



## 배관용 탄성접촉시일의 응력 및 변형거동에 관한 유한요소해석

†김청균 · 김태환

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터  
(2011년 8월 13일 접수, 2011년 12월 26일 수정, 2011년 12월 26일 채택)

### FE Analysis on Stress and Deformation Behaviors of Elastomeric Contact Seals for a Pipe

†Chung Kyun Kim · Tae Hwan Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy,  
Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received August 13, 2011; Revised December 26, 2011; Accepted December 26, 2011)

#### 요 약

본 논문에서는 배관을 연결하기 위해 사용한 탄성접촉시일의 밀봉접촉응력과 변형거동 특성을 다루고 있다. 본 연구에서 배관을 연결하기 위해 체결너트와 탄성접촉시일 사이에 가해진 밀봉압축 간섭량은 0.2~0.5mm이다. 탄성접촉시일을 압축하기 위한 밀봉 간섭량은 두 개의 배관을 하나의 너트로 체결하는 과정에 발생한다. FEM 해석결과에 의하면, 경사진 밀봉표면을 갖는 접촉모델 1의 접촉수직응력은 평행한 밀봉표면을 갖는 접촉모델 2의 접촉수직응력에 비해 1.5~1.75배나 높게 나타났다. 이것은 배관과 배관을 연결하는 밀봉접촉표면이 높은 밀봉압축응력을 얻을 수 있도록 하기 위해 쇄기형상의 접촉모드를 형성하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

**Abstract** - This paper presents sealing contact stress and deformation behaviors of an elastomeric contact seal for a pipe connection. In this study, a pipe connection is used by a joint nut and an elastomeric contact seal with a sealing interference of 0.2~0.5mm. A sealing interference in which compresses an elastomeric contact seal is generated by fastening a joint nut between two pipes. The FEM computed results show that the contact normal stress of contact model 1 with an inclined sealing surface is 1.5~1.75 times high in compared with that of contact model 2 with a parallel sealing surface. This indicates that the sealing contact surface recommends a wedge contact mode between two pipe connections for a high sealing compression stress.

**Key words** : elastomeric contact seals, pipe, stress, deformation behavior, FEM

#### 1. 서 론

가스, 물, 오일과 같은 유체를 이송시키기 위해서는 강재(steel)로 제작한 배관을 많이 사용하고 있으나, 최근에는 내식성, 진동 감소, 내화학성 등을 위해 사용하는 유체의 종류에 따라 엔지니어링 플라

스틱으로 제작한 배관을 사용하는 경우도 많아졌다.

배관은 건물의 구조에 따라 직관이나 곡관의 형태로 잘라서 필요한 길이만큼 연결하여 사용한다. 이들 배관을 안전하게 연결하기 위해서는 연결부를 플랜지로 체결하거나, 용접으로 접합하기도 한다. 또한, 배관의 위치조정, 분기, 유체의 유출입과 관련된 개폐작동, 보수의 편의성을 위해 다양한 형태의 엘보, 티, 밸브, 너트 등을 사용하여 연결하기도 한다.

배관에 플랜지, 밸브, 너트 등을 사용할 경우는

†주저자:ckkim\_hongik@naver.com

연결부의 유체누출을 차단하기 위해 탄성접촉 밀봉성이 우수한 O-링, 패킹, 스크레이퍼시일과 같은 탄성접촉시일을 많이 사용한다. 탄성접촉시일은 배관의 연결, 자동차의 휠 베어링 등 다양하게 적용되고 있다[1-3].

배관의 밀봉성을 확보하기 위해 사용하는 탄성체 고무소재는 탄성변형 복원력이 우수해야 하고, 오래 사용할 수 있어야 안전하다. 따라서 배관에서 널리 사용하는 탄성접촉시일은 소재선정과 밀봉설계를 사용유체의 종류와 내압조건에 적합하도록 밀봉압축 간섭량을 설정하는 것이 설계의 핵심 포인트이다.

본 연구에서는 배관 연결부의 밀봉성과 내구성은 체결배관에서 발생할 수 있는 가스누출이나 누수현상을 너트와 탄성접촉시일에 의해 간단하게 차단될 수 있도록 설계하였다. 기존의 플랜지 체결방식이나 용접으로 접합하는 방식보다 너트와 탄성접촉시일로 밀봉한다면 특히 작은 배관의 시공과 보수를 간편하게 수행할 수 있고, 원가절감에도 큰 기여를 할 것으로 예상된다.

## II. 해석모델 및 사용소재

본 연구에서 고려한 연결배관은 Fig. 1(a)에서 보여 주는 것처럼 두 개의 배관을 체결하기 위한 너트와 연결배관을 밀봉하기 위한 탄성접촉시일로 구성되어 있다.

