉하

여 있다는 점을 올바르게 인식하는 것도 또한 중요하다. 예를 들어, 파이프 실은 한쪽에서 계속 유지되고 있는 액체와 접촉하고, 다른 쪽에서 공기와 접촉될 것이다. 실 안에는 또한 온도 차이가 있을 수도 있다. 그러한 조건은 응력 릴랙세이션을 측정할 때 아주 합리적으로 모의실험할 수 있다.

유동체가 시편에 스며들기 위해서는 대단히 긴 시간을 취한다는 문제도 또한 유동체에서 일어날 수 있다. 이들의 경우에는 팽윤과 같은 다른 파라미터의 영향이 중요하게 될 수도 있다. 또 다른 가능한 위험은 고온에서 수행한 시험이 엘라스토머와 접촉하는 유동체의 변화 때문에 오도하는 결과를 제공할 수도 있다는 점이다. 실제 문제로서, 연료는 실이나 그들의 금속 하우징에 고착하게 될 점성을 형성할 수 있다. 이들의 점성은 실의 유효성을 작게 하기 보다는 오히려 개량시킬 수도 있다.

10. 단기간 응력-스트레인

엘라스토머의 응력-스트레인 시험은 두 가지 방식으로 수행한다. 상기의 장에서 이미 설명한 것처럼 단기간(short-term) 또는 정적 응력-스트레인(static stress-strain) 시험은 다소 임의로 선택한 스트레인율에서 행하며 오랜 시간의 영향과 주기운동의 영향은 무시한다. 다른 한편, 동적 시험은 엘라스토머에 대해 주기적 응력-스트레인 거동을 계산할 수 있는 변형패턴을 받게 한다.

충전제를 포함하고 있는 가황고무가 변형될 때는 물리적 파손이 일어나며 그것의 응력-스트레인 곡선이 변화한다. 통상적으로 가장 명백한 결과는 강성(stiffness)의 감소이며, 강성은 하중/변형, 또는 탄성률×면적/두께로 정의된다. 각각의 후속의 변형은 더욱 작은 영향을 가지며 그것은 최후에 평형 응력-스트레인 곡선에 도달되어야 하는 것을 나타낸다. 변형의 영향은 영속하지 않지만 높은 온도에서조차 원래 응력-스트레인 곡선으로의 회복이 대단히 느릴 수도 있다.

정적 시험에 사용하려는 시편의 프리-스트레싱, 또는 기계적 조절(스크래깅, scragging)의 중요성은 완성된 제

품에서 요구된 실제사용 조건에 좌우될 것이다. 부품이 반복 변형을 받기로 되어 있는 경우에는 시편을 프리-스트레싱하는 것이 현명하다. 다른 한편, 만일 부품(예를 들어, 자동차용 일정속도 베로즈(bellows))이 오랫동안 정지상태로 유지하고 있는 후에 엘라스토머로서 작용하여야 한다면, 실제 문제로서 프리-스트레싱은 성능에 대한 진실의 지표를 마련하지 않을 것이다. 예를 들어, 시편이 연속 진동을 받는 많은 동적 시험에서 시험의 스트레인 레벨까지의 프리스트레싱은 자동적으로 이루어진다.

기계적 조절의 요구조건은 다소의 시험절차에 통합되지만 일반적인 룰이 없다. 그러므로, 기계적 조절이 요구되는지 어떤지를 점검하는 것과 고려중인 적용에 대하여 얼마만큼의 중요성을 갖는지의 여부를 결정하는 것이 중요하다.

제5장에 기술한 것처럼 인장 응력-스트레인 시험은 주어진 스트레인에 응력을 측정하며 엘라스토머에 대한 강성의 지표를 주는 것으로 고려할 수 있다. 강성의 또 다른 지표는 '완화된 탄성률(relaxed modulus)'를 측정하여 얻을 수 있으며, 그것은 일정한 시간의 릴랙세이션 후에 주어진 신장에서의 인장 응력이다. 이 시험은 단기 응력 릴랙세이션의 효과적인 측정이다.

고무제품의 파손에서 중요한 인자는 찢어지기 시작하여 전파될 수 있음의 용이도이다. 그러나, 찢김이 일어날 수 있는 조건이 상당히 광범위하게 변화하므로 이용하여야 하는 시험은 실험실 비교에만 적당할 정도이다. 이들 시험이 구매 시방서에 포함될 때는 생산을 위한 품질 관리의 수단만을 마련한다. 게다가, 찢김은 일반적으로 새긴 금(cut)을 갖고 있는 시편으로 일으킨다. 그러므로, 이들 결과는 찢김을 전파하는데 필요한 힘만을 측정하며, 찢김을 일으키는데 필요한 힘의 지표를 제공하지 않는다.

