

태양전지 모듈의 가속수명시험에 대하여



문진철
충북테크노파크
IT융합센터
선임연구원

서론

현재의 태양전지 결정질 모듈에 대한 대표적인 시험으로는 KS C IEC 61215 규격시험이 있다. 이 규격은 IEC 60721-2-1에 정의되어 있는 일반 옥외 기후에서의 장기 운전에 적합한 지상 설치용 태양전지 모듈의 설계 적격성 확인 및 형식 승인을 위한 IEC 요구사항을 규정한다. 이 시험 절차는 모듈의 전기적 및 온도 특성을 결정하고, 비용 및 기간의 제약 안에서 가능한 모듈이 적용범위에 기술된 기후환경에서 장시간 노출되어 있어도 견딜 수 있는 것을 나타내기 위해 실시하고 있다. 이것은 설계적합성 측면에서의 규격시험이며 신뢰성시험의 개념과 20년 이상 수명보증시험과는 상당한 거리가 있다.

신뢰성(Reliability)의 정의는 아이템이 주어진 기간동안 주어진 조건에서 요구기능을 수행할 수 있는 가능성으로 표현하고 있다. 이러한 신뢰성에는 아이템, 주어진 시간, 주어진 조건, 요구기능을 포함하는 요소들이 있으며 포괄적 개념의 시인성(Dependability)의 한 부분으로 IEC 60050-191에 설명되어 있다.

그림 1에서는 일반적인 제품에 대한 고장률(Failure rate)을 나타내고 있다. 시간에 따른 함수로서 초기 발생하는 품질고장영역(Infant Mortality Failure area)에서는 초기 품질 및 출하검사에서는 정상적인 양품으로 판정되지만 저장, 물류, 설치 및 환경조건에 따른 스트레스를 받아 결함(고장)이 발생하게 된다. 이것은 IEC 61215 등에 따라 품질 및 인증이 완료되어도 시장에서는 다양한 조건으로 스트레스가 발생하며 고장이 유발된다. 제조업체 및 판매업체는 신속한 시정조치(설계 및 제조공정 변경 등)를 통해 결함이 시정된 이후 제품의 고장은 감소하게 된다.

태양전지 모듈(결정질 또는 박막 등)은 25년 이상 출력에 대한 수명보증을 필요로 하고 있으므로 초기

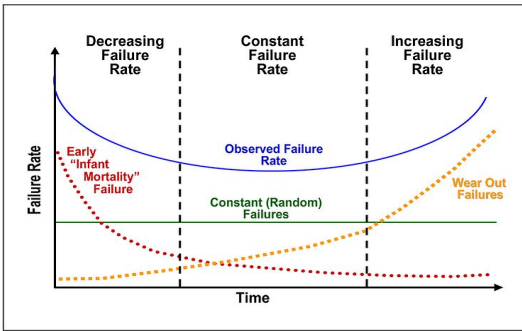


그림 1. 고장을 곡선(Bathtub Curve)

품질불량의 감소 및 마모고장영역(Wear out Failure area) 까지도 고장률을 감소시키는 다양한 신뢰성시험이 요구되고 있다.

신뢰성시험의 척도로써 수명, 신뢰도 함수, 고장밀도 함수, 누적분포함수, B_{10} 수명, 고장률 함수, 누적고장률 함수, 평균수명 등을 사용하여 신뢰성을 정량적인 값으로 표현하는 수치가 필요하며 수명분포를 위해서는 지수분포(Exponential Distribution), 와이블분포(Weibull Distribution), 정규분포(Normal Distribution), 대수정규분포(Lognormal Distribution) 등 통계적 기법을 적용하여 신뢰성시험 자체의 신뢰성을 확보할 필요가 있다.

