

3MW 해상풍력용 영구자석 동기발전기 개발현황

김 동언, 한 홍식, 이 흥기, 정 영규, 서 형석, 정 진화

Status of 3 MW PM Synchronous Generator Development Project for Off-shore WECS

Dong-Eon Kim, Hong-Sik Han, Hong-Gi Lee, Yung-Gyu Jung, Hyung-Suck Suh, Chin-wha Chung

Key words : Synchronous Generator (동기발전기), Permanent Magnet (영구자석형), Radial Flux (레이알 플럭스), High Efficiency(고효율)

Abstract : Pohang Wind Energy Research Center (PoWER-C) is developing a 3 MW Radial Flux Permanent Magnet (RFPM) Synchronous Generator for offshore Wind Energy Converter (WEC). The rotor rpm is 15.7 and the gear ratio is set to be 92.93. The nominal generator rpm at the rated load is about 1459. To reduce the switching loss in the power electronics, the maximum frequency is limited to 100 Hz. This requirement limits the number of pole to six or eight. Permanent magnet excitation is assumed for higher energy yield and higher efficiency. In this report, the requirements and the first efforts for the physics design are described.

Nomenclature

$P_{windage}$: windage loss
 C_d : skin friction coefficient
 ρ : air density
 R : rotor radius of the generator
 ω : angular velocity of the rotor
 L : generator rotor length
 μ : air viscosity
 t : air gap
 h_2 : heat transfer coefficient at the air gap
 A_{sum} : heat transfer area at the air gap
 c_p : constant pressure specific heat the air
 \dot{m} : Mass flow rate
 H_{cJ} : intrinsic coercivity of NdFeB
 X_d : D-axis synchronous inductance
 X_q : Q-axis synchronous inductance
HVG : Harmonic Voltage Factor

1. 서 론

풍력발전기에 사용되는 발전기는 크게 나누어 증속기를 사용하는 비동기형 유도발전기형과 증속기를 사용하지 않는 직접구동형이 있다. 두 방법 모두 각자의 장점이 있으며 증속기를 사용하는 형이 현재 시장에서의 주도적 위치를 차지하고 있다. 증속기를 사용하지 않는 직접구동형 풍력발전기는 증속기가 없음으로 인한 높은신뢰성, 가변속도 운전에 따른 향상된 에너지일드 등의 장점이 있으나 한편으로 대용량의 인버터가 필요하고 직접구동형 발전기의 경우 발전기 용량이 커짐에 따라 크기가 커지고 무게가 무거워지며 비용이 많이 드는 단점이 있다. 근래에는 이 두가지 타입의 장점을 절충하는 방법에 많은 진전이 있었다. 기어를 사용하는 유도형 발전기 쪽에서는 DFIG (Doubly Fed Induction Generator) 를 채용하여 고정속의 한계에서 벗어나서 넓은 rpm 범위에서 가변속 운전을 하고 있으며, 또 직접구동형 발전기 쪽에서는 저단 기어를 사용하여 코스트와 nacelle의 중량을 줄이려는 노력을 하고 있다. 이런 전략에서는 영구자석을 사용하여 여자하는 동기발전기가 핵심적인 역할을 하고 이런 발전기와 관련해서 그동안 많은 진전이 국외⁽¹⁾⁽²⁾

1) 포항가속기연구소, 포항공과대학교
E-mail : dekim@postech.ac.kr
Tel : (054)279-1811 Fax : (054)279-1799

표 1. 3 MW 영구자석 동기발전기의 주요 요구조건

| Parameter | |
|------------------------------|------------------|
| Rated Power | 3150 kVA |
| Nominal Voltage | 690 Vrms |
| Rated speed | 1459 rpm |
| Operating Range | 745-1898 rpm |
| Number of Poles | 6 or 8 |
| Frequency | less than 100 Hz |
| Rated Current | 2930 A |
| D-axis synchronous Reactance | 0.7 p.u |
| Q-axis synchronous Reactance | $X_q \leq X_d$ |
| 최대 운전환경 온도 | 40 C |
| Efficiency | 98.1 % 이상 |

에서 있었고, 국내에서도 전기연구소를 중심으로 (3)(4) 관련 연구가 있어왔다.

