

평면형 3 자유도 RCC 메카니즘의 상반효과로 인한 강성 특성 분석

Analysis On Characteristics of Antagonistic Stiffness of the Planar 3
Degrees-Of-Freedom RCC Mechanism

이 병주, 김희국**, 이준용**

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

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

Abstract : In this work, an effective stiffness generated by internal loading for a planar 3 degrees of freedom RCC mechanism is investigated. For this purpose, the internal kinematic analysis and antagonistic stiffness modeling for this mechanism are performed. It is shown that the antagonistic stiffness could be effectively created at the center of the mechanism in its symmetric configuration.

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

1. 서론

현존하는 대부분의 RCC 콤플라이언스 기구들은 구조물의 변형에 의존하여 제작되었으며 다양한 작업조건에 따라 요구되는 RCC점에서의 콤플라이언스 크기를 변화할 수 없는 구조를 가지고 있다[3]. 이러한 문제를 극복하기 위하여 최근에 관절 콤플라이언스만을 활용하는 평면형 3 자유도 메카니즘의 RCC특성에 관한 연구가 수행되었으며[2] 이에 관한 결과를 요약하면 다음과 같다. 즉, 각 부속체인에 있어서 대응되는 링크 길이가 같으며, 동일한 크기의 관절 콤플라이언스가 대칭의 위치에 있는 관절들에 부착되면 메카니즘이 대칭형상을 유지하는 한 메카니즘의 유동판의 중앙점에 RCC점이 존재한다는 것이다. 그리고 링크길이와 관절 콤플라이언스의 크기와 같은 인자들의 변화에 무관하게 두 선형출력방향으로의 콤플라이언스는 항상 같은 값을 가지고 있다는 것이다.

그러나, 주어진 형상에서 관절 콤플라이언스의 크기를 증감시킴으로서 선형방향과 회전방향으로의 출력 콤플라이언스의 크기를 비례적으로는 조절할 수 있지만 서로 독립적으로는 조절할 수 없다는 단점이 있다. 따라서, 병렬형 구조의 잉여 관절에서 다른 크기의 콤플라이언스를 부착함으로써 선형방향과 회전방향으로의 출력 콤플라이언스의 크기를 독립적으로 변화할 수 있는가에 관한 연구가 수행되었다[6]. 또한, 잉여관절 콤플라이언스를 활용하는 경우에는 이들간에 메카니즘의 내력을 활용한 preloading으로 인한 상반강성(antagonistic stiffness)이 발생되는 데[4,5] 본 논문에서는 이로 인한 RCC 점에서의 유효 강성효과에 관하여 살펴본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 평면형 3 자유도 메카니즘의 내부 기구학모델(internal kinematic model)을 구속 내포 방식(constraint embedding method)[1]을 사용하여 구한다. 그리고 내부하중으로 발생하는 상반강성 모델과 이로 인한 RCC점에서의 유효출력강성에 관한 모델을 구하고 RCC점에서 임의의 강성을 발생시키기 위해 소요되는 각 관절에서의 preloading의 크기에 관하여 조사한다. 그리고 이들을 시뮬레이션을 통하여 선형방향과 회전방향으로의 유효강성도에 관하여 조사한다.

2. 내부 기구학 모델

Figure 1의 평면형 3 자유도 메카니즘의 출력속도벡터와 r 번째 직렬 부속체인의 관절속도벡터와의 관계식은

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

로 표현되며 이 식들은 다음과 같이 관절속도변수들에 대한 두 개의 구속관계식으로 나타내어진다.

