

# 내진설계용 편심방식 가지배관 고정장치의 좌굴 실험

오 창 수\* · 김 지 훈\*\* · 공 하 성\*\*\*

\*우석대학교 일반대학원 소방·안전공학과 박사수료 · \*\* (주)양수금속 · \*\*\*우석대학교 소방방재학과 교수

## Buckling Experiment of Eccentric Seismic Bracing Devices for Branch Lines

Changsoo, Oh\* · Jihoon, Kim\*\* · Hasung Kong\*\*\*

\*Ph.D, Candidate, Fire · Safety Engineering, Woosuk University · \*\*YangSoo Metals Co.,Ltd

\*\*\*Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Woosuk University

### Abstract

Restraints of Branch Lines are used as earthquake-resistant support devices for fire-fighting pipes along with sway brace devices. The central types are aligned and fixed in a straight line with center of the pipe, but the eccentric types are fixed to on side of the pipe, so a bending moment occurs. In this study, three specimens each of central type and eccentric type were installed at an angle of 45° from the vertical and a monotonic compression load of 1340N was applied. All central type samples satisfied 17.8mm of the allowable displacement, but all eccentric type samples failed to meet the target load and buckled. Therefore, when considering the performance of eccentric type restraints, both compressive load and bending moment must be considered. Even through material mechanics calculations, the yield stress of eccentric type - 3/8 inch all threaded steel bolt - exceeds 320Mpa of the allowable stress. A experiment standards need to be established for eccentric type restraints.

**Keywords :** Seismic Design, Restraint of Branch Lines, Eccentric Load, Buckling, Sway Brace

### 1. 서론

2016년 소방시설의 내진설계 기준이 시행되면서 내진설계용 제품에 대한 성능시험 기준도 함께 제정되기 시작했다. 흔들림 방지 버팀대의 KFI(Korea Fire Institute) 인정기준은 2016년 12월 28일 최초 제정된 후 2023년 10월까지 480건이 승인되었고, 내진스토퍼의 KFI인정기준도 2018년 12월에 제정된 후 같은 기간까지 48건이 승인되었다. 그러나 소방시설의 내진설계 기준 제13조에 가지배관 고정장치는 수직으로부터 45° 이상의 각도로 설치해서 최소 1340N 이상의 인장 및 압축하중을 견딜 수 있어야 한다[1]고 제시하고 있으나 관련 제품 시험 기준은 아직까지 없다. 이로 인해 현재까지 많은 제조사가 제품을 출시했고, 해당제품이 설치되어 사용되고 있으나 기준에서 제시한 최소 하중을 견디는 제품인지 확인하는 것

은 쉽지 않다. 특히, 배관의 중심과 일직선으로 정렬해서 고정하는 중심방식(Centric Type) 고정장치가 아니라, 배관의 한쪽에서 고정해서 편심하중이 발생하는 편심방식(Eccentric Type)의 경우 지지대에 작용하는 휨하중과 함께 편심 처짐에 의한 굽힘 모멘트도 함께 고려된 제품인지 확인해야 하기 때문이다.

본 연구에서는 소방시설 내진설계에 사용되는 환봉타입 가지배관 고정장치를 중심방식과 편심방식으로 구분하여 지지대 단조 압축 실험을 하고 편심방식에 대해서는 재료 역학적 계산으로 실험 결과를 해석하고자 한다.

내진 설계용 지지대의 성능에 대해 변홍석(2021)은 흔들림 방지 버팀대를 ANSYS 해석 프로그램을 이용해서 조립품의 각 부품을 몇 개의 모듈로 나누어 해석한 후 각 구성품의 변형량을 합한 전체 변형량으로 평가하는 해석 연구 방법으로 제품의 제작성능 실험전 구성품의 변형량

†Corresponding Author : Hasung Kong, Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, WOOSUK UNIVERSITY, 443, Samrye-ro, Samrye-eup, Wanju-gun, Jeollabuk-do, E-mail: 119wsu@naver.com  
Received January 24, 2024; Revision March 18, 2024; Accepted March 18, 2024

