

# 동시 이중주파수를 이용한 기어 열처리의 열·전자기 연성 해석

## Thermal-electromagnetic Coupled Analysis for Gear Heat Treatment using Simultaneous Dual Frequency

윤동원<sup>1,✉</sup>, 박희창<sup>1</sup>, 함상용<sup>1</sup>, 구정희<sup>2</sup>  
Dongwon Yun<sup>1,✉</sup>, Heechang Park<sup>1</sup>, Sangyong Ham<sup>1</sup>, and Jeong-Hoi Koo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 로봇메카트로닉스연구소 (Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Materials)

<sup>2</sup> 마이애미대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Miami University)

✉ Corresponding author: dwyun@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7769

Manuscript received: 2014.7.6. / Revised: 2015.4.25. / Accepted: 2015.5.19.

*In this paper, Finite Element Analysis (FEA) for gear heat treatment using simultaneous dual frequency (SDF) induction heating is conducted. To do this, thermal-electromagnetic coupled FE model is built. A two dimensional FE model of gear and heater is introduced to reduce computation time. For more time-efficient analysis, harmonic analysis for electromagnetic model is adopted and transient analysis model, for heat transfer model. Through the coupled analysis, it can be found that the proposed FE model can solve for SDF induction heating of gear and heat treatment parameters can also be determined.*

KEYWORDS: Induction heating (유도가열), Simultaneous dual frequency (동시 이중 주파수), Gear (기어), Heat treatment (열처리)

### 기호설명

A = sectional area of coil

$\mathcal{A}$  = vector potential

B = magnetic Flux density

$C_p$  = specific heat

I = current

$J_e$  = current density

Q = heat capacity

$\mathbf{r}$  = unit vector

T = temperature

$\epsilon_r$  = relative permittivity

$\mu_0$  = air permeability

$\mu_r$  = relative permeability

v = velocity

$\rho$  = resistivity

$\sigma$  = conductivity

$\omega$  = frequency

### 1. 서론

기어는 두 개 이상의 축 사이를 연결하여 동력을 전달하는 수단으로, 축의 배열과 사용 목적에 따라 다양한 형태와 크기를 가진다. 기어에서 동력의 전달은 원판 또는 원뿔 형태의 모양에 여러 개의 돌기를 가진 이빨을 만들어 서로 맞물려 동

력을 전달하게 되므로, 정확한 속도비로 전달이 가능하고, 구조도 비교적 간단하여 동력전달용으로 널리 사용되고 있다.<sup>1</sup> 따라서, 기어 자체에는 동력이 전달되면서 많은 힘과 충격이 가해지게 되며, 자동차, 선박 등 기계의 운전 조건에 따라 큰 외란이 가해지기도 한다. 기어의 재질, 열처리, 가공방식 등에 따라 이러한 하중에 대한 내성이 달라지게 되고, 이는 곧 기어의 수명을 결정하게 된다. 이와 같이 기어의 수명을 결정하는 데는 여러 요인이 있을 수 있겠으나, 기어의 절삭 가공 후, 행하는 열처리에 의해 그 성능과 수명이 크게 좌우된다. 특히, 최근에는 기계장치의 고속화와 전달하중의 증가에 따라 기어의 내마모성과 내피로성을 증가시키기 위해서 기어의 열처리가 더욱 중요시되고 있다.<sup>2</sup>

기어의 열처리에 있어서는 크게 침탄 열처리방법과 유도가열을 이용한 방법이 사용되어지고 있다. 이 중, 산업적으로 가장 널리 사용되어지는 방법은 침탄 열처리를 이용한 방법으로, 이는 호빙 공정으로 기계가공을 한 후, 가열과 냉각 공정을 거치면서, 경화요소의 침투와 확산을 이용하는 방법이다. 침탄 깊이가 곧 열처리 깊이를 뜻하므로, 재료의 경화능, 침탄 처리 사이클 등 각종 변수를 이용하여 침탄 깊이를 제어하게 된다.<sup>3,4</sup> 하지만, 이러한 침탄을 이용한 기어의 열처리 방법은 근본적으로 화석 연료를 주로 사용하여 가열로내에서 열처리를 수행하게 되므로, 과도한 연료 사용으로 인한 환경 오염 및 탄소 배출 과다 발생들에 대한 문제를 내포하고 있다.<sup>5</sup>

