

# 고속 저진동 운동을 위한 비대칭 S-커브 프로파일

## Antisymmetric S-curve Profile for Fast and Vibrationless Motion

류근호\*, 권정태, 박경우  
(Keun-Ho Rew, Jeong-Tae Kwon, and Kyoungwoo Park)

**Abstract :** By breaking the symmetry of the velocity profile in the S-curve, we developed a fast starting and smooth ending motion profile, named asymmetric S-curve(AS-curve). The problem for generating motion profile is formulated, and the algorithm for the AS-curve is derived and the flow chart of the AS-curve is illustrated. By various simulations, the derived algorithm is tested and shows the validity. This AS-curve can be applied to the high precision machines where fast and vibrationless motion is required in the near future.

**Keywords :** residual vibration, antisymmetric S-curve, vibrationless motion, motor profile

### I. 서론

일반적으로 모터를 제어하기 위해서는 기준 신호(reference signal)에 해당하는 운동 프로파일(motion profile)을 생성하고, 이 신호와 측정된 모터 엔코더의 위치 신호와의 차이를 피드백 또는 앞먹임 제어한다. 이러한 과정을 수행할 때, 기준 신호에 따라서 모터의 궤적이 결정되므로 운동 프로파일은 모터 제어 성능을 결정짓는 중요 인자이다. 예를 들면, 사다리꼴 프로파일은 S-커브 프로파일에 비해서 운동의 출발에서 도착까지 궤적 생성 시간은 짧지만 가속도 및 저크(jerk)가 급변하여 잔류 진동(residual vibration)이 발생하므로 정착 시간(settling time)까지 고려하면 S-curve 보다 비효율적이라고 할 수 있다.

현장에서 모터 제어를 할 때, 운동 보드에 내장된 S-커브 프로파일 생성 함수를 불러와서 사용한다. 초정밀 운동이나 접촉 운동과 같이 잔류 진동이 지극히 적어야 하는 상황에서는 가속도 및 저크를 낮춰야 하지만 빠른 시간 안에 운동이 끝나야 생산성을 높일 수 있다.

기존의 S-커브는 비대칭 속도 프로파일이 불가능하므로 현장에서는 출발 시 빠른 속도로 S-커브로 이동을 하여 도착 지점 직전에 멈춘 후, 다시 느린 속도로 S-커브 이동을 하는 2단 S-커브 이동 방식을 사용한다. 2단 S-커브 이동 방식은 기존의 S-커브 함수를 불러서 사용하므로 손쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있지만, 출발 시와 도착 시의 가속도 및 저크를 동일하게 설정할 수밖에 없다. 잔류 진동을 고려하면 정착시간을 더 줄여야 할 필요성이 발생하여 아래 그림 1과 같이 비대칭 S-커브(AS-커브)를 개발하게 되었다.

비대칭 S-커브는 S-커브의 대칭성을 깨뜨림으로써 출발할 때는 빠른 속도, 가속도, 및 저크를 허용하고, 도착할 때는 느린 속도, 가속도 및 저크가 되도록 하여 출발할 때는 고속성을 꾀하고 도착할 때에는 저크를 임의로 낮춰 잔류 진동이

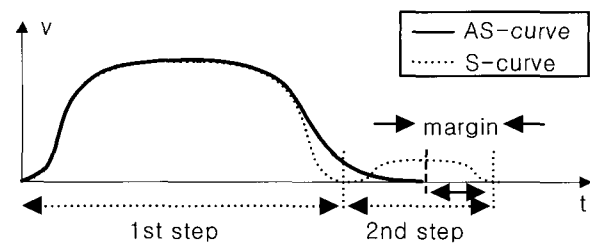


그림 1. AS-커브와 2단 S-커브 비교.

Fig. 1. Illustration of AS-curve and two-step-S-curve.

적도록 하였고, 그림 1의 margin에 해당하는 시간상의 효율을 얻을 수 있을 것이라고 예상된다.

모터 궤적 생성에 관한 기존의 연구를 살펴보면, Chen과 Lee는 이산 FIR 필터를 이용하여 부드러운 프로파일 생성에 관해 연구하였고 XY 테이블의 정확도를 개선하기 위해 알고리즘을 적용하였고[1], Erkokmaz와 Altintas는 추가적인 저크 제한 조건을 만족시켜 더 빠른 CNC 시스템을 개발하기 위해 궤적생성 알고리즘을 개발하였다[2]. Hong과 Chang은 버퍼가 있는 이산 분석기를 제안하고 그들의 방법을 방전가공기에 적용하여 곡선 가공의 효율을 높였다[3]. Meckl과 Arestides는 S-커브의 파라미터를 최적화하여 잔류 진동을 최소화하였으며[4], Zanasi 등은 속도, 가속도 제한 조건을 만족시키는 비선형 필터를 개발하여 타일 프린트 기계에 적용하였다[5-7]. 김정환은 리니어 모터의 제어에 관해 전반적으로 정리하였고, S-커브 생성에 대해 자세히 소개하였고[8], 이상훈과 박종현은 산업용 로봇의 진동 억제 제어에 대해 연구하였다[9]. 기존 연구를 살펴보면 S-커브의 속도 대칭성을 깨뜨리려는 시도는 없었는데 이는 S-커브의 대칭성을 깨뜨리면 알고리즘이 매우 복잡해지기 때문이라고 생각된다.

