

모터 구동 게이트 밸브의 취약부 분석

배윤호*, 홍민기*, 이광남*

Weak Link Analysis of Motor Operated Gate Valves

Yoon-Ho Bae, Min-Ki Hong and Kwang-Nam Lee

Key Words : Weak Link Analysis(취약부 분석), Motor Operated Valve (모터 구동 밸브), Bearing Stress(지압 응력)

Abstract

The purpose of this paper is to address the structural integrity of the stem disc T-head connection of the motor operated valve assembly by comparing the previously developed methodology with the finite element analysis(FEA). From the experiences of the previously performed weak link analysis, the most of "weak links" when valve is opened are stem-disc T-head connections, and the bearing stress on the disc is the dominant stress. The results of FEA are compared with that of the classical approaches of the weak link analysis. The higher allowable thrust be represented by performing the elastic-plastic FEA.

기호설명

- σ_s : 단면 5에서 지압 응력
- TH5 : 단면 5의 허용 스러스트
- T5 : 단면 5의 두께
- W5 : 단면 4&5의 폭

1. 서 론

원자력 발전소에 사용되는 모터 구동 밸브는 밸전소의 안전에 중요한 역할을 수행하고 있으나 가끔 고장으로 인하여 원전 안전성이 저하될 수 있어 미국의 원자력 규제 위원회(NRC)에서는 규제지침(GL 89-10)을 발행하여 이에 대한 안전성을 확인 및 입증하도록 요구하였으며 국내 대부분의 원자력 발전소는 이를 수행하였다. 또한, 국내에서도 과기부 규제 권고 사항(97.6.13)을 통하여 안전성 관련 모터 구동 밸브에 대해 설계 기준 조건하에서의 안전 기능 확인을 요구하고 있다. 이를 만족시키기 위해서는 설계 기준 검토, 최소 요구 스러스트 계산, 전압 강하 계산, 여유도 분석, 구동기 성능 분석, 현장 시험, 그리고 취약부 분석

등 다양한 과정이 수행되어야 한다. 취약부 분석은 구동기 작동에 의한 스러스트 또는 토크와 자진 하중의 하중 전달 경로 상에 있는 모든 밸브 부품에 대하여 구조적으로 견딜 수 있는 스러스트 값을 산출하여, 밸브의 최대 허용 스러스트 또는 토크를 제시한다. 이 하중 경로 상에 있는 부품들로서는 스템 및 스템 너트, 구동기 장착 플랜지 및 볼트, 요크 다리, 요크 플랜지 및 볼트, 요크 클램프, 보닛 네, 보닛 볼트, 그리고 스템-디스크 연결부 등이 있다.

모터 구동 밸브 중 게이트 밸브에 대한 취약부 분석 방법은 참조문헌[1]에서 개발되어 원전 동력구동 밸브 안전성 평가에 적용된 바 있다. 원전 동력 구동 밸브 취약부 분석 결과, 모터 구동 게이트 밸브의 단점 시에는 요크 플랜지가 취약부의 반 이상을 차지하며, 스템과 구동기 플랜지뿐만 아니라 요크 다리나 구동기 볼트에서도 취약부가 나타났다. 반면, 열림 시에는 스템-디스크 연결부가 대부분 취약부임을 알 수 있었다. 특히, 이 스템-디스크 연결부에서 취약부는 대부분 지압 응력에 의해 디스크 부위로 나타났다.

따라서, 본 논문에서는 원전 동력 구동 밸브 취약부 분석을 수행한 임의의 밸브를 기준으로 고전역학을 적용한 취약부 분석을 수행하고 이를 유한 요소 해석에 의해 분석한 결과와 비교하고자

* 한국전력기술㈜

한다. 또한 비교 결과를 바탕으로 원전 동력 구동 벨브 취약부 분석에 대한 대안을 제시하고자 한다

$$\sigma_5 = \frac{(I\bar{H}5)}{2(T5)(W5)}$$

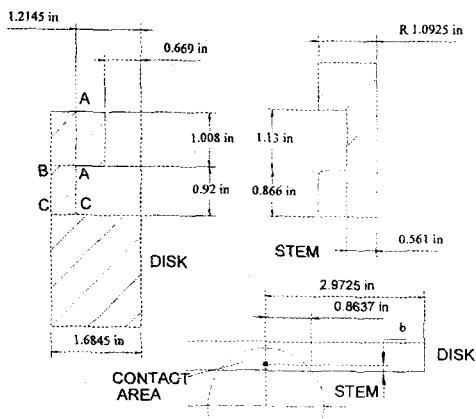


Fig. 1 Detail sketch of stem-disc connection

Table 1 Design conditions

스템 팩터	0.0147 ft
설계 압력	535 psig
설계 온도	400 °F
설계 지진 가속도 한계	4.5 g

Table 2 Material properties

스템	재료 규격	SA-564, 630
	설계온도에서 항복 응력	98.3 ksi
	설계온도에서 응력 강도	43.8 ksi
	탄성 계수	26 500 ksi
디스크	재료 규격	SA-182, F316
	설계온도에서 항복 응력	21.4 ksi
	설계온도에서 응력 강도	19.3 ksi
	탄성 계수	26 500 ksi