11. 동적 응력-스트레인

고무 기술자에 있어서 '탄성률(modulus)'은 상기에 기술한 단기간의 방법으로 측정된 것처럼 어떤 스트레인에서의 엘라스토머 응력을 의미한다. 즉, 응력-스트레인 곡

선상의 한 점이다. 응력이 스트레인에 직접 비례하는 후크(Hook)의 법칙에 따르는 재료를 가공하여 사용하는 기술자들은 그 응력이 일으킨 스트레인에 대한 응력의 비율로서 탄성 계수를 정의한다. 즉, 응력과 스트레인간에서 선형 관계의 기울기이다. 재료가 인장이나 압축에 있을 때의 공학적 정의는 일반적으로 영률(Young's modulus)로 알려져 있다.

엘라스토머에 대한 동적 시험의 결과는 시편 형상, 변형의 모드, 스트레인 진폭, 스트레인 이력현상, 진동수 및 온도에 좌우되지만, 그들은 기술자가 직접 사용하는 것이다. 이것은 통상적으로 전단이나 압축에서, 그리고 낮은 스트레인으로 측정이 행하여지기 때문이며, 그리고 그것은 대부분의 엘라스토머가 실제사용 중에 응력을 받는 방식이다. 게다가, 시편이 실제 실행에 관련된 기계적 그리고/또는 열적 조절을 받게 할 수 있으며 제공된 데이터는 단 하나의 점보다는 오히려 조건의 범위에 맞추어 적용할 수 있다. 마지막으로, 결과는 일반 공학 단위로 표현한다.

그러나, 적용을 위해서는 올바른 동적 조건을 선택하는 것이 필요하다. 예를 들어, V벨트는 일정한 진폭으로 고정되며, 그러므로 합성재의 열 형성 특성을 비교하기 위하여 일정한 진폭 시험을 이용하여야 한다. 다른 한편, 저속으로 주행하는 딱딱한 타이어는 일정한 하중에서 진동되며 이 적용을 위한 합성은 일정한 하중 시험으로 검토하여야 한다. 정확한 진동종류의 선택이 중요하며, 그 이유는 일정한 진폭에서 진동의 사이클 당 발생된 열이 강성에 '직접' 비례하면서도 일정한 하중에서 그것이 강성에 '역' 비례하기 때문이다.

동적 시험은 실제사용에서 고무 제품의 평형 작용온도를 아주 정확하게 예측하기 위하여 사용할 수 있으며 작용온도는 그것의 물리적 성질에 중요한 영향을 줄 것이다. 높은 온도는 일반적으로 기계적 강도를 손상시키며 노화를 가속시킨다.

높은 이력 현상을 가지는 합성재가 불만족스러울 것이라고 가정하는 경향이 있지만 이것이 반드시 진실인 것은 아니다. 다소의 적용에서 이력현상과 탄성은 지지성능이 거의 없거나 아주 없다. 어떤 진동-댐핑 적용에서는 상대

적으로 낮은 탄성을 가진 합성재가 바람직할 수도 있으며 그 이유는 그들의 댐핑 영향이 실제사용 중에 전개된 최대 진폭을 제한할 수도 있기 때문이다. 이것은 실제사용 중에 진동의 주파수가 넓은 범위에 걸쳐 변화할 때 특히 사실일 수도 있으며, 그 이유는 진동수가 공진 가까이에 있을 때 높은 탄성의 합성재에서 해로운 진폭이 전개될 수도 있기 때문이다. 다른 한편, 만일 진동의 주파수와 진폭이 저 탄성에서 과도한 열 형성을 일으킨다면 고탄성 합성재의 사용을 지시한다.

12. 마손

대다수의 적용에서 마모(wear)에 대한 저항은 고무 합성재의 가장 중요한 성질 중의 하나이며 아직까지는 측정하고 분석하기가 가장 어려운 것의 하나이다. 예를 들어, 도로상에서 자동차 타이어가 경험하는 마모의 유형은 모래 뿜기용으로 사용하는 호스의 마모와는 아주 다르다. 타이어는 격렬함이 도로 표면의 여러 가지 유형에 좌우되는 연마 작용을 받으며, 반면에 높은 속도의 뿜족한 모래입자는 모래 뿜기용 호스에 깎임(cutting)과 마멸작용을 준다. 다수의 표준시험은 타이어 답면이 받은 마모의 종류를 표면상 다소 닳았을지라도, 그들은 일반적으로 도로시험과 잘 상관되지 않는다.

