

접착제의 물성해석과 응용실례 (제13회)

김현중¹ · 김대준² 공역

¹서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 환경재료과학전공 바이오복합재료 및 접착과학 연구실
²삼성전기(주) 생산기술연구소 생산기술팀
 (2007년 3월 4일 접수)

제7장 광파이버 코팅의 경화도와 특성

1. 서 론

최근, 정보 전달매체의 중심이 되고 있는 광파이버 [1]는 저손실, 광대역, 좁은 지름, 경량, 무유전·무누화, 자원 절약 등의 장점을 가지고 있다. 그 반면에 기계적 강도는 종래의 통신 케이블에 이용되던 도체 재료(동)와 비교하면 무디고 깨지기 쉽다. 광파이버는 케이블화로부터 포설까지의 공정에서 항장력이 요구된다. 또 포설 후의 보수단계에서는 각종 환경 하에서 우수한 정적·동적 피로성이 필요하다. 이를 위해서 광파이버를 수지로 피복하여 기계적 강도를 향상시키고 있다.

최근 광파이버의 피복(코팅)재료로서 UV경화수지가

주류를 이루고 있다. 그림 7-1에 광파이버 케이블의 구조 예로서 UV경화수지로 피복한 광파이버 심선의 구성이 나타나 있다. 파이버 2종의 유리로 구성되어 있고 중심부에 고굴절률을 가지는 코어, 그 둘레를 저굴절률의 클래드로 감싸고 있다. 따라서 빛은 전반사의 원리에 따라서 코어 속에 가두어져 전파된다. 통상 UV경화수지 피복층은 1차층과 2차층으로 형성되어 있고 최외층은 착색층으로 이루어져 있다. 1차층은 직접 유리와의 접촉하기 때문에 밀착성이나 계면 안정성이 요구되고 UV경화 후의 탄성률이 2차층에 비해 낮아야 한다. 한편, 2차층은 우수한 기계적 강도가 필요하기 때문에 UV경화 후에는 높은 탄성률을 가지도록 설계되고 있다. 즉 UV수지의 경화도는 앞서 언급한 광파이버의 제조 공정의 최적화나 광파이버 상태에서 의 각종 물성 평가에 대한 필수적인 평가 항목이 된다.

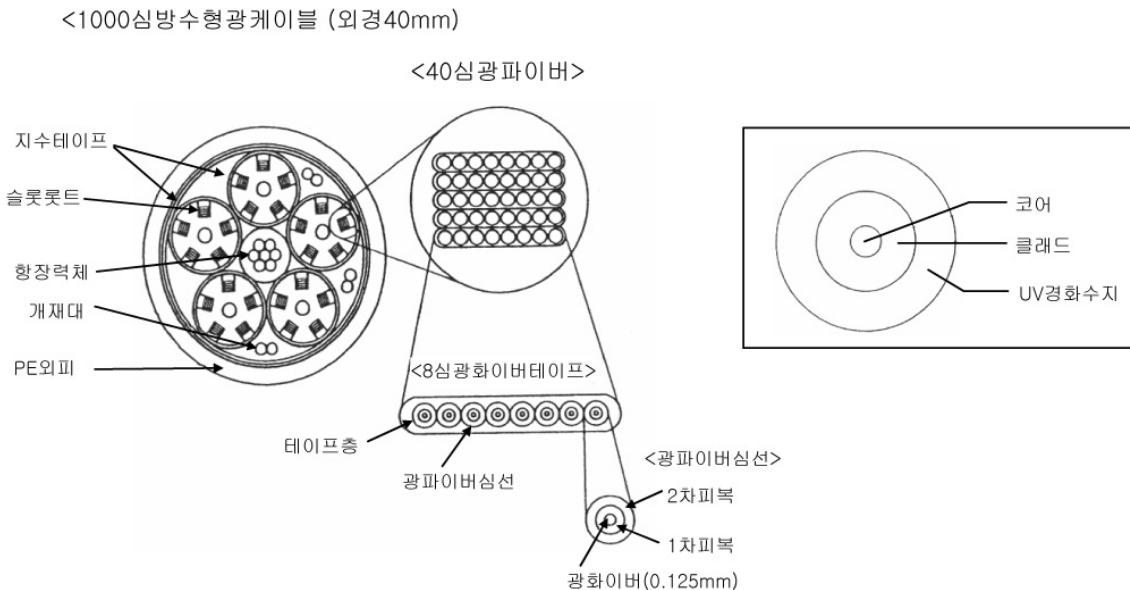


그림 7-1. 광파이버케이블의 구조 예와 UV경화수지에서 피복한 광파이버 심선의 구성

† Corresponding author: e-mail: hjokim@snu.ac.kr

*이 내용은 加納義久 (古河電氣工業(株)) 및 일본 고분자간행회의 허락에 의해 번역된 것입니다.

