



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2012 年 2 月  
工學碩士學位論文

EV 高效率 BLDC 모터 코어  
成形解析에 관한 研究

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

崔 誌 炫

# EV 高效率 BLDC 모터 코어 成形解析에 관한 研究

A Study on the Moulding Analysis of High  
Efficiency BLDC Motor Core to EV

2012 年 2 月 24 日

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

崔 誌 炫

# EV 高效率 BLDC 모터 코어 成形解析에 관한 研究

指導教授 車 龍 勳

이 論文을 工學碩士學位 申請論文으로 提出함.

2011 年 10 月

朝鮮大學校 大學院

機械工學科

崔 誌 炫

崔誌炫의 工學碩士學位論文을 認准함

委員長            朝鮮大學校 教授        朴 昌 宣        印

委 員            朝鮮大學校 教授        成 百 燮        印

委 員            朝鮮大學校 教授        車 龍 勳        印

2011 年    11 月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

List of figures .....	III
List of tables .....	V
Abstract .....	VI

## 제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 연구방법 .....	3

## 제 2 장 이 론

2.1 BLDC 모터의 동작원리 및 구조 .....	4
2.2 영구자석의 종류 및 특징 .....	6
2.3 희토류 영구자석의 분말야금 제조 과정 .....	9
2.4 열전달 해석 이론 .....	13

## 제 3 장 실 험

3.1 실험 방법 .....	18
3.2 Core 3D모델링 및 설계 .....	18
3.3 Core 열전달해석 .....	23

## 제 4 장 결과 및 고찰

4.1 열전달 Temperature results .....	28
4.2 열전달 Total heat flux .....	36
4.3 Core 성형 밀도결과 분석 .....	49
4.4 Core 성형 표면경도 결과 분석 .....	51

제 5 장 결론 .....	53
----------------	----

REFERENCES .....	55
------------------	----

## List of figures

Fig. 2.1 Brushless direct current motor .....	5
Fig. 3.1 2D design for the BLDC core .....	19
Fig. 3.2 Section view A-A for the BLDC core .....	19
Fig. 3.3 Isometric view for the BLDC core .....	20
Fig. 3.4 Assembly view for stator and rotor .....	20
Fig. 3.5 3D design for BLDC motor .....	21
Fig. 3.6 3D design for rotor and stator .....	22
Fig. 3.7 3D design for BLDC core .....	22
Fig. 3.8 BLDC core geometry by CATIA V5 R18 .....	23
Fig. 3.9 BLDC core finite element mesh geometry .....	24
Fig. 4.1 Transient thermal temperature distribution .....	28
Fig. 4.2 Temperature distribution results 1sec .....	29
Fig. 4.3 Temperature distribution results 111sec .....	29
Fig. 4.4 Temperature distribution results 222sec .....	30
Fig. 4.5 Temperature distribution results 333sec .....	30
Fig. 4.6 Temperature distribution results 444sec .....	31
Fig. 4.7 Temperature distribution results 555sec .....	31
Fig. 4.8 Temperature distribution results 666sec .....	32
Fig. 4.9 Temperature distribution results 777sec .....	32
Fig. 4.10 Temperature distribution results 888sec .....	33
Fig. 4.11 Temperature distribution results 1000sec .....	33
Fig. 4.12 Transient thermal temperature A-type results .....	35
Fig. 4.13 Transient thermal temperature B-type results .....	35
Fig. 4.14 Transient thermal total heat flux distribution .....	36
Fig. 4.15 Total heat flux distribution results 1000sec .....	37



Fig. 4.16 Total heat flux distribution results 888sec .....	37
Fig. 4.17 Total heat flux distribution results 777sec .....	38
Fig. 4.18 Total heat flux distribution results 666sec .....	38
Fig. 4.19 Total heat flux distribution results 555sec .....	39
Fig. 4.20 Total heat flux distribution results 444sec .....	39
Fig. 4.21 Total heat flux distribution results 333sec .....	40
Fig. 4.22 Total heat flux distribution results 222sec .....	40
Fig. 4.23 Total heat flux distribution results 111sec .....	41
Fig. 4.24 Transient thermal total heat flux distribution .....	42
Fig. 4.25 Total heat flux distribution results 1000sec .....	42
Fig. 4.26 Total heat flux distribution results 888sec .....	43
Fig. 4.27 Total heat flux distribution results 777sec .....	43
Fig. 4.28 Total heat flux distribution results 666sec .....	44
Fig. 4.29 Total heat flux distribution results 555sec .....	44
Fig. 4.30 Total heat flux distribution results 444sec .....	45
Fig. 4.31 Total heat flux distribution results 333sec .....	45
Fig. 4.32 Total heat flux distribution results 222sec .....	46
Fig. 4.33 Total heat flux distribution results 111sec .....	46
Fig. 4.34 Transient thermal total heat flux A-type results .....	48
Fig. 4.35 Transient thermal total heat flux A-type results .....	48
Fig. 4.36 Core manufacture and moulding part .....	49
Fig. 4.37 Stator assembled moulding parte .....	49
Fig. 4.38 Measurement results to the density test .....	50
Fig. 4.39 HV hardness test zone .....	51
Fig. 4.40 Measurement results to the HV hardness test .....	52

## List of tables

Table 3.1 Statistics details of stator and rotor .....	21
Table 3.2 Mesh statistics details of sizing and method .....	24
Table 3.3 BLDC core material data .....	25
Table 3.4 Transient thermal initial condition .....	25
Table 3.5 Step controls of temperature .....	26
Table 3.6 Boundary conditions for the hat forging .....	27
Table 4.1 Transient thermal temperature results .....	34
Table 4.2 Transient thermal total heat flux results .....	47
Table 4.3 A-type and B-type core molding density .....	50
Table 4.4 Hardness test results .....	51

# ABSTRACT

## A Study on the Moulding Analysis of High Efficiency BLDC Motor Core to EV

Choi Ji Hyun

Advisor : Prof. Cha Yong-hun, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

The necessity of EV has expanded and interest in it has been increasing while environmental restrictions has been stricter due to energy and environmental issues such as reinforced standards of discharged gas, depletion of fossil fuel, and global warming. EV is an area which is expected to occupy 10% of the entire automobile markets in 10 years. If EV is mass-produced 10 years later, companies which advance first into the markets will have advantages and dominated the market in advance. EV motor, home electronic and industrial motor manufacturers are rushing into development of 10kw~100kw BLDC motor, an EV driving motor. As BLDC motor doesn't have brushes, it has more advantages such as less electric and mechanical noise, high-speed, high reliability, and no need of maintenance in comparison with DC and AC motors. So, although the BLDC motor is expensive, its life and efficiency is superior, there have been a number of studies on it. The BLDC motor uses a permanent magnet. Today, a rare-earth permanent magnet has become a fundamental

element as its coverage is very wide. With the development of electronic industries and increase of motor output, DC motors with brush is being replaced by brushless motors and ferrite magnet is being replaced by neodymium sintered magnet as a built-in magnet. A rare-earth permanent magnet is necessarily used for development of high-performance motor needed by better performance and light-weight. BLDC Core mostly uses a ferrite magnet as a permanent magnet, but torque per cubic volume is small. To overcome this disadvantage, a rare-earth magnet is used, but it demands higher cost, 60% of the expenses of motor manufacturing. As there is a limitation in reserves of rare-earth metal worldwide, the crystal size of neodymium sintered magnet was decreased to 5 $\mu$ m through 1.1 $\mu$ m in order to improve coercivity and to curtail the amount used of dysprosium.

This study manufactured BLDC motor core as an EV driving motor system and modelled the BLDC core and improved BLDC core using CATIA V5 R18, a three-dimensional design program. Then it analysed transient heat transfer with Ansys Workbench R13, evaluated health of spare parts according to thermal behaviors and achieved an optimal design of the EV motor. A core was molded and sampled through powdered compressed molding to measure density and hardness. Therefore, the results are presented as follows:

1. A less-weight optimal modelling was performed with a use of CATIA and the weight of the core was decreased from 1.15kg to 0.99kg.
2. A transient heat transfer with a use of Ansys Workbench R13 and the changes in temperature distribution of the near the BLDC rotor was larger than the around the BLDC core. In addition, based on these analysis results the transient heat transfer of many 3D models was performed.

BLDC core drawing works of less-weight optimal modelling were completed through a evaluated health of spare parts according to thermal behaviors.

3. Five species of molded A-type and B-type were randomly extracted for density test and the two samples were almost same in molding density,  $7.2\text{g}/\text{cm}^3$ . It was near to  $7.2\text{g}/\text{cm}^3 \sim 7.5\text{g}/\text{cm}^3$ , mean densities of rare-earth permanent magnet, which indicates that powder compacting ability is good.

4. Five species of molded A-type and B-type were randomly extracted for hardness test. A-type was  $H_v=586.4$ , B-type was  $H_v=578.6$ . It was near to  $560 \sim 650$  mean hardness of rare-earth permanent magnet, which indicates that mechanical properties is good.

As indicated in this study, if the developed BLDC core is applied for industrial fields, it is suggested that the production cost will be reduced to more than 5% and motor manufacturing time can be decreased to more than 5%. Through decreasing 2% of motor weight, BLDC motor can be light-weight and production procedures can be simplified. If the entire tendency of thermal behavior of the BLDC core is analysed, the results can be helpful to engineers who design motors in industrial fields, and to high-efficiency motor production according to future distribution of EV.

**Key Words :** EV, BLDC core, rare-earth Permanent magnet, Powder moulding, Moulding density, optimal modelling, Finite element method, transient heat transfer, Convection

# 제 1장 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

세계 각국에서는 배기가스 규제 기준강화와 화석연료의 고갈, 지구 온난화 등의 에너지와 환경문제로 친환경 자동차에 대한 필요성이 환경 규제가 강화되는 가운데 크게 일어나고 있다. 이에 전기자동차(EV)<sup>(1~2)</sup>에 대한 관심이 꾸준히 높아지고 있다. 일본과 미국에 이어 우리나라에서도 2012년 내 양산형 전기자동차 시대가 본격 개막될 예정이고, 전기자동차는 향후 10년 내에 전체 자동차 시장에서 10%를 차지할 것으로 기대되는 분야이다. 특히 지금과 같이 국제 지구온난화 방지 대책으로 이산화탄소 규제와 배기가스 규제, 석유자원의 고갈에 따른 대체 에너지 개발과 더불어 환경 친화적 자동차의 개발 필요성이 대두 되는 가운데, 경제 위기로 물가가 계속 오르는 시점에서 생활이 점점 더 어려워지고, 휘발유와 경유가격이 급상승하고 있는 상황에 유지비가 적은 연비 좋은 자동차를 찾는 실속형 운전자들이 많아지는 추세이다. 향후 10년 후 전기자동차가 양산화 되면 그 시장을 먼저 진출한 업체가 그 시장에서 이점을 가지며 그 시장을 선점 할 것으로 전망한다. 현재 전기자동차의 구동 모터인 10kw~100kw급 BLDC 모터<sup>(6~8)</sup> 개발에 전기자동차 모터 생산업체 뿐만 아니라 가전 및 산업모터를 생산하는 업체들까지 제품개발 및 품질향상에 관한 연구 및 사업에 뛰어 들고 있다. 그 이유로 BLDC 모터는 브러시가 없으므로 전기적, 기계적 노이즈가 작고 고속화가 용이하며 신뢰성이 높고 유지보수가 필요 없는 등 일반 DC, AC모터 보다 전기자동차 구동모터로서 장점이 많기 때문이다. 그러기 때문에 고가라는 단점에도 불구하고 수명과 효율이 좋기에 전기자동차의 구동모터로 많이 연구되고 있다. 현재 국내외 자동차업체들이 전기자동차 대중화에 박차를 가하고 있다. 전기자동차용 BLDC모터 수명 및 효율을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되는 이유이기도 하다. BLDC 모터는 영구자석이 사용된다. 오늘날 희토류 영구자석<sup>(15~18)</sup>은 그 응용범위가 매우 넓어 중요한 기초 물질이 되었다. 각종 전자산업의 발전과 모터 출력의 증대와 함께 브러시가 달린 DC모터에서 브

러시리스 모터로, 내장자석 역시 페라이트 자석에서 네오뉘(Nd-Fe-B)계 소결자석으로 바뀌고 있다. 희토류 영구자석은 성능개선 및 경량화에 필요한 고성능 모터 개발에 필수적으로 사용된다. BLDC core는 영구자석을 사용하는데 일반적으로 페라이트 자석을 사용할 경우가 많으나 체적 당 토크가 작다. 이 결점을 개선하기 위해 에너지급이 높은 희토류 자석을 사용하는데 비용이 상당히 높아질 뿐만 아니라 모터제작비용에 약 60%를 차지한다. 희토류 금속은 세계적으로 그 매장량이 한계가 있으므로, 네오뉘(Nd-Fe-B) 소결자석의 결정입자 사이를 5마이크로미터에서 1.1마이크로미터 사이즈로 작게 함으로써 보자력을 향상시켜 디스프로슘의 사용량을 절감하는 기술 등과 같은 연구가 활발히 일어나고 있다.

본 논문은 전기자동차가 대중화 단계에 진입하기도 전에 전기자동차의 고효율 구동모터 생산에 없어서는 안 될 희토류금속의 확보에 문제점들이 나타나고 있어 계획적이고 체계적인 생산, 제조 및 절감 기술 등이 연구 되어져야 할 필요가 있으며, 전기자동차용 10kw급 고효율 BLDC 모터의 Core 제작 시 모터의 고효율을 유지하면서 희토류를 절감하는 설계방법을 고안하였고, 희토류 분말성형 방법에 의한 제작을 위해 CATIA를 이용한 최적설계와 ANSYS를 이용한 과도상태 열전달해석<sup>(31~47)</sup>을 수행하고 분말 성형한 Core의 밀도와 경도를 측정하여 Core에 대한 부품 신뢰성 검증을 실시하였다.

## 1.2 연구방법

1. 전기자동차용으로 개발된 10kw급 BLDC 모터의 Core를 CATIA V5 R18을 이용하여 제품의 성능 및 규격에 영향을 주지 않는 범위 내에서 중량 절감 모델을 Case 별로 모델링 설계를 수행 하였다.

2. Case 별로 중량을 절감 시킨 모델들과 비교 대상인 개발된 A-type core 를 ANSYS Workbench R13<sup>(23~25)</sup>을 이용하여 1000sec간의 과도상태 열전달 해석을 수행 하고 2010년 개발된 A-type의 BLDC 모터 Core의 해석결과 값 과 가장 근접한 B-type core 모델을 선정 한다.

3. 과도상태 열전달 해석을 수행하여 선정된 모델이 분말 압축성형<sup>(15~17)</sup> 이 가능하도록 CATIA V5 R18을 이용하여 최적화 설계를 수행하고 A-type 과 B-type core의 도면화 작업을 수행 한다.

4. 부품의 건전성 평가를 마친 고효율 BLDC 모터 Core를 분말압축성형 방식으로 시제품을 제작하고 5종의 시편을 랜덤으로 선정하여 밀도와 경도측정을 수행하고 비교 분석 하였다.



## 제 2 장 이 론

### 2.1 BLDC 모터의 동작원리 및 구조

#### 1. BLDC 모터 정의

BLDC(Brushless DC)모터는 그 이름에서 알 수 있는 바와 같이 DC모터에서 브러시 구조를 없애고 정류를 전자적으로 수행하는 모터이다. 즉 영구자석의 위치를 홀센서 등의 전자적 센서로 검출하고 검출된 신호로 전기각을 판단하여 코일에 전류를 흘려서 토크를 발생시키는 것이다. 홀센서로 전기각을 검출하면 부가적으로 여러 가지 장점이 생긴다. 전자적으로 전기각을 검출하므로 브러시와 정유자간의 기계적인 마찰부가 없어지므로 고속화가 가능하고 소음이 감소하며 아크가 없어지므로 전자 노이즈가 감소한다. 일반적으로 DC 모터는 페라이트 자석을 사용하지만 BLDC는 고성능의 희토류자석을 사용하므로 소형화가 가능하다.

#### 2. BLDC 모터 동작원리

일반적으로 BLDC모터를 구입하면 드라이버를 함께 구입 할 수 있다. 직접 제어를 하려는 경우에 대해서 설명한다. 먼저 모터의 U, V, W 리드선에 수십 k $\Omega$  정도의 저항을 연결하고 저항의 반대편을 하나로 연결하여 역기전력의 중성점을 만들고 홀(Hall)센서 전원단에 규정된 전압을 인가한 후 역기전력의 중성점과 홀센서 전원의 GND(-단자)를 연결한다. 홀(Hall)센서 신호와 역기전력 신호를 스코프로 관찰하여 역기전력이 최대가 되는 두개의 단자에 주전원의 전압이 인가될 수 있는 로직을 구성한다. 이렇게 구성된 로직에 따라 모터의 리드선에 전압을 인가하면 모터가 회전하게 된다. BLDC모터에서는 전기각을 검출하기 위해서 홀센서를 가장 많이 사용한다. 홀센서에는 자속밀도에 비례하여 전압이 나오는 것과 자극이 바뀌는 곳에서 High와 Low

로 바뀌는 Open Collector 출력 타입이 있다. 그리고 홀센서의 배치에 따라 홀센서 신호가 120도의 위상차가 있는 것과 60도의 위상차가 있는 타입이 있으나 제어기에서 로직을 변환하여 역기전력을 기준으로 하면 동일한 구동방식을 취하게 된다. 홀센서 출력상태를 조합해 보면 전기각으로 60도의 간격으로 나눌 수 있고 각각의 상태에 따라 BLDC 모터의 U, V, W각상에 전압을 인가하면 BLDC모터가 회전하게 된다<sup>(1~2)</sup>.

