

## 유한요소해석을 이용한 국부 감육배관에 대한 응력집중계수 제시

손범구\*, 김윤재†, 김영진\*

(2003년 12월 14일 접수, 2004년 5월 27일 심사완료)

### Finite Element Based Stress Concentration Factors for Pipes with Local Wall Thinning

Beom-Goo Son, Yun-Jae Kim and Young-Jin Kim

**Key Words :** Finite Element Analysis(유한요소해석), High Cycle Fatigue(고주기 피로), Local Wall Thinning(국부감육), Stress Concentration Factor(응력집중계수)

#### Abstract

The present work compiles the elastic stress concentration factor for a pipe with local wall thinning, based on detailed three-dimensional elastic FE analysis. To cover practically interesting cases, a wide range of pipe and defect geometries are considered, and both internal pressure and global bending are considered. Resulting values of stress concentration factors are tabulated for practical use, and the effect of relevant parameters such as pipe and defect geometries on stress concentration factors are discussed. The present results would provide valuable information to estimate fatigue damage of the pipe with local wall thinning under high cycle fatigue.

#### 1. 서 론

원자력발전소 기기설비의 40%를 차지하는 배관의 건전성은 발전소의 안전성과 관련된 매우 중요한 문제이며 이런 배관들은 많은 사고에 대비하여 보수적으로 설계되었다. 그 중 배관의 피로에 의한 손상평가는 ASME Sec. III<sup>(1)</sup>에 제시된 설계피로 곡선(design fatigue curve)으로 평가하고 있다. 설계 피로곡선을 사용하여 설계된 배관의 피로손상평가(fatigue damage assessment)는 일반적으로 형상의 비연속부에서의 응력집중을 고려하여 평가하게 된다.

발전소의 가동 중에 결함을 가진 배관이 발견되면 발전소 가동상태에서 결함을 평가하여야 한다. 그런 결함 중 하나가 국부감육(local wall thinning)이며 그 평가법은 크게 2가지로 분류 할 수 있다. 그 첫번째가 감육배관의 단순하중에 대한 파괴강

도를 기준으로 평가하는 방법이며 국내외로 많은 평가법<sup>(2-11)</sup>들이 연구되어 왔다. 그 한 예로 원자력 배관에서 사용되는 ASME Code Case N-597<sup>(2)</sup>은 감육배관의 계속사용, 수리 또는 교체 등의 조치를 위한 기준으로 허용두께 평가 기준을 제시하고 있다. 두 번째로 반복하중에 의한 피로손상 평가방법이다. 배관에 하중이 가해지면 감육부는 응력집중을 야기하여 감육부에서 최대 응력이 나타나게 된다. 따라서 감육배관의 피로손상에 대한 평가는 감육부에서 수행하여야 하며 감육부의 응력상태를 판단하기 위하여 배관 및 결함의 형상, 작용하중을 고려한 응력집중계수(stress concentration factor)가 필요하다. 단순 형상에 대한 응력집중계수는 참고문헌<sup>(12)</sup>에 제시되어 있다. 하지만, 감육배관에 대한 응력집중계수는 문헌으로 제시된 바 없다.

따라서, 감육배관의 피로손상평가를 수행하기 위해서는 응력집중계수가 필요하며 이를 위하여 본 논문에서는 3차원 탄성 유한요소 해석을 기반으로 내압, 굽힘하중이 작용하는 경우에 대하여 감육배관의 감육부에 대한 응력집중계수를 결정하

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학부

E-mail : kimy0308@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)926-9290

\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

였다. 내압을 받는 경우에 대해서는 하중의 영향이 미비한 반경방향을 제외한 축방향과 원주방향에 대하여 응력집중계수를 결정하였고 굽힘하중이 작용하는 경우에 대해서는 주 하중방향인 축방향에 대하여 응력집중계수를 결정하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 감육배관의 형상

