

기술표준원 고시 제 2001 - 57 호
(제정 2001. 2. 17)

전기용품 안전기준

K61072

[IEC 1991-12]

전기트리 개시에 대한 절연재료의
저항 평가를 위한 시험 방법

목 차

서론	2
1.1 범위 및 목적	5
1.2 규범 참조	5
1.3 정의	5
2.1 방법 요약	6
2.2 기구	6
2.3 시험 절차	8
2.4 시험 결과 분석	10
2.5 보고	10
2.6 정밀도 및 바이어스(bias)	11
3.1 방법 요약	12
3.2 의의 및 용도	12
3.3 용어	12
3.4 기구	12
3.5 샘플 추출 (Sampling)	13
3.6 시험 시료	14
3.7 조절 (Conditioning)	16
3.8 절차	16
3.9 결과 제출	17
3.10 보고	17
3.11 정밀도 및 바이어스	18
(그림)	19
부록 A	23
부록 B	25

서론

a) 개관

전기적 내구성에 관한 준비작업반(preparatory working group)이 창설되었다. 주어진 임무 중에는 절연재 및 그 단순 결합의 전기 트링 내구성(electrical treeing endurance) 평가 방법을 마련하는 것이 포함되어 있었다.

건조 조건하에서 단시간 스트레싱(stressing)을 사용하여 전기 트리 개시에 대한 고체 절연재의 저항력을 비교하기 위해서는 일반적으로 두 가지 트링 시험을 사용한다. 이는 본 보고서에 기술되어 있다. 그 방법들은 주로 전극 배열과 전압이 인가되는 시간 간격에 따라 상이하다.

- 본 보고서 제2절에 기술된 방법 A의 단침 시험(single-needle test)은 트리 개시가 일어날 때까지 점-대-평면 기하학과 지속시간 1분의 연속적인 전압 스텝을 사용한다.
- 제3절에 기술된 방법 B의 2침 시험(double-needle test)은 하나는 한 점에 대해 뾰족하고 다른 하나는 반구형의 말단을 갖는 서로 마주보는 원통형 전극 2개를 사용한다. 한 번도 사용한 적이 없는 시료에다 전압을 상이한 응력 수준에서 1시간 동안 인가한다.

전기 트링에 대한 저항력 시험의 첫 번째 단계로, 2절 및 3절에 기술된 전극 배열들을 짧은 시간(1분)의 스트레싱 조건하에서 라운드 로빈 방식 시험(round robin test)으로 평가했다. 시험 결과와 그에 대한 짧은 토론이 부록 B에 수록되어 있다.

요약하면, 명확하게 정의된 조건하에서 시판용 바늘 전극을 사용하여 전기 트리 개시에 대한 저항력을 측정하는 트링 시험은 통계학적으로 유효하고도 재현 가능한 결과를 제공한다고 결론 내릴 수 있다. 두 시험 어느 것에도 확실하게 우월한 점이 없기 때문에, 두 방법 모두를 우선 순위 없이 추천할 수 있다.

트링에 대한 내구성이 단시간 트리 개시(inception) 전압과 반드시 상관 관계를 가지지는 않는다는 것을 반드시 지적해야 한다. 따라서 높은 트리 전압이 보다 낮은 일정한 응력에서 장기의 트리 개시 시간과 대응하는지 또는 얼마나 밀접하게 대응하는지 알아내기 위해 상기한 전극 배열을 사용한 시험들을 수행하였다. 결과는, 현 단계의 지식에서는, 2절 및 3절에 기술된 방법을 트링에 대한 절연재의 장기 내구성 시험에 확대하는 것은 너무 오퍼레이터(operator) 의존적이어서 IEC의 필요를 충족시킬 수 없다는 것이다. 현재로서는 절연재의 장기 트링 내구성에 대한 IEC 시험 방법을 마련하려는 시도를 계속해야 할 타당한 이유가 없다고 결론지어졌다. 따라서 이 분야에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 절연 재료의 장기 트링 내구성의 중요성이 인식되고 있고 실험실 조건에서 그것을 평가하는 방법들은 확실히 유용하기 때문에 그러한 작업은 다른 곳에서 분명히 계속돼야 한다는 것이 강조되었다.

b) 트리 시작(tree inception)에 대한 저항을 평가하기 위한 시험 방법

고체 유기 유전체에 충분히 높고 불 균일한 전기 기울기(gradients)을 가하면, 통상 트링(treeing)이라고 하는 메커니즘을 통하여 고장이 발생한다.

상이한 분자 구조를 가진 재료에서는 이 전기 트링 과정이 서로 다른 응력 수준에서 개시되고, 트리 개시에 대해 서로 다른 정도의 저항력을 보여 준다.

높고 불 균일한 전기 기울기 또는 부분 방전으로 인한 열화에 의해서 발달하는 트리는 전혀 다른 트리인 (전기화학) 물 트리(electrochemical and water trees)와의 구별을 위해 전기 트리(electrical tree)라고 부른다.

전기 트링은, 고전압 절연에서 발생할 경우, 강한 국부화 전기응력 지대인 전극 코너, 에스페리티(asperities), 도전 입자(conducting particles) 등에서 흔히 개시한다. 트링 시험에서는 이러한 필드 인헨스먼트를 시뮬레이션하기 위해 바늘 전극을 사용한다.

측정된 특성 - 이번 경우에는 특성전압(characteristic voltage)과 발산 필드수명(divergent field life)의 재현 가능성은 많은 요인에 의해 좌우된다. 이런 요인들 중 몇몇 요인을 다음과 같이 식별하였다:

- 바늘끝 기하학(the geometry of the needle point)의 차이
- 바늘 삽입이 만들어 내는 시료 내의 잔류 응력(residual strains)이나 오리엔테이션
- 시료 내의 개재물(inclusion)나 보이드(void)
- 시료에 포함된 작용물로서, 바늘 끝 주위의 전기장을 충분히 변경시킬 수 있을 정도의 도전성이 있는 필름을 만들어내면서 표면에 스며나오거나 퍼져나갈 수 있는 것.
- 특히 트링에 대한 자화율에 영향을 줄 수 있는 휘발성 성분을 포함하는 재료의 경우, 열적 내력(thermal history) 또는 처리상의 차이.

전기 트리(ELECTRICAL TREES) 개시에 대한

절연재료의 저항 평가를 위한 시험 방법

제1절: 일반 사항

1.1 범위 및 목적

본 기술보고서는 단시간의 스트레싱중에 크게 발산하는 전기장과 더불어 부분 방전이 발생할 수 있는 나무 무늬, 즉 관형 채널(tubular channels) 망상조직의 개시(initiation)에 대한 고체 유전체 물질의 저항을 평가 및 비교하기 위한 두 가지 방법을 기술한다.

이 시험은 주로 상용 주파수(48Hz~62Hz)에서 이용된다.

시험은 대개 실내온도에서 수행한다. 다른 온도가 바람직할 경우, 이 온도는 피시험 재료의 정규 사용 범위를 초과해서는 안 된다.

1.2 규범 참조

다음 표준들은 본문 중 참조를 통해 본 기술 보고서의 규정을 구성한다. 본 기술 보고서의 발간 당시에는, 표시되어 있는 판들(editions)이 유효했다. 모든 표준은 개정을 필요로 하므로, 본 기술보고서에 기초한 협정의 당사자들은 하기 표준들의 최신판의 적용 가능성을 검토할 것을 권한다. IEC 및 ISO 회원들은 현재 유효한 국제 표준들의 등록대장을 유지한다.

IEC 60-1: 1989, 고전압 시험 기법(*High-voltage test techniques*) - 일반정의 및 시험 요건 (*General definitions and test requirements*).

