

비철 브러시 DC 및 무브러시 DC 모터에 대한 열 고려 사항

소개 및 원리

전력을 기계적 힘으로 변환하면 이 과정에서 항상 손실이 발생합니다. 이러한 전력 손실은 주로 열 에너지로 전환되며 발생한 기계적 힘이 클수록 전력 손실이 커지는 경향이 있습니다. 전기 모터 내부에서 생성된 열 에너지는 온도 상승을 일으켜 (전도 및 대류 덕분에) 더 따뜻한 곳에서 더 차가운 곳으로 열이 전달되고, 결국 모터 외부로 열이 전달됩니다.

전기 모터 제조업체의 가장 큰 과제 중 하나는 모터의 순간 내부 온도가 다양한 부품의 최대 허용 온도를 초과하지 않도록 하는 것입니다. 모터의 설계와 사용된 재료에 따라 열 현상은 모터의 성능을 나타냅니다.

설계자는 일반적으로 모터의 부품을 과열 및 손상시키지 않으면서 성능을 향상시킬 수 있는 다음 두 가지 개선 영역을 고려합니다.

손실 최소화: 주어진 기계적 힘에 대해 더 적은 열을 발생하여 전력 변환의 효율성을 개선합니다(같은 열을 발생시키면서 더 큰 기계적 힘을 제공).

발생된 열 에너지를 주변 환경으로 보내는(발열) 모터의 기능을 개선하여 내부 온도 상승을 줄임으로써 더 큰 열 에너지가 발생하더라도 내부 온도 상승을 동일하게 유지합니다.

이 현상을 이해하도록 도움을 주기 위해 물이 새는 욕조에 물을 채우는 상황을 예로 들 수 있습니다.

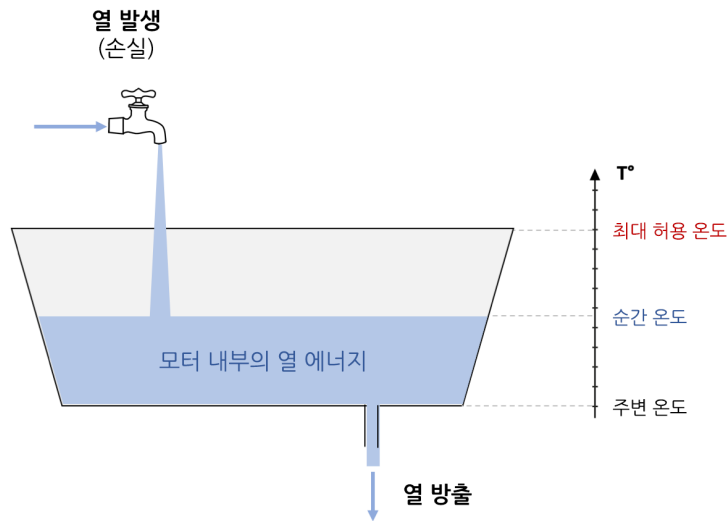


그림 1: 모터의 열 전달을 물에 비유한 모습

수도꼭지에서 나오는 물의 흐름은 모터 내부의 열 에너지 발생에 해당합니다. 욕조에 물이 모이면 바닥에 압력이 가해지면서 누수가 발생하여 열이 방출되면서 물이 욕조 밖으로 배출됩니다. 수위가 높을수록 욕조 바닥의 압력이 높아지므로 누수의 흐름도 커집니다.

마찬가지로 모터의 열 방출은 모터 내부 온도와 외부(주변) 온도 사이의 델타에 비례합니다. 그러나 물의 흐름이 출구 구멍 직경에 따라 달라지는 것과 마찬가지로 열 방출은 열 저항에 따라 달라지며, 이를 통해 모터 밖으로 열을 전달하는 것이 "얼마나 어려운지"를 알 수 있습니다. 열 저항이 낮을수록 열이 모터 외부로 더 쉽고 빠르게 방출되며 이것은 방출 전력이 더 커짐을 의미합니다.

