한국기계가공학회지, 제12권, 제6호, pp.101-108 (2013.12) ISSN 1598-6721 (Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.12 No.6, pp.101-108(2013.12)ISSN2288-0771 (Online)

항공기용 연료호스의 빔 시일 피팅의 형상변화에 따른 접촉특성에 관한 연구

전준영*, 김병탁#
(*,# 부경대학교)

A Study on Contact Characteristics by the Geometry Variation of Beam Seal Fitting of an Aircraft Fuel Hose

Jun-Young Jeon*, Byung-Tak Kim#
(Received 8 October 2013; received in revised form 1 November 2013; accepted 11 November 2013)

ABSTRACT

An aircraft fuel hose is a kind of high pressure hose, and generally consists of a nipple, a socket, an inner tube, and a reinforcement layer to increase the tensile strength. Especially the nipple supports the other components in manufacturing stages such as the swaging or crimping processes however, the nipple also serves to prevent leakage in cases of hose engagement with a hydraulic system. To ensure the seal of the hose assembly, a beam seal fitting with metal-to-metal contact is usually adopted at the end of a nipple. Therefore, the geometry of the beam is an important parameter to be determined to make sure there is sufficient contact force. This study aims to investigate the effects of beam seal geometry on the contact force by changing the inclined angle and the thickness of the beam. The results reveal that the proper thickness and inclined angle of the beam seal are 0.45 mm and 8.5°, respectively.

Key Words : Aircraft Fuel Hose(항공기용 연료호스), Beam Seal Fitting(빔 시일 피팅), Contact Force(접촉력), Finite Element Analysis(유한요소해석)

1. 서 론

항공기용 연료호스는 고온 고압의 작동유가 유압통로를 따라 원활하게 순환될 수 있도록 높은 신뢰성과 내압성, 내열성, 기밀성, 내화성 등이 요구되는 제품이다. 현재 자동차나 산업용 고압호스는 연구 및 부품의 국산화 개발을 통해 양산되고 있으나, 항공기용 호스는 요구되는 성능 및 품질 요건을 충족하는 제품을 생산할 수 있는 업체가 없어 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 항공기용 호스를 개발하기 위해서는 호스와 피팅부품의 제조 기술, 호스와 피팅의 체결기술 및 시험평가 기술 등에 대한 원천 기술이 확보되어 있어야 하며, 이에 앞서 설계 제품에 대한 해석 및 연구를 통하여 안전성과 신뢰성에 영향을 주는 각종 파라메터에 대한 깊이 있는 고찰이 필요하다. 항공기용

* Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University
# Corresponding author :
Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University
E-mail : btkim@pknu.ac.kr

호스의 구조와 성능 요건에 대한 적용 규격은 SAE의 항공우주 규격[1](Aerospace Standard)에 명시되어 있으며, 이를 국산화하기 위해서는 먼저 규격에 명시된 요구조건을 파악하고 선진 제품에 대한 분석 및 연구 결과를 토대로 개발품에 대한 설계를 수행할 필요가 있다. 또한 설계에 따른 시제품이 미국 군사규격 MIL-S-8897C 등에 명시된 요구 조건을 충족하는지에 대한 성능시험을 수행하여 항공우주분야를 포함한 군수산업 분야에 적용 가능한 제품을 개발하는 것이 바람직하다.

