

클램프에서 예하중의 영향에 관한 연구

한 동 민*, 이 석 순**, 이 영 석***, 이 동 렬****

A Study on the Effect of Preloading in Clamp

Dong Min Han*, Seok Soon Lee**, Young Seok Lee***, Dong Ryeol Lee****

ABSTRACT

The clamp, as the structure which is used for supporting the pipe in the atomic power plant, is produced with a certain degree of anticlastic curvature in the current manufacturing process.

In this study, the structural analysis of the clamp and the pipe was performed using ABAQUS. And the finite element modelling for the analysis was made by an HyperMesh. The contact forces which are transferred between the clamp and the pipe for the external force are changed according to the binding force of bolts and keeps the clamp tightly and protects the slipping between the clamp and the pipe.

The clamps with the anticlastic curvature and with the flat curvature are considered in order to invest the anticlastic effect. In this study, another case is suggested. The present case does not have the stiffness ring on the end of the clamp but the suggested case has the ring.

For the present case, the results showed that the equivalent stress is higher in the anticlastic curvature case than in the flat curvature case and the equivalent stresses on the pipe are almost the same as the binding force increases. For the suggested case, the result showed that the equivalent stress in the anticlastic curvature case decreases until some binding force and increases as the binding forces increase and is lower in some range than in the flat curvature case.

From this study, the clamp with the anticlastic curvature in the suggested method is better than the clamp with the flat curvautre and the optimal binding force are given.

Key Words : Preloading(예하중), anticlastic Curvature(배사곡률), Contact(접촉).

1. 서 론

클램프(clamp)는 원자력 발전소 배관의 지지에 사용되
는 구조물로서 현재의 제조공정으로는 어느 정도의 배사

곡률(anticlastic curvature)이 되어서 제작되어지고 있
다⁽¹⁾. 이렇게 제작된 클램프는 보울트(bolt)로 체결하여
원자력 발전소의 배관(pipe)을 지지하는 데 사용된다. 클
램프를 체결할 때 클램프와 배관 사이에 어느정도의 접촉

* 경상대학교 대학원 기계공학과
** 경상대학교 기계공학과 (정회원), 항공기부품기술연구센터
*** 인천기능대학
**** 성화산업 주식회사

력이 발생하도록 체결하여 클램프와 배관이 상대 이동하지 않도록 해야하나 이에 대한 기준이 없이 시행되고 있다. 보울트를 어느 정도의 힘으로써 체결하느냐에 따라서 클램프와 파이프사이에서 전달되는 접촉력(contact force)이 달라지게 되고 이 접촉력에 의해서 클램프와 파이프의 내부응력은 변화하게 된다. 적절한 보울트의 체결력을 가하게 되면 클램프와 파이프의 체결을 보다 확실하게 할 수 있으며, 클램프와 파이프 사이의 미끄러짐을 방지할 수 있을 것이다.

실제로 베어링에서는 예하중(preloading)을 가하므로써 수명연장과 정확한 축의 위치교정을 가능하게 해주며 하중이 가해진 상태에서 축의 처짐을 감소시키며 전 시스템의 강성도를 증가시킨다. 그리고 미끄럼현상(skidding)을 방지하고 베어링 소음을 감소시키며 내충격성을 향상시키며, 베어링에 걸리는 하중을 적절히 분산시킨다고 알려져 있다⁽²⁾.

본 연구에서는 배사곡률이 없는 클램프와 배사곡률이 있는 클램프를 비교하므로써 배사곡률이 클램프의 안정성에 어느 정도의 영향을 미치는가를 조사하고, 보울트의 체결력을 조절하므로써 예하중에 의한 클램프와 파이프의 접촉압력과 응력변화를 해석하고자 한다. 이 해석을 통하여 클램프에서 내부응력이 최소가 되는 보울트의 체결력을 제시하고자 한다.

또한, 기존의 클램프에는 클램프의 끝부분에 강성링을 가지고 있지 않은데, 본 연구에서는 기존 클램프의 끝부분에 강성링을 추가한 새로운 모델을 제시하여, 기존의 모델과 비교함으로써 본 연구에서 제시한 클램프모델의 우수성을 입증하고자 한다.

본 연구에서는 전처리기로 Hyper Mesh⁽³⁾, 해석과 후처리기로는 접촉문제의 해석이 가능한 상업용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS/Standard⁽⁴⁾, ABAQUS/Post⁽⁵⁾를 사용하였다.

II. 본론

2.1 클램프(clamp)의 개요

그림 1은 배사곡률이 된 클램프의 형상이며 제조공정은 그림 2와 같다. 그림 2에서와 같이 위 금형과 아래 금형이 한 쌍을 이루어서 유압 프레스로 가공하여 클램프를 제조한다. 따라서, 이 제조공정에서는 클램프소재의 굽힘이 일어나는 중심부에서 배사곡률이 그림 1과 같이 발생하게 된다. 배사곡률의 크기는 클램프의 폭과 두께에 따

라 달라지게 된다. 표 1에서는 클램프 제조회사에서 정한 클램프의 폭에 따른 배사곡률의 허용오차를 나타내고 있다.

