

## Energy Minimization을 이용한 유압 호스의 최적 경로 설계

임호빈 · 권 강 · 김재정<sup>†</sup>

한양대학교 기계공학과

## Optimization Routing Path Design of Hydraulic Hose Using Energy Minimization

Hobin Yim, Kang Kwon, and Jayjung Kim<sup>†</sup>

Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

Received 20 February 2012; received in revised form 29 May 2012; accepted 31 May 2012

### ABSTRACT

The piping route of hydraulic hose is designed with avoiding interferences to surrounding components. However, in a real practice, the piping route is mostly decided with an expert's experiences on site due to the complexity of design. Thus, this paper proposes a design methodology of the optimized route of a hose. We use NURBS representation to describe the piping route, which is possible to be locally modified, and an energy minimization method is applied to avoid interferences to the surroundings. In other words, the NURBS curve describing a piping route is modified to meet the desired positions from minimizing the perturbation of the control points, and the strain energy of the curve is then optimized to make the curve natural. The proposed method is implemented and its feasibility is validated using the commercial CAD software, CATIA V5.

**Key words:** Energy minimization, Hydraulic hose, Interference, NURBS curve, Optimization, Routing path design

### 1. 서 론

유체를 유압시스템에 전달하는 부품에는 금속 파이프(Steel Pipe), 금속 튜브(Steel Tube) 그리고 호스(Flexible Hose)가 있다. 호스는 금속 파이프나 금속 튜브에 비해 배관 경로 설정이 용이하다. 배관 경로가 복잡한 경우 금속 파이프나 금속 튜브를 사용하여 배관하면 여러 개의 부품을 연결하여 배관하여야 한다. 그럴 경우 연결 부위에서 유

체가 누출될 가능성이 높고 사용 되는 부품의 수가 많아지게 되어 비용도 상승한다. 하지만 호스로 배관하면 호스의 유연한(Flexible) 특성으로 하나의 호스로도 배관이 가능하므로 유체의 누출을 최소화할 수 있고 비용도 절감할 수 있다<sup>[1]</sup>. 그 중 유압호스는 건설기계, 자동차, 항공기, 산업기계, 공작기계 및 기타 선박용 기계 등 각종 기계의 유압장치에서 동력을 전달하는 목적으로 주로 사용된다. 즉 유압호스는 기계류 장치의 유기적인 연결과 동력전달에 있어 매우 중요한 부품이며, 이에 따라 유압 호스 설계의 신뢰성이 요구된다<sup>[2]</sup>.

유압 호스의 경로 설계는 설계자가 설계단계에

<sup>†</sup>Corresponding Author, jaykim@hanyang.ac.kr  
©2012 Society of CAD/CAM Engineers

서 고려하는데 어려움이 있다. 그 이유로는 크게 두 가지를 들 수 있는데, 첫 번째로는 3차원 CAD 소프트웨어에서 호스 경로를 표현하기 어려운 점을 들 수 있다. 호스는 자유 곡선(Freeform curve)이기 때문에 3차원 상에서 정의된다. 하지만 현업에서는 설계자가 2차원 도면상에 호스의 규격과 길이 정보만을 표시하고 현장의 경험자가 경로를 결정하여 조립한다. 현재 사용되는 3차원 CAD 시스템에서 호스배관 설계 툴을 지원하지 않지만 실제 현업에서 활용하기에는 사용자 인터페이스 등에서 많은 불편함이 있다. 두 번째로 호스는 유연한 특성으로 자유도가 높기 때문에 다른 부품이 조립된 이후 마지막으로 조립된다. 때문에 설계 단계에서 최적의 경로를 생성하여도 다른 부품과의 간섭 혹은 다른 부품의 재설계 등으로 경로를 수정해야 하는 문제가 발생한다.

이러한 문제점들을 해결하고자 본 논문에서는 설계자가 편리하게 호스경로를 지정할 수 있도록 에너지 최소법을 이용하여 변형에너지가 최소가 되는 최적 경로를 생성하고, 호스 경로의 수정이 필요한 경우 호스의 경로를 수정할 수 있는 최적화 방법을 제안하였다. 그리고 설계자가 3차원 CAD 시스템에서 사용할 수 있도록 호스 배관 설계 지원 툴을 개발하였고 상용 CAD 소프트웨어인 CATIA V5에 적용하여 구현해 보았다.

