

항공기용 연료호스 제작시 최적 크리핑 직경에 관한 연구

A Study on the Optimal Crimping Diameter of Aircraft Fuel Hoses in Manufacturing Process

전준영* · 김병탁**†

Jun-Young Jeon* and Byung-Tak Kim**†

(접수일 : 2013년 07월 22일, 수정일 : 2013년 10월 21일, 채택확정 : 2013년 10월 21일)

Abstract: The high pressure hoses are widely used for the vehicles, aircraft, and overall industries. The hose assembly is generally composed of a nipple, a socket and a hose with reinforcement layers to increase the tensile strength. To produce the hose assembly, crimping or swaging process is usually used to clamp its components to ensure the prevention of fluid leakage. Crimping is a cold-working technique to form a strong bond between the workpiece and a non-metallic component. The crimping stroke is a primary parameter to be determined in the metalworking process, and it plays an important role in hose performance. This study aims at investigating the optimal crimping stroke according to the size of aircraft high pressure hose by using MSC/MARC. It is supposed that the results can be useful to get the information about the crimping stroke in manufacturing process, even with the different size of a hose.

Key Words : High Pressure Hose, Crimping, Nipple, Socket, Finite Element Method, MSC/MARC, Contact Analysis

1. 서 론

고압호스는 기계장치에 연료나 오일을 공급하기 위한 용도로 차량이나 항공기 등을 비롯한 산업 전반에 널리 사용되고 있다. 고압호스는 그 구조적 특성상 체결부가 취약하며, 주위 환경 변화에 따른 가혹한 운전조건 하에서 누설이 일어나기 쉽기 때문에 호스 체결부의 기밀 유지가 제품의 성능에 매우 중요한 역할을 한다. 대부분의 고압 호스 조립품은 호스 안쪽의 금속관인 니플(nipple)

과 호스 바깥의 소켓(socket) 사이에 호스를 삽입한 후, 소켓의 바깥에서 안쪽으로 하중을 가하여 소성변형시킴으로써 이들 부품을 체결하는 방식으로 제작된다. 호스는 유체와 직접 접촉하기 때문에 그 재료는 주로 내 화학성 및 전기저항성 등이 좋은 고무 재질이나 PTFE(Polytetra-fluoroethylene) 등을 사용하며, 호스의 강도를 높이기 위하여 철사나 나일론 등으로 보강하는 것이 일반적이다.

항공기용 연료호스는 최대온도 232 ℃, 최대압력 10.3 MPa의 작동유가 유압계통 경로를 따라 원

**† 김병탁(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과

E-mail : btkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6161

*전준영 : 부경대학교 대학원 기계설계공학과

**† Byung-Tak Kim(corresponding author) : Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University.

E-mail : btkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6161

*Jun-Young Jeon : Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Pukyong National University.

활히 순환될 수 있도록 높은 신뢰성과 함께 내압성, 내열성, 기밀성, 내화성 등이 요구되는 제품이다. 이와 같은 이유로 지금까지 항공기용 호스는 전량 수입에 의존하고 있으며, 한국형 헬기의 안정적 생산 및 원활한 유지와 운용을 위해서는 국산화 개발이 절실한 실정이다.

