

# HILS 기법을 적용한 신축관 이음 수명예측에 관한 연구

오정수\*, 조승현

한국기계전기전자시험연구원 기계금속센터

## A Study for Lifetime Prediction of Expansion Joint Using HILS

Jung-Soo Oh\*, Sueng-Hyun Cho

Division of Machinery Testing Center, Korea Testing Certification

**요약** 본 연구에서는 플랜트 기자재 중 수충격에 매우 취약한 신축관 이음을 대상으로 수충격 발생 시 신축관 이음의 신축량의 변화를 현장에서 취득한 후 HIL 시뮬레이터의 작동데이터로 적용한 HILS 기법을 적용한 진동내구 시험을 수행하였다. 또한 진동내구 시험 시 내구수명의 주요 스트레스 인자로 신축관 내부압력을 가정하였다. 진동내구 시험은 신축관 내부 설정압 따라 진행되었으며 수명데이터를 이용, 수명데이터를 잘 따르는 곡선을 접합하여 수명예측 모델식을 유도하였고 특정 내부 설정압에서의 시험 및 수명결과를 통하여 이를 검증하였다. 한편, 시험 중 발생된 신축관의 고장모드는 모두 벨로우즈 부 표면에 발생된 크랙과 크랙을 통한 누수 등이 있었다. 본 연구에서 유도한 수명예측 모델식은 설정압력을 스트레스 인자로 따르는 전형적인 역승모형이며 특정환경에서만 적용될 수 있는 한계를 지니고 있다. 이에 본 연구는 진동내구 수명의 가속요인인 압력 외 온도상태 등을 다양한 수명변수가 적용 가능한 복합수명예측 모델식을 개발할 예정이다.

**Abstract** This study used HILS to test an expansion joint, which is vulnerable to the water hammer effect. The operation data for the HIL simulator was the length rate of the expansion joint by the water hammer, which was used for life prediction based on the vibration durability. For the vibration durability test, the internal pressure of the expansion joint was assumed to be a factor of the durability life, and the lifetime prediction model equation was obtained by curve fitting the lifetime data at each pressure. During the test, the major failure modes of crack and water leakage occurred on the surface of the bellows part. The lifetime prediction model typically follows an inverse power law model. The pressure is a stress factor, and the model is effective in only a specific environment. Therefore, another stress factor such as temperature will be added and considered for a mixed lifetime prediction model in the future.

**Keywords** : Expansion joint, HILS, Lifetime Prediction, Vibration durability, Vibration reproducing, Waterhammer

### 1. 서론

배관계통 내 수충격(Waterhammer) 현상은 주로 급수 펌프의 정지로 인하여 유동 중의 유체에너지가 압력에너지로 변화하면서 충격파를 유발하고 이로 인해 배관계통을 구성하는 밸브 및 신축관 이음, 배관 등을 파손하게 된다[1].

이러한 현상을 완화하기 위해 배관 및 신축관 이음 등

설치 규정에 따라 에어챔버 및 체크밸브 등 설치를 권고하고 있으나 노후화된 플랜트 설비의 경우 설치공간의 제약과 높은 설치비용으로 인하여 적용이 용이하지 않으므로 아직도 많은 현장에서는 기자재 부품을 교체·수리하고 있는 실정이며 이는 플랜트 설비의 유지보수의 효율성 저하를 유발하는 주요인으로 꼽히고 있다.

대다수의 플랜트 설비용 기자재의 경우 국내·외 시험표준(KS, ISO, ASNI/ASME 등)에 의거, 제품의 검사

본 논문은 국토교통부 2017 국토교통기술촉진연구사업 (no. 16CTAP-C117188-01)의 지원으로 수행되었음

\*Corresponding Author : Jung-Soo Oh(Korea Testing Certification)

Tel: +82-31-470-8471 email: ojs82@kctc.re.kr

Received January 31, 2018

Revised March 19, 2018

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

및 성능시험을 통해 제품 사용 전, 이상 유·무를 판정하고 있으나 실제 작동환경 및 운전조건에 따라 제품 성능이 상이하고 수충격과 같은 과도한 조건에서는 제품의 파손에 취약하기에 실제 수명을 예측하기에는 어려움이 있다[2-4].