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 감육배관을 나타낸 것으로서, 감육부의 반경방향 감육깊이  $d$ , 축방향 감육길이  $\ell$ , 원주방향 감육각도  $\theta$ , 배관의 평균반경  $R_m$ , 배관의 벽두께  $t$ 를 주요 형상변수로 하여 내압  $P$ , 굽힘하중  $M$ 을 고려하였다. 또한, 본 연구에서는 감육부의 국부응력에 영향을 미친다고 판단되는 4가지의 무차원변수,  $R_m/t=5, 13, 20, 40$ ,  $d/t=0.35, 0.5, 0.75$ ,  $\ell/t=(\ell/t)_{\min}, 5, 10, 20, 40$ ,  $\theta\pi=(\theta\pi)_{\min}, 0.125, 0.25, 0.5$ 를 고려하였으며  $(\ell/t)_{\min}$ 과  $(\theta\pi)_{\min}$ 은 감육부가 반원의 형상을 나타낼 때의  $\ell/t$ 와  $\theta\pi$ 를 나타낸다. 즉,  $(\ell/t)_{\min}=d/t$ 이며  $(\theta\pi)_{\min}=0.003\sim 0.053$ 의 값을 나타낸다.

### 2.2 유한요소 모델 및 해석

본 연구에서는 감육부를 원형의 일부로 이상화 하여 해석을 수행하였다. Fig. 2는 3차원 탄성유한요소 해석에 사용된 유한요소모델을 나타낸 것으로 20절점 사각 등계수 주요소(20-nodes isoparametric brick reduced integration element)를 사용하였고 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 모델링하였다. 사용된 절점(node)은 17,039개이며 요소(element)는 3,480개를 사용하였다. 응력집중계수를 결정하기 위하여 감육부의 최심점에서의 응력을 유한요소해석으로 계산하였다. 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(13)</sup>를 사용하였으며, 정확한 응력값을 계산하기 위하여 벽두께 방향으로 10개의 요소를 사용하였다. 해석에 사용된 재료물성치인 탄성계수(Young's modulus)와 포아송의 비(Poisson's ratio)는 각각  $E=200\text{ GPa}$ ,  $\nu=0.3$ 을 사용하였다.

하중조건은 내압과 굽힘하중을 고려하였으며 내압이 작용하는 경우에 대하여는 유한요소모델의 끝단에 내압에 의한 등가인장하중을 가하였으며, 굽힘하중은 배관의 끝단에 작용시켰으며 감육부가 인장하중을 받는 경우만 고려하였다. 내압이 작용하는 경우에 대하여는 응력이 미비한 반경방향을 제외하고 축방향과 원주방향을 고려하였으며 굽힘하중이 작용하는 경우에 대하여는 응력이 미비한 반경방향과 원주방향을 제외하고 축방향만 고려

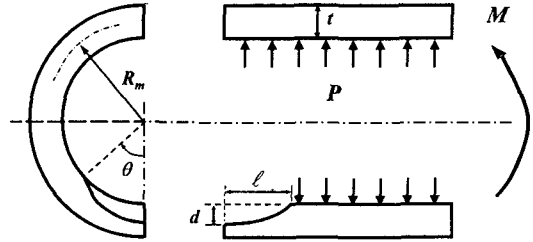


Fig. 1 Schematic illustration of pipe with local wall thinning

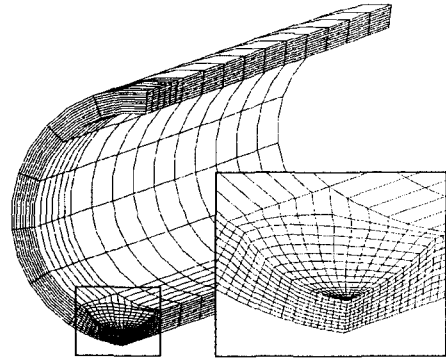


Fig. 2 3D finite element mesh employed in the present work

하였다.

### 2.3 해석의 타당성

본 연구에서 수행한 유한요소해석의 타당성을 입증하기 위하여 감육부가 반원형인 경우에 해당하는 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에서 나타낸 것과 같이 인장하중이 작용하는 2차원모델에 대하여 참고문헌(12)에 제시된 응력집중계수를 유한요소해석과 비교해 보았다. 유한요소해석에서는 본 연구에서 두께방향으로 10개의 요소를 사용한 것과 동일하게 노치(notch)부로부터 10개의 요소를 사용하였다. 해석 결과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 2%이내로 잘 일치하였다. 또한 감육부의 형태가 반구형태인 경우, 두께 방향으로 3개, 6개 그리고 10개의 요소를 사용한 결과를 비교해 본 결과, 6개와 10개의 요소를 사용한 결과가 일치하였다. 따라서, 본 연구에서 두께방향으로 충분히 많은 10개의 요소를 사용하였다.