Table 1. Anticlastic curvature tolerance through clamp width

Clamp width(W)	Anticlastic curvature tolerance(D mm)
up to 63.5 mm	2
76.2mm ~ 101.6mm	4
127.0mm ~ 203.2mm	5
228.2mm ~ 254.0mm	9
279.4mm over	10

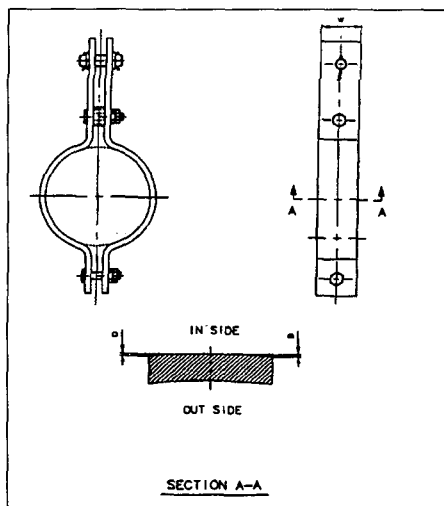


Fig. 1 Schematic of a clamp with anticlastic curvature

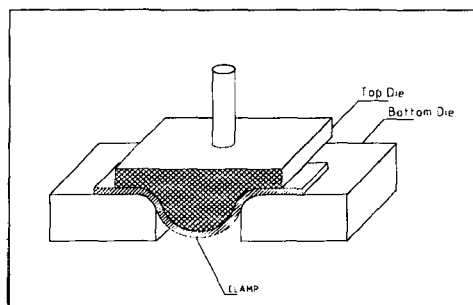


Fig. 2 Manufacturing process of a clamp

배관지지대로 사용되는 클램프와 파이프의 재료상수는 표 2와 같다. 표 2는 파이프와 클램프는 열에 의하여 영향을 받기 때문에 사용 최고온도인 343℃에서의 재료상

수이다. 본 해석에서는 배관에 흐르는 유체의 온도와 압력에 대한 영향을 고려하지는 않았다.

Table 2. Material constants of a pipe and a clamp

	Material	Young's Modulus	Yield Stress
Pipe	SA53-B	1.8×10^5 MPa	175 MPa
Bolt	SA307-A (SPC-36-360)	2×10^5 MPa	860 MPa
	SA193-B7 (SPC-08-060)		
	(SPC-10-080)		
Clamp	SA36	1.8×10^5 MPa	180 MPa

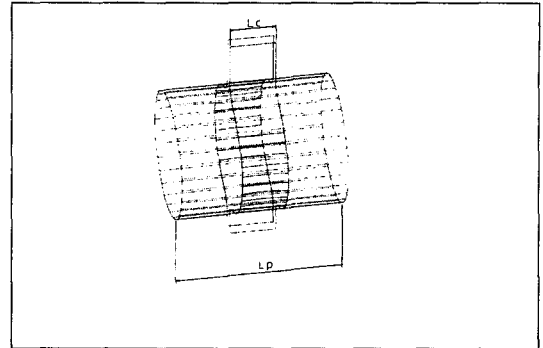


Fig. 3. Length of a clamp and a pipe.

2.2 클램프의 유한요소 모델링

클램프와 파이프는 서로 접촉에 의해 작용하는 외력을 전달하고 있다. 본 해석에서 해석하고자 하는 대상은 클램프와 파이프 사이에 작용하는 접촉압력과 접촉영역을 구하고, 동시에 응력분포를 구해야 한다. 본 해석에서 사용한 요소는 shell요소로서 클램프와 파이프를 모델링하였다. 클램프와 파이프는 접촉력에 의하여 하중을 전달받으므로 접촉력에 크게 기여하지 않는 체결용 보울트는 등가 보 (beam) 요소로 모델링하였다. 경계조건으로는 파이프의 양단을 고정 (fixed) 시켰으며, 하중은 클램프가 매달리는 부분인 보울트 위치에 설계 최고하중을 집중하중으로 클램프의 길이방향으로 작용시켰다.

Table 3 Dimensions of a clamp and a pipe

Model No.	Dimension(mm)	Load	Anticlastic curvature tolerance
SPC-08-60	tc = 12.7 Lc = 63.5	22241.0 N	2 mm
PIPE(6")	R = 84.1 tp = 7.1 Lp = 263.5		

각각의 클램프모델에 대하여 파이프의 주요치수와 클램프에 작용하는 하중은 표 3과 같다. 표 3에서 tc는 클램프의 두께이며, Lc는 클램프의 폭, R은 파이프의 반경, tp는 파이프의 두께, Lp는 모델링에 사용된 파이프의 길이를 나타낸다.

유한요소 모델링에 사용된 요소의 개수는 표 4와 같다. 요소 분할은 파이프와 클램프를 큰 영역으로 나누고 파이프와 클램프의 접촉부분에 대해서는 접촉하는 부분끼리 쌍(pair)을 지었다. 본 연구에서 사용한 사각형 요소는 S4R요소이며, 배사곡률이 있는 경우에는 일부분에 삼각형 요소인 S3R을 사용하였다. 그림 4는 배사곡률이 되지 않은 클램프를 모델링한 것이며, 그림 5는 배사곡률이 된 경우를 모델링한 것이다.

