

잉여 관절 콤플라이언스를 활용하는 평면형 3자유도 메카니즘의 RCC 특성분석

Analysis On RCC Characteristics Of A Planar 3 Degrees-Of-Freedom Mechanism With Redundant Joint Compliances

김희국*, 이준용*, 이병주**

* 고려대학교 제어계측공학과(Tel: 0415-60-1443; Fax: 0415-865-1820)

** 한양대학교 제어계측공학과(Tel: 0345-400-5218; Fax: 0345-406-6639)

Abstract : In this work, we investigate the characteristics of output compliance matrix of a planar 3 degree-of-freedom parallel mechanism when joint compliances are attached to the mechanism redundantly. It is shown by simulation that by attaching redundant joint compliances symmetrically to the mechanism, the translational and rotational compliances can be arbitrarily modulated within some ranges. This property could be effectively used in the control of the compliance characteristics of actively adjustable RCC devices.

Keywords : Remote Center Compliance(RCC), Joint Compliance(관절 콤플라이언스), Parallel Mechanism(병렬 메카니즘), Assembly(조립)

1. 서론

일반 조립작업에 있어서 활용되는 자동화 기기 또는 로봇 시스템의 조립 제한된 정밀도, 조립부품의 불균일성, 작업지지의 오차 등으로 인하여 조립작업에 많은 문제가 발생되며 이를 극복하기 위하여 힘/토크 센서를 활용하는 제어기법의 개발, 콤플라이언스 기기를 활용하는 방법 등 많은 다양한 기법들이 소개되어 활용되고 있다. 특히, 콤플라이언스 기기를 활용하는 방법은 경제적인 측면에서 뿐만 아니라 조립시간의 단축측면에서도 매우 우수한 것으로 알려져 있으며 특히, RCC(remote center compliance) 콤플라이언스 기기는 기존의 여러 콤플라이언스 기기들에 비하여 그 성능이 매우 우수한 것으로 확인되고 있다[4]. 그러나, 현존하는 대부분의 RCC 콤플라이언스 기기들은 구조물의 변형에 의존하여 제작되어 있으므로 다양한 작업조건에 따라 요구되는 RCC점에서의 콤플라이언스의 크기를 변화할 수 없는 구조를 가지고 있다[5].

이러한 문제를 극복하기 위하여 최근에 본 연구자들은 관절 콤플라이언스만을 활용하는 평면형 3자유도 메카니즘과 구형 3자유도 메카니즘의 RCC특성에 관하여 조사하였으며 이 두 메카니즘들은 서로 매우 유사한 RCC특성을 나타내는 것을 확인하였다[3,6]. 간략하게 평면형 3자유도 메카니즘의 경우에 관한 연구 결과를 요약하면 메카니즘이 대칭의 기구학적 인자들을 가지며(즉, 각 부속체인에 있어서 대응되는 링크 길이가 같은 경우) 동일한 크기의 관절 콤플라이언스가 대칭의 위치에 있는 세 개의 관절들에 부착되면, 대칭형상에서 메카니즘의 이동관의 중앙점에 RCC점이 존재하며 링크길이와 관절 콤플라이언스의 크기 변화에 무관하게 두 선형출력방향으로의 콤플라이언스는 항상 같은 값을 가지고 있다는 결과를 확인할 수 있었다. 그러나, 세 개의 관절 콤플라이언스를 활용한 경우에는 관절 콤플라이언스의 크기를 증감시킴으로써 작업공간에서 선형방향과 회전방향으로의 출력 콤플라이언스의 크기를 비례적으로는 조절할 수 있지만 독립적으로는 조절할 수 없다는 단점이 있다. 그러나, 병렬형 구조를 가지는 메카니즘을 활용하기 때문에 관절 콤플라이언스

를 부착할 잉여의 관절들이 있으며 본 연구에서는 이러한 잉여 관절에 다른 크기의 콤플라이언스를 부착함으로써 선형방향과 회전방향으로의 출력 콤플라이언스의 크기를 독립적으로 조절할 수 있는 방법론에 대하여 기술한다.