IEC 60-3: 1976, 고전압 시험 기법(*High-voltage test techniques*) - 3부: 측정 장치 (*Part 3: Measuring devices*)

IEC 270: 1981, 부분방전 측정(*Partial discharge measurements*)

1.3 정 의

본 기술보고서의 목적에 따라 다음의 정의를 적용한다:

전기 트리(electrical tree): 불균일한 심한 전기 기울기나 부분 방전으로 인한 열화 메커니즘에 의해 형성된 고체 유전체 재료 내 관형 채널의 나무 모양 망상조직.

전기 트링(electrical treeing): 전기 트리의 형성.

트리드(treed): 나무 모양의 무늬를 나타냄.

제2절: 방법 A – 단침시험(THE SINGLE-NEEDLE TEST): 바늘-대-평면 기하학(NEEDLE-TO-PLANE GEOMETRY)

2.1 방법 요약

이 방법은 일련의 1분간의 응력 증가 스텝을 최소 10개 시료 군에 적용한다. 트리 검사를 각 스텝 끝에 수행하여, 트리가 나타나지 않은 시료만 더 높은 전압에서 시험한다. 각 단계에서의 트리 개시 수를 센다. 각 단계에서의 트리 개시 수의 결과적인 분포는 일반적으로 정규분포와 맞으며, 그 평균 전압을 단침시험 특성전압으로써 보고한다. 다른 분포를 허용 할 수도 있다.

이 방법은 전극 구성으로 바늘-대-평면 기하학을 사용한다. 바늘을 피 시험 재료 블록 속에 열로 삽입하거나 몰딩(mould) 혹은 주조(cast)하고, 블록을 평면 전극 쪽으로 가볍게 눌러 붙인다.

단침 특성전압은 전압을 1분 동안씩 연속적으로 인가할 때 부분 방전 채널이 형성되는 트리-개시-전압-스텝 분포의 평균이다.

2.2 기 구

2.2.1 전 원 (Power supply)

전원은 50Hz 또는 60Hz의 전력 주파수에서 정현파 전압 출력을 가지면서, 제어 전류 수준에서 동작하는 연속 전압 제어 및 회로 차단 장치를 갖추어야 한다. 시험 시료는 회로 중에 있는 상태에서, 실효(값)(r.m.s) 시험 전압에 대한 파고 비율이, 시험 전압이 트리 개시 전압의 50%보다 큰 모든 전압에서, $\sqrt{2} \pm 5 \%$ 와 같아야 한다.

전압을 1~2분 이내에 0에서 사전에 정의된 수준까지 높이는 것이 가능해야 한다. 높은 전압을 낮춘 다음에 스위치를 끄기 위한 유사 작동 또한 가능해야 한다.

실효값을 얻기 위해 $\sqrt{2}$ 로 나눈 도수를 가진 피크 탐지 전압계(peak-reading voltmeter)를 사용한다(IEC 60-3 참조).

2.2.2 바늘 전극 (Needle electrodes)

바늘 전극들은 바늘 끝 반지름이 $3\mu\text{m}$ 이어야 하고, 30° 의 끼인각을 가져야 한다. 보다 바람직한 바늘 전체직경은 0.7~1.0mm이다.

주 - 바늘은 다음의 공급자로부터 입수할 수 있다: Ogur Jewel Industry Co. Ltd., 7-12 Omori Kita 5 Chome, Ota-Ku, Tokyo 143, Japan

사용에 앞서 바늘 전극들을 통상적인 실험실 관례대로 청소하되, 바늘 끝을 손상하지 않도록 주의한다. 청소 전, 각 바늘 끝 부분의 반지름 및 모양을 검사한다.

2.2.3 시험 시료

시험시료는 그림 1a에 표시된 치수와 같아야 한다. 그러나 전기 트링에 대한 자화율을 2.3.1 c)에 기술된 방법으로 검출할 경우, 그림 1b의 시료를 사용할 것을 권장한다. 각 시료의 하부 (어스) 평면은 적절한 도전층으로 코팅할 수 있다.

열가소성 재료의 경우, 두께 6mm인 샘플재료의 플라크(plaque)를 적당한 릴리스 포일(release foil)이 있는 가열된 액압 프레스에서 준비한다. 이 플라크로부터 시료 블록을 절단해 내고, 필요한 경우에는 시료 블록 가장자리의 프린지(frings)를 제거한다. 그림 1b에 따른 원통형 시료는 용융 압축(melt compression)이나 압출 가공(extrusion)으로 쉽게 얻을 수 있다

바늘전극을 삽입하기 위하여, 적절한 위치의 슬롯에 바늘 전극이 들어 있는 장치 속에 시료를 넣는다. 시료 블록을 장치 속에 삽입하는 동안, 바늘 끝을 시료 표면에 닿지 않게 위치시킨다. 샘플 재료가 충분히 연화되어, 바늘 끝을 손상시키거나 바늘 끝 앞의 시료에 기계로 인한 금이 생기지 않는 상태로 시료 속에 바늘을 삽입할 수 있는 온도까지 바늘과 시료가 들어 있는 장치를 가열한다(예: PE-LD(저밀도 폴리에틸렌)나 PE-X(교차결합 폴리에틸렌)의 경우에는 80°C). 샘플 온도에 도달한 후 그 상태에서 20분간 유지하고, 장치를 오븐에서 꺼내어 바늘을 서서히 시료 속으로 전진시켜서 전극과 8mm 떨어지게 하고 이 위치에 고정시킨다. 실내 온도까지 냉각시키고 나면 시료에 대한 시험 준비는 완료된 것이며 더 이상의 바늘 위치를 고정시키지 않아도 된다.

고무 재료에서는 냉각 후에도 바늘을 삽입 위치에 고정시켜야 하고, 시험 도중에 바늘의 움직임을 방지할 바늘 삽입 장치를 사용한다.

주조 수지의 경우, 전극 주위에 수지를 주조하기 전에 바늘 전극을 규정대로 위치시킨다.

2.2.4 시험을 위한 시료 배열

2.3.1 a)나 2.3.1 b)에 따른 시험을 위해, 그림 1a과 같이 도전 물질의 평면(예: 권장 반지름 $\geq 1.0\text{mm}$ 의, 가장자리(edge)와 코너(corner)가 둥근 알루미늄판이나 황동판) 위에 최소한 10개의 시료를 25mm 간격으로 여러 줄 배치한다. 각 바늘 끝 - 남은 작은 틈은 개의치 말고 - 을 샘플 재료로 완전히 감싸고 바늘 전극 사이 또는 바늘 전극과 플레이트 가장자리 사이의 최소 거리가 25mm가 되도록, 시료 줄 사이의 빈틈을 적당히 자른 피 시험 재료 블록으로 최소 12mm 높이로 채운다. 그림 1b에 따른 시료를 사용할 때에는 이 요건들이 자동으로 충족된다. 끝으로, 그라운드 전극으로부터 $\geq 40\text{mm}$ 의 거리에서 유지되는 고전압 전위의 또 다른 둥근 가장자리 플레이트를 사용하여, 시험 배열의 외부 전기장 경계 조건이 명확히 정해지도록 바늘 전극을 고전압 전원에 연결한다. 이는 적당한 지지물(supports)을 사용하여 달성할 수 있다.

그림 1a에 따른 시료를 사용하는 장치의 한 예가 그림 2에 예시되어 있다.

시험 중에 전체 배열을 필요한 유전 특성을 지닌 액체 속에 담근다. 액체의 유전율은 시험 시료 유전율의 20% 이내이어야 한다.