Fig. 1(b)에서는 배관을 연결하기 위해 사용한 밀봉시스템을 2D 유한요소 해석모델로 나타내었고, 외측 배관과 내측배관 사이에는 쇠기형상으로 삽입된 탄성접촉시일을 보여주고 있다.

본 연구에서 사용한 배관소재는 내수성과 내식성이 우수한 PP이고, 탄성접촉시일의 소재는 탄성거동성이 우수한 EPDM, FKM, HNBR을 사용하였다. 시일소재의 특성을 보면, EPDM 소재는 기계적 강도, 내마모성, 탄성, 압축률, 특히 내오존성이 우수하여 증기, 고온수, 유압유, 자동차 브레이크 및 냉각 시스템에서 많이 사용한다. 또한, FKM은 내유성, 내약품성이 우수하여 패킹, 가스켓, 다이어프램 등

**Table 1.** Material properties of an elastomeric contact seal

	HNBR	EPDM	FKM
Shore Hardness A	73~75	40~90	60~90
Tensile Strength, kg/cm <sup>2</sup>	50~250	50~200	70~150
Heat Resistance, °C	149	149	200

에 사용하지만 가격이 비싸서 제한적으로 사용되고 있다. HNBR 소재는 인장강도, 내마모성, 내오존성이 우수하여 자동차의 연료 및 냉매, 유압유, 시일제품 등에 널리 적용하고 있다.

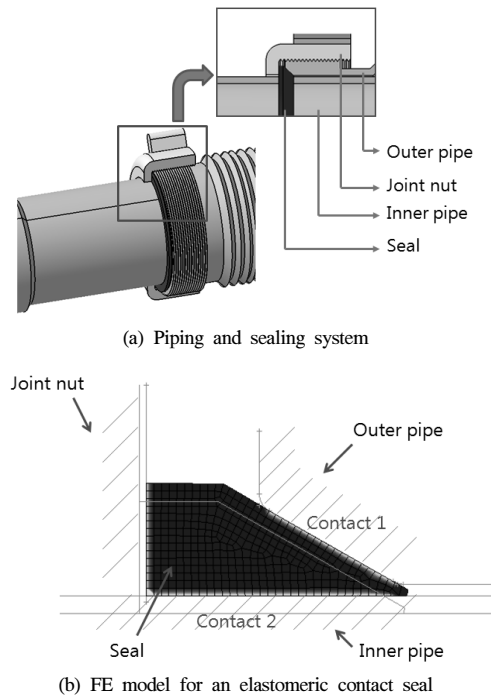
본 연구에서 사용한 탄성접촉시일에 대한 물리적 특성치를 Table 1에서 제시하고 있다.

## III. 해석조건 및 해석결과고찰

### 3.1. 해석조건

Fig. 1에서 보여준 FEM 해석모델은 축대칭 2D 모델로 유한요소해석 프로그램 MARC[4]를 사용하여 해석하였다. Table 1에서 제시한 대변형 소재인 탄성접촉시일에 비교하여 PP소재로 제작한 배관과 너트는 응력과 변형거동성이 상대적으로 대단히 작기 때문에 하나의 강체(rigid body)로 가정하고 해석하였다.

두 개의 배관을 연결하여 가스와 같은 작동유체의 누설을 완벽하게 차단하기 위해서는 내측배관과 외측배관 사이에 삽입된 탄성접촉시일의 변형거동을 발생시킬 수 있도록 체결용 너트로 밀봉압축 간섭량을 어느 정도는 제공해야 한다. 따라서 본 연구에



**Fig. 1.** Pipe connection system and finite element analysis model for sealing two pipes.

서는 탄성접촉시일의 탄성거동 밀봉효과를 확보하기 위해 사용한 밀봉압축 간섭량은 0.2~0.5mm이다.

고무와 같은 탄성체의 변형거동 특성을 유한요소법으로 해석하기 위해서는 실험적 데이터에서 획득한 응력-변형률 곡선을 적절한 함수모델로 환산시켜 사용해야 한다. 본 연구에서 사용한 탄성접촉시일 소재에 대한 물성치는 인장시험을 통한 얻은 응력-변형률 곡선을 근사치 곡선 3차원모델로 환산하여 탄성접촉시일에 적용하였다.

### 3.2 해석결과 및 고찰

배관의 연결부에서 발생하는 접촉응력 및 변형거동 특성을 파악하기 위해 삽입된 탄성접촉시일에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 외측배관과 탄성접촉시일 사이의 경사 접촉모델 1과 내측배관과 탄성접촉시일 사이의 평행 접촉모델 2에서 발생한 응력

및 압축변형은 너트를 체결하는 과정에서 형성된다.

배관을 너트로 체결하기 때문에 형성되는 축방향의 밀봉압축 간섭량 0.2~0.5mm을 탄성접촉시일에 적용할 때의 접촉응력은 배관보다는 상대적으로 연한 탄성접촉시일에서 발생한다.

