

가압기 헤드 및 노즐의 건전성 평가

김강수, 김태완, 이규만, 박근배

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

국내 경수로 원자력발전소 가압기는 안전성향상을 위하여 보다 많은 배관과 부수적인 배관이 설치 될 수 있다. 이에 따라 ASME 코드의 공식에 의한 설계(Design by Formula)보다는 해석에 의한 설계(Design by Analysis)의 필요성이 증가하고 있다. 본 논문에서는 한국 표준형 원자로의 가압기 헤드 및 노즐에 대하여 ASME 코드의 해석에 의한 설계를 적용하여 범용유한요소 코드인 IDEAS로 응력해석하고 구조적 건전성을 분석, 고찰하였다. 또한 해석결과에 따른 가압기헤드, 노즐 그리고 노즐보강에 대한 설계시 고려되어야 할 인자를 분석하였다.

1. 서론

원자력발전소의 핵증기공급계통에는 원자로, 증기발생기, 가압기등과 같은 압력용기가 많이 사용되고 있다. 이들 기기는 고온, 고압에서 운전되며 외부로부터 여러 가지 하중을 받는다. 특히 이들 기기는 계통구성을 위해 크기가 다른 여러종류의 배관으로 연결되어 있다. 이러한 배관연결부, 즉 압력용기의 개구부는 그 형상의 불연속으로 인하여 응력집중이 발생하며 용접부에서의 균열가능성등 구조적 건전성에 많은 영향을 끼친다. 그러므로 압력용기의 개구부에서의 구조적 건전성과 노즐의 강도계산 및 덧살보강에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 이제까지의 연구는 개구근처 강도계산에 국한되어 왔으며, 한국 표준형원자로의 가압기처럼 ASME 코드[1]를 만족하는 범주에서만 설계를 하여왔고 배관에 적용되는 하중은 ASME 코드의 공식에 의한 설계(Design by Formula)에 의해 노즐의 최대허용 외부 하중이 정의되었다. 그러나 ASME 코드의 공식은 노즐사이(개구간)의 간격이 개구안쪽 반경합의 3배 이상인 경우에 대해서만 적용이 가능하다. 하지만 최근에는 안전성 향상을 위하여 부수적인 배관이 설치되는 경우가 증가하고 있으며 이에 따라 ASME 코드의 공식에 의한 설계보다는 해석에 의한 설계의 필요성이 증가하고 있다. 이 논문에서는 이러한 필요성증가에 따라 한국 표준형원자로 가압기 및 PSV(Pressurizer Safety Valve) 노즐[2]에 대하여 ASME 코드의 해석에 의한 설계(Design by Analysis)를 수행하여 그 수행가능성 및 타당성을 연구, 조사하고 노즐 및 노즐보강에 대한 구조적 건전성을 분석, 고찰하여 이 해석결과에 따른 가압기, 노즐, 그리고 노즐보강에 대한 설계시 고려되어야 할 인자를 분석하였다.

2. 해석에 의한 설계

ASME 코드 개구설계요건인 NB-3222.4(d)와 NB-3331를 만족하고 노즐설계의 대응법칙인 NB-3339를 만족하는 한국 표준형원자로의 가압기 헤드 및 PSV 노즐을 ASME 코드의 해석에 의한 설계(Design by Analysis)로 구조적 건전성 및 응력분포를 분석, 평가하였다.

3.1 해석모델

한국 표준형원자로 가압기의 기본치수[2]는 그림 1에 나타내었고 PSV 노즐의 기본치수는 그림 2에 나타내었다. 관심있는 해석부위는 보통 노즐직경 두배의 영역이상을 모델링하면 되지만 그림 3과같이 가압기의 전체 헤드의 3/8까지 모델링하여 충분한 응력해석부위를 주었다. 또한 실제 가압기의 노즐의 덧살보강을 모델링하기위해 solid 요소를 사용하였고 사용된 요소수는 이만개정도였다. 해석은 유한요소 해석모듈을 갖춘 IDEAS 코드[3]를 사용하였고 workstation HP735에서 수행되었다.

3.2 해석방법

가. 적용하중

적용하중은 자중, 열팽창하중, 정상운전시 기계하중, OBE 및 SSE 지진하중, BLPB(Branch Line Pipe Break) 하중, SDSVA(Safety Depressurization System Valve Actuation) 하중 그리고 SVA(Safety Valve Actuation) 하중을 포함하며 경수로가압기 내부압력 설계하중 2500 psi[4][5]를 적용하였다.

