

상수도 강관 플랜지 접합부 누수 원인 및 대책

The Cause of the Water Leakage in the Steel Pipe Flange Connection of the Water Distribution and Measures



임 춘 길^{1)*}

Lim, Chun Gil

1. 서론

상수도는 인간생활에서 요구되어지는 음용수를 위생적으로 안정하게 공급하고, 산업시설에서 필요로 한 수질의 용수를 공급하는데 그 목적이 있으며, 보건 위생상, 산업 및 방화상 중요한 급수기능을 가진 원동력으로서 현대 생활에 있어 꼭 필요한 중요 기본시설이다. 사용목적에 맞는 물을 필요한 만큼 단수 없이 공급하기 위해서 상수도는 취수, 도수, 정수, 송수, 배수, 급수시설로 구성되어 있으며 이중 검토대상 시설물은 수원에서 취수한 물을 정수장까지 운반하는 도수시설 중 이토밸브실 내부의 배수설비(이토관)와 인접한 관로이다. 배수설비(이토밸브실)는 관을 매설하였을 때에 관의 바닥에 남은 이토나 모래 등 협잡물을 배출하고 관내에 발생한 탁질수의 배제와 공사 및 사고 등 비상시나 평소의 유지관리상 관내의 청소와 정체수의 배제 등을 목적으로 설치한다.

이토밸브실은 Fig. 1과 같이 내부에 SP D400mm 이토관과 이토밸브와 인접하여 SP D700mm 관과 제수밸브가 설치되어 있다. D400mm의 이토밸브와 유입배관 플랜지 체결 볼트 3개에 파단 및 이로 인한 누수가 발생하였으며, 플랜지 볼트를 모두 교체하고 누수에 대한 복구를 완료한 상태이다. 현장에서 채취한 파단된 볼트에 대하여

볼트두부에 붙어있는 이물질 제거하고 관찰한 결과, 10.9의 규격과 제조사의 로고를 확인하였다. 또한 이토밸브실 내의 D700mm 플랜지부에서 경미한(소량이 분출) 누수가 발생되었으나 현장에서 즉시 플랜지 볼트를 재조임을 실시, 개스킷을 압축함으로써 누수 발생을 차단하였다.

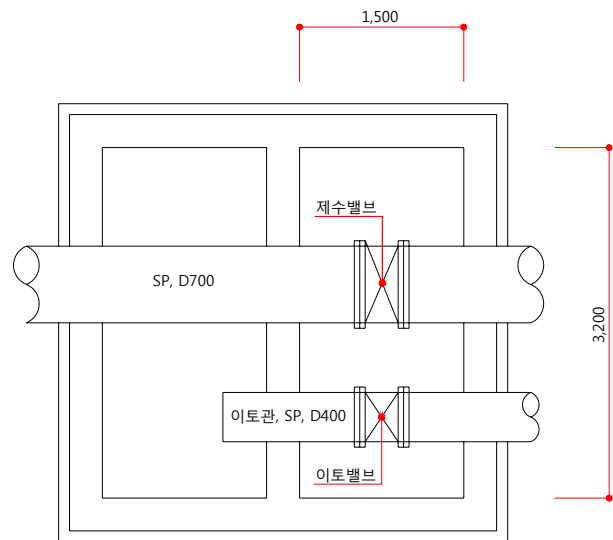


Fig. 1 이토밸브실 평면도

1) 한국시설안전공단 진단평가실 실장, 상하수도기술사

* E-mail : sangsu@kistec.or.kr

2. 본 론

2.1 D400mm 배관 및 밸브 플랜지 볼트 파단

2.1.1 볼트 파단의 원인

파단된 플랜지 볼트는 유입 배관 플랜지와 제수밸브 플랜지를 연결하는 볼트이며, 볼트 홀은 설계 및 제작 시 약 1mm의 여유가 있어 볼트가 상·하·좌·우로 움직일 수 있는 공간이 있다. 그러나 이토밸브실에 설치되어 있는 플랜지는 밸브와 배관의 레벨이 부적합(축정렬 불량)하여 볼트와 플랜지 볼트 홀의 중심이 맞지 않는 것을 알 수 있었다. 시공 중 일부 플랜지 볼트 홀의 확공이 발생하였고 다른 몇몇 볼트는 플랜지와 직접 접촉하였으며, 관과 플랜지에서 전달되는 외력이 직접 볼트에 작용하여 결과적으로 볼트 홀의 여유가 부족한 3개의 볼트에 전단 파단이 발생된 것으로 판단된다.

