

산업용 112 FRAME 모터의 응력해석

Structural Analysis for Industrial 112 Frame Motor

우 회 석 김 연 달*
Woo, Hee-Suk Kim, Yeon-Dal

Abstract

Electro Electric Systems Division of HHI is developing new series of models for industrial mid/compact size motors to satisfy the demand of costumers. Various essential technologies are required for motors to support design technology on design and development stage.

Conventional motors have several things to analyze for mechanical strength and structural deformation during manufacturing process or operation. Therefore, the manufacturing cost will be reduced and the danger of accident during operation will be prevented by recognizing and revising the problems prior to actual manufacturing and operation.

112 Frame motor (3.7 kW) has been analyzed for this study and the basic analysis technology is eventually developed by analyzing other models gradually (sequence of 112, 135, 250, 200, 280, 225, 160, 180 Frame motors). Then, the developed technologies are established as main factors to support the motor design technology and competitive motors will be manufactured to satisfy the costumers.

1. 서 론

본 과제는 산업용 112 Frame 모터 구조물 (Frame & End Shield)의 강도를 해석함으로써 전동기의 재료 비 절감 가능성과 제작공정의 최소화 가능성을 찾아 볼 수 있다. 또한 이 과정에서 검증된 데이터를 참고로 신제품 개발시 개발제품의 사전 해석을 통해 응력 분포를 확인함으로써 제작시의 시행착오를 줄여 제작비를 절감 할 수 있도록 모델의 구조적 안전성을 평가할 수도 있다.

본 과제의 112 Frame 모터의 응력 해석은 Frame의 열에 의한 변형 또한 고려함으로 크게 열과 응력의 두 부분의 해석으로 나뉜다. 모터 내부의 열원에 의해 Stator 및 Frame의 변형을 해석하고 Frame에 영향을 끼치는 경계조건을 토대로 응력해석을 행한다.

해석을 위한 프로그램은 상용 유한요소 프로그램인 SolidWorks/CosmosWorks를 이용하여 각 단품의 3차원 형상화 및 FEM 해석을 하였다.

차후 이와 같은 기법을 기존의 다른 모델들에도 적용하여 모델의 제조공정 (열 박음, 억지 끼워 맞춤 등)의 응력해석을 통해 안전성을 평가할 수 있다.

* 비회원 · 현대중공업 (주) 연구원

2. 본 문

2.1 열변형 해석 (Thermal Analysis)

2.1.1 경계조건 (Boundary Conditions)

모델을 단순화하기 위해 최소의 단품으로 해석에 쓰인 Frame을 모델링 하였다. 효율적인 해석을 위해서 모델은 해석상에 지장이 없도록 Frame, End Shield, Stator, Bolt로 단순화하였으며 Stator의 경우 슬롯 홈을 없앤 평범한 Cylindrical Hollow로 가정하였다. 각 부품의 재질은 Frame과 End Shield는 Gray Cast Iron (회주철), Stator는 Alloy Steel, Bolt는 Plain Carbon Steel로 주어졌고 그 물성치는 다음과 같다.

Table 2.1 Properties of Materials

	E Young's Modulus [Pa]	ν Poisson's Ratio	ρ Density [Kgm/m ³]	α Thermal Expansion Coefficient [$^{\circ}$ Kelvin]	σ Tensile Strength [Pa]
Gray Cast Iron	6.6178e10	0.27	7159	1.188e-5	1.76e8
Alloy Steel	2.0681e11	0.28	7800.1	1.332e-5	7.2383e8
Plain Carbon Steel	2.0681e11	0.28	7800.1	1.33e-5	4.02e8