침탄을 이용한 기어의 열처리 다음으로 많이 사용되고 있는 공정은 고주파 전자기장을 이용한 유도가열방식이다. 이는 수십~수백 kHz의 주파수 성분을 가지는 전자기장을 기어 주위에 가해주게 되면, 기어의 표면에 유도전류가 발생하게 되고, 그에 따라 기어자체의 저항에 의해 저항가열이 되는 원리를 이용하는 방법이다. 이러한 유도가열을 이용한 기어의 열처리 방법은 선택적으로 기어의 표면의 일부분만 가열이 가능하며, 순간적으로 고온으로 가열이 가능하므로, 짧은 시간에 고효율로 기어의 열처리가 가능하므로 산업적으로 널리 사용되고 있다.<sup>6,7</sup> 이러한 유도가열 기술을 이용한 기어의 열처리는 약 50년 전부터 시작되어 왔으나, 최근 들어 자동차의 경량화, 고순도의 순철 사용 등이 늘어남에 따라 또다시 각광을 받고 있다.<sup>7</sup>

유도가열을 이용한 강재의 열처리에서는 인가

되는 전류의 주파수, 전류의 세기, 공극의 크기 및 자로의 형상 및 특성에 따라 강재에 가해지는 열적 특성이 달라지게 된다. 따라서, 바람직한 열처리 결과를 얻기 위해서는 유도가열기의 치수/형상, 인가 전류 특성, 물성치 등 다양한 조건을 설계하여야 하며, 전통적인 산업에서는 작업자의 경험과 시행착오를 통하여 주로 수행되었다. 하지만, 최근 들어 전산 해석적인 방법을 이용하여 유도가열기를 설계하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 이 중에서도 유한요소법이 가장 많이 사용되고 있으며, 이를 통하여 실제 가열기를 제작하기 전에 전산 해석을 통하여 여러 주요한 파라미터를 설계할 수 있다. 기존의 연구에서는 5000kW 급 유도용해로의 설계를 위하여 인가 주파수에 따른 줄에너지를 유한요소법을 사용하여 계산하였으며,<sup>8</sup> 강판의 유도가열 제어 공정 변수를 찾기 위하여 2차원 유한요소 모델을 이용한 해석이 수행되기도 하였다. 이를 통하여 주파수, 공극의 크기 등이 유도가열 특성에 미치는 영향을 파악하기도 하였다.<sup>9</sup> 또한, 코일의 형상에 따른 최대온도분포, 변형을 등에 대한 해석을 수행하여 최적의 코일의 형상에 대한 설계를 수행하기도 하였다.<sup>10</sup> 소반경 굽힘 파이프의 제작을 위한 유도가열기에 대한 해석도 유한요소해석을 이용하여 수행하여, 재료내의 잔류 응력에 대한 연구를 하기도 하였다.<sup>11</sup> 이러한 해석은 주로, 상용 유한요소 해석툴을 사용하거나, 맥스웰 방정식을 이용하여 이루어진다.<sup>12</sup>

이러한 강재의 열처리 및 가열 분야에 적용되는 유도가열은 일반적으로 단일 주파수를 이용하게 되는데, 기어와 같이 형상이 복잡한 피가열체에 대해서는, 침투 깊이와 침탄 형상의 보다 정밀한 제어를 위하여 두 가지 주파수를 동시에 사용하는 동시 이중 주파수를 이용한 유도가열에 대한 연구가 최근 많이 진행되고 있다.<sup>13,14</sup> 동시 이중주파수를 이용한 기어의 열처리는 기어의 형상에 따라, 두 가지 주파수, 주파수에서의 입력전류 등에 의해 열처리 깊이와 형상이 달라지게 되므로, 공정 조건을 정하는 것이 단일주파수에 비해 더 복잡하게 된다. 이를 위해서 유한요소 해석법을 이용한 연구가 진행되었으나, 모델의 특성상, 3D 모델링을 하여야 하므로, 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있었다.<sup>13</sup>

본 논문에서는 유한요소법을 이용한 기어의 동시이중주파수 열처리에 대한 연구를 수행하였으며, 특히, 계산시간의 단축을 위해 기어의 2D 모델링

및 해석을 수행하였으며, 유도전자기장에 의한 가열을 해석하고자 전자기-열전달 연성해석을 수행하여, 기어의 열처리를 위한 공정조건 탐색에 관한 연구를 수행하였다.

**2. 동시 이중주파수 기어 열처리의 유한요소 모델**

앞 절에서 기술한 바와 같이, 동시 이중주파수에 의한 기어의 열처리는 먼저, 고주파 전자기장에 의해 기어의 표면에 유도전류가 흐르게 되고, 이에 유도된 전류와 기어의 저항에 의해 가열이 되게 된다. 따라서, 해석은 전자장과 열의 2개의 물리계가 연성되어 해석되어야 한다. 이때, 발생하는 유도전류밀도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$(\mathbf{j}\omega\sigma - \omega^2\epsilon_0\epsilon_r)\mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}\mathbf{B}) - \sigma\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{J}_e \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2)$$

여기서,  $\omega$ 는 인가 주파수,  $\epsilon_r$ 는 비유전율,  $\sigma$ 는 전도율,  $\mathbf{A}$ 는 벡터 포텐셜,  $\mu_r$ 는 기어 재료의 비투자율,  $\mu_0$ 는 공기의 투자율,  $\mathbf{B}$ 는 자속밀도,  $\mathbf{J}_e$ 는 인가전류밀도,  $\mathbf{v}$ 는 속도이다.