### II. 프로파일 생성 문제 정식화(formulation)

특정 모터의 프로파일을 특정한 속도, 가속도 조건으로 생성하는 것은 제한 속도 및 가속도가 상수인 방정식을 푸는 것이므로 어려운 문제가 아니지만, 일반적인 모터에 대해서 프로파일을 생성하는 경우는 속도 및 가속도 한계가 임의의 값을 가질 수 있는 변수가 되므로 프로파일 생성 문제는 풀

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 6. 8., 채택확정 : 2006. 8. 1.

류근호, 권정태, 박경우 : 호서대학교 기계공학과

(khrew@office.hoseo.ac.kr/jtkwon@office.hoseo.ac.kr/kpark@office.hoseo.ac.kr)

※ 본 연구는 2005년도 호서대학교 학술연구비 및 산업자원부 지방 기술혁신사업(RTI04-01-01) 지원으로 수행되었음.

기가 쉽지 않다.

프로파일을 생성하기 위한 제한 조건들을 구체적으로 나열해 보자. 편의상 프로파일에 대한 일반적인 제한조건들을 A그룹, 하드웨어 제약 때문에 발생하는 제한조건들을 B그룹으로 분류하자.

C-A1:  $P(T_0)=0, P(T_{end})=\delta$

출발 위치는 원점이고, 도착 위치는 임의의 목표 거리  $\delta$ 이다.

C-A2: 모든  $k$ 에 대해  $|V(k)| < V_{max}, |A(k)| < A_{max}$

프로파일의 임의의 시점에서 속도 및 가속도는 임의의 한계 이내이다.

C-A3:  $J(0)=A(0)=V(0)=0, J(T_{end})=A(T_{end})=V(T_{end})=0$

출발지점과 도착지점의 저크, 가속도, 속도는 0이다.

C-A4:  $T_{end}$ 를 최소화

프로파일 생성에서 종료까지 걸리는 시간을 최소화한다.

C-A5: 매 순간마다 저크와 가속도, 속도는 연속이며 무한대가 되지 않아야 한다.

C-A6: 조정 파라미터  $R_2$ 를 통해 출발과 도착 시점에 각기 다른 저크, 가속도, 속도 프로파일을 얻어야 한다.

기존의 사다리꼴 프로파일은 제한조건을 C-A1~C-A4까지 만족시키지만 제한조건 C-A5에서 저크가 이론상인 무한대인 지점이 발생하며, S-커브 프로파일은 제한조건을 C-A1~C-A5까지 만족시키지만 속도 프로파일이 대칭적이어서 제한조건 C-A6을 만족시키지 못하지만, AS-커브는 제한조건 C-A6도 만족시킨다. 참고로 언급하면, Zanasi 등[5-8]은 제한조건 C-A3를 더 확장하여, 임의의 속도, 가속도까지 확장한 경우에도 프로파일이 생성되는 알고리즘을 개발하였다.

C-B1: 인터럽트(interrupt) 안에 계산이 끝나야 한다.

C-B2: 모든 위치는 정수 값을 가진다.

C-B3: 모든 시간은 샘플링 시간의 양의 정수 배이다.

위의 제한 조건들은 하드웨어에 의해서 발생하는 것이지만, 일반적으로 운동 보드(motion board)에서 프로파일 생성 값이 이산(digital) 연산되며, 인터럽트 타임 안에 계산이 끝나야 하므로 프로파일의 실제적인 적용을 위해서는 알고리즘이 간단해야 하며 이산 엔코더로 위치 감지를 하므로 위의 B 그룹 제한 조건들을 추가해야 한다. 계산 양이 적어야 한다는 제한조건 C-B1 때문에 대부분의 프로파일은 exp, sin 등의 초월 함수(transcendent function)를 사용하지 않고, 다항식으로 이루어져 있다.

본 논문에서 제안한 AS-커브 생성 알고리즘은 C-A1~C-A6와 C-B1~C-B3의 제한조건들을 만족시킨다.

**III. AS-커브 생성 알고리즘**

현장에서 널리 쓰이는 모터제어 보드인 PMAC 매뉴얼은 S-커브 생성 알고리즘에 관한 자세한 설명을 하고 있으며 [10] 비대칭 S-커브의 아이디어 구상에 많은 도움을 주었다.