Fig. 2는 너트를 조일 때 탄성접촉시일에서 발생하는 최대코시응력(maximum cauchy stress)과 변형률(total strain)을 보여준 결과이다. 즉, 밀봉에 필요한 압축 간섭량이 증가할수록 탄성체 모두에서 최대코시응력과 변형률은 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 2의 유한요소해석 결과에 의하면, 밀봉압축 간섭량이 0.3mm 이상 증가하면서 EPDM과 HNBR 소재의 최대코시응력은 FKM 소재에 비해 크게 높이는 것으로 나타났다. 그러나, 변형거동 측면에서 EPDM과 FKM에 대한 변형률을 보면, 밀봉압축 간섭량이 0.4mm 이상으로 증가할 때 특히 높아지는 것으로 나타났다.

탄성접촉시일의 밀봉성능에 가장 큰 영향을 미치는 설계요소는 배관과 탄성접촉시일 사이에 걸리는 접촉수직응력이다. 따라서 체결용 너트를 조임으로 인해 탄성접촉시일에 가해지는 밀봉압축 간섭량이 0.2~0.5mm일 때, Fig. 1(b)에서 보여준 접촉모델 1과 접촉모델 2에 대한 FEM 해석결과를 Fig. 3에서 제시하였다.

밀봉특성을 나타낸 Fig. 3의 FEM 해석결과에 의하면, 접촉모델 1과 2 모두에서 가장 큰 접촉수직응력은 EPDM에서, 그다음은 HNBR, 가장 작은 접촉수직응력은 FKM에서 각각 나타났다. 경사진 밀봉 접촉면을 갖는 외측배관과 탄성접촉시일 사이의 접촉모델 1에서 가장 큰 접촉면압을 나타낸 EPDM 시일의 경우, 밀봉압축 간섭량이 0.2mm일 때는 1.4MPa, 0.5mm일 때는 4.1MPa로 2.9배나 증가하였다. 반면에 접촉수직응력이 가장 낮은 FKM 시일의 경우, 밀봉압축 간섭량이 0.2mm일 때는 0.8MPa, 0.5mm일 때는 2.4MPa로 3배나 증가하였다. 또한, 중간정도의 접촉수직응력을 보여준 HNBR 시일의 경우, 밀봉압축 간섭량이 0.2mm일 때는 1.0MPa, 0.5mm일 때는 3.6MPa로 3.6배나 증가하였다.

또한, 내측배관과 탄성접촉시일 사이에서 평행한 밀봉 접촉면을 갖도록 형성된 접촉모델 2에서 가장 높은 접촉면압을 보여준 EPDM 시일의 경우, 밀봉압축 간섭량이 0.2mm일 때는 0.8MPa, 0.5mm일 때는 2.4MPa로 3배나 증가하였다. 반면에 접촉수직응력이 가장 낮은 FKM 시일의 경우, 밀봉압축 간섭량이 0.2mm일 때는 0.5MPa, 0.5mm일 때는 1.6MPa로 3.2배나 증가하였다. 또한, 중간정도의 접촉수직응력을 보여준 HNBR 시일의 경우, 밀봉압축 간섭량이

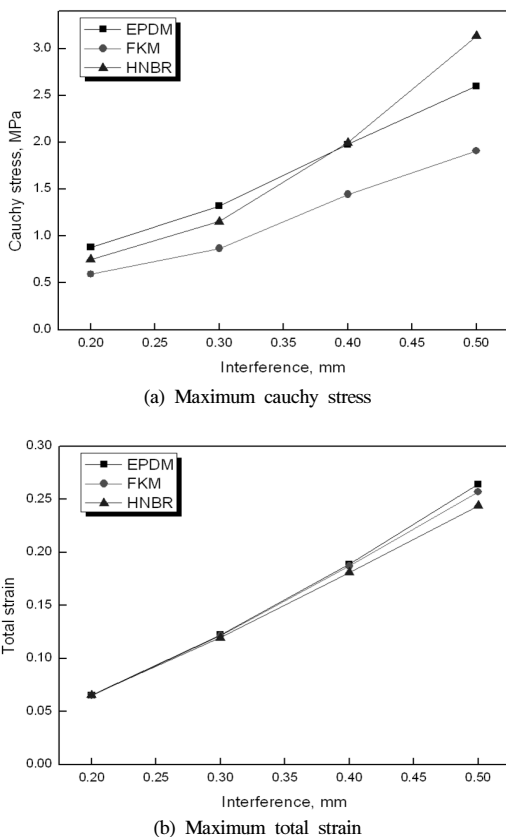
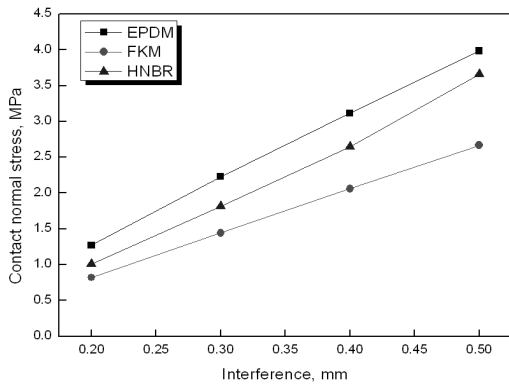


Fig. 2. Stress and strain of an elastomeric contact seal for a pipe connection.

