

산업용 인버터의 가속 피로수명 평가에 관한 연구

이상훈*^{#,}, 김원진*

*계명대학교 기계자동차공학부

A Study on Accelerated Fatigue Life Testing for Industrial Inverter

Sanghoon Lee*^{#,}, Won-Jin Kim*

*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University

(Received 14 April 2022; received in revised form 10 May 2022; accepted 18 May 2022)

ABSTRACT

Industrial inverters are used in a variety of fields for electric power supply. They may be exposed to vibration and heat once they are installed. This study focused on a framework of accelerated life testing of an industrial inverter considering fatigue damage as the primary source of deterioration. Instead of analyzing detailed failure mechanisms and the product's vulnerability to them, the potential of fatigue failure is considered using the fatigue damage spectrum calculated from the environmental vibration signals. The acceleration and temperature data were gathered using field measurement and spectral analysis was conducted to calculate the vibration signal's power spectral density (PSD). The fatigue damage spectrum is then calculated from the input PSD data and is used to design an accelerated fatigue life testing. The PSD for the shaker table test is derived that has the equivalent fatigue damage to the original input signal. The tests were performed considering the combined effect of random vibration and elevated temperature, and the product passed all the planned tests. It was successfully demonstrated that the inverter used in this study could survive environmental vibration up to its guarantee period. The fatigue damage spectrum can effectively be used to design accelerated fatigue life testing.

Keywords : Accelerated Life Testing(가속수명시험), Fatigue Damage(피로손상), Fatigue Damage Spectrum(피로손상스펙트럼), Shaker Table Test(진동대시험), Industrial Inverter(산업용인버터)

1. 서 론

산업용 인버터는 매우 다양한 분야에서 직류전력을 교류로 변환하는 용도로 사용된다. 인버터는 사용되는 환경에 따라 고온 및 진동에 노출될 수 있는데 이로 인하여 기대하였던 설계 수명에 다다르

기 전에 오작동을 일으킬 수 있으며 많은 선도 업체에서는 제품의 사양에 보장 설계수명을 제시하기도 한다.

본 연구에서는 현재 양산되어 시판 중인 산업용 인버터에 대하여 온도와 진동조건을 고려한 환경시험을 수행하고 해당 제품들이 18개월의 설계 수명을 보장할 수 있는지 여부를 평가하였다. 제품의 열화 혹은 손상기전을 진동으로 인한 피로파손으로 보고 제한된 시간에 진행되는 진동시험으로 실제와

Corresponding Author : shlee1222@kmu.ac.kr

Tel: +82-53-580-5264, Fax: +82-53-580-5974

유사한 수준의 피로손상을 인가할 수 있도록 가속화 시험기법을 적용하였다. 동시에 온도의 영향을 반영하기 위한 가속화 시험기법을 적용하여 최종적으로는 온도와 진동을 함께 고려한 가속화 계수를 산정하여 시험 결과를 분석 평가하였다. 인버터 설치 현장에서 진동 가속도 신호와 온도를 실측하였으며 측정된 진동 신호의 PSD(Power Spectral Density)로부터 피로손상스펙트럼(Fatigue Damage Spectrum; FDS)^[1]을 계산하였고 이를 토대로 제한된 시험시간 동안 등가의 피로손상을 야기할 수 있는 진동시험의 PSD를 도출하였다. 최종적으로 항온챔버가 설치된 진동대에서의 실제품 시험을 통하여 인버터 제품이 제안된 가속수명시험 하에 성능을 유지하는지의 여부를 평가하였다.

본 논문의 1장에서는 연구에 고려된 인버터 제품에 대한 소개와 설치현장에서 실측된 진동신호를 분석한 내용을, 2장에서는 피로, 온도를 손상기전으로 고려하여 가속화 시험계획을 수립한 내용을 다룬다. 3장에서는 최종시험을 수행한 내용을 기술하고자 한다.

