

탄성 조절 막대를 이용한 가변형 원격 순응 중심 장치 개발에 관한 연구

Development of a Variable Remote Center Compliance (VRCC) with Stiffness Adjusting Rods.

이 상 철*
(Sangcheol Lee)

Abstract : In this paper, a simple idea is proposed to change the compliance center of the Remote Center Compliance (RCC) by adjusting the elasticity of the Elastomer Shear Pad (ESP). To vary the elasticity of the ESP, a hole is made in the ESP along its stiffness axis, and a stiffness adjusting rod (SAR) is inserted into the hole. By adjusting the insertion depth of the rod, lateral stiffness of the ESP can be varied, and the compliance center of the VRCC can be controlled accordingly. To verify the effectiveness of the proposed idea, a prototype VRCC is designed and, the position of the compliance center with various lengths of the inserted rod are measured.

Keywords : ESP, elasticity, stiffness adjusting rod (SAR)

I. 서론

원형 막대 삽입 (round peg in hole) 작업에서 발생하는 재밍 (jamming)과 웨징(wedging)을 해결하기 위하여 사용되는 원격 순응 중심 장치(Remote Center Compliance, RCC), 1982년 Whitney [1]에 의하여 이론 및 실험적으로 그 타당성이 증명되었다. 특히 1986년 Whitney [2]에 의하여 제안된 탄성체를 이용한 원격 순응 중심 장치 (Elastomer Shear Pad RCC, ESP RCC)는 단순한 구조와 사용의 편리함으로 인하여 현재 널리 사용되고 있다.

그러나 이러한 장점에도 불구하고 RCC는 고정된 길이의 막대에 대해서만 적용이 가능하기 때문에, 작업 도중 조립하는 막대의 길이가 바뀌면 사용하는 RCC를 교체하여야 하는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 RCC의 단점을 극복하기 위하여 조립하는 막대의 길이 변화에 대응하여 순응 중심의 위치를 자유롭게 변화시킬 수 있는 가변형 원격 순응 중심 장치(Variable RCC, VRCC)들이 개발되었다[3-9]. 그러나 개발된 VRCC들은 RCC와 비교하여 그 구조가 너무 복잡하여, 간단한 구조를 가진 ESP RCC를 이용한 다양한 VRCC가 개발되었다[10-14].

본 논문에서는 이같이 기존에 개발된 ESP를 이용한 VRCC를 보다 간단한 방법으로 구현하기 위하여, 기존의 ESP RCC에 약간의 수정을 가하여 VRCC의 기능을 부가하고자 하였다. 이를 위하여 ESP의 축 방향으로 관통구멍을 만들고, 이 구멍에 EPS의 횡 방향의 움직임을 제어하는 탄성 조절 막대 (Stiffness Adjusting Rod, SAR)를 삽입 하여 삽입된 탄성 조절 막대의 삽입 깊이에 따라 ESP의 횡 방향 탄성 계수와 회전/횡 방향 결합 탄성 계수를 변화시켜, RCC의 원격 순응 중심의 위치를 조절할 수 있도록 하였다.

이러한 방법의 효과를 검증하기 위하여, 탄성 조절 막대의 삽입 깊이에 따른 ESP의 탄성계수의 변화를 이론적으로 도

출하였고, 실험을 통하여 ESP 탄성 계수의 변화량과 VRCC의 순응 중심의 변화를 측정 하였다.

제안된 방법을 이용하여 개발된 ESP VRCC의 특성과 실험 결과를 서술하기 위하여 2장에서는 ESP 와 ESP RCC의 구조에 관하여 간단히 언급하였고, 3장에는 제안된 ESP의 구조와 이론적 배경을 정리하였으며, 제작된 ESP와 이를 이용한 실험 결과를 4장에 정리 하였다. 5장에서는 제안된 방법을 이용하여 제작된 VRCC의 순응 중심 변화를 측정한 실험 결과를 정리하였으며, 마지막 6장에서는 결론을 정리 하였다.

II. ESP 와 ESP RCC

ESP는 3축 방향의 탄성을 가지는 탄성체로, 탄성체와 강체의 적층 구조를 가지고 있다. 아래 그림 1은 이러한 ESP의 구조를 나타내며, 그림 2는 외력이 가해진 경우 ESP의 변형을 나타내고 있다. 이러한 ESP는 일반적으로 다음과 같은 수식으로 표현된다[2].

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

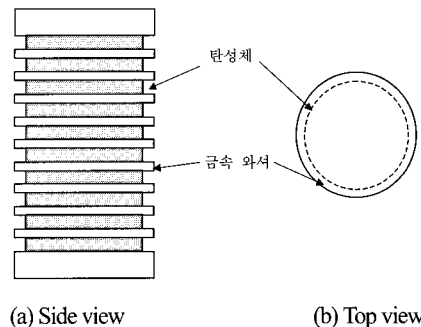


그림 1. ESP 구조.
Fig. 1. Structure of the ESP.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2005. 1. 28., 채택확정 : 2005. 4. 25.
이상철 : 체육과학연구원 스포츠 산업실(k200lsc@hanmail.net)

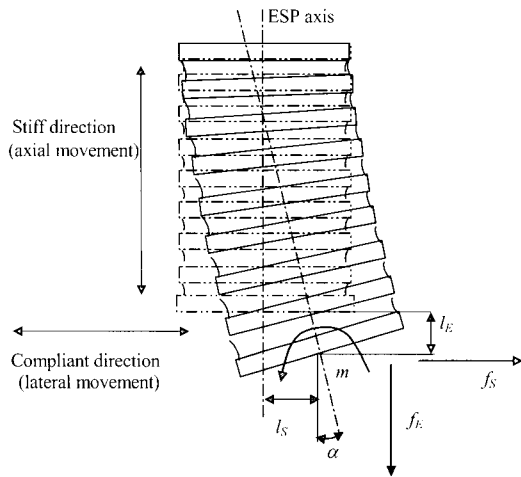


그림 2. 외력이 가해진 경우 ESP의 변형.
Fig. 2. Distortion of the ESP by external force and moment.

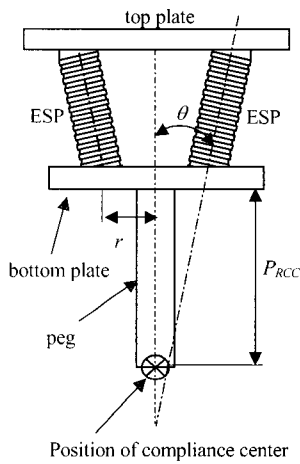


그림 3. 두 개의 ESP를 갖는 ESP RCC의 구조.
Fig. 3. Structure of the ESP RCC with two ESPs.

여기서 f_E 와 f_S 는 ESP의 축 방향과 횡 방향으로 가해진 힘이며, m 은 ESP에 가해진 모멘트를 나타낸다. l_E , l_S 와 α 는 외력에 의하여 변형된 ESP의 축 방향과 횡 방향의 길이 및 ESP 축의 각도 변화량이며, K_E , K_S , K_{α} 와 K_{α} 는 각각 ESP의 축 방향 탄성계수, 횡 방향 탄성계수, 회전 탄성계수 및 회전/횡 방향 결합 탄성계수를 나타낸다.

ESP를 이용한 ESP RCC는 Whiteny [1,2]에 의하여 제안되었고, 위의 그림 3은 두 개의 ESP를 가지는 간단한 ESP RCC의 구조를 나타내고 있다.

그림에서 r 은 RCC의 바닥판의 중심에서 ESP가 부착되어 있는 지점의 중심까지의 거리, θ 는 ESP가 RCC의 바닥판과 이루는 각도, P_{RCC} 는 ESP가 RCC의 바닥판에 부착되어 있는 지점부터 순응 중심까지의 거리를 나타낸다. 여기서 순응 중심이란 물체에 힘이나 모멘트가 가해지는 경우, 힘에 의해서 직선 운동만이 발생하고, 모멘트에 의해서는 회전 운동만이 발생하는 지점으로 정의 된다.

위 그림에서 표시된 P_{RCC} 는 RCC의 가장 중요한 특성을 나타내며, RCC를 이용하여 작업 할 수 있는 대상체의 길이를

결정하게 된다. 따라서 작업하고자 하는 대상체의 길이가 정해지면 여기에 맞는 P_{RCC} 를 가지는 RCC를 선정하여 사용하게 된다.

이러한 ESP RCC의 P_{RCC} 는 ESP RCC에 외력이 가해진 상태에서 힘과 모멘트에 관한 평형 방정식과 순응 중심의 정의를 이용하여 수식적으로 유도되며[2], 두 개의 ESP를 가지는 ESP RCC의 P_{RCC} 는 다음과 같이 표현된다.

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

위 식에서 ESP RCC의 P_{RCC} 는 ESP의 탄성계수 K_E , K_S , K_{α} , $K_{\alpha s}$ 와 RCC의 기구학적 상수인 r , θ 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 따라서 ESP RCC의 순응 중심을 변화시키기 위하여 기구학적 상수를 변화시키는 방법을 도입한 VRCC [10-13]와, ESP의 탄성계수를 변화시키는 방법을 도입한 VRCC [14]가 개발되었다.

본 논문에서는 기 개발된 VRCC 보다 간편한 방법으로 RCC의 순응 중심을 변화시키기 위하여 탄성 조절기 [14]를 더욱 발전시킨 형태인 탄성 조절 막대를 이용한 RCC의 순응 중심 조절 방법을 개발하였다. 개발된 ESP의 탄성 조절 방법은 다음 장에서 설명 한다.

III. 새로운 ESP 탄성조절 방법

탄성 조절기를 이용하여 ESP의 탄성을 조절하는 방법은 [14] 매우 간단하고 효과적인 방법이지만, 자유롭게 탄성을 변화시키기 위해서는 다양한 길이의 탄성 조절기가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 기존 탄성 조절기의 단점을 보완하고자 ESP의 내부에 관통 구멍을 만들고, 관통 구멍에 탄성 조절 막대(SAR, Stiffness Adjusting Rod)를 삽입하여, 삽입된 막대의 길이로 ESP의 탄성을 조절하는 방식을 개발 하였다. 이와 같은 방법은 기존의 VRCC에서 도입한 방법에 비하여 조절하는 방법이 순쉬우며, 간단한 개조를 통하여 기존 RCC에 순응 중심을 변화시킬 수 있는 기능을 부여할 수 있다. 아래 그림은 새롭게 제안된 ESP의 탄성 조절 방법을 나타내고 있다.

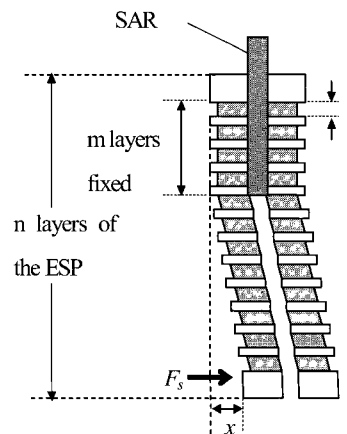


그림 4. 탄성 조절기를 이용한 ESP 탄성 조절 방식.
Fig. 4. Adjusting method of the ESP stiffness with the SAR.

앞의 그림에서와 같이 삽입된 탄성 조절 막대는 삽입된 부분의 ESP의 횡 방향의 움직임을 막지만, 축 방향의 움직임에는 영향을 주지 않는다. 따라서 탄성 조절 막대의 삽입 깊이에 따라서 횡 방향 탄성 계수와 회전/횡 방향 결합 탄성계수의 변화가 가능하다. 이와 같이 삽입된 탄성 조절 막대의 길이 변화에 따른 ESP 탄성 계수의 변화는, ESP의 탄성 계수를 ESP한 층의 탄성 계수로 나타내면 수식으로 표현이 가능하다[18].

수식 전개를 위하여 ESP한 층의 횡 방향 탄성계수를 k_s , ESP 탄성체 부분의 단면적을 A , ESP 탄성체 부분의 두께를 l , ESP 전체 층 수를 n , 탄성 조절 막대에 의해서 고정된 층 수를 m 이라 하면, 그림 4의 전단응력은 다음과 같이 표시된다.

$$F_s = GA\varepsilon, \tag{3}$$

$$= GA \frac{x}{l(n-m)}. \tag{4}$$

여기서 G 는 탄성체의 전단계수, ε 은 탄성체의 변형률을 나타내며, ESP 횡 방향 탄성 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$F_s = K_S x. \tag{5}$$

(4) 와 (5)를 정리하면, ESP 횡 방향 탄성 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$K_S = \frac{GA}{l(n-m)}. \tag{6}$$

위 (6)과 ESP 한 층의 탄성 계수와의 관계를 유도하기 위하여 ESP의 i 번째 층에 F_i 전단 응력이 가해져서 x_i 의 변형이 발생한 경우를 가정하면, 다음과 같이 표현된다.