열변형 해석은 Stator 외면과 Frame 내면의 접촉면에서 어떤 변화가 일어나는가를 예측하는데 가장 큰 목적이 있으므로 해석을 위해 쓰인 Assembly는 Frame과 Stator로 이루어져 있다. 경계조건으로는 열원이 (Heat Source) Stator의 코일온도이므로 그 측정온도인 73.6 $^{\circ}$ C를 Stator 내면에 주었다. Stator 외면과 Frame 내면의 접촉면은 완전히 붙어 있다고 가정하였으므로 그 접촉면에는 Heat Flux가 13700 W/m²인 Conduction 조건을 주었고 Frame 외면과 Fin에는 Film Coefficient가 500 W/m²/K이고 Bulk Temperature가 20 $^{\circ}$ C인 Convection 조건을 주었다. Thermal analysis의 결과로는 열 분포도만을 얻을 수 있다. 따라서 그에 따른 변형을 보려면 모델의 어느 한 부분을 고정시키고 열응력을 Input Load로 해서 Static Analysis를 해야만 열응력에 의한 변형을 볼 수 있다. 따라서 모델에서 Foot의 8개의 Bolt Hole중 실제 Bolt를 조이는 바깥쪽 4개의 Hole을 고정해서 해석을 실행했다.

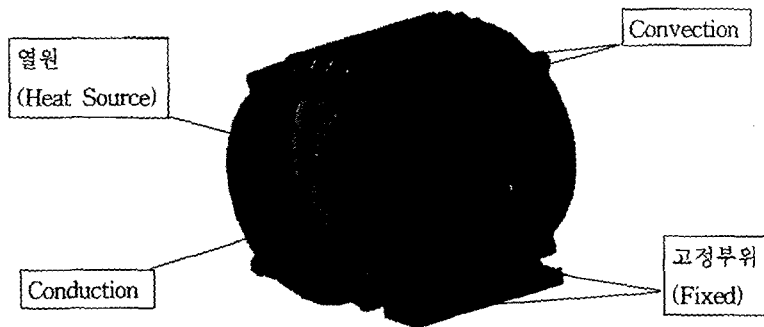


Figure 2.1 Boundary Conditions for Thermal Analysis

2.1.2 결과 분석 (Analysis of Results)

Figure 2.2는 열 조건에 의한 온도 분포도를 보여주고 있다. Stator 안쪽이 열원이고 Frame 외면의 Fin 사이로 Cooling Air가 통과하므로 온도 분포는 안쪽에서 바깥쪽으로 나갈수록 그 온도가 내려간다 (76.5 °C → 21.0 °C). 온도 분포는 색깔로서 표현되어 있으며 그 값은 그림의 우측에 나타나 있다. 이 결과 값은 열 응력을 해석하는데 Input Load로 쓰였다. 그 해석 결과로 얻어진 Stress Profile은 Figure 2.3에 Displacement Profile은 Figure 2.4에 나타났다. Stress Profile은 단계적으로 고정 부위에서 먼 쪽에서부터 가까이 갈수록 Stress가 점점 커졌고 Maximum Stress는 Bolt 체결 부위 (Bolt Hole) 주위에서 발생했다.