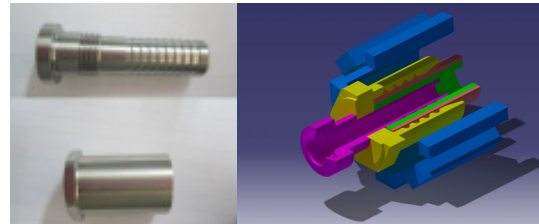
호스의 제조기술은 용도에 합당한 재료의 선정과 호스 부품의 결합기술에 크게 의존한다고 할 수 있다. 호스의 구성 부품들을 체결하는 방식은 조(jaw)를 안쪽으로 이동시켜 소켓을 죄어주는 크리핑(crimping)과 소켓을 공구 사이에서 압축 성형하는 스웨이징(swaging)이 있다. 본 연구에서 채택한 크리핑은 냉간 가공의 하나로, 이 공정을 통하여 호스의 가장 중요한 성능인 기밀성이 결정된다.¹⁾ 크리핑 공정에서 가장 중요시 되는 조작 인자는 조의 반경방향 이동거리인 크리핑 행정거리(stroke)가 되며 이 행정거리에 따라 호스 제작시의 양품 여부가 결정된다. 만약에 행정거리가 소켓, 니플, 그리고 호스에 충분한 잔류 접착력을 부여할 수 없는 경우에는 사용압력으로 가압될 시 호스와 니플 사이가 점차적으로 분리되는 벌지(burge)현상 등으로 호스의 가장 중요한 기능인 기밀성을 잃을 수 있으며, 부품들 간의 결합이 해제되어 큰 사고로 이어 질 수 있다. 반면에 행정거리가 너무 큰 경우, 호스에 손상이 발생하여 유체누설로 인해 사용이 불가능해질 뿐만 아니라 니플의 내경이 과도하게 축소되어 유체흐름을 방해하므로 압력강하 및 캐비테이션(cavitation)과 같은 문제를 야기할 수 있다.

지금까지 유압계통의 고압호스에 대한 다양한 연구²⁻⁴⁾가 진행되어 왔으나, 대부분 자동차 및 산업용 호스에 국한되어 있으며 헬기 등 항공기용으로의 연구 개발은 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 유한요소법을 사용한 접촉 해석을 통하여 항공기용 연료호스의 크기에 따른 최적 크리핑 행정거리를 접착력과 니플의 직경 감소율에 근거하여 제시하였다. 이를 위하여 실험 결과에 대한 자료를 해석 결과와 함께 검토하였으며, 제시된 행정거리는 향후 다른 크기의 호스의 제작 시 필요한 크리핑 행정거리의 결정

및 발생 접착력 추정에 대한 기초 자료를 제공해 줄 수 있을 것으로 사료된다.

2. 수치해석

해석에 사용된 호스는 SAE에서 규정한 항공기용 고압호스이며, 그 형상을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 (a)는 니플과 소켓을 나타낸 것으로, 일반적으로 니플은 소켓보다 강도가 큰 소재를 사용하며, 소켓의 외경은 크리핑이나 스웨이징과 같은 압축 성형 공정에서 조의 크기 결정을 위한 지표로 사용된다. (b)는 해석을 위한 호스의 조립도를 나타낸 것으로 안쪽에서부터 니플, PTFE 내관, 보강층, 소켓으로 구성되어 있으며, 조가 외부를 둘러싸고 있다.



(a) nipple & socket (b) solid model

Fig. 1 Geometric shape of the hose components

본 연구에서 사용된 호스의 종류는 4종으로 그 치수는 Table 1과 같으며, 표의 치수들은 가공전의 직경을 나타내고 있다. 호스의 호칭치수에 따른 소켓의 외경과 니플의 내경은 호칭치수와 정확히 비례하지 않으나, 그 크기의 구분을 위해 규격에서 통용되고 있는 호칭치수를 사용하였다.

Table 1 Types and Dimensions of hoses

Size	Outer diameter of socket(mm)	Inner diameter of nipple(mm)
04	12.548	3.354
06	20.88	6.208
08	27.956	8.632
12	39.918	12.934

Table 2는 해석에 사용된 각 부품별 재료의 물성치를 나타낸 것이며, PTFE의 경우에는 탄성중합체(elastomer)의 성질을 갖고 있으므로 Table 2의 값을 사용하지 않고 Ogden 3차 모델을 사용하여 실험값을 그대로 적용하여 해석을 진행하였다.