2. 연구대상 제품 및 사용환경

2.1 인버터 제품 및 실측 방법

본 연구에서 고려된 제품은 Fig. 1에 제시된 것과 같은 산업용 인버터로서 매우 다양한 환경에서 사용되고 있다. 본 연구에서는 해당 인버터가 사용되는 16개소에서 진동 및 온도환경에 대한 실측을 수행하였다. 인버터가 설치되는 거치대의 인접 3개 지점에 3축 가속도계를 설치하여 진동신호를 5분간 측정하였으며 최대 5kHz까지의 신호를 취득하였다. 얻어진 진동신호의 시계열 데이터를 처리하여 1Hz의 정도를 가지는 가속도 PSD 곡선을 구하였다.



Fig. 1 Industrial inverter for life testing

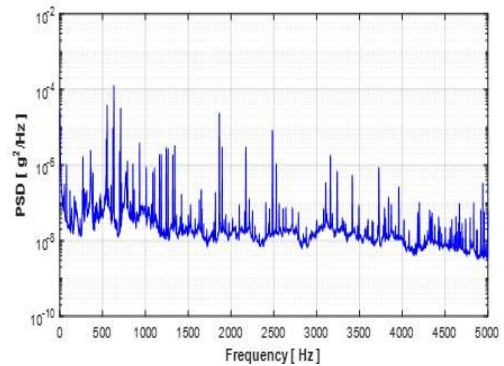


Fig. 2 APSD curve obtained from field measurement

2.2 실측 진동신호 및 온도 데이터

모든 측정지점에서 구해진 세 방향의 가속도 데이터의 gRMS 값을 비교 분석한 결과 가장 작은 값은 0.011, 가장 큰 값은 0.092로 계산되었다. 수명평가에는 보수성을 확보하기 위하여 가장 큰 gRMS를 주는 진동신호를 환경진동으로 고려하기로 하였다. Fig. 2는 해당 진동신호의 PSD 곡선이다.

해당 신호가 측정된 거소에서의 온도는 18.65°C로 확인되었고 온도영향을 고려한 가속시험 및 가속화계수 산출의 기준 온도로 활용되었다.

3. 가속수명시험 사양 도출

3.1 피로손상스펙트럼

피로손상스펙트럼은 주어진 세 가진신호가 생성할 수 있는 피로손상을 주파수의 함수로서 계산한 스펙트럼으로 특정 주파수 f_n 이 1 자유도계 시스템에 누적하는 피로손상을 Minor의 선형누적모델에 기반하여 예측한 것이라 할 수 있다.^[1-4] 해당 계의 피로수명 $N(s)$ 를 응력 s 의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. C 와 b 는 S-N 곡선으로부터 유추할 수 있는 상수이다.

$$N(s) = Cs^{-b} \quad (1)$$

Minor의 모델로부터 누적피로손상 $D(f_n)$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D(f_n) = \int_0^\infty \frac{n(s)}{N(s)} ds = \int_0^\infty \frac{f_n T p(s)}{C s^{-b}} ds \quad (2)$$

$$= \frac{f_n T}{C} \int_0^\infty p(s) s^b ds$$

위 식에서 $n(s)$ 는 응력 진폭이 s 인 진동 사이의 회수를, T 는 가진에 노출된 총시간을 의미하며 $p(s)$ 는 응력 진폭의 확률밀도함수이다. 1자유도계 시스템의 반응이 가우시안 프로세스로 근사가 가능하다면 진폭의 최대치의 분포는 레일리분포를 따르며 확률밀도 함수 $p(s)$ 는 다음 식과 같이 주어진다.

$$p(s) = \frac{s}{\sigma_s^2} e^{-s^2/2\sigma_s^2} \quad (3)$$

식 (2)의 $p(s)$ 에 레일리분포의 확률밀도함수 (3)을 대입한 후 적분을 수행하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$D(f_n) = \frac{f_n T}{C} [\sqrt{2}\sigma_s]^b \Gamma\left(1 + \frac{b}{2}\right) \quad (4)$$

위 식에서 σ_s 는 응력 피크값의 표준편차를 의미하며 Γ 는 감마함수를 의미한다. σ_s 와 입력 가속도 PSD $G(f_n)$ 의 상관관계는 ISO 18431-4^[5] 등에 다음과 같이 정리되어 있다.

$$\sigma_s \approx k \sqrt{\frac{G(f_n) Q}{2(2\pi f_n)^3}} \quad (5)$$

위 식에서 k 는 1 자유도계의 스프링 상수, Q 는 동적증폭계수(dynamic amplification factor)를 의미한다. 식 (5)를 (4)에 대입하여 최종적으로 구해지는 피로손상스펙트럼의 식은 다음과 같다.^[1]

$$D(f_n) = \frac{f_n T k^b}{C} \left[\frac{G(f_n) Q}{2(2\pi f_n)^3} \right]^{\frac{b}{2}} \Gamma\left(1 + \frac{b}{2}\right) \quad (6)$$

상기 식을 유도하는 과정에서 이루어진 가정과 적용 한계성 등은 참고문헌^[2,6]에 제시되어 있다.