욕조는 용량이 한정되어 있으며 수위가 특정 지점을 초과하면 물이 넘칩니다. 마찬가지로 모터의 부품은 정해진 열 수용력을 가지며 순간 온도가 일정 수준을 초과하면 몇 초 내에 부품이 손상될 수 있습니다. 모터의 정격 성능은 허용되는 작동 온도 범위 내에서 온도를 유지해야 한다는 요구 사항에 부합해야 합니다.

일반적으로 가장 중요한 부품은 코일이며 바로 여기에 줄 가열이 발생합니다. 온도가 과도하게 높으면 구리선을 감싼 절연 코팅이 녹아 모터에 영구적인 손상을 입힐 수 있습니다.

안정 상태 작동

브러시 DC 모터

코어리스 브러시 DC 모터는 일반적으로 고정자의 일부인 영구 자석과 하우징 사이의 공극에서 회전하는 자립형 코일로 설계됩니다.

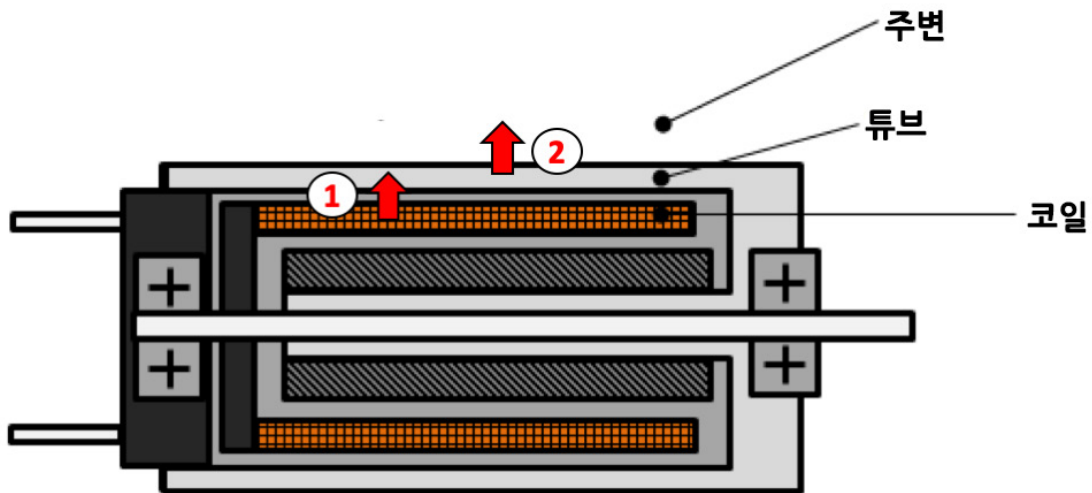


그림 2: 코어리스 브러시 DC 모터의 방열

회전하는 코일에서 발생하는 줄 가열 전력(W)은 전기 저항 R(Ω)과 이를 통해 흐르는 전류 I(A)에 직접 연결됩니다. 회전자는 비철이므로 철 손실은 없습니다.

$$P_{joule} = R * I^2$$

P_{joule} : 전기 모터의 맥락에서 손실로 간주되는 줄 가열 전력(W)입니다.

R: 코일의 전기 저항 (Ω)

I : 모터의 토크 상수 및 하중 토크에 따라 코일에 흐르는 전류(A)입니다.

그림 2에서 볼 수 있듯, 코일 온도가 상승하면 열이 코일에서 튜브로 전달된 다음(1), 튜브에서 주변 환경으로 전달됩니다(2). 각 자재에는 이질적인 열 전도체가 있고 각 부품의 모양, 중량 및 표면적도 열이 전달되는 방식에 영향을 미치게 되므로 이러한 연속되는 두 단계는 서로 다른 열 저항(각각 R_{th1} 및 R_{th2})을 가집니다.

발생과 방출 사이의 균형 문제...

코일을 통해 흐르는 전류가 과도하지 않다고 가정하면 코일 온도가 상승하고 열 방출이 열 발생을 정확히 보정하게 되는 지점까지 열 방출이 증가합니다($T_{coil} - T_{amb}$ 에 비례하기 때문입니다). 이 시점에서 모터에 포함된 열 에너지는 시간이 지나도 일정하므로 부품의 온도는 더 이상 달라지지 않습니다.