## 2. 유압 호스의 구조

유압 호스는 유압을 전달하는 호스부와 호스와 결합된 이음쇠 즉, 피팅으로 구성되어 있다. 호스는 Fig. 1과 같이 내면고무, 외면고무, 보강층으로 구성되어 있다. 고압호스의 경우 인장력에 대한 저항강도를 증대시키기 위하여 고무 내부에 강선이나 합성섬유 등의 보강층을 포함하고 있다<sup>[3]</sup>. 피팅은 Fig. 2<sup>[4]</sup>와 같이 Nut, Nipple, Shell 등으로 구성되어 있고, 피팅의 종류에는 Straight Type과 Elbow Type이 있다. Elbow Type은 Straight Type에 비해 배관이 간결하여 배관의 유지 보수비용이 절감되는 장점이 있지만 피팅 배열각을 계산해야 하는 단점이 있다.

유압 호스에 고압의 유체가 유동하고 있을 때 체결력이 약한 호스와 피팅의 결합부분에서 누유가 발생할 수 있다. 호스를 제작할 때에는 스웨이징 작업을 통하여 피팅과 완전히 결합시킨 Fig. 3

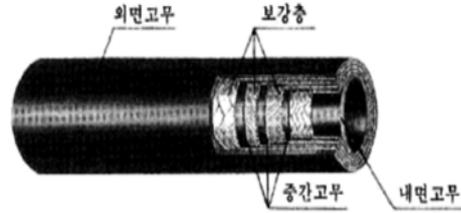


Fig. 1 Structure of Hydraulic hose

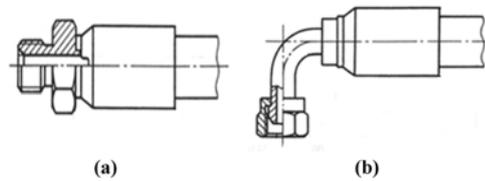


Fig. 2 Type of fitting : (a) Straight Type, (b) Elbow Type

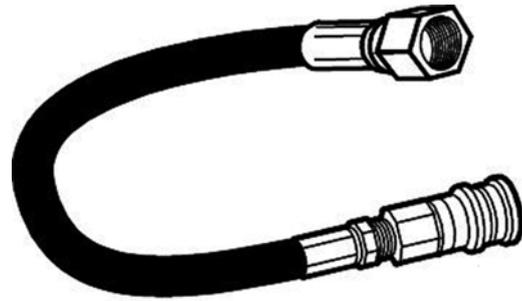


Fig. 3 Structure of hose assembly

과 같은 호스 어셈블리 상태로 유압 호스를 제작하여 누유가 발생하지 않도록 한다<sup>[5]</sup>. 때문에 호스 어셈블리에서 호스와 피팅은 회전자유도가 존재하지 않으므로 호스 경로 설계 시에 피팅 배열각을 고려하지 않는다면 호스에 비틀림 모멘트가 작용하여 피팅이 이탈하거나 호스가 파손될 위험이 있다<sup>[1]</sup>.

## 3. 유압 호스 경로 설계의 문제점

유압 호스의 경로를 설계할 때에 문제가 되는 점은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로는 3차원 CAD 시스템에서 유압 호스의 경로를 설계하기 어려운 점이다. Fig. 4에서 보면 (a)와 (b)는 같은 유압 호스의 형상이지만 정의되는 평면에 따라 경로 형상이 다르게 표현된다. 현업에서 유압 호스의 경로를 설계할 때에는 설계자가 전체 조립



Fig. 4 Form of hose route may differ depending on the plane chosen in CAD tool

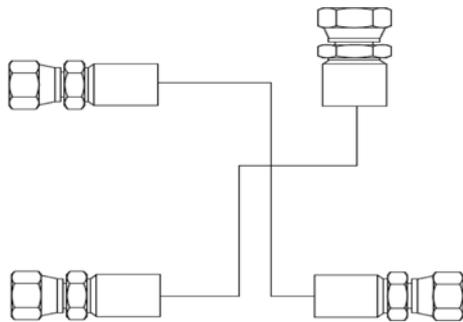


Fig. 5 Conventional hose drawing

도면에 호스의 규격과 길이 정보만을 표시해주거나 Fig. 5와 같이 호스 도면을 2D 도면으로 작성하여 피팅의 규격 및 호스의 경로, 길이 정보를 간략히 표시해주면 현장의 경험자가 경로를 결정한다. 물론 현재 상용 3차원 CAD시스템에서 호스 배관 툴을 지원하고 있지만 설계자가 사용하기에는 많은 불편함이 있고, 호스 경로를 유동적으로 설계할 수 없는 단점이 있다.