방법 2.3.1 c)에 따라 시험하기 위해, 필요 방전 검출 감도(requisite discharge detection sensitivity)(통상 1pC)를 가지면서 배열 자체가 최고 예상인가전압에서 무방전(charge-free)인 적당한 시험 배열로 단일 시험 시료의 위치를 정한다. 그림 1b에 따른 시료를 사용할 경우 일반적으로 유침유(Immersion oil)를 사용하지 않아도 된다.

2.3 시험 절차

전기트리가 나타나지 않을 것으로 예상되는 전압에서 최소 10개의 시료를 스트레싱(stressing)함으로써 시험을 시작한다. 이 전압 인가시 제어 불능한 과전압 피크를 피하기 위해, 1~2초 사이의 시간에 0에서 정해진 수준까지 전압을 높여야 한다.

2.3.1 트리 개시의 검출

트리는 다음과 같은 다양한 방법으로 검출할 수 있다:

- a) 현미경에 의한 직접 광학 검사;
- b) 마이크로톰(microtome)에 의한 시료 절단 및 뒤이은 현미경 검사 ;

c) 각 1분 스트레싱 전압에서 부분방전의 직접 검출. 한 번에 시료 하나만을 시험한다.

방법 a) 또는 b)에 따라 시험할 경우, 전압을 0으로 신속하게 줄이고 스위치를 끈다. 응력 노출 후, 트리 개시 여부를 알아보기 위하여 시료를 검사한다. 아래에 주어진 배율로 눈으로 볼 수 있는 트링 채널—그 길이에 상관없이—이 검출되는 전압 수준에서 시료는 트리 개시에 의해 실패(fail)한 것으로 간주된다.

방법 c)에 따라 시험할 경우, 첫 번째 전압 단계는 방법 a) 및 b)의 것과 동일하다. 전압을 0으로 내리고 샘플을 떼내어 검사하는 대신, 부분 방전 활동도(partial discharge activity)를 계속 모니터링하면서 전압을 1분 내에 그 다음으로 높은 전압으로 올린다. 5pC (또는 미리 정의해 놓은 다른 수준) 수준의 연속 방전이 발생하는 전압 수준에서 시료를 실패한 것으로 간주한다. 그런 다음 전압 스위치를 끈다. 바람직할 경우, 시료를 추가로 a) 또는 b)에서와 같이 검사할 수도 있다.

방법 a)는 PE-LD, PE-X 및 언필드(unfilled) 에폭시 수지와 같이 충분히 투명한 재료에 적합하다. 직접 현미경 검사는 투과광(transmitted light)과 50배 배율을 사용해 수행할 경우 만족스럽다. 이런 식으로 시료를 점검할 수 없을 경우에 방법 b)를 적용하며, 전술한 대로 또는 필요시 입사광과 보다 높은 250배 배율로 현미경 검사를 수행한다.

광학적 검출 방법들 중 비파괴 검사(방법 a)와 파괴 검사(방법 b)를 구별해야 한다.

트링 컨트롤(treeing control)을 위한 또 다른 비파괴 절차를 방법 c)에서 제공하고 있다.

2.3.2 시료 비파괴검사에 의한 시험

비파괴 검사에 의하여 시료에서 트리가 발견되지 않았을 경우, 보다 높은 수준의 추가 응력을 시료에 1분 간 가한다. 트리 개시에 의해 실패한 시료를 그 조(set)에서 제거하고 바늘 전극이 없는 모조 샘플 재료로 교체한다. 그 다음, 각 스텝에서 전보다 1kV 더 높은 전압으로, 모든 시료가 전기 트리를 보일 때까지 시료 조에 추가 전압 스트레싱을 가한다.

2.3.3 시료 파괴검사에 의한 시험

트리 개시 검출을 위하여 비파괴방법을 적용할 수 없는 경우 시료를 모두 파괴해야 한다.

따라서 각 응력 수준에는 새로운 한 조의 시료가 필요하게 된다. 최소 시료 수는 10개이다. 시험은 5kV의 응력 수준에서 시작하고, 하한(첫번째 실패)을 찾는 노력을 최소화하기 위해 응력을 5kV씩 증가시킨다. 이렇게 측정된 하한으로부터 1kV 스텝씩 높여 가며 시험을 계속한다. 시험은 모든 시료들이 전기 트리를 나타내는 전압에서 종결된다.

2.4 시험 결과 분석

2.4.1 비파괴검출 결과 분석

2.3.2에 기술된 시험 절차의 결과로, 여러 응력 수준에서의 트리 개시 도수분포를 얻을 수 있는데, 평균편차 및 표준편차로 그 특성을 나타낼 수 있으며, 대개는 가우스 분포에 맞다. 다른 분포도 허용될 수 있다. 때로는, 이중 모드나 다중 모드가 도수분포의 특징을 더 잘 나타낼 수 있는 경우도 있다. 이는 시험 보고서에 기록해야 한다. 샘플 크기에 좌우되는 평균의 95% 신뢰성 한계도 역시 기록해야 한다.

2.4.2 파괴검출을 통한 결과 분석

2.3.2에 기술한 시험 절차에 따른 결과는 여러 응력 수준에서의 트리개시 누적도수분포이다. 1차 결과가 모든 보다 낮은 응력 수준에서의 실패 수에 의하여 단일도수분포로 낮아지는 분석 방법이 권장된다. 예를 들면, 21kV에서 10개, 20kV에서 8개의 실패가 발생할 경우, 21kV에 2개 실패를 할당한다. 더 낮은 응력에서보다 더 적은 수의 트리 개시가 발견되는 응력 수준은 무시한다. 예를 들어 18kV에서 4개의 실패, 17kV에서 5개의 실패가 발생할 경우에는, 0개 실패를 18kV에 할당한다. 이 도수분포는 앞서 기술한 특징을 갖는다.

2.5 보 고

실험에 관한 데이터는 가능한 한 완전하게 제출해야 한다. 보고서는 어떠한 경우에도 다음을 포함해야 한다:

- a) 피시험 재료;
- b) 시험 시료 수;
- c) 시험-전 조절(conditioning prior to testing);
- d) 시험 조건 (예: 온도);
- e) 사용한 시료 유형 (크기, 모양);
- f) 사용한 전극 (각도를 포함하여 지름, 끝부분 반지름);
- g) 채용된 트리 검출 유형(시각, 부분방출);

h) 트리 개시 전압;

i) 사용된 분석 절차(가우스, 와이불 분석), 따라서 트리 개시 전압의 평균 또는 63.2% 값.

2.6 정밀도 및 바이어스(bias)

PE-LD 및 에폭시 수지 단침(SN: single needle) 시료에 관한 5개 실험실의 라운드 로빈을 IEC 작업 그룹 내에서 차례로 운영하였다. 데이터 요약은 다음과 같다(상세한 내용은 부록 B 참조):

	<i>PE-LD</i>	에폭시 수지
평균 특성전압 (kV)	12.63	23.3
표준편차 (실험실간) (kV)	1.24	2.44
평균 변동 계수 \bar{V} (%)	13.1	34.5
\bar{V} (%)의 표준편차	2.1	11.0

이 방법의 바이어스는 표준 재료가 없어 측정하지 못하였다.

작업 그룹은 “트링 전압 수명(treeing voltage life)”을 조사하여, 실험실간 산포(scatter)가 과다했다고 결론 내렸다.

제3절: 방법 B – 2침 시험 (THE DOUBLE-NEEDLE TEST): 침-대-침 기하학 (NEEDLE-TO-NEEDLE GEOMETRY)

3.1 방법 요약

이 방법에서는, 시료를 준비하고 침을 전극으로 사용하기 위해 삽입한다. 침에 전압을 인가하여 1시간 동안 또는 전기항복 발생 시까지 유지한다. 결과는 시료 절반이 1시간 내에 유전체 손상을 보이는 전압, 또는 연속 전압이 가해진 시료군의 실패까지의 중앙 시간(median time)으로 나타낸다.