전단 파단되기 전 볼트는 플랜지 볼트 체결 시 과도한 너트 조임으로 인장력에 의해 1차적으로 일부 국부적 손상이 발생되었으며, 노치(Notch)를 만들어 볼트의 전단강성이 감소하는 원인이 되었을 것으로 판단된다. 또한, 배관 내의 압력변화로 인해 이토밸브 유입측 배관의 차수를 위하여 방수처리한 시멘트에 균열이 발생한 상태(Fig. 3)로, 이토밸브도 함께 거동하였다는 것을 의미한다.

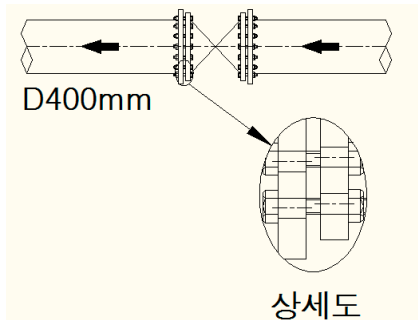


Fig. 2 볼트 홀 센터 부적합 추정도



Fig. 3 밸브 유입측 배관 차수 시멘트 파손

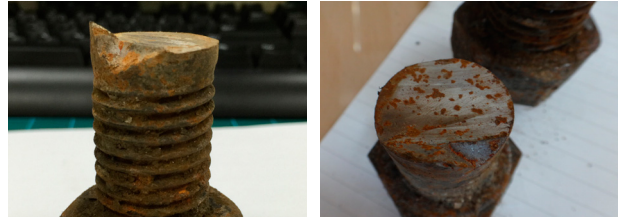


Fig. 4 플랜지 연결 볼트 파단면



Fig. 5 밸브 받침대의 상태

2.1.2 고장력볼트의 기계적 성질 및 화학성분

강재 시험은 고장력볼트(M24 10.9)의 재료적 적합성 여부를 파악하기 위한 것으로서, 플랜지 볼트교체 시 채취한 고장력볼트에 대하여 KS B 0233 기준인 기계적 성질(인장강도 및 경도)과 화학성분(C, P, S, B, Mn, Cr)을 파악하기 위한 시험을 실시하였다.

금회 채취된 볼트는 파단된 볼트 1개와 파단되지 않은 볼트 3개로 총 4개이며, 시험결과 시험편의 물리적 성질 및 화학적 성질은 다음 Table 1, 2와 같다. 파단된 볼트 1개에 대해서는 시험편 크기가 작아 볼트의 인장하중과 경도를 측정하지 못하고 화학성분분석에 대해서만 시험이 실시되었다. 시험결과인 제품의 인장하중을 M24볼트의 유효단면적 $A_e=353\text{mm}^2$ 으로 인장강도를 산정하였으며 채취된 볼트의 분석결과, 금회 시험한 볼트 모두 KS기준의 기계적, 화학적 요구조건에 적합한 것으로 나타났으며, 볼트간 상대적인 특성 변화도 없었다.