다소의 경우에 표준시험은 실제로 판단을 그르치게 할 수 있다. 예를 들어, 시험 중에는 모래 뿜기 호스용으로 불충한 것으로 보이는 고무 합성재가 실제로는 우수할 수도 있다. 역으로, 모래 뿜기용 호스에 좋은 것으로 입증된 고무가 구두 밑바닥 대기에, 그리고 컨베이어 벨트용으로 사용하기에도 적합할 것이라고 가정하는 것은 신중하지 못하다. 마모 시험의 표준 방법은 가능하다면 언제나 적당한 모의실험의 실제사용 시험에 관련시켜야 한다.

오해하기 쉬운 결과를 산출할 수도 있는 다소 순수한 기계적 시험의 어려움도 또한 있다. 예를 들어, 경화미달의 성분(연하고 고무질의), 또는 왁스나 기름 함유량이 있는 것은 단지 시편의 표면에서 벗겨진 재료에 의하여 시험기

계가 막히거나 도유되어 있기 때문에 우수한 마모성질을 갖고 있는 것처럼 보일 수도 있다.

마모(wear)는 통상적으로 마손(abrasion)의 견지에서 고려되며, 마손은 고무표면에 따른 기계적 작용으로 생기는 재료의 손실로서 정의된다. 마손 저항은 복잡한 현상이며, 탄성, 강성, 열적 안정성, 각임과 찢김에 대한 저항 등 여러 가지에 좌우되고, 갖가지의 적용은 크게 변화하는 몫으로 이들 성질을 필요로 한다. 실험실 시험은 합리적으로 짧은 시간에 완료하여야 하며, 일반적으로는 무거운 하중으로, 예를 들어 강옥(鋼玉)(산화알루미늄)의 예리한 연마재 표면에 대어 높은 슬립속도로 시편을 문지르고 체적, 또는 중량 손실을 측정하는 것으로 이루어진다. 이들 조건은 실제사용의 요구조건에 관련시키기가 어렵고 결과로서 많은 갖가지 장치가 개발되어 왔으며 어떤 것은 하나의 특정한 적용에만 적용할 수 있다.

마손 시험으로 얻은 결과는 불충분한 재현성을 갖고 있음직 하며, 그것은 특히 비교용 표준고무의 사용을 중요하게 만든다. 더욱이, 실제 사용조건과의 상호관계는 불확실하며 성능 시방서에서는 일반적으로 마손 시험의 사용을 권고하지 않는다.

13. Gough—Joule 효과

Gough가 1805년에 최초로 관찰한 고무의 분자구조는 외관상 변칙을 발생시킨다. 고무의 스트립이 인장에서 가열되는 경우에 늘어나기보다는 오히려 줄어든다. 만일 고무를 일정한 스트레인으로 잡고 있다면 더 큰 응력이 발휘될 것이라는 점이 뒤따른다. 이 관찰은 약 50년 뒤에 Joule이 확인하였으며, 현재 Gough—Joule 효과로서 알려져 있다.

Gough—Joule 효과의 조건을 적용할 때에 탄성계수와 강성 또는 고무의 하중을 지탱하는 능력은 온도의 상승과 함께 증가한다. 그러나, Gough—Joule 효과는 역으로 할 수 있으며 -60℃ 이하의 온도에서는 적용되지 않는다.

관련된 또 다른 열 탄성 효과는 고무를 빠르게 잡아당길

때 고무가 열을 방출하고, 빠르게 수축하도록 허용될 때 열을 흡수하는 것이다. 예를 들어, 고무밴드를 빠르게 잡아당긴 후에 가장자리를 잡고있는 경우에는 고무가 따뜻하게 느껴진다. 역으로, 고무밴드가 빠르게 이완되었을 때는 고무밴드가 차갑게 느껴지지만 재 수축은 가해진 힘을 향하여야 한다. 만일, 고무를 안쪽으로 싹뚝 잘라낸다면 운동에너지가 발산되고 냉각이 일어나지 않을 것이다.

Gough—Joule 효과는 회전 샤프트용 O링 실(seal)과 비틀림 스프링의 설계에서 실용적인 관계를 갖고있다.