$$[{}_1 G_a^u] {}_1 \dot{\phi} = [{}_2 G_b^u] {}_2 \dot{\phi} \quad (2)$$

$$[{}_1 G_a^u] {}_1 \dot{\phi} = [{}_3 G_b^u] {}_3 \dot{\phi} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)은 ${}_r \dot{\phi}_a$ 와 ${}_r \dot{\phi}_b$ 를 각각 r 번째 직렬부속체인의 독립속도벡터와 비독립속도벡터를 나타낸다고 할 때 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} [{}_1 G_a] {}_1 \dot{\phi}_a + [{}_1 G_b] {}_1 \dot{\phi}_b \\ = [{}_2 G_a] {}_2 \dot{\phi}_a + [{}_2 G_b] {}_2 \dot{\phi}_b \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} [{}_1 G_a] {}_1 \dot{\phi}_a + [{}_1 G_b] {}_1 \dot{\phi}_b \\ = [{}_3 G_a] {}_3 \dot{\phi}_a + [{}_3 G_b] {}_3 \dot{\phi}_b \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 ${}_r \dot{\phi}_a$, ${}_r \dot{\phi}_b$ 그리고 $\dot{\mathbf{u}}$ 의 크기가 각각 $N_a \times 1$, $N_b \times 1$, N_u 라고 할 때 $[{}_r G_a]$ 와 $[{}_r G_b]$ 는 $N_u \times N_a$ 과 $N_u \times N_b$ 의 크기를 갖는 행렬들로 표현된다. 식 (4)와 식 (5)는 다음과 같은 하나의 행렬식으로 표현할 수 있으며

$$[G_r] \dot{\phi}_b = [G_a] \dot{\phi}_a \quad (6)$$

여기서

$$\dot{\phi}_a = ({}_1 \dot{\phi}_a \quad {}_2 \dot{\phi}_a \quad {}_3 \dot{\phi}_a)^T, \quad (7)$$

$$\dot{\phi}_b = ({}_1 \dot{\phi}_b \quad {}_2 \dot{\phi}_b \quad {}_3 \dot{\phi}_b)^T \quad (8)$$

$$[G_a] = \begin{bmatrix} [{}_1G_a] & -[{}_2G_a] & 0 \\ [{}_1G_a] & 0 & -[{}_3G_a] \end{bmatrix}, \quad (9)$$

그리고

$$[G_p] = \begin{bmatrix} -[{}_1G_p] & [{}_2G_p] & 0 \\ -[{}_1G_p] & 0 & [{}_3G_p] \end{bmatrix} \quad (10)$$

이다. 그러므로 식 (6)으로부터 비독립관절 속도벡터 $\dot{\phi}_p$ 와 독립관절 속도벡터 $\dot{\phi}_a$ 사이의 관계식은

$$\dot{\phi}_p = [G_a^p] \dot{\phi}_a \quad (11)$$

로 표현되며, 여기서

$$[G_a^p] = [G_p]^{-1} [G_a] \quad (12)$$

이다. 한편, 로봇의 출력 가속도벡터와 r 번째 직렬 부속체인의 관절 가속도벡터와의 관계식은

$$\ddot{u} = [{}_rG_p^u] {}_r\ddot{\phi} + {}_r\dot{\phi}^T [H_{\phi\phi}^u] {}_r\dot{\phi} \quad (13)$$

로 표현되며 이 식들도 앞에서와 마찬가지로 다음과 같은 두 셀의 구속관계식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} [{}_1G_p^u] {}_1\ddot{\phi} + [{}_1\dot{\phi}^T [H_{\phi\phi}^u] {}_1\dot{\phi} \\ = [{}_2G_p^u] {}_2\ddot{\phi} + [{}_2\dot{\phi}^T [H_{\phi\phi}^u] {}_2\dot{\phi} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} [{}_1G_p^u] {}_1\ddot{\phi} + [{}_1\dot{\phi}^T [H_{\phi\phi}^u] {}_1\dot{\phi} \\ = [{}_3G_p^u] {}_3\ddot{\phi} + [{}_3\dot{\phi}^T [H_{\phi\phi}^u] {}_3\dot{\phi} \end{aligned} \quad (15)$$