두 번째 문제점은 유압 호스의 경로는 다른 부품이 조립된 이후 마지막으로 고려되기 때문에 다른 부품과의 간섭 등의 문제가 발생한다. Fig. 6은 유압 크레인의 기둥(Column) 부분을 설계하여 조립한 것이다. 기둥의 Hole 을 통과하게 호스 경로를 설계해야 하는데, 간섭 등의 문제로 경로를 결정하기 어렵다. 실제로 상용 CAD 소프트웨어 CATIA V5에서 제공하는 호스 배관 설계 툴로 호스를 설계할 경우 원하는 경로로 설계하는 것이 어렵고, 다른 부품과의 간섭을 고려하는 것 또한 어렵다. 간섭을 피해서 설계를 하였다 하더라도 설계 변경으로 호스의 경로를 수정해야 하는 경우 적용하기 어렵다. 호스의 경로를 수정하기 어렵다 하여 경로에 맞게 주변부품을 재설계하는 것은 시간적, 금전적으로 손실이 크다.

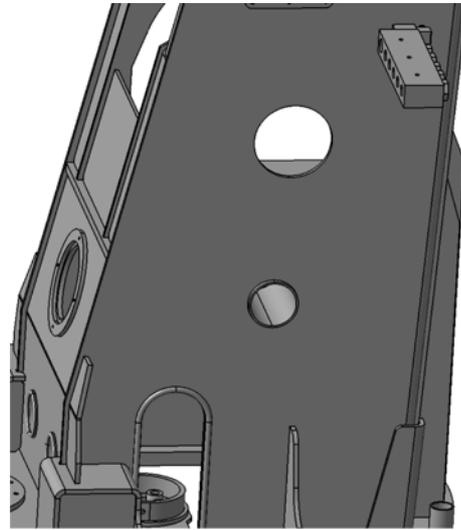


Fig. 6 Interference of hose route

#### 4. 간섭을 고려한 유압 호스의 경로 생성

호스의 경로 설계를 설계자가 설계 단계에서 고려할 수 있다면, 호스의 최적 경로를 생성할 수 있고 간섭 문제 또한 해결할 수 있다. 호스 경로 곡선을 생성할 때 호스는 규정된 최소 굽힘 반지름을 최소값으로 하여 굽힘 정도를 결정한다<sup>[3]</sup>. 따라서 최소 에너지법을 이용하여 호스 경로의 변형에너지를 최소화한 최적경로를 생성하고, 간섭문제 등이 발생하지 않도록 경로가 통과하는 대상점(Target point)을 지정하여 경로를 생성할 수 있는 방법을 제안하였다.

##### 4.1 호스 경로 생성을 위한 곡선의 방정식

호스의 경로를 생성하기 위해서는 경로를 결정할 수 있는 곡선이 필요하다. 본 논문에서는 호스의 경로 곡선으로 NURBS 곡선<sup>[4]</sup>을 선택하였다. NURBS 곡선을 선택한 이유는 첫째, NURBS 곡선의 경우 차수에 상관없이 조정점(Control point)만으로 곡선을 결정할 수 있어 사용자가 사용하는 데 용이하다. 둘째로 곡부수정이 가능하기 때문에 간섭 문제가 발생하거나 호스의 경로가 복잡할 경우에 적용하기 용이하다. 마지막으로 대부분 상용 CAD 소프트웨어에서 사용하는 곡선이 NURBS 곡선이기 때문에 다양한 CAD 소프트웨어에 적용할 수 있다.

