

Rotational Rheometry(III): Application to Polymeric Systems

박 정 옥

1. 서 론

지난 두 편에서는 rheometry의 기본이 되는 여러 가지 유변학적 개념과, 실험 방법 및 유변 물성-구조 관계에 대하여 살펴 보았다. 이러한 지식을 응용하면, 상당히 다양한 방면에서 rheometry가 고분자 물질의 물성 개선 및 가공성 개선 등에 유익하게 이용될 수 있다. 본 3편에서는 rheometry가 어떻게 실제 문제에 적용되어 도움을 줄 수 있는지 구체적인 예를 몇 가지 들어 보임으로써 이해를 돕고자 한다.

본 3편을 준비하면서 처음에는 필자의 경험을 바탕으로 정리할까 하였으나, 개인의 경험에 한계가 있다는 것 외에도 기업체 연구소의 연구원으로써 경험을 드러 낼 수 있는 데 한계가 있다는 인식에서 기존 문헌만을 이용하기로 하였다.

2. Rotational Rheometer의 응용

2.1 인쇄용 잉크의 품질 문제¹

신문 인쇄용 잉크 제조회사에, 잉크 색에 따라 인쇄되는 형상이 다르고 수시로 인쇄 공정을 멈춰야 하는 일이 발생한다는 불만이 고객으로부터 접수되었다. 흑색 잉크는 유동성이 좋지만 노란색 잉크는 인쇄판에 축적되었다가 종이에 번지고(blots) 결국 인쇄 중단까지 야기되었다.

인쇄 과정에서 잉크는 압축되었다가(compressed) 늘어나고(stretched) shear를 받아서 파괴되고(fractured) 종이에 옮겨진 후 마르게 되는 심한 상황 변화를 수 초 내에 모두 겪게 된다. 이 때 종이의 이송 속도는 μ 를 경우 초당 9m에 이른다. 따라서 가공 특성(process performance)을 정확하게 측정하기 위한 방법이 필요했다.

잉크의 유동 특성을 규명하기 위하여 oscillation 실험을 하고 complex viscosity(η^* , 에너지 손실의 크기)를 측정하여 그림 1과 같은 결과를 얻었다. 흑색 잉크가 노란색 잉크보다 점도가 훨씬 낮았을 뿐 아니라, shear frequency (즉 shear rate)에 따른 변화도 작았다.

두 잉크의 shear thinning 현상이 이와 같이 다른 것은 잉크 내에 존재하는 molecular structure의 차이에 의한 것이라고 보인다. 따라서 oscillation의 진폭을 1%→15%→1%로 바꾸어 step strain 실험을 하면서 G' (잉크에 의한 에너지 저장량)을 측정하여 그림 2와 같은 결과를 얻었다. 흑색 잉크의 경우에는 strain이 바뀌어도 G' 의 변화가 없었으므로, 흑색 잉크에는 aggregation 등의 내부 구조가 없는 셈이다. 그러나 노란색 잉크의 경우에는 1%에서 15%로 strain이 증가할 때 G' 이 서서히 감소하였고, 다시 1%로 감소할 때 G' 이 서서히 증가하였다. 따라서 노란색 잉크는 점도가 높을 뿐만 아니라 aggregate 등의 structure가 서서히 변형되고 회복되기 때문에 위와 같은 문제를 일으킨 것이다.

이와 같은 실험 결과로부터, 잉크의 구조에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 인자를 조절하면서 적절한 잉크를 제조할 수 있고, quality control을 통해서 고객불만이나 불량품을 줄일 수 있었다.



박정옥

1975~ 서강대학교 화학과(B.S.)
1978 서강대학교 화학과(M.S.)
1976~ 한국과학기술연구원(KIST)
1979.3 화학공정연구실
1986 Carnegie Mellon University
화학과(Ph.D.)
1987.1~ 럭키기술연구원 고분자 연구소
현재 책임연구원

Rotational Rheometry(III): Application to Polymeric Systems

(주)럭키기술연구원 고분자연구소(Jung Ok Park, Lucky Research Park, Petrochemicals and Polymers, P. O. Box 108, Yusung, Taejon 305-343, Korea)

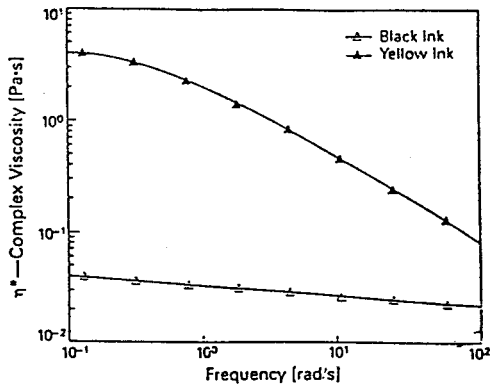


그림 1. Complex viscosity as a function of frequency for a black and a yellow ink.¹

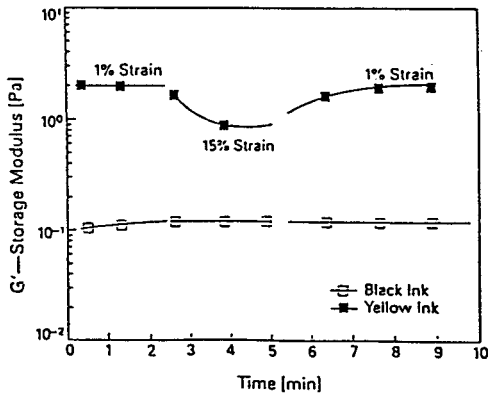


그림 2. Storage modulus(G') as a function of time and strain for a black and a yellow ink.¹

여기에서는 잉크를 예로 들었지만, 모든 emulsion이나 suspension 또는 latex 에서 내부 구조의 적정화 및 분산성 조절, 입자의 크기 등은 제품의 특성과 가공성에 큰 영향을 미친다.¹ Storage modulus가 물성 개선 및 예측에 이용된 다른 예를 하나 더 보기로 하자.

