

# 온도상태에 따른 신축관 이음의 수명예측에 관한 연구

오정수\*, 이봉수

한국기계전기전자시험연구원 기계금속센터

## A Study for Lifespan Prediction of Expansion by Temperature Status

Jung-Soo Oh\*, Bong-Soo Lee

Division of Machinery Testing Center, Korea Testing Certification

**요약** 본 연구에서는 플랜트 설비 부품류 중 충격에 취약한 신축관 이음을 대상으로 수충격 발생 시 신축관 이음의 신축량을 유압식 액추에이터의 작동데이터로 적용하여 진동내구 시험을 수행하였다. 진동내구 시험 시 내구수명의 가속 요소로 신축관 내부의 온도상태를 가정하고 온도상태를 30℃부터 50℃ 및 65℃로 가속화한 진동내구 시험을 진행하였다. 각 조건별 온도상태별 수명데이터들은 아레니우스 모델식을 따른다고 가정하고 각 수명데이터를 선형화하여 선형식의 상수값과 활성화 에너지 계수를 유도하였다. 또한 유도된 모델식으로부터 85℃ 경우의 예측 수명과 85℃ 온도상태에서의 시험 수명결과와 비교를 통해 작은 편차 범위내에서 유도된 모델식의 유효성을 검증하였다. 한편, 시험 중과 시험 후 발견된 신축관의 고장모드에서는 누수 및 벨로우즈 부 내부 슬리부의 이탈과 내부변형 등을 확인할 수 있었다. 향후 본 연구는 진동내구 수명의 가속요인인 온도상태 외 압력상태 등 다양한 수명변수를 적용한 복합수명예측 모델식을 개발하고 검증할 예정이다.

**Abstract** In this study, an expansion joint that is susceptible to waterhammer was tested for its vibration durability. The operation data for the hydraulic actuator was the expansion length of the expansion joint when the waterhammer occurred. In the case of the vibration durability test, the internal temperature status of the expansion joint was assumed to be a stress factor and a lifespan prediction model was assumed to follow the Arrhenius model. A test was carried out by increasing the internal temperature status at 30 °C, 50 °C, and 65 °C. By a linear transformation of the lifespan data for each temperature, a constant value and activation energy coefficient was induced for the Arrhenius equation and verified by comparing the value of a lifetime prediction model with the experimental value at 85°C. The failure modes of the ongoing or finished test were leakage, bellows separation, and internal deformation. In the future, a composite lifespan prediction model, including two more stress factors, will be developed.

**Keywords** : Arrhenius model, Accelerated life test, Expansion joint, Lifespan prediction, Vibration reproducing

### 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].

ICT 기술의 향상은 센서류를 활용한 플랜트 산업의 안전상태 실시간 모니터링뿐만 아니라 자료의 빅데이터화를 가능하게 하여 설비의 이상을 감지할 수 있는 진단 기술 향상을 촉진하고 있는 추세이다.

반면, 고장발생의 예측과 잔여수명(Remaining useful life, RUL) 평가에 있어서는 현재까지도 방대한 양의 고장예측 알고리즘의 부족으로 아직 정확한 수명예측이 어

본 논문은 국토교통부 2018 국토교통기술촉진연구사업 (No. 16CTAP-C117188-01)의 지원으로 수행되었음

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

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

Received August 14, 2018

Revised (1st September 5, 2018, 2nd October 1, 2018)

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

려운 실정이다.

한편, 고장수명 예측 기법으로 가속수명시험(Accelerated life test, ALT)을 통한 수명예측 모델식 유도가 있다.

본래 가속수명시험은 인위적으로 스트레스 수준을 사용 조건보다 높임으로써 시험시간을 단축시킬 목적으로 고안된 신뢰성 시험의 일종이나 시험결과를 수명-스트레스 모델식에 적용하여 고장예측 수명에도 적용이 가능하다[2-4].

이에 본 연구는 실제 플랜트 기자재의 현장 작동조건을 가속수명시험에 적용함으로써 고장수명예측모델을 도출하려고 한다.

## 2. 수명예측 진단대상

Fig. 1은 본 연구의 시료인 125A용 단식형 신축관 이음(Single Type Expansion Joint)이다. 단식형 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.



Fig. 1. Specimen : Bellows type expansion joint

본 연구의 시료인 신축관의 설계수압은  $10 \text{ kg/cm}^2$ , 적용온도는 최대  $220^\circ\text{C}$  이하이며 작동유체는 증기 및 냉·온수, 가스 등이나 플랜트용 송수배관계에 적용시 작동온도는  $30 \sim 80^\circ\text{C}$  이다.