아래의 그림 2에서 AS-커브의 가속도 구간을 기준으로 시각을  $t_0 \sim t_7$ 으로 정의하였다.  $t_0$ 은 출발 시각,  $t_7$ 은 도착 시각을 의미하며, 가속도 제한,  $a_{max}$ 에 걸리지 않을 경우,  $t_1$ 과  $t_2$ 가 같게 되는 경우처럼 각 시각이 겹칠 수 있다. 1-3단계는 기존의 S-커브와 유도과정이 동일하며, AS-커브는 유도과정이 5-7단계부터 달라진다.  $R_2 = 1$ 이면 AS-커브와 S-커브는 동일하게

되며, 검증을 위해  $R_2 = 1$ 의 경우 S-커브와 동일한지 여부를 확인하였으며, 유도된 수식들은 기호 연산 (symbolic computation) 프로그램을 통해 재차 확인하여 계산 실수를 방지하도록 하였다.

아래 그림 2에서 정의된  $t_0 \sim t_7$ 을 기준으로 가속도, 속도, 위치를 유도해 보자.

1단계:  $t_0 \sim t_1$  ( $t_j = t_1 - t_0$ ) 구간

$$a_{t1} = \frac{A_{max}}{t_j} \tag{1}$$

$$V_1 = \int_{t_0}^{t_1} a_{t1} dt = \frac{A_{max}}{2t_j} t^2 \Big|_{t_0}^{t_1} = \frac{A_{max}}{2} t_j \tag{2}$$

$$R_1 = \int_{t_0}^{t_1} V dt = \int_{t_0}^{t_1} \frac{A_{max}}{2t_j} t^2 dt = \frac{A_{max}}{6} t_j^2 \tag{3}$$

여기서,  $t_0$ 는 출발시각이므로 계산 편의상 0으로 하자.

2단계:  $t_1 \sim t_2$  ( $t_a = t_2 - t_1$ ) 구간에서는 다음이 성립한다.

$$a_{t2} = A_{max} = A_x \tag{4}$$

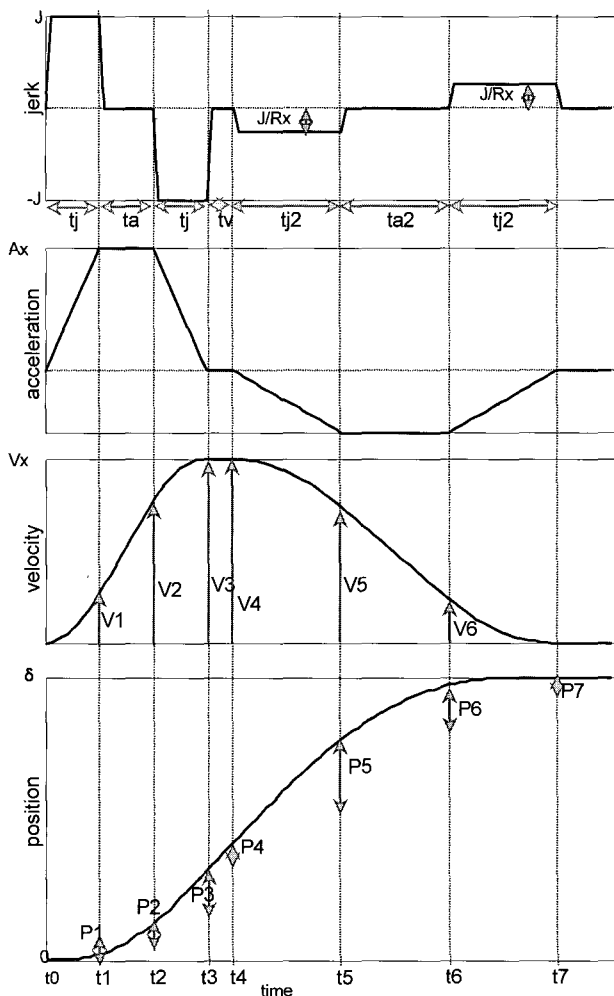


그림 2. AS-커브에서 변수들의 정의.  
Fig. 2. Naming convention of variables for AS-curve.

$$V_2 = \int_{t_1}^{t_2} a_{t2} dt + V_1 = A_x(t_2 - t_1) + \frac{A_x t_j}{2} = A_x(t_a + \frac{t_j}{2}) \quad (5)$$

$$P_2 = \int (A_x t + \frac{A_x t_j}{2}) dt = (\frac{A_x}{2} t^2 + \frac{A_x t_j}{2} t) \Big|_{t_1}^{t_2} \quad (6)$$

$$= \frac{A_x}{2} (t_2 - t_1)^2 + \frac{A_x t_j}{2} (t_2 - t_1) = \frac{A_x}{2} t_a (t_a + t_j)$$

3단계:  $t_2 \sim t_3$  ( $t_j = t_3 - t_2$ ) 구간에서는 다음이 성립한다.