2. 스템-디스크 연결부의 분석

스템-디스크 T-Head 연결부는 열림 동작 시에서만 높은 응력을 받으므로 열림 동작만 고려한다. 참조문헌[1]에 따르면, 스템-디스크 연결부는 단면 1에서 단면 5로 나누어 분석하는데, 단면 5에서 발생하는 지압응력은 다음 식으로부터 얻는다.

스템-디스크 연결부는 각 벨브마다 다양하지만, 일반적인 모양 중의 하나는 그림 1에서 보는 것과 같으며, 상세 치수도 이 그림에 나타내었다. 다만, 대부분 스템의 단면은 사각형 또는 절단된 원형이지만, 이 설계에서 스템의 단면은 완전 원형이다. 이 설계에서 서로 접촉하는 면적은 디스크의 폭에 비례 상대적으로 작다. 스템은 원형 단면의 봉을 가공하여 만들었으며, 접촉면의 안쪽 폭(W45)은 1.7274 in이고 단면의 두께(T5)는 0.5455 in이다. 원형 디스크의 상부에서 평평한 부분의 폭은 5.9450 in이다. 이 해석에서 디스크 단면은 이 일정한 폭을 갖는 사각형으로 가정한다. 디스크와 스템의 상대적인 크기를 고려할 때 이 가정은 유효한 것으로 판단된다. 설계 조건은 표 1에서 보는 것과 같으며, 스템과 디스크의 재료에 사용된 재료는 표 2에서 보는 것과 같다. 스템의 축방향으로만 힘이 작용한다고 가정한다. 디스크를 들어올릴 때 스템에는 인장력이 적용되어, 디스크의 T-홈 지역에 하중이 작용한다. 디스크 T-홈의 안쪽 위의 접촉면에 위 방향으로 힘이 작용하여 전단, 굽힘, 그리고 접촉면에 직접적인 압축 응력이 발생된다. 일반적으로 스템 재료는 고강도 스테인리스강이고 디스크 재료는 저강도 스테인리스강이다. 따라서, 디스크의 강도가 낮고 결과적인 응력 상태로 볼 때, 이 하중 조건에서 '취약부'는 디스크임을 알 수 있다.

3. 유한 요소 해석

스템-디스크 연결부의 디스크나 요크 플랜지는 주로 연성 재질로써 탄소성 거동을 한다. 따라서 일반적인 고전 역학에 의해 산출된 허용 스러스트 값은 유한 요소 해석에 의해 산출한 허용 스러스트에 비해 상당히 낮을 것으로 예상된다. 동력 구동 벨브 안전성 평가의 취약부 분석 결과를 바탕으로 열림 시에 주로 문제가 되었던 스템-디스크 연결부에 대하여 유한 요소 해석에 의한 탄성 해석 및 탄소성 해석을 수행하였다. 디스크 및 스템에서 실제 상태를 결정하기 위하여 그림 2에서 보는 것과 같은 유한 요소 모델을 그림 1의 치수와 표 2의 물성치를 사용하여 수립하였다. 유한 요소 해석에 ANSYS 프로그램을 사용하였으며, SOLID45 3 차원 요소를 사용하였다. 모델링에서 디스크 모서리 부분의 필릿 반지름을 고려하지 않

았다. 스템과 디스크의 접촉은 면-면 접촉 요소로 써 모델링 하였으며, 스템의 경우 CONTAC173 접촉 요소를 사용하였고, 디스크의 경우 TARGET170 접촉 요소를 사용하였다. 이 절차는 상당히 간단 하지만 수렴된 해를 얻기 위하여 반복적으로 비선형 해석 과정을 필요로 한다. 면 접촉은 미끄럼이 일어날 수 있는 절점-절점 접촉보다 바람직하며, 정확한 강성의 계산을 필요로 하지 않는다. 여기서는 단지 축방향 하중만 작용하는 것으로 고려하기 때문에 모델링과 해석을 단순하게 하기 위해 ¼ 대칭 모델을 사용한다.

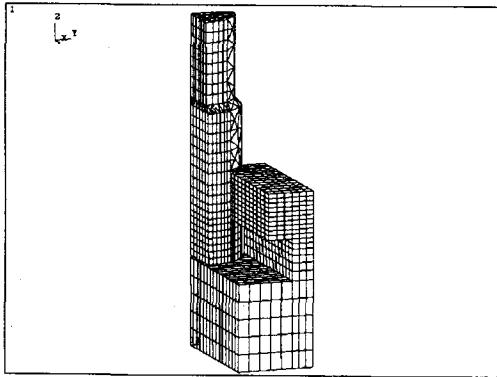


Fig. 2 Complete model of stem-disc connection

3.1 탄성 해석

탄성 해석에서 스리스트는 10 000 lbs를 적용하였으며, 필럿 반지름은 적용하지 않았다.