본 논문의 구성은 다음과 같이 요약된다. 먼저, 평면형 3자유도 메카니즘의 기구학에 대하여 기술하고 잉여의 관절 콤플라이언스에 관한 출력 콤플라이언스 모델을 유도한다. 그리고 잉여관절에서의 콤플라이언스 크기의 변화가 선형방향과 회전방향의 출력 콤플라이언스에 어떠한 효과를 나타내는가에 관한 관계식을 유도하고 시뮬레이션을 통하여 잉여 콤플라이언스의 장점을 확인한다.

2. 병렬구조 평면형 3 자유도 메카니즘의 콤플라이언스 특성에 관한 해석

본 연구에서 조사하려는 메카니즘은 Fig. 1과 같이 지면과 플랫폼 사이에 세 개의 관절과 두 개의 링크로 구성되는 세 개의 직렬형 부속체인으로 이루어진다. r 번째 직렬형 부속체인에서 지면으로부터 n 번째 관절변수를 ϕ_n 이라고 하자. 그리고 r 번째 직렬형 부속체인의 n 번째 링크의 길이를 l_n 이라고 하자. 이 때 플랫폼 중앙의 위치를 나타내는 출력벡터를 $\mathbf{u} = (x \ y \ \phi)^T$, 그리고 r 번째 부속체인의 관절변수벡터를 $\phi = (\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3)^T$ 라고 할 때, 이들 사이의 일차 미분관계식은 다음과 같다[2].

$$\dot{\mathbf{u}} = [G_r^u] \dot{\phi}, \quad r=1,2,3. \quad (1)$$

각 부속체인의 일차 미분계수 $[G_r^u]$ 가 비특이할 때 역관계식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\phi} = [G_r^u]^{-1} \dot{\mathbf{u}}, \quad (2)$$

이 식으로부터 각 체인의 첫번째 관절변수들로 이루어진 벡터 $\phi_b = ({}_1\phi_1 \ 2\phi_1 \ 3\phi_1)^T$ 를 입력관절 변수벡터라고 할 때 출력벡터와의 입출력 미분관계식은 다음과 같이 주어지며

$$\dot{\phi}_b = [G_u^b] \dot{u}, \quad (3)$$

여기서

$$[G_u^b] = \begin{bmatrix} [{}_1G_{\phi_1}^u]^{-1} \\ [{}_2G_{\phi_1}^u]^{-1} \\ [{}_3G_{\phi_1}^u]^{-1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$[{}_iG_{\phi_1}^u]^{-1}$ 는 $[{}_iG_{\phi_1}^u]$ 의 첫번째 행을 의미한다. 식 (4)의 역관계식은 아래와 같이 구해진다.

$$\dot{u} = [G_b^u] \dot{\phi}_b \quad (5)$$

여기서

$$[G_b^u] = [G_u^b]^{-1}. \quad (6)$$

이와 동일한 방법으로 각 체인의 두번째 관절변수들로 이루어진 벡터 $\phi_m = ({}_1\phi_2 \ 2\phi_2 \ 3\phi_2)^T$ 와 각 체인의 세번째 관절변수들로 이루어진 벡터 $\phi_t = ({}_1\phi_3 \ 2\phi_3 \ 3\phi_3)^T$ 의 경우에도 위와 같은 방법으로 구해진 각각에 해당하는 일차 기구학적 영향계수(자코비안)은 다음과 같으며

$$\dot{\phi}_m = [G_u^m] \dot{u} \quad (7)$$

$$\dot{\phi}_t = [G_u^t] \dot{u} \quad (8)$$

여기서

$$[G_u^m] = \begin{bmatrix} [{}_1G_{\phi_2}^u]^{-1} \\ [{}_2G_{\phi_2}^u]^{-1} \\ [{}_3G_{\phi_2}^u]^{-1} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$[G_u^t] = \begin{bmatrix} [{}_1G_{\phi_3}^u]^{-1} \\ [{}_2G_{\phi_3}^u]^{-1} \\ [{}_3G_{\phi_3}^u]^{-1} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