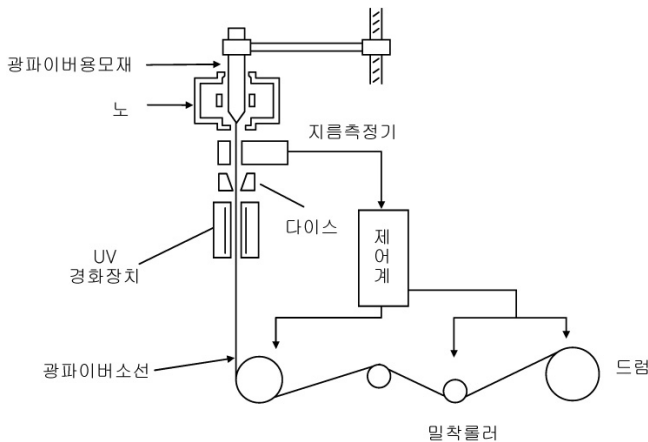


그림 7-2. 광파이버 피복장치의 구성[1-c].

세계적으로 광파이버의 생산량은 2001년에는 7000만 Km에 달할 것으로 예상된다. 그래서 광파이버용 UV 경화수지의 사용량도 이후 큰 폭으로 늘어날 것으로 예상하고 있다. 본 고에서는 먼저 광파이버 피복기술과 UV피복수지의 조성과 특성에 대해서 간단하게 설명한다. 다음으로 광파이버에 사용되는 UV수지에 대한 경화도 평가방법을 기술한다. 또 필자 등이 고안한 강제 진자형 점탄성 장치에 의한 경화도 및 스트레스 제어 레오미터에 의한 경화거동 평가결과[2]도 함께 소개하기로 한다.

2. 광파이버 피복기술과 UV피복수지의 조성 및 특성[1-c]

광파이버의 일반적인 피복 프로세스를 그림 7-2[1-c]에 나타내었다. 광파이버의 모재가 노에서 가열 용융되어 외경 125 μm의 글래스파이버로 피복되어진다. 다음에 광파이버는 어플리케이터(다이)에 의해 UV 피복수지(경화 전; 액상)가 도포되어 UV램프 등으로 경화된다. 통상적으로 광파이버는 1차, 2차층의 UV수지로 피복된다. 현재 광파이버의 비용 절감을 위해서 파이버 선 제조의 고속화(1200 m/min)가 진행되고 있

으며, 이 때 UV수지를 보다 빨리 경화시키는 것이 중요하다.

일반적으로 광파이버의 UV피복수지는 비교적 고점도의 올리고머, 저점도의 모노머(희석제) 및 광중합개시제를 주성분으로 하고 있다. UV수지의 특성은 이들의 종류나 배합비, 구체적으로는 올리고머의 골격 구조, 관능기수와 분자량, 모노머의 구조와 관능기수에 의해서 제어된다. 2차층의 올리고머에는 에폭시아크릴레이트, 폴리에스테르아크릴레이트, 폴리에스테르우레탄아크릴레이트 등이 이용된다. 또 1차층에는 폴리에스테르아크릴레이트, 폴리에테르우레탄아크릴레이트, 폴리부타디엔아크릴레이트 등이 있고 2차층 용의 올리고머에 비교적 유리전이온도 T_g 가 낮은 것을 알 수 있다. 모노머는 단관능·다관능 아크릴레이트가 일반적이다. 다관능아크릴레이트는 경화물의 가교밀도를 높이므로 2차층에, 단관능 아크릴레이트는 1차층에 1차층에 사용된다. 최근에는 1차층, 2차층에 모두 우레탄아크릴레이트가 주류를 이루고 소프트세그먼트로서 폴리에테르류(PEG, PPG, PTMG), 하드세그먼트로 이소시아네이트(IPDI, TDI)가 기본 골격이 되고 있다. 그 물성은 소프트세그먼트의 화학구조(골격의 종류, 길이, 배합비)에 의해서 제어된다.

3. 광파이버용 UV피복수지의 경화도

광파이버의 UV피복수지의 경화도에 관한 여러 가지 평가방법[2-12]이 전자정보통신학회에서 보고되어지고 있다(표 7-1). 경화도의 평가방법은 역학적 방법, 분광학적 방법, 열분해, 및 정성·정량분석으로 크게 구분한다. 역학적 방법을 이용한 경화도 평가방법이 많이 보고된 것을 알 수 있다. 특히 광파이버 상태에서 평가 가능한 방법은 표 안에 *로 표시하였다. 여기서는 지면 관계상 몇 가지의 평가 방법에 초점을 맞추어 설명한다.

村田 등[10]은 조사량 10~300 mJ/cm²으로 경화한 광파이버 용 UV피복수지에 대해서 tan δ 피크 온도는

표 7-1. 광파이버용 UV피복수지의 경화도 평가방법

분 류	역학적수법	분광학적수법	열분석	정성·정량분석
평가법	동적점탄성*	ATR-FTIR*	포토칼로리미터	GC-MS*
	TMA*	현미경 FTIR*	광화학반응열량계	
	Push in Modulus*	시간분해 FTIR		
	다이나믹큐어미터			
	강제진자형점탄성*			

* 광파이버 피복상태에서 평가할 수 있는 방법.