그림 3 및 그림 4는 각각 탄성해석에 의한 디스크에서 응력 강도 분포와 주응력 분포를 나타내었다. 고전적인 해석과 탄성 유한 요소 해석의 결과를 비교할 때, 위에서 제시된 디스크에 대하여 탄성 해석 결과로부터 다음 사항을 알 수 있다.

- (1) 단면 A-B에서 전체 단면 폭을 사용하여 참고문헌[1]에 따라서 계산한 응력은 유한 요소 해석에 의한 최대 주응력과 잘 일치한다.
- (2) 스템 디스크의 접촉면에서 참고문헌[1]에 따라서 계산한 응력은 유한 요소 해석에 의한 주응력의 약 1.5 배정도 크다.
- (3) 응력 분포를 보면 스템 하중에 직접적인 영향을 받는 디스크에서 응력이 국부적으로 상당히 집중됨을 볼 수 있다.

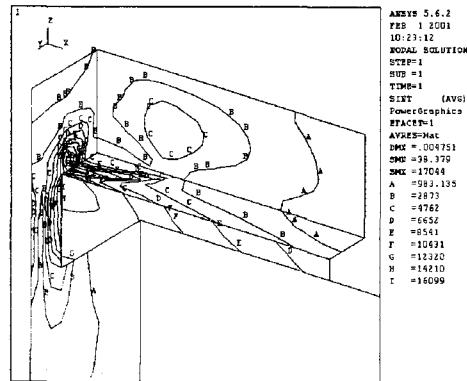


Fig. 3 Stress intensity contours in elastic analysis

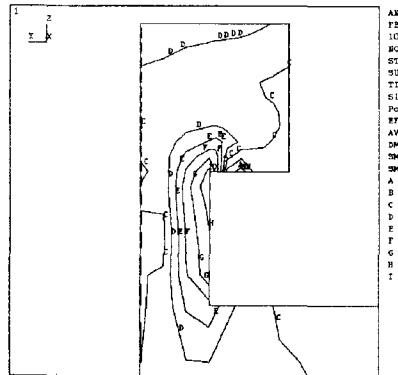


Fig. 4 Principal stress contours in elastic analysis

3.2 탄소성 해석

스템에 상당히 큰 축방향 하중이 작용될 경우에 고전적인 방법과 유한 요소 해석에 의한 결과는 분명히 설계 코드의 허용 응력을 초과할 것이다. 코드 허용 응력은 코드에 포함된 기본적인 해석 방법과 함께 사용하는 것을 전제로 한다. 하중 및 설계가 기본적인 방법론에 통합된 모든 가정을 만족시키지 못하는 경우에 기본적인 방법이 완전히 상세한 응력 해석을 제시할 수 없다. 이 스템-디스크 연결부의 문제는 앞에서 사용된 정의와 같이 표준 보급형 이론이 분명하게 맞지는 않는다.

탄성 응력 해석에서 사용된 유한 요소 모델을 사용하여 소성에 의한 응력 상태 재분배의 영향을 결정하기 위하여 탄소성 해석을 ANSYS 프로그램을 사용하여 수행하였다. ANSYS 프로그램에는 재료의 응력-변형률 선도를 정의하는 여러 가지 방법이 있다. 여기서 사용된 방법은 MKIN(multi-linear kinematic hardening) 방법이다. 응력의 역전이 없는 한 방향의 응력이 작용하는 경우에 이 방법

은 좋은 결과를 보여주지만, 응력-변형률 선도의 정확한 입력에 의해 제한된다. 그림 5는 입력으로 사용된 디스크 재료의 응력-변형률 선도이다. 축 방향 하중, $FZ=50000$ lbs를 적용한 탄소성 해석을 수행한 결과, 그림 6은 중앙 단면에서 주응력 분포, 그림 7은 응력 강도 분포, 그림 8은 등가 응력 분포를 나타내고, 그림 9는 스템에서 지압 응력 분포를 나타낸다.

예상한 바와 같이 탄소성 해석에서는 응력 재분배가 발생함이 입증되었다. 이와 같은 연성 재료에 대하여 von Mises의 등가 응력은 가장 적절한 항복 및 강도 기준이다. SEGV 응력분포 그림에서 중앙 대칭 단면의 상당한 부분이 항복된 것을 보여주고 있으나, 최대 등가 변형률은 약 10% 정도에 지나지 않았다. 이 재료의 관련 자료에 의하면, 파손시 연신율이 적어도 40%이다. 이 기준에 따라서 50 000 lbs는 허용할 수 있다. 다만, 이와 같은 힘이 반복해서 작용할 경우에는 피로해석을 수행하여야 한다.