2.2 과일 주스 혼합액의 안정성 예측²

과일 주스를 제조하는 어떤 음료수 제조회사에서, 보관 기간 동안 주스 내의 작은 입자들이 가라 앉는 것을 발견하였다. 과일 주스 suspension의 점도가 높으면 저장 안정성은 증가되었지만, 혼합 공정이 어려워지고 비용이 많이 들게 된다. 따라서 혼합이 용이하면서도 저장 안정성이 우수한 처방을 개발하기 위하여, 주스의 안정성과 구조 특성의 관계를 조사하기로 하였다.

과일 주스 혼합액에 내부 구조가 상당량 존재하면, 탄성 특성(G')이 증가하고, 저장 중(즉 shear rate이 낮을 때)에 주스 입자가 가라 앉는 것을 막을 수 있다. 따라서 주스의 내부 구조를 파괴시키지 않는 조건에서 실험하고 그

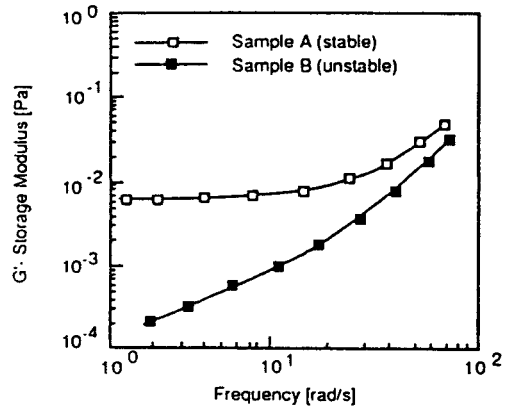


그림 3. Storage modulus as a function of frequency for a stable and an unstable juice blend.²

결과로부터 구조에 대한 정보를 얻어야 했다. 일반적으로 oscillation 실험에서는 시편에 작은 진폭의 strain을 왕복 운동으로 가하기 때문에, 시편 내의 내부 구조를 파괴시키지 않게 되고 따라서 내부 구조 연구에 유용하다.

그림 3은 frequency 변화에 따른 G' 의 변화를 나타낸다. 저장 안정성이 우수한 sample A는 low frequency에서 G' 이 클 뿐 아니라 plateau 현상을 보여, 내부구조가 상당량 존재하며 탄성이 크다는 것을 알 수 있다. 한편 sample B는 G' 이 작고, 주어진 조건에서 plateau에 도달하지 않았는데, 이것으로부터 내부구조가 충분히 존재하지 않기 때문에 settling이 일어나게 된 것임을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 test를 수행함으로써 저장 안정성이 우수한 주스 blend를 제조할 수 있다.

2.3 Powder Coating의 균일성(uniformity) 개선³

Polyester-urethane계 powder coating을 수행하던 중 어떤 lot의 생산품은 coating이 균일하게 되지 않는 문제가 발생하였다. 이와 같은 코팅성의 차이가 어디에서 오는지를 규명하기 위한 방법이 필요했다.

우선 polyester-urethane resin의 특성을 비교하기 위하여 oscillation 실험을 하였다. 그림 4에 의하면 good sample의 경우, low frequency에서 점도가 낮은 뿐만 아니라, frequency에 따른 점도 변화도 매우 작다. 그러나 poor sample의 경우에는 low frequency에서 점도도 높고, shear thinning 현상이 매우 크다. 이로부터 powder coating이 균일하게 되기 위해서는, low frequency에서 점도가 낮아야 유동성과 leveling 특성이 우수하게 된다는 것을 알았다. 이와 같은 목표를 달성하기 위해서는 적당한 첨가제를 투입하거나 사용하는 resin의 분자량을 작게 하고 분자량 분포를 좁게 함으로써 달성할 수 있음을 알았다.

2.4 일회용 아기 기저귀의 접착제 성능 개선⁴

일회용 기저귀를 사용하는 고객들로부터 어떤 때는 접착 테이프가 잘 붙지 않고, 어떤 때는 잘 떨어지지 않아 사용

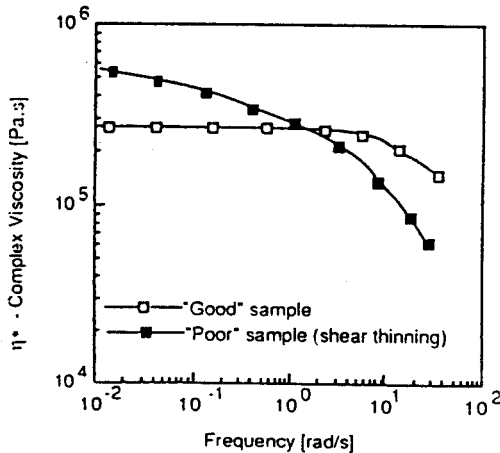


그림 4. Complex viscosity as a function of frequency for a good and a poor powder coating resin.³