포항가속기연구소는 (주)두산중공업을 주관사업자로 에너지관리공단의 지원을 받아 개발 중인 해상풍력용 3.0 MW급 풍력발전기에 사용될 3.0 MW급 영구자석 동기발전기를 (주)보국전기와 함께 개발하고 있다. 이 보고에서는 3.0 MW 본제품 발전기의 요구조건 및 첫 번째 물리 설계 및 손실, 냉각에 대해서 논의한다.

2. 요구조건 및 주요 Parameter 들

발전기를 설계에는 많은 변수들이 개입되어 있으므로 그 parameter space 가 매우 넓어 모든 Parameter space를 다 조사하는 것은 어렵다. 여기에서는 발전기의 주요 parameter를 결정하는 각각의 근거에 대해서 간략하게 논의한다. 이 장에서 논의될 사항들을 포함하여 지금까지 알려진 요구사항과 설계 Parameter들을 미리 표1과 표2에 요약하였다.

로터의 외경: 로터의 크기는 전체 발전기크기와 연결되어 있다. 일반적으로 같은 토크에서는 Active material의 소재비용은 직경이 크고 길이가 짧아질수록 작아진다. 한편 소재비를 최적화하기 위하여 내경을 키우게 되면 전체적으로 직경이 커짐으로써 그에 따른 구조물의 제작비용이 커지게 되며 국내도로 상황에서의 운송문제가 있을 수 있다. 또 외경이 커지게 되면 그에 따른 원심력이

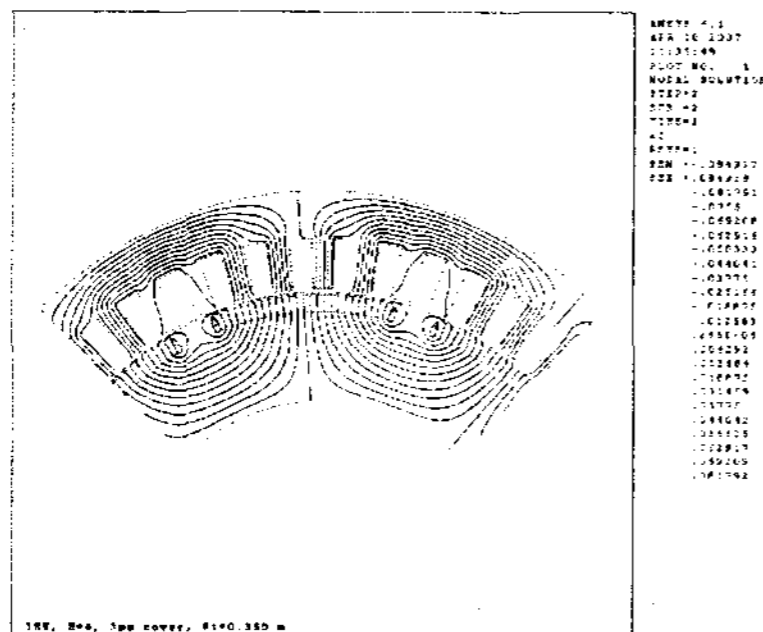


그림 1 전형적인 flux plot. (1주기)

표 2. 주요 Parameter 들

| Parameter | |
|------------------------|---------|
| Number of Poles | 8 |
| Frequency | 97.3 Hz |
| Rotor 반경 | 310 mm |
| Stator 내부반경 | 313 mm |
| Stator 길이 | 1164 mm |
| Q (슬롯수/상/극) | 2 |
| Stator thickness | 150mm |
| Stator 외부 반경 | 413 mm |
| Air gap | 3 mm |
| Magnet Cover thickness | 3 mm |
| Joule Loss | 14.3 kW |
| Steel Loss | 26.0 kW |
| Other losses | 5.0 kW |

같이 커지게 되고 구조적인 문제가 발생할 수 있다. 일반적으로 저속이고 토크가 큰 경우에는 반경이 크고 축방향 길이가 짧은 모양이 되며 rpm이 증가하고 토크가 작아질수록 반경이 작아지고 길이가 길어진다. 3 MW 발전기의 경우 rpm 이 약 1460 으로 높으므로 구조적인 안정성을 고려하여 로터의 반경은 310 mm 로 결정한다.