한편, 식 (13)의 오른쪽은 독립관절 변수벡터와 비독립관절 변수벡터를 구분하여 다음과 같이 정리될 수 있으며

$$\begin{aligned} [{}_rG_p^u] {}_r\ddot{\phi} + {}_r\dot{\phi}^T [H_{\phi\phi}^u] {}_r\dot{\phi} \\ = [{}_rG_p] {}_r\ddot{\phi}_a + [{}_rG_p] {}_r\ddot{\phi}_p + \\ [{}_r\dot{\phi}_a^T \quad {}_r\dot{\phi}_p^T] \begin{bmatrix} [{}_rH_{aa}] & [{}_rH_{ap}] \\ [{}_rH_{pa}] & [{}_rH_{pp}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}_r\dot{\phi}_a \\ {}_r\dot{\phi}_p \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $[{}_rH_{aa}]$, $[{}_rH_{ap}]$, $[{}_rH_{pa}]$, $[{}_rH_{pp}]$ 는 각각 $N_u \times (N_a \times N_a)$, $N_u \times (N_a \times N_p)$, $N_u \times (N_p \times N_a)$, 그리고 $N_u \times (N_p \times N_p)$ 의 크기를 갖는다. 이 식을 식 (14)와 식 (15)에 대입한 후 한 식으로 정리하면

$$[G_p] \dot{\phi}_p = [G_a] \dot{\phi}_a + [\dot{\phi}_a^T \quad \dot{\phi}_p^T] [H_{ap}] \begin{bmatrix} \dot{\phi}_a \\ \dot{\phi}_p \end{bmatrix} \quad (17)$$

로 표현되며 여기서

$$[H_{ap}] = \begin{bmatrix} [{}_1H_{aa}] & 0 & 0 & [{}_1H_{ap}] & 0 & 0 \\ 0 & -[{}_2H_{aa}] & 0 & 0 & -[{}_2H_{ap}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [{}_1H_{pa}] & 0 & 0 & [{}_1H_{pp}] & 0 & 0 \\ 0 & -[{}_2H_{pa}] & 0 & 0 & -[{}_2H_{pp}] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} [{}_1H_{aa}] & 0 & 0 & [{}_1H_{ap}] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -[{}_3H_{aa}] & 0 & 0 & -[{}_3H_{ap}] \\ [{}_1H_{pa}] & 0 & 0 & [{}_1H_{pp}] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -[{}_3H_{pa}] & 0 & 0 & -[{}_3H_{pp}] \end{bmatrix}$$

이다. 식 (17)을 정리하면

$$\dot{\phi}_p = [G_a^p] \dot{\phi}_a + \dot{\phi}_a^T [H_{aa}^p] \dot{\phi}_a \quad (19)$$

여기서

$$[H_{aa}^p] = [G_p]^{-1} \cdot \left([[J[G_a^p]^T][H_{ap}]] \begin{bmatrix} J \\ G_a^p \end{bmatrix} \right) \quad (20)$$

3. 상반효과로 인한 강성도 분석

먼저 T_a 와 T_p 를 각각 다음과 같이 독립관절과 비독립관절에서 주어진 토크벡터로 한다.

$$T_a = (T_{a1} \ T_{a2} \ \dots \ T_{a_n})^T, \quad (21)$$

$$T_p = (T_{p1} \ T_{p2} \ \dots \ T_{p_n})^T, \quad (22)$$

그리고 이러한 토크들에 의해 메카니즘이 평형상태를 이룰때 이들 사이에 관계식은 다음과 같이 표현되며

$$T_k = T_a + [G_a^p]^T T_p = 0 \quad (23)$$

이 식에서 T_k 는 내부하중으로 인하여 발생하는 스프링효과와 복원력을 나타내는 힘으로서 평형상태에서는 이러한 힘이 존재하지 않는다. 이 때 식 (23)을 만족시키는 독립관절 토크벡터 T_a 에 대한 비독립관절에서의 토크벡터를 T_{pe} 로 표현한다.

