차량용 구동모터 워터 자켓 방열 특성 최적화

팀명 **모터 해열제**

건국대학교 기계공학부 **성명기, 문재민**

지도 교수 **김창완 교수**

2020. 08. 28

ALTAIR

KU KONKUK UNIVERSITY

목차

1. 서론	2. 전자기 해석	3. 열유동 해석	4. 워터 자켓 방열 특성 최적화	5. 결 론
연구 배경	전자기 해석 개요	열유동 해석 개요	최적 설계 개요	결 론
연구 개요	해석 모델	해석 모델	Morphing	
해석 절차	구동 조건	경계 조건	최적설계 정식화	
	전자기 해석 결과	열유동 해석 결과	채널 직경 최적화	
			결과 분석	

1. 서 론

I. 연구 배경

II. 연구 개요

III. 해석 절차

연구 배경

※출처 : 정부 2019년 2월 기준 친환경차 보급 로드맵

- 전기차 시장 규모가 확대
- 차량용 전기 구동 시스템인 **모터 수요 증가**
- 차량용 모터의 고출력화, 고효율화 지속적 요구

연구 개요

➢ 문제점

- 모터의 출력이 높아질 수록 **많은 열**이 발생
- 모터 내부에서 발생한 열로 인한 **절연 등급 허용 온도 초과** 등 여러 문제 발생
- **절연등급** : 모터에 적용된 절연물의 최고 사용 허용 온도를 기준으로 구분한 것

절연등급	최고허용온도
Y종	90℃
A종	105℃
E종	120℃
B종	130℃
F종	155℃
H종	180℃

※일반적인 모터 B등급, 130 ℃

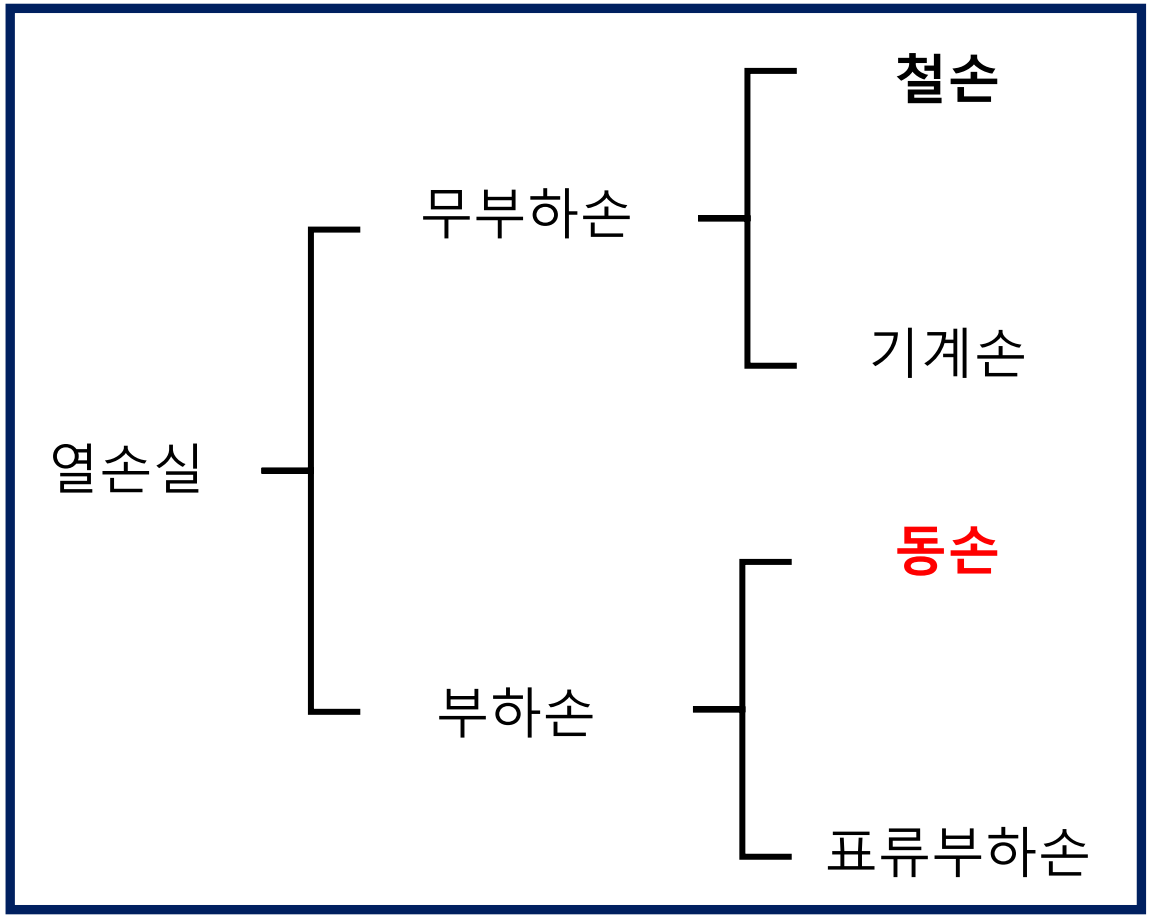
- 모터 코일의 온도가 10℃ 높아짐에 따라 코일의 절연체의 수명은 절반으로 감소함

➡ **코일의 온도 최소화 필요**

연구 개요

➢ 문제점

- 모터에 다양한 열손실이 존재



- 다양한 열원 중 대표적인 열손실은 **동손 (Joule Loss), 철손(Iron Loss)이 있다.**
- 기계손과 표류부하손은 무시가능

- 동손 : 권선 저항에 의해서 생기는 손실 (I^2R)
- 철손 : 히스테리시스손 + 와류손

연구 개요

➢ 설계 목표

- 모터 **코일의 온도를 최소화**하기 위해 냉각 설계 필요
- 전자기 해석을 통해 열원 (**동손**, 철손) 계산
- 열유동 해석을 통해 모터의 코일 온도 산출
- 워터 자켓 **채널 직경 최적화**