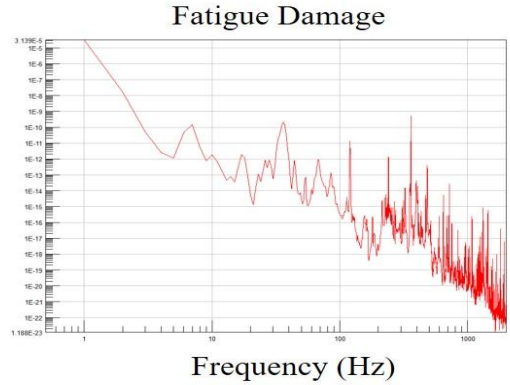


Fig. 3 FDS calculated from acceleration PSD

상기 식을 이용하여 2절에서 제시된 환경진동이 18개월 동안 가해졌을 때의 피로손상 스펙트럼을 계산한 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 그래프는 로그 스케일로 그려졌으며 저주파 신호로 인한 피로손상 가능성이 상대적으로 크다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 가속화 피로시험 사양의 결정

가속화 피로시험은 가용한 시험시간 동안 실제 작동환경에서 설계수명 동안 제품에 가해지는 것과 동일한 수준의 피로손상을 시험편에 생성시킬 수 있는 시험조건을 설정함으로써 가능해진다.^[1,2] 본 연구에서는 앞 절에서 소개된 피로손상 스펙트럼을 활용하여 시험 사양을 결정하였다. 주어진 입력 가진 PSD로부터 피로손상 스펙트럼을 계산하고 시험시간 동안 이 스펙트럼과 같은 스펙트럼을 생성하는 가진시험의 PSD를 구해내는 것이 목표이다.

증가의 피로손상 스펙트럼을 생성하는 시험 가진 신호는 식 (6)으로부터 손쉽게 계산할 수 있다. 식에서 $D(f_n)$ 이 특정 주파수 f_n 이 시간 T 동안 생성하는 피로손상이므로 이 값을 고정값으로 두고 시간을 시험시간 T_{eq} 로 바꿔었을 때 시험 가진의 PSD값 $G_{syn}(f_n)$ 을 구하면 다음과 같다.

$$G_{syn}(f_n) = \frac{2(2\pi f_n)^3}{Q} \left[\frac{D(f_n) C}{k^b f_n T_{eq} \Gamma(1+b/2)} \right]^{2/b} \quad (7)$$

상기 식으로부터 바로 시험 가진의 PSD를 구하

려면 상수 Q , C , b , k 를 알아야 하나 식 (7)의 $D(f_n)$ 이 식 (6)으로부터 구해진다는 것을 고려하면 대부분의 상수들은 중요하지 않다. 식 (6)을 식 (7)에 대입하여 정리하면 대부분의 상수들은 소거되고 다음과 같은 식이 남게 된다.

$$G_{sym}(f_n) = G(f_n) \cdot \left(\frac{T}{T_{eq}} \right)^{2/b} \quad (8)$$

위 식을 시험시간과 실제 수명시간의 비로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{T_{eq}}{T} = \left(\frac{G_{sym}(f_n)}{G(f_n)} \right)^{-b/2} \quad (9)$$

식 (9)는 전통적으로 가속수명시험의 설계에 많이 활용되는 역승모델(inverse power law)과 같은 형태로서 피로손상스펙트럼을 기준으로 하는 가속화 시험은 가속화 계수가 입력값의 역승에 비례하여 결정된다는 것을 알 수 있다. 따라서 가속화 시험을 수행하는 과정에서 식 (7)의 여러 상수들은 크게 의미가 없어 1로 설정하여 계산을 하였고 피로손상지수 b 는 참고문헌^[6]에서 제시한 보수적으로 많이 활용하는 값인 4로 설정하였다.