$$a_{t3} = -\frac{A_x}{t_j} t + A_x \quad (7)$$

$$V_3 = \int_{t_2}^{t_3} (-\frac{A_x}{t_j} t + A_x) dt + V_2 = A_x(t_j + t_a) \quad (8)$$

$$P_3 = \int_{t_2}^{t_3} (-\frac{A_x}{2t_j} t^2 + A_x t + A_x t_a + \frac{A_x t_j}{2}) dt \quad (9)$$

$$= -\frac{A_x}{6t_j} t_j^3 + \frac{A_x}{2} t_j^2 + (A_x t_a + \frac{A_x t_j}{2}) t_j$$

$$= A_x t_j (\frac{5}{6} t_j + t_a)$$

4단계:  $t_3 \sim t_4$  ( $t_v = t_4 - t_3$ ) 구간에서는 다음이 성립한다.

$$a_{t4} = 0 \quad (10)$$

$$V_4 = \int_{t_3}^{t_4} a_{t4} dt = V_3 = A_x(t_a + t_j) \quad (11)$$

$$P_4 = \int_{t_3}^{t_4} V dt = A_x(t_a + t_j)t_v \quad (12)$$

5단계:  $t_4 \sim t_5$  ( $R_2 t_j = t_5 - t_4$ ) 구간에서는 다음이 성립한다. 저크를 가하는 시간을  $R_2$ 배로 늘리고, 저크 량은  $R_x$ 배로 늘리면 아래와 같다.

$$J_2 = J / R_x = \frac{A_x}{R_x t_j} \quad (13)$$

$$t_{j2} = R_2 t_j \quad (14)$$

이를 이용하여 1~4단계와 같이 가속도, 속도, 위치를 구하면 다음과 같다.

$$a_5 = -\frac{A_x}{R_x} R_2 \quad (15)$$

$$V_5 = -\frac{A_x}{R_x} t_j R_2^2 + A_x(t_j + t_a) \quad (16)$$

$$P_5 = -\frac{A_x}{6R_x} t_j^2 R_2^3 + A_x t_j R_2 (t_a + t_j) \quad (17)$$

6단계:  $t_5 \sim t_6$  ( $R_2 t_a = t_6 - t_5$ ) 구간에서도 저크를 가하는 시간을  $R_2$ 배로 늘리고, 저크 량은  $R_x$ 배로 늘리면 (13)과 다음이 성립한다.

$$t_{a2} = R_2 t_a \quad (18)$$

이를 바탕으로 비대칭 지역에서의 가속도, 속도, 위치를 구하면 다음과 같다.

$$a_6 = a_5 = -\frac{A_x}{R_x} R_2 \quad (19)$$

$$V_6 = -\frac{A_x}{R_x} t_a R_2^2 - \frac{A_x}{2R_x} t_j R_2^2 + A_x(t_j + t_a) \quad (20)$$

$$P_6 = -\frac{A_x}{2R_x} t_a^2 R_2^4 - \frac{A_x}{2R_x} t_j t_a R_2^3 + A_x t_a R_2 (t_a + t_j) \quad (21)$$

7단계:  $t_6 \sim t_7$  ( $R_2 t_j = t_7 - t_6$ ) 구간에서는 5단계와 같은 량의 저크와 저크시간을 가하면 다음이 성립한다.

$$a_7 = 0 \quad (22)$$

$$V_7 = -\frac{A_x}{R_x} t_a R_2^2 - \frac{A_x}{R_x} t_j R_2^2 + A_x(t_j + t_a) \quad (23)$$

$$= -\frac{A_x}{R_x} R_2^2 (t_a + t_j) + A_x(t_j + t_a)$$

$$P_7 = -\frac{5A_x}{6R_x} t_j^2 R_2^3 - \frac{A_x}{R_x} t_j t_a R_2^3 + A_x t_j R_2 (t_a + t_j) \quad (24)$$

8단계: (23)과  $V_7 = 0$ 라는 조건으로부터  $R_x$ 를 다른 변수에 대해 구하자.

$$R_x = R_2^2 (t_a + t_j) / (t_j + t_a) = R_2^2 \quad (25)$$

9단계: (25)을 (3), (6), (9), (17), (21), (24)에 대입하여 가감속으로 이동하는 거리,  $\delta_j$  를 구하자.

$$\delta_j = P^* - \delta_v = P_1 + P_2 + P_3 + P_5 + P_6 + P_7 \quad (26)$$

$$= A_x (1 + R_2) \left[ t_a^2 / 2 + (3t_j / 2) t_a + t_j^2 \right]$$

여기서,  $P^*$  는 목표 이동거리이고,  $\delta_v$  는 정속주행 거리이다.

이제,  $\{t_v = 0, t_a \neq 0\}$ ,  $\{t_v = 0, t_a = 0\}$ ,  $\{t_v \neq 0, t_a \neq 0\}$ 를 각 (9-A단계), (9-B단계), 및 (9-C단계)라 하고, 각 경우에 대해  $t_a$ 와  $t_j$  및 저크를 구하자. 계산 순서는 그림 5를 통해 설명하겠다.