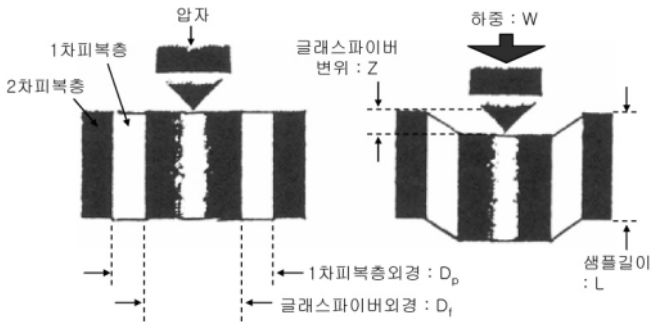


그림 7-3. Push in Modulus Test의 원리[8].

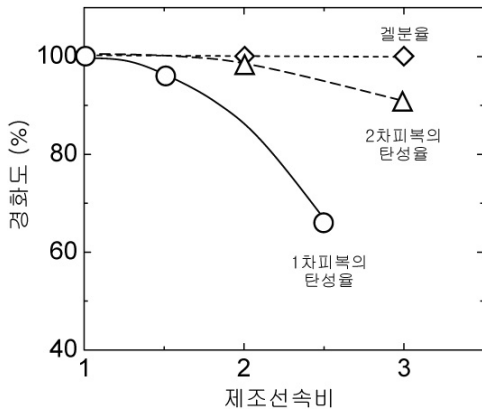


그림 7-4. 경화도 평가.

UV조사량의 증가에 따라서 상승하고 가교가 진행된다는 것을 보고하였다. 大石 등[8]은 광파이버 피복 후의 1차층의 탄성률을 Push in Modulus Test에 의해서 평가하였다. 측정원리를 그림 7-3에 나타내었다. 마이크로경도계로 하중 W (g)를 가하면 글래스파이버에 변위 Z (μm)가 발생한다. 이 때 2차층은 1차층에 비해 탄성률이 2자리수 이상 높기 때문에 변위는 유연한 1차층의 탄성률에 따른다고 가정한다. 시료길이 L (mm), 글래스파이버의 외경 Df (μm), 1차층 외경 Dp (μm), 포아송비 ν라고 하면 탄성률 E (kg/mm²)는 다음 식으로 표현된다.

$$E = [(1+\nu)W / \pi LZ] \cdot \ln(Dp/Df) \quad (1)$$

그들은 시트상의 1차층 탄성률과 Push in Modulus Test에 의한 1차층의 탄성률이 상관 관계를 보인다고 보고하였다. 또 선속 조건을 바꾸어 2층 피복 광파이버를 형성하고 겔분율, 인장시험으로 2차층의 탄성률과 Push in Modulus Test에 의한 플라임러리의 탄성률을 평가했다. 그림 7-4에 보이는 것처럼 겔분율로는 완전 경화로 예상된 영역에서 2차층, 1차층의 경화가 완료하고 있지 않다. 특히 1차층의 경우 탄성률은 선속의 증가에 따라서 저하함을 알 수 있다. 三ッ橋 등

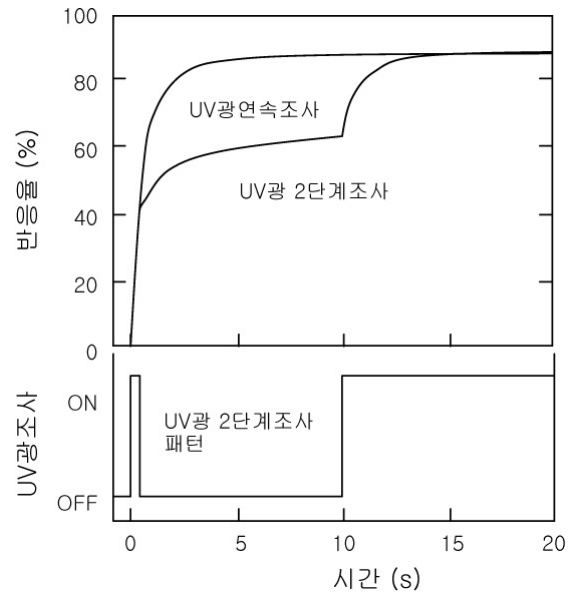


그림 7-5. 연속조사와 2단계 조사에서의 반응을 경시변화의 비교[11].

[9]은 열기계분석장치(TMA)를 이용해서 광파이버 심선의 1차층의 탄성률을 평가하고 같은 결과를 얻었다.