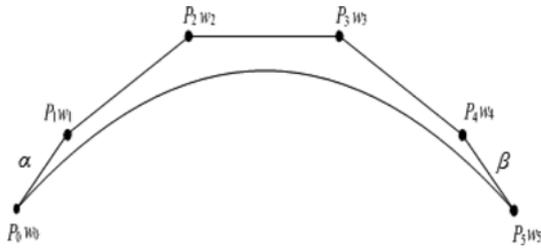


Fig. 7 NURBS curve

일반적으로  $n$ 개의 조정점을 가진 NURBS 곡선  $S(u)$ 는 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$S(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i} \quad (1)$$

여기서  $w_i$ 는 각 조정점  $P_i$ 의 가중치(Weight)이고  $N_{i,p}(u)$ 는 블렌딩 함수로서 B-Spline 기저함수이다. 그리고 블렌딩 함수는 하나로 묶어 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u)w_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i} \quad (2)$$

Fig. 7은 조정점이 6개인 NURBS 곡선을 나타내고 있다. 각각의 조정점  $P_i$ 에 가중치  $w_i$ 가 작용하는데, Fig. 7에서는 가중치가 모두 1로 작용하고 있다. 유압 호스는 호스와 피팅이 완전히 결합되어 고정되기 때문에 곡선의 시작점과 끝점의 조정점  $P_0, P_5$ 는 자유도가 0이 되어 구속된다. 그리고 조정점  $P_1$ 과  $P_{i-1}$ 의 경우 시작점과 끝점  $P_0, P_i$ 의 방향벡터 스칼라값  $\alpha, \beta$ 로 정의할 수 있다.

#### 4.2 유압 호스의 경로 변형에너지 최소화

최적의 호스 경로를 설계하기 위해서 변형에너지가 최소인 NURBS 곡선을 생성해야 한다. NURBS 곡선을 생성하기 위한 설계변수는 식 (3)과 같다.

$$X = \{P_i, w_i, \alpha, \beta\}, 0 \leq i \leq n \quad (3)$$

변형에너지가 최소가 되는 곡선  $S(u)$ 는 곡률 (Curvature)  $\kappa$ 의 제곱을 곡선의 길이에 대해 적분한 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$E(S(u)) = \int \kappa^2(s) ds \quad (4)$$

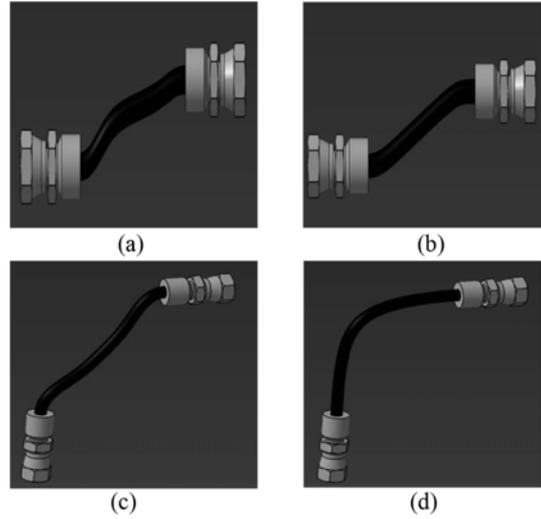


Fig. 8 Hose routing path : (a) Initial hose routing path, (b) Hose routing path using energy minimization, (c) Initial hose routing path, (d) Hose routing path using energy

따라서 변형에너지를 최소화 하는 목적함수는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다. 그리고 구속조건으로 가중치를 고려해야 하는데, 변형에너지가 최소화 된 곡선은 자연적인(Natural) 곡선이므로 가중치는 식 (6)과 같이 일정 범위에서만 정의한다<sup>[6]</sup>. 그리고 호스 경로의 길이  $L_c$ 를 식 (7)과 같이 구속조건에 추가하였다.

$$\text{Minimize } f(X) = \int_0^L \kappa^2 ds \quad (5)$$

$$\varepsilon \leq w_i \leq \frac{1}{\varepsilon}, 0 < \varepsilon \leq 1 \quad (6)$$

$$h(X) = \int_0^L ds - L_c = 0 \quad (7)$$

Fig. 8은 변형에너지를 최소화한 유압 호스의 경로이다. (a), (c)의 경우 최초 생성된 유압 호스 경로이고, (b), (d)의 경우는 변형에너지를 최소화하는 최적화 방법을 적용한 호스 경로 곡선이다.

