

AOC 2023

수냉식 구동 모터의  
냉각 성능 향상을 위한  
유량 및 유로 형상 최적설계

팀	명	고엔장
소	속	건국대학교 기계공학부
성	명	고재경, 장영우
지도교수		김창완 교수님

# CONTENTS

## 01 서론

- 1) 연구 배경
- 2) 연구 목적
- 3) 연구 개요

## 03 코일의 최고온도 계산을 위한 열-유동 해석

- 1) 열-유동 해석 지배방정식
- 2) 초기 모델의 형상 및 물성치
- 3) 초기 모델의 유한요소모델
- 4) 초기 모델의 경계조건
- 5) 초기 모델의 열-유동 해석 결과
- 6) 엔드와인딩 과열 방지를 위한 설계 개선
- 7) 개선 모델의 열-유동 해석 결과
- 8) 열-유동 해석 결과 분석

## 02 모터의 손실 계산을 위한 전자기 해석

- 1) 전자기 해석 지배방정식
- 2) 전자기 해석 모델
- 3) 전류 인가 조건
- 4) 전자기 해석 결과

## 04 냉각 성능 향상을 위한 유량 및 유로 최적화

- 1) 최적설계 개요
- 2) 최적설계 정식화
- 3) Case Study
- 4) 메타모델 생성
- 5) 최적화 수행
- 6) 최적화 결과 분석

## 05 결론

# CONTENTS

## 01 서론

- 1) 연구 배경
- 2) 연구 목적
- 3) 연구 개요

## 02 모터의 손실 계산을 위한 전자기 해석

- 1) 전자기 해석 지배방정식
- 2) 전자기 해석 모델
- 3) 전류 인가 조건
- 4) 전자기 해석 결과

## 03 코일의 최고온도 계산을 위한 열-유동 해석

- 1) 열-유동 해석 지배방정식
- 2) 초기 모델의 형상 및 물성치
- 3) 초기 모델의 유한요소모델
- 4) 초기 모델의 경계조건
- 5) 초기 모델의 열-유동 해석 결과
- 6) 엔드와인딩 과열 방지를 위한 설계 개선
- 7) 개선 모델의 열-유동 해석 결과
- 8) 열-유동 해석 결과 분석

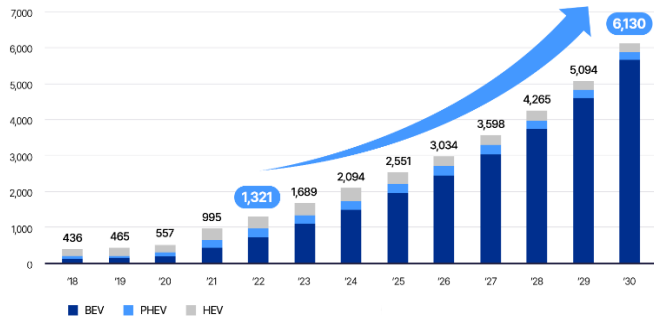
## 04 냉각 성능 향상을 위한 유량 및 유로 최적화

- 1) 최적설계 개요
- 2) 최적설계 정식화
- 3) Case Study
- 4) 메타모델 생성
- 5) 최적화 수행
- 6) 최적화 결과 분석

## 05 결론

# 연구 배경

- 전기자동차의 시장 규모가 증가함에 따라, 핵심 부품인 구동 모터에 대한 연구가 확대됨
- 전기자동차의 구동 모터는 전기에너지를 기계적 에너지로 변환하여 동력을 생성함
- 이러한 에너지 변환 과정에서 각종 손실이 발생하며, 대표적인 손실로 **철손, 동손**이 있음
  - 기계손, 표류부하손은 철손, 동손에 비해 손실량이 작음



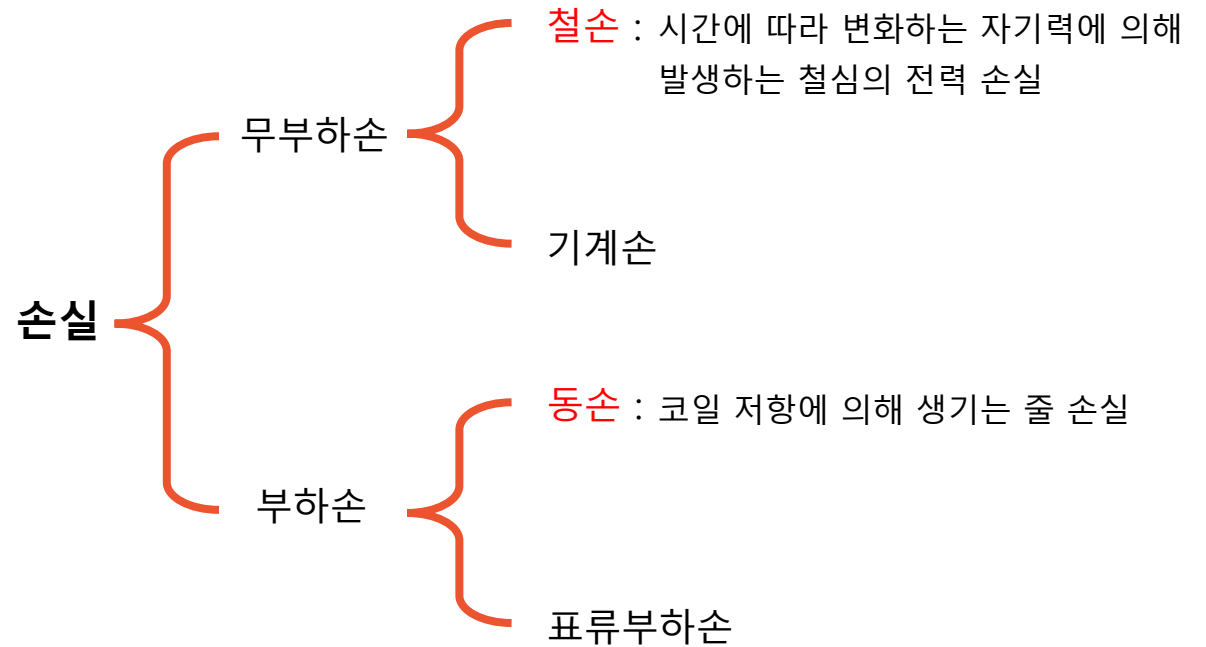
<글로벌 전기차 시장 규모>

출처: 글로벌 EV 및 LIB 시장 전망(SNE Research, 2022.03)



<전기차 구동 모터>

출처: <https://www.carscoops.com>

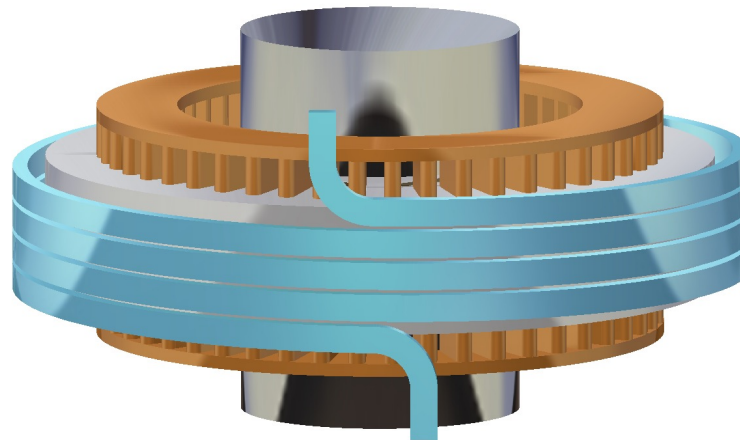


# 연구 배경

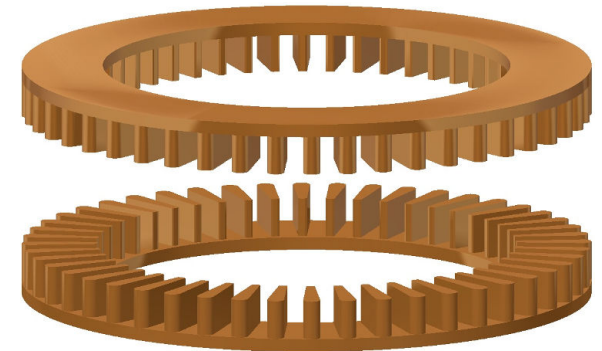
- 발생한 손실은 열 에너지의 형태로 방출되어, 구동 모터의 온도를 상승시킴
- 구동 모터의 절연등급별 허용 온도, 성능, 수명을 고려하였을 때 냉각 시스템을 통한 열관리는 필수적임  
\* 절연등급: 모터에 적용된 절연물의 최고 사용 허용 온도를 기준으로 구분한 것
- 전기자동차 구동 모터의 냉각을 위해, 냉각 유로를 이용한 수냉 방식이 널리 사용됨
- 냉각 유로를 이용한 수냉 방식은 **냉각 구조상 코일의 돌출부인 엔드와인딩이 과열**되어 성능 저하를 유발할 수 있음