이때, 기어의 온도 변화는

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (3)$$

와 같이 표현될 수 있다. 여기서,  $C_p$ 는 비열,  $T$ 는 온도,  $Q$ 는 전자장 수식에 의해 계산된 발생하는 열량이다.

이때, 기어의 열처리는 일반적으로 재료의 큐리온도 이상으로 가열되게 되므로, 기어 재료의 전자기적 특성 중 투자율의 값이 상온에 비해 급격하게 감소하게 되므로, 연성해석 시 온도에 따라 투자율의 값의 변화에 대한 값을 미리 알고, 온도 변화에 따라 투자율 값을 갱신하여야 한다. 또한, 온도에 따른 투자율뿐만 아니라, 상온에서의 초기의 투자율 값도 해석에 영향을 미칠 수 있는데, 이는 기존의 연구에서 해석에 크게 영향을 끼치지 않는 것이 밝혀졌다.<sup>15</sup> 따라서, 본 논문에서는 온도에 따른 투자율값을 사용하였으며, 이는 참고 문헌 15의 값을 참조하여 Fig. 1과 같은 데이터를 사용하였다.

해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 COMSOL

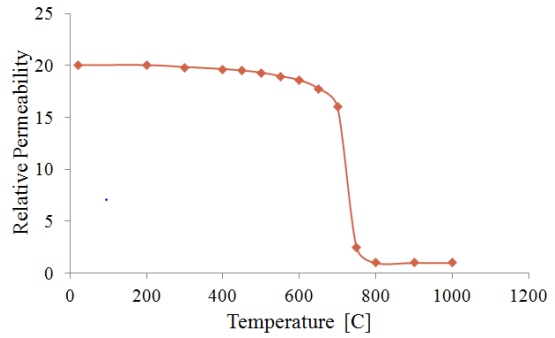


Fig. 1 Relationship between relative permeability and temperature

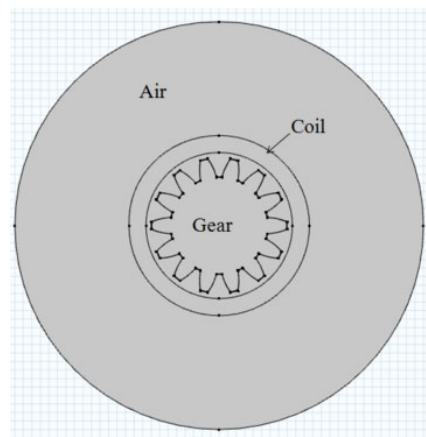


Fig. 2 Modeling for FE analysis

을 사용하였으며, 앞서 언급한 것과 같이 전자장과 열전달 연성 해석을 수행하였다. Fig. 2에 해석을 위한 모델을 보여주고 있다. 그림과 같이 2차원 모델링을 하였으며, 기어의 열처리 모델 같은 경우 일반적으로 기어의 주위를 둘러싼 유도코일의 단면의 수직 방향으로 전류가 흐르므로, 2D 모델을 할 수 없고, 3D 모델만을 하게 된다. 그러나, 이러한 3D 모델링을 이용한 유한요소해석을 수행한 결과, 본 연구실에 보유중인 64비트 서버급 컴퓨터를 이용해서는 해석이 제대로 수행되지 않았다. 따라서, 유한요소의 수를 줄일 필요가 있었으며, 이를 위하여 본 논문에서는 코일에 흐르는 전류를 Fig. 2의 모델에서 원통좌표계의 원주 방향으로 흐른다고 가정하였으며, 이때, 전류  $\mathbf{J}$ 는

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_r \mathbf{e}_r = \frac{I}{A} \mathbf{e}_r \quad (4)$$

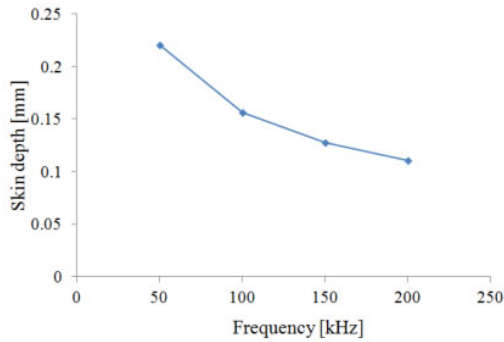


Fig. 3 Relationship between frequency and skin depth

와 같이 입력하였다. 이때,  $I$ 는 코일에 흐르는 전류,  $A$ 는 코일의 단면적,  $\mathbf{r}_0$ 는 원주방향의 단위벡터이다. 이와 같이 코일의 방향을 가정할 수 있으므로 인해서, 기어의 유도가열 현상을 2차원으로 모델링할 수 있었다. 유도가열 현상을 유한요소모델을 사용하여 해석할 때 메쉬의 크기는 침투깊이에 의해 큰 영향을 받게된다. 즉, 침투깊이  $\delta$ 는