## 3. 응력집중계수

### 3.1 굽힘하중이 작용하는 경우

굽힘하중이 작용하는 경우에 대하여 축방향 응력집중계수( $K_t^a$ )는 다음과 같이 정의된다.

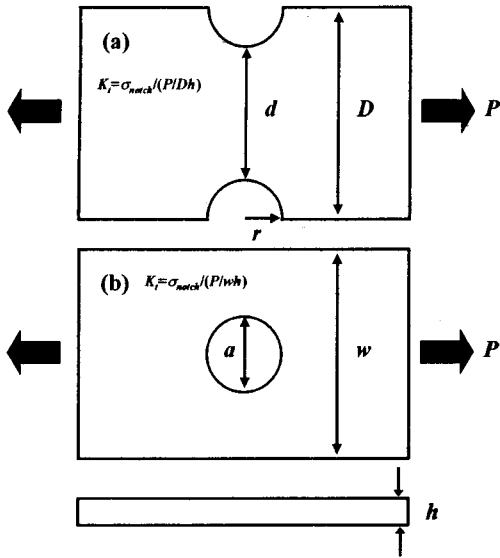


Fig. 3 (a) Tension strip with semi-circular edge notches, and (b) a plate with a circular hole under tension. Definitions of stress concentration factors are also given

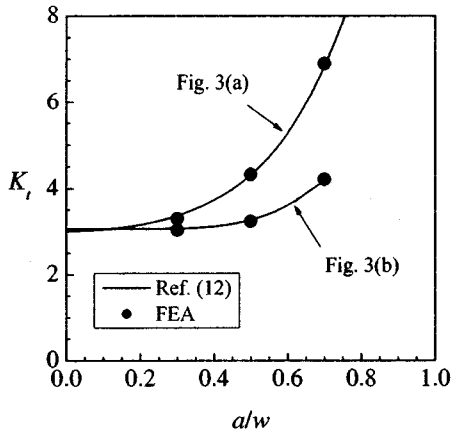


Fig. 4 Comparison with the present FE stress concentration factor solutions with those in Ref. (12)

$$K_t^b = \frac{\sigma_a^{FE}}{\sigma_n} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_a^{FE}$ 는 유한요소해석으로 계산한 감육부의 축방향 최대응력이며  $\sigma_n$ 은 기준응력(nominal stress)으로서 다음과 같이 벽두께 방향 중간지점에서의 응력으로 결정하였다.

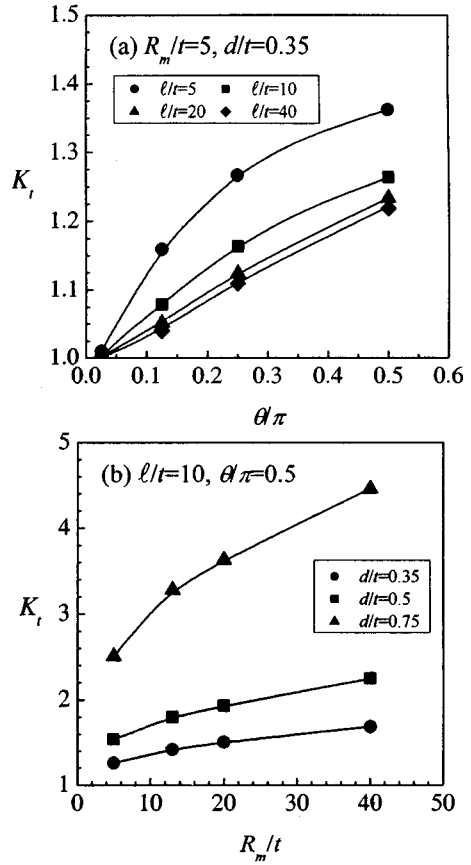


Fig. 5 Variations of the axial stress concentration factor for the locally wall-thinned pipe under bending with (a)  $R_m/t=5, d/t=0.35$  (b)  $l/t=10, \theta/\pi=0.5$

$$\sigma_n = \frac{4}{\pi} \frac{MR_m}{(R_o^4 - R_i^4)} \quad (2)$$

굽힘하중이 작용하는 경우에 대한 축방향 응력 집중계수를 유한요소해석으로 결정하였고 이를 Table 1~4에 나타내었다.  $R_m/t=5, d/t=0.35$ 인 경우에 대하여  $\theta/\pi$ 와  $l/t$ 의 영향을 Fig. 5(a)에 나타내었으며  $l/t=10, \theta/\pi=0.5$ 인 경우에 대하여  $R_m/t$ 와  $d/t$ 의 영향을 Fig. 5(b)에 나타내었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이  $l/t$ 가 감소할수록 또한  $\theta/\pi$ 가 증가할수록 응력집중계수는 증가하는 경향을 나타냈으며  $R_m/t$ 와  $d/t$ 가 증가할수록 응력집중계수가 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 굽힘하중이 작용하는 경우에 대한 축방향 응력집중계수에서 모두 같은 경향을 나타내었다.