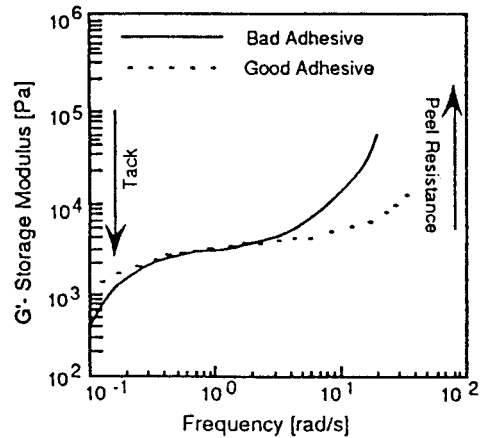


그림 5. Storage modulus as a function of frequency for a good and a bad adhesive.⁴

이 불편하다는 불만사항이 접수되었다. 어떤 고객은 아예 다른 회사의 제품으로 바꾸어 사용하기로 하였다.

손 힘만으로 붙이고 떼는 pressure sensitive adhesive (PSA)의 끈적한 성질(tackiness)과 탈착(peel) 성능은 점도 및 탄성과 관계된다. 기저귀 사용 중 (낮은 shear rate)에 탄성이 저하되면 tacky해 지고, 접착제가 너무 tacky해서 탄성이 너무 낮아지면 기저귀에 붙어 있지 못한다. 반면에 탈착(peel)은 속도가 빠른 과정이므로, high shear rate에서의 탄성이 클 때는 떼어 내기가 어려워진다.

따라서 좋은 PSA는 적당한 peel resistance와 적당한 tacky 특성을 가져야 하며, 이것은 그림 5와 같은 실험결과를 통하여 예측하고 개선할 수 있었다.

2.5 Epoxy/Glass Fiber 복합소재의 Moisture Resistance 평가⁵

비행기에는 epoxy/glass fiber 복합소재로 만들어진 부품이 많이 사용된다. 그런데 어느 한 부품이라도 불량이면 결국 failure가 일어나서 엄청난 재산 피해를 입을 뿐 아니라 인명 피해도 있을 수 있다. 일반적으로 복합소재의 glass fiber를 표면처리하면 기계적 강도 등 여러 가지 성능이 향상되지만, 이러한 표면처리가 moisture resistance에 어떤 영향을 주는지 규명할 방법이 필요하였다.

새로 개발된 표면처리제를 사용한 sample 2종(A,B)과 moisture resistance를 부여하는 것으로 알려진 물질을 사용한 sample(C)에 대하여 oscillation 실험을 하였다. 그림 6에 의하면, 건조한 상태에서는 A~C 모두 G' 값이 크고 동일하여 우수한 복합소재인 것으로 나타났다.

그러나 이들 sample을 끓는 물에 일정 시간 동안 넣었다가 동일한 실험을 반복하였을 때는 그림 7과 같은 결과를 얻었다.

Sample A와 C는 원래의 G' 값을 그대로 유지했지만,

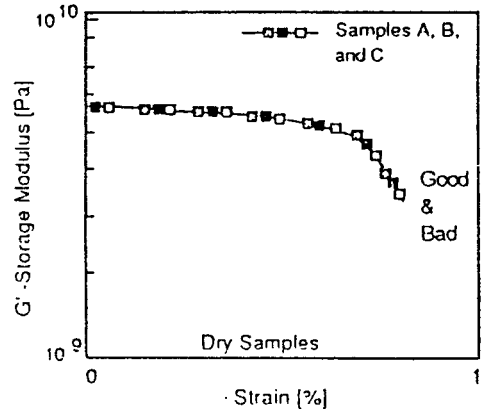


그림 6. Storage modulus as a function of strain for dry samples.⁵

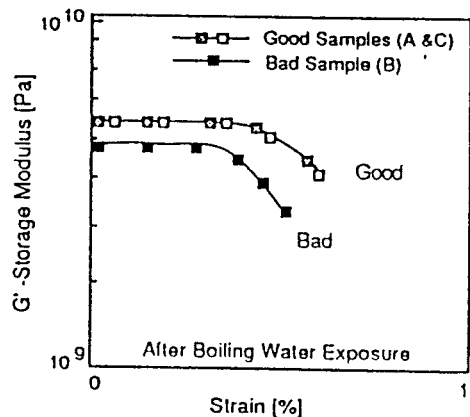


그림 7. Storage modulus as a function of strain for samples following boiling water immersion.⁵

sample B의 경우는 G' 값이 감소한 것으로 보아, 끓는 물에 있을 때 glass fiber와 resin 사이의 접착이 파괴된 것을 알 수 있다. 따라서 sample B로 만들어진 복합소재 부품은 moisture에 노출되었을 때 결국 망가질 것이다. 이러한 결과를 이용하면 표면처리제의 효과를 평가할 수 있고, 좋은 복합소재를 제조할 수 있다.