9-A 단계:  $\{t_v = 0, t_a \neq 0\}$ 이면 아래 그림 3와 같은 가속도를 가지게 되고, (25), (26)과  $\delta_j = P^*$  를 정리하면 (27)과 같고,  $t_j$ 에 대해 정리하면 (28)과 같다.

$$t_a^2 / 2 + (3t_j / 2) t_a + t_j^2 - P^* / [A_x (1 + R_2)] = 0 \quad (27)$$

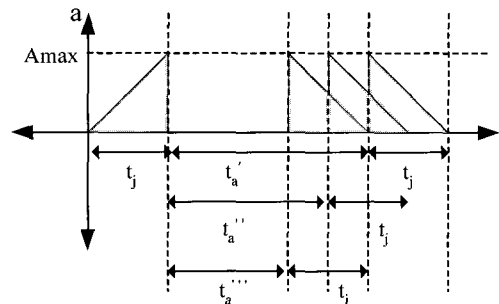


그림 3. 임의의  $t_a$ 에 대한 가속도 프로파일.

Fig. 3. Acceleration profile for arbitrary  $t_a$ .

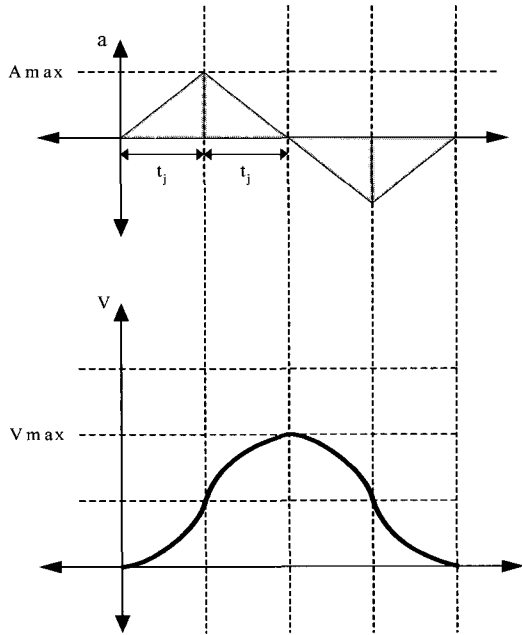


그림 4.  $t_a=0$  경우의 가속도 및 속도.  
Fig. 4. Acceleration and velocity when  $t_a=0$ .

$$t_j = A_x / J \tag{28}$$

(27), (28)를 이용하여  $t_a$ 를 구하면 아래와 같다.

$$t_a = \frac{-3(R_2+1)A_x^2 + \sqrt{[A_x(R_2+1)][A_x^3(R_2+1) + 8P^*J^2]}}{2(R_2+1)JA_x} \tag{29}$$

9-B 단계:  $\{t_v = 0, t_a = 0\}$ 이면 아래 그림 4과 같은 가속도, 속도를 가지며,  $P_2 = P_6 = 0$ 이고 다음이 성립한다.

$$A_x = Jt_j \tag{30}$$

$$P^* = P_1 + P_3 + P_5 + P_7 = J(1+R_2)t_j^3 \tag{31}$$

(30), (31)로부터  $t_j$ 를 구하자.

$$\therefore t_j = \sqrt[3]{\frac{P^*}{(1+R_2)J}} \tag{32}$$

9-C 단계:  $t_v \neq 0, t_a \neq 0$ 이면 다음이 유도된다.

$$\delta_j = A_x (t_a + t_j)(2t_j + t_a)(1+R_2)/2 \tag{33}$$

$$V_3 = V_{\max} = A_x(t_j + t_a) = Jt_j(t_j + t_a) \tag{34}$$

이제, 다음과 같이  $t_v$ 를 구할 수 있다.

$$t_v = (\delta - \delta_j)/V_x = (P^* - \delta_j)/V_3 \tag{35}$$

10단계: 다음과 같이 저크  $J$ 와  $J_2$ 를 계산한다.

$$\therefore J = P^* / [t_j(t_j + t_a)\{(R_2 + 1)(t_j + t_a/2) + t_v\}] \tag{36}$$

$$\begin{aligned} \therefore J_2 &= J/R_x = J/R_2^2 \\ &= P^* / [t_j R_2^2 (t_a + t_j)\{(R_2 + 1)(t_j + t_a/2) + t_v\}] \end{aligned} \tag{37}$$

11단계: 최종 프로파일 생성

위의 (26)에서  $\delta_s$ 를 구하고, (29), (32), (35)에서 각각  $t_a, t_j, t_v$ 를 구해서 (36), (37)에 대입하면 임의의 거리에 대해서 AS-커브 프로파일을 생성할 수 있다.

