

## 운동의 허용공차를 이용한 RSSS-SC 현가장치의 기구학적 설계

김 선 평\*, 심 재 경\*\*  
(1999년 8월 30일 접수)

### Kinematic Synthesis and Analysis of RSSS-SC Suspension System Using Acceptable Tolerances of Motion

Seon-Pyung Kim and Jae-Kyung Shim

**Key Words :** Kinematic Synthesis(기구학적 합성), Sensitivity Analysis(민감도 해석), Suspension System(현가장치), Kinematic Constraint Equation(기구학적 구속조건식), Acceptable Tolerances(허용공차)

#### Abstract

In synthesizing an RSSS-SC mechanism that is the kinematic model of the McPherson strut suspension system in automobiles, the design equations for R-S, S-S and S-C dyads should be solved separately for a given set of prescribed positions. The number of prescribed positions that an RSSS-SC mechanism can be synthesized is up to three because of the S-C dyad. This limitation may cause unsatisfactory results in synthesized joint positions. This paper presents a kinematic synthesis method to place the joints of an RSSS-SC mechanism in desired boundaries by varying the prescribed positions of the mechanism within acceptable tolerances. The sensitivity analysis of the joint positions is used to determine which displacement parameter should be altered to fulfill this task.

#### 1. 서 론

맥퍼슨 스트럿 현가장치는 설치 공간의 이용률이 좋다는 장점 때문에 전륜 구동형 중소형 차량에 널리 사용되는 현가장치이다.<sup>(1,2)</sup> 차량용 현가장치는 휠 얼라인먼트의 변화가 승차감과 조종안정성 등의 특성에 큰 영향을 미치는 3 차원 기구로서, 차체에 대한 휠 어셈블리의 범프 리바운드 운동과 조향 운동이 현가계의 기본적인 운동이라 할 수 있다. 이러한 운동들은 3 차원 공간 기구학으로 해석할 수 있으며 특히, 범프 리바운드 운동시 나타나는 휠 얼라인먼트들의 변화를 차체에 대한 휠 어셈블리의 상대운동으로 표현하면, 기구에 요구되는 운동을 구현하도록 조인트의 위치를 설정하는 기구 합성법을 이용하여 설계자가 반복적인 해석작업에 의존하지 않고 현가장치의 특성에 유리

한 방향으로 조인트의 위치를 구할 수 있다. 따라서 3 차원 공간 기구학을 통한 현가장치의 합성법은 시간과 비용 절감을 위한 효율적인 설계환경을 제공한다.

현가장치의 기구학적 합성에 대하여 Suh<sup>(3)</sup>는 변위행렬법(displacement matrix method)을 이용하여 더블 위시본 현가장치를 합성하였고, Kang 등<sup>(4)</sup>은 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 합성법을 연구하였다. 또한, 정<sup>(5)</sup>은 기구학적 사상(kinematic mapping)을 이용하는 근사 합성법을 제시하는 등, 현가장치의 합성은 많은 학자들의 관심의 대상이다.

현가장치의 성능향상을 위해 고려해야 할 기구학적 인자들로서 조인트의 위치와 캠버각, 토우각과 같은 휠 얼라인먼트 값 등을 들 수 있다. 이들은 서로 복합적인 영향을 미치므로 이들간의 민감도를 이용하여 상호영향을 해석하는 방법들<sup>(6,7)</sup>이 현가장치의 설계에 많이 응용되고 있다. 또한, 현가장치가 설치되는 공간은 엔진 룸과 조향 장치가 인접해 있어 공간상의 설치 조건에 제한이 있다. 현가장치로서 기구가 수행해야 하는 성능과 각 조

\* 회원, 고려대학교 대학원

\*\* 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : jkshim@korea.ac.kr

TEL : (02) 3290-3362 FAX : (02) 926-9290

인트들이 설치될 수 있는 공간의 이중적인 제한 조건을 만족시키기 위한 한 방법으로 기구의 허용 공차를 이용하는 방법<sup>(8)</sup>이 있다. 기구가 수행해야 하는 운동의 허용공차 영역 내에서 운동을 미소 변화시키면 이는 조인트의 위치를 다양하게 변화시키는 설계 변수로 사용될 수 있고, 이러한 운동의 변화를 이용하는 방법은 현가장치의 초기 설계 단계에서 조인트의 위치를 조절하는 유용한 도구로 사용될 수 있다.

본 연구에서는 현가장치의 효율적인 설계법을 모색하기 위해 운동의 허용공차를 이용하여 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 기구학적 모델인 RSSS-SC 기구를 합성하였다. 이를 위해 전체기구를 R-S, S-S, S-C 다이어드(dyad)로 분리하였고, 합성 가능한 운동 위치(prescribed positions)의 수가 가장 적은 S-C 다이어드<sup>(4)</sup>를 먼저 합성하였다. 운동 위치의 미소 변화에 따른 S-C 다이어드의 민감도를 계산하고 허용공차 영역 내에서 운동 위치를 변경하여 조인트 위치의 제한 조건에 맞는 S-C 다이어드를 구하였다. 이렇게 변경된 운동 위치를 만족하도록 S-S 다이어드와 R-S 다이어드를 합성하고 이들을 결합하여 RSSS-SC 기구를 구성하였으며 합성된 기구의 검증을 위해 변위 해석을 수행하였다. 각 다이어드의 합성식은 기구학적 구속조건식을 이용하였고 해석식은 변위행렬법을 이용하였다.