**Table 1** Values of the stress concentration factor for the locally wall-thinned pipe with  $R_m/t=5$

$d/t=0.35$					$d/t=0.5$					$d/t=0.75$				
$\theta/\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$	$\theta/\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$	$\theta/\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$
0.025	0.35	2.79	2.29	1.98	0.035	0.5	2.92	2.33	2.17	0.053	0.75	3.07	2.50	2.71
	5	4.06	5.74	1.13		5	4.50	6.79	1.08		5	5.43	9.27	1.26
	10	4.51	6.38	1.00		10	5.46	8.18	1.04		10	7.61	12.6	1.16
	20	4.80	6.75	1.00		20	6.18	9.10	1.03		20	9.49	15.0	1.13
	40	4.94	6.91	1.00		40	6.57	9.53	1.03		40	10.7	16.2	1.11
0.125	0.35	4.07	1.54	3.09	0.125	0.5	4.16	1.57	3.38	0.125	0.75	4.26	1.67	4.21
	5	1.96	2.63	1.16		5	2.36	3.51	1.29		5	3.28	6.00	1.63
	10	2.20	3.08	1.08		10	2.90	4.40	1.17		10	4.84	8.49	1.39
	20	2.44	3.38	1.05		20	3.40	5.01	1.13		20	6.27	10.1	1.28
	40	2.60	3.54	1.04		40	3.75	5.33	1.11		40	7.24	10.9	1.24
0.25	0.35	4.44	1.48	3.40	0.25	0.5	4.86	1.47	3.96	0.25	0.75	6.09	1.61	5.60
	5	1.53	1.99	1.27		5	1.71	2.48	1.49		5	1.99	3.99	2.19
	10	1.75	2.37	1.16		10	2.16	3.20	1.33		10	3.23	5.93	1.80
	20	1.97	2.63	1.13		20	2.59	3.69	1.26		20	4.53	7.42	1.60
	40	2.13	2.75	1.11		40	2.90	3.91	1.24		40	5.52	8.09	1.52
0.5	0.35	4.64	1.46	3.56	0.5	0.5	5.42	1.49	4.33	0.5	0.75	8.18	1.74	6.86
	5	1.33	1.61	1.36		5	1.54	1.98	1.70		5	2.61	3.61	2.93
	10	1.52	1.81	1.26		10	1.89	2.29	1.54		10	3.33	4.22	2.51
	20	1.66	1.93	1.23		20	2.13	2.52	1.47		20	3.76	4.75	2.23
	40	1.73	1.95	1.22		40	2.27	2.58	1.45		40	4.18	5.01	2.11