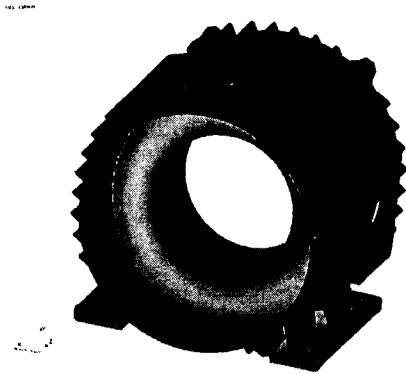


Figure 2.2 Temperature Profile

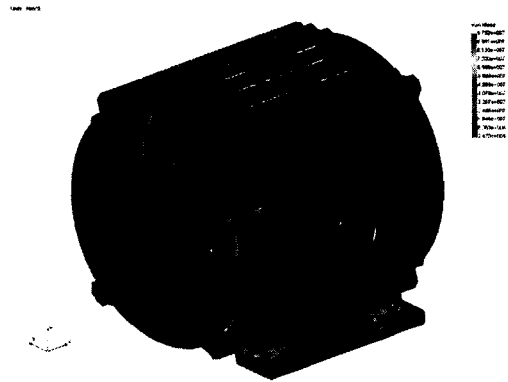
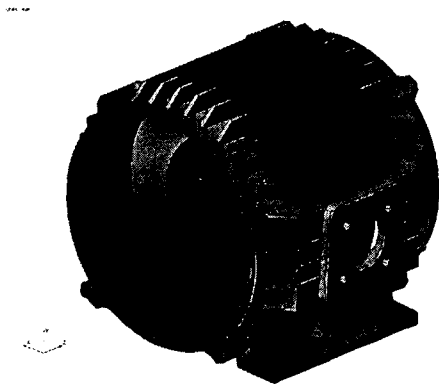
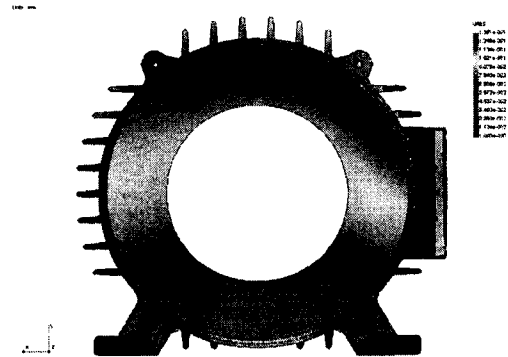


Figure 2.3 Stress Profile by Thermal Analysis



(a) Isometric View



(b) Front View

Figure 2.4 Displacement Profile by Thermal Analysis

Figure 2.4에서 보여지듯이 고정위치에서 멀어질수록 그 재질이 변위 할 수 있는 자유도가 높아지므로 Displacement가 점점 커진다. Maximum Displacement는 Frame 외면 중앙 윗 부분에서 0.136mm만큼 발생했다. Frame의 내면과 Stator 외면의 접면에서의 Displacement 또한 Maximum Displacement에 상응하는 0.130

mm 정도의 Displacement가 발생하였다.

2.2 응력 해석 (Stress Analysis)

2.2.1 경계조건 (Boundary Conditions)

열 해석에서와 같이 모델을 단순화하기 위해 최소의 단품으로 해석에 쓰인 Frame을 모델링 하였다. 응력 해석에 쓰인 모델은 열해석시 사용한 모델에 End Shield 와 Bolt를 더하여 Assemble되었다. Figure 2.5에서 보여지듯 Restraints로는 4개의 바깥쪽 Bolt Hole을 고정하였고 Stator의 외면과 Frame의 내면이 닿는 접면에 정격 Torque (19.5 Nm) 또는 그것의 6배에 해당하는 Torque를 (급가속/급제동시의 Torque) 주었고 Stator와 Frame이 접하는 면과 Stator와 Frame이 접하는 면에서의 공차에 의한 Pressure를 주었다. 그리고 마지막으로 자중을 주었다. 하지만 모델의 단순화를 위해 생략된 Rotor와 Shaft의 무게를 양쪽 End Shield의 Bearing 부에 그에 상응하는 무게를 주었다. (Drive side: 18 N, Non-Drive side: 18.4 N)

정격회전속도와 (1800 rpm) 파워에 (5 Hp) 의해 정격토크가 19.5 Nm로 계산되었고, 부품간 공차에 의한 Pressure 또한 수식에 의해서 구해졌다. 수식에 의해 계산한 결과 Stator 외면과 Frame 내면사이의 Pressure는 $2.037e6$ Pa, Frame과 End Shield 사이의 Pressure는 $238.354e3$ Pa로 계산되었다.

위의 모든 경계조건들은 Figure 2.5에서 보여지듯이 모델에 적용되었다.

