

점착(粘着)의 기초(1)

The Basis of Adhesion

水町 浩 / 도쿄대학 명예교수 · 과학기술진흥사업단 과학기술 감독관

본 연구는 필자들이 지금까지 해 온 점착 특성에 관한 유동학적인 연구를 중심으로, 점착의 기초적인 사항, 특히 점착제의 물성과 점착 특성과의 관계에 대해 고찰하고자 한다.

1. 서론

점착제도 점착제도 넓은 의미에서는 점착제이지만 세밀하게 따지자면 양자는 몇 가지의 면에서 다르다. 점착제는 액체 상태에서 피착재에 도포되지만 접합한 후에 상태 변화가 일어나 단단하고 강한 재료로 변화한다. 이에 대해, 점착제는 어디까지나 고화(固化)되는 것은 아니다. 점착 제품이 생산되고나서 최종적으로 폐기되기까지 고체와 액체의 중간적인 상태가 계속된다. 또한 점착제는 액체 또는 고체로서 최종 유저(User)에게 공급되지만 점착제는 대부분의 경우에서 필름 상태의 지지체(支持體) 위에 얇게 코팅된 형태의 점착 제품으로 공급된다. 점착 제품으로서 가장 많은 것은 점착 테이프이다. 여기

에는 포장용, 사무용, 일렉트로닉스용, 차량용, 건축용 등 종류가 다양하다. 다음으로 많은 것은 점착 라벨이나 데카르 류이다. 그 외 의료용 점착 제품도 계속해서 개발되고 있다.

점착제로 사용되는 폴리머에는 고무계, 핫멜트계, 아크릴계, 실리콘계 등의 종류가 있다. 고무계 중에는 천연 고무, 합성 고무(SBR) 모두 포함되는데, 전자가 압도적으로 많다. 고무에 터키화이어(점착부여제 수지)를 섞거나, 그것을 지지체(支持體)에 코팅하는 단계에서 통상적으로 용제(溶劑)를 사용한다.

핫멜트계에는 SIS, SBS(스티렌-이소프렌 스티렌계, 혹은 스티렌-부타디엔 스티렌계의 블록 코폴리머), SIS를 물에 섞은 SEBS 등이 있는데, 이러한 것에도 터키화이어가 배합되고 있다. 지지체(支持體)에 코팅을 할 때 용제를 필요로 하지 않으므로 핫멜트계라 불린다.

아크릴계는 각종 아크릴레이트나 메타크릴레이트를 조합한 코폴리머이며, 그 종류가 다양하다. 아크릴계 코폴리머의 경우에는, 모노마 조성

을 적당히 조절하면 임의의 Tg나 탄성률의 폴리머를 만들 수 있으므로 특별히 터키화이어를 더 하지 않고도 사용한 때가 있었으나, 폴리오레핀에 대한 점착성, 기타 특수한 성능을 부여할 목적으로 터키화이어를 섞게 되었다.

실리콘계는 실리콘 고무와 실리콘 레진을 섞은 것인데, 이러한 계통의 점착제는 표면장력이 낮기 때문에 테프론, 폴리이미드, 실리콘 고무와 같은 난점착성 재료에 대한 점착이 용이하며, 또한, 내열성, 내약품성, 내후성 등이 뛰어나다는 것이 특징이다.

이러한 점착제를 종이, 옷감, 셀로판, 플라스틱 필름, 금속 호일 등의 위에 코트한 점착 테이프, 점착 라벨, 데카르 등이 우리들 주변이나 다양한 산업 분야에서 대량으로 사용되고 있는 것이다.

2. 점착제의 3물성(物性)

각종 점착제에 대해 거의 공통적으로 평가되는 것은 “택(Tack)” “점착력” 및 “유지력”이다. 이것을 “점착 3물성”, 혹은 “점착제의 기본 3요소”라고 부른다. 이 외에도 용도에 맞춰 다양한 실용적인 특성이 평가되고 있으나, 여기에서는 주로 이 점착 3물성에 초점을 맞춰 논의하고자 한다.