**Table 2** Values of the stress concentration factor for the locally wall-thinned pipe with  $R_m/t=13$

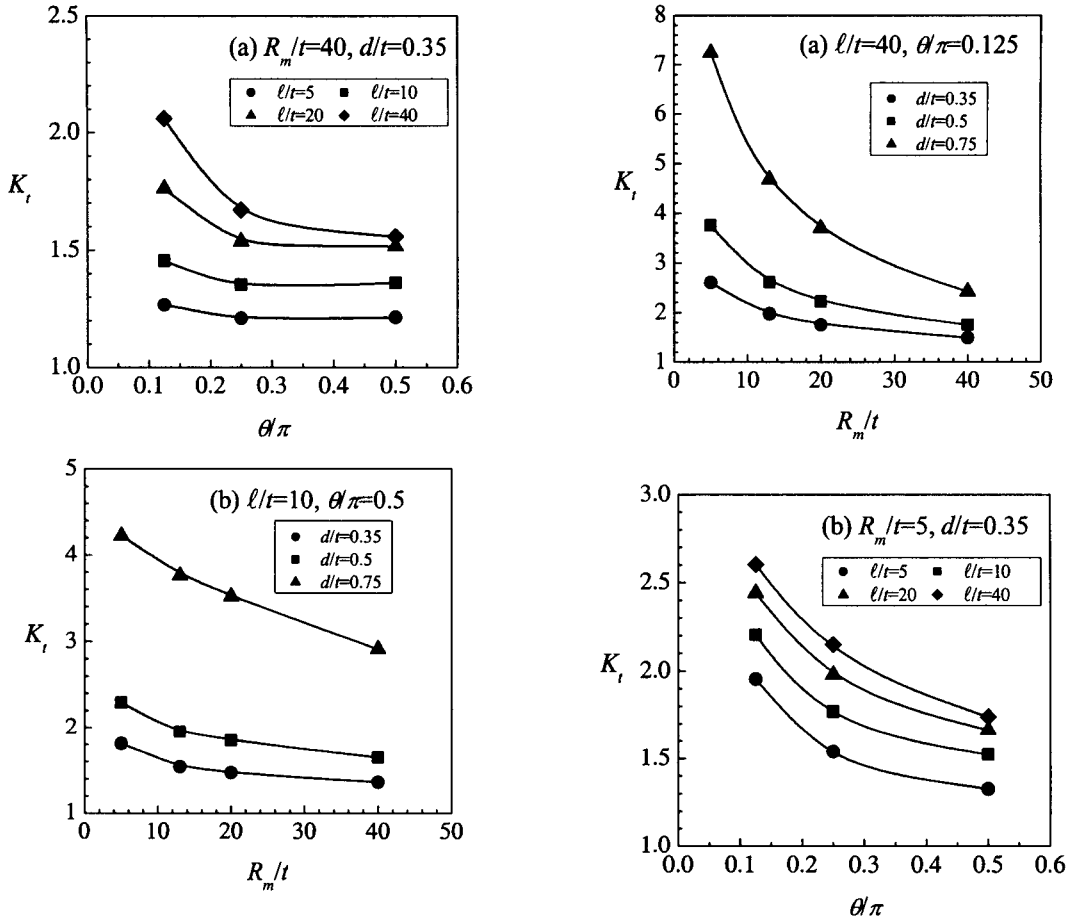
$d/t=0.35$					$d/t=0.5$					$d/t=0.75$				
$\theta/\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$	$\theta/\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$	$\theta/\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$
0.009	0.35	2.47	2.19	1.97	0.013	0.5	2.63	2.26	2.13	0.019	0.75	2.96	2.59	1.97
	5	3.62	5.21	1.03		5	4.02	6.18	1.08		5	4.59	8.05	1.19
	10	4.07	5.88	1.01		10	4.97	7.68	1.03		10	6.78	11.8	1.09
	20	4.36	6.33	1.00		20	5.77	8.88	1.01		20	9.18	15.6	1.04
	40	4.55	6.61	1.00		40	6.34	9.73	1.01		40	11.5	19.0	1.02
0.125	0.35	4.31	1.49	3.92	0.125	0.5	4.99	1.53	4.69	0.125	0.75	6.27	1.62	6.32
	5	1.54	1.73	1.45		5	1.68	2.07	1.72		5	1.65	2.92	2.48
	10	1.58	2.13	1.21		10	1.84	2.83	1.36		10	2.43	4.99	1.81
	20	1.77	2.50	1.13		20	2.23	3.54	1.24		20	3.53	6.97	1.51
	40	1.97	2.80	1.09		40	2.61	4.11	1.17		40	4.64	8.47	1.33
0.25	0.35	4.50	1.48	4.14	0.25	0.5	5.52	1.55	5.24	0.25	0.75	8.12	1.77	7.96
	5	1.31	1.41	1.60		5	1.40	1.62	2.02		5	1.62	2.46	3.46
	10	1.31	1.68	1.32		10	1.45	2.10	1.59		10	1.95	3.61	2.53
	20	1.47	1.96	1.25		20	1.72	2.58	1.45		20	2.40	4.72	2.11
	40	1.62	2.21	1.19		40	2.01	3.05	1.34		40	3.13	6.05	1.76
0.5	0.35	4.62	1.49	4.26	0.5	0.5	5.87	1.59	5.54	0.5	0.75	9.60	1.91	9.12
	5	1.33	1.35	1.69		5	1.56	1.60	2.24		5	2.43	2.67	4.29
	10	1.35	1.54	1.42		10	1.66	1.95	1.80		10	3.06	3.76	3.28
	20	1.46	1.63	1.36		20	1.82	2.08	1.69		20	3.30	4.01	2.94
	40	1.50	1.72	1.32		40	1.87	2.22	1.59		40	3.27	4.21	2.59

