ESP의 전단 변형을 이용한 원격 순응 중심 장치의 순응 중심 조절 방법에 관한 실험적 고찰

An experimental study on adjusting mechanism of Remote Center Compliance for assembly robots with shear stress control of Elastomer Shear Pads(ESP)

이 상 철*
(Sangcheol Lee)

Abstract : In this paper, an experimental study is performed to adjust position of compliance center of Elastomer Shear Pad Remote Center Compliance (ESP RCC) device, which is used on precise peg in hole process. In the study, variation of the lateral/axial stiffness of the ESP is proposed as a control parameter to adjust the position of compliance center of the ESP RCC. The variation of the stiffness of the ESP is achieved by controlling the shear stress of the ESP. To control the shear stress of the ESP, position of top side of the ESP is changed while remaining bottom side of the ESP is fixed on the RCC plate. To evaluate effect of the proposed idea, stiffness variations of the ESP on various shear stresses are measured, and variation of the compliance center is measured with the ESP RCC that can control the position of compliance center by using the shear stress. The measured data shows unique characteristics that have not been shown in other types of ESP VRCCs.

Keywords : compliance center, ESP RCC, shear stress

I. 서론

정밀한 막대 삽입 문제 (precise peg in hole problem)에 적용되는 원격 순응 중심 장치(Remote Center Compliance, RCC)는 복잡한 제어기를 필요로 하지 않고, 조립작업을 수행하는 기구의 끝에 부착하여 손쉽게 사용이 가능하므로 작업 현장에서 널리 사용되고 있다. 이러한 RCC는 개발 초기 다양한 기구학적 구조를 갖는 제품들이 있었으나[1-6], 탄성체(Elastomer Shear Pad, ESP)를 사용한 제품들이 타 제품들에 비하여 간단한 구조와 사용의 용이함으로 인하여 현재 사용되는 RCC의 대부분을 차지하고 있다[3].

ESP RCC를 포함한 대부분의 RCC는 순응 중심을 조립하는 막대의 끝부분으로 이동시켜, 작업 중 발생하는 비 정상적인 조건을 피해갈 수 있도록 고안되었으나[1-3], 순응 중심의 위치가 고정되어 있는 단점이 있어 길이가 다른 막대를 조립하는 경우에는 순응 중심의 길이가 다른 RCC로 교체하여야 하는 문제를 가지고 있다.

따라서 이 같은 문제를 해결 하고자 순응 중심의 위치를 변화시킬 수 있는 가변형 RCC(variable RCC)에 대한 연구가 비교적 오래 전부터 수행되어 왔으며, 다양한 종류의 VRCC에 대한 논문이 발표 되었다[6-11].

본 논문에서는 이와 같은 VRCC중에서, ESP RCC를 이용한 순응 중심 조절 기구 개발에 관한 연구를 수행하였으며, 이를 위하여 ESP RCC의 순응 중심 위치를 조절 할 수 있는 ESP의 축/횡방향의 탄성계수가, ESP횡 방향의 전단 변형률(shear stress)에 따라 변화한다는 특성에 착안하여 기존의 연구보다 좀더 간편한 방법으로 원격 순응 중심의 위치를 변화시키고자 하였다[12,13].

연구를 위하여 먼저 ESP의 종단변화율에 따른 축/횡방향의 탄성계수의 변화를 측정하였으며, 측정된 데이터를 바탕으로 EPS RCC의 원격 중심의 위치의 변화를 simulation을 통하여 확인하였다. Simulation결과를 바탕으로 ESP의 종단변화율을 조절할 수 있도록 ESP RCC를 개조한 후, 원격 순응 중심의 변화를 실측하여 제안된 방법의 유효성을 확인하였다.

새로운 방식의 순응 중심 조절 장치의 설명을 위하여 2장에서는 ESP 특성과 이를 이용한 순응 중심 조절 원리를 간략히 설명하였고, 3장에서는 본 연구에서 이용한 전단 변형에 따른 ESP의 특성 변화의 측정치를 정리 하였다. 4장에서는 3장의 결과를 이용하여 제작된 순응 중심 조절 장치 구조 및 순응 중심 측정치 결과를 정리하였으며, 마지막으로 5장에서 논문에 대한 결론과 향후 연구 방향에 관하여 정리 하였다.