회전 샤프트를 밀폐하기 위하여 O링을 사용할 때, 샤프트보다 O링을 약간 더 작게 만드는 것은 민첩하게 밀폐시키고 더 좋게 밀폐(seal)시킬 것이라는 아이디어를 갖고 샤프트보다 약간 더 작은 링을 만드려는 유혹이 항상 있다. 이것은 치명적인 착각이다. 마찰이 O링을 가열시키며, 링이 인장에 있으므로 Gough—Joule 효과가 적용된다. 링이 접촉에서 흡사되고 더 많은 마찰을 야기하며 더 많은 열을 발생시킨다. 그 때에 고무가 까맣게 타고 균열되며 마지막으로 실(seal)이 새게 된다. 고속에서는 샤프트 파손이 즉시 일어날 수 있다.

올바른 처리는 링의 안쪽 직경을 샤프트 직경보다 약 5% 더 크게 만드는 것이다. 그러면, 실은 실의 작동위치에서 바깥둘레 압축 하에 있을 것이다. 열 곡선은 온도의 알맞은 상승 후에 안정상태로 될 것이며 더 이상의 열 형성(heat buildup)이 없을 것이다. 물론, O링 실의 설계에서 다른 인자도 또한 고려하여야 하지만 인장 대신에 바깥둘레 압축의 개념이 극히 중요하다.

14. 가열 노화

엘라스토머가 높은 온도에 장기간 노출된 후에는 일반적으로 그 성질이 변화될 것이다. 예를 들어, 천연고무는 유연하고 고무성으로 되어 갈 것이며, 반면에 네오프렌은 같은 조건 하에서 서서히 단단해질 것이다. 부드러워짐이 듣지 딱딱해짐이 탐탁하지 않게 되는 범위는 요구된 개개의 실제사용에 좌우될 것이다. 엘라스토머의 성질이 변화

하는 속도는 온도와 함께 대수적으로 증가한다. 그러므로, 상대적으로 작은 온도변화는 열화의 정도에서 큰 차이를 일으킬 수도 있다.

가열노화 시험의 주된 용도는 품질관리용이지만 좋은 재현성을 얻도록 절차의 상세한 요구 조건을 밀접하게 수행하여야 한다. 가속된 시험과 천연 노화간의 보편적인 상호관계가 구해지지 않고 있으며 노화와 실제사용 조건간의 상이함이 커질수록 어떠한 상호관계도 신뢰성이 적게 된다. 물론, 실험적 어려움은 천연 노화 데이터를 얻기 위하여 필요로 하는 시간 및 외삽법이 요구될 수도 있는 범위 때문에 생긴다. 고무 제품은 50년 이상 사용할 수 있다.

노화는 또한 고무 두께의 영향도 받는다. 열화가 주로 산화 작용에 기인하므로 고무 용적 안으로의 산소 확산의 율(rate of oxygen diffusion)은 결과에 중대한 영향을 줄 수 있다. 만일, 시험 동안, 또는 사용에서 율이 너무 낮다면, 재료의 용적은 비록 동일한 고무의 표면이 대단히 나쁘게 노화될지라도 노화를 거의 경험하지 않거나 노화를 경험하지 않을 수도 있다. 온도가 증가될 때는 산소확산의 율이 더욱 더 중요하게 될 것이다. 그러므로, 유사한 형상과 크기의 시편으로 얻은 결과로만 비교하여야 한다.

공기에 접한 얇은 시편의 가열 노화시험이 제품의 실용적인 수명을 전반적으로 과소 평가할 수 있다는 점에 또한 주목하여야 한다. 예를 들어, 총 제적에 비교하여 작은 면적이 공기에 노출되는 교량 받침은 얇은 단면의 단기 시험으로 지적인 것보다 상당히 더 긴 시간 동안 사용될 것이다.

응력 릴랙세이션의 측정은 네트워크(망상) 구조에서의 변화의 점에서 고무탄성의 운동이론으로 해석할 수 있다. 이것은 일정한 신장과 온도에서 고무 시편의 힘이 네트워크에서 활동연쇄의 수에 비례한다는 점을 나타낸다. 처음의 근사로서 두 개의 교차결합을 연결하는 폴리머 분자의 어떠한 부분도 활동연쇄로 간주할 수 있다.