나. 하중조합

참고문헌 4에 나타나는 PSV 노즐에 걸리는 하중을 설계하중 및 각 운전조건에 따라 하중조합하면 표 1와 같으며 Level C 하중에는 자중과 열팽창하중을 포함하고 있다. 가장 심각한 응력을 생산하는 배관하중의 방향성을 찾기위해 표 2과 같이 8가지 경우의 수로 나누어 응력해석을 한 후 노즐하중의 방향성을 찾았다. 각하중들의 +방향은 그림 4에 표시된 방향이다.

표 1. 각 운전조건에 대한 하중조합

하중조합	Force(kips)		Moment(ft-kips)	
	F_y	F_z	M_y	M_z
Design Condition	13	16	5	27
Level A	6	4	9	13
Level B	16	19	13	38
Level C	20	10	18	48
Level D	31	61	27	144

표 2. 노즐하중의 방향성

	F_y	F_z	M_y	M_z
Case 1	+	+	+	+
Case 2	+	+	-	+
Case 3	+	+	+	-
Case 4	+	+	-	-
Case 5	+	-	+	+
Case 6	+	-	-	+
Case 7	+	-	+	-
Case 8	+	-	-	-

다. 허용응력기준

표 3에 각 하중 조건에 따라 허용응력기준을 나타내었다. 가압기 헤드의 재질은 ASME SA-508, 노즐의 재질은 SA-541 CL3이며 탄성계수값은 27.6E6 psi, 프와송의 비는 0.3이다. 이 두 재질의 응력강

도: $S_m=26.70$ ksi, 극한강도: $S_u=80.00$ ksi, 항복응력: $S_y=43.10$ ksi이다[4].

3. 해석결과

해석결과 가장 헤드에 심한 영향을 미치는 노즐하중의 방향은 표 2에서 CASE 7의 경우였다. 보수적 계산을 위해 Design, Level A, Level B 하중중에서 Level B가 하중이 제일 큰 경우이므로 Level B 하중을 적용하였다. Level B, Level C, Level D의 해석결과는 표 3과 같으며 이 값은 가장 응력이 높게 나타나는 요소번호인 5697에서의 값이고 이 요소의 위치는 그림 5에 표시하였다.

표 3. 각 운전조건에 대한 해석결과

운전조건	응력범주	허용응력(psi)	계산된 응력강도값(psi)
설계조건, Level A, B	P_m	$S_m = 26700$	23985
	$P_m + P_b$	$1.5S_m = 40050$	30540
Level C	P_m	$1.2S_m = 32040$	23170
	$P_m + P_b$	$1.8S_m = 48060$	29040
Level D	P_m	$\min(2.4S_m, 0.7S_u) = 56000$	24925
	$P_m + P_b$	$1.5\min(2.4S_m, 0.7S_u) = 84000$	33740

4. 해석결과의 검토

한국 표준형원자로 가압기 및 PSV 노즐에 대한 내부압력과 운전조건에 따른 배관하중을 적용하여 해석한 결과를 검토해 보면 다음과 같다.

4.1 배관하중의 방향성

노즐근처 헤드부위에 가장 높은 응력을 발생시키는 배관하중의 방향성은 표 2의 CASE 7의 경우이고 그 요소의 평균응력값은 31110 psi이었다. 그리고 가장 낮은 응력을 발생시키는 배관하중의 방향성은 표 2의 CASE 2의 경우이고 응력값은 27340 psi이었다. 두응력의 차이값은 3770 psi이고 이 값은 결코 무시할 수 있는 적은 값이 아니므로 해석에 의한 설계(Design by Analysis)에서 필히 가장 심각한 배관하중의 방향성을 고려해야한다. 각 경우에 대해 노즐과 노즐사이 중간위치의 헤드부위에서 응력값은 큰 차이가 나지않으므로 배관하중의 방향성은 노즐부근의 응력분포에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다.

4.2 한국 표준형원자로 가압기 및 PSV 노즐의 건진성

한국 표준형원자로 가압기 용기는 ASME 코드 NB-3224.4(d)를 만족하므로 개구부근에서 NB-3221.1, NB-3221.2, NB-3221.3, NB-3222.2의 요구사항(Design by Analysis)을 만족함을 보이는 해석이 필요치 않으며 개구의 일반요건인 NB-3331을 만족하고 있다. 또한 PSV 노즐(그림 2 참조)에 대한 ASME 코드 노즐설계의 대응법칙 NB-3339을 만족하고 있다.