극수: 일반적으로 영구자석으로 excite 시키는 발전기에서는 극수를 많이 하는 것이 유리한 것으로 알려져 있다. 그것은 극수가 많아지게 되면 회전자나 고정자가 감당하여야 할 자속밀도가 낮아지고 그에 따라서 회전자나 고정자의 무게를 감소시켜 그만큼 원가절감 및 중량 감소에 도움이 된다. 또 자속의 형상이 사인모양에 가까워져서 Higher Harmonic 성분이 작아진다. 또 고정자 쪽에서의 자속이 미치는 범위가 작아져서 철손이 작아지는 장점이 있다. 한편 극수가 많아질 경우의 단점은 주파수가 높아져서 그에 따른 히스테리시스 손실이나 와전류손실이 높아지고 인버터의 스위칭 손실이 커질 수 있다. 우리의 경우에는 주관사에서 100 Hz 이하를 요구하고 있고 어느쪽이 유

리한지 검토중에 있다. 여기에서는 잠정적으로 8극을 가정하고 정격 회전자 rpm에서 97.3 Hz의 주파수를 발생시킨다.

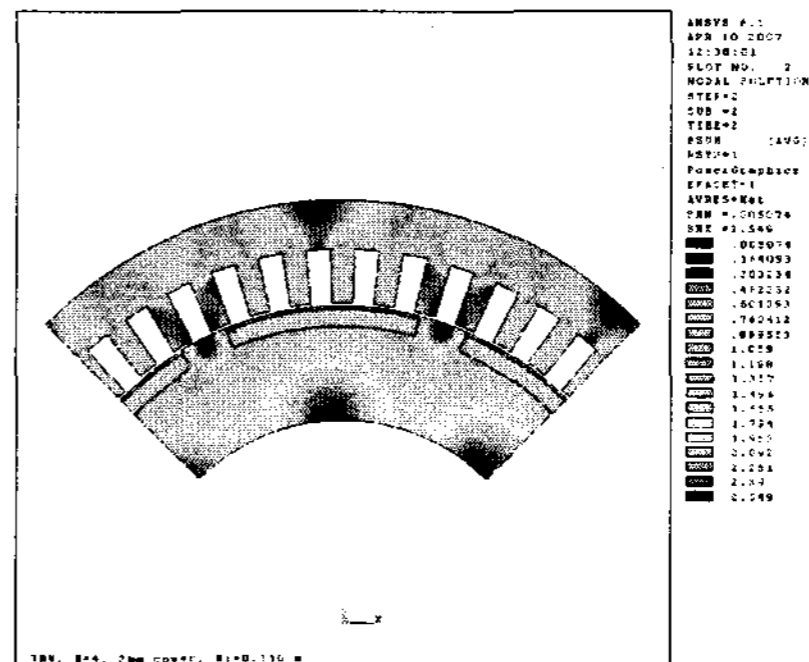


그림 2 한주기의 전형적인 |B| plot. (1주기)

공극: 자석과 고정자 내경의 간격은 3.0 mm를 사용하였다. 통상적으로 자극간격은 직경에 비례하며 대형의 경우 0.1%에서 소형의 경우 1%까지에 이른다. 공극의 크기를 결정하는 근거는 운전시의 회전자, 고정자사이의 온도차에 의한 열팽창의 차이, 베어링의 유격, 고정자의 기계적 가공/조립 오차 등이 고려되었다. 영구자석의 투자율이 낮기 때문에 (약 1.05) 자기적인 공극은 자석두께와 기계적 공극을 더한 값이 된다. 공극을 2 mm로 줄인다 해도 실효공극은 공극과 자석두께의 합이기 때문에 전체적인 이득은 크지 않고, 기계적인 정밀도는 많이 높아져 전체적으로 장점보다 불리한 점이 많을 수 있다.

전류밀도: 보통 fan을 이용하는 강제 공냉방식의 발전기나 모터에서는 6~8 A/mm² 정도의 전류밀도를 사용하는 것으로 알려져 있으나 우리의 경우는 보호등급 IP54의 완전밀폐형 발전기를 고려하고 있으므로 냉각능력이 강제 공냉방식 보다 떨어지므로 사용 전류밀도가 낮아야 한다. 열분석과 냉각능력을 생각할 때 3.6 A/mm² 근처가 적절한 것으로 판단되어 이 값을 사용한다.