**Table 3** Values of the stress concentration factor for the locally wall-thinned pipe with  $R_m/t=20$

$d/t=0.35$					$d/t=0.5$					$d/t=0.75$				
$\theta\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$	$\theta\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$	$\theta\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$
0.006	0.35	2.38	2.16	1.94	0.008	0.5	2.56	2.26	2.10	0.012	0.75	2.98	2.65	2.54
	5	3.52	5.07	1.04		5	3.83	5.90	1.08		5	4.31	7.56	1.18
	10	3.97	5.76	1.01		10	4.78	7.43	1.03		10	6.35	11.2	1.08
	20	4.28	6.24	1.00		20	5.63	8.72	1.01		20	8.88	15.3	1.03
	40	4.48	6.55	1.00		40	6.25	9.66	1.00		40	11.4	19.3	1.01
0.125	0.35	4.47	1.50	4.21	0.125	0.5	5.45	1.59	5.30	0.125	0.75	7.34	1.72	7.44
	5	1.51	1.49	1.64		5	1.65	1.69	2.04		5	1.68	2.20	3.19
	10	1.41	1.82	1.30		10	1.55	2.31	1.51		10	1.75	3.78	2.15
	20	1.58	2.19	1.19		20	1.89	2.99	1.33		20	2.67	5.65	1.73
	40	1.75	2.50	1.13		40	2.22	3.59	1.22		40	3.66	7.28	1.46
0.25	0.35	4.61	1.51	4.39	0.25	0.5	5.92	1.62	5.79	0.25	0.75	9.16	1.90	9.13
	5	1.38	1.30	1.79		5	1.58	1.46	2.36		5	2.20	2.14	4.33
	10	1.22	1.51	1.42		10	1.34	1.85	1.75		10	1.93	3.27	2.98
	20	1.36	1.74	1.31		20	1.57	2.22	1.57		20	2.28	3.98	2.50
	40	1.47	1.96	1.25		40	1.73	2.63	1.45		40	2.47	4.95	2.08
0.5	0.35	4.73	1.52	4.52	0.5	0.5	6.22	1.65	6.06	0.5	0.75	10.4	2.03	10.1
	5	1.43	1.28	1.88		5	1.74	1.48	2.56		5	2.90	2.25	5.15
	10	1.31	1.47	1.51		10	1.58	1.85	1.93		10	2.80	3.52	3.63
	20	1.45	1.57	1.42		20	1.82	2.02	1.79		20	3.35	3.95	3.25
	40	1.46	1.63	1.38		40	1.83	2.09	1.70		40	3.37	4.04	2.94

**Table 4** Values of the stress concentration factor for the locally wall-thinned pipe with  $R_m/t=40$

$d/t=0.35$					$d/t=0.5$					$d/t=0.75$				
$\theta\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$	$\theta\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$	$\theta\pi$	$\ell/t$	$K_t^a$	$K_t^h$	$K_t^b$
0.003	0.35	2.27	2.09	1.94	0.004	0.5	2.47	2.23	2.11	0.006	0.75	3.02	2.77	2.51
	5	3.36	4.77	1.05		5	3.60	5.43	1.09		5	4.21	7.02	1.19
	10	3.79	5.51	1.01		10	4.42	6.91	1.02		10	5.68	9.97	1.07
	20	4.13	6.02	1.00		20	5.33	8.28	1.00		20	8.05	14.1	1.02
	40	4.35	6.38	1.00		40	6.02	9.38	1.00		40	10.7	18.4	0.99
0.125	0.35	4.74	1.55	4.59	0.125	0.5	6.22	1.71	6.27	0.125	0.75	9.35	1.98	9.56
	5	1.64	1.27	1.99		5	1.95	1.38	2.63		5	2.84	1.73	4.62
	10	1.27	1.45	1.52		10	1.33	1.71	1.87		10	1.36	2.61	3.01
	20	1.34	1.76	1.29		20	1.50	2.25	1.51		20	1.86	3.89	2.28
	40	1.49	2.06	1.22		40	1.75	2.80	1.38		40	2.42	5.32	1.88
0.25	0.35	4.85	1.55	4.72	0.25	0.5	6.58	1.74	6.65	0.25	0.75	11.0	2.17	11.1
	5	1.64	1.21	2.13		5	2.09	1.34	2.96		5	3.76	1.78	5.86
	10	1.23	1.35	1.63		10	1.38	1.62	2.12		10	2.02	2.80	3.93
	20	1.30	1.54	1.42		20	1.54	1.94	1.77		20	2.65	3.66	3.14
	40	1.37	1.67	1.36		40	1.62	2.14	1.65		40	2.58	3.97	2.75
0.5	0.35	5.03	1.58	4.93	0.5	0.5	6.88	1.78	6.96	0.5	0.75	11.9	2.27	12.0
	5	1.68	1.21	2.19		5	2.21	1.35	3.12		5	4.29	1.81	6.60
	10	1.30	1.36	1.69		10	1.54	1.65	2.25		10	2.46	2.91	4.46
	20	1.42	1.52	1.49		20	1.78	1.94	1.92		20	3.34	3.80	3.66
	40	1.48	1.56	1.46		40	1.89	2.01	1.85		40	3.60	3.99	3.41



