

플랜지 체결 시 금속 개스킷의 구조해석

인상렬 · 윤병주

한국원자력연구소 핵융합연구팀, 대전 305-353

(논문접수일 : 2006년 8월 4일)

컨플래트 (Con-Flat) 및 개량형 (IPD) 플랜지에서 개스킷을 넣고 체결할 때 나사의 체결력 또는 선하중에 따라 플랜지 및 개스킷에 발생하는 변형량, 응력 분포, 접촉 면압 따위의 계산을 통해 플랜지 날의 형상이나 체결조건이 기밀에 미치는 영향을 분석 또는 예측하는 것이 가능한지를 판단해 보았다.

주제어 : 플랜지, 개스킷, 컨플래트, 개량형, 면압

1. 서 론

진공 시스템을 구성하려면 용기, 도관, 밸브, 도입기, 게이지, 펌프 등 많은 진공부품들을 연결하는 것이 필요하다. 도관의 연결에는 용접이나 브레이징 따위의 영구적인 접합방법이 견고하고 경제적이긴 하지만 탈착이 반드시 필요한 부분이나 상용화된 진공 부품들이 달리는 곳은 플랜지와 개스킷으로 구성된 연결방식이 필수적이거나 때가 많고 또 사용하기에도 편리하다.

플랜지 밀봉구조는 구조적으로나 진공기밀의 측면에서 모두 취약한 부분으로 이를 극복하기 위해 많은 방식들이 고안되었다. 이에 초고진공에 널리 사용되어 왔던 컨플래트 (CF: Con-Flat) 플랜지나 헬리코플렉스 (Helicoflex) 또는 금속선 (metal wire) 개스킷 외에 CF의 각종 개량형 (IPD: Improved) 플랜지가 있다. 과거부터 통용되었거나 새롭게 나온 플랜지 기밀방식의 여러 가지 형태는 이미 수십 년 전에 제안되었던 것들 중 일부가 실용화되었다고 할 수 있다 [1-3]. 새로운 제안의 일반적인 경향은 플랜지 밀봉구조에서 체결력 및 체결시간을 줄이려는 것이다. 예를 들어 실험 [4-6] 및 이론적 분석을 통해 [6, 7] 기밀에 필요한 선하중(linear sealing loads)을 낮출 수 있음을 증명하고 이에 맞춰 플랜지 체결 나사수를 줄인다든지 체인 클램프를 사용하도록 고안하는 것이다.

그런데 그 동안 개발된 소위 개량형 플랜지에 대한 일반 시장에서의 수요와 공급은 사실상 많지 않고 가속기, 핵융합실험장치 등 특수한 환경에서 신속한 조립, 해체가 필요한 부품들에 국한되는 것이 사실이다. [7, 8] 그것은 이미 널리 쓰이는 규격 부품들이 새로운 시스템의 규격을 제한하기 때문이다. 더군다나 전문적인 지식과 정확한 정보를 가지고 있지 않은 일반 소비자의 부품 사용습관은 매우 보수적인 수밖에 없다. 한편 이미 널리 사용하고 있는 기밀방식도 적절한 체결조건을 모르고 잘못 사용하는 경우도 많으므로 기존의 밀봉방식이든 새로운 개념이든 체결조건과 기밀특성에 대한 바른 지식을 가지는 것이 밀봉방식의 적절한 선택과 올바른 사용을 통해 좋은 진공 시스템을 구축하도록 한다고 할 수 있다.

이 논문의 목표는 일일이 실험을 하지 않고도 플랜지 밀봉구조의 구조해석을 통해 기밀특성에 영향을 미치는 기본요소들의 분석이 가능한가를 시험해 보려는 데 있다. 특정한 밀봉구조에 대해 개스킷을 체결할 때 체결력 또는 선하중에 따라 플랜지 및 개스킷에 발생하는 접촉변형, 응력 분포, 면압 따위의 계산을 통해 플랜지 면의 형상이나 개스킷의 재질이 기밀에 미치는 영향이 분석 또는 예측 가능한지를 판단해 보려는 것이다. 이 논문에서는 CF와 IPD 두 가지 밀봉방식에 대해 비교분석했지만 역시 일차적인 목표는 비교 자체가 아니라 구조해석의 타당성을 알아보기 위함이다.

II. 플랜지 밀봉구조의 일반적 기밀개념

용접이나 브레이징 같은 접합방법은 양쪽 재료나 중간물질이 녹아서 원자단위로 양 물체의 틈새를 메우므로 이음새의 결합을 한 몸체처럼 구조적으로 완성하면서 동시에 기밀도 보장한다. 이때는 물체 및 이음새 접합부에 결합이 없는 한 공기는 투과를 통해서만 결합부위를 지나갈 수 있다. 반면에 플랜지 밀봉구조는 두 플랜지면 사이에 개스킷을 넣어 나사나 클램프 등으로 힘을 가함으로써 탈착이 가능한 결합부위를 형성한다. 일반적인 조건에서 압착에 의한 힘만으로 두 물체를 원자단위로 가까이 붙일 수는 없기 때문에 플랜지 밀봉구조에서 형성된 결합부위에는 여전히 작은 틈새가 남아있어서 기체 누설의 통로가 되기 마련이다[9]. 이때 기밀형성과 성능의 관건은 얼마나 이 틈새를 좁힐 수 있는가 하는 것이다.