해석 절차

Flux

모터 형상 모델링

↓

모터 구동 조건 입력

↓

전자기 해석

↓

Joule loss 산출

Acusolve

모터 형상 모델링

↓

경계 조건 입력

↓

열유동 해석

↓

Winding 온도 산출

HyperStudy

최적설계 정식화

↓

채널 직경 최적화

↓

결과 분석

2. 모터 전자기 해석

I. 전자기 해석 개요
II. 해석 모델
III. 구동 조건
IV. 전자기 해석 결과

전자기 해석 개요

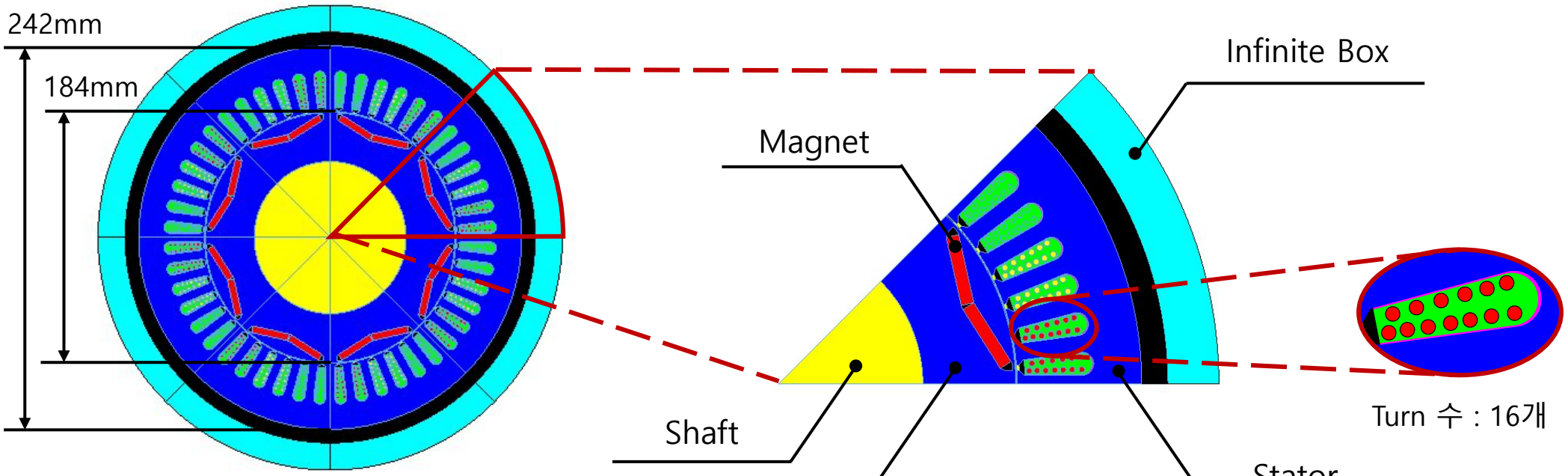
➢ 해석 절차

모터 모델링 → 구동 조건 → 전자기 해석 → Joule loss 산출

전자기 해석 목적	1. 모터 성능에 악영향을 미치는 열손실 (동손, 철손) 산출 2. 산출한 열손실을 열유동 해석 시 열원으로 반영
모터 모델링	1. Toyota Prius hybrid 전기차의 구동 모터 제원 참고 2. 해석시간 단축을 위해 2D 모델 적용 3. 해석시간 단축을 위해 Symmetry 조건 (1/8모델) 적용
해석 결과	코일의 동손 산출

해석 모델

- Toyota Prius 에 사용하는 영구자석 매입형 동기전동기(IPMSM)에 대하여 해석 수행
- 해석 시간 단축을 위해 Period Symmetry 조건을 사용하여 **2D, 1/8 모델** 해석