**Fig. 6** Variations of the hoop stress concentration factor for the locally wall-thinned pipe under internal pressure with (a)  $R_m/t=40$ ,  $d/t=0.35$  (b)  $l/t=10$ ,  $\theta/\pi=0.5$

3.2 내압이 작용하는 경우

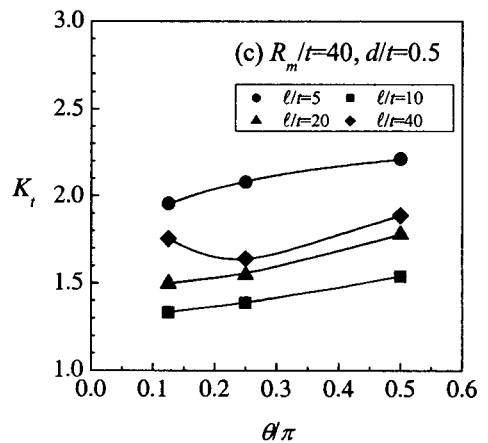
내압이 작용하는 경우에 대하여 축방향 응력집중계수( $K_t^a$ )와 기준응력을 다음과 같이 정의하였다.

$$K_t^a = \frac{\sigma_a^{FE}}{\sigma_n} \tag{3}$$

$$\sigma_n = \frac{PR^2}{(R_o^2 - R_i^2)} \tag{4}$$

또한, 원주방향 응력집중계수( $K_t^h$ )는 다음과 같이 정의되며 기준응력은 벽두께 방향 중간지점에서의 응력으로 정의하였다.

$$K_t^h = \frac{\sigma_h^{FE}}{\sigma_n} \tag{5}$$



**Fig. 7** Variations of the axial stress concentration factor for the locally wall-thinned pipe under internal pressure with (a)  $l/t=40$ ,  $\theta/\pi=0.125$  (b)  $R_m/t=5$ ,  $d/t=0.35$  (c)  $R_m/t=40$ ,  $d/t=0.5$

$$\sigma_n = \frac{PR_y^2}{(R_o^2 - R_i^2)} \left[ 1 + \left( \frac{R_o}{R_m} \right)^2 \right] \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_n^{FE}$ 는 유한요소해석으로 계산한 감육부의 원주방향 최대응력을 나타낸다.

내압이 작용하는 경우에 대한 축방향과 원주방향 응력집중계수를 유한요소해석을 이용하여 결정하였고 이를 Table 1-4에 나타내었다.  $R_m/t=40$ ,  $d/t=0.35$ 인 경우에 대하여  $\theta\pi$ 와  $l/t$ 의 영향을 Fig. 6(a)에 나타내었으며  $l/t=10$ ,  $\theta\pi=0.5$ 인 경우에 대하여  $R_m/t$ 와  $d/t$ 의 영향을 Fig. 6(b)에 나타내었다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 굽힘하중이 작용하는 경우와는 달리  $l/t$ 가 감소할수록 또한  $\theta\pi$ 가 증가할수록 응력집중계수는 감소하는 경향을 나타냈으며  $R_m/t$ 가 감소할수록  $d/t$ 가 증가할수록 응력집중계수가 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 내압이 작용하는 경우에 대한 원주방향 응력집중계수에서 모두 같은 경향을 나타내었다.