그러나, 시스템에 미소한 변위가 발생되는 경우 식 (23)은 평형위치에 대하여 선형화된 식으로 다음과 같이 표현될 수 있으며

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_k}{\partial \phi_a} d\phi_a = \frac{\partial T_a}{\partial \phi_a} d\phi_a + \frac{\partial}{\partial \phi_a} ([G_a^p]^T T_{pe}) d\phi_a \\ + [G_a^p]^T \left(\frac{\partial T_p}{\partial \phi_p} \right) d\phi_p \end{aligned} \quad (24)$$

여기서,

$$[K_{aa}] = - \frac{\partial T_a}{\partial \phi_a}, \quad (25)$$

$$[K_{aa}^*] = - \frac{\partial}{\partial \phi_a} ([G_a^p]^T T_{pe}) \quad (26)$$

$$[K_{pp}] = - \frac{\partial T_p}{\partial \phi_p} \quad (27)$$

그리고

$$[K_{aa}^e] = - \frac{\partial T_k}{\partial \phi_a}, \quad (28)$$

로 정의되며, $[K_{aa}]$, $[K_{aa}^*]$, $[K_{pp}]$ 와 $[K_{aa}^e]$ 는 각각 독립관절에서의 강성행렬, 상반효과로부터 발생하는 강성행렬, 비독립관절에서의 강성도행렬, 그리고 이러한 모든 강성도행렬을 합한 독립관절에서의 유효 강성행렬을 나타낸다. 한편,

$$\frac{\partial T_p}{\partial \phi_a} = \frac{\partial T_p}{\partial \phi_p} \frac{\partial \phi_p}{\partial \phi_a} = [K_{pp}] [G_a^p] \quad (29)$$

이므로 비독립관절에서의 강성행렬로 인한 독립관절에서의 등가 강성행렬은

$$\begin{aligned} [K_{aa}^p] &= [G_a^p]^T \left(- \frac{\partial \mathbf{T}_p}{\partial \phi_a} \right) \\ &= [G_a^p]^T [K_{pp}] [G_a^p] \end{aligned} \quad (30)$$

로 표현된다. 한편 식 (26)의 $[K_{aa}^*]$ 는

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \phi_a} \left(- \sum_{k=1}^{N_1} \frac{\partial \phi_{pk}}{\partial \phi_{a1}} T_{pk} \right) \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial \phi_a} \left(- \sum_{k=1}^{N_1} \frac{\partial \phi_{pk}}{\partial \phi_{ai}} T_{pk} \right) \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial \phi_a} \left(- \sum_{k=1}^{N_1} \frac{\partial \phi_{pk}}{\partial \phi_{a, N_1}} T_{pk} \right) \end{bmatrix} \quad (31)$$

와 같은 행렬로 표현되는데 이 행렬의 (i, j) 요소는

$$[K_{aa}^*]_{ij} = - \frac{\partial}{\partial \phi_{aj}} \left(\sum_{k=1}^{N_1} \frac{\partial \phi_{pk}}{\partial \phi_{ai}} T_{pk} \right) \quad (32)$$

임을 알 수 있다. 독립관절 변수벡터에 대한 비독립관절 변수벡터의 이차 영향계수 행렬의 각 요소가

$$[H_{aa}^p]_{k, i; j} = \frac{\partial}{\partial \phi_{aj}} \left(- \frac{\partial \phi_{pk}}{\partial \phi_{ai}} \right) \quad (33)$$

로 정의되는 것을 활용하면 식 (32)는 다음과 같이 일반화된 내적으로 표현된다⁽⁴⁾.

$$[K_{aa}^*]_{ij} = (- \mathbf{T}_{pe}^T) \cdot ([H_{aa}^p])_{k, i; j} \quad (34)$$

그러므로 $[K_{aa}^*]$ 은

$$[K_{aa}^*] = (- \mathbf{T}_{pe}^T) \cdot [H_{aa}^p]^T \quad (35)$$

로 표현된다. 마지막으로 식 (26)을 $d\phi_a$ 로 나누고 식 (25)-(28)를 이용하면 독립관절에서의 유효강성행렬은

$$[K_{aa}^e] = [K_{aa}] + [K_{aa}^*] + [G_a^p]^T [K_{pp}] [G_a^p] \quad (36)$$

와 같이 나타내어진다. 식 (36)에서 오른쪽의 첫번째 항은 독립관절에서의 강성행렬을 나타내고, 두번째항은 상반효과로부터의 강성행렬 그리고 세번째항은 독립관절에서 느껴지는 나머지 비독립관절에서의 강성에 의한 강성행렬을 나타낸다.