鈴木 등[11]은 우레탄아크릴레이트계 UV경화수지의 경화메커니즘에 대해 시간 분해 FT-IR을 이용하여 연구하였다. 시간분해 FT-IR이란 UV광을 조사하면서 IR스펙트럼의 시간 변화를 추적하는 방법이다. 그들은 시료를 KBr판으로 싸고 투과모드에서 UV수지의 광중합 반응을 in-situ로 조사였다. 그림 7-5에 UV광을 연속 조사한 경우와 2단계로 조사한 경우의 반응률 변화를 나타내었다. 이 때 시료 내의 비닐기 귀속 피크 (1647 cm⁻¹)면적의 감소량으로부터 반응률을 산출하였다. UV 조사를 정지한 후에도 중합반응이 진행됨을 알 수 있다. 또 다시 UV광을 조사하면 중합반응이 재개되고 최종 반응률은 연속조사의 경우와 일치하였다. 광파이버용 UV피복수지는 산소분위기하에서 경화시 표면의 경화도가 저하하고 최종 제품의 품질 불량 발생의 원인이 된다. 野中 등[3]은 ATR-FTIR법에 의해서 광파이버 피복수지의 표면경화도를 평가하고 그 산소 농도 의존성이나 피복수지 표면의 마찰계수와 의 관계를 조사하였다. 표면의 경화도는 잔류하는 2중 결합에 기인한 1400 cm⁻¹에서의 흡수 피크와 경화에 의해서 영향을 받지않는 1373 cm⁻¹에서의 흡수 피크로부터 %RAU (The percent reacted acrylate unsaturation)의 형태로 다음 식에 의해 산출하였다.

$$\%RAU = \frac{\text{미경화상태에서의 흡광도비} - \text{경화상태에서의 흡광도비}}{\text{미경화상태에서의 흡광도비}} \times 100 \quad (2)$$

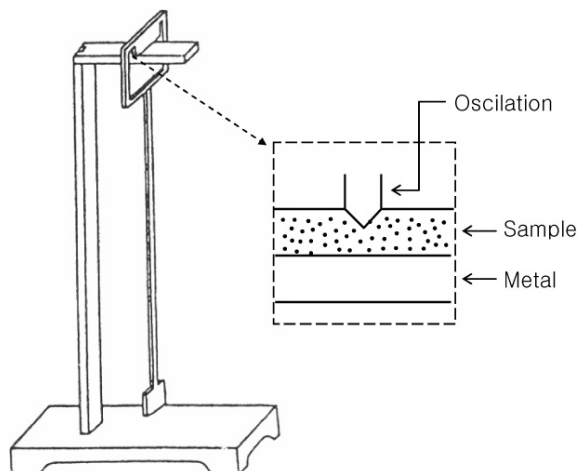


그림 7-6. 강제진자형 점탄성 장치[13].

%RAU값은 산소농도가 2%를 넘으면 산소농도의 상승에 따라서 크게 저하하고 표면의 경화도가 저하한다고 보고하였다. 또 RAU값은 마찰계수와 음의 상관관계를 나타내므로 ATR-FTIR법은 수지표면의 경화도 평가에 대한 유효한 방법이라고 하였다.

池田 등[12]은 광화학반응열량계(PDC)를 이용해서 UV수지의 경화도를 평가하였다. 시료에 UV광을 조사하면 수지의 미가교성분이 반응할 때 발열한다. 발생한 열은 열저항체를 통해서 일정 온도에 유지되고 있는 열류입면에 흐르고, 이 열류를 PDC에 의해서 측정하여 미가교성분 양을 평가할 수 있다. 그들은 UV조사량에 변화시켜 제조한 시트 및 실제 광파이버 소선에서 PDC발열량과 겔분률 등이 음의 상관관계를 나타낸다고 하였다.

이 밖에 개스크로마트그래프 질량분석계(GC-MS)법 [7]이나 용제 침적에 의한 가교도 측정법[13]이 검토되고 있다. 지면 관계상 생략하지만 관심이 있는 분들은 문헌을 참고해주길 바란다.

4. 강제진자형 점탄성에 의한 UV피복수지의 경화도

필자 등은 광파이버 피복수지(UV경화과정, 파이버 상태)에 대해서 강제진자형 점탄성장치 RPT-3000을 이용해서 대수감쇠률 Δ 및 주기 T를 측정하고 경화도를 평가하였다[2]. 장치의 개략도[14]를 그림 7-6에 나타내었다. 시료 표면에 나이프 에지를 접촉시키고 시료를 위치시킨 판에 지점을 두고 진자를 진동시킨다. 이 진동을 해석하여 시료의 경화도 등 역학적 성질을 평가할 수 있다.