3. 출력 콤플라이언스 모델

$\tau = (\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_n)^T$ 와 $f = (f_1 \ f_2 \ \dots \ f_m)^T$ 를 각각 입력관절에서의 토크벡터와 RCC점에 가해진 외력벡터라고 하자. 이 때 가상 일의 정리로부터

$$d\phi_a^T \tau = du^T f. \quad (11)$$

이 성립하며 식 (5)에 대한 미분관계식을 식 (11)에 대입하여 정리하면

$$\tau = [G_a^u]{}^T f. \quad (12)$$

을 얻는다. 입력관절벡터 $\phi_a = ({}_1\phi_1 \ 2\phi_1 \ 3\phi_1)^T$ 의 콤플라이언스 행렬을

$$[C_{\phi\phi}] = \begin{bmatrix} C_{1\phi_1} & 0 & 0 \\ 0 & C_{2\phi_1} & 0 \\ 0 & 0 & C_{3\phi_1} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

라고 할 때 다음의 관계식으로부터

$$\begin{aligned} \delta u &= [G_a^u] \delta \phi_a \\ &= [G_a^u][C_{\phi\phi}] \tau \\ &= [G_a^u][C_{\phi\phi}][G_a^u]{}^T f \\ &= [C_{uu}] f \end{aligned} \quad (14)$$

출력 콤플라이언스는

$$[C_{uu}] = [G_a^u][C_{\phi\phi}][G_a^u]{}^T \quad (15)$$

로 표현됨을 알 수 있다. 식 (14)의 강성도행렬은 다음과 같이 역관계식으로 표현된다

$$[K_{uu}] = ([G_a^u][C_{\phi\phi}]^{-1}[G_a^u]{}^T)^{-1} \quad (16)$$

여기서

$$[K_{uu}] = [C_{uu}]^{-1}, \quad (17)$$

$$[K_{\phi\phi}] = [C_{\phi\phi}]^{-1}. \quad (18)$$

한편, RCC점에서의 출력 콤플라이언스 행렬은 항상대칭행렬이어야 하므로 다음과 같이 식 (15)의 비대각 요소에 대한 세 개의 관계식이 만족되어야 한다.

$$\begin{bmatrix} C_{xy} \\ C_{xt} \\ C_{yt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{\phi_1} \\ C_{\phi_2} \\ C_{\phi_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

이 식에서 행렬 A 의 디터미넌트가 0이 되어야 하며 이러한 조건을 만족시키는 충분조건은 메카니즘이 항상 대칭의 형상을 유지하고 관절 콤플라이언스의 크기가 같은 경우에 성립한다는 것은 이미 세 개의 기저 관절에 콤플라이언스를 부착한 평면형 3자유도 메카니즘의 해석을 통하여 확인된 바 있다[2]. 즉, Fig. 1의 평면형 3자유도 메카니즘의 인자들이 다음과 같은 조건을 만족시키는 경우

$${}_2\phi_1 = {}_1\phi_1 + \frac{2}{3}\pi, \quad {}_3\phi_1 = {}_1\phi_1 + \frac{4}{3}\pi, \quad {}_1\phi_2 = {}_2\phi_2 = {}_3\phi_2,$$

$${}_1\phi_3 = {}_2\phi_3 = {}_3\phi_3, \quad C_{\phi} = C_{\phi_1} = C_{\phi_2} = C_{\phi_3} \quad (20)$$

메카니즘의 유동판의 중앙점에서의 출력 콤플라이언스행렬은 대각성분만을 가지며 선형방향과 회전방향으로의 콤플라이언스는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$C_{xxb} = C_{yyb} = \frac{2I_1^2(S_2^1)^2}{3} C_{\phi}, \quad (21)$$

$$C_{\omega\omega} = \frac{I_1^2(S_2^1)^2}{3I_3^2(S_3^1)^2} C_{\phi}, \quad (22)$$

식 (21)에서와 같이 두 선형방향으로의 출력 콤플라이언스는 항상 같으며 ($C_{xxb} = C_{yyb}$) 선형방향과 회전방향으로의 출력 콤플라이언스는 모두 메카니즘의 링크길이, 현재의 형상, 그리고 입력 콤플라이언스의 크기에 의해 결정된다는 사실을 알 수 있다. 또한, 메카니즘이 대칭의 형상을 유지한다는 가정을 하고 있으므로 임의의 한 관절변수가 결정되면 메카니즘의 전체 형상이 결정되는 것을 의미하므로 식 (21)과 (22)로부터 선형방향과 회전방향으로사이의 출력 콤플라이언스비는 다음과 같은 관계를 지니고 있음을 알 수 있다.

