

〈論 文〉

Cubic Spline을 사용한 최적 캠곡선의 합성

손태영* · 양민양**

(1994년 7월 4일 접수)

Synthesis of Optimum CAM Curve by Cubic Spline

Tae-Young Shon and Min-Yang Yang

Key Words : Cam(캠), Cam Curve(캠곡선), DRD Motion(양정류운동), Object Function(목적 함수), Cubic Spline(3차 스트라인)

Abstract

The application of cubic spline is presented for basic curve (DRD motion) of cam motion. The purpose of this paper is to achieve better dynamic characteristics than general cam curves. A cubic spline is a piecewise function that is continuous in displacement, velocity and acceleration. The best cam curve is obtained by changing the weights of the object function. So the method can be used to any machine system case by case. For the proposed object function, the result has improved all characteristics such as velocity, acceleration and jerk compared with that of the modified sine curve.

1. 서 론

캠은 직접 접촉된 종동절(follower)이 예정된 운동경로를 따라 움직일 수 있도록 운동을 전달하는 기계요소이다. 캠기구(cam mechanism)는 캠(cam), 종동절(follower), 프레임(frame) 등으로 간단히 구성되며 복잡한 형태의 운동도 쉽게 반복적으로 재현해 낼 수 있다.⁽¹⁾

캠기구는 다른 구동기구에 비하여 부하 능력이 높고, 동기 제어가 쉬워 설계가 간단하며, 충격과 가속도가 작기 때문에 고속에서도 신뢰성 높고 정속한 운동을 얻을 수 있다.⁽²⁾ 그리고, 고장이 적고 보수가 용이하므로 수명이 긴 특징이 있다. 이러한 특성에 의하여 자동차 기계들에서 필수적인 요소인데 대표적인 사용 예로 자동조립기, 방적기계, 식품기계, 복사기, 인쇄기, 내연기관 등에서 다양하

게 사용되고 있으며 그 사용 영역이 점차 확대되고 있다.

가장 간단한 캠곡선은 아르키메데스 나선을 사용한 등속도곡선(constant velocity motion)이지만 이것은 시작과 끝부분에서 무한대의 가속도가 존재하므로 여기서의 큰 충격으로 인하여 고속에서는 사용할 수 없는 단점이 있다. 무한 가속도를 해결하기 위하여 등가속도곡선(constant acceleration motion or parabolic motion)을 사용할 수 있지만 이것은 시작과 끝부분에서 무한대의 저크(jerk)가 나타나므로 종동절에 충격을 가하게 되어 부적절하다. 이를 개선하기 위하여 단진자운동의 정사영을 이용한 단현곡선(harmonic motion)이 제시되었으나 시작과 끝부분에서의 무한 저크는 여전히 존재한다. 이에 대한 해결책으로 굴러가는 원주상의 한 점에 대한 궤적에서 나타나는 사이클로이드곡선(cycloidal motion)이 제시되었으나 속도와 가속도가 비교적 크기 때문에 만족스럽지 못하다.⁽³⁾

운동이 복잡해지고, 캠기구의 작동속도가 빨라질

*한국과학기술원 기계공학과

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

경우 높은 수준의 정확성 및 연속성을 만족시키기 위하여 다항식에 경계조건을 적용한 다항식 곡선(3-4-5 polynomial, 4-5-6-7 polynomial), 기본함수들을 푸리에급수로 전개하여 만든 푸리에곡선(Fourier curve) 등을 시도하여 곡선의 유연성은 개선되었지만 속도와 가속도 특성이 미흡하여 만족스러운 특성을 갖는 곡선을 생성하지 못하였다. 이러한 이유로 여러 가지 기본 곡선들을 구간별로 연결하여 만든 변형곡선(modified cycloidal curve, modified sine curve, modified trapezoidal curve)들이 비교적 좋은 운동 특성을 얻을 수 있으므로 주로 사용되고 있다.

