

회전성형 프로세스의 회전운동 제어에 관한 연구

이완규 최만용 임순재

한국표준과학연구원

1. 서론

회전성형가공(Rotation molding)은 사출성형등에 비해 제품의크기, 형상에 제약이 거의 없고 동일한 설비에서 금형의 교환만으로 다양한 제품을 생산할수 있기 때문에 최근 국내외적으로 각광을 받기 시작하고 있다. 회전성형가공은 금형의 외부에 고온의 열을 가하면서 2축방향으로 동시에 회전을 시켜 금형내부의 수지를 금형내부에 균일하게 용착시켜 제품을 생산하는 과정으로, 일반적으로 제품의 강도보다는 제품 치수의 정도 및 치수(예를들면 두께)의 균일성이 가공상의 중요한 문제가 된다.

이로서 강도와 내부식성이 동시에 요구되는 화학플랜트의 특수용액저장용 대형탱크의 경우 탱크벽면의 두께의 균일성에 대한 보장이 매우 중요한 문제가 되고 있다. 이와같은 탱크의 경우 동상 PC(Polycarbon), PVDF(불소수지의 일종)등이 사용되고 있는데 재료가 고가일뿐 아니라 요구되는 벽면의 두께가 3-5mm와 같이 제한되기 때문에, 부분적인 수지의 뭉침 또는 흠이 발생하지 않는 균일한 치수의 제품의 성형이 매우 중요하게 된다.

성형가공의 성능은 주로 금형의 회전운동과 금형내부의 온도분포에 의존하기 때문에 고정도 제품의 성형과 함께 제품의 생산성향상을 위해서는 금형의 회전운동과 금형내부의 수지의 응고기동을 규명함과 동시에 이들을 복합적으로 제어한 필요가 있다. 즉 금형내부의 수지가 가능하면 한곳으로 몰리지 않고 균일하게 분포하면서 이동할수 있는 금형의 회전운동모 델을 설정하고 금형내부의 응고상태에 따라 온도 및 회전비를 적절히 제어해야 한다.

본연구에서는 회전성형프로세스의 최적제어를 위한 목적으로 금형의 회전운동에 관해 검토한다. 먼저 금형의 회전운동에 관한 수학적모델을 작성하고 금형내부의 수지가 균일한 운동을 할수 있는 금형의 회전 경로를 생성하는 2축의 회전비의 관계를 구하는 방법에 관해 검토하였다. 다음 시뮬레이션을 통하여 본

방법의 타당성에 대해 검토하였다.

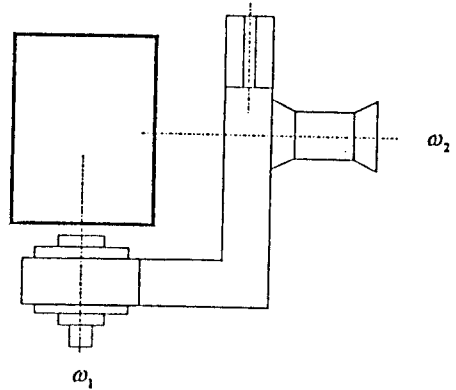


그림 1 회전성형가공프로세스

2. 회전운동제어

2.1 회전운동제어의 기본개념

회전성형가공프로세스는 그림1에 보이는 것과 같이 다량의 분말수지를 충전한 금형의 외부로부터 고온의 열을 가하면서 금형을 자체 회전시키고 동시에 진체를 회전시켜 금형내의 수지를 금형내부의 벽면에 끈고루 용착시켜 원하는 제품을 얻는 것이다. 따라서 수지가 금형내부에 끈고루 용착하기 위해서는 금형내부의 온도가 균일한 온도분포를 갖도록 유지하면서 수지가 한곳에 몰리지 않도록 금형을 적절히 회전시켜야 된다.

금형의 회전은 자체 및 진체의 회전속도 ω_1 , ω_2 의 비에 의해 결정되므로 금형의 회전운동의 제어는 금형내부의 점들이 가능하면 중복되지 않는 경로를 따라 운동하도록 두축의 회전속도 ω_1 및 ω_2 의 비를 제어하는 것이 된다.