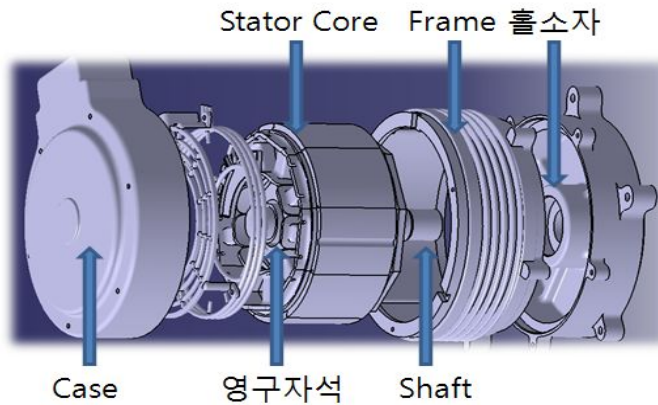


Fig. 2.1 Brushless direct current motor

### 3. BLDC 모터 구조

#### 가. Outer Rotor형

Brushless DC모터의 외주 측으로 회전자를 배치, 모터의 내부 측면으로 회전자계를 만든다. 회전자의 관성모멘트가 크므로 정속도 주행에 유리하다. 마드네트를 비교적 크게 할 수 있으므로 고효율 및 고평토크가 가능하다. 권선의 코일 평균길이가 짧게 되어 손실절감 및 고효율화 하기 쉽다. 단 회전자 지지기구가 복잡하고, 밀폐구조로 하기 어렵다<sup>(3~5)</sup>.

## 나. Inner Rotor형

Brushless DC모터의 내주 축으로 회전자를 배치, 모터의 외주 축으로 회전자계를 만든다. 회전자의 관성모멘트가 Outer motor에 비하여 작다. 모터구조를 비교적 간단하게 구성할 수 있다.

## 다. Axial Gap형

Brushless DC 모터 축방향의 두께를 비교적 얇게 한 원판상의 모터 회전자의 전기자를 축방향으로 나열한 구조이다. 축수간 간격이 짧기 때문에 동작의 정확을 요한다. 축수구조도 복잡하고 권선과 전기자를 분리 Slotless구조로 하여 회전율을 저감시킬 필요가 있는 곳에서 많이 사용되고 있지만 권선의 배치정도와 권선형상의 밸런스를 작게 하여야 할 필요가 있다.

## 2.2 영구자석의 종류 및 특징

### 1. 영구자석의 종류

#### 가. 알리코자석(주조자석)

알리코자석(주조자석): 이방성과 등방성으로 나누어진다. 예를 들면 스피커 자석의 경우 주파수 특성에서 고역부분의 재생능력이 탁월하며 아날로그계기의 경우에도 높은 범위로 올라가면 직선성이 좋다. 장점은 온도 계수가 좋으나 단점으로는 원자재(Co) 가격이 고가이면서도 변동이 심해 일부분의 사용으로 제약하고 있다<sup>(15 ~ 18)</sup>.

#### 나. 웨라이트자석(소결자석)

웨라이트자석(소결자석): 이방성과 등방성으로 나누어지고 생산방식은 습식

공법과 건식공법으로 나누어진다. 자장 방향에 따라 Radial 이방성과 극이방성, 일반 이방성으로 나누어진다. 가격은 저렴하나 특성 향상에 어렵고 온도계수가 나쁘며 대량 생산해야하는 문제점이 있다.

#### 다. 희토류자석

희토류자석은 NdFeB(네오뎀)자석과 SmCo(사마리움코발트)자석으로 나누어진다. 특히 NdFeB자석의 발명은 SmCo의 강력한 자석이 나왔으나 원료가 고가이며 가격 불안정 함으로 타자석이 이미 개발 중이었다. 1986년에는 중국이 시장 자유화와 동시에 네오디움 자석 생산에 총력하면서 생산이 시작되었다. 희토류원소는 17개로 분리되나 희토류의 매장량이 세계매장량의 50% 이상을 중국이 차지하고 있고, 현재생산량의 90%정도를 중국이 채광하고 세계경제불황으로 아프리카 및 호주가 고전하는 가운데 중국이 아프리카 및 호주와 같은 여러나라들의 광산을 매입해 세계시장의 주도권을 쥐고 있다. 특히 중국정부가 희토류의 출하량을 조정하며 가격도 마음대로 책정 하고 있는 실정이다. 이 정책은 클린산업에 특히 희토류자석의 사용이 주류를 이루는 자기부상열차, 풍력발전기, 전기자동차의 구동모터 등 그 용도는 다양하다.

##### (1) 네오디움 자석

처음 개발시에는 온도계수가 문제 되었으나, 지금은 동작온도 200℃까지는 가능하다. 한국은 처음은 특허문제로 현재는 원가와 기술 노하우 문제로 생산하지 못하고 있다. 중국 제품이 주류를 이루고 있고, 일본은 기술로는 다소 앞서 가지만 단가가 문제시 된다.

##### (2) 사마륨코발트 자석

현재는 Co가 가격이 비싸고 가격변동이 심해 NdFeB자석으로 많이 전환되는 추세이다. 온도계수가 우월하여 350℃까지 사용이 가능하다. 일본에서는 High-Tech 분야에 많이 사용하고 있다.

## 라. 알리코 자석(주조자석)

- (1) 본드자석 : 각자석의 분말을 수지와 섞어 만든 자석
- (2) 알리코 본드자석: 알리코자석 제조후 분쇄해서 수지와 섞어 성형해서 만든 자석
- (3) 웨라이트 본드자석: 웨라이트자석 제조후 분쇄해서 수지로 섞어 사출성형해서 만든 자석
- (4) 네오디움본드자석: 네오디움자석 제조후 분쇄해서 수지와 섞어 압축 사출 성형 하여 만든 자석
- (5) 사마륨 본드자석: 사마륨자석 제조후 분쇄해서 수지와 섞어 압축 사출 성형하여 만든 자석. 본드 자석은 플라스틱 자석이라고도 말하며 자력은 각 자석보다 약하다.

## 마. 고무자석

본드자석과 같이 고무에 각 자석 분말을 혼합하여 만든다. 거의가 Ferrite 고무자석. 등방성과 이방성이 있으며 Plate Type과 Strip Type등이 있고 여러 가지로 Cutting 해서 홍보물로도 사용한다.

## 2. BLDC 희토류 영구자석의 특징

### 가. Sm-Co Magnet(삼아륨 코발트자석)

- (1) 희토류 금속인 Sm과 Co를 분말 가공 성형 후 진공에서 소결시키며 연마 후 완성품을 낸다.
- (2) 자기특성이 네오뎀자석 다음으로 우수하다.
- (3) 전 세계적으로 Co의 매장량이 극소이므로 최근에는 Nd-Fe-B로 대체중이고 열에 대한 안정성은 네오뎀보다 높으나 가격이 고가이다.
- (4) 잔류자속밀도(Br) : 9.2~11.2

- (5) 보자력( $H_c$ ) : 5.5K $O_e$ ~9.0K $O_e$
- (6) 최대 에너지적( $BH$ ) $_{max}$  : 22MG $O_e$ ~26MG $O_e$
- (7) 밀도( $g/cm^3$ ) : 7.82 $g/cm^3$

## 나. Nd-Fe-B Magnet(네오뎀자석)

- (1) 제조공법은 Sm-Co 자석과 유사하다.
- (2) 자기 특성이 가장 높고 부피가 적으면서도 뛰어난 자기특성을 발휘한다.
- (3) 가격이 Sm-Co보다 저렴하여 현재 전 세계적으로 사용량이 급등한다.
- (4) 잔류자속밀도( $B_r$ ) : 12.8~14.0
- (5) 보자력( $H_c$ ) : 12K $O_e$  ~14.9K $O_e$
- (6) 최대에너지적( $BH$ ) $_{max}$  : 20MG. $O_e$ ~40MG. $O_e$
- (7) 밀도( $g/cm^3$ ) : 7.48 $g/cm^3$

## 2.3 희토류 영구자석의 분말야금 제조 과정

### 1. 영구자석 재료의 종류 및 특성

현재 공업 및 과학기술 분야에 광범위하게 응용되고 있는 영구자석재료에는 주조자석 재료, 페라이트 자석재료, 희토류 자석재료 및 기타 자석재료등 크게 4가지로 분류할 수 있다. AlNiCo 자석재료는 큐리온도  $T_c$ 가 높고, 온도안정성도 좋으며 자기유도 온도계수도 낮다. 그러나 이 재료는 전략 금속인 코발트와 니켈을 다량 함유하는 문제가 있다. 그래도 20세기 60년대에 희토류 영구자석 재료가 출현하기 전까지는 그 생산량이 23000톤 까지 증가하였다. 페라이트 영구자석 재료의 주요 장점은 원료 자원이 풍부하고 가격이 저렴하다는 것이다. 비록 자기 성능은 그리 높지 않지만 자동차 공업, 음향 통신, 가전용 기기, 사무자동화 기기 등에 광범위하게 응용되고 있으며 그 생산량은 지속적으로 증가하고 있다. Sm-Co계 영구자석 재료는 큐리온도가 높고, 온도안정성도 좋다. 그러나 Co와 Sm 금속을 다량 함유한다. Sm은 희토류 광석에서도 함유량이 적은 편이어서 가격이 비싸다. 때문에 Sm-Co계 영구자석의 응용은 제한을 받

게 되고 1994년 이래 그 생산량은 매년 감소하고 있다. NdFeB계 영구자석 재료와 같은 희토류-철계 영구자석 재료는 자기 성능이 높고 전락 금속인 코발트나 니켈을 함유하지 않기 때문에 상대적으로 가격이 낮아서 광범위하게 응용되고 있으며 년 평균 증가율은 20~30%로 높은 성장을 보이고 있다<sup>(15~16)</sup>.

## 2. 분말야금(소결)법에 의한 제조과정

### 가. 원료준비

Nd-Fe-B계를 용해할 때에는 Nd 순금속(98%~99%) 또는 Nd-Fe 합금, 공업적으로 순수한 Fe, B 분말 또는 Ferro boron을 사용한다. B 분말보다 Fe-B를 사용하는 것이 좋다. Ferroboron의 가격이 저렴할 뿐 아니라 장입하기 쉬어서 성분 통제가 용이하여 용해하기가 편하기 때문이다. B분말을 사용하여 540~870℃로 가열하게 되면 B 분말은 급격히 산화되어  $B_2O_3$  또는 이온가가 더 낮은 산화물을 생성하고 이들은 용탕으로부터 분출되거나 휘발하게 된다. 따라서 B 분말을 원료로 사용할 때에는 먼저 B분말과 철 분말을 압축하여 덩어리로 만들어서 사용한다. 원료 덩어리의 크기와 용해 방법 그리고 장입량은 서로 연관되어 결정된다<sup>(17~18)</sup>.

### 나. 용해

희토류 영구자석 재료를 용해할 때에 가장 중요하게 지켜야 할 것은 성분을 정확히 지키고, 균질하게 용해하고 이물질이 혼입되지 않도록 하는 것이다. 희토류 원소는 활성이 크기 때문에 쉽게 산화된다. 따라서 용해는 진공 중에서 이루어져야 된다. 진공 유도로 또는 진공아크로 등을 사용하여 용해한다.

### 다. 분말제조

큰 덩어리의 합금 괴를 일정한 입도의 분말로 파쇄하기 위하여 공정을 조 파쇄와 미분 공정의 두 공정으로 구성한다. 시차열분석 결과에 따르면 Nd-Fe-B계의 열안정

성은 시료 상태에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 분말상태의 NdFeB 자성체는  $Nd_2Fe_{14}B$ 상을 기지로 하고  $Nd_8Fe_{27}B_{24}$ 상과 (Nd)상을 제2상으로 하고 있다. 이를 공기 중에서 가열하여 290℃ 전후에 이르면 주상은 아직  $Nd_2Fe_{14}B$ 상이나 X-선회절에 의하면  $Nd_2O_3$ 상의 회절선이 나타난다. 이는 Nd가 산화되기 시작함을 뜻하는 것이다. 400℃에 이르면  $Nd_2Fe_{14}B$  상은 분해되어  $Fe_2O_3$ ,  $Nd_2O_3$  그리고 소량의 기타 상으로 변한다. 덩어리 상태의 Nd-Fe-B시편의 경우에는 290℃로 가열해도  $Nd_2O_3$ 상이 나타나지 않을 뿐 아니라 단시간이지만 700℃까지 가열할 수도 있다. 이는 덩어리 상태의 시편이 분말 상태에 비하여 안정성이 훨씬 높다는 것을 말해주는 것이다. 또 큰 덩어리 시편을 작은 덩어리 또는 미세 분말로 파쇄할 때 열안정성이 떨어질 수 있다는 것을 의미하기도 한다. 따라서 파쇄과정에 산화를 방지하도록 보호 매질을 사용할 필요가 있다. 파쇄시 사용되는 매질에는 휘발유, 톨루엔, 에테르 또는 기타 유기액체나  $N_2$ , Ar 과 같은 불활 기체 등이 있다. 파쇄 방법에는 파쇄기계를 쓸 수도 있고 수동 공구를 사용할 수도 있다. Sm-Co 자성체에 대해서는 일반적으로 60 mesh로 일차 파쇄한 뒤에 다시 미분으로 연마한다. 미세 분말로 연마하는 목적은 거친 분말 상태의 합금을 진일보 연마하여 적합한 규격을 갖게 하는 것이다. 여기서 적합한 규격이라 함은 세가지의 뜻을 가지고 있다. 첫 번째 분말 입자의 크기로서  $SmCo_5$  합금은  $5\mu m \sim 10\mu m$ , Nd-Fe-b 자성체는  $3\mu m \sim 5\mu m$  정도이며 분말입마다 단결정으로 한다. 둘째 분말의 입도가 균일하여야한다. 셋째 분말 입자가 구형에 가깝고 표면이 매끈하고 결함이 적어야 한다. 연마의 방법으로는 진동 볼 밀링, 회전 볼 밀링, 제트밀링 등이 있다.

## 라. 성분의 통제 및 조정

희토류 영구자석 합금의 자기 성능은 화학성분에 따라 매우 민감하게 변한다. 희토류 원소는 활성이 강해서 산화되기가 매우 쉽고 따라서 합금용해나 제분 과정 중에 희토류 원소가 부분적으로 산화되는 것을 피하기 힘들다. 희토류 원소가 산화되면 합금 성분이 전이금속이 풍부한 쪽으로 이동하게 된다. Nd-Fe-B의 경우 희토류 Nd의 산화가 매우 심하기 때문에 Nd-Fe-B 3원 상태도에서  $Nd_2Fe_{14}B + Nd_8Fe_{27}B_{24} + Nd$ 의 3상 구역에 있는 합금이  $Nd_2Fe_{17} + Nd_2Fe_{14}B$ 의 상 구역으로 이동하여 합금의 자기적 성능이 매우 나빠질 수도 있다.  $SmCo_5$  합금의 경우 가장 좋은 자성은  $SmCo_5$ 의 계량



된 성분에 0.5wt%의 Sm이 초과되었을 때 얻어진다. 이 초과 Sm은 0.08wt%의 산소를 흡수하는 양에 상당한다. 희토류 원소의 산화에 의한 손실을 보상하기 위하여 통상적으로 연마 전 혹은 연마 후에 일정량의 액상을 첨가한다.  $\text{SmCo}_5$ 의 경우 액상의 성분은 60%Sm+40% Co이다. 액상합금  $\text{Sm}_{0.6}\text{Co}_{0.4}$  합금은 액상으로 소결을 도와주는 작용을 하게 된다. 이 때문에  $\text{Sm}_{0.6}\text{Co}_{0.4}$  합금을 액상합금이라 부른다. 액상합금의 첨가량은 합금의 성분이 36.75wt%Sm~37.0wt%Sm과 나머지 Co에 이르도록 조정하는 데에 상응하는 양이 된다.

