

# 고준위방사성폐기물 처분장 모니터링용 피에조센서의 온도 스트레스에 관한 가속수명시험 설계

황현중<sup>1</sup> · 박창희<sup>2</sup> · 홍창호<sup>3</sup> · 김진섭<sup>4</sup> · 조계춘<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>학생회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정

<sup>2</sup>비회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 한국원자력연구원 처분성능실증연구부 선임연구원

<sup>4</sup>정회원, 한국원자력연구원 처분성능실증연구부 책임연구원

<sup>5</sup>정회원, 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수

## Design of accelerated life test on temperature stress of piezoelectric sensor for monitoring high-level nuclear waste repository

Hyun-Joong Hwang<sup>1</sup> · Changhee Park<sup>2</sup> · Chang-Ho Hong<sup>3</sup> · Jin-Seop Kim<sup>4</sup> ·  
Gye-Chun Cho<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>2</sup>Master Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

<sup>3</sup>Senior Researcher, Disposal Performance Demonstration Research Division, KAERI

<sup>4</sup>Principal Researcher, Disposal Performance Demonstration Research Division, KAERI

<sup>5</sup>Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST

\*Corresponding Author : Gye-Chun Cho, gyechun@kaist.edu

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
24(6)451-464(2022)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.6.451>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received October 25, 2022

Revised November 3, 2022

Accepted November 3, 2022



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

### Abstract

The high-level nuclear waste repository is a deep geological disposal system exposed to complex environmental conditions such as high temperature, radiation, and groundwater due to handling spent nuclear fuel. Continuous exposure can lead to cracking and deterioration of the structure over time. On the other hand, the high-level nuclear waste repository requires an ultra-long life expectancy. Thus long-term structural health monitoring is essential. Various sensors such as an accelerometer, earth pressure gauge, and displacement meter can be used to monitor the health of a structure, and a piezoelectric sensor is generally used. Therefore, it is necessary to develop a highly durable sensor based on the durability assessment of the piezoelectric sensor. This study designed an accelerated life test for durability assessment and life prediction of the piezoelectric sensor. Based on the literature review, the number of accelerated stress levels for a single stress factor, and the number of samples for each level were selected. The failure mode and mechanism of the piezoelectric sensor that can occur

[www.kci.go.kr](http://www.kci.go.kr)

in the environmental conditions of the high-level waste repository were analyzed. In addition, two methods were proposed to investigate the maximum harsh condition for the temperature stress factor. The reliable operating limit of the piezoelectric sensor was derived, and a reasonable accelerated stress level was set for the accelerated life test. The suggested methods contain economical and practical ideas and can be widely used in designing accelerated life tests of piezoelectric sensors.

**Keywords:** High-level nuclear waste repository, Piezoelectric sensor, Accelerated life test, Failure mode, Operating limit

## 초 록

고준위방사성폐기물 처분장은 심지층 처분시스템으로 사용후핵연료를 취급하는 특성상 고온, 방사선 및 지하수 등의 복합적인 환경조건에 노출되어 있다. 지속적인 노출에 의해 시간이 지남에 따라 구조물의 균열 및 열화가 발생할 수 있다. 한편 고준위방사성폐기물 처분장은 초장기 기대수명이 요구되며 이에 따른 장기적인 구조물 건전성 모니터링이 필수적이다. 구조물 건전성 모니터링에는 가속도계, 토압계, 변위계 등 다양한 센서들이 활용될 수 있으며, 이 중 일반적으로 피에조센서가 사용된다. 따라서 피에조센서의 내구성 평가를 바탕으로 고내구성 센서를 개발할 필요가 있다. 본 연구에서는 피에조센서의 내구성 평가 및 수명예측을 위한 가속수명시험을 설계하였다. 문헌연구를 바탕으로 단일 스트레스 인자에 대한 가속 스트레스 수준 수 및 각 수준 별 시료 수를 선정하였다. 또한 고준위방사성폐기물 처분장 환경조건에서 발생할 수 있는 피에조센서의 고장모드 및 고장메커니즘을 분석하였다. 온도 스트레스 인자에 대한 최대 가속조건 탐색 실험을 두 가지 방법으로 제안하였으며 피에조센서의 신뢰도 높은 동작한계를 도출하였다. 이를 이용하여 가속수명시험의 합리적인 가속 스트레스 수준을 설정하였다. 본 연구에서 제시된 최대 가속조건 탐색 실험방법은 경제적이며 실용적인 아이디어를 담고 있으며, 추후 피에조센서의 가속수명시험 설계에 널리 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어:** 고준위방사성폐기물 처분장, 피에조센서, 가속수명시험, 고장모드, 동작한계

## 1. 서 론

원자력발전은 핵연료의 핵분열에 의해 생성되는 열에너지를 활용하여 전기를 생산하는 것을 말한다. 한편 핵연료의 열에너지 생성능력은 시간이 지남에 따라 저하되므로 일정하고 지속적인 전기 생산을 위해선 새로운 핵연료로 교체해야 한다. 새로운 핵연료로 교체된 후 기존의 핵연료인 사용후핵연료의 경우는 고준위방사성폐기물로 구분하고 있다. 고준위방사성폐기물은 현재 일정 기간 저장수조에 보관 후 건식저장시설에 저장되고 있으나 여전히 붕괴열을 발생시키고 있고 반감기가 긴 방사성 핵종들이 다량 함유되어 있다. 이는 인간 생활권계에 영향을 미칠 수 있기 때문에 대량의 폐기물을 장기적으로 처분할 장소가 필요한 실정이다(Kim et al., 2011a). 고준위방사성폐기물의 영구 처분을 위한 여러 방법 중 인간 생활권계로의 누출 가능성이 거의 없고 경제적이며 기술적으로 실현 가능한 방법은 심지층 처분시스템이다(Chapman and Hooper, 2012). 초장기 기대수명이 요구되는 고준위방사성폐기물 처분장은 심지층 지하 500~1,000 m 깊이의 다중 방벽 처분시스템으로 공학적 방벽(Engineered Barrier System, EBS)과 천연 방벽(Natural Barrier System, NBS)으로 구성된다. 공학적 방벽(EBS)은 인공적

방법으로 처분 용기, 완충재, 뒷채움재, 그리고 처분고 구조물 등을 포함하며 일차적으로 방사성 핵종의 누출을 차단시키고 장기간 누출을 최소화하여 지연시키는 역할을 한다. 천연 방벽(NBS)은 공학적 방벽 주변 지하 암반과 토양 등을 포함한다(Choi et al., 2008).