본 연구에서는 금형의 운동경로를 금형내부의 한 점에 위치하는 단위질점이 금형내부를 이동하는 것과

같은 것으로 생각하고, 이 질점이 중복되지 않는 경로를 따라 이동하여 금형내부의 모든 점을 기치도록 하는 회전운동을 생성하는 방법을 검토하였다.

그림 1에서와 같은 직방체의 형상을 갖는 단순한 금형을 예로 생각하면 금형내의 질점의 운동은 이 금형을 x축방향으로 절단하여 전개한 그림 2와 같은 구형의 도형상을 한점 p가 속도 v로 이동하여 도형의 모든점을 기치는 것과 같다고 할수 있다. 단 여기서 금형내부의 한질점은 미끄러짐없이 운동한다고 가정한다.

따라서 본 연구에서는 금형의 회전운동을 금형을 절단하여 전개한 평면상을 임의의 질점이 운동하는 것과 동가로 생각하고, 이 평면상의 질점의 운동을 수학적으로 기술함과 동시에 내부의 모든점을 중복되지 않고 기치게 하는 두축의 회전비 ω_1, ω_2 의 관계를 구하였다.

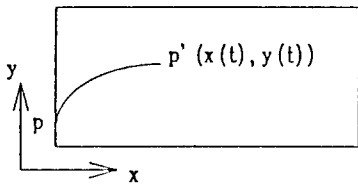


그림 2 금형내의 질점의 운동

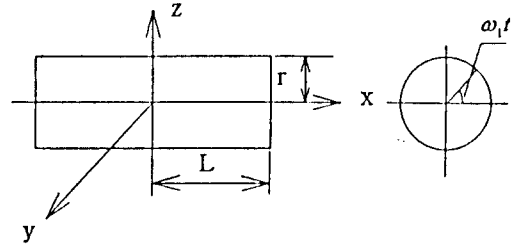


그림 3 x축 중심의 회전

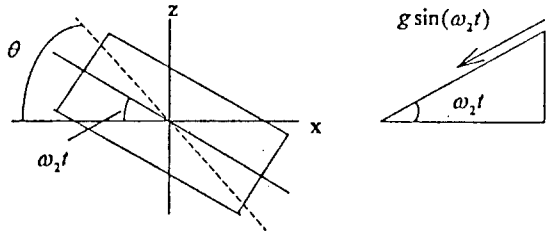


그림 4 y축 중심의 회전

여기서

- 실린더의 반지름 r
- 실린더의 길이 2L
- x축을 중심으로 한 회전속도 ω_1
- y축을 중심으로 한 회전속도 ω_2
- y축을 중심으로 한 회전각 θ
- (x축과 실린더의 중심선이 이루는 각)

이다.

그림 3 및 4에 보이는 것과 같이 금형은 x축 및 y축을 중심으로 각각 ω_1, ω_2 의 속도로 회전한다. 그림 2에 보이는 것과 같이 이 회전운동에 의해 금형을 펼쳐서 생기는 구형평면내의 한 질점은 속도 v로 운동하고 임의의 시각에서의 p'의 이동거리는 $x(t)$ 및 $y(t)$ 로 표시된다.

2.2 회전운동모델

금형의 형상은 원통, 직방체 그리고 자유곡면과 다각형으로 이루어진 복잡한 형상으로 다양하며, 벽면에 오목 볼록한 단 또는 홈등이 존재하나 본연구에서는 문제를 단순화하기 위해 금형을 펼쳤을때 생기는 도형의 형상은 구형이고 도형상의 모든점은 2차원 평면상에 존재한다고 가정하고 수학적 모델을 전개한다. 즉 금형은 벽면이 평평한 원통실린더로 이루어 졌다고 가정한다. 이것은 실제의 가공상에서는 금형의 부분적인 형상의 차이에 의한 영향은 극히 적고 오히려 금형의 단면대 길이의 비가 회전비에 크게 영향을 주기 때문이다.

이들 금형은 두축을 중심으로 회전운동을 하기 때문에 금형내의 한질점의 운동은 각축에 대한 원운동의 합성으로 이루어진다. 그림 3 및 그림 4는 금형의 회전모델을 나타낸다.