한편, 한국 표준형원자로 가압기 용기 및 PSV 노즐을 유한요소법을 이용하여 해석한 결과도 ASME 코드가 규정하는 응력강도의 허용기준을 만족하고 있다. 즉, 각 운전조건(Level A, B, C, D)에 따른 해

석결과인 표 3의 모든 응력강도값은 ASME 코드가 규정하는 허용응력강도내에 있다. 이로써 한국 표준형원자로 가압기 용기 및 PSV 노즐의 건전성은 검증된다.

해석결과와 마진(안전율)측면에서 살펴보면 Level A, B 조건에서 막응력에서는 10%, 굽힘응력에서는 24%이고 Level C 조건에서 막응력에서는 28%, 굽힘응력에서는 40%이고 Level D 조건에서 막응력에서는 55%, 굽힘응력에서는 60%로 나타났다. 가장 마진이 낮은 조건은 Level A, B의 10%이므로 배관하중이 좀더 심하게 적용될 때에는 ASME 코드가 규정하는 허용응력강도를 벗어날 수 있기 때문에 해석에 의한 설계(Design by Analysis)의 필요성이 더욱 절실함을 알 수 있다.

4.3 배관하중이 미치는 영향

배관하중이 미치는 영향을 평가하기 위해 배관하중을 적용하지않고 오직 내부압력만을 가압기에 적용한 해석결과와 정상운전 조건하에서의 가압기 내부압력과 가장 심각한 배관하중을 적용하여 해석한 결과를 비교할 때 헤드에서 응력차이 값은 1470 psi였다. 같이하여 Level C에서는 배관하중으로 오히려 응력값이 적어지고 Level D에서 응력차이값은 4670 psi로 나타났다. 각 운전조건에 따라 배관하중이 가압기헤드에 영향을 미침을 알 수 있다.

4.4 정상운전 조건에서 헤드 및 노즐의 응력분포

가장 응력이 높게 나타나는 부위는 노즐과 헤드가 만나는 경계선 부근의 요소들이며 헤드부위에서다. 헤드에서의 최고 응력값은 30540 psi이고 노즐과 헤드가 만나는 경계선 부근의 노즐에서의 최고 응력값은 18220 psi이므로 덧살보강시 헤드부위에 지우치도록 덧살보강해야함을 알 수 있다. 또한 배관하중의 방향성에 따라 헤드부위에서의 최고응력의 위치는 달라질 수 있으나 노즐부위에서는 가압기 중심선에서 먼쪽이 가까운 곳보다 응력이 높게 나타났다. 가까운 쪽은 9157 psi, 먼쪽은 18220 psi로 나타났다.

5. 결론

범용유한요소 해석모듈을 갖춘 IDEAS를 사용하여 한국 표준형원자로 가압기 및 PSV 노즐을 모델링하고 각 운전조건에 따른 해석에 의한 설계(Design by Analysis)를 수행하고 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 한국 표준형원자로 가압기 용기 및 PSV 노즐을 해석에 의한 설계(Design by Analysis)로 해석한 결과 ASME 코드가 규정하는 허용응력강도내에 있으므로 가압기 용기 및 PSV 노즐의 건전성은 검증된다. 해석에 의한 설계(Design by Analysis)는 헤드 및 노즐부위에서의 응력의 정량적인 값을 생산하기 때문에 가압기 노즐설계에 도움이 되는 유리한 점이 있다.
2. 해석결과와 마진(안전율)측면에서 볼 때 Level A, B 조건에서 막응력에서는 10%, 굽힘응력에서는 24%의 낮은 마진으로 나타났다. 배관하중이 좀더 심하게 적용될 때에는 ASME 코드가 규정하는 허용응력강도를 벗어날 수 있기 때문에 해석에 의한 설계(Design by Analysis)의 필요성이 더욱 절실함을 알 수 있다.
3. 해석에 의한 설계(Design by Analysis)시 배관하중의 방향성이 노즐근처 헤드의 강도에 영향을 미치

므로 가장 심각한 배관하중의 방향성을 고려해야한다.

4. 가장 응력이 높게 나타나는 부위는 노즐과 헤드가 만나는 경계선 부근의 헤드부위이고 노즐부위에서는 가압기 중심선에서 먼쪽이 가까운 곳보다 응력이 높게 나타나므로 설계변경시 혹은 배관하중이 높아질 경우 보강의 방향은 응력분포가 높은 쪽으로 더 두텁게 해야한다.

참 고 문 헌

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 1, Subsection NB, Class 1 Components, 1995.
2. Drawing Number, KHIC, D-UC-22162-CO3, Rev.2, Pressurizer Interfaces.
3. I-DEAS FEM User's Guide, Structural Dynamics Research Corporation, Inc., 1994.
4. NO291-ME-DR270-00, Rev.3, "Design Requirements for the Pressurizer for UCN 3&4", 1995.
5. NO291-ME-DS270-00, Rev.2, "Design Specification for the Pressurizer Assembly for UCN 3&4", 1994.