Table 4. Element No. of each clamp model

Model No.	Case of non anticlastic curvature	Case of anticlastic curvature
SPC-08-060	1788 개	2316 개

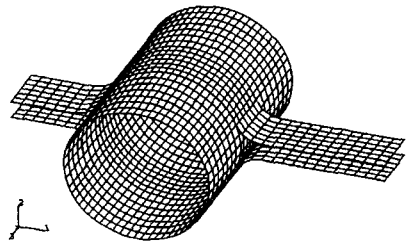


Fig. 4 FE modelling of a clamp and a pipe with non anticlastic curvature

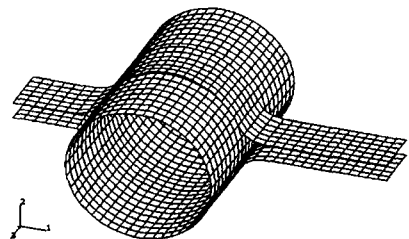


Fig. 5 FE modelling of a clamp and a pipe with anticlastic curvature

2.3 초기접촉면적에 따른 클램프의 등가응력의 비교

초기접촉면적의 변화는 제품의 제조과정에서 생기는 치수편차에 의하여 발생한다. 본 해석에서는 초기접촉면적이 클램프와 파이프사이의 응력분포에 어떻게 영향을 미치는지 알아보기 위해서 그림 6과 같이 초기접촉면적의 크기를 세가지로 모델링하였다. 그림 7은 클램프와 파이프사이의 초기접촉면적에 따른 클램프의 등가응력의 변화를 나타낸 것이다. 그림 7에서 배사곡률이 없는 경우의 등가응력이 가장 작게 나타나고 있으며, 보에 작용하는 힘이 증가할 수록 배사곡률이 없는 경우와 초기접촉면적이 1/3인 경우는 거의 같은 수준으로 클램프의 등가응력 값이 증가하는 것을 알 수 있으며, 접촉면적이 1/7인 경우에는 클램프의 등가응력값이 감소하다가 증가하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 배사곡률이 있는 경우는 초기접촉면적이 1/7인 경우로 가정하여 수치해석을 수행하였다.

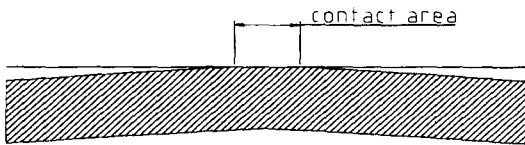


Fig. 6 contact area between clamp and pipe

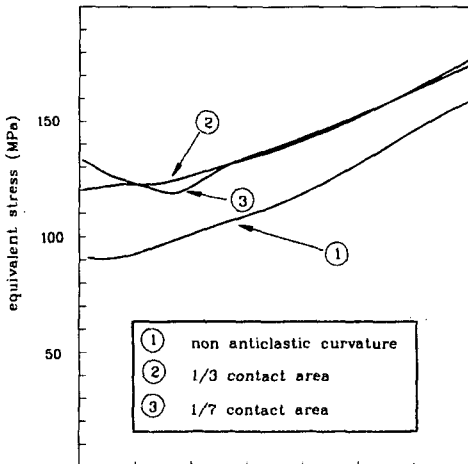


Fig. 7 Comparison of equivalent stress of a clamp through contact area

2.4 기존 클램프에서 보울트체결력이 내부응력변화에 미치는 영향

상, 하 한 쌍으로 되어 있는 클램프는 보울트의 체결력

으로 클램프와 파이프를 고정시키므로 보울트의 체결력이 클램프와 파이프의 접촉력에 변화를 주게 된다. 이 접촉력이 클램프와 파이프의 내부응력에 변화를 주게 된다. 본 연구에서는 보울트의 체결력을 보(beam)요소에 온도차를 가해서 발생하는 힘으로 등가화 하여 예하중(preloading)을 가하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 보(beam)요소의 재료상수는 표 5와 같다.

Table 5 Material constants of a beam

	Material constants
Young's modulus	2×10^5 MPa
Poison ratio	0.3
Thermal expansion coefficient	0.00009

2.4.1 배사곡률이 있는 경우의 보울트체결력의 영향

표 6은 배사곡률이 있는 경우에 있어서 체결력으로 등가화된 온도차에 의한 보에 작용하는 힘과, 이 힘으로 구한 비틀림 모멘트를 나타낸 것이다. 온도차에 따른 보울트에 작용하는 힘과 비틀림 모멘트(twisting moment)는 표 6과 같다. 여기서 보울트에 작용하는 힘은 해석결과이며, 비틀림 모멘트는 다음 식에 의해서 구한 값이다⁽⁶⁾.

$$T = Q \times \frac{d_2}{2} \times \tan(\rho_\Delta + \lambda)$$

Q = 보울트의 축방향으로 작용하는 힘

d_2 = 보울트의 유효지름

ρ_Δ = 삼각나사의 마찰각

$$\lambda = \tan^{-1} \frac{P}{\pi d_2}$$

Table 6 Force and twisting moment acting on a beam through temperature difference(with anticlastic curvature)

Temperature difference (°C)	Force acting on beam (N)	Twisting moment (N · m)
10	100.7	0.3409
30	420.0	1.4217
50	728.5	2.4660
80	1215.7	4.1152
100	1531.7	5.1849
120	1851.8	6.2684
150	3000.7	10.1575
200	4998.5	16.9201
250	7004.8	23.7115
300	8957.4	30.3211
400	12833.0	43.4402