이 방법에서는 마주보는 얇은 원통형 전극 2개를 사용하는데, 하나는 한 점을 향해 뾰족하고, 다른 하나는 반구형의 말단을 가진다. 이것들을 피 시험 재료의 블록 속으로 몰딩 또는 삽입한다.

3.2 의의 및 용도

이는 다음의 효과를 시뮬레이션하기 위한 실험실 시험이다:

- 절연 시스템 내 도체 또는 반 도전 스크린과 1차 절연 사이의 조질 인터페이스(rough interfaces)의 존재
- 절연 시스템 내 이물질(오염물질)의 존재
- 절연 내 작은 보이드나 공동(cavity)의 존재.

3.3 용 어

3.3.1 특성 전압 (characteristic voltage) 또는 DNCV (2침 특성 전압: double-needle characteristic voltage): 동일 시료군 내에서 2개의 얇은 원통형 전극(하나는 뾰족하고, 다른 것은 반구형 말단을 가진) 사이에 1시간 인가시, 시료 중 절반의 뾰족한 전극 끝에 관찰 가능한 유전체 손상을 일으키는 전압.

3.3.2 전압 수명 (voltage life) (t_{50}): 동일한 전압 응력이 가해진 동일시료군에서 50%가 실패한 시간.

3.3.3 부분 방전 (IEC 270 참조).

3.4 기 구

3.4.1 전 원

연속 전압 제어 및 제어가능 전류 수준에서 동작하는 가조정 보호용 자동 회로차단 장치를 갖춘, 전력 주파수에서 정현파 전압 출력을 갖는 고전압 전원(IEC 60-1 참조).

3.4.2 전류-감지식 개별 시료 단절 (Current-sensitive individual specimen disconnect)

복합 시료에 실패 시험을 할 경우, 각각에 대하여 단절 회로를 사용해야 한다. 단절 전류는 35mA를 초과할 수 없다. 각 시료에 대해 실패까지의 시간을 기록할 준비를 하도록 한다.

3.4.3 3.3.2, 3.8.2, 3.9.2 및 3.10 j)는 전압 수명 시험에 적용되며, 이는 개시 특성 평가와는 관련 없음을 주의해야 한다. 이는 본 문서에 부가 정보로 포함된다.

트링 내구성 시험은 아직 검토 중에 있다.

3.4.4 전 극

중요한 전극은 한쪽 끝에서 제어 반경(controlled radius) $2.5\mu\text{m}$ 와 끼인각 30° 로 뿔쪽해지는 지름 $0.7\sim 1\text{mm}$ 의 둥근 강철봉이다. 다른 전극은, 말단이 반구형이면서, 동일한 지름을 가져야 한다. 전극은 부록 A에 실린 방법으로 준비하거나 완성된 형태로 구입할 수 있다(2.2.2의 주 참조). 이 전극은 시료 준비중에 시료 속에 몰딩되거나 또는 고온에서 시료 블록에 삽입된다.

3.4.5 바늘 연삭용 선반(Needle-grinding lathe)

제어된 침 침예도 및 끼인각으로 연마된 전극을 준비하기 위한 선반.

3.4.6 시료 몰드(Specimen mould)

바늘이 들어 있는 압축 몰딩 시료의 단일 단계 준비를 위한 몰드. 전형적인 몰드를 그림 5에서 볼 수 있다.

3.4.7 바늘-삽입 지그 (Needle-insertion jig)

전극의 저속 제어 삽입을 위한 지그. 그림 3이 바늘-삽입 지그를 보여 준다.

3.5 샘플 추출(Sampling)

샘플 추출은 피시험 시료들이 배치(batch) 전체를 대표하는 방식으로 수행해야 한다.

3.6 시험 시료

3.6.1 시험 시료는 그림 4에서 보는 바와 같이 바늘 같은 전극 2개를 포함하는 대략 25mm×25mm×6mm의 블록이다. 시험 시료는 압축 몰딩, 압축 가공, 완성품으로부터 절단 등에 의하여 준비할 수 있다. 전극의 끝은 특성전압 측정을 위해서는 6~12mm, 전압수명 측정을 위해서는 2~6mm 정도 분리시킨다.

3.6.2 열가소성 시료의 준비

동일 재료의 6mm 두께 시트를 플레이트의 냉수 냉각 설비를 갖춘 증기 또는 전기 가열 액압 프레스로 압축 몰딩한다. 정압(positive pressure) 몰드를 사용하는데, picture-frame 식이나 milled-cavity 식 중 어느 것이라도 된다. 몰드 표면과 수지 사이에는 셀로판, 폴리에스테르 필름 또는 알루미늄박 등의 분리 시트를 사용한다. 분리 시트의 선택은, 알콜로 세척하여 완전히 말린 알루미늄 시트가 우선적이긴 하지만, 어느 정도는 몰딩 온도에 좌우된다. 몰드의 크기는 중요하지 않다: 200mm×200mm를 권장한다.

3.6.2.1 몰딩 후, 직각을 이루는 매끄러운 가장자리의 25mm 정사각형 블록으로 시트를 자른다. 이 정사각형 블록들을 23℃ 및 50% 상대습도의 표준 실험실 조건에서 보관하고, 사용할 때까지 오물 및 대기 오염으로부터 보호한다.

3.6.3 바늘 삽입

오리엔테이션 응력, 공동 형성, 뾰족한 바늘 끝 손상 등을 피하기 위해 바늘 전극을 시료 블록 속으로 천천히 그리고 조심스럽게 집어넣는다. 모든 바늘이 동일 조건 아래서 삽입되는 것을 보장하기 위해, 그림 3에서 보는 것과 같은 지그를 사용한다.

3.6.3.1 삽입은 다음과 같이 한다: 시료 블록을 위하여 제공된 슬롯에 시료를 위치시키고 클램프로 가볍게 정 위치에 고정시킨다. 연마된 바늘 끝을 메틸 에틸 케톤으로 세척 후 검사한다. 그런 다음, 바늘 끝이 시료에 닿도록 한쪽 면의 바늘 슬롯에 바늘을 조심스럽게 위치시킨다. 바늘을 올바르게 위치시키기 위하여 개별 조정 나사를 이용한다. 바늘 위의 바늘 슬롯에 심(shims)을 밀어 넣고, 덮개 플레이트를 사용하여 바늘 슬롯 상단부를 막는다. 각 말단에서 이 덮개를 소형 C 클램프로 고정시킨다. 심과 덮개의 목적은 바늘이 위로 치켜 올라가는 것을 막고 시료 속으로 똑바로 들어가도록 강제하기 위한 것이다. 시료의 반대쪽에 있는 슬롯에다 반구형 말단의 전극들을 동일한 방식으로 위치시킨다.

3.6.3.2 시료와 바늘을 장착하고 바늘을 올바른 위치로 조정하고 나면, 지그 전체를, 예를 들어 저 밀도 폴리에틸렌의 경우에는 105℃에서, 예열 기간 1시간 동안 순환 공기 오븐(circulating-air oven) 속에다 둔다. 부분적으로 결정성인 다른 중합 재료의 경우, 열역학 1차 전이점보다 약 10℃ 아래의 온도를 사용한다. 예열 후, 큰 엄지나사(lead screw)를 한

바퀴 완전히 돌려 1.2mm 스텝씩 바늘을 동시에 전진시킨다. 5분 간격으로 반복한다. 충분한 스텝으로, 삽입을 완성한다.* 일반적으로, 특성 전압 측정을 위해서는 6~12mm의 전극 갭을 사용하고, 전압수명 시험의 경우에는 2~6mm를 선호한다. 이 시험을 통하여 재료들을 비교하기 위해서는 동일한 갭을 사용해야 한다.