II. ESP 의 특성과 ESP RCC 의 순응 중심 조절 방법

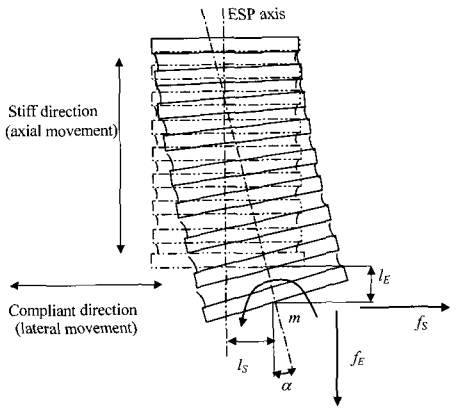

그림 1. 외력이 가해진 경우 ESP의 변형.
Fig. 1. Distortion of the ESP by external force and moment.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2007. 1. 22., 채택확정 : 2007. 6. 15.
이상철 : 체육과학연구원 스포츠 산업실(Dept. of Sport Engineering, Korea Institute of Sport Science(KISS))(k200lsc@hanmail.net)

ESP는 강체와 탄성체를 적층하여 만든 소형 구조물로, 외력에 의하여 직선 방향과 회전 방향으로 변형되는 특성을 가지고 있다. 그림 1은 외력이 가해진 경우 이러한 ESP의 변형을 나타내고 있으며, (1)은 이 같은 외력에 의한 ESP의 수식적 모델을 나타내고 있다[3].

$$\begin{bmatrix} f_E \\ f_S \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_E & 0 & 0 \\ 0 & K_S & K_{s\alpha} \\ 0 & K_{\alpha s} & K_{\alpha\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_E \\ l_S \\ \alpha \end{bmatrix}. \quad (1)$$

f_E : ESP의 축 방향으로 가해진 힘.
f_S : ESP의 횡 방향으로 가해진 힘.
m : ESP에 가해진 모멘트.
l_E : 외력에 의한 ESP의 축 방향의 길이 변화량
l_S : 외력에 의한 ESP의 횡 방향의 길이 변화량
α : 외력에 의하여 변형된 ESP 축의 각도 변화량
K_E : ESP의 축 방향 탄성계수
K_S : ESP의 횡 방향 탄성계수
$K_{\alpha\alpha}$: ESP의 회전 탄성계수
$K_{\alpha s}$: ESP의 회전/횡 방향 결합 탄성계수
$K_{s\alpha}$: ESP의 횡/회전 방향 결합 탄성계수

위와 같은 특성을 가지는 ESP는 Whitney [3]에 의하여 RCC제작에 이용되었으며, ESP를 이용한 RCC는 간단한 구조와 사용의 용이성으로 인하여 널리 사용되고 있다. 그림 2는 Whitney에 의하여 제안된 후 일반적인 ESP RCC의 제작에 널리 사용되는 구조 중, 두 개의 ESP를 이용한 구조를 보여주고 있다.

r : RCC의 바닥판의 중심에서 ESP가 부착되어 있는 지점의 중심까지의 거리
θ: ESP가 RCC의 바닥판의 수직축과 이루는 각도
P_{RCC} : ESP가 RCC의 바닥판에 부착되어 있는 지점부터 순응 중심까지의 거리
Kx_{RCC}: 순응 중심에서의 RCC의 수평 탄성 계수

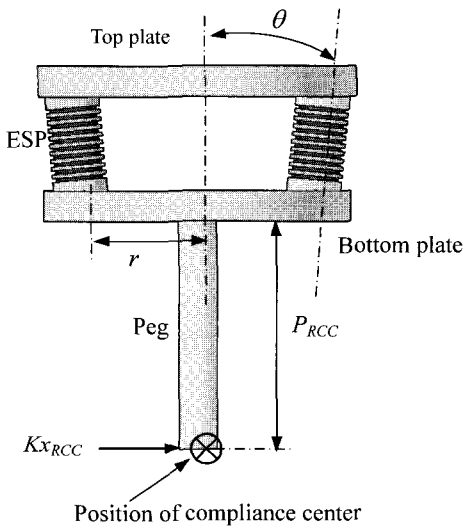

그림 2. 두 개의 ESP를 갖는ESP RCC의 구조.
Fig. 2. Structure of the ESP RCC with two ESPs.