$$\frac{C_{xxb}}{C_{\omega\omega}} = \frac{I_3^2(S_3^1)^2}{2}. \quad (23)$$

한편 두번째와 세번째 관절콤플라이언스만을 활용하는 경우에도 식 (20)의 조건을 만족하는 인자들과 대칭형상을 만족시키는 경우 위와 동일한 해석을 수행하면 각각 식 (24)-(26)과 식 (27)-(30)과 같이 메카니즘의 유동판의 중앙점에 위치한 RCC점에서의 콤플라이언스에 관한 관계식을 얻을 수 있다.

$$C_{xxm} = C_{ymm} = \frac{2l_1^2 l_2^2 (S_2^1)^2}{3(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 C_2^1)} C_{\phi_m} \quad (24)$$

$$C_{\phi\phi m} = \frac{l_1^2 l_2^2 (S_2^1)^2}{3(l_2 l_3 S_3^1 + l_1 l_3 S_{23}^1)^2} C_{\phi_m} \quad (25)$$

$$\frac{C_{xxm}}{C_{\phi\phi m}} = \frac{2(l_2 l_3 S_3^1 + l_1 l_3 S_{23}^1)^2}{(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 C_2^1)} \quad (26)$$

$$C_{xxt} = C_{yyt} = \frac{2}{3} l_2^2 (S_2^1)^2 C_{\phi_t} \quad (27)$$

$$C_{\phi\phi t} = \frac{l_2^2 (S_2^1)^2}{3(l_2 S_2^1 + l_3 S_{23}^1)^2} C_{\phi_t} \quad (28)$$

$$\frac{C_{xxt}}{C_{\phi\phi t}} = 2(l_2 S_2^1 + l_3 S_{23}^1)^2 \quad (29)$$

식 (23), (26), 그리고 (29)로부터 첫번째, 두번째, 세번째 관절 콤플라이언스를 활용하는 경우 서로 다른 $C_{xxt}/C_{\phi\phi t}$ ($i = b, m, t$)의 값을 나타낸다는 것을 확인할 수 있으며 이 때문에 모든 관절에 콤플라이언스를 활용하는 경우 출력 콤플라이언스의 비인 $C_{xxt}/C_{\phi\phi}$ 의 값을 변화시킬 수 있는 범위가 존재한다는 것을 추론할 수 있다. 따라서, 메카니즘이 수행하는 작업조건에 따라 다양한 선형방향과 회전방향으로의 출력 콤플라이언스의 비가 임의로 조절할 수 있는 기능이 부여됨을 알 수 있다.

4. 잉여 관절 콤플라이언스를 가지는 경우 RCC점에서의 콤플라이언스 모델

각 직렬 부속체인의 첫번째, 두번째, 그리고 세번째 관절변수 벡터(ϕ_b, ϕ_m, ϕ_t)에 대한 각각의 강성 행렬은 다음과 같다.

$$[K_{ii}] = \begin{bmatrix} k_{i,\phi} & 0 & 0 \\ 0 & k_{i,\phi} & 0 \\ 0 & 0 & k_{i,\phi} \end{bmatrix} \quad i = b, m, t \quad (30)$$

평형상태로부터 미소변위가 발생하였을 때 이들 콤플라이언스로 인해 생성되는 잠재 에너지는 다음과 같으며

$$\begin{aligned} P.E. &= \frac{1}{2} \sum_{i=b}^3 \{d\phi_i^T [K_{ii}] d\phi_i\} \\ &= \frac{1}{2} du^T \sum_{i=b}^3 \{[G_u^i]^T [K_{ii}] [G_u^i]\} du \quad (31) \\ &= \frac{1}{2} du^T [K_{uu}] du, \end{aligned}$$

이들로부터 출력 강성도행렬은 다음과 같이 구해진다.

