

# Supply Chain 상의 중첩스트레스를 고려한 환경시험

이동혁<sup>1</sup> · 장중순<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>LG Display 품질센터, <sup>2</sup>아주대학교

## An Environmental Test in Consideration of Cumulative Stresses of Supply Chain

Dong-Hyuk Lee<sup>1</sup> · Joongsoon Jang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>LG Display Quality Center, <sup>2</sup>Graduate School of Ajou University

**Purpose:** The purpose of this paper is to suggest an environmental test plan for reducing early failure.

**Methods:** We study the preferred test design and tests that are performed substantially in the company. We investigate the environmental profile on the actual supply chain and identify the effectiveness for this test design.

**Results:** Proposed sequential test designed to implement the supply chain on the environment profile showed more effective results compared to existing tests.

**Conclusion:** Suggested sequential test in this paper will be an effective guidance for the given environment test.

**Keywords:** Early Failure, Supply Chain, Cumulative Environmental Stress

### 1. 서론

최근 들어 스마트폰과 같은 첨단 전자기기의 활발한 보급은 신뢰성공학에서도 많은 변화를 가져 오고 있다. 과거에는 청소기나 에어컨과 같은 가전제품의 신뢰성 목표가 10년 이상의 수명을 갖도록 정해져 특히 수명 보증에 많은 노력을 기울여 왔다. 그러나 스마트폰 등은 라이프 사이클이 매우 짧아서 마모고장 즉 수명에 해당하는 고장은 발견하기 어렵게 되었으며, 따라서 신뢰성의 보증도 불량에 의한 초기고장이나 사용 환경으로 부터의 스트레스성 고장을 예방하는 방안에 초점이 주어져 있다. 특히 전 세계적인 치열한 경쟁은 일정비율의 고장도 허용치 않는 무고장

을 추구하게 하고 있다. 이러한 경향으로 과거보다 제품에서 발생하는 고장의 원인을 보다 세밀하게 분석하여 설계 및 제조, 시험 등에 반영하는 노력이 한층 더 활발해지고 있다.

초기고장이나 스트레스성 고장을 예방하기 위해서는 ESS를 포함한 다양한 환경시험을 실시하여야 한다. 환경시험에 관해서는 이미 많은 국제규격이 발표되어 있다. 그러나 이러한 규격들은 모든 제품에 적용되는 범용적인 것이므로, 자사 제품의 경우는 실제 환경 조건을 측정하여 고유한 규격을 만드는 것이 바람직하다[1]. 즉 제품의 출하 이후 겪게 되는 수송, 보관, 설치, 사용, 정비 등의 일련의 과정인 라이프 사이클 동안 제품에 인가될 수 있는 스트레스들의 종류와 수

\* 교신저자 jsjang@ajou.ac.kr

2016년 5월 15일 접수, 2016년 6월 10일 수정본 접수, 2016년 6월 17일 게재 확정.

준을 파악하여야 한다. 스트레스 종류로는 기후적 조건, 생물학적 조건, 화학적 활성 물질, 기계적 활성 물질, 오염 액체, 기계적 조건 등이 있을 수 있고 수준으로 고려할 사항은 저장, 운송, 실내거치, 실외거치 차량, 배, 휴대용 등 사용 조건에 따라 달라진다[2, 3]. 그럼에도 불구하고 대부분의 기업에서는 사용단계에서의 환경조건만을 고려한 시험을 실시하고 있어 이에 대한 보완이 요구된다고 하겠다.

한편 자사가 생산하지 않는 부품의 경우에는 더욱 세밀한 검토가 필요하다. 왜냐하면 구매되는 부품의 경우에는 협력업체에서부터 자사까지 수송과 보관이 이루어지며, 또한 자사 공정에서 다양한 스트레스를 받을 수 있기 때문이다. 몇 가지 예를 들면 저항, Cap 등 칩 부품의 경우 출하 이후 저장, 운송, 납품 이후 SMT 공정에서 Reflow, 검사, 최종 제품화 단계에서 조립, 검사 등의 과정을 거친다. 기구물인 광학 Sheet 류의 경우 원단 업체에서 납품 이후 타발 등의 공정이 이후 다른 업체에서 진행되고 몇 개의 기구물과 조립 후 다시 Set 업체로 납품되는 여러 경로로 구성된다. 과거에는 이러한 물류과정에 대한 고려 없이 국제 규격 등을 활용하여 부품에 대한 시험을 실시하거나 협력업체에게 요구하였지만, 실제의 물류과정이 부품마다 다르다는 것을 고려하면 해당 부품에 적합한 조건을 설정하여 시험을 실시하여야 할 것이다. 본 연구에서는 이와 같이 부품마다 달라지는 물류조건을 고려하여 환경시험을 설계하고자 한다.

