

## 예방교체부품을 가지는 전자파차폐용 문세트의 신뢰성입증시험법<sup>§</sup>

신정훈\* · 이효경\*\* · 장진\*\*\* · 김도식\*\*\*\*† · 남태연\*\*\* · 정동수\*\*\*

\* 대구경북첨단의료산업진흥재단, \*\* 대한실드엔지니어링, \*\*\* 한국기계연구원

### Reliability Demonstration Test Method for Electromagnetic Shielding Doorset with a Sub-Unit Subjected to Preventive Replacement

Jung-Hun Shin\*, Hyo-Kyung Lee\*\*, Jin Jang\*\*\*, Do-Sik Kim\*\*\*\*†, Tae-Yeon Nam\*\*\* and Dong-Soo Jung\*\*\*

\* Daegu-Gyeongbuk Medical Innovation Foundation

\*\* Dae Han Shield Engineering Co., Ltd.

\*\*\* Korea Institute of Machinery & Materials

(Received March 3, 2014 ; Revised August 5, 2014 ; Accepted August 24, 2014)

**Key Words:** Electromagnetic Shielding(전자파 차폐), Doorset(문세트), Reliability Demonstration Test(신뢰성입증시험), Maintenance(보전), Replacement Interval(교체주기)

**초록:** 전자파차폐용 문세트는 기계적 강도 및 내구성과 전자파 차폐라는 전기적 성능 요구를 동시에 충족시켜야 하므로 이에 알맞은 신뢰성입증시험법의 정립이 요구된다. 특히 전자파 차폐 성능에 직접적인 영향을 미치는 핑거스트립이라고 불리는 베릴륨동 재질의 박형 스프링 하위 부품은 문짝과 직접적인 반복 건조마찰이 발생하므로 내구성에 만전을 기해야 하는 부위인데, 산업계에서는 주기적인 보전이 필요한 이 핑거스트립의 교체주기에 대한 보증도 또한 필요한 실정이다. 이러한 요구들에 대응하여 본 연구에서는 전자파차폐용 문세트의 시험항목들을 정하고 전체 시스템 수명뿐만 아니라 교체품의 교체주기에 대한 보증을 단순한 방법으로 동시수행하는 입증시험을 설계하였다. 결론적으로 하위 교체부품을 가지는 직렬 시스템의 신뢰성입증시험에서는 교체품의 교체주기에 대한 보증도 항상 함께 포함시킬 것을 제안한다.

**Abstract:** An electromagnetic shielding doorset must satisfy requirements associated with both mechanical strength/durability and electromagnetic shielding. Among the primary components of the doorset, a finger strip—a leaf-type spring normally made of beryllium copper—is a core part to shield electromagnetic waves as well as to endure repetitive dry sliding friction. This study presented a reliability demonstration test method for the doorset system and, by a simple and simultaneous implementation, of the replacement interval of the finger strip. A rigorous evaluation for the qualification of maintenance or replacement interval is included in the reliability demonstration test of any series system that holds critical maintenance sub-units.

- 기호설명

$B_{100p}$  : 백분위 보증수명  
 $CL$  : 신뢰수준(confidence level)  
 $n$  : 인증시험 시료 수  
 $p$  : 불신뢰도  
 $R(t)$  : 시간  $t$  까지의 생존확률(=신뢰도)

$t$  : 시험 시간  
 $\beta$  : 형상모수  
 $\eta$  : 척도모수

하첨자

$z$  : 시스템의 무고장(zero-failure)  
 $zm$  : 하위 교체품의 무고장

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회(2014. 2. 26.-28., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, dohsik@kimm.re.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 1. 서론

전자파차폐용 문세트는 자기 공명 영상(magnetic

resonance imaging, MRI) 시스템이나 전자파 펄스 (electromagnetic pulse) 방호용 구조물 등에 사용되는 전자파 차폐시설의 유일한 출입구로서, 반복 작동되는 부품들의 기계적 내구성과 전자파 차폐라는 전기적 성능 요구를 동시에 충족시켜야 하는 융합 기기이다. 본 논문에서 다루는 이 전자파차폐용 문세트에 대한 제품평가방법은 아직 제한적이고 고장 해석이나 예측 또한 난해한 실정이다.