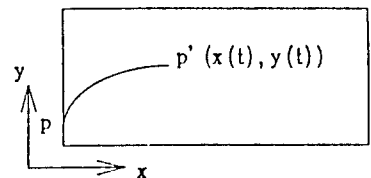


그림 5 평면상의 질점의 운동

임의의 시간 t 초후의 질점의 x 축을 중심으로한 회전에 의한 이동거리를 $y(t)$, y 축을 중심으로한 회전에 의한 이동거리를 $x(t)$ 라 하면 다음과 같이 표시된다.

1) x 축 중심의 회전에 의한 이동거리
 t 초후의 중심각을 $\omega_1 t$ 라 하면 이동거리 $y(t)$ 는 다음식으로 표시된다.

$$y(t) = r\omega_1 t$$

2) y 축 중심의 회전에 의한 이동거리
 그림 4에서 t 초후의 중심각은 $\omega_2 t$ 이므로 그때의 실린더의 중심방향으로의 가속도는 $g \sin(\omega_2 t)$ 이다. 여기서 g 는 중력가속도이다. 또 $\omega_2 t$ 의 범위를 다음과 같이 설정한다.

$$-\theta \leq \omega_2 t \leq \theta$$

t 초후에 실린더 내부로 향하는 속도 $v(t)$ 는

$$\begin{aligned} v(t) &= \int_0^t g \sin(\omega_2 s) ds \\ &= -\frac{g}{\omega_2} \cos(\omega_2 t) + \frac{g}{\omega_2} \end{aligned}$$

그러면 t 초동안 실린더 끝면에서 내부를 향하여 움직인 거리는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} x(t) &= \int_0^t v(s) ds \\ &= \int_0^t \left[-\frac{g}{\omega_2} \cos(\omega_2 s) + \frac{g}{\omega_2} \right] ds \\ &= -\frac{g}{\omega_2^2} \sin(\omega_2 t) + \frac{g}{\omega_2} t \end{aligned}$$

2.3 2축의 회전속도의 관계

상기의 식에 의해 구해진 급형의 운동모델로부터 중복되지 않는 경로를 따라 급형내부의 모든 점을 기하게 하기 위한 두축의 회전비 ω_1, ω_2 의 관계는 급형을 전개한 평면상의 질점의 운동에 의해 그리지는 궤적으로부터 구할수 있다.

그림 6 과 같이 평면상의 양 끝단을 각각 A 및 B 라고 하면 한 끝단 A 상의 임의의 한점 p를 출발한

질점이 다른 끝단 B상의 임의의 한점을 거쳐 다시 A상의 p가 아닌 점에 도달하는 궤적을 그리는 회전비를 구한다. 이와같은 회전비는 가능한한 중복을 피하면서 부분적인 누락을 피할수 있기 때문이다. 그림에서 이해할수 있는 것과 같이 점선으로 표시되는 궤적을 그리는 회전비는 부분적인 누락이 발생할 가능성이 많기 때문이다.

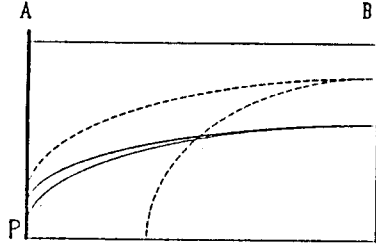


그림 6 평면상의 궤적

3. 시판레이션 및 고찰

2.3절에서 제안한 방법에 의해 궤적을 구하기 위해 $x(t)$ 및 $y(t)$ 를 다음과 같이 변형한다.

$$f(t) = \sin\left\{\frac{\pi\omega_2}{2\theta}t\right\}$$

$$g(t) = \sin\left\{\frac{\pi}{2L}t\right\}$$

$$x(t) = \text{sgn}(g(t)) \left[-\frac{g}{\omega_2} \sin\{\text{sgn}(f(t))\omega_2 t\} + \frac{\text{sgn}(f(t))gt}{\omega_2} \right]$$

$$y(t) = 2\pi \left\{ \frac{\omega_1 t}{2\pi} - \left[\frac{\omega_1 t}{2\pi} \right] \right\}$$

여기서

$\text{sgn}(x)$: x 의 부호

$[x]$: x 를 넘지 않는 최대 정수

상기 식을 풀고 시판레이션한 결과를 그림 7에 나타낸다. 그림에서 가로축 및 세로축은 각각 급형의 길이방향의 치수 및 단면의 둘레(여기서는 원주길이)를 나타낸다.