근래에는 자동차 기계의 고속, 경량화 추세에 부응하기 위하여 캠곡선에서 하나의 해석적인 함수로 표현하기 어려운 복잡한 운동이 요구되는 경우들이 발생하고 있다. 이러한 경우에 구간별로 적합한 특성을 갖는 기본 곡선들을 적절히 선정하여 연결하는 혼합기법(curve blending technology)을 사용하거나 설정점(constraints)들이 있는 경우 캠의 형상을 수치적으로 구해야만 한다. 수치적인 해석으로 캠의 형상을 합성할 경우에 대하여 스플라인곡선(spline curve)을 이용하는 방법이 최근 10여년간 연구되어 왔다.⁽⁴⁻⁷⁾ 스플라인곡선에 의한 장점은 캠 형상설계에서 설정점 및 경계조건(boundary condition)의 선택이 자유롭고, 캠곡선의 부분적인 변형이 쉽고, 스플라인 차수의 선택이 용이하며, 스플라인곡선의 유일성 등으로 인하여 캠곡선의 해석적인 접근을 가능하게 하였다.⁽⁶⁾ 최근에는 Yoon과 Rao⁽⁸⁾가 캠곡선의 상승구간과 하강구간을 대칭으로 가정하고 설정점(constraints)이 주어진 캠곡선을 스플라인곡선으로 합성하였다. 이때 위치와 속도를 모두 변수로 하는 가변점(free choices)을 추가하여, minimum norm principle을 적용함으로써 최적의 대칭형 RR 곡선(rise-return curve)을 구하고자 하였다. 그러나, 이러한 스플라인곡선들이 다수의 설정점들을 연결하는 복잡한 캠곡선에는 유용하지만 기본 곡선(DRD curve)에 대한 운동 특성치들이 비교적 크게 나타나므로 단순한 운동을 요구하는 캠기구들의 경우에는 잘 사용되지 않고 있다.

캠곡선을 선정함에 있어서 특성치(dynamic characteristics)들을 고려해야 하는데, 캠과 종동절 사이의 압력각(pressure angle)을 줄이고 경량화를 위해서는 최대 속도(Vmax, maximum veloc-

ity)가 작아야 한다. 그리고 캠의 진동과 마멸을 억제하기 위해서는 최대 가속도(Amax, maximum acceleration)가 낮아야 하며, 종동절의 진동을 줄이기 위해서는 최대 저크(Jmax, maximum jerk)를 억제해야 한다. 그러나 캠곡선에서 최대 속도, 최대 가속도, 최대 저크는 서로 어느 한쪽을 줄이면 다른 쪽에서 높아지게 되는 어려움이 있는 것으로 알려져 있다. 이 때문에 적합한 곡선은 캠기구가 사용되는 시스템의 용도에 따라 설계자의 경험에 의존하여 선정하고 있으며, 특별한 제한이 없는 경우에는 세 가지 특성이 모두 무난한 변형 사인곡선(modified sine curve)을 채택하고 있다.

본 연구에서는 보다 우수한 특성을 갖는 캠곡선을 개발하기 위하여 스프라인곡선의 유연성과 유일해(unique solution)를 기반으로 최적의 동역학적 특성을 갖는 DRD 곡선(dwll-rise-dwell curve)을 얻을 수 있는 방법을 개발하고자 한다. 그리고 캠기구를 필요로 하는 특정 시스템에 대하여 최적의 캠곡선을 능동적으로 생성할 수 있도록 하기 위하여 최적화를 수행할 수 있는 합리적인 목적함수를 제시하고자 한다.