### 마. 분말의 자장취향 및 성형

많은 단결정 분말로 소결자석을 만들 때 개개의 분말 입자의 자화용이축이 같은 방향을 취한다면 그 방향으로 자화했을 때 최대의 잔류자화를 얻을 수 있을 것이다. 분말의 자장취향 방법에는 두 가지가 있다. 하나는 수직취향이고 다른 하나는 평행취향이다. 자장의 방향과 압력의 방향이 나란할 때 평행취향이라 하며 그 압력의 방향과 자장의 방향이 서로 수직일 때 수직취향이라고 한다. 일반적으로 수직취향이 비교적 높은 취향인자를 얻는 데 유리하다. 평행취향의 경우 압력이 어느 값에 이르면 취향인자가 다소 감소하고  $B_r$  값도 내려가게 된다. 분말의 압축 형틀과 방향에는 5가지가 있다. 평행강형압축, 수직강형압축, 고무형틀압축, 평행강형압축+정압압축, 수직금형 압축+정압압축. 수직압축은 분위기에서 두 가지의 다른 압축성형 방법이  $\text{SmCo}_5$ 의 성능에 미치는 영향을 나타내는 것이다. 정압 압축된 시편이 성능이 높은 경우가 많음을 볼 수 있다. X-선회절 분석 결과를 통해 밝혀진 것은 금형 압축시편의 c-축과 취향축이  $15^\circ$  이내의 각을 이루는 분말의 전체 분말에 대한 비율이 50% 정도인데 비해 정압 압축한 시편은 c축이 자장취향축과 평행한 비율이 70%나 된다. 이는 정압성형이 취향 정도를 크게 개선시킨다는 것을 나타내는 것이다. 정압 압축 과정에서 압력의 크기나 자성체의 밀도에 중요한 영향을 준다.

## 2.4 열전달 해석 이론

### 1. 질량보존 방정식

질량보존의 원리는 단순히 질량은 생성되거나 소멸될 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 해석하는 동안에 모든 질량이 고려되어야 한다. 정상유동에서 제어체적내의 질량의 총합은 일정하다. <sup>(26 ~ 30)</sup>

$$\left( \begin{array}{l} \text{Rate of mass flow} \\ \text{into the control volume} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{Rate of mass flow} \\ \text{out of control volume} \end{array} \right) \quad (2.16)$$

질량 유동율은 밀도, 평균속도 그리고 유동에 수직한 단면적의 곱과 같다는 것을 유념하면 왼쪽 면으로 부터 제어체적으로 들어가는 유량은  $\rho u(dy \cdot 1)$ 이다. 오른쪽 면으로 부터 제어체적을 나가는 유량은 식(2.17)과 같다

$$\rho \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) (dy \cdot 1) \quad (2.17)$$

이것을 y방향에 대해서 반복하고 결과를 식(2.16)에 대입하면 식(2.18)을 얻는다.

$$\rho u(dy \cdot 1) + \rho v(dx \cdot 1) = \rho \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) (dy \cdot 1) + \rho \left( v + \frac{\partial v}{\partial y} dy \right) (dx \cdot 1) \quad (2.18)$$

정리하고  $dx \cdot dy \cdot 1$ 로 나누면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.19)$$

## 2. 운동량 보존 방정식

속도 경계층에서 미분형 운동방정식은 경계층에서 미분형 제어체적 요소에 뉴턴의 제2운동법칙을 적용함으로써 얻어진다. 뉴턴의 제2법칙은 운동량 보존에 대한 표현인데 식(2.20)와 식(2.21)같이 표현된다.

$$(Mass) \left( \begin{array}{c} \text{Acceleration in} \\ \text{a specified direction} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Net force (body and surface)} \\ \text{acting in that direction} \end{array} \right) \quad (2.20)$$

$$\delta m \cdot a_x = F_{surface,x} + F_{body,x} \quad (2.21)$$

여기서 제어체적 내의 유체요소의 질량은

$$\delta m = \rho(dx \cdot dy \cdot 1) \quad (2.22)$$

유동이 정상 2차원이므로  $u=u(x,y)$ 임에 유의하면

$$du = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \quad (2.23)$$

따라서 x방향의 유체요소의 가속도는

$$a_x = \frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{dy}{dt} = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.24)$$

이 된다. x방향으로 작용하는 순 표면력(net surface force)은 식(2.25)와 같다.

$$\begin{aligned}
F_{surface,x} &= \left(\frac{\partial \tau}{\partial y} dy\right)(dx \cdot 1) - \left(\frac{\partial P}{\partial x} dx\right)(dy \cdot 1) \\
&= \left(\frac{\partial \tau}{\partial y} - \frac{\partial P}{\partial x}\right)(dx \cdot dy \cdot 1) \\
&= \left(\mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial P}{\partial x}\right)(dx \cdot dy \cdot 1)
\end{aligned} \tag{2.25}$$

식(2.19), 식(2.21), 식(2.22)를 식(2.18)에 대입하고  $(dx \cdot dy \cdot 1)$ 로 나누면 식(2.25)처럼 된다.

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + \nu \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial P}{\partial x} \tag{2.26}$$

이것이 x방향 운동량 보존 관계이며 이는 x방향 운동량 방정식이다. 중력효과와 다른 체적력들을 무시할 수 있고 경계층 근사가 유효할 때 체적요소  $y$ 방향으로 뉴턴 제 2운동법칙을 적용하면  $y$ 방향 운동량 방정식은 식(2.27)과 같이 된다.

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \tag{2.27}$$

### 3. 에너지 보존 방정식

어떤 과정이 진행 중인 어떤 시스템에 대한 에너지 균형은 어떤 과정 동안 시스템의 에너지 용량의 변화가 유입 에너지와 유출 에너지의 차와 같다. 에너지는 단지 열, 일 그리고 질량에 의해서만 전달될 수 있음에 유의하면 정상유동에서 제어체적에 대한 에너지 균형은 식(2.28)과 같이 명확하게 나타낼 수 있다.

$$(\dot{E}_{In} - \dot{E}_{out})_{by\ heat} + (\dot{E}_{In} - \dot{E}_{out})_{by\ work} + (\dot{E}_{In} - \dot{E}_{out})_{by\ mass} = 0 \tag{2.28}$$

x방향의 질량 흐름에 의해 제어체적에 가해지는 에너지 전달률은 식(2.29)과 같다.

$$\begin{aligned}
 (\dot{E}_{In} - \dot{E}_{out})_{by\ mass} &= \left[ (\dot{m}e_{stream})_x + \frac{\partial(\dot{m}e_{stream})_x}{\partial x} dx \right] \\
 &= - \frac{\partial[\rho u(dy \cdot 1)C_p T]}{\partial x} dx = - \rho C_p (u \frac{\partial T}{\partial u} + T \frac{\partial u}{\partial x}) dx dy
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

y방향에 대해 이것을 반복하고, 이 결과들을 더하면 질량 흐름에 의해 제어체적에 가해지는 총 에너지 전달률은 식(2.30)과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned}
 (\dot{E}_{In} - \dot{E}_{out})_{by\ mass} &= - \rho C_p (u \frac{\partial T}{\partial u} + T \frac{\partial u}{\partial x}) dx dy - \rho C_p (v \frac{\partial T}{\partial v} + T \frac{\partial v}{\partial y}) dx dy \\
 &= - \rho C_p (u \frac{\partial T}{\partial u} + T \frac{\partial T}{\partial y}) dx dy
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

체적요소에 가해지는 x방향으로의 총 열전도율은

$$\begin{aligned}
 (\dot{E}_{In} - \dot{E}_{out})_{by\ heat, x} &= \dot{Q}_x - \left( \dot{Q}_x + \frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x} dx \right) \\
 &= - \frac{\partial}{\partial x} \left( - \kappa (dy \cdot 1) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \\
 &= \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dx dy
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

이다. y방향에 대해 이것을 반복하고 이 결과들을 더하면 열전도에 의해 제어체적에 가해지는 총 에너지 전달률은 식(2.32)와 같다.

$$\begin{aligned}
(\dot{E}_{In} - \dot{E}_{out})_{by\ heat} &= \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dy + \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dx dy \\
&= \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) dx dy
\end{aligned}
\tag{2.32}$$

물성치가 일정하고 전단응력을 무시할 수 있는 유체의 정상2차원 유동에 대한 에너지 방정식은

$$\rho C_P \left( u \frac{\partial T}{\partial u} + \nu \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)
\tag{2.33}$$

점성 전단응력을 무시할 수 없을 때, 식(2.34)처럼 에너지방정식을 나타냄으로서 그들의 효과가 설명된다.

$$\rho C_P \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + \nu \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \Phi
\tag{2.34}$$

정지된 유체의 경우에 있어서  $u = v = 0$ 이고 에너지 방정식은, 기대한 것과 같이 정상2차원 열전도 방정식으로 단순화된다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0
\tag{2.35}$$

## 제3장 실험

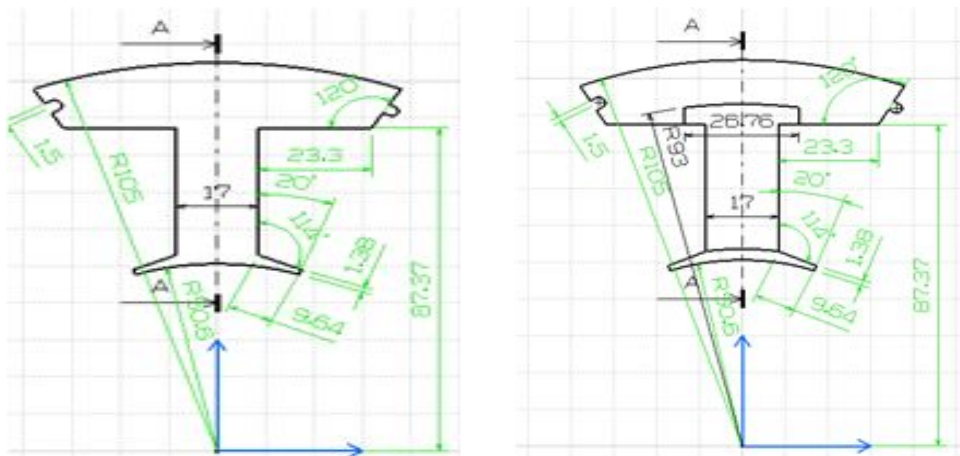
### 3.1 실험 방법

모터의 경량화 및 고효율 구동모터를 개발하기 위하여 희토류금속의 절감 기술 등이 필요함에 따라 네오뉘(Nd-Fe-B)<sup>(16~18)</sup> 절감을 목적으로 전기자동차용 10kw급 고효율 BLDC motor core를 CATIA V5 R18 이용한 3차원 최적화 모델링을 수행하고, ANSYS Workbench R13을 이용한 과도상태 열전달 해석수행을 통해 네오뉘(Nd-Fe-B)이 절감된 Core의 설계와 열 거동 및 건전성 분석을 A-type를 비교 대상으로 A-type과 B-type의 2가지 모델을 비교 분석하여 모델의 수정 과정을 통해 최종 선정된 최적 Core 모델을 선택한 후 Core 분말 성형후 Core의 밀도와 경도를 측정하여 네오뉘(Nd-Fe-B)이 절감된 B-type core 실험값과 기존 Core모델인 A-type의 실험값 및 희토류 영구자석의 기존 실험값들과 비교 분석 한다. 네오뉘(Nd-Fe-B)영구자석의 평균 밀도는  $7.2 \sim 7.5\text{kg/cm}^3$  임으로 이 범위 안에 밀도 값이 나오는 것을 목표로 실험을 실시하였다.

### 3.2 Core 3D 모델링 및 설계

#### 1. 2D모델링

Fig. 3.1은 BLDC 모터 분할 core의 2D 설계도면이며 도면에서 보는 것과 같이 중량을 10% 줄이는 게 목표인 B-type 모델은 Rotor쪽으로 갈수록 두께 치수가 작아져 부품이 작동함에 따라 발생하는 열에 의한 마멸 및 강도를 필요로 함으로 이 부위에 대한 설계가 고려 되었다<sup>(11~14)</sup>.

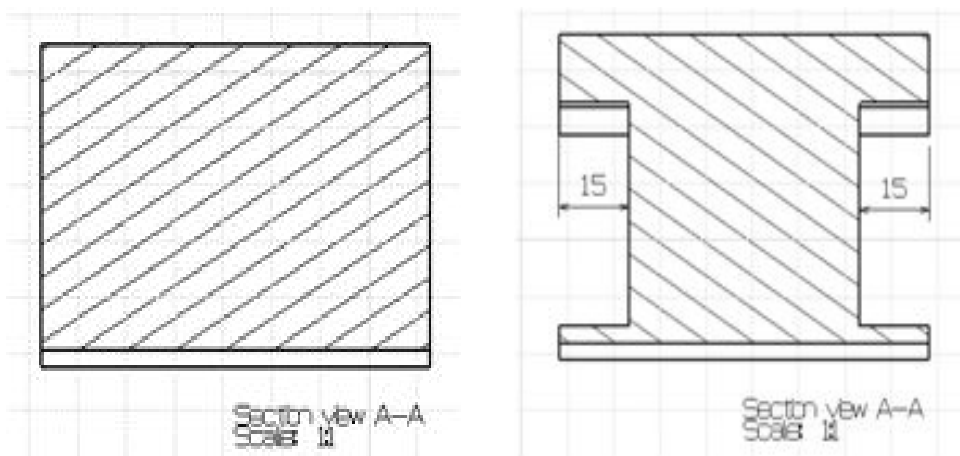


(a) A type

(b) B type

Fig. 3.1 2D design for the BLDC core

Fig. 3.2는 Core의 단면도이며 내부의 형상을 보여주고 있다. B-type은 15mm가 양쪽으로 들어간 형상으로 양면의 노치부분들이 생기기 때문에 이 부위에 대한 설계에 많은 경우에 수를 고려 하였다.



(a) A type

(b) B type

Fig. 3.2 Section view A-A for the BLDC core



Fig. 3.3은 A-type과 B-type의 Core형상을 2D상에서도 보기 쉽게 Isometric view로 나타내었고 A-type의 BLDC core는 기존 10kw급 전기자동차 구동모터로 개발된 부품이고 B-type는 현장에서 제품단가를 줄이기 한 방안으로 제시한 회토티류 절감 모델이다.

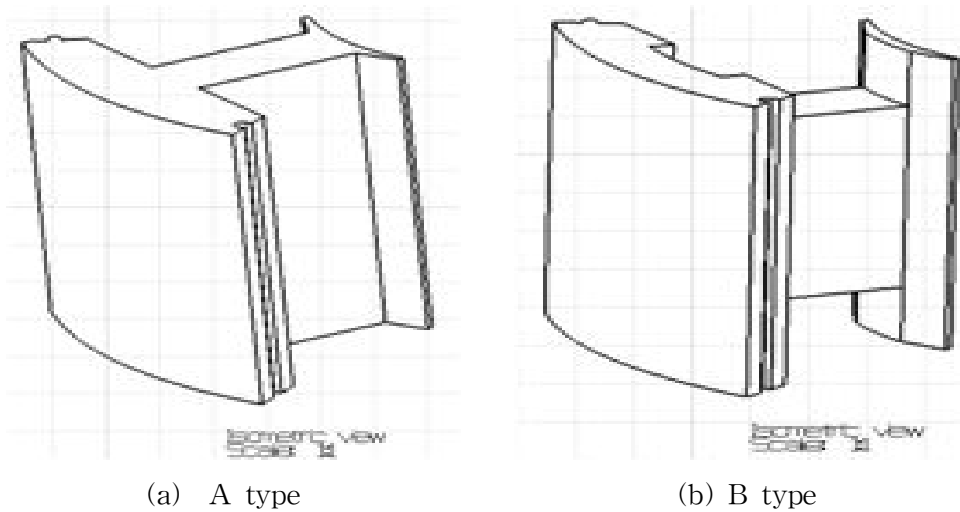


Fig. 3.3 Isometric view for the BLDC core

Fig. 3.4는 Rotor와 Core의 조립위치를 보여주고 있으며 Table 3.1는 Rotor와 Stator의 스펙을 보여주고 있다.

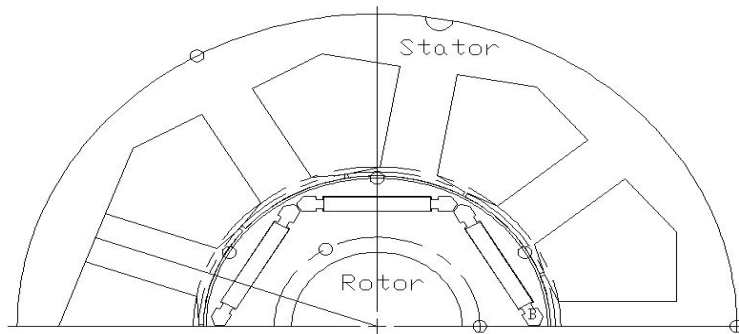


Fig. 3.4 Assembly view for stator and rotor

Components	Parameters	Values (mm)
Stator	Outer Diameter	210
	Thickness	80
Rotor	Outer Diameter	99.6
	Thickness	80
	Air gap	1

Table 3.1 Statistics details of stator and rotor

## 2. 3D모델링

CATIA을 사용하여 BLDC motor 부품들을 모델링하고 전체부품을 조립한 모습을 Fig. 3.5~Fig. 3.7 에서 보여주고 있다.