$$F_i = GA\varepsilon_i, \tag{7}$$

$$= GA \frac{x_i}{l}. \tag{8}$$

(5)와 같이 ESP i 층의 횡 방향 탄성 계수는 다음과 같이 정의되므로,

$$F_i = k_s x_i. \tag{9}$$

(8) 과 (9)를 정리하면,

$$k_s = \frac{GA}{l}. \tag{10}$$

따라서 (6) 과 (10)을 이용하면,

$$K_S = \frac{k_s}{n-m}. \tag{11}$$

유사한 과정을 이용하여 정리하면,

$$K_{\text{os}} = \frac{k_{\text{os}}}{n-m}. \tag{12}$$

위 (11) 과 (12)에서 ESP내부로 삽입된 탄성 조절 막대에 의하여 ESP전체 횡 방향 탄성 계수와 회전/횡 방향 결합 탄성 계수가 변화 함을 할 수 있다. 따라서 본 논문에서 개발된 방식을 이용하면 ESP내부로 삽입하는 탄성 조절 막대의 깊이에 따라 손쉽게 ESP의 탄성변화가 가능하므로, 별다른

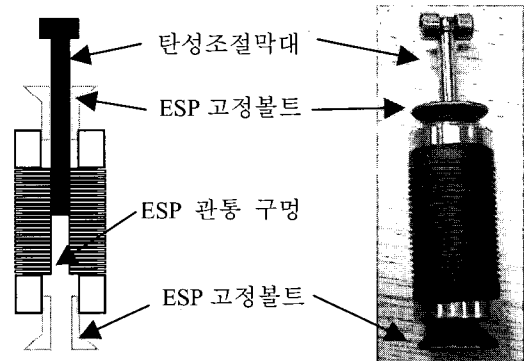
보조 기구 없이 기존 RCC의 순응 중심을 조절하여 다양한 종류의 막대 삽입 문제에 대응이 가능하다.

IV. ESP 탄성계수 측정 실험

개발된 방법을 이용한 ESP VRCC를 제작하기 위하여, 상용으로 판매되는 ESP RCC를 개조 하였다. 탄성 조절 막대를 삽입하기 위하여 ESP본체에 직경 3mm의 관통 구멍을 만든 후, VRCC의 본체에 고정하기 위하여 ESP의 상하부에 직경 6mm의 볼트캡을 만들었다. ESP를 VRCC에 고정시키는 고정 볼트에도 탄성 조절 막대를 수용할 수 있도록 직경 3mm의 관통 구멍을 만들었다. 개조된 EPS와 고정 볼트 및 탄성 조절 막대의 모습을 아래 그림에 나타내었으며, 사용된 ESP의 제원을 표 1에 정리 하였다.

ESP의 탄성 변화는 6축 힘/토크 측정 장비를 이용하여 측정하였으며, 아래 그림 6은 탄성 조절 막대의 삽입 깊이에 따른 ESP의 탄성 계수 변화의 측정치를 보여주고 있다.

측정을 통하여 탄성 조절 막대를 이용한 방법이 유효함을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 방식을 이용하면, 약간의 개조를 통하여 기존의 ESP RCC 에 원적 순응 중심을 조절할 수 있는 기능을 추가하는 것이 가능함을 알 수 있었으며, 이를 확인하기 위하여 기존 ESP RCC를 개조하여 새로운 형태의 ESP VRCC를 제작하였다. 새로운 형태의 ESP VRCC의 제작과 특성은 다음 장에서 상세히 설명한다.



(a) Cutaway view of the modified ESP (b) The modified ESP and SAR

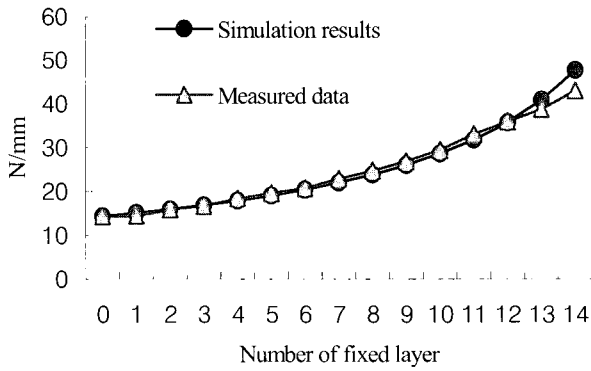
그림 5. 개조된 ESP와 탄성 조절 막대.

Fig. 5. The modified ESP and SAR.