심지층 처분시스템인 고준위방사성폐기물 처분장은 전술한바와 같이 여러 요소를 포함하고 있으며 위치에 따라 다양한 환경 조건에 노출되어 있다. 고준위방사성폐기물 처분장의 주요 환경 조건은 Fig. 1과 같이 방사성 폐기물에 의한 고온 조건, 방사선 조건, 그리고 암반층으로부터 유입되는 지하수로 인한 고습 조건이다. 한편 이러한 고유 환경 조건으로 인해 인공구조물인 공학적 방벽은 시간이 지남에 따라 강도 감소, 균열 등과 같은 열화가 발생한다(Field et al., 2015; Ma et al., 2015). 따라서 초장기 기대수명이 요구되는 고준위방사성폐기물 처분장의 경우 구조물 건전성 모니터링이 필수적이다. 고준위방사성폐기물 처분장의 구조물 건전성 모니터링을 위해 가속도센서, AE센서, 초음파센서 등 다양한 피에조센서가 활용될 수 있다(Kessler and Spearing, 2002; Kim et al., 2015). 한편 심지층 처분시스템 특성상 시공 시 최초 설치된 센서의 추후 교체 및 제거가 불가능하기 때문에 처분장의 고유 환경 조건에서 충분히 오래 버틸 수 있는 고내구성 센서를 적용해야 한다. 하지만 앞서 언급한 피에조센서들은 처분장 고유 환경 조건(고온, 고습, 방사선 조건)하에서 각기 다른 내구성을 가지고 있으므로 신뢰도 높은 내구성 평가를 통한 수명 예측이 필수적이다.

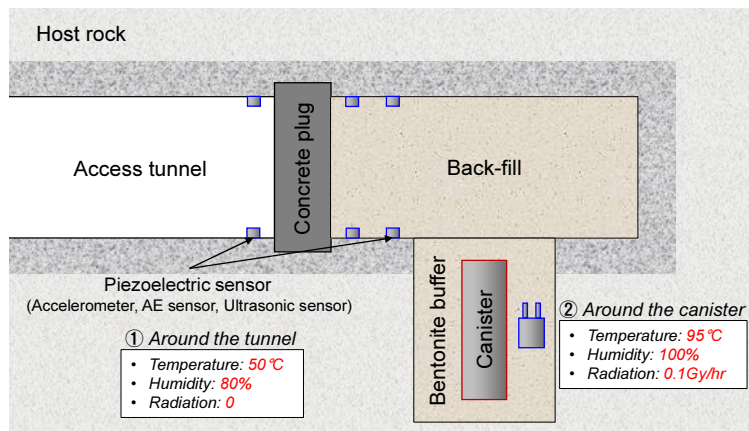


Fig. 1. Environmental conditions and sensor locations of high-level nuclear waste repository

피에조센서의 내구성 평가 및 수명 예측을 위해 다양한 신뢰성보증시험(reliability qualification test)이 활용될 수 있으며, 그 중 시험기간을 줄일 수 있는 가속수명시험(accelerated life test)이 흔히 수행된다(Sung, 2015). 한편 가속수명시험 설계 시 시험기간을 결정하는 중요한 요소는 적절한 가속 스트레스 수준의 설정이다. 적절한 가속 스트레스 수준을 설정하지 못할 경우, 전체 시험기간이 너무 길어지거나 짧아져 비경제적이고 신뢰도가 낮은 결과가 도출될 수 있다. 또한 가속수명시험 설계 시 각기 다른 가속 스트레스 수준 하에서 피에조센서의 고장모드 일치가 필수적으로 요구된다(Jung et al., 2012).

따라서 본 연구에서는 피에조센서의 가속수명시험 설계 시 적절한 스트레스 수준 설정을 위해 온도 스트레스 인자에 대한 최대 가혹조건을 실험적으로 탐색하였다. 문헌조사를 바탕으로 피에조센서에 대한 고장모드 및 영향 분석(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)에 기초하여 주요 고장모드와 고장메커니즘을 파악하였다. 또한 최대 가혹조건 탐색 실험은 두 가지 방법(Method 1, Method 2)을 수행하여 다른 고장모드가 발견되는 피에조센서의 신뢰도 높은 동작한계를 도출하였다. 이를 바탕으로 온도 스트레스 인자에 대한 피에조센서의 가속수명시험 설계 방법을 제시하였다.

## 2. 피에조센서의 신뢰성보증시험

본 장에서는 고준위방사성폐기물 처분장 모니터링용 피에조센서의 신뢰성보증시험에 대해 자세히 기술하였다. 문헌조사를 바탕으로 신뢰성보증시험 중 가장 널리 사용되는 가속수명시험에 대한 설계와 피에조센서의 FMEA 분석을 통한 고장모드 및 고장메커니즘을 파악하였다.

### 2.1 가속수명시험

신뢰성보증시험(reliability qualification test)은 일반적으로 다음과 같은 두 가지 주요 목표를 갖는다. 하나는 제품의 신뢰성 수준, 수명, 평균 고장시간, 그리고 고장률 등의 신뢰도 높은 평가이며, 다른 하나는 제품 결함을 제거하고 부적격 제품을 선별한다(Chen et al., 2018). 피에조센서의 내구성 평가 및 수명 예측을 위한 가속수명시험은 전자의 경우로 통계 기반 신뢰성 시험(statistics-based reliability test)으로 분류된다. 이러한 시험은 제품의 신뢰성을 보다 정확하고, 신속하고, 경제적으로 추정하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 사용자의 원하는 목적에 맞게 실험 설계 및 데이터 분석에 적합한 통계 이론, 방법, 그리고 기술을 결정해야 한다.