Magnet의 두께, 폭, Grade: 영구자석의 치수는 필요한 자속밀도, 단락사고시의 역자장에 의한 탈자 방지, torque ripple의 최적화 등에 의해서 결정되었다. 자석두께 17 mm 일 때 기준이 되는 공극자속밀도는 약 0.88 Tesla 정도이다. 영구자석의 폭은 cogging torque를 최소화 하도록 최적화한다. 또 cogging torque와 torque ripple을 더욱 작도록 하고 무부하 유도 전압의 고조파를 줄이기 위하여 stator slot을 1 slot pitch 만큼 skewing 하였다.

영구자석은 발전기의 성능을 위해서는 높은 잔류자기를 가져야 하지만 발전기의 작동온도가 높음에 따른 온도에 따른 탈자를 견딜 수 있어야 하고, 단락시의 transient 전류에 의한 탈자를 견딜 수 있어야 한다. 이런 특징을 가지기 위해서는 작동온도가 높고, 높은 intrinsic 보자력을 가지

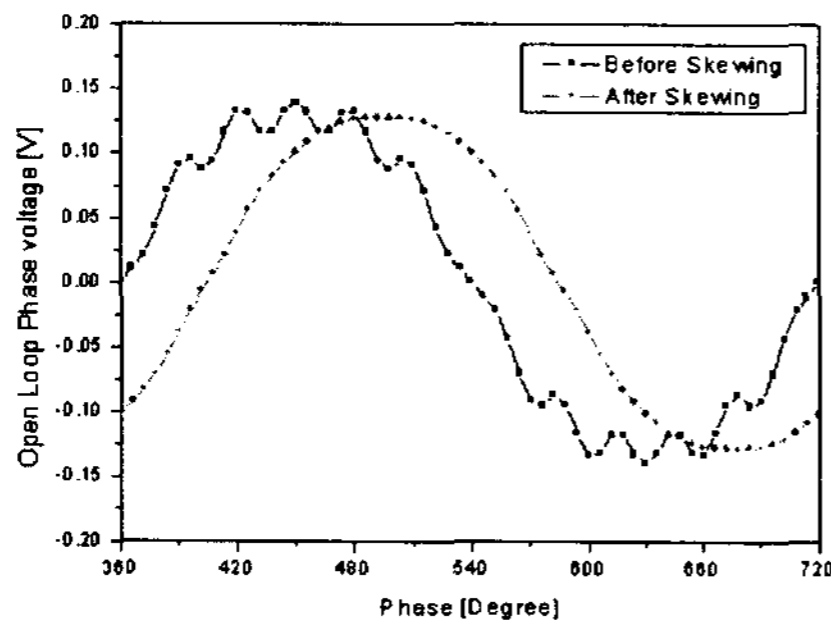


그림 3 Skewing 하기전의 전압파형과 Skewing 한 후의 전압파형. Slot형상에 따른 고조파와 Skewing에 의한 smoothing 효과를 볼 수 있다.

는 물질을 선택하여야 한다. 우리의 경우에는 일단 연속사용 가능온도가 200 °C 이고 30 kOe의 높

표 3 무부하시의 Flux와 유도전압의 상대적인 고조파의 크기.

| n | Flux [Weber/m] | Normalized Volt |
|-----|-------------------------|------------------------|
| 1 | 1.378×10^{-1} | 1.00 |
| 3 | -2.789×10^{-3} | -6.09×10^{-2} |
| 5 | -1.714×10^{-4} | -6.22×10^{-2} |
| 7 | 1.647×10^{-4} | -8.36×10^{-3} |
| 9 | -7.095×10^{-4} | -4.63×10^{-2} |
| HVF | | 3.85×10^{-2} |

은 보자력을 가지는 NEOMAX 35AH를 가정하였다. Stator와 rotor, magnet block의 2차원 FEM 분석이 그림 1, 그림2에 나타나 있다. 그림1은 전형적인 magnetic flux 모양을 보여주고 그림2는 회전자, 고정자부분에서의 자속밀도의 크기를 보여준다. 회전자의 각도를 변화시키면서 여러 각도에서 이 같은 2차원 분석을 수행하여 flux, 무부하 전압, Synchronous inductance, 철손 등을 계산할 수 있다. 그림3에서는 skewing 하기전의 전압 파형과 skewing후의 전압 파형을 보여준다. Skewing 하기전의 전압은 slot 형상의 효과로 많은 고조파가 포함되어 있는 것을 알 수 있다. Skewing에 의해서 고조파들이 많이 감소하고 결과적인 HVF는 약 3.8% 정도이다. 각 고조파의 크기가 표 3에 나타나 있다.