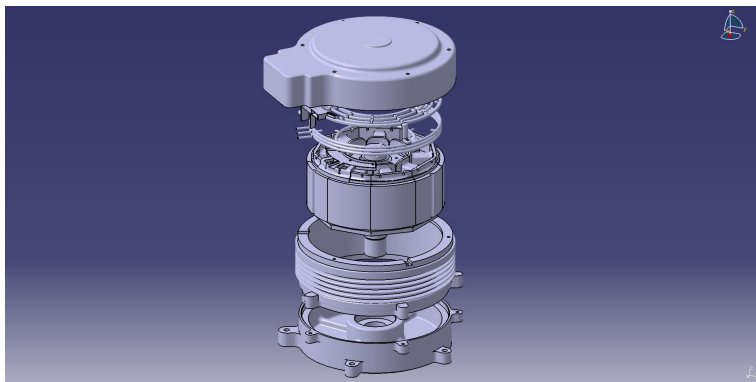


Fig. 3.5 3D design for BLDC motor

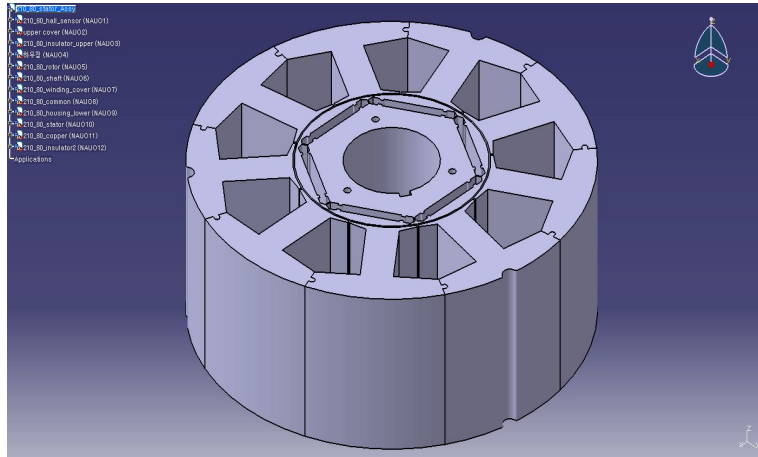
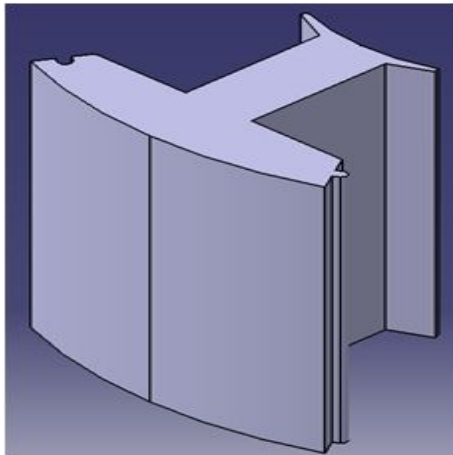
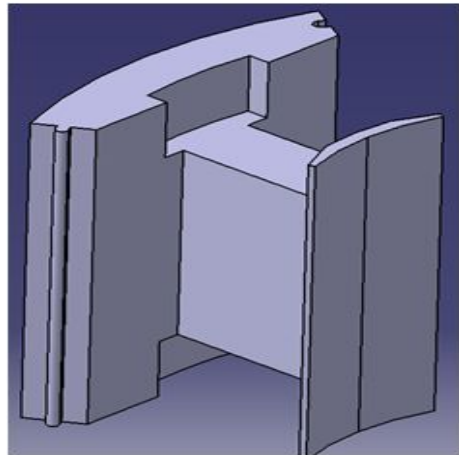


Fig. 3.6 3D design for rotor and stator



(a) A type



(b) B type

Fig. 3.7 3D design for BLDC core

### 3.3 Core 열전달 해석

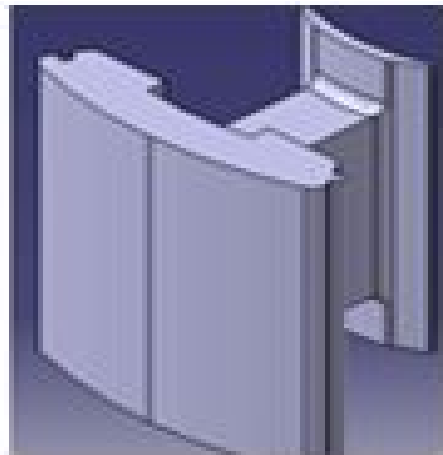
#### 1. 형상(Geometry)

유한요소 해석을 위하여 ANSYS Workbench R13의 해석 프로그램을 사용하고 모델링, 해석타입, 재료물성치 정의, 격자생성, 구속조건정의, 해석, 결과검토 순으로 작업을 수행 한다. 유한요소 해석에서 실제 구조물을 모델링하는 방법은 자체의 모델링 기능(Design Modeler)을 이용하거나 CAD 데이터를 불러오는 방법이 있다. 여기서는 Fig. 3.8과 같이 CATIA V5 R18을 이용하여 중량 값을 검토해 가며 모델링한 형상이다<sup>(11 ~ 12)</sup>.



BLDCCore Mass1.15 kg

(a) A-type



BLDCCore Mass0.99 kg

(b) B-type

Fig. 3.8 BLDC core geometry by CATIA V5 R18

#### 2. 격자(Mesh)

Fig. 3.9에서 보는 바와 같이 삼각형 오토격자가 아닌 사각형 격자로 격자

컨트롤을 하여 최적의 Node와 Element를 결정하였다. Table 3.2가 격자 사이즈 조정 값과 방법에 대해 보여주고 있다<sup>(26 ~ 29)</sup>.

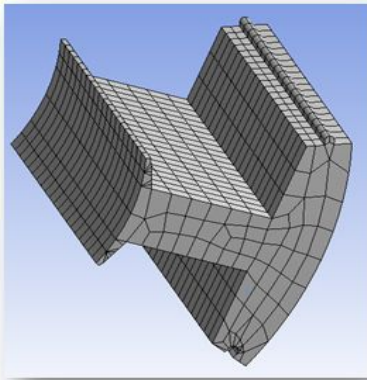
Statistics	
Nodes (ea)	9,060
Elements (ea)	1,740
Element Size (mm)	5
Method	Sweep/ (SND:20)

(a) A-type

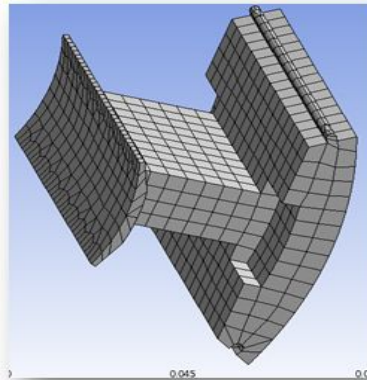
Statistics	
Nodes (ea)	8,868
Elements (ea)	2,284
Element Size (mm)	5
Method	Hex Dominant

(b) B-type

Table 3.2 Mesh statistics details of sizing and method



(a) A-type



(b) B-type

Fig. 3.9 BLDC core finite element mesh geometry

### 3. 열전달(Transient Thermal)

#### 가. 물성치(Material Data)

유한요소 모델로 생성한 후에 실제 모델의 재질을 정의해 주어야 하고 동일한 형상의 모델이라도 그 재질에 따라 여러 가지 기계적 성질이 달라진다. 또한 같은 금속이라도 재질의 종류 열처리 상황에 따라서 물성치 값이 달라질 수 있다. 따라서 해석을 수행하기 전에 Table 3.3과 같은 희토류영구자석의 물성치(열전도율, 밀도, 비열)를 정의하였다<sup>(19 ~ 22)</sup>.

Thermal Conductivity (W/mC)	10
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7480
Specific Heat (J/kgC)	350

Table 3.3 BLDC core material data

#### 나. 초기 온도조건(Initial Temperature)

해석타입으로 1000sec 간의 과도상태 열전달 해석을 수행한다. BLDC core를 분말 압축성형 할 때 금형에서 빠져 나올 때의 온도가 150℃이다. Table 3.4에서 처럼 초기 온도 조건으로 150℃을 주었다<sup>(19 ~ 22)</sup>.

Initial Temperature	Uniform Temperature
Initial Temperature Value(℃)	150

Table 3.4 Transient thermal initial condition

## 다. 열전달 해석조건(Analysis settings)

### (1) Temperature analysis settings

초기 150℃인 BLDC core를 자연대류 상태에서 1000sec동안 과도상태 열전달 해석을 수행하고 Temperature와 Total heat flux의 해석을 수행 하였다. 그에 대한 온도 조건을 Table 3.5와 같이 정의 하였다. 1000sec를 3단계로 나누고 0sec부터 1sec까지 150℃를 정의하고 2, 3단계에서는 비활성화(Deactivate at this step)를 시켜 온도를 계속 가하지 않고 초기 온도만을 가지고 가도록 정의하였다.

Steps	Time(s)	Temperature[℃]
1	0	150
	1	
2	1.01	0
3	100	
	1000	0

Table 3.5 Step controls of temperature

### (2) Convection analysis settings

대류 열전달률은 뉴턴의 냉각법칙(Newton's law of cooling)으로 표시된다.  $Q=hA(T_s-T_\infty)[W]$  여기서  $h$ 는 대류 열 전달계수로서  $W/m^2 \cdot c$ 이며,  $A$ 는 대류 열 전달이 발생하는 면적,  $T_s$ 는 물체표면온도,  $T_\infty$ 는 유체의 온도이다. 대류 조건을 Table 3.6와 같이 정의 하였다.

Steps	Time(s)	Convection Coefficient [W/m <sup>2</sup> °C]	Ambient Temperature [°C]
1	0	0	25
	1		
2	1.01	5	25
3	100		
	1000	5	25

Table 3.6 Boundary conditions for the hat forging

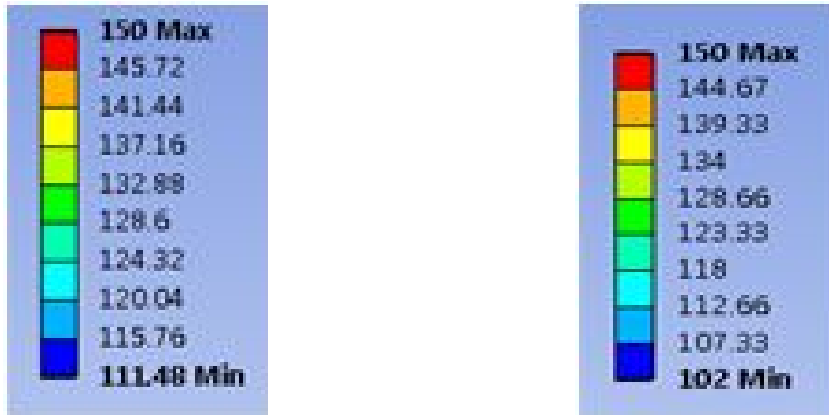
온도 조건과 마찬가지로 3단계를 주고 1단계는 1초까지는 대류계수와 주위온도를 0과 25의 값을 입력하는 게 아니라 비활성화(Deactivate at this step)를 시켰다. 이유는 초기 온도가 1초까지는 150°C를 가지고 있어야 하나 대류계수와 주위온도 조건을 1초간 부여 하면 초기 온도를 유지할 수 없이 해석이 수행이 되기 때문에 이때는 비활성화를 시켜 1초간은 아무런 영향을 미치지 못하게 하였다. 그리고 2단계와 3단계에서 대류열 전달 계수는 5W/m<sup>2</sup>°C주고 주위온도는 25°C로 정의하였다.



## 제 4장 결과 및 고찰

### 4.1 열전달 온도 해석

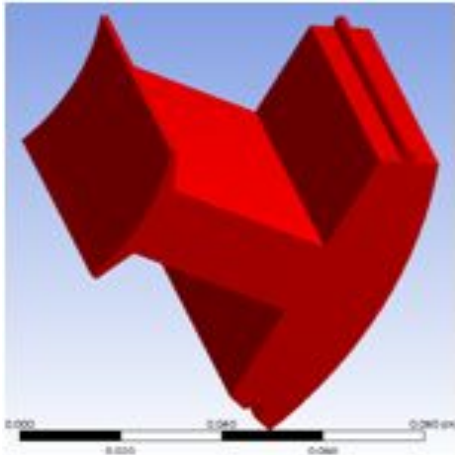
온도는 해석조건에 따른 모델의 전체 온도분포를 확인할 수 있다. Fig. 4.1 ~ Fig. 4.11은 BLDC core A-type과 B-type의 열전달해석 진행과정을 보여주고 있다. 이 과정을 통해서 core 1000sec간 내외부의 온도 분포상태를 알아볼 수 있으며 제품의 결함이 발생하기 쉬운 위치를 찾아 낼 수 있다. 해석결과에서 알 수 있듯이 B-type의 BLDC core 가 A-type에 비해 온도 분포가 급격하게 변화함을 볼 수 있다. 특히 rotor부의 두께가 2mm 안 짊되는 부분의 열거동이 core 강도 설계에 중요한 변수임을 찾을 수가 있다. 1000sec을 10step으로 나누고 온도분포를 확인하였다<sup>(23 ~ 25)</sup>.