신뢰성보증시험 중 가속수명시험은 상대적으로 빠른 시간에 신뢰성 정보를 획득할 수 있어 자주 사용되고 있다(Bae and Seo, 2017). 가속수명시험은 실제 사용 조건보다 가혹한 스트레스를 인가하여 단시간 내에 고장을 유발하며, 취득된 고장데이터를 바탕으로 제품의 내구성을 평가하고 수명을 예측한다. 일반적인 가속수명시험의 수행 절차는 Fig. 2(a)와 같다. 높은 수준의 스트레스를 인가하거나 특정 동작의 반복횟수를 증가시키는 등 가혹한 스트레스 조건 하에서 제품의 고장메커니즘을 촉진하여 고장모드를 파악한다. 시험결과로부터 얻은 고장데이터를 바탕으로 수명과 스트레스 간의 관계식을 추정한다. 추정된 관계식을 바탕으로 사용자의 목적에 맞는 실제 사용조건을 외삽하여 제품 내구성을 평가하고 수명을 예측할 수 있다. 높은 신뢰도를 갖는 수명-스트레스 추정관계식을 도출하기 위해서는 가속 스트레스 조건과 실제 현장 조건에서 발견되는 고장모드가 동일해야 한다.

가속수명시험의 일반적인 설계 절차는 Fig. 2(b)와 같다. 먼저 제품이 사용되는 실제 현장의 환경조건에서 어떤 고장모드가 발견되는지를 확인한다. 파악된 환경조건 중 가속수명시험에 활용할 주요 스트레스 인자를 선정하고 가속 스트레스 수준의 수를 결정한다. 가속 스트레스 수준의 수는 일반적으로 단일 스트레스의 경우 분포군에 따라 2~3개의 수준을 사용하며, 복합 스트레스의 경우 3~4개의 수준을 사용한다(Seo and Yum, 1991; Escobar and

Meeker, 1995). 다음 단계로 각 수준별 시료 수를 산정하고 스트레스 수준과 고장판정기준을 설정한다. 내구 및 환경시험의 경우, 시료 수는 각 수준 별 최소 5개를 사용한다(Kim, 2009; Kim et al., 2020). 가속수명시험 설계 시 스트레스 수준이 너무 낮은 경우 원하는 고장모드 발현에 긴 시험시간이 소요되며, 반대로 스트레스 수준이 너무 높은 경우 제품의 고장모드가 달라져 신뢰도 낮은 결과가 도출되므로 적절한 가속 스트레스 수준 설정이 중요하다(Kim et al., 2011b).

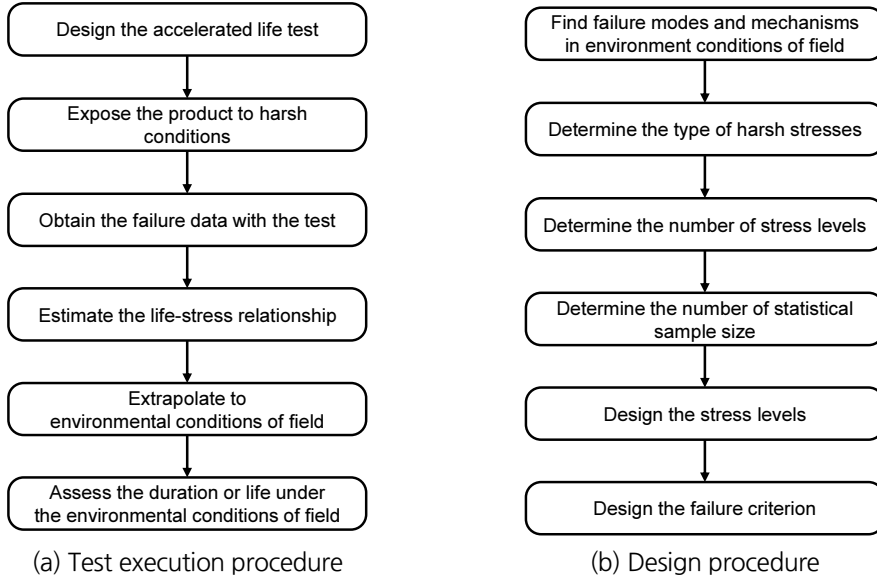


Fig. 2. Flow chart of the accelerated life test procedure (Kim, 2009)

## 2.2 고장모드 및 고장메커니즘

본 연구에서 사용한 피에조센서는 산업용 가속도센서로 일반적인 센서 구성은 Fig. 3과 같다. 피에조센서는

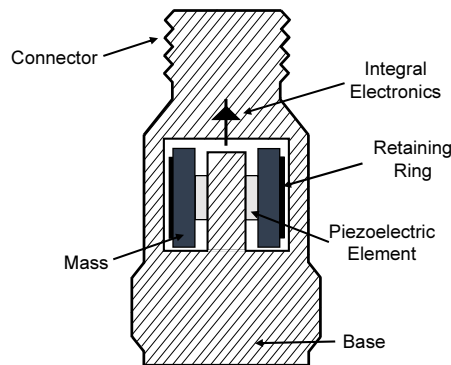


Fig. 3. Schematic diagram of industrial piezoelectric accelerometer sensor (PCB PIEZOTRONICS)

외부 압력이 가해질 경우 압전소자(피에조필름)의 기계적 변형에 의해 전기적인 신호를 발생시키는 원리로 최종적으로 발생한 전압은 내부 전극을 통해 외부 장치로 전달된다. 이를 바탕으로 취득된 전압을 분석하여 부착된 매질 상태나 주변 환경 변화를 평가하는 데 주로 사용된다.

전술한바와 같이 가속수명시험을 비롯한 신뢰성보증시험 수행 시 높은 신뢰도를 보장하기 위해서는 동일한 고장모드의 발현이 매우 중요하다. 따라서 가속수명시험 설계 단계에서 시료의 고장모드와 고장메커니즘의 정확한 파악이 필수적이다. 본 연구에서는 문헌조사를 통해 피에조센서의 고장모드 및 고장메커니즘을 파악하였다. Wlodkowski (1999)는 압력, 온도, 에이징 등에 의해 피에조센서의 수집신호 감도가 변화됨을 관찰하였다. Lim et al. (2015)은 수집신호 감도 변화의 원인을 피에조센서의 구성요소별로 세분화하여 FMEA 분석을 통해 도출하였다(Table 1). 이들은 피에조센서를 크게 외부 동관, 피에조필름, 그리고 내부 전극으로 구분하여 분석하였다. 우선 외부 동관의 경우 기계적 스트레스, 온도, 습기 침투 등의 원인으로 파손 형태의 고장메커니즘이 발현된다. 피에조필름의 경우 기계적 스트레스, 온도, 습기 침투 등의 원인으로 파괴 혹은 변형 형태의 고장메커니즘이 발현된다. 마지막으로 내부 전극의 경우 온도와 습도 침투로 인해 단선 형태의 고장메커니즘이 발현된다. 또한 Catelani et al. (2018)은 고장메커니즘 별 고장모드에 대해 분석하였다. 분석된 고장메커니즘 별 고장모드는 다음과 같다. 고장메커니즘이 기계적 스트레스에 의한 굽힘, 항복, 좌굴 등의 변형일 경우 불규칙하거나 불량한 신호가 발생한다. 고장메커니즘이 물이나 건조에 의한 부식일 경우 불규칙하거나 감도가 낮은 신호가 수집된다. 마지막으로 고장메커니즘이 단선, 균열 등의 파괴일 경우 신호가 수집되지 않는다.