제품의 완전한 고장 시점까지 시험하는 것은 있는 그대로의 제품의 성능을 평가할 수 있지만 과도한 시간과 비용이 요구된다. 그래서 개발현장에서는 많은 경우 와이블 분포(Weibull distribution)를 가정한 적은 고장 혹은 무고장(few- or zero-failure acceptance) 시험<sup>(1-3)</sup>이 수행된다. 권영일<sup>(4)</sup>은 무고장 시험의 경제성을 보다 속고한 시험방법을 제안하였고, yadav 등<sup>(5)</sup>은 시스템을 물리특성·기능·시간 차원에서 분류하여 고장과 관련된 핵심적인 요소를 규명한 입증시험법(demonstration test planning)을 제안하였다. 전자파차폐용 구조물에 대해서는 미국공병단(united state army corps of engineers)에서 제정한 인증규격<sup>(6)</sup>이 존재하는데 전체 규격 중 하나의 장(chapter)에서 문세트에 관해 기술하고 있다. 하지만 설계단계에서의 신뢰성을 보증하기 위해서는 현재보다 더 철저한 시험이 요구된다.

기존의 단순한 전자파차폐 문세트의 시험법의 한계를 극복하고자 본 연구에서는 보다 철저한 시험절차를 개발하였다. 특히 주기적으로 교체가 필요한 핵심 구성품인 베릴륨동(Beryllium-Copper) 재질의 핑거스트립(finger strip)을 가진 전자파 문세트 시스템의 신뢰성을 인증(qualification)하기 위한 수명 입증시험법을 개발하였다. 본문에서는 신뢰성 보증에 필요한 시스템 분석과 전체 시험항목도출을 수행하고 신뢰성에 핵심이 되는 수명시험설

계에 관해 상술한다. 일반 건축용 문세트에 대해서는 이미 ISO 나 KS<sup>(7-12)</sup>에서 그 시험법이 규격화되어 있고, 전자파차폐용 문세트에 대해서는 미주 지역의 MIL-STD-188-125<sup>(13)</sup> 혹은 유럽의 IEEE 299 규격<sup>(14)</sup>에서 상세히 규정하고 있으므로 본 논문의 각종 신뢰성시험항목 역시 기존 규격들에 기술된 방법들을 상당부분 그대로 채용하였다. 최종적으로 설계단계에서의 문세트의 전방위적 신뢰성입증 절차를 MRI 용 문 세트를 예시로 설명한다.

## 2. 신뢰성입증시험 계획

### 2.1 대상시료 설명

본 논문에서 대상으로 삼은 전자파차폐용 문세트의 구조는 Fig. 1 과 같다. 일반적인 건축용 문세트와 같이 문틀(door frame)과 문짝(door leaf), 손잡이의 기본구성을 가지고 있고, 전자파의 직접적인 차폐기능을 수행하는 핑거스트립과 문짝을 문틀에 밀착시키는 잠금장치가 추가된다. 핑거스트립은 Fig. 2 와 같이 장착이 되면서 일정한 주기로 교체보전이 필요하고, 잠금장치는 문짝이 문틀에 특정 간격으로 접근을 하게 되면 자동으로 작동하는데 일반적으로 공기압 장치를 사용한다.

### 2.2 시스템 분석 및 분포가정

전술한 바와 같이 전자파차폐용 문세트에는 다양한 부품들이 조합되어 있기 때문에 각각의 부품과 그것들의 상호작용, 고장특성 등의 분석이 필요하다. 우선 Table 1 과 같이 문 세트의 고장모드와 고장메커니즘, 고장원인들을 분석하였다. 주로 과하중 때문에 발생한 각 부품들의 변형에 의한 차폐성능고장과 계폐성능고장이 가장 빈번하였는데, 발생빈도(occurrence)와 심각도(severity)를 따져보면 핑거스트립의 변형과 힌지 부 마모가 공히 주요고장메커니즘으로 평가되었다. 또한 Fig. 3 의 고장나무(fault tree)에서