2. 설계 모델

Fig. 1 은 맥퍼슨 스트럿 현가장치의 기구학적 모델인 RSSS-SC 기구를 나타낸다. 로워 암은 회전 조인트(revolute joint: R)와 구면 조인트(spherical joint: S)에 의해 차체와 휠 어셈블리에 연결되어 R-S 다이어드를 이루고, 스트럿은 구면 조인트와

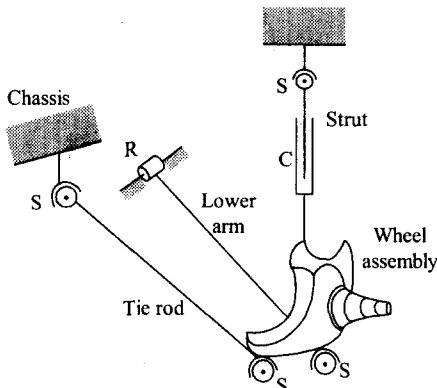


Fig. 1 RSSS-SC mechanism

원통 조인트(cylindrical joint: C)에 의해 차체와 휠 어셈블리에 연결되어 S-C 다이어드를 이룬다. 본 연구에서는 조향 운동이 없는 경우에 관한 모델만을 다루었으므로 조향 장치가 차체에 고정되어 타이로드가 2 개의 구면 조인트에 의해 S-S 다이어드를 이루도록 하였다. 이 기구의 자유도(degrees of freedom : DOF)를 구하기 위해 다음과 같은 식<sup>(9)</sup>을 이용할 수 있다.

$$F = \lambda(l - j - 1) + \sum_{i=1}^l f_i \tag{1}$$

여기서  $F$ 는 기구의 자유도,  $l$ 은 링크의 수,  $j$ 는 조인트의 수,  $f_i$ 는  $i$  번째 조인트의 자유도를 나타낸다.  $\lambda$ 는 운동 수(mobility number)로 평면 운동기구의 경우에는 3, 공간 운동기구의 경우에는 6 이다.

RSSS-SC 기구의 경우  $\lambda=6, l=5, j=6$ 이며 회전 조인트가 1 자유도, 원통 조인트가 2 자유도, 4 개의 구면 조인트가 각각 3 자유도를 가지므로 조인트의 총 자유도가 15 이다. 따라서 기구의 자유도  $F=3$  이나 기구의 거동에 영향을 미치지 않는 수동 자유도(passive DOF)가 S-S 다이어드와 S-C 다이어드에서 각각 1 씩 존재하므로 RSSS-SC 기구의 실제 자유도는 1 이다.

3. 현가장치의 설계

3.1 기구학적 합성

3.1.1 R-S 다이어드의 합성

차량의 후진방향을 양의 X 축, 차체를 후방에서 바라보았을 때 차량의 우측방향을 양의 Y 축이 되도록 차체에 고정 좌표계 X-Y-Z 를 설정하고 RSSS-SC 기구의 휠 센터에 이동 좌표계  $x_i-y_i-z_i$  를 지정하면 이동 좌표계의 원점을 가리키는  $O_i$  벡터와 고정 좌표계에 대한 이동 좌표계의 롤-피치-요(Roll-Pitch-Yaw: RPY)<sup>(4)</sup>로 이루어진 회전행렬  $[R_i]$ 로 휠 어셈블리의 초기 위치에 대한  $i$  번째 위치의 변위를 표현할 수 있다. 롤, 피치, 요는 각각 고정된 좌표의 X, Y, Z 축 방향 회전을 나타내며 이를 각각  $\gamma, \beta, \alpha$ 로 표기하였다. 여기서,  $\alpha$ 각은 토우각과 동일하며  $\gamma$ 각은 캠버각과 절대값은 같고 부호만 반대이므로 설계자가 원하는 초기 위치와  $i$  번째 위치의 캠버각과 토우각의 변화로 휠 어셈블리의 변위가 표현된다.

Fig. 2 는 R-S 다이어드를 나타낸다. 여기서  $A_i$ 는 휠 어셈블리에 고정된 구면 조인트의  $i$  번째 위치를 나타내는 위치벡터이고,  $A_0$ 는 차체에 고정된

회전 조인트를 나타낸다.  $\mathbf{a}_i$  와  $\mathbf{a}$  를 각각 고정 좌표계와 이동 좌표계로 표시한 이동 좌표계의 원점으로부터 구면 조인트까지를 나타내는 위치벡터라 하면,  $n$  개의 위치에 대한 이들의 관계는 다음과 같다.

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{O}_i + \mathbf{a}_i = \mathbf{O}_i + [\mathbf{R}_i] \mathbf{a}, \quad i=1, \dots, n \quad (2)$$

여기서,

$$[\mathbf{R}_i] = [\mathbf{R}_{\alpha i}] [\mathbf{R}_{\beta i}] [\mathbf{R}_{\gamma i}]$$

회전 조인트에 연결된 링크는 조인트의 회전축과 항상 일정한 각도를 유지한다는 구속조건으로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\mathbf{u}_a^T (\mathbf{A}_i - \mathbf{A}_0) - \mathbf{u}_a^T (\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_0) = 0, \quad i=2, \dots, n \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{u}_a$  는 회전 조인트의 회전축 방향 단위벡터이다.