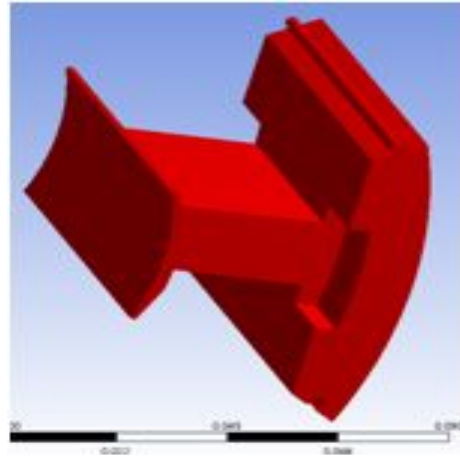
(a) A-type

(b) B-type

Fig. 4.1 Transient thermal temperature distribution

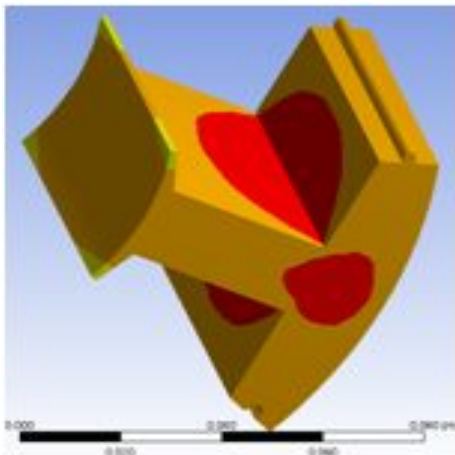


(a) A-type

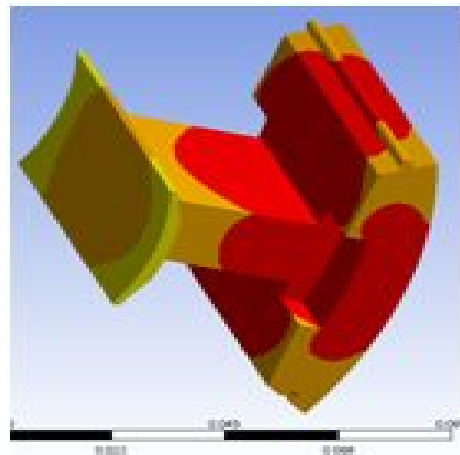


(b) B-type

Fig. 4.2 Temperature distribution results 1sec

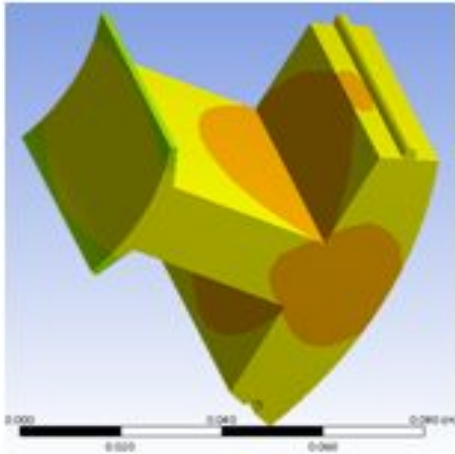


(a) A-type

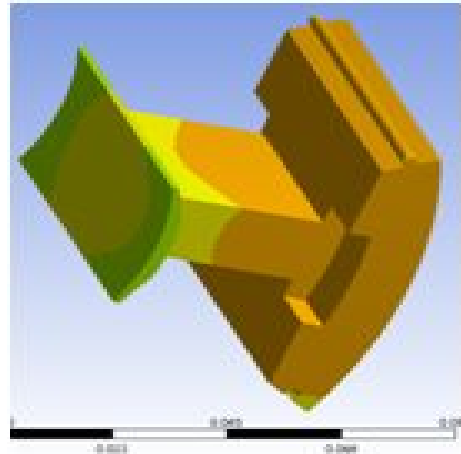


(b) B-type

Fig. 4.3 Temperature distribution results 111sec

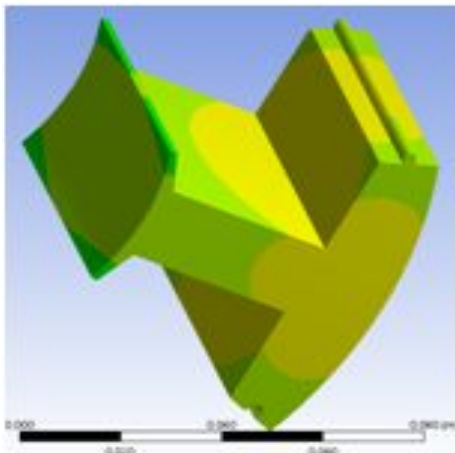


(a) A-type

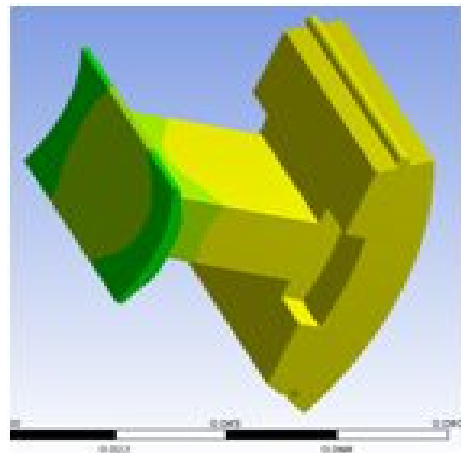


(b) B-type

Fig. 4.4 Temperature distribution results 222sec

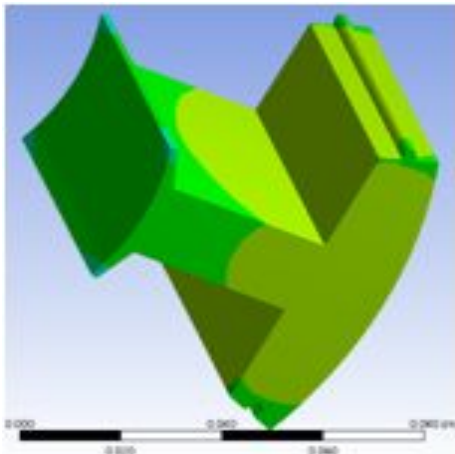


(a) A-type

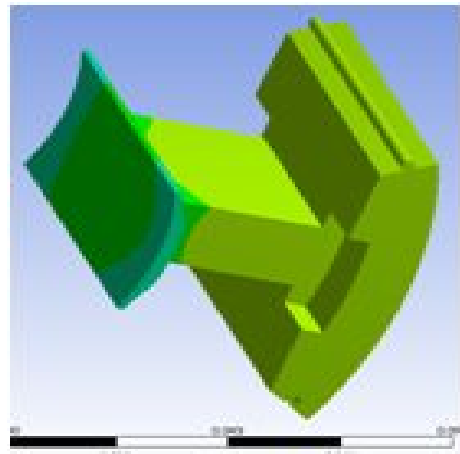


(b) B-type

Fig. 4.5 Temperature distribution results 333sec

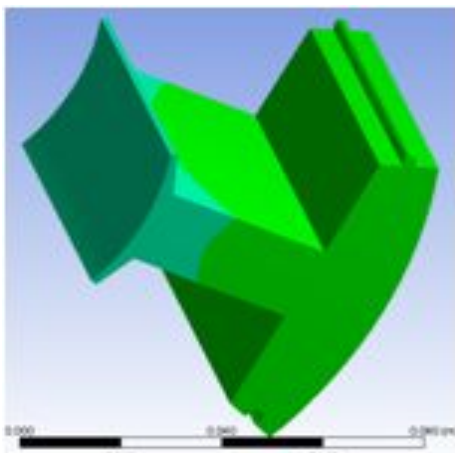


(a) A-type

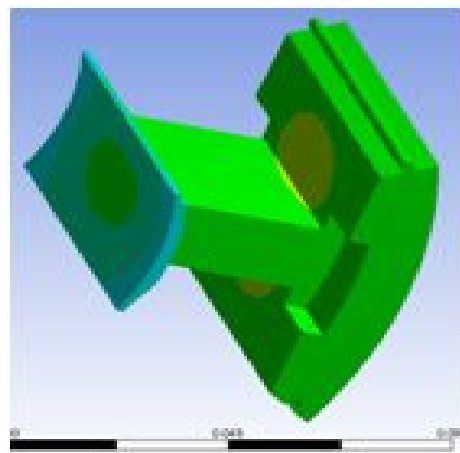


(b) B-type

Fig. 4.6 Temperature distribution results 444sec

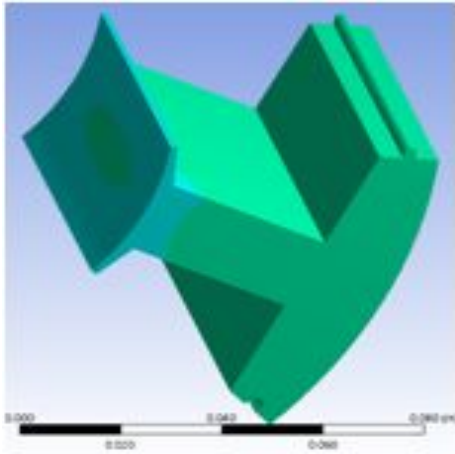


(a) A-type

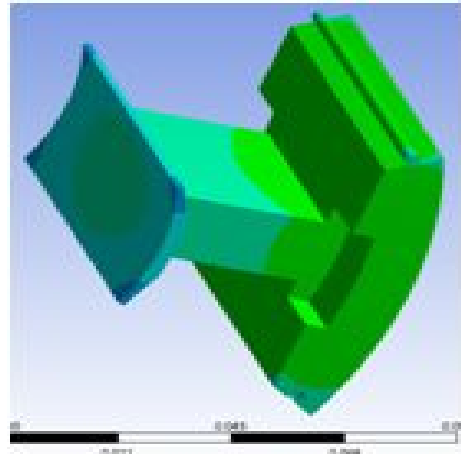


(b) B-type

Fig. 4.7 Temperature distribution results 555sec

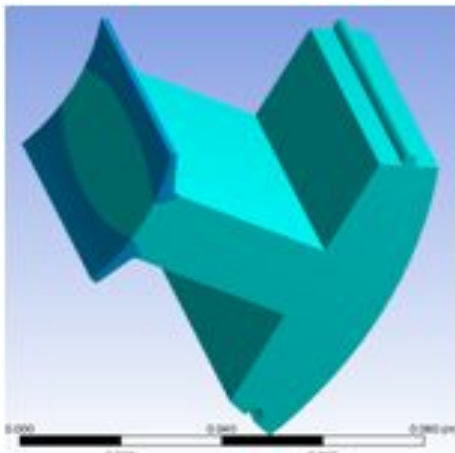


(a) A-type

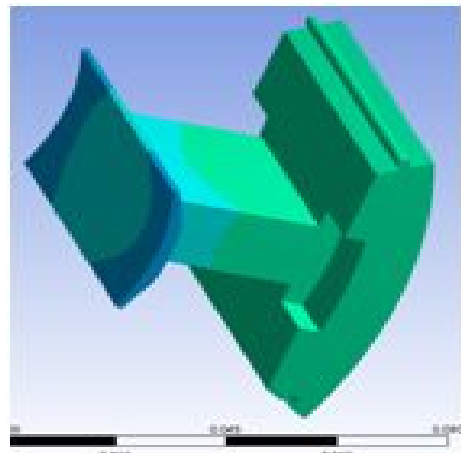


(b) B-type

Fig. 4.8 Temperature distribution results 666sec

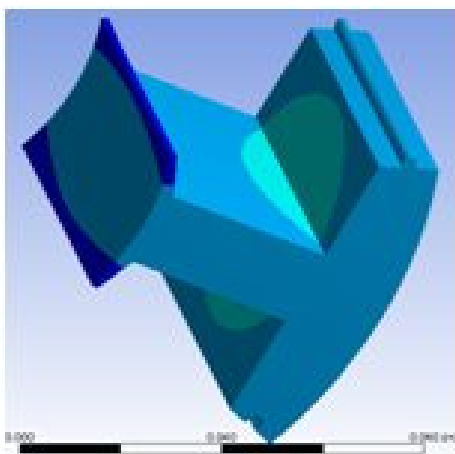


(a) A-type

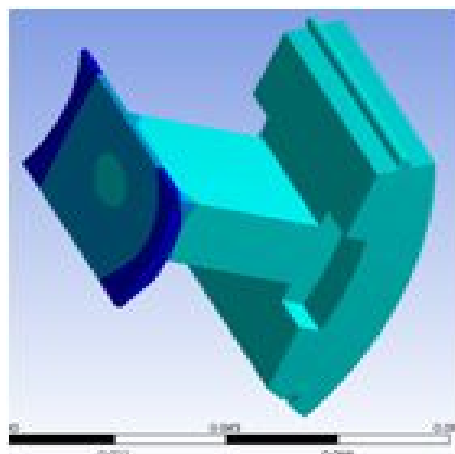


(b) B-type

Fig. 4.9 Temperature distribution results 777sec

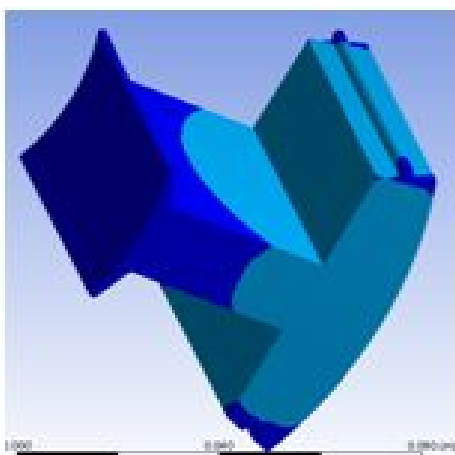


(a) A-type

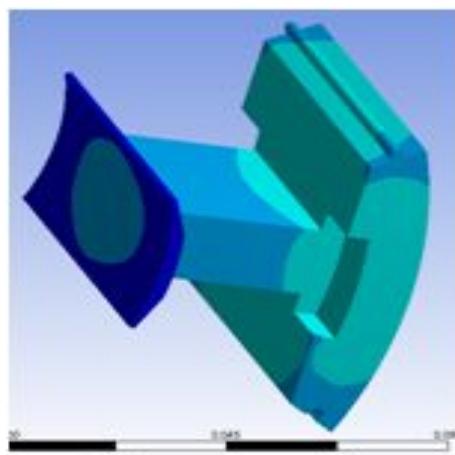


(b) B-type

Fig. 4.10 Temperature distribution results 888sec



(a) A-type



(b) B-type

Fig. 4.11 Temperature distribution results 1000sec

Fig. 4.12는 시간에 따른 온도분포 그래프 Table 4.1는 A-type과 B-type의 온도의 최고값과 최저값을 시간때 별로 나타내주고 있다. 1000sec 때에 A-type의 최대값은 117.71℃, 최저값은 111.48℃로 A-type의 최대값과 최저값이 114.19℃와 102℃로 차이가 9℃로 BLDC core를 B-type으로 교체하여도 형상변경에 따른 온도분포에 따른 열거동의 부품 건전성에는 이상이 없을 것으로 사료된다.

Time(s)	A case(℃)		B case(℃)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
0.1	150	150	150	150
10	147.6	149.9	147.3	149.9
20	146.1	149.7	145.3	149.7
50	143.7	148.9	141.2	148.8
140	139.2	145.8	134.0	145.4
240	135.2	142.3	128.4	141.5
340	131.6	138.8	123.8	137.5
440	128.2	135.3	119.8	133.7
540	124.9	132.0	116.2	129.9
640	121.8	128.7	112.8	126.3
740	118.8	125.5	109.6	122.8
840	115.9	122.5	106.6	119.4
940	113.1	119.5	103.7	116.1
1000	111.5	117.7	102.0	114.2

Table 4.1 Transient thermal temperature results

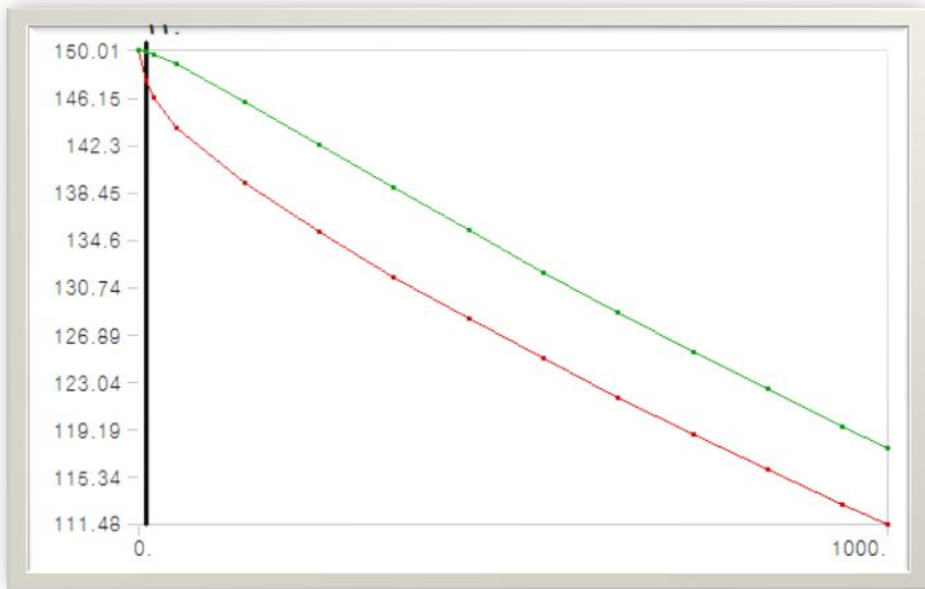


Fig. 4.12 Transient Thermal temperature A-type results

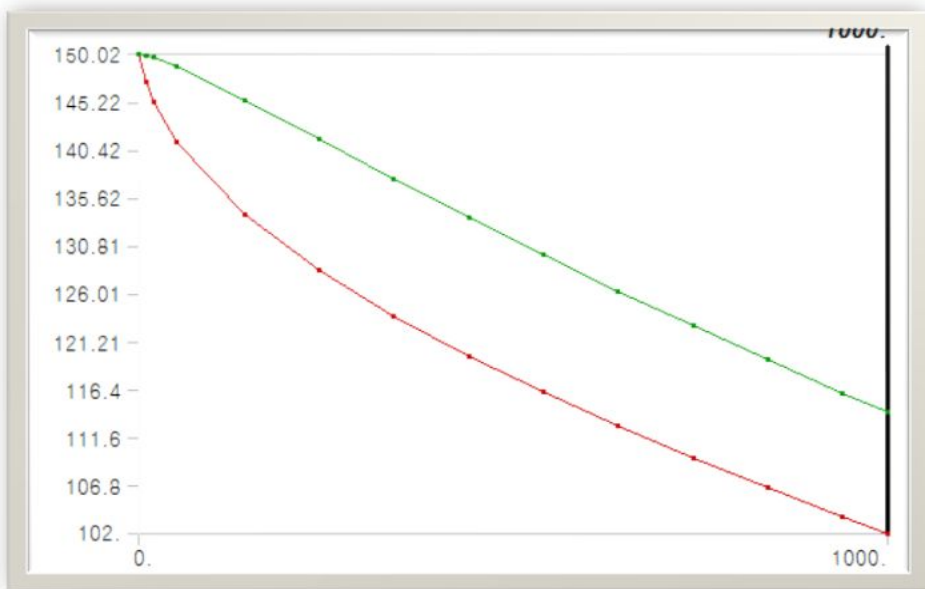


Fig. 4.13 Transient Thermal temperature B-type results



## 4.2 열전달 Total heat flux 해석

### 1. Vector display 결과

Heat flux는 단위면적에 대한 단위시간의 열에너지로서 해석조건에 따른 전체 Heat flux분포를 확인할 수 있는 것이 Total heat flux 이다. Fig. 4.13 ~ Fig. 4.22는 core A-type과 B-type의 열전달해석 진행과정을 보여주고 있다<sup>(29 ~ 30)</sup>.