물체 사이에 존재하던 자연적인 틈새가 줄어들다는 것은 어느 쪽인가 변형을 일으켰다는 것을 뜻하고 플랜지 쪽 보다는 개스킷이 변형되도록 상대적으로 무른 물질을 사용하는 것이 통상적이다. 대표적인 것이 바로 고무 오링을 쓰는 경우인데 고무는 거친 틈을 효과적으로 메우면서 상당한 변형에도 계속 탄성을 유지하지만 불행히도 낮은 사용온도와 높은 기체발생 및 기체투과 때문에 고진공 이상에서는 본격적으로 사용하지 않는다. 초고진공 이상이라면 금속 개스킷을 사용할 수밖에 없고 기밀이 유지될 정도로 충분히 눌린 개스킷은 탄성한계를 벗어나 소성변형에 이르는 것이 보통이다. 만일 개스킷의 탄성은 전혀 남아있지 않고 완전 소성변형이 일어난다면 기밀은 매우 불안정하고 약간의 외력이나 온도변화에 의해서도 깨질 수 있다. 결국 어딘가에는 탄성이 남아 있어야 외부 환경의 변화에 상관없이 개스킷과 플랜지면 사이에 일정한 수준 이상의 면압이 걸려서 기밀을 유지할 수 있는 여유가 생긴다.

한 예로서 볼트로 조여진 플랜지를 생각해 볼 수 있다. 이때 플랜지는 판스프링으로, 개스킷은 탄소성체로, 볼트는 강한 코일 스프링으로 표현할 수 있다. 나사를 체결하여 일정한 힘으로 조이면 나사의 축력은 플랜지를 마치 지렛대처럼 누르고 개스킷은 하중을 받아 일부 소성변형을 일으키지만 볼트와 플랜지는 탄성한계 내에 있다고 할 수 있다. 만일 시스템을

가열(baking)할 때 고온에서 장시간 유지되었던 개스킷의 연화가 일어나서 완전 소성체에 가까워지면 기밀특성이 나빠지고 더군다나 볼트의 열팽창이 플랜지의 복원점을 지나서 계속되면 기밀은 완전히 파괴된다. 온도를 낮추면 볼트가 수축하고 플랜지가 제자리로 돌아와 기밀이 어느 정도 회복되기는 하지만 개스킷의 소성변형이 지나치게 진행되어 원상태로 돌아가지 못할 가능성도 높다. 그렇다고 플랜지 구조를 탄성유지에 적합하도록 고안하는 것은 필요한 축력을 구현하는 데 어려움이 있으므로 쉽지 않다. 개스킷의 탄성을 오래 유지하기 위해 중공(hollow) 튜브를 쓰거나 판 개스킷을 원추형으로 가공하여 사용하거나 개스킷 피복 내부에 스프링을 넣는 등 여러 가지 고안이 있지만 CF나 IPD처럼 개스킷 홈의 제한적 구조도 개스킷 탄성유지에 도움을 준다고 알려져 있다.

III. 구조해석

플랜지와 개스킷 및 나사 또는 클램프로 이루어진 밀봉구조를 해석하는 작업을 시도하면서 전체 어셈블리를 모델화하기 보다는 우선 가장 난해한 부분인 개스킷의 탄소성 변형과, 개스킷과 플랜지와의 접촉면에 걸리는 면압을 분석하는 것에 초점을 맞추었다. 이 작업이 원활히 진행된다면 다음 과제로는 플랜지와 나사의 탄성을 고려한 밀봉구조 전체의 구조해석이 필요하다.

구조해석의 대상은 날이 있는 플랜지에 통상적인 구리 개스킷을 사용하여 날이 개스킷을 파고들어 변형을 일으키는 CF 형식과 폭이 좁은 개스킷을 날등쪽에 넣어 경사면에 개스킷의 모서리가 닿아 눌리면서 변형을 일으키는 소위 IPD 개념 두 가지를 선택해서 서로 비교함으로써 구조해석의 유용성을 입증하려고 했다. 금속 개스킷은 탄성한계를 넘어서 결국 소성변형을 일으키는데 이때 구조해석은 날과 개스킷 경계면이 서로 연결점을 가지면서도 슬립이 일어나야 하는 조금 독특한 조건에서 이루어져야 한다. 이 일은 탄소성 변형이 수반되는 비선형 구조해석을 통해 플랜지에서 기밀특성을 좌우한다고 생각되는 지표들을 구할 수 있는지? 이들 값의 경향이 합리적인지? 예측 가능한 결과를 보이고 있는지? 등 구조해석을 통한 기밀특성 분석기법 개발이라는 목표를 달성하는