Table 2 Material properties of components

Material (component)	Young's modulus	Poison's ratio	Yield strength
SUS630 (nipple)	189GPa	0.27	877MPa
SUS316 (braid)	97GPa	0.18	70MPa
SUS304L (socket)	193GPa	0.27	240MPa
PTFE (inner tube)	580MPa	0.46	15MPa

소켓과 보강층 사이의 마찰계수는 편조층의 거칠기를 고려하여 0.3을 적용하였고, PTFE의 특성이 마찰계수가 매우 적어 무급유 슬라이딩재의 코팅에 적합하므로 니플과 PTFE 사이의 마찰계수는 0.04의 값을 적용하였다. 전체적인 해석은 대변형(Large strain) 문제로 설정하였으며, 침투(penetration)와 같은 오류 발생을 방지하기 위하여 해석진행시 필요에 따라 10^{-7} 초까지 시간증분을 줄일 수 있도록 설정하였다. 또한 반복과 수렴에 관한 계산 기법으로는 갱신 라그랑지안(updated Lagrangian)을 사용하였다. 해석에 사용된 프로그램은 범용소프트웨어 MSC/MARC이며, 전체 요소 수는 3만 여개이고, 반복해석을 위하여 요소 수에 따라 결과 값이 크게 차이 나지 않도록 격자의 조밀도를 변경시켜 가면서 최적의 요소 수를 결정하였다.

Fig. 2는 본 해석에 사용된 호스 조립품의 체결 전 유한요소모델을 나타낸 것이다. 제품의 형상 및 하중이 수평축(X축)에 대하여 대칭이므로 축대칭 요소(axisymmetric element)를 사용하였으며, 접촉문제에서 발생할 수 있는 계산 오류를 방지하기 위하여 각 부품간의 요소 크기를 달리하여 모델링하였다. 경계조건은 강체운동을 방지하기 위하여 체결부의 거동에 영향을 미치지 않는 니플의 끝부분을 그림과 같이 고정하였고, 호스는

체결시의 조건에 부합하도록 반경 방향 변위만이 구속하였다.

전체적인 해석의 진행은 먼저 04 크기 모델의 실험과 해석결과를 토대로 최적의 행정거리를 선정 한 후, 그 선정기준을 06, 08, 12 크기 모델에 적용하여 각 호스 크기별 최적 크리핑 직경을 결정하였다. 각 호스별 해석에 적용된 행정거리는 8 종류로서 최소값에서부터 동일한 간격으로 그 값을 증가시켜 가면서 해석을 진행하였다.

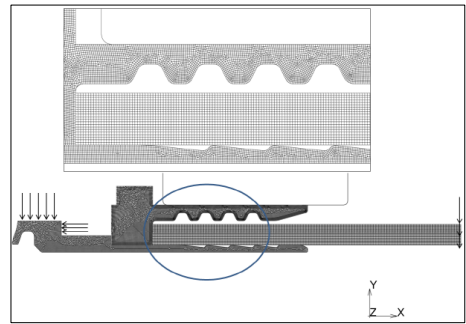


Fig. 2 Finite element model of hose assembly

3. 해석결과 및 고찰

Fig. 3은 04 크기 모델의 행정거리 2.2mm에 대한 해석결과로서, 해석전의 유한요소 모델로부터 크리핑 공정이 완료된 후의 변형 형상 및 잔류 코시 응력을 나타낸 것이다.

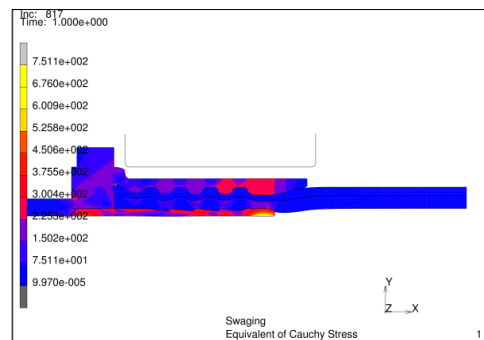


Fig. 3 Residual Cauchy stress for size 04 with the stroke 2.2mm

제작이 완료된 후 최대 응력은 니플에서 나타나며 그 값은 751.1MPa이고, 소켓과 니플 사이의 호스는 돌출부로부터 압력을 크게 받는 부분에서 상대적으로 높은 응력이 잔류함을 알 수 있다.