과 응력을 사전에 평가하는 방법을 제시하였다.[2] 김학선 외(2021)는 흔들림 방지 버팀대의 설치 각도별 하중 적용 연구를 통해 설치 각도가 작아짐에 따라 변위가 커진다는 연구를 하였다.[3] 오수연 외(2022)는 4방향 흔들림 방지 버팀대를 정적시험과 동적시험을 통해 비교 시험을 하였다.[4] Qingxue Shang 외(2022)는 천정에 매달린 배관 시스템을 FM1950에서 제안한 프로토콜로 반복 시험을 통하여 지지대가 지진 진동 에너지를 소산시킨다는 것을 확인하였다.[5] 또, 나영진 외(1997)는 편심하중을 받는 박벽개단면 압축재의 임계하중은 편심이 증가함에 따라 감소함을 컴퓨터를 이용해서 계산한 후 압축부재 설계에서 편심의 영향을 고려해야 함을 연구하였다.[6] 그러나 편심방식의 흔들림 방지 버팀대 또는 가지배관 고정장치의 좌굴 특성을 실험과 공학 계산으로 연구한 사례는 없었다.

따라서 편심방식 가지배관 고정장치를 단조 압축 실험과 재료 역학적 계산을 통해 편심방식 제품이 국내 소방시설 내진설계 기준을 만족할 수 있는지 평가하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 방법

본 연구에서는 10 Ton UTM(Universal Testing Machine)으로 KFI인증기준을 준용하여 가지배관 고정장치를 45° 각도로 설치하고 1340N의 압축하중으로 정적 단조 가력 실험을 실시한다.[7] 실험체별 최대내력까지 가력속도 30 mm/min로 단조가력하고 최대 변위 17.8 mm를 만족하는지 평가한다.

### 2.2 실험체 계획

본 연구에서는 가지배관 고정장치의 지지대로 주로 사용되는 3/8인치 전산볼트에 체결된 25A 구경의 중심방식과 편심방식 고정장치 2가지를 각 3개씩 단조 압축 실험한다. Test 1 그룹은 중심방식 제품이고, Test 2 그룹은 편심방식 제품이다. Test 1 그룹은 국내 제조사 A의 제품 3개 시료이며, 시료 2-1은 Test 2 그룹의 국내 제조사 B의 시료로 나비볼트 2개로 지지대를 고정하는 제품이다. 시료 2-2는 Test 2 그룹의 국내 제조사 C의 시료로 배관을 지지대가 직접 밀착시키는 제품이며, 시료 2-3은 Test 2 그룹의 해외 제조사 D의 시료로 전단볼트 1개로 지지대를 고정하는 제품이다.

실험에 사용된 3/8인치 전산볼트는 ISO898-1 규격에

따라 인장강도 400 MPa, 항복응력 320 MPa으로 별도의 실험은 생략했다.

모든 실험체는 흔들림 방지 버팀대의 KFI 인증기준 시험 방법에 따라 45° 로 실험체에 설치하고 체결 토크는 전단볼트는 전단될 때까지, 일반볼트는 최대 토오크로 고정 하였다. Figure 1은 중심방식 Test 1 그룹의 실험체를 UTM에 설치한 사진이다. Test 2 그룹 제품들도 같은 방법으로 시험을 하였다.



[Figure 1] Central Type Load Test



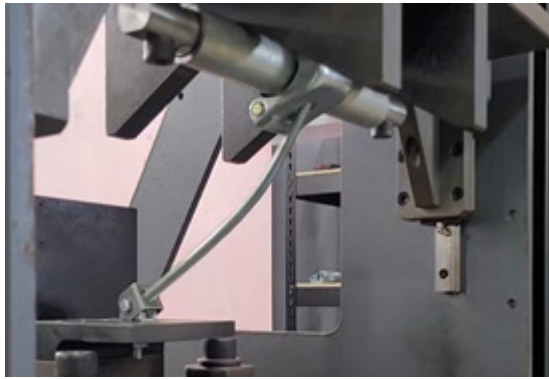
[Figure 2] Buckling of Eccentric Type 2-1

## 3. 실험 결과

### 3.1 좌굴 양상

중심방식 고정장치는 45° 설치조건에서 모두 실험하중인 1340N에서 좌굴하지 않았고 17.8 mm이하의 변위를 나타냈다.

그러나 편심방식 고정장치는 모두 실험 하중에 미치지 못하고 좌굴이 발생했다. 좌굴 방향은 모두 배관에 지지대가 편심 되게 설치된 방향이다. 좌굴 양상은 Figure 2, 3, 4와 같다.



[Figure 3] Buckling of Eccentric Type 2-2



[Figure 4] Buckling of Eccentric Type 2-3

### 3.2 최대 하중

각 실험체별 최대 하중은 Table 1과 같다. Test 1 그룹 중심방식 가지배관 고정장치로 고정한 실험체는 모두 목표 실험하중 1340 N까지 변위가 3.1 mm, 3.1 mm, 4.7 mm로 허용 변위 이하로 설계 기준을 만족하는 결과를 나타냈다.

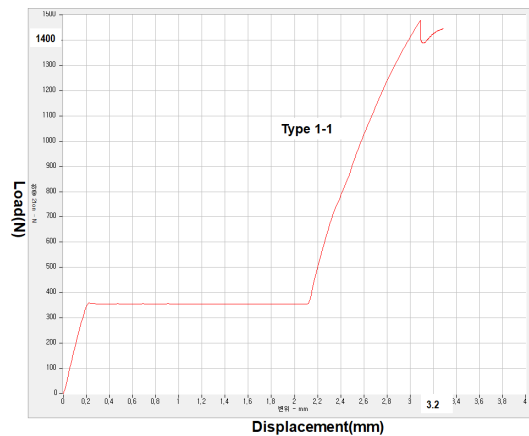
그러나 Test 2 그룹 편심방식 가지배관 고정장치로 고정한 실험체는 1010 N, 960 N, 610 N의 하중에서 좌굴하여, 모두 설계 기준을 만족하지 못했다.

### 3.3 압축하중 평가

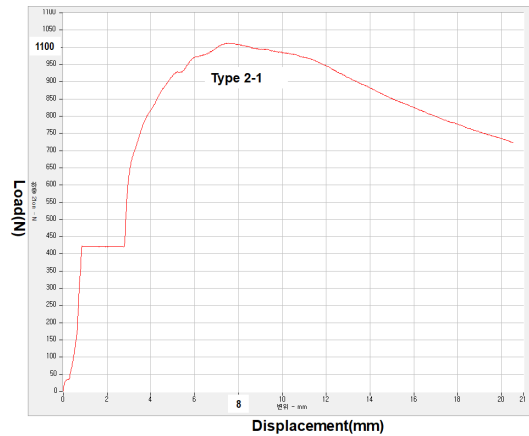
중심방식 고정장치 실험체 1-1, 1-2, 1-3은 모두

Figure 5에서 보듯이 목표 실험하중에서 좌굴하지 않은 반면, 편심방식 고정장치 실험체는 Figure 6, 7, 8에서 보듯이 모두 목표 실험하중에 미치지 못하고 좌굴이 발생했다. 이는 편심방식에서는 제품의 형상과 관계없이 편심에 의한 굽힘 모멘트가 추가로 발생하기 때문에 지지대에 더 많은 응력이 발생하는 것으로 추정된다.

따라서 편심방식 가지배관 고정장치로 내진 설계하고 설치할 경우, 지지대의 허용 세장비만으로 설계해서는 안 되고 편심에 의한 굽힘 모멘트까지 고려해서 설계해야 한다. 이런 설계 기준은 흔들림 방지 버팀대를 포함해서 편심 받는 기둥에는 모두 적용되는 과학적 기준이다.



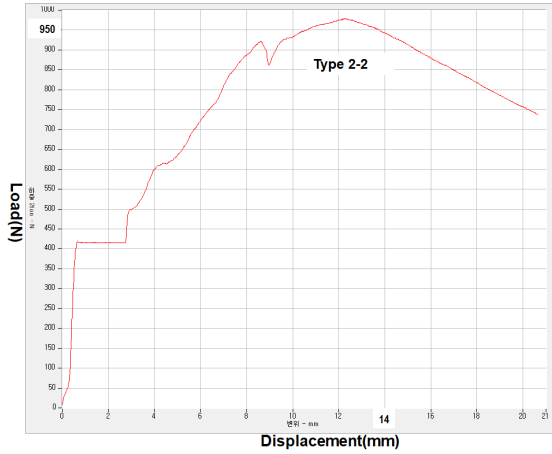
[Figure 5] Load-Displacement of 1-1



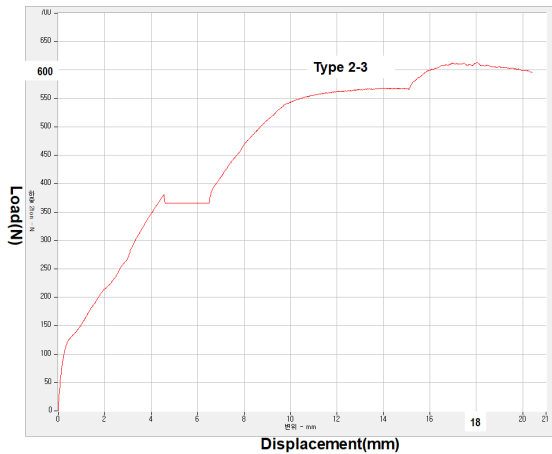
[Figure 6] Load-Displacement of 2-1

<Table 1> Load Test Results of 3/8inch All Threaded Bolt

Test Name	Type	Length(mm)	Max Load(N)	Displacement (mm)	Result
1-1	Centric	200	1340	3.1	Acceptable
1-2	Centric	200	1340	3.1	Acceptable
1-3	Centric	200	1340	4.7	Acceptable
2-1	Eccentric	200	1010	-	Bucking, Failed
2-2	Eccentric	200	960	-	Bucking, Failed
2-3	Eccentric	200	610	-	Bucking, Failed



[Figure 7] Load-Displacement of 2-2



[Figure 8] Load-Displacement of 2-3

### 4. 편심방식 고정장치 압축하중 계산

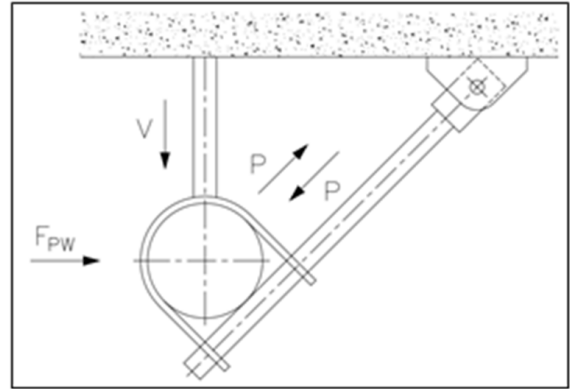
Figure 9와 같이 편심방식 가지배관 고정장치가 설치되어 수평지진하중  $F_{pw}$  에 의해 좌굴하중  $P$ 가 지지대에 작용할 경우, 편심방식 가지배관 고정장치의 최대 압축응력은 식 (4-1)과 같이 처짐과 굽힘 모멘트가 최대가 되는 단면, 즉 중심축으로부터 최외각( $y=c$ )에서 발생한다. 그리고 봉강의 길이에 걸쳐 굽힘 모멘트가 최대인 곳에서 발생한다. Figure 10은 편심 축하중을 받는 지지대를 나타낸 것이다.

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} + \frac{M_{max}c}{I} \tag{4-1}$$

여기서,  $I$ 는 굽힘평면 내의 단면2차모멘트이고,  $c$ 는 지지대의 오목한 측에서 도심축으로부터 끝단까지 거리다.  $P/A$ 는 압축하중으로 인한 응력이고  $M_{max}c/I$ 는 굽힘으로 인한

응력이다. 이는 또다시 (4-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{max} = P \left\{ \frac{1}{A} + \frac{ec}{I} \sec \left( \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_{cr}}} \right) \right\} \tag{4-2}$$

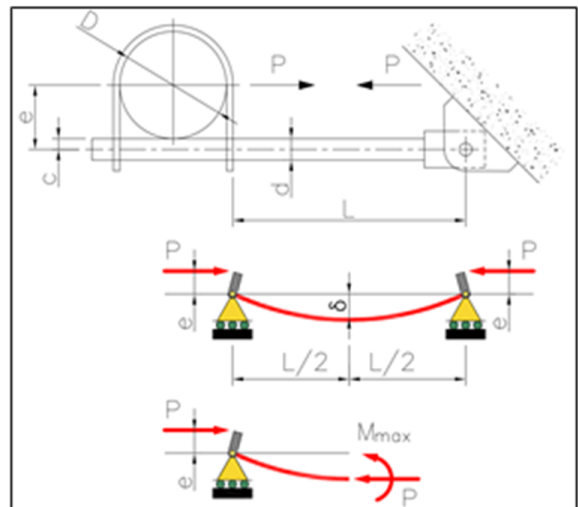


[Figure 9] Horizontal Seismic Load

그리고 편지지 기둥 임계하중은  $P_{cr} = \pi^2 EI/L^2$ 이고 회전반지름이  $r$ 이라 할 때  $I = Ar^2$ 이므로 아래 (4-3)식으로 정리할 수 있는데, 이를 편심 축 하중을 받는 편지지 기둥의 시퀀트 공식이라 한다.[8]

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} \left\{ 1 + \frac{ec}{r^2} \sec \left( \frac{L}{2r} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right\} \tag{4-3}$$

여기서,  $\sigma_{max}$ 는 최대 압축응력(Mpa),  $P$ 는 압축하중(N),  $A$ 는 부재의 유효단면적( $mm^2$ ),  $e$ 는 편심량(mm),  $c$ 는 중립축에서 최외각(mm),  $r$ 은 좌굴축에 대한 단면2차반경(mm),  $L$ 은 부재의 횡좌굴에 대한 비지지길이(mm),  $E$ 는 강재의 탄성계수(MPa)이다.



[Figure 10] Eccentric Loaded Brace

탄젠트 함수처럼 시컨트 함수도 인수가  $\pi/2$ 에 근접할수록 무한대로 간다. 이 결과로 예측된 응력도 무한대로 가게 된다. 즉, 봉강의 응력이 재료의 항복응력과 같아지면( $\sigma_{\max} = \sigma_{yield}$ ) 좌굴하고, 하중이  $P_{cr}$ 보다 작을 때 발생한다.

편심방식 가지배관 고정장치가 3/8인치 전산볼트에 아주 짧게 100 mm로 설치되어 수평지진하중  $F_{pw}$ 에 의해 좌굴하중  $P$ 가 짧은 지지대에 작용할 경우,  $P = 1895 N$  ( $1340N \times \sqrt{2}$ ),  $A$ 는  $56.61 \text{ mm}^2$ ,  $e$ 는 21.25 mm,  $c$ 는 4.25 mm,  $r$ 은 2.12 mm,  $L$ 은 100 mm,  $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ 이므로 최대 압축응력  $\sigma_{\max}$ 는 737.09 Mpa이 되어 강재의 항복응력( $\sigma_{yield} = 320 \text{ Mpa}$ )보다 훨씬 크므로 좌굴이 발생함을 역학적 계산으로도 확인할 수 있다.

만약, 1/2인치 전산볼트에 체결된 경우라고 하더라도 같은 방법으로 계산하면 최대 압축응력  $\sigma_{\max}$ 는 315.87 Mpa으로 강재의 항복응력과 유사하므로 좌굴이 발생할 가능성이 크다.