이에 대한 방안으로 근래에는 전기·전자 및 일부 기계·부품류를 대상으로 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation) 기법을 통한 수명예측 연구들이 활발히 진행 중에 있다[5,6].

이에 본 연구는 위 기법을 적용하여 실제 플랜트 기자재의 작동조건을 동적 모사함으로써 기자재의 수명예측을 도출하려고 한다.

## 2. 수명예측 진단대상

Fig. 1은 본 연구의 시료인 150A 용 벨로우즈 형 신축관 이음 (Bellows Type Expansion Joint)이다. 벨로우즈 신축관 이음(이하, 신축관)은 작동유체의 온도변화에 따른 팽창 및 수축에 대한 열변형과 진동 및 수충격 등 이상 충격에 따른 충격흡수를 대비하기 위해 플랜트 설비 시스템에 적용되고 있다.

본 연구의 시료인 신축관의 설계수압은 10 kg/cm<sup>2</sup>이며 신축량은 ± 15 mm 이다. 또한 플랜지 부의 재질은 SS400, 벨로우즈 부의 재질은 STS 304이며 0.6t 의 벨로우즈 막이 2중으로 구성되어 있으며 벨로우즈 각 부위는 용접구조로 구성되었다.

신축관의 주요 고장모드는 벨로우즈 표면의 크랙에 의한 누수와 충격에 의한 외관의 변형 및 충격에 의한 배관과의 연결·지지부 (볼트 및 너트)의 파손 등이 있다.

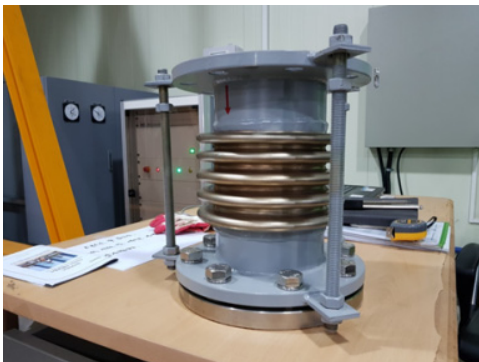


Fig. 1. Specimen : Bellows type expansion joint

## 3. 현장데이터를 적용한 수명 도출

### 3.1 HILS 기법 적용을 위한 현장데이터

Fig. 2는 송수배관계로 수충격 발생 시 신축관으로 전달되는 신축 변화량을 측정하기 위한 측정 셋업이다. 신축변화 측정을 위해 가속도계(Max. ± 98.1 m/sec<sup>2</sup>)를 적용하였고 시축관 이음 축방향으로 부착하였다.

Fig. 3의 상단의 결과는 펌프의 기동 정지 후 수충격이 발생되었을 때 신축관의 축방향으로 전달된 신축 변화상태를 변위량으로 환산한 결과이다.

수충격에 의한 신축량의 P-P (Peak to Peak) 값은 약 9 mm 로 수준으로 보이고 있으며 신축 발생속도 최대 120 mm/sec 수준으로 본 연구에서 구축 중인 HIL 시뮬레이터의 가진 성능(Max. 130 mm/sec)을 충족하기에 HIL 시뮬레이터의 작동 데이터로 적용하고자 한다[7].