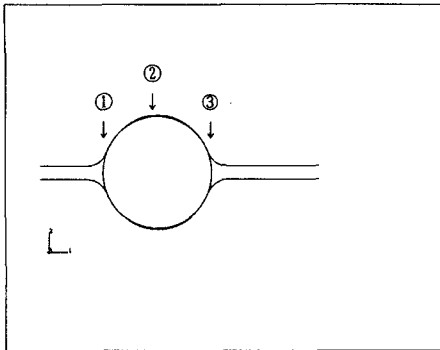


Fig. 8 Stress check points

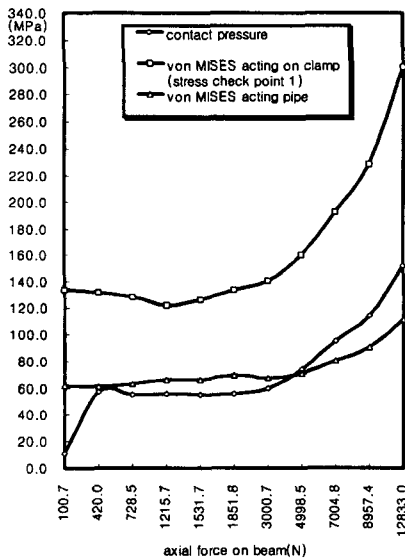


Fig. 9 Changes of equivalent stress and contact pressure through axial force on a beam (with anticlastic curvature)

클램프에서의 응력은 그림 8에서 표시한 응력점검 위치에서 큰 응력을 보이고 있어서 이 위치에서의 응력값을 비교하였다. 그림 9는 보에 작용하는 힘, 즉 체결력에 따른 클램프와 파이프사이의 접촉압력과 클램프의 등가응력, 파이프의 등가응력을 나타낸 것이다.

그림 9에서와 같이 배사곡률이 있는 경우에 있어서 클램프의 등가응력은 보에 작용하는 힘이 1215.7N 근처에서 최소가 되는 것을 알 수 있으며, 파이프에 작용하는 등가응력과, 클램프와 파이프사이의 접촉압력은 많은 변화를 보이지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 9에서 보는 바와 같이 클램프의 최적 체결력은 1215.7N이라는 것을 알 수 있다.

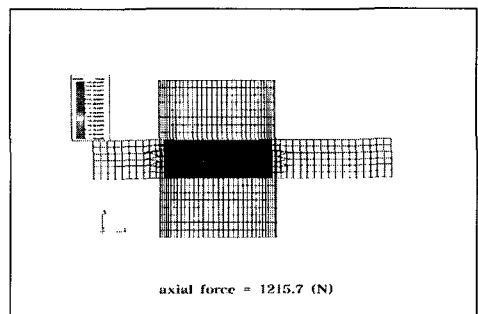
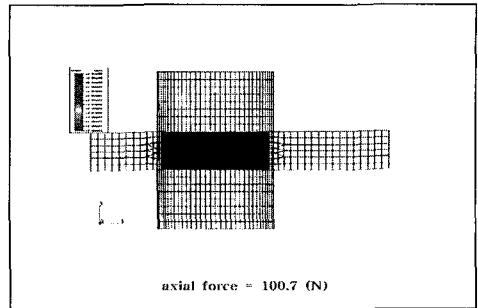


Fig. 10(a) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - contact pressure

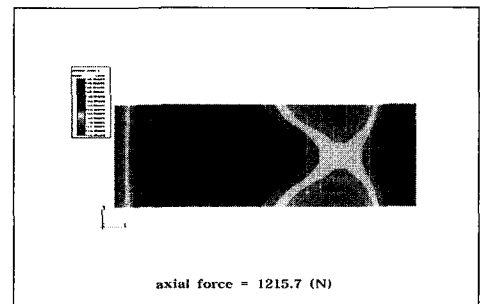
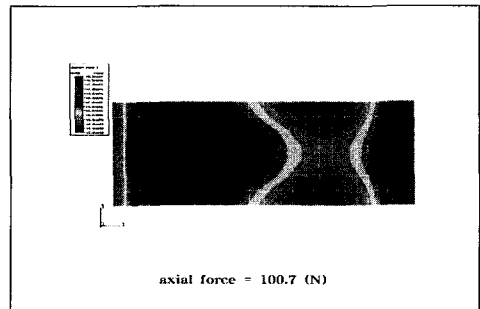


Fig. 10(b) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - equivalent stress acting on clamp

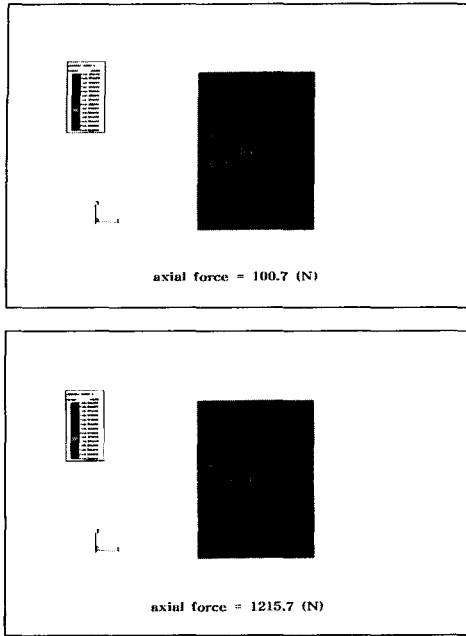


Fig. 10(c) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - equivalent stress acting on pipe

그림 10은 보울트의 체결력을 가장 작게 가했을 경우와 클램프의 내부응력이 최소가 되는 체결력의 경우의 접촉압력, 접촉 전단응력, 내부응력값을 비교한 것이다. 그림 9에서는 클램프의 내부응력이 최소가 되는 체결조건에서 접촉면적이 증가하며, 클램프의 가장자리에서 크게 작용 하였던 응력이 줄어드는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

2.4.2 배사곡률이 없는 경우의 보울트체결력의 영향

표 7은 배사곡률이 없는 경우에 있어서 체결력으로 작용하는 힘과, 이 힘으로 구한 비틀림 모멘트를 나타낸 것이다. 그림 11은 보에 작용하는 힘, 즉 체결력에 따른 클램프와 파이프사이의 접촉압력과 클램프의 등가응력, 파이프의 등가응력을 나타낸 것이다.