2. 이론적 전개

캠곡선을 설계함에 있어서 캠의 각변위에 대하여 종동절의 위치 또는 속도에 대한 기본적인 설정점들이 지정됨이 일반적이다. 이러한 설정점들은 기본적인 DRD 곡선에서는 아래의 관계를 만족한다.

$$\theta_i \leq \theta_{i+1} \text{ and } y_i \leq y_{i+1} \text{ for } i=0, 1, \dots, n$$

설정점들이 주어지면 이러한 점들을 유연하게 연결할 수 있는 방법들이 여러 가지가 있을 수 있지만 piecewise continuous fit을 사용하는 스플라인 기법이 혼합기법이나 다항식함수(polynomial function) 보다 우수한 것으로 밝혀진 바 있다.⁽⁶⁾ piecewise continuous fit에서 여러 가지 차수(degree)를 선택할 수 있는데 짝수 차수 스플라인(even-degree spline)은 홀수 개의 경계조건을 가짐으로 인하여 연산(computation)의 불확실성을 유발하게 되므로 제외된다. 일반적인 캠기구의 동역학적 관점에서는 저크까지의 연속성이 요구되므로 3차 미분의 연속이 보장되는 최소 차수인 3차 스플라인(cubic spline)이 주로 사용된다. 5차 스플라인(quintic spline)을 사용하면 저크곡선이 보다 유연하게 되

적합한 유일해를 구할 수 있다. 이와 같이 전개된 이론에 의하여 생성되는 캠곡선은 기본 곡선이므로 일반적인 전용기에 사용되는 캠처럼 설정점의 수가 추가되지 않고, 두 점 사이를 중동절이 반복적으로 운동하는 경우에 유용하다.

3. 최적화

캠곡선의 특성치들(V_{max} , A_{max} , J_{max})이 서로 어느 한쪽의 특성치를 개선하면 다른 특성치가 나빠지는 관계를 가지는 것으로 알려져 있다. 새로이 제시되는 곡선의 우월성은 기존의 곡선에 대한 각 특성치들의 상대적인 비교로서 논의되어 왔다. 그러나, 각각의 특성치들의 절대적인 증감량은 특성치들 사이에 크기가 수배 이상 차이 나므로 의미를 부여하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 종류별 크기 차이에 따른 민감도를 제거해야 하는데, 이것은 새로이 만든 곡선에서의 특성치들을 선택된 기준 곡선에서의 대응하는 특성치들로 나누어 줌 무차원화시킴으로써 가능하다. 실질적인 캠 곡선 설계에서는 적용하고자 하는 시스템의 요구에 따라 특성치의 중요도가 바뀌므로 그에 대한 가중치를 변경할 수 있어야 하며, 이것을 기준으로 최적의 곡선을 추적하기 위한 반복수행을 하여야 한다. 이와 같이 민감도 제거와 가중치 변경이 가능한 아래의 식을 목적함수(object function)로 제시하고자 한다.

$$\text{minimize } cof = \alpha \frac{V_{max}}{V_{bs}} + \beta \frac{A_{max}}{A_{bs}} + \gamma \frac{J_{max}}{J_{bs}} \quad (6)$$

여기서, $\alpha + \beta + \gamma = 1.0$

실질적으로 고속 캠곡선의 설계에서 시스템의 부하가 적을 경우에는 최대 가속도, 최대 속도, 최대 저크, 최대 토크의 순서로 중시하여 선정하고, 부하가 큰 경우에는 최대 속도, 최대 가속도, 최대 토크, 최대 저크의 순서를 기준으로 결정하고, 저속이고 부하가 적은 경우에는 최대 속도, 최대 토크를 중요시 하는 것이 일반적이다.^(10,11) 그리고, 시스템의 설계상 특별한 제한이 없으면 기존의 곡선들 중에서 모든 특성치가 비교적 우수한 변형사인곡선을 사용한다.

이에 따라 본 논문에서는 변형 사인곡선을 기준 곡선으로 하고, 최대 속도와 최대 가속도의 중요도를 같게 두면서 최대 저크보다 중요시하기 위하여 $\alpha = \beta = 0.4$, $\gamma = 0.2$ 를 가중치로 선택하였다. 여기

서 최대 토크는 속도와 가속도를 곱한 것에 대한 최대 값으로 근사되므로 최대 속도와 최대 가속도에 연관성을 가지고 있어서 목적함수에서 제외하였다.