또한, 조인트간의 거리가 일정하다는 구속조건으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$(\mathbf{A}_i - \mathbf{A}_0)^T (\mathbf{A}_i - \mathbf{A}_0) - (\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_0)^T (\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_0) = 0, \quad i=2, \dots, n \quad (4)$$

R-S 다이어드는 구면 조인트의 위치와 회전 조인트의 위치, 그리고 회전 조인트의 회전축 방향을 알면 공간상에서 그 형상을 구현할 수 있다. 그러나 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 회전 조인트가

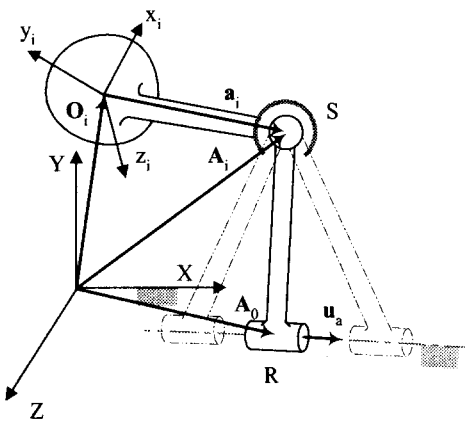


Fig. 2 R-S dyad

Table 1 Synthesis condition of R-S dyad

| Number of positions | Number of unknowns                          | Number of equations | Number of free choices | Number of solutions |
|---------------------|---|---------------------|------------------------|---------------------|
| 3                   | $7(\mathbf{a}, \mathbf{A}_0, \mathbf{u}_a)$ | 4                   | 3                      | $\infty^3$          |
| 4                   | 7   | 6                   | 1                      | $\infty$            |

회전축 방향 직선 위의 어느 곳에 위치하더라도 휠 어셈블리의 거동에 영향을 미치지 않으므로 회전 조인트의 위치를 나타내는 벡터  $\mathbf{A}_0$  의 한 성분은 설계자가 임의로 지정할 수 있다. 따라서 R-S 다이어드의 미지값은 구면 조인트 위치벡터의 3 성분과 회전 조인트 위치벡터의 2 성분, 그리고 회전축 방향 단위벡터의 2 성분이며 요구되는 휠 어셈블리의 운동 위치가  $\mathbf{O}_i$  와 RPY 각으로 주어지면, 식 (3)과 (4)에 의해 Table 1 과 같은 합성조건을 갖는다.

3.1.2 S-S 다이어드의 합성

Fig. 3 은 S-S 다이어드를 도시한 것이다.  $\mathbf{B}_i$  는 휠 어셈블리에 고정된 구면 조인트를 나타내는 위치벡터이고,  $\mathbf{B}_0$  는 차체에 고정된 구면 조인트를 나타내며,  $\mathbf{b}_i$  와  $\mathbf{b}$  를 각각 고정 좌표계와 이동 좌표계로 표시한 이동 좌표계의 원점으로부터 휠 어셈블리의 구면 조인트까지를 나타내는 위치벡터라 하면,  $n$  개의 위치에 대한 이들의 관계는 다음과 같다.

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{O}_i + \mathbf{b}_i = \mathbf{O}_i + [\mathbf{R}_i] \mathbf{b}, \quad i=1, \dots, n \quad (5)$$

조인트간의 거리가 일정하다는 구속조건으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$(\mathbf{B}_i - \mathbf{B}_0)^T (\mathbf{B}_i - \mathbf{B}_0) - (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_0)^T (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_0) = 0, \quad i=2, \dots, n \quad (6)$$

S-S 다이어드는 두 조인트의 위치가 미지값이므로 요구되는 휠 어셈블리의 운동 위치가  $\mathbf{O}_i$  와 RPY 각으로 주어지면 식 (6)에 의해 Table 2 와 같은 합성조건을 갖는다.

3.1.3 S-C 다이어드의 합성

Fig. 4 는 S-C 다이어드를 도시한 것으로서  $C_i(C_{ix},$

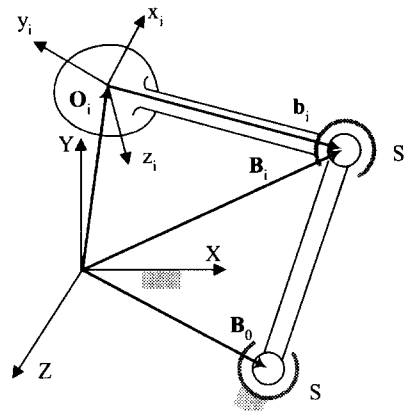


Fig. 3 S-S dyad

Table 2 Synthesis condition of S-S dyad

| Number of positions | Number of unknowns               | Number of equations | Number of free choices | Number of solutions |
|---------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| 2                   | 6 ( $\mathbf{b}, \mathbf{B}_0$ ) | 1                   | 5                      | $\infty^5$          |
| 3                   | 6                                | 2                   | 4                      | $\infty^4$          |
| 4                   | 6                                | 3                   | 3                      | $\infty^3$          |
| 5                   | 6                                | 4                   | 2                      | $\infty^2$          |
| 6                   | 6                                | 5                   | 1                      | $\infty$            |
| 7                   | 6                                | 6                   | 0                      | finite              |

$C_{iY}, C_{iZ}$ 는 고정 좌표계의 원점에 대한 원통 조인트상의 한 점의 위치를 표시하고,  $C_0(C_{0X}, C_{0Y}, C_{0Z})$ 는 구면 조인트의 위치를 나타낸다.  $\mathbf{u}_{ci}(u_{ciX}, u_{ciY}, u_{ciZ})$ 와  $\mathbf{u}_c$ 를 각각 고정 좌표계와 이동 좌표계로 표시한 원통 조인트의 운동축 방향을 나타내는 단위벡터라 하고,  $\mathbf{c}_i$ 와  $\mathbf{c}$ 를 각각 고정 좌표계와 이동 좌표계로 표시한 이동 좌표계의 원점으로부터 원통 조인트상의 한 점 까지를 나타내는 위치벡터라 하면,  $n$ 개의 위치에 대한 이들의 관계는 다음과 같다.