Fig. 4는 04 크기 호스 조립품의 행정거리 2.2mm에 대한 제작 후의 잔류 변형률을 도시한 것이다. 조로 이동으로 인해 소켓의 조 모서리 접촉부분에서 가장 높은 변형률이 나타나며, 그 값은 1.477이었다. 소켓의 나머지 부분은 안쪽으로 병진하는 형태이므로 변형률이 상대적으로 작게 나타나며, 니플에서는 최대값이 0.147로서 소켓에 비해 상대적으로 낮은 값을 나타냄을 볼 수 있다. 호스의 변형률은 예상대로 소켓과 니플의 돌기 접촉부에서 비교적 큰 값이 나타나며, 이 부분이 조 모서리와 접촉하는 소켓부분을 제외하면 전체적으로 가장 큰 변형이 발생하는 부분임을 확인할 수 있다.

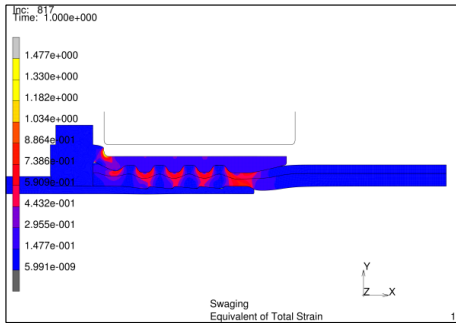


Fig. 4 Residual total strain for size 04 with the stroke 2.2mm

Fig. 5는 04 크기의 모델에 대하여 행정거리에 따른 접촉력의 변화를 도시한 것이다. 이 그림에서 접촉력은 행정거리 2 mm에서 2.15 mm까지는 선형적으로 증가하나 2.25 mm 이후에는 거의 일정해 짐을 볼 수 있다. 이것은 행정거리가 일정 값 이상으로 증가하면 니플에 소성변형이 발생하여 직경이 감소되어 나타나는 현상이므로, 최적 행정거리의 결정을 위해서는 접촉력 변화뿐만 아니라 니플의 변형 정도를 동시에 고려해야 할 필요가 있다.

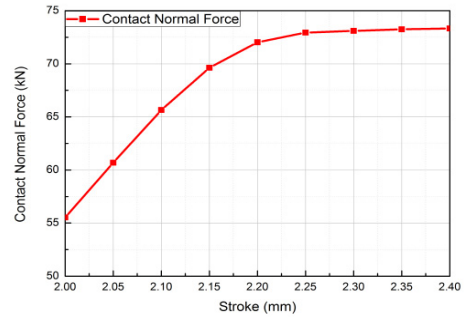


Fig. 5 Variation of contact normal force according to the crimping stroke(size 04)

일반적으로 호스의 기밀유지를 위해서는 체결력을 크게 하는 것이 바람직하므로 조의 행정거리를 가능한 크게 할 필요가 있다. 그러나 크리핑 직경이 과도하게 작아질 경우에는 작동유체의 흐름을 방해할 뿐 아니라 호스에 손상이 발생하여 본래의 기능을 다할 수 없게 된다. 이러한 현상은 실제 실험에서도 관찰되었는데 행정거리가 너무 큰 경우에 대한 실제 제품의 절단면을 Fig. 6에 나타내었다. 이 제품의 경우 과도한 크리핑으로 니플의 직경이 상당히 감소했을 뿐만 아니라 호스 또한 파손되어 작동압력에 의한 액체의 누출이 관찰되었다. 그러나 수치 해석적 방법으로 호스의 파단 여부를 판별하기는 매우 어렵기 때문에 실험에서 나타난 니플 직경 감소량에 대한 자료를 근거로 최적의 행정거리를 도출하는 것이 바람직하다 할 수 있다.