최적화를 위한 순서는 다음과 같다.

1단계 : DRD 곡선에 대하여 주어진 설정점을 고려하여 가변점의 개수를 선정하고 기준 데이터 점들을 결정한다.

2단계 : 대칭성을 적용하여 $\frac{n}{2} - 2$ 개의 가변점으로서 임의로 선택되는 점들 ($y_1, y_2, \dots, y_{\frac{n}{2}-2}$)에 의하여 구속되는 $y_{\frac{n}{2}-1}$ 에 대한 수식을 식(5)에 의거하여 유도 한다. 여기서 $y_{\frac{n}{2}-1} = f(y_1, y_2, \dots, y_{\frac{n}{2}-2})$ 으로 표현 된다.

3단계 : 주어진 데이터 점들에서의 속도 $t_i (i=1, 2, \dots, \frac{n}{2})$ 가 식(4)에 의해 계산된다. 그리고, 속도그래프의 대칭성에 의하여 $t_i (i=\frac{n}{2}+1, \frac{n}{2}+2, \dots, n)$ 도 구해진다.

4단계 : 반복수행에 의하여 아래의 목적함수를 만족하는 가변점들을 결정한다.

$$\text{minimize } cof = 0.4 \times \frac{V_m}{1.76} + 0.4 \times \frac{A_m}{5.53} + 0.2 \times \frac{J_m}{69} \quad (7)$$

이때 각각의 가변점들의 위치는 $y_{(ms)i-1} \leq y_i \leq y_{(ms)i+1}$ 의 범위에 대하여 존재할 수 있는 것으로 하였다. 여기서, $y_{(ms)i-1}$ 은 기준곡선으로 선택한 변형 사인곡선에서 $i-1$ 번째의 위치이며, 식(7)에서 분모의 1.76, 5.53, 69는 변형 사인곡선의 특성치이다. 그리고, 최적의 곡선을 얻기 위하여 존재할 수 있는 0.0001 단위의 모든 위치에 대하여 스프라인을 사용한 캠곡선과 그 때의 cof 를 계산하여 최소의 cof 를 갖는 데이터 점들의 위치를 구하였다.

5단계 : 선정된 각각의 데이터 구간들마다 piecewise continuous fit을 하기 위해 Hermite interpolation을 적용하면 3차 스프라인곡선에 의해 만들어지는 최적화된 캠곡선을 생성할 수 있다.

$$y(x) = H_0^3(x) y_{i-1} + H_1^3(x) t_{i-1} + H_2^3(x) t_i + H_3^3(x) y_i \quad (8)$$

4. 최적 곡선의 생성

4.1 최적 곡선 생성 예

캠에 대한 기본 곡선인 DRD 곡선을 생성함에는

Table 1 Optimum points generated by iteration

$n=6$	$y_0=0, y_1=0.0278, y_2=0.194533, y_3=0.5, y_4=0.805467, y_5=0.9722, y_6=1$
$n=8$	$y_0=0, y_1=0.0139, y_2=0.0973, y_3=0.264035, y_4=0.5, y_5=0.735965, y_6=0.9027, y_7=0.9861, y_8=1$
$n=10$	$y_0=0, y_1=0.0092, y_2=0.0644, y_3=0.174, y_4=0.331732, y_5=0.5, y_6=0.668268, y_7=0.8260, y_8=0.9356, y_9=0.9908, y_{10}=1$
$n=12$	$y_0=0.0, y_1=0.0059, y_2=0.0414, y_3=0.1128, y_4=0.2201, y_5=0.357035, y_6=0.5, y_7=0.642965, y_8=0.7799, y_9=0.8872, y_{10}=0.9586, y_{11}=0.9941, y_{12}=1$

아래의 경계조건(boundary condition)이 주어진다.

첫째, 정규화된 중동절의 변위와 캠 각변위에 대하여 대칭성을 적용하면 설정점들은 $y_0=0, y_{n/2}=0.5, y_n=1$ 로 된다.

