

## 열과 온도의 관점에서 본 모터의 선정

임 석 원

강릉영동대학 신소재과

### Motor Selection from the Viewpoint of Heat and Temperature

S. W. Lim

Dept. of Advanced Materials Engineering, Gangneung Yeongdong College, Gangneung 210-792, Korea

#### 1. 서 언

최근 반도체 · IT 분야의 발전과 함께 모터의 기능도 첨단화 · 소형화되고 있다. 소형모터에는 다양한 종류가 있는데, 생산량에서 보면 DC(직류) 모터가 대부분이다. 기본적으로 충실하게 설계가 이루어지면, 계산한 그대로 성능을 발휘할 수가 있다. 그러나 막상 사용하게 되면 그렇게 만만하지가 않다. 실제로 로봇 연구자나 경기용 로봇의 제작자들은, 최적의 모터 선정에 시행착오를 거쳐, 마침내 결정하여 설치해 보면 생각했던 대로 되지 않는 경우가 많다고 한다. 이와 같은 상황에서, 모터의 설계와 사용법에 있어 온도와 열의 문제는 여러 의미에서 매우 중요하다. 따라서 다양한 요소를 숙지한 후에, 종합적으로 고찰할 필요가 있다. 온도와 열이 어떠한 의미에서 모터의 선정 및 사용법에 중요한 위치를 차지하고 있는가를 고찰하였다.

#### 2. 열의 의미

##### 2.1 온도와 열(열량)

모터의 특성은 온도에 따라 변화한다. 이것에 대한 상세한 설명에 들어가기 전에 온도는 대체 무엇이며, 온도의 문제에 대해 어떠한 사고를 지녀야 할 것인지 우선 알아둘 필요가 있다. 온도가 서로 다른 물체가 있으면, 반드시 고온에서부터 저온으로 향하여 에너지가 이동한다. 이 에너지가 열인 것이다. 열은 에너지의 이동에 있어서 하나의 형태이다. 물체는 정지하고 있을 경우에도, 물체를 구성하는 미시적인 입자가 운동을 하고 있기 때문에 운동에너지나 입자간의 힘에 따른 위치에너지를 지니고 있다. 이것이 내

부에너지인 것이다.

##### 2.2 열용량과 비열

열을 가하면 물체의 온도가 상승하여 팽창하거나 전기저항이 높아지는 등 여러 가지 변화가 일어난다. 동일한 물체에 있어서, 일정한 온도변화를 일으키게 하는 데에 필요한 열량은 일정하다. 어느 물체의 온도를 1°C 올리는 데에 필요한 열량을 그 물체의 열용량이라고 하며, 질량 1kg인 물질의 열용량을 비열이라고 한다.

##### 2.3 현열과 잠열

액체가 기체로 될 때, 온도는 변화하지 않아도 일정한 열이 흡수된다. 예를 들어 모터의 표면을 알코올에 적신 천이나 종이로 닦으면 모터로부터 열을 빼앗아 알코올은 기화한다. 액체 알코올과 기체 알코올의 온도가 동일하여도, 모터의 온도는 떨어진다. 이와 같이 물체의 상이 변화하였을 경우에 흡수되거나 발생하거나 하는 열량을 잠열이라고 한다. 그에 대하여 상의 변화가 없는(온도변화로서 나타남) 열량을 현열이라고 한다.

##### 2.4 비평형상태와 비정상 · 정상상태

열을 설명할 경우에 사용되는 용어에는 주의가 필요하다. 모터를 사용하는 기기에서 전원을 끊고 장시간이 경과한 상태를 생각하여 보자. 기기에 있어서 모든 부분의 온도가 동일하며, 이것이 열평형상태이다. 이 기기가 빛이 닿지 않는 장소에 설치되어 있다면, 기기의 온도와 그 장소의 온도가 동일하다고 생각해도 좋을 것이다. 그러나 유리창을 통하여 빛을 받고 있다면, 기기 내부의 온도는 실온보다는 높은

평형상태에 있을 지도 모른다. 스위치를 넣어 기기를 운전하기 시작하여 모터가 회전한다. 이것이 열적인 비정상상태이다.