항공기용 호스는 안쪽으로부터 니플(nipple), 내관(inner tube), 보강층(reinforcement layer), 소켓(socket), 슬리브(sleeve) 등으로 구성되어 있고, 이중 니플은 조립품 제작 시 스웨이징[2-3](swaging)이나 크림핑(crimping) 등의 부피 성형 공정에서 다른 부품들을 지지하는 역할을 하므로 소켓에 비해 항복점이 높은 SUS630 등의 재료를 사용한다. 또한 니플은 호스 조립품의 양 끝단에 위치하여 유압시스템과 체결되므로, 이 부분의 기밀 유지가 제품의 성능에 매우 중요한 역할을 하게 된다. 현재 수입되고 있는 항공기용 연료호스의 기밀 유지 방법은 기밀성 확보와 경량화에 유리한 빔 시일 피팅[4-5]을 사용하고 있다. 이 방법의 개발 및 적용은 1969년도 NASA의 아폴로/제미니 계획에서 이루어져 그루먼사 달 로켓에 사용되었으며, 현재는 다양한 형태로 개량되어 군용 및 상용 항공기 연료시스템, 원자로, 비행 중 급유 시스템, 미사일 등에 사용되고 있다. 이 체결 방법의 주요한 특징은 금속간 체결(metal-to-metal fitting)로서, 니플의 끝 부분인 체결부가 보(beam)의 형상을 가지고 있으며, 체결시 접촉에 의해 보가 탄소성 변형을 함으로써 기밀을 유지하는 방식이다. 이 방법에 대한 개념 소개는 이미 국내에 알려져 있으나 제품 개발을 위한 적용기술이나 관련된 연구 결과는 찾아 보기 힘든 실정이다.

따라서 본 연구에서는 항공기용 연료호스의 국산화 계획의 일환으로 빔 시일의 보 두께와 경사각의 변화에 따른 접촉력의 변화를 살펴보고자 한다. 접촉력은 기밀 유지와 밀접한 관계가 있는 인자로서 주로 재료의 물성이나 제품의 형상에 의해 결정되기 때문에 제품 규격의 요구조건을 충족하는 범위 내에서 여러 모델에 대한 접촉 특성을 상호 비교하였다. 본 연구에서 얻어진 해석 결과는 추후 빔 시일 형태의 체결을 이용한 제품의 설계 및 개발에 필요한 기초자료를 제공해 줄 수 있을 것으로 사료된다.

2. 수치해석

본 연구의 해석 대상인 호스 피팅부의 전체적인 조립 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 우측의 호스 조립체는 좌측의 유압시스템의 체결부(수나사)와 너트에 의해 연결되어 작동유의 통로를 형성하게 된다. 니플과 수나사의 치수는 SAE AS 규격[1]을 참고하였으며, 수나사는 상용규격 ANSI B18.2.1에서 규정하는 7/16-24UNF-3B 나사의 규격을 사용하였다. 전체 모델은 체결용 너트를 제외하고는 축대칭 형상을 가지고 있으며, 너트에 의해 상호 접촉하여 기밀을 유지하는 수나사와 니플의 재료는 동일하게 스테인리스강(SUS630)을 사용하였다. 해석에 사용된 SUS630의 기계적 성질이 Table 1에 나타나 있다.

본 연구에 사용된 수나사와 니플 선단의 빔 시일 부분에 대한 유한요소모델을 Fig. 2에 도시하였다. 사용된 요소는 4절점 축대칭 요소(4-node

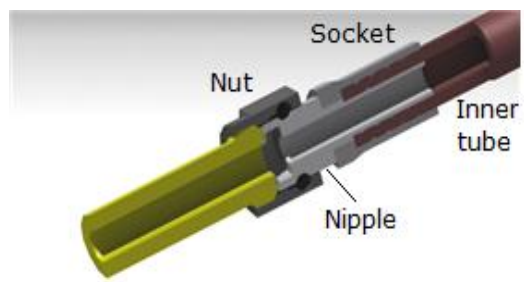


Fig. 1 Shape of hose assembly

Table 1 Mechanical properties of SUS630

Material	STS630(17-4PH)
Young's modulus	192GPa
Poisson's ratio	0.272
Yield stress	877.4MPa

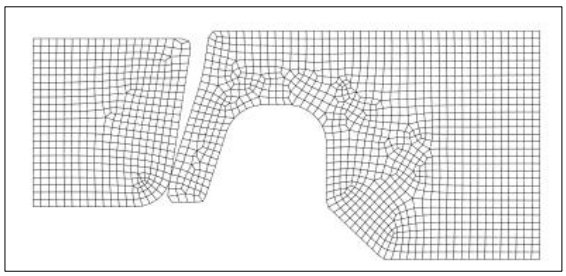


Fig. 2 Finite Element Model

axisymmetric element)이며, 수나사의 나사산은 빔 시일의 접촉 변형과 무관하므로 모델링에서 제외하였고, 요소의 수는 각 모델에 대한 해석결과의 상호 비교를 위하여 3만 여개로 고정하였다.