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\mu_r\omega}} \quad (5)$$

와 같이 표현할 수 있다. 이때,  $\rho$ 는 기어 재료의 저항률이다. 식 (5)에서 알 수 있듯이, 인가전류의 주파수가 커지면, 침투깊이가 줄어들게 되는데, 이때, 정확한 해석을 위해서는 유한요소 모델에서의 메쉬의 사이즈는 이 침투깊이보다 작아야 하며, 이에 따라, 고주파수의 유도가열 현상을 유한요소법을 사용하여 해석하게 되면 메쉬의 수가 상당히 많이 늘어나게 되어, 계산 시간을 많이 소요하게 되는 원인이 된다. 예를 들어, 저항률을  $9.6 \times 10^{-8} \Omega m$ , 재료의 비투자율을 10이라고 가정하면, 주파수에 따른 침투깊이는 인가 전류의 주파수에 따라 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 50~200kHz 사이의 주파수에 대해서, 침투 깊이는 최대 약 0.23mm 에서 최소 0.1mm까지 변하므로, 이러한 현상을 해석하기 위해서는 이보다 훨씬 작은 사이즈의 메쉬를 사용하여야 하므로, 수십에서 수백 mm 의 직경을 가지는 기어의 유한요소 해석 시에 메쉬의 수는 주파수에 따라 기하급수적으로 증가하게 되며, 해석시간 동안 기하급수적으로 증가하게 되는 것이다. 따라서, 본 논문에서는 유한요소모델링을 2차원으로 함에 따라, 메쉬의 수를 대폭 줄일 수 있었다.

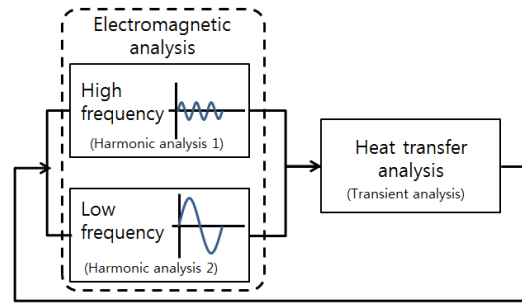


Fig. 4 Analysis procedure

다음으로 앞에서 언급한 바와 같이, 동시이중주파수를 이용한 기어의 열처리 해석은 열-전자장 연성 해석을 수행하여야 한다. 동시 이중주파수를 이용한 유도가열 장치에서는 일반적으로 수~수십 kHz의 중간 대역 주파수(MF)와 수백 kHz 정도의 높은 대역 (HF) 주파수를 사용하게 되는데, 이를 유한요소모델링에 사용하기 위해서는 MF와 HF의 다른 주파수와 각각의 다른 진폭을 가지는 두 개의 조화파를 합성하여 유한요소 모델에 입력하여 과도해석을 수행하게 된다. 이때, 해석이 수행되는 시간간격(Time step)은 파장의 길이보다 작아야 정확한 해석이 이루어지므로, 수백 kHz 성분을 가지는 합성 조화파를 해석하기 위해서는 많은 계산시간이 소요되게 된다. 참고문헌 9에서는 또 다른 상용 소프트웨어인 ANSYS를 활용하여 전자장 해석은 주파수 영역에서 해석하고, 그보다 느린 열 전달 해석만 과도 응답해석을 수행한 선행연구가 있어, 본 논문에서도 해석시간을 줄이기 위한 방법으로 이와 같은 주파수 영역 해석과 과도응답 해석을 병행하여 모델을 생성하였다. 실제로, HF가 100kHz, MF가 10kHz 인 경우의 동시이중주파수 유도가열해석 모델에 대해서, 과도 전자장-과도 열 해석 연성모델인 경우(Model 1)와 조화 전자장-과도 열해석 연성모델인 경우(Model 2)에 대해서 3초간의 유도가열 해석을 수행하고, 해석시간을 비교한 결과, Model 1의 경우는 45일 동안, 273,033 반복 해석을 수행하며 겨우 0.1015초의 해석만 수행하였으나, Model 2의 경우는 평균 4~5시간 안에 3초간의 유도가열에 대한 해석을 완료할 수 있었다. 코일에 서로 다른 주파수를 가지는 전류를 인가하기 위해서, 식 (1)과 같은 전자기장 지배방정식을 2개 생성하고, 0.1초 동안의 시간 동안 두 물리계가 수렴하도록 전자기장 해석을 순차적으로 수행한 후, 각 시간간격에서의 수렴후의 와전류 손실