수도꼭지를 통해 동시에 추가되는 것과 동일한 양의 물이 매초 욕조에서 배출되는 것과 마찬가지로, 수위가 욕조의 주어진 높이에서 안정화되기 때문에 코일은 특정 온도에서 안정화됩니다. 코일 온도가 안정화된 이 값보다 약간 높으면 약간 높아진 방출

전력으로 인해 온도가 안정화된 값으로 다시 내려갈 수 있습니다. 그러면 안정 상태에 도달하게 됩니다.

안정 상태에서는 열 방출과 열 발생이 균형을 이루므로 코일의 안정 온도를 전류 I(A), 전기 저항 R(Ω), 열 저항 R_{th1} 및 R_{th2} (K/W)(연속될 때 추가됨), 주변 온도 T_{amb} (K)의 함수로 계산할 수 있습니다.

$$P_{joule} = R * I^2 = \frac{T_{coil} - T_{amb}}{R_{th1} + R_{th2}} = P_{dissipated}$$

$$\rightarrow T_{coil} = R * I^2 * (R_{th1} + R_{th2}) + T_{amb}$$

온도가 상승하면 전기 저항이 증가합니다...

코일의 전기 저항(R)이 실제로 순간 온도에 좌우되고 코일 온도가 이제 주변 온도보다 훨씬 높다는 점을 고려한다면 주어진 온도에서 코일의 실제 전기 저항을 고려하는 것이 중요합니다.

예를 들어 100°C 코일 온도 상승을 고려할 때 ($T_{coil}-T_{amb}$), 위의 공식은 코일 저항이 22°C (R_{22})일 때의 저항에 비해 122°C에서 39% 더 높은 것으로 나타났습니다. 이 크기는 매우 큰 것이므로 열 계산에서 무시할 수 없습니다.

이 현상으로 인해 줄 가열 전력 $R \cdot I^2$ 은 (전류는 여전히 동일하다고 가정할 때) 고온에서 더 크며, 코일은 다음과 같이 계산할 수 있는 온도에서 최종 안정 상태에 도달하게 됩니다.

표 1은 잠시 후에(열 시간 상수에 따라 다름) 코일 온도가 최종 안정 온도에 도달할 때까지 점점 더 느리게 증가함을 보여 줍니다.

$$R_{T_{coil}} = R_{22} * (1 + \alpha * (T_{coil} - 22))$$

$R_{T_{coil}}$: 코일의 전기 저항(Ω)

R_{22} : 22°C에서 코일의 전기 저항(Ω)

α : 구리의 저항 온도 계수(0.0039/°C)

T_{coil} : 코일 온도(°C)

$$T_{coil} = \frac{R_{22} * I^2 * (R_{th1} + R_{th2}) * (1 - 22\alpha) + T_{amb}}{1 - \alpha * R_{22} * I^2 * (R_{th1} + R_{th2})}$$

I : 코일에 흐르는 전류(A)

R_{th1} : 열 저항 회전자/본체(K/W)

R_{th2} : 열 저항 본체/주변(K/W)