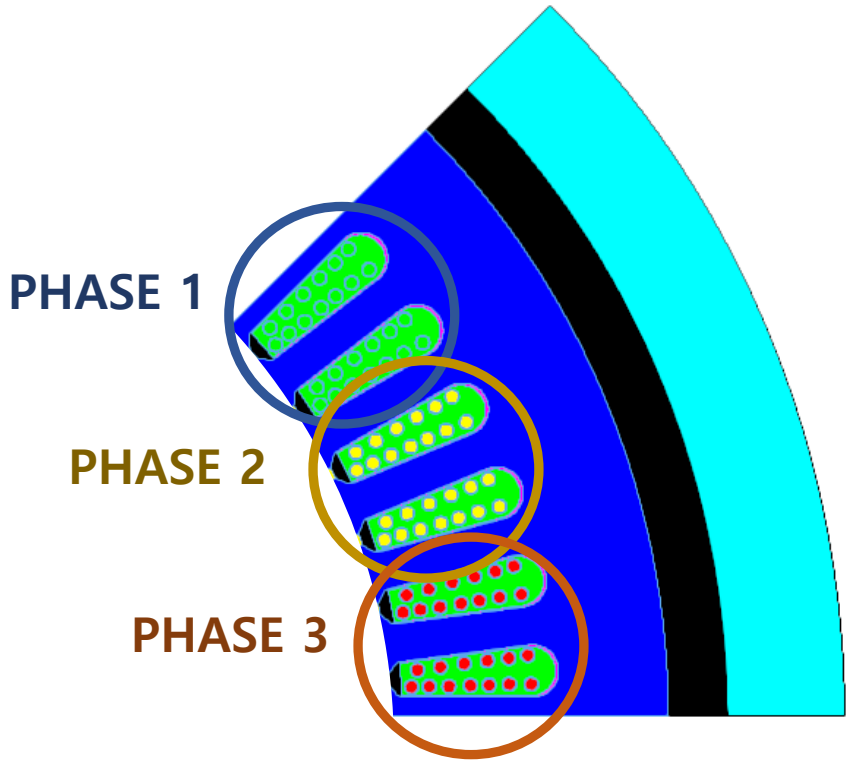
➢ **48 Slot / 8 극**

해석 모델

➢ 모터 주요 물성치

- 권선 분포 : 분포권
- 고정자계 : 3상 교류
- 영구 자석 : NdFeB
- Rotor, Stator : M270_35A
- 모터 사양

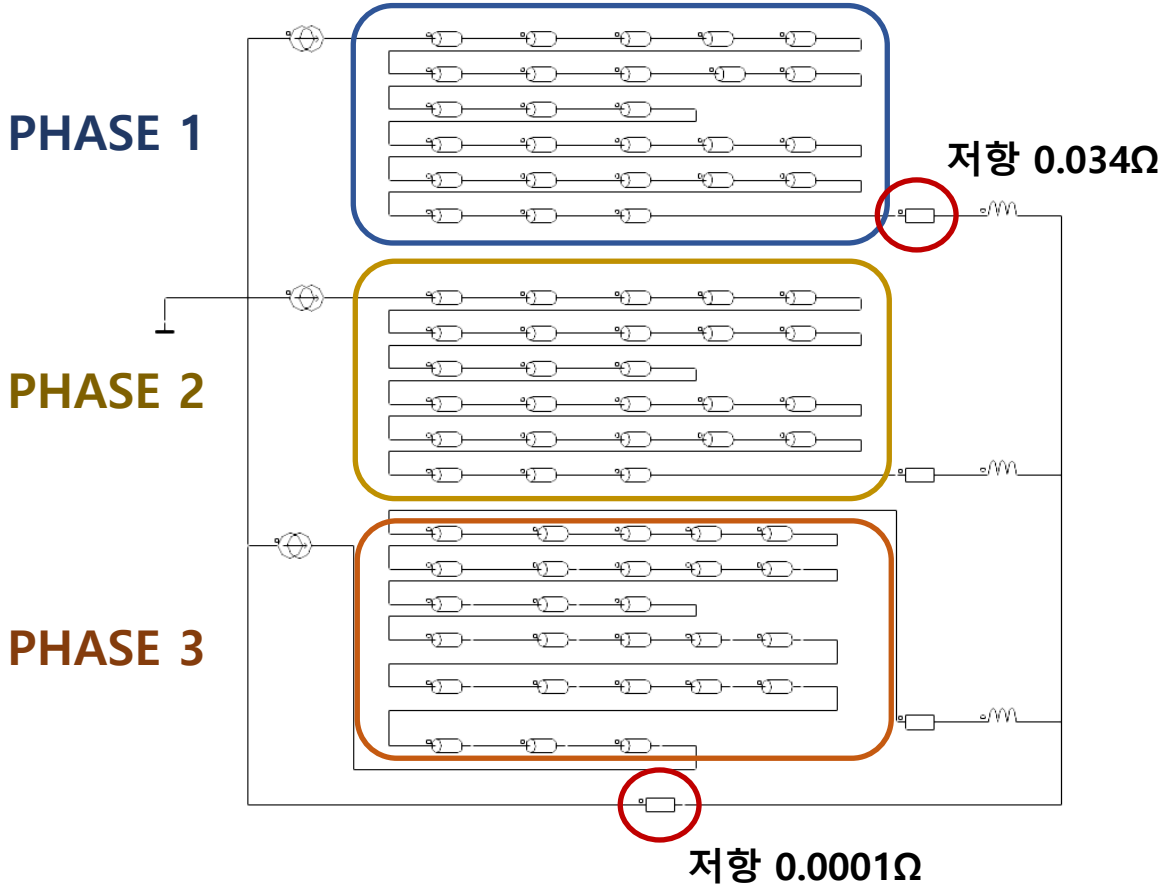
최대 전압	500V
피크 토크	400N·m
최대 속도	6000rpm
피크 일률	50kW at 1200-1500rpm



구동 조건

➢ 3상 회로 구성

- 각 Phase당 Turn 수 만큼 Solid Conductor ( ) 구성



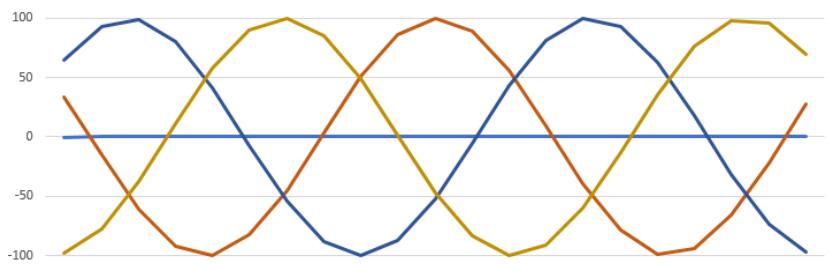
- 전류 인가 조건

  - 최대전류 I_m = 100A

  Phase1 : $I_m \sin(wt + \gamma)$

  Phase2 : $I_m \sin(wt + \gamma - \frac{2\pi}{3})$

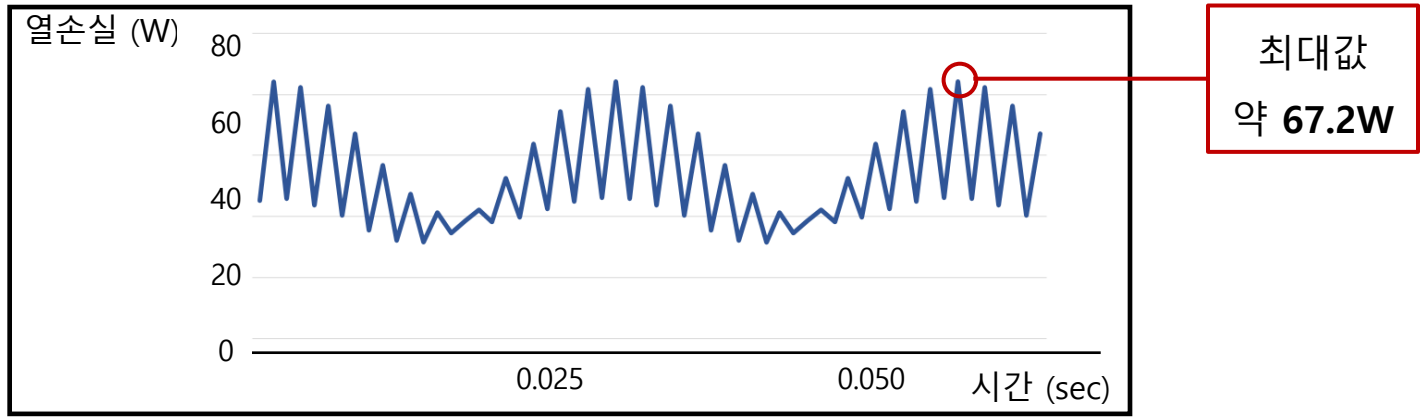
  Phase3 : $I_m \sin(wt + \gamma - \frac{4\pi}{3})$