#### IV. AS-커브 프로파일 구현

AS-커브 생성 알고리즘의 순서도는 그림 5와 같다. 그림 5의 순서도에서 판단이 많은 이유는 속도 및 가속도 제한 조건에 걸리는지 판단하기 위한 경우의 수가 발생하기 때문이다.

본 계산 순서도는 S-커브의 계산 순서도와 흡사하며,  $R_2 = 1$ 이면 AS-커브와 S-커브는 동일하게 된다. Save frames가 끝나고 실제로 동작이 시작하면 저크를 덧셈하여 가속도를, 가속

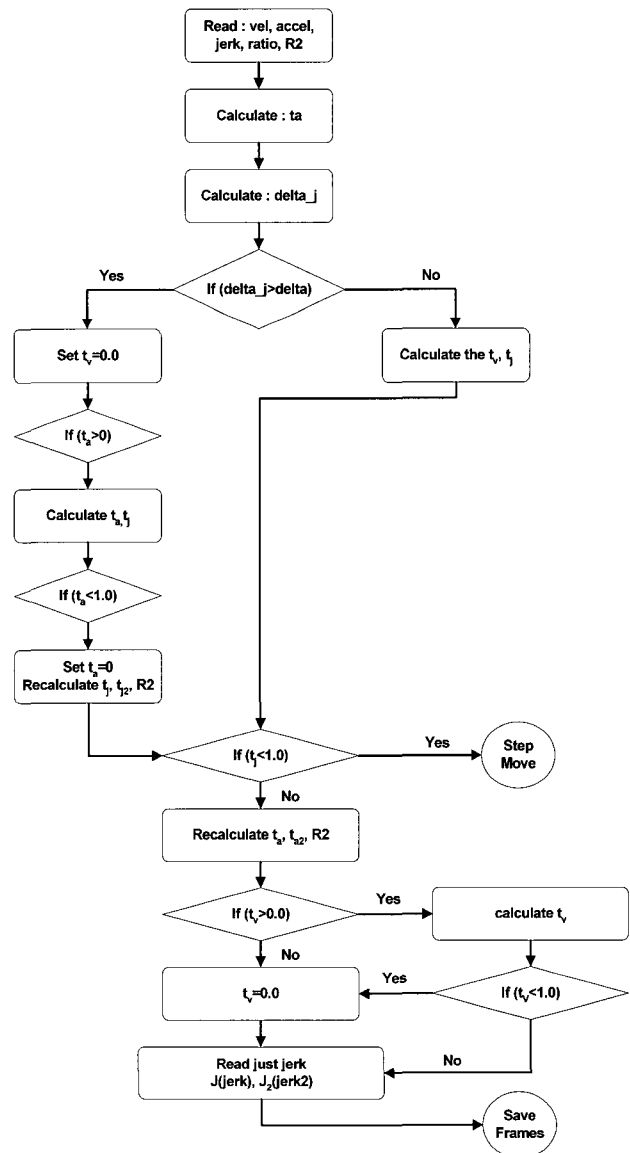


그림 5. AS-커브의 순서도.  
Fig. 5. Flow chart of AS-curve.

도를 덧셈하여 속도를, 속도를 덧셈하여 위치를 만들기 때문 실시간 계산에 매우 유리하다. 재계산(recalculation)은 샘플링 타임의 정수 배가 되도록  $t_m$ ,  $t_j$ ,  $t_v$ 를 조정하기 때문에 소수점 이하 오차 때문에 발생하는 오차를 거꾸로 다시 계산해서 보상하는 방식으로 기존의 S-커브에서도 사용되는 방법이다[10].

본 연구에서 제안한 AS-커브는 저크,  $J$  혹은  $J_2$ 를 구한 다음 저크를 매스텝마다 더해서 가속도를, 가속도를 더해서 속도를, 속도를 더해서 위치를 구하는 방식으로 구현되므로 인터럽트 시간 동안에서는 덧셈만 수행하여 계산시간이 짧다.

**V. AS-커브 프로파일 생성 결과**

AS-커브 생성을 위한 수치모사 조건은 표1과 같다. 여러 번의 수치모사를 통해 예상대로 AS-커브가 가속도 제한, 속도 제한 조건을 지키면서 원하는 펄스 수만큼 이동함을 관찰할 수 있었다. 또한,  $R_2 = 1$ 인 경우에는 S-커브와 완전히 동일한 결과가 나오음을 확인할 수 있었다.

AS-커브 프로파일 생성 결과는 아래와 같다. 그림 6~8은 각각 가속도 및 속도 제한에 걸린 경우, 가속도 제한에 걸린 경우, 제한 조건에 안 걸린 경우에 대한 프로파일이다.

그림 6-9에서  $V_{max} = 2000$  [pulse/s],  $A_{max} = 50$  [pulse/s<sup>2</sup>]의 제한 조건을 어기지 않음 관찰할 수 있으며, 그림 8에서  $R_2$ 가 증가함에 따라 의도했던 대로 감속 시에 저크, 가속도, 속도가 감소하고 이동 위치 목표 지점에 점점 부드럽게 안착함을 관찰할 수 있다.