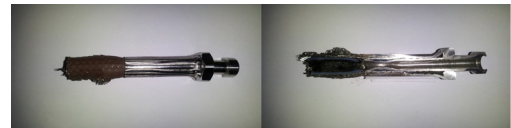


Fig. 6 Damaged hose by excessive jaw stroke

Fig. 7은 행정거리에 따른 니플의 처짐(반지름 감소량)을 도시한 것으로, 행정거리의 증가에 따라 그 값이 급격히 증가함을 알 수 있다. 그러나 접촉력은 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 행정거리 2.25 mm 이후에는 거의 일정하므로 체결력 측면에서 그 이상의 행

정거리로 제작할 필요는 없을 것으로 판단된다.

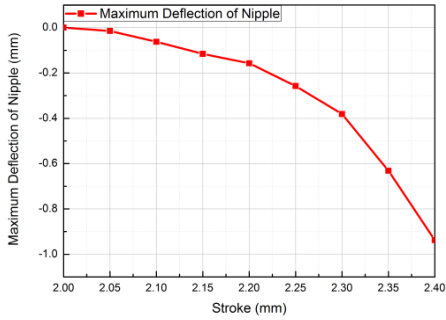


Fig. 7 Maximum deflection of nipple for size 04

실제로 어느 정도까지 니플의 처짐을 허용할 수 있는지를 해석만으로 판단하기는 어렵기 때문에 크기별로 여러 개의 시제품을 제작하여 크리핑 행정거리에 관한 성능 시험을 수행하였다. 시제품은 현재 사용되는 제품의 치수를 참고하여 제작되었고, 여기에 작동압력을 가하여 불량 여부를 판별하였다. Fig. 8은 실험을 통하여 호스 크기별 허용 행정거리를 구하고, 그 단면을 절단하여 니플의 처짐을 측정한 후 그 결과를 니플의 초기직경에 대한 감소율로 나타낸 것이다. 각 호스별 행정거리의 허용범위는 약간의 차이가 있으나, 그 평균 값은 6~6.7%로 그 차이가 비교적 작게 나타났다. 따라서 크기와 무관하게 양호한 제품을 만들기 위한 최적의 직경감소율은 이들 4개 제품의 평균값 6.42%를 취하는 것이 바람직하며, 이 시점에서 체결력 확보를 위한 접촉력을 변화 추이를 동시에 검토해 보는 것이 필요하다고 할 수 있다.

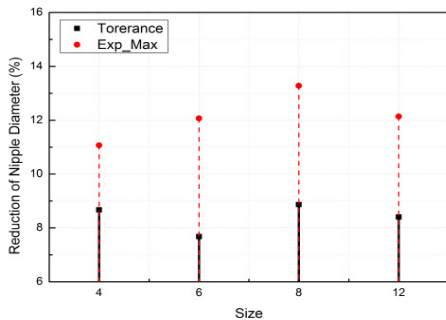
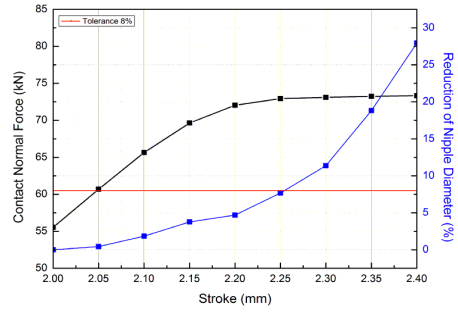
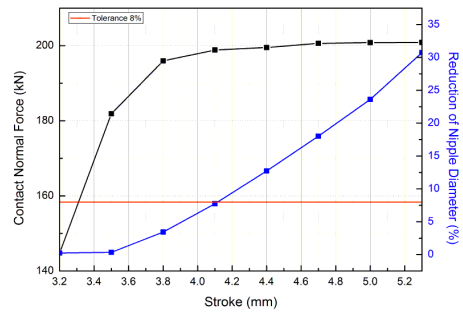