UV수지의 경화과정에는 화학반응에 의한 분자량(점도)의 증가나 가교구조의 형성이 일어난다. 고점도의

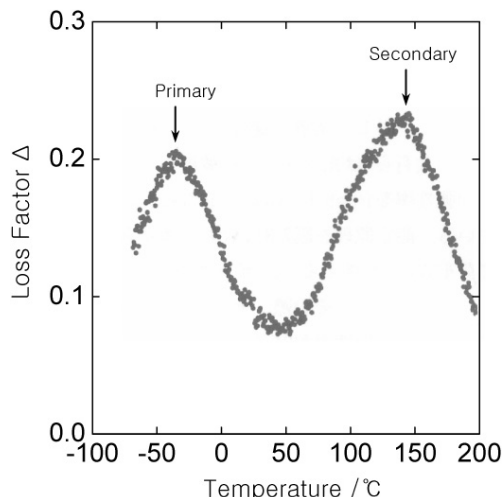


그림 7-7. 광파이버 심선에 있어서 대수감쇠률 Δ 의 온도 의존성.

시료 속에서 진동시키면 브레이크가 걸리기 때문에 진동이 감쇠하고 대수감쇠률이 증대한다. 한편 가교구조가 형성되어지면 망목의 크기가 작아지고 운동거리가 작아지기 때문에 진동주기 T가 짧아진다. 따라서 대수감쇠률과 주기의 변화를 해석함으로써 시료의 역학적 성질이나 경화과정에 있어서 경화도 거동을 평가할 수가 있다.

UV수지에서 피복한 광파이버(UV조사 후)에 대해서 대수감쇠률 Δ 의 온도 의존성을 그림 7-7에 나타내었다. 1차층 및 2차층의 유리전이온도 T_g 에 해당하는 피크가 -40°C 및 150°C 부근에서 관찰된다. 이 피크 온도는 DSC에 의해서 얻은 전이온도와 거의 일치한다. 2차층에 해당하는 대수감쇠률의 크기는 1차층보다 크다. 강제진자장치는 표층부의 점탄성 거동을 우선적으로 감지함으로써[14], 외층부인 2차층의 역학적 거동이 반영된 것이라고 추측된다. 이 방법을 이용하면 파이버 상태에서 직접적으로 1차층 및 2차층의 역학적 성질을 평가할 수 있으므로 제조 현장에서의 품질관리에 유익한 방법이라고 기대된다.

UV경화 과정에 있어서 경화 거동의 파악은 광파이버의 제조 조건의 최적화나 제품 신뢰성에 대해 중요한 과제가 된다. 2종류의 UV경화수지에 대해서 UV조사과정(조사시간; 1초, 조사량; 10 mW/cm²)에서의 대수감쇠률 Δ , 주기 T의 변화를 조사하였다(그림 7-8). 두 수지 모두 UV조사에 의해서 현저한 Δ 의 증대와 T의 저하가 관찰되므로 단시간에 경화반응이 완료함을 알 수 있다. 특히 Δ 및 T의 변화가 현저한 UV수지에서는 6초 이내에 가교반응이 완료한다고 추측된다. 또 수지의 종류에 따라 경화 후의 Δ 및 T의 평형값이 다르므로 형성되어진 가교구조나 겔보기 분자량(점도)이

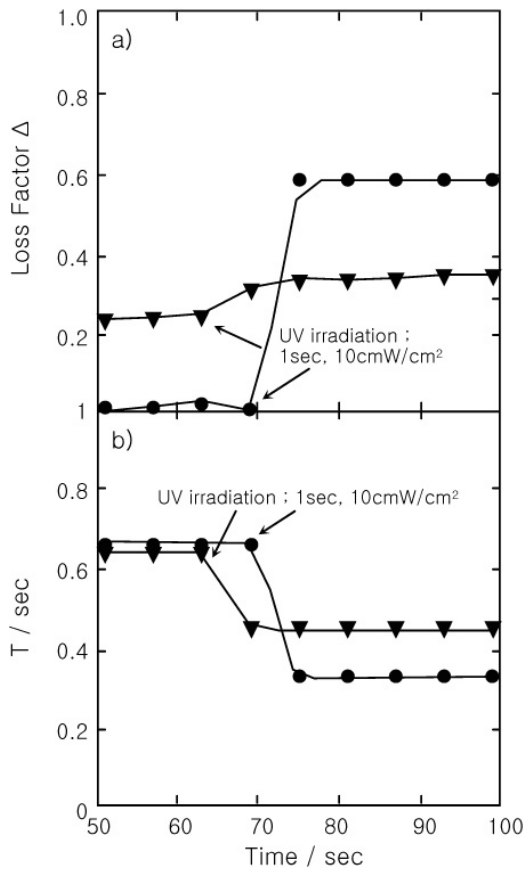


그림 7-8. UV수지의 경화과정에 있어서 a) 대수감쇠율 Δ , b) 주기 T의 변화.