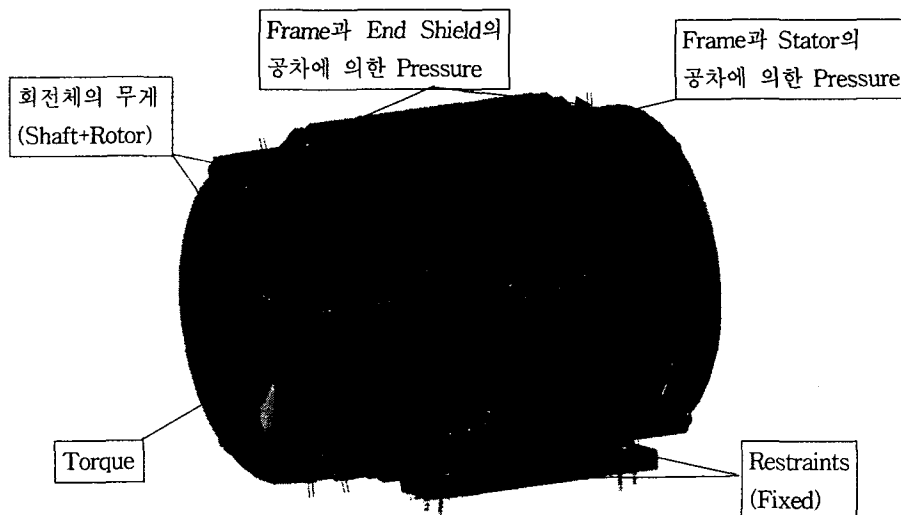


Figure 2.5 Boundary Conditions for Stress Analysis

2.2.2 결과분석 (Analysis of Results)

위와 같은 Boundary Condition과 정격토크로 해석한 결과 Figure 2.6과 같은 Stress Profile이 나타났다. 전체적인 Stress는 $8.451e4 \sim 5e7$ Pa 사이의 범위로 나타났다. 그리고 Gray Cast Iron의 Tensile Stress는 $1.76e8$ Pa 임으로 안전율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{안전율} = (\text{Tensile Stress}) / (\text{Maximum Stress}) = (1.76e8) / (5e7) = 3.5$$

Maximum Stress는 Bolt 체결부 주위에서 발생했다. 하지만 Frame의 전체적인 외면에서의 Stress는 $1e7$ Pa

이하였다. 따라서 Frame 외면에서의 안전율은 다음과 같이 계산되었다.

$$\text{안전율 (Frame 외면에서)} = (1.76e8) / (1e7) = 17.6$$

Frame 외면에서의 안전율은 Maximum Stress에서의 (Bolt 체결부) 안전율보다 높게 나타났으므로 Frame의 전체적인 외면은 안정적이다.

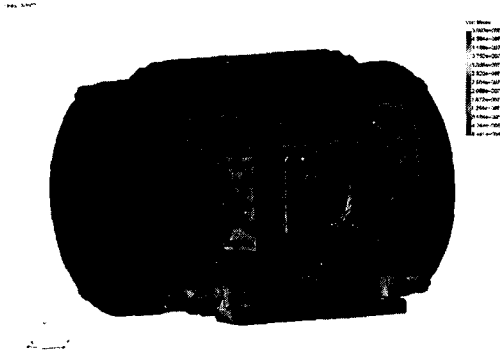


Figure 2.6 Stress Profile by Nominal Torque

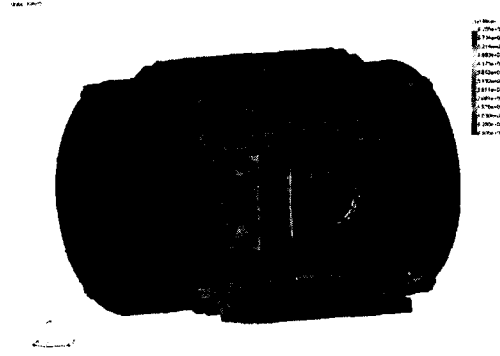


Figure 2.7 Stress Profile by 6T

위와 같은 방법으로 경계조건중 정격 토크를 (T) 급가속/급제동시의 토크로 (6T) 바꾸고 나머지 경계조건은 같게 Static Analysis를 실행한다. 그 결과로 Figure 2.7과 같은 Stress Profile을 얻을 수 있다. 지금까지는 열과 응력을 따로 해석했으나 실제로는 응력과 열팽창이 동시에 발생함으로 이에 대한 해석 또한 실행하였다. 경계조건으로는 응력해석과 열해석에 쓰인 경계조건과 동일한 경계조건을 주었다. 그러나 열/응력해석에 (Static + Thermal Analysis) 쓰인 모델에 End Shield가 Assemble 되어 있으므로 (열해석에 쓰인 모델은 Frame 과 Stator로만 이루어짐) Frame 외면에 주었던 Convection 조건을 End Shield의 외면에도 주었다. 응력해석의 경계조건은 이전의 응력해석에 쓰인 조건과 같다. 이와 같은 경계조건으로 해석한 결과 Figure 2.8 (a)와 같은 Stress Profile을 얻을 수 있었다. 각각의 경우에 대한 결과와 안전율은 Table 2.2에서 보여진다.