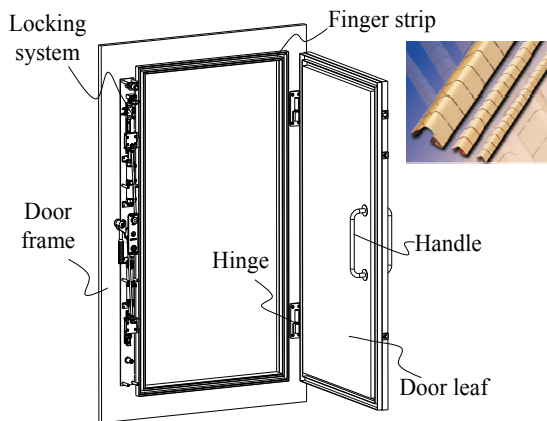


Fig. 1 Electromagnetic shielding doorset

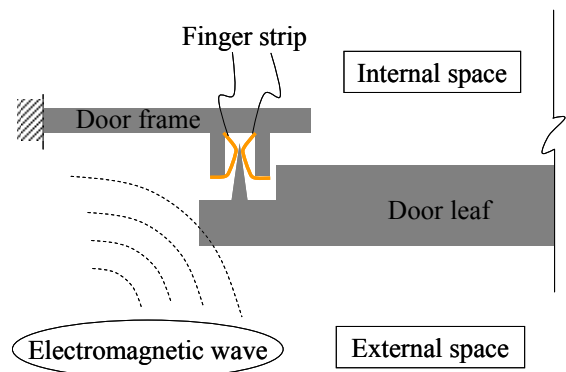


Fig. 2 Shielding mechanism in finger strips

처럼 전체 시스템의 고장은 전자파차폐성능 고장과 문의 개폐성능 고장으로 분류될 수 있고, 최하위 수준의 고장은 앞서 언급한 각 부품들의 변형과 그들 사이의 과도한 마찰에 의한 고장으로 분석되었다. 특히 전체 구조물의 기틀이 되는 문틀, 문짝, 힌지의 변형은 다양한 고장의 동일한 원인이 되는 것으로 분석된다. 부품에 따른 고장의 중요도 순위를 매기기 위해 Table 2의 품질기능전개<sup>(15)</sup>(Quality function deployment) 1 단계를 수행한 결과 직접적인 건조마찰 부위가 되는 핑거스트립의 변형의 중요도가 가장 컸고, 힌지가 근소하게 그 뒤를 따랐다.

**Table 1** Failure mode & Mechanism analysis

Components	Failure mode	Failure mechanism	Failure cause
Door frame	Misalignment	Deformation	Overload
Door leaf	Misalignment	Deformation	Overload
Finger Strip	Misalignment	Deformation	Over friction
	Contamination	Friction	Cyclic load
Hinge	Misalignment	Deformation and wear	Overload
	Contamination	Friction	Cyclic load
Handle	Malfunction	Deformation	Overload
Locker	Malfunction	Roller wear	Cyclic load

전자파차폐용 문세트의 고장은 기계적인 부하와 마찰에 의해 발생한다. 본 논문에서는 많은 기계 부품들에 적용되는 고장분포인 와이블 분포를 가정하여 시험법을 정립하였다.

2.3 신뢰성 시험항목 선정

2.2 절의 부품별 고장해석을 통해 기본적인 전자파차폐시험뿐만 아니라 문세트의 다양한 고장원인들과 관련된 기계적 내구성 및 제품의 수송·보관과 관련된 환경시험법들을 조사하였다. 그리하여 중요하다고 간주되는 고장모드들과 연관된 신뢰성