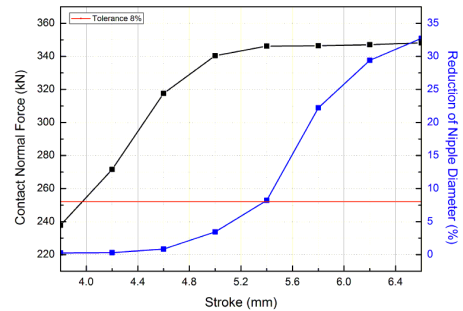
Fig. 8 Allowable range of jaw stroke



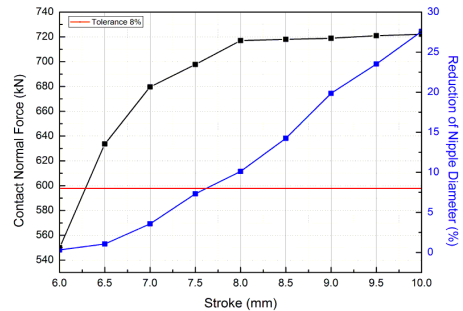
(a) size 04



(b) size 06



(c) size 08



(d) size 12

Fig. 9 Contact normal force and reduction of nipple diameter according to crimping stroke

Fig. 9는 설계상 니플의 허용 직경감소를 6.42%에 해당되는 조의 행정거리와 그 때의 접촉력을 살펴보기 위하여 호스의 크기별 행정거리에 따른 해석결과를 도시한 그래프이다. 먼저 04 크기의 모델인 경우 최적 니플 직경감소율에 해당되는 크리핑 행정은 2.23 mm로 나타났으며, 이 때의 접촉력은 더 이상 증가하지 않는 한계값에 근접하고 있으므로 최적 크리핑 행정을 2.23 mm로 설정하는 타당하다고 볼 수 있다.

동일한 관점에서 다른 크기의 호스 06, 08, 12 모델에 대한 최적 크리핑 행정을 검토한 결과 각각 4.01 mm, 5.25 mm, 7.56 mm로 나타났으며, 이때의 접촉력, 니플의 처짐 및 직경감소율을 요약하여 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Parameters obtained by FE analysis

size	04	06	08	12
Optimal stroke (mm)	2.25	4.1	5.4	7.5
contact normal force(kN)	72.9	198.9	344.8	697.7
Deflection of nipple(mm)	0.26	0.48	0.61	0.95
Reduction of nipple diameter (%)	7.67	7.73	7.02	7.33

Table 3의 결과를 이용하여 Fig. 10과 Fig. 11에 호스의 크리핑 이전 소켓외경에 대한 최적 행정거리와 그때 발생하는 접촉력을 곡선 맞춤 (curve-fitting)한 실선과 함께 그래프로 도시하였다. 소켓의 외경이 증가함에 따라 최적 행정거리는 거의 직선적으로 증가하고 있으나, 그때의 접촉력은 지수함수 형태로 급격히 증가함을 알 수 있다. 이들 그림으로부터 얻은 소켓외경(X)에 따른 최적 행정거리(S)와 접촉수직력(F)을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S = -0.25248 + 0.19259 * X \quad (1)$$