2.6 복합소재의 성능 예측⁶

Epoxy/graphite composite를 사용하여 테니스 라켓을 제조하는 회사에 어느정도 사용 후 라켓이 쉽게 부러진다는 불만이 접수되었다. 부러진 라켓을 반쯤 받아 보았을 때 작은 crack들이 많이 생겨 있는 것이 발견되었다. 그러나 제조 후에 실시한 X-ray, 초음파, 전자파 등의 실험에서는 아무런 결함(flow)도 발견되지 않았으므로 당황하였다. 이러한 방법은 macroscopic flaw만을 조사할 수 있는 것이므로, 결국 fiber와 resin 간의 접착이 불량하거나 파괴된 것을 알 수 있는 다른 방법이 필요하였다.

Composite의 G' 은 fiber의 함량과 배향 정도를 나타내는 척도이다. 한편 G'' 은 에너지 손실의 척도이므로 resin 분자의 움직임과 밀접한 관계가 있다. 따라서 G''/G' , 즉 $\tan \delta$ 를 측정하면 제품 내의 structure 변화를 알 수 있다.

그림 8은 부러진 라켓과 괜찮은 라켓의 실험 결과이다. 두 라켓의 G' 은 거의 유사한 값을 가지지만 부러진 라켓의 $\tan \delta$ 가 훨씬 크게 관찰되어, G'' 이 많이 증가했음을 알 수 있다. 이것은 사용 도중의 휘어짐(flexing)과 피로(fatigue)로 인해 fiber와 resin 사이의 결합이 파괴되어 라켓 내부 구조에 void가 생겼음을 의미한다. 따라서 복합소재로 시편을 만들고, fatigue를 일부를 가한 후 G' 과 $\tan \delta$ 를 측정함으로써 fiber와 resin 사이의 접착성을 평가할 수 있었고, 현저한 품질 개선과 고객 만족을 달성할 수 있었다.

2.7 Epoxy Resin의 경화 특성 비교⁷

인쇄 회로 기판(Printed Circuit Board) 제조 회사에서 어떤 epoxy resin을 사용하면 resin이 woven glass cloth에 붙지 않고 흘러 내려 버리는 문제를 발견하였다. 열분석

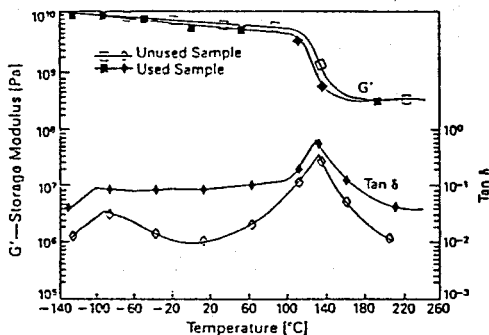


그림 8. Storage modulus and $\tan \delta$ as function of temperature for used and unused composite product.⁶

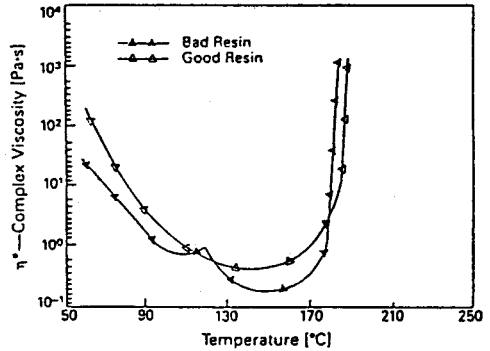


그림 9. Viscosity as a function of temperature for a good and a bad epoxy resin.⁷

등의 방법으로 조사하였지만 정상적인 resin과 다른 점이 발견되지 않았다.

Resin의 점도는 수분, 열, 가공조건 등의 제반 요인에 의해 변한다. 그림 9는 good resin과 bad resin을 경화할 때의 점도 변화를 나타낸다. Bad resin의 경우에는 약 100 °C 정도에서 조그만 peak를 하나 보이고 나서 점도가 good resin보다 더 낮아졌음을 알 수 있다.

100 °C가 되면 수분이 증발하여 제품 내에 void를 남기게 되므로 점도가 상승한다. 그러나 온도가 더 상승하면 잔존하는 수분이 일시적으로 가소제로 작용하게 되어 점도가 good resin(dry resin)보다 낮아진다. 따라서 glass cloth에 resin을 밀착시키기(impregnation) 위하여 압력을 가할 때, 점도가 낮으면 resin이 이동(migration)하게 되고 resin과 cloth 사이의 접착이 나빠진다. 그림 9와 같은 결과를 이용하여 가공 시에 압력의 크기를 조절함으로써 bad epoxy도 사용할 수 있게 되었다.

2.8 HDPE 파이프 두께 변화 문제

HDPE(고밀도 폴리에틸렌) 파이프 압출 가공 업체에서 어떤 HDPE 수지를 사용하면 파이프가 너무 두껍거나 얇아서 고객의 spec에 맞지 않는 제품이 생산되는 문제가 발생하였다. Capillary rheometer나 melt flow index 실험을 하였지만 resin간 차이점이 발견되지 않았다.

G' 이 크다는 것은 분자 엉킴(molecular entanglement)이 많고, 탄성이 크다는 것을 의미한다. 탄성(G')의 크기는 die swell과 관계가 있기 때문에, gauge uniformity와도 관계된다. 즉 G' 이 크면 탄성이 증가하여 die swell도 크고 gauge 두께가 두꺼워진다. 따라서 두께가 일정하려면 die swell이 일정하여야 한다.

HDPE pellet으로 sheet를 만들어서 oscillation 실험을 하여 그림 10과 같은 결과를 얻었다.