**Table 1.** FMEA of a piezoelectric sensor (Lim et al., 2015)

Part	Function	Failure mechanism	OCC <sup>a)</sup>	Failure mode	SEV <sup>b)</sup>	Failure causes	DET <sup>c)</sup>	RPN <sup>d)</sup>	Detection method
Outer tube	Signal generation	Breakage	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Poor internal protection</li> <li>Poor signal</li> </ul>	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mechanical stress</li> <li>Temperature</li> <li>Humidity</li> </ul>	4	48	Voltage measurement
Piezo film		Destruction	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Poor signal</li> </ul>	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperature</li> <li>Humidity</li> </ul>	2	20	
		Transformation	4				2	40	
Inner electrode		Breakage	3		3		2	18	

a) OCC: Occurrence probability of a failure mode represented as a value between 1 to 10

b) SEV: Severity of a failure represented as a value between 1 to 10

c) DET: Detection probability of a failure mode represented as a value between 1 to 10

d) RPN: Risk Priority Number = OCC × SEV × DET

이를 종합하면 피에조센서의 고장모드 및 고장메커니즘은 다음과 같다. 기계적 스트레스 조건에서는 외부 동관이나 피에조필름에서의 변형이 발생하며 그 결과 불량한 신호가 수집된다. 고온 및 고습 조건에서는 외부 동관

이나 피에조필름의 변형에 의해 불량한 신호가 수집되며, 특히 온도가 과하게 높을 경우 피에조필름의 파괴나 내부 전극의 단선으로 인해 신호가 수집되지 않는다.

최종적으로 본 장에서 파악된 문헌조사를 바탕으로 피에조센서에 대한 가속수명시험을 설계하였다. 피에조센서 고장에 주요한 영향을 미치는 온도 스트레스를 가속 스트레스 인자로 설정하였다. 하지만 적절한 가속 스트레스 수준을 설정하기 위해선 피에조센서의 동작한계에 대한 정확한 파악이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 피에조센서의 온도 스트레스 인자에 대한 최대 가속조건 탐색 실험을 통해 보다 정확한 동작한계를 파악하고자 하였다.

### 3. 실험 구성 및 방법

본 장에서는 온도 스트레스 인자에 따른 피에조센서의 최대 가속조건 탐색 실험에 관해 자세히 기술하였다. 크게 실험에 사용된 장비, 조건 등과 같은 실험구성과 신뢰도 높은 결과 도출을 위한 실험방법으로 구분하여 서술하였다.

#### 3.1 실험 구성

고준위방사성폐기물 처분장에서 피에조센서는 전술한바와 같이 콘크리트로 이루어진 공학적 방벽(EBS)과 암반으로 이루어진 천연 방벽(NBS)에 대한 균열 모니터링에 활용되므로 본 연구에서는 화강암 시편을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험은 Fig. 4와 같이 구성하여 수행하였다. 실험에 사용된 센서는 PCB PIEZOTRONICS의 가속도센서로 현장에서 흔히 사용되는 산업용 피에조센서이다. 실험에 사용된 피에조센서의 사양은 Table 2와 같다. 피에조센서를 통해 수집된 신호는 컨디셔너에서 증폭되고 필터를 통해 노이즈가 제거되는 과정을 바탕으로 오실로스코프에 나타나게 된다. 컨디셔너의 경우, 신호의 증폭을 10배로 설정하여 신호를 수집하였다. 이때 노이즈도 동시에 증폭되므로 필터를 사용하여 노이즈를 제거하고자 하였다. 필터는 저주파 통과 필터(Low-Pass Filter, LPF)를 이용하여 10 kHz의 임계값을 적용하였다. 이는 화강암의 공진주파수가 일반적으로 5~7 kHz의 범

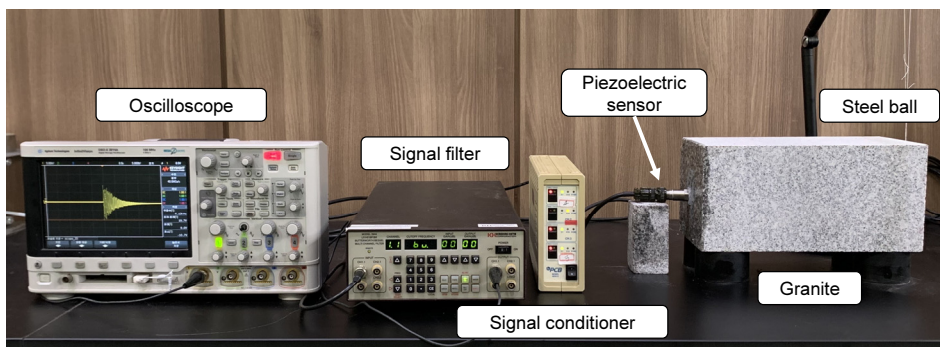
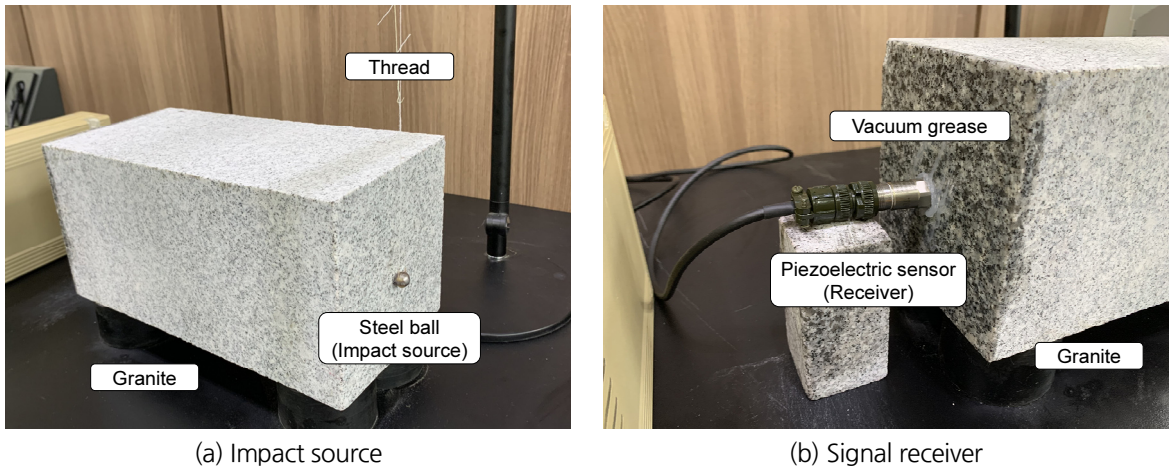