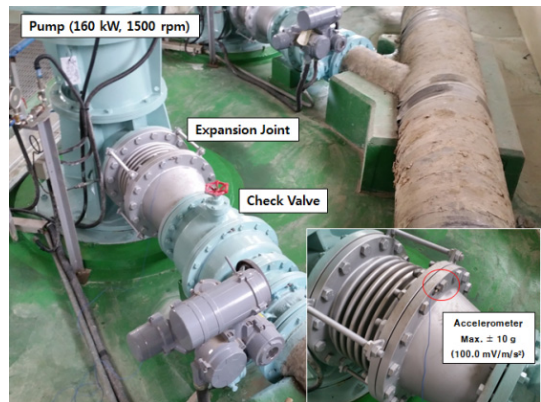


Fig. 2. Measurement setup for change of expansion joint after waterhammer

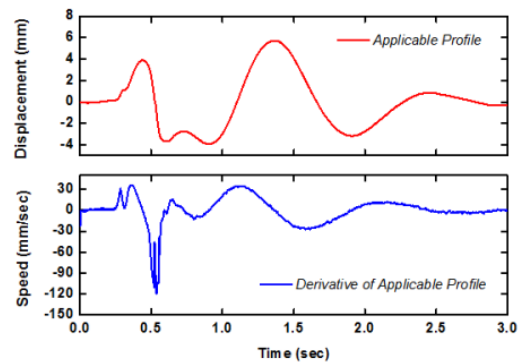


Fig. 3. Operating data applied to HIL Simulator for vibration reproducing

### 3.2 진동내구 시험셋업

Fig. 3의 신축변화 프로파일을 신축관 진동내구 시험에 적용하기 위한 셋업을 Fig.4와 같이 구성하였다.

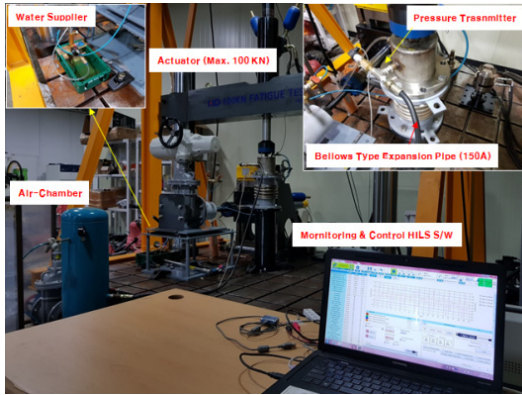


Fig. 4. Set-up for durability test of expansion joint using HILS

시험셋업은 크게 유압식 액추에이터 (Max. 100 kN) 및 액추에이터 제어 및 모니터링용 소프트웨어부로 구성되어 되었다.

액추에이터 하단에 신축관을 설치 후 신축관 외부에 수압의 공급과 압력을 조정할 수 있는 수압 테스트기를 두었으며 수압 공급 시 수압의 상태와 액추에이터 구동에 따른 신축관 내부 압력변화를 확인 할 수 있도록 압력 트랜스미터 (Max. 60 kg/cm<sup>2</sup>)를 장착하였다.

또한 액추에이터 구동 시 신축관 내부의 과도한 압력을 흡수 및 설정압력 값을 일정하게 유지하기 위하여 압력챔버를 설치하였고 물의 온도 상온(20 ± 5 °C)을 유지하였다.

### 3.3 시험계획

신축관 고장모드의 주요 요인으로는 신축관 내부에 작용하는 급작스런 내압의 변화나 작동유체의 온도상태, 충격에 의한 신축관 내·외부의 파손 등이 있으나 본 연구에서는 먼저 신축관 작용하는 진동내구특성을 살펴보고자 한다.

우선 진동내구 특성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 신축관 내부 상태압력을 주요 인자로 결정하였다. 각 시험조건과 수량은 Table 1과 같으며 진동내구성 시험 중 신축관의 주요고장 모드인 누수가 발생시 시험은 종료하였다.

Table 1. Test condition according to inner pressure of expansion joint

no.	Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Q'ty of Sample
1	10	3
2	11	3
3	13	3

### 3.4 진동내구 시험결과

신축관 내부압력에 따른 진동내구성 시험결과를 Table 2에 나타내었다. 결과를 살펴보면 신축관 내부수압이 10 kg/cm<sup>2</sup> 인 경우 고장발생까지의 평균수명은 약 2,700 회를 보였으며 내부 수압이 11 kg/cm<sup>2</sup> 의 경우에는 약 1,800 회, 내부 수압이 13 kg/cm<sup>2</sup> 인 경우에는 1,000 회 수준으로 나타났다.