결국 sample B보다 A에 entanglement가 더 많고 이것이 thick gauge의 원인이 되었음을 알 수 있었다. 따라서 HDPE의 분자량과 분자량 분포를 조절하여 entangle-

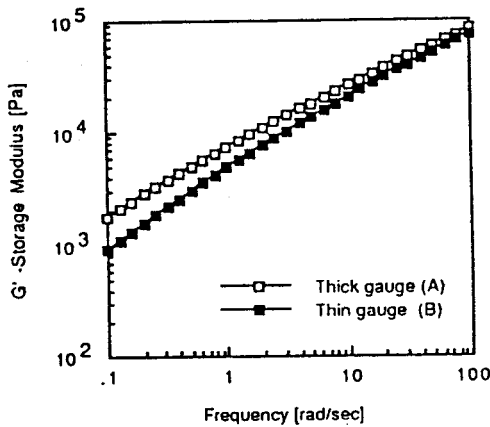


그림 10. Storage modulus for pipes of thick and thin gauges.⁸

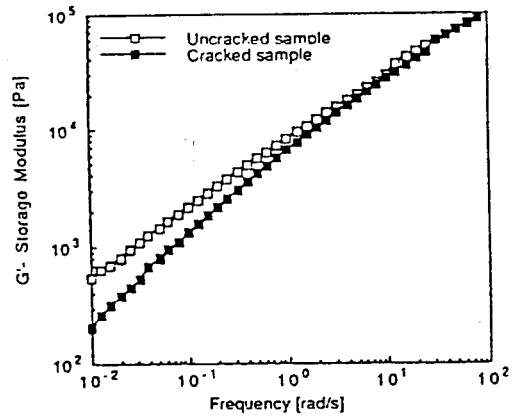


그림 11. Storage modulus as a function of frequency for a cracked and an uncracked PE sample.⁹

ment와 die well을 조절함으로써 두께가 균일한 파이프를 생산할 수 있다.

2.9 폴리에틸렌 병의 Weld-Splitting 문제 해결

PE병을 blow molding 하는 업체에서 병에 제품을 채울 때 병 밑바닥의 weld line을 따라서 splitting 및 crack이 발생하는 문제 때문에 불량품을 버려야 하고 생산성이 저하되는 문제에 봉착하였다. 기존에 해 오던 melt flow index나 capillary rheometer 실험으로는 lot별 PE 수지간의 차이점을 발견할 수 없었다.

고분자 재료의 강도(strength)는 분자의 entanglement에 기인하므로 분자량에 크게 의존한다. 그런데 분자량과 가장 밀접한 관계가 있는 것은 zero shear viscosity이므로, 가능한 한 low shear rate에서 lot별 PE 수지의 특성 비교가 필요한 것으로 판단되었다.

그림 11과 그림 12에 의하면, crack이 발생한 불량품 PE는 양호한 PE sample보다 low frequency에서 G' 과 점도가 모두 낮았다. 결국 불량품 PE는 분자량이 낮아서 weld line에서 entanglement가 충분히 발달하지 않기 때문에 splitting과 crack이 발생하고 장시간 사용이 어려운 것으로 판단되었다.

2.10 폴리에틸렌 필름의 Quality Control¹⁰

PE 필름을 blow 성형하는데 extrusion 속도와 bubble gauge uniformity를 동시에 유지할 수 없는 문제가 발생하였다. 어떤 PE resin은 film blowing시 extrusion이 잘 되었지만 gauge uniformity가 spec을 벗어났다. 그러나 gauge uniformity를 향상시키기 위해서 성형조건을 변경하면 생산속도가 감소하였다. 결국 PE lot별로 품질 불량률과 생산 속도 변동이 심하였다.

이 업체는 melt index를 이용하여 extrusion 특성을 예측해 왔고, melt tension을 이용하여 bubble stability를 예측하여 왔다. 그러나 이러한 방법은 시간이 오래 걸릴 뿐 아니라, PE resin의 가공 특성을 정확히 예측하는데 충분

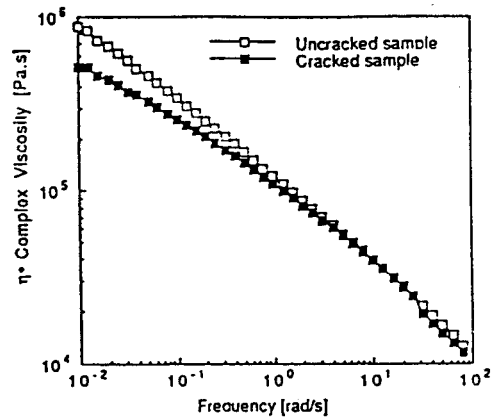


그림 12. Complex viscosity as a function of frequency for a cracked and an uncracked PE sample.⁹

한 정보를 제공하지 못하였다.

Bubble stability와 gauge uniformity는 low shear rate에서의 특성과 밀접한 관계를 가지며, high shear rate에서의 물성은 extrusion 특성과 관계가 깊다. 따라서 합격품 PE와 불량품 PE에 대하여 가능한 한 넓은 범위의 frequency에서 실험하고 그림 13과 같은 결과를 얻었다.