초기 고장에 대한 주요 연구는 생산 중 공정관리를 통해 저감하고 스크리닝 시험으로 검출하는 개념으로 고장의 조기감지, ESS 조건에 대한 최적화, Burn-in에 대한 모델링 및 최적 조건 등으로 대표된다. 그러나 현재 휴대용 IT제품의 수명주기로 볼 때 초기 생산 및 판매시점부터 문제없는 제품을 적기에 출시해야 하는 필요성이 증대되어 있으므로 본 연구는 초기고장

을 유입결함 관점이 아닌 설계 단계의 마진 설계나 공정조건의 마진 확보로 사전에 해결해야 할 문제로 검토하려고 한다. 이를 위해 환경시험 방법을 재검토하여 신규 시험 모드를 도출, 그 결과를 통해 제품 및 공정조건의 강건 설계를 유도하려고 한다 또한 이번 연구과정을 통하여 제품의 하위 Module 단위의 부품 Assembly별 시험에 대해 고찰함으로써 새로운 평가 방법에 대한 연구 효과도 예상된다.

## 2. 환경시험에 대한 연구 및 실제 환경

### 2.1 환경시험에 대한 연구

“환경시험 설계 Guide Line(2004)”를 보면 일반적인 부품 또는 제품의 환경시험 절차가 나타나 있다. 이 설계 절차는 절차 1) 제품의 수명주기 중 예상 경로 파악, 절차 2) 주요 환경요인 목록 작성, 절차 3) 환경 파라미터의 엄격도 설정, 절차 4) 환경프로파일 결정, 절차 5) 환경시험항목 결정, 절차 6) 환경시험조건 결정, 절차 7) 시료 수 및 합격 판정기준 결정의 단계를 거치고 있다[4].

여기에 제시된 예상경로 및 환경 프로파일의 결정 예를 검토해 보면 제품 또는 부품을 중심으로 운송, 저장, 사용에 대한 환경요인을 도출하고 환경 파라미터를 정리하여 <Table 1>과 같이 예상 경로 중 엄격도가 가장 높은 것을 환경 프로파일로 결정하도록 제안하고 있다[4].

예: 공장에서 출하 → 트럭으로 선착장까지 운송 → 선착장에서 대기(저장) → 선적되어 배로 수출 지역까지 운송 → 선착장에서 대기(저장) → 기차로 판매지역까지 운송 → 판매지역 창고에 보관(저장) → 자동차로 소비자가 집까지 운송 → 실내에서 사용

Table 1 Example of environmental profile

Condition	Parameter	Expected route								Environmental Profile
		Truck (Transportation)	Domestic marina (Storage)	shipboard (Transportation)	Local marina (Storage)	Train (Transportation)	Warehouse (Storage)	Vehicle (Transportation)	Location (Use)	
Low temp	temp	-25℃	-5℃	-25℃	-5℃	-25℃	-5℃	5℃	15℃	-25℃
High temp	temp	70℃	45℃	70℃	45℃	70℃	45℃	30℃	30℃	70℃

2.2 Supply chain을 고려한 실제 환경

제2.1절에서 제품 또는 부품에서도 적용될 수 있는 Guide가 제시되어 있으나 실제로는 다른 경우가 많다. 저항, MLCC, IC류 등 일반적으로 사용되는 부품의 환경시험은 국제 규격 표준으로 정해져 있는 경우가 대다수이고, 또는 시험 항목 및 조건이 고객이 제시한 조건에 의해 결정되어 진다. 그러나 많은 경우 부품들은 <Fig. 1>과 같이 Supply chain을 거치면서 몇 개 또는 수십, 수백 개 단위의 부품이 Module의 형태로 조립되어 최종 제품 생산처에 납품되고 소비자에게 전달된다.

그림 중 LED PKG의 경우, 출하 이후 SMT 공정에서 PCB위에 실장되어 LED Array가 되고 광학 기구물과 조립되어 LED Assembly가 된 후 Back light 업체로 넘어가 그 외 기구물에 부착, LCD Module 생산업체

로 출하된다. 이러한 과정에서 운송, 저장의 환경 스트레스는 반복되고 각 공정의 조건에 따른 스트레스가 추가된다. 이는 온도, 진동, 기계적 조건 등이 누적 스트레스 요인으로 작용할 수 있음을 의미한다

특히, Module화된 부품의 경우, 시험항목과 조건이 고객의 요구에 의해 결정되는 경우가 있는데, 다음의 <Table 2>는 Display Module의 운송환경을 평가하기 위한 Packing Vibration Test 조건으로 고객별로 제시된 조건이다. 실제 제품의 운송 시 진동Data를 확보하여 고객 제시 조건과 비교 검토하였다.

실제 제품의 운송 시 진동Data를 확보하기 위해 Display Module 업체와 Set Maker가 있는 중국 지역의 육상운송 경우 중Y시에서 S시로 운송을 선정, Saver라는 진동 측정 기록기를 장착하여 결과를<Fig. 2>와 같이 확인해 보았다. 운송은 Y시에서 Display Module

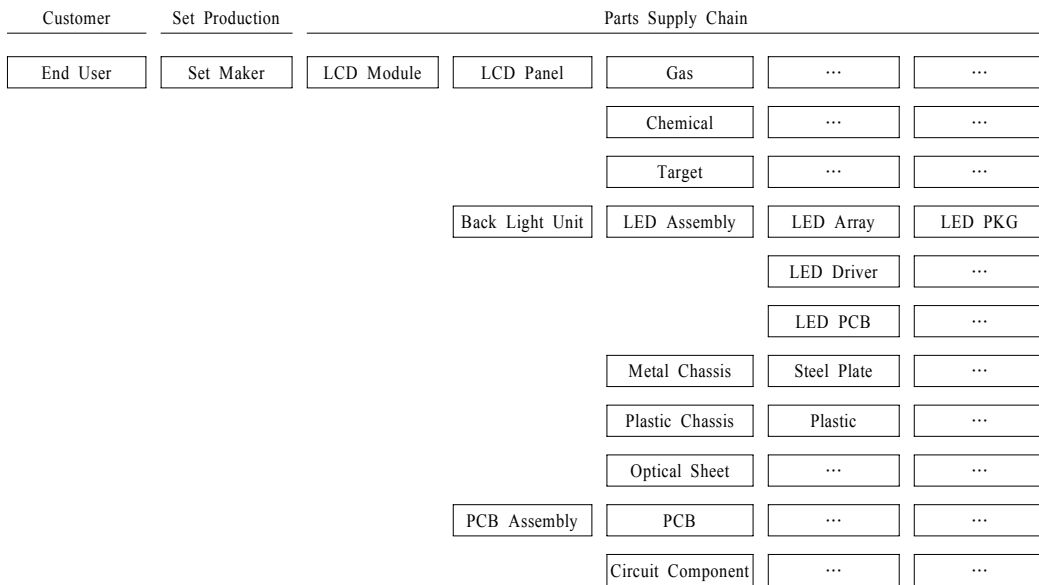


Fig. 1 Example of supply chain(LCD display module)

Table 2 Packing vibration testing condition proposed by customer for display module

Test Item	Company-A	Company-B	Company-C	Company-D
Packing Vibration	1.15Grms Z-Axis 30min 5~200hz	1.15Grms 30min /X, Y, Z-Axis 5~200hz	Random 0.8Grms 30min 5~200hz	0.73Grms
				1.43Grms 3.0Grms 30min /X, Y, Z-Axis

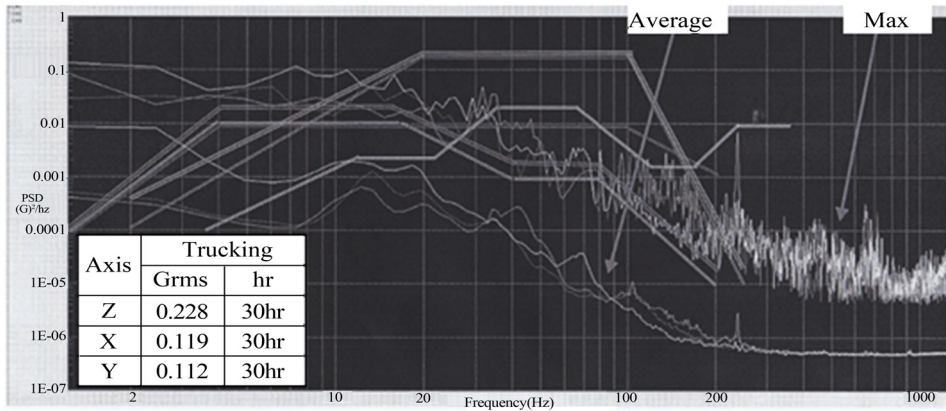


Fig. 2 Vibration data from city Y to city S

Table 3 Packing vibration test condition, measured and customer condition

Axis	Vibration Data from City Y to City S		Translated Test Condition		Test Condition by Customer Company-B	
	Grms (Average)	Time	Grms (Average)	Time	Grms (Average)	Time
X	0.119	30hr	1.15	19min	1.15	30min
Y	0.112	30hr	1.15	17min	1.15	30min
Z	0.228	30hr	1.15	70min	1.15	30min

출하하여 Set Maker가 있는 S시까지 편도 2,500Km, 30시간의 Truck 운송이다.

측정된 결과를 진동 시험 조건으로 바꾸기 위해 McConnell[5]에서 나타난 식 (1)을 사용하였다. 비교를 위해서 진동 에너지(Grms)는 고객 시험 조건과 같이 고정하였다[5].

$$T_T = T_0 \times \left(\frac{I_0}{I_T}\right)^2 \quad (1)$$

$T_T$ : 시험시간,  $T_0$ : 운송시간,  $I_T$ : 시험 진동 조건,  $I_0$ : 실측 진동 Data

<Table 3>과 같이 비교 결과 고객제시 조건은 X, Y 축 방향으로는 실제보다 가혹한 조건이지만 Z축 방향은 실제의 절반에 못 미치는 조건이었다 이는 고객들이 제시한 조건별로 달라질 수 있지만 실제 운송 거리와 시간, 진동 환경에 따라 차이가 발생한다는 점을 확인할 수 있다.

### 3. 중첩 환경 스트레스에 대한 시험 설계

#### 3.1 환경 파라미터 조사 및 시험 설계

환경시험 설계 절차 중 환경 프로파일 결정 단계에서 본 연구는 중첩된 스트레스를 가할 수 있는 시험 설계를 통해 초기 고장을 검출하는 것을 목적으로 한다.

연구 절차는 첫 번째 Supply Chain 환경 파라미터 조사, 두 번째 환경 파라미터의 반복 스트레스를 반영한 시험 설계 및 진행, 세 번째 시험 결과 Data 분석 순으로 진행하고 이를 위해 Display Module의 Supply chain을 살펴보면 출하 이후 운송 → 보관 → 제품 공정 → 운송 → 보관 → 소비자 사용의 경로를 거치게 된다. 여기서 제품공정 이후 소비자 사용까지의 사용 조건은 최종 제품의 환경시험 조건으로 대체하고 이에 앞선 운송, 보관 환경의 파라미터를 먼저 조사해 보았다.

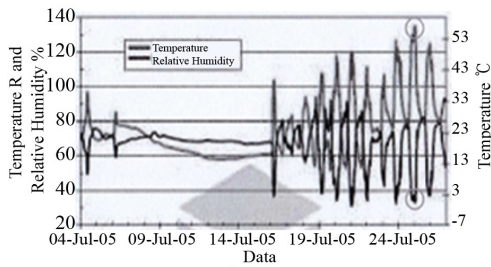
조사 및 시험 대상은 단순한 Supply chain의 예로 4.7" LCD Display Module, 이하 Module을 설정하였다. 이 제품은 Y시에서 생산하여 S시의 Set maker로 납품되는 제품이다. 먼저, Module 운송의 진동 조건은

<Table 3>에 실제 측정된 프로파일을 사용하였으며, 운송시의 온/습도 조건은 아래 <Fig. 3>에 검토된 바와 같이 ISTA(International Safe Transit Association)와 실 운송 평가 Data를 참조하였고 검토된 환경 파라미터를

고려하여 IEC 60721-3-1~7의 표준화된 시험 조건과 비교, 시험 조건을 <Table 4>와 같이 결정하였다[6].