#### 4.3 유압 호스의 경로 수정

앞 절에서 제안한 방법으로 변형에너지가 최소가 되는 호스의 경로를 생성할 수 있었다. 그리고 경로가 지나가는 포인트를 직접 지정할 수 있기 때문에 경로가 복잡하거나 다른 부품과의 간섭문제가 발생하는 경우도 해결할 수 있다. 하지만 설

계가 완료된 후나 시작품 제작 단계에서 설계 변경으로 인해 호스의 경로를 수정해야 하는 경우가 발생한다. 호스의 경로를 수정하는 방법은 최초 경로를 생성했을 때의 포인트를 이동하여 새로운 경로를 생성한다. NURBS 곡선은 조정점의 위치변화에 따라 곡선이 변하므로 조정점의 이동량을 결정해야 한다. 조정점의 이동량을 결정하는 방법으로는 Piegl이 제안한 방법<sup>[7]</sup>이 널리 사용된다. 하지만 이 방법은 하나의 조정점을 이동하여 수정하는 것으로 동시에 여러 점을 수정하는 데에는 다소 비효율적이다<sup>[8]</sup>. 따라서 본 연구에서는 여러 점을 동시에 만족하도록 최소자승법을 이용하여 Piegl 방법을 수정하였다. 또한 경로가 수정되면 변형에너지도 변화하기 때문에 수정된 경로에 따른 에너지 최소화법에 따른 최적화방법을 제안하였다.

조정점의 변동(perturbation)을 식 (8)과 같이  $\epsilon_i$ 로 정의하고 수정된 조정점의 위치는 식 (9)과 같이  $P'_i$ 로 정의하여 식 (1)에 대입하면 식 (10)과 같은 수정된 NURBS곡선  $S'(u)$ 를 얻을 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$\epsilon_i = \begin{bmatrix} \epsilon_i^x \\ \epsilon_i^y \\ \epsilon_i^z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P'_i = (P_i + \epsilon_i) \quad (9)$$

$$S'(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i(P_i + \epsilon_i)}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i} \quad (10)$$

수정된 NURBS 곡선의 형상은 Fig. 9를 보면 확인할 수 있다. 설계된 경로 곡선  $S(u)$ 의 시작점(Start point)  $S$ 를 사용자가 대상점(Target point)  $T$ 로 움직였을 때  $T$ 를 통과하는 수정된 곡선  $S'(u)$ 가 생성된다. 하지만 수정된 곡선  $S'(u)$ 와 대상점  $T$ 와의 거리는 0이 되지 않기 때문에 조정점의 위치 변화를 최소화하여 대상점  $T$ 와  $S'(u)$ 의 거리를 최소화한다.

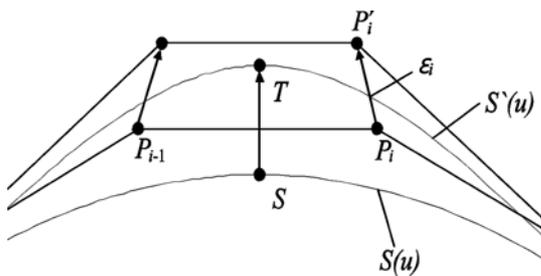


Fig. 9 Modified NURBS curve

조정점의 위치 변화를 최소화하기 위해 최소자승법을 이용하고 구속조건은 ALM(Augmented Lagrange multiplier Method)<sup>[10]</sup> 최적화 방법을 이용해 목적함수에 포함시킨다. 먼저 식 (10)을 변형하면 식 (11)과 같이 표현할 수 있고 시작점  $S$ 와 대상점  $T$ 에 대한 식으로 표현하면 식 (12)와 같다.

$$S'(u) = S(u) + \sum_{i=i_1}^{i_2} \epsilon_i R_{i,p}(u), \quad i_1 \leq i \leq i_2 \quad (11)$$

$$T_\ell = S'(u_\ell) = S_\ell + \sum_{i=i_1}^{i_2} \epsilon_i R_{i,p}(u_\ell), \quad \ell = 1, 2, \dots, r \quad (12)$$

목적함수는 조정점의 위치 변화를 최소화하는 것이므로 조정점의 변동  $\epsilon_i$ 을 최소화하는 것으로 표현할 수 있다. 따라서 목적함수는 식 (13)과 같다.

$$\text{Minimize } f(X) = \sum_{i=i_1}^{i_2} \|\epsilon_i\|^2 \quad (13)$$

구속조건으로는 곡선  $S'(u)$ 와 대상점  $T$ 의 거리이므로 식 (14)와 같다.

$$h(X) = T_\ell - S_\ell - \sum_{i=i_1}^{i_2} \epsilon_i R_{i,p}(u_\ell) = 0, \quad \ell = 1, 2, \dots, r \quad (14)$$

목적함수와 구속조건을 AML 최적화 방법을 이용하여 Lagrange 함수를 정의하면 식 (15)와 같다.