태양전지 제조업체 또는 시험기관에서는 모듈의 설치 이후 25년 동안 출력값에 대한 보증이 필요한데 누가 25년을 기다리면서 관련 자료를 축적할 수 있겠는가?. 그래서 신뢰성시험에서는 가속수명시험(Accelerated Life Test Model)을 통하여 제품의 수명을 추정하고자 노력하고 있다. 이러한 가속시험의 정의는 KS A 3004에 따라 시험시간을 단축할 목적으로 기준보다 가혹한 조건에서 실시하는 시험을 의미하고 있으며, 이때 중요한 것은 가속수명시험을 통하여 실제 사용조건으로 수명을 추정하고 각종 데이터 분석을 통해 수명분포와 수명-스트레스관계식을 설정하여야 한다.

대표적인 모델로써는 아레니우스 모형(Arrhenius Model), 역승 모형(Inverse Model), 아이링 모형(Eyring Model) 등이 사용되는데 아레니우스 모형은 온도에 의한 가속수명시험에서 가장 널리 사용되며 활성화에너지와 온도의

반응율에 대한 인자로 표현하고 있다. 역승 모형은 전압, 부하 등의 스트레스를 이용하고 있으며, 아이링 모형은 전기장에 의한 가속, 화학적 열화반응에 적용하는 대표적인 모형임으로 주어진 가속스트레스 조건에서 적용 및 응용하는 방법을 권고하고자 한다.

마지막으로 고장분석(Failure Analysis)에 대한 고장메커니즘을 밝히는 물리적, 화학적, 전기적 원인규명이 필요하다. MIL-STD-883에서는 「고장분석은 보고된 고장을 확인하고 고장 모드 또는 메커니즘을 규명하기 위해 전기적 특성, 물리·금속·화학적 최신기술에 의하여 고장 발생 후에 고장원인을 조사하는 것이다.」로 정의하고 있다. 이러한 고장분석의 접근방법으로 고장현상을 정량적으로 파악하고 개선 포인트와 우선순위를 명확히 하기 위한 통계적 접근, 고장의 근본원인과 메커니즘(FMEA)을 규명하는 고장물리적 접근, 설계 수정 및 매뉴얼 개정 등의 관리적 접근으로 구분할 수 있다.

가속시험(High Acceleration Life Time test)은 짧은 시간 내에 수명에 관한 더 많은 정보를 수집할 수 있으며 잠재적 고장모드와 설계의 취약점(weak point) 확인, 설계 검증 및 양산검증 시험기간을 단축하는 방법으로 일정 스트레스, 계단형 스트레스, 점진적 스트레스 등의 스트레스(stress factor)를 인가하는 방법이 있다.

가속시험에는 가속수명시험(Accelerated Life Testing: ALT)와 가속스트레스시험(Accelerated Stress Testing: AST)로 나누어지며 동일하지 않다. ALT의 경우 사용조건에서의 수명을 추정, 수명-스트레스 관계식 사용, 일정 스트레스 인가가 포함되며 AST의 경우는 약점발견 및 설계 개선, 동작한계 평가, 계단형 및 점진적 스트레스 인가를 수행하는 방법으로 구분할 수 있으며 적용절차는 그림 2와 같이 실시한다.

ALT의 경우 사용조건보다 가혹한 스트레스(온도, 습도, 전압, 전류) 수준에서 시험하여 고장을 가속시키고, 가속 조건에서 관측된 고장데이터를 분석하여 수명-스트레스 관계식을 추정하고, 이를 사용조건으로 외삽(extrapolation)하여 사용조건에서의 수명을 정확하게 추정하기 위한 시험으