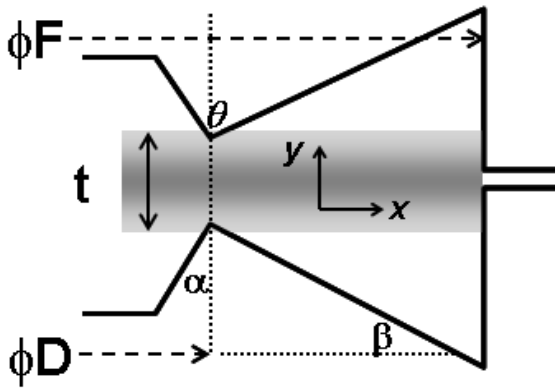


그림 1. CF 플랜지 날 및 개스킷 계산모델

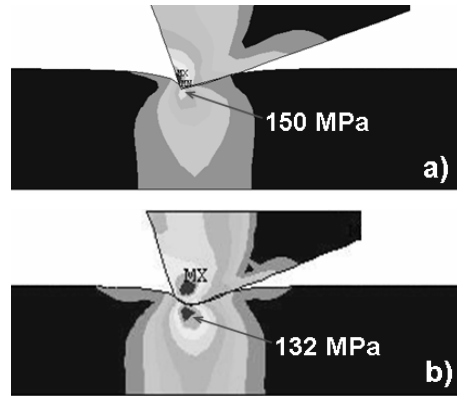


그림 2. CF 플랜지 a) 2020-0fix 및 b) 2020-0.2fix 체결시 개스킷 및 날에 나타나는 응력분포. 기호는 표 1 참조.

것이다. 따라서 해석의 타당성을 입증하기 위해서는 특성이 잘 알려져 있는 밀봉구조를 실례로 삼는 것이 유리하다고 생각했다.

가. Con-Flat 플랜지

1) 계산모델 및 해석조건

구조해석에 사용된 CF 플랜지는 외경이 150 mm로 날 부분의 형상은 그림 1과 같다. 날의 각도 등 몇 가지 계산 조건을 정리하면 표 1과 같다. 날의 내면 각도 α 는 0° 및 20° 로 두 가지, 날등의 각도 β 는 20° 및 30° 두 가지를 시험했다. (날의 각도 θ 로는 60° , 70° , 90° 세 가지) 실제 날끝은 어느 정도 원호형태를 취하기 마련인데 규격에 명시된 것은 없지만 곡률반경을 0.1 mm 이내로 하는 경우도 있고 0.4 mm 정도로 하는 경우도 있어서 그 영향을 알기 위해 날 끝

의 곡률반경은 0, 0.2 및 0.35 mm로 변화시켰다. 개스킷 구속조건은 반경방향으로 구속된 것과 자유로운 것 두 가지를 다루었다. 재질은 냉간압연을 거친 무산소동으로 가정했다.

구조해석은 일단 변형량을 0에서 0.2 mm까지 점차 증가시키면서 단계별로 그때그때 응력 및 반력을 구해 이로부터 선하중을 계산하는 방식으로 진행된다. 선하중은 플랜지 날 끝에 걸리는 반력을 원주길이로 나눈 것이다. 접촉 면압 P_s 는 개스킷과 날이 닿는 면을 따라 표면의 압축응력 (σ) 중 수평 (x), 수직 (y) 성분 및 전단응력 (τ) 중 수평, 수직 성분을 가지고 다음 식에 의해 계산한다. 실제로는 수평, 수직 전단 응력은 서로 같기 때문에 오른쪽 마지막 항에 2가 들어간다. 면압 계산은 매우 번거롭기 때문에 0.2 mm 변형에 대해서만 계산했다.

표 1. Con-Flat 플랜지 구조해석 모델의 계산조건.

	D [mm]	F [mm]	t [mm]	Knife Edge				Gasket		Radial Constraint
				α [deg]	β [deg]	Θ [deg]	R [mm]	E [GPa]	Y.S [MPa]	
1	114.3	120.3	2	0	20	70	0	130	54	free
2				90		free				
3				free						
4				20	30	0.2	54		fix	
5				0.35		fix				
6				0	60	0	free			

§ 본문에서 020-0fix는 ($\alpha=0$, $\beta=20$, $\Theta=70$, 경방향 자유), 2020-0.2fix는 ($\alpha=20$, $\beta=20$, $\Theta=90$, $R=0.2$, 경방향 구속) 조건을 말한다.

$$P_s = \sigma_x \sin^2 \beta + \sigma_y \cos^2 \beta - 2\tau_{xy} \sin \beta \cdot \cos \beta \quad (1)$$

어떤 물체가 표면을 눌러 변형이 일어날 때 물체가 누르는 표면에 수직하게 작용하는 압축력 외에 변형이 진행되면서 새롭게 생성되는 옆면에는 전단력이 발생한다. 물체에 눌리는 바로 밑면만 안으로 들어가는 것이 아니라 둘레에서도 전단력 때문에 변형이 어느 범위까지 전과된다. 이것은 그 만큼 그 부분에서 압축력을 감소시키므로 식 (1)에서 오른쪽 마지막 항처럼 이를 빼주는 것이다.

