

안물안궁 엔지니어링 5

등속 조인트를 아시나요?

글. 조인준 KBS 미디어기술연구소 차장

C군의 네버엔딩 스토리

독자 여러분들 중에 자동차 정비를 받으시면서 등속 조인트 교체나 수리를 하신 경험이 있거나 이에 관해 들어보신 분이 있을 겁니다. 등속 조인트는 [그림 1]과 같이 엔진의 회전력을 바퀴에 전달하는 조인트입니다. 이 조인트의 특징은 노면의 충격 흡수를 위해 바퀴가 위·아래로 움직이거나 특히, 전륜구동 차량의 경우 조향을 위해 바퀴가 큰 각도로 꺾이는 경우에도 엔진의 회전속도와 등속으로 바퀴를 회전시킬 수 있는 것인데요. 어떤 구조를 가졌기에 이렇게 각도가 꺾여도 구동력이 등속으로 전달되는지 궁금하게 여기셨던 적이 있나요? 그리고 왜 그냥 조인트라고 안 하고 등속 조인트라고 부르는지도 궁금해하신 적이 있나요?

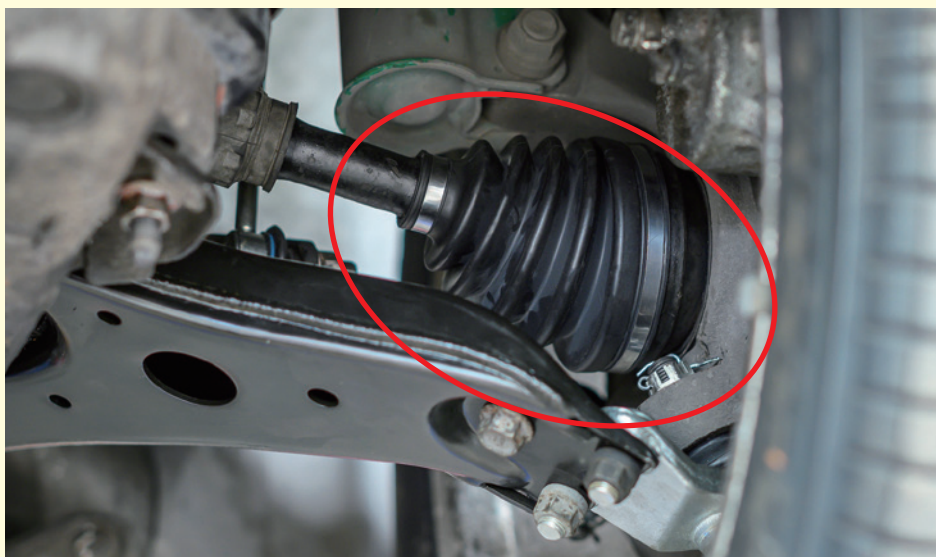


그림 1. 전륜구동 차량의 등속 조인트 / 출처 : www.carparts.com

우선 [그림 1]의 등속 조인트를 설명하기 전에 [그림 2]와 같이 유니버설 조인트라는 것이 있었습니다. 원리는 꽤 오래전에 발명된 듯하며, 초기엔 등속 조인트라고 믿었다가 누군가에 의해 회전시 속도가 변하는 조인트임이 증명되었다고 합니다. 유니버설 조인트가 꺾어진 각도에서도 회전

력을 전달하는 원리는 복잡하지 않습니다. [그림 2]의 빨간 원으로 표시된 조인트의 안쪽을 보시면 + 모양의 쇠붙이가 있고, 이 쇠붙이에 회전력을 주는 축과 회전력을 받는 축이 90도로 엇갈려서 움직이는 관절처럼 연결되어 있습니다. 이렇게 90도로 엇갈려 연결되어 있으므로 상하좌우 원하는 방향으로 관절이 다 움직일 수 있고, 이러한 구조가 임의의 각도로 회전축들이 꺾여 있어도 회전력 전달을 가능하게 합니다.