고무 가황물의 노화 동안에는 교차 결합하는 반응뿐만 아니라 네트워크의 파손도 일어난다. 따라서, 연속 측정과 단속(斷續) 측정 양쪽은 관심이 있는 것이며 다른 결과를 제공한다. 시편은 연속 측정 동안 항상 스트레인되며, 잡

아당겨진 시편에서 교차 결합이 형성된다. 이들은 새로 형성된 교차결합이 스트레인 하에 있지 않도록 폴리머 연쇄에서 유니트의 한 쌍 사이에 형성되는 것을 기대할 수 있다. 따라서, 시편의 인장은 그들의 형성으로 변화되지 않을 것이다. 연속 릴랙세이션 측정은 교차 결합함으로써의 영향을 나타내지 않고 열화 반응만을 측정한다는 점이 뒤따른다.

단속 시험에서는 잡아당겨지지 않은 시편에 교차결합이 형성되며 시편이 스트레인되고 하중이 측정될 때만 최대한의 교차결합 영향을 나타낸다. 이 유형의 측정은 교차결합과 열화 양쪽이 결합된 영향을 나타낸다. 만일, 교차결합이 힘보다 무겁다면, 단속 시험결과는 힘의 증가를 나타낼 것이며, 반면에 연속시험결과는 항상 감소를 나타낼 것임에 틀림없다. 엄밀히 말하자면, 단속시험은 응력 릴랙세이션을 측정하지 않으며 ISO는 '응력 릴랙세이션'이란 표현을 사용하지 않는다. 그러나, 문헌과 산업계에서는 이 용어가 보편적으로 사용된다.

만일, 연속시험과 단속시험을 동시에 행한다면 다른 두 반응의 개별적인 평가를 얻는 것이 가능하다.

응력 릴랙세이션 방법은 네트워크 노화에 대하여 인장 강도에 기초한 시험보다 더 좋은 정보를 제공한다. 그것은 수행하기가 더 빠르며, 그러므로 비용이 더 적게 든다. 요구되는 재료의 양이 작으며 시편은 표면 반응으로부터 일어날지도 모르는 어려움을 피하기 위하여 충분히 얇을 수 있다. 마지막으로, 최종 성질의 측정에 대한 것보다 정확성이 더 높으며, 그러므로 더 민감한 영향을 조사할 수 있다.

15. 풍화에 대한 저항

엘라스토머가 비바람(weather)에 노출될 때는 물리적 성질의 열화(deterioration)가 일어날 수 있다. 이 열화는 균열, 벗겨짐, 초킹(chalking), 색 변화 및 기타 표면 결합으로, 그리고 실제사용에서 최종적으로 제품의 파손까지 관찰될 수 있다. 이들 결합의 대부분은 적당한 합성으로 방지할 수 있으며 특수 합성 엘라스토머는 본래부터 천연 고무보다 열화에 대한 저항력이 더 크다. 특히, 카본 블랙

의 함유는 대부분의 엘라스토머 합성재에서 자외선(UV) 방사의 공격에 대한 저항을 증가시킬 것이다.

풍화(weathering)에 기인하는 열화의 가장 중요한 원인은 오존의 존재이다. 대기에서 1억 분의 1 (pphm)보다 적은 오존은 무저항 고무가 약간 스트레인된 조건에 있다면 무저항 고무를 심하게 공격할 수 있다. 그러나, 대기에서 오존의 농도는 시험목적으로 실제작업 조건을 재현하기가 대단히 어려운 가변성의 피라미터이다. 그러므로, 보통은 실험실 시험을 이용한다.

햇빛, 산소, 습기 및 온도도 또한 엘라스토머에 영향을 준다. 단파장 UV광선은 햇빛 방사에서 가장 해로운 것이며 균열, 초킹 및 엘라스토머 표면의 점진적인 부식으로 이끌 수 있는 표면 경화를 일으킬 수 있다. 산소는 폴리머(중합체)의 산화를 일으키고 기계적 성질과 탄성의 손실로 이끌 수 있으며 그 영향은 고온에서 가속된다. 습기는 일반적으로 추축한 것보다 흔히 더 존재할 수 있다. 미국에서의 연구는 북미 6 위치에서의 재료가 일생의 약 30% 동안 젖어 있었으며 습기의 주된 근원은 강우보다는 오히려 이슬이라는 점을 나타내었다. 물 자체는 특히 해를 끼치지 않을 수도 있지만, 연구는 재료에 스며든 이슬이 높은 비율의 산소를 함유하고 있으며 내부산화를 일으킨다고 결론지었다. 습기의 연속적인 존재는 또한 엘라스토머로부터 가용성 첨가제가 걸러지는 시간을 허용할 수 있다.

엘라스토머의 열화는 상기에 더하여 가스와 특정한 장소에 특유한 화학제품의 존재에 기인할 수 있다. 바다의 위치에서 염류 물보라는 단지 하나의 예에 지나지 않는다.