2) 응력분포

응력이 면압 형성의 근원이므로 기밀을 위해서는 어느 수준 이상으로 발생하는 것이 필수적이지만 너무 과도하면 날끝이 무디어진다든지 개스킷이 끊어지는 손상을 가져올 수도 있다. 그림 2는 응력계산의 한 예로 날 각도가 90°일 때 경방향 구속 상태에서 얻은 것이다. 응력분포는 변형이 0.2 mm 진행되었을 때를 기준으로 계산한 것이다. 개스킷의 최대 응력은 1.5 GPa (1 GPa=10⁹ Pa), 날의 최대 응력은 2.3 GPa에 이르고 대부분의 접촉영역에서 개스킷의 응력은 3백 MPa 이상의 값을 유지한다. 자유구속 상태에서는 응력이 약 10 % 낮아지지만 여전히 상당한 수준을 유지하므로 기밀 유지에 큰 영향이 없을 것으로 보인다.

한편 날의 곡률반경이 커지면 예상대로 개스킷보다는 날의 응력이 현저히 낮아져서 개스킷의 응력 수준과 거의 같아진다. 날끝의 곡률반경이 0.2 mm일 때 날과 개스킷의 최대응력은 모두 1.3 GPa 정도가 되

며 접촉영역에서 개스킷의 응력은 역시 300 MPa 이상의 값을 유지한다.

한편 그림 2에서 개스킷이 변형된 모양을 보면 식 (1)을 설명하면서 이미 언급한 대로 날의 형태를 그대로 따르는 것이 아니라 파고 들어간 날보다 더 많은 부분이 함몰되어 있다. 참고로 그림 3은 실제 CF 플랜지를 체결할 때 얻어지는 개스킷의 변형사진이다. 그림 2의 구조해석 결과와 원리적으로 일치함을 알 수 있다. 날의 경사가 급한 내면 쪽에서는 이런 변형이 그대로 드러나므로 면압 형성을 전혀 기대할 수 없다. 경사가 완만한 날등 쪽에서는 날이 결국 개스킷에 닿아 겉으로 많이 드러나지는 않지만 내재된 전단응력에 의해 이미 변형이 진행되고 있었던 부분만큼은 압축력이 줄어들어 그 만큼은 면압을 감소시킬 것으로 예상된다.

3) 변형량 및 접촉면적

그림 4에서 보면 같은 변형을 일으키는데 일반적으로 날의 각도가 작을수록 선하중이 낮고 자유구속보다는 경방향으로 구속되는 것이 선하중을 높인다. 특이한 점은 날의 각도가 90°일 때가 70°일 때보다 오히려 약간 낮은 선하중을 보인다는 것인데 그 이유는 잘 알 수 없다. 기밀을 위한 최소 변화량으로 보통 얘기되는 0.1 mm (100 μm) 변형을 일으키기 위해서는 어느 경우나 대략 30 kgf/mm의 선하중이 필요하다.

만일 개스킷을 경방향으로 구속하지 않는다면 y 방향 변형이 x 방향 변형을 다소간 유발하여 (그림 5

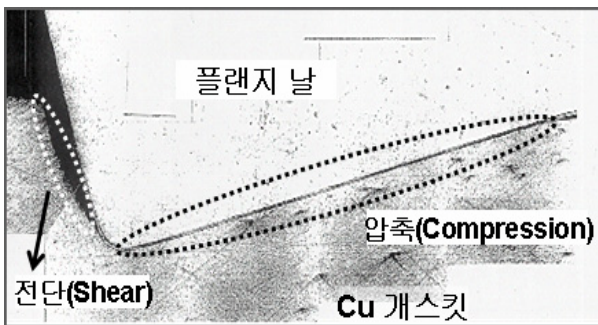


그림 3. 체결된 CF 플랜지 및 개스킷의 변형 단면 사진.

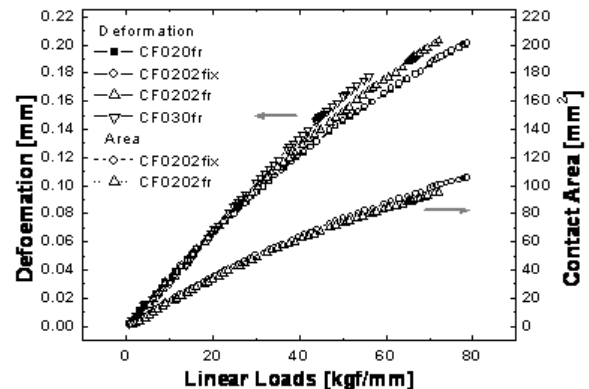


그림 4. CF 플랜지 개스킷 선하중 대 y 변형량과 접촉면적.

참조) 그렇지 않을 때보다 접촉 면적이 줄어들 것으로 예상할 수 있다. 이를 고려하여 경방향으로 구속되었을 때와 자유로운 상태일 때를 비교하면 같은 선하중에 대해 후자의 경우가 약 5% 정도 접촉 면적이 줄어든다. 30 kgf/mm의 선하중에서 접촉면적은 약 100 mm²로 날끝에서 원주길이가 359 mm이므로 날과 개스킷이 접촉하는 폭은 약 0.28 mm가 되는 셈이다. 그리고 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 날 끝이 곡률반경을 가지면 날끝의 원호를 따라 날의 내면에서도 상당한 수준의 접촉면이 형성되어 날등 길이가 줄어든 것을 상당히 보충해 준다.