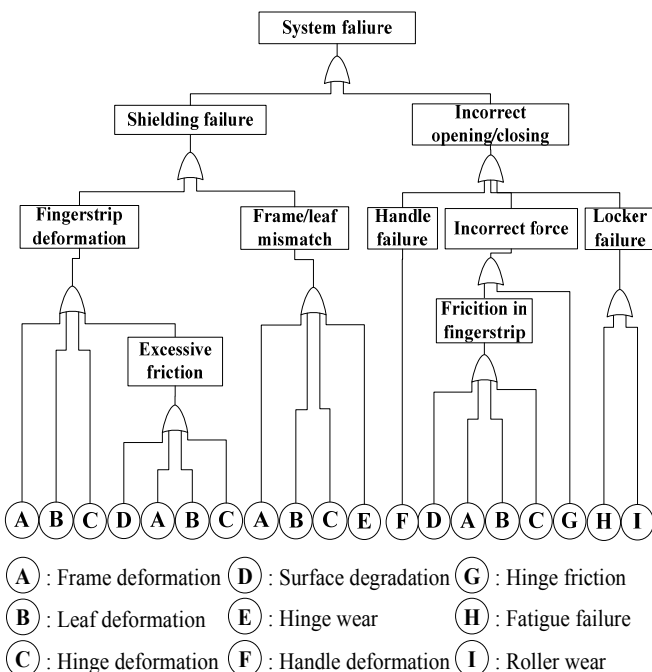
**Table 2** Quality function deployment (stage I)

Components	Door frame	Door leaf	Finger Strip		Hinge		Handle	Locker roller
Failure Req.	D.	D.	D.	F.	D.	F.	D.	W.
Structural stiffness	◎	◎			◎		▲	
Shielding	◎	◎	◎	▲	●			◎
Proper open/close	●	●	◎	◎	●	●	◎	▲
Low noise			●	●	●	●		
Contamination				◎		◎		
Lifetime	▲	▲	◎	●	●	◎	▲	▲
Criticality Score	14	14	18	17	17	16	7	7

Note- ◎high(5), ●medium(3), ▲low(1)  
Abbreviation- D.: deformation, F.: friction, W.: wear

**Table 3** Selected test items

Classification	No.	Test name	Ref. standard
Performance	1	Gap deviation	UFGS-13 27
	2	Electromagnetic shielding	IEEE-299, MIL - STD-188-125
	3	Open-close force	KS F 2237, KS F 3109
	4	Static loading	UFGS-13 27
	5	Vertical loading	KS F 2631, KS F 3109, UFGS-13 27
	6	Torsion	KS F 2630, KS F 3109
	7	Handle	UFGS-13 27
Environmental	8	Impact	KS F 2236, KS F 3109
	9	Vibration (transportation)	MIL-STD-810G
	10	Low temperature (storage)	MIL-STD-810G
	11	High temperature (storage)	MIL-STD-810G
	12	Humidity (storage)	MIL-STD-810G
Life	13	Life	UFGS-13 27



**Fig. 3** Fault tree analysis

- Ⓐ : Frame deformation      Ⓓ : Surface degradation      Ⓔ : Hinge friction
- Ⓑ : Leaf deformation      Ⓔ : Hinge wear      Ⓕ : Fatigue failure
- Ⓒ : Hinge deformation      Ⓕ : Handle deformation      Ⓖ : Roller wear

인증시험 항목들을 Table 3 에서와 같이 성능시험, 환경시험, 수명시험의 대분류 내에 총 13 종으로 선정하였다.

또한 Table 4 의 품질기능진개 2 단계는 각 시험의 중요도를 보여준다. 차폐성능시험의 중요성이 가장 크기 때문에 대표적인 성능시험으로 채택하였다. 하지만 차폐시험은 비용과 시간이 많이 들기 때문에, 만약 현실적으로 차폐시험을 대표성능 시험으로 채택할 수 없다면 차선택으로 틸새변동 시험을 대표성능시험으로 채택한다.