택(Tack)이란, 순간적인 점착성이다. 점착제가 피착재에 가볍게 접촉했을 때 단기간 내에 발현하는 점착강도를 몇 가지의 매개변수로 나타낸 것이다. 무언가에 가볍게 접촉하자마자 곧 바로 착 달라붙는 것이 점착제의 특징이므로, 택(Tack)은 매우 중요한 실용 특징이다. 하지만, 그것이 물리적으로 엄밀하게 정의되어 있지 않

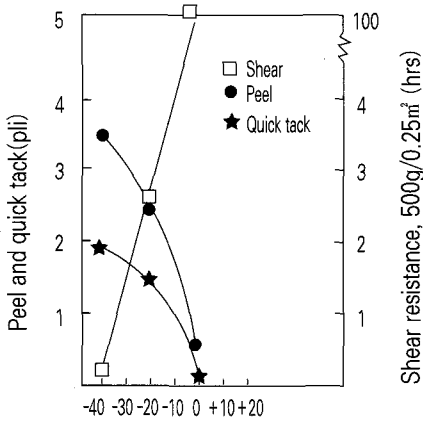
아, 현실적으로는 점착제의 순간적인 점착성을 강하게 반영하고 있으리라 생각되는 시험법이나 측정 조건을 정하여, 그것을 기초로서 택(Tack)을 평가한다. 여기에, 몇 가지의 시험법을 제안하고자 한다.

“점착력” 또는 “필(Peel)력”이라고 불리는 특성은 점착제 면을 피착재에 충분히 접촉시켰을 때의 180°박리 강도인 것이다(규격에 따라서는 90°박리가 규정되어 있다). 이것은 점착제의 기본적인 점착성을 나타내는 매개변수이다. 피착재, 압착방법, 온도, 박리 속도 등의 시험 조건은 각종 규격으로 규정되어 있다.

“유지력”은 점착 테이프를 피착재에 충분히 접촉시켜, 이것에 일정한 하중(전단력)을 가했을 때에 점착 테이프가 피착재에서 떨어져나가기까지의 시간, 즉, 전단 클립 파괴시간인 것이다. 언어로 표현하자면 “힘(力)”이지만, 유지력의 단위는 “시간”이다. 이것은 점착제 그 자체의 강도를 강하게 반영하는 의미에서 “응집력”이라 부르기도 한다. 예를 들면, 마분지 상자에 조금 많은 양의 물품을 넣고 크라프트 테이프로 봉합했을 경우에는 마분지의 입구가 벌어지려고 하는데, 그 경향을 크라프트 테이프의 점착성에 의해 억제하게 되므로, 점착제 부분에는 끊임없이 전단 응력이 가하여지게 되는 것이다. 어느 정도의 응력에 어느 만큼 견딜 수 있는가 하는 것은 심각한 문제이므로, 유지력도 또한 중요한 실용 특성 중 하나가 되고 있다.

이러한 점착 3물성은 점착제의 구조 물성, 예를 들면 화학 구조, 분자량, 상구조, 점강성 등에 강하게 의존한다. [그림 1] 및 [그림 2]에 점착 3물성과 점착제의 분자량 및 Tg와의 관계를 모

[그림 1] 점착 3물성과 점착제 Tg와의 관계



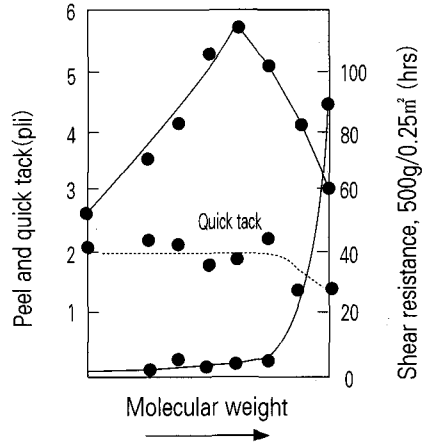
※여기에서 Peel은 점착력(파운드/인치), Shear는 유지력(시간), Quick tack은 Peel형에 있어서의 Tack(파운드/인치)이다.

식적으로 나타냈다. 다른 인자에 대해서도 다양한 시험칙(試驗則)이 알려져 있다.

점착 연구가나 기술자는 이 점착 3물성의 균형을 잘 이용함으로써 다양한 점착 제품을 만들어내고 있다. 예를 들면, 무엇에나 가볍게 달라 붙는 메모 용지(포스트 잇(住友3M(주) 상표) 등)의 경우에는 택(Tack)이 어느 정도 있으므로 해서, 박리력은 종이의 섬유가 달려오지 않을 정도로 약해야 하는 것이 필요조건이다. 인간의 피부를 피착재로 하는 플라스터(Plaster)의 경우에도 박리력이 어느 정도 이상이 되면 피부가 벗겨지므로 이것을 낮게 억제하고 있는 것이다.