둘째, 상승(rise) 구간의 곡선이 양단의 정류구간과 속도가 연속되어야 하므로 $t_0=0, t_n=0$ 가 되어야 한다.

셋째, 상승 구간의 곡선이 양단의 정류구간과 가속도가 연속되어야 하므로 $\dot{y}_0=0, \dot{y}_n=0$ 이어야 한다.

이러한 경계 조건들은 식(4)를 유도하는 과정에서 모두 사용되었다.

$n=6$ 인 경우를 예로 들면 아래와 같다.

$$t_1 = \frac{3}{h} y_1$$

$$4t_1 + t_2 = \frac{3}{h} \times y_2$$

$$t_1 + 4t_2 + t_3 = \frac{3}{h} \times \left(\frac{1}{2} - y_1\right)$$

$$2t_2 + 4t_3 = \frac{3}{h} \times (1 - 2y_2)$$

관계식 4개에 미지수 5개(t_1, t_2, t_3, y_1, y_2)이므로 1개의 가변점이 존재한다. y_1 가 결정되면 위의 식에 의하여 t_i 를 구할 수 있으므로 y_1 를 가변점으로 선택하고, 위의 연립방정식을 풀면 $y_2 = 4y_1 + \frac{1}{12}$ 로 주어진다. 최적화를 위하여 식(7)을 목적함수로 반복수행하면 $y_1=0.0278, y_2=0.194533$ 에서 최적 곡선이 생성된다.

구간의 수(n)가 증가할 경우에는 위와 같은 요령으로 식(5)에서 만들어지는 연립방정식을 정리하여 변위 관계식을 구하고, 목적함수인 식(7)을 기준으로 반복수행하면 Table 1과 같은 최적 캠곡선을 생성할 수 있는 기준점들의 위치를 구할 수 있

다. 이러한 기준점들을 식(4)에 적용하면 기준점들에서의 속도를 구할 수 있다. 이러한 결과를 식(8)에 대입하면 스프라인으로 만들어지는 최적의 캠곡선을 생성할 수 있다.

4.2 최적 곡선의 수렴성

가변점의 개수를 선정하면 그에 따른 최적의 캠곡선을 3차 스프라인함수로 구할 수 있었다. 가변점의 개수를 증가시키면 2차원 평면 상에서 보다 자유도가 높은 곡선을 생성할 수 있을 것이다. 그러므로 주어진 목적함수에 대하여 보다 우수한 특성을 갖는 캠곡선을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 기본적으로 3차 스프라인을 사용하므로 저크까지의 연속성만 보장된다. 또한 가변점의 개수 증가에 따라 특성치가 개선되는 폭이 급격히 줄어들 것이며, 최적해를 구하기 위한 반복수행 시간이 지나치게 많이 소요되는 문제가 있다. 캠을 제작하는 NC(numerical control) 가공에서 B.L.U.(basic length unit)가 보통 $1 \mu\text{m}$ 로 주어지며, 가공 오차(machining error)가 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 나 되므로 지나치게 많은 가변점은 필요하지 않다. 그러므로 구간의 수(n)를 증가시켜가면서 특성치들($V_{\max},$

