

## PC기반 병렬 분산제어방식을 이용한 곡면유리 자동성형기 개발

### Development of Bent Glass Automatic Shaping System using PC-based Parallel Distributed Control Scheme

양 근 호\*  
Keun Ho Yang

#### 요 약

본 논문에서는 병렬 분산제어 방식을 이용한 곡면유리 자동성형 시스템을 개발한다. 설계된 시스템은 PC, 하나의 주제어기, 그리고 11개의 서보제어기로 구성된다. 각 요소들은 RS-232C와 8비트 데이터 버스로 연결된다. 안정성과 제어성능을 고려하여 정밀 PID 모션제어기 프로세서와 DC모터 제어에 사용되는 H-브리지를 사용한다. 설계된 시스템에서, PC는 주어진 곡률반경에 대한 각 구조물의 위치 값을 계산하고 이 값에 대응하는 모터 회전 데이터를 계산하며 작업자의 조작 입력을 위한 사용자 인터페이스를 제공한다. 주제어기는 PC로부터 동작 명령과 제어 파라미터를 받아 버스 통신방식을 이용하여 이를 각 서보제어기로 전달하며 서보제어기는 주제어기로부터 넘겨받은 동작명령과 제어 파라미터를 이용하여 각 모터에 대하여 PID제어를 수행한다.

#### Abstract

This paper presents the parallel distributed control scheme for shaping of the bent glass. The designed system consists of a PC, a main controller and 11 servo-controllers, the precision motion controllers. Each elements are connected by using RS-232C and 8-bit data bus. In order to guarantee the stability and the control performance, we use a precision PID motion controller and a H-bridge on the servo-drivers. PC calculates position values of 11 DC motors by using the pre-determined curvature value and offers the user interface environment operator. The main controller provides the control instructions and parameter values to 11 servo-controllers by chip enable signal, simultaneously. Using the received commands and parameter values, the servo-controllers control the positions of the DC motors based on PID control scheme.

*Key words* : PID control, Parallel Distributed Control Scheme, LM629, Bent-Glass

#### I. 서 론

최근 주거공간의 아름다움을 추구하거나 제품의 질적 또는 형태적 다양화와 함께 곡면유리의 사용은 날로 증가하고 있다. 이러한 곡면유리는 일반적인 평면유리를 적정한 온도로 가열하고 미리 제작된 틀을 이용하여 곡면의 모양을 만들어낸다. 이 때 곡면이 형성된, 가열된 유리에 대하여 차가운 공기를 이용한 급속 냉각과 진동을 이용하면 강화유리로의 형변환도 가능하다. 이러한 곡면

강화유리 제작기는 기존의 제품이 있으나 매우 고가이며 수입에 의존하는 상태이다. 또한 이 제작기의 단점은 곡률을 다양화 할 수 없는 단점을 가지고 있다. 즉, 하나의 판유리에 하나의 곡률 만을 적용할 수 있다는 것이다. 현재 국내에서는 대부분 강판을 이용하여 필요한 곡면 틀을 제단과 용접을 통해 제작하고 이를 이용하여 곡면유리를 생산하고 있다. 이러한 틀 제작은 숙련된 기술자라 하더라도 수일이 소요되는 매우 어려운 작업이며 필요로 하는 곡률이 다르면 틀을 다시 제작해야 한다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 11개의 DC 모터를 사용하고 이 모터에 기계적으로 연결된 스�크류에 의해, 성형틀을 이루는 폴(pole)의 위치를 컴퓨터에

\*한려대학교 멀티미디어정보통신공학과  
접수 일자 : 2003. 9. 29    수정 완료 : 2004. 1. 05  
논문 번호 : 2003-4-14

의해 계산된 위치로 수초 이내에 위치시키는 제어시스템을 개발하는 것이다. 개발된 시스템은 곡면유리를 생산하기 위한 틀의 자동성형에 국한된 것이지만 여기에 공기를 이용 냉각 시스템의 부착과 진동 및 가열된 유리의 컨베이어 시스템을 추가하여 완전한 곡면 강화유리 생산 시스템의 구축에 대한 기본 연구이다.