$$\mathbf{u}_{ci} = [\mathbf{R}_i] \mathbf{u}_c, \quad i=1, \dots, n \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{O}_i + \mathbf{c}_i = \mathbf{O}_i + [\mathbf{R}_i] \mathbf{c}, \quad i=1, \dots, n \quad (8)$$

맥퍼슨 스트럿 현가장치에서 S-C 다이어드는 원통 조인트의 운동축의 연장선 위에 구면 조인트가 위치한 스트럿 기구이며, S-C 다이어드에서의 미지 값은 원통 조인트의 운동축을 나타내는 직선과 그 직선 위의 구면 조인트의 위치이다. 이를 초기 위치에 대한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{C}_0 = \mathbf{C}_i + k \mathbf{u}_{ci} \quad (9)$$

여기서  $k$ 는 초기 위치에서 구면 조인트와 원통 조인트상의 한 점 사이의 거리이다.

Fig. 4에서 도시된 것과 같이 원통 조인트가 운동축 방향 직선 위의 어느 곳에 위치하더라도 휠 어셈블리의 거동에는 영향이 없다. 따라서 원통 조인트의 위치벡터  $\mathbf{c}$ 의 한 성분을 임의로 지정할 수 있다.

S-C 다이어드의 구속조건은 구면 조인트가 항상 원통 조인트의 운동축 위에 위치한다는 것이며, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.<sup>(4)</sup>

$$\frac{C_{iX} - C_{0X}}{u_{ciX}} = \frac{C_{iY} - C_{0Y}}{u_{ciY}} = \frac{C_{iZ} - C_{0Z}}{u_{ciZ}}, \quad i=1, \dots, n \quad (10)$$

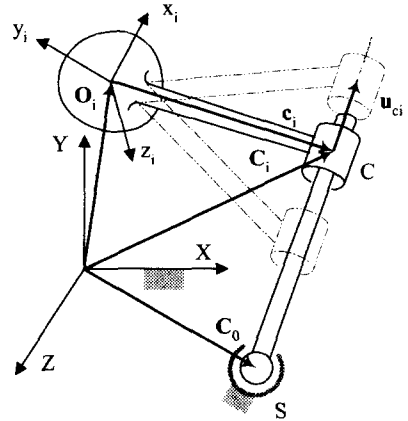


Fig. 4 S-C dyad

Table 3 Synthesis condition of S-C dyad

| Number of positions | Number of unknowns                 | Number of equations | Number of free choices | Number of solutions |
|---------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| 2                   | 5( $\mathbf{u}_c, \mathbf{c}, k$ ) | 2                   | 3                      | $\infty^3$          |
| 3                   | 5                                  | 4                   | 1                      | $\infty$            |

식 (10)을 둘로 나누고, 초기 위치와  $i$ 번째 위치와의 관계로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{-u_{ciX}(C_{iY} - C_{0Y}) + C_{iX}u_{ciY}}{u_{ciY}} - \frac{-u_{ciX}(C_{iY} - C_{0Y}) + C_{iX}u_{ciY}}{u_{ciY}} = 0, \quad i=1, \dots, n \quad (11)$$

$$\frac{-u_{ciZ}(C_{iY} - C_{0Y}) + C_{iZ}u_{ciY}}{u_{ciY}} - \frac{-u_{ciZ}(C_{iY} - C_{0Y}) + C_{iZ}u_{ciY}}{u_{ciY}} = 0, \quad i=1, \dots, n \quad (12)$$

S-C 다이어드는 요구되는 휠 어셈블리의 운동 위치가  $\mathbf{O}_i$ 와 RPY 각으로 주어졌을 때 식 (11)과 (12)에 의해 Table 3과 같은 합성조건을 갖는다.

### 3.2 기구운동의 변화에 대한 민감도 해석

기구의 주어진 운동에 대한 허용공차를 그 기구의 합성에 이용하기 위해서는 기구의 운동을 허용공차 내에서 변화시키고 그 변화를 설계자가 자유롭게 사용하여 조인트 위치를 다양화할 수 있어야 한다. 이를 위해 기구운동의 변화에 대한 조인트 위치의 민감도를 이용하면, 운동의 변화를 최소화 하면서 설계자가 의도하는 방향으로 조인트 위치를 변화할 수 있다. 일반적인 기구의 합성식은 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\Phi = \Phi(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \quad (13)$$

여기서,  $\mathbf{Y}$  는 조인트 위치들의 변수를 나타내며  $\mathbf{X}$  는 운동 위치들을 나타낸다.

이때, 운동 위치의 한 인자  $x_i(x_i \in \mathbf{X})$ 에 대한 조인트 위치의 민감도  $\partial \mathbf{Y} / \partial x_i$  는 다음과 같이 합성식을 미분하여 구할 수 있다.<sup>(7,8,11,12)</sup>

$$\frac{d\Phi}{dx_i} = \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{Y}} \frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial x_i} = 0 \quad (14)$$

본 연구에서는 설계 가능한 운동 위치의 수가 다른 다이어드에 비해 적어서 자유 설정치(free choice)로 조인트 위치를 조정하기 어려운 S-C 다이어드를 다양하게 변화시키기 위하여 운동의 미소 변화에 대한 민감도를 계산하고 이 값을 토대로 허용공차 내에서 운동 위치를 변경하였다.