그림 11에서와 같이 배사곡률이 없는 경우에 있어서 클램프의 등가응력은 보에 작용하는 힘이 1579.9N 근처에서 최소가 됨을 알 수 있으며, 클램프에 작용하는 등가응력과 파이프에 작용하는 등가응력, 클램프와 파이프사이의 접촉압력은 체결력이 커지므로써 같이 커지는 경향을 보이고 있다.

그림 12는 보울트의 체결력을 가장 작게 가했을 경우와

Table 7. Force and twisting moment acting on a beam through temperature difference

Temperature difference (°C)	Force acting on beam (N)	Twisting moment (N · m)
10	275.3	0.93051
30	919.7	3.10858
50	1579.9	5.34005
80	2608.1	8.81536
100	3324.2	11.23577
120	4148.1	14.02054
150	5351.6	18.08836
200	7188.4	24.29673
250	9033.2	30.53214
300	10837.0	36.62897
400	14477.0	48.93213

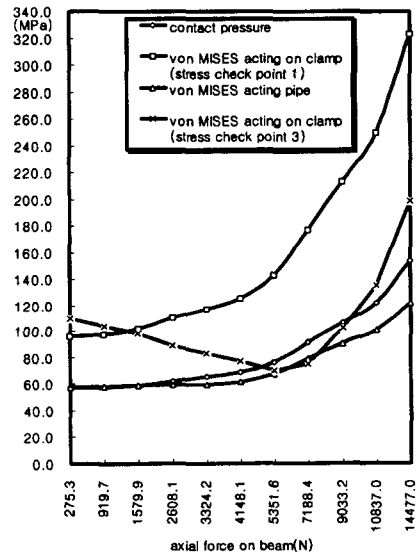


Fig. 11 Changes of equivalent stress and contact pressure through axial force on a beam

클램프의 내부응력이 최소가 되는 체결력의 경우의 접촉압력, 접촉 전단응력, 내부응력값을 비교한 것이다. 그림 12에서는 두 경우에 있어서 비슷한 경향을 보이고 있으며 클램프의 내부응력에 있어서 클램프의 내부응력이 최소가 되는 체결력에 있어서는 가장자리부근에 높은 응력이 거의 없으며 접촉이 시작되는 부근에서 높은 응력이 작용하는 것을 알 수 있다.

2.5 새로운 클램프모델의 제안

기존의 클램프모델은 끝부분에 강성링을 가지고 있지 않다. 현재의 클램프모델의 끝부분에 강성을 증가시키기

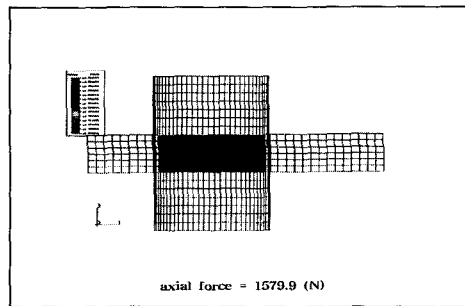
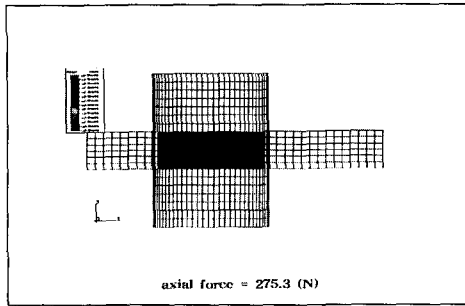


Fig. 12(a) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - contact pressure

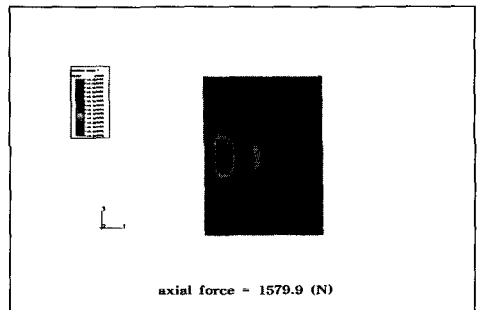
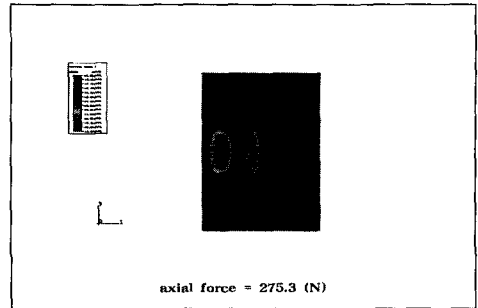


Fig. 12(c) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - equivalent stress acting on pipe

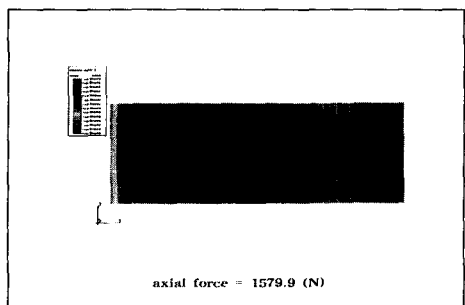
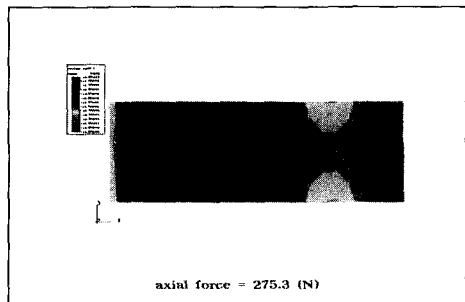


Fig 12(b) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - equivalent stress acting on clamp

위하여 강성링을 하나 더 추가시키는 모델을 본 논문에서 제시한다. 제시된 클램프 모델은 강성링이 보울트의 바깥쪽에 있어서 최고하중이 작용할 경우에 클램프가 배관으로부터 분리되려는 경향을 보울트의 체결력으로 막을 수 있는 구조로 되어 있다. 이 때 강성링이 없는 기존의 모델은 보울트의 체결력을 증가시키면 클램프의 맨 끝부위가 변형에 의하여 가깝게 되고 그림 8에서의 응력 점검점 ③에서 큰 굽힘응력을 발생하게 된다.