본 연구에서는 사용자 인터페이스와 자동 곡률 계산을 위해 윈도우 OS를 탑재한 펜티엄급 PC와 주제어기로 8비트 마이크로프로세서를 사용하였으며[9,10], 서보 드라이버단의 프로세서로는 PID 제어 알고리즘을 사용하는 모터제어 전용 칩을 사용하였다[1-7]. 또한 DC 모터의 안정된 서보기능을 유지하기 위해 H-브리지 소자를 사용하였다[8].

본 논문의 구성은 II장에서 자동 곡면유리 성형기 시스템의 전체 구성도와 제어에 필요한 파라미터의 계산을 위한 기계시스템의 모델을 분석하며 III장에서는 서보 드라이버단에 대한 언급과 본 연구에 사용된 PID 모터제어 전용 칩인 LM629의 동작 알고리즘에 대하여 소개한다. IV장에서는 주 제어기 동작 알고리즘과 각 부분들의 통신에 대하여 서술한다. V장에서는 개발된 사용자 인터페이스 프로그램에 대하여 서술하고 전체 시스템을 보인다. 마지막으로 VI장에서는 결론과 차후 연구에 대하여 서술한다.

## II. 곡면유리 성형시스템과 모델링

그림 1은 본 연구에서 개발된 자동 곡면유리 성형시스템을 위한 병렬 분산제어 시스템의 구성도이다.

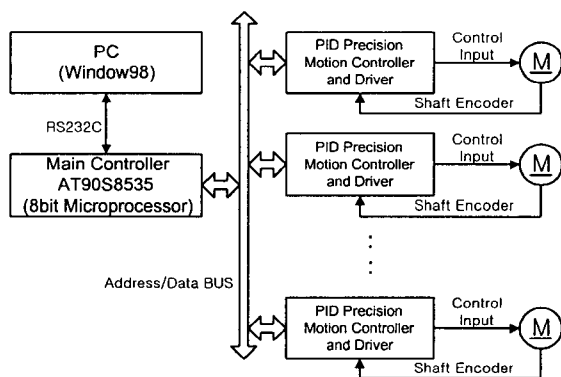


그림 1. 개발된 자동 곡면유리 성형시스템의 구성도  
Fig. 1. The structure of the developed bent glass auto shaping system

먼저 각 구성요소들에 대한 기능은 다음과 같다. 먼저 시스템을 구성하고있는 PC는 작업자가 필요로하는 곡률반경 값을 입력하면 이에 따라 11개의 폴의 위치 값을 계산하며 이 값을 토대로 모터 위치의 목표치를 계산한

다. 이렇게 계산된 값은 RS-232C 통신을 사용하여 주제어기에 전송시키며 또한 PC를 통해 입력받은 각종 제어 명령을 주제어기에 전송한다. 주제어기는 PC로부터 두 종류의 데이터를 전송 받는다. 하나는 제어파라미터 값이며 나머지 데이터는 제어 명령이다. 이 데이터를 11개의 서보 드라이버로 8비트 버스 통신방식을 통해 전송한다. 이렇게 전송 받은 파라미터나 명령은 서보 드라이버의 동작 제어기에 의해 처리되고 H-브리지 회로를 통해 모터를 동작시킨다. 이 때 각 모터 축에 연결되어있는 샤프트 인코더 신호를 동작 제어기에 반환시키게 된다.

곡면유리의 형태를 결정하는 곡률의 수와 곡률의 중심 위치에 따른 11개의 각 폴의 위치 값을 계산하기 위해 단일 곡률모드의 경우에 대하여 모델링하면 그림 2와 같다.