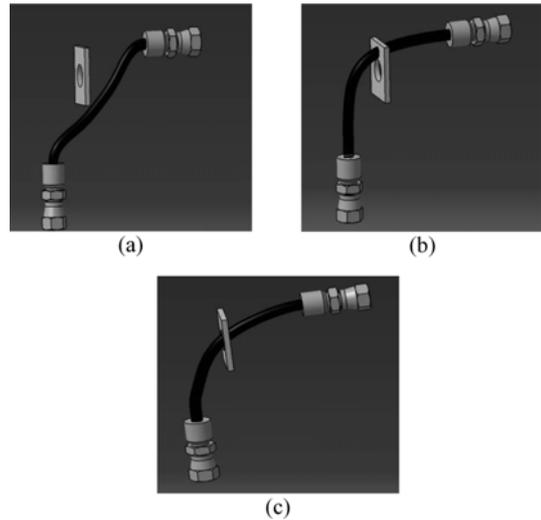


Fig. 10 Hose routing path : (a) Initial hose routing path, (b) Hose routing path using energy minimization (c) Modified hose routing path using target point

$$L = \sum_{i=1}^{i_2} \|e_i\|^2 + \sum_{i=0}^r \lambda_i \left[ T_\ell - S_\ell - \sum_{i=i_1}^{i_2} \epsilon_i R_{i,p}(u_\ell) \right] \quad (15)$$

Fig. 10은 수정된 유압 호스의 경로이다. (a)의 경우 최초 생성된 유압 호스 경로이고, (b)의 경우는 변형에너지를 최소화하는 최적화 방법을 적용한 호스 경로 곡선이다. 그리고 마지막으로 (c)는 원하는 대상점을 지나는 수정된 호스 경로이다.

## 5. 구현

### 5.1 CAD소프트웨어에서 구현

본 논문에서 제안하는 호스의 경로 생성 방법을 이용하여 Fig. 11과 같은 호스 배관 설계 지원 툴을 개발하였다. 적용된 상용 CAD 소프트웨어는 Dassault System에서 개발한 CATIA V5이고, CATIA Automation을 이용하여 Visual C#을 기반



Fig. 11 Hose design tool

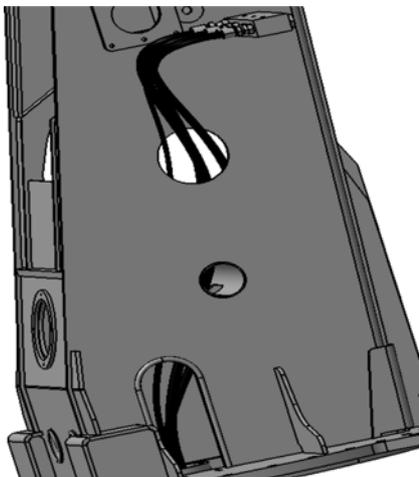


Fig. 12 Hose routing path design

으로 개발하였다. NURBS 곡선 구현을 위하여 오픈 라이브러리인 OpenNURBS 라이브러리를 사용하였고 최적화 모듈은 오픈 라이브러리인 ALGLIB를 이용하여 본 논문에 맞게 알고리즘을 구성하였다. Fig. 12는 본 논문에서 개발한 방법으로 설계한 호스 경로이다.

## 6. 결론

본 논문에서는 유압 호스 경로 생성을 위해 최소 에너지법을 이용한 최적화 방법을 적용하였다. 그리고 호스 경로를 원하는 대상점을 지나게 하는 경우 조정점의 변동을 최소화하기 위해 ALM 최적화 방법을 이용한 경로 수정 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 개발된 호스 배관 설계 지원 툴에 적용하여 구현해 보았다.