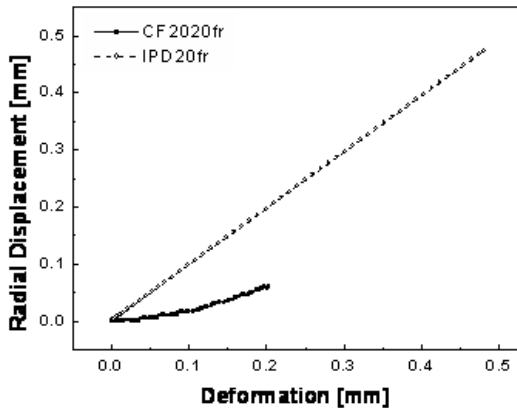


그림 5. CF 플랜지 (2020fr) 개스킷의 y 방향 변형에 따른 x 방향 변위의 변화.

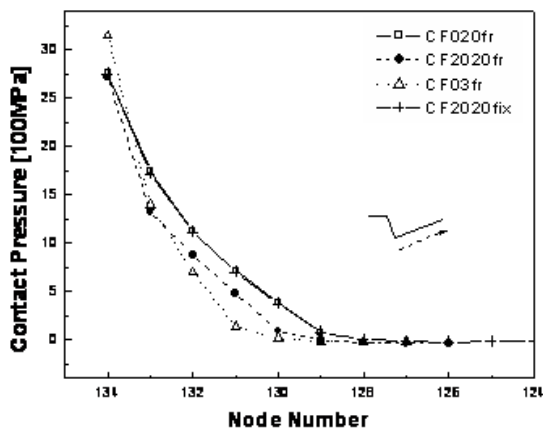
4) 면 압

면압은 표면층의 응력 중 날에 수직한 방향으로의

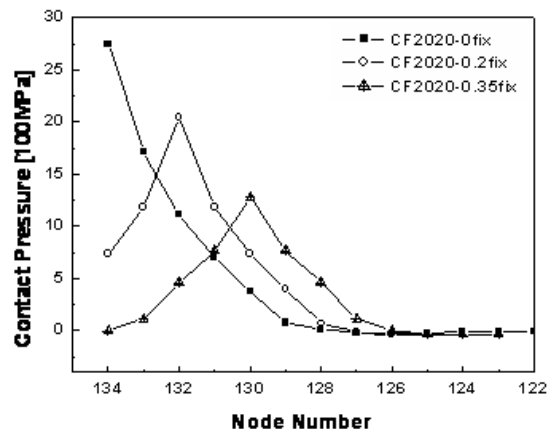
성분들을 합친 것인 만큼 위치에 따라 변하는데 면압의 절대 값 및 분포와 실제 기체 누설량의 연관성은 아직 알려진 것이 없지만 일단 상대적으로 그 값의 범위와 분포를 비교해 보려고 한다. 면압의 계산은 0.2 mm 변형에 대해서만 계산했지만 다른 변형량에 대해서는 접촉면적에 반비례하는 것으로 가정하고 면압을 추산할 수도 있다.

그림 6a를 보면 먼저 날의 각도가 가장 작은 60°일 때 면압은 날의 선단에서는 매우 높지만 날등 부분에서는 상대적으로 낮은 값을 가진다. 구속상태의 90° 날은 자유구속 상태일 때보다 전반적으로 높은 면압을 나타낸다. 이때 날끝 부분에서 면압은 2.5 GPa에 이르고 날등에서는 평균적으로 1 GPa 내외의 값을 가진다. 그림에서 노드번호는 134가 날 끝이고 번호가 작은 쪽으로 갈수록 날 등을 따라 접촉이 끝나는 지점까지 이어진다.

그림 6b에서 날끝이 가지는 곡률반경의 영향을 살펴보면 날이 뾰족할수록 최대 면압이 높은 대신 날등에서 면압이 일찍 감소하고, 날이 뿔뿔할수록 최대 면압은 낮아지지만 날등 부분에서 면압은 더 멀리까지 일정 수준을 유지한다. 이때 최대점의 위치는 날 끝 부분에 해당하므로 뾰족할수록 더 안에서 형성된다. 따라서 날등 부분만 보면 전반적으로 면압이 형성되는 구간의 유효 길이는 모두 비슷하지만 뾰족한 날이 평균적으로 더 높은 면압을 나타낸다. 반면 날이 뿔뿔하면 면압이 날 안에서에서도 형성되므로 면압이 유지되는 전체 구간은 약간 넓어진다.



(a)



(b)

그림 6. CF 플랜지 날과 개스킷의 접촉부위에 형성되는 면압, a) 날의 각도와 구속조건에 따라, b) 날끝의 곡률반경에 따라.

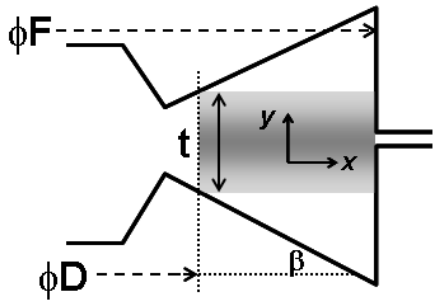


그림 7. IPD 플랜지 및 개스킷 계산모델.