Fig. 4. Experimental setup for impact signal acquisition of piezoelectric sensor

위에 존재하며, 피에조센서의 주파수 상한값이 10 kHz임을 고려한 값이다. 또한 충격신호의 경우, 화강암 시편에 대한 가진원은 Fig. 5(a)와 같이 실에 쇠구슬을 연결하여 동일한 높이에서 낙하시키는 방법으로 시편의 중심부에 일정한 충격을 가했다. 화강암 시편에 대한 피에조센서의 부착은 Fig. 5(b)와 같이 vacuum grease를 사용하여 가열된 센서 또한 효과적으로 부착하였다.

**Table 2.** Specification of piezoelectric sensor (PCB PIEZOTRONICS)

Sensitivity (mV/g)	Measurement range (g)	Frequency range (Hz)	Resonant frequency (kHz)	Temperature range (°C)
100 (±10 %)	±50	0.5~10,000	25	-54~121



**Fig. 5.** Excitation of impact signal for granite specimen

### 3.2 실험 방법

피에조센서의 최대 가혹조건 탐색 실험은 모든 온도 조건에 동일한 센서를 지속적으로 사용하는 방법(Method 1)과 온도 조건마다 새로운 센서를 사용하는 방법(Method 2), 총 두 가지의 방법을 통해 수행되었다. 두 방법 모두 130°C부터 단계적으로 온도를 증가시키며 고장이 발생될 때까지 반복적으로 진행되었다. Method 1은 두 개의 피에조센서(Sample A, Sample B)를 온도 조건에 따라 지속적으로 사용하는 것으로 실험 방법은 Fig. 6과 같다. Sample A와 Sample B를 오븐에 넣기 전, 실온에서 정상 상태의 충격신호를 수집한다. 130°C의 오븐에 Sample A와 Sample B를 넣고 60분마다 꺼내어 각각 3번의 충격신호를 수집한다. 충격신호 수집은 총 480분 간 진행하며 피에조센서의 고장유무를 관찰한다. 피에조센서의 고장이 발생되지 않을 경우, 960분 간 실온에 노출시켜 고온 상태의 센서를 정상 상태로 충분히 복원시킨다. 이후 오븐의 온도를 10°C 증가시켜 전술한 순서를 센서의 고장 발생 시까지 반복 수행한다.



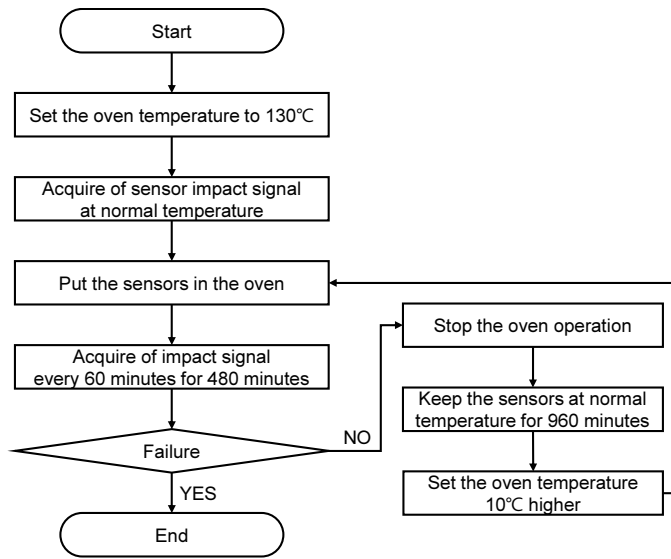


Fig. 6. Flow chart of Method 1 using the same piezoelectric sensors

Method 2는 온도 조건에 따라 새로운 센서를 사용하는 것으로 실험 방법은 Fig. 7과 같다. 처음 130°C 온도 조건은 Method 1에서 전술한 순서를 동일하게 적용한다. 하지만 피에조센서의 고장이 발생되지 않을 경우, 사용했던 피에조센서를 복원시켜 지속적으로 사용하는 것이 아닌 새로운 피에조센서(e.g., Sample C, Sample D, Sample E, Sample F, etc)로 교체하여 실험을 진행한다. 즉, 오븐의 온도를 10°C 증가시킬 때마다 두 개의 새로운 피에조센서로 교체하여 고장 발생 시까지 반복 수행한다.