그림 13(a)는 현재 제작되어지고 있는 클램프 모델을 나타낸 것이며, 그림 13(b)는 본 연구에서 제안한 새로운 클램프를 나타낸 것이다.

2.5.1 제안된 클램프모델에서 배사곡률이 있는 경우의 보울트체결력의 영향

표 8은 배사곡률이 있는 경우에 있어서 체결력으로 작용하는 힘과 이 힘으로 구한 비틀림 모멘트를 나타낸 것이다. 그림 14는 보에 작용하는 힘, 즉 체결력에 따른 클램프와 파이프사이의 접촉압력과 클램프와 파이프에 작용하는 등가응력을 나타낸 것으로 보에 작용하는 힘이 12725.0N 근처에서 클램프에 가장 작은 내부응력이 작

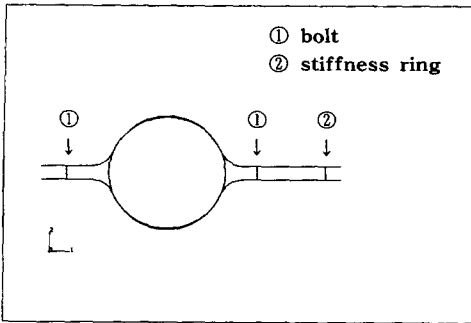


Fig. 13(a) Present clamp model

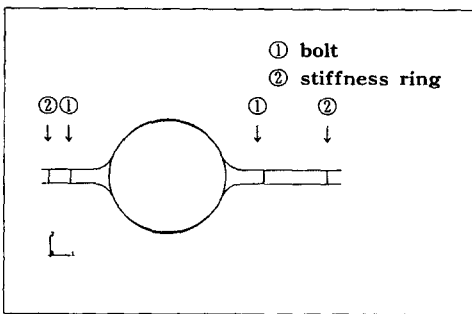


Fig. 13(b) Suggested clamp model

용한다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 14는 그림 9와 비교해 볼 때, 기존의 클램프모델에서의 값보다 더 낮은 등가응력이 작용하므로 제안된 클램프 모델이 강도상 유리함을 알 수 있다.

그림 15는 보울트의 체결력을 가장 작게 가했을 경우와 클램프의 내부응력이 최소가 되는 체결력을 가했을 경우의 접촉압력, 내부응력값을 비교한 것이다.

Table 8 Force and twisting moment acting on a beam through temperature difference

Temperature difference (°C)	Force acting on beam (N)	Twisting moment (N · mm)
10	694.6	2347.44
30	2356.1	7963.70
50	3947.1	13341.34
80	6334.2	21409.82
100	9362.4	31645.24
120	12725.0	43010.90
150	17901.0	60506.01
200	26429.0	89330.95
250	34930.0	118064.63
300	43217.0	146074.99
400	59745.0	201940.21

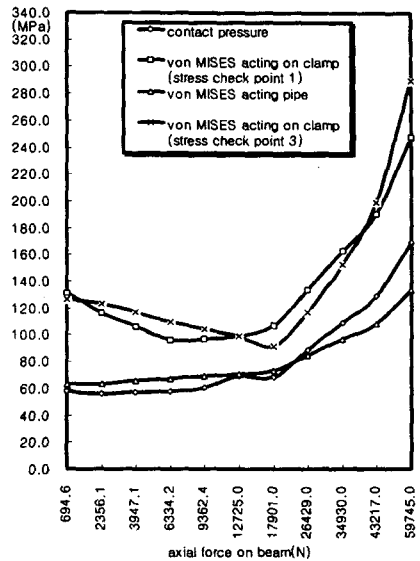


Fig. 14 Changes of equivalent stress and contact pressure through axial force on a beam (with anticlastic curvature)

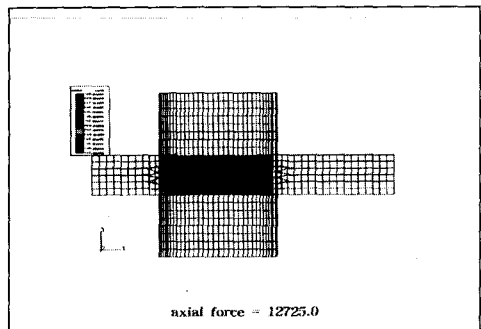
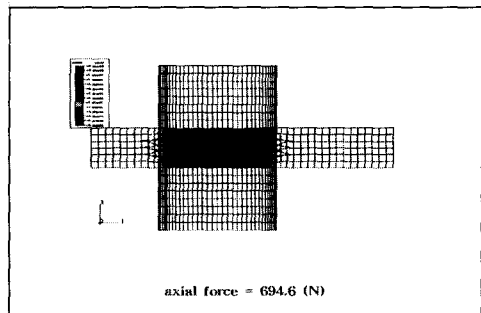