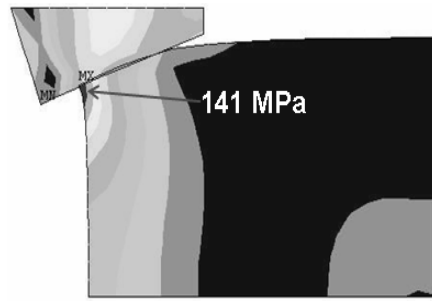


그림 8. IPD 플랜지에서 경방향으로 구속되어 있는 개스킷과 플랜지의 응력분포.

나. IPD 플랜지

1) 계산모델 및 해석조건

IPD 플랜지는 CF 플랜지를 그대로 사용하는 대신 개스킷만 제원이 달라진다. 그림 7은 계산모델이고 표 2는 IPD 플랜지의 구조해석 조건을 요약한 것이다.

표 2. IPD 플랜지 구조해석 모델의 계산조건.

	D [mm]	F [mm]	t [mm]	Edge	Gasket		Radial Constraint
				β [deg]	E [GPa]	Y.S [MPa]	
1							free
2	116.3	120.3	2	20	130	54	fix
5				30		54	free

2) 응력분포

그림 8은 IPD 플랜지 체결시 y 변형량이 0.2 mm 일 때 개스킷과 날에 나타나는 응력을 보여주고 있다.

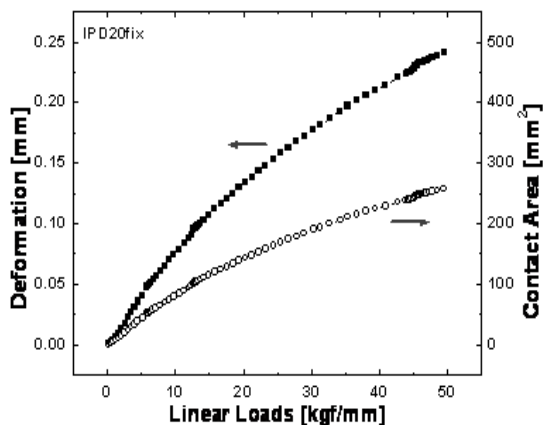


그림 9. IPD 플랜지 (20fr) 개스킷 선하중 대 y 방향 변형량 및 접촉면적.

반경방향으로 구속되어 있을 때 개스킷은 안쪽에서의 변형이 두드러지게 나타나고 이 부분에서 1.4 GPa의 응력이 발생한다. 특이한 점으로 개스킷이 플랜지 턱에 닿는 바깥쪽도 100 MPa 이상으로 응력이 상승한다. CF 플랜지와 달리 플랜지 날에는 개스킷에 비해 현저히 낮은 응력이 발생한다.

3) 변형량 및 접촉면적

그림 5에서 보는 대로 IPD 개스킷의 외경을 구속하지 않는다면 x 방향 변형이 너무 커서 제 기능을 제대로 할 수 없으리라는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 9에는 구속 상태에서 계산한 결과만 나타냈다. IPD 플랜지 개스킷 홈의 사면이 개스킷을 누르는 힘은 CF 형과 달리 개스킷을 끊으면서 끌고 들어가는 데 소모되지 않고 개스킷을 눌러 접촉을 유지하면서 변형을 일으키는 데 소모된다. 따라서 0.1 mm 변형을 일으키는 선하중 값은 15 kgf/mm 이내로 CF 형에 비해 반 정도 수준이다. 이때 접촉면적은 역시

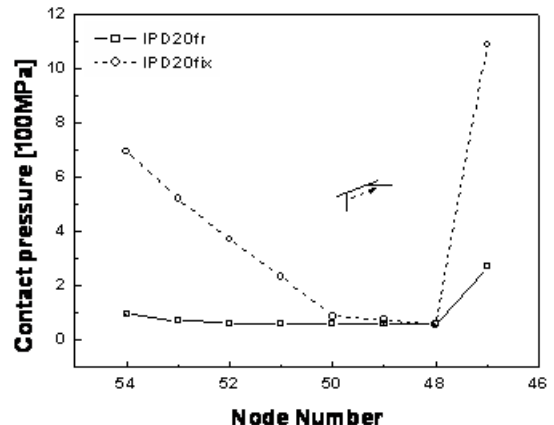


그림 10. IPD 플랜지 개스킷과 플랜지 접촉부위 근처에서 발생하는 면압.

100 mm² 정도의 값을 갖는다.

4) 면 압

그림 10은 IPD 플랜지에서 개스킷을 구속했을 때와 그렇지 않았을 때 계산한 면압 분포를 나타내고 있다. 자유구속 상태에서 생성되는 면압은 최대 300 MPa 이내, 평균적으로는 100 MPa 이내로 매우 낮아서 과연 기밀이 유지될 수 있을까 의문이다. 구속 상태에서는 최대 1.1 GPa, 평균적으로 400 MPa 정도의 면압을 나타낸다. 한 가지 CF 플랜지와 다른 점은 IPD 플랜지에서는 항상 날과 개스킷의 접촉면 바깥쪽이 다른 어떤 부위보다 확실히 닿는다는 것이다. 이것은 CF 플랜지에서와 달리 날이 개스킷 표면을 끌고 들어가지 않기 때문이다. 그림을 보면 가운데 보다는 양쪽 가장자리 부분의 면압이 높고, 또 안쪽보다는 오히려 바깥쪽에서 면압이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 구속 상태의 개스킷이 자유구속 상태의 것보다 접촉부 가운데에서는 면압이 비슷하거나 오히려 낮은 곳도 있는 것은 특이한 현상인데 이는 구속 상태에서의 전단응력이 약간 더 크게 계산되는 것과 연관이 있다.