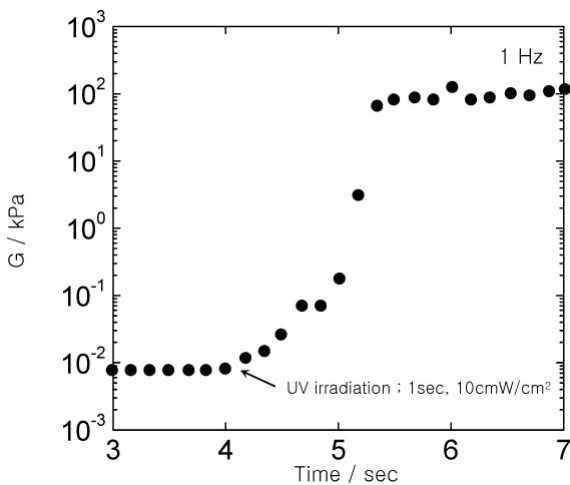


그림 7-9. UV수지의 경화과정에 있어서 저장탄성률 G' 의 변화.

다르다고 추정된다.

다음으로 스트레스 제어형 레오미터인 DAR-100을 이용하여 광파이버 피복수지 경화 시의 점탄성 거동 변화를 조사했다. 이 스트레스 제어 레오미터에는 ‘Fast

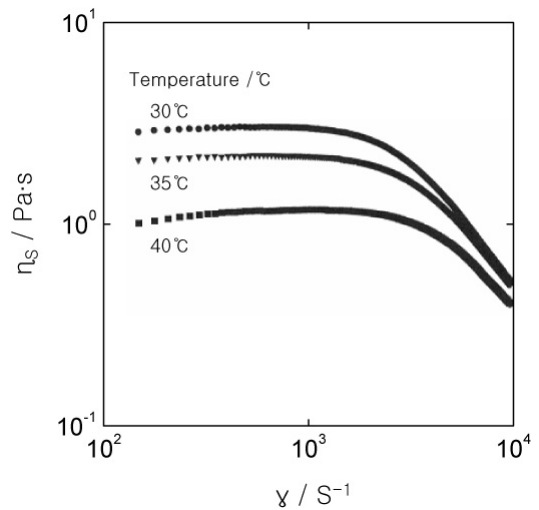


그림 7-10. UV수지의 코팅특성(전단 점도 η_s).

Oscillation Mode’ 프로그램이 포함되어 있어 UV경화가 매우 빠른(1초 이내)수지의 경화거동을 매우 짧은 샘플링 시간만으로 평가가 가능하다. 이 프로그램에서는 동적 점탄성 측정 시에 있어서 정현파의 일주기를 512점으로 분해하고 각각의 점에 있어서 토크를 계산·검출할 수 있다. 따라서 주파수 1 Hz에서 동적 점탄성을 측정하면 1분 동안에 $512 \times 60 = 30720$ 점이나 데이터를 채취하는 것이 가능하다. 그림 7-9에는 UV피복수지 경화 시 저장탄성률 G' 의 변화를 나타내었다. UV조사에 의해서 1초 정도의 사이에 G' 이 $10^{-2} \sim 10^2$ kPa로 4자리 수나 증대하고 있다. 이 결과로부터 본 시스템은 경화 과정에서의 G' 의 변화도 명확하고 또한 단시간에서 경화하는 광파이버 피복수지의 평가에 대해 매우 유효하다고 판단된다.

광파이버에 UV수지를 코팅할 때의 젖음성 평가는 레올로지 특성의 파악이 중요하다. 특히 파이버 제조의 고속화를 추진하는 경우 UV수지에 대한 전단 점도의 전단속도 의존성을 측정해 두는 것이 필요하다. 그림 7-10에 UV수지에 있어서 전단 점도의 전단속도 의존성을 나타내고 있다. 또 고속영역에서는 점도의 급격한 저하가 관찰된다. 이러한 UV수지의 여러 가지 레올로지 데이터를 축적해 감에 따라 제조 프로세스의 최적화(선속, 온도, UV경화 조건)을 도모할 수 있다.

5. 광파이버 용 UV피복수지의 특성

지금까지 광파이버 용 UV피복수지의 경화 거동에 초점을 맞추어 설명해 왔는데, 다른 특성(광파이버소선으로부터의 피복제거력, 글래스파이버에 대한 UV수지 코팅특성, 신뢰성(열열화, 자외선열화, 가수분해 등)도 중요한 과제이다. 아래에 UV수지 특성이 광파이버

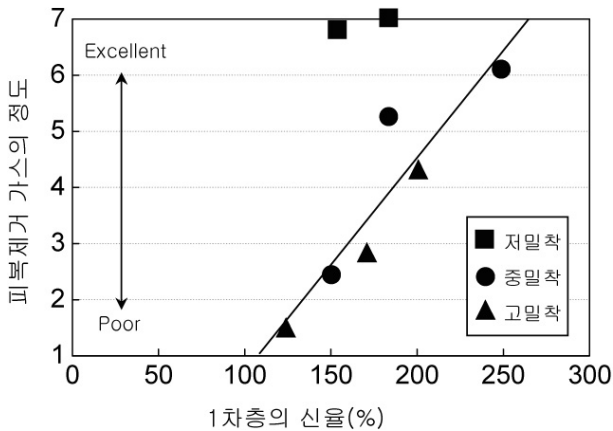


그림 7-11. 테이프 일괄 제거시에 1차층의 파단 인장과 제거 후의 수지 잔사와의 관계[17].