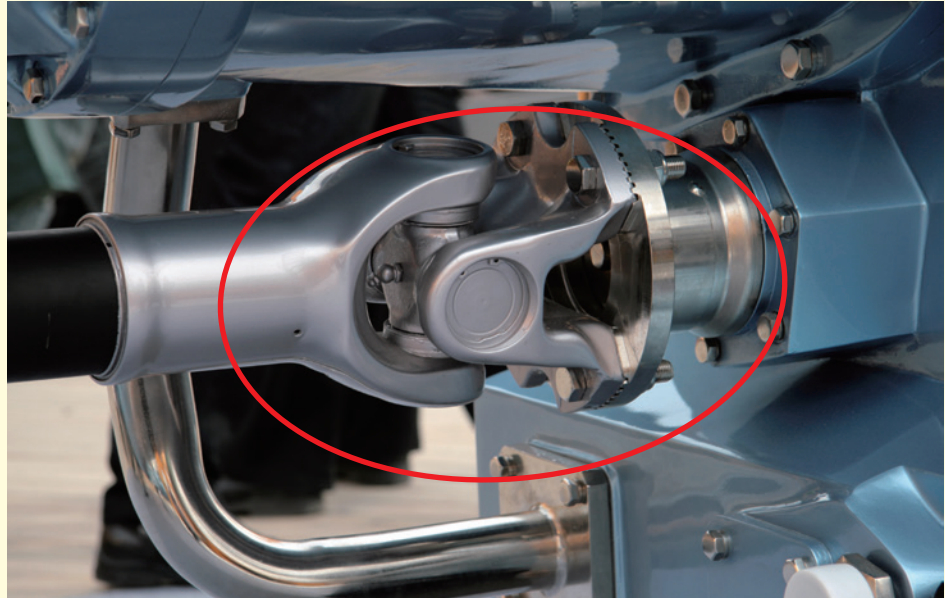


그림 2. 유니버설 조인트 / 출처 : www.yourmechanic.com

그런데 왜 유니버설 조인트가 등속 조인트가 아닌 것이 문제일까요? 이를 간단히 설명하기 위해 자동차의 예를 들어보겠습니다. 전륜구동차에 엔진의 회전력을 바퀴에 전달하기 위해 유니버설 조인트를 사용했다고 가정합니다. 전륜구동 차량의 경우 앞바퀴로 주행 및 조향을 모두 하기 때문에 앞바퀴의 각도 변화가 큼니다. 유니버설 조인트는 연결된 축 간의 꺾임 각이 클수록 양 축간 속도 차의 변동이 점점 커지는데(구동력을 주는 축이 일정한 속도로 회전할 때 구동력을 받는 축의 1회전 사이에 회전이 빠른 구간과 느린 구간이 존재하게 됨), 앞바퀴가 회전하는 속도가 빨라졌다 느려졌다 출렁임을 반복하면 차량의 기계적 안정성을 유지하기 힘들고, 안정적 주행도 불가능합니다. 그래서 양 축간 회전 속도 차가 문제가 되는 분야에는 유니버설 조인트를 사용할 수 없습니다.

그런데 왜 이런 회전 속도의 출렁임이 생기는 걸까요? 직업 엔지니어로서 한 번은 이론적으로 짚고 넘어가야 할 것 같은 사명감에 [그림 3]과 같이 약간의 기하 및 미분 지식을 활용하여 유니버설 조인트의 회전속도 출렁임을 설명해 보겠습니다. [그림 3] 오른쪽의 파란 원과 빨간 원은 각각 왼쪽 사진의 아래 축, 위축의 회전면을 단위원으로 나타낸 것이고, xyz 좌표계는 우측 상단과 같습니다. x축과 일직선으로 정렬된 아래 축 연결 부위가 우측 파란 단위원의 회전면을 따라 반시계방향으로 θ_1 만큼 회전한다고 가정하면, y축과 일직선으로 정렬된 위축 연결 부위도 우측 붉은 단위원의 회전면을 따라 반시계방향으로 θ_2 만큼 회전하게 됩니다. 이렇게 단위원을 따라 회전한 단위 벡터를 각각 u_1 , u_2 라고 하면 u_1 의 좌표는 $(\cos\theta_1, \sin\theta_1, 0)$ 이 되고 u_2 의 좌표는 $(-\cos\alpha \sin\theta_2, \cos\theta_2, \sin\alpha \sin\theta_2)$ 가 됩니다. 그리고 u_1 , u_2 는 유니버설 조인트의 관절에 들어가는 + 모양의 연결부품과 일치하므로 항상 직각을 유지하게 되어 $u_1 \cdot u_2 = 0$ 의 조건을 만족해야 합니다. 이로부터 자연히 [수식 1]이 만들어지고 [수식 2]와 같이 이항 후, [수식 3]과 같이 양변을 $\cos\alpha \cos\theta_1 \cos\theta_2$ 로 나누면 [수식 4]가 되고, 마지막으로 tan의 역함수를 양변에 취하면 [수식 5]와 같이 θ_1 과 θ_2 의 관계식이 나옵니다. 그리고 마지막으로 양변을 시간에 관해 미분하면 [그림 3] 오른쪽 붉은 원과 파란 원 위에서