3.6.3.3 삽입을 완료하고 나면, 응력 제거 또는 가열 냉각(annealing)을 위해 지그를 오븐 속에 최소한 30분 동안 손대지 않은 채 그대로 둔다. 지그를 오븐에서 꺼내어 실내 온도로 자연 냉각시킨다. 각 시료를 가능한 한 현미경으로 검사하여 삽입 중에 바늘 끝이 손상되지 않았는지 확인한다.

3.6.4 몰딩-인 전극 시료 준비

3.7의 규정대로 조절한다.

3.6.4.1 몰딩은 예를 들면 150mm×25mm×6mm(두께)이며 뿔족형 전극 6개, 반구형 전극 6개를 포함한다.

3.6.4.2 6개 시료 시트의 준비를 위해 사용할 수 있는 압축 몰드는 몰딩 중에 전극을 클램핑하기 위한 홈이 파인 2개층의 몰드로 구성된다. 몰드 변형을 방지하기 위하여 강철 보완 플레이트를 그 주위에 측면으로 두른다. 보완 플레이트에 파인 틈(slit) 속에 바늘 끝부분이 들어가게 된다. 상단부와 하단부는 정밀 연마한(polished) 스테인레스 스틸 플레이트이다(그림 5 참조).

3.6.4.3 바늘을 설치하기 위해, 상단부 클램프 플레이트 A 및 B를 떼어낸다. 반구형 전극을 홈(groove) 속의 제자리에 조심스럽게 놓아, 말단이 빈 공간 부분으로 약 11mm 정도 돌출하게 한다. 플레이트 A를 제 위치에 두고 나사를 조인다. 플레이트 B의 뿔족한 전극에 대하여 동일한 절차를 수행하되, 나사는 조이지 않는다. 뿔족한 전극을 내장 광학 스케일(built-in optical scale)이 장착된 현미경 밑에 놓는다. 각각의 뿔족한 전극을 조심스럽게 조작하여, 마주보는 전극을 규정된 간격으로 놓는다. 그리고 나서 플레이트 B의 나사들을 조인다. 간격이 유지되고 있는지 살펴보기 위하여 점검한다. 바늘 끝 부분이 구부러지지 않도록 처음부터 끝까지 주의를 기울여야 한다.

3.6.4.4 정밀 연마한 200mm×250mm의 플레이트 하나를 몰딩 프레스의 하부 플레이트 위에 놓는다. 정밀 연마한 플레이트에 수지가 들러붙는 것을 방지하기 위하여, 이를 최소 두께 0.1mm의 폴리에스터 필름 시트나 알루미늄박으로 덮는다. 이 폴리에스터 시트나 알루미늄박의 한가운데 위아래 몰드를 놓는다. 시험할 몰딩 재료(예를 들어, 폴리에틸렌) 약 30g을 몰드의 공동 내에 고르게 분포시킨다. 그 다음, 또 다른 폴리에스터 필름 시트나 포일과 정밀연마한 두 번째 플레이트를 몰드 위에 올려 놓는다.

3.6.4.5 일반적으로 인정된 관례에 따라 시료를 몰딩한다.

3.6.4.6 플레이트 A와 B 양쪽 모두의 나사를 제거하여 시료를 제거한다.

3.6.4.7 150mm 블록을 별개의 25mm 정사각형 시료 6개로 절단한다.

3.6.4.8 광학 스케일의 현미경 아래에서 각 시료를 점검하여, 전극 간격이 올바른 것으로 밝혀질 경우에만 그 시료를 사용한다. 시험 영역에서 오염물이나 보이드가 발견될 경우, 그 시료는 불합격시킨다.

3.7 조 절(Conditioning)

시료 준비를 완료하고 나면, 모든 시료를 시험 전에 23℃ 및 50% 상대습도에서 약 24시간 보관한다.

3.8 절 차

3.8.1 시료의 전기 스트레싱 (Electrical stressing of specimens)

하나의 샘플에 시료 40개를 준비한다. 시험 블록의 측부 표면 전체를 알콜로 조심스럽게 닦는다. 최소 50mm의 센터 상에 일정한 간격을 두고 있는 수직 상태의 블록을 지탱하기 위한 적절한 시료 홀더에 시료 중 10개를 놓는다. 시험 챔버(test chamber)는 챔버의 모든 부분에 대한 섬락을 방지할 수 있는 충분한 여유 공간(clearance)을 가지고서, 시료 홀더와 시료가 들어갈 정도로 충분히 커야 한다. 챔버로의 모든 진입구(access door)는 전기적으로 인터록(interlock)이 해야 한다. 시료에 전기를 접속한 후, 챔버의 문을 닫고 전압을 인가한다. 전압을 0에서 시험 레벨까지 원활하게 높여, 원하는 전압을 수초 내로 얻도록 한다. 그 전압을 1시간 동안 일정하게 유지한다. 이 기간이 지난 후, 전압을 0으로 내린 다음 전원을 끄고서 검사용 시료를 제거한다.

3.8.1.1 시료 검사

뾰족한 전극 끝의 트리 존재 여부를 100x 광학현미경으로 검사한다. 필요한 경우, 시료를 박편화하여 두께를 줄여 가시도(visibility)를 향상시킬 수 있다. 현미경 유침유(immersion oil)를 시료 상단부와 하단부에 떨어뜨리면 내부 구조를 쉽게 인지할 수 있다. 바늘 끝부분에 어떠한 외관상의 변화가 발생할 경우 트리로 간주한다. 이에선 속이 빈 짧은 보이드, 트렁크(trunk)나 트리, 심지어는 점(dot)도 포함된다. 트리가 형성된 시료의 수를 “트리드 시료율(fraction of specimens treed)”로 표시한다. 시료는 재사용하지 않는다.

주 - 광학적 고품질과 유기 플라스틱에 가까운 굴절률을 지닌 적합한 오일이 Fisher Scientific Co. (203 Fisher

Building, Pittsburgh, PA 15219, USA 소재)가 공급하는 Cargille 현미경용 비건조 유침유이다.

3.8.1.2 약간의 그러나 시료 절반보다는 적은 실패를 가진 최소한 3개 시험 전압과 시료 절반보다는 많지만 전부는 아닌 실패를 가진 최소한 하나의 전압을 사용하여 3.8.1 및 3.8.1.1의 절차를 반복한다.

3.8.2 발산-필드 전압 수명 시험 (*Divergent-field voltage life test*)

10개의 시료만을 준비하여 3.8.1에 요약된 대로 진행한다. 3.8.1과 같이 전압을 인가하여, 5개 시료에 대해 실패(완전 항복)가 발생할 때까지 유지한다. 어떤 연구에서는, 9번째나 10번째 실패까지 시험하는 것이 바람직할 수도 있다. 5번째 실패에 대해 최소한 24시간을 요하는 시험 전압을 선택한다. 이 전압은 실험에 의해서 결정된다.

3.8.2.1 각 시료의 실패까지의 시간을 기록한다.

3.9 결과 제출

3.9.1 특성 전압 시험

시험 결과를 직각 (선형) 좌표 그래프 상에 나타낸다. 축을 지정한다: 시험 전압 대 트리를 보인 시료의 비율. 데이터는 상당히 곧고 기울기가 급한 직선을 나타내야 한다. 데이터 점들의 이 선과 50% 수준과의 교점이 2침 특성전압(DNCV)을 규정하는 것이다.