합격품 PE는 low shear rate에서의 점도가 높아서 bubble stability gauge uniformity가 우수했으며, high shear rate에서의 점도는 낮기 때문에 extrusion 속도(생산속도)가 높은 것으로 나타났다. 결국 이와 같은 정보를 이용하여 PE lot의 분자량과 분자량 분포를 철저히 control 함으로써 제품의 품질과 생산속도를 모두 향상시킬 수 있었다.

2.11 ABS 수지에서 Rubber Size 및 Graft 율의 측정

ABS(acrylonitrile-butadiene-styrene)를 이용하여 여행용 가방을 제조했는데, 어떤 ABS lot를 이용한 가방이 쉽게

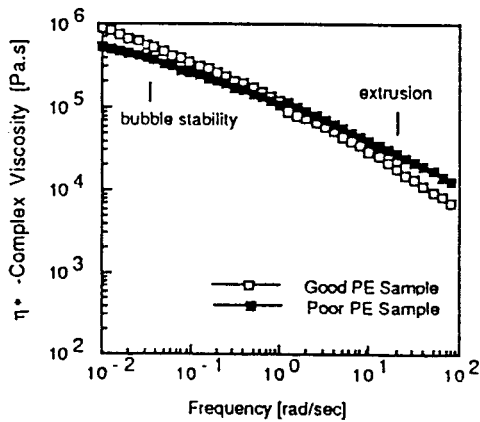


그림 13. Complex viscosity as a function of frequency.¹⁰

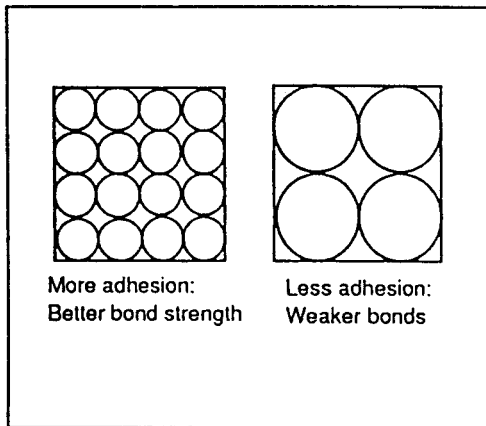


그림 14. Differences in grafting for small and large particles.¹¹

깨어지는 문제가 발생하였다. 그러나 Izod 충격강도 실험으로는 불량 가방에 사용된 ABS와 좋은 제품의 ABS 사이에 아무런 차이도 발견할 수 없었다. ABS 수지의 충격 강도는 rubber의 크기 및 graft율에 의해서 결정된다. 따라서 쉽고 빠르게 정확한 방법으로 rubber의 크기와 graft율을 측정할 방법이 필요하였다.

Rubber의 크기가 작으면 rubber volume에 대한 surface area가 커지고, graft율이 증가하기 때문에 strength가 증가한다(그림 14). 이러한 재료는 terminal(또는 flow) region에서 relaxation time이 길어지며, 따라서 low frequency에서 G' 이 증가한다.

수지 내에 존재할 수도 있는 orientation effect를 제거하기 위하여 Tg 보다 높은 온도에서 low frequency 위주의 oscillation 실험을 하고 그림 15와 같은 결과를 얻었다. 튼튼한 가방을 제조하는데 쓰인 ABS sample B는 예상했던대로 low frequency에서 G' 의 값이 컸다. 이후로는 이와

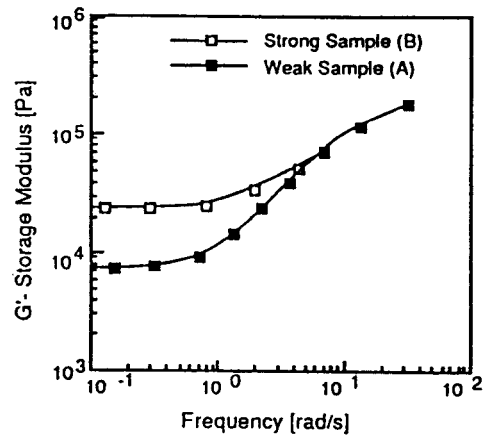


그림 15. Storage modulus as a function of frequency for strong and weak ABS samples.¹¹

같은 실험을 이용하여 TEM을 이용하지 않고도 ABS 중의 rubber에 대한 size 및 fraet율을 쉽게 예측 또는 비교할 수 있었고, 여행용 가방을 제조하기에 앞서 quality assurance의 한 방법으로 선택되었다.

2.12 폴리에스터 섬유 특성 예측

폴리에스터 섬유회사에 의류 제조 업체로부터 claim이 제기되었다. 어떤 lot의 fiber를 사용하여 만든 의류는 세탁기나 건조기의 온도에 견디지 못하고, 줄어들거나 퍼지지 않는 영구 주름살이 생겼고, 이에 화가 난 소비자들이 옷을 반품하는 사례가 발생하였던 것이다.

모든 섬유를 제조할 때, 제조방법은 동일하였지만, 가공 조건이 line 마다 약간씩 달랐었다. 즉 fiber spinning 속도, drawing 속도 등이 달랐던 것이다. 이 회사에서는 현재까지 했던대로 QC test(IR 및 X-ray)를 수행하였으나, processing line별 fiber 사이에 아무런 차이도 발견할 수 없었다.