## 5. 결론

본 연구에서는 가지배관 고정장치로 사용되고 있는 편심방식 제품을 중심방식 제품과 함께 단조 압축 실험을 진행했고 아래의 결과를 확인할 수 있었다.

첫째, 국내 소방시설 내진설계 기준에 따라 편심방식 가지배관 고정장치를 25A 가지배관에 3/8인치 전산볼트를 사용해서 수직으로부터  $45^\circ$ 로 설치할 경우 제품의 형상과 관계없이 설계기준인 1340N의 하중을 지지하지 못하고 좌굴한다.

둘째, 편심방식 가지배관 고정장치를 내진 설계에 사용할 경우, 허용 세장비만 고려해서는 안 되고 편심에 의한 굽힘 모멘트까지 고려해서 설계해야 한다.

셋째, 중심방식 가지배관 고정장치의 경우 같은 조건에서 설계기준인 1340N의 하중을 지지할 수 있다.

넷째, 가지배관 고정장치도 흔들림 방지 버팀대와 같이 제품의 성능시험기준을 제정해서 성능 미달 제품의 유통을 막고 잘못된 내진 설계를 방지할 필요가 있다.

국내 소방시설내진설계 기준이 준용한 NFPA13에서는 가지배관 고정장치의 설치 기준은 제시되어 있고, [9]

UL203A에서는 제품 성능 시험기준이 있다. [10] 이번 실험에서 인증 받은 미국 제품인 Test 2-3이 성능 인증 기준인 1340N의 하중을 지지하지 못했다는 점은 이해되지 않는 부분이다. 시장의 혼란을 막기 위해서 국내 소방시설 내진설계 기준 또는 성능 시험 기준에서 가지배관 고정장치 성능 시험 방법을 제정해야 할 것이다.

## 6. References

- [1] Natinal Fire Agency(2019), Seismic Design Criteria for Fire Protection System in 2019.
- [2] H. S. Byun(2021), "A Study on the Structural Analysis of Sway Brace Device." Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, 23(4): 563-568.
- [3] H. S. Kim, J. H. Lee, M. J. Lee(2021), "The Case Study of Load by The Angle of Sway Brace Device for Fire Fighting Pipe." Summer Conference of SAREK, 90-92.
- [4] S. U. O, H. J. Lee, S. H. Choa(2022), "Study of Structural Stability and Seismic Performances of 4-Way Sway Prevention Brace." Journal of the Society of Disaster Information, 18(3):646-659.
- [5] Q. Shang, L. Qiu, T. Wang, J. Li(2022), "Experimental and analytical study on performance of seismic sway braces for suspended piping systems." Journal of Building Engineering, 57:104826.
- [6] Y. J. Na, S. G. Lee(1997), "Critical Loads of Eccentrically Loaded Struts with Thin-Walled Open Sections." Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, 9(4):135-140.
- [7] KFI(2023), KFI Certification Standard for Sway Brace Device.
- [8] B. J. Goodno, J. M. Gere(2017), Mechanics of Materials, SI Edition, 9th Edition. Cengage Learning Korea Ltd, 952-954.
- [9] NFPA13(2019), Standard for the Installation of Sprinkler Systems.
- [10] UL203A(2019), Sway Brace Devices for Sprinkler System Piping.

## 저자 소개



### 오 창 수

학위 : 우석대학교 일반대학원 박사과정  
 관심분야 : 소방내진, 비구조내진, 내진설계 SW 등  
 근무지 : (주)양수금속 대표이사



### 김 지 훈

학위 : 울산대학교 기계자동차공학부 졸업  
 관심분야 : 소방내진, 기계설계, 구조해석 등  
 근무지 : (주)양수금속 기술연구소 책임연구원



### 공 하 성

학위 : 공학 박사  
 경력 : 대한안전경영과학회 편집위원, 한국화재 소방학회 평의원 역임  
 관심분야 : 소방전기, 소방기계, 화재피난시물 레이션 등  
 근무지 : 우석대학교 소방방재학과 부교