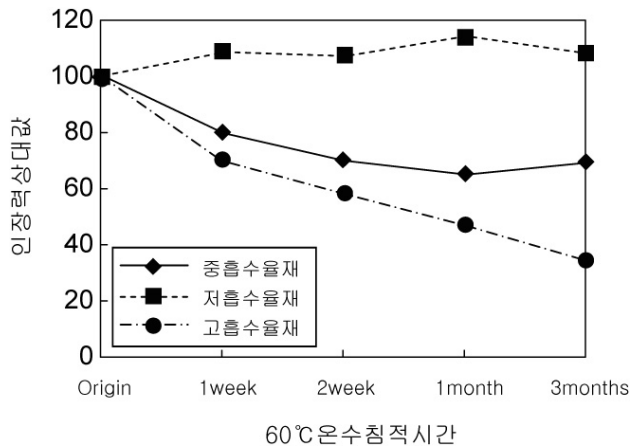


그림 7-12. 유리-1차층 계면 인장력에 대한 1차층 흡수율의 영향[18].

소선의 피복제거력, 유리-1차층의 밀착력 및 전송 특성에 미치는 영향에 대한 연구 결과를 소개한다.

광파이버소선의 용착 접속시에 있어 피복재가 쉽게 유리로부터 제거될 수 있는 것이 좋다. 지금까지 피복제거력에 영향을 미치는 여러 요인이 보고[15-17]되고 있다. 池田 등[16]은 피복제거력은 2차층의 두께 증가에 따라 증가한다고 하였다. 테이프 심선으로부터 피복재를 제거할 때에 파이버 유리 위에 수지 잔사가 남으면 와이핑에 의해서 제거할 필요가 있어서 작업성과 강도의 신뢰성 면에서 문제가 된다. 村田 등[17]은 일괄 피복 제거시의 응력이나 잔사 유무를 1차층 특성의 관점에서 평가하였다. 그들은 피복 일괄 제거시의 최대응력이 유리-1차층 사이의 인장력과 정의 관계를 나타냄을 확인하였다. 또 중~고 밀착의 소선에 있어서 잔사의 양은 1차층 파단 시 인장 증가에 따라서 증대한다고 하였다(그림 7-11). 그러나 잔사량과 파

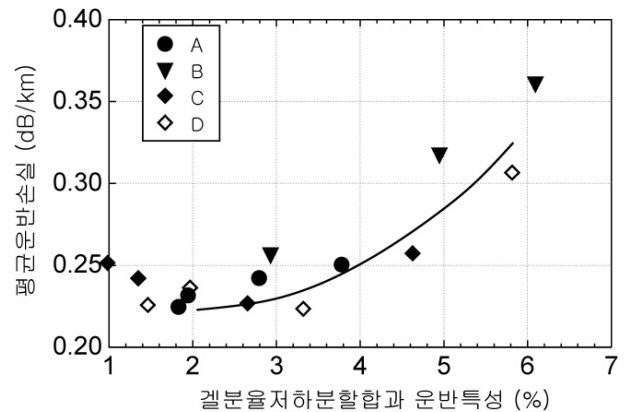


그림 7-13. 겔 분율 저하비율과 전송 특성[19].

단 강도와와의 사이에는 상관관계가 나타나지 않았다. 피복제거의 초기 과정에서는 칼날에 인접한 면에 피복재가 압축된다. 이 때 1차층의 파단 신장이 크면 파단되지 않는다. 한편 파단 인장이 작으면 1차층의 압축응력에 견디지 못하고 파단된다. 이 때 파단된 수지가 제거 과정에서 유리에 부착하고 수지 잔사로 된다고 보고하였다.

광파이버의 장기간에 따른 안정성이나 파이버 강도의 신뢰성을 고려하면 UV피복수지에 따른 영향도 크다고 생각할 수 있다. 예를 들면 파이버를 물에 침지하면 밀착력이 저하하고 유리-수지계면에서 박리가 생기는 일이 있다. 이러한 박리부의 형성은 전송손실을 증대시킬뿐 아니라 파이버 강도를 저하시킨다. 村田 등[18]은 유리-1차층 사이의 인장력의 안정성에 미치는 흡수율의 영향을 조사하고 있다. 1차층의 흡수율이 다른 파이버를 60°C의 온수에 침지할 경우의 인장력의 경시변화를 그림 7-12에 나타내었다. 흡수율의 높은 1차층에서는 경시적인 인장력의 저하가 관찰되기는 하지만 흡수율이 낮은 경우에는 변화하지 않고 양호한 결과가 얻어졌다. 흡수율이 높은 수지를 이용하면 물이 1차층-유리계면에 침입하기 때문에 역박리했을 것으로 추정된다. 더욱이 피복수지는 적절한 친수성과 소수성을 가질 필요가 있을 것이다.