Fig. 15(a) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - contact pressure

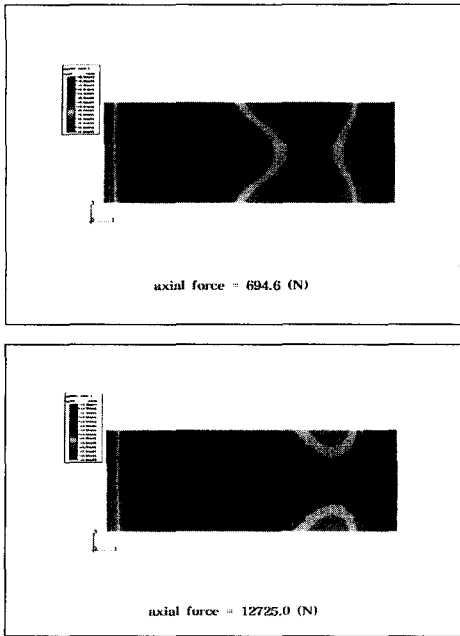


Fig. 15(b) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - equivalent stress acting on clamp

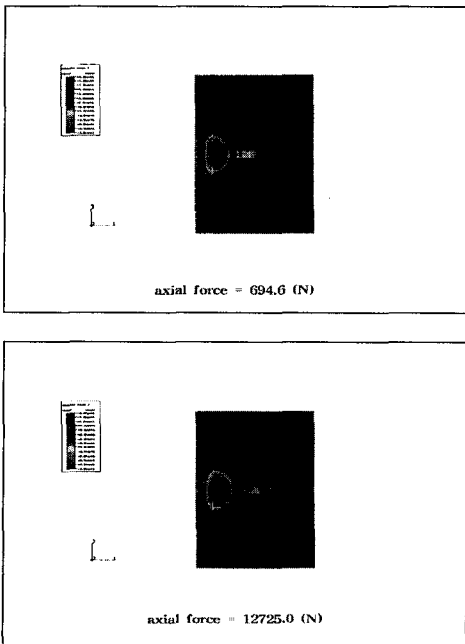


Fig. 15(c) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - equivalent stress acting on pipe

2.5.2 제안된 클램프모델에서 배사곡률이 없는 경우의 보울트체결력의 영향

표 9는 배사곡률이 없는 경우에 있어서 체결력으로 등가화된 온도차에 의한 보에 작용하는 힘과 이 힘으로 구한 비틀림 모멘트를 나타낸 것이다.

그림 16은 보에 작용하는 힘, 즉 체결력에 따른 클램프와 파이프사이의 접촉압력과 클램프와 파이프에 작용하는 등가응력을 나타낸 것이다. 그림 16에서 보에 작용하는 힘이 15000.0N 근처에서 클램프에 가장 작은 내부응력이 작용한다는 것을 알 수 있다. 배사곡률이 없는 경우에 있어서도 본 연구에서 제안한 모델이 기존의 클램프 모델보다 더 낮은 등가응력이 작용한다는 것을 알 수 있다.

Table 9 Force and twisting moment acting on a beam through temperature difference

Temperature difference (°C)	Force acting on beam (N)	Twisting moment (N · mm)
10	1600.3	5409.01
30	5249.8	17744.31
50	9073.8	30669.42
80	14936.0	50483.65
100	19291.0	65203.54
120	23780.0	80376.35
150	30156.0	101927.21
200	40928.0	138336.55
250	51563.0	174282.82
300	62289.0	210536.68
400	76509.0	258600.25

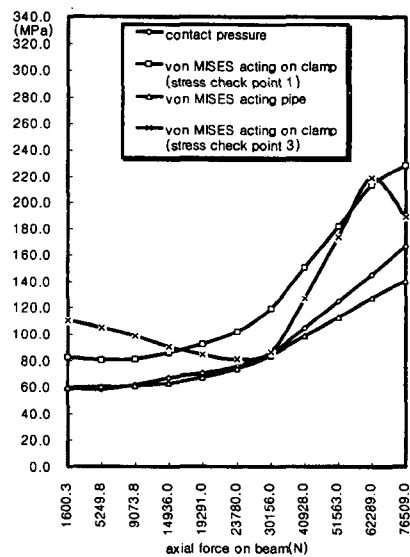


Fig. 16 Changes of equivalent stress and contact pressure through axial force on a beam

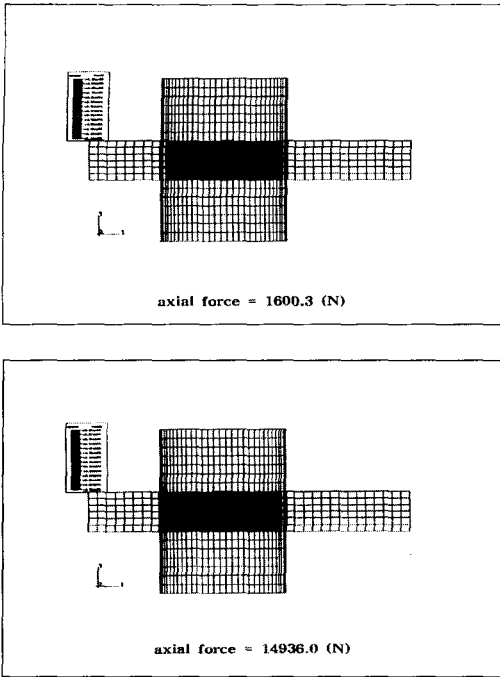


Fig. 17(a) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - contact pressure

그림 17은 보울트의 체결력을 가장 작게 가했을 경우와 클램프의 내부응력이 최소가 되는 체결력을 가했을 경우의 접촉압력, 내부응력값을 비교한 것이다.