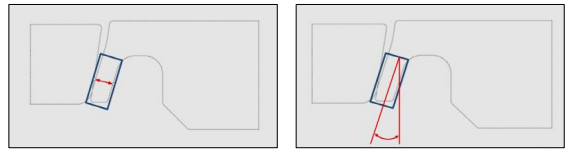
수나사와 니플은 코팅 처리된 강재이므로, 마찰계수는 그 코팅재의 일반 값인 0.05를 적용하였다. 경계조건으로는 너트의 회전에 의한 수나사의 좌측 절점들에 대한 축방향 이동(translation) 조건과 접촉부에서 멀리 떨어진 니플 우측 절점들에 대한 변위 고정 조건을 부여하였다. 수나사의 이동거리는 수나사의 선단부가 니플과 접촉을 시작하는 거리로 설정하였으며, 빔 시일의 접촉으로 니플의 절점이 이동하는 관계로 초기 해석을 통하여 추정한 값은 약 0.21 mm로 나타났다. 또한 MIL-F-85421 규격[6]에서 요구하고 있는 수나사와 니플 체결시의 토크는 18 N·m로 설정되어 있으므로, 이에 대한 만족여부를 판단하기 위하여 해석에서 얻은 니플 접촉부의 X방향 접촉력을 사용하여 축방향 하중을 구하고, 이를 나사 식 (1)과 (2)에 대입하여 토크를 계산하였다[7].

$$T = Q\tan(\lambda+\rho')\cdot\frac{d_2}{2} \quad (1)$$

$$\lambda = \tan^{-1}\left(\frac{p}{\pi d_2}\right),\ \rho' = \tan^{-1}\frac{\mu}{\cos 30^\circ} \quad (2)$$

여기서 T는 토크(N·m), Q는 축방향 하중(N), d_2는 유효지름, p는 수나사의 피치(pitch), 그리고 μ는 마찰계수이며, 계산을 통해 얻어진 리드각 λ와 마찰각 ρ'은 각각 1.85°, 3.3°로 나타났다.

일반적으로 호스 제품의 기밀성을 유지하기 위해서는 부품 간 접촉력이 큰 것이 유리하나 이 경우 응력과 변형률도 동시에 증가하게 되므로 규격 토크 18 N·m에 해당하는 접촉력을 얻는 조건하에서 응력이 낮은 제품을 개발하는 것이 필요하다.



(a) thickness (b) inclined angle

Fig. 3 The variable dimensions of beam seal geometry

이를 위하여 본 연구에서는 부품의 호환성을 위한 치수를 제외하고 접촉력에 큰 영향을 줄 것으로 판단되는 Fig. 3의 두 치수를 변경하여 그에 따른 접촉 특성을 분석하였다. 빔 시일부의 두께는 기존 모델의 측정값 0.51 mm를 기준으로, 경사각은 17.25°를 기준하여 이들 치수의 변화에 따른 거동특성을 해석하였다.

3. 해석결과

3.1 초기해석 결과

수나사와 니플 체결시 규격토크를 얻기 위한 수나사의 이동거리를 추정하고 수나사의 이동거리에 따른 빔 시일부의 거동특성을 살펴보기 위하여 초기 해석을 수행하였다. 해석 모델의 초기 형상은 기존 제품의 단면 치수를 측정하여 결정하였으며, 수나사의 이동거리를 접촉시작 직후인 0.2 mm로부터 0.4 mm까지 0.04 mm 간격으로 변경해 가면서 해석을 수행하였다. Fig. 4는 수나사의 이동거리에 따른 접촉력의 변화를 나타낸 그래프이다. 접촉력은 수나사의 이동거리에 따라 초기에는 급격히 증가하다가 0.28 mm 이후에는 거의 일정값에 수렴하는 경향을 나타내었다. 즉 접촉력은 수나사의 이동거리에 따라 선형적으로 변화하지 않으며, 이동 거리가 과대한 경우 체결력의 증가 없이 니플에 과도한 응력이 발생하여 제품의 성능이나 수명 면에서 바람직하지 못할 것으로 판단된다.