Table 1 고장력볼트 기계적 성질

구 분	제품 인장하중 [N]	인장강도 [N/mm ²]	로크웰 경도 [HRC]
허용기준 (KS B 0233)	-	1,000 이상	32~39
볼트1	434,250	1,230	37
볼트2	437,063	1,238	37
볼트3	449,031	1,272	37
볼트4(파단)	-	-	-

Table 2 고장력볼트 화학적 성질

구분	C [%]	P [%]	S [%]	B [%]	Mn [%]	Cr [%]
허용기준 (KS B 0233)	0.15~0.55	0.035 이하	0.035 이하	0.003 이하	0.7 이상	0.3 이상
볼트1	0.22	0.016	0.006	0.002	0.77	1.0
볼트2	0.22	0.015	0.006	0.002	0.77	1.0
볼트3	0.22	0.015	0.006	0.002	0.77	1.0
볼트4(과단)	0.22	0.015	0.006	0.002	0.77	1.0

2.1.3 볼트의 응력검토

초기 인장력과 배관 플랜지의 접촉에 의해 볼트에 노치(Notch)가 발생할 경우에 대하여 노치의 발생면적에 따른 볼트 내부에 응력집중의 영향을 평가하기 위해 볼트에 대한 상세 구조검토를 실시하였다. M24 볼트의 유효직경 21.2mm, 유효단면적 353mm², 목길이 90mm, 탄성계수는 2.05×10⁵Mpa, 프아슨비는 0.3을 적용하였으며, MIDAS CIVIL 2012 범용구조해석프로그램을 사용하여 선형탄성해석을 수행하였다. 경계조건으로는 볼트두부 하면을 힌지로 볼트목은 자유단으로 가정하였으며, 하중은 볼트 끝단에서 균일하게 단위 인장력을 작용시켰다.

노치의 발생은 목길이 방향(나사산측)으로 1mm가정하였으며, 볼트의 유효단면적에 대하여 1~5%씩 증가시켜 단면에 발생하는 응력집중영향을 검토하였고 그 결과는 다음 Fig. 7과 Table 3과 같다.

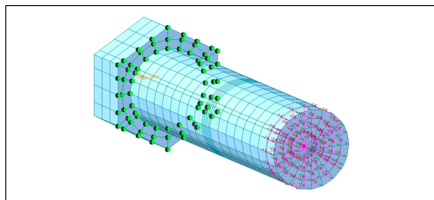
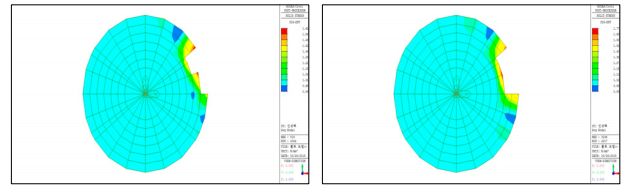
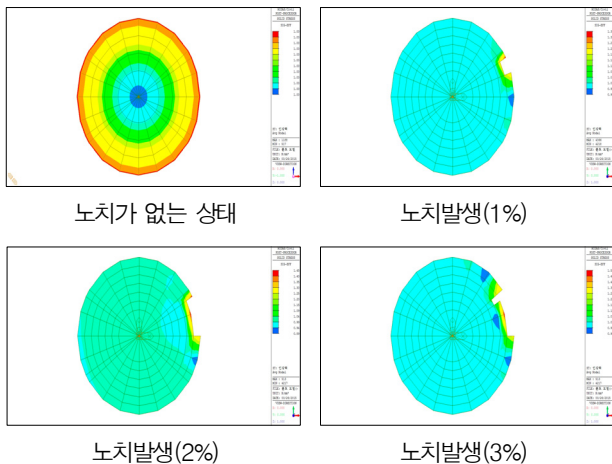


Fig. 6 고장력볼트(M24) 모델링



노치발생(2%) 노치발생(3%)

Fig. 7 노치부 발생응력(Von-Mises Stress)

Table 3 노치부 발생응력

단면 손상률	유효단면적 [mm ²]	노치단면적 [mm ²]	유효-노치단면적 [mm ²]	발생응력 [MPa]
노치 1%	353	3.53	349.47	1.34
노치 2%	353	7.06	345.94	1.45
노치 3%	353	10.59	342.41	1.53
노치 4%	353	14.12	338.88	1.62
노치 5%	353	17.65	335.35	1.77