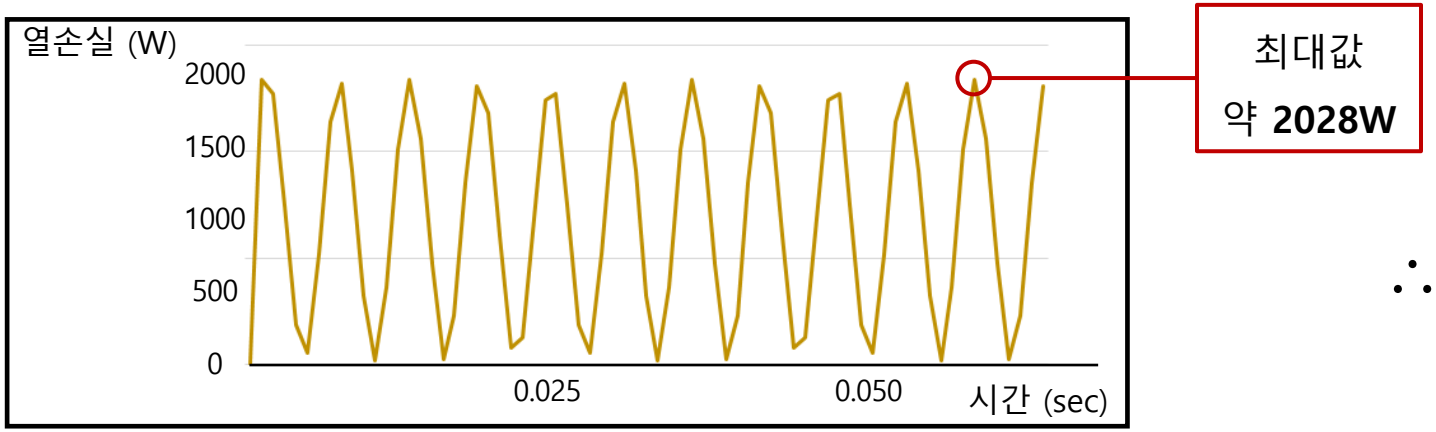
전자기 해석 결과

➢ 열손실 분석

1. **철손** (Iron Loss)



2. **동손** (Joule Loss)



- 동손에 비해 철손이 매우 작음

  ➡ **철손 무시**

- 안전성을 위해 손실을 보수적으로 고려

  ➡ **동손의 최대값**을 **열원**으로 적용

∴ 열원 : 코일에 2028W로 적용

3. 열유동 해석

I. 열유동 해석 개요
II. 해석 모델
III. 경계 조건
IV. 열유동 해석 결과

열유동 해석 개요

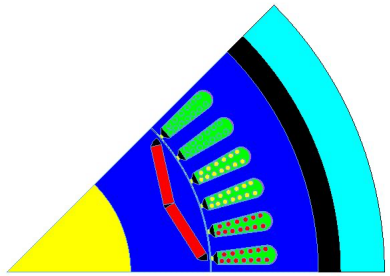
➢ 해석 절차

모터 모델링 → 경계 조건 → 열유동 해석 → 온도 산출

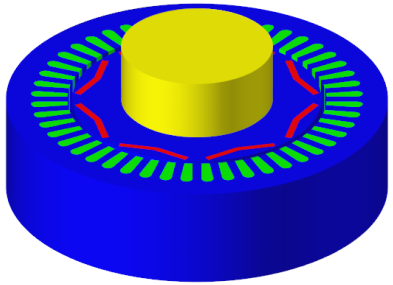
열유동 해석 목적	1. ‘절연등급 허용온도’ 만족여부 확인 위한 코일 온도 산출 2. 최적화에 필요한 변수 (압력 강하, 직경, 온도) 결정
열유동 해석	1. 3D모터 구성 2. 하우징 및 워터자켓 결정 3. 경계조건 결정
해석 결과	최적화를 위한 코일온도 산출

해석 모델

➢ 전자기 해석에 사용한 2D, 1/8 모델을 **3D로 재모델링**



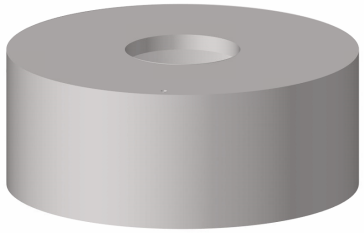
△ 2D, 1/8 모델



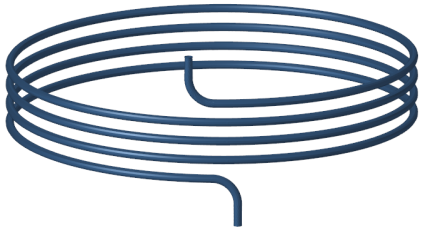
△ 3D 모델 (높이 75mm)

- 실제 모터 형상에 따라 축을 길게 모델링
- Slot 내부 코일을 단순화

➢ 워터 자켓 및 하우징 모델링



△ 하우징



△ 하우징 내부 워터 자켓

- 논문을 참조하여 냉각 방식을 **수냉식** 선정

※ 출처 : 국내 차량용 구동 모터의 방열 및 냉각 기술 동향, 이기수 외 1명, 오토저널

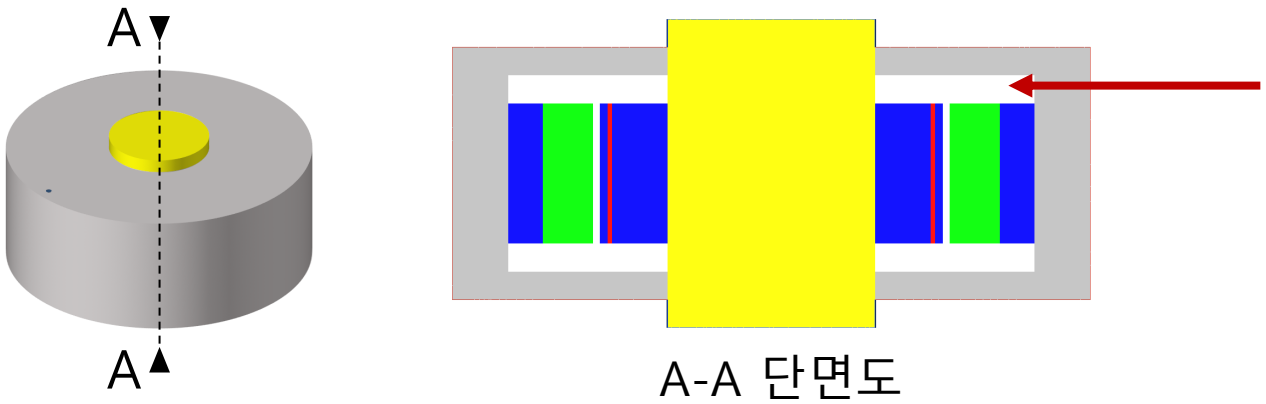
- **유동저항**이 가장 적은 워터 자켓 선정

➡ **Helical structure** 워터 자켓

※ 출처 : Simulative Analysis of Traction Motor Cooling System Based on CFD, YE Zhen-nan, LUOWei-dong, ICEICE