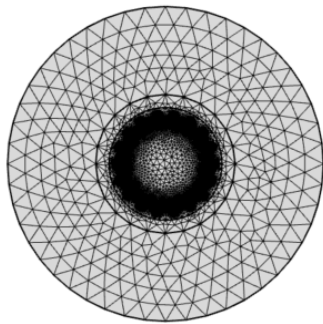


Fig. 5 Generated mesh

을 열전달 물리계로 전달하여 해석을 수행하였다. Fig. 4에 본 개념이 설명되어 있으며, 그림은 연성 해석이 한번의 열해석 Time step 동안 해석이 수행되는 것을 보여주며, 원하는 시간 간격 동안 여러 차례 반복하여 해석을 수행하게 된다. 본 논문에서는 기어의 잇수 18개, 모듈 4, 피치직경 72mm, 폭 10mm 인 임의의 기어를 가정하고 이에 대해서 제안된 해석 방식으로 유한요소 모델을 만들어 열-전자장 연성 해석을 수행하였다.

### 3. 유한요소 해석결과

Fig. 5에 동시 이중주파수를 이용한 기어의 열처리 해석을 위해 만들어진 유한요소모델을 보여주고 있다. 요소의 종류는 삼각형 요소를 사용하였으며, 요소의 개수는 약 8,782개이다. 해석에 사용된 재료는 기어는 일반철, 코일은 구리라 가정하였으며, 나머지 공간은 공기로 두었다. 각 재료의 구체적인 물성치가 Table 1에 나와 있다. 공기의 열용량, 밀도, 열전도도는 온도에 의한 함수로써, Comsol에 내장된 온도에 따른 함수를 사용하였다. 동시 이중주파수에 의한 열처리가 제대로 되는 조건은 등온선이 기어의 외형선을 따라 분포하도록 하는 조건이다. 먼저, 인가 전류의 주파수가 미치는 영향을 알아보기로 하였다. 고주파 유도가 열에서는 높은 주파수로 인해 기어의 이빨 부위가 가열이 쉽게 되는 경향이 있으므로, 이뿌리 부위의 가열에 영향을 주는 MF의 변화에 따른 유도가 열에 의한 온도변화를 살펴보았다. 이를 위해서 Table 2와 같이 3가지 해석 조건을 정하고 해석을 수행해 보았다.

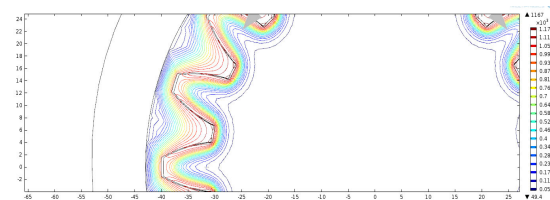
통상적으로 동시 이중주파수를 이용한 기어의 열처리는 수십~수백 ms 내에서 이루어지므로, 해

Table 1 Material properties

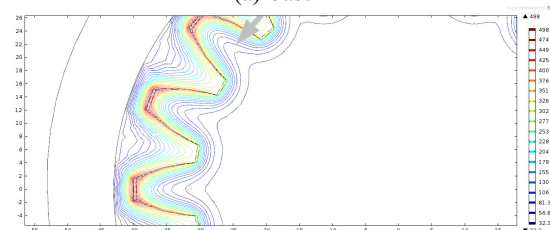
Property	Iron	Copper	Air
Relative permeability	Fig. 1	1	1
Electrical conductivity [S/m]	$1.12 \times 10^7$	$5.998 \times 10^7$	1
Heat capacity [J/(kg*K)]	440	385	$C_p(T)$
Relative permittivity	1	1	1
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	7870	8700	$\rho(T)$
Thermal conductivity [W/(m*K)]	76.2	400	$k(T)$

Table 2 Analysis conditions I

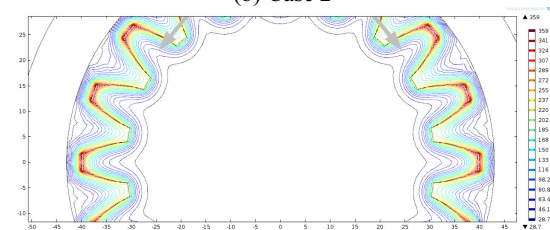
	HF [kHz]	MF [kHz]	IH [A]	IM [A]
Case 1-1	110	3	2000	8000
Case 1-2	110	10	2000	8000
Case 1-3	110	15	2000	8000



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 6 Temperature distribution according to various MF