Table 4 Quality function deployment (stage II)

Component	Test item no.	Test item no.												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Door frame	14	◎	◎	●	◎	▲	▲		▲		▲	▲	▲	▲
Door leaf	14	◎	◎	●	●	◎	◎		◎		▲	▲	▲	▲
Finger Strip	18	●	◎	●					●	●	▲	▲	▲	●
	17	▲		◎					▲	●	●	●	●	◎
Hinge	17	●	◎	▲	●	◎	◎			▲	▲	▲	▲	▲
	16	▲		▲		◎	◎			▲	●	●	●	◎
Handle	7					▲	▲	◎			▲	▲	▲	
Locker roller	7	●	●						▲	●	●	●	●	◎
Effectiveness		299	308	256	163	256	256	35	162	159	190	190	190	300
Score & Rank		3	1	4	10	4	4	13	11	12	7	7	7	2

Note- ◎high(5), ●medium(3), ▲low(1)

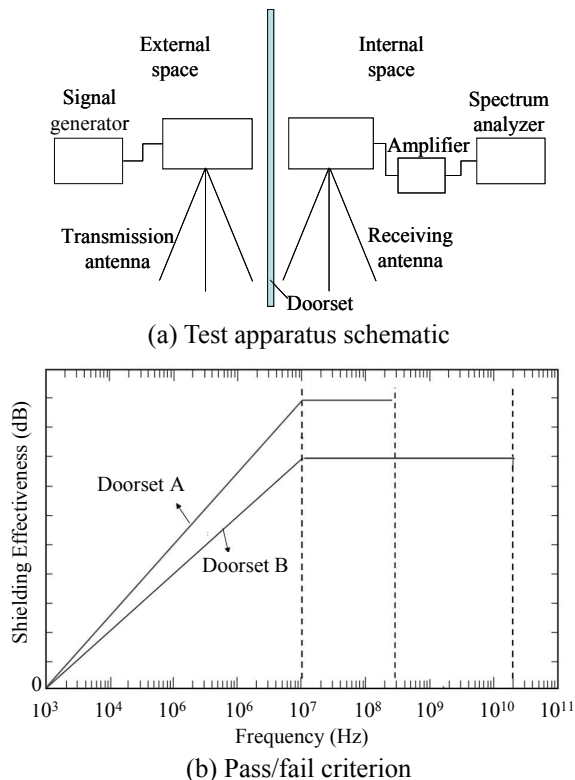


Fig. 4 Electromagnetic shielding test

전자파차폐시험법은 Fig. 4 나타내었고, 기계적인 시험법의 개념도를 Fig. 5 에 나타내었다. 기계적 하중시험들 중 개폐력시험을 제외한 모든 시험들의 고장기준은 KS3109 의 가장 높은 수준으로 정하였고, 차폐시험의 고장판단기준은 Fig. 6(b)의 형태를 따르되 시험 주과수 후반부의 일정한 부분의 차폐효과(shielding effectiveness)수준은 제조사나 수요자가 제시하는 것으로 정하였다. 미국방규격(MIL-STD-188-125)에서는 100 dB 정도의 한계차폐효과를 권고하고 있다. 전자파 차폐 문 세트는 다른 문 세트와 다르게 핑거스트립이라는 부품으로 인해 개폐력이 큰 특성이 있는데, 한계 개폐력 수준도 제조사가 제시하되 사람이 열 수 있는 한계 값인 200 N 을 넘지 않는 것을 권고한다. 본 논문의 인증시험에서 가장 많이 참조한 규격은 미공병대규격(UFGS-13 27)이지만, 비틀림(torsion)시험과