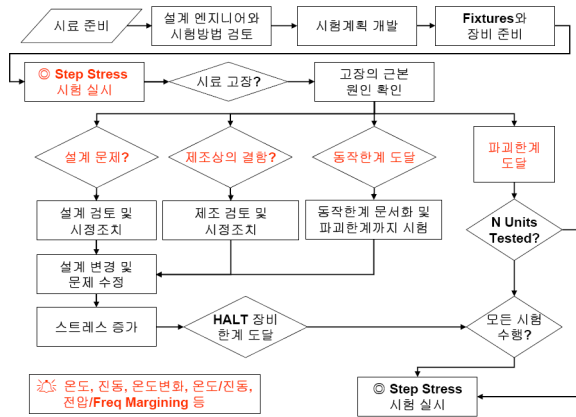


그림 2. 가속수명시험의 절차 예시

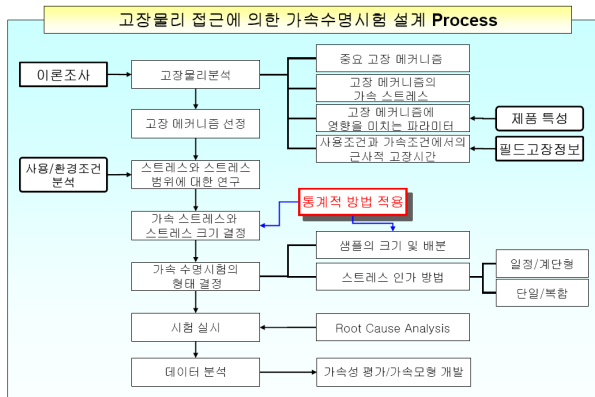


그림 3. 고장물리접근에 의한 가속수명시험 설계

로 스트레스조건 간의 분포 추정선이 평행인가에 대한 가속성을 확인하여야 한다.

일반적으로 가속시험을 수행하는 경우 고장물리분석 및 고장메커니즘에 대한 예측 및 사전조사 없이 스트레스조건(온도, 습도, 전압, 전류)만을 고려하여 시험을 수행하는 경우 옥외환경 또는 설치환경에서의 동일한 고장원인을 추정할 수 없게 됨으로 이점을 유의하여 그림 3과 같이 가속수명시험을 설계하여야 한다.

IEC 규격과 가속수명시험의 관계

결정계 실리콘 태양전지 모듈에 대한 설계적격성 확인 및 형식승인 요구사항인 IEC 61215의 경우 모듈의 온도, 전기적 특성, 온습도 복합시험 등을 수행하고 있으나 우리

가 알고 있는 실제 설치환경의 환경조건과 부합하는지는 검토해 봐야 한다. 규격시험에서는 태양광 또는 인공광원과 온도, 습도, 전기적 특성에 대한 복합적인 시험은 없으며 대부분이 부품·소재 단위의 시험이 확대되어 모듈 완제품에 적용되고 있다. 이러한 부품·소재 단위의 시험으로는 20년 이상 보증할 수 있다고 할 수 있지만 부품·소재가 결합된 완제품 상태에서는 과연 20년 이상을 보증할 수 있을까 의문이다.

태양광 산업에 다양하게 적용되는 태양전지의 경우 단독 스트레스 인자 또는 약간의 조합으로 태양전지 모듈의 신뢰성을 평가하기 위한 가속시험을 대부분 실시하고 있으나 TUV Rheinland의 경우 모듈 내구성을 위해 long term sequential test을 통해 실제 옥외 고장모드와 결과 간의 조합을 최적화 시키고 있으며, ATLAS의 경우 25^{PLUS++} 내구성시험을 통해 indoor와 outdoor의 복합시험을 제공하고 있다. 또한 Fraunhofer ISE는 가속시험 설계 인자 도출을 위해 micro-climate, time-transforming, 모니터링을 포함하고 있다.