석은 0.1초까지 수행하였다. 해석 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이, Case 1-1, 즉 MF가 3kHz 인 경우는 등온선의 분포가 기어의 외형선을 따라 분포함을 알 수 있으나, MF가 10kHz, 15kHz 인 Case1-2와 1-3의 경우는 Case 1-1과 MF

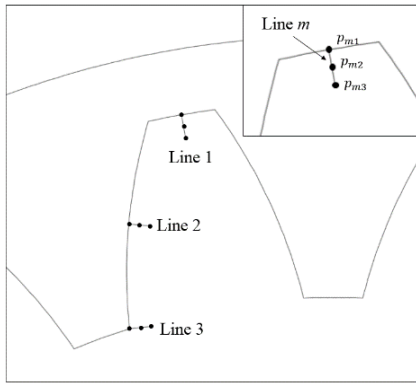


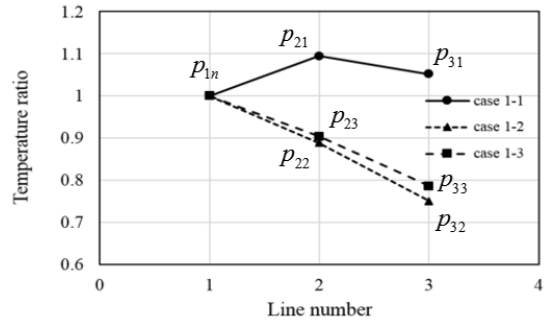
Fig. 7 Temperature measurement positions

의 값만 다르지만, 온도상승이 이끝에 집중함을 알 수 있으며, MF의 주파수가 증가함에 따라 열이 이끝으로 더 많이 몰리는 것을 알 수 있었다.

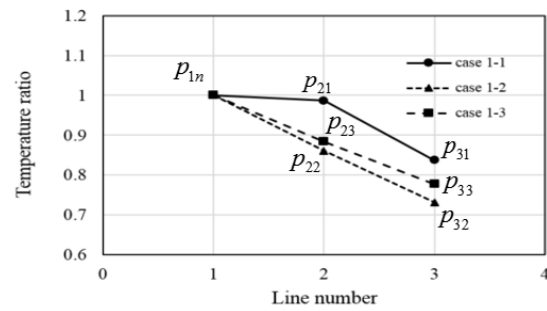
각 조건에 따른 온도분포를 보다 정량적으로 살펴보고자, 기어의 치형을 따라 3부분의 위치에서 선분상의 일정한 깊이에서의 온도변화를 살펴 보았다. 이를 위해서 온도 측정 부위를 Fig. 7과 같이 9개의 지점으로 정하고 각 경우에 따른 온도 분포를 살펴보았다. 그림에 나타나 있듯이, 각 측정 지점은  $p_{mn}$ 으로 표시하였으며, 여기에서 m은 측정 선분의 번호를, n은 측정 깊이의 위치를 나타낸다. 각 선분에서의 측정위치는 표면과 표면에서 각각 0.5mm, 1mm 만큼 들어간 3위치를 정하였다. Table 2의 각각의 인가조건의 변화에 따른 온도균일도의 영향을 분석하고자, line 1에서의 온도에 대한, line 2와 3에서의 0.5mm 깊이, 1mm 깊이에서의 상대적인 온도분포를 살펴봄으로써, 각각의 인가 조건에 따른 온도 균일도의 차이를 살펴보았다.

Fig. 8에 Table 2의 조건에 따른 각 측정위치에서의 상대적인 온도 분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 깊이 0.5mm 위치에서는 Case 1-1의 조건에 의한 가열시 온도 편차가 10% 이내임을 알 수 있으나, Case 1-2와 1-3에서는 온도 편차가 최대 20% 이상 발생함을 알 수 있었다.

다음으로 MF와 HF는 일정하고, HF에서의 전류(I<sub>H</sub>)와 MF의 전류(IM)의 변화에 따른 영향을 알아보기로 하였다. 이를 위하여 Table 3과 같은 해석 조건을 설정하였으며, 표에 나타나 있는 바와 같이 두 전류의 값은 10,000A로 일정할 때, 각각의 비율이 다르도록 설정하였다. 이때, 주파수는 앞의 해석에서 가장 좋은 결과를 보인 HF=110kHz,



(a) Depth=0.5mm



(b) Depth=1.0mm

Fig. 8 Relative temperature distribution I

Table 3 Analysis conditions II

	HF [kHz]	MF [kHz]	I <sub>H</sub> [A]	I <sub>M</sub> [A]
Case 2-1	110	3	2000	8000
Case 2-2	110	3	5000	5000
Case 2-3	110	3	8000	2000

MF=3kHz로 고정하였다.