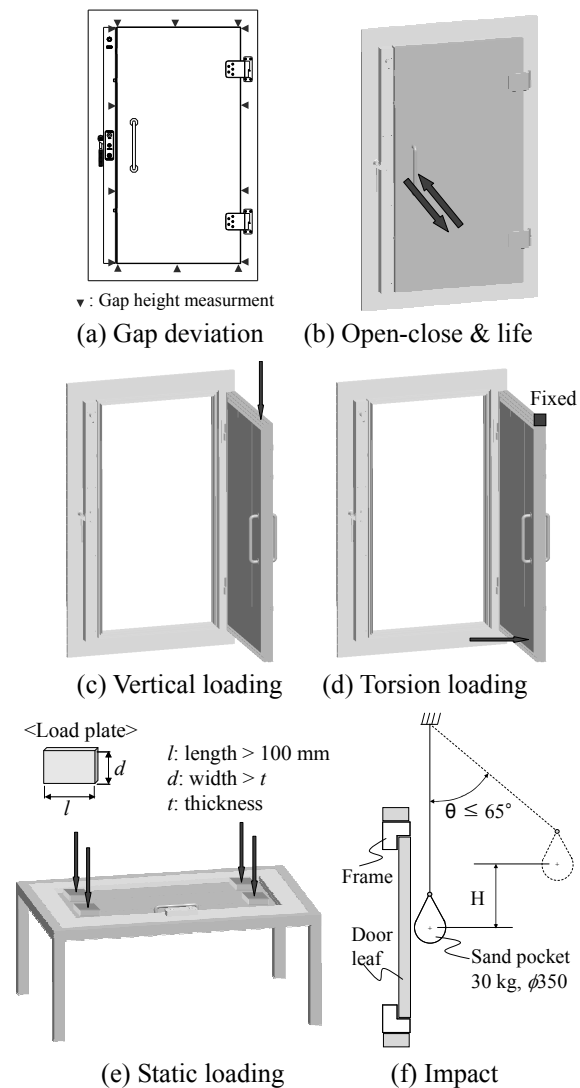


Fig. 5 Mechanical test items of doorset

내충격시험 및 일반 내환경성시험이 부재하므로 KS, MIL 규격 등을 대거 참고하여 보장하였다. 가진시험은 수송상황을 가정하였고, 온·습도 시험은 보관상황을 가정하였다. 그리고 신뢰성입증시험에 핵심이 되는 보증수명시험의 경우에는 기존의 단순한 문세트의 수명시험법을 보장하여 재설계하였다. 수명시험의 세부내용은 이어지는 3장에서 설명한다.

### 3. 수명시험 설계

#### 3.1 시스템의 무고장시험

수명보증에 필요한 무고장시험시간은 다음과 같이 정해진다. 와이블 분포의 고장밀도함수와 이로부터 유도된 신뢰도는 각각 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, t > 0 \quad (1)$$

$$R(t) = \int_t^\infty f(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

이 때  $R(B_{100p}) = 1 - p$  이므로 척도모수는 식 (3)과 같이 유도된다.

$$\eta = \frac{B_{100p}}{[-\ln(1-p)]^{1/\beta}} \quad (3)$$

한편  $n$  개의 시료를 동시에 수명시험 하였을 때 시간  $t$  까지 시료가 모두 고장 나지 않았다면(즉,  $t=t_z$ ) 신뢰도와 신뢰수준의 관계는 식 (4)와 같다.

$$CL = 1 - R(t)^n \text{ or } R(t) = (1 - CL)^{1/n} \quad (4)$$

그러므로 식 (2)~(4)을 재배열하여 문세트 시스템의 무고장시험시간에 관해 정리하면 식 (5)와 같이 된다.

$$t_z = B_{100p} \cdot \left[ \frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{1/\beta} \quad (5)$$

#### 3.2 교체품의 무고장 시험

주기적인 교체보전이 요구되는 핑거스트립의 교체주기를 보증하기 위한 무고장시험은 다음과 같이 설계할 수 있다.

##### a) 방법 1: 일반적인 무고장시험

교체품의 형상모수를 이미 알고 있거나 믿을 수 있는 수준에서 가정을 한다면 교체품의 교체주기( $t_{zm}$ )는 3.1 절의 무고장시험시간과 동일한 방식으로

유도된다.

$$t_{zm} = B_{100p,zm} \cdot \left[ \frac{\ln(1-CL_{zm})}{n_{zm} \cdot \ln(1-p_{zm})} \right]^{1/\beta_{zm}} \quad (6)$$

이 방식은 전체 문세트의 수명시험과 교체품의 수명시험이 동일한 시험 안에서 동시에 수행되지만 상호간섭은 없다는 전제가 필요하다.