최근 31th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition에서 AU Optronics Corporation이 발표한 Cocktail Sequential Test for c-Si PV Module의 가속시험 스트레스 인자의 상관관계를 부제목으로 발표한 자료에 의하면 IEC 61215 시험조건을 동일하게 적용하여 P-Multi & P-Mono Front Contact Module, N-Mono Back Contact Module에 대한 시험절차의 조합에 따른 모듈의 출력저하 결과를 발표하였다. 저자가 강조하고 싶은 것은 기존의 IEC 61215 규격을 만족하면서도 가속시험 스트레스 인자로서의 적합성, 그리고 시험결과 옥외환경에서 5년간 노출 및 동작된 모듈과의 고장분석(Failure Mode)을 비교한 부분이다. 앞에서 설명한 것처럼 너무 가혹한 조건을 스트레스 인자로 선정한다면 실제 고장현상은 멀어지기 때문에 시험의 의미가 없으며, 태양전지 모듈의 설치환경에서의 고장현상을 재현하고 이를 설계단계에서 검증하는 가속수명시험 절차수립을 강조하기 위함이다. 그림 4에서는 Cocktail sequential test procedure를

Table I: Type-A cocktail sequential test procedure

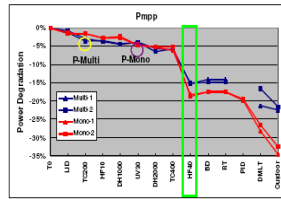
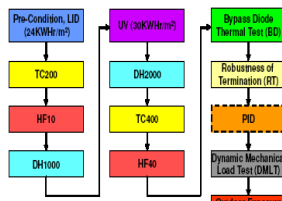


Figure 1: Power degradation for front contact modules with Type-A cocktail sequential test.

Table II: Type-B cocktail sequential test procedure

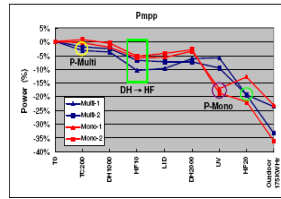
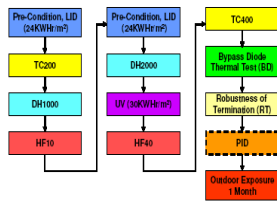


Figure 2: Power degradation for front contact modules with Type-B cocktail sequential test

Table III: Type-C cocktail sequential test procedure

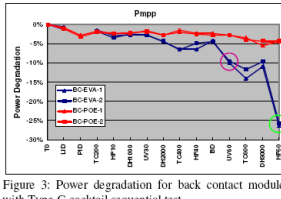
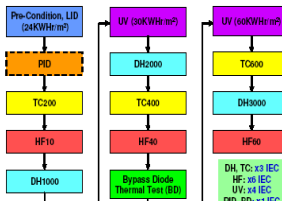


Figure 3: Power degradation for back contact modules with Type-C cocktail sequential test

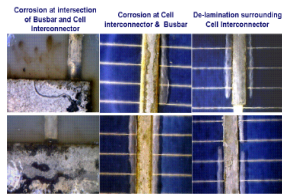


Figure 13: Faults and defects for P-multi front contact module after Type-A cocktail sequential test

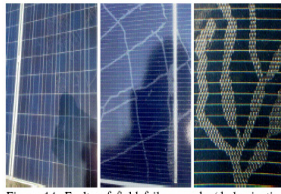


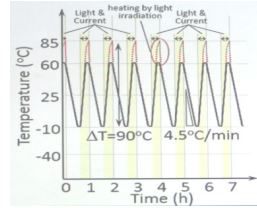
Figure 14: Faults of field failure mode (de-lamination) for P-multi module after 5-year in the field

그림 4. Cocktail Sequential Test(가속수명시험) 예

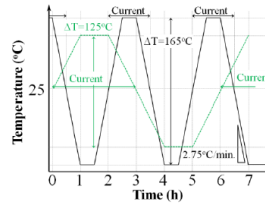
나타내었다.