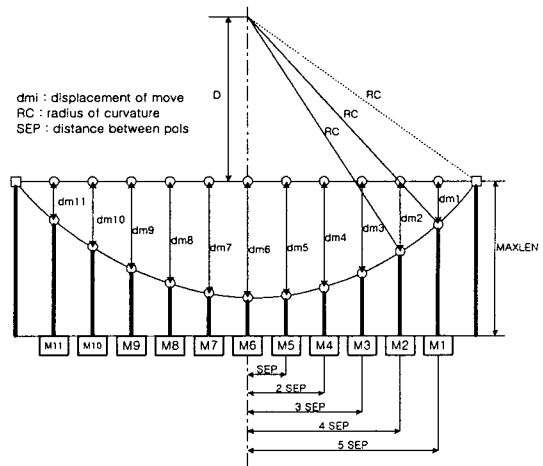


그림 2. 단일 곡률모드의 경우에 대한 시스템 모델링  
Fig. 2. System modeling for one curvature mode

이 때 곡률중심에서 최단거리  $D$ 는 식(1)과 같으며, 모터 M1부터 M11에 의해서 움직이는 각 폴의 이동 거리는 식(2)와 같이 계산된다.

$$D = \sqrt{RC^2 - (6 \times SEP)^2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} dm1 &= dm11 = \sqrt{RC^2 - (5 \times SEP)^2} - D \\ dm2 &= dm10 = \sqrt{RC^2 - (4 \times SEP)^2} - D \\ dm3 &= dm9 = \sqrt{RC^2 - (3 \times SEP)^2} - D \\ dm4 &= dm8 = \sqrt{RC^2 - (2 \times SEP)^2} - D \\ dm5 &= dm7 = \sqrt{RC^2 - (SEP)^2} - D \\ dm6 &= RC - D \end{aligned} \quad (2)$$

이 값을 이용하여 모터의 위치를 계산하여야 하는데 각 모터의 회전위치 값의 계산식을 얻기 위한 단일 폴 모델은 그림 3과 같다.

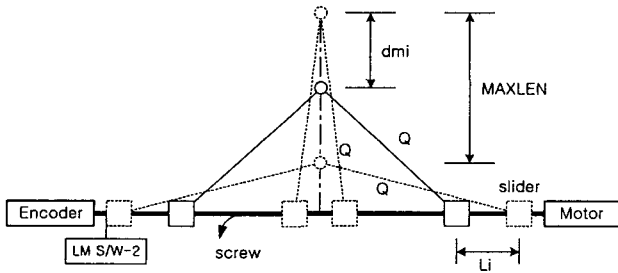


그림 3. 모터의 회전 값 계산을 위한 I번째 폴 모델링  
Fig. 3. The  $i$ -th pole modeling for calculating the value of motor rotation

여기서  $Q$ 는 스크류에 의해 각도가 변하는 바(bar)의 길이를 나타내며  $L_i$ 는  $i$ 번째 모터에 의해 이동시킬 폴의 변위를  $dmi$  만큼 이동시키기 위한 슬라이더(slidebar)의 이동 거리를 나타낸다.  $dmi$ 에 의한  $L_i$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$L_i = dmi \tag{3}$$

따라서 스크류를 회전시켜 슬라이더를  $L_i$ 만큼 이동 시켜야 한다.  $L_i$ 에 대한 모터회전위치는 다음과 같다.

$$T_i = \frac{1}{G_r} \times \frac{L_i}{P_s} \tag{4}$$

여기서  $T_i$ 는  $i$ 번째 모터의 회전수(turns)를 나타내며  $G_r$ 는 감속기의 기어비(gear ratio)이며  $L_i$ 는  $i$ 번째 모터에 대한 슬라이더의 이동 거리이고  $P_s$ 는 스크류 나사산의 거리, 즉 스크류의 피치(pitch)이다.

다 곡률모드 및 편 곡률모드의 형태는 다양하게 선택할 수 있으며 대표적인 3가지의 경우에 대하여 부록에 나타내었다.

### III. 서보 구동회로와 PID 제어

#### 3.1 서보 구동회로

본 연구에서 설계된 서보 구동회로의 구성은 다음 그림 4와 같다. 이 회로는 LM629칩을 사용하여 구성되었으며 11개의 드라이버를 구분하는 칩선택(chip selection) 신호에 의해 해당 드라이버가 선택되지도록 설계되었다. 주제어기와 통신에 사용되는 버스는 모두 32개의 신호선으로 구성되며 각 신호선의 사용은 표 1과 같다. 또한 각 폴의 초기위치와 최대 변위를 센싱하기 위해 각 드라이버에 2개씩의 리미트 스위치가 사용된다.