수나사의 이동거리에 따라 니플에 발생하는 응력과 변형률의 최대값을 Fig. 5에 도시하였다. Fig.

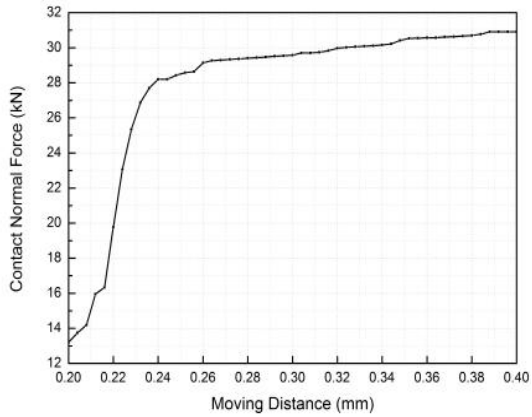


Fig. 4 Contact normal force by moving distance of an external thread

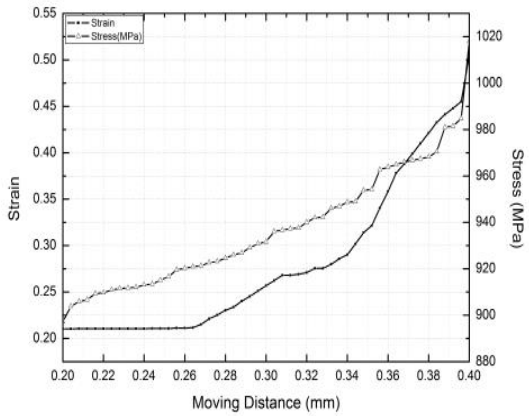


Fig. 5 Strain and stress by moving distance of an external thread

4에서 이동거리 0.35 mm의 경우 접촉력은 약 31 kN으로 그 이후에도 큰 변화가 없는 반면 응력과 변형률은 그 이후에도 급격히 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 빔 시일 체결시 수나사의 이동을 0.27 mm 이상으로 할 필요가 없으며, 적당한 나사의 리드(lead)는 기밀성 유지와 관련된 제품의 성능 측면에서 볼 때 요구되는 체결 토크를 만족하는 범위 내에서 응력과 변형률이 작은 구간을 선택하는 것이 바람직하다 하겠다.

전술한 결과를 토대로 적당한 수나사의 이동거리로 판단되는 0.21 mm로부터 0.27 mm 까지의 접

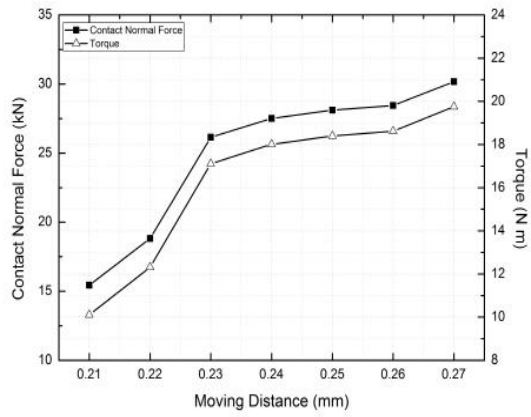
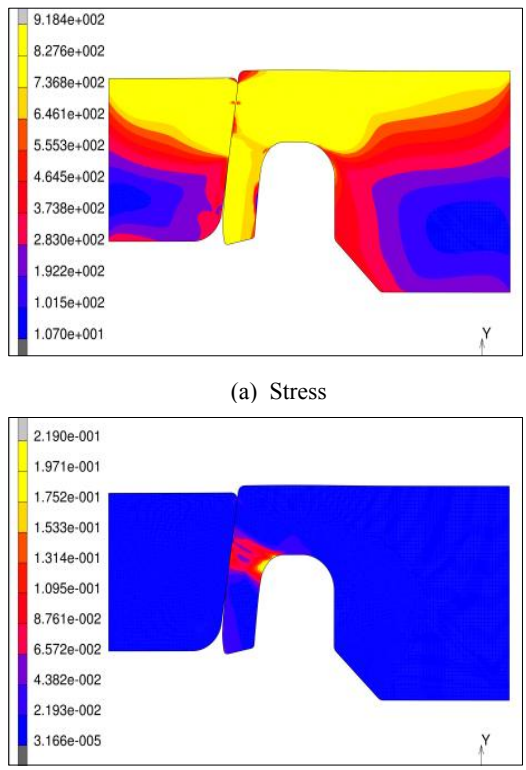