표 1. 수치모사 파라미터들.

Table 1. Parameters for simulations.

변수명 (variable)	값 (value)
샘플링 시간 (sampling time, $T_s$ )	1 (ms)
최대 가속도 (max. acceleration, $A_x$ )	50 (pulse/s <sup>2</sup> )
최대 속도 (max. velocity, $V_x$ )	2000 (pulse/s)

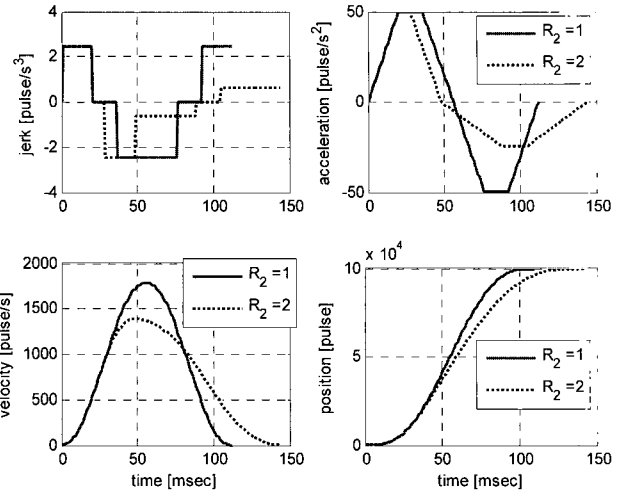


그림 7. AS-커브의 운동 프로파일 ( $\delta = 100k, R_2 = 1, 2$ ).

Fig. 7. Motion profiles for AS-curve ( $\delta = 100k, R_2 = 1, 2$ ).

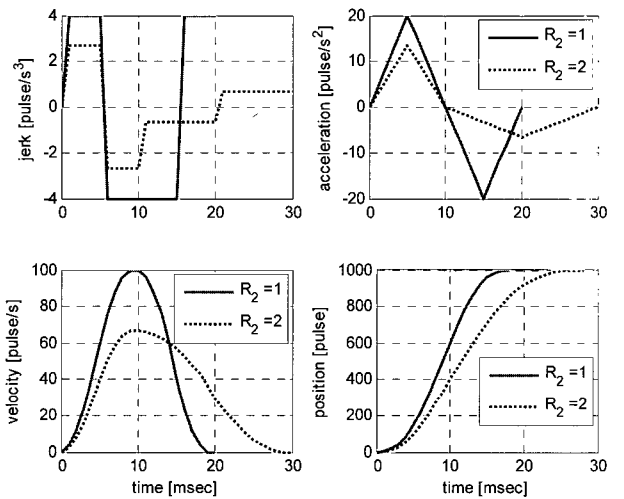


그림 8. AS-커브의 운동 프로파일 ( $\delta = 1k, R_2 = 1, 2$ ).

Fig. 8. Motion profiles for AS-curve ( $\delta = 1k, R_2 = 1, 2$ ).

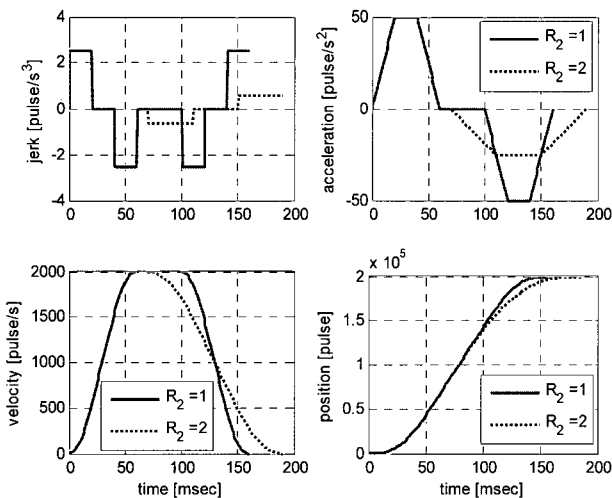


그림 6. AS-커브의 운동 프로파일 ( $\delta = 200k, R_2 = 1, 2$ ).

Fig. 6. Motion profiles for AS-curve ( $\delta = 200k, R_2 = 1, 2$ ).

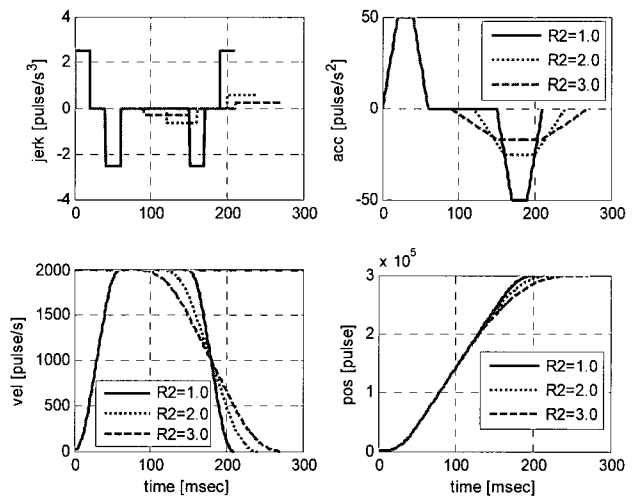


그림 9. AS-커브의 운동 프로파일 ( $\delta = 300k, R_2 = 1, 2, 3$ ).