VI. 결과에 대한 고찰

구조해석을 통한 플랜지 밀봉방식의 기밀특성을 평가하는 데 있어서 가장 중심이 되는 파라미터를 면압과 접촉면적으로 생각하고 있지만 과연 그 값이 얼마일 때 기밀성능, 예를 들면 헬륨누설률이 얼마가 되는지 정보가 없기 때문에 역시 실험을 통해 이들의 상관관계를 밝히는 것이 필수적이다. 이때 일정 수준 이상의 면압을 나타내는 구간에 대한 적분값 즉 누적 면압이 실질적인 기밀특성의 지표가 될 수 있으리라고 생각한다.

Kurokouchi 등이 [10] CF 및 IPD 플랜지를 가지고 변형과 접촉면적을 실측한 결과를 보면 (그림 11 참조) 일반적으로 계산결과와 유사한 경향을 보인다. 역시 같은 선하중에서 IPD 플랜지의 접촉 면적이 두 배 정도 항상 넓다.

CF와 IPD 플랜지의 면압을 비교해 보려고 하면 그 양상이 약간 복잡한데 접촉부 안쪽에서는 CF의 경우

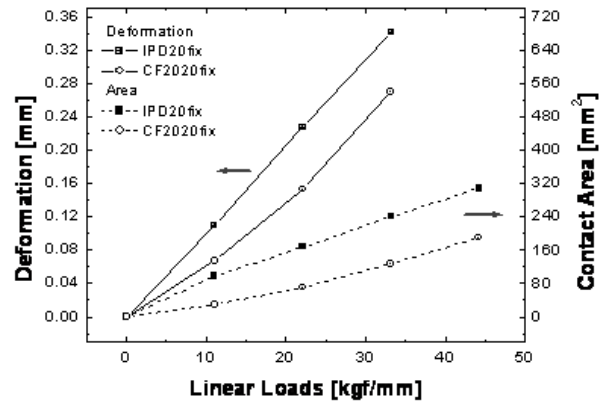


그림 11. 선하중 대 개스킷 변형량 및 접촉면적 실험치. [6]

가, 바깥쪽에서는 IPD의 경우가 높은 면압을 나타낸다. 이미 언급한 대로 CF 형식에서는 날이 개스킷을 파고 들어가면서 날 주위의 넓은 부분에 변형을 일으키고 전단응력을 발생시키므로 날 끝부분에 응력 및 면압이 집중되고 그 주변은 오히려 면압이 크게 감소하는 반면, IPD의 경우는 안쪽은 소성 변형량이 많아서 면압이 감소하지만 바깥쪽에서 전단응력에 의한 면압의 감소가 거의 없기 때문에 나타나는 현상이다. 어느 쪽이 좋은가는 사실 잘 알 수가 없다. IPD에서 변형은 큰 대신 면압의 수준이 CF에 비해 전반적으로 낮으므로 개스킷 재료를 더 단단한 것으로 사용하는 것이 훨씬 효과적이라고 판단된다. 또 접촉부 가운데 부분의 면압을 높이기 위해 날의 경사면을 약간 불룩하게 가공하는 것도 생각해 볼만하다.

응력분포 계산에서 알 수 있듯이 CF 플랜지 날에 집중되는 응력 값을 보면 매우 우려되는 수준이다. 응력을 완화하기 위해 날을 너무 뚱뚱하게 하면 면압이 전반적으로 감소하므로 곡률반경을 적절히 유지하는 한편 플랜지 재료의 강도를 높이는 것이 필요하다고 판단된다.

CF 방식에서 기밀특성 유지의 필수조건으로 주장되어 왔던 소위 포획 (capturing) 효과는 개스킷이 플랜지 바깥 부분 턱에 걸려 반경방향으로 늘어나지 못하고 구속될 때 그 반작용으로 개스킷의 탄성감소가 완화되는 것으로 이해하여 왔으나 여러 실험을 통해 개스킷이 반경방향으로 구속되는 것과 기밀특성이 별 관계가 없다는 주장도 있다[10]. 그림 5에서 보면 CF(2020) 형 플랜지 개스킷의 반경방향으로 늘어나는 정도는 수직방향 변형량의 (0.1~0.2 mm) 약

10~25%에 이른다. 이때 각도가 20도인 것과 날의 위치를 고려하면 y 방향으로의 변형량에는 약 8.5% 정도의 영향을 미치는 것으로 추산할 수 있다. IPD의 경우는 매우 심각해서 x 방향 변위가 y 방향 변위에 버금간다. 어느 형식에서나 외경이 늘어나지 않도록 구속하면 그 만큼 실질적인 y 변형량과 면압의 증가를 가져오는 것으로 나타났으며 이는 개스킷 자체의 탄성을 유지하는 데도 도움이 될 것이다. CF 형식에서 외경 변화량은 개스킷 직경의 0.2% 이내로 대개 탄성한계 내에 있다고 볼 수 있지만 개스킷 직경이 작다면 탄성한계를 상회할 수도 있다. 계산결과만 놓고 보면 개스킷이 경방향으로 구속되는 것은 면압과 접촉면적을 모두 증가시키므로 정도의 차이는 있지만 기밀에 좋은 영향을 미치리라는 것을 예상할 수 있다. CF 플랜지에서는 비록 경방향 구속이 안 되어도 기밀에 심각한 악영향을 미칠 것으로 보이지는 않지만 IPD의 경우는 경방향 구속이 기밀에 필수적임을 나타내고 있다.