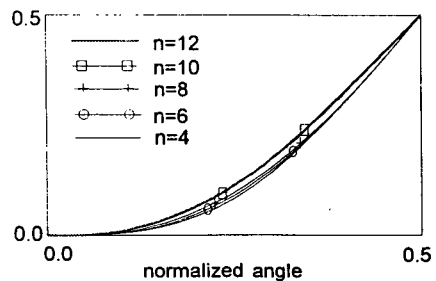


Fig. 1 Convergence of displacement

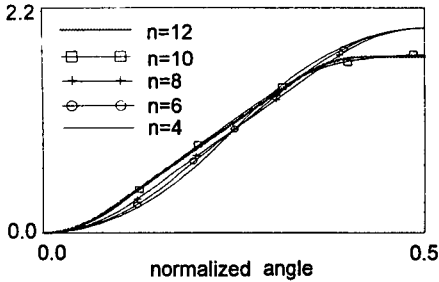


Fig. 2 Convergence of velocity

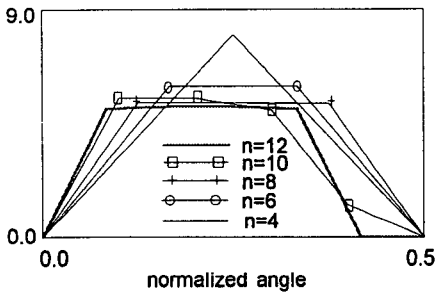


Fig. 3 Convergence of acceleration

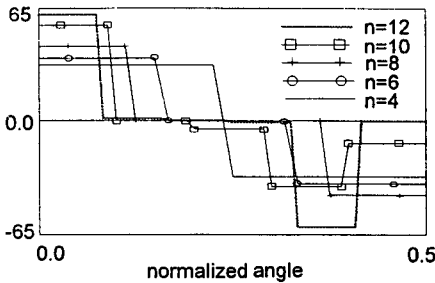


Fig. 4 Convergence of jerk

A_{max} , J_{max} , cof)의 수렴성을 확인하여 실질적인 캠 제작에서 유용한 정도로 구간의 수를 줄여야 한다. 적절한 구간의 수를 결정하기 위하여 $n=4\sim 12$ 의 경우에 나타나는 변위곡선과 속도곡선, 가속도곡선, 저크곡선을 Fig. 1~Fig. 4에 제시하였다. 이 그림들에서 대칭성에 의하여 정규화된 각변위(normalized angular displacement) 구간 0.5~1.0은 생각하였다. 그림들에서 보면 변위곡선과 속도곡선은 수렴성이 빨라 $n=10$ 에서 수렴되며, 가속도곡선은 수렴성이 비교적 늦어 $n=12$ 에 수렴되는 것으로 기대되지만 저크곡선은 수렴성이 거의 없는 것으로 나타난다.

$n=4\sim 12$ 에 대한 특성치들을 구해 보면 Table 2

Table 2 Comparison of characteristics of the optimized curves as a function of the number of free choies

n	V_{max}	A_{max}	J_{max}	cof.
4	2.00	8.00	32.0	1.1260
6	2.00	6.00	36.03	0.9931
8	1.998	5.338	42.7	0.9640
10	1.688	5.520	55.2	0.9429
12	1.716	5.184	61.17	0.9423

Table 3 Comparison of characteristics of optimized curve($n=12$) with those of important cam curves

Cam curves	V_{max}	A_{max}	J_{max}
Optimized curve	1.716	5.184	61.17
Parabolic	2.000	4.000	∞
Simple harmonic	1.57	4.93	∞
Cycloidal	2.00	6.28	40
Modified cycloidal	1.76	5.89	67
Modified trapzoidal	2.00	4.89	61
Modified sine	1.76	5.53	69
3-4-5 polynomial	1.89	5.77	60
4-5-6-7 polynomial	2.19	7.52	52

와 같다. 주어진 목적함수에 대하여 가변점 개수의 변화에 따른 cof 의 추이를 살펴보면 $n=12$ 에 수렴됨을 알 수 있다. Table 2에서 가변점 개수의 증가에 따른 최적화된 캠곡선들의 동역학적 특성치들의 변화를 살펴보면 최대 가속도는 감소하는 경향이 있고, 최대 저크는 증가하는 것을 알 수 있다. 가변점이 3개인 $n=10$ 을 선택할 경우에는 기준곡선인 변형 사인곡선에 비하여 가속도 특성이 나빠지지 않으면서 속도 특성은 4% 개선되고, 저크특성이 20% 개선되는 DRD 곡선이 생성되었다. 가변점이 4개인 $n=12$ 를 선택할 경우에는 기준 곡선인 변형 사인곡선에 비하여 속도 특성은 2.5% 개선되고, 가속도 특성은 6.3% 개선되며, 저크 특성