$$[K_{uu}] = \sum_{i=b}^3 \{[G_u^i]^T [K_{ii}] [G_u^i]\} \quad (32)$$

식 (32)에서 첫번째, 두번째, 그리고 세번째 관절벡터의 강성행렬이 대각행렬이며 각 대각요소의 크기가 같다고 하면 다음과 같이 표현되며

$$[K_{uu}] = \sum_{i=b}^3 (k_i [G_u^i]^T [G_u^i]) \quad (33)$$

여기서

$$[K_{uu}]_{m,n} = \sum_{i=b}^3 K_i \sum_{k=1}^3 [G_u^i]_{k,m} [G_u^i]_{k,n}, \quad m, n = 1, 2, 3 \quad (34)$$

이다. 특히, 식 (20)과 같은 메카니즘이 대칭의 형상에 있는 경우에는 식 (21)과 (22), 식 (24)와 (25), 식 (27)과 (28)로부터 전체 출력 강성행렬 $[K_{uu}]$ 의 비대각행렬 요소의 값은 0이며 두 선형방향으로의 출력 강성계수는 항상 같다는 사실($k_{xx} = k_{yy}$) 알 수 있다. 따라서 식 (16)과 (17)에서와 같이 강성행렬과 콤플라이언스와의 역관계식을 이용하면 출력 강성계수와 관절 강성계수사이의 관계식은 다음과 같이 출력 콤플라이언스와 관절 콤플라이언스사이의 관계식으로 정리된다.

$$K_u = [A] K_{\phi} \quad (35)$$

여기서

$$K_u = [1/C_{xx} \ 1/C_{yy}]^T \quad (36)$$

$$K_{\phi} = [1/C_{\phi_b} \ 1/C_{\phi_m} \ 1/C_{\phi_t}]^T \quad (37)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} C_{\phi_b}/C_{xxb} & C_{\phi_m}/C_{xxm} & C_{\phi_t}/C_{xxt} \\ C_{\phi_b}/C_{\phi\phi b} & C_{\phi_m}/C_{\phi\phi m} & C_{\phi_t}/C_{\phi\phi t} \end{bmatrix} \quad (38)$$

식 (36)으로부터 K_{ϕ} 는

$$K_{\phi} = [A]^+ K_u + ([I] - [A]^+ [A]) \epsilon \quad (39)$$

와 같이 구해지는데, 여기서 $[A]^+$ 는 $[A]$ 행렬에 대한 의사역 행렬을 의미하고 식 (39)의 오른쪽의 첫번째항은 minimum norm 해를 나타내고 두번째항은 영공간을 나타낸다. 이와 같이 식 (39)의 두번째 항은 출력 강성도에 아무런 영향을 미치지 않지만 K_{ϕ} 의 값에는 영향을 주기 때문에 실제 메카니즘의 설계에서는 적당한 ϵ 을 선정하여 콤플라이언스 민감도를 향상시키거나 다른 목적으로 다양하게 활용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 식 (39)로부터 첫번째, 두번째, 그리고 세번째 관절 콤플라이언스 ($C_{\phi_b}, C_{\phi_m}, C_{\phi_t}$)중에서 두 개의 독립적인 관절 콤플라이언스만을 사용하여도 주어진 출력 콤플라이언스를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 한 예로서, 실제설계에 있어 $C_{\phi_b}, C_{\phi_m}, C_{\phi_t}$ 들 중 두 개의 값이 동일한 값을 갖는다면 $[A]$ 의 해당 열을 합함으로서 식 (38)은 2×2 크기의 행렬이 되며 이로부터 모든 관절 콤플라이언스의 값들이 결정될 수 있다. 즉, $C_{\phi_m} = C_{\phi_t}$ 로 가정하는 경우 식 (36)은

$$K_u = [A^*] K_{\phi}^* \quad (40)$$

로 표현되며, 여기서

$$K_{\phi}^* = [1/C_{\phi_b} \ 1/C_{\phi_m}]^T \quad (41)$$

$$[A^*] = \begin{bmatrix} C_{\phi_b}/C_{xxb} & C_{\phi_m}/C_{xxm} + C_{\phi_t}/C_{xxt} \\ C_{\phi_b}/C_{\phi\phi b} & C_{\phi_m}/C_{\phi\phi m} + C_{\phi_t}/C_{\phi\phi t} \end{bmatrix} \quad (42)$$

이다. 그러므로 관절 콤플라이언스의 값은

$$K_{\phi}^* = [A^*]^{-1} K_u \quad (43)$$

로 구해진다. 이와 같이 식 (39)나 (43)로부터 메카니즘의 링크 길이와 형상이 결정되었을 때 요구되는 출력 강성행렬을 발생시키기 위한 관절에서의 강성계수를 구할 수 있다.