Table 2.2 해석 결과 및 안전율

	입력 토크	회주철의 인장강도 [Pa]	최대응력 (해석결과) [Pa]	Frame 외면에서의 최대응력 [Pa]	안전율 $[(\sigma_{Tensile})/(\sigma_{Max})]$	
					최대 응력부위 (Bolt 체결부)	Frame 외면
Static Analysis	T	1.76e8	5e7	1e7	$1.76e8/5e7 = 3.5$	$1.76e8/1e7 = 17.6$
	6T		6.255e7	2e7	$1.76e8/6.255e7 = 2.8$	$1.76e8/2e7 = 8.8$
Static+Thermal Analysis	6T		1.048e8	2.6e7	$1.76e8/1.048e7 = 1.7$	$1.76e8/2.6e7 = 6.77$

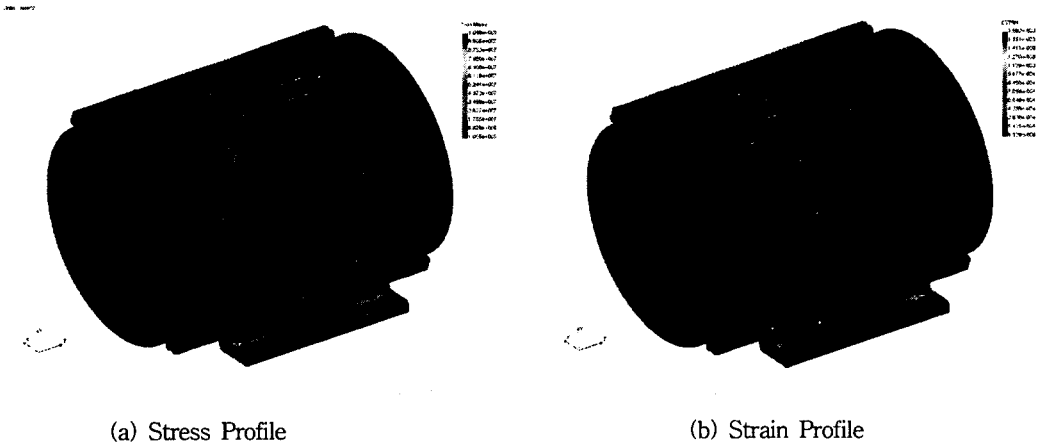


Figure 2.8 Thermal + Stress Analysis with 6T

Torque 값의 변화에 따른 전체적인 Stress Profile의 차이는 있었지만 (6T 조건이 정격 Torque 조건 보다 Input Load가 크기 때문에 그 결과 값인 Stress Profile도 더 크다) 세 가지의 경우 모두 구조물에서 Frame 외면에서의 안전율은 안정적인 값이 나왔다. 그러나 Maximum Stress가 걸리는 Bolt 체결부에서의 안전율은 3.5, 2.8, 1.7 정도로 높은 안전율을 확보하지 못했다. 따라서 강도 보강을 고려할 필요가 있다.