Table 4 Optimum points generated by various values of weights ($n=10$)

α	β	γ	y_4
0.4	0.4	0.2	0.331733
1/3	1/3	1/3	0.331733
0.35	0.45	0.2	0.331733
0.45	0.35	0.2	0.333633
0.45	0.45	0.1	0.333633

은 11.3% 개선되는 등 필요한 모든 동특성이 우수한 DRD 곡선을 얻을 수 있었다. 스플라인을 사용하여 최적화($n=12$)한 캠곡선을 다른 중요한 기본 곡선들과 비교해 보면 Table 3과 같다. Table 3에서 보는 바와 같이 최적화된 곡선은 운동 특성들이 기존의 캠곡선들에 비하여 우수함을 알 수 있다.

위의 Table 1과 Table 2에 제시된 데이터들은 목적 함수의 가중치를 $\alpha=\beta=0.4, \gamma=0.2$ 로 한 경우이고, 캠을 사용할 시스템의 필요에 따라 가중치를 바꾸면 이러한 데이터들이 변화될 수도 있다. Table 4에 제시된 바와 같이 가중치의 변화가 크지 않으면 최적 위치를 구한 결과가 같게 나타난다. Table 4에서 y_4 값이 같은 경우들은 다른 데이터 점들($y_0 \sim y_{10}$)의 위치가 모두 동일하다.

4.3. 변형 사인곡선과 최적화된 스플라인곡선의 비교

최적화된 스플라인곡선($n=10$, 가변점 3개)과 가장 많이 사용되는 변형 사인 곡선을 비교해 보면 Fig. 5~Fig. 8에 제시된 바와 같다.

변위곡선(Fig. 5)을 비교해 보면 두 곡선이 거의 일치하지만 스플라인곡선이 정규화된 각변위 $\theta=0.2$ 부근에서 변형 사인곡선에 비하여 약간 천천히 상승한다. 이에 의한 변위의 차이는 종동절의 최대 변위가 10 mm인 캠곡선에 대하여 적용해 보면 정규화된 각변위 $\theta=0.25$ 에서 $46 \mu\text{m}$ 만큼 변형 사인 곡선이 빨리 상승한다. 이 원인은 저크곡선(Fig. 8)에 나타난 바와 같이 스플라인곡선의 초기 저크가 상대적으로 적기 때문으로 생각되며, 이 영향으로 가속도곡선(Fig. 7)에서 최대값은 서로 비슷하지만 정규화된 각변위 $\theta=0.05$ 근처에서 스플라인 곡선의 가속도가 현저하게 적게 나타남을 볼 수 있