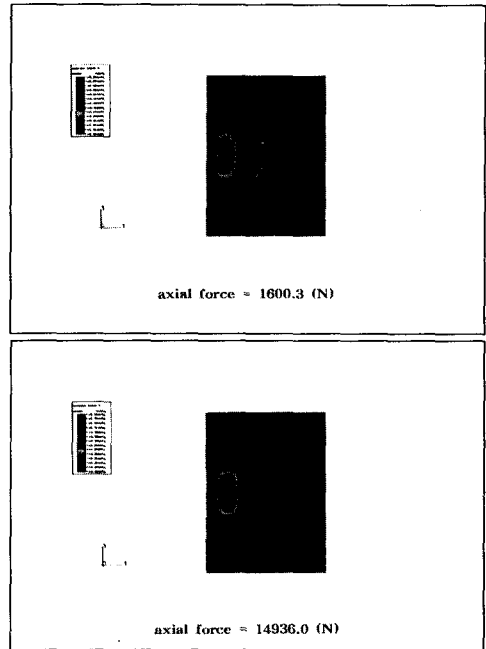


Fig. 17(c) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - equivalent stress acting on pipe

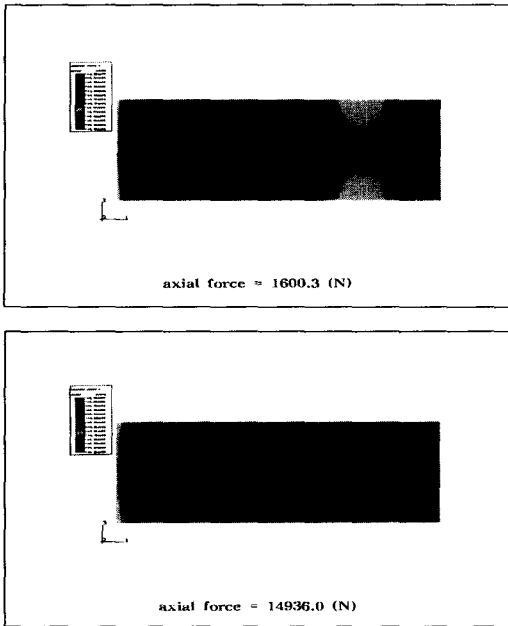


Fig. 17(b) Comparison of equivalent stress of a clamp and a pipe and contact pressure through joint force - equivalent stress acting on clamp

Ⅲ. 토의 및 결론

본 연구로부터 클램프부의 보울트체결력을 증가시켰을 경우 배사곡률이 없는 클램프의 경우에는 클램프와 파이프부의 내부응력이 체결력에 따라서 증가하는 경향을 보이고 있다. 배사곡률이 있는 클램프의 경우에는 보울트체결력의 증가에 따라서 클램프의 내부응력이 어느 정도의 체결력까지는 감소하다가 증가하는 경향을 보이고 있으며, 최소가 되는 체결력을 찾을 수 있었다.

현재의 클램프모델에 클램프의 끝부분에 간단한 강성링을 추가한 클램프모델에서는 현재의 클램프모델과 비교하였을 때, 클램프에 작용하는 내부응력과 파이프에 작용하는 내부응력이 클램프에 배사곡률이 있는 경우와 없는 경우 둘다 상당히 감소한다는 것을 알 수 있었다. 즉 체결력이 2200N 근처에서는 클램프에 작용하는 등가응력이

80MPa로 항복응력값보다 훨씬 작게 작용하고 있다. 그리고, 클램프에 체결력을 조절하므로써 클램프와 파이프사이의 체결력을 확보하여 클램프와 파이프사이의 고정율을 보다 확실하게 할 수 있으며 체결력을 조절하므로써 배사곡률의 영향을 최소화 시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 구조해석을 통해서 배사곡률이 있는 클램프의 경우에 보울트체결력을 조절하므로써 클램프에 작용하는 내부응력을 감소시킬 수 있다는 것을 보였다. 그리고 본 연구에서 제안한 현재의 클램프모델에 간단한 강성링을 추가한 클램프모델은 배사곡률이 있는 클램프에 작용하는 등가응력의 값을 감소시킬 수 있었다. 또한 예압을 증가시킴으로써 클램프와 파이프사이의 접촉압력을 증가시킴으로써 클램프와 파이프사이의 고정을 더욱 확실하게 할 수 있다.

후 기

본 연구는 성화산업주식회사와 한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다

참 고 문 헌

1. Stephen H. Crandall, Norman C. Dahl and Thomas J. Lardner, An Introduction to the Mechanics of Solids. McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1978.
2. 전만수, 안창국, "베어링 프리로딩의 근사해석법과 유한요소모델의 개발", 대한기계학회 '87춘계학술대회 초록집, pp. 590~593, 1987.
3. HyperMesh Documentation Version 2.0, Altair Computing Inc, 1996.
4. Hibbit, Karlsson and Sorensen, ABAQUS/Standard User's Manual, Volume I, Volume II, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc, 1995.
5. Hibbit, Karlsson and Sorensen, ABAQUS/Post User's Manual, Volume I, Volume II, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc, 1995.
6. 정선모, 한동철, 標準機械設計學, 東明社, 1983.