##### b) 방법 2: Success run 시험

두 번째 방법으로서 교체품의 형상모수와 무관하게, 즉 그 분포와 상관없이 교체품의 교체주기 보증하기 위해서 Success run 시험을 수행할 수 있다. 교체주기를 실제 현장에서의 교체주기와 동일하게 설정하여 수명시험을 하는 경우(즉,  $t_{zm} = B_{100p,zm}$ ), 교체주기를 보증하기 위한 시료수는 식 (7)과 같다.

$$n_{zm} = \frac{\ln(1-CL_{zm})}{\ln(1-p_{zm})} \quad (7)$$

이 방식은 현장작동조건을 그대로 반영하였기 때문에 보다 믿을 수 있는 시험방법일 것이라 사료된다. 하지만 방법 1 과 같이 가용 시료수를 시험자가 임의로 정할 수 없는 제약사항이 존재하게 된다. 만약 시스템의 수명시험시간 내에 교체품 보증시험을 다 끝내지 못한다면 시스템의 수명시험시간을 임의로 연장하거나 교체품의 수명에 관한 신뢰수준을 상황에 맞게 조절하는 방법이 가능하다.

#### 3.3 수명시험 절차 예시: MRI 용 문세트

기 설명된 이론적 배경을 바탕으로 자기공명영상(MRI)용 문세트를 대상으로 정립된 구체적인 수명시험 절차는 다음과 같이 예시한다:

- 1) MRI 용 문세트 시료의 시험가능 개수와 형상모수, 신뢰수준, 보증수명, 가용한 시험사이클이 주어진다. ( $n = 2, \beta = 2.5, CL = 80\%, B_{10} = 99,000 \text{ cycles}$ )
- 2) 1)의 정보로부터 무고장 시험시간을 계산해 보고, 거꾸로 가용시험사이클로부터 요구 시료수를 계산해 본 후 시료수와 시험시간 모두 현실에 부합하는 쪽으로 선택한다. ( $n = 2, t_z = 224,000 \text{ cycles}$ )

$$\begin{aligned} t_z &= B_{100p} \cdot \left[ \frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{1/\beta} \\ &= 99,000 \cdot \left[ \frac{\ln(1-0.8)}{2 \cdot \ln(1-0.1)} \right]^{1/2.5} \approx 224,000 \text{ cycles} \end{aligned}$$

- 3) 문세트의 수명시험 동안 수요자 혹은 제조자가 제시한 주기마다 핑거스트립을 전체 교체 시료수를 정한다. ( $CL_{zm} = 80\%$ , 교체주기  $B_{10,zm} = 99,000$  cycles)

$$n_{zm} = \frac{\ln(1 - CL_{zm})}{\ln(1 - p_{zm})} = \frac{\ln(1 - 0.8)}{\ln(1 - 0.1)} \approx 16 ea$$

- 4) 수명시험의 고장기준을 다음과 같이 정한다.  
: 문세트는 성능시험의 평가기준들을 모두 만족하여야 한다. 또한 무고장시험시간까지 시험하여 문세트의 고장이 없어야 한다. 교체품에 대해서는 전체 사용된 교체 구성품 중 16 개가 연속으로 변형 및 파손이 발생하지 않은 구간이 있어야 한다(Fig. 6(a) 참조).
- 5) 시료를 실제 사용 조건 또는 이와 동등한 조건으로 수명시험 장비에 장착한다.
- 6) 문짝을 90° 각도로 개방 후 다시 폐쇄하는 작업 2 주기를 1 분 동안 수행하며 무고장 시험 사이클( $t_z$ ) 동안 계산된 교체주기( $B_{10,zm}$ ) 교체해가며 문세트를 수명시험 한다.
- 7) 문세트의 수명시험 시간 내에 교체한 교체 구성품의 개수가 16 개가 안 된다면 16 개가 될 때까지 문세트의 수명시험시간을 연장 하고, 교체 구성품 평가 기준을 만족해야 한다. 만약 시험시간 연장이 불가능하다면 교체품의 신뢰수준을 기 시험된 교체품의 개수에 맞게 적절히 낮춘다.

수명시험 중 성능열화를 확인하기 위해서 Fig.

6(b)와 같이 수명시험 전과 총 수명시험 시간의 50 % 지점, 그리고 시험 완료 후에는 성능시험들을 실시하여 각 성능시험의 평가기준들을 모두 만족하여야 한다.

#### 4. 결론

이상 본 논문에서는 다음의 과업을 수행하여 전자파차폐용 문세트의 신뢰성평가 계획을 마련하였다.