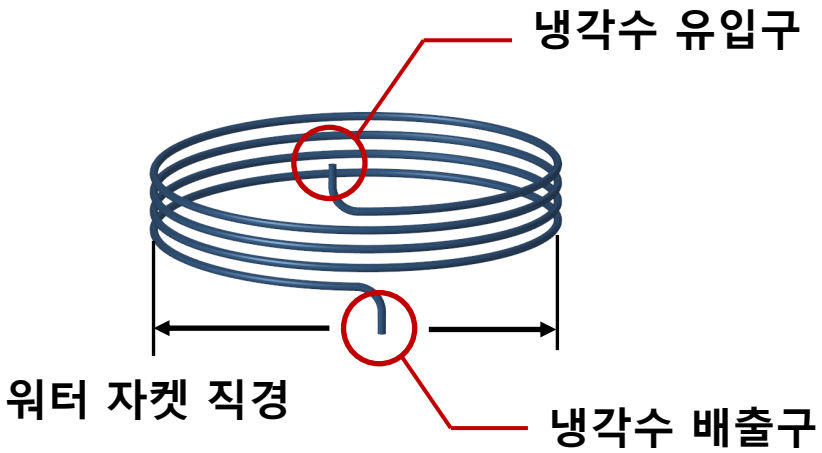
해석 모델

➢ 하우징이 장착된 모터



- 실제 모터를 참조
- 공기 반영 (흰색 부)
  - Rotor 와 Stator 사이
  - 하우징 내부 빈 공간

➢ 워터 자켓

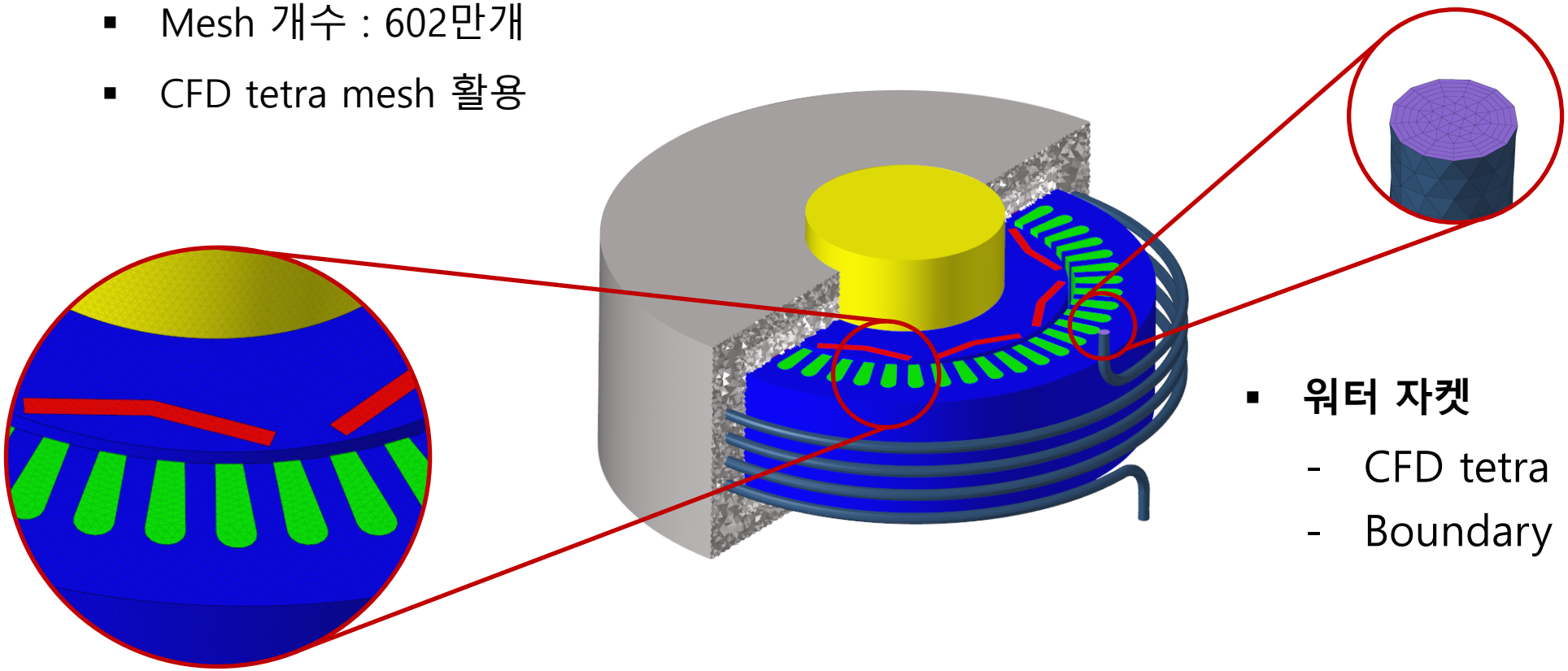


- 워터 자켓 채널 직경은 논문을 참조하여 6mm로 모델링
- 워터 자켓은 하우징의 중앙에 위치하도록 모델링

해석 모델

➢ **Mesh**

- Mesh 개수 : 602만개
- CFD tetra mesh 활용



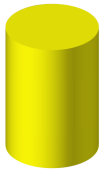
- **워터 자켓**
  - CFD tetra mesh
  - Boundary layer : 4층

해석 모델

➢ 모터 주요 물성치

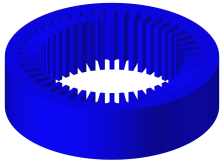
※ 단위 : 밀도 [kg/m3], 비열 [J/kg K], 열 전도율 [W/m K]

- Shaft



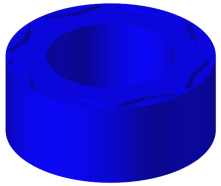
- 재료 : SAE_1045
- 밀도 : 7870
- 비열 : 486
- 열전도율 : 50.9