출력점에서의 유효 출력 콤포라이트스 $[K_{uu}^e]$ 는 다음과 같이 주어지며,

$$[K_{uu}^e] = [G_u^a]^T [K_{aa}^e] [G_u^a] \quad (37)$$

여기서 $[G_u^a]$ 는 ϕ_a 과 u 사이의 일차 기구학적 영향계수를 나타내며 다음과 같은 미분관계식을 만족시킨다.

$$\dot{\phi}_a = [G_u^a]^T \dot{u}. \quad (38)$$

4. RCC점에서의 Antagonistic 강성에 대한 해석

본 절에서는 식 (36)에서의 독립관절과 비독립관절의 상반효과로 인하여 생성되는 강성행렬에 대하여 살펴본다. 식 (37)로부터 상반효과로 인한 출력점에서의 강성행렬은

$$[K_{uu}^*] = [G_u^a]^T [K_{aa}^*] [G_u^a] \quad (39)$$

로 표현되며 출력점이 RCC특성을 나타내기 위해서는 $[K_{uu}^*]$ 의 비대각요소가 모두 0이 되어야 한다. 식 (39)의 요소들을 다음과 같이 표현하자.

$$[K_{uu}^*] = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{x\psi} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{y\psi} \\ k_{\psi x} & k_{\psi y} & k_{\psi\psi} \end{bmatrix}, \quad (40)$$

식 (35)를 식 (39)에 대입하면

$$[K_{uu}^*] = [G_u^a]^T (- \mathbf{T}_{pe}^T \cdot [H_{aa}^p]^T) [G_u^a] \quad (41)$$

로 표현되는데, 이 식은 다음과 같고 동일하다.

$$[K_{uu}^*] = - \mathbf{T}_{pe}^T \cdot ([G_u^a]^T [H_{aa}^p] [G_u^a]) \quad (42)$$

여기서 \mathbf{T}_{pe}^T 는 식 (23)을 만족시키는 값이다. 식 (42)의 (m, n) 요소는 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$[K_{uu}^*]_{m, n} = [[G_u^a]^T [H_{aa}^p] [G_u^a]]_{, m, n} \{ \mathbf{T}_{pe} \} \quad (43)$$

$[K_{uu}^*]$ 는 대칭행렬이므로 일반적으로는 여섯 개의 강성요소 존재한다. 그러나, 주어진 메카니즘은 오직 네 개의 holonomic 구속방정식을 가지므로^[5], 이 중 오직 네 개의 강성요소만 독립적으로 제어할 수 있다. 특히, 세개의 비대각요소에 관련된 관계식 중 임의의 두 개의 요소만이 독립적인 관계식을 가지므로 이 중 두개의 비대각요소가 0일 때 나머지 하나의 비대각요소도 0이라는 사실은 수치적으로 확인할 수 있다. 또한, 항상 $k_{xx} = k_{yy}$ 의 관계식인 존재한다는 사실도 확인할 수 있다. 그러므로, 식 (42)로부터 두 개의 비대각 요소 (k_{xy} , $k_{x\psi}$)에 관한 관계식과 두 개의 대각요소 (k_{xx} , $k_{\psi\psi}$)에 관한 관계식을 다음과 같은 하나의 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{x\psi} \\ k_{xy} \\ k_{\psi\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ([G_u^a]^T [H_{aa}^p] [G_u^a])_{:11} \\ ([G_u^a]^T [H_{aa}^p] [G_u^a])_{:33} \\ ([G_u^a]^T [H_{aa}^p] [G_u^a])_{:12} \\ ([G_u^a]^T [H_{aa}^p] [G_u^a])_{:13} \end{bmatrix} \{ \mathbf{T}_{pe} \} \quad (44)$$