실제 가공에서 각 축의 최대 허용 회전수는 주축이 약 5-10rpm, 부축이 15-20rpm정도로 제한이 되기 때문에 여기서도 실제의 회전수에 가까운 5rpm과

10rpm의 값을 설정하고 시뮬레이션 하였다. 일반적으로 회전비는 금형의 x축방향의 길이 L과 반경의 크기 r의 비에 크게 의존하기 때문에 금형의 형상은 L:r의 비가 1:1, 2:1의 대표적인 경우에 대하여 적용해 보았다. 시뮬레이션 결과 실제의 가공시의 회전비에 상당히 접근됨을 확인 하였다.

4. 결론

실제의 가공에서는 2축의 회전비가 금형의 기하학적인 운동만으로 결정되지는 않고 금형내부의 수지의 응고 기동에 따라 크게 좌우되는 경우가 많다. 그러므로 실제의 상황에서는 가공상의 모든 요소를 고려한 최적의 회전비를 산출하지 않으면 안된다. 그러나 금형내의 수지의 거동은 비선형적인 복잡한 거동이기 때문에 이론적인 모델링이 매우 어렵고 고온속에서 회전하기 때문에 금형내의 온도분포 또는 수지의 용융상태를 정확하게 모니터링하기도 매우 어려운 실정이다 [1][2]. 따라서 금형의 기하학적인 운동에 의한 회전비를 바탕으로 실제의 가공상황에 맞는 적절한 제어를 할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 회전성형가공의 최적의 제어를 목적으로 금형의 기하학적인 운동모델을 작성하고 이에 대한 2축의 적합한 회전비를 구하는 방법에 대해 제안하였다. L:r의 비가 1:1, 2:1의 실제 가공시 중요한 형상에 대해 시뮬레이션 한 결과 실제의 회전비에 근접함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 김치업, 최만용, 허식한, 회전기계의 고온환경에서의 원격제측, 정밀공학회 '93년도 추계학술대회논문집 p 158.
- [2] Rotosystem Ltd., A new process control system for rotational molding, reference manual

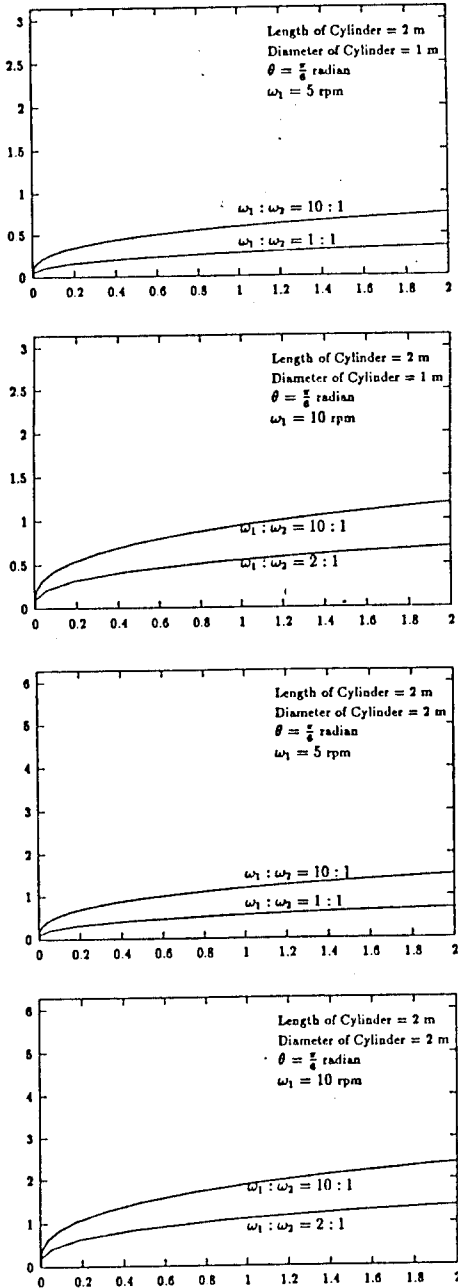


그림 7 금형형상에 관한 회전비의 관계