3.3 기구학적 해석

3 차원 공간에서 자유롭게 움직이는 강체는 6 자유도를 가지고 있으며 이러한 강체의 위치는 6 개의 독립변수로 표현될 수 있다. 본 연구에서는 맥퍼슨 스트럿 현가장치를 1 자유도 RSSS-SC 기구로 모델링 하였으므로 1 개의 입력값이 주어지면 기구의 위치가 결정된다.

현가장치의 범프 리바운드 변위를 해석하기 위해 휠 어셈블리의 Z 방향 위치를 변화시키며 기구의 변위를 구하였다. 초기 위치와 해석하고자 하는 위치에서 모든 벡터들을 동차 좌표(homogeneous coordinates)로 변환하였고, 다음과 같은 관계를 갖는다.<sup>(3,4)</sup>

$$\mathbf{A}_i = [\mathbf{D}_i] \mathbf{A}_1 \quad (15)$$

$$\mathbf{B}_i = [\mathbf{D}_i] \mathbf{B}_1 \quad (16)$$

$$\mathbf{C}_i = [\mathbf{D}_i] \mathbf{C}_1 \quad (17)$$

$$\mathbf{u}_{ci} = \begin{bmatrix} [\mathbf{R}_i] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{c1} \quad (18)$$

여기서,

$$[\mathbf{D}_i] = \begin{bmatrix} [\mathbf{R}_i] & \mathbf{O}_1 - [\mathbf{R}_i] \mathbf{O}_1 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$$

- $\mathbf{A}_1$  : R-S 다이어드의 구면 조인트 초기 위치
- $\mathbf{B}_1$  : S-S 다이어드의 휠 축 구면 조인트 초기 위치
- $\mathbf{C}_1$  : S-C 다이어드의 원통 조인트 초기 위치
- $\mathbf{u}_{c1}$  : S-C 다이어드의 운동축 단위벡터 초기 위치
- $\mathbf{O}_i(O_{ix}, O_{iy}, O_{iz})$  : 이동 좌표계의 위치

식 (15), (16), (17), (18)을 식 (3), (4), (6), (11), (12)에 대입하고  $O_{iz}$  를 입력값으로 설정하면, 식 (3),

(4), (6), (11), (12)는 5 개의 미지값 ( $O_{ix}, O_{iy}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ )을 갖는 초기 위치와  $i$  번째 위치에 대한 5 개의 해석식이 된다. 이 식들을 연립하여 풀이하면 현가장치의 운동을 해석할 수 있다.

4. 합성 예제

다이어드를 이용하여 기구를 합성할 경우, 각각의 다이어드들이 모두 동일한 운동을 만족하도록 합성되어야 결합된 전체기구의 운동에 오차가 발생하지 않는다. 따라서, RSSS-SC 기구와 같이 서로 다른 합성조건을 가진 다이어드들의 결합으로 이루어진 기구는 합성 가능한 운동 위치의 수가 가장 적은 S-C 다이어드의 합성조건에 맞추어 3 개의 운동 위치를 만족하도록 합성하여야 한다. 이 경우, R-S 와 S-S 다이어드는 각각 3 개와 4 개의 자유 설정치를 가지므로 이들을 설계 변수로 사용하며 다양한 조인트 위치를 찾을 수 있다. 그러나 자유 설정치가 1 개인 S-C 다이어드의 경우는, 이론적으로는 무한한 수의 조인트 위치를 찾을 수 있으나 현가장치가 장착되는 공간의 제한 조건을 고려하면 자유 설정치의 값에도 한계가 있으므로 설계자가 의도하는 공간 내에서 조인트의 위치를 찾을 수 있는 보장이 없다. 다이어드의 합성조건에 맞추어 최대한의 운동 위치를 만족시키는 기구 합성 과정에서 나타날 수 있는 이러한 설계 변수의 부족 문제는 기구 합성의 결과를 실제 설계에 적용하는데 있어서 공간적인 치수 설정의 어려움을 야기하며 설계자가 의도하는 대략적인 조인트 위치를 만족시키기 위해선 자유 설정치 이외의 설계 변수를 사용하는 합성법의 개발을 필요로 한다.

본 연구에서는 이러한 RSSS-SC 기구 합성의 난점을 해결하기 위하여 운동의 허용공차를 이용하였으며 이를 실제 수치를 가진 예제로 검증하고자 우선, 요구되는 운동을 만족하는 S-C 다이어드를 합성하고 그 결과가 조인트 위치의 공간적 제한 조건을 만족하지 않을 경우나 설계 변경의 필요가 있는 경우로 가정하였다. 기구 운동의 변화를 최소화하기 위하여 운동의 변화에 대한 조인트 위치의 민감도를 계산하였고 이를 토대로 허용공차 내에서 운동을 변화시켜 S-C 다이어드의 조인트 위치가 설계자가 원하는 공간 내에 존재하도록 조정하였다. S-C 다이어드의 조정으로 변화된 운동을 만족하도록 R-S, S-S 다이어드를 합성하여 모든 다이어드가 동일한 운동을 만족하도록 합성하였다.

합성할 기구의 운동은 Kang 등<sup>(4)</sup>의 설계값을 이용하여 범프와 리바운드 행정의 위치를 고정 좌표계에서 이동 좌표계의 기준점을 가리키는 벡터  $\mathbf{O}_i$

와 RPY 각으로 Table 4 에 표기하였다. 설치 공간의 제한 조건은 차종과 사양에 따라 서로 다르지만, 합성법의 경향을 보이기 위해 Table 5 와 같이 임의로 설정하였다. 운동의 허용공차는 초기 위치에 대한 각 위치의 변위 인자 변화량의 약 5%로 설정하여 Table 6 에 표기하였다.