응력해석시의 Stress Profile과 (Figure 2.7) 열/응력해석시의 Stress Profile을 (Figure 2.8 (a)) 비교하면 Maximum Stress를 받는 부위가 서로 다르다는 것을 발견할 수 있다. 그 차이는 Mesh 방법의 차이 때문에 일어났다. 본 해석에 쓰인 Mesh 작업은 Bonded 와 Node to Node라는 두 가지 방법이 있다. Bonded는 여러 부품이 합해진 Assembly를 하나의 개체로 간주하여 Mesh하는 방법이고 Node to Node는 Assembly 내의 각 부품을 별개의 개체로 간주하여 부품이 닿는 부분에서 Node를 공유하지 않고 Mesh 하는 방법이다. 두 방법 중 Node to Node 방법이 실제상황과 더 가깝다고 볼 수 있다. 응력해석의 경우 두 방법으로 모두 Mesh가 가능하므로 Node to Node 방법으로 Mesh 하였지만 열해석의 경우 Bonded 방법으로만 Mesh가 가능하다. 따라서 열해석을 포함하는 열/응력해석의 경우 Bonded 방법으로 Mesh하였다. 그 결과로 Frame과 End Shield를 체결하는 볼트 주변 (응력해석시 Maximum Stress가 발생한 부분)에서 Frame 외면과 Stress 차이가 크지 않고 Maximum Stress는 Foot의 Bolt Hole에서는 측정되었다. 따라서 열/응력해석 결과는 정확도 면에서 응력해석 결과보다 떨어진다고 볼 수 있으나 열해석과 응력해석을 각각 따로 한 결과 값들과 비교하여 그 정확도를 판단할 수 있다.

Gray Cast Iron (회주철)은 Yield Point (항복점이 나타나지 않는 물질인 관계로 안전율을 계산할 때 본사의 기술자료에서 Gray Cast Iron (회주철)의 인장강도 (Tensile Stress)에 의해 계산되었다. 또한 항복점이 없는 Gray Cast Iron (회주철)과 같은 재료에는 편의상 0.002의 영구 Strain을 잔류하는 응력치를 Yield Point (항복점)로 생각하고 이것을 Yield Strength (항복응력)이라 부른다.

따라서 해석결과의 Strain Profile 또한 검토하였다. Figure 2.8 (b)에서 보여지는 것과 같이 Strain Profile은 0.002를 넘지 않는다. ($1.128e-6 < \text{Strain} < 1.692e-3$) 그러므로 Frame에 잔류하는 Stress는 Yield Point를 넘지 않고 현재 모델은 안전도를 확보되었다.

3. 최적화 설계

응력해석을 통해 현재 모델의 장단점을 파악하고 단점보완을 위해 현재모델의 형태를 변경하여 Stress Profile의 변화를 분석하여 설계의 최적화를 실행했다. 해석은 이전과 같은 경계조건으로 실행되었으며 각 단품은 다음과 같이 변화했다.

- 1) Case 1: Frame과 End Shield의 내면을 깎아서 Drum의 두께를 3.5mm로 줄였다.
- 2) Case 2: Case 1에서의 변화와 Foot의 두께를 10.05mm로 줄였다.
- 3) Case 3: Case 2에서의 변화와 Fin의 크기를 150% 만큼 크게 했다.

각 Case마다 응력해석과 열/응력해석의 두 가지 해석을 실행했다. 응력해석은 Node to Node 방법으로 (Assembly의 각 부품을 별개로 간주하여 부품이 닿는 부분에서 Node를 공유하지 않는다) 열/응력해석은 Bonded 방법으로 (Assembly를 하나의 개체로 간주한다) Mesh 해서 해석했다. 그 결과로 얻어진 Stress Profile은 이전의 결과들과 비슷하게 Bolt 체결부위 주변에서 Maximum Stress를 나타냈다. 그리고 두 경우 모두 높은 안전율은 확보하지 못했지만 1 보다 큰 안전율을 나타냈다.

Table 3.1 Analysis Results

	회주철의 인장강도 [Pa]	최대응력 (응력해석결과) [Pa]	최대응력 (열/응력해석결과) [Pa]	Safety Fator ($\sigma_{Tensile}$)/(σ_{Max})	
				응력해석	열/응력해석
Case 1	1.76e8	6e7 ~ 6.5e7	9.735e7	2.70 ~ 2.93	1.81
Case 2		6e7 ~ 6.5e7	1.059e8	2.70 ~ 2.93	1.66
Case 3		6e7 ~ 6.5e7	9.972e7	2.70 ~ 2.93	1.76