이에 대해 포장용 테이프나 반구조용 공업 테이프(VHB 등)의 경우에는 오히려 강한 박리력과 유지력을 부여하는 데 중점을 두고 있는 것이다. 다양한 실용 분야에서 점착제에 요구되는 조건이 명확해진다면, 점착제의 화학구조, 조성비, 분자량, 점착부여제의 종류와 그 배합비, 지

[그림 2] 점착 3물성과 점착제의 분자량과의 관계



지체(支持體)의 종류, 점착제 층의 두께 등을 적절히 선택함에 따라 거기에 적합하도록 점착 3물성의 균형을 맞추는 것이 가능해진다. 그러기 위한 시험칙도 종류별로 제창되어 있으므로, 그러한 것을 참고로 하거나, 혹은 그것 이외의 독자적인 경험적 지침을 근거로 하여 연구개발이 진행된다.

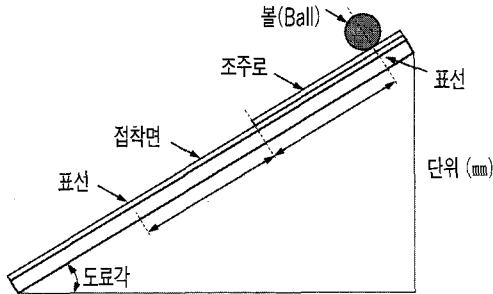
이러한 점착 3물성은, 통상 각각의 규격으로 규정된 일정한 온도나 타임 스케일로 규정되지만, 만약 온도나 변형 속도를 계통적으로 변화시켜 규정할 수 있다면 그 유동학적인 특징으로부터 점착 현상의 메카니즘에 대해 고찰할 수 있게 되리라 생각한다.

3. 택(Tack)

3-1. 볼 택(Ball Tack)

점착제의 택(Tack) 정도를 간단하게 평가하는 방법 중 하나로, “구전법(球轉法)”이 있다. 이것은, 점착제 위에 강구(볼)를 굴려, 어느 범

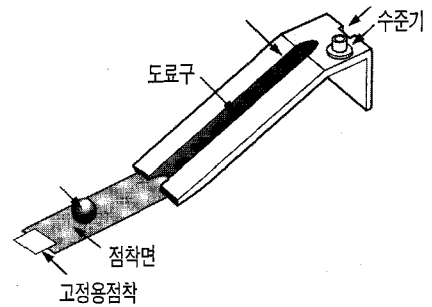
(그림 3) J.Dow법 택(Tack) 시험 장치



위 내에 정지한 볼의 직경, 또는 일정한 직경의 볼이 어느 정도의 초속도(初速度)로 점착제 위를 굴러 그것이 정지하기까지 진행한 거리에 따라 택(Tack)의 정도를 판단하는 방법이다. 볼이 점착제 위를 구를 경우에는 그 표면과 점착제가 짧은 시간 내에 접촉과 파괴(벗겨짐)를 반복하게 되므로 점착제의 순간적인 점착성이 볼의 회전 운동에 반영될 것이라는 기대가 담겨져 있다. 대표적인 시험법으로서 “J.Dow법” “PSTC-6법”이 있다. 이러한 구전법에 의해 평가된 택(Tack)을 “볼 택(Ball Tack)”이라 부른다.

J.Dow법의 시험장치를 [그림 3]에 모식적으로 나타냈다. 경사각이 30°인 면 위에 깔아놓은 점착 테이프 위에서 각종 크기의 볼을 일정한 조건으로 굴러, 일정한 범위 내에서 정지하는 볼 중 가장 큰 것의 직경이 결정된다. 그 볼의 직경이 n/32 인치라면 그 점착제의 택(Tack)은 “볼 넘버n”이라고 표현된다. 예를 들면, 어떠한 점착 테이프의 택(Tack)이 “볼 넘버18”이라는 것은, 직경 18/32 인치 이하의 볼은 점착제의 영역 내에서 정지하지만, 그보다 큰 볼은 그것을 통과해 버린다는 의미이다. 볼 넘버가 클수록 점

(그림 4) PSTC-6법 택(Tack) 시험 장치



착제의 택(Tack)은 크다. 이 방법은 일본에서 가장 자주 사용되고 있다. J.Dow법에서는 시료인 점착 테이프를 경사진 평면 위에 셋팅하기 때문에, 이 방법에서 얻을 수 있는 택(Tack)을 “경사식 볼 택(Ball Tack)”이라 부르기도 한다.