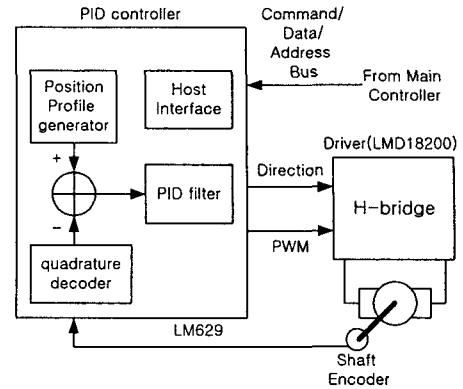


그림 4. 서보 구동회로의 구성  
Fig. 4. The structure of servo-driver

표 1. 주제어기와 서보 구동회로의 버스 통신 구성  
Table 1. The structure of communication between the main controller and servo-drivers

| Line   | Name       | Description   |
|--------|------------|---|
| 1~8    | D0~D7      | Data, Commands  |
| 9~13   | RD         | RD : Read from LM629                                    |
|        | WR         | WR : Write to LM629                                     |
|        | PS         | PS : Command/Data Sep.                                  |
|        | CLK        | CLK : Clock   |
|        | RST        | RST : Reset LM629                                       |
| 14, 15 | LM S/W1, 2 | LM S/W 1 : Initial position<br>LM S/W 2 : Max. position |
| 16~26  | SEL1~SEL11 | Driver Selection Signal                                 |
| 27~30  | Not used   | Driver Selection Signal                                 |
| 31, 32 | VCC, GND   | Power   |

#### 3.2 PID 제어기와 제어 파라미터

설계된 드라이버의 LM629 칩은 주 제어기로부터 전송받은 PID 제어 파라미터를 사용하여 PWM 신호로 DC 모터를 제어한다. 주제어기로부터 전송 받는 파라미터는 비례기이득(proportional gain)  $K_p$ , 미분기이득(derivative gain)  $K_d$ , 적분기이득(integral gain)  $K_i$ , 적분제한계수(integration limit coefficient)  $I_l$ 이다. 이 파라미터를 이용한 제어입력은 다음과 같다.

$$u(n) = K_p \cdot e(n) + K_i \cdot T \cdot \sum_{n=0}^n e(n) + \frac{K_d}{T_s} \cdot [e(n) - e(n-1)] \tag{5}$$

여기서  $u(n)$ 은 샘플링 시간의 모터제어신호이며  $e(n)$

은 시간  $n$ 에 대한 위치오차이고  $T$ 는 프로세서의 제어 샘플링 구간이며  $T_s$ 는 미분 샘플링 시간이다. 일반적으로 PID제어의 파라미터 설정은 Ziegler-Nichols 동조방법을 사용하거나 여러 가지 다른 동조방식을 사용한다 [[1-6]. 그러나 본 연구에서 개발된 시스템에서는 11개의 폴과 스크류의 기계적 특성이 일정치 않고 평면 유리가 각 폴에 작용하는 부하가 다르며 또한 제어 기준궤적이 LM629에 의해 자동으로 결정되기 때문에 그와 같은 일반적인 방법을 사용하기 어렵다[[7]. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 점에 유의하여 실험적으로 PID제어 파라미터를 결정하였다. 즉, 부하의 상황에 따라 각 계수들은 적절히 설정되어야 하며 위치 오차에 비례하는 입력에 사용되는  $K_p$ 는 0이 되지 않아야 하며  $K_d$ 는 과도상태의 특성을 결정하는 것으로 너무 크면 과도응답(overshoot)이 발생되므로 너무 크지 않도록 조절하였다. 그리고 정상상태 오차를 줄이기 위한  $K_i$ , 그리고 입력 중 적분치의 크기가 프로세서내의 레지스터에 오버플로우가 발생되지 않도록 하기 위한  $I_l$ 을 적절히 선택하였다. 최종적으로 결정된 제어 파라미터는 다음과 같다.

$$K_p = 20, K_d = 12, K_i = 5, I_l = 1000 \quad (6)$$

특히 LM629의 동작은 제어 파라미터만을 필요로 하는 것이 아니며 궤적에 필요한 파라미터도 필요하게 된다. 즉, 가속도 또는 감속도 값, 등속도 값, 최종 위치 값을 주제어기로부터 전송 받아 그림 4의 위치프로파일발생기(position profile generator)에 의해 그림 5와 같은 제어궤적이 생성된다.