최적 경로 설계 방법이 적용될 경우, 설계자는 설계 단계에서 호스의 설계를 진행할 수 있다. 그리고 경로를 수정할 수 있기 때문에 해석 프로그램으로 해석을 한 후 응력이 집중되는 부분을 피하는 경로를 생성할 수 있다. 무엇보다도 최종적으로 제품 설계가 완성되었을 때 호스와 다른 부품과의 간섭이 발생했을 경우 부품을 재설계하지 않고 호스의 경로만을 수정하여 시간적, 금전적 손실을 줄일 수 있고 시작품 제작 단계에서 다른 부품에 설계 변경이 발생할 경우 설계 변경에 맞추어 유동적으로 경로를 수정할 수 있다.

본 논문에서 유압 호스의 경로를 생성할 때 호스의 기하학적 형상만을 고려하고 유압이나 호스의 물성치 등은 고려하지 않았다. 유압 호스는 유압에 따라 고압호스, 저압호스로 구분할 수 있고, 재질, 직경에 따라 규격화 되어 있다. 따라서 해당 규격에 따른 물성치 등을 고려한 유압 호스 경로 설계가 필요하다. 또한 호스에 압력을 가하면 호스의 길이 및 부피의 변화가 발생하기 때문에 호스의 길이변화율을 고려해 유압 호스의 경로를 설계해야 한다. 향후 연구 과제는 생성된 호스의 경로에 유압의 영향 및 호스 물성치를 고려하여 경로를 설계, 해석하는 방법을 개발하는 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국파워트레인(주)의 사업으로 지원받아 연구되었음(과제번호 : 2011-0000001196).

### 참고문헌

1. Kim, Y.S. and Kim, J.J., 2005, Design for Hydraulic Hose Routing Paths and Fitting Angles, *Society of CAD/CAM Engineers*, 10(1), pp. 44-48.
2. Evans, C.W., 1980, Testing Requirements for Hydraulic Hose, *Polymer Testing*, 1(1), pp. 39-49.
3. Kim, B.T. and Kim, H.J., 2003, A Study on the Deformation Characteristics of a High-Pressure Hose with Respect to the Swaging Strokes, *The Korean Society of Ocean Engineers*, 17(4), pp. 37-42.
4. Rubber Hose Assemblies for Hydraulic Use, *KS B 6371*, 2009.
5. Kim, J.J., 1998, Learning CAD/CAM with CATIA, *Bando Publisher*, pp. 263-324.
6. Kim, T.W., Cho, D.Y., Lee, K.Y. and Ma, Weiyin, Automatic Weight Computation for Smoothing NURBS Curve Interpolation, *Curve and Surface Modeling, IJCC 2006 on Digital Engineering*, pp. 32-38.
7. Piegl, L., 1989, Modifying the Shape of Rational b-Spline. Part 1: Curves, *Computer-Aided Design*, pp. 509-518.
8. Hu, S.M., Li, Y.F. and Zhu, X., 2001, Modifying the Shape of NURBS Surface with Geometric Constraints, *Computer-Aided Design*, 33, pp. 903-912.
9. Liu, X.Y., 2009, Geometric Features Modification of NURBS Curves via Energy Optimization, *Education Technology and Computer Science*, pp. 929-932.
10. Garret, N. Vanderplaats, 1999, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design 3rd Edition, *Vanderplaats Research & Development. Inc.*, pp. 168-182.



**임 호 빈**

2010년 한국기술교육대학교 기계정보공학부 학사  
2011년~현재 한양대학교 기계공학과 석사  
관심분야: Geometric Modeling, CAD, BIM, CATIA 응용



**권 강**

2010년 영남대학교 기계공학과 학사  
2010년~현재 한양대학교 기계공학과 석사  
관심분야: PDM/PLM, CAE, Function-based Modeling



**김 재 정**

1981년 한양대학교 정밀기계공학과 학사  
1983년 미국 George Washington 대학 공학석사  
1989년 미국 MIT 공학박사  
1989년~1991년 미국 IBM TJ Waston 연구소 연구원  
1991년~1993년 한국 IBM 소프트웨어 연구소 연구원  
2002년~2003년 미국 NIST 객원연구원  
2003년 프랑스 Dassault System 객원 연구원  
1993년~현재 한양대학교 기계공학부 교수  
관심분야: Geometric Modeling, CAD/CAM 응용, PDM/PLM, Rapid Prototyping, CATIA 응용