5. 결과 및 고찰

Table 3 에 표기한 S-C 다이어드의 합성조건에 맞추어 원통 조인트 위치벡터 **c** 의 z 성분을 0(mm)의 자유 설정치로 지정하였으며 3.1.3 절에서 언급한 바와 같이 원통 조인트의 위치는 운동축 방향 직선 위의 임의점을 지정할 수 있으므로 **c** 의 x 성분을 0(mm)으로 설정하였다. Table 4 의 운동을 만족하도록 비선형 방정식 (11)과 (12)를 소거법<sup>(10)</sup>으로 풀이하여 주어진 3 개의 운동 위치에 대한 모든 해를 구하였다.

합성된 S-C 다이어드의 결과 중 Table 5 에 주어진 요구되는 설치 공간에 가장 근접한 다이어드를 민감도 해석을 위한 기본 조인트 위치로 설정하여 Table 7 에 표기하였고, 식 (11)과 (12)의 합성식을 **O<sub>i</sub>** 의 3 성분과 RPY 각으로 미분하여 주어진 운동 위치의 미소 변화에 대한 각 조인트 위치들의 민감도를 구하였다. 복잡한 대수방정식을 직접 미분하기 위해 상용 문자처리 프로그램인 MATHE-

MATICA<sup>(13)</sup>를 이용하였고, 이 민감도들을 바탕으로 조인트 위치들의 변화를 예측하여 설치 공간 내에 다이어드가 존재하도록 허용공차 내에서 운동 위치를 변경하였다. 본 논문의 예제의 경우, RPY 각 만을 변화시켰으므로 이 각들의 변화에 대한 조인트 위치의 민감도를 Fig. 5 에 도시하였다.

제한된 설치 공간 내에 존재하지 않는 조인트 위치의 성분 **C<sub>0Y</sub>** 와 **C<sub>0Z</sub>** 를 조정하기 위하여 이들의 민감도가 큰  $\beta_2$  를 0.01(deg.),  $\gamma_2$  를 -0.07(deg.) 그리고  $\beta_3$  을 0.01(deg.) 변화시켜 조인트를 요구되는 설치 공간 내로 조정할 수 있었다. Table 8 의 1 번에 변화된 S-C 다이어드의 조인트 위치를 표기하였고 주어진 운동을 만족하는 모든 해들 중 실수해 9 개를 표기하였다.

민감도 합성의 결과로 미소 변화된 운동을 만족하도록 식 (3)과 (4)를 풀이하여 R-S 다이어드를 합성하였다. 자유 설정치들을 이용하여 주어진 설치 공간을 만족하는 여러 개의 다이어드를 구할 수 있었으며 이 다이어드들의 위치 중 회전 조인트의 회전축 방향 직선 위의 한 점을 지정하기 위해 벡터 **A<sub>0</sub>** 의 X 성분을 30(mm)으로 설정하고 Table 1 에 표기한 R-S 다이어드의 합성조건에 따라 **a** 의 3 성분을 자유 설정치로 지정한 5 개의 조인트 위치를 Table 9 에 표기하였다.

Table 2 에 표기한 S-S 다이어드의 합성조건에 따

Table 4 Prescribed positions of RSSS-SC mechanism

| Positions | O <sub>iX</sub> (mm) | O <sub>iY</sub> (mm) | O <sub>iZ</sub> (mm) | $\alpha_i$ (deg.) | $\beta_i$ (deg.) | $\gamma_i$ (deg.) |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| i=1       | 0                    | 689.5706             | 45                   | 0                 | 0                | 0                 |
| i=2       | -3.9841              | 676.0701             | -15                  | 0.0129            | 0.2818           | -1.9506           |
| i=3       | 9.8977               | 689.4685             | 145                  | -1.3464           | -0.5111          | 1.5332            |

Table 5 Required installation spaces (mm)

| Installation positions | Required X-Component       | Required Y-Component       | Required Z-Component       |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>a</b>               | $-50 \leq a_x \leq 50$     | $-200 \leq a_y \leq 0$     | $-150 \leq a_z \leq -50$   |
| <b>A<sub>0</sub></b>   | $-50 \leq A_{0X} \leq 50$  | $250 \leq A_{0Y} \leq 350$ | $-50 \leq A_{0Z} \leq 50$  |
| <b>b</b>               | $100 \leq b_x \leq 150$    | $-200 \leq b_y \leq 0$     | $-50 \leq b_z \leq 50$     |
| <b>B<sub>0</sub></b>   | $100 \leq B_{0X} \leq 150$ | $250 \leq B_{0Y} \leq 350$ | $50 \leq B_{0Z} \leq 100$  |
| <b>c</b>               | $c_x = 0$                  | $-200 \leq c_y \leq 0$     | $c_z = 0$                  |
| <b>C<sub>0</sub></b>   | $-50 \leq C_{0X} \leq 50$  | $450 \leq C_{0Y} \leq 550$ | $550 \leq C_{0Z} \leq 600$ |

Table 6 Acceptable tolerances of prescribed positions

| Positions | O <sub>iX</sub> (mm) | O <sub>iY</sub> (mm) | O <sub>iZ</sub> (mm) | $\alpha_i$ (deg.) | $\beta_i$ (deg.) | $\gamma_i$ (deg.) |
|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| i=2       | $\pm 0.1992$         | $\pm 0.6750$         | 0                    | $\pm 0.0007$      | $\pm 0.0141$     | $\pm 0.0975$      |
| i=3       | $\pm 0.4949$         | $\pm 0.0051$         | 0                    | $\pm 0.0673$      | $\pm 0.0256$     | $\pm 0.0767$      |

라  $B_0$ 의 3 성분과  $b$ 의  $x$  성분을 자유 설정치로 지정하고, 식 (6)을 풀이하여 주어진 3 개의 운동 위치에 대한 S-S 다이어드의 해를 구하였으며 이들을 중 5 개를 Table 10 에 표기하였다.