Fig. 9에 0.1초 후의 기어의 온도분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, Case 2-1인 경우에 등온선이 기어의 외형선을 따라 분포함을 알 수 있다. 이와 같이, 등온선이 기어의 외형을 따라 분포하는 형상일 때, 기어의 열처리 심도가 일정하여, 정상적인 열처리가 된다. 그에 반해, Case 2-2와 Case 2-3의 경우는 온도가 균일한 분포를 보이지 않고, 기어의 이끝 부분이 가열되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경우에는 이끝쪽에만 열처리가 깊게 되어, 열처리 불량이다.

본 해석도 마찬가지로, Table 3의 각 인가조건에 따른 기어 치형에서의 온도 균일도를 살펴보기 위하여, Fig. 7에 표시된 위치에서의 상대적인 온도 균일도를 도시하여 보았으며, 그 결과가 Fig. 10에 나타나 있다.

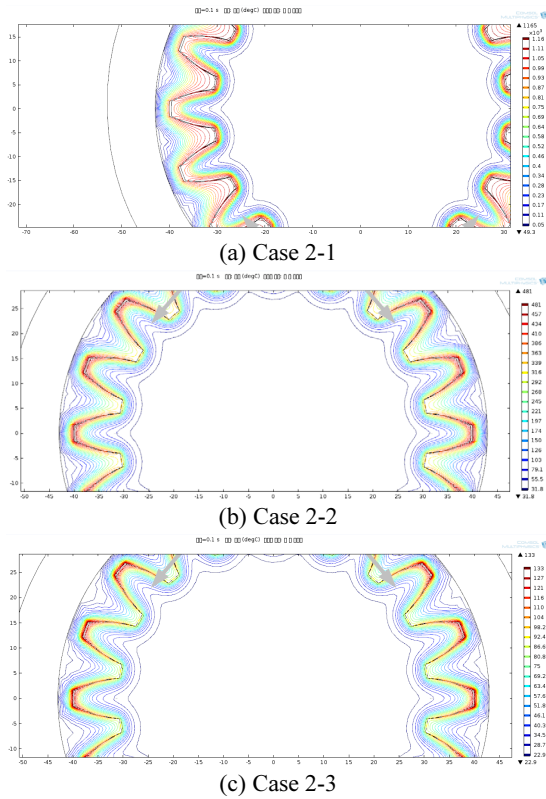


Fig. 9 Temperature distribution according to input current

Fig. 10에 보여주듯이, 깊이 0.5mm 에서는 Case 2-1의 경우 온도 편차가 최대 9%정도인데 반해, Case 2-2와 Case 2-3은 각각 최대 온도 편차가 23%, 10% 정도 발생하였다. 경화 깊이 0.5mm에 대해서는 Case 2-1의 조건이 가장 좋은 온도 균일도를 보여줌을 알 수 있었다.

깊이 1mm 에서는 Case 2-1의 경우  $p_{11}$ 과  $p_{21}$ 의 온도편차가 1% 이내도 아주 우수한 반면,  $p_{31}$ 에서 16% 정도의 비교적 큰 오차가 발생하였으나, Case 2-3의 경우  $p_{33}$ 에서의 최대 오차가 10% 정도로 우수한 성능을 보여주었다. 이를 통하여, Case 2-1의 성능이 전반적으로 우수한 것을 알 수 있었으나, 경화 깊이가 0.5mm 정도가 요구될 때에는 Case 2-1의 조건을 사용하고, 경화 깊이가 1mm 정도가 요구시에는 Case 2-3의 조건을 사용함이 더 좋다는 것을 확인할 수 있었다.

따라서, 위의 해석을 통하여 주어진 기어에서 최적의 열처리 조건은 주파수의 경우 HF는 110kHz, MF는 3kHz이며, 각각의 주파수에 해당되는 인가전류는 IH=2000A, IM=8000A임을 알 수 있었다.