한편, 식 (23)은 행렬식으로 다음과 같이 표현되며

$$[[L]_{3 \times 3} [G_a^p]^T] \{ \mathbf{T}_e \} = \mathbf{0}_{3 \times 3} \quad (45)$$

여기서

$$\mathbf{T} = [\mathbf{T}_{ae} \quad \mathbf{T}_{pe}]^T \quad (46)$$

식 (44)와 (45)를 종합하면

$$\mathbf{y} = [A] \mathbf{T} \quad (47)$$

로 표현되며 여기서

$$\mathbf{y} = [k_{xx} \quad k_{\psi\psi} \quad k_{xy} \quad k_{x\psi} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (48)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \left([G_u^a]^T [H_{aa}^p] [G_u^a] \right)_{:11} \\ \left([G_u^a]^T [H_{aa}^p] [G_u^a] \right)_{:33} \\ \left([G_u^a]^T [H_{aa}^p] [G_u^a] \right)_{:12} \\ \left([G_u^a]^T [H_{aa}^p] [G_u^a] \right)_{:13} \\ [L]_{3 \times 3} \quad [G_a^p]^T \end{bmatrix} \quad (49)$$

이다. 식 (48)에서 $k_{xy} = 0$, $k_{x\psi} = 0$ 로 그리고 k_{xx} 와 $k_{\psi\psi}$ 를 임의의 값으로 설정하고 식 (47)로부터 이에 해당하는 \mathbf{T} 를 구하면

$$\mathbf{T} = [A]^+ \mathbf{y} + (I - A^+ A) \boldsymbol{\varepsilon} \quad (50)$$

로 구해진다. 여기서 $[A]^+$ 는 행렬 $[A]$ 의 Moore Penrose

Pseudo-Inverse 행렬을, 그리고 식 오른쪽의 첫번째항은 minimum norm해를 나타낸다. 메카니즘이 대칭형상을 유지하는 형상에서는 minimum norm 해인 T_b , T_m , T_t 각각의 요소들의 값은 항상 같다는 것을 수치적으로 확인할 수 있다. 그리고 식 (50)의 오른쪽의 두번째항은 내력을 활용하는 영공간해를 나타내는데 이를 통하여 강성 이외에는 다양한 알고리즘을 구현할 수 있다.

식 (50)에서 minimum norm해를 취하는 경우에 Fig. 2(a), 2(b), 2(c)는 각각 링크길이가 모두 0.5, $k_{xy}=0$, $k_{yx}=0$, 그리고 k_{xx} 와 k_{yy} 를 임의로 변화하는 경우에 관절에서의 상반구 동력 T_b , T_m , T_t 의 값을 등고선그림을 나타낸다.

5. 결론

평면형 3 자유도 RCC 메카니즘이 대칭형상을 이루고 있는 형상에서 각 관절에 잉여의 스프링을 부착하여 메카니즘에 내부하중을 발생시키는 경우에, 이러한 내부하중으로 발생하는 상반강성을 고려한 RCC점에서의 유효출력강성 모델에 관하여 기술하였다. 그리고 이러한 RCC점에서 선형방향과 회전방향으로 서로 독립적이며 임의의 크기를 갖는 강성을 발생시킬 수 있다는 사실을 규명하였으며 임의의 강성을 생성하기 위하여 필요한 각 관절에서의 상반구동력의 해를 제시하였고 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

본 연구에서의 결과는 평면형 3 자유도와 같은 대칭을 유지하는 병렬형 메카니즘에 잉여구동을 적용하는 경우, 접촉예상점이 메카니즘의 RCC점과 일치하도록 하면 접촉점에서의 콤플라이언스 행렬을 대각행렬로 만들 수 있음을 의미하며 이러한 특성은 접촉을 수반하는 작업을 수행하는 마이크로 로봇과 같은 경우에 각 방향으로의 독립적인 제어를 하는 데 매우 유용하게 적용되리라 판단된다.