齋藤 등[19]은 탄성률, 겔분율 및 초기밀착이 다른 UV수지와 유리로부터 형성된 파이버심선으로 열화시험 후 겔분율의 저하비율과 전송손실과의 관계를 조사하였다. 60°C의 온수에 2시간 침지했을 때의 2주일 후 평균전송손실과 각 UV수지의 겔분율과의 관계를 그림 7-13에 나타내었다. UV수지의 탄성률이나 겔분율의 절대값에 상관없이 겔분율의 저하비율이 4% 이상이 되면 특성이 악화하는 경향이 있다. 그들은 물에 의해서 추출성분이 증가하기 때문이라고 추측하였다.

6. 끝으로

본 장에서는 광파이버 피복기술과 UV피복수지의 조성 및 특성에 대한 개요를 간단히 설명하였다. 다음으로 광파이버 피복재의 UV경화수지에 대해서 여러 가지 경화도의 평가방법을 소개하였다. 또한 필자 등의 시도하고 있는 강제진자형 점탄성 장치 및 스트레스제어형 레오미터에 의한 경화도의 평가결과를 설명하였다. 그리고 UV수지 특성이 광파이버의 피복 제거력, 유리-1차층의 밀착력 및 전송특성에 미치는 영향에 대한 연구 결과를 설명하였다. 마지막으로 지면 관계상 생략했지만 최근의 광파이버 고속 제조에는 광파이버에의 UV수지의 젖음성(고전단 속도영역에서의 점도)이나 고속광경화 반응이 필수적임을 덧붙여 둔다

참 고 문 헌

1. a) 福富秀雄, 光ファイバーケーブル, 電気通信協會, オーム社 (1983); b) 大久保勝彦, *ISDN時代の 光ファイバー技術*, 理工學社 (1989); c) 山川進三, *UV硬化技術の進歩*, 第3章 電子・電気への応用 第4節 光ファイバーコーティング, 総合技術センター (1992).
2. a) 伊藤貴和, 石井伸尚, 加納義久, *日本接着學會年次大會講演要旨集*, **38**, 125 (2000); b) 伊藤貴和, 加納義久, *高分子加工技術討論會講演要旨集*, **12**, 31 (2000).
3. 野中毅, 佐藤久雄, 荻澤信昌, 細谷俊史, 松田裕男, 山西徹, 1989年電子情報通信學會秋季全國大會, B-399, 4-13.
4. サムファイ, 清水修, 井上直哉, 千葉實, 花井節, 1990年電子情報通信學會春秋全國大會, B-860, 4-39.
5. 細谷俊史, 伊藤茂, 山西徹, 松田裕男, 増田重雄, 1990年電子情報通信學會春秋全國大會, B-861, 4-40.
6. 野中毅, 小宮建雄, 松田裕男, 山西徹, 1991年電子情報通信學會春秋全國大會, B-843, 4-5.
7. 岡崎智子, 關敏訓, 白井由紀, 八木賢二, 平井進, 塩野武男, 1993年電子情報通信學會春秋大會, B-864, 4-2.
8. 大石和正, 赤坂伸宏, 服部知之, 松田裕男, 1994年電子情報通信學會秋季大會, B-816, p414.
9. a) 三ッ橋恵子, 小林和永, 荒木眞治, 1995年電子情報通信學會ソサイエティ大會, B-609, p.276; b) 村田曉, 三ッ橋恵子, 大橋圭二, 1999年電子情報通信學會綜合大會, B-10-34, p.395.
10. 村田曉, 大橋圭二, 荒木眞治, 1995年電子情報通信學會綜合大會, B-1023, p.469.
11. 鈴木厚, 伴めぐみ, 角田樹哉, 赤坂伸宏, 松田裕男, 1995年電子情報通信學會綜合大會, B-1024, p.470.
12. 地田勝佳, 村田曉, 大橋圭二, 1998年電子情報通信學會綜合大會, B-10-65, p.526.
13. 白石恵子, 關敏訓, 井上直哉, 塩野武男, 松浦宏司, 1994年電子情報通信學會秋季大會, B-939, 4-5.
14. Y. Kano, S. Akiyama, and T. Kasemura, *J. Appl. Polym. Sci.*, **50**, 1619 (1993).
15. 井野悦男, 村田曉, 大橋圭二, 荒木眞治, 1996年電子情報通信學會綜合大會, B-1048, p.480.
16. 地田勝佳, 村田曉, 大橋圭二, 1998年電子情報通信學會ソサイエティ大會, B-10-51, p.373.
17. 村田曉, 三ッ橋恵子, 大橋圭二, 1998年電子情報通信學會綜合大會, B-10-58, p.519.
18. 村田曉, 加藤修, 下道毅, 大橋圭二, 1998年電子情報通信學會綜合大會, B-10-70, p.579.
19. 佐藤登志久, 服部知之, 松田裕男, 1998年電子情報通信學會綜合大會, B-10-57, p.518.