또한, 신축량 최대  $35 \text{ mm}$  이며 플랜지 부의 재질은 SS400, 벨로우즈 부의 재질은 STS 304로  $0.6 \text{ t}$ 의 벨로우즈 막이 2중으로 구성되고 외부 충격 방지용 외통부가 벨로우즈 부를 감싸는 구조로 구성되었다.

신축관의 주요 고장모드는 벨로우즈 표면의 크랙에 의한 누수와 충격에 의한 내·외관의 변형 및 충격에 의한 배관과의 연결·지지부의 파손 등이 있다.

## 3. 현장데이터를 적용한 수명 도출

### 3.1 진동내구 시험용 현장데이터

Fig. 2는 송수배관계의 펌프의 기동 정지 후 수충격이 발생 시 측정·유도된 현장데이터로써 신축량의 최대 P-P(Peak to Peak)의 값은 약  $9 \text{ mm}$  이다[5].

본 연구에서는 진동 내구성 시험용 유압식 가진기로 신축관의 신축량을 변위 제어용 작동데이터로 반복 적용할 진동내구 시험에 적용하고자 한다[6].

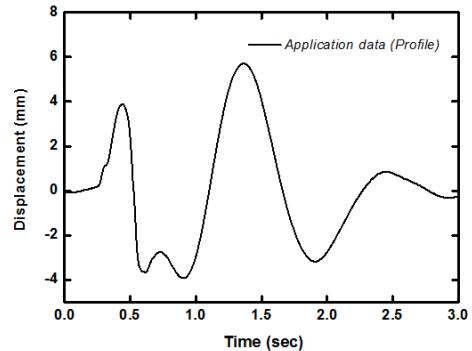


Fig. 2. Operating data applied to hydraulic actuator for vibration reproducing

### 3.2 진동내구 시험셋업

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

시험셋업은 크게 유압식 액추에이터(Max.  $100 \text{ kN}$ ) 및 액추에이터 제어, 그리고 모니터링용 소프트웨어부로 구성이 되었다.

액추에이터 하단에 신축관을 설치 후 신축관 외부에 수압의 공급과 압력을 조정할 수 있는 수압 테스터기를 두었으며, 수압 공급 시 수압의 상태와 액추에이터 구동에 따른 신축관 내부 압력변화를 확인할 수 있도록 압력 트랜스미터 (Max.  $4,903.3 \text{ kPa}$ )를 장착하였다.

한편, 온도변화에 따른 신축관 이음의 진동내구시험을 위해 신축관 하단에 히터를 장착하고 온도제어는  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  이내로 설정하였다.

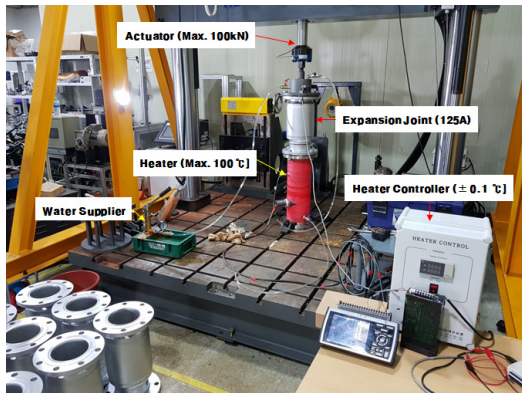


Fig. 3. Set-up for durability test of expansion joint using in-situ data

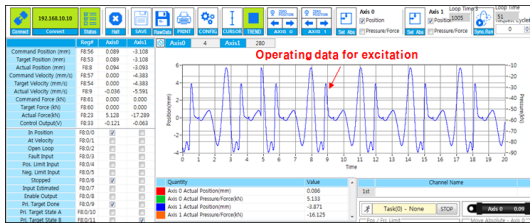


Fig. 4. Real-time monitoring for continuous excitation

### 3.3 가속 시험계획

신축관 고장모드의 주요 요인으로는 신축관 내부에 작용하는 과도한 내압의 변화나 충격에 의한 진동 등이 있을 수 있으며, 3.1절과 같은 충격 발생에 따른 진동내구특성을 살펴보고자 한다.

우선 진동내구 수명특성의 가속 요인으로 본 연구에서는 신축관 내부 온도상태를 주요 인자로 설정하고 온도 상태별 내구수명을 도출하기 위해 Fig. 2의 신축량 변화량을 고장 발생이 일어나기까지 Fig. 4와 같이 연속적으로 적용하였다. 또한 온도상태를 단계적으로 증가시켜 진동내구성 시험을 수행하였다. 각 시험조건과 수량은 Table 1과 같다.