Fig. 1에 제시된 환경진동 PSD로부터 계산된 가속화 시험용 PSD를 Fig. 4에 도시하였다. 그림의 적색선이 시험시간을 2일로 설정하였을 때 구해진 시험 PSD이며 적색선은 환경진동의 PSD이다. Fig. 4는 로그스케일로 그려져 Fig. 1과 그래프 형상에 차이가 있다. 그림의 두 PSD에 대하여 검증 차원에서 FDS를 계산하여 비교한 결과 두 FDS가 완벽히 동일함을 확인하였다.

3.3 진동대 시험을 위한 시험사양 결정

Fig. 4에 제시된 시험 PSD는 이론적으로는 정확한 가속화 계수로부터 도출된 시험 사양이지만 실제 진동대 시험의 입력으로 사용하기에는 기술적 어려움이 있다. 진동대 입력 PSD는 가급적 평평한 부분이 많고 급격한 변화가 발생하지 않아야 안정적인 시험이 가능하다는 것이 알려져 있다.^[7] 따라서 본 연구에서는 Fig. 4의 시험 PSD의 주요 꼭지

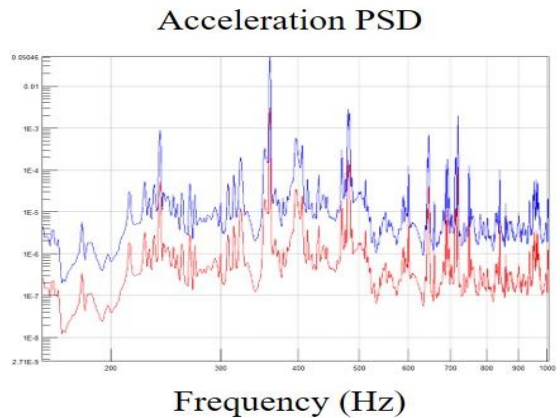


Fig. 4 Comparison of test PSD and input PSD

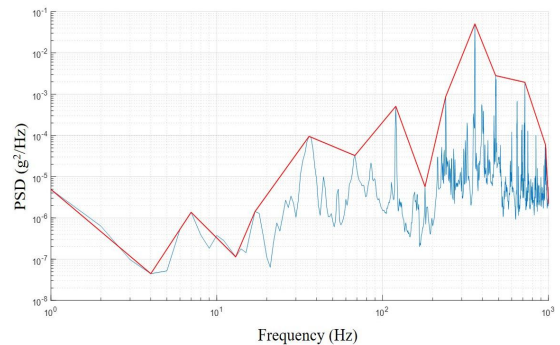


Fig. 5 Enveloped PSD for accelerated life testing

점을 잇는 직선으로 전체 구간의 PSD를 감싸는 새로운 시험 PSD를 작성하였다.

Fig. 5의 적색선으로 만들어진 새로운 PSD로 시험을 함으로써 시험의 보수성과 안정성이 확보된다고 할 수 있다. PSD 곡선을 감싸는 시험 사양을 결정할 때 유의점은 참고문헌^[7]에 제시되어 있다.

3.4 온도를 고려한 가속화 시험

본 연구에서 고려된 인버터의 경우 고온조건에 노출됨으로써 설계수명을 충족시키지 못하는 사례에 대하여 구체적으로 보고된 바가 있지는 않다. 이에 확인되지는 않았지만 온도로 인하여 축진될 수 있는 수명감소가 있는 기전이 있다는 가정을 하고 광범위하게 사용되는 가속화기법을 통하여 해당 기전으로 인하여 설계수명 내에서 문제가 발생할지

의 여부를 시험적으로 평가 및 확인하는 접근을 시도하였다.