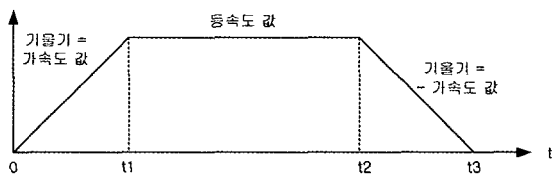


그림 5. LM629의 제어궤적  
Fig. 5. Control trajectory generated by LM629

드라이버단에서 모터에 가해지는 입력은 시스템의 안정성 확보를 위해 3A(최대 순간 5A), 최대전압 55V용 H-브리지인 LMD18200 칩을 사용하였다. 이 칩은 기계적 오류로 인한 과전류시 칩의 온도를 체크하여 자동으로 전원을 차단하기 때문에 특별히 다른 보호회로를 필요로 하지 않는다는 장점을 가지고 있다.

#### IV. 주 제어기

본 연구에서 설계된 주 제어기는 범용 제어용 칩인

Atmel사의 8비트 마이크로프로세서인 AT90S8535를 사용하였다. 주 제어기에 탑재된 프로그램 흐름도는 그림 6과 같다.

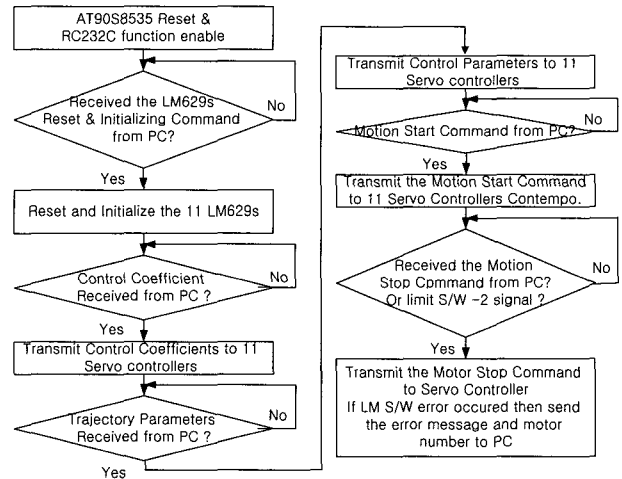


그림 6. 주 제어기의 프로그램 흐름도  
Fig. 6. Program flow-chart of main controller

#### V. 사용자 인터페이스

사용자 인터페이스 프로그램은 비주얼베이직으로 개발되었으며 시스템을 동작시키는 순서는 표 2에 나타난 바와 같이 폴의 위치가 결정되면 동작시킬 모터를 지정한다. 동작 시키고자하는 모터에 대한 설정이 지정된 후에 주제어기와 PC와의 RS-232 통신설정을 하고 모터의 위치를 초기화한 후에 데이터를 전송을 수행하여 시스템의 동작을 지시한다. 이러한 목적으로 설계된 화면은 그림 7과 같다. 특히 기계적 파라미터(폴 간격, 최대 허용 변위, 스크류의 피치 등)를 설정할 수 있도록 하였으며 제어 파라미터를 사용자가 손쉽게 변화시킬 수 있도록 하였다. 구체적인 단계별 설정화면은 생략한다. 개발된 시스템의 각 부분과 기계구조물은 다음 그림 8, 9, 10, 11과 같다.