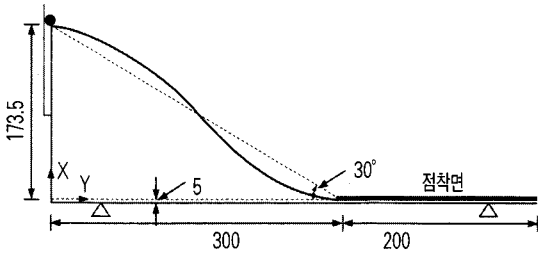
PSTC-6법의 시험장치를 [그림 4]에 모식적으로 나타냈다. 이 방법에서는 조주로(助走路)에만 경사를 주고, 점착제는 수평에 놓아 일정한 크기(직경 14/32 인치)의 볼을 굴러, 점착제면 위의 주행거리(정지거리)가 규정된다. 이 거리가 택(Tack)은 커진다. 통상, 롤링 볼 택(Rolling Ball Tack)이라고 하면, 이 방법에 의해 측정된 택(Tack)을 가리키는 경우가 많다.

여기에는, “Bauer&Black법” “Ashland법” “Nichiban법” “Douglas법” 등이 있는데, 상세한 설명은 생략하겠다. 어쨌든 조주(助走)의 부분에 독특한 연구가 진행되고 있다.

역학적으로 생각하면 이러한 시험법은 모두 점착제가 그 위에서 굴러가고 있는 볼의 회전운동을 어느 정도 방해하고 있는지, 즉, 점착제의 회전마찰계수를 문제로 삼은 점을 알 수 있다. 회전마찰계수는 몇 가지의 방법으로 표현된다.

(a) 장구가 다른 재료 위를 굴러갈 경우, 힘의

[그림 5] Nichiban법 택(Tack) 시험 장치



비대칭성에 근거한 모멘트(Moment)Mf가 수직항력 N에 비례함으로 해서 그 비례계수 $f(=Mf/N)$ 으로 나타낸다.

(b) 강구가 다른 재료 위를 구르면, 그 재료는 변형했다가 그 후 다시 회복된다. 그 때 산일하는(흩어져 없어지는) 에너지 양 로 나타낸다.

(c) 에너지 산일량을 부하 W로 나눈 값 ($=W$)로 나타낸다.

이러한 것은 각각 다른 차원을 가진 양이지만, 필요한 수치를 알고 있으면 서로 환산할 수 있다.

이 중에서 볼의 회전 운동을 운동방향식으로 기술할 경우에는 힘의 비대칭성에 근거해서 모멘트 Mf와 수직항력 N의 비 $f(=Mf/N)$ 를 이용하는 것이 편리하다. 이 경우 f의 차원은 [길이(cm)]가 된다.

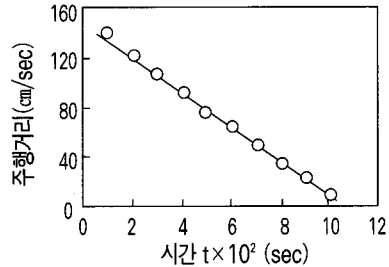
또한 浦濱 등은 $Mf(=fN)$ 을 “회전점착 모멘트”라 이름 붙여 이것에 의해 점착제의 택(Tack)을 표현하고 있는데, 본질적으로는 똑같이 취급할 수 있다.

수평으로 놓여진 점착제 위에서 볼을 굴릴 경우의 운동방정식으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$d^2x/dt^2 = -5gf/7R \quad \dots\dots(1)$$

여기에서 R은 볼의 반경이다.

[그림 6] 시판 점착 테이프 위를 구르는 볼의 진행속도와 경과 시간



(i) 회전마찰계수의 속도의존성을 고려하지 않은 경우

이 경우는, 볼의 속도 v, 주행거리(x-x0) 및 정지거리(x-x0) st를 각각 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$v = v_0 - (5gf/7R)t \quad \dots\dots(2)$$

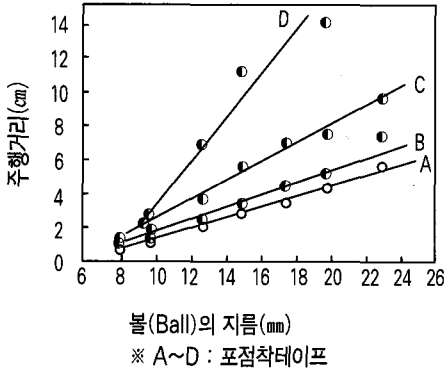
$$x - x_0 = v_0 t - (5gf/14R) t^2 \quad \dots\dots(3)$$