Case 1과 2는 제품의 하중을 줄이는 목적으로 Frame과 End Shield의 내면을 깎아서 두께를 줄였고 Case 3은 발열의 원활한 냉각을 목적으로 Frame의 Fin과 Cool Air와의 접촉 면적을 넓히기 위해 Fin의 크기를 키웠다. 각각의 Case는 전체 치수에 비해 상대적으로 크게 변화하지 않았기 때문에 해석 결과 값이 변화 전의 모델과 크게 차이나진 않았고 세 경우 모두 비슷한 Stress Profile을 나타냈다. 각 Case의 응력해석 경우 Maximum Stress는 Frame과 End Shield의 체결부 부위에서 6.5e7 Pa이하의 Stress를 (안전율은 2.7이상) 보였고 그 외의 부분에서는 2e7 ~ 3e7 Pa이하의 Stress를 (안전율은 5.9이상) 나타냈다. 열/응력해석의 경우 Maximum Stress는 1e8 Pa 이하 (안전율은 1.66이상) 그 이외의 부분에서는 3 ~ 4e7 Pa이하의 Stress를 (안전율은 4.4이상) 나타냈다.

Case1의 조건으로 응력해석과 (Static Analysis) 열/응력해석을 (Static+Thermal Analysis) 실행한 결과로 얻어진 Stress Profile은 Case 2 와 Case 3의 조건으로 얻어진 Stress Profile과 크게 다르지 않게 나타났다. Gray Cast Iron은 항복점이 나타나지 않는 재질로써 0.002의 영구 Strain을 잔류하는 응력치를 항복점으로 생각한다. 따라서 결과의 검증차원에서 Strain Profile을 확인한 결과 그 수치 또한 0.002를 넘지 않았다.

Table 3.2 Maximum Strain on Each Case

	Maximum Strain of Static + Thermal Analysis
Case 1	0.00164
Case 2	0.00168
Case 3	0.00180

4. 결 론

모든 경우에 대한 해석은 응력해석과 열/응력해석이 수행되었으며 그 결과 값인 Stress Profile을 Static Analysis와 Static + Thermal Analysis의 Stress Profile 결과를 비교해보면 Mesh 방법의 차이에 의해 (Static Analysis: Node to Node 방법, Static + Thermal Analysis: Bonded 방법) Stress Profile 결과의 차이를 볼 수 있다. Bonded 방법 (Static + Thermal Analysis)은 이전에서 서술했듯이 Assembly를 하나의 단품으로 간주하기 때문에 Frame과 End Shield 결합단에서는 응력분포가 다른 Frame 외면과 별 차이가 없게 나타났다. 그러나 Node to Node 방법 (Static Analysis)은 그 결합단에서 응력분포가 다른 Frame 외면보다는 높게 나왔다. 따라서 Node to Node 방법으로 해석한 Static Analysis의 Stress Profile이 좀 더 현실과 가까운 결과이고 Static + Thermal Analysis는 Stress Profile보다는 Coil 온도 변화에 의한 Stator 외면과 Frame 내면사이에서의 Displacement (변위)를 분석하는 관점에서의 해석으로 보는 것이 바람직하다.

112 Frame의 열/응력해석 결과 현 모델의 강도는 전체적으로 안정적으로 나왔다. 따라서 기존의 Model을 경량화 및 고효율화 시키는 모델 변화를 시도할 수 있다. 최적화 설계에 대한 해석을 실행한 결과 Frame, End Shield, Foot의 두께와 Fin의 크기 변화 (각각의 Case)등에 대해 Stress Profile은 이전의 결과 값 등에 비해 크게 변하지 않았다. 따라서 본 보고서에서 서술된 모터의 변화는 위의 경계조건에서는 가능하다고 볼 수 있다. 하지만 본 해석은 모터의 운전상태를 경계조건으로 하였기 때문에 가공 또는 제조공정에서 생길 수 있는 잔류응력은 고려되지 않았다 또한 주물 제작의 최소 가능두께를 고려하고 Gray Cast Iron 도 Aluminum 등의 다른 재질에 비해 가격이 저렴한 관계로 현 모델디자인 변경이나 재질변경은 신중하게 검토를 할 필요가 있다. 또한 응력해석 과정에서는 검토되지 않았던 재질 변경과 진동 발생에 대한 영향도 확인되어야 할 것이다.