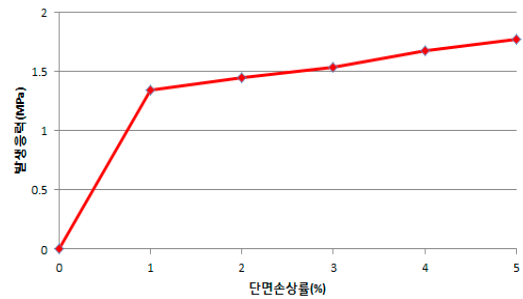


Fig. 8 단면손상률에 따른 발생응력

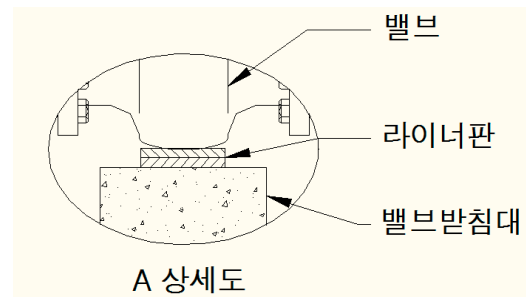


Fig. 9 이토밸브 받침대 설치 상세도

Fig. 8에서 노치가 전체 유효단면적에 대해 1%가 발생되어 있으면 응력은 노치가 없는 단면에 비해 30%가 증가하였다. 노치부 면적이 1~5%씩 점진적으로 증가함에 따라 노치부에 발생하는 응력집중도 선형적으로 증가한다. 노치의 면적이 전체 유효단면적에 대해 1%일 때 응력집중은 약 34%(1.34MPa)이고 노치의 면적이 5%이면 응력집

중은 약 77%(1.77MPa)가 증가되는 것으로 나타났다.

노치의 면적이 0~1%일 경우 그래프에서 기울기(응력집중)는 급격한 상승을 보이며 이후 1~5%구간에서는 상대적으로 기울기가 완만해진다. 볼트의 응력검토 결과, 볼트에 작은 면적이라도 초기손상(노치)가 발생되면 노치가 없는 볼트에 비해 큰 응력집중을 유발하며, 노치면적 증가에 대한 응력집중 영향은 상대적으로 작은 것으로 검토되었다. 따라서 플랜지 볼트 연결 시 과도한 인장력이나, 플랜지와의 접촉을 통해 볼트에 초기 손상이 발생되지 않아야 한다.

2.1.4 대책

장기적인 보수대책으로는 이미 손상된 이토밸브 및 배관 플랜지 교체는 단수가 수반되어야 가능하므로 현실적으로 어렵다는 점이 있으나, 누수발생 원인에 대한 근본적인 해결을 위해서는 손상된 이토밸브 및 배관플랜지를 교체하고 정밀하게 재시공하는 것이 바람직하다. 플랜지 연결용 볼트 길이는 KS D 3578에 준하여 선정하여야 한다. 단기적인 보수대책으로는 파손된 플랜지 부위에서의 모든 볼트는 새로운 볼트로 교체된 상태이며, 현실적으로 이토밸브와 배관플랜지 교체는 쉽지 않으므로 관과 밸브를 연결시켜 주는 플랜지에서 추가적인 단차 발생 및 볼트의 전단 파단 발생 방지를 위해 Fig. 9와 같이 밸브 받침 콘크리트를 보강한다. 또한, 밸브 받침 콘크리트와 밸브 몸통 사이에는 라이너 판을 여러장 삽입하여 배관과 밸브 플랜지 홀 중심선이 일치시켜 배관 내 압력 변동 시 밸브의 처짐이 없도록 하여야 한다.

2.2 D700mm 배관 및 밸브 플랜지 누수

2.2.1 밸브 플랜지 누수의 원인

플랜지 차수를 위한 개스킷은 사용연수가 10년 이상된 것으로 경화되었다고 추정되며, 경화된 개스킷은 신축성과 수밀성이 감소되어 밸브와 배관의 연결부에 경미한 누수가 발생될 수 있다. 누수가 발생될 경우, 누수방지를 위하여 플랜지 체결 볼트를 조임으로써 임시적인 차수는 가능하나, 볼트를 계속 조일 경우 나사산이 부족하여 인장파단이 발생할 우려가 있다. 또한, Fig. 10과 같이 볼트 교체 전 현재 상태는 너트의 풀림으로 인하여 볼트의 인장력 상실과 함께 플랜지간 결합력이 감소되어 누수가 발생될 수 있다.