Table 1. Test condition according to inner temperature status of expansion joint

Case	Temperature (°C)	Qty of specimen
I	30	3
II	50	3
III	65	3

한편, 온도상승은 압력상승을 초래할 수 있으므로 본 연구에서는 신축관 내부의 온도가 시험설정 온도로 안정화된 이후 초기 설정압력을 980.6 kPa로 설정하였고, 시험 중 신축관의 주요고장 모드인 누수(Leakage)가 발생 시 시험은 종료하였다.

### 3.4 진동내구 시험결과

신축관 내부 온도상태에 따른 진동내구성 시험결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Test results for each condition

Temperature (°C)	Specimen	Life (cycle)	Average life (cycle)
30	#1	521	904
	#2	937	
	#3	1254	
50	#1	494	605
	#2	846	
	#3	612	
65	#1	507	502
	#2	524	
	#3	475	

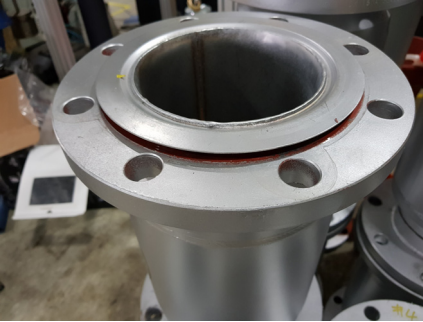
결과를 살펴보면 신축관 내부 온도상태가 30°C 인 경우 고장발생까지의 평균수명은 약 900회를 보였으며, 내부 온도상태가 50°C의 경우에는 약 600회, 내부 온도상태가 60°C의 경우에는 약 420회 수준으로 신축관 내부 온도상태가 높을수록 수명은 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

또한 신축관 수명편차가 작아지는 경향을 보이는데 이는 신축관 진동내구 시험 시 신축관 내부 압력의 변화와 그에 따른 벨로우즈 부의 팽창이 낮은 온도상태에서는 상대적으로 느리게 발생되면서 시험오차에 영향을 미쳤을 것이라 추정된다.

Fig. 5에 본 시험에서 발생된 신축관의 고장모드를 나타내었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Failure mode

- (a) Inner deformation
- (b) Separation from flange part
- (c) Leakage under durability test

## 4. 수명예측 모델식 개발

### 4.1 수명예측 모델식

우선 온도변화에 따른 신축관의 내구수명 분포는 아레니우스 모델(Arrhenius model)을 따른다고 가정하고 내구수명 모델식 (1)을 다음과 같이 나타내었다.

$$L = A e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (1)$$

$L$  : 예상 수명 (사이클)

$A$  : 아레니우스 모델 상수

$E_a$  : 활성화 에너지(eV)

$k$  : 볼츠만 상수 ( $8.167 \times 10^{-5} eV/K$ )

$T$  : 절대온도 (K)

한편, 아레니우스 모델식을 다음 (2)와 같이 대수식으로 변환이 가능하다.

$$\ln(L) = \ln(A) + \frac{E_a}{kT} \quad (2)$$

모델식의 계수를 추출하기 위해 Fig. 6의 십씨 온도별 평균 수명데이터를 절대온도별 평균 수명데이터로 변환 이후 Fig. 7의 데이터를 따르는 선형식을 피팅(Fitting)하였다.

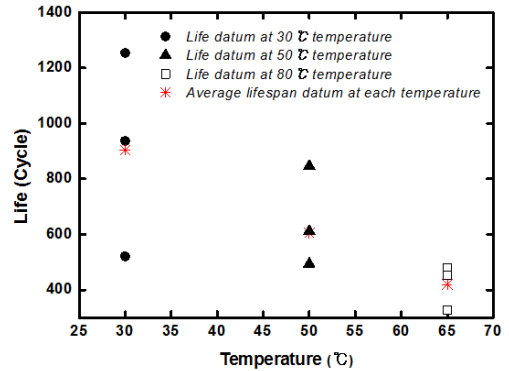


Fig. 6. Distribution of lifespan datum at the each temperature

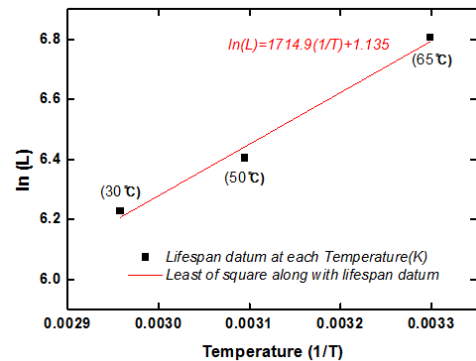


Fig. 7. Linear transformation of law datum

이로써 직선의 기울기에 해당하는  $\frac{E_a}{k}$  는 약 1,714.9 이며 절편에 해당하는  $\ln(A)$  는 약 1.135를 유도할 수 있었으며, 이를 통해 활성화 에너지,  $E_a$  는 약 0.148을, 상수값  $A$  는 3.112를 얻었다.