- Stator



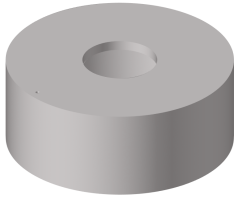
- 재료 : M270_35A
- 밀도 : 7680
- 비열 : 460
- 열전도율 : 25

- Rotor



- 재료 : M270_35A
- 밀도 : 7680
- 비열 : 460
- 열전도율 : 25

- Housing

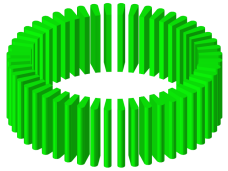


- 재료 : Cast Iron
- 밀도 : 7300
- 비열 : 461
- 열전도율 : 45

- Magnet

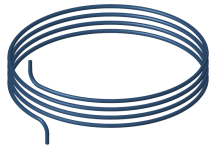
- 재료 : NdFeB
- 밀도 : 7600
- 비열 : 502
- 열전도율 : 8.96

- Coil



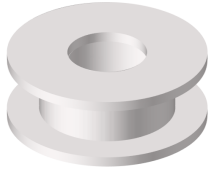
- 재료 : Copper
- 밀도 : 8940
- 비열 : 401
- 열전도율 : 385

- Water



- 재료 : Water
- 밀도 : 988
- 비열 : 4183
- 열전도율 : 0.598

- Air



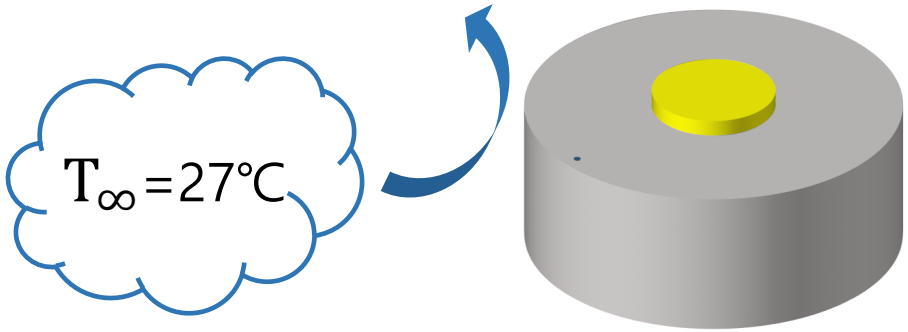
- 재료 : Air
- 밀도 : 1.225
- 비열 : 1005
- 열전도율 : 0.02521

경계 조건

➢ 온도 조건

- 외부 온도 : 27℃
- 대류 계수 : 15 W/m^2K (자연 대류 조건)
- 모터 초기 온도 : 60℃

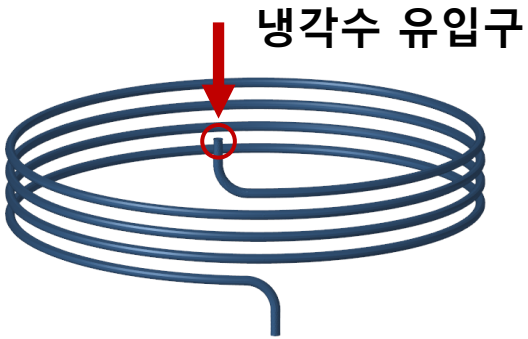
※ 출처 : AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK의 냉각수 참조



➢ 워터 자켓 경계 조건

- 냉각수 유량 : 3L/min
- 냉각수 온도 : 50 ℃

※ 출처 : Simulative Analysis of Traction Motor Cooling System Based on CFD,
YE Zhen-nan, LUOWei-dong, ICEICE



경계 조건

➢ Solving method 선택

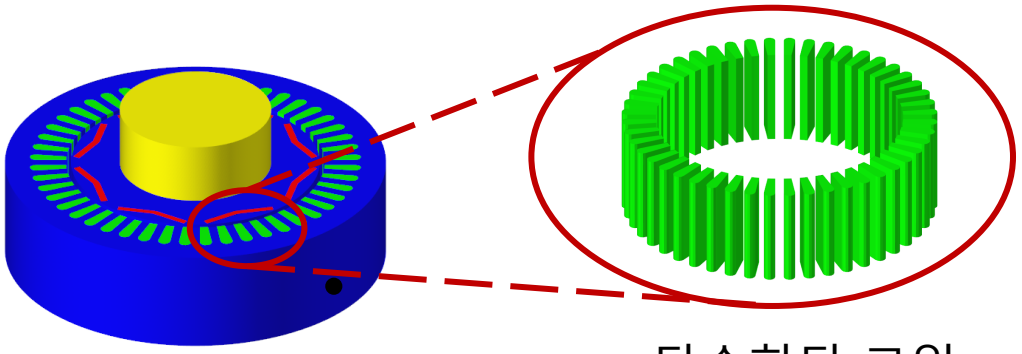
- 레이놀즈 수 Re : $\frac{\text{관의직경}\times\text{유속}}{\text{동점성계수}} = \frac{6\times10^{-3}\times0.377}{0.556\times10^{-6}} = 4063$

➡ **난류 Solving method** 사용 (Spalart Allmaras)