V. 결 론

CF 및 IPD 플랜지 체결 시 금속 개스킷의 구조해석을 수행했다. 이는 특정 플랜지를 체결할 때 체결력 또는 선하중에 따라 플랜지 및 개스킷에 발생하는 변형량, 응력 분포, 접촉면압 따위의 계산을 통해 플랜지 면의 형상이나 개스킷의 재질이 기밀에 미치는 영향을 분석 또는 예측 가능한지를 판단해 보려는 것이다. 계산결과가 적절한 실험 결과와 더불어 비교될 때 그 유용성이 입증될 수 있지만 일단 플랜지 체결 시 작업자가 조절할 수 있는 유일한 파라미터인 선하중을 변화시킬 때 기밀특성과 밀접한 관련이 있는 접촉면적 및 면압을 합리적인 값으로 구할 수 있었고 또 어떤 양상으로 변하는지를 알 수 있었다. 이런 이론적 접근방법과 이미 알려진 또는 앞으로 수행할 실험결과를 비교 분석함으로써 기밀에 영향을 미치는 주요 지표들의 상관관계를 밝히면 기존 밀봉구조의 개선점을 찾는다는 새로운 개념의 밀봉방식을 개발하는 데 좋은 도구로 활용할 수 있으리라고 생각한다.

어떤 플랜지 밀봉구조가 실용적이기 위해서는 볼트 및 체결도구의 사용범위 내에 들어가는 적절한 체결력에서 플랜지 면과 개스킷의 접촉면이 넓게 형성되

면서 면압이 일정 수준 이상 나타나는 것이 바람직하다. 만일 합리적인 체결력으로 얻을 수 있는 접촉면적이 너무 작다면 국부적으로 면압은 높지만 좋은 기밀특성을 기대하기 힘들 것이고 더군다나 플랜지의 손상을 초래할 수도 있다. 반면 접촉면적은 커지지만 면압이 너무 낮아져도 역시 기밀을 유지하기 어렵다. 그렇다면 합리적인 체결력 범위 내에서 접촉면적도 넓으면서 면압도 높은 밀봉구조를 찾는 것이 앞으로 더 좋은 밀봉구조를 개발하는 관건이라고 말할 수 있다.

사 사

이 일은 한국표준과학연구원에서 시행한 진공기술 기반구축사업의 지원을 받아 이루어진 것이다.

참고문헌

- [1] A. Roth, Vacuum Sealing Techniques, Pergamon Press, 1966.
- [2] W.R. Wheeler and M. Carlson, Ultra-high vacuum flanges, Natl. Sym. Vacuum Technol. Trans. 1961, 1309(1962).
- [3] I. Sasaki, H. Ishimaru, G. Horikoshi, Sealing concept of elastic metal gasket Helicoflex, Vacuum **32**, 33(1982).
- [4] K. Obara et al., A study for the improvement on knife-edge metal-seal flange, Jap. J. Vac. Soc. **32**, 2(1989).
- [5] K.M. Welch et al., Metal and elastomer seal tests for accelerator applications, Vacuum **41**, 1924(1990).
- [6] S. Kurokouchi, S. Morita and S. Morita, Characteristics of a taper-seal type gasket for the Conflat sealing system, J. Vac. Sci. Technol. **A19**, 2963(2001).
- [7] T. Wikberg and E. Dodelin, FEM calculation of UHV all-metal demountable joints for LEP, CERN-LEP-VA/89-49, 1989.
- [8] R.B. Fleming, R.W. Brocker and D.H. Mullaney, Development of bakeable seals

- for large noncircular ports on the TFTR, J. Vac. Sci. Technol. **17**, 337(1980).
- [9] A. Roth, The influence of the surface roughness on the specific leak rate of the gasket seals, Vacuum **20**, 431(1970).
- [10] S. Kurokouchi, et al., Reconsideration on ConFlat seal mechanism by gasket deformation measurements (in Japanese), J. Vac. Soc. Jpn. **42**, 910(1999).

Structure analysis of metal gaskets in tightened flanges

S. R. IN and B. J. Yoon

Nuclear Fusion Lab., KAERI, Daejeon 305-353

(Received August 4, 2006)

The deformation, the stress distribution, and the contact pressure of gaskets used in sealing flanges of CF (Con-Flat) or IPD (Improved) type were calculated to investigate the possibility of analyzing and estimating the sealing performance under a given tightening condition for a specific flange system.

Keywords : flange, gasket, CF, IPD, contact pressure

* [E-mail] srin@kaeri.re.kr