위와 같이 시험조건 설정 후 Supply chain의 중첩된 스트레스를 Modeling한 시험 설계는 동일 시료를 진

(a) Transportation(Summer)



(b) Transportation(Winter)

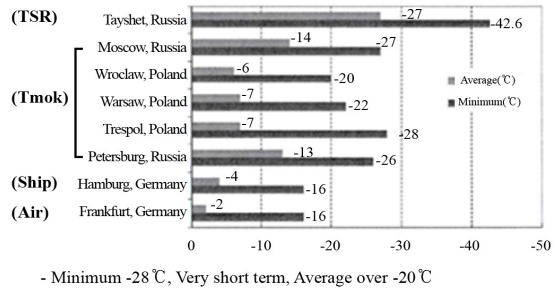


Fig. 3 Temperature, humidity condition under trucking

Table 4 Decided test condition for the case study

Test	Environmental profile	Standard condition (IEC60721)	Decided Test Condition
Low Temp	-28°C, only short term average over -20°C	-25°C(2K2)	-20°C 30hr
High Temp	max 57°C	60°C(2K2)	60°C 30hr
Package Vibration	Trucking 30hr X 0.119Grms Y 0.112Grms Z 0.228Grms	9~200Hz 10m/s <sup>2</sup> (1.0Grms) (2M2)	X 1.15Grms 19min Y 1.15Grms 17min Z 1.15Grms 70min

\* Storage Condition is commonly applied: 30°C 50%

Table 5 Test design in consideration of cumulative stresses of supply chain

Procedure (up to down)	Test Condition		
	Case 1(C1) Summer	Case 2(C2) Winter	Case 3(C3) Comparison group
Package vibration	X 1.15Grms 19min Y 1.15Grms 17min Z 1.15Grms 70min		-
High temp.	60°C 30hr	-	-
Low temp	-	-20°C 30hr	-
storage	30°C 50% 24hr		-
Existing Environmental Test (Customer Condition)	Thermal shock : -20°C/65°C, 30min/step, 100cyc Temp. Humidity Cycling : 65°C 90%/20°C, 2hr/step, 12cyc High Temp, High Humidity Operation: 65°C 90% Op. 500hr High Temp, High Humidity Storage: 65°C 90% Non-Op. 500hr		

동시시험 → 고온시험 또는 저온시험 → 보관 조건 방치  
 → 최종 제품의 환경시험 순으로 진행되는 것으로  
 <Table 5>와 같다.

## 4. 중첩 환경 스트레스에 대한 시험 결과

### 4.1 불량 발생 유형별 검증

1차 시험은 진동시험 후 최종 제품의 환경시험까지 진행 후 발생된 불량유형별 불량률을 비교하여 초기 고장 검출에 대한 효과성을 파악하였다. 이를 위해 시료당 발생된 불량은 중복 Count 하였다. 그 결과 아래 <Fig. 4>와 같이 최종제품 환경시험 조건에 포함된 흡습과 온도 변화에 의한 기구치수, 흡습 관련 불량이 다수를 점유하고 있지만 중첩 환경 스트레스를 반영한 C1, C2의 경우 Panel 불량률이 C3 대비 4~5배의 차이가 발생함을 확인 할 수 있다.

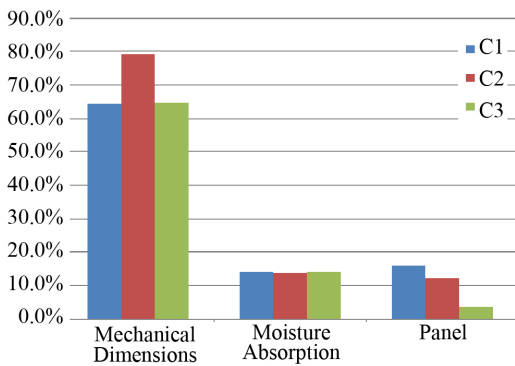


Fig. 4 Failure mode by test condition in test 1

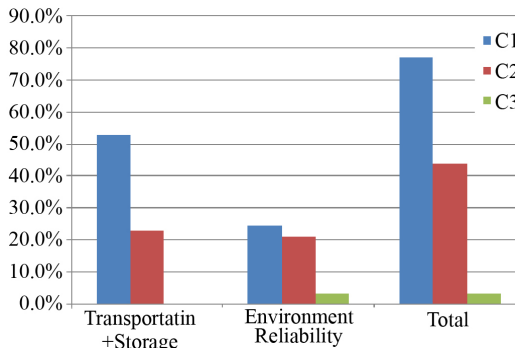
### 4.2 Fault Injection Test

Panel 불량유형의 검출력에서 차이가 발생됨이 확인되어 중첩 환경 스트레스 시험의 검출력을 명확히 검증하기 위하여 Panel의 대표적 불량 mode인 이물성 휘점 불량을 유발하여 동일한 시험을 재 실시하였다.