의복이 세탁기나 건조기 온도에서 변형을 일으키지 않기 위해서는 의복 제조에 사용된 섬유의 Tg가 이들 기기의 사용 온도보다 높아야 한다. 그런데 fiber를 제조할 때 draw를 많이 하면 structural orientation이 증가하게 되고, 따라서 Tg가 상승한다. 따라서 Tg와 drawing 조건과의 관계를 측정하여, 적절한 범위의 drawing 점도를 선정함으로써 의류의 내열성을 향상시킬 수 있다.

이와 같은 원리를 이용하여 orientation 정도를 측정하기 위하여, oscillation 실험을 하고 넓은 온도 범위에서 $\tan \delta$ (손실된 에너지와 저장된 에너지의 비, 즉 G''/G')를 plot하여 그림 16과 같은 결과를 얻었다. 예측한 바와 같이 불량 fiber는 Tg가 낮았으며, 이것은 drawing이 충분하지 않았던 line의 생산품임이 판명되었다.

2.13 유기 용매형 또는 수용성 접착제의 특성 평가¹³

유기용매에 녹아 있는 아크릴 시스템이나 비닐 아세테이

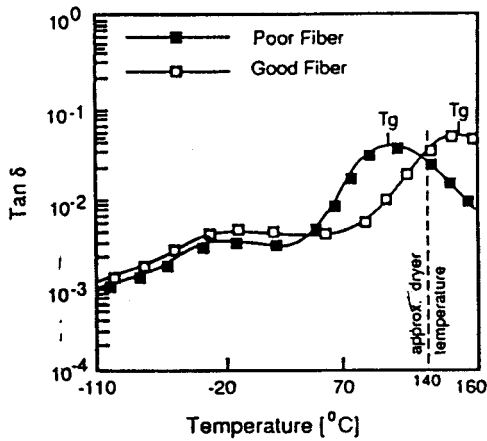


그림 16. Tan δ values for good and poor polyester fiber samples.¹²

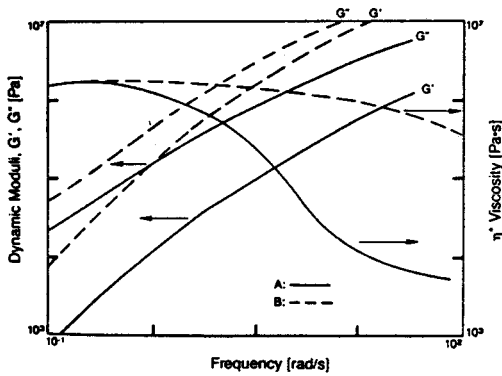


그림 17. water-based spray adhesives.¹³

트 라텍스는 대표적인 접착제이다. 나무, 플라스틱 또는 종이 위에 이들 접착제를 도포할 때는 주로 spray, roller coating 및 calendering 등의 방법이 사용된다. 접착제가 spray gun 이나 roller를 떠나는 순간에는 유동성이 매우 좋아야 하지만, 일단 substrate에 묻은 후에는 표면 평활성을 유지하면서 drip-free 한 상태를 유지해야 하며, 빈틈 없이 균일하게 도포되어야 한다. 따라서 접착제의 shear thinning 현상이 상당히 요구되며 이것은 사용되는 고분자의 분자량 및 분자량 분포를 적절히 조절함으로써 달성할 수 있다. 그림 17는 이러한 현상을 보여주는 예로써, 실제 적용시 sample A는 균일하게 코팅이 되었으나, sample B는 불균일하였다.

2.14 Rubber 중의 분산 특성 평가¹⁴

Rubber를 사용하기 위해서는 가공 조건과 최종 용도에 따라서 여러가지 첨가제들을 투입하게 된다. 만일 이러한 첨가제가 제대로 분산되지 않는다면, 좋은 재료를 사용하 고도 물성이 나빠지게 된다.

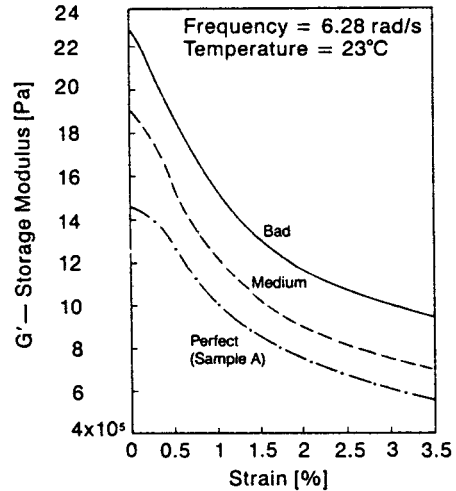


그림 18. Carbon black dispersion in rubber.¹⁴

Rubber 중의 분산 특성을 쉽게 평가하기 위해서는 그림 18과 같이 strain을 증가시키면서 oscillation 실험을 수행할 수 있다. 여기서 세 가지 sample은 carbon black을 rubber에 투입할 때 compounding 조건을 다르게 하여 얻은 것이다.

Strain이 증가하면서 storage modulus G' 이 감소하는 것은, van der Waals 힘에 의해서 carbon black이 약한 aggregate로 존재하다가, strain을 받아 aggregate가 깨지기 때문이다. 반면에 low strain에서는 filler 함량이 증가할수록, 또 aggregate의 void volume이 증가할수록 modulus가 증가하게 된다.