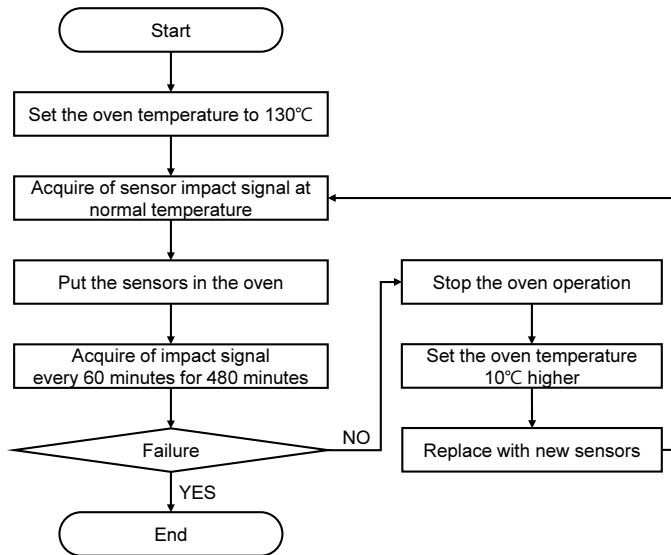


Fig. 7. Flow chart of Method 2 using the new piezoelectric sensors

## 4. 실험 결과 및 고찰

본 절에서는 피에조센서의 최대 가혹조건 탐색 실험결과에 대해 자세히 기술하였다. 검토 내용은 Method 1과 Method 2를 바탕으로 충격신호에 대한 피에조센서 각각의 peak voltage ( $V_{0-p}$ ), peak to peak voltage ( $V_{p-p}$ ), 그리고 Method 간의 비교 등이다. 실험을 통해 수집된 충격신호는 각 센서마다 다른 신호감도(sensitivity)를 가지므로 후처리를 통해 모두 100 mV/g로 정규화 및 보정하여 오차를 최소화하였다. 또한 피에조센서의 고장은 정상 상태에서 취득된 각 센서의 충격신호를 기준으로  $\pm 20\%$  값을 벗어나면 고장으로 판단하였다. 산업에서는 일반적으로 온도 변화에 대한 피에조센서의 신호감도 편차를  $\pm 20\%$  범위 내에서 변화되는 것을 사용가능한 정상신호로 판단한다. 따라서 본 연구에서는 이를 고려하여 고장 판단기준을 설정하였다.

### 4.1 Method 1에 의한 동작한계

Method 1을 바탕으로 온도 스트레스 인자에 대한 Sample A와 Sample B의 peak voltage ( $V_{0-p}$ )는 Fig. 8로 관찰되었다. 전술한바와 같이 FMEA 분석을 통해 파악된 고온 조건에서 피에조센서의 주요 고장모드는 피에조 필름 변형에 의한 수집신호 감도 변화이다. 실험을 통해 수집된 충격신호의 peak voltage ( $V_{0-p}$ )를 관찰한 결과, Sample A와 Sample B 모두 130°C부터 170°C까지의 고온 조건에서는 불규칙한 신호가 수집되었다. 이는 추후 수집신호의 감도 변화에 따른 고장모드가 발현될 것으로 예상된다. 반면에 Sample A와 Sample B 모두 180°C 고온 조건에서의 충격신호는 실험 시작 후 60분만에 수집되지 않는 결과를 보였다. 이는 신호 감도 변화에 따른 고장모드가 아닌 신호가 수집되지 않는 다른 고장모드가 발현됨을 알 수 있다.

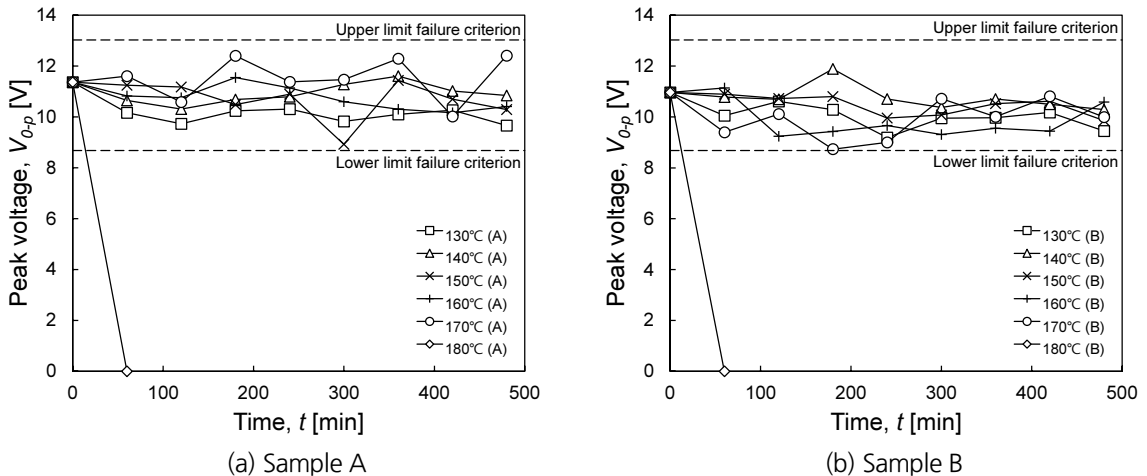


Fig. 8. Peak voltage ( $V_{0-p}$ ) of piezoelectric sensors according to temperature stress

또한 온도 스트레스 인자에 대한 Sample A와 Sample B의 peak to peak voltage ( $V_{p-p}$ )는 Fig. 9와 같이 관찰되었다. Sample A와 Sample B 모두 130°C부터 170°C까지의 고온 조건에서는 시간이 지남에 따라 수집된 충격 신호의 peak to peak voltage ( $V_{p-p}$ )가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 온도 스트레스 인자에 의해 피에조 필름이 변형되므로 충격신호에 의해 발생하는 전하량이 달라지기 때문이다. 추후 130~170°C까지의 동일한 온도 스트레스에 지속적으로 노출 시 신호 감도 변화에 따른 고장모드가 발현될 것으로 예상된다. 반면에 Sample A와 Sample B 모두 180°C 고온 조건에서의 충격신호는 실험 시작 후 60분만에 수집되지 않았다. 즉 앞서 전술한 peak voltage ( $V_{0-p}$ )와 마찬가지로 180°C 온도 조건에서는 신호가 수집되지 않는 다른 고장모드가 발현된 것으로 판단된다. 따라서 Method 1에 따른 피에조센서의 온도 스트레스 인자에 대한 동작한계는 170~180°C 범위에 존재한다.