이윽고 시간이 경과하여 각각의 부위 온도가 변화하지 않게 된다. 이것이 정상상태이며, 부위에 따라 온도가 다르다. 여기에서는 열의 발생과 제거가 균형을 이루고 있다. 모터의 사용법을 온도의 측면에서 논의할 경우, 대체로 어떠한 상태를 대상으로 할 것인지 그 인식이 필요하다. 아울러, 열평형상태의 온도는 어느 곳을 측정하여도 동일하나, 정상상태에서는 온도구배가 있으며, 아주 조금밖에 떨어져 있지 않은 곳에서도 온도는 상당히 차이가 나는 경우가 있다.

### 3. 모터의 고온에 따른 문제

모터에 있어서 발열이나 온도의 증가를 문제로 삼는 근거·요인에는 몇 가지가 있는데, 그것에 대하여 개략적으로 설명한다.

#### 3.1 온도에 따른 특성의 변화

온도에 따라 모터의 특성은 크게 변화한다. 초음파 모터를 제외한 모든 모터의 공통된 문제가 코일저항  $R$ 이다. 여기에 전류  $I$ 가 흐르면 매초  $I^2R$ 의 열(Joule's heat)이 발생하여 코일의 온도가 상승한다. 그렇게 되면 저항이 상승하여 같은 전류값이라도 매초의 발열량은 더욱 커지게 된다. 코일의 온도는 주위의 온도와 그 자체의 발열에 의한 「온도상승」에 따라 결정된다. 모터를 논의할 경우의 온도상승은, 주위의 온도를 기준으로 하여 코일 등의 온도가 얼마만큼 높은가를 나타낸 것이다.

코일에 있어서는 온도 그 자체가 문제이다. 코일만이 회전하는 코어리스(coreless) 모터의 경우, 코일이 절연의 목적을 겸한 수지로 이루어져 있는데, 고온이 되면 이것이 연화되어 기계적 강도가 현저히 저하되므로 온도관리가 중요하다.

주위의 온도가 크게 문제시되는 전형이 자동차의 엔진룸이다. 열대지역에서 주행하고 있는 경우와, 시베리아와 같은 한대에서 정지하고 있는 상태의 경우 거의  $200^{\circ}\text{C}$ 의 차이가 난다.  $-40^{\circ}\text{C}$ 에서  $150^{\circ}\text{C}$ 를 상정하면, 코일저항의 차이는 1.75배나 된다. 실온이

되는  $20^{\circ}\text{C}$ 를 상정한 온도상승과 자동차 엔진룸에서 사용하는 모터의 온도상승과는 전혀 차원이 다른 이야기이다.

또 하나의 중요한 파라미터가 역기전력 정수  $K_E$ (torque 정수  $K_T$ 와 동일)이다. 이것은 사용되는 자석의 종류나 크기, 코일의 권수로 결정된다.

직류 모터에 있어서 전압을  $V$ 로 하면, 기동 torque는

$$T = K_E V / R$$

로 주어진다. 일반적인 경향으로 고온이 되면,  $K_E$ 가 낮아지므로( $R$ 이 높아지는 것은 당연함) 일정전압에 대해 고온일수록 torque가 낮다고 할 수 있다. 그렇다면 저온에서는 torque가 높을까 하는 것과, 저온에서는 베어링의 윤활유 점성이 높아져 기동하기 어려워지는 경향을 고려해야만 한다.

#### 3.2 주위로의 영향

모터가 자신의 발열에 의해 고온이 되어, 주위에 미치는 영향을 고려해야만 하는 경우가 있다. 제어 구동용 전자회로가 들어있는 모터에서는, 반도체 소자(트랜지스터, MOSFET, 다이오드, Hall 소자 등)가 정상적으로 기능하는 온도에 주의를 기울여야 한다. 모터에 의해 주위가 가열되고 회로소자 자체에서의 발열이 더해져, 정상적인 기능을 발휘하지 못하는 경우에도 주의를 기울여야 한다. 의료기에 사용되는 모터에서는 생체로의 영향을 고려하여 고온을 피할 수 있는 설계가 매우 중요한 요소이다.

#### 3.3 절연열화

모터를 고온상태에서 장시간 사용하면 코일의 절연이 열화된다. 절연재료의 온도제한에 관한 규격이 절연등급이며, 표 1에 나타나는 바와 같이 규정되어 있다.

### 4. 온도상승과 열시정수, 온도저항의 파라미터

보조전동기(servomotor)의 기본적인 특성을 논의할 경우, 전기적 시정수와 기계적 시정수를 인용하는 경우가 많다. 그와 더불어 또 하나의 시정수가 열시정수(온도상승 포화치의 63%에 달하는 시간을 열시정수라고 함)이다. 그것은 일정전류를 모터에 가했을

표 1. 절연 등급표(JISC4003)

| 전기절연 내열등급 | 허용 최고온도 (°C) |
|-----------|--------------|
| Y         | 90           |
| A         | 105          |
| E         | 120          |
| B         | 130          |
| F         | 155          |
| H         | 180          |
| 200       | 200          |
| 220       | 220          |
| 250       | 250          |

경우, 코일의 온도가 그림 1과 같이 변화(상승)하여 일정값에 다다를 때 변화의 속도지표이다. 온도의 포화치와 주위 온도와의 차이를 온도상승이라 한다. 코어리스 모터에서 코일의 열시정수는 작고 온도상승이 높으며, 하우징의 열시정수는 크고 온도상승은 낮다. 코일온도가 한계치를 넘지 않도록 주의할 필요가 있다.

온도상승은 손실  $P_{LOSS}$ , 열저항  $R_{h1}$ (코일과 하우징 사이의 열저항),  $R_{h2}$ (하우징과 주변 사이의 열저항)로부터 다음 식에 의해 구할 수가 있다.

$$\text{온도상승} = (R_{h1} + R_{h2}) P_{LOSS}$$

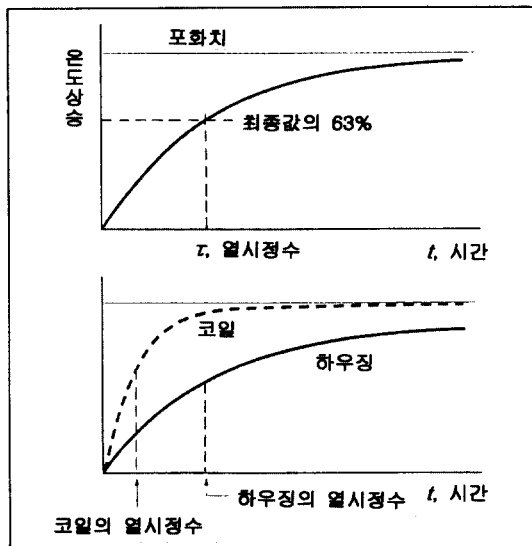


그림 1. 온도상승과 열시정수.

여기에서 모터의 사용자가 손을 가할 수 있는 부분이  $R_{h2}$ 이다. 즉 열전도가 쉽게 발생하는 장치의 구조로 만들면, 이 값이 저하되어 온도상승을 낮출 수가 있다.

### 5. 운전 중 모터에서의 발열

그림 2는 모터 내부에서 전력소모의 내역을 도식화한 것이다. 왼쪽이 입력전력(전압과 전류의 곱)이며, 오른쪽이 기계적 출력(torque와 회전속도의 곱)이다. 아래쪽을 향한 화살표가 손실이다. 손실 중에서 가장 큰 것이 동손이라고 불리우는 것으로, 코일에 흐르는 전류에 의한 Joule 열이다.

두 번째 손실이 철손이다. 이것은 전류의 통로가 전선인 것에 대해, 자속의 통로는 일반적으로 규소강판을 사용하는 철심이며, 자계가 변화하기 때문에 발생하는 손실이다. 철손에는 유도전류에 의한 Joule 열과 자기 hysteresis에 의한 열의 발생이 있다.

세 번째가 기계손이라 불리우는 것으로 Coulomb 마찰, 점성마찰, 공기의 교반에 의한 손실이다. 이들 성분이 비율로서 커지기 쉬운 경우가 기어헤드가 장착된 모터이다. 특히 웜기어의 전달효율은 50% 이하이다. 웜기어뿐만 아니라, 일반적인 기어에서도 단수가 겹쳐지면 전체의 효율은 50% 이하인 것이 드물지 않다. 기계적인 전달효율이 낮으면, 그것을 극복하기 위해 전류를 필요로 함으로서 동손의 증가, 코일온도의 상승으로 이어진다.

### 6. 정지된 모터에서의 발열

열에 대해서는 여러 가지 측면에서 종합적으로 검

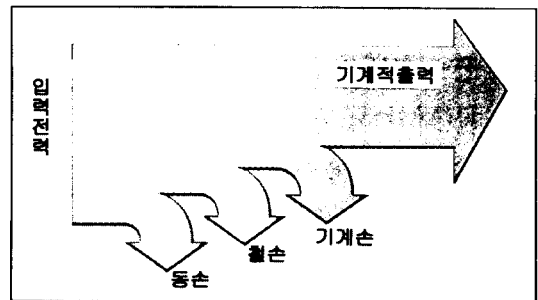


그림 2. 모터의 발열부위와 손실의 내역.