$$F = -243.5 + 191 * \exp(0.04 * X) \quad (2)$$

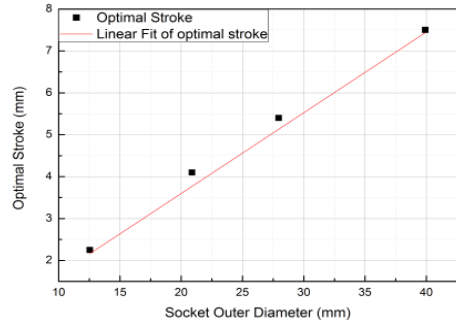


Fig. 10 Optical stroke according to the socket outer diameter

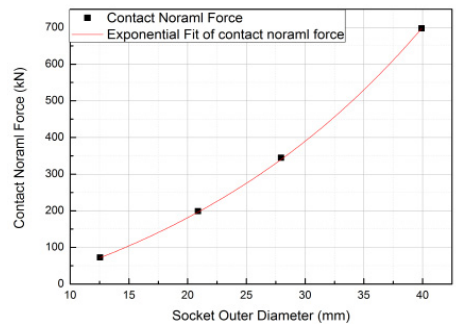


Fig. 11 Contact normal force according to the socket outer diameter

식(1)을 이용하면, 본 연구에 사용된 호스 이외의 제품에 대해서도 필요한 행정거리를 결정할 수 있으며, 그때의 접촉력도 식(2)에 의해 추정이 가능하다. 따라서 추후 호스의 크기를 변경하여 제품을 제작할 때, 먼저 최적 행정거리에 대한 유한요소해석을 수행하여 얻은 접촉력을 식(2)와 비교하여 충분한 체결력을 얻을 수 있는지를 확인해 볼 필요가 있다. 체결력에 대한 검토가 완료되면 최적 행정거리를 적용하여 시제품을 만들고 실험을 통하여 요구조건에 대한 제품의 부합 여부를 판별하는 과정이 필요하다. 이와 같은 방법을 통하여 새로운 제품에 대한 크리핑 직경을 결정한다면 신제품 개발을 위한 시제품의 수를 줄일 수 있어 개발시간의 단축뿐만 아니라 개발비용의 절감에서도 상당히 유리한 측면이 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 항공기용 연료호스 제작시의 최적 크립핑 직경을 결정하기 위하여 4종류의 호스에 대한 제작과정을 조의 행정거리별로 해석하였다. 이 해석에서 각 치수별 최적 행정거리를 추정할 수 있었으며 실험에서 얻은 자료와 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실험에 근거한 호스 치수별 니플 직경의 허용 감소율의 평균은 6.42%로 나타났으며, 이를 유한요소해석에서 얻은 접촉력 결과와 비교했을 때 04, 06, 08, 12 모델에 대한 최적 행정거리는 각각 2.23mm, 4.01 mm, 5.25 mm, 7.56 mm로 나타났다.

2. 해석 대상과 다른 치수의 호스 제작 시 적합한 행정거리 추정을 위한 정보를 제공하기 위하여, 해석 모델의 치수별 최적 행정거리와 체결력을 소켓의 초기 직경에 대한 수식으로 표현하였다.

3. 최적 행정거리에 대한 식을 새로운 제품에 적용하면 신제품 개발을 위한 시제품의 수를 줄일 수 있어 개발시간의 단축뿐만 아니라 개발비용의 절감에서도 상당히 유리한 측면이 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음

References

1. G. C. Lee, H. E. Kim, J. W. Park, H. L. Jin, Y. S. Lee and J. H. Kim, 2011, "An Experimental Study and Finite Element Analysis for Finding Leakage Path in High Pressure Hose Assembly", IJPEM, Vol. 12, No. 3, pp. 537-542.
2. J. K. Beak and B. T. Kim, 2010, "Finite Element Analysis for the Swaging Process of an Automotive Air-conditioning Hose Assembly", KSPSE Vol. 14, No. 6, pp. 54-60.
3. S. R. Han, J. H. Choi and J. S. Kwak, 2012, "New Metal Fitting Geometry And Optimization of The Swaging Parameters for An Automobile Power Steering Hose", IJAT, Vol. 13, No. 4, pp. 637-644.
4. H. J. Kim B. T. Kim, 2001, "Finite Element Analysis for the Mechanical Deformation Characteristics of a Fiber-reinforced Hose with respect to the Jaw Strokes" KSPSE pp. 173-1783.
5. MIL-S-8879C, SAE AS85421, SAE AS4209B