파라미터의 수, 현장에서 현장까지 조건의 상당한 변동 및 계절적 차이는 절대 조건에서 자연 풍화를 측정하는 것을 대단히 어렵게 만든다. 그러므로, 어떤 일련의 시험에서 기지의 풍화 특성의 시편을 포함시켜서 비교상의 성능만을 고려하는 것이 바람직하다. 따라서, 예기할 수 있는 가장 좋은 관계는 아를테면 플로리다에서 노출된 일련의 시험이 임의의 다른 위치에서 노출된 것과 같은 상대적인 랭킹을 갖는 것이다. 이것은 본질적으로 가치가 있는 정보를 마련할 수 있으며 빠르게 약해지는 합성재를 제거하기

위해서 흔히 사용할 수 있다. 어떠한 신제품의 노출 시도도 가능한 한 초기에 시작하여야 한다. 그러면, 경험과 데이터가 실제사용 시간보다 항상 앞서 있을 것이다.

가속풍화 시험의 결과는 자연 풍화 및 실제 성능에 관련 시키기가 마찬가지로 어렵다. 가속 시험은 태양에너지 스펙트럼의 UV 범위를 과장하는 경향이 있으며 시험 동안의 온도는 흔히 실제로 경험한 것보다 더 높다. 그 때에 열화의 부분은 UV 방사의 작용이라기보다는 오히려 높은 온도에 기인한다. 또한, 시험하는 동안 오존의 부재(不在)는 풍화저항에 가장 심하게 영향을 주는 인자를 배제한다. 게다가, 시편의 상대 랭킹이 자연 풍화로 얻은 것과 서로 상관됨을 기대할 수 있는 것이 가장 좋다.

얇은 시편을 이용하는 풍화 시험은 그르치기 쉽다. 엘라스토머가 예를 들어 교량 받침에서 상대적으로 두꺼울 때는 열화가 표면에만 영향을 미칠 수도 있으며 엘라스토머에서 대부분의 기계적 성질은 만족스럽게 남아있을 것이다. 그러한 경우에는 실제의 경험이 실험실, 또는 현장시험에 우선하여야 한다.

16. 가스에 대한 저항

엘라스토머가 일상적으로 노출되는 세 가지 가스(gas)는 공기, 산소 및 오존이며 그들은 국제적으로 인정된 표준 시험이 있는 유일한 것들이다. 공기와 산소에 대한 엘라스토머의 노출은 제15장에서 고찰하였으며, 공기와 산소의 영향은 제15장에서 논의한 풍화시험의 일부이다. 증기와 가스에 대한 엘라스토머의 투과성은 개별적인 주제이지만 본고에서는 생략한다.

다른 증기나 가스에 관한 데이터가 요구되는 경우에는 통상적으로 가스가 순환될 수 있는 챔버에서 시편을 노출시킨다. 만일, 가스가 액체상태로 쉽사리 유지될 수 있다면, 때때로 가스보다는 오히려 액체로 시험을 한다.

엘라스토머 표면의 균열은 물리적 성질의 얼마간의 변화를 측정하는 것을 어렵게 만들 수도 있다. 이것은 특히 균열이 열화의 최초 징후인 오존저항에 대하여 사실이다.

그러나 만일, 인장 강도, 신율 및 경도가 오존의 영향을 받지 않고 남아있다면, 다른 기계적 성질도 충족될 것이라는 개연성이 있다.

오존 균열의 패턴과 심각성은 가해진 스트레인의 크기와 본질에 따라 변화한다. 실제사용에서의 스트레인은 반드시 0일 필요가 없는 한 점에서의 최소로부터 어떤 다른 점에서의 최대까지 변화할 수도 있다. 그러므로, 범위 내의 모든 신장에서 균열의 패턴을 고려하는 것이 필요하다. 그러나, 스트레인과 균열의 심각성간의 관계는 단순하지 않다. 분계점을 약간 넘는 스트레인에서는 소수이고 흔히 큰 균열이 발견되며, 점진적으로 더 높은 스트레인에서는 균열이 더 다수로 되고 더 작아질 것이다. 대단히 높은 스트레인에서는 균열이 육안으로 볼 수 없을 만큼 작게 되는 것이 전적으로 가능하다. 노출 시간이 증가함에 따라 수많은 대단히 작은 균열들은 더 크지만 상대적으로 얇은 균열들을 형성하도록 합체된다. 그러므로, 다소의 적용에서는 고무 분계점 스트레인 바로 위에서 더 저항력이 있는 고무보다 높은 스트레인에서 저항력이 없는 고무가 더 적당할 수 있을 것이라는 점이 가능하다. 그러므로, 고무가 단지 표준의 단일 스트레인과 기간의 시험을 통과하는 것만을 요구하는 시방서를 갖는 것은 위험하다.