Fig. 6 Contact normal force and torque according to the moving distance



(a) Stress

(b) Strain

Fig. 7 Stress and strain distribution for the moving distance, 0.24mm

촉력과 이로부터 계산된 토크의 값을 Fig. 6에 나타내었다. 그래프를 살펴보면 접촉력을 통하여 규격토크 18 N·m를 얻을 수 있는 최소한의 수나사 이동거리는 0.24 mm이며, 이때의 접촉력의 합은 약 27.5 kN이 됨을 알 수 있다. Fig. 7은 이동거리 0.24 mm일 때의 응력과 변형률 분포를 도시한 것으로 최대 응력은 항복 응력을 약간 상회하는 918.4 MPa, 최대 변형률은 빔 시일의 목 부분에서 0.219로 각각 나타났다.

3.2 빔 시일의 두께에 따른 해석결과

형상적 특징에 따라 두께 변경은 0.45 mm부터 0.55 mm까지 가능하며 이보다 작거나 큰 두께를 적용시킬 경우에는 다른 치수들도 변경시켜야 하므로, 초기 두께 0.51 mm를 기준으로 0.45 mm로부터 0.55 mm까지 0.01 mm 간격으로 모델을 구성하여 해석을 진행하였다. 각 모델 간 상호 비교를 위하여각 두께에서 규격토크 18 N·m의 값을 가지는 시점에서의 결과를 대상으로 고찰하였으며, 각 모델에 대한 규격토크 발생 시점까지의 수나사 이동거리 변화는 Fig. 8에 나타낸 것과 같다.

이 그림으로부터 두께가 증가할수록 규격토크에 해당하는 접촉력을 얻는데 필요한 수나사의 이동거리가 급격히 감소함을 알 수 있다. 즉 규격토크를 얻기 위한 수나사의 이동거리는 변경 전의 두

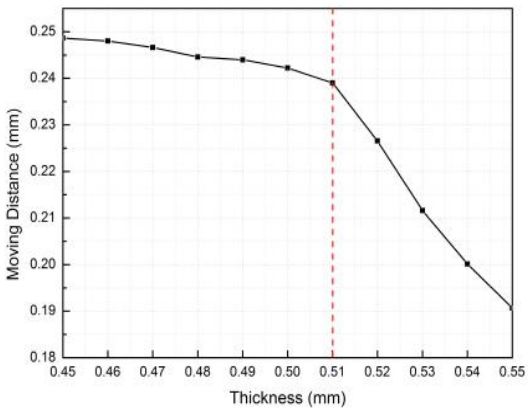


Fig. 8 Moving distance for the specified torque according to the thickness of the beam seal

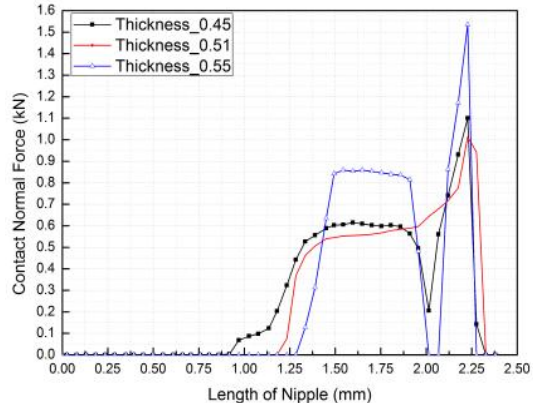


Fig. 9 Contact normal force distribution with different thickness along the contact length

께 0.51 mm를 기준으로 0.01 mm의 두께 증가 시 약 5%가 감소하는 것으로 나타났다.