회전하는 유니버설 조인트의 연결점들의 각속도 w_1 과 w_2 의 관계식을 얻을 수 있습니다. w_2 가 w_1 과 θ_1 의 함수라는 것로부터 θ_1 에 따라 w_1 과 달라진다는 것이 수식으로 확인됩니다.

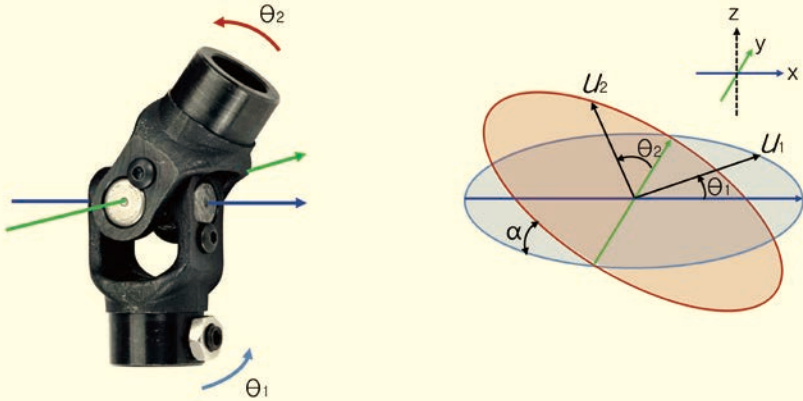


그림 3. 유니버설 조인트의 입력축·출력축 회전 각도 관계 / 출처 : www.moglix.com

$$-\cos\alpha\cos\theta_1\sin\theta_2 + \sin\theta_1\cos\theta_2 = 0 \dots\dots\dots \text{[수식 1]}$$

$$\cos\alpha\cos\theta_1\sin\theta_2 = \sin\theta_1\cos\theta_2 \dots\dots\dots \text{[수식 2]}$$

$$\frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2} = \frac{\sin\theta_1}{\cos\alpha\cos\theta_1} \dots\dots\dots \text{[수식 3]}$$

$$\tan\theta_2 = \frac{\tan\theta_1}{\cos\alpha} \dots\dots\dots \text{[수식 4]}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\theta_1}{\cos\alpha}\right) \dots\dots\dots \text{[수식 5]}$$

$$w_2 = \frac{w_1 \cos\alpha}{1 - \sin^2\alpha\cos^2\theta_1} \dots\dots\dots \text{[수식 6]}$$