3.9.2 전압수명 시험

발산 필드 전압수명 시험의 결과는 같은 전압이 가해진 동일 시료군의 전압수명 t_{50} 으로 표시할 수 있다. 9번째나 10번째 시료가 실패할 때까지 시험을 하고, 가우스확률지(Gaussian probability paper) 상에 시간 대비 실패의 백분율을 나타내는 것이 유용할 수 있다. 이는 실패의 분포를 보여 주는 곡선을 만들고 전압수명 t_{50} 의 추정을 가능하게 한다.

3.10 보 고

보고에는 다음 사항을 포함해야 한다:

- a) 피시험 재료;
- b) 피시험 시료 수;
- c) 시험 전 조절(conditioning);
- d) 시험 조건;
- e) 시료 기하학;

- f) 전극 끝부분 반지름 및 끼인각;
- g) 전극 간격;
- h) 시료 크기 및 모양;
- i) 측정된 특성전압;
또는
- j) t_{50} 으로 나타낸 전압 수명.

3.11 정밀도 및 바이어스

PE-LD 2침(DN: double-needle) 시료에 관한 4개 실험실의 라운드 로빈(round robin)이 IEC 작업 그룹 내에서 운영되었다. 하나의 시험을 제외하고는 1분 전압 스텝을 사용하였다. 데이터 요약은 다음과 같다(상세한 내용은 부록 B 참조):

	PE-LD
평균 특성 전압 (kV)	15.88
표준편차 (실험실간) (kV)	0.76
평균 변동 계수 \bar{V} (%)	11.5
\bar{V} (%)의 표준편차	1.5

1시간 전압 스텝을 사용한 이 PE-LD에 대한 2침 특성전압 DNCV는 11.5kV이다.

이 방법의 바이어스는 표준 재료가 없어 측정하지 못하였다.

(그림)

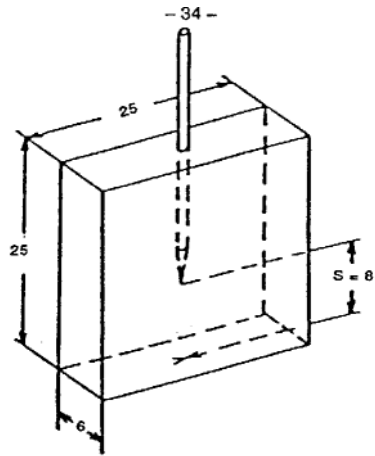


그림 1a)

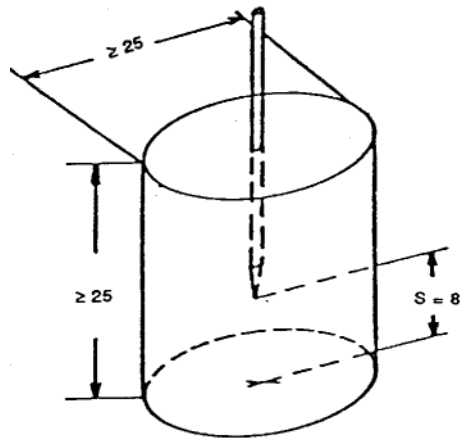


그림 1b)

(단위 : mm)

그림 1 - 시료 크기 및 바늘진극 위치

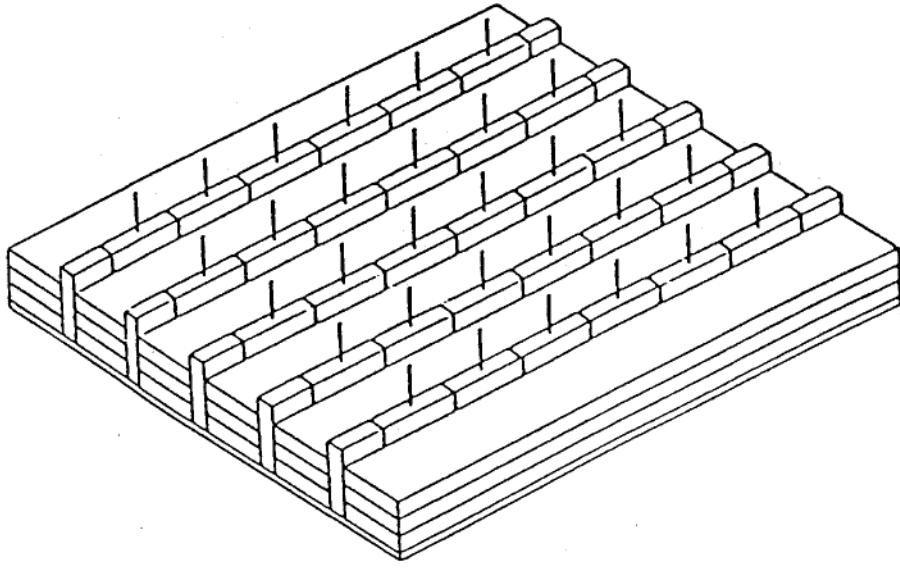


그림 2 - 가능한 시료 배열

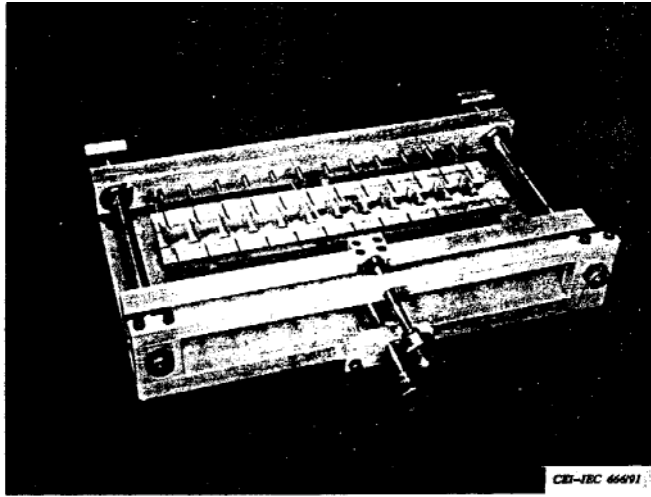


그림 3 - 바늘 삽입 지그

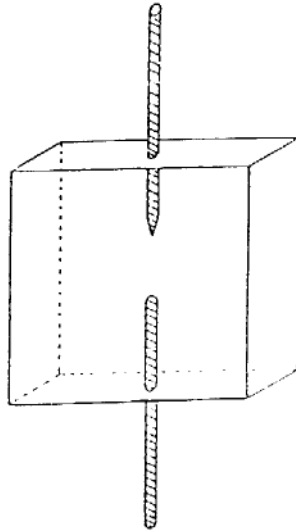
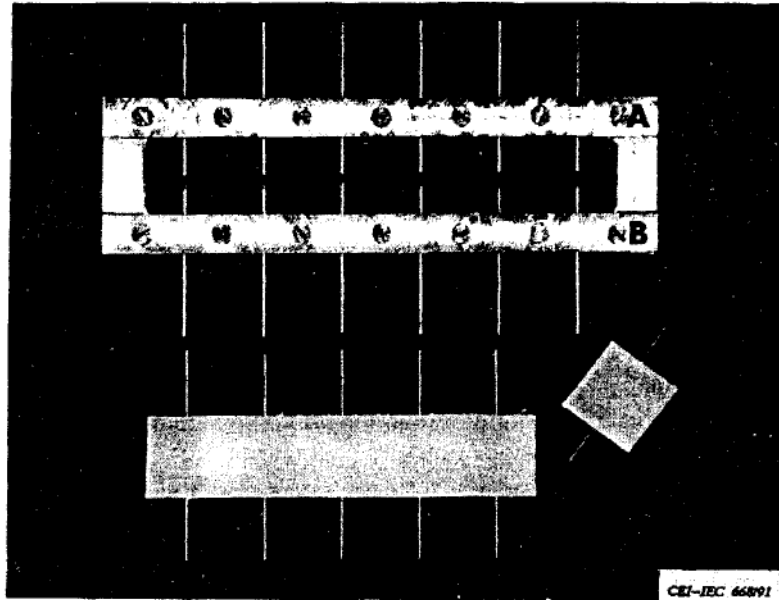