기밀을 안정적으로 유지하기 위해서는 접촉력의 크기뿐만 아니라 접촉력의 분포 및 접촉길이에 대한 고찰도 필요하다. 왜냐하면 두께가 두꺼울수록 규격토크를 얻기 위한 수나사의 이동거리는 짧아지지만 접촉길이 또한 짧아져 접촉력이 좁은 범위에 집중될 것을 예상할 수 있기 때문이다. 이는 안정적 접촉으로 기밀을 유지하는데 부정적 효과를 미치므로 두께에 따른 접촉력 분포를 살펴보기 위하여 세 가지 두께에 대한 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 이 그림에서 두께가 감소할수록 빔 시일의 접촉길이는 증가하나 접촉력은 감소함을 알 수 있으며, 두께가 증가하는 경우 접촉길이가 짧아져 접촉력이 국부적으로 크게 발생함을 관찰할 수 있다.

Fig. 10은 각 모델에서 규격토크가 발생하는 시점에서의 최대 응력과 변형률을 나타낸 그래프이다. 두께가 두꺼워 질수록 동일한 토크를 가했을 때 발생하는 응력과 변형률이 증가함을 알 수 있다. 해석 결과에 의하면 두께가 0.01 mm 증가할수록 변형률은 1.5%, 응력은 0.6% 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과를 종합해 볼 때 기밀을 안정적으로 유지하기 위한 빔 시일의 두께는 0.51 mm를 초과하지 않는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 두께가 너무 얇은 경우에도 접촉력의 분포가 빔의 고정단 쪽으로 편중되어 접촉 안정성 측면에서는

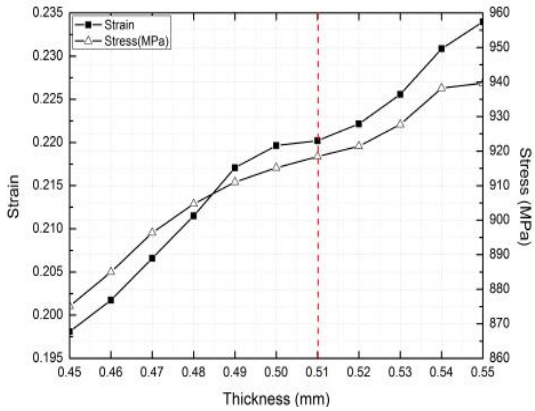


Fig. 10 Maximum stress and strain for the specified torque according to the thickness of beam seal

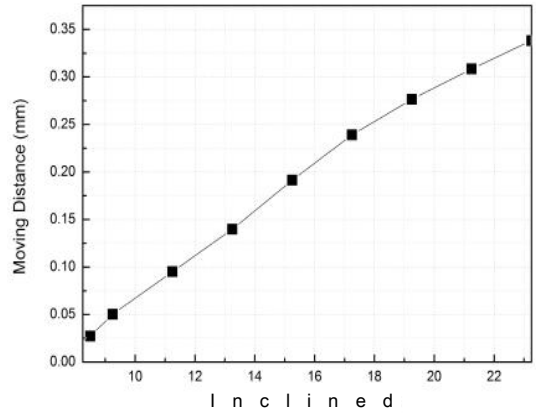


Fig. 11 Moving distance for the specified torque according to the inclined angles of the beam seal

다소 불리할 것으로 사료된다.

3.3 빔 시일의 경사각에 따른 해석결과

경사각 변경에 따른 빔 시일부의 접촉특성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 기존 제품의 형상에서 측정한 17.25°를 기준으로 그 값을 변경해 가면서 해석을 수행하였다. 수나사의 선단부 경사각이 수직축을 기준으로 8.5°로 설정되어 있으므로, 빔 시일의 경사각은 기하학적 특성상 이 각도보다 작아질 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 기존 제품의 경사각을 기준으로 9.25°부터 23.25°까지 각도를 2°씩 변경시켜 가면서 해석을 진행하였으며, 경사각의 한계치로서 수나사 선단부와 평행한 8.5°에 대하여도 해석을 수행하였다. Fig. 11은 각 경사각에 대하여 규격토크를 얻기 위한 수나사의 이동거리를 나타낸 것이다. 이 그림에서 나타난 바와 같이 경사각이 증가할수록 규격토크를 얻기 위한 수나사의 이동거리는 거의 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