절연등급	최고허용온도 (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	180 초과

<절연등급별 최고허용온도>



<엔드와인딩을 냉각하기 어려운 유로 형상>



<코일의 엔드와인딩>



# 연구 목적

- 엔드와인딩의 과열을 방지하기 위해, 냉각 범위를 넓혀 코일 최고온도를 최소화하는 유로 설계

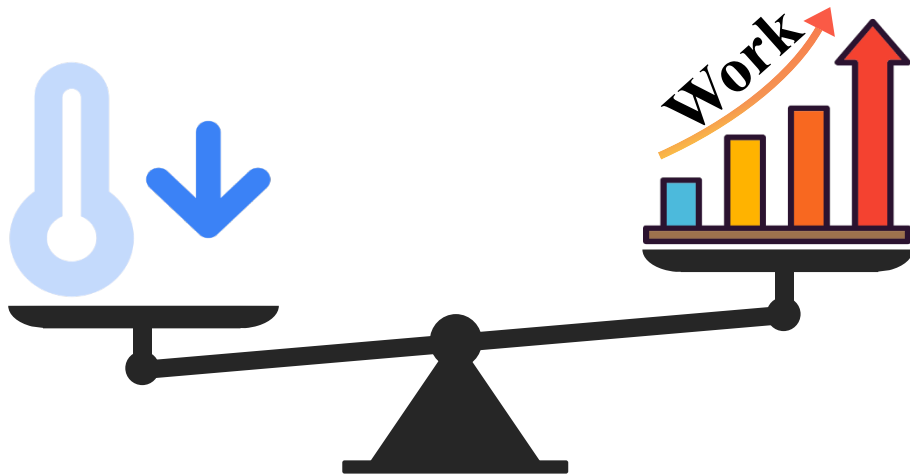
열교환 면적이 증가하여

엔드와인딩 과열 방지 및 코일 최고온도 감소

- 냉각 범위가 기존보다 넓어지면서

압력 강하가 증가하여 펌프 소요동력 증가

“Trade-off” 관계



펌프 소요동력을 증가시키지 않고

코일 최고온도를 최소화하는 것이 본 연구의 목적



**Flux**

- 전자기 해석을 통해 **구동 모터의 손실 계산**
- 열-유동 해석의 열원으로 부여



**Acusolve**

- 열-유동 해석을 통해 **코일 최고온도, 냉각수 압력강하, 펌프 소요동력 계산**
- 최적화를 위한 설계변수 선정



**HyperStudy**

- 자동화 스크립트 기능을 이용해 Case study 수행
- 메타모델을 생성하고 최적화 알고리즘을 적용하여 **최적화 모델 도출**

# CONTENTS

## 01 서론

- 1) 연구 배경
- 2) 연구 목적
- 3) 연구 개요

## 03 코일의 최고온도 계산을 위한 열-유동 해석

- 1) 열-유동 해석 지배방정식
- 2) 초기 모델의 형상 및 물성치
- 3) 초기 모델의 유한요소모델
- 4) 초기 모델의 경계조건
- 5) 초기 모델의 열-유동 해석 결과
- 6) 엔드와인딩 과열 방지를 위한 설계 개선
- 7) 개선 모델의 열-유동 해석 결과
- 8) 열-유동 해석 결과 분석

## 02 모터의 손실 계산을 위한 전자기 해석

- 1) 전자기 해석 지배방정식
- 2) 전자기 해석 모델
- 3) 전류 인가 조건
- 4) 전자기 해석 결과

## 04 냉각 성능 향상을 위한 유량 및 유로 최적화

- 1) 최적설계 개요
- 2) 최적설계 정식화
- 3) Case Study
- 4) 메타모델 생성
- 5) 최적화 수행
- 6) 최적화 결과 분석

## 05 결론



# 전자기 해석 지배방정식

- 가우스 법칙

$$\operatorname{div}(\vec{D}) = \rho$$

- 가우스 자기 법칙

$$\operatorname{div}(\vec{B}) = 0$$

- 패러데이 전자기 유도 법칙

$$\operatorname{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

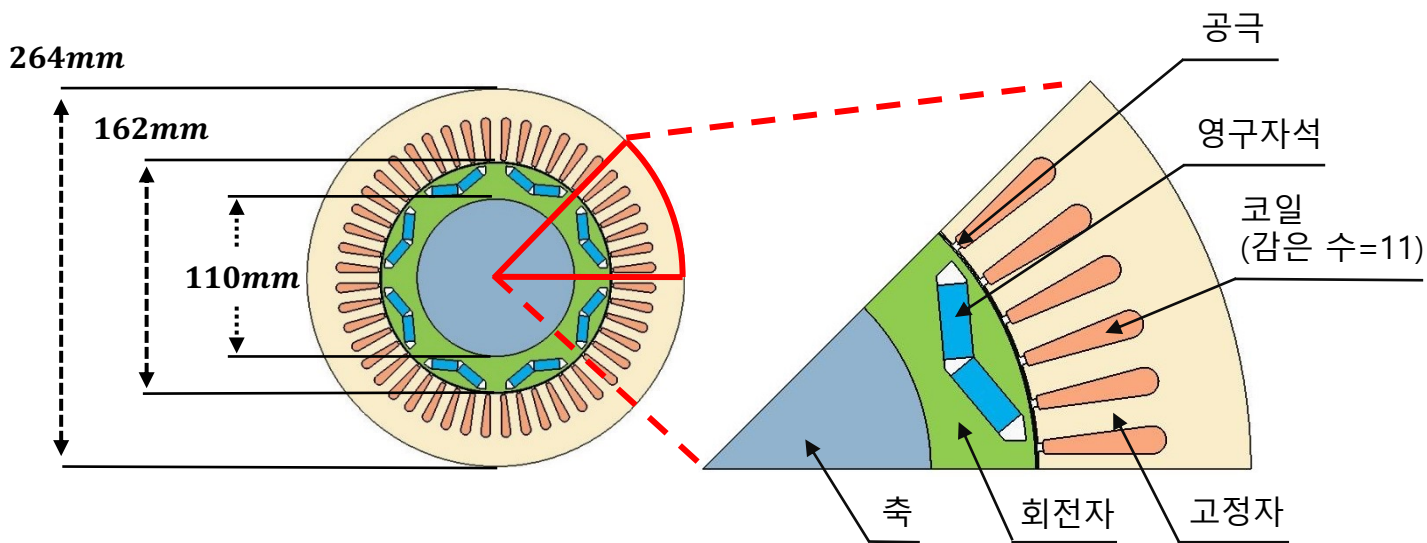
- 앙페르-맥스웰 회로 법칙

$$\operatorname{rot}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

맥스웰 방정식

# 전자기 해석 모델

- Toyota Prius 2010의 매입형 영구자석 동기전동기 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM) 모델링
- **2D, 1/8** 형상만을 모델링하여 해석함으로써 해석 시간 단축



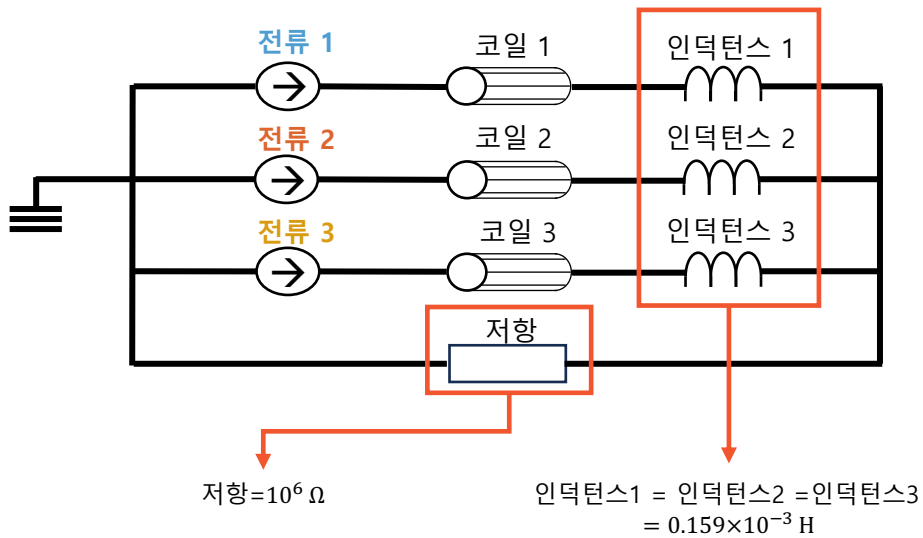
<Prius 2010 IPMSM>

모터의 구성요소별 재료와 물성치

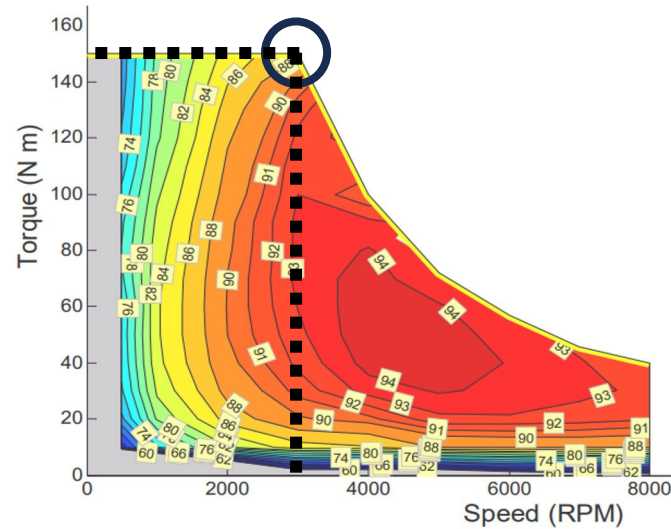
Component	Material	Magnetic type	Electrical resistivity	Iron loss computation
축	AISI 1045 Steel	Soft Magnetic	$1.62 \times 10^{-7}$	-
고정자, 회전자	M330_35A	Soft Magnetic	$4.6 \times 10^{-7}$	Bertotti model
코일	Copper	Soft Magnetic	$1.724 \times 10^{-8}$	-
영구자석	NdFeb	Permanent Magnetic	$1.6 \times 10^{-6}$	-
공극	Air	-	-	-

# 전류 인가 조건

- 모터 제원에 따른 3상 회로 구성
- Prius 2010의 효율 맵을 참고하여 **최대 토크**를 출력할 때의 상황을 모터의 구동 속도로 결정
- 모터의 구동 속도, 실효 전류 값, 극 수를 기반으로 전류 인가

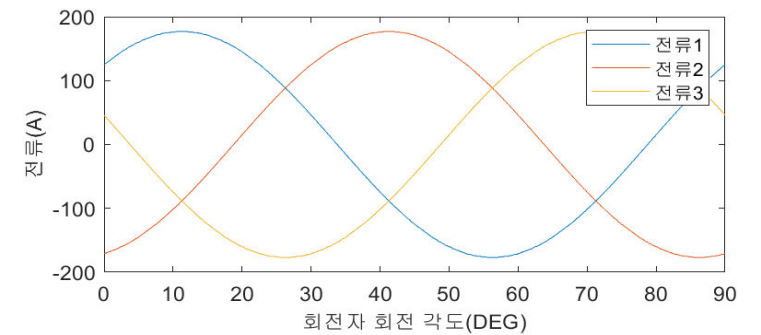


<Prius 2010 IPMSM의 3상 회로>



<Prius 2010 IPMSM의 효율 맵>

전류 인가 조건	
모터의 구동 속도	3,300 RPM
실효 전류 값	125.16 Amp
극 수	8

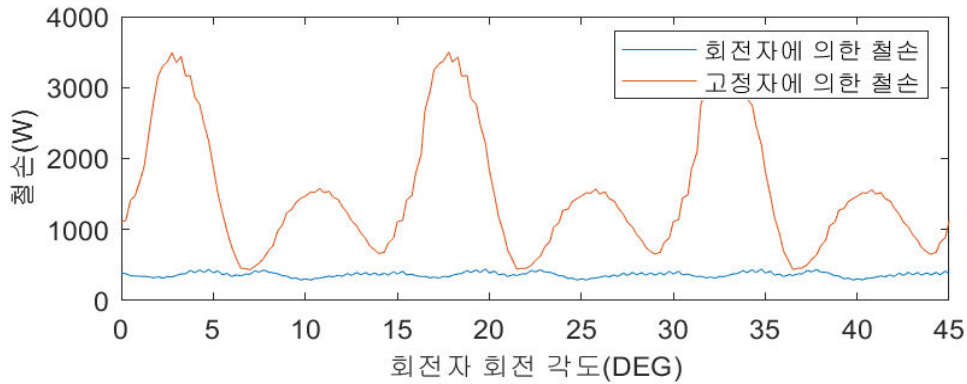


<인가한 3상 전류>

# 전자기 해석 결과

- 전자기 해석을 통해 계산한 손실을 열-유동 해석의 **열원**으로 부여

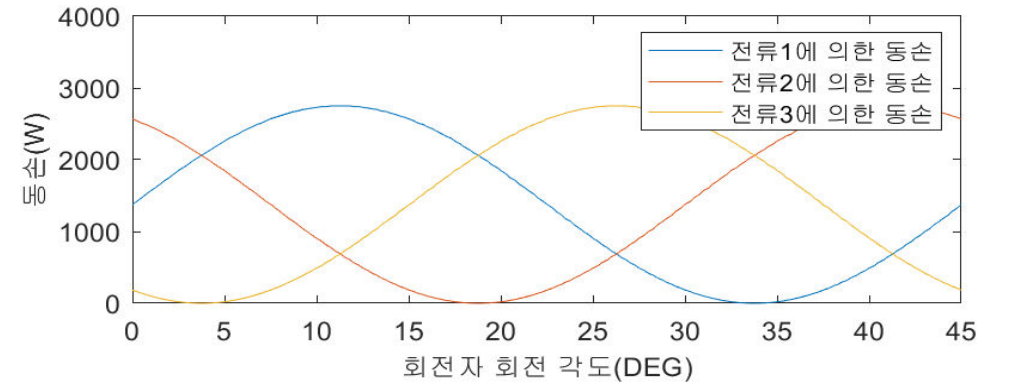
<철손 (Iron loss)>



구성 요소별 발생한 철손

	최댓값	최솟값	RMS
회전자	445 W	288 W	<b>366 W</b>
고정자	3,500 W	434 W	<b>1,804 W</b>

<동손 (Copper loss)>



전류1에 의한 동손

전류2에 의한 동손

전류3에 의한 동손

**전체 동손 = 4,125 W**

# CONTENTS

## 01 서론

- 1) 연구 배경
- 2) 연구 목적
- 3) 연구 개요

## 02 모터의 손실 계산을 위한 전자기 해석

- 1) 전자기 해석 지배방정식
- 2) 전자기 해석 모델
- 3) 전류 인가 조건
- 4) 전자기 해석 결과

## 03 코일의 최고온도 계산을 위한 열-유동 해석

- 1) 열-유동 해석 지배방정식
- 2) 초기 모델의 형상 및 물성치
- 3) 초기 모델의 유한요소모델
- 4) 초기 모델의 경계조건
- 5) 초기 모델의 열-유동 해석 결과
- 6) 엔드와인딩 과열 방지를 위한 설계 개선
- 7) 개선 모델의 열-유동 해석 결과
- 8) 열-유동 해석 결과 분석

## 04 냉각 성능 향상을 위한 유량 및 유로 최적화

- 1) 최적설계 개요
- 2) 최적설계 정식화
- 3) Case Study
- 4) 메타모델 생성
- 5) 최적화 수행
- 6) 최적화 결과 분석

## 05 결론



# 열-유동 해석 지배방정식

- 질량 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

- 운동량 보존 방정식

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\rho \vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \tau$$

- 에너지 보존 방정식

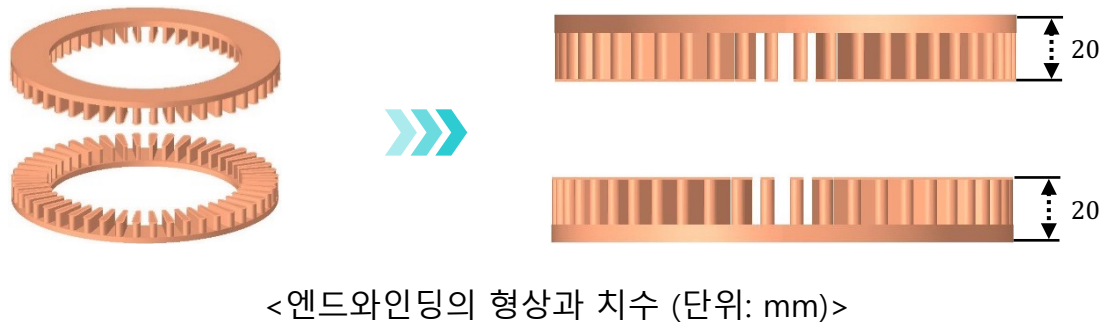
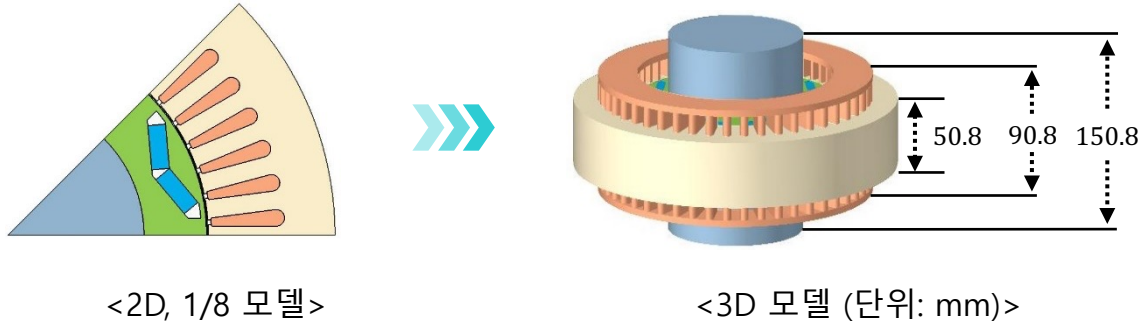
$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \vec{u} \cdot \tau + S$$

유동 해석을 위한 방정식

열 해석을 위한 방정식

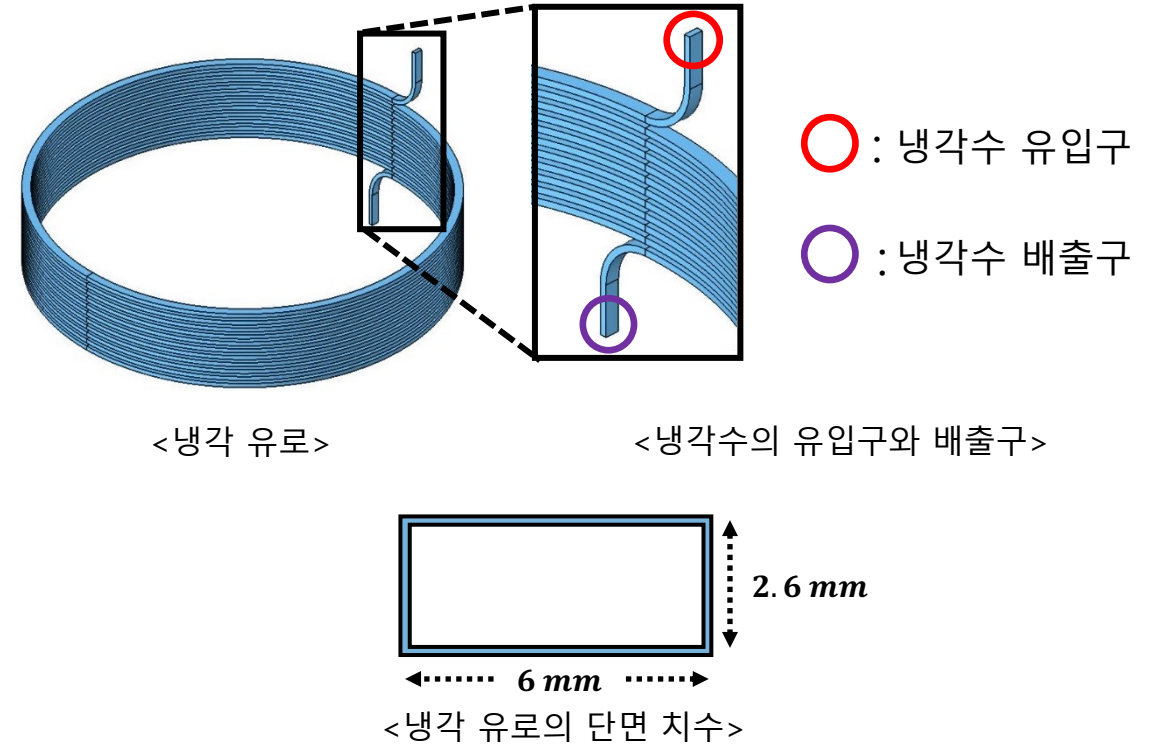
# 초기 모델의 형상 및 물성치

- 모터의 2D, 1/8 모델을 3D 전체 형상으로 모델링



- 엔드와인딩의 형상을 단순화하고, 모터 제원을 참고하여 엔드와인딩의 길이 선정

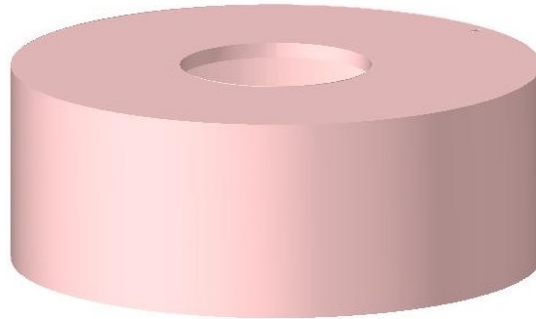
- 냉각 유로 모델링 및 단면 치수



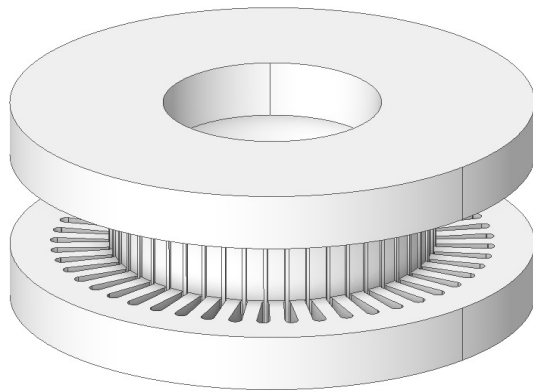
- 초기 모델의 냉각 유로 단면 치수는 논문을 참고하여 선정

# 초기 모델의 형상 및 물성치

- 하우징, 내부 공기 모델링

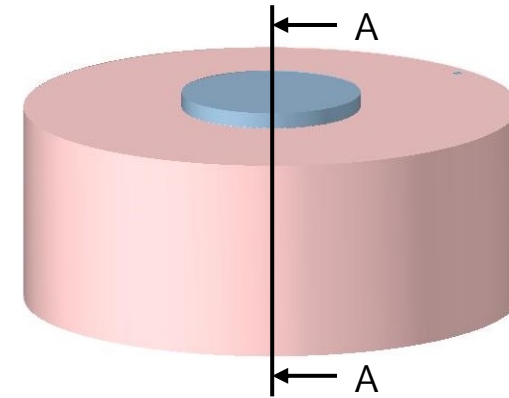


<하우징>

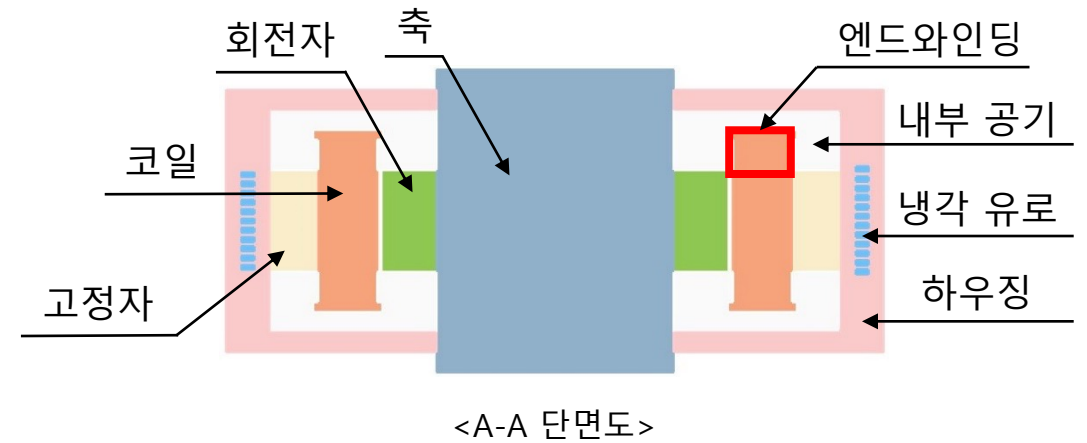


<내부 공기>

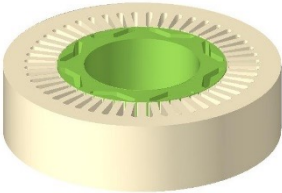
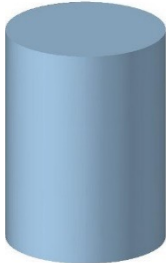
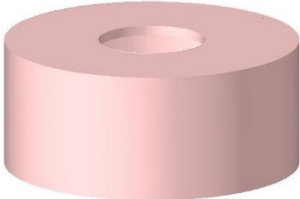
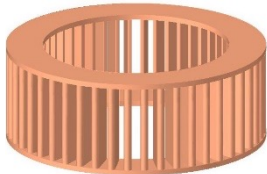
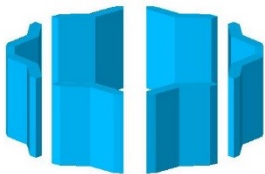
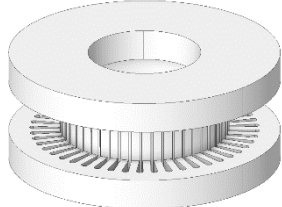

- 초기 모델의 전체 형상 및 단면도



<초기 모델의 전체 형상>

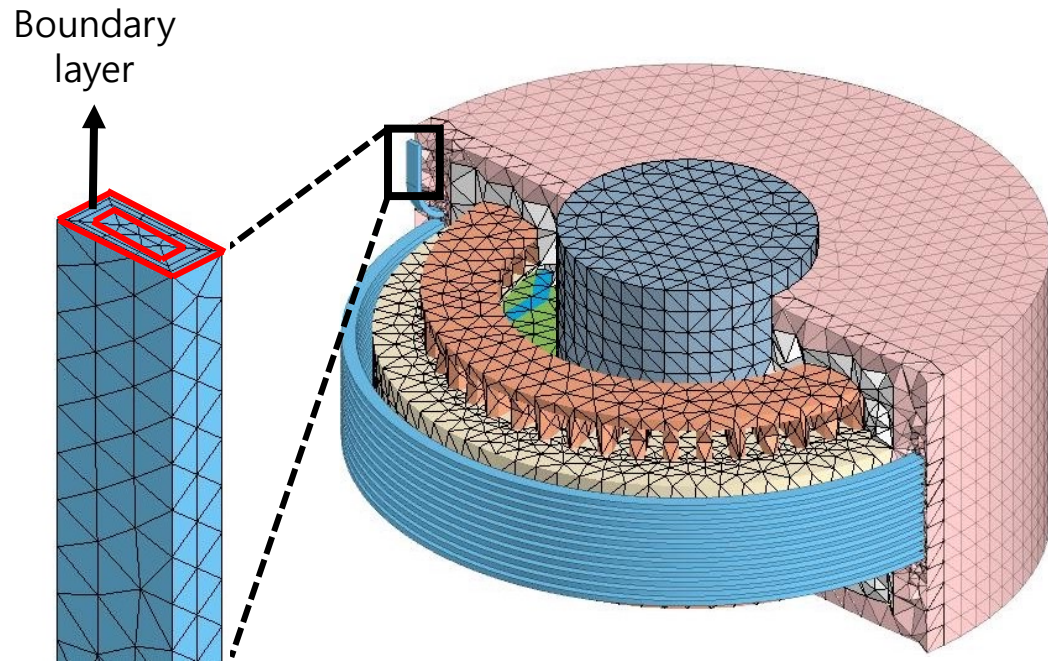


# 초기 모델의 형상 및 물성치

물성치							
Component	고정자, 회전자	축	하우징	코일	영구자석	내부 공기	냉각 유로
							
Material	M330_35A	AISI 1045 Steel	Aluminum Alloy A380	Copper	NdFeb	Air	Water
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7,650	7,870	2,710	8,940	7,600	1.225	1,000
Specific heat (J/kg · K)	460	486	963	401	502	1,005	4,183
Thermal conductivity (W/m · K)	25	51.9	96	385	8.96	0.0252	0.598

# 초기 모델의 유한요소모델

- 열-유동 해석의 정확성을 확보하기 위해, 냉각수가 흐르는 유로의 요소를 조밀하게 구성
- 냉각수와 벽면사이의 마찰을 고려하기 위해, 냉각 유로 벽면에 3층의 Boundary layer 생성
- 총 요소 개수 : 948,299



<모터의 유한요소모델>

모터의 유한요소모델에 대한 세부 정보

	Surface mesh size	Body mesh size	요소 종류	요소 개수
냉각 유로	2 mm	5 mm	Tet4 + Wedge6	427,314
냉각 유로를 제외한 구성 요소	10 mm	20 mm	Tet4	520,985



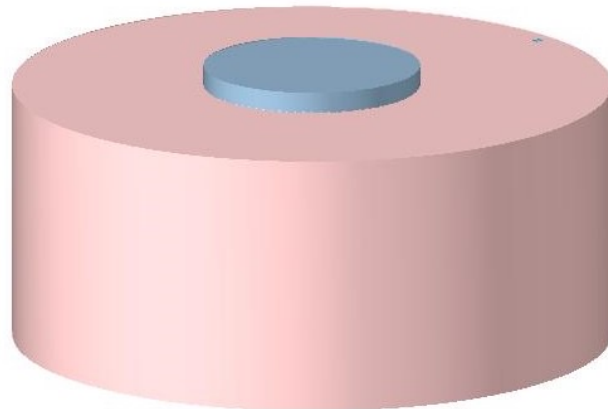
# 초기 모델의 경계조건

- 벽 경계조건

- 하우스 외부, 내부 공기에 의한 대류 조건 부여

하우스 외부의 공기는 정지상태로 가정  
→ 하우스 외벽에 **자연 대류 조건** 부여

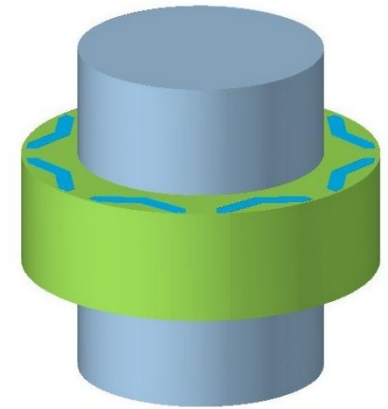
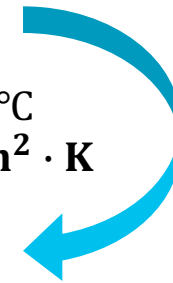
$$T_{\infty} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$
$$h = 15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$



<하우스>

회전자와 축이 회전하며, 하우스 내부 공기가 순환함을 가정  
→ 회전자와 축에 **강제 대류 조건** 부여  
구동 조건에서의 강제 대류 계수는 Flux motor를 이용하여 계산

$$T_{Air} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$
$$h = 186 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$



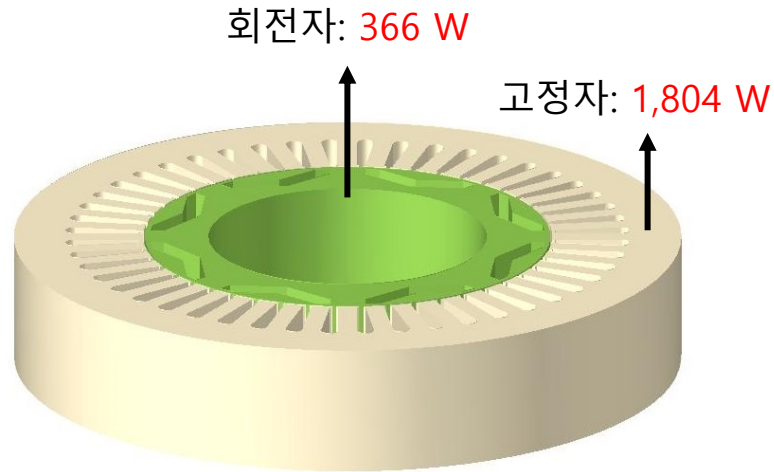
<회전자와 축>

# 초기 모델의 경계조건

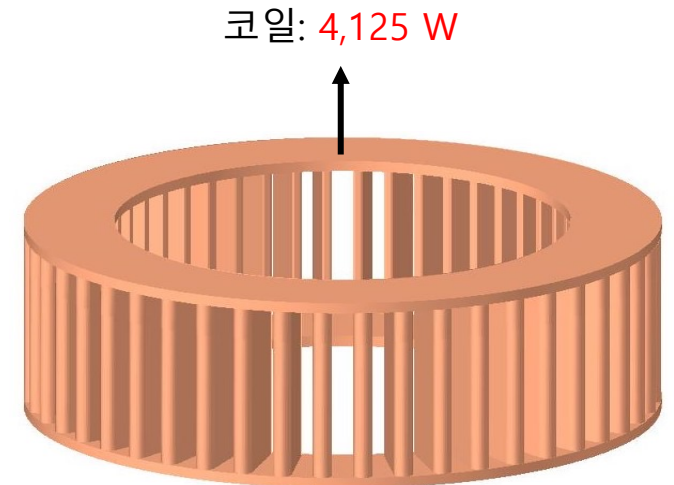
- 열원 경계조건

- 전자기 해석을 통해 계산한 손실을 구성요소에 부여

전자기 해석을 통해 계산한 손실		
구성요소	손실량	손실 종류
회전자	366 W	철손
고정자	1,804 W	철손
코일	4,125 W	동손



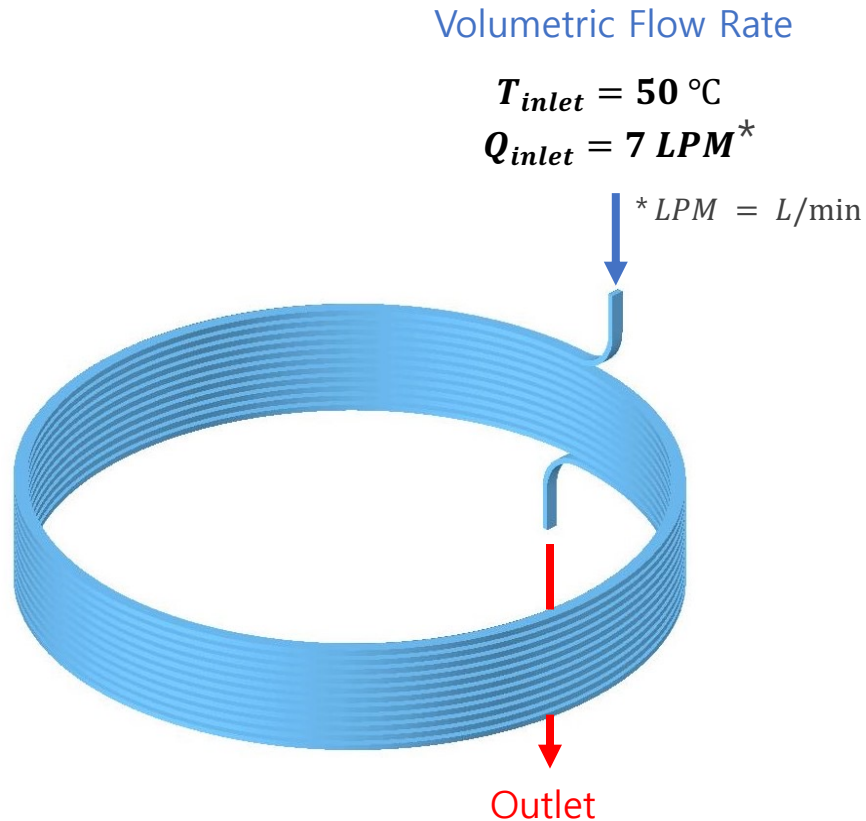
<철손이 부여되는 회전자와 고정자>



<동손이 부여되는 코일>

# 초기 모델의 경계조건

- 냉각수 경계조건



- 냉각수 유동 상황 분석

- 냉각수 레이놀즈 수

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{1000\left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot 7.4\left(\frac{m}{s}\right) \cdot 0.00365(m)}{0.001\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)} = 27,010$$

$\rho$ : 냉각수의 밀도  
 $u$ : 냉각수의 속도  
 $D$ : 냉각 유로의 수력학적 직경  
 $\mu$ : 냉각수의 마찰계수

→ 냉각수 유동은 **난류 유동**

→ 해석 모델에 적합한 난류 모델은 2-equation 모델인

SST  $k - \omega$  모델 또는 Realizable  $k - \epsilon$  모델로 판단되지만

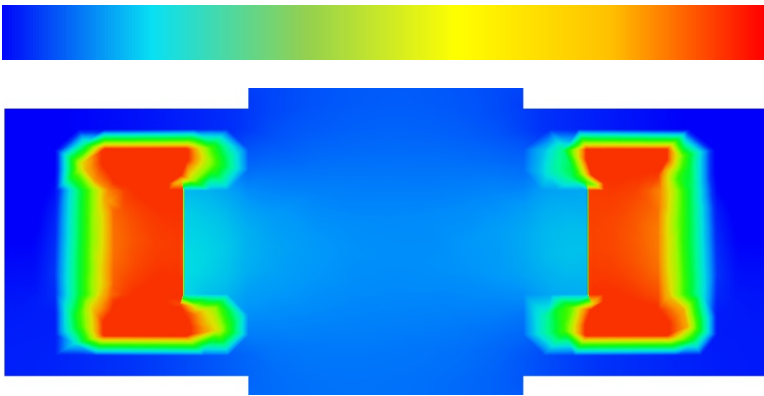
연산비용과 정확성을 모두 고려하였을 때,

1-equation 모델인 **Spalart-Allmaras 모델**을 난류 모델로 선정

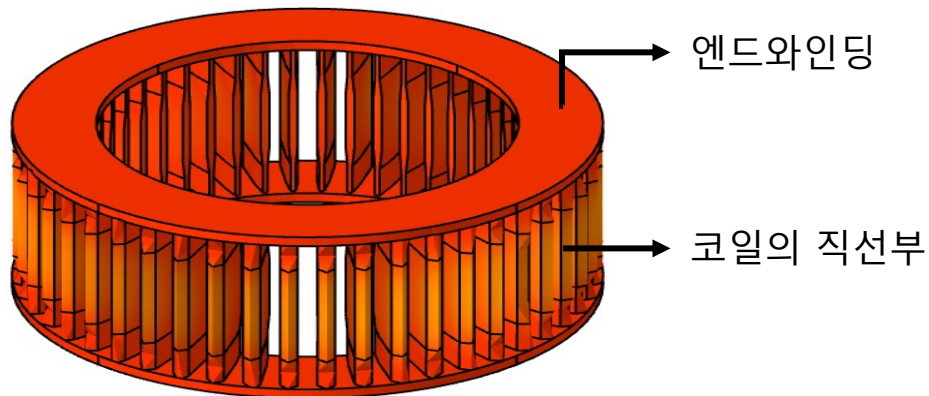
# 초기 모델의 열-유동 해석 결과

## 초기 모델의 온도 분포

50.0 °C   77.6 °C   105.2 °C   132.8 °C   160.4 °C   188.0 °C



<모터 단면의 온도분포>



<코일의 온도 분포>

- 최고온도: **188 °C**
- 최고온도는 엔드와인딩에서 발생
- 엔드와인딩을 제외한 코일의 직선부는 절연 허용온도 이내
- 하지만 최고온도가 발생한 **엔드와인딩은 절연 허용온도\* 초과**  
\*H등급 기준: 180 °C



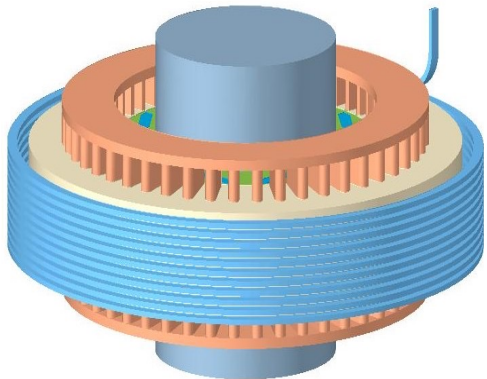
**엔드와인딩의 과열을 방지하여  
코일 최고온도를 감소시키기 위한 설계 개선 필요**

# 엔드와인딩 과열 방지를 위한 설계 개선

- 초기 모델의 엔드와인딩은 단열재인 공기로 둘러싸여 있음

→ 열 저항이 높은 공기로 인해, 냉각수와 엔드와인딩 사이의 열 교환이 비효율적

- 효율적인 열 교환을 위해
  - 엔드와인딩을 감싸는 삽입물질을 추가하여 효과적인 열 전달 경로 제공
  - 냉각 유로를 엔드와인딩 부분까지 설치하여 열 교환 면적 증가



<초기 모델>

## <설계 개선 1>

삽입물질 추가

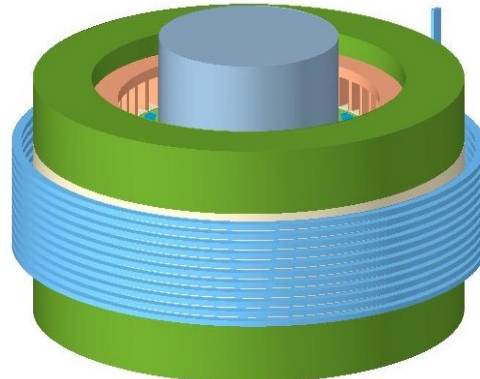


Epoxy 2315

밀도: 1,800 kg/m<sup>3</sup>

비열: 1,000 J/kg·K

열전도도: 58 W/m·K

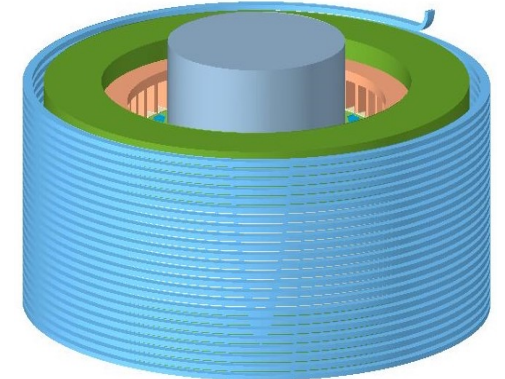


## <설계 개선 2>

추가적인 유로 설치



유로의 감긴 횟수  
11 → 24



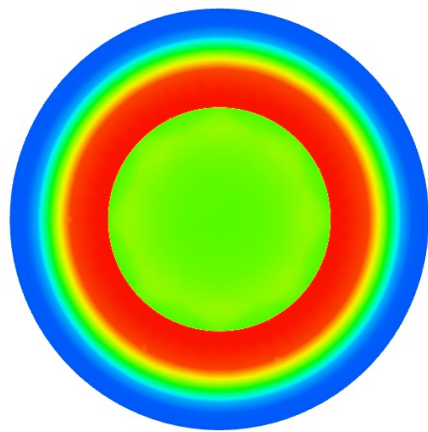
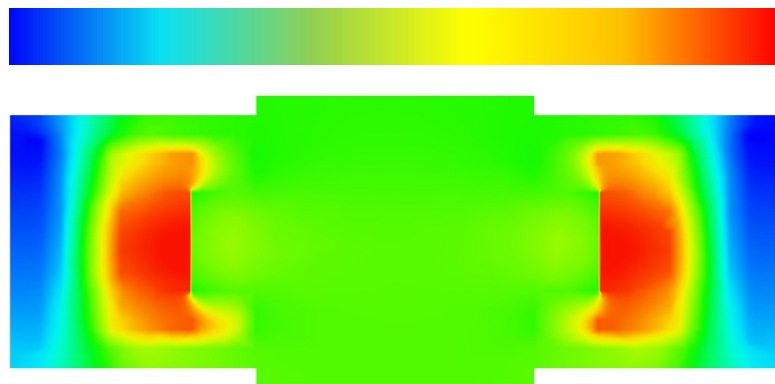
<개선 모델>



# 개선 모델의 열-유동 해석 결과

## 개선 모델의 온도 분포

50.0 °C    59.4 °C    68.8 °C    78.3 °C    87.8 °C    97.2 °C



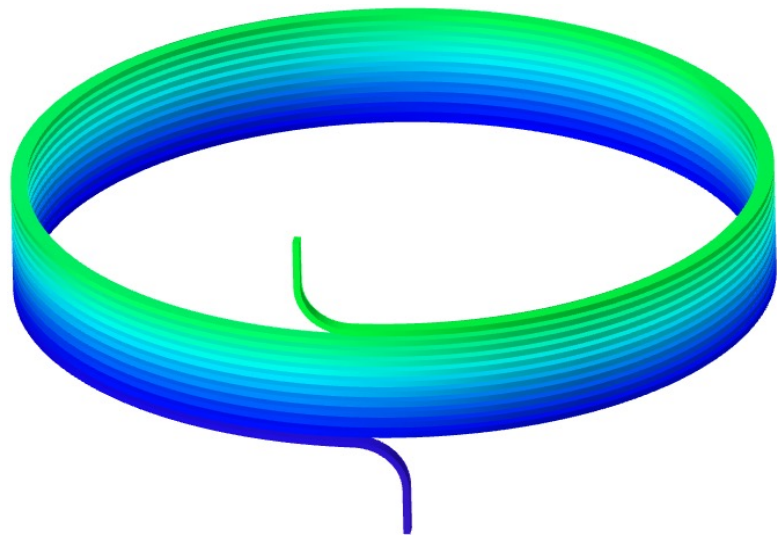
<모터 단면의 온도분포>

- 최고온도: **97.2 °C**
  - 최고온도는 코일의 직선부에서 발생
  - 삽입물질로 인해 엔드와인딩과 냉각수 사이의 열 교환 증가
  - 유로를 추가로 설치함으로써, 냉각수와 열원 사이의 열 교환 증가
- **엔드와인딩의 온도 감소 및 코일의 최고온도 감소**

# 열-유동 해석 결과 분석

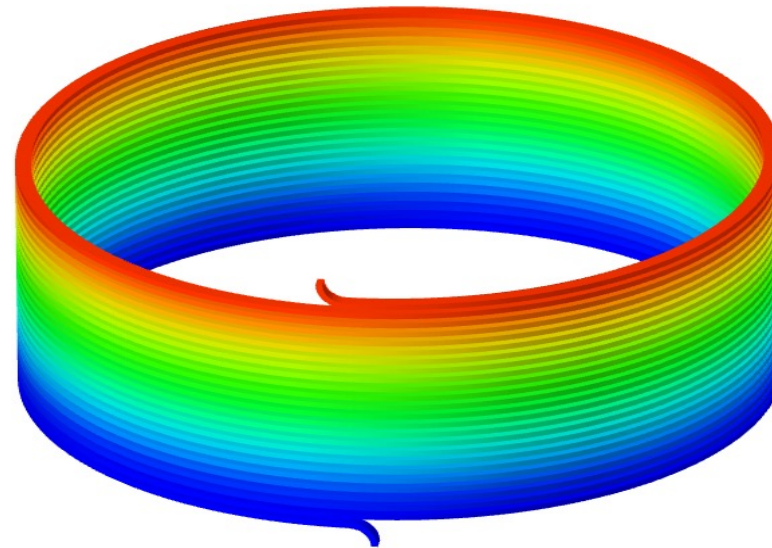
- 초기 모델과 개선 모델의 압력강하 및 펌프 소요동력 비교

※ 초기 모델과 개선 모델의 냉각수 유량(Q)은 7 LPM 으로 동일



<초기 모델의 냉각수 압력 분포>

- 압력강하  $\Delta P = 2.865 \text{ MPa}$
- 펌프 소요동력  $\dot{W} = Q \cdot \Delta P = 334 \text{ W}$



<개선 모델의 냉각수 압력 분포>

- 압력강하  $\Delta P = 5.998 \text{ MPa}$
- 펌프 소요동력  $\dot{W} = Q \cdot \Delta P = 700 \text{ W}$

# 열-유동 해석 결과 분석

- 초기 모델과 개선 모델의 결과 비교

초기 모델과 개선 모델의 결과 비교			
	초기 모델	개선 모델	변화량
코일 최고온도 ( $T_{max}$ )	188 °C	97.2 °C	-90.8 °C
입출구 압력강하 ( $\Delta P$ )	2.865 MPa	5.998 MPa	+3.133 MPa
펌프 소요동력 ( $\dot{W}$ )	334 W	700 W	+366 W

- ✓ 개선 모델은 초기 모델에 비해 코일 최고온도가 **90.8 °C 감소**
- ✓ 하지만 추가적인 유로 설치로 인해, 유로의 감긴 횟수가 증가함으로써 압력강하와 펌프 소요동력이 **2배 이상 증가**



초기 모델의 펌프 소요동력을 초과하지 않으며,  
코일 최고온도를 최소화하는 최적설계 필요

## 연구 목적

초기 모델의 펌프 소요동력( $\dot{W}$ )을 초과하지 않고  
코일 최고온도를 최소화하는 최적화 모델 설계

## 펌프 소요동력을 결정하는 인자

$$\dot{W} = Q \cdot \Delta P$$

$\Delta P$  : 유로의 감긴 횟수( $N$ )와 유량( $Q$ )에 의해 결정  
 $\rightarrow \dot{W} = \text{function of } N \text{ \& } Q$



$\therefore N, Q$ 를 설계변수로 하는 최적화 필요

# CONTENTS

## 01 서론

- 1) 연구 배경
- 2) 연구 목적
- 3) 연구 개요

## 03 코일의 최고온도 계산을 위한 열-유동 해석

- 1) 열-유동 해석 지배방정식
- 2) 초기 모델의 형상 및 물성치
- 3) 초기 모델의 유한요소모델
- 4) 초기 모델의 경계조건
- 5) 초기 모델의 열-유동 해석 결과
- 6) 엔드와인딩 과열 방지를 위한 설계 개선
- 7) 개선 모델의 열-유동 해석 결과
- 8) 열-유동 해석 결과 분석

## 02 모터의 손실 계산을 위한 전자기 해석

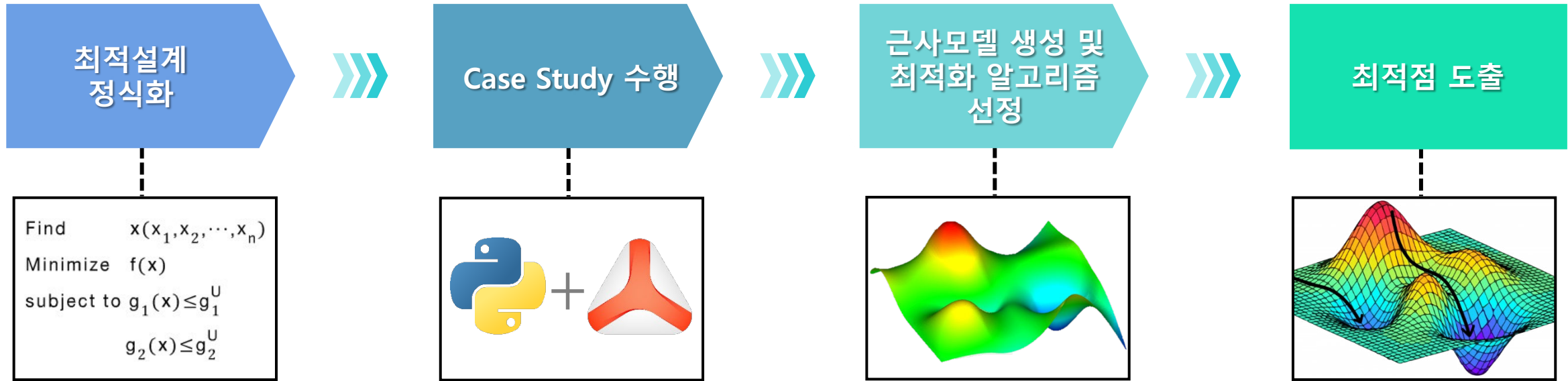
- 1) 전자기 해석 지배방정식
- 2) 전자기 해석 모델
- 3) 전류 인가 조건
- 4) 전자기 해석 결과

## 04 냉각 성능 향상을 위한 유량 및 유로 최적화

- 1) 최적설계 개요
- 2) 최적설계 정식화
- 3) Case Study
- 4) 메타모델 생성
- 5) 최적화 수행
- 6) 최적화 결과 분석

## 05 결론

# 최적설계 개요



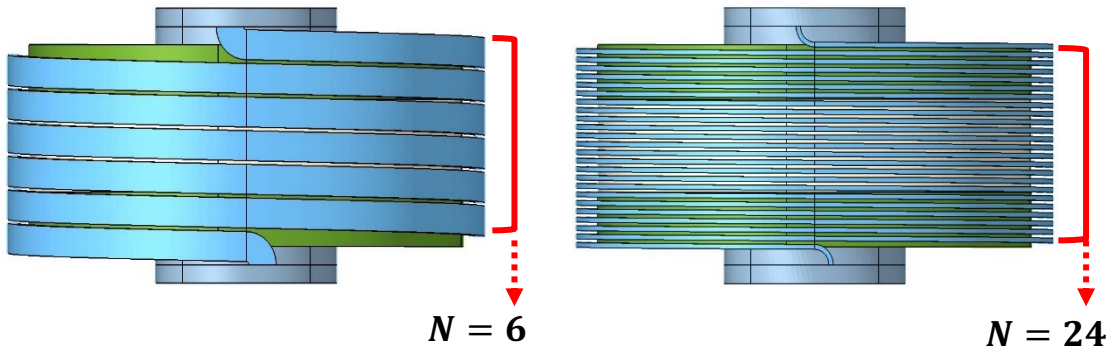
펌프 소요동력 제한조건을 만족하면서  
코일 최고온도를 최소화하는 **최적점 도출**



# 최적설계 정식화

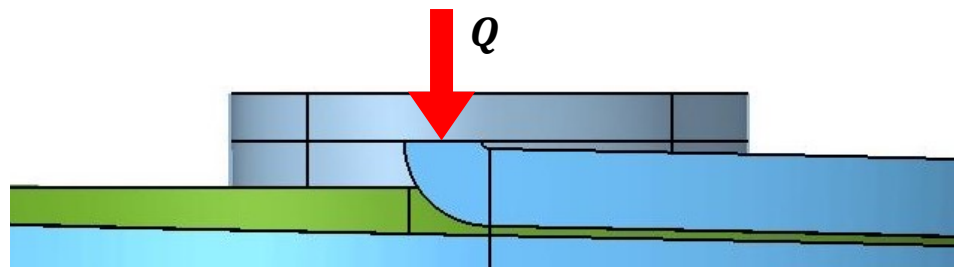
- 설계변수1 :  $N$  (유로의 감긴 횟수)

- 유로 사이의 간격을 유지하며, 형상이 왜곡되지 않는 범위 설정



- 설계변수2 :  $Q$  (입구 유량)

- 논문을 참고하여, 완성차 업체에서 사용하는 실험값인 10 LPM 을 기준으로 범위 설정



목적함수

코일 최고온도의 **최소화**

설계변수

- ①  $N$ : 유로의 감긴 횟수
- ②  $Q$ : 입구 유량

제한조건


$$6 \leq N \leq 24$$

$$3 \leq Q \leq 20 \text{ [LPM]}$$

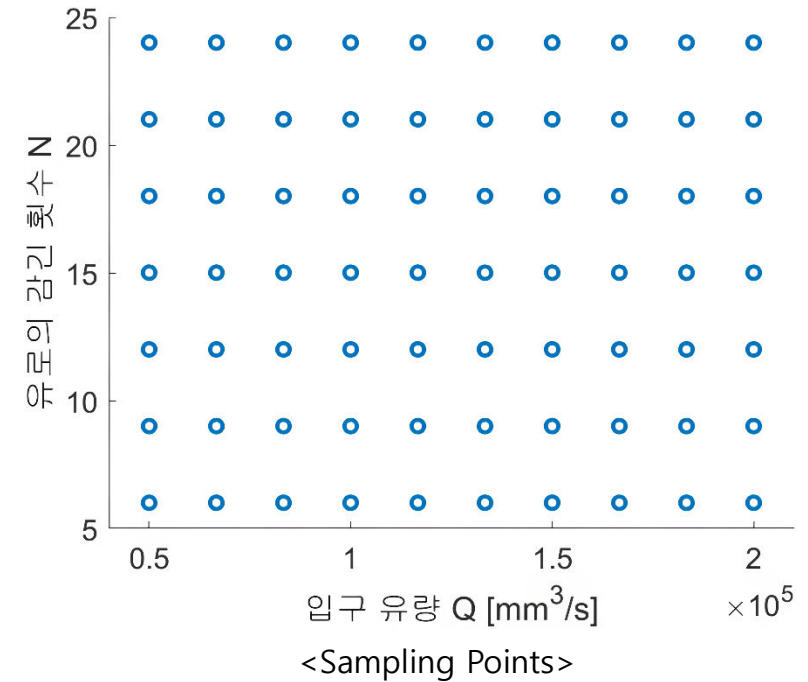
$$\text{펌프 소요동력 } (\dot{W}) \leq \underline{334 \text{ W}}$$

초기 모델의 펌프 소요동력

# Case study

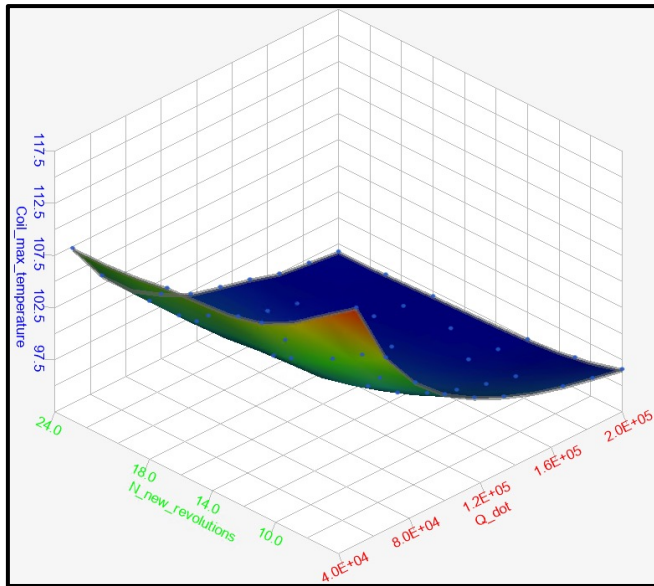
-  HyperStudy를 이용한 case study 수행
- 입력 설계변수( $N, Q$ )와 출력 응답( $T_{max}, \Delta P, \dot{W}$ ) 정의
- 총 70개의 sampling point에 대해 case study 수행

Input variables definition		
	Lower Boundary	Upper Boundary
$N$	6	24
$Q$	3 LPM	12 LPM
Output responses definition		
	Label	Expression
$T_{max}$	코일 최고온도	-
$\Delta P$	압력 강하	-
$\dot{W}$	펌프 소요동력	$Q \times \Delta P$

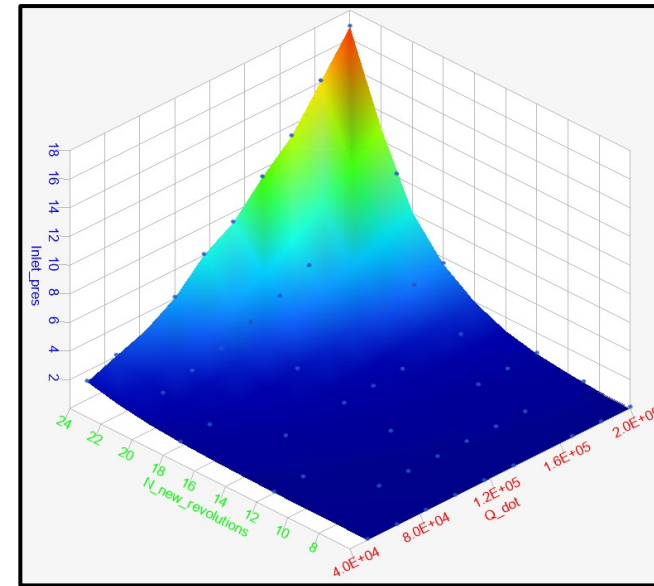


# 메타모델 생성

- 70개의 case study 결과를 이용하여 메타모델을 생성
- 실험적 오차가 없는 전산해석의 특성을 고려하여, 보간법(Interpolation)을 이용한 근사 진행
- 보간법을 이용한 메타모델 생성 방법 중 RBF (Radial Basis Function) method 사용



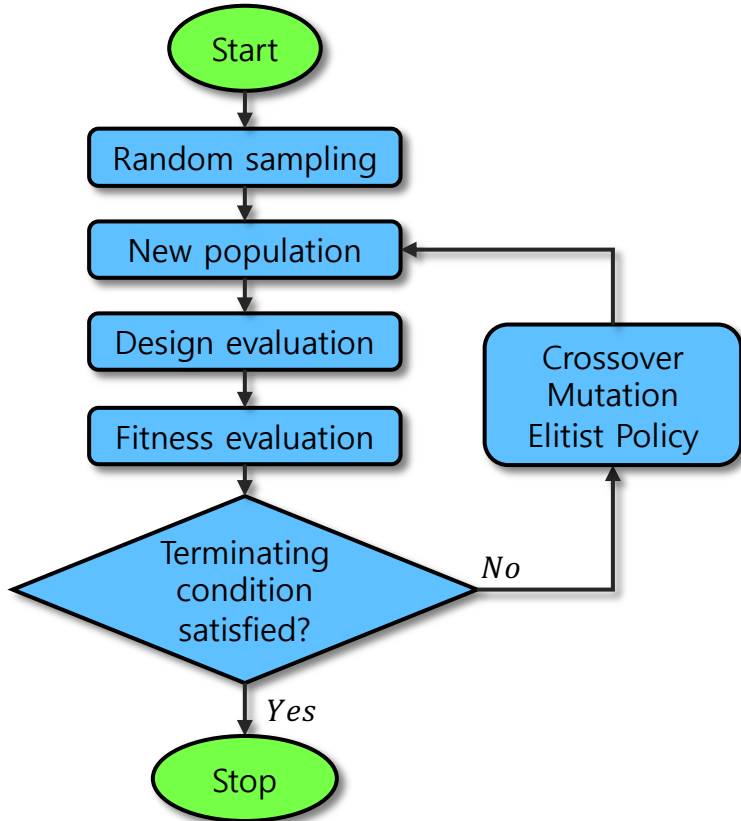
< $T_{max}$ 에 대한 메타모델>



< $\Delta P$ 에 대한 메타모델>

# 최적화 수행

- 이산 문제에 적합하고, 효과적으로 전역 해를 탐색할 수 있는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 이용하여 최적점 탐색



<유전 알고리즘 순서도>

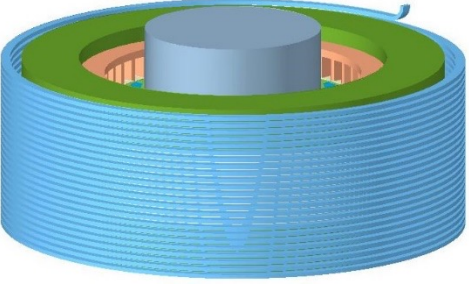
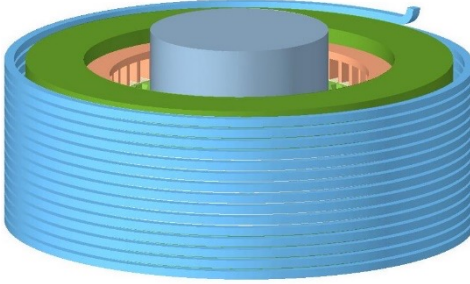
Genetic Algorithm Settings	
Maximum Iterations	100
Minimum Iterations	50
Population Size	540
Global Search	High



최적점	
	Value
$N$	<b>15</b>
$Q$	<b>12.5 LPM</b>

# 최적화 결과 분석

## 입력 설계변수와 출력 응답 변화

입력 설계변수 변화		
	최적화 이전 모델	최적화 이후 모델
형상		
$N$	24	<b>15</b>
$Q$	7 LPM	<b>12.5 LPM</b>

출력 응답 변화			
	$T_{max}$	$\Delta P$	$\dot{W}$
최적화 이전 모델	97.20 °C	5.998 MPa	700 W
최적화 이후 모델	<b>94.47 °C</b>	<b>1.602 MPa</b>	<b>334 W</b>
변화율	-2.819 %	-73.29 %	-52.29 %

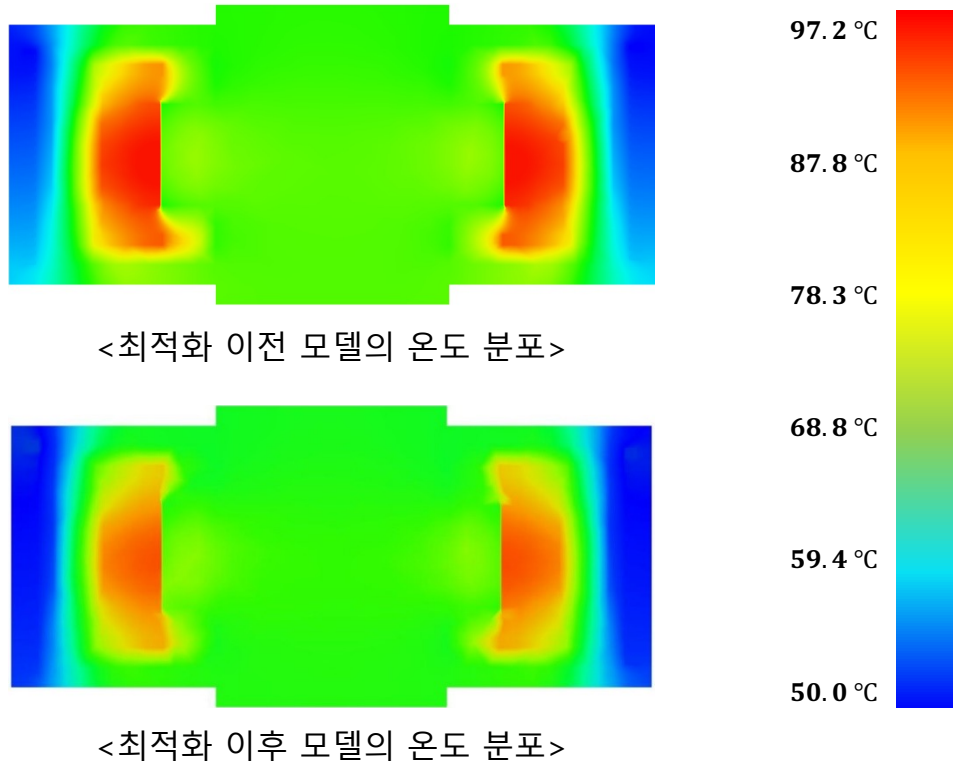
## 최적화 결과의 정확성 검토

메타모델 예측값과 해석 결과값 간의 오차율			
	$T_{max}$	$\Delta P$	$\dot{W}$
메타모델 예측값	94.47 °C	1.602 MPa	334 W
실제 해석 결과값	94.35 °C	1.579 MPa	329.2 W
오차율	0.13 %	1.46 %	1.46 %

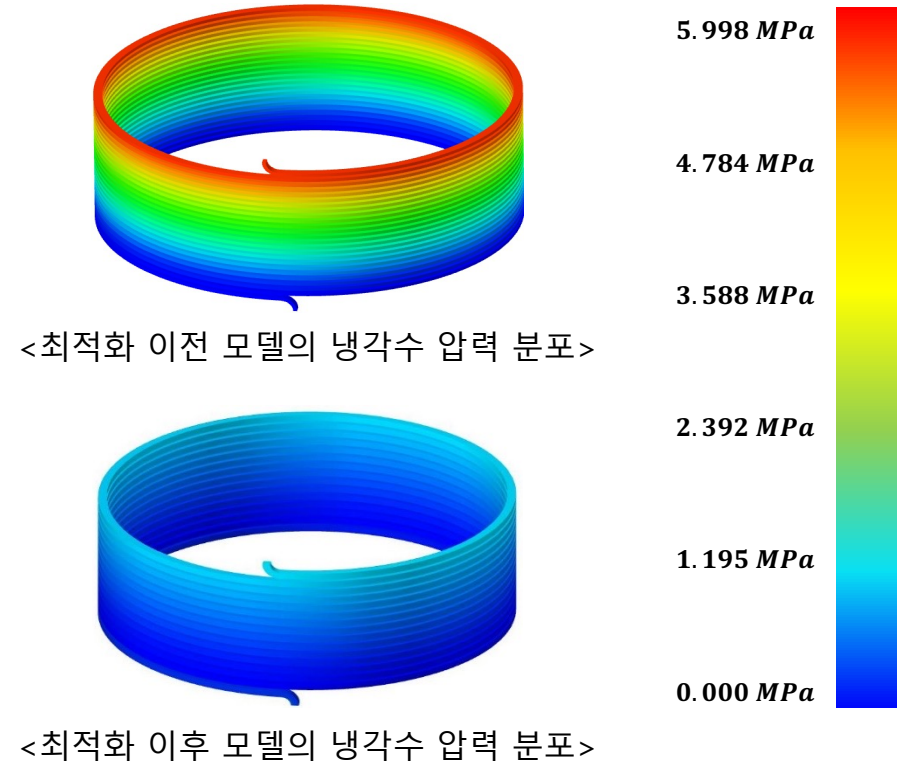
- 최적화 결과의 정확성 검토를 위해, 최적점에서 실제 해석을 진행
- 최적점에서의 메타모델 예측값과 실제 해석 결과값 간의 **오차율이 적음**을 확인
- 최적화 모델이 초기 모델의 펌프 소요동력을 초과하지 않으며, 코일 최고온도를 낮추는 **최적화 목적 달성**

# 최적화 결과 분석

- 최적화 이전 모델과 이후 모델의 온도 비교



- 최적화 이전 모델과 이후 모델의 압력 강하 비교



최적화 결과 코일 최고온도 **2.85 °C 감소**, 압력 강하 **4.419 MPa 감소**



# CONTENTS

## 01 서론

- 1) 연구 배경
- 2) 연구 목적
- 3) 연구 개요

## 03 코일의 최고온도 계산을 위한 열-유동 해석

- 1) 열-유동 해석 지배방정식
- 2) 초기 모델의 형상 및 물성치
- 3) 초기 모델의 유한요소모델
- 4) 초기 모델의 경계조건
- 5) 초기 모델의 열-유동 해석 결과
- 6) 엔드와인딩 과열 방지를 위한 설계 개선
- 7) 개선 모델의 열-유동 해석 결과
- 8) 열-유동 해석 결과 분석

## 02 모터의 손실 계산을 위한 전자기 해석

- 1) 전자기 해석 지배방정식
- 2) 전자기 해석 모델
- 3) 전류 인가 조건
- 4) 전자기 해석 결과

## 04 냉각 성능 향상을 위한 유량 및 유로 최적화

- 1) 최적설계 개요
- 2) 최적설계 정식화
- 3) Case Study
- 4) 메타모델 생성
- 5) 최적화 수행
- 6) 최적화 결과 분석

## 05 결론

# 결론

- ✓ 구동 모터에 대한 전자기해석을 진행하여 모터의 주요 손실인 동손, 철손 계산
- ✓ 손실을 열원으로 반영한 열-유동해석 결과를 통해, 초기 모델의 코일 최고온도가 절연 허용온도를 초과하는 문제점 확인
- ✓ 엔드와인딩을 감싸는 삽입 물질을 추가하고 추가적인 유로를 설치한 개선 모델 도출
- ✓ 초기 모델과 개선 모델의 결과 비교를 통해, 유로의 감긴 횟수( $N$ )와 냉각수의 유량( $Q$ )을 설계변수로 선정
- ✓ Case study 수행, 메타모델 생성 및 유전 알고리즘을 통한 최적화 진행
- ✓  $N$ 과  $Q$ 의 최적화를 통해, 초기모델의 펌프 소요동력을 초과하지 않으며 코일 최고온도를 최소화하는 최종 모델 도출
- ✓ 실제 해석 값과의 비교를 통해 최적화 결과의 정확성 확인

# Thank You

👤 Jaekyung Go

✉ k990910@konkuk.ac.kr

👤 Youngwoo Jang

✉ jangyw@konkuk.ac.kr