합성된 결과의 검증을 위해 Table 8 의 S-C 다이어드 1 번과 Table 9 의 R-S 다이어드 4 번 그리고 Table 10 의 S-S 다이어드 4 번을 지정하여 RSSS-SC 기구를 구성하고 그 변위를 해석하였다. 입력 값은 고정 좌표계의 Z 축방향으로 45mm 의 위치를 기본위치로 하여 145mm 까지의 범프와 -15mm 까지의 리바운드 행정을 10mm 씩 나누어 사용하였고 Table 11 에 변위 해석 결과를 표기하였다.

**Table 7** Basic solution for sensitivity analysis (mm)

|          |         |          |           |          |         |
|----------|---------|----------|-----------|----------|---------|
| $c_x$    | 0       | $c_y$    | -112.2446 | $c_z$    | 0       |
| $C_{0x}$ | 10.0049 | $C_{0y}$ | 510.021   | $C_{0z}$ | 583.005 |
| $u_{cx}$ | 0.0184  | $u_{cy}$ | -0.1241   | $u_{cz}$ | 0.9921  |

**Table 8** Joint positions of S-C dyad (mm)

| No. | $c_x$ | $c_y$    | $c_z$ | $C_{0x}$ | $C_{0y}$ | $C_{0z}$ | $u_{cx}$ | $u_{cy}$ | $u_{cz}$ |
|-----|-------|----------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1   | 0     | -132.276 | 0     | 10.1983  | 499.753  | 545.35   | 0.0202   | -0.1142  | 0.9932   |
| 2   | 0     | -1770410 | 0     | 237389.  | -105628. | -327814. | -0.1386  | -0.9717  | 0.1914   |
| 3   | 0     | -1724.63 | 0     | -227.435 | -1051.74 | 397.829  | -0.5414  | -0.0397  | 0.8398   |
| 4   | 0     | 11868.   | 0     | 400.209  | 12536.7  | 634.268  | 0.5616   | -0.0293  | 0.8269   |
| 5   | 0     | -1840.64 | 0     | -261.31  | -1163.42 | 396.874  | -0.5960  | -0.0282  | 0.8025   |
| 6   | 0     | -1698.56 | 0     | -362.04  | -1008.03 | 401.826  | -0.7122  | 0.0019   | 0.7020   |
| 7   | 0     | 13216.1  | 0     | -4.89171 | 13897.2  | -267.253 | 0.0157   | 0.0269   | 0.9995   |
| 8   | 0     | 40192.2  | 0     | -6229.58 | 365.507  | -4591.12 | 0.1510   | 0.9821   | 0.1124   |
| 9   | 0     | -416312. | 0     | -9849.19 | 406.487  | 738.971  | -0.0237  | 0.9997   | 0.0017   |

**Table 9** Joint positions of R-S dyad (mm)

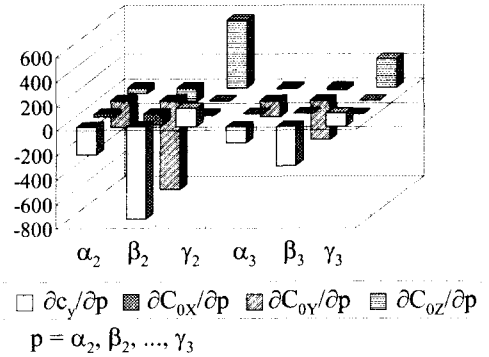
| No. | $a_x$ | $a_y$ | $a_z$ | $A_{0x}$ | $A_{0y}$ | $A_{0z}$ | $u_{ax}$ | $u_{ay}$ | $u_{az}$ |
|-----|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1   | 40    | -150  | -150  | 30       | 283.241  | -47.5617 | -0.9967  | 0.0146   | 0.0802   |
| 2   | 30    | -130  | -140  | 30       | 293.505  | -37.9716 | -0.9964  | -0.0025  | 0.0842   |
| 3   | 5     | -100  | -120  | 30       | 305.611  | -19.2606 | -0.9955  | -0.0302  | 0.0897   |
| 4   | -5    | -40   | -100  | 30       | 341.822  | -0.1258  | -0.9908  | -0.0889  | 0.1016   |
| 5   | -40   | -20   | -50   | 30       | 332.236  | 45.4964  | -0.9878  | -0.1186  | 0.1014   |

**Table 10** Joint positions of S-S dyad (mm)

| No. | $b_x$ | $b_y$    | $b_z$    | $B_{0x}$ | $B_{0y}$ | $B_{0z}$ |
|-----|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1   | 100   | -164.796 | -39.7819 | 100      | 250      | 50       |
| 2   | 110   | -102.471 | -17.9443 | 110      | 290      | 70       |
| 3   | 120   | -85.9269 | -6.00271 | 125      | 300      | 80       |
| 4   | 135   | -56.9479 | 5.82323  | 140      | 320      | 90       |
| 5   | 150   | -13.655  | 17.1656  | 150      | 350      | 100      |

### 6. 결론

본 연구에서는 현가장치가 구현하는 휠 어셈블리 운동의 미소 변화에 대한 조인트 위치의 민감도를 이용하여 RSSS-SC 현가장치를 합성하고 그 검증을 위해 기구의 변위를 해석하였다. 휠 어셈