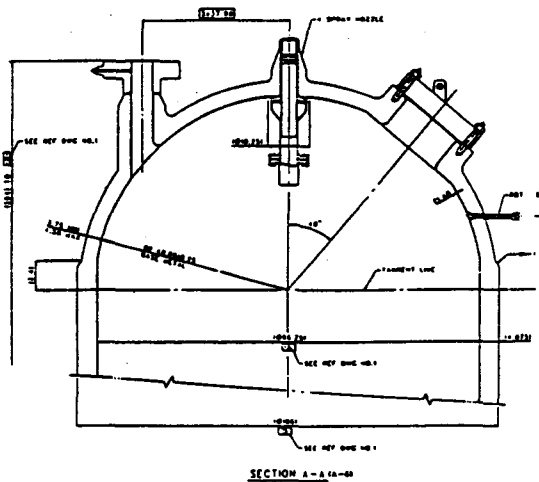


그림 1. 한국 표준형원자로의 가압기

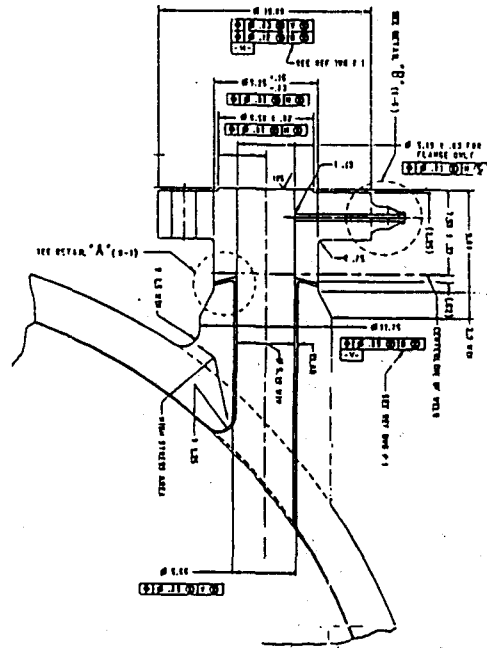


그림 2. PSV 노즐

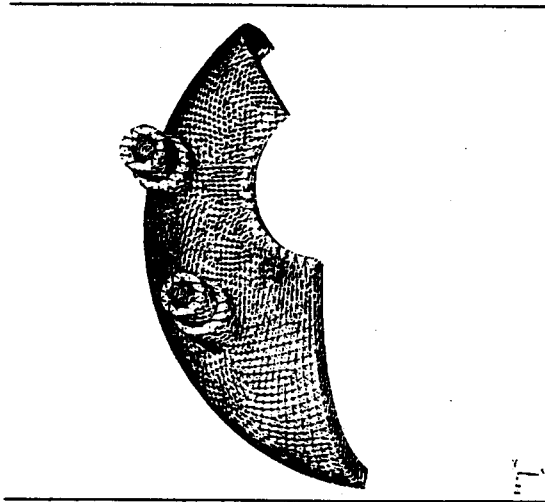


그림 3. 해석모델

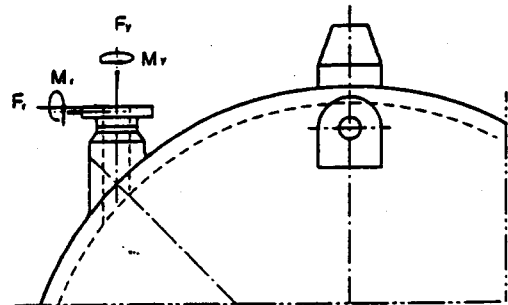


그림 4. 노즐하중의 +방향

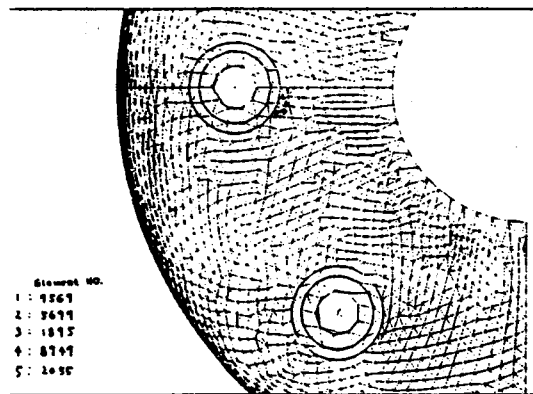


그림 5. 5697요소의 위치