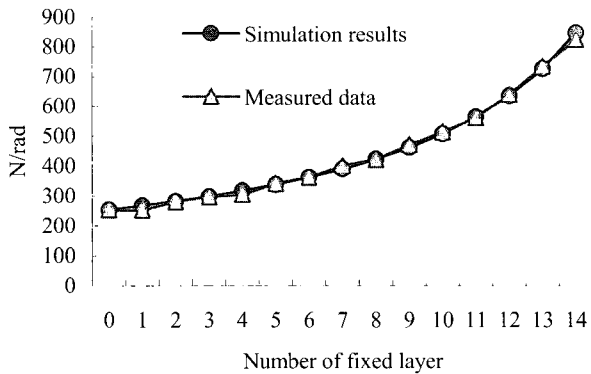
표 1. 개조된 ESP 제원.

Table 1. Specification of the modified ESP.

ESP 지름	14 mm
ESP 높이(볼트 고정부 제외)	20 mm
ESP 내부 구멍 지름	3 mm
Elastomer 1층 두께	1 mm
Washer 1층 두께	1 mm
Layer 갯수	20
K_E	831 N/mm
k_s	288 N/mm
k_{os}	4900 N/rad



(a) Lateral stiffness(K_S)



(b) Bending/lateral coupling stiffness(K_{As})

그림 6. 탄성 조절 막대의 삽입 깊이에 따른 ESP 탄성계수 측정치.

Fig. 6. Measured data of the ESP stiffness coefficients according to the insertion depths of the SAR.

V. ESP VRCC

탄성 조절 막대 방식을 이용한 ESP RCC의 순응 중심변화를 확인하기 위하여 기존 ESP RCC를 개조하여 시제품을 제작하였다.

제작된 ESP VRCC는 기존 RCC의 ESP에 탄성 조절 막대를 삽입 할 수 있도록 구멍을 만든 후에, RCC상부에 보조 기구를 제작하여 2개의 탄성 조절 막대가 동시에 ESP의 구멍으로 삽입되도록 제작 하였다. 2개의 탄성 조절 막대는 상하로 조절이 가능한 가동판에 장착이 되고, 가동판은 VRCC의 상부 구조물을 관통하는 볼트와 연결이 되어있어, 볼트의 회전에 따라 탄성 조절 막대의 높이를 조절하게 된다. 관통 볼트는 상부의 손잡이와 연결되어 손잡이로 ESP의 탄성을 조절할 수 있도록 제작 하였다.

그림 7의 도면은 제작된 VRCC의 단면도와 사진을 나타내고 있다.

제작된 VRCC의 원적 순응 중심의 변화를 확인하기 위하여 탄성 조절 막대의 위치를 변화 시켜 가면서 원적 순응 중심의 변화를 측정하였다. 순응 중심의 측정을 위하여 VRCC에 실험용 막대를 장착하여 일정 방향으로 일정한 외력을 가한 후 막대의 상하 부분의 이동 정도를 측정하여 순응 중심을 찾아내는 방식을 이용하였다. 막대의 이동 정도를 측정하기 위하여 1 μ m의 분해능을 갖는 다이얼 게이지를 막대의

상하 부분에 장착하였으며, 측정 오차를 최소화 하기 위하여 다이얼 게이지 접촉면과 외력을 가하는 부분은 평탄하게 제작하였다. 표 2는 측정에 사용된 VRCC의 제원을 나타내고 있다.

탄성 조절 막대의 삽입 깊이에 따른 VRCC의 원적 순응 중심의 위치에 관한 simulation 결과와 실제 측정 결과를 그림 8에 나타내었다.

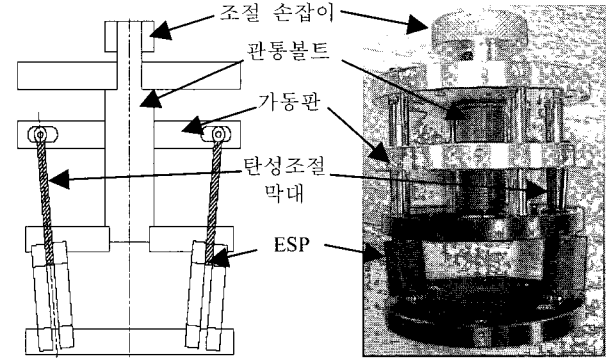


그림 7. 제작된 ESP VRCC.

Fig. 7. The developed VRCC.

표 2. 제작된 VRCC 제원.

Table 2. Specification of the developed VRCC.