토하는 것이 바람직하다. 모터는 본래 회전하는 것이며, 외부에 대해 일을 하는 것이다. 그 때문에 회전시의 「효율」을 논의의 대상으로 하는 경우가 많다. 그러나 이것은 어디까지나 하나의 factor에 지나지 않는다.

모터가 정지하고 있을 때, 즉 외력에 대응하여 일정 위치를 유지하는 것이 중요한 기능이 되는 경우도 있다. 이때의 에너지 소비 혹은 열의 발생이 일어나는지 없는지가 문제화 되는 경우가 있다. 정지하고 있기 때문에, 물리적인 의미로는 일을 하고 있는 것이 아니다. 따라서 효율은 0이다. 몇 가지 방식을 고려하여 보자.

### 6.1 모터 자체에 브레이크를 설치하는 방식

이 방식의 모터에도 여러 종류가 있다. 교류 모터의 한 종류에 reversible 모터라고 하는 것이 있는데, 이것은 일반적으로 가볍게 브레이크를 걸면서 회전하며, 순간적으로 역회전하기 쉬운 구조로 되어 있다. 또한 정지상태에서 외력에 대해 유지력을 지니게 하는 의미도 있다. 그러나 이 모터의 열손실은 높다.

브레이크 방식의 한 종류에 무려자작동 브레이크 방식이 있다. 통전(운전) 상태에서 브레이크 판을 스프링에 역으로 장착시켜, 통전이 멈추면 스프링의 힘에 의해 브레이크 판을 밀어 붙여서 제동력을 발생시키는 방식이다.

이에 대해 여자작동형은 전류를 가함으로서 브레이크를 거는 방식이다. 이것은 연속운전이 주체이며, 제조라인의 운전 중에 불량품이 발생하였을 경우, 순간 정지하여 배출시키는 용도에 주로 사용된다.

### 6.2 Stepping 모터의 경우

전류를 계속해서 흘려 일정 위치를 유지하는 방식과, 전류에 따르지 않고 영구자석 작용과 기어의 구조에 따라 위치를 유지하는 방법이 있다. 의외로 후자의 경우는 그다지 이용되지 않고 있다. 오히려 cogging torque를 감소시키는 경우로의 관심이 높다. 이용되는 방법의 전형이, 시계용 stepping 모터의 detent mechanism으로, 전력소비를 매우 낮추고 있다.

### 6.3 Servomotor의 경우

위치 센서를 사용하여 feedback 제어를 하는데,

이 경우 제어를 위한 전력손실이 있다. 한편 cogging torque와 기어의 역전달 효율이 낮다는 것을 이용하여, 무전력에서의 유지가 가능하다.

유도 모터나 스위치 reluctance 모터에서는 detent나 cogging이 없기 때문에, 전류를 이용한 유지가 필요하다.

## 7. 냉각의 방법

모터의 냉각 즉, 열을 배제시키는 방법이다. 그림 3을 참조하면서 설명하기로 한다. 열배제의 방법에는 물질의 이동을 수반하지 않는 열전달과 이동을 수반하는 열전달이 있다.

### 7.1 열전도

금속이 열을 잘 전달한다는 것은 누구나 알고 있는 상식이다. 모터의 코일을 varnish로 고정하는 것은, 전기적인 절연을 위한 것이기도 하며, 고체에 의해 금속끼리(전선의 동과 철심)를 고착시켜 열전달을 좋게 하기 위한 것이기도 하다. 철심은 AI 등의 flange나 bracket에 접촉하여 열을 전도하며, flange는 기계의 면(base)에 접촉하여 발열한다. 그림 3(a)는 이와 같은 냉각방식의 전형이다. (a)와 같이, 철심(코어)에 코일을 설치한 형태에서는 코어에 열이 전도되고 다시 base로 전도되므로, 열대척면에서는 유리하다.