앞의 그림에서 순응 중심이란 물체에 힘이나 모멘트가 가해지는 경우, 힘에 의해서는 직선 운동만이 발생하고, 모멘트에 의해서는 회전 운동만이 발생하는 지점으로 정의 되며, 정밀한 원형 막대 삽입 작업이 수행되기 위해서는 순응 중심이 삽입되는 막대의 끝 부분에 위치하여야 된다는 것이 이론과 실험을 통하여 증명되었다[1].

따라서 P_{RCC} 는 RCC의 가장 중요한 특성을 나타내며, RCC를 이용하여 조립 할 수 있는 막대의 길이를 결정하게 된다. P_{RCC}는 ESP RCC에 외력이 가해진 상태에서 힘과 모멘트에 관한 평형 방정식과 순응 중심의 정의를 이용하여 유도되며 [3], 두 개의 ESP를 가지는 ESP RCC의 P_{RCC}는 다음과 같이 표현이 가능하다[3].

$$P_{RCC} = \frac{K_{\alpha s}\cos\theta + r\sin\theta\cos\theta(K_E - K_S)}{K_S\cos^2\theta + K_E\sin^2\theta}. \quad (2)$$

위와 같이 표현된 ESP RCC의 P_{RCC} 는 다양한 변수들로 구성되어 있으며, 각각의 변수를 조절하여 P_{RCC} 의 변화가 가능함을 여러 연구에서 보여주고 있다[7-11]. 특히 위 수식에서 ESP의 축방향 탄성과 횡방향 탄성 및 회전/횡방향 결합 탄성계수가 P_{RCC}를 결정하는데 중요역할을 함을 알 수 있으며, 이러한 축/횡방향의 탄성계수에 변화를 주어 순응 중심을 변화가 가능함을 이미 다른 연구에서 확인한 바 있다[10,11].

이러한 ESP의 탄성계수에 대한 연구는 건축과 관련된 분야에서도 활발하게 진행되어 왔으며, 특히 지진으로부터 건축물이나 구조물을 보호하기 위하여 사용되는 소재의 하나로, 적층 고무 베어링(Laminated Rubber Bearing, LRB)이라는 명칭으로 오래 전부터 연구되어 왔다[12,13]. 이러한 ESP와 LRB는 크기의 차이만이 있을 뿐 완전히 동일한 구조이며, 단지 사용 방법에 차이가 있을 뿐이다.

이미 알려진 LRB의 특성 중 RCC의 적용 측면에서 유용한 특성은 LRB의 횡방향 탄성계수 즉, ESP의 횡방향 탄성계수 (K_S)가 LRB의 전단 변형률이 증가함에 따라서 급격히 감소한다는 사실이며[12,13], 이러한 탄성계수의 변화는 위 식 (2)에서 보는 것과 같이 RCC의 순응 중심을 변화시키는 방법으로 적용이 가능하다. 그러나 LRB는 사용 시 부가되는 수직 및 수평 하중의 크기가 RCC의 경우보다 매우 크고, 그 변화 범위도 RCC의 적용에서는 고려되지 않은 부분이므로 실제 실험을 통하여 ESP에 전단 변형을 가하는 경우 각 탄성계수가 어떠한 변화를 나타내는지 확인할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 ESP에 전단 변형을 가하여 각 탄성계수들이 어떻게 변화하는지 실험을 통하여 측정하여 보았다. 다음 장에서는 이러한 실험 결과를 정리하였다.