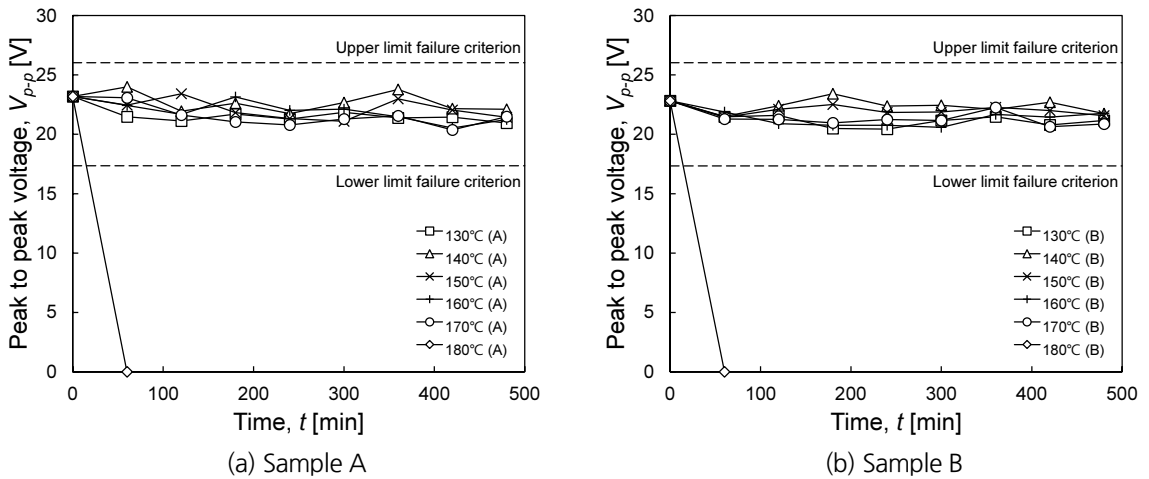


Fig. 9. Peak to peak voltage ( $V_{p-p}$ ) of piezoelectric sensors according to temperature stress

#### 4.2 Method 2에 의한 동작한계

Method 1은 모든 고온 조건에서 동일한 센서를 사용하므로 피로에 대한 영향이 존재할 수 있다. 이러한 영향을 최소화하기 위해 Method 2는 고온 조건이 증가될 때마다 두 개의 새로운 센서로 교체하여 실험을 진행하였다. Method 2를 바탕으로 온도 스트레스 인자에 대한 각 센서의 수집신호는 Fig. 10과 같이 도출되었다. Fig. 10(a)에서 볼 수 있듯이 고온 조건마다 교체된 새로운 센서들의 수집된 peak voltage ( $V_{0-p}$ )는 130°C부터 170°C까지의 고온 조건에서는 신호의 감도가 변화되는 것이 확인되었다. 반면에 180°C 고온 조건에서의 충격신호는 실험 시작 후 60분만에 수집되지 않는 결과를 보였다. 이는 Method 1과 마찬가지로 피에조필름 변형에 의해 발현될 것으로 예상되는 신호 감도 변화 고장모드가 아닌 신호가 수집되지 않는 다른 고장모드가 발현된 것으로 판단된다.

Fig. 10(b)는 각 피에조센서들의 고온 조건에 따른 peak to peak voltage ( $V_{p-p}$ ) 결과를 도시한 것으로, 130°C

부터 170°C까지의 고온 조건에 노출된 모든 센서들은 시간이 지남에 따라 peak to peak voltage ( $V_{p-p}$ ) 값이 감소하는 경향을 보인다. 이는 온도 스트레스 인자에 의한 피에조필름의 변형으로 수집신호의 감도가 변화된 결과로 보인다. 반면에 180°C 고온 조건에서는 60분이 지난 시점에서 바로 신호 수집이 되지 않았으므로 기존과 다른 고장모드가 발현된 것으로 보이며, 이를 피에조센서의 동작한계라 판단할 수 있다. 따라서 Method 2에 따른 피에조센서의 온도 스트레스 인자에 대한 동작한계는 170~180°C 범위에 존재한다.

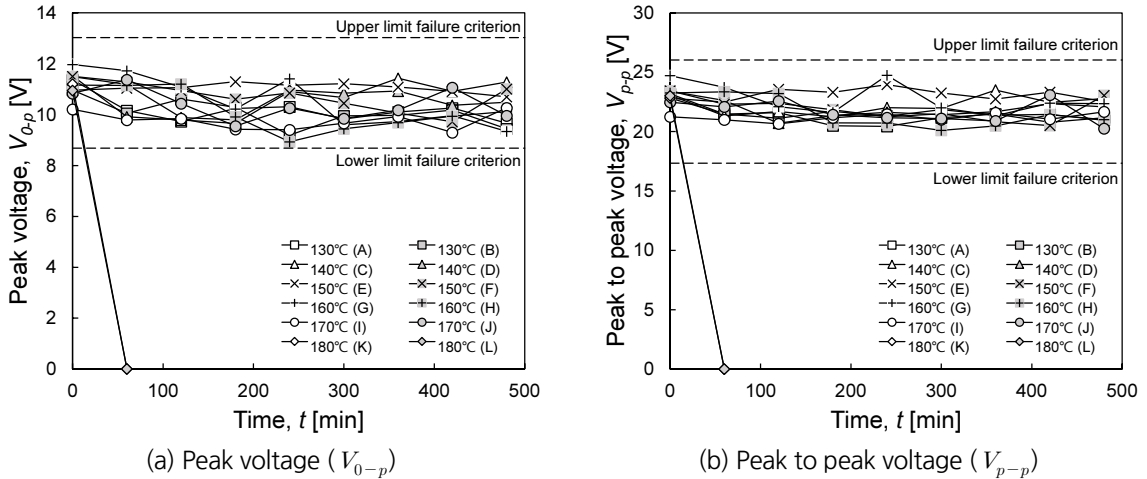


Fig. 10. Experimental result of piezoelectric sensors for Method 2

최종적으로 Method 1과 Method 2를 비교해보면 두 방법 모두 온도 스트레스 인자에 대한 최대 가속조건에 따른 동작한계는 170~180°C 범위에 존재한다는 결론을 얻을 수 있다. 따라서 온도 스트레스 인자에 대한 가속수명시험 설계 시 스트레스 수준은 170~180°C 범위보다 낮은 조건으로 설정하는 것이 합리적이라 판단된다. 또한 이를 통해 피로에 의한 영향보다 피에조센서가 노출되는 절대적인 고온 환경조건이 센서의 고장을 발현하는데 지배적이라 볼 수 있다. 따라서 추후 피에조센서의 가속수명시험을 위한 스트레스 수준 설정에 있어 많은 시료 수를 사용하기보다 적은 시료 수를 사용하여 경제적이고 효율적으로 최대 가속조건을 탐색할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 고준위방사성폐기물 처분장의 구조물 건전성 모니터링용 피에조센서의 온도 스트레스 인자에 대한 가속수명시험을 설계하였다. 문헌조사를 바탕으로 피에조센서의 고장모드 및 고장메커니즘을 분석하였다. 효과적인 가속수명시험에 필수 요소인 가속 스트레스 수준 설정을 위해 피에조센서의 최대 가속조건 탐색 실험을 두 가지 방법(Method 1, Method 2)으로 수행하였다. 온도 스트레스에 따른 피에조센서 각각의 충격신호에 대한