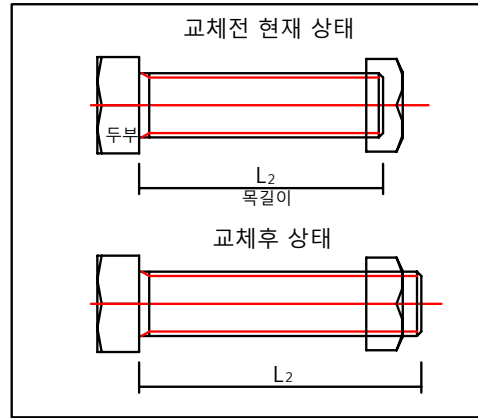


Fig. 10 볼트 교체 전·후 비교

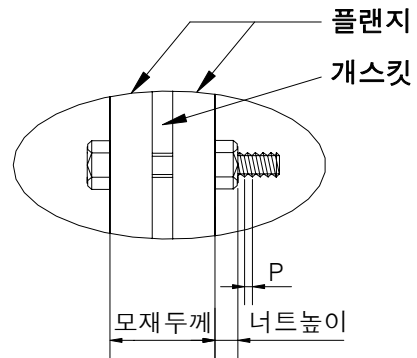


Fig. 11 볼트 길이 선정

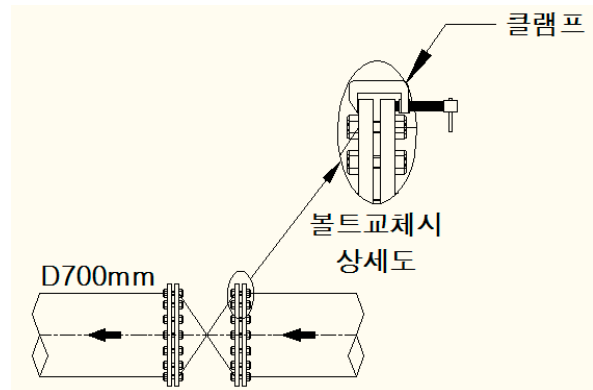


Fig. 12 현재 플랜지 체결 상태 및 볼트 제거(클램프 사용) 개략도

2.2.2 대책

장기적인 보수 대책으로는 단수를 실시하고 개스킷을 교체한다. 그러나 이 방안은 단수가 수반되어야 가능하므로 현실적으로 쉽지 않으나, 플랜지 연결부 누수의 근본적인 해결을 위해서는 개스킷 및 볼트 교체가 필요하다. 단기적인 대책으로 현재의 개스킷은 그대로 유지한 상태에서 플

랜지 볼트를 교체하는 것이 시공 및 경제성을 고려하면 장기적인 보수방안 보다 유리하다.

고장력 볼트는 표면 경도 및 강도가 높기 때문에 연신율이 기계 조립용 체결 볼트 보다 낮다. 고장력 볼트가 플랜지 파손 보다 먼저 파단 되면 볼트만 교체하면 되나 고장력 볼트의 강도가 플랜지보다 높아 플랜지에 균열 및 손상이 볼트 보다 먼저 발생할 수 있다. 그러므로 플랜지와 볼트는 가급적 비슷한 기계적 성질을 갖고 있고 KS B 0233 규정을 만족하는 10.9 볼트의 사용하여 안전을 확보한다.

KS D 3578 이형관 플랜지 접합용 부품 6각 볼트·너트 기준에서 RF형 또는 GF형 플랜지와 게이트밸브를 접속 시, D700 관의 경우 볼트 두부를 제외한 M27 볼트 목길이 (L2)는 130mm이다. 현재, 볼트 길이는 110mm로 20mm가 부족하여 나사산이 노출되지 않은 상태이며 Fig. 10의 교체전 현재 상태와 같다.