III. 전단 변형에 따른 ESP 의 탄성 변화 측정 실험

ESP 또는 LRB의 전단 변형률(γ)은 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = \frac{\Delta}{T} \quad (3)$$

Δ: ESP의 수평 이동 변위 (mm)
T: ESP 고무층의 두께 총합 (mm)

기존 연구 결과를 보면 ESP의 전단 변형에 따라 횡방향

탄성계수가 급격히 변하는 것을 알 수 있으므로[12,13], 본 연구에서도 ESP 전단 변형에 대하여 횡방향, 축방향 및 회전/횡 방향 결합 탄성계수의 변화 측정 실험을 실시 하였다. 측정에 사용된 ESP의 제원과 전단 변형의 방법을 표 1과 그림 3에 정리하였다.

전단 변형하의 횡방향 탄성계수 측정은, 그림 3에서 전단 변형의 크기(Δ)를 0-3.5mm까지 0.5mm 간격으로 변화시켜 가면서, 좌우 ±50μm의 횡방향 변위에 따른 힘을 측정 하였다. 축방향 탄성계수는 횡방향 탄성계수 측정 시와 동일한 기준 위치로 이동 후 z축으로 상하 ±50μm 변화 주면서 변위에 따른 힘을 측정하였다. 모든 측정은 동일 조건에서 5회씩 반복하여 측정하였으며, 그림 4-6은 각각 측정된 ESP의 횡방향 탄성계수(K_S)와 축방향 탄성(K_E) 계수 및 회전/횡방향 결합 탄성계수($K_{\alpha s}$)의 변화를 보여주고 있다.

측정 결과 전단 변형의 크기에 따른 EPS의 각 탄성계수는 모두 변화하는 형태를 나타내고 있으며, 이러한 탄성계수의 변화는 이미 여러 연구에서 EPS RCC의 순응 중심 변화를 위한 제어변수로 사용될 수 있음을 보여주고 있다[10,11]. 이를

표 1. ESP의 제원.
Table 1. Specification of the ESP.

높이	34 mm
층 수	20
층 높이	1 mm
직경	13 mm
고무층 두께 총합(T)	10 mm

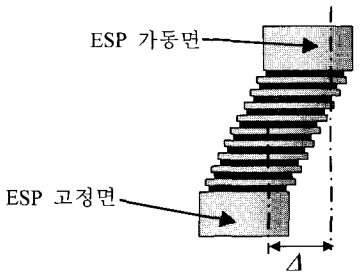

그림 3. ESP의 전단 변형 방법.
Fig. 3. Shear stress of the ESP.

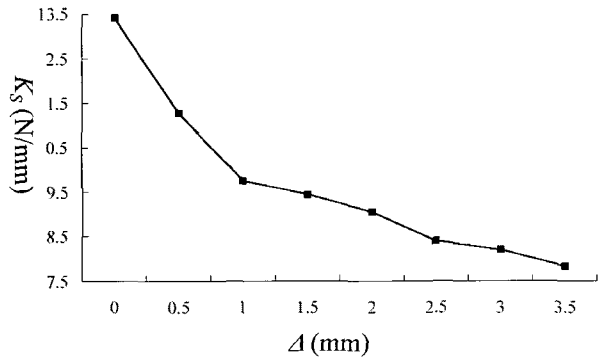

그림 4. 전단 변형에 따른 ESP의 횡방향 탄성계수(K_S)의 변화.
Fig. 4. Variation of the lateral stiffness (K_S) of the ESP according to the shear stress.

확인하기 위하여 그림 4-6의 측정된 탄성계수들과 시험용으로 제작된 RCC의 기구학적 변수를(r = 23 mm, θ = 6.5°) (2)에 대입하여 2개의 ESP를 갖는ESP RCC의 원격 순응 중심을 계산하여 보았으며, 그 결과를 그림 7에서 보여주고 있다.