한편, 신축관 내부수압이 낮을수록 시험편차가 높아지는 경향을 보이고 있다. 이는 신축관 진동내구 시험 시 신축관 내부 압력의 변화와 그에 따른 벨로우즈 부의 변형과 팽창이 저압영역에서는 비교적 느리게 발생되면서 시험오차에 영향을 미쳤을 것이라 추정된다.

Fig. 5에 본 시험중에 발생된 신축관 외부 고장모드를 나타내었다.

Table 2. Test results for each condition (cycle)

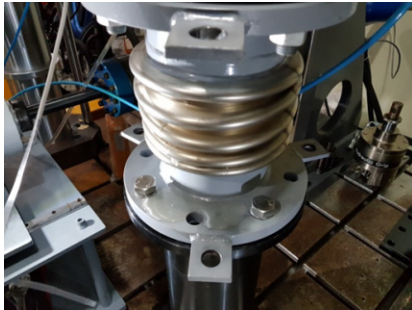
Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Sample	Life (cycle)	Average Life (cycle)
10	#1	2,403	2,733
	#2	2,589	
	#3	3,208	
11	#1	2,025	1,814
	#2	1,890	
	#3	1,528	
13	#1	1,138	1,073
	#2	1,257	
	#3	824	



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Failure mode  
 (a) Deformation  
 (b) Crack on surface of bellows part  
 (c) Leakage under durability test

#### 4. 수명예측 모델식 개발

##### 4.1 수명예측 모델식

우선 신축관의 내구수명 분포는 기계부품류의 수명분포로 적합한 역승모델(Inverse power law model)을 따른다고 가정하고 내구수명 모델식 (1)을 다음과 같이 나타내었다.

$$L = A_1 e^{-\left(\frac{P_s}{S}\right)} + C \quad (1)$$

- L = 예상 수명 (사이클)
- A<sub>1</sub> = 역승모델의 상수
- P<sub>s</sub> = 스트레스 인자 (압력)
- S = 스트레스 지수
- C = 상수

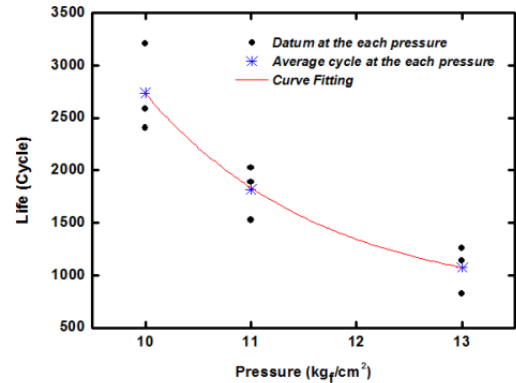


Fig. 6. Curve fitting for datum at each pressure

한편, 모델식의 각 계수를 추출하기 위해 시험결과를 Fig. 6 과 같이 도시한 후 각 각 수압에 따른 시험결과를 지나는 커브를 피팅(Fitting)하였다.

이때 커브의 경향을 잘 따르는 수학적식은 전형적인 역승모델이며 상수 A<sub>1</sub>는 845,907.9, 스트레스 지수 B는 1.651, 상수 C는 750.8를 얻을 수 있었다.