경사각의 변화에 따른 빔 접촉길이에 대한 접촉력 분포를 살펴 본 결과, 경사각이 8.5°의 경우에 접촉력이 가장 크고 상대적으로 균일한 분포를 나타낸 반면, 각이 커질수록 접촉력의 크기는 감소하면서 빔의 상부에 접촉력이 편중되는 현상이 나타났다. 또한 경사각 8.5°의 경우 규격토크에 도달했을 때의 변형률과 응력은 다른 경우에 비하여 상대적으로 낮게 나타나고, 특히 변형률은 초기모델의 약 1/4정도로 나타났다. Fig. 12는 규정토크 작용 시 발생하는 응력과 변형률을 경사각의 변화에 따라 도시한 것이다.

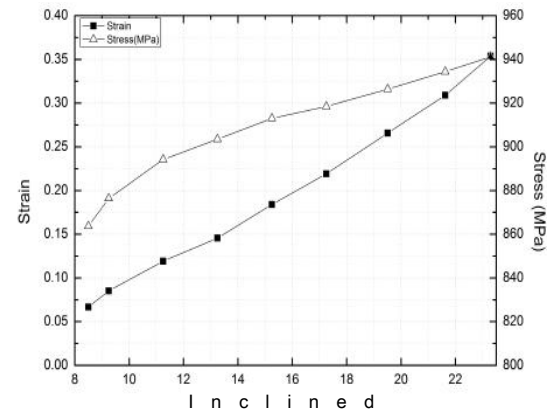
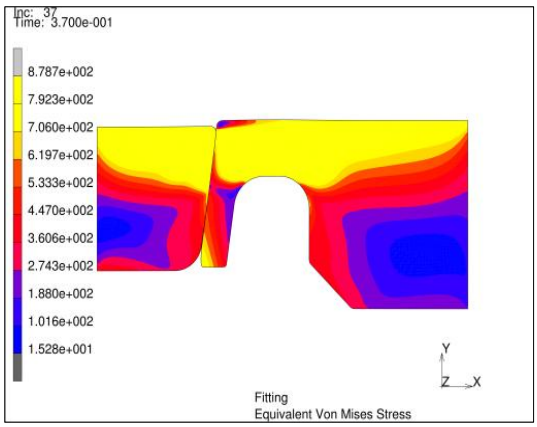


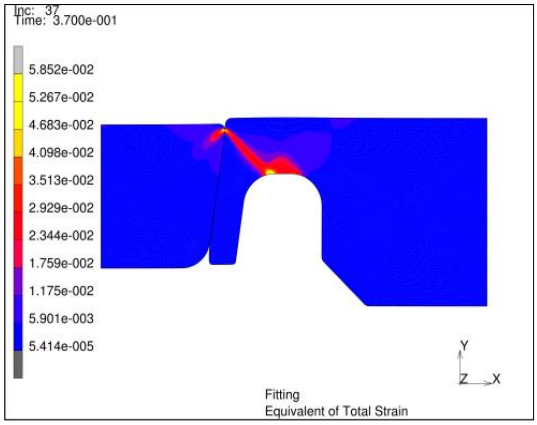
Fig. 12 Variations of stress and strain according to the inclined angles of beam

3.4 수정모델에 대한 해석 결과

전술한 해석 결과를 바탕으로 초기 모델의 형상에서 두께를 0.51 mm에서 0.45 mm로 줄이고, 경사각을 수나사의 빔 접촉면과 평행한 8.5°로 변경한 모델에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 13은 규격토



(a) Stress



(b) Strain

Fig. 13 Stress and strain distribution of the revised model

크로 체결했을 때 수정모델에서 발생하는 응력과 변형률 분포를 도시한 것이다. 이 결과를 초기 모델과 비교해 보면, 최대 응력은 918.4 MPa에서 878.8 MPa로 감소하였고, 변형률 또한 0.219에서 0.059로 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 두께가 감소함으로서 빔의 전체적인 응력은 감소하며 빔의 고정단에서 굽힘에 의한 응력이 상대적으로 크게 나타남을 관찰할 수 있다.