직경	84 mm
높이(손잡이 포함)	125 mm
높이(손잡이 제외)	97 mm
사용된 ESP의 갯수	2
ESP 부착 각도 (θ)	5.5°
하부판 중심에서 ESP 부착 부분까지의 거리 (r)	25 mm
원적 순응 중심 위치 (P_{RCC})	81~34 mm

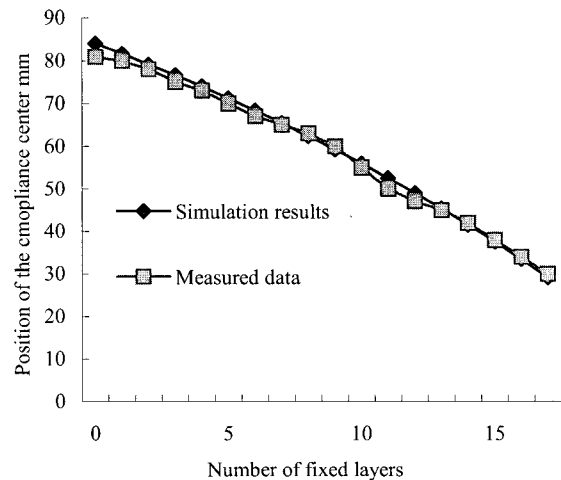


그림 8. 탄성 조절 막대의 길이에 따른 VRCC의 원적 순응 중심 위치의 변화량.

Fig. 8. Variation of the compliance center position of the VRCC according to lengths of the SAR.

위의 그래프에서 실험 측정치와 simulation 결과가 대체적으로 잘 일치함을 볼 수 있었으며, 이를 통하여 본 논문에서 제안한 ESP의 탄성을 변화시켜 RCC의 순응 중심을 변화시키는 방법이 효과적임을 확인 할 수 있었다.

VI. 결론

본 논문에서는 기존 ESP RCC의 순응 중심을 변환시키기 위하여, ESP의 탄성을 조절하는 간단하고 효과적인 방법을 제시하였다. 제시된 방법을 이용하여 제작된 ESP VRCC는 실험을 통하여 효과적으로 기능을 발휘할 수 있음을 확인 할 수 있었으며, 저렴한 비용으로 기존 ESP RCC의 사용 범위를 증가시키는 것이 가능함을 보여주었다.

논문에서 제작된 VRCC는 기능 검증을 위하여 수동으로 작동하도록 제작되었으나, 제어 및 실제 사용의 편의성을 위하여 모터를 이용하여 탄성 조절 막대를 구동할 수 있는 전기적 장치를 개발 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 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.
- [3] M. R. Cutkosky, P. K. Wright, "Position sensing wrists for industrial manipulators," *12th ISIR*, pp. 472-478, 1982.
- [4] Stefan Havlik, "A new elastic structure for a compliant robot wrist," *Robotica*, vol. 1, pp 95-102, 1983.
- [5] A. Fakri, A. Jutard and G. Liegeois, "Passive compliant wrist with two rotation center for assembly robot," *Proceedings of 5th Intl. Conference on Assembly Automation*, pp. 235-241, 1984.
- [6] W.-K. Kim, J.-Y. Lee and B.-j. Yi, "RCC characteristics of planar/spherical three degree of freedom parallel mechanisms with joint compliance," *Proc. IROS 96*, pp. 360-367.
- [7] Dragan Milutinovic, "Universal compliant device based on scara

concept," *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 15, no. 4, pp. 319-321, 1997.

- [8] H. Van Brussel and J. Simons, "The adaptable compliance concept and its use for automatic assembly by force feedback accomodation," *Proc. 9th ISIR*, pp. 167-181.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] S. W. Joo and Hiroyuki Waki and Fumio Miyazaki, "On the mechanics of elastomer shear pads for remote center compliance (RCC)," *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, pp. 291-298, 1996.
- [12] S. C. Lee, S. C. Won, S. J. Choi, "Development of a new variable remote center compliance for assembly robots," *Advanced Robotics*, vol. 14, no. 3, pp. 241-255, 2000.
- [13] S. C. Lee, 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.
- [14] S. J. Choi, S. C. Lee, 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.



이 상 철

1993년 동국대학교 전자공학과 졸업(학사). 1995년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업(석사). 2000년 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 졸업(박사). 2000년~2001년 (주)현대정보기술 자동화 사업부 선임연구원. 2002년~현재 한국 체육과학연구원 스포츠산업실 연구원. 관심분야는 센서 계측, 자동화 및 보행 로봇.