불량의 유발을 위해 Panel 공정 중 액정 배향 공정인 Photo Resister의 소성 온도를 공정조건 범위 밖으로 하향하여 배향막 표면의 이물 발생이 용이하게 시료를 제작하였다. 또한 이 결과를 Module의 운송, 보관 환경을 검증하는 진동/고온/저온시험, 보관 조건 방치(운송+보관) 후와 최종제품 환경시험 후 검사를 통해 시험의 효과성을 <Fig. 5>로 파악하였다.

유발된 휘점 불량은 고객 요구 조건 이전 Supply chain에서의 운송, 보관 조건의 시험에서도 검출되지만 다음 단계인 고객 요구 조건의 환경 신뢰성 시험에서도 중첩 스트레스가 인가되지 않은 시험 대비 7~8배의 높은 확률로 검출되고 있음이 확인된다. 이는 환

	C1	C2	C3
Mechanical Dimensions	64.3%	79.3%	64.9%
Moisture Absorption	14.3%	13.8%	14.0%
Panel	16.1%	12.1%	3.5%
Total	94.6%	105.2%	82.5%
Sample Quantity	56	58	57



	C1	C2	C3
Transportation + Storage	64.3%	79.3%	64.9%
Environment Reliability	14.3%	13.8%	14.0%
Total	16.1%	12.1%	3.5%
Sample Quantity	57	57	63

Fig. 5 Failure mode by test condition in fault injection test

경프로파일 상의 엄격한 조건의 시험 외에 환경 스트레스의 누적이 초기 고장의 검출력을 높일 수 있는 것으로 추정할 수 있다.

## 5. 결 론

현재 환경시험에 대해서는 제품의 수명주기 내 모든 예상경로 및 주요 환경요인을 파악해야 하나 많은 기업들이 사용조건만 고려하여 고객 요구 조건에 준해 시험을 진행하고 있으며, 특히 부품의 경우 공급경로상의 다양한 스트레스가 고려되지 않고, 반복적인 스트레스의 누적에 의한 고장 발생 가능성에 대해서도 간과되어 왔다.

본 연구에서는 Supply chain상 포함된 중첩 환경 스트레스를 고려한 환경시험을 통해 잠재 불량률의 검출 가능성을 검토하였다. 실제 진동 조건 외, 공정 중에 고온, 압력 또는 UV 등 다양한 스트레스가 인가될 가능성이 있고 소비자가 직접 사용하는 최종 제품이 아닌 부품 입장에서는 이러한 환경을 포함한 시험 설계로 초기 고장을 사전에 감지하여 해결함으로써 신뢰성을 높일 필요가 있다.

추후 Supply chain 환경 프로파일의 면밀한 검토를 통해 저온 시험, 더 높은 온도의 고온시험, 진동 시험, 광인가 시험 등 환경시험의 조합을 통해 결과를 관찰하여 추가적인 분석이 필요하며, 다양한 부품에 대해서도 추가적인 연구가 필요하다.

## References

- [1] Handbook, Military. (1998). "MIL-HDBK-338B." US Department of Defense 1.
- [2] Cheryl Tulkoff. (2011). "Test Plan Development" Electronic Equipment Reliability & Testing Seminar, May 24.
- [3] Park, J. W. *et al.* (2005) "Design of Environmental Tests". Journal of Applied Reliability, Vol. 5, No 3, pp. 01-314.
- [4] Park, J. W. *et al.* (2004) "The Guide Line of Environmental Tests Design" SUWON University.
- [5] McConnell, K. G. (1995). "Vibration testing: theory and practice". John Wiley & Sons.
- [6] IEC Pub. 60721, Part 3. Classification of groups of environmental parameters and their severities.