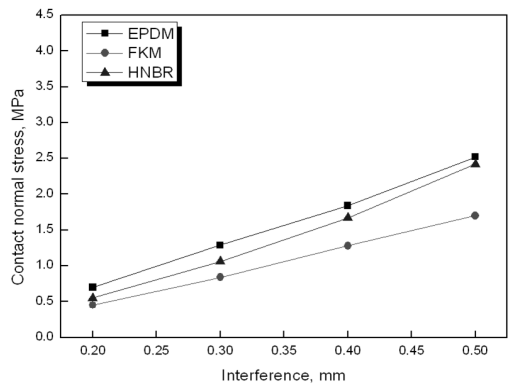
0.2mm일 때는 0.6MPa, 0.5mm일 때는 2.36MPa로 3.8배나 증가하였다.

Fig. 3에서 제시한 경사진 접촉모델 1과 평행한 접촉모델 2의 경우, 모두에서 탄성거동 밀봉력은 고압이 걸리지 않는 대부분의 배관에서 양호하게 유지하는 것으로 나타났다.

그러나 배관을 연결하는 체결부에서의 밀봉특성은 탄성접촉시일의 접촉형태에 따라 크게 달라지고 있음을 알 수 있다. 즉, 외측배관과 탄성접촉시일의 접촉면이 쇄기형상으로 경사지게 만나는 접촉모델 1의 경우는 평행하게 만나는 접촉모델 2에 비하여 1.5~1.75배나 높은 접촉수직응력을 나타내고 있다. 이것은 배관과 탄성접촉시일의 밀봉접촉 형태가 평행하게 접촉하여 밀봉하기보다는 쇄기형상으로 접촉하여 밀봉하는 것이 더 큰 밀봉효과를 얻을 수 있다는 해석결과이다.



(a) Maximum contact normal stress at contact 1



(b) Maximum contact normal stress at contact 2

Fig. 3. Maximum contact normal stress of an elastomeric contact seal for a pipe connection.

따라서 본 연구에서 제시한 배관과 탄성접촉시일의 밀봉형태는 평행하게 접촉하기보다는 경사지게 접촉하여 밀봉하도록 설계하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

#### IV. 결론

배관과 배관을 안전하게 연결하기 위해 너트와 탄성접촉시일을 사용하였고, 이들 사이에 발생하는 밀봉압축에 관련된 접촉응력과 변형률을 FEM 해석으로 고찰하였다.

본 연구에서 사용한 밀봉소재는 EPDM, FKM, HNBR으로 탄성변형 거동성이 우수하기 때문에 배관에서 누출되는 가스나 물과 같은 유체를 차단하는데 적합한 것으로 나타났다.

FEM 해석결과에 의하면, 외측배관과 탄성접촉시일 사이의 밀봉압축 접촉면이 경사진 쇄기형상의 접촉모델 1의 경우는 평행한 접촉모델 2에 비하여 1.5~1.75배나 높은 접촉수직응력을 나타내고 있다. 이것은 배관과 탄성접촉시일의 밀봉접촉 형태가 평행하게 접촉하여 밀봉하기보다는 쇄기형상으로 접촉하여 밀봉하는 것이 더 효과적이라는 해석결과이다.

따라서 본 연구에서 제시한 것처럼 배관과 탄성접촉시일의 밀봉형태는 평행하게 접촉하는 것보다 경사지게 접촉하여 밀봉하도록 설계하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

#### 참고문헌

- [1] 김도현, 김청균, “배관용 O-링의 밀봉특성에 관한 수치적 연구”, 한국윤활학회 제49회 추계학술대회 논문집, 221-226, (2009)
- [2] 김경섭, 김청균, “유한요소해석을 이용한 가스수송 배관용 파형오링의 밀봉특성에 관한 연구”, 한국가스학회 춘계학술대회논문집, 82-88, (2010)
- [3] 허영민, 이광오, 심태양, 강성수, “자동차용 휠 베어링의 기동토크와 밀봉성을 고려한 립 쉘의 형상설계에 관한 연구”, 한국자동차공학회는논문집, 15(4), 10-16, (2007)
- [4] “MARC user’s manual,” Ver. K6.1, MARC Analysis Research Co., (1996)