일반적으로 온도의 영향을 받는 손상기전의 경우에는 아래의 식과 같이 주어지는 아레니우스의 법칙에 따라 기전의 진행 속도가 결정된다는 것이 알려져 있다.^[8]

$$L(T_m) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{BT_m}} \quad (10)$$

위 식에서 L 은 수명을 나타내주는 척도, T_m 은 온도 (K), E_a 는 활성화에너지(eV), B 는 볼츠만 상수($=8.6173303 \times 10^{-5}$ eV/K)이다. 가속시험의 수명 $L(T_{meq})$ 와 실제 환경에서의 수명 $L(T_m)$ 사이의 관계는 다음 식과 같이 정리가 가능하다.

$$\frac{L(T_m)}{L(T_{meq})} = e^{\frac{E_a}{B} \left(\frac{1}{T_{meq}} - \frac{1}{T_m} \right)} \quad (11)$$

상수 A 는 가속화 계수를 계산하는 과정에서 소거되므로 크게 중요하지 않으나 활성화에너지 E_a 는 실제 가속수명시험의 설계에 중요한 영향을 미친다. 일반적으로 전기소자 등에 적용 가능한 활성화에너지는 열화기전 별로 Table 1에 정리되어 있고 본 연구에서는 보수적으로 0.2 eV를 선택하였다. 이 경우 온도가 50°C가 되면 상온 (20°C) 대비 가속화 계수는 약 2.1이 된다.

4. 가속수명시험 및 결과

4.1 가속수명시험 계획

3절에서 제시된 진동 및 온도 조건을 고려한 가속화 기법을 활용하여 두 조건을 동시에 고려한 가속수명시험 계획이 수립되었다. 랜덤가진에 의한 피로손상의 경우 실측된 환경 PSD에 대한 노출시간을 18개월, 24개월, 36개월로 설정하여 각각에 대응하는 시험 PSD를 구하였으며 온도는 상온과 50°C를 고려하였다. 총 5번의 시험을 Table 2와 같이 수행하였다. 진동시험의 시험시간은 2일이다.

진동시험에 제시된 gRMS 값은 FDS로부터 계산된 시험 PSD의 면적의 제곱근을 구하여 계산할 수

있으며 식 (9)에서 제시된 바와 같이 수명과 gRMS의 값이 역승모델을 따름을 확인할 수 있다.

Table 1 Activation energies for some failure mechanism^[9]

Failure mechanism	Accelerating factors	Activation energy
Dielectric break down	Electric Field, Temperature	0.2-1.0 eV
Corrosion	Humidity, Temperature, Voltage	0.3-1.1 eV
Electromigration	Temperature, Current density	0.5-1.2 eV
Au-Al intermetallic growth	Temperature	1.0-1.05 eV
Hot carrier injection	Electric field, Temperature	~ 1 eV
Slow charge trapping	Electric field, Temperature	1.3 eV
Mobile ionic contamination	Temperature	1.0-1.05 eV

Table 2 Accelerated life testing plan

Test No.	Vibration level (gRMS)	Temperature
1	2.7096 g (18m)	Room temp.
2	2.7096 g (18m)	50°C
3	2.8729 g (24m)	Room temp.
4	2.8729 g (24m)	50°C
5	3.1793 g (36m)	50°C

4.2 시험결과 및 분석

Fig. 6과 7에 제시된 것처럼 고온챔버와 진동대를 이용한 시험이 진행되었다.

시험에 사용된 모든 제품은 현장에서 작동시험 및 분해 후 정밀검사를 수행하였으며 모든 제품이 품질 기준을 만족하는 수준으로 정상 작동하는 것을 확인하였다. AC 380V의 상용전원을 입력전압으로 하고, 3.7kW의 구동모터를 이용하여 기능검사를 실시하였다. 인버터의 출력전압이 415~425 [V], 출력전류가 3.65~3.75 [A]의 범위에 들어올 때 정상으로 판정하며 시험 결과를 Table 3에 제시하였다.



Fig. 6 Shaker table test at room temperature



Fig. 7 Shaker table test at elevated temperature

Table 3 Accelerated life testing plan

Test No.	Input voltage	Input current	Output Voltage	Output Current
1	386.632	1.56142	420.813	3.73159
2	384.856	1.51126	420.095	3.71675
3	384.459	1.50836	420.915	3.70349
4	384.098	1.54665	420.703	3.70527
5	387.79	1.49179	417.737	3.74643