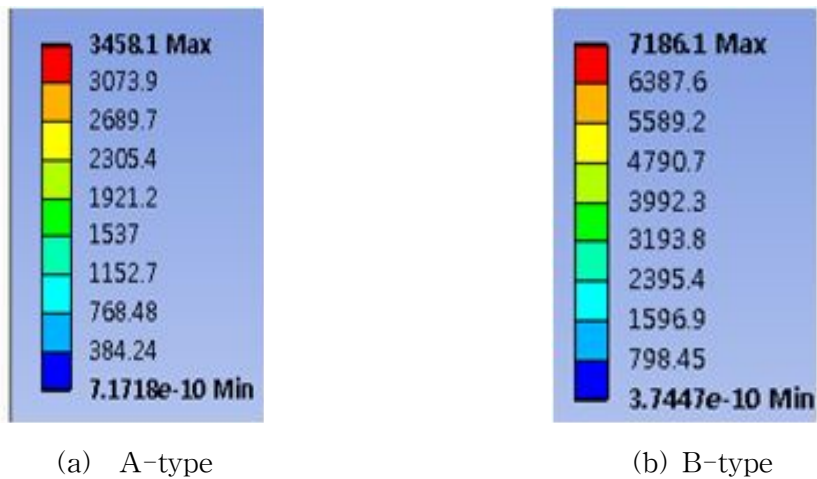
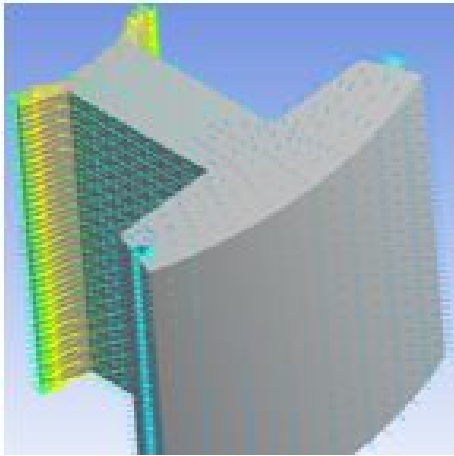
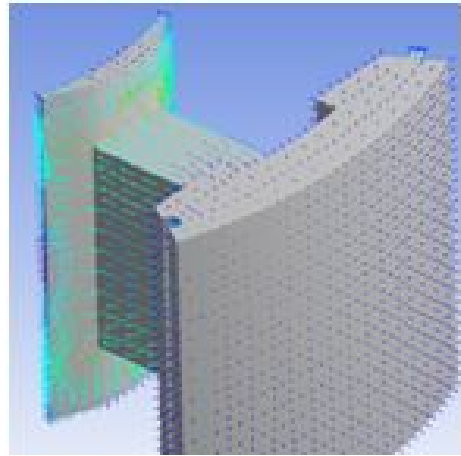


Fig. 4.14 Transient thermal total heat flux distribution

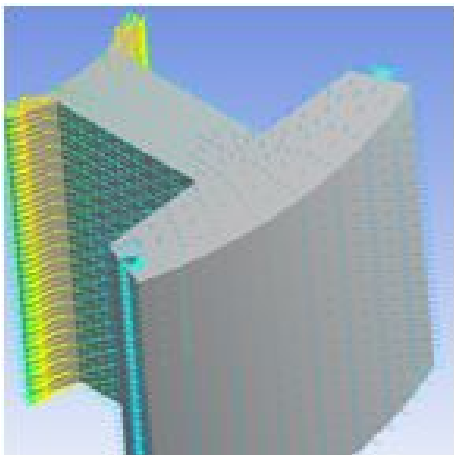


(a) A-type

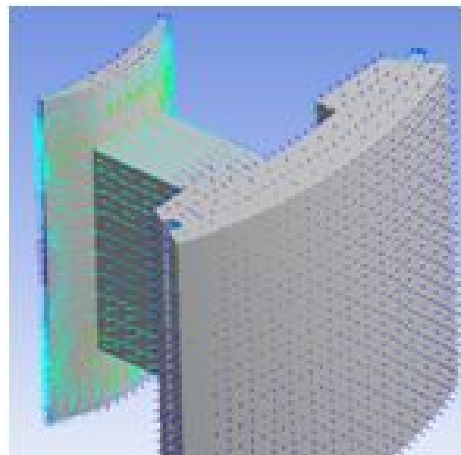


(b) B-type

Fig. 4.15 Total heat flux distribution results 1000sec

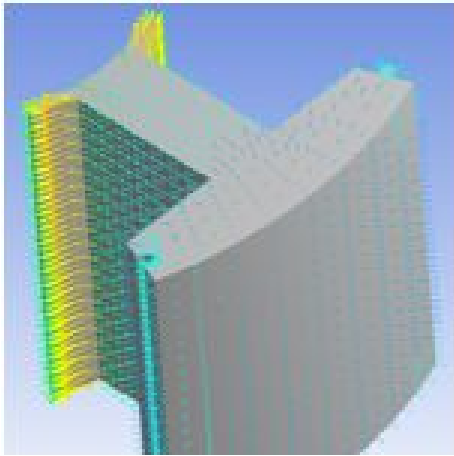


(a) A-type

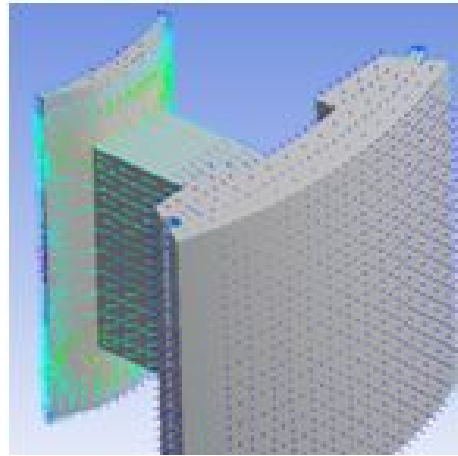


(b) B-type

Fig. 4.16 Total heat flux distribution results 888sec

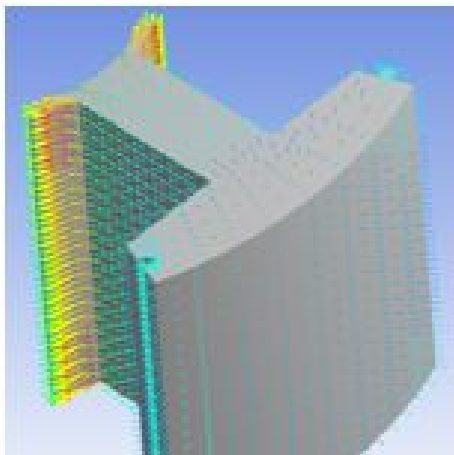


(a) A-type

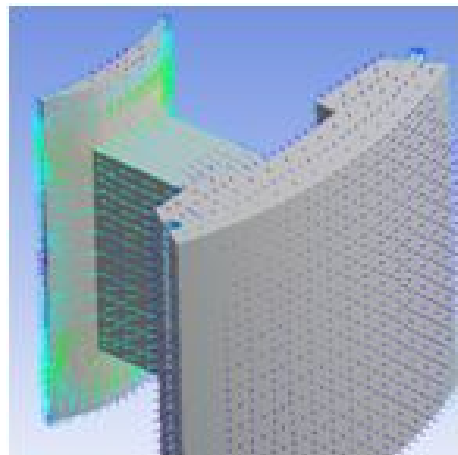


(b) B-type

Fig. 4.17 Total heat flux distribution results 777sec

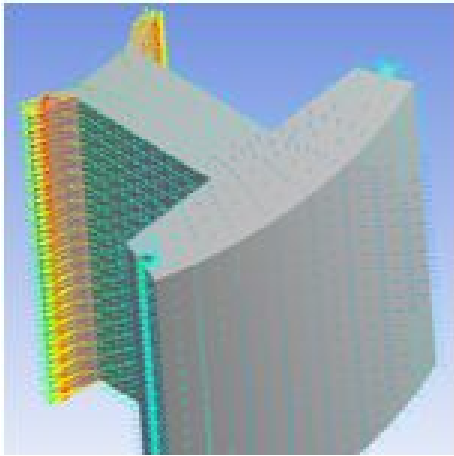


(a) A-type

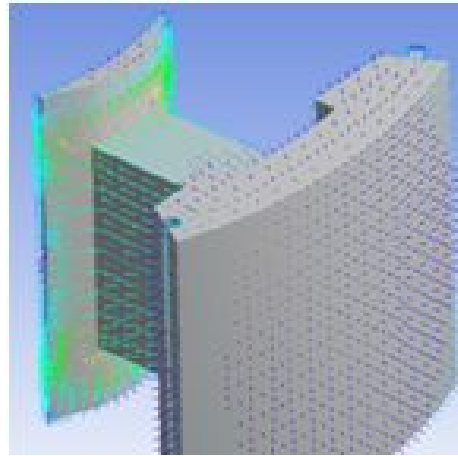


(b) B-type

Fig. 4.18 Total heat flux distribution results 666sec

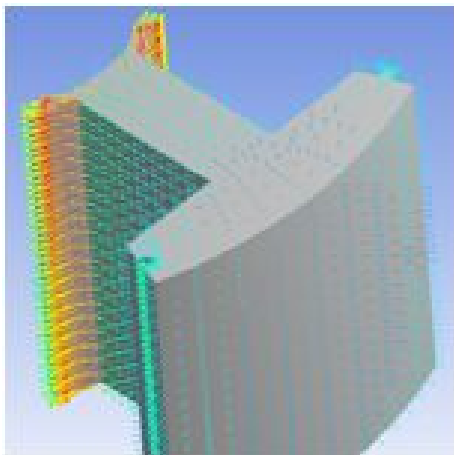


(a) A-type

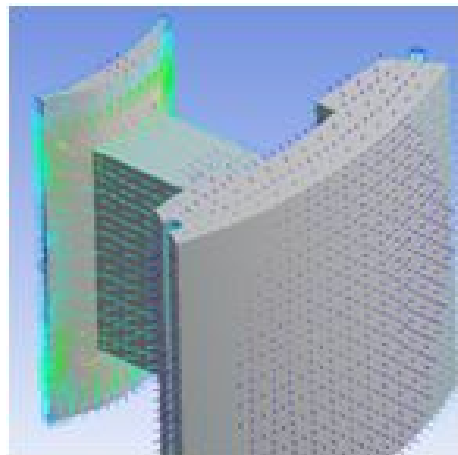


(b) B-type

Fig. 4.19 Total heat flux distribution results 555sec

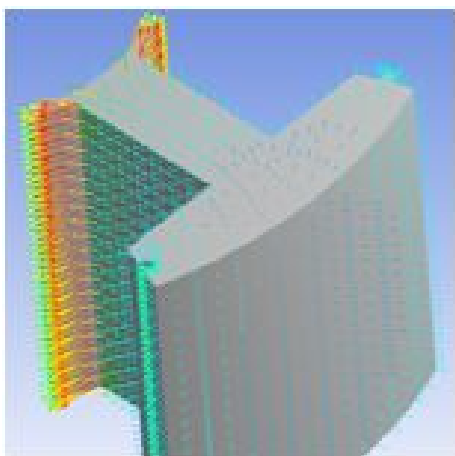


(a) A-type

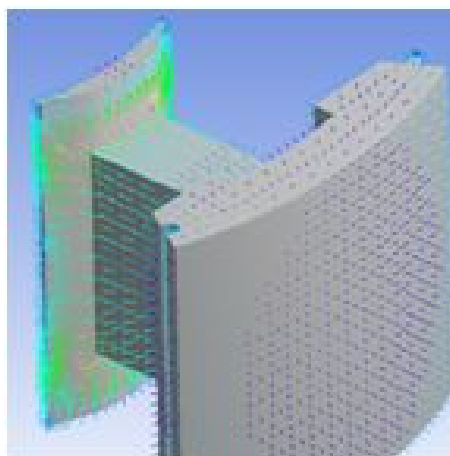


(b) B-type

Fig. 4.20 Total heat flux distribution results 444sec

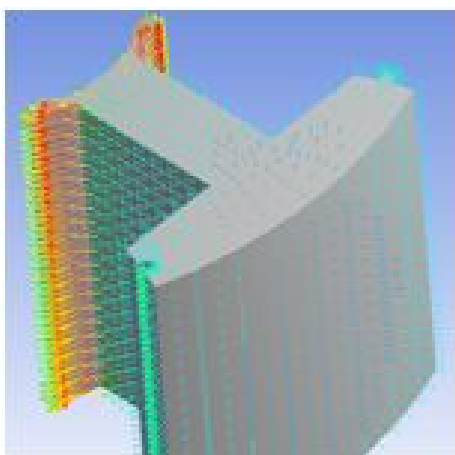


(a) A-type

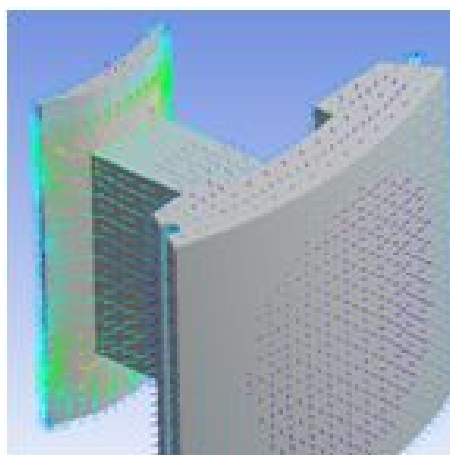


(b) B-type

Fig. 4.21 Total heat flux distribution results 333sec

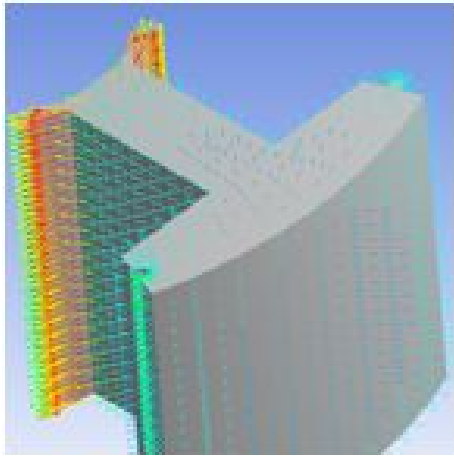


(a) A-type

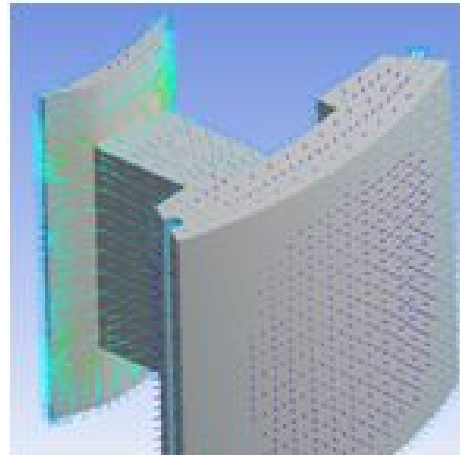


(b) B-type

Fig. 4.22 Total heat flux distribution results 222sec



(a) A-type



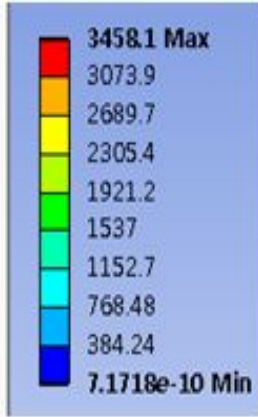
(b) B-type

Fig. 4.23 Total heat flux distribution results 111sec

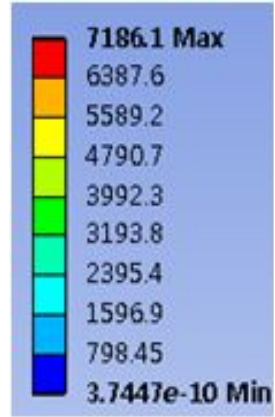
해석결과에서 알 수 있듯이 B-type의 BLDC core 가 A-type에 비해 rotor 부의 두께가 2mm 안 꺾이는 부분에서 A-type과 달리 좌우방향이 아닌 좌우상하 방향으로 heat flux 분포가 시간에 따라 변하고 있으므로, heat flux의 영향이 분산됨에 따라 부품의 건전성 부분에는 B-type의 BLDC core의 품질이 우수하다고 사려 된다.

## 2. Contour Display 결과

Fig. 4.23~ Fig. 4.32는 total heat flux 해석결과 값을 그래픽 화면에서 contour 형식으로 보여주고 있어 벡터 방식과 더불어 해석 결과를 확인하는데 도움이 된다.