표준 시험은 인장에서 변형된 얇은 시편으로 행한다는 점을 또한 기억하여야 한다. 실제 문제로서, 완성된 제품은 아주 두껍고, 최소 스트레인을 받을 수도 있으며, 보다 작은 균열은 전체성능에 대하여 어떠한 중요성도 갖지 않을 수도 있다. 더욱 고려할 사항은 표면 균열에 기인하는 열화가 일정한 속도로, 또는 쉽게 예측할 수 있는 속도로 조차 진행되지 않을 것이라는 점이다.

동적 스트레인 조건 하에서는 오존 균열과 피로 손상에 서 생기는 균열을 구별하는 것이 필요하다. 오존 공격은 기계적 피로 한계로서 알려진 특성 스트레인(characteristic strain) 아래의 주기적 스트레인에서 균열 개시의 유일한 원인이다. 이 한계를 일단 초과하면, 균열성장의 속도가 빠르게 증가하며, 그것은 많은 엘라스토머에 있어서 대기 산소의 존재가 조력하는 주로 기계적 피로의 결과이다. 이

영역에서는 오존의 영향이 작으며 더 높은 스트레인에서는 점점 무시할 수 있게 된다. 기계적 피로는 또한 오존 균열이 일단 어떤 크기에 도달하면 낮은 스트레인에서도 일어날 수 있다. 이들의 이유 때문에 갖가지 엘라스토머의 랭킹 오더는 스트레인의 크기에 따라 변화할 수 있으며, 그러므로 이용하는 시험 조건이 가능한 한 실제사용에서 예기한 것들에 필적하여야 한다.

마지막으로, 실험실 시험에서 얻은 결과와 실제사용 성능간의 상호관계는 대단히 작다. 그러므로, 시험은 통상적으로 갖가지 엘라스토머와 합성재를 비교하고 평가하기 위해서만 이용하며, 여기서 그 시험들은 고무 기술자들에게 극히 유용하다. 그럼에도 불구하고, 오존 공격으로 빠르게 약해질지도 모르는 합성재를 제거하기 위하여 생산 시방서에 때때로 오존시험을 포함한다. 이들의 경우에 단순한 '균열됨' / '균열이 없음' 절차는 필요로 하는 모든 것이다.

17. 액체에 대한 저항

엘라스토머에 대한 액체(liquid)의 작용은 엘라스토머의 액체 흡수, 엘라스토머에서 가용성 성분의 추출, 또는 엘라스토머와의 화학 반응으로 귀착될 수도 있다. 다소의 경우에 2, 또는 모두 3개의 반응이 일어날 수 있다. 흡수는 일반적으로 추출보다 더 크며(일반적으로 '팽윤(膨潤, swelling)'이라 알려진) 체적의 순수 증가가 있지만 이것이 항상 실제하는 것은 아니다. 다소의 제품에서는 체적이 나 치수의 감소가 팽윤보다 더 심할 수 있으며, 만일 상당한 화학적 반응이 있다면 낮은 팽윤은 물리적 성질의 큰 열화를 숨길 수도 있다. 따라서, 팽윤의 정도가 저항에 관하여 좋은 일반적 지표를 마련할지라도 다른 성질들의 변화를 측정하는 것이 또한 중요하다.

가속 시험방법이 어떤 점에서는 실제사용 조건을 밀접하게 모의 실험할 수 있을지라도 실제 성능과는 직접의 상호관계가 조금도 없을 것이다. 엘라스토머의 두께를 항상 고려하여야 한다. 투과 속도는 시간의 종속이며 두꺼운 제품의 대부분은 계획된 실제사용 수명의 전체에 영향을

주지 않은 채로 남아 있을 수도 있다. 또한, 엘라스토머에 대한 액체의 작용은 대기 산소의 존재에 의한 영향을 현저하게 받을 수도 있다. 그러나, 가속된 시험은 컨트롤 목적으로, 그리고 특정한 액체에 저항하는 엘라스토머를 개발할 때 비교 시험으로 널리 사용한다.