계산 결과를 보면, 전단 변형의 크기에 따라 순응 중심의 위치가 변화됨을 확인 할 수 있었다. 따라서 전단 변형의 크

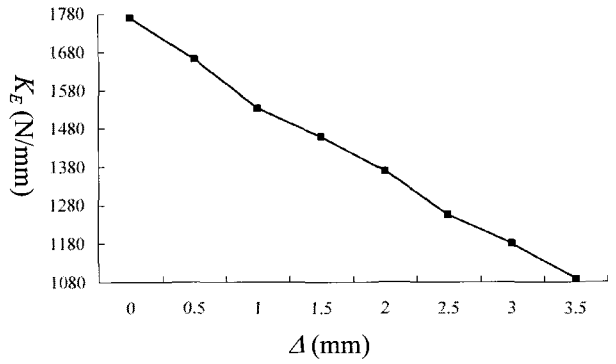

그림 5. 전단 변형에 따른 ESP의 종방향 탄성계수(K_E)의 변화.
Fig. 5. Variation of the axial stiffness (K_E)of the ESP according to the shear stress.

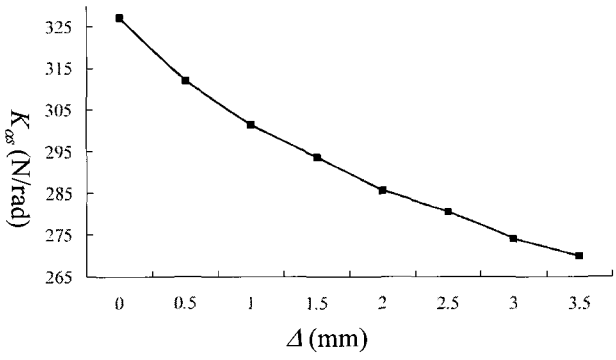

그림 6. 전단 변형에 따른 ESP의 회전/횡 방향 결합 탄성계수($K_{\alpha s}$)의 변화.
Fig. 6. Variation of the bending/lateral stiffness ($K_{\alpha s}$) of the ESP according to the shear stress.

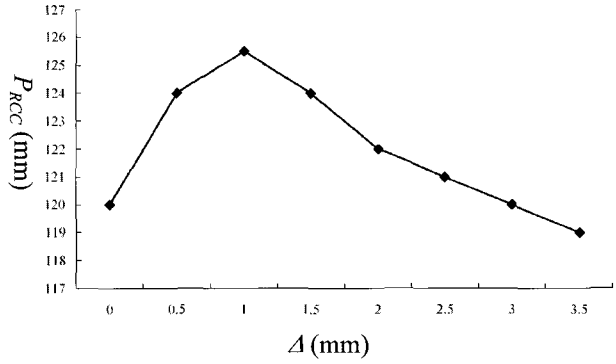

그림 7. ESP 탄성계수 측정치를 이용한 전단 변형에 따른 2 EPS RCC의 순응 중심 변화량 계산치.
Fig. 7. Simulation result of the compliance center on the 2 EPS RCC with the measured stiffness parameters of the ESP.

기를 조절하여 ESP RCC의 순응 중심을 조절할 수 있으며, 이러한 원리를 이용한 가변형 ESP RCC를 제작하여 순응 중심의 변화를 실측하였다. 다음 장에서는 전단 변형을 이용한 가변형 ESP RCC의 구조 및 제작에 대하여 정리하였다.

IV. 전단 변형을 이용한 ESP VRCC

전단 변형을 이용한 ESP VRCC를 제작하기 위하여 ESP하부는 기존 ESP RCC와 동일하게 RCC의 하부 구조물에 고정하였고, ESP의 상부 구조물에는 전단 변형을 조절 할 수 있는 모듈화된(module) 구조물을 개발하여 장착하였다. 그림 8은 개발된 EPS모듈을 보여주고 있다.