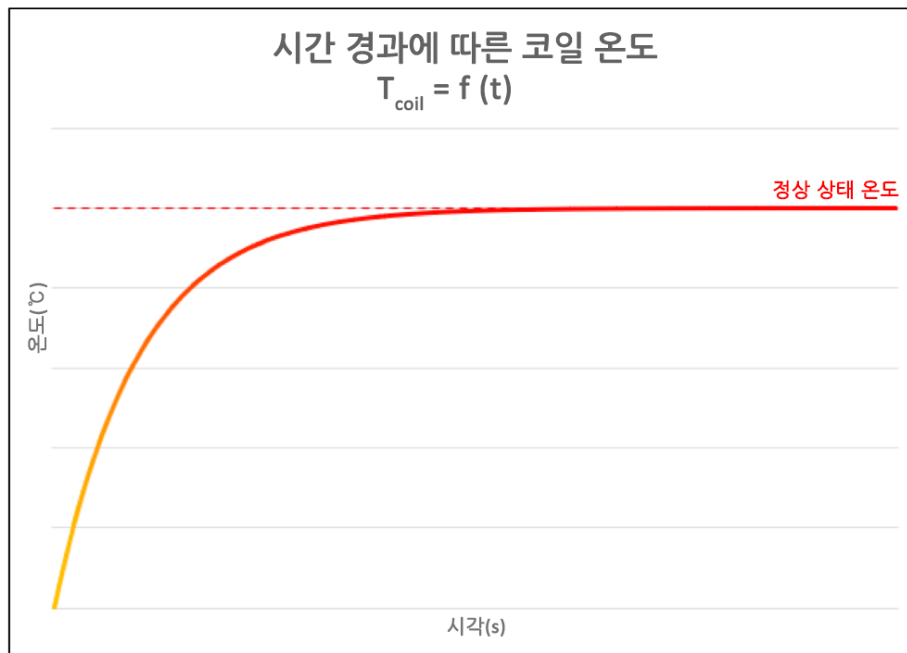


표 1: 전류가 시간이 지나도 계속 일정할 경우 코일 온도는 주어진 온도에서 안정화됩니다.

예를 들어 더 높은 토크 부하 때문에 전류 I 가 좀 더 높다고 가정할 경우 코일은 이전보다 더 높은 온도에서 안정화됩니다. 허용 가능한 최고 안정화 코일 온도는 구리선 제조업체에서 지정한 코일의 최대 허용 온도(예: 125°C)를 초과하지 않아야 합니다. 따라서 이것은 이전 공식으로 역 계산할 수 있는 최대 전류 값을 정의하며 일반적으로 모터 사양에서 "정격 전류" 또는 "최대 연속 전류"라고 합니다. (포화되지 않은 경우) 토크와 전류는 비례하므로 "정격 토크" 또는 "최대 연속 토크"도 정의됩니다.

무브러시 DC 모터

무브러시 모터는 코일이 고정자에 고정되고 영구 자석이 샤프트와 함께 회전한다는 점을 제외하면 브러시 모터(자기장에서 이동하는 전자에 적용되는 라플라스 힘)와 동일한 작동 원리를 사용합니다. 위상 정류는 전자적으로 작동합니다.

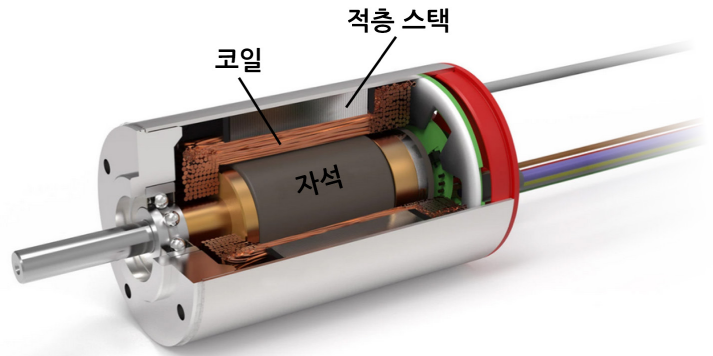


그림 3: 무브러시 DC 모터의 구성 예

모터 내부의 다른 열원...

(모터 내부의 자기장을 폐쇄하기 위해) 철 라미네이션을 포함하는 고정자에 따라 움직이는 자기장을 유지하면 고정자의 라미네이션 스택에서 전류가 유도되는 "철 손실"이라는 현상이 발생합니다.

(브러시 모터에서와 마찬가지로) 이 전류는 고정자 내부에서 발열을 일으켜 코일에서 이미 생성된 줄 발열에 추가됩니다. 철 손실은 모터 속도에 비례하기 때문에 저속에서는 무시할 수 있지만 고속에서는 줄 손실보다 커지는 경향이 있습니다. 이로 인해 고속에서는 토크를 낮게 유지해야 합니다.

물 비유로 돌아가면 욕조에는 두 개의 수원을 통해 물이 공급될 수 있습니다. 하나는 줄 손실이고 다른 하나는 철 손실입니다.