➢ 열원

- 코일 부피를 고려하여 모델 단순화
- 코일 2028W, 코일의 부피 695,000 mm^3

➡ 단위 부피당 열원 : 2,918,315.3 W/m^3



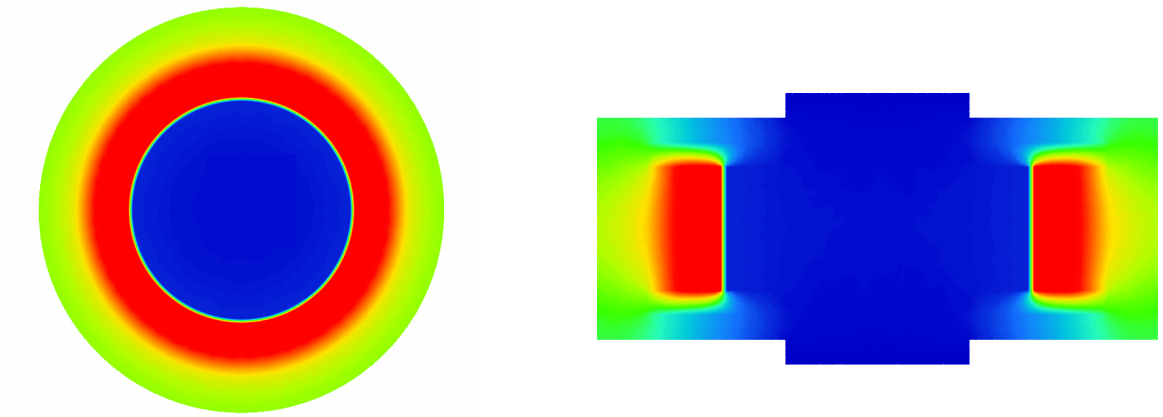
△ 단순화된 코일

열유동 해석 결과

1. 워터 자켓이 없는 모델

➢ **해석 결과**

- 코일 최고 온도 : **507.2 ℃**



△ 모터의 최고 온도는 코일에서 발생

➢ **해석 결과 분석**

- 실제 모터와 달리 하우징 내부가 밀폐되어 있음
- 열방출이 자연 대류로만 일어나므로 온도가 높음
- 코일온도가 절연 등급 허용 온도를 초과

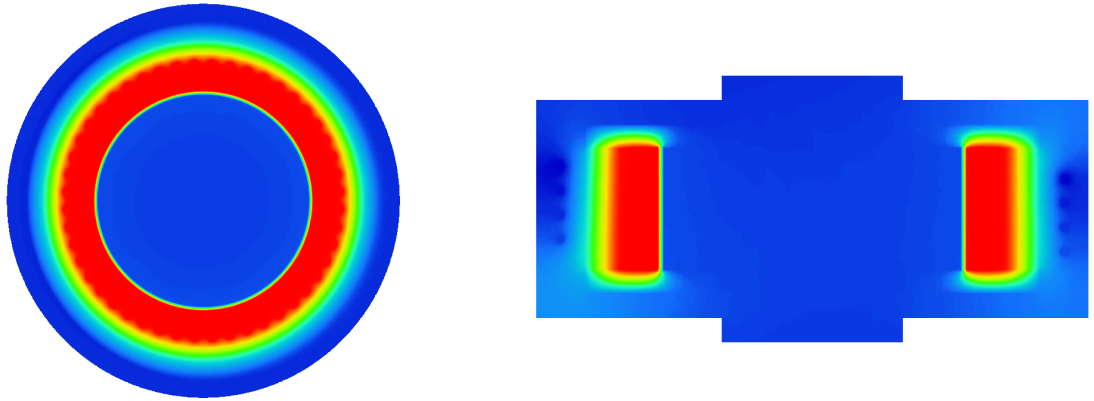
➡ **모터 냉각 필요**

열유동 해석 결과

2. 워터 자켓이 있는 초기 모델

➢ **해석 결과**

- 코일 최고 온도 : **90.2 ℃**



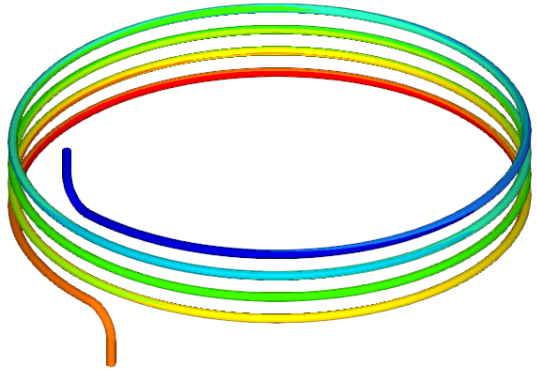
△ 모터의 최고 온도는 코일에서 발생

- 냉각수 온도 변화

- 유입부의 온도 : **50.0 ℃**
- 배출부의 온도 : **55.6 ℃**

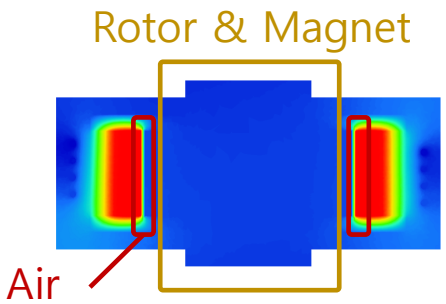
➡ 온도 변화 : **5.6 ℃**

- 압력 강하 : **168,324 Pa (1.68기압)**



△ 냉각수 온도 변화

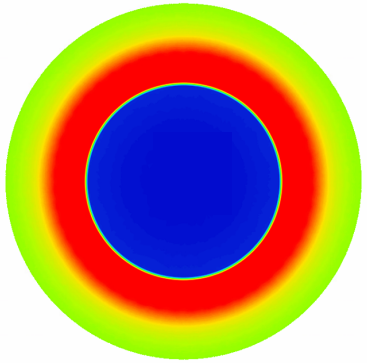
열유동 해석 결과



➢ 해석 결과 분석

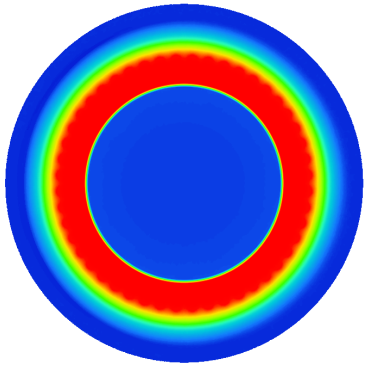
- **최고온도**가 열원인 **코일**에서 나타남
- Rotor와 Stator사이의 **공기가 단열재 역할**을 하여 Rotor, Magnet의 온도 상승을 차단
- **수냉식 워터 자켓**을 통한 **모터 냉각** 확인

워터 자켓이 없는 모델



코일 최고 온도 : **507.2 ℃**

워터 자켓이 있는 초기 모델



코일 최고 온도 : **90.2 ℃**

417 ℃ 감소 !

열유동 해석 결과

➢ 해석 결과 분석

- 밀폐된 시스템에서 폭염, 엔진의 열 등과 같은 **극한 상황**에도 문제가 없어야 함
- 해석한 모터의 모델은 외기 온도를 27 ℃로 설정
- 절연 물질의 온도가 10 ℃ 상승 당 코일 수명이 절반씩 감소

➡ **코일온도**를 줄여야 함!

- 압력차가 작을 수록 냉각수 펌프의 소모동력이 작아짐 ➡ **냉각수 입출구의 압력차**를 줄여야 함!

최적화 필요!!!