그림 4 - 완성된 시료



A 및 B 상단부 클램프 플레이트

그림 5 - 전극이 들어 있는 시료 준비용 몰드

부록 A (정보용)

바늘전극의 준비

몸대 지름 약 0.7 mm, 길이 37.5mm, 그리고 바늘끝 지름이 약 0.025mm인, “7번 바느질 바늘 (No.7 Sharps)”이라고 불리는 표준 바느질 바늘을 사용한다. 다이애저널커터(diagonal cutters)로 바늘 귀를 잘라 내고, 바늘을 선반의 척 속에 집어넣어 약 5mm만 나오게 한다. 표준 척 대신에 시계제조인의 선반 스펀들과 정밀 강철 컬렉트(collect)로 이 정밀 연삭(grinding)을 수행하는 것이 보다 쉽고 빠르다. 절삭공구대 그라인더(tool post grinder)에 장치된 회전 휠에 연삭하여, 바늘 끝을 끼인각 30°의 원뿔꼴로 뾰족하게 만든다. 휠은 결이 매우 곱고 아주 단단한 돌이어야 한다.

주 - 직경은 50mm, 두께는 6mm이고 아버 홀의 직경이 직경 6mm인 휠을 Abrasives Distributors (26 W. Passare St., Rochell Park, NJ 07662, USA 소재)로부터 입수할 수 있다.

각각 3,500 및 10,000 회전/분의 비율로 바늘과 그라인딩 휠을 반대 방향으로 회전시켜 연삭을 완성한다. 시작 전에 등유 수 방울로 휠을 침윤시키고, 바늘 바로 위에 위치하면서 소형 현미경 스폿 램프로 조명을 받는 10x 입체현미경으로 연마 과정을 계속 관찰한다. 바늘 끝이 충분히 날카로워지면 떼어내서, 바늘 끝을 위로 향하도록 하고서 손대지 않은 상태로 다른 바늘 수 개가 준비될 때까지 일시 보관한다. 바늘은 한 벌로 총 30개까지 모을 수 있는데, 이는 휠 표면을 다시 갈아서 날을 세워야 하기 전까지 연마할 수 있는 대략적인 바늘 개수이다. 바늘 연마 과정을 주의 깊게 지켜보도록 한다. 이는 그것이 바늘이 기대만큼 날카롭지 않아 휠의 날을 세우는 것이 필요한 때가 언제인지를 결정하는 가장 좋은 방법이기 때문이다. 때로는 그때가 바늘을 불과 몇 개밖에 갈지 않은 뒤일 수도 있다. 휠의 날을 세우기(dressing) 위해서는 수평으로 그리고 선반 축에 대해 75° 각도로 장착된 다이몬드 공구를 사용한다. 날세우기는 건식으로 수행한다.

바늘 한 벌이 준비되면, 각 바늘 끝이 매끄럽고 원뿔 꼴이며 뾰족한지 100x 현미경으로 검사한다. 만족스럽다고 생각되는 것을 마이크로프로젝터로 후속 검사를 진행해야 한다. 스테이지에 올려진 바늘 끝의 이미지가, 지름 1.0mm의 원호에 의해 정점에서 끝나는 30° 평면각의 윤곽을 가진 화이트 카드 상에 200x의 배율로 투영된다.

이 치수는 허용 최대치인 바늘 끝 지름 5 μ m에 상당한다. 적절히 뾰족한 끝, 적당한 각도를 가지면서 매끄럽고 버(burr)가 없는 바늘은 합격이다. 바늘 끝 부분들을 경계계유에 담그고 나서, 장래 사용에 앞서 바늘 끝을 위로 향하도록 하고서 손대지 않은 상태로 건조기에 보관한다.

바느질 바늘로 전극을 준비하는 대신, 드릴 블랭크(drill blank)를 사용해도 된다. 한쪽 전극에는 반구를 연삭하고, 다른 쪽에는 날카로운 끝을 연삭한다.

또 하나의 방법은 전극을 구입하는 것이다. 30° 끼인각의 말단에 끝부분 반경이 3 μ m인 지름

1mm의 강철봉으로 만든 전극이 구입 가능하다(2.2.2 참조). 동일한 지름 1mm짜리 봉으로 만들어 지는 뭉툭한 전극은 반경 0.5mm의 말단을 갖는다.

부록 B
(정보 제공용)

라운드로빈 트링 시험의 결과 및 토론

2절 및 3절에 기술된 바늘 배열에 PE-LD를 이용하여 라운드 로빈 방식 시험을 수행하였다. 또한, 방법 A의 전극 배열을 이용해서 에폭시 수지를 평가하였다. 이러한 시험의 목적은 이 전극 배열들로 달성할 수 있는 정밀도 및 재현성을 평가하는 것과, 그것들 중 어떤 것 하나가 양호한 것인지를 알아내는 것이었다.

단침 시험은 A, B, C, D의 4개 실험실에서 방법 A에 따라 수행되었다. PE-LD (Lupolen 1812 DSK)를 사용하여, 각 시험 실험실뿐만 아니라 실험실 (D)에서도 시료들에 바늘을 집어넣었다. 모든 에폭시수지 시료들은 무수프탈산으로 경화시킨 비스페놀 A형 수지를 사용하여 하나의 실험실 (D)에서 준비되었다.

바늘끝 반경 약 $3\mu\text{m}$, 끼인각 30° 인 동일한 유형의 시판용 바늘을 모든 시험을 위한 전극으로 사용하였다. 3개 실험실에서는 현미경 관찰로, 1개 실험실 (B)에서는 2.3.1 c)에 따른 부분방전 측정으로 트리 개시를 검출했다.

동일한 PE-LD(Lupolen 1812 DSK)로 2침 시험이 B, C, D, E의 4개 실험실에서 수행되었다. 전극 배열은 방법 B를 따랐다. 그러나 시험 절차는 방법 A의 절차, 즉 지속시간 1분의 연속 전압 스텝들을 사용하는 절차와 동일하였다. 시료 전부에 대해 실험실 E에서 바늘을 삽입했다.

이런 종류의 시험으로 쉽게 도달할 수 있을 것으로 판단되는 배열 유형을 조정할 수 있도록 표 B1a, B1b 및 B2를 본 보고서에 포함시켰다.

데이터의 통계학적 평가는 다음을 분명히 보여준다:

- 뾰족한 전극 하나와 뿔뿔한 전극 하나를 가진 2침 배열뿐만 아니라 단침 점-대-평면 배열도 작은 산포와 상대적으로 낮은 변동계수의 유사한 결과를 모든 실험실에서 제공한다.
- (단침 시험으로 증명된 바와 같이) 상이한 실험실에서 시료에 바늘을 삽입해도 결과는 유사하다.
- 실험실 B의 결과는 다른 결과들과 훌륭하게 일치한다. 이는 현미경표시(microscopical indication)나 직접 전기 표시(direct electrical indication)의 둘 중 하나에 의해 트리 개시를 만족할 수 있을 정도로 검출할 수 있음을 의미한다.
- PE-LD에 관하여, 연속 1kV/분의 동일한 전압 인가 조건 하에서 평균 트리 개시 전압은

단침 배열에서보다 2침에서 재현 가능하게 약 3kV 정도 높다(표 B1a 및 B2 참조).