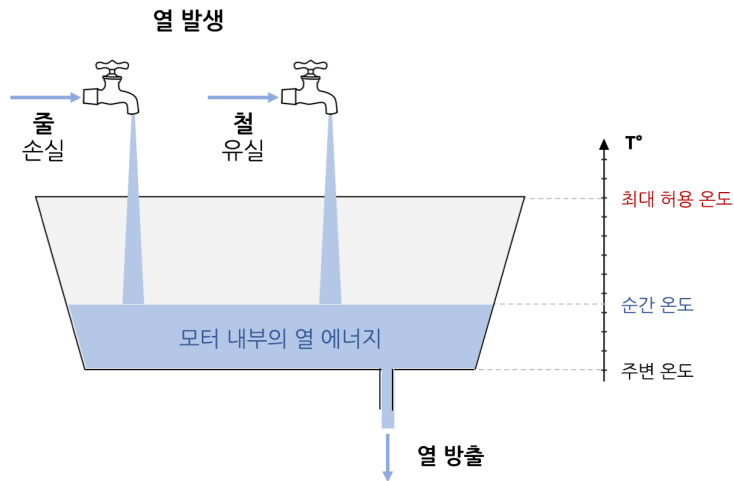


그림 4: 두 개의 열원이 있는 BLDC 모터의 열 전달에 비유한 물 흐름

기계 설계상 무브러시 모터는 기계식 브러시/수집기 정류 시스템에 의해 속도가 제한되지 않기 때문에 브러시 모터보다 훨씬 더 높은 속도에 도달할 수 있습니다.

두 열원 사이의 구분은 높은 토크의 줄 손실(저속)과 높은 속도의 줄 손실(낮은 토크) 사이의 균형점으로 볼 수 있지만 열 문제는 동일하게 유지됩니다. 코일 온도를 최대 허용 온도 아래로 유지합니다.

성능에 미치는 열 저항의 영향

앞서 언급했듯이 열이 코일에서 외부 환경으로 이동하는 두 가지 다른 열 저항을 고려합니다. R_{th1} 은 모터 설계에 따라 달라집니다. 그러나 R_{th2} 는 모터 설계와 모터 주변 모두에 따라 달라집니다. 실제로 모터와 열전도율이 높은 다른 본체 사이에 접촉 부위를 생성하면 모터가 열을 발산하고 더 낮은 온도에서 작동하는 데 도움이 됩니다.

- 모터 본체 감싸기(추가 튜브/슬리브...)
- 대류를 촉진하기 위해 모터 본체 주변에 공기 흐름 추가
- 금속 몸체에 모터 전면 장착

구성에 따라, 좀 더 중요하게는 소재의 열전도율에 따라 이러한 주변 요소는 모터가 외부 환경으로 열을 방출하는 것을 돕거나 저해할 수 있습니다.

대부분의 경우 모터는 금속 부품에 설치되며 종종 전면이 금속 스탠드 또는 프레임에 장착됩니다. 금속의 우수한 열전도율은 모터에서 열을 배출하는 데 도움이 되며(그림 5 참조), 모터를 공기만으로 둘러싸는 것보다 더 나은 냉각을 제공합니다.

결과적으로 응용 환경의 모터 장착 구성에 따라 더 나은 냉각 성능을 반영하도록 열 저항 R_{th2} 값을 수정하는 것이 적절합니다(외부 요소의 소재, 크기, 표면적, 열 수용력이 모두 고려할 실제 R_{th2} 에 영향을 미침).

욕조에 비유할 경우 욕조 내부에 더 높은 수위(압력)를 유지하지 않고도 물을 더 빠른 속도로 배출하기 위해 배출구 직경을 더 크게 유지해야 합니다.