Fig. 7은 내압이 작용하는 경우에 대한 축방향 응력집중계수를 나타낸 것으로 Fig. 7(a)는  $l/t=40$ ,  $\theta\pi=0.125$ 인 경우에 대하여  $R_m/t$ 와  $d/t$ 의 영향을 나타낸 것이다.  $d/t$ 가 증가할수록  $R_m/t$ 가 감소할수록 응력집중계수가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 내압이 작용하는 경우에 대하여 축방향으로 모두 같은 경향을 나타내었다. 하지만, Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)에서 나타난 바와 같이 내압이 작용하는 경우에 대하여 축방향 응력집중계수는  $l/t$ ,  $R_m/t$ ,  $\theta\pi$ ,  $d/t$ 의 영향이 복합적으로 나타났다. 이는 결합의 형상과 배관의 크기에 따라 응력의 지배성이 원주방향과 축방향으로 달라지는 현상에 의한 결과로 판단된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 3차원 유한요소해석을 이용하여 배관의 크기 및 결합의 형상등을 고려하여 감육배관의 응력집중계수를 결정하였다. 배관의 크기  $R_m/t=5, 10, 20, 40$ , 감육부의 깊이  $d/t=0.35, 0.5, 0.75$ , 감육부의 축방향 길이  $l/t=(l/t)_{min}, 5, 10, 20, 40$ , 감육부의 원주방향각도  $\theta\pi=(\theta\pi)_{min}, 0.125, 0.25, 0.5$  등을 고려하였다. 또한, 작용하중은 굽힘하중과 내압을 고려하였으며 굽힘하중에 대하여 축방향 응력집중계수를 결정하였고 내압에 대하여 축방향과 원주방향 응력집중계수를 결정하였다. 본 연구에서 제시한 응력집중계수는 내압과 굽힘하중이 동시에 작용하는 복합하중의 경우에도 응력집중계수를 선형중첩하여 결정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 제시된 응력집중계수를 사용하여 감육배관

의 고주기 피로평가에 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- (1) American Society of Mechanical Engineer, 1998, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components," ASME Boiler and Pressure Vessel Code SECTION III.
- (2) American Society of Mechanical Engineer, 1998, "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning," ASME B&PV Code Sec. XI, Division 1, Code Case N-597.
- (3) American Society of Mechanical Engineer, 1991, "Manual for Remaining Strength of Corroded Pipelines," ANSI/ASME B31.G
- (4) Lim, H, Shim, D.J, Kim, Y.J and Kim, Y.J, 2003, "Development of Assessment Methodology for Locally Corroded Pipe Using Reference Stress Concept," *Transaction of KSME(A)*, Vol. 27, No. 7, pp. 1200~1209.
- (5) Shim, D.J, Lim, H, Choi, J.B, Kim, Y.J, Kim, J.W and Park, C.Y, 2003, "Effect of Wall Thinned Shape and Pressure on Failure of Wall Thinned Nuclear Piping Under Combined Pressure and Bending Moment," *Transaction of KSME(A)*, Vol. 27, No. 5, pp. 742~749.
- (6) Choi, J.B; Kim, J.S, Goo, B.G, Kim, Y.J and Choi, Y.W, 2001, "Engineering Estimation of Limit Load Solution for Wall Thinned Pipes Considering Material Properties," *KSME 2001 Spring Annual Meeting A*, pp. 351~356
- (7) 2000, "API 579: Recommended Practice for Fitness-for-Service," First Edition, American Petroleum Institute.
- (8) Roy, S., Grigory, S., Smith, M., Kanninen, M.F. and Anderson, M., "Numerical Simulations of Full-Scale Corroded Pipe Tests with Combined Loading," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 119, 1997, pp. 457~466.
- (9) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S.H. and Ando, K. "Fracture Behavior of Carbon Steel Pipe with Local Wall Thinning Subject to Bending Load," *Nuclear Engineering Design*, Vol. 191, 1999, pp. 195~204.
- (10) Smith, M.Q. and Waldhart, C.J., "Combined Loading Tests of Large Diameter Corroded Pipelines," *ASME International Pipeline Conference*, Vol. 2, 2000.
- (11) Cronin, D. and Pick, R.J., "Experimental Database for Corroded Pipe: Evaluation of RSTRENG and B31G," *ASME International Pipeline Conference*, Vol. 2, 2000.
- (12) Peterson, Rudolph Earl, 1974, "Stress Concentration Factors," John Wiley & Sons, Inc.
- (13) 2001, "ABAQUS User's manual," Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc.