

발전소내 긴 밸브 stem을 갖는 옥외 소화전의 파손 현상 규명

손석만[†] · 이상국* · 이육륜** · 이준신*** · 김기태****

Diagnosis for damage of fire hydrant with long valve stem in power plant.

Sohn Seok-Man, Lee Sang-Guk, Lee Wook-Ryun, Lee Jun-Shin, Kim Ki-Tae

Key Words: Buckling(좌굴), Fire hydrant(소화전), Vibration(진동), Resonance(공진)

Abstract

Nuclear power plant has many external fire hydrants that have to operate in the state of emergency such as facility fire, forest fire. The valve stem of one among them was broken 3 times for 4 years. It had long valve stem and operated under high water pressure. The elongation and the tensile strength for the broken valve stem was measured to examine the defect of material property. And the vibration level and the natural frequencies was detected to check the resonance. As the result of a diagnosis, the cause of this fault is proven buckling of long valve stem.

기호설명

P_{cr} : 좌굴하중, l : 봉 길이,
 E : Young's modulus, I : momentum

1. 서 론

원자력발전소에 있는 옥외 소화전은 발전소 건물 화재 발생시는 물론, 인근 지역의 산불 발생 등과 같은 비상시에 대비하여 항시 작동 가능하여야 한다. 화재에서 발전소를 안전하게 지켜주는 소화전은 안전관련 설비로 분류, 운영되고 있다. 소화 계통의 안전성을 유지하기 위해 정기적으로 작동 시험을 수행하고 있다.

본 논문의 대상 소화전이 있는 원자력발전소에 는 총 29기의 옥외 소화전이 있다. 이중 2기에서 밸브 stem이 파손되는 사례가 시공이후 4년동안 3회나 발생하였다. 파손 발생 소화전의 현장 조사 결과, 옥외 소화전은 밸브가 완전히 개방되었을 때는 진동이 크지 않지만, 부분 개방시에는 소화전 전체에 고진동이 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 소방 계통에 있는 많은 소방 펌프들은 계통에 일정 압력을 유지하기 위해 자동적으로 가동된다.

본 논문에서는 밸브의 파손이 지속적으로 일어나는 원인을 찾고 재발 방지 대책을 강구하였다. 원인 파악을 위해 stem 소재에 대한 재질 분석, 소화전 계통에 발생된 진동 분석과 stem설계등을 검토하였다. 또한, 나타난 결과를 토대로 방지 대책을 수행하였다.

† 책임저자, 회원, 선임연구원, 한전전력연구원
 E-mail : bbrrng@kepri.re.kr
 TEL : (042)865-5662 FAX : (042)865-5604
 * , ** , *** , **** 한전전력연구원

- 소방계통 구성
 - 자키펌프 (1대): 9.49 kg/cm³
 - 전동기 구동 소방펌프 (1대): 8.79 kg/cm³
 - 디젤구동 소방펌프 (2대): 1-set 8.09 kg/cm³,
2-set 7.38 kg/cm³
 - 옥외 소화전 : 총 29대
 - 도면: Fig. 1 참조

2. 파손재 재질 분석

현장에서 채취한 파손 stem으로부터 봉상의 인장시편 2개를 가공, 제작하였으며, 이를 이용하여 인장 시험 및 화학성분을 검사하였다.

2.1 인장 시험

가공된 시편을 이용하여 표준 인장시험법으로 시험하였다. 인장 시험 결과는 Table 1에 나타낸 것과 같다. 표에서 보듯이 파손재는 SS50 강종 규격보다 인장강도가 매우 높고, 연신율이 매우 낮은 것으로 나타났다. 특히 연신율이 11% 정도 밖에 되지 않음으로써, 본 소재가 취성 파단을 나타낼 가능성이 높으며, 실제 파손재의 파단면도 그러한 양상을 보이고 있다.

Table 1 Result of Tensile Strength Test and Specification of SS50 Steel

	Yield Stress (kgf/mm ²)	Tensile Stress (kgf/mm ²)	Elongation (%)
Broken Stem	-	79.49	10.8
SS50 Spec. (KS D3503)	≥ 28	50 ~ 62	≥ 19

2.2 화학조성 검사

파손재의 화학 조성을 조사한 결과를 Table 2에 나타내었다. 이 표에서 보듯이 탄소(C)와 망간(Mn)의 함유량이 매우 높다. 이들 원소가 과량 함유되면, 인장강도는 증가하는 반면 연신율은 감소하게 된다. SS50 강종 규격은 소재의 성분을 P와 S 함량만 각각 0.05 wt% 이하로 제한할 뿐

다른 성분에 대한 제한은 없으며, 다만 항복강도, 인장강도 및 연신을 만을 제한하고 있다. 따라서 본 파손재는 소재 제조시 탄소 및 망간 등이 필요 이상으로 과량 함유됨에 따라 강도는 매우 높으나 연신율이 낮게 된 것으로 판단된다. 파손재가 재질 규격을 만족시키지 못하고는 있으나, 이 점이 stem 파손의 모든 원인은 아닌 것으로 판단된다. 왜냐하면 연신율이 낮더라도, 강도가 매우 높기 때문에 이러한 소재의 파단을 가져오기 위해서는 높은 응력 상태가 필요하기 때문이다. 또한 하부 stem이 휘어진 소성 변형된 상태를 보이고 있는 것도 과거에 어떤 높은 응력 부하가 걸렸던 것을 뜻하고 있다. 따라서 이러한 높은 응력 부하가 어떻게 발생되었는지를 조사하는 것이 필요하다. 이를 위하여 진동분석을 수행하였다.

Table 2 Result of Chemical Composition Test

Element	C	Mn	Si	P	S	Fe
Content (wt %)	0.44	0.72	0.04	n.m*	0.026	balance
spec (wt %)	-	-	-	≤ 0.05	≤ 0.05	-

3. 진동 분석

본 소화전 밸브 stem 파손의 원인을 파악하여 보면, 좌굴(buckling)과 유동에 의한 진동이 있을 수 있으며 이중 유동에 의한 진동이 stem과 공진을 일으킬 수도 있다. 따라서, 먼저 고진동을 점검하기 위해 stem의 고유진동수와 밸브의 부분 개방시 케이싱에서 진동 신호를 취득하고 분석하였다.

3.1 진동 측정 셋팅

소화전에 대한 진동을 측정한 현황은 다음과 같다.

- 대상: 파손이력이 없는 소화전 및 파손이력이 있는 소화전 총 2대
- 신호취득위치 (Fig. 1 참조)
 - 고유진동수 측정 - 밸브 stem

- 진동 측정 : 옥외소화전 케이싱 상부
- 센서/증폭기 감도 : 10V/m/s
- 채취한 진동신호의 분석
 - bandwidth frequency: 500Hz
 - 주파수 분석 window: hanning

3.2 진동 측정

3.2.1 파손 이력이 있는 소화전의 진동 분석

소화전에 대해 밸브를 조금씩 열어가면서 진동 신호를 측정하였다. 밸브가 열리면서 소화전에 고압의 소방수가 차기 시작할 때 진동이 발생하였으며 이 때 진동 신호를 계측한 결과 Fig 2와 같이 케이싱에서 250mm/s의 매우 큰 진동이 발생하였다. stem부의 진동은 stem이 물속에 잠겨있는 관계로 센서의 삽입이 불가능하여 계측할 수는 없지만, 케이싱의 진동치가 250mm/s로 매우 큰 상태임을 감안할 때 stem부의 진동은 케이싱보다 훨씬 클 것으로 판단된다. 주파수 분석신호를 보았을 때 낮은 주파수의 신호가 앰프의 필터링에도 불구하고 크게 나타나는 것으로 보아 매우 큰 유체력이 발생함을 알 수 있다.

3.2.2 파손이력이 없는 소화전의 진동 분석

Stem 파손 사고가 발생한 적이 없는 소화전의 진동을 계측한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 진동치는 50mm/s정도로 파손되었던 소화전에 비해 낮게 나오고 있으나 이는 밸브를 여는 속도에 따라 다르게 나타났으며, 주파수 분석 신호도 파손이력이 있는 소화전의 경우 10Hz의 조화성분이 나타났으나 본 소화전의 경우에는 16Hz의 조화성분이 나타나고 있다. 이는 가진력이 유속에 종속적임을 감안할 때, 파손이력이 없는 소화전이 유동불안정성이 작아 진동치 및 주파수 모양이 다르게 나온 것으로 판단된다. 하지만, 본 소화전의 진동치 50mm/s도 여전히 큰 진동치이다.

3.3 밸브 stem의 고유진동수 측정

공기중에 노출된 밸브가 닫혔을 때 및 열렸을 때의 고유진동수를 측정한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 결과에서 보듯이 밸브가 닫혔을 때는

고유진동수로 38Hz, 120Hz, 245Hz가 차례대로 나왔는데 이는 fixed-fixed 경계조건하의 빔의 고유진동수비와 일치한다. 밸브가 열렸을 때의 고유진동수로는 4.4Hz, 11.2Hz등의 여러 주파수가 나왔는데, 이는 stem의 1, 2차 고유진동수로 판단된다. 이는 공기 중에서 측정한 값이므로 수중에서의 고유진동수는 더욱 낮아질 것이다.

측정된 고유진동수를 앞의 두 소화전의 진동 측정 결과와 비교하면 유동에 의한 가진력이 각각 10Hz, 16Hz로 나왔으나 주파수영역에서 이 크기는 전체 진동치의 10%에 불과하므로 공진이 발생한다고 판단할 수 없다. 따라서, 공진에 의한 진동은 아님을 알 수 있다.

4. 좌굴(buckling) 해석

앞서, 재질과 진동측면에서 stem의 파손 가능성이 적은 것으로 확인되었다. 설계적 측면에서 본 소화전 밸브 stem의 파손 가능성을 검토하였다. 본 소화전의 stem이 가늘고 긴 beam 형태이므로 좌굴 가능성도 계산, 검토하였다.

좌굴 하중을 계산하기 위해 stem의 제원 Table 3을 사용하여, 식 (1)에 나타낸 Euler Critical Load 공식을 이용하여 계산하여 보았다. 이때 실제 하중은 소방수 압력이 밸브 디스크에 가하는 힘으로 계산하였다. 또한, 구조용 강은 경우를 안전율 3.5를 감안하여 설계하도록 되어있는 것을 고려하였다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2}{4l^2} EI \quad (1)$$

계산 결과, Table 3에서 보는 바와 같이 밸브 개방시 stem에 가해지는 유체력은 20.9KN이지만 좌굴 하중은 5.4KN으로써 좌굴 하중보다 실제 가해지는 힘이 크므로 좌굴이 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서, 이 stem은 Fig. 5에 나타낸 것과 같은 좌굴현상에 대하여 매우 불안정함을 알 수 있다.

Table 3 Stem Specification and Buckling Load Computation Result

Spec.	Size	Etc
Length	1.6m	
Section Area	1.09m ²	
Inertial Mom.	9.9×10 ⁻⁸ m ⁴	
Disc Dia.	0.1773m	
Load	2.09×10 ⁴ N	
Euler Critical Load	1.91×10 ⁴ N (식(1)에 의거)	No safety factor
Buckling Load	0.54×10 ⁴ N	Safety factor 3.5

5. 방지 대책

stem 파손에 대한 방지 대책으로는 다음과 같은 것들이 있다.

1) 밸브 양단에 걸리는 압력차를 줄인다.

압력차를 줄임으로써 밸브에 가해지는 힘을 줄이는 방법이다. 현실적으로 적용하기 가장 좋은 방법은 소화전 밸브와 전단 밸브의 개폐 순서를 바꾸는 것이다. 즉, 현재의 밸브 개폐 순서를 바꾸어, 먼저 소화전 밸브를 완전히 개방한 채로 소화전 전단 밸브를 개폐하게 되면 소화전 밸브 양단에 걸리는 압력차가 줄어들게 되고 따라서 소화전으로 유입되는 소방수의 유속을 줄일 수 있게 되어, 가진력 및 유체불안정성을 줄일 수 있다. 따라서 stem 파손을 방지할 수 있게 된다.

2) stem 중간에 격자를 설치하여 좌굴하중을 낮춘다.

현재의 소화전 설계상 좌굴이 일어나게 되어 있으므로, 좌굴하중을 낮추기 위해 stem 중간에 격자를 설치하면 Fig. 6과 같이 좌굴하중이 낮아지게 되어 stem 파손을 방지할 수 있다.

6. 결론

옥외 소화전 stem 파손 원인에 대한 소재 및 진동 관련 조사, 분석 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

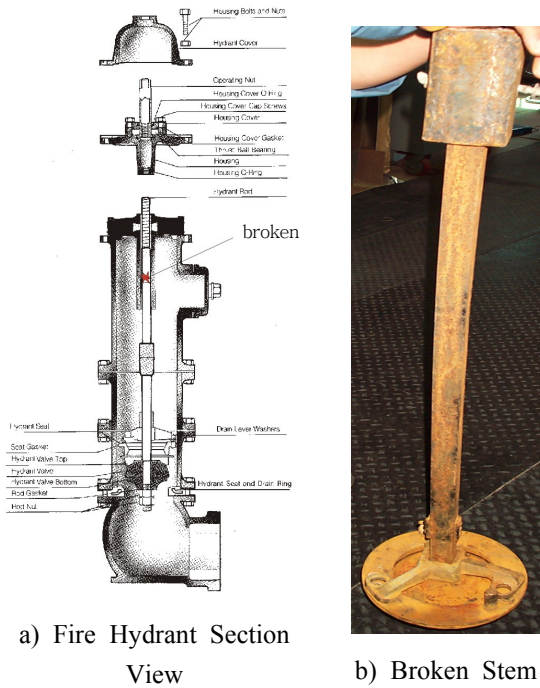
1) 파손재는 SS50 강종 규격보다 인장강도가 매우 높고, 연신율이 매우 낮은 것으로 나타났다. 그러나, 파손재가 재질 규격을 만족시키지 못하고는 있으나, 이 점이 stem 파손의 모든 원인은 아닌 것으로 판단된다.

2) 밸브 부분 개방시 stem에서 매우 큰 진동이 발생되고 있으며, 이는 밸브 전후단면에 걸리는 압력차에 의한 유동의 불안정성에 기인한 것이다.

3) 소화전 밸브 부분 개방시 밸브 전후단의 높은 압력차(8.49 kg/cm²)로 소화전에 들어오는 소방수의 유속이 매우 크므로 과도한 힘을 받고 있으며, 이에 비해 힘을 지지하는 stem이 너무 길어 좌굴(buckling)이 발생하도록 설계되어 있다.

4) 좌굴 해석 결과 현재의 밸브 stem은 좌굴하중보다 높은 유체력을 받고 있으므로 좌굴에 의한 stem 파손이 위험이 매우 크다.

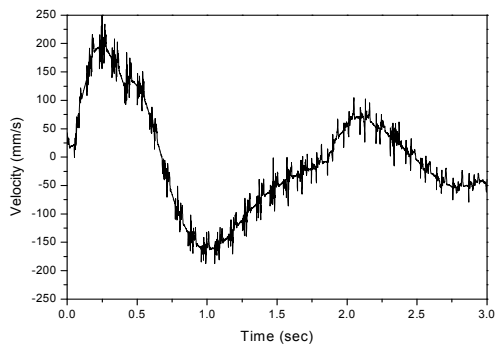
5) stem 파손의 주원인은 밸브 부분 개방시에 발생하는 큰 진동 및 좌굴 발생이 용이한 소화전 설계에 기인하며, stem 소재의 연신율이 낮은 것도 부수적으로 작용하였다.



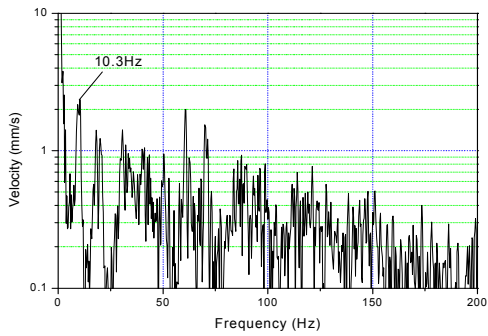
a) Fire Hydrant Section View

b) Broken Stem

Fig. 1 Fire Hydrant Section View and Broken Stem

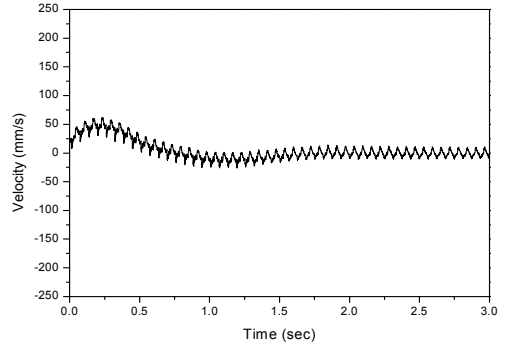


a) Time History

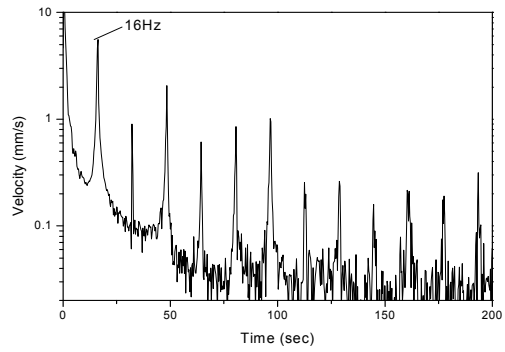


b) Frequency Plot

Fig. 2 Vibration of Fire Hydrant with Broken Stem

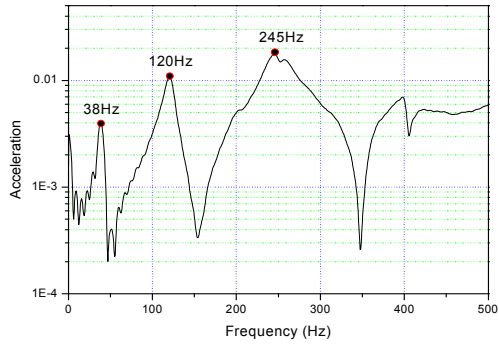


a) time plot

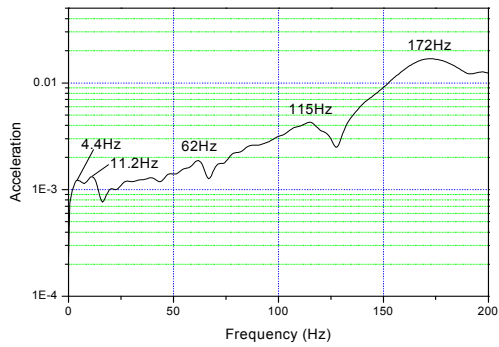


b) frequency plot

Fig. 3 Vibration of Fire Hydrant with Normal Stem



a) Vavle Open



b) Valve Close

Fig. 4 Frequency Plot of Impact Test

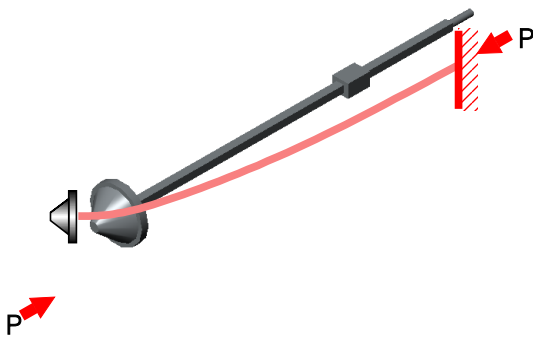


Fig. 5 Buckling Shape and Load

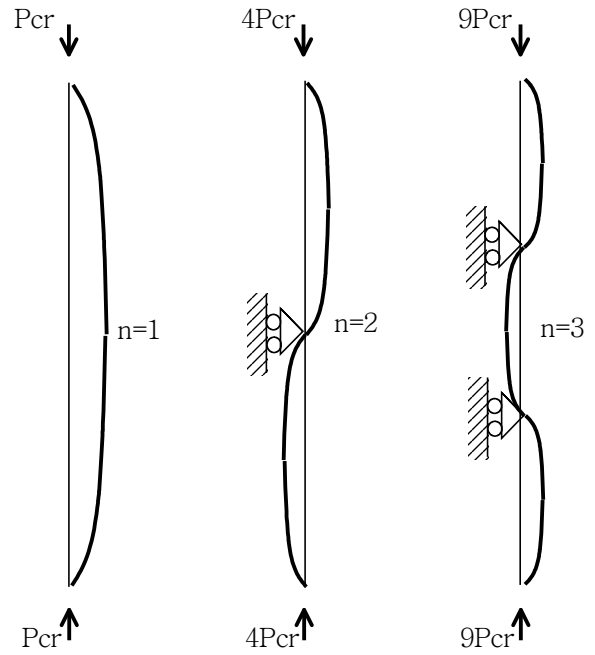


Fig. 5 Increase of Critical Buckling Load as to Support

참고문헌

- (1) Kim, K. N., 1981, "Solid Mechanics", pp.299~307
- (2) Jens Trampe, et al, 1984, "Mechanical Vibration and Shock Measurements", pp.43~45
- (3) ASME, 2003, "Standards and guides for operation and maintenance of nuclear power plant", Part 3