Fig. 14는 수정모델에 대한 피팅부의 기밀성을 검토하기 위하여 빔의 접촉길이에 따른 접촉력의 분포를 초기모델 결과와 함께 도시한 것이다. 수정모델의 경우 낮은 응력과 변형률에도 불구하고 규격토크에 해당하는 접촉력을 얻었을 뿐 아니라, 접

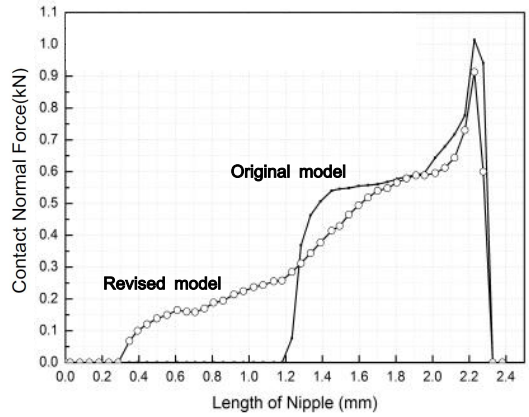


Fig. 14 Comparisons of contact normal force distribution between the original model and the revised model

촉길이가 초기모델보다 80% 정도 증가하여 기밀 안정성 측면에서도 더 효과적임을 알 수 있다. 또한 접촉력의 전체적인 크기도 초기모델보다 증가하여 수나사와 빔의 결합이 견고해짐으로써 작동유체의 압력에 의한 누출 방지에 수정모델이 더 효과적일 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 항공기용 연료호스의 빔 시일의 형상 변화에 따른 접촉력 및 거동특성을 유한요소법으로 해석하였다. 해석은 기존 제품으로부터 추정한 초기 모델에서 빔 시일의 두께 및 경사각을 변경해가면서 형상변화에 따른 접촉력, 접촉길이, 응력 및 변형률을 검토하였으며, 이들 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 빔 시일의 두께는 초기 0.51 mm에서 0.45 mm로 변경한 경우가 접촉력과 관련된 성능 면에서 가장 효과적인 것으로 나타났다. 전체적으로 빔 시일의 두께를 증가시키는 경우 접촉력의 국부적 집중으로 응력과 변형률의 큰 증가가 나타났으며, 두께를 감소시킨 경우에는 접촉길이가 길어져 응력과 변형률이 감소하는 경향을 나타내었다.

2. 경사각의 경우 수나사의 선단 접촉면과 평행한 경사각인 8.5°가 빔 시일의 성능 면에서 가장 효과인 것으로 나타났으며, 이 경우 규격토크로 체결했을 때, 초기모델에 비해 변형률이 큰 폭으로 감소하였다.
3. 두께와 경사각을 변경한 수정모델의 경우, 접촉길이가 초기모델에 비해 80%증가하였으며, 규격토크로 체결시 발생하는 변형률이 초기모델에 비해 약 1/4로 감소하는 효과를 나타내었다.

REFERENCES

1. Specification : SAE AS 4207, 4209, 85420, 85421, MIL-S-8897 C , Technical requirements : AS 604D, AS620F, AS1339F, AS1946B, AS2078
2. Kim, H. J. and Kim, B. T., “Nonlinear Finite Element Analysis for the Swaging of a High-Pressure Hose,” J. of KSPSE, Vol. 7, No. 2, pp. 44-50, 2003.
3. Baek, J. K. and Kim, B. T., “A Study on the Clamping Force of an Automotive Air-conditioning Hose according to the Friction Coefficient,”, J. of KSMPE, Vol. 10, No. 3, pp. 39-46, 2011.
4. Paker Hannifin Corporation, “Dynatube fittings for the Aerospace Industry”, Jacksonvile, Florida, pp. 2-16, 2007.
5. Jeon, J. Y., Kim, B. T. and Kim, K. H., “Finite Element Analysis for the Fitting of an Aircraft Fuel Hose,”, Proceeding of the KSMPE Autumn Conference, p. 77, 2011.
6. SAE AS 85421, Table.3 Torque Requirement
7. Song, J. B. et al., Mechanical Design, Bookshill, pp. 434-437, 2013.