Fig. 9. Motion profiles for AS-curve ( $\delta = 300k, R_2 = 1, 2, 3$ ).

**VI. 결론**

본 논문에서는 AS-커브를 제안하고, AS-커브의 운동 프로파일 정식화를 수행하였고, AS-커브를 구현하는 방법에 대해 체계적으로 보였고, 수치모사를 이용하여 AS-커브 구현의 유효성을 입증하였다. AS-커브는 처음 의도대로, 출발 시 S-커브와 동일한 고속이지만 도착 시에는 사용자 임의로 저크를 감소시킬 수 있음을 보였다. 이러한 비대칭성은 출발 시 고속이고, 도착 시 저진동인 운동을 가능하게 한다.

추후 연구로서, 수치모사 및 실험을 통해 잔류 진동 억제에 중요한 시스템에 본 논문에서 제안한 AS-커브를 적용한 예정이다.

**참고문헌**

[1] C. S. Chen and A.C. Lee, "Design of acceleration/deceleration profiles in motion control based on digital FIR filters," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38, pp. 799-825, 1998.

[2] K. Erkokmaz and Y. Altintas, "High speed CNC system design. part I: Jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, pp. 1323-1345, 2001.

[3] R. C. Hong and Y. F. Chang, "Parametric curve Machining of a CNC milling EDM," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, pp. 941-948, 2005.

[4] P. H. Meckl and P. B. Arestides, "Optimized S-Curve motion profiles for minimum residual vibration," *Proc. of the American Control Conference*, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 2627-2631, June 1998.

[5] G. L. Bianco, C., A. Tonielli, and R. Zanasi, "Nonlinear trajectory generator for motion control systems," *Proc. IEEE IECON '96*, Taipei, Taiwan, R.O.C, pp. 195-201, Aug. 1996.

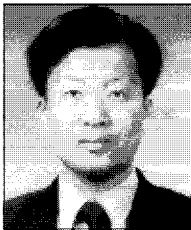
[6] R. Zanasi, C. Guarino Lo Bianco, and A. Tonielli, "Nonlinear filters for the generation of smooth trajectories," *Automatica*, vol. 36, no. 3, pp. 439-448, Mar. 2000.

[7] C. G. L. Bianco and R. Zanasi, "Smooth profile generation for a tile printing machine," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 3, pp. 471-477, June 2003.

[8] 김정환, DSP로 리니어 모터 제어하기, 동일출판사, 2003.

[9] 이상훈, 박중현, "산업용 로봇의 유연관절 제어기 설계: Part2-진동억제 제어 및 게인스케줄링," 제어·자동화·시스템공학 논문지, vol. 12, no.4, pp. 371-379, 2006.

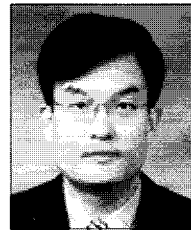
[10] *PMAC manual*, Delta Tau Data Systems, Inc., California, U.S.A., 1996.



**류근호**

1971년 1월 30일생. 1994년 KAIST 기계공학과(공학사). 1996년 동 대학원(공학석사). 2001년 동 대학원(공학박사). 1998년~2003년 미래산업. 2003년~2005년 파인디앤씨. 2005년~현재 호서대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 모터의 잔류

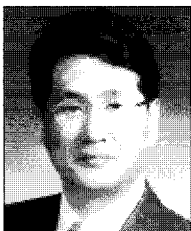
진동제어, 온도제어, 생체신호처리, 반도체/디스플레이 장비 개발.



**권정태**

1966년 3월 2일생. 1988년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1993년 포스텍(포항공대) 기계공학과(공학석사). 1999년 동 대학원(공학박사). 1999년 3월~2005년 2월 남부대학교 자동차기계공학부 교수. 2005년 3월~현재 호서대학교 기계공학

과 교수. 관심분야는 열전달, 2상 유동, 열유동제어.



**박경우**

1961년 2월 11일생. 1985년 한양대학교 기계공학과(공학사). 1990년 동 대학원(공학석사). 1995년 동 대학원(공학박사). 1995년~1999년 LG산전(주)연구소. 1999년~2001년 UC Berkeley, Post Doc. 2002년~2004년 한양대학교 최적설계신기술연

구센터. 2005년~현재 호서대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 전산 열유체역학(CFD/CHT), 최적 설계, 미소 열유체역학, 열전달.