**Fig. 5** Sensitivity of joint positions

Table 11 Displacement analysis of RSSS-SC mechanism

| $O_{ix}$ (mm) | $O_{iy}$ (mm) | $O_{iz}$ (mm) | $\alpha_i$ (deg.) | $\beta_i$ (deg.) | $\gamma_i$ (deg.) |
|---------------|---------------|---------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 9.8977        | 689.468       | 145           | -1.3464           | -0.5011          | 1.5332            |
| 8.68266       | 690.695       | 135           | -1.09731          | -0.459426        | 1.50695           |
| 7.5254        | 691.651       | 125           | -0.879906         | -0.414831        | 1.44782           |
| 6.42231       | 692.337       | 115           | -0.691386         | -0.367683        | 1.35801           |
| 5.37024       | 692.755       | 105           | -0.529278         | -0.31837         | 1.23939           |
| 4.3665        | 692.905       | 95            | -0.391363         | -0.267294        | 1.09361           |
| 3.40872       | 692.785       | 85            | -0.275636         | -0.214867        | 0.922063          |
| 2.49485       | 692.394       | 75            | -0.180268         | -0.161505        | 0.725973          |
| 1.62311       | 691.73        | 65            | -0.103571         | -0.107627        | 0.506374          |
| 0.791947      | 690.79        | 55            | -0.0439749        | -0.0536521       | 0.26414           |
| 0             | 689.571       | 45            | 0                 | 0                | 0                 |
| -0.753905     | 688.067       | 35            | 0.0297666         | 0.0529111        | -0.285456         |
| -1.47079      | 686.274       | 25            | 0.0466917         | 0.104664         | -0.591766         |
| -2.15154      | 684.186       | 15            | 0.052117          | 0.154844         | -0.918592         |
| -2.79692      | 681.795       | 5             | 0.0473813         | 0.203035         | -1.26572          |
| -3.40758      | 679.093       | -5            | 0.033842          | 0.248824         | -1.63305          |
| -3.9841       | 676.07        | -15           | 0.0129            | 0.2918           | -2.0206           |

블리가 수행하는 운동의 허용공차 영역 내에서 미소 변화를 이용하는 합성법은 설치 공간 등의 제한 조건을 가지는 초기 설계단계에서 조인트 위치를 다양화하는 유용한 수단으로 이용될 수 있다. RSSS-SC 현가장치에서 S-C 다이어드는 다른 다이어드에 비해 적은 수의 운동 위치만을 만족시킬 수 있어 자유 설정치가 적으므로 주어진 성능과 설치 공간을 만족시키며 설계하기 위해서는 다양한 설계법으로의 접근이 필요하다. 그 중 하나의 방법으로서 기구가 수행해야 할 운동의 허용공차를 이용하는 합성법은 타당성 있는 조인트 위치를 구할 수 있는 S-C 다이어드의 설계법으로 사용될 수 있다. 운동의 허용공차를 설계 변수로 사용하는 합성법은 본 논문의 예제로 사용한 RSSS-SC 기구 뿐만 아니라 다양한 형태의 다이어드로 구성된 여러 기구의 최대 운동 위치를 고려하는 합성에서도 설계 변수의 부족한 문제를 해결하는 수단으로 사용될 수 있다. 앞으로는 이러한 기구학적 인자들의 허용공차를 함수화하여 현가장치의 성능과 설치 공간을 최적화하는 방법이 연구되어야 할 것이며, 3 차원 기구의 운동을 보다 효율적으로 해석하는 방법에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

(1) Bastow, D., Howard, G., 1993, *Car Suspension and Handling*, Society of Automotive Engineers, Inc., pp. 82~85.

(2) Gillespie, T. D., 1992, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Inc., pp. 243~244.

(3) Suh, C. H., 1989, "Synthesis and Analysis of Suspension Mechanisms with Use of Displacement Matrices," SAE Paper 890098, pp. 171~182.

(4) Kang, H. Y., Suh, C. H., 1994, "Synthesis and Analysis of Spherical-Cylindrical (SC) Link in the MacPherson Strut Suspension Mechanism," *ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 116, pp. 595~606.

(5) 정병주, 1995, "기구학적 사상을 이용한 더블 위시본 현가장치의 기구학적 설계," 석사학위논문, 고려대학교, 서울.

(6) 문흥기, 1995, "차량 현가장치의 기구학적 민감도 해석," 한국자동차공학회 논문집, 제 3 권, 제 4 호, pp. 126~138.

(7) 민현기, 탁태오, 이장무, 1997 "직접 미분법을 이용한 현가장치의 기구학적 민감도해석," 한국자동차공학회 논문집, 제 5 권, 제 1 호, pp. 38~48.

(8) Mahableshwarkar, S. V., Kramer, S. N., 1990, "Sensitivity Analysis of the Burmester Equations of Planar Motion," *ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 112, pp. 299~306.

(9) Hunt, K. H., 1978, *Kinematic Geometry of Mechanisms*, Oxford University Press, pp. 30~52.

(10) 이태영, 심재경, 1996, "기어 5 절링크 함수발생장치와 4 절링크 경로발생장치의 설계," 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp. 954~961.

(11) Erdman, A.G., 1993, *Modern Kinematics : Development in The Last Forty Years*, John Wiley & Sons, pp. 491~501.

(12) Kaizerman, S., Zak, G., Benhabib, B., Fenton, R. G., 1994, "A Sensitivity Analysis Based Method for Robot Calibration," *ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 116, pp. 607~613.

(13) Wolfram, S., 1996, *The Mathematica Book*, 3rd ed., Wolfram Media, Cambridge University Press, Cambridge.