참고문헌

- [1] H.J.Kang, B.J.Yi, W.Cho, R.A. Freeman, "Constraint-embedding Approaches for General Closed-Chain System Dynamics in Terms of A Minimum Coordinate Set," 1990, ASME Conf. Proceedings of Flexible Mech. Dyn. and Robot Trajectories, DE-Vol.24, pp. 125-132.
- [2] Whee-Kuk Kim, B-J. Yi, and D.G. Kim, "Synthesis of a Planar 3-Degree-of-freedom Adjustable Compliance Mechanism," KACC Conference, 1994, 334-339.
- [3]. 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.
- [4] Byung-Ju Yi and R.A. Freeman, "Synthesis of Actively Adjustable Springs by Antagonistic Redundant Actuation," *Trans. ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 114, Sept. 1992, pp. 454-461.
- [5] Byung-Ju, Yi and R.A. Freeman, "Geometric Analysis of Antagonistic Stiffness in Redundantly Actuated Parallel Mechanisms," *Journal of Robotic Systems*, Vol.10, No.5, 1993, pp. 581-603.
- [6] 김희국, 이준용, 이병주, "잉여의 관절 콤플라이언스를 활용하는 평면형 3자유도 메카니즘의 RCC특성분석," 추계 제어. 자동화.시스템학술회의, 1996.

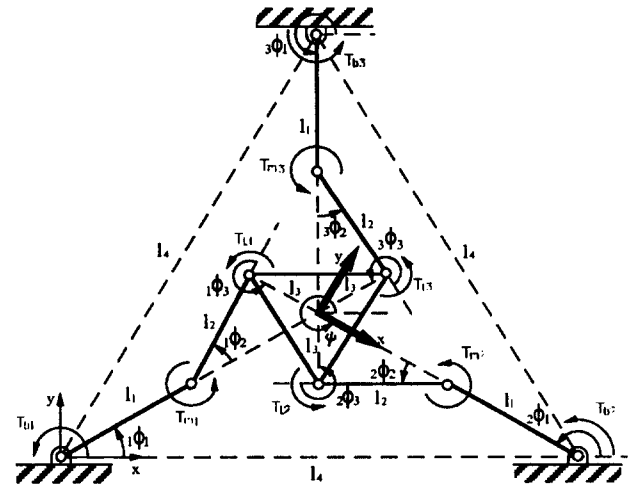


그림 1. 평면형 3 자유도 메카니즘.

Figure 1. A Planar 3 Degrees of Freedom Mechanism.

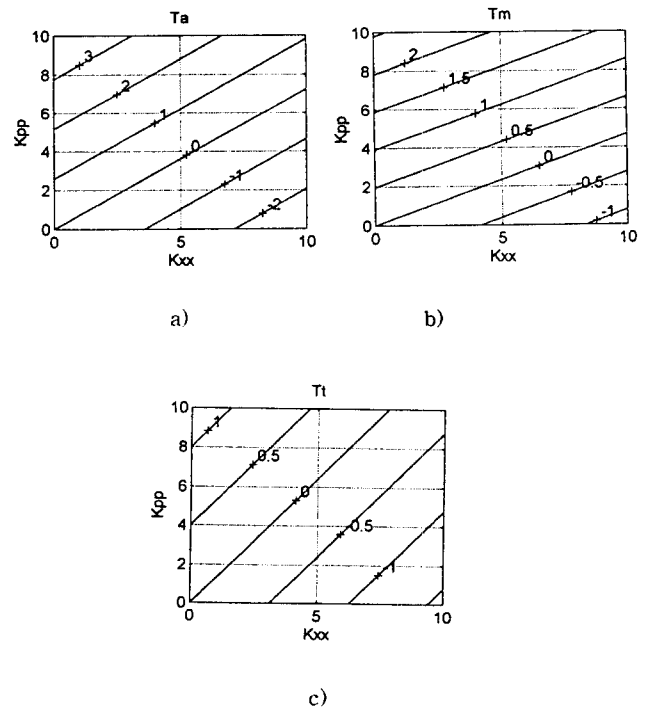


그림 2. 프리로딩토크 :a) $T_b = T_a$ b) T_m c) T_t

Figure 2. Preloading Torque :a) $T_b = T_a$ b) T_m c) T_t