(1) 전자파 차폐용 문세트 시스템 고장특성 분석을 통해 신뢰성입증시험에 필요한 시험항목들을 정하였음.

(2) 수명시험에서는 전체 시스템 수명뿐만 아니라 교체품의 교체주기에 대한 보증을 단순한 방법으로 동시수행하는 입증시험법을 제시하였음.

결론적으로 다른 부품들과 간섭하지 않는 하위 교체부품을 가지는 직렬 시스템의 신뢰성입증시험에서는 교체품의 교체주기에 대한 보증도 항상 함께 포함시킬 것을 제안한다.

#### 후기

본 연구는 한국산업기술진흥원에서 주관하는 “EMP 방호용 및 MRI 용 전자파 차폐도어 신뢰성 확보”의 연구비 일부 지원에 의해 수행되었음.

#### 참고문헌

#### (References)

- (1) Abernethy, R. B., 2000, *The New Weibull Handbook*, Williams Enterprises, Florida.
- (2) Nelson, W., 1985, “Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures,” *Journal of Quality Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 140~146.
- (3) Kwon, Y. I., 2006, “A Two-Stage Reliability Demonstration Test for Mechanical Components,” *Journal of the Korean Society for Quality Management*, Vol. 34, No. 1, pp. 20~26.
- (4) Kwon, Y. I., 2011, “Economic Design of Zero-Failure Reliability Qualification Test,” *Journal of the Korean Society for Quality Management*, Vol. 39, No. 1, pp. 71~77.
- (5) Yadav, O. P., Singh, N., and Goel, P. S., 2006, “Reliability Demonstration Test Planning: A Three Dimensional Consideration,” *Reliability Engineering and System Safety*, 91, pp. 882~893.
- (6) UFGS-13 27 54.00 10, 2007, “Special Construction – Electromagnetic Shielding,” *United State Army Corps of Engineers*.

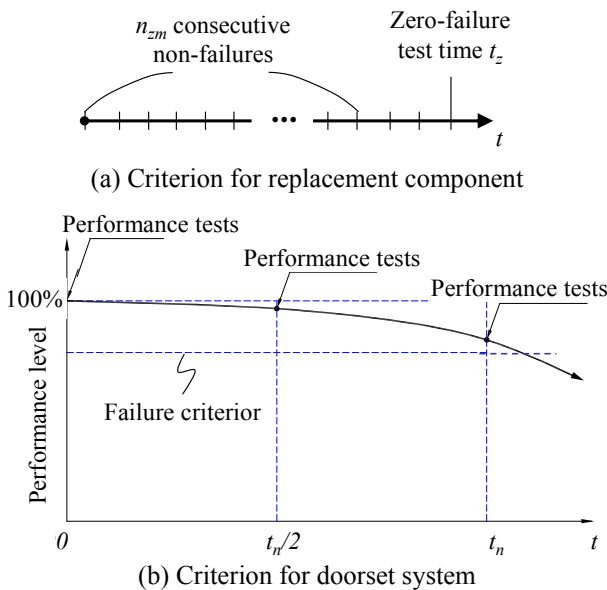


Fig. 6 Failure criteria of life test

- (7) KS F 2236, 1999, "Doorsets - Soft Heavy Body Impact Test," *Korean Standard Association*.
- (8) KS F 2630, 2007, "Doorsets - Static Torsion Test," *Korean Standard Association*.
- (9) KS F 2631, 2007, "Doorsets - Vertical Load Test," *Korean Standard Association*.
- (10) KS F 2632, 2007, "Doorsets - Repeated Opening and Closing Test," *Korean Standard Association*.
- (11) KS F 2634, 2000, "Doorsets - Static Loading Test," *Korean Standard Association*.
- (12) KS F 3109, 2013, "Doorsets," *Korean Standard Association*.
- (13) MIL-STD-188-125, 1998, "High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground-based C4I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions for Common Long-Haul/Tactical Communication Systems," *USA Department of Defense*.
- (14) IEEE 299, 1997, Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- (15) James L. Bossert, 1990, *Quality Function Deployment: A Practitioner's Approach*, ASQC Quality Press.