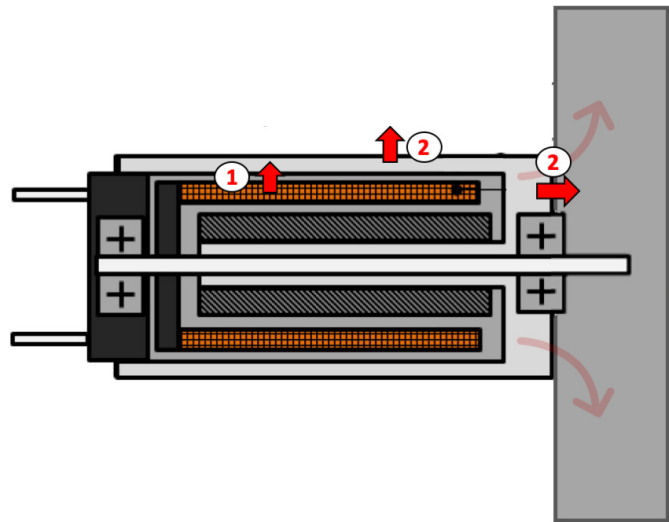


그림 5: 모터 본체와 접촉하는 외부 요소를 통한 열 방출

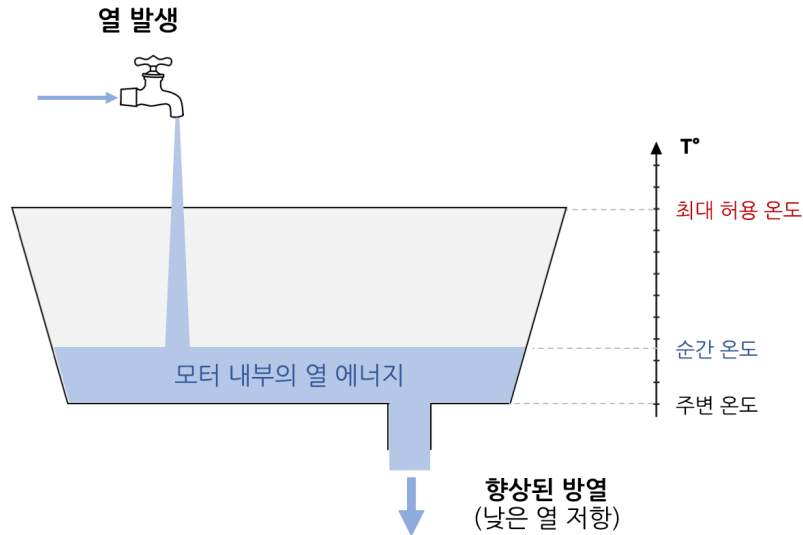


그림 6: 낮은 열 저항으로 인한 열 방출 증가를 물의 경우와 비교한 예 여기에서는 수위가 낮기 때문에 수위가 최대 허용 온도에 도달하기 전에 더 많은 토크(더 많은 열 발생)를 사용할 수 있습니다.

이론적으로는 응용 환경마다 다를 수 있지만 열 계산에서 R_{th2} 값의 절반을 고려하는 것이 적절할 것입니다 (값이 낮을수록 냉각 효과가 좋음). 결과적으로 동일한 최대 코일 온도 T_{coil} 에 대해 더 높은 정격 토크(최대 연속 토크)가 적용됩니다(토크는 전류 I에 비례함).

Portescap과 같은 모터 설계자 및 제조업체는 개발 프로세스 초기에 고객과 협력하여 모터 또는 모터/기어박스 어셈블리가 지정된 환경에 설치되면 방출 능력을 평가하여 작업 조건을 가장 잘 평가하고 모터화 시스템의 최대 전위를 활용합니다.

과도 작동

최대 회전력

일부 응용 환경에서는 짧은 시간 동안에만 높은 토크가 필요합니다. 스크루드라이버와 같은 산업용 전동 공구는 런다운 단계 동안에 속도가 필요하고, 약 1초 이하로 지속되는 조임 단계 동안에 최대 회전력이 필요합니다.

코일 온도가 최대 허용 온도를 초과하지 않는 한, 모터의 최대 연속 전류를 초과하는 전류를 모터에 공급할 수 있습니다. 즉, 제한된 시간 동안에만 모터를 작동시킬 수 있다는 의미입니다.