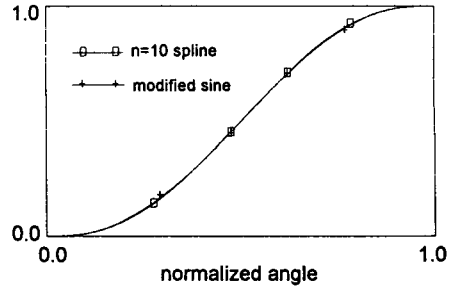


Fig. 5 Trend of displacement

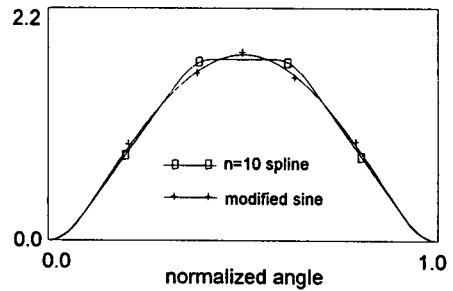


Fig. 6 Trend of velocity

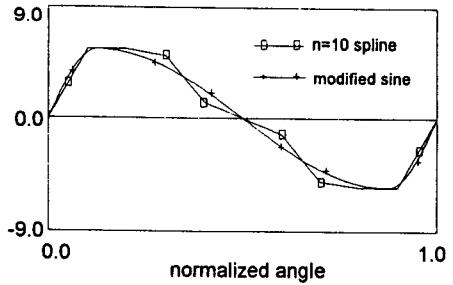


Fig. 7 Trend of acceleration

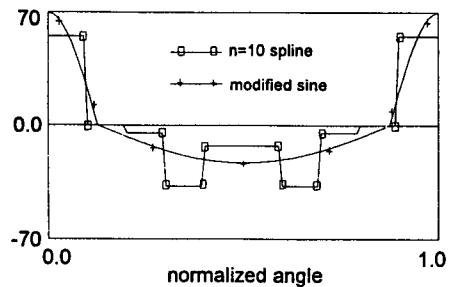


Fig. 8 Trend of jerk

다. 속도곡선(Fig. 6)은 변형 사인곡선의 중앙 부분이 볼록한 형상이지만 스플라인곡선은 정규화된 각변위 $\theta=0.4 \sim 0.6$ 구간이 편평하여 최대 속도가

감소함을 알 수 있다. 이러한 결과들을 종합해 보면 최적화된 스프라인곡선($n=10$)이 변형사인 곡선에 비하여 가속도 특성의 저하 없이 속도와 저크 특성이 개선된 캠곡선을 생성할 수 있음이 확인된다.

5. 결론

기존의 캠곡선들 보다 우수한 기본 곡선을 개발하기 위하여 스프라인곡선을 도입하고, 생성 가능한 모든 곡선에 대하여 검증하여 최적화하는 본 연구에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 캠곡선의 상승구간(rising period)에서 가속영역(acceleration interval)과 감속영역(deceleration interval)을 대칭으로 두고 스프라인곡선을 적용하여 보다 우수한 DRD 곡선을 생성할 수 있었다.

(2) 목적함수의 가중치 변경에 의하여 필요로 하는 특정 시스템의 요구에 대해 최적인 캠곡선을 생성할 수 있다.

(3) 가변점의 개수를 4개로 선정하면 변형 사인 곡선에 비하여 속도 특성이 2.5%, 가속도 특성이 6.3%, 그리고 저크 특성은 11.3% 만큼 모두 개선되는 DRD 곡선을 생성할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Chen, F. Y., 1982, *Mechanics and Design of Cam Mechanisms*, Pergamon Press Inc.
- (2) 김종수, 정성호, 신중호, 1993, "순간속도 중심점을 이용한 디스크형 캠의 형상 설계," 대한 기계학회 추계 학술대회 논문집(I), pp. 452~455.
- (3) 牧野 洋, 1982, "자동기계기구학," 기전연구소.
- (4) Angles, J., 1983, "Synthesis of Plane Curves with Prescribed Local Geometric Properties using Periodic Spline," *Computer Aided Design*, Vol. 15, pp. 147~155.
- (5) MacCarthy, B. L. and Burns, N. D., 1985, "An Evaluation of Spline Function for Use in Cam Design," *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 199, pp. 239~248.
- (6) Tsay, D. M. and Huey, C. O., 1988, "Cam Motion Synthesis Using Spline Functions," *Trans. ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 110, pp. 161~165.
- (7) Tsay, D. M. and Huey, C. O., 1989, "Spline Functions Applied to the Synthesis and Analysis of Nonrigid Cam-Follower Systems," *Trans. ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 111, pp. 561~569.
- (8) Yoon, K. and Rao, S. S., 1993, "Cam Motion Synthesis Using Cubic Spline," *Trans. ASME, J. of Mechanical Design*, Vol. 115, pp. 441~446.
- (9) 최병규, 1993, "CAM 시스템과 CNC 절삭가공," 청문각.
- (10) 田中義弘, 1979, "カム曲線の選定と設計," 機械設計, 第23卷, 第15號, pp. 6~16
- (11) 牧野 洋, 1990, "カム設計. 應用のQ&A," 機械設計, 第34卷, 第11號, pp. 25~47