또한, 31th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition에서 HITACHI사의 Highly Accelerated Thermal Cycling Test for Short term Examination of Photovoltaic Module의 발표자료에 따르면 기존의 IEC 61215에서 온도사이클시험(Thermal Cycle)의 1주기를 짧게하고 온도구간을 크게하여 가속시험을 수행하였으며 가속모델은 Eyring model(참조: IEC 61215 TC는 -40°C~85°C ΔT=125°C, 1 cycle은 6시간이 소요됨)

상기 논문을 검토한 결과 HFTC의 경우 온도범위가 IECTC 보다 낮으며 동일 시간 기준 반복 cycle수는 많지만 시험 결과로 측정된 Fill factor의 변화는 IECTC 보다 가속화되



- High Frequency Thermal Cycling (HFTC) was used for acceleration (-10°C~80°C, ΔT=90°C, 1 cycle 1hr.)



- High Accelerated TC(HATC) (-60°C~105, ΔT=165°C, 1/3 cycle은 1hr.)
Black Line display

- IEC 61215 TC(IECTC) (-40°C~85, ΔT=125°C, 1/6 cycle은 1hr.)
Green Line display

■ Eyring model(HFTC vs IECTC)

$$-\frac{1}{N} = A \exp\left(-\frac{E_a}{k_y T}\right) S^\alpha \quad (S \equiv \Delta T \text{ for TC testing})$$

- Acceleration factor(K):

$$K \equiv \left(\frac{N_{IECTC}}{N}\right) = \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{IECTC}}\right)^\alpha, \quad \alpha = 2,5$$

- 즉, IECTC에 비해 HFTC의 가속계수는 0.46

■ Eyring model(HATC vs IECTC)

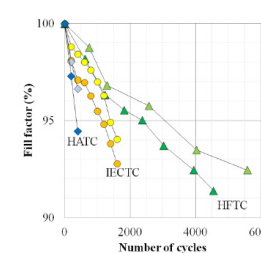


Figure 4: Fill factor reduction in HATC testing together with that in IECTC and HFTC testing for comparison.

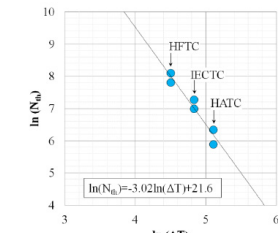


Figure 5: Pairs of ΔT and Na obtained from each TC testing. The α in the Eyring model is 3.02 from the slope of the fitted line.

- Acceleration factor(K)

$$: K \equiv \left(\frac{N_C}{N_{IECTC}}\right) = \left(\frac{\Delta T_C}{\Delta T_{IECTC}}\right)^\alpha, \quad \alpha = 3,02$$

- 즉, IECTC에 비해 HATC의 가속계수는 2.31

그림 5. IEC 61215 TC 변형 가속모델 시험 결과

지 않았음을 알 수 있고(가속계수가 1 이하) HATC는 IECTC 보다 가속계수가 2.31임으로 온도구간 증가에 따라 가속되었다고 할 수 있음. 결론적으로 정리하면 온도사이클(Thermal cycle)시험에서는 온도구간의 ΔT를 증가시키고 cycle 회수를 증가시키는 것이 IECTC 시험조건보다 가속하게 수행함으로써 가속모델은 Eyring model을 사용하는 가속수명을 예측할 수 있다.