비어 있는 욕조를 고려한다면 수도꼭지를 갑자기 틀면 물이 아주 세게 나옵니다. 일반적으로 짧은 기간(몇 초)의 최대 회전력만을 고려하기 때문에 일반적으로 (더 긴 시간 상수를 가지는) 열 방출을 무시하고 시스템이 단열 상태라고 가정할 수 있습니다.

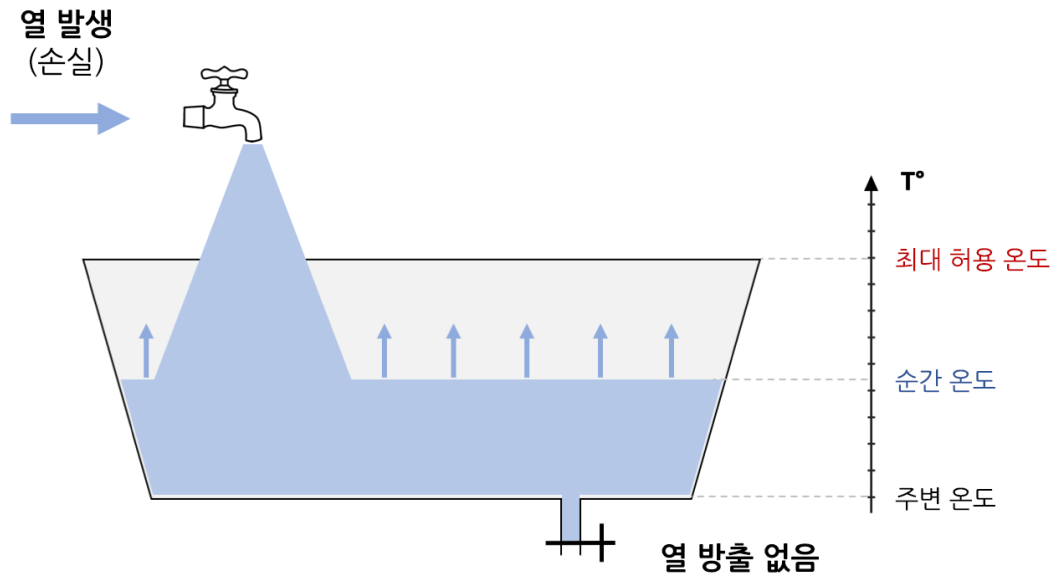


그림 7: 방출을 무시해도 무방할 정도의 매우 높은 전류가 잠시 고려됩니다.

수위가 빠르게 상승하고 욕조는 몇 초 안에 채워집니다. 마찬가지로 코일 온도는 몇 초 내에 최대 허용 온도에 도달합니다. 다음 공식은 열 방출이 무시되는 동안(짧은 시간)의 코일 온도를 구합니다.

이것은 코일의 열 수용력도 중요하다는 것을 보여줍니다. 열 수용력이 더 높으면 더 오래 최대 전류를 유지하거나 같은 기간 동안 더 높은 최대 전류를 유지할 수 있습니다. 실제로 욕조가 클수록 채우는 데 더 오래 걸립니다.

$$T_{coil}(t) = \frac{R * I^2}{C_{th}} * t + T_{amb}$$

t: time (s)
 C_{th} : thermal capacity of the coil (J/K)

무슬롯 무브러시 모터는 특히 단 기간 최대 회전력에 적합한 모터입니다.

- 무슬롯 고정자 설계는 10배 더 높은 전류에서 모터 최대 연속 토크의 10배에 해당하는 높은 토크에 도달할 수 있게 합니다(다른 설계(슬롯형)는 자기 포화로 인해 토크가 최대로 제한되므로 높은 전류가 토크 결과 측면에서 무의미해집니다).
- 무슬롯 코일 설계는 높은 열 수용력 덕분에 많은 양의 열 에너지를 축적할 수 있습니다.
- 각 응용 환경의 특정 과제를 고려할 때 최고 회전력에 관심이 있는 고객과 협력하여 최상의 솔루션을 정의하는 엔지니어링 팀이 있으면 도움이 됩니다.