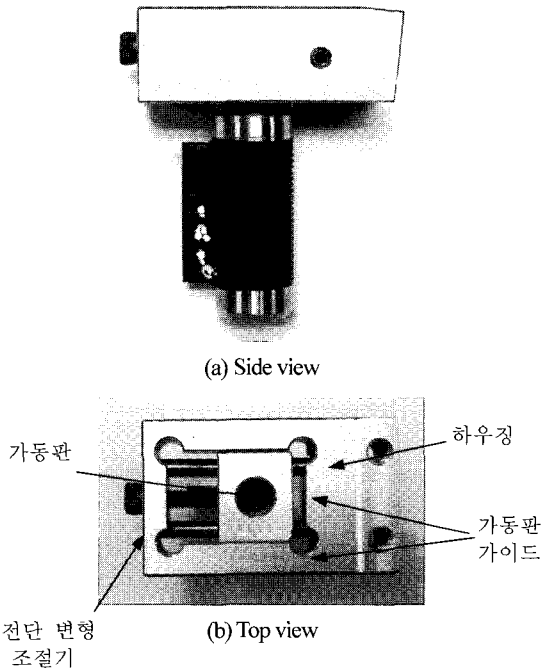

그림 8. 개발된 ESP 모듈.
Fig. 8. Photograph of the developed ESP module.

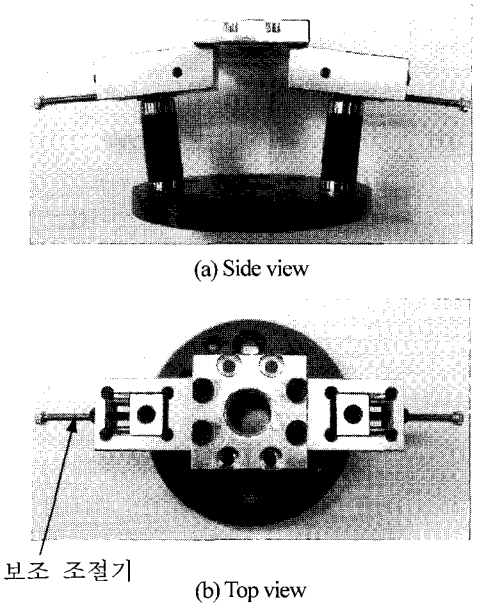

그림 9. 개발된 ESP VRCC.
Fig. 9. Photograph of the developed ESP VRCC.

ESP 모듈은 전체 구조물을 수용하는 하우징과 ESP와 연결되는 가동판, 가동판의 이동 경로를 따라 설치된 가동판 가이드 및 가동판의 위치를 조절 할 수 있는 전단 변형 조절기로 구성된다.

따라서 이러한 ESP모듈의 하우징을 RCC의 상판과 연결하고, 모듈의 하부인 ESP의 끝단을 RCC의 하판과 연결하면 전단 변형 조절기를 이용하여 간단하게 ESP의 전단 변형을 조절할 수 있게 된다. 그림 9는 이러한 ESP모듈을 이용하여 개발한 ESP VRCC를 보여주고 있다.

ESP모듈 장착을 위하여 RCC의 상부 구조물을 간단한 고정판 형태로 제작하였으며, 전단 변형 조절기에 의하여 발생하는 위치 오차(backlash)를 제거하기 위하여 보조 조절기를 추가하였다(그림 9. (b)). 제작된 ESP VRCC의 제원을 표 2에 정리하였다.

제작된 ESP VRCC의 순응 중심 조절 기능을 확인하기 위하여 0.5mm 단위로 0-3.5mm까지 전단 변형을 조절하면서 순응 중심의 위치와 이에 따른 ESP VRCC의 수평 탄성 계수 (Kx_{RCC})를 측정하였다[3].

순응 중심의 측정은, 순응 중심에 수평 외력이 가해지면 이 지점에서는 회전이 없는 순수한 수평 이동만이 발생하는 순응 중심의 정의를 이용하여 측정하였으며, 이를 위하여 개발된 ESP VRCC의 하부에 장착된 막대의 상/하 양단에 1μm의 분해능을 갖는 다이얼 게이지를 장착하여 막대의 각 부분에 동일한 수평 외력을 가하는 경우 막대의 움직임을 측정할 수 있도록 하였다[8-11]. 순응 중심의 위치를 찾아내기 위하여 막대의 상부에서 하부로 이동하면서 다이얼 게이지의 접촉 부분과 반대 방향에서 일정한 길이로 막대를 밀면서 상/하부에 장착된 다이얼 게이지의 변화를 관측하여, 그 변화의 크기가 방향이 동일한 지점을 확인하여 그 지점에서의 수평 이동 거리와 이때 측정된 힘의 크기를 관측하여 순응 중심의 위치 및 그 지점에서의 ESP VRCC의 수평 탄성 계수를 측정하였다.