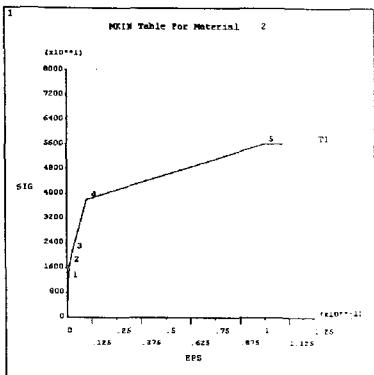


Fig. 5 Stress-strain curve of disc material

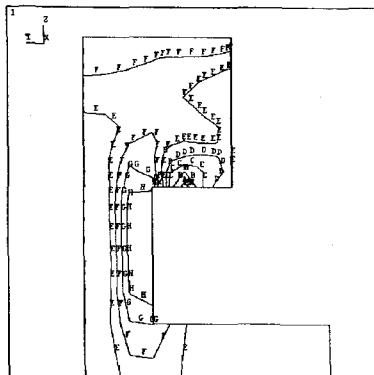


Fig. 6 Principal stress contours in elastic-plastic analysis

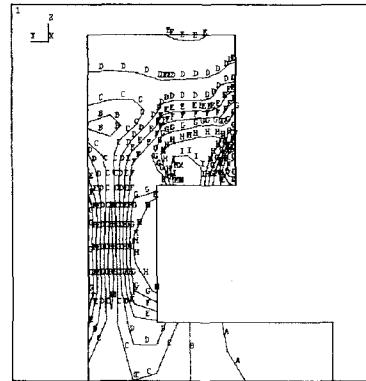


Fig. 7 Stress intensity contours in elastic-plastic analysis

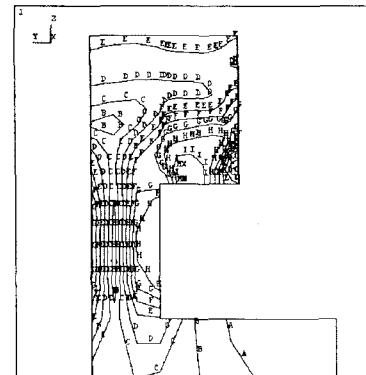


Fig. 8 Von Mises equivalent stress contours in elastic-plastic analysis

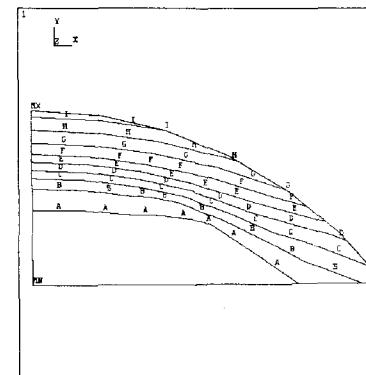


Fig. 9 Bearing stress contours in elastic-plastic analysis

4. 결 론

본 연구는 원자력 발전소에 사용되고 있는 모터 구동 게이트 밸브 부품들 중에서 스템-디스크 연결부에 대하여 최대 스러스트를 구하는 공식의 문제점을 제시하고, 유한 요소 해석 프로그램을 사용하여 탄성 해석 및 탄소성 해석을 수행하였으며. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 스템-디스크 연결부의 탄성 해석의 수행 결과 와 참고문헌[1]에 의한 값이 비교적 잘 일치하였다. 이 값은 필럿 반지름을 고려하지 않았기 때문에 참고문헌[1]에 의한 값은 충분히 보수적이다.
- (2) 탄성 해석의 수행 결과 스템-디스크의 접촉 면에서 참고문헌[1]에 따라서 계산한 지압 응력은 유한 요소 해석에 의한 주응력의 약 1.5 배정도 크다.
- (3) 스템-디스크 연결부의 탄소성 해석에 의한 허용 스러스트는 참고문헌[1]에 의한 값보다 상당히 높은 값을 제시할 수 있다.
- (4) 탄소성 해석의 경우에 설계 수명의 관점에서 보다 현실적으로 허용할 수 있는 영구 변형률과 이 변형률에서 저주기 피로 수명을 고려하여야 한다..

참고문헌

- (1) 김동해 등, 모터 구동 게이트 밸브의 취약부 분석, 대한기계학회 추계학술대회, 1999.
- (2) Warren C. Young, *Roark's Formulas for Stress and Strain*, Sixth Edition.
- (3) EPRI Report No. NP-6660-D, 1990, *Application Guide for Motor-Operated Valve in Nuclear Power Plants*.
- (4) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division I, 1989 edition.
- (5) AISC, *Manual of Steel Construction*, Ninth Edition.