표 2. 시스템 동작 순서

Table 2. Operation order of the system

| Step | 동작 내용     | 비 고                                 |
|------|-----------|-------------------------------------|
| 1    | 폴의 위치 결정  | 자동/수동, 다곡률/단곡률                      |
| 2    | 동작 모터 지정  | 1 ~ 11번                             |
| 3    | 통신포트의 초기화 | RS232C, PC : Main controller        |
| 4    | 모터위치 초기화  | 폴의 수평 세팅                            |
| 5    | 제어파라미터 세팅 | PC -> Main controller<br>-> Drivers |
| 6    | 동작 개시명령   | Motion Start                        |
| 7    | 전체 모터 정지  | 모든 모터를 정지                           |



그림 7. 설계된 사용자 인터페이스 주화면

Fig. 7. The designed main screen of the user interface program

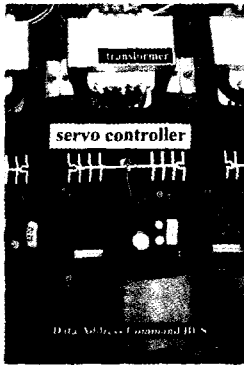


그림 8. 주제어기

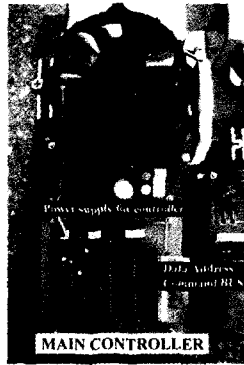


그림 9. 서보 드라이버

Fig. 8. Main controller Fig. 9. Servo-driver



그림 10. 전체 제어시스템

Fig. 10. Total control system

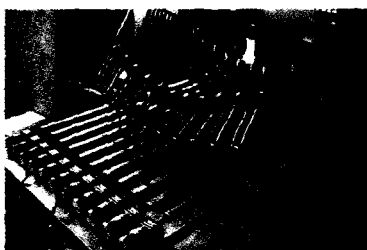


그림 11. 개발된 기계시스템과 제어시스템

Fig. 11. The developed control system and mechanical frame

## VI. 결 론

본 연구에서는 곡면 강화유리 생산 시스템 설계의 기본 단계로서 곡면 틀 성형기의 자동화 부분에 관한 연구이다. 제안된 시스템은 기존의 단순한 곡면만을 만드는 단점과 틀의 재사용이 불가능하다는 단점을 보완하여 다양한 형태의 곡면모양을 간단한 조작으로 성형할 수 있으며 또한 반복하여 사용할 수 있다. 그리고 이 시스템의 개발로 고가의 수입장비를 대체하는 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 앞으로의 연구는 개발된 시스템에 공기 냉각장치와 진동장치를 부착함으로써 강화유리를 생산할 수 있도록 하는 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 부 록

### 1) 단일 편 곡률모드

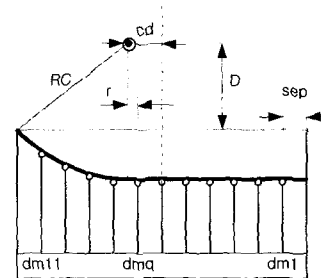


그림 12. 단일 편 곡률모드

Fig. 12 Biased one curvature mode

그림 12에서  $Quo(\frac{cd}{SEP}) = q$ ,  $Rem(\frac{cd}{SEP}) = r$ 로 놓고 계산식을 유도하면 다음과 같다. 여기서  $Quo(\cdot)$ 는 몫을,  $Rem(\cdot)$ 는 나머지를 나타낸다. 이 경우는 곡률중심이 좌반측에 위치한 경우이다.

$$D = \sqrt{RC^2 - (6SEP - cd)^2} \quad (7)$$

$$dmi = \begin{cases} RC - D, & i \leq q \\ \sqrt{RC^2 - \{(SEP - r) + (i - q - 7) \cdot SEP\}^2} - D, & i > q \end{cases} \quad (8)$$

### 2) 비대칭 두 곡률모드

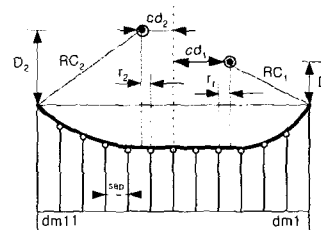


그림 13. 비대칭 두 곡률모드

Fig. 13. Asymmetric two curvature mode

그림 13에서  $Quo\left(\frac{cd_1}{SEP}\right) = q_1$ ,  $Rem\left(\frac{cd_1}{SEP}\right) = r_1$ ,  
 $Quo\left(\frac{cd_2}{SEP}\right) = q_2$ ,  $Rem\left(\frac{cd_2}{SEP}\right) = r_2$  로 놓으면

$$D_1 = \sqrt{RC_1^2 - (6SEP - cd_1)^2} \quad (9)$$

$$D_2 = \sqrt{RC_2^2 - (6SEP - cd_2)^2} \quad (10)$$

이며 중심 폴을 기준으로 구분하여 유도한다.