그림 11은 이러한 방식으로 실측된 순응 중심의 위치와 측정된 ESP의 탄성계수를 바탕으로 계산된 순응 중심의 위치를 보여주고 있다.

실측된 결과를 보면 실제 ESP VRCC 제작 및 실측 과정에서 발생한 오차에 의하여 계산치와 차이를 보이고 있으나, 거의 동일한 형태로 순응 중심이 변화함을 알 수 있다.

전단 변형을 이용하여 개발된 ESP VRCC의 순응 중심의 변화 형태는 기존 ESP VRCC에서는 찾아 볼 수 없으며[7-11], 전단 변형의 크기에 따라 동일한 크기의 순응 중심이 두 곳에서 나타나는 특징을 보여주고 있다. 이러한 특징을 ESP

표 2. 개발된 ESP VRCC의 제원.
Table 2. Specification of the developed ESP VRCC.

r	23 mm
θ	약 6.5°
Δ 조절 범위	0 - 4 mm
P_{RCC}	약 119-126 mm

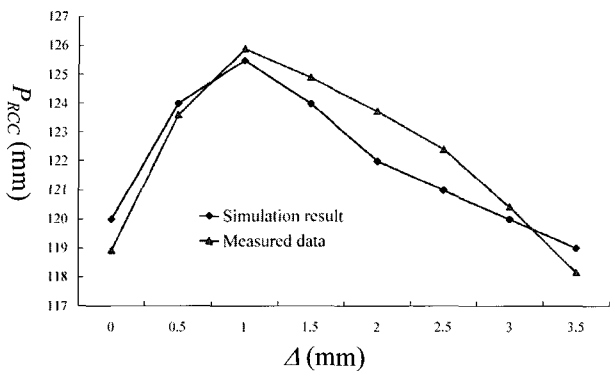

그림 11. 개발된 ESP VRCC의 순응 중심 변화.

Fig. 11. Variation of the compliance center of the developed ESP VRCC.

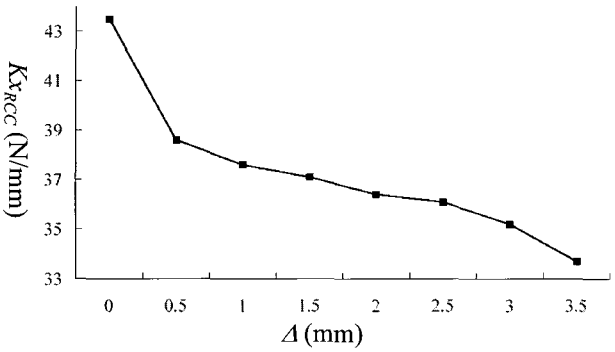

그림 12. ESP VRCC의 수평 탄성 계수(Kx_{RCC}) 변화.

Fig. 12. Variation of the lateral stiffness (Kx_{RCC}) of the developed ESP VRCC.

VRCC의 수평 탄성 계수와 결합하여 관찰해 보면(그림 12.), 전단 변형의 크기에 따라 동일한 위치의 순응 중심에서 서로 다른 수평 탄성 계수(Kx_{RCC})를 가질 수 있도록 조절이 가능하게 된다. 이것은 기존 ESP VRCC의 원격 순응 중심과 수평 탄성 계수가 일대일 대응을 갖는 것에 비하여[3,7] 보다 유연함을 사용자에게 제공할 수 있으므로, 실제 작업에서 보다 다양한 방식으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결론

본 논문에서는 ESP의 전단 변형에 따른 탄성 계수의 변화를 ESP RCC의 순응 중심 변화에 이용하기 위하여 전단 변형에 따른 ESP의 각 탄성 계수의 변화를 측정하였다. 측정 결과 EPS의 각 탄성 계수는 전단 변형의 크기에 따라 그 크기가 변함을 확인할 수 있었고, 이러한 특성을 이용하기 위한 ESP 모듈을 제작하여 새로운 ESP VRCC개발에 적용하였다.