태양전지 Outdoor 설치조건 즉, 환경조건에 대한 발전

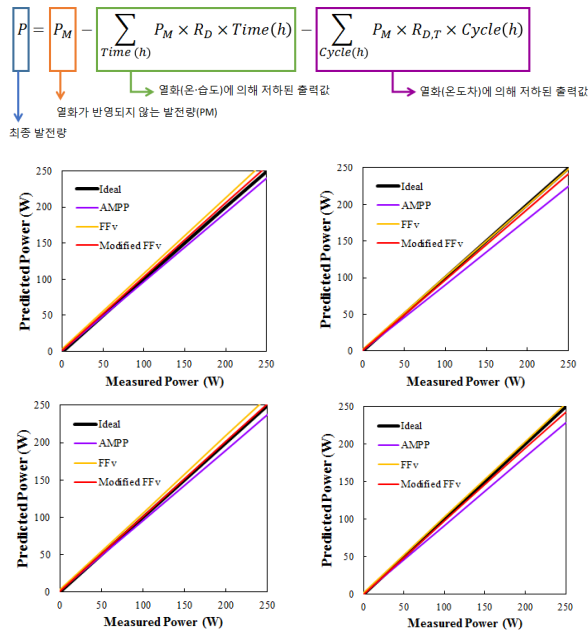


그림 6. 모듈 발전량 예측 가속수명모델과 실증 결과비교

발전량 예측에는 다양한 가속모델을 적용하고 있으나 온도편차의 스트레스로 서로 다른 재료간의 열팽창수축에 의한 목적으로 사용하는 경우 메커니즘 기반으로 Coffin-Manson 식을 수명예측모델로 선정할 수 있다.

$$N = A f^m (\Delta T)^{-n} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k T_{max}}\right)$$

$$\ln(N) = \ln(A) + m \cdot \ln(f) - n \cdot \ln(\Delta T) - \frac{E_a}{k T_{max}}$$

발전량 예측을 위한 가속모델 수립은 태양전지의 특성, 환경조건에 따른 출력변화 등 매우 복잡한 스트레스인자가 포함되어야 하며 복합 환경상황에서 태양광 모듈의 열화가 반영된 발전량 예측방법은 컴퓨터 시스템에서 실행 가능한 방법으로, 열화가 반영되지 않는 태양광 모듈 발전량(P_M)에서 온·습도 및 온도차에 따른 태양전지 모듈의 열화(R_D)에 의해 저하된 출력값을 반영하여 최종발전량(P)을 계산할 수 있으며 이러한 정보를 통해 발전 열화 가속

모델(Modified FFv)을 수립할 수 있다.

실제 측정된 발전량 대비 예측된 발전량의 경우 시험모듈에 따라 차이가 발생할 수 있으며 이것은 사용되는 부품소재의 물성, 전기적 특성, 제조 및 품질 안전성 등 다양한 복합요소가 포함되어지기 때문이며 가속모델의 경우 단순 일사량, 온도조건 스트레스 조건에서 벗어나 습도, 온도차 등 스트레스 인자가 추가 될수록 정확해지지만 빅데이터 처리에 장시간의 일정이 소요됨으로 매우 어려운 현실에 있다.

태양전지 부품소재 분야 가속시험의 경우 자외선 파장에 대한 고분자 열화가 가장 큰 문제로 대두되고 있다. 이러한 고분자 열화(EVA, POE, Back sheet 등)의 대부분 시험은 자외선 가속시험으로 실시하고 있다.

EVA Browning, Optical loss, Encapsulant Adhesion/Delamination 등과 Back sheet의 변색, 물성변화 등 다양한 고장메커니즘 기반의 신뢰성시험과 가속시험이 요구되고 있으며 최근에는 모듈(250W급 이상) 상태에서 일사량 1,000W/m²(300~1,100nm, Class B0이상) 연속 광조사 상태에서 모듈의 전/후면 표면온도 60°C, 습도 85%RH 유지 하면서 3,000시간 이상 시험하는 가속복합열화시험 등 해외 우수기업 등에서는 가속수명 모델 수립을 위해 스트레스 복합인자 조건으로 실시하는 경우가 증가하고 있다.

결론

신재생에너지산업의 중추적 역할을 수행하기 위해서는 태양전지의 품질, 신뢰성 확보를 위한 IEC 61215, IEC 61646 등 규격시험 항목이 목적하는 방향과 실제 설치환경(지역, 날씨, 발전조건 등)에서의 고장분석과 메커니즘의 이해가 필요하다. 또한 부품 구매부터 모듈 판매, AS까지의 요소설계 및 품질을 확보 할 수 있는 전사적 시스템의 구축과 각 소재별 또는 모듈별 가속수명 모델을 적용하여 단 시간에 기술 및 양산 적합성을 사전 평가할 수 있는 통합 프로세스를 확립할 수 있는 계기가 마련되어야 할 것이다.