Table 3. Test results according at 7 kg/cm<sup>2</sup>

Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Qty	Life (cycle)	Average Life (cycle)
7	#1	15,128	12,420
	#2	11,229	
	#3	10,904	

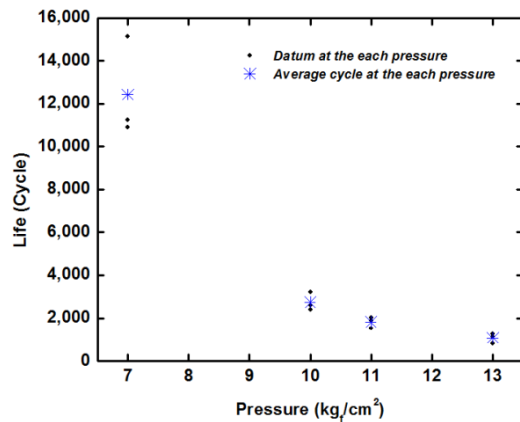


Fig. 7. Entire durability results of expansion joint

##### 4.2 수명예측 모델식 검증

4.1 절에서 유도한 모델식 검증을 위해 수압 7 kg/cm<sup>2</sup>

에서의 진동 내구수명을 수행하였다.

시험결과 신축관의 진동내구 평균수명은 약 12,400 회 수준으로 수명예측 모델식을 통한 예측수명은 약 12,946 회 수준과 시험결과 편차 범위내에서 비교적 잘 맞는 결과를 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 실제 운용중인 플랜트용 신축관 이음의 수명예측 모델식을 유도 하고 이를 검증하였다.

1. 수명예측을 위한 진동내구 시험용 가진 데이터는 실제 신축관 이음에 수충격이 전달되었을 때 신축관 이음의 신축량을 이용하였다.
2. 진동내구 시험 시 내구수명의 주요 요인을 신축관 이음 내부압력으로 가정하였다.
3. 신축관 이음 내부설정압에 따른 고장수명 시험결과를 이용하여 수명예측 모델식을 유도하였고 이를 검증하였다.
4. 본 연구에서 개발한 수명예측 모델식은 특정환경 및 운전조건에서 운용중인 신축관 이음에 국한될 수 밖에 없는 한계가 있다.
5. 향후 본 연구는 압력 외에 신축관 내부의 작동유체의 온도영향 등을 진동내구 수명의 인자로 한 진동내구 시험을 수행하여 복합 수명예측 모델식을 개발할 예정이다.

## References

- [1] J. H. Lee, H. H. Lee, B. H. Kyoung, J. W. Woo, K. H. Lee, " A Study of Water-Hammer Control with Statuette-Piping", *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Annual Spring Conference*, pp. 674-678, 2007.
- [2] "KS B 4500 : Expansion Joints", Korea Standard Association, 2016.
- [3] "ISO 15348(en) : Pipework-Metal bellows expansion joints", *International Organization for Standardization*, 2002.
- [4] "ASME B31.3 : Processing Piping", The American Society of Mechanical Engineers", 2016.
- [5] N. J. Lee, D. C. Lee, C. G. Kang, "Study on a Brake HILS System for a Railway Vehicle", *The Korean Society for Urban Railway, Journal of The Korean Society For Urban Railway*, vol. 1, no. 3, pp 91-94,

2013.

- [6] K. Y. Jeong, R. C. Kang, H. C. Lee, "Prediction of Iron Loss Resistance by Using HILS System", *The Korean Society Of Automotive Engineers, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 23, no. 1, pp25-33, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2015.23.1.025>
- [7] J. S. Oh, D. K. Kang, J. S. Heo, "Development of HIL Simulator for Vibration Reproducing of Waterhammer", *Korea Academy Industrial Cooperation Society, Fall Conference*, pp. 325-326, 2017.

### 오 정 수(Jung-Soo Oh)

[정회원]



- 2012년 8월 : 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과 (공학석사)
- 2009년 3월 ~ 2012년 5월 : 한국기계연구원 초정밀시스템연구실 연구원
- 2016년 4월 ~ 현재 : 한국기계전기전자시험연구원 연구원

<관심분야>

정밀측정, 초정밀기계시스템, 기계요소부품

### 조 승 현(Sueng-Hyun Cho)

[정회원]



- 2014년 2월 : 국민대학교 자동차공학 (공학석사)
- 2015년 4월 ~ 현재 : 한국기계전기전자시험연구원 연구원

<관심분야>

기계재료, 자동차, 에너지, 친환경