### 4.2 수명예측 모델식 검증

4.1절에서 유도한 모델식 검증을 위해 신축관 내부 온도상태 80℃에서의 진동 내구수명시험을 수행하였다.

시험결과 신축관의 진동내구 평균수명은 약 420회 수준으로 수명예측 모델식을 통한 예측수명 약 403회 수준과 시험결과가 비교적 잘 맞음을 확인할 수 있었다.

Table 3. Test results at 80℃

Temperature (℃)	Specimen	Life (cycle)	Average life (cycle)
80	#1	477	419
	#2	452	
	#3	328	

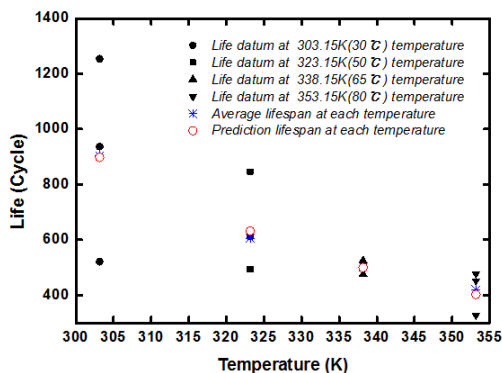


Fig. 8. Entire durability results of expansion joint

## 5. 결론

본 연구에서는 실제 운용중인 플랜트용 신축관 이음에 수충격이 발생되었을 때 전달되는 신축관 이음의 신축량을 진동가진 데이터로 이용한진동내구 시험을 수행하였다.

진동내구 시험 시 내구수명의 한 요인을 신축관 이음 내부온도상태로 설정하였고, 주요 온도상태에 따른 시험

결과를 이용하여 수명예측 모델식을 유도하고 검증하였다.

본 연구에서 유도한 수명예측 모델식은 전형적인 아레니우스 모형을 따르며 특정온도상태에서의 예측수명과 시험결과와의 비교를 통해 작은 편차범위 내에서 수명예측 모델식의 유효성을 검증하였다.

한편, 본 연구에 사용된 신축관 이음의 적용온도가 30 ~ 80℃임을 고려할 때, 최대 온도상태, 80℃에서의 내구수명은 최저 온도상태, 30℃에서의 내구수명과 비교 시 약 46.7% 수준으로 감소되어 신축관 이음의 내구수명이 압력상태 외에 온도상태에도 적지 않은 영향을 받는 것으로 확인 되었다.

향후 본 연구는 온도상태 외에 신축관 내부의 압력상태 등을 진동내구 수명 인자로 한 진동내구 시험을 수행하여 복합 수명예측 모델식을 개발할 예정이다.

## References

- [1] J. H. Lee, H. W. Suh, "Design of a Plant Life Cycle Data Management System for Plant Operation and Maintenance", *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol.42, No.3, pp.241-248, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.7232/JKIE.2016.42.3.241>
- [2] H. Lim, B. Cho, Y. Kim, H. Lee, J. Kim, "A Study on Accelerated Life Evaluation Method of Component for Automatic Transmission", *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol.25, No.2, pp.250-256, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.2.250>
- [3] G. S. Yu, N. R. Lee, Y. H. Yeo, B. C. Lee, "Accelerated Life Prediction of the Rubber for Combat Boots", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.16, No.12, pp.8637-8642, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.12.8637>
- [4] K. S. Kim, J. H. Lee, M. C. Kang, "Life Prediction of Hydraulic Piston Pump for Light Rescue Vehicle through Accelerated Life Testing", *Proceedings of Fall Conference of The Korea Fluid Power Systems Society*, pp.187-190, 2017.
- [5] J. S. Oh, S. H. Cho, "A Study for Lifetime Prediction of Expansion Joint Using HILS", *Korea Academy-Industrial Cooperation Society, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.4, pp.138-142, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.4.138>
- [6] 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, 고장수명 예측

---

**이 봉 수(Bong-Soo Lee)**

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국항공대학교 항공공학과 (공학박사)
- 2000년 2월 ~ 현재 : 한국기계전기전자시험연구원 수석연구원
- 2008년 5월 ~ 현재 : ISO TC 22, 86, 117 전문위원

<관심분야>

유체기계 성능평가, 고효율 성능시험, 고장수명 예측