본 연구에서처럼 온도를 가속인자로 사용하는 열화기전과 그렇지 않은 열화기전을 동시에 고려하는 경우에 수명평가에 많이 사용되는 모델로 온도-비열모델(temperature-non thermal model) 등이 있다.^[8] 다만 본 연구에서는 인버터의 수명의 확률적 분포에 대한 분석을 수행하는 것이 아니므로 해당 모델을 그대로 적용하여 예측수명을 도출하는 것을 적

절치 않으며 해당 모델의 타당성, 적용성은 보다 면밀한 수명시험을 통하여 검증이 되어야 한다. 본 연구를 통하여 얻을 수 있는 결론은 제품이 설치된 환경에서의 진동 및 온도조건을 고려하였을 때 제품이 보증기간으로 제시된 18개월 동안 예측된 환경에 노출되어도 피로파손이 발생하지 않을 것이며 상기 결론은 노출 온도가 고온(50°C)이어도 달라지지 않는다는 것이다. 요약하자면 본 연구에서 고려된 산업용 인버터 제품이 환경진동 및 고온조건에 노출되었을 때 18개월이라는 보증기간 동안에는 제품에 이상이 발생하지 않을 것이라는 정성적 결론에 도달하였으며 추가로 실시된 36개월 노출을 고려한 시험에서도 이상이 발견되지 않았다는 점이다. 본 연구의 접근법은 미국방부에서 제시하고 있는 환경시험표준(MIL-STD-810G) 중 진동을 고려하는 방법과도 일맥상통한다 할 수 있다.^[10]

4. 결 론

산업용 인버터가 보증기간 18개월 동안 환경진동에 노출되었을 때 건전성을 유지할 것인가를 가속 수명시험을 통하여 확인하였다. 본 연구에서는 제품에 존재하는 구체적인 파손기전을 분석하고 해당 기전에 대한 제품의 취약성을 분석하였다기 보다 실측으로 구해진 환경진동이 야기할 수 있는 피로 손상의 스펙트럼을 계산하고 이와 동일한 손상을 줄 수 있는 시험가진 PSD를 구한 후 진동대 시험을 수행하여 제품이 보증기간 동안 건전성을 유지할 수 있는지 여부를 시험적으로 검증한 내용이라 할 수 있다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. FDS를 계산하여 가속화 피로수명 사양 도출에 활용하여 손쉽게 시험가진 PSD를 작성하는 것이 가능하였다.
2. FDS를 이용한 가속화 피로시험은 입력가진의 gRMS를 가속화 인자로하는 역승모델이 됨을 확인하였다.
3. 시험에 사용된 제품이 제시된 보증기간 중 환경진동에 의한 피로파손이 발생하지 않을 것임을 확인하였으며 이는 환경온도가 고온인 상황에서도 유효하다.

REFERENCES

1. Halfpenny, A., “Accelerated vibration testing based on fatigue damage spectra.” nCode International 230, 2006.
2. Lalanne, C., Mechanical Vibration and Shock Analysis: Fatigue Damage, Vol. 4, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2009.
3. McNeill, S. I., “Implementing the Fatigue Damage Spectrum and Fatigue Damage Equivalent Vibration Testing.” Proceedings of 79th Shock and Vibration Symposium, October 26-30, Orlando, Florida, USA, 2008.
4. Jang, J., Park, J.-W., “Simplified Vibration PSD Synthesis Method for MIL-STD-810,” Applied Sciences, Vol. 10, No. 2, pp. 458, 2020.
5. ISO 18431-4, Mechanical Vibration and Shock-Signal Processing- Part 4: Shock-Response Spectrum Analysis, International Standard Organization, London, UK, 2007.
6. Miskel, J. F., “Fatigue-based random vibration and acoustic test specification,” A Thesis for Master of Science, Massachusetts Institute of Technology, USA, 1994.
7. Simmons, R., “Creating a Random Vibration Component Test Specification,” (1997) <https://femci.gsfc.nasa.gov/random/randomtestspec.html> (accessed 12, April 2022)
8. Bertsche, B., Reliability in Automotive and Mechanical Engineering, Springer, 2008.
9. EESemi.com, “Activation Energy,” (2005), <https://www.eesemi.com/activation-energy.htm#:~:text=The%20Arrhenius%20Equation%20is%20as,at%20which%20the%20mechanism%20occurs> (Accessed 12, April 2022)
10. MIL-STD-810G, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, United States Department of Defense, 2008.