주기 듀티 사이클

경우에 따라 응용 환경의 토크 요구 사항은 시간이 지남에 따라 반복되는 주어진 토크 프로파일입니다. 일정 정도까지는, 사이클 중 가장 높은 토크는 토크 프로파일과 사이클의 각 단계 기간에 따라 모터의 최대 연속 토크를 초과할 수 있습니다.

한 사이클의 지속 기간(반복 기간)이 열 시간 상수보다 훨씬 더 짧을 경우 I^2 에 비례하는 줄 열로 인해 평방 평균(RMS, 평균 제곱근)으로 계산될 수 있는 등가 연속 토크 값(또는 전류 값)을 고려합니다.

RMS 전류가 정의되면 이 전류를 시간 경과에 따른 연속 값으로 간주하고 모터의 최대 연속 토크보다 크지 않은지 확인합니다.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

I_{RMS} : 전류의 평균 제곱근 값(열 발생 측면에서 연속 전류와 동일)(A)

T : 주어진 듀티 사이클의 지속 시간(초)

$i(t)$: 순간 전류(A)

이 경우를 안정 상태 작동이라고 이해하고 있으므로(여전히 듀티 사이클 기간이 열 시간 상수보다 짧다고 가정) 여기에서는 앞서 언급한 열 저항의 영향(응용되는 모터 환경에 따라 다름)도 작용합니다.

활성 공기 흐름 냉각 기능이 있는 무브러시 DC 모터

열 관리가 모터 성능의 핵심이기 때문에 엔지니어는 모터가 열을 처리하는 방식을 좀 더 개선할 수 있는 대안을 찾아냈습니다. 이를 수행하는 한 가지 방법은 공기 흐름이 모터 밖으로 열을 전달할 수 있도록 통합된 공기 경로가 있는 고정자를 설계하는 것입니다. 이러한 설계에서는 주로 열 전도에 의존하는 설계보다는 모터 내부의 대규모 열 대류에 초점을 맞춥니다. 이 추가 방열판은 모터 외부로 열을 방출하는 데 도움이 되므로 열 저항이 감소된 것으로 볼 수 있습니다.

어떤 경우에는 압축 공기 시스템과 같은 외부 소스에 의해 공기 흐름이 구동될 수 있습니다.

그러나 모터가 휴대용 장치 또는 압축 공기를 사용할 수 없는 환경에 내장된 경우 모터 샤프트에 팬을 통합하여 작동 중일 때 모터 본체를 통해 공기가 흐르도록 할 수 있습니다. 이 경우 모터 속도(따라서 팬 속도)가 높을수록 공기 흐름이 더 강해지고 열 저항은 더 낮아집니다. 즉, 이러한 모터의 토크 성능은 팬이 더 빨리 작동할 때 열 발산이 대폭 개선되기 때문에 저속보다 고속에서 훨씬 더 높을 수 있습니다. 팬 구동 공기가 모터에 하중 토크를 적용하여 속도가 매우 높을 때 결국 추가 열을 발생하기 때문에 이러한 특성은 어느 정도 사실입니다.

결론

전기 모터의 성능은 여러 측면에 따라 달라지며 그중 하나는 열 관리입니다. 모터는 각 응용 환경의 듀티 사이클, 환경 및 중요한 성공 요인(배터리 수명을 연장하기 위해 최고 토크, 최고 속도, 최고의 에너지 효율성을 제공하거나 가능한 가장 낮은 온도에서 작동)에 따라 많은 문제를 해결하도록 개선될 수 있습니다. 각 응용 환경에 가장 적합한 솔루션을 선택하여 고객의 문제를 이해하고 성공을 이끌어 내기 위해 확장된 지원을 제공하는 파트너를 찾는 것이 가장 좋습니다. **P**

연락처

서울 강남구 영동대로 517
아셈타워 30층 3033호
전화: +82 2 6001 3247
sales.asia@portescap.com
www.portescap.kr

엔지니어에게 문의

www.portescap.com/ko-kr/문의

Daniel Muller

애플리케이션 엔지니어

Portescap