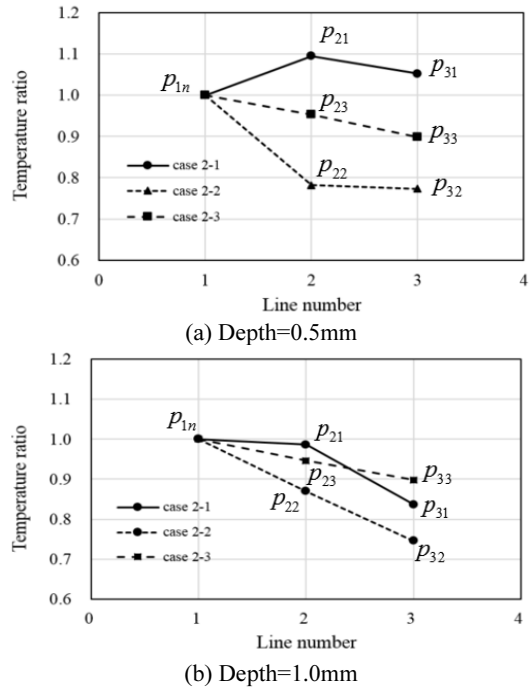


Fig. 10 Relative temperature distribution II

#### 4. 결론

본 논문에서는 기어의 열처리를 위한 동시 이중주파수 유도가열에 대해 연구하였다. 동시 이중주파수 유도가열의 경우 서로 다른 주파수를 가지는 두 개의 조화파가 합성되어 입력되고, 열-전자장 연성 해석을 수행하여야 하며, 이와 함께 계산 시간이 많이 소요될 수 있어, 이를 고려한 모델링이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 해석시간을 고려하여 2차원 과도 열-조화 전자장 연성 모델링을 하고, 동시 이중주파수 기어 열처리의 해석을 수행하였다. 해석결과, 두 가지 조화파가 합성된 경우의 유도가열 해석을 수행할 수 있었으며, 만들어진 모델을 이용하여, 적절한 주파수와 전류를 정할 수 있었다. 향후 연구에서 개발된 유한요소 모델을 검증하기 위한 실험을 수행하여 모델 검증 및 신뢰성 확보를 할 계획이다.

#### 후 기

본 연구는 중소기업청 중소기업융복합기술개발 사업인 “동시 이중주파수 구동 인버터를 이용한 기어 열처리 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. "Gear," [http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=923125 &cid=3430&categoryId=3430](http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=923125&cid=3430&categoryId=3430) (Accessed 20 May 2015)
2. Cho, J. R., Kang, W. J., Bae, W. B., Lee, Y. S., and Lee, J. H., "Analysis of the Heat Treatment Process on Bevel Gears," Proc. of the KSME Fall Conference, pp. 1471-1476, 2002
3. Bae, K., Yang, Y., and Park, B., "Analysis of Deformation of Automotive Helical Gear in Heat Treatment of Carburized Quenching," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 27, No. 11, pp. 84-91, 2010.
4. Ahn, M. J., Xu, Z. Z., and Lyu, S. K., "A Study on the Heat-treatment Deformation of SCM415 Spur Gear by Carburizing Hour," Proc. of the KSTP Conference, pp. 74-75, 2011.
5. Choi, B. H., Lee, H. C., Lee, H. D., and Byun, S. G., "Optimization of Carburizing Process for Commercial Vehicle," Proc. of the KSAE Conference, pp. 1999-2003, 2011.
6. Grum, J., "A Review of the Influence of Grinding Conditions on Resulting Residual Stresses after Induction Surface Hardening and Grinding," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 114, No. 3, pp. 212-226, 2001.
7. Hömberg, D., "A Mathematical Model for Induction Hardening Including Mechanical Effects," Nonlinear Analysis: Real World Applications, Vol. 5, No. 1, pp. 55-90, 2004.
8. Kim, J.-H., Yoo, H.-Y., Kang, H.-H., and Jeon, H.-J., "Quality of Thermal Distribution for Induction Heating with FEM," Proc. of the KIPE Conference, pp. 156-158, 2005.
9. Bae, K.-Y., Lee, T.-H., and Yang, Y.-S., "A Study of the Effects of Process Variables on Temperature and Magnetic-flux Distribution in Induction Heating of Steel Plate," Journal of the Korean Welding Society, Vol. 19, No. 5, pp. 78-85, 2001.
10. Yang, Y.-S., Bae, K.-Y., and Shin, H.-Y., "Effects of Inductor Shape in Steel Forming Process with High Frequency Induction Heating," Journal of the Korean Welding Society, Vol. 26, No. 4, 2008.
11. Lim, J. S., Chun, S. H., Moon, Y. H., and Lee, Y. S., "A Study on the Residual Stress of Small Radius Pipe Fabricated by Pipe Bending with Local Induction Heating," Proc. of the KIPE Conference, pp. 331-335, 2011.
12. Im, K.-S., Kim, W.-K., and Oh, S.-I., "Analysis of Induction Heating System using FEM," Proc. of the KSTP Conference, pp. 125-129, 1997.
13. Shin, W.-S. and Park, H.-C., "Inverter for Induction Heating using Simultaneous Dual-frequency Method," Journal of Power Electronics, Vol. 16, No. 6, pp. 554-560, 2011.
14. Wrona, E., Nacke, B., and Resetov, D., "3D-Modelling of the Transient Heating Process for Induction Surface Hardening," Proc. of the Modelling for Electromagnetic Processing in International Scientific Colloquium, pp. 119-123, 2003.
15. Zedler, T., Nikanorov, A., and Nacke, B., "Investigation of Relative Magnetic Permeability as Input Data for Numerical Simulation of Induction Surface Hardening," Proc. of the Modelling for Electromagnetic Processing in International Scientific Colloquium, pp. 119-126, 2008.