볼트 목의 길이의 결정은 모재두께(강관 플랜지 두께, 개스킷 공간, 밸브 플랜지 두께)와 너트 높이 및 피치 수를 더한 값이 되며 볼트의 길이는 5mm 단위로 생산되므로 계산 시 127mm이면 실제 사용하는 볼트 길이는 130mm로 선정한다.

Fig. 12에서 제거 하려고 하는 볼트 주위에 작업방해를 받지 않는 범위 내에서 플랜지에 클램프를 먼저 체결한 후 현재 체결되어 있는 볼트를 제거한다. 클램프를 체결하지 않고 볼트를 제거 할 경우 관내 수압에 의해 플랜지 개스킷이 밖으로 빠져나와 누수 우려가 있으므로 반드시 클램프를 사용하고 볼트 한 개씩 순차적인 교체를 실시한다.

토크렌치를 사용하여 볼트를 조일 경우, 공장에서 양산되는 볼트는 표준 토크 표(KS B 0140)를 참조하면 되나 토크 조임 수치가 없을 경우는 볼트 구매 시 볼트의 축력이 표기되어 있는 시험 성적서를 요구하여야 한다. 볼트 축력을 아래 식에 적용하여 볼트에 도입되는 토크를 계산한다.

$$T = F \times d \times k \quad (1)$$

여기서, T 는 볼트의 토크(kN.m), F 는 볼트 축력(kN), d 는 호칭경(m), k 는 계수(0.15~0.2)이다.

3. 결론

이토밸브실 내 D400mm 배관과 이토밸브 플랜지 접합부에서 고장력 볼트파단으로 인한 누수가 발생하였다. 고장력 볼트의 파단의 원인으로는 볼트 조임 시 과도한 인장력 도입, 이토밸브와 배관의 축정렬 불량으로 인한 고장력 볼트의 초기결함(노치, Notch)이 발생된 것으로 판단된다. 이후 볼트에 직접적으로 외력이 작용하여 볼트에 전단파단이 발생되었으며 볼트의 응력검토 결과, 작은 면적이라도 볼트에 초기손상(노치)이 발생하면 노치에 응력이 집중되는 것을 확인하였다.

D700mm 배관 및 밸브 플랜지 접합부에서 발생한 누수의 원인으로는 개스킷이 열화 및 경화되고, 볼트 목길이가 부족하여 너트가 풀려 시공 시 볼트에 도입된 인장력 상실로 인한 것으로 판단된다. 보수 대책으로는 단수를 실시하고 개스킷과 목길이가 부족한 볼트를 교체하여야 하나 현실적으로 쉽지 않으므로 단계적으로 목길이가 부족한 볼트를 교체하여야 한다.

배관과 밸브의 플랜지 결합부에 대한 누수를 방지하기 위해서는 정밀한 시공을 통해 배관과 밸브의 축정렬을 정확히 하여 플랜지 연결을 위한 고장력 볼트에 과도한 인장력이 도입 및 초기손상이 발생되지 않아야 한다. 또한, 배관과 밸브 플랜지 연결시 KS 규정을 만족하는 볼트재질의 선정 및 적절한 호칭 및 목길이를 가진 볼트를 사용하여 공용 중 플랜지에서 누수가 발생이 없어야 한다.

References

1. 환경부 (2015), 수도법, 제3조(정의)
2. 한국상하수도협회 (2010), 상수도시설기준, 201
3. 한국표준협회 (2006), KS B 0233 강제 볼트·작은 나사의 기계적 성질, 4-5
4. 한국표준협회 (2006), KS B 0140 나사의 조임 통칙, 참고표2
5. 한진희, 최종경, 허인성, 김성보 (2008), 압축력을 받는 고장력 볼트 이음부의 미끄러짐 거동, 한국강구조학회 논문집, 제20권, 제2호, 한국강구조학회, 279-288

담당 편집위원: 김형준
(서울시립대학교 건축학부 조교수)
hyungjoonkim@uos.ac.kr