if  $i \geq 6$ ,

$$dmi = \begin{cases} RC_2 - D_2, & 6 \leq i \leq (q_2 + 6) \\ \sqrt{RC_2^2 - \{(SEP - r_2) + (i - q_2 - 7)SEP\}^2} - D_2, & i > (q_2 + 6) \end{cases} \quad (11)$$

if  $i \leq 6$

$$dmi = \begin{cases} RC_1 - D_1, & (5 - q_1) < i \leq 6 \\ \sqrt{RC_1^2 - \{(SEP - r_1) + (5 - q_1 - i) \cdot SEP\}^2} - D_1, & i \leq (5 - q_1) \end{cases} \quad (12)$$

단,  $dm(q_2 + 6) = dm(6 - q_1)$ 가 되어야 한다.

### 3) 대칭 두 곡률모드

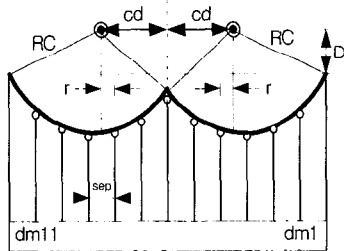


그림 14. 대칭 두 곡률모드

Fig. 14. Symmetric two curvature mode

그림 13에서  $Quo\left(\frac{cd}{SEP}\right) = q$ ,  $Rem\left(\frac{cd}{SEP}\right) = r$ 로 놓으면

$$D = \sqrt{RC^2 - (6SEP - cd)^2} \quad (13)$$

이며 중심 폴을 기준으로 구분하여 유도한다.

if  $i \geq 6$ ,

$$dmi = \begin{cases} \sqrt{RC^2 - \{(6 + q - i)SEP + r\}^2} - D, & 6 \leq i \leq (6 + q) \\ \sqrt{RC^2 - \{(SEP - r) + (i - q - 7)SEP\}^2} - D, & i > (6 + q) \end{cases} \quad (14)$$

if  $i < 6$ ,

## 참고문헌

- [1] G. F. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeini, "Feedback control of dynamic system", Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- [2] S. Omatu, "PID control by neural networks and its applications", Proc. of the 2nd Asian Control Conference, Seoul, pp. 665-668, 1997.
- [3] P. Pannil, P. Julsereewong, P. Ukakimaparn, and K. Tiraseath, "Automatic PID controller parameter analyzer", Proc. of the 14th KACC, pp. 288-291, 1999.
- [4] 이상용, 이명의, 김대우, 권오규, "계수추정법을 이용한 PID 자동동조 제어기 설계", Proc. of the 14th KACC, pp. 82-85, 1999.
- [5] J. K. Park, Y. C. Lim, K. Y. Cho, Y. J. Ryoo, "Autotuning fuzzy PID controller for position control of DC servo motor", KACC, pp. 257-262, 1994.
- [6] 이수훈, 정순현, "유전자 알고리즘을 사용한 PID제어기의 자동동조", 한국신호처리·시스템학회 논문지, 제 3권, 2호, pp. 71-75, 2002.
- [7] "LM628 Programming Guide", National Semiconductor, 1999.
- [8] "LMD18200/18201 3A, 55V H-Bridge", National Semiconductor, 1999.
- [9] "8-bit AVR microcontroller with 8k bytes in-system programmable flash: AT90S8535, AT90LS8535", National Semiconductor, 1999.
- [10] 김철오, 임규만, 박생하, "예제로 배우는 AVR", 성안당, 2001.



양 근 호 (Keun-Ho Yang)

正會員

1989년 전북대학교 전자공학과(공학사)

1991년 전북대학교 전자공학과(공학석사)

1999년 전북대학교 전자공학과(공학박사)

1995~현재 한려대학교 멀티미디어정보통신공학과

관심분야 : 영상신호처리 및 영상통신, 의료영상처리, 디지털신호처리 및 응용