개발된 ESP VRCC는 모듈화된 ESP 를 사용하여 간단한 방법으로 순응 중심의 변화가 가능하며, 필요에 따라 ESP VRCC의 상판에 연결되는 ESP모듈의 숫자를 손쉽게 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 전단 변형의 크기에 따라 동일한 순응 중심에서 서로 다른 수평탄성 계수를 갖도록 조절이 가능하므로 다양한 작업조건에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

연구에서 개발된 방식은 가장 일반적으로 알려진 전단 변형을 통하여 ESP의 특성을 변화시켰으나, 이러한 방식은 기구의 공간적인 배치에서 비 효율성을 가져 올 수도 있어, ESP 의 축방향에 비틀림을 가하여 전단 변형과 동일한 효과를 발생시키는 방법에 관한 연구를 진행 중이다.

참고문헌

[1] D. E. Whitney, "Quasi-static assembly of compliantly supported rigid parts," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 104, pp. 65-77, 1982.

[2] D. E. Whitney, "Remote center compliance," *Encyclopedia of Robotics System and Control*, vol. 104, pp. 1316-1324, 1986.

[3] D. E. Whitney and J. M. Rourke, "Mechanical behavior and design equations for elastomer shear pad remote center compliances," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 108, pp. 223-232, 1986.

[4] D. Milutinovic, "Universal compliant device based on SCARA concept," *Robotics & Computer-Integrated Manu-facturing*, vol. 15, no. 4, pp. 319-321, 1997.

[5] H. Van Brussel and J. Simons, "The adaptable compliance concept and its use for automatic assembly by force feedback accommodation," *Proc. 9th ISIR*, pp. 167-181.

[6] M. R. Cutkosky and P. K. Wright, "Active control of a compliant wrist in manufacturing task, transactions of the ASME," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 108, pp. 36-43, Feb. 1986.

[7] S. Joo and F. Miyazaki, "Development of variable RCC and Its application," *Proceedings of IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1326-1332, 1998.

[8] S. C. Lee, S. C. Won, and S. J. Choi, "Development of a new variable remote center compliance for assembly robots," *Advanced Robotics*, vol. 14, no. 3, pp. 241-255, 2000.

[9] S. C. Lee and S. C. Won, "Experimental evaluation of a new Variable Remote Center Compliance(VRCC)," *JSME International Journal Series C*, vol. 44, no. 3, pp. 875-882, 2001.

[10] S. J. Choi, S. C. Lee, and S. C. Won, "Development of a new variable remote center compliance using stiffness adjuster," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Intelligent Robots and System*, pp. 1860-1863.

[11] 이상철, "탄성 조절 막대를 이용한 가변형 원격 순응 중심 장치 개발에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학논문지, 제 11 권, 제 8 호, pp. 704-708, 2005. 8.

[12] 이경진, 김갑순, 강태경, 서용표, 이종림, "적층고무베어링의 동적 특성평가," 한국지진공학회 2002 춘계학술대회 논문집, pp. 367-372.

[13] 구경회, 이재한, 유봉, "면진용 적층고무베어링의 기계적 역학특성," 한국지진공학회 논문집, 제 1 권, 제 2 호, pp. 79-89, 1997. 6.

이 상 철

1993년 동국대학교 전자공학과 졸업(학사). 1995년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업(석사). 2000년 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 졸업(박사). 2000년~2001년 ㈜현대정보기술 자동화사업부 선임연구원. 2002년~현재 한국체육과학연구원 스포츠산업실 선임 연구원. 관심분야는 센서 계측, 자동화 및 HCI 응용.