peak voltage ( $V_{0-p}$ ), peak to peak voltage ( $V_{p-p}$ )를 관찰함으로써 동작한계를 도출하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 고준위방사성폐기물 처분장의 고유 환경조건(고온, 고습, 방사선) 중 피에조센서의 주요 고장 인자는 온도 스트레스이며, 고온 조건에 노출 시 피에조센서는 수집신호 감도가 변화되거나 신호가 수집되지 않는 고장모드를 발현한다. 따라서 온도 스트레스를 가속 스트레스 인자로 설정하였다.
2. 경제적이면서 신뢰도 높은 가속수명시험을 위해 가속 스트레스 수준의 수는 3개의 수준으로, 각 수준 별 시료 수는 5개로 설정하였다.
3. Method 1과 Method 2를 통해 도출된 피에조센서의 동작한계는 170~180°C 범위에 존재하므로 가속수명시험의 가속 스트레스 수준은 이보다 낮은 온도 조건인 150, 160, 170°C의 3개 수준으로 설정하는 것이 합리적이라 판단된다.
4. 온도 스트레스 인자에 대한 동작한계는 센서의 종류 및 모델에 따라 다를 수 있으나 본 연구에서 제시된 최대 가속 조건 탐색 실험방법을 활용하면 각기 다른 동작한계를 효율적으로 도출하여 신뢰도 높은 가속수명시험 설계가 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었습니다(NRF-2022M2E3A3015608). 두 번째 저자는 국토교통부의 스마트시티 혁신인재육성사업으로 지원되었습니다.

## 저자 기여도

황현중은 실험 수행, 데이터 수집 및 분석, 원고 작성을 하였고, 박창희는 실험 수행, 데이터 수집 및 해석, 원고 작성을 하였고, 홍창호는 연구 설계, 데이터 분석 및 해석을 하였고, 김진섭은 연구 설계, 원고 검토를 하였고, 조계춘은 연구 개념 및 설계, 원고 검토를 하였다.

## References

1. Bae, B.S., Seo, S.K. (2017), "Planning practical multiple-stress accelerated life tests", Journal of Applied Reliability, Vol. 17, No. 2, pp. 112-121.
2. Catelani, M., Ciani, L., Venzi, M. (2018), "Failure modes and mechanisms of sensors used in oil&gas applications", In Convegno Nazionale Sensori, Springer, Cham, pp. 429-436.
3. Chapman, N., Hooper, A. (2012), "The disposal of radioactive wastes underground", Proceedings of the Geologists' Association, Vol. 123, No. 1, pp. 46-63.

4. Chen, W.H., Gao, L., Pan, J., Qian, P., He, Q.C. (2018), "Design of accelerated life test plans - Overview and prospect", Chinese Journal of Mechanical Engineering, Vol. 31, No. 1, pp. 1-15.
5. Choi, H.J., Lee, J.Y., Kim, S.S. (2008), Korean reference HLW disposal system, KAERI/TR-3563/2008, Korea Atomic Energy Research Institute, pp. 1-20.
6. Escobar, L.A., Meeker, W.Q. (1995), "Planning accelerated life tests with two or more experimental factors", Technometrics, Vol. 37, No. 4, pp. 411-427.
7. Field, K.G., Remec, I., Le Pape, Y. (2015), "Radiation effects in concrete for nuclear power plants - Part I: Quantification of radiation exposure and radiation effects", Nuclear Engineering and Design, Vol. 282, pp. 126-143.
8. Jung, Y.M., Joo, W.J., Jeong, S.K. (2012), "Investigation into the worst stress condition for an accelerated life test of a compressor in refrigerators-acceleration factor and the reducible test time under high temperature", Journal of Power System Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 44-50.
9. Kessler, S.S., Spearing, S.M. (2002), "Design of a piezoelectric-based structural health monitoring system for damage detection in composite materials", Proceedings of the Smart Structures and Materials 2002: Smart Structures and Integrated Systems, SPIE, San Diego, Vol. 4701, pp. 86-96.
10. Kim, E.J., Cho, S., Sim, S.H. (2015), "A recent research summary on smart sensors for structural health monitoring", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 19, No. 3, pp. 10-21.
11. Kim, H.M., Wi, S.H., Lee, H.B. (2011b), "Life assessment of tire pressure sensor with accelerated life test", Proceedings of the Korean Reliability Society Conference, Gyeongsan, pp. 41-48.
12. Kim, J.J. (2009), "Accelerated life test and example", Journal of KSME, Vol. 49, No. 12, pp. 60-64.
13. Kim, J.S., Kwon, S.K., Sanchez, M., Cho, G.C. (2011a), "Geological storage of high level nuclear waste", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 721-737.
14. Kim, S.H., Yeom, J., Baek, I.S., Kim, J.S., Sung, S.I. (2020), "Determining the statistical sample size for reliability testing", Journal of Applied Reliability, Vol. 20, No. 1, pp. 84-93.
15. Lim, S.Y., Jang, I.H., Lee, Y.J., Lim, H.W. (2015), "Improvement through failure modes and failure mechanisms of piezoelectric sensors using the AVC", Journal of Advanced Engineering and Technology, Vol. 8, No. 2, pp. 135-140.
16. Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., He, K. (2015), "Mechanical properties of concrete at high temperature - A review", Construction and Building Materials, Vol. 93, pp. 371-383.
17. Seo, S.K., Yum, B.J. (1991), "Accelerated life test plans under intermittent inspection and type-I censoring: The case of weibull failure distribution", Naval Research Logistics (NRL), Vol. 38, No. 1, pp. 1-22.
18. Sung, S.I. (2015), "A review on the accelerated life test plan: 2006~2015", Journal of Applied Reliability, Vol. 15, No. 2, pp. 84-89.
19. Wlodkowski, P.A. (1999), Physics of failure modes in accelerometers utilizing single crystal piezoelectric materials, Doctoral Dissertation, University of Maryland, College Park, pp. 64-125.