4. 워터자켓 방열 특성 최적화

I. 최적 설계 개요
II. Morphing
III. 최적설계 정식화
IV. 채널 직경 최적화
V. 결과 분석

최적 설계 개요

➢ 최적 설계 절차

최적 설계 정식화 → 채널 직경 최적화 → 결과 분석

최적 설계 목적	코일 온도 최소화를 위한 채널 직경 최적화
최적 설계 과정	1. 채널 직경 변화를 위한 Morphing 2. 유속이 증가함에 따라 증가하는 압력 강하 (유동 저항) 제한

최적 설계 개요

➢ 설계 목표

- 모터 코일의 온도를 최소화하기 위해 냉각 설계 필요
- Reference 논문의 설계 변수 : 채널 직경, 채널 높이, 채널 공통부 길이
- 그 중 모터의 냉각 성능에 가장 영향을 미치는 인자인 **워터 자켓 채널 직경**을 설계 변수로 선정

<channel 직경>

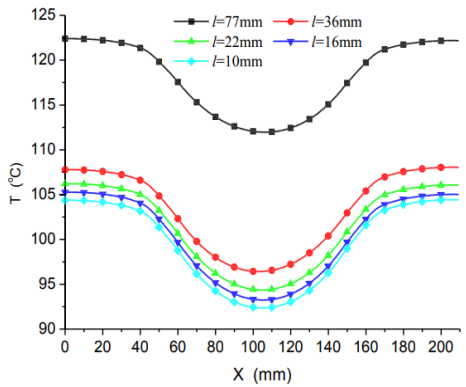


Fig.2 Temperature distribution of axial cross - section of motor end windings and effective windings with different channel widths

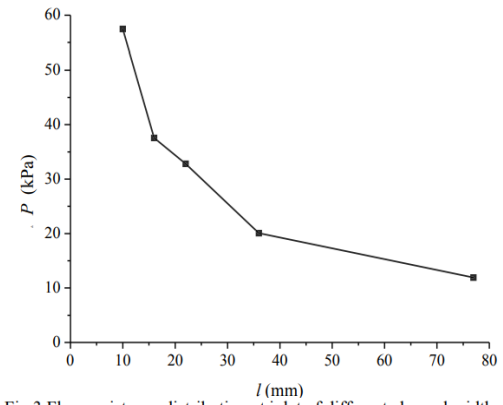


Fig.3 Flow resistance distribution at inlet of different channel width.

채널 직경의 변화에 따라
온도와 **압력 강하**가 크게 변함

※ 출처 : Optimal Design of Cooling System for Water Cooling Motor Used for mini Electric Vehicle, Li Cuiping 외 4명, ICEMS

Morphing

- 목적 : 워터 자켓 채널 직경을 설계 변수로 설정

△ 기존 워터 자켓

- Negative jacobian이 발생하지 않도록 **큰 범위의 Morphing 지양**
- 워터 자켓 채널 지름 **5mm ~ 7mm**로 설정

최적 설계 정식화

➢ 최적 설계 정식화

목적함수	**코일온도 최소화**
설계변수	5mm < **채널 직경** < 7mm
제한조건	**압력 강하** < 3기압

※ 유량 일정

- 참조 논문의 모델과 연구 대상 모델의 Scale이 유사
- 논문을 참조하여 제한조건과 설계변수의 범위 설정

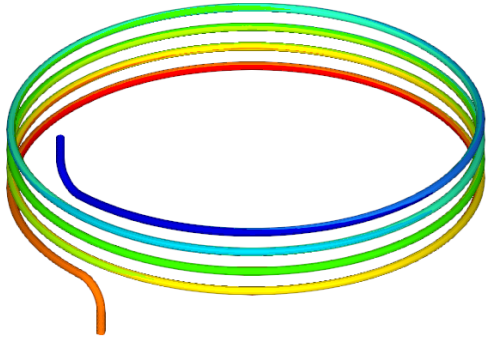
※ 출처 : Optimizing water cooling systems of high speed BLDC motors using a design of experiment method ,송길재 외 2명, 한국 자동차공학회

채널 직경 최적화

➢ **최적화 결과**

- 최적화된 모델
  - 채널 직경 : 약 **6.5mm**
  - 유속 : **1.5 m/s** (유량 일정)
  - 코일 온도 : **89.0 ℃**
  - 압력 강하 : **157,783 Pa (1.57기압)**

△ 최고 온도는 코일에서 검출



△ 냉각수 온도 변화

결과 분석

➢ 최적화 결과 비교

	기존 워터 자켓 모델	최적화된 워터 자켓 모델	변화량
워터 자켓 채널 직경	6mm	6.5mm	**0.5 mm**
유속 ※ 유량 일정	1.76 m/s	1.5 m/s	**- 0.26 m/s**
코일 최고 온도	90.2 ℃	89.0 ℃	**-1.2 ℃**
입출구 압력차	168,324 Pa	157,783 Pa	**- 10,541 Pa (0.1기압)**

결과 분석

- 기존 워터 자켓 모델에 비해 **코일 최고 온도 감소**

- 직경 증가로 단면적 증가 ➔ 열교환 면적 증가 ➔ 코일 최고 온도 감소

- 기존 워터 자켓 모델에 비해 **압력 강하(유동저항) 감소**

- 유량 일정 ➔ 단면적 증가, 유속 감소 ➔ 압력 강하(유동저항) 감소

가정

1. 정상상태
2. 비압축성 유동
3. 높이 차이 무시할 만큼 작음

Navier Stockes Equation

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t} + (u\cdot\nabla)u = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g + \mu\nabla^2 u \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \mu\nabla^2 u$$

➔ 압력 강하와 유속은 양의 상관관계를 가짐

5. 결 론

결 론

- Toyota Prius Hybrid 에 사용하는 영구자석 매입형 동기 전동기 모델링
  - 해석시간 단축 위해 2D Symmetry 조건 사용
- 전자기 해석을 통해 열손실 중 주요 열원 비교 (**철손**, **동손**)
- 열손실 중 가장 지배적인 열원인 **동손** 산출
- 동손을 모터 코일에 열원으로 반영하여 모터 **코일 최고 온도 검출**
- 워터 자켓의 모터 **냉각 효과 검증**
- 워터 자켓 직경을 최적화하여 모터 **코일 최고 온도** 및 **압력 강하 저감**

Q & A