17. 고무 제품의 저장

고무제품(rubber product)은 특히 균용일 경우에 장기간 동안 저장될지도 모르므로 그들이 열화되지 않도록 보장하기 위하여 주의하여야 한다. 저장(storage)에서의 수명을 평가함에 있어 가속 시험을 얼마간 사용할 수도 있지만 좋은 창고 업무가 수반되는 것이 또한 필요하다. 고무 제품은 시원하고 가급적이면 어두운 옥내의 창고에서 저장하여야 한다. 상대습도는 80% 아래로, 온도는 10℃와 30℃ 사이로 유지시켜야 한다. 만일 이들 조건이 가능하지 않다면 적어도 직접의 햇빛을 피하도록 예방 조치를 하여야 한다. 갖가지 고무들은 그들 성분의 이동을 피하도록 분리하여 저장하여야 한다.

고무 제품은 스트레인을 받지 않도록 저장하여야 한다. 예를 들어, 압축성형 제품은 단일 돌출물에 걸쳐 매달지 않아야 하고, 컨베이어 벨트는 움푹 꺼진 곳 가까이에서 저장하지 않아야 하며, 호스는 공간을 줄이기 위하여 더 타이트하게 뒤틀림 감아지게 다시 감지 않아야 한다. 더욱이, 고무 제품은 전기모터, 개폐기 또는 오존이 발생될 수 있는 어떠한 다른 설비에도 가깝게 저장하지 않아야 한다.

만일 부적당한 저장 조건을 피할 수 없다면, 합성에 의하여 상태를 개선하는 것이 가능할 수도 있다. 최초의 비용은 더 클 수도 있지만 최종 비용은 더 작을 것이다. 균용 적용에서의 실패는 파멸적일 수 있으며 최초비용의 절약은 정당화될 수 없다.

18. 맺음말

고무는 우리들의 주위에서 가장 많이 사용되고 있는 재

료 중의 하나로서 타이어, 벨트, 호스와 같은 공학 재료뿐만 아니라 의류와 양말 속의 고무줄, 운동화, 구두 바닥, 각종의 공, 고무장갑, 문방구용 고무밴드, 고무 지우개, 고무 튜브 등 우리 주변에서 그 종류를 셀 수 없을 정도로 가장 흔히 접하는 재료이다. 특히, 방진 고무의 경우에는 자동차, 철도차량, 선박 및 산업 기계 분야에서는 이미 상당히 보급되어 있다. 근년에는 반도체의 제조장치나 고배율 전자 현미경 등에서 고성능의 방진대가 요구되며, 공기 스프링이 많이 사용되고 있다. 또한, 최근에는 토목, 건축 등의 건설분야에도 진출하고 있다. 철도선로의 경우에 탄성 레일 체결장치의 부품으로 천연고무나 EVA 등을 이용하는 레일패드가 필수적인 궤도 재료로 되어 있으며, 최근에는 고무의 도상 매트를 부설하고 있는 등 궤도 구조에서도 고무 재료를 이용하는 사례가 많아지고 있다.

필자는 경부고속철도 궤도건설의 계획수립부터 기본설계, 시방서 작성, 궤도재료 수급, 장비 확보·운영, 궤도공사 실시설계, 1단계구간(광명~대구)의 궤도시공 및 개통 초기의 선로 유지보수까지 참여하는 과정에서 국내 최초로 시행하는 최첨단의 고속철도 건설사업에 참여한다는 보람과 긍지를 느꼈다. 그러나, 궤도차장으로서 궤도건설 업무를 총괄하면서부터 일부의 고무기술 문제에도 접하였지만, 오히려 고무와 관련하여 기술적인 문제보다도 큰 범주에서 보아 고무와 관련된 고무외적, 기술외적인 민원 등으로 시달리고 많은 고심을 하였다. 따라서, 필자는 구조기술자로서 전공분야는 아니지만 고무에 관심을 갖게 되었다.

고무는 상기에 같이 우리 주위에서 흔히 접하는 재료이며, 차량이나 토목·건축 구조물에서도 방진 재료로서 사용되고 있지만, 고무는 구조기술자에게는 난해한 기술이다. 따라서, 본고에서는 머리말에서도 언급하였지만 고무 기술자와 구조기술자가 사용하는 기술의 차이를 설명하였다. 경부고속철도 궤도건설 업무를 수행하는 과정에서 필자와 동고동락하면서 상기와 같은 문제로 많은 고생을 하신 김연국 기술사님을 비롯한 여러분에게 진심으로 위로와 감사의 말씀을 올리며, 본고가 구조기술자들이 고무기술을 이해하는데 다소라도 도움이 되기를 기대한다.