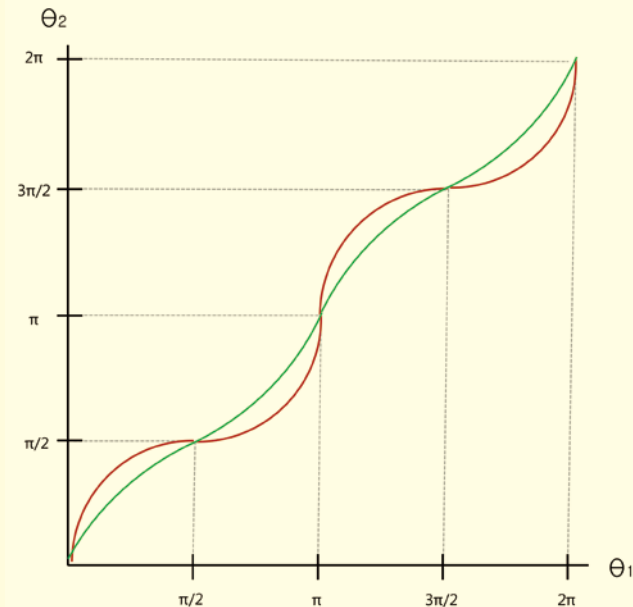


그림 4. 유니버설 조인트의 입력축·출력축 회전 각도 함수 그래프

[그림 4]는 [수식 5]를 통해 얻어진 θ_1 과 θ_2 의 관계를 대략적인 그래프로 그린 것입니다. 그래프에서 볼 수 있듯이 [그림 3] 아래 축이 등속으로 회전하며 θ_1 이 0에서 2π 까지 일정한 간격으로 증가할 경우 θ_2 는 많이 증가했다 적게 증가했다 하며 증가 폭이 일정치 않게 되고, 이로 인해 위축의 회전 속도에 출력임이 생깁니다. 그림에서 빨간 선은 녹색 선보다 유니버설 조인트의 꺾임 각이 큰 경우입니다. 꺾임 각이 클수록 θ_2 의 증가량도 많이 출력하게 됩니다.

그렇다면 유니버설 조인트의 문제점을 해결한 등속 조인트는 어떤 구조를 가지고 있을까요? [그림 5]의 자동차용 등속 조인트에서 그 구조를 알 수 있습니다. 자동차용 등속 조인트는 회전력을 전달하는 축과 전달받는 축이 볼(ball)이 들어갈 수 있는 홈(①로 표시)을 통해 연결되어 있습니다. 그리고 이 볼들이 각 축의 홈에서 자유롭게 움직이다 이탈하지 않도록 잡아두기 위한 틀(②로 표시)이 양축 사이의 공간에 들어갑니다. 각 축의 홈에 볼이 들어가 두 축을 연결하므로 회전력 전달 및 축간 각도 변화가 가능합니다.

등속 조인트의 원리는 [그림 6]을 통해 유니버설 조인트와 같은 분석 없이도 직관적으로 이해할 수 있습니다. 간단한 사고실험을 하나 해보면 [그림 6]의 꺾어진 줄무늬 빨대에서 빨대의 한쪽 끝을 회전시키면 반대쪽 끝이 같은 각도로 돌아갈 수밖에 없는 것을 줄무늬를 통해 알 수 있습니다. 이로부터 줄무늬의 위치를 [그림 5]의 조인트 홈(①로 표시)의 위치라고 가정하면 [그림 5]의 조인트에서는 [그림 4]와 같은 축들의 회전각 사이에 출력임이 발생하지 않아서 축간 등속 회전이 성립합니다.

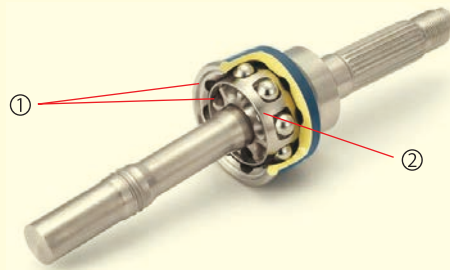


그림 5. 등속 조인트(자동차용) / 출처 : www.ntn-snr.com



그림 6. 줄무늬 빨대

[그림 7]은 자동차용 등속 조인트의 꺾임각을 보여줍니다. 볼을 잡고 있는 틀이 두 축이 이루는 각의 중간 각도에 위치하며 이중 관절과 같은 구조를 만들고 있어 축이 많이 꺾여도 홈에서 볼이 빠지지 않게 해줍니다. 용도에 따라 구조의 복잡도에 차이가 있을 수 있지만, 등속 조인트는 대부분 회전력을 전달하는 축과 전달받는 축이 [그림 5]와 같이 볼이나 베어링으로 연결되어 있습니다.



그림 7. 자동차용 등속 조인트 가동 범위 / 출처 : youramazingcar.com

지금까지 독자 여러분이 자동차를 이용하시며 일상에서 매일 사용하고 있는 기계 장치이지만 딱히 관심을 두지 않으셨을 등속 조인트에 관해 설명 드렸습니다. 6회로만 연재를 기획한 안물안궁 시리즈이기에 다음 연재가 안물안궁의 마지막 편이 될 것 같습니다. 시리즈의 대미를 장식할 신선한 소재를 꼭 찾아서 읽어주신 노력에 대한 보답을 꼭 드리겠습니다. 📖