이 두 시험을 통하여 동일 시험 조건하에서 상이한 두 전극 배열을 비교하였다. 그러나 방법 A와 방법 B는 상이한 시험 조건들을 규정하고 있으므로, 수행된 라운드 로빈 시험을 두 방법의 직접 비교로 간주할 수는 없다.

비교 목적에 따라, 위에서 검사한 PE-LD를 방법 B로 하나의 실험실 (E)에서도 시험하였다. 2침 특성전압 DNCV값 11.5kV를 이 경우에서 구했다.

끝으로, 장기 전압 스트레싱중의 트리 개시 시간 측정을 위해 기술된 시험 배열의 적합성을 평가하기 위하여 단침 배열을 사용하였다. 데이터를 가지고 의미있는 상세한 토론을 할 수는 없었으나, 다음과 같이 데이터의 특성을 기술할 수 있다:

- 두 실험실간 그리고 심지어는 동일하다고 생각된 조건들 하의 한 실험실에서의 여러 실험간에 극히 큰 산포(scatter)가 존재한다.
- 응력 인가 및 휴지 시간(resting times)에 대한 세부사항이 주요 실험 요소이다.
- 트리 개시의 순간은 약간 주관적이다. 이것은 시각 검출 사용 시 특히 그러하다.

표B1a - PE-LD를 통한 단침 트링 시험에서의 트리 시작 전압
(스트레싱 조건 : 연속적인 1kV/분 스텝, 2절의 방법A를 참조)

실험실	A n.D	B n.D n.t		C n.D n.t		D n.t	
전압	검출된 트리						합계
	8 kV	1					
9	1			1	1		3
10	7			8	2	1	18
11	10	3	1	10	10	1	35
12	6	8	6	7	7	4	38
13	2	7	9	1	5	5	29
14	1	6	7	2	1	6	23
15	0	3	5	0	1	6	15
16	2	1	2	1	2	2	10
17		2				1	3
18						4	4
<i>n</i>	30	30	30	30	29	30	179
가우스/정상							
\bar{x} kV	11,4	13,3	13,5	11,3	12,0	14,3	12,6
\bar{x}_l kV	10,7	12,7	13,0	10,8	11,4	13,5	12,3
\bar{x}_u kV	12,0	13,9	14,0	11,9	12,7	15,1	12,9
<i>s</i> kV	1,75	1,62	1,28	1,47	1,66	2,12	2,00
<i>V</i> %	15,4	12,2	9,5	13,0	13,8	14,8	15,8
가우스/로그							
\bar{x}_G kV	11,2	13,2	13,4	11,2	11,9	14,1	12,5
$\bar{x}_{G,l}$ kV	10,2	12,6	13,0	10,7	11,4	13,4	12,2
$\bar{x}_{G,u}$ kV	11,9	13,8	13,9	11,8	12,5	15,0	12,8
<i>s</i> kV	1,16	1,13	1,10	1,13	1,14	1,16	1,17
<i>V</i> %	6,1	4,6	3,6	5,1	5,4	5,6	6,2
Weibull							
E_0 kV	12,1	14,0	14,1	12,0	12,8	15,2	13,5
<i>b</i>	7,5	9,3	12,0	8,7	8,3	7,8	7,7
n.D = 실험실 D에서 사용하는 침 n.t = 시험 실험실에서 사용하는 침							

표B1a - 에폭시 레진을 통한 2침 트링 시험에서의 트리 시작 전압 ;
 시험 결과 및 통계학적 평가
 (스트레싱 조건 : 연속적인 1kV/분 스텝, 2절의 방법A를 참조)

시험실	A	B	C	D	
전압	검출된 트리				합계
11 kV	3	-	-	-	3
12	5				5
13	3				3
14	4				4
15	2		3		5
16	1		5	1	7
17	0	3	2	2	7
18	0	3	3	3	9
19	0	1	3	1	5
20	1	4	0	3	8
21	1	4	1	1	7
22	0	0	1	1	2
23	1	2	1	1	5
24	0	1	0	0	1
25	0	0	0	4	4
26	0	1	0	2	3
27	0	0	0	0	0
28	0	1	0	4	5
29	0	1	1	0	2
30	1	1	1	1	4
31	0	0	2	2	4
32	1	1	0	0	2
33	1	0	0	1	2
34	0	1	1	3	5
35	2	0	3		5
36	2	0	2		4
37	0	1	1		2
38	0	1			1
39	1	1			2
40		1			1
41		1			1
<i>n</i>	29	29	30	30	118
가우스/정상					
\bar{x} kV	19,8	25,2	23,5	24,7	23,3
\bar{x}_l kV	16,1	22,3	20,5	22,5	21,8
\bar{x}_u kV	23,5	26,2	26,5	26,8	24,8
<i>s</i> kV	9,75	7,83	8,16	5,68	8,15
<i>V</i> %	49,3	31,0	34,7	23,0	35,0
가우스/로그					
\bar{x}_G kV	17,8	24,2	22,2	24,0	21,9
$\bar{x}_{G,l}$ kV	15,1	21,7	19,6	22,0	20,6
$\bar{x}_{G,u}$ kV	21,1	27,0	25,2	26,2	23,4
<i>s</i> kV	1,57	1,34	1,40	1,26	1,43
<i>V</i> %	15,7	9,1	10,8	7,4	11,5
Weibull					
E_0 kV	22,8	28,1	26,5	26,9	25,7
<i>b</i>	2,3	3,7	3,2	4,9	3,4

표B2 - PE-LD를 통한 2침 트링 시험에서의 트리 시작 전압
(스트레싱 조건 : 연속적인 1kV/분 스텝, 2절의 방법A를 참조)

실험실	E			B	C	D		
	I	II	III	-	-	I	II	
전압	검출된 트리							합계
11 kV					1	1		2
12					0	1	1	2
13				3	3	2	1	9
14	1		1	4	3	4	4	17
15	1	1	0	2	5	2	5	16
16	4	4	3	6	7	7	4	35
17	1	4	1	2	4	3	4	19
18	1	1	3	1	4		1	11
19	1		0	1	2			4
20	0		1	1	1			3
21	1		1					2
<i>n</i>	10	10	10	20	30	20	20	120
가우스/정상								
\bar{x} kV	16,8	16,5	17,4	15,6	15,9	14,9	15,3	15,8
\bar{x}_I kV	15,3	15,9	15,9	14,7	15,1	14,1	14,6	15,5
\bar{x}_u kV	18,3	17,1	18,9	16,5	16,7	15,7	16,0	16,2
<i>s</i> kV	2,04	0,85	2,07	1,96	2,06	1,71	1,53	1,92
<i>V</i> %	12,2	5,2	11,9	12,6	12,9	11,5	10,0	12,2
가우스/로그								
\bar{x} kV	16,7	16,5	17,3	15,5	15,8	14,8	15,2	15,7
\bar{x}_{GJ} kV	15,3	15,9	15,9	14,6	15,0	14,0	14,5	15,4
\bar{x}_{Gw} kV	18,2	17,1	18,8	16,4	16,6	15,7	16,0	16,1
<i>s</i> kV	1,13	1,05	1,13	1,13	1,14	1,13	1,11	1,18
<i>V</i> %	4,2	1,8	4,2	4,5	4,8	4,5	3,7	4,5
Weibull								
E_0 kV	17,7	16,9	18,3	16,5	16,8	15,7	16,0	16,7
<i>b</i>	8,8	20,2	9,0	8,9	8,8	9,5	11,3	9,9