5. 출력 콤플라이언스의 크기변조에 관한 시뮬레이션

본 절에서는 시뮬레이션을 통하여 잉여 관절 콤플라이언스를 부착한 경우에 RCC점에서의 콤플라이언스 값의 변화에 대한 전반적인 특성에 관하여 알아보려고 한다.

먼저, 메카니즘이 $\psi=0^\circ$ 의 방위각을 가지며 대칭을 유지하는 형상에 대하여 살펴본다.

Figure 2(a)-2(b)는 각각 링크길이가 $l_1=0.9$, $l_2=0.8$, $l_3=0.3$ 인 메카니즘이 $\psi=0^\circ$ 이며 대칭인 형상에서 첫번째 관절 콤플라이언스가 단위크기를 갖는다는 가정하에, 두번째와 세번째 관절 콤플라이언스의 크기(C_{ϕ_x} 와 C_{ϕ_y})를 변화하는 경우에 대한 선형방향과 회전방향으로의 출력 콤플라이언스의 크기를 나타낸다. 역으로, Fig. 3(a)-3(c)는 각각 링크길이가 $l_1=0.9$, $l_2=0.8$, $l_3=0.3$ 인 메카니즘이 $\psi=0^\circ$ 이며 대칭인 형상에서 선형 방향과 회전방향으로의 출력 콤플라이언스가 주어졌을 때 식 (40)에서 minimum norm해만을 취한 첫번째, 두번째, 세번째 관절 콤플라이언스의 크기를 나타내는 그림이다. 이러한 그림들에서 관절 콤플라이언스가 음수인 영역은 물리적으로 수동적인 관절 콤플라이언스로는 발생시킬 수 없는 영역을 의미하므로 Fig. 3(a)-3(c)에서 공통적으로 양수인 영역만이 잉여의 관절 콤플라이언스의 크기를 변화할 때 선형방향과 회전방향으로의 안정된 출력 콤플라이언스를 변화시킬 수 있는 영역을 나타낸다는 것을 알 수 있다. Figure 2와 3으로부터 관절 콤플라이언스가 양수인 경우 항상 출력 콤플라이언스는 양수이지만 출력 콤플라이언스가 양수인 경우 관절 콤플라이언스는 반드시 양수라는 것이 보장되지 않는다는 사실을 확인할 수 있다[1].

6. 결론

본 논문에서는 평면형 3 자유도 메카니즘에 세 개의 단위크기를 갖는 관절 콤플라이언스를 첫번째, 두번째, 세번째 관절에 각각 부착하는 경우들에 대하여 RCC점에서의 콤플라이언스 특성에 관하여 조사하였다. RCC점에서의 선형방향과 회전방향으로의 콤플라이언스비는 이러한 각각의 경우에 고정된 값을 갖지만 이들은 서로 다른 값을 나타낸다.

그러나, 실제 조립작업의 경우 작업환경에 따라 RCC 점에서의 다양한 콤플라이언스의 크기가 요구된다. 그러나 세 개의 관절 콤플라이언스를 이용하는 경우에는 RCC 점에서의 요구되는 임의의 출력 콤플라이언스를 발생시킬 수 없다. 그러므로, 본 연구에서는 메카니즘의 나머지 모든 관절에 콤플라이언스를 추가로 부착한 경우에 RCC점에서의 선형방향과 회전방향으로 각각 임의의 크기의 콤플라이언스를 발생시킬 수 있음을 제시하였고 시뮬레이션을 통하여 RCC점에서의 콤플라이언스의 변조특성에 관하여 분석하였다.

이 밖에도 잉여 관절 콤플라이언스를 사용하는 경우 내력(internal force)으로 인하여 발생하는 상반효과로 인한 강성효과가 발생하는데 이러한 현상을 활용하여 RCC점에서의 임의의 출력 콤플라이언스를 발생시키는 연구도 본 연구와 병행하여 수행되었다[7].