2.15 페인트와 코팅 분야에서 Sagging 및 Leveling 문제 해결^{15,16}

Spray coating 시에는 spray nozzle에서 매우 high shear를 받으므로 점도가 낮아야 유동성이 좋으나 coating 후에는 점도가 높으면서도 elasticity가 적당히 커야 sagging을 방지할 수 있다. 이것은 앞에서 언급한 유기용매형 및 수용성 접착제의 경우와 매우 유사한 문제로써, elasticity와 shear thinning을 최적화 하는데는 여러 가지가 있으나, 그 중의 한 예로써 sagging 방지제를 첨가하는 방법이 흔히 쓰인다. 그림 19에서 보는 바와 같이 sagging 방지제를 사용하지 않았을 때는 점도와 elasticity가 모두 낮아서 pumping은 쉬우나 sagging 현상을 방지할 수 없다. 한편 sagging 방지제를 첨가하면 특히 low shear rate에서 점도와 탄성이 모두 증가하고 shear thinning도 증가하기 때문에 coating 작업도 쉽고 sagging도 없는 좋은 필름을 얻을 수 있다.

그러나, sagging 방지를 위하여 thickener를 첨가할 때, 이로 인해 탄성이 지나치게 증가하면, leveling 특성이 나

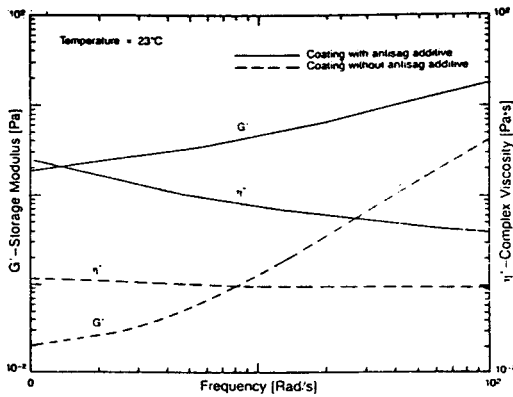


그림 19. Comparison of a spray coating with and without an astisag additive.¹⁵

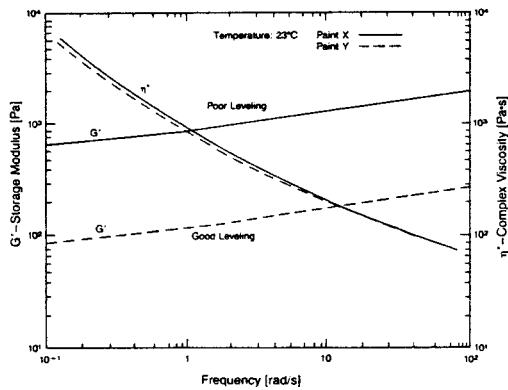


그림 20. Effect of shear rate on rheological properties of paints.¹⁶

빠져서 오히려 표면 상태가 불량해진다. 그림 20은 점도가 비슷한 두 종류의 페인트라 할지라도 각각의 탄성 특성에 따라서 매우 다른 leveling성을 가진다는 것을 보여 주는 예이다. 이와 같은 경우, 점도의 비교만으로는 서로 다른 페인트의 성능 차이가 어디에서 오는 지 알 수 없기 때문에, G' 과 G'' 을 통하여 점도와 탄성 특성을 동시에 비교하는 것이 문제 해결에 매우 중요한 요소가 된다. 결국, 페인트나 코팅 분야에서는 점도와 탄성의 적절한 balance가 중요하고, rheometer는 이를 평가하는데 최적의 방법이 될 수

있다.

3. 결 론

지금까지 rotational rheometry와 관련하여, 기초 지식으로써 rheology의 기본 개념과 실험 방법, 구조와 물성 및 가공성간의 관계 등을 살펴 보고, 이를 이용한 실험들을 들어 보았다. 1편에서 언급했듯이 rheometry에는 이밖에 capillary rheometer나 extentional rheometer 또는 slit die rheometer 등을 이용하는 방법들이 있으며, 평가하고자 하는 특성이나 상황 또는 용도에 알맞게 선택하여 사용할 수 있다. 어느 방법이든 적절히 사용함으로써, rheometry가 고분자 관련 재료의 개발과 평가 및 응용에 많은 도움이 되기를 바란다.

감사의 글 : 본 원고는 주로 Rheometrics사의 자료 (Application Note 등)로부터 발췌하여 전제한 것이며, 그렇게 할 수 있도록 Rheometrics사로부터 인가를 얻어 주고 필요한 자료를 제공해 주신 (주)인스텍에 감사 드립니다.

참 고 자 료

1. Rheometrics Application Brief(ABFL3) : Quality assurance of printing inks using the rheometrics fluids spectrometer.
2. Rheometrics Application Brief(ABFL6).
3. Rheometrics Application Brief(ABTS1).
4. Rheometrics Application Brief(ABTS2).
5. Rheometrics Application Brief(ABTS3).
6. Rheometrics Application Brief(ABTS4).
7. Rheometrics Application Brief(ABTS6).
8. Rheometrics Application Brief(ABTP1).
9. Rheometrics Application Brief(ABTP6).
10. Rheometrics Application Brief(ABTP8).
11. Rheometrics Application Brief(ABTP12).
12. Rheometrics Application Brief(ABTP13).
13. Rheometrics Application Note 2.
14. Rheometrics Dynamic Analyzer II, 1989.
15. Rheometrics Application Bulletin 9.
16. Rheometrics Product Guide, 1986