### 7.2 열전달(공냉)

여기에는 모터 주변의 바람 통로가 필요하다. 정지된 공기는 열을 전달하기 어려운 물질이다. 발포 styrol의 단열효과는 발포 styrol이 감싸안고 있는 기계에 의한 것이다. 그런데 공기의 흐름(바람)은 열을 효과적으로 제거한다. 그것은 공기가 열에너지 그 자체를 옮기기 때문이다. 좁은 공간에서는 공기가 쉽게 정체하여 냉각이 어려워진다. 공간이 있음으로서 공기의 흐름이 가능해지는 것이다. 모터 자체로 공기를 교반하는 fin이나 propeller가 장착된 모터가 있다. 그림 3(b)의 코어리스 DC 모터에서는 코일에서 열이 발생하여, 로터가 회전함으로써 공기의 대류에 의해 하우징으로 열이 전달되고, base로 전도된다.

최근 전자기기에는 바람의 발생을 목적으로 한 모

그림 3. 발열과 냉각의 관점에서 본 모터구조의 두 가지 전형.

터가 자주 이용된다. 즉, 모터의 냉각에 또 다른 모터를 사용하는 것이다.

모터의 냉각에는 넓은 면이 유효하다. 그러면 매끈한 표면과 거친 표면에서는 차이가 있을까? 열이 발생한 모터에 손가락을 대면, 매끈한 면은 뜨겁고 거친 면은 그만큼 뜨겁게 느껴지지 않는다. 그러나 온도를 측정하면 동일하다. 이것은 손과 모터와의 접촉면적 차이에 의한 현상이다. 거칠면 손과의 접촉면적이 적기 때문에, 모터로부터 손으로의 열전도가 적으므로 뜨겁게 느끼지 않는 것이다.

그러나 바람을 불어 공냉할 경우, 공기와 접하는 면적이 큰 거친 면일수록 효과적이다. 거친 면의 효과는 「온도경계층」의 박리라는 관점에서도 유효하다.

### 7.3 복사에 의한 효과

검은 도장을 한 자동차와 흰 도장을 한 자동차를 한 여름 햇볕이 쨍쨍 내리쬐는 곳에 방치하여 보자. 검은 색의 차체는 태양빛의 열을 흡수하여 뜨거워진다. 또한, 검은 표면은 흰 표면의 경우보다 열을 쉽게 발산한다고 알려져 있다. 그러면 모터의 표면도장에 따라 얼마만큼 열흐름의 차이가 있을 것인가? 실제로 시험하여 보면, 도장에 의한 차이는 거의 없다. 복사에 의한 열의 발산 흡수는, 일반적인 모터의 온도에서는 고찰의 대상이 되지 못할 정도이다. 복사에 의한 가열·냉각은 절대온도의 4제곱에 비례한다. 검은 자동차가 뜨거워지는 근거는 태양의 표면온도에 있다. 복사에 의한 열의 이동은, 저온에서는 거의 없다고 생각해도 무관하다. 저온이라는 것은 어느 정도

를 말하는 것일까? 200°C를 저온이라고 하면, 모터의 도장색은 무관계일 뿐이다.

### 7.4 Heat pipe(잠열효과)의 이용

액체를 이용함으로써, 고온부에서는 기화가 발생하고 저온부에서는 액화가 발생하여, 액체는 저온에서 고온부로, 기체는 역으로 흐르게 한 냉각장치가 heat pipe이다(그림 4). 이것은 어느 정도 모터의 부피를 필요로 한다.

## 8. 앞으로의 과제

모터설계의 큰 조류로서, 소형이며 강력한 영구자석에 의해 모터 내부에서의 열 발생이 적은 설계가 이루어지고 있다. 동시에 철심에서의 손실 경감을 위

그림 4. Heat pipe의 원리.

한 노력이 이루어져 왔다. 앞으로는 소형 모터를 열의 한계나 강도의 한계에 다다른 상황에서 능숙하게 다루는 기술이 추구될 것이다.

일반적인 연속정격전류라는 것은, 실온 25°C의 환경에서 모터 하나를 넓은 공간에 두고 자연대류에 의한 냉각 하에서 코일온도가 155°C를 넘지 않는 전류이다. 실제로 이와 같은 사용법은 쓰여 지지 않고 있다. 따라서 앞에서 설명한 바와 같이, 코어리스

모터의 코일온도는 특히 중요하다. 그 때문에 운전 중 코일온도의 계측·추정 기술이 필요한 것이다.

보조기술에 있어서는 모터의 관성부하(관성모멘트)와 코일저항과 역기전력정수가 중요한 요소이며, 그에 적합하게 제어 요소를 항상 조정할 수 있는 방식이 이상적이다. 저항과 역기전력정수는 온도에 의존하므로, 모터 부위의 온도 추정 기술이 요구된다.