참고문헌

- [1] Cutkosky, M.R., and Kao, Imin, 1989, "Computing and Controlling the Compliance of a Robotic Hand," IEEE transaction. of robotics and automation, vol. 5, no. 2, pp. 151-165, 1989.
- [2] R.A.Freeman and D. Tesar, "Dynamic Modeling of Serial and Parallel Mechanisms/Robotic Systems, Part I-Methodology, Part II-Applications," Proceedings of 20th ASME Mechanisms Conference, Orlando, FL, 1988.

[3] W.K.Kim, J.Y.Lee, and B.J.Yi, "Analysis of a Planar 3 Degree-of-Freedom Adjustable Compliance Mechanism," KSME Journal, Vol. 10, No.3, 1996.

[4] D.E.Whitney, "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 104, mar. 1982, pp. 65-77.

[5] D.E.Whitney, "Remote Center Compliance," in *Encyclopedia of Robotics System and Control*, vol 2, pp. 1316-1324, edited by J.J. Diponio and Y. Hasegawa, published by Industrial Training Corporation, 1986.

[6] 김 회 국, 김 동 구, 이 병 주, "평면형/구형 3자유도 병렬 메카니즘의 RCC특성," 대한 기계학회 추계학술회의, 1994, pp. 624-629.

[7] 이 병 주, 김 회 국, 이 준 용, "잉여의 관절강성도를 활용하는 평면형 3자유도 RCC메카니즘의 상반효과로 인한 강성도 특성," 추계 제어.자동화.시스템 학술회의, 1996.

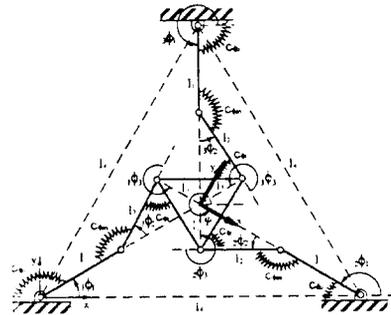


그림 1. 평면형 3 자유도 메카니즘.

Figure 1. A Planar 3 Degrees of Freedom Mechanism.

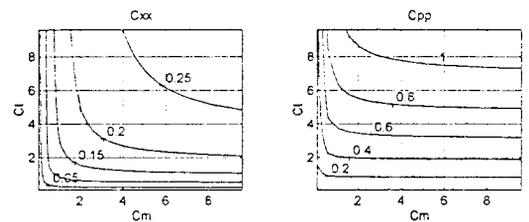


그림 2. C_{ϕ_x}/C_{ϕ_y} 와 C_{ϕ_y}/C_{ϕ_x} 에 대한 출력 콤플라이언스 등고선도(단, $C_{\phi_x}=1$, $l_1=0.9$, $l_2=0.8$, $l_3=0.3$)

Figure 2. Output Compliances Contour Plot wrt. C_{ϕ_x}/C_{ϕ_y} vs.

C_{ϕ_y}/C_{ϕ_x} (for $C_{\phi_x}=1$, $l_1=0.9$, $l_2=0.8$, $l_3=0.3$)

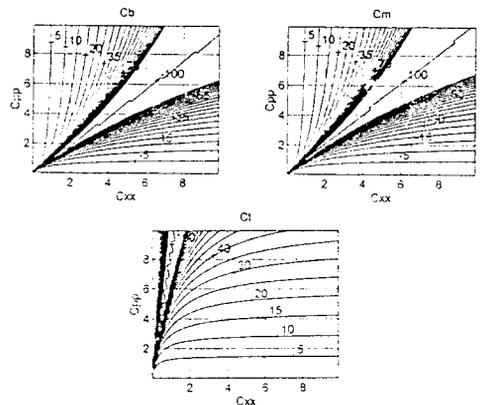


그림 3. C_{xx} 와 C_{ϕ_x} 에 대한 관절 콤플라이언스 등고선도
(단, $l_1=0.9$, $l_2=0.8$, $l_3=0.3$)

Figure 3. Joint Compliances Contour Plots wrt C_{xx} vs. C_{ϕ_x}

(for $l_1=0.9$, $l_2=0.8$, $l_3=0.3$)