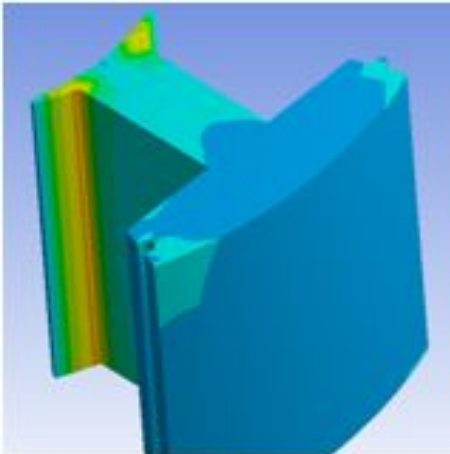


(a) A-type

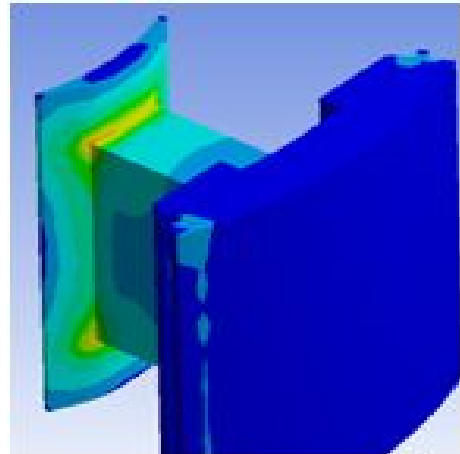


(b) B-type

Fig. 4.24 Transient thermal total heat flux distribution

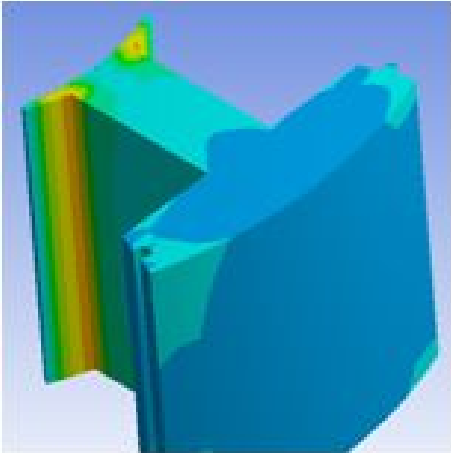


(a) A-type

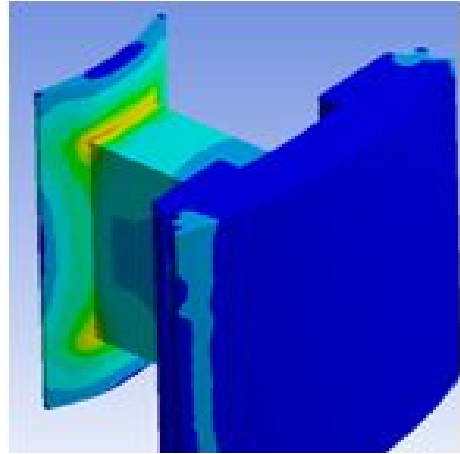


(b) B-type

Fig. 4.25 Total heat flux distribution results 1000sec

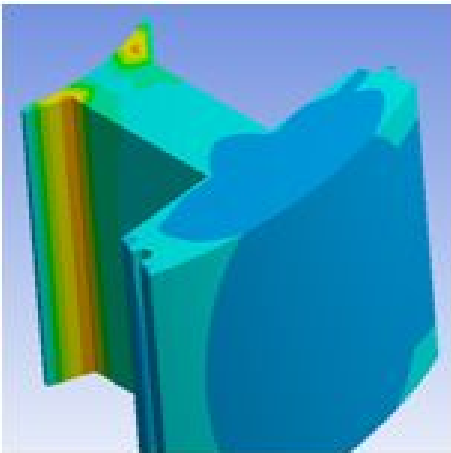


(a) A-type

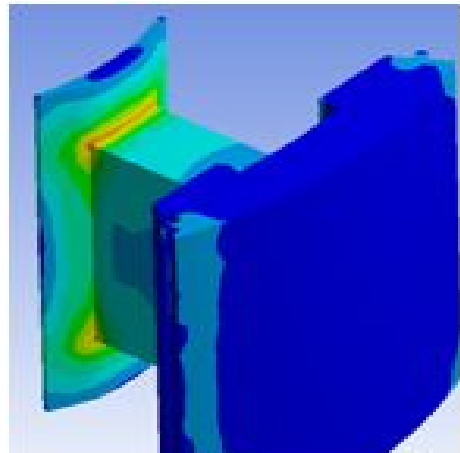


(b) B-type

Fig. 4.26 Total heat flux distribution results 888sec



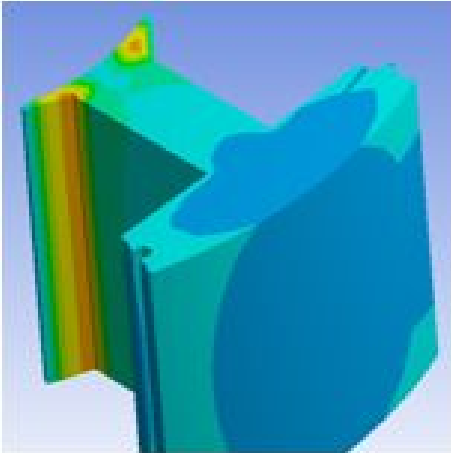
(a) A-type



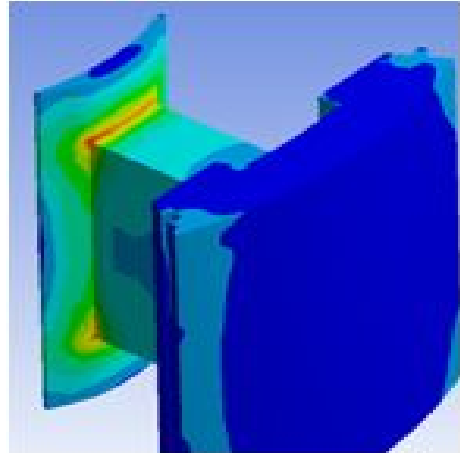
(b) B-type

Fig. 4.27 Total heat flux distribution results 777sec



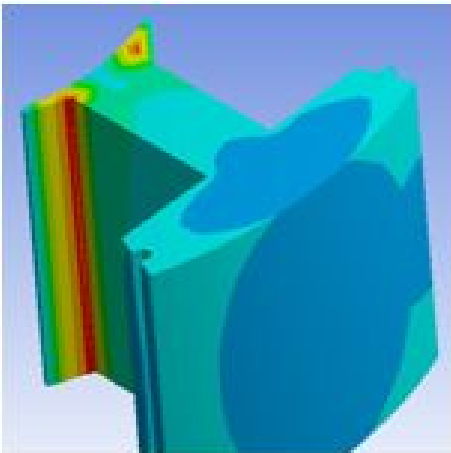


(a) A-type

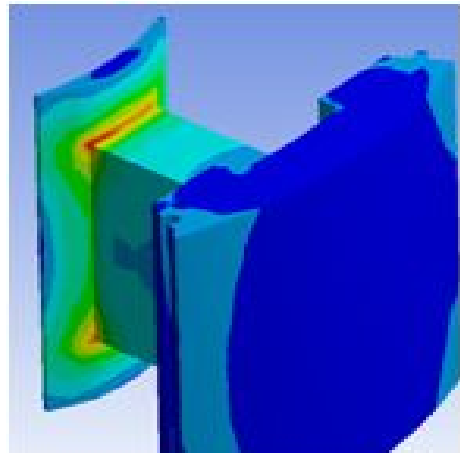


(b) B-type

Fig. 4.28 Total heat flux distribution results 666sec

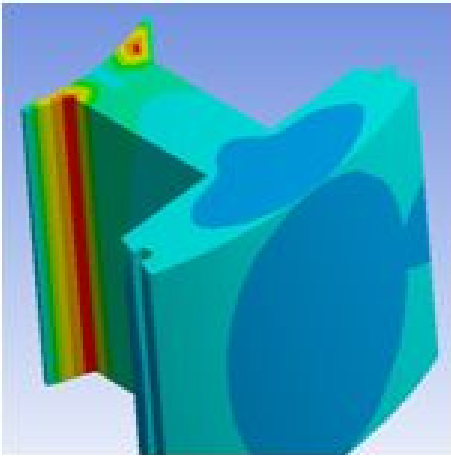


(a) A-type

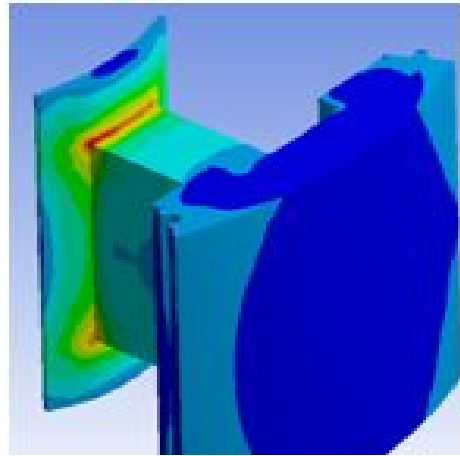


(b) B-type

Fig. 4.29 Total heat flux distribution results 555sec

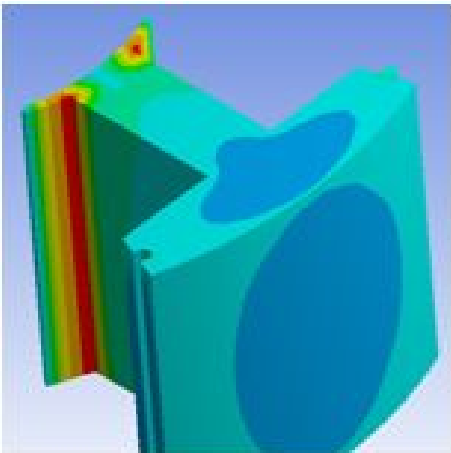


(a) A-type

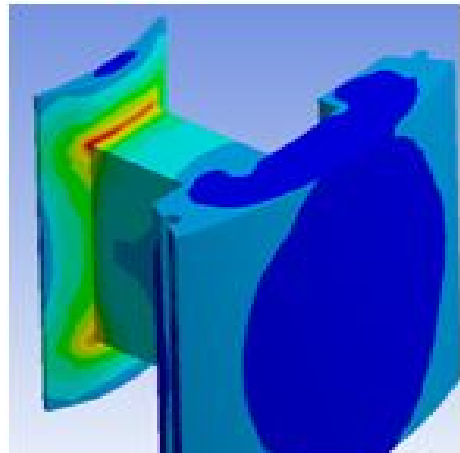


(b) B-type

Fig. 4.30 Total heat flux distribution results 444sec

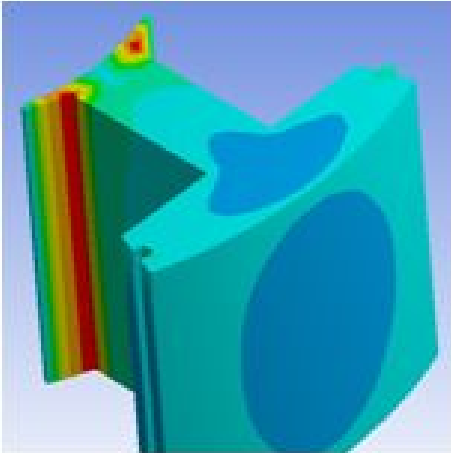


(a) A-type

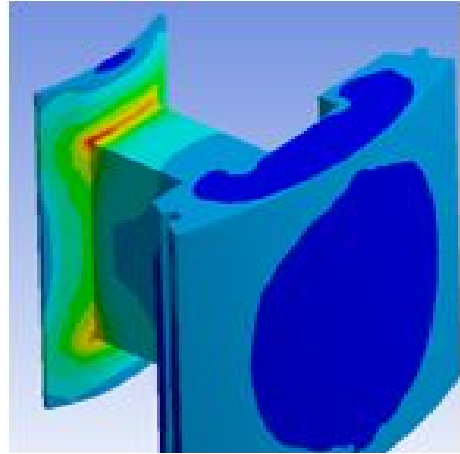


(b) B-type

Fig. 4.31 Total heat flux distribution results 333sec

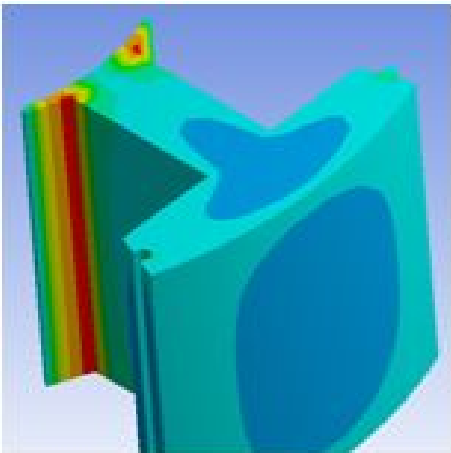


(a) A-type

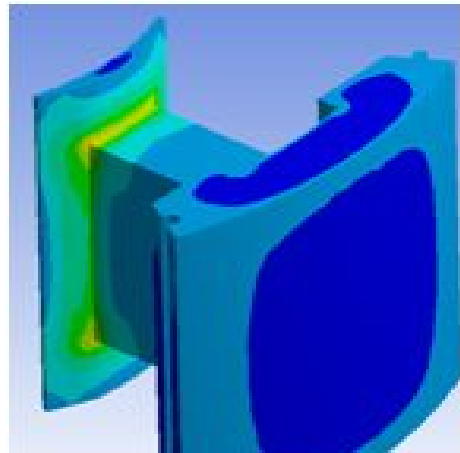


(b) B-type

Fig. 4.32 Total heat flux distribution results 222sec



(a) A-type



(b) B-type

Fig. 4.33 Total heat flux distribution results 111sec

Fig. 4.33은 시간에 따른 heat flux 분포 그래프, Table 4.2은 A-type과 B-type의 heat flux의 최고값, 최저값을 시간때 별로 나타내주고 있다. 각 시간 때에 A-type의 최대값보다 B-type의 최대값과 두 배 이상 큰 결과를 얻었다. BLDC core를 B-type으로 교체하여도 형상변경에 따른 heat flux 분포에 따른 열 거동의 부품 건전성에는 이상이 없을 것으로 사료된다.

Time(s)	A case		B case	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1	0.093	778	0.039	990
10	26	1711	16	1524
20	42	2478	31	2462
50	55	3188	38	4384
140	53	3468	46	6380
240	25	3456	44	7062
340	19	3381	49	7195
440	37	3292	41	7122
540	49	3198	50	6965
640	55	3104	54	6775
740	51	3011	56	6571
840	48	2921	49	6362
940	45	2832	44	6153
1000	43	2780	42	6029

Table 4.2 Transient thermal total heat flux results

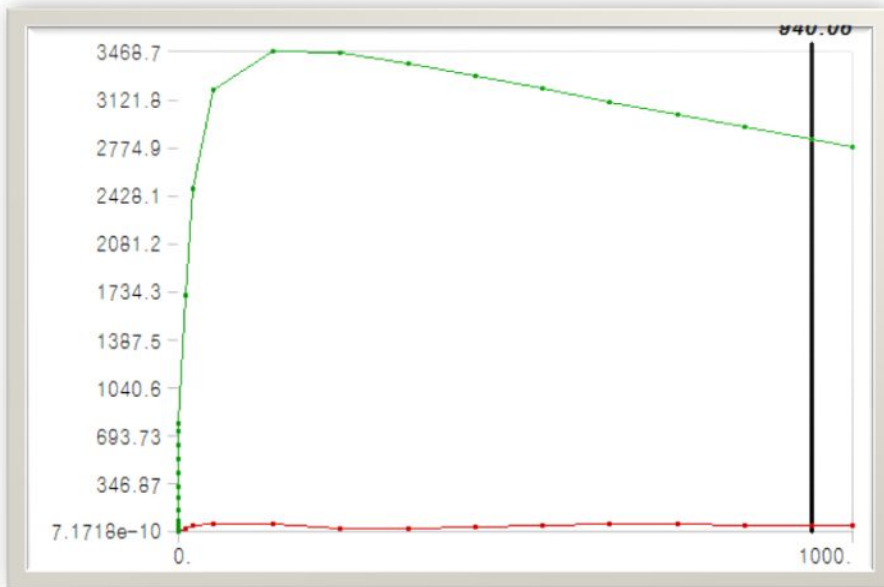


Fig. 4.34 Transient thermal total heat flux A-type results

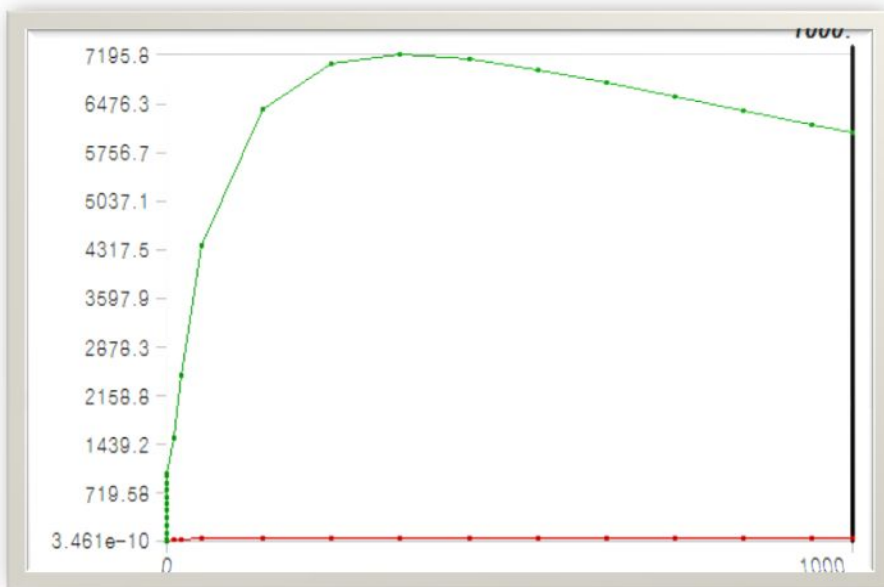


Fig. 4.35 Transient thermal total heat flux B-type results

### 4.3 Core 성형밀도결과 분석

#### 1. Core 분말압축 성형

Fig. 4.34는 분말압축 성형기에서 A-type과 B-type의 core를 성형하는 것을 보여 주고 있다. Fig. 4.35는 분할 형 코어를 조립한 stator를 보여준다 (17 ~ 18).