$$(x - x_0) st = 7Rv_0^2 / 10gf \quad \dots\dots(4)$$

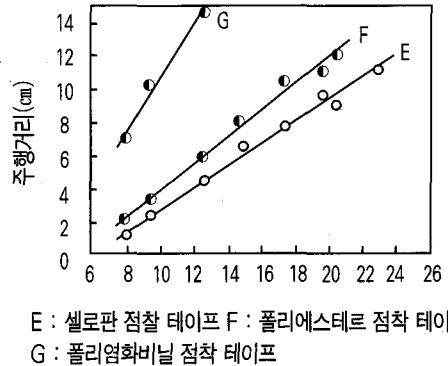
鎌形, 齊藤(次雄), 遠山은, [그림 5]의 Nichiban법 택 테스터(Tack Tester)를 이용해서 시판중인 점착 테이프의 볼 택(Ball Tack) 실험을 실시했는데, 고속 카메라를 사용하여 [그림 6]의 데이터를 얻어냈다. [그림 6]의 데이터를 직선으로 본다면 f는 정수이므로, (2)식을 적용할 수 있다. 이 점착 테이프의 회전마찰계수는 $f = 1.62 \pm 0.11 \text{cm}$ 가 된다.

또한 그들은 볼의 직경과 점착제 상의 주행거리(정지거리)와의 관계에 대한 실험도 실시하여, [그림 7] 및 [그림 8]의 데이터를 얻어냈다. 각각의 점착 테이프에 대해 직선적인 관계를 얻을 수 있는데, (4)식을 참조하면 이것은 점착제의 회전마찰계수 f가 이 범위에 있어서 볼의 직경에 강하게 의존하지 않는다는 것을 의미하는 것이다. 단순하게 $d(x-x_0) st/dR = 7v_0^2 / 10gf$

[그림 7] 각종 시판 점착 테이프 위를 구르는 볼의 직경과 정지거리



[그림 8] 각종 시판 점착 테이프 위를 구르는 볼의 직경과 정지거리



[표 1] 각종 시판 점착 테이프 위를 구르는 볼의 직경과 정지거리

점착테이프	회전마찰계수(cm)
A(포점착 테이프)	2.8
B(포점착 테이프)	2.3
C(포점착 테이프)	1.5
D(포점착 테이프)	0.6
E(셀로판 점착 테이프)	1.2
F(폴리에스테르 점착 테이프)	1.0
G(폴리염화비닐 점착 테이프)	0.5

라고 두고, 이러한 점착 테이프의 회전마찰계수를 예측하면, [표 1]의 수치를 얻을 수 있다. 일본기계학회편 “기계공학편람”(1937)에는 일반적인 재료의 회전마찰계수가 리스트 업 되어 있는데, 예를 들면, 목재와 목재(목재 위에서 목재를 굴릴 경우)에 대해서는 $f=5 \times 10^{-2} \text{cm}$, 연강(軟鋼)과 연강에 대해서는 $f=5 \times 10^{-3} \text{cm}$, 담금질한 강철과 동에 대해서는 $f=(5 \sim 10) \times 10^{-4} \text{cm}$ 라는 수치를 얻을 수 있으며, 점착제의 회전마찰계수는 이러한 점착성(점착성)이 없는 재료의 회전마찰계수의 102~3배 정도임을 알 수 있다.

단, 회전마찰계수의 반경의존성을 무시한 경

우에는 [그림 7] 및 [그림 8]의 직선이 원점을 통과하지 않으면 안 되지만, 이것을 엄밀하게 만족시키고 있지 않은 점, 같은 저자들은 그 밖에도 많은 데이터를 공표하고 있으나, 그 중에는 볼 속도의 시간적 변화가 반드시 [그림 6]과 같이 직선적이지 않는 것도 있다는 점, 더욱이, Nichiban법이나 PSTC-6법에서는 회전 높이를 H로 한다면 초속도는 $v_0=(10gH/7)^{1/2}$ 가 되므로, (3)식에 의하면 $(x-x_0)$ st와 H와의 관계는 원점을 통과하는 직선이어야만 하는데, 이것이 곡선이 되는 경우가 많다는 점 등을 고려하면 [그림 7] 및 [그림 8]의 테이터에 위의 식을 무리하게 대입하는 것은 엄밀한 의미에서 바람직하지 못하다.

점착제 상의 볼 회전 운동을 보다 상세히 분석하기 위해서는 회전마찰계수의 속도의존성, 볼의 반경이나 중량에 대한 의존성, 점착제나 볼의 계면화학적 성질에 대한 의존성 등을 자세히 검토해 나갈 필요성이 있다고 생각된다. 저자들은 이 중 f의 속도 의존성에 대해 일련의 연구를 실시했다. [ko]