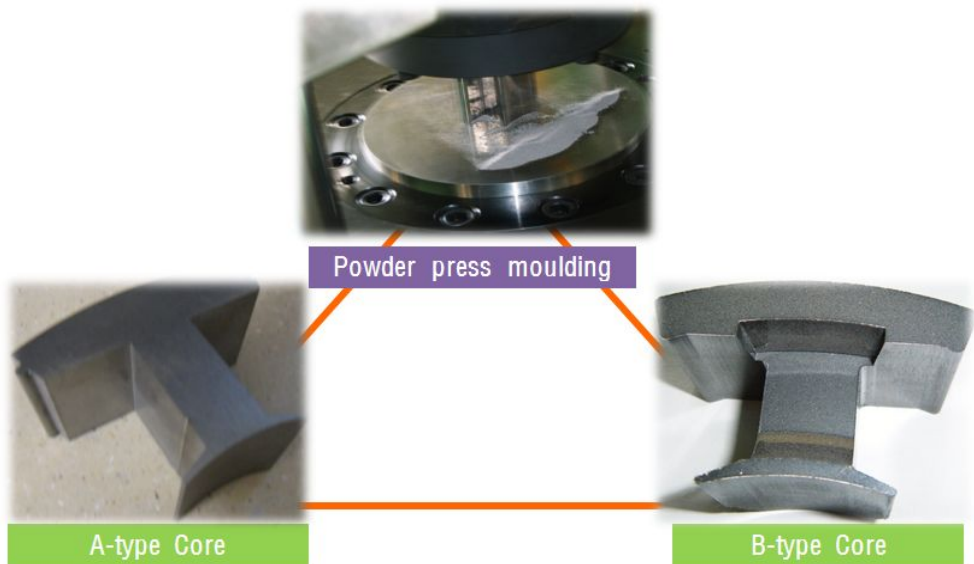


Fig. 4.36 Core manufacture and moulding part

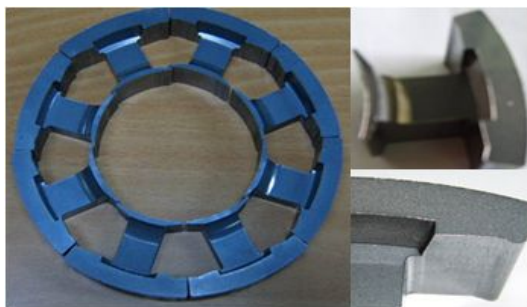


Fig. 4.37 Stator assembled moulding part

## 2. BLDC Core 밀도 측정

물질은 질량과 공간을 차지하고 있기 때문에 각 물질이 차지하는 일정한 부피 중에 포함되는 질량을 나타냄으로서 물질을 서로 비교하는 것이 가능하다. 물질의 밀도는 그 물질의 질량과 부피와의 비를 말하며, 단위는  $\text{g/cm}^3$ 로 표시된다. Table 4.3은 랜덤으로 샘플링한 A-type과 B-type의 BLDC core를 밀도 실험한 결과 값을 보여주고 있고, A-type과 B-type 모두 측정오차 범위 내에 평균  $7.2\text{g/cm}^3$ 와  $7.16\text{g/cm}^3$ 의 밀도 값이 나와 희토류영구자석의 밀도 범위인  $7.2\text{g/cm}^3 \sim 7.5\text{g/cm}^3$ 에 충족함을 알 수 있었다.<sup>(15 ~ 18)</sup>

No.	A-type ( $\text{g/cm}^3$ )	B-type ( $\text{g/cm}^3$ )
1	7.1	7.0
2	7.3	7.2
3	7.2	7.2
4	7.2	7.2
5	7.2	7.2
Average	7.20	7.16

Table 4.3 A-type and B-type core molding density

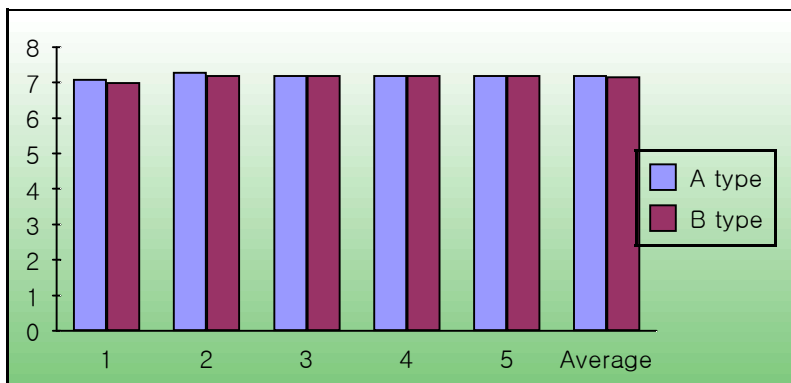
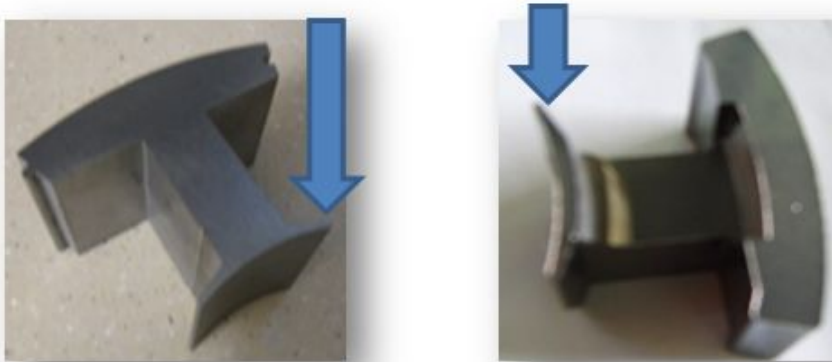


Fig. 4.38 Measurement results to the density test

## 4.4 Core 성형 표면경도 결과 분석

Fig. 4.37에서 화살표 방향과 같이 rotor 위치와 가까운 부위의 시험편을 채취하여 비커스경도 시험을 하였다<sup>(15~16)</sup>.



(a) A-type

(b) B-type

Fig. 4.39 HV hardness test zone

No.	A type	B type
1	588	577
2	592	582
3	576	579
4	592	572
5	584	583
Average	586.40	578.60

Table 4.4 Hardness test results



그 결과는 Table 4.4와 Fig. 4.37 같다. A-type과 B-type 경도 시험 결과 A-type은 586.4, B-type은 578.6로 B-type이 A-type 보다 7.8 작게 나왔다. 약간의 미소한 차이가 있는 것은 측정 오차에 의한 것으로 판단된다. 희토류 영구자석중 대표적인 Sm-Co영구자석은 경도 Hv가 550~600 네오듦자석은 Hv가 560~650이다. 이번 경도 실험을 통해서 개량된 B-type의 BLDC core의 취약부위의 경도 값이 기존 core와 오차값 범위 내에서 미소한 차이만 보였으면 네오듦 자석의 데이터 값 범위에도 높게 측정되었음을 정확히 알 수 있었다. 분할코어 방식으로 중국이 거의 독점하며 계속 값이 급속도로 오르고 있는 시점에 희토류금속을 중량을 줄이는 최적형상으로 제작하게 되어 현장에서는 제품의 신뢰성과 가격측면에서 이점을 가질 것으로 판단한다.

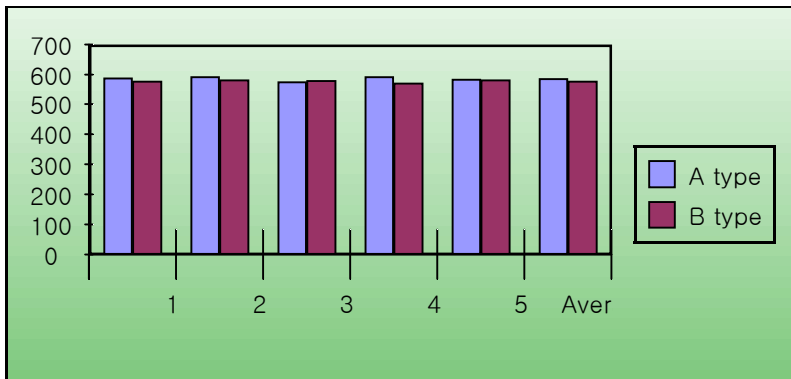


Fig. 4.40 Measurement results to the HV Hardness test

## 5장 결론

본 연구에서는 전기자동차 구동시스템인 BLDC motor core 부를 분할 가압 성형하여 제작하고, 기존에 개발된 BLDC core 와 개선된 BLDC core를 3차원 설계프로그램인 CATIA V5 R18을 이용하여 모델링하고 Ansys Workbench R13으로 과도상태 열전달 해석을 수행하여 열 거동에 따른 부품의 건전성 평가 및 최적화 설계를 하였다. 분말 압축성형을 통한 core를 성형하고 샘플링 하여 밀도와 경도 측정을 하였다. 따라서 본 연구를 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 3차원 설계 프로그램인 CATIA R18을 이용하여 중량 절감 최적화 모델링으로 기존 BLDC core의 질량 1.15kg에서 개선된 core의 질량을 0.99kg으로 경량화 설계 하였다.
2. Ansys Workbench R13을 이용하여 다수의 3D모델들의 과도상태 열전달 해석결과 전체적으로 BLDC core의 rotor와 가까운 쪽 노치부의 온도분포 변화가 core주위온도분포 변화보다 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 이러한 해석결과를 토대로 과도상태 열전달 해석을 수행하여 열 거동 및 Core의 건전성 분석 작업을 통해 중량이 감소된 최적화 BLDC motor core형상 도면화 작업을 수행 완료하였다.
3. 성형된 A-type 과 B-type의 시험편을 랜덤으로 추출하여 밀도 실험을 한 결과 A-type 과 B-type 모두 성형밀도 평균  $7.2\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 같은 수치의 데이터 값이 측정되어 희토류 영구자석의 평균밀도인  $7.2\text{g}/\text{cm}^3 \sim 7.5\text{g}/\text{cm}^3$ 에 근접하여 분말 성형 능력이 양호함을 알 수 있었다.
4. A-type과 B-type 경도 실험을 한 결과 A-type은  $H_v=586.4$ , B-type은  $H_v=578.6$ 로 B-type이 A-type보다  $H_v=7.8$  낮게 측정되었다. 희토류 영구자석 중 대표적인 네오뎀 자석은  $H_v$ 값이 560~650으로 볼 때 측정오차를 감안한

경우 고려 대상 이었던 rotor 부분쪽 노치부 경도가 네오뎴 자석 경도 범위 안에 들어 개선된 부품의 상대적 기계적 성질이 양호함을 알 수 있었다.

본 연구 개발로 BLDC core를 생산현장에 적용하면 생산원가 5%이상 절감할 수 있을 것으로 판단되며, 분할 압축코어 방식으로 모터제작 생산시간을 5%이상 줄일 수 있었다. 모터 중량을 2% 감소시켜 BLDC 모터 경량화와 생산공정의 단순화 추세에 따른 기업의 어려움을 해결 할 수 있었다. 또한 BLDC core의 열 거동 관한 전체적인 경향을 해석 하므로써 현장에서 모터를 설계하는 엔지니어에게 실질적인 도움이 될 것이라 사료 되고, 향후 전기자동차 보급에 따른 고효율 모터생산에 일조 할 것으로 사료된다.

## REFERENCES

1. MATLAB 활용 전기자동차, 박한웅, 아진, 2008.
2. Hyun, G. H, and Son, B. G, 전기자동차의 원리와 응용, 미학사, pp.273 ~ 295, 2005.
3. Hwang, T. K., Rhee, S.H., Kim, D.R. and Moon, S.I., "A Study on the Nondestructive Test Method for Adhesively Bonded Joint in Motor case Assembly", Journal Of the KSNT, Vol. 26, No. 5, pp. 343 ~ 352, 2006.
4. Evaluation of structural Characteristic and Integrity for Rocket Motor Case according to Dome Type", Journal of the KSPE, Proceedings of the KSPE Spring Conference, pp.257 ~ 262, 2009.
5. Y. G. M. Ehsani, S. E. Gay and A. Emadi, "Mordern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design", CRC Press, 2005.
6. Brushless Motors ATS-ELC-1-2000, 산업자원부 기술표준원, 2000.
7. D. Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", 2003.
8. B. Stumberger, et al., "Performance comparison of three-phase flux reversal permanent magnet motors in BLDC and BLAC operation mode", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 320, pp. E896 ~ E900, Oct 2008.
9. Jang, G. H., and Chang, J. H., "Numerical analysis of the eletromechanically coupled magnetic field in brushless DC motor", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 7, NO. 2, pp.1223 ~ 1225, 2001.
10. D. Ishak, Z.Q. Zhu, D. Howe, "Comparative Study of Permanent Magnet Brushless Motors with All Teeth and Alternative Teeth Winding", IEE International conference of Power Electronics and Electrical Machines(PEMD), Edinburgh, United Kingdom, 2004.
11. 김기찬, "EV/HEV용 매입형 영구자석 동기전동기의 최적 설계 및 제어 특

- 성연구”, 학위논문(박사), vol. 한양대학교 대학원, 2008.
12. Duane C. Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", McGraw-Hill, pp.86~89, 1993.
  13. Hendershot, J. R. and Miller, T.J.E., "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Magna Physics Publishing, Oxford, 1994.
  14. Ki-Jin Han et al., "Optimal Core Shape Design for Cogging Torque Reducing of Brushless DC Motor Using Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.36, No.4, pp.1927~1931, 2000.
  15. 정명식, "분말 재료의 압축성형 및 소결 공정의 유한요소해석", 학위논문(박사), vol. 서울대학교 대학원, 2010.
  16. 희토류 자원전쟁, 김동환, 미래의창, 2011.
  17. 초강력 영구자성체 [희토류철계 영구자석재료], 윤석길, 울산대학교 출판부, 2002.
  18. 자성재료학, 노태환, 두양사, 2006.
  19. A.J.DAY, "A finite element approach to drum brake analysis, 1999.
  20. S.Y.Kim, M. Phill, "Drum brake noise and vibration analysis", 1993.
  21. N. Rebelo, H. Rydstad and G. Schroder, "Simulation of material flow in closed-die forging by model techniques and rigid-plastic FEM, in numerical method in industrial forming process", Pineridge press, Swansea. U.K. pp.237~249, 1980.
  22. Peeters, F. J. H., "Thermal Analysis by means of Finite Element Methods", MARC Manual
  23. Swanson, J. ANSYS 12.0, ANSYS Inc., U.S.A. 2010.
  24. ANSYS User's Manual for Revision 11.0, ANSYS, Inc. 2006.
  25. ANSYS, Inc., Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench Release 12.0, 2009.
  26. Logan의 유한요소법 첫걸음, Daryl L. Logan 원저 신종계, 이용신, 조성욱 공역, 시그마프레스, 1998.
  27. 알기쉬운 유한요소해석, 구남서외 5명, (주)피어슨 에듀케이션 코리아.2001

28. ANSYS를 이용한 유한요소해석 3 Third Edition, Saeed Moaveni 지음, 방정선 옮김. 도서출판 ITC, 2008.
29. CONCEPTS AND APPLICATIONS OF FINITE ELEMENT ANALYSIS. FOURTH EDITION, Robert D Cook, David S. Malkus, Michael E. Plesha, Robert J. Witt. 2001.
30. Cengel 열전달 2nd Edition, 김유, 김경훈, 김병철, 김창녕, 유성연, 이종봉 공역, 2003.
31. K. Azar and J.E. Graebner, "Experimental Determination of Thermal Conductivity of Printed Wiring Boards", 1996.
32. Joonyun Kim and BoGwan Kim, "Thermal Analysis of Electronic Devices in an Onboard Unit Considering Thermal Conduction Environment", 2006.
33. Tunner CW, Klimas SJ, and Brideau MG, "Thermal resistance of steam-generator tube deposits under single-phase forced convection and flow-boiling heat transfer", Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.78, No.1, 53~60, 2000.
34. Yunas A.Cengel "Thermodynamics An Engineering Approach" MGH. P.821, 2003.
35. Frank P. Incropera. and David P. Dewitt "Introduction to Heat Transfer", Science & Technology of fourth edition, pp.2~9. P.834, 2001.
36. Ming, C. and Cheng, F. Y., "Steady-state and dynamic thermal models for heat flow analysis of silicon-on-insulator MOSFETs", Elsevier Ltd, 2004
37. Yuan, Z. X., Saniei, N. and Yan, X. T., "Turbulent heat transfer on the stationary disk in a rotor-stator system", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 2207~2218, 2003.
38. Madhavan, P. N. and Sastri, V. M. k., "Conjugate natural convection cooling of protruding heat sources mounted on a substrate placed inside an enclosure"; a parametric study, Computer methods in applied

- mechanics and engineering Vol. 188, pp.187~2002.
39. Deng, Q. H., Tang, G. F. and Ha, M. T., "Interaction between discrete heat sources in horizontal natural convection enclosures", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp.5117~5132, 2002.
  40. Holman, J.P,2005, *Heat transfer*, McGraw-Hill Education, 9th edition
  41. Kim, H.k, Oh, S.I, 1996, "Evaluation of heat transfer coefficient distribution by inverse analysis", *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.20, No.12, pp.3856~3870
  42. Kwak, H.S, Lee, S.E, Park, K.S, Kim, K, "A computational study on free convection for thermal performance evaluation of a SWNT thin-film heater", *Korean Society of Computational Fluids Engineering*, pp. 315~320, 2009.
  43. T. M. Huang, C. Gau and Win Aung, "Mixed convection flow and heat transfer in a heated vertical convergent channel", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 13, pp. 2445~2456, 1995.
  44. F. J. Higuera and Yu. S. Ryazantsev, "Natural convection flow due to a heat source in a vertical channel", *Int Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45. pp. 2207~2212., 2002.
  45. A. G. Fedorov and R. Viskanta, "Turbulent natural convection heat transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel-plate channel", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 16, pp. 3849~3860, 1997.
  46. N. K. Ghaddar and F. Theile, "Natural convection over a rotating cylinder heat source in rectangular enclosure", *Numerical Heat Transfer, Part A*, 26 pp. 701~717, 1994.
  47. W.T.Kim, K.S.Kim, " Forced Convective Cooling Characteristics with Stacked Modules of Multi-PCBs' in Telecommunication Cabinet", *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol.8, No.2, pp.230~239, 1996.