3. 손실 및 열분석

3.1 손실

Joule 손실은 $P = 3I^2R$ 로 주어진다. 여기에서 I는 phase current 이고 R은 작동온도에서의 phase 저항값이다. 주파수가 높지않고 도체의 두께가 얇아서 첫 번째 근사로 skin effect와 proximity 효과는 무시한다.

철손은 stator yoke와 teeth에서의 hysteresis 손실과 eddy current 에 의한 손실로 나뉘어진다. 이 철손을 계산하는 방법에는 여러 가지가 있으나 우리는 참고문헌⁽¹⁾에 있는 추정방법을 사용한다.

이 외에 bearing 손실과 additional loss 부분이 있고 또 rpm이 높음으로 인한 windage 손실이 있다. Windage loss는 발전기 로터 (또는 내장된 blade) 와 공기의 마찰에 의해서 발생한다. Windage 손실이 우리의 경우 중요한 것은 Windage 손실은 주로 rotor와 stator 사이의 공극에서 발생하고 이 발생된 열은 공극부근의 온도를 상승시켜 전체 시스템의 바탕온도를 올린다. 따라서 windage 손실을 최소화시키고, 또 발생한 열을 효과적으로 냉각시킴으로써 쉽게 전체시스템의 온도를 낮게 유지할 수 있다. 지금까지는 상세한 계산 없이 비슷한 유형의 발전기나 모터에서 측정된 풍손을 scaling하여 사용하여 왔으나 NASA의 James E. Vrancik 에 의해서 일반적으로 추정하는 방법이 제시되었다.⁽⁵⁾ 표 2에

나타난 손실들은 참고문헌들의 자료를 바탕으로 추정된 것이다.

Windage 에 의한 손실은 전반적인 발전기 온도를 크게 높이기 되므로 추가적인 냉각방법이 필요하다. 그 방법 중의 하나가 발전기 내부의 공기를 순환시키면서 열교환기를 통하여 공기를 냉각하는 것이다. 최저냉각수 온도 50 °C를 만족할 수 있다면 발전기크기에 비해서 과대하게 크지 않은 radiator 형 열교환기를 사용하여 Windage loss에 의한 공기 발열을 충분히 냉각할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 Thermal Analysis

도체와 stator, rotor에서의 온도상승을 추정하기 위하여 상용 FEM code를⁽⁶⁾ 사용하는 2D 열분석을 수행하였다. Ohmic 손실은 stator slot에 균일하게 분포시켰으며 철손과 기타 손실은 고정자 teeth 와 yoke 부분에 각각의 기여분에 따라서 분포시켰다. 철손을 분포시키는 방법에 따른 분석 결과의 민감도를 조사하였으나 분포방법에 따른 최대 온도 상승의 변화가 1°K 이하로 둔감하여 철손의 분포를 개략적으로 하여도 최종결과에는 크게 차이가 없었다. 슬롯단면에서 도체수직방향으로의 열전달율은 순수구리의 1/222 로 계산하였다⁽¹⁾. 이것은 슬롯이 절연물을 포함하는 도체로 이루어진 것을 고려한 것이다. 고정자 외경쪽에 water jacket이 설치되어 냉각수가 흐르도록 되어 있다. 냉각채널을 최적화하여 냉각채널에서의 열전달계수가 최소한 10,000 W/m²/K 이 되도록 하여야 한다. 고정자 외경과 바깥의 water jacket 사이의 열저항을 최소화하기 위해서 접촉면적을 최대화하여야 한다. 고정자외경과 water jacket 사이에 조그만 공극이라도 있을 경우에는 온도상승은 허용한계를 쉽게 넘을 수 있다. 여기에서는 고정자외경과 water jacket 은 tight 한 열박음으로 완벽한 접촉이 이루어졌다고 가정한다. 절연물의 두께가 최종 온도상승에 많은 영향을 주는데 여기에서는 전에 개발하였던 800 kW 영구자석형 동기발전기에서의 슬롯절연지와 같은 치수를 사용하였다.

이런 가정 하에서 2차원 FEM 열분석 결과가 그림 4에 나타나 있다. 냉각수량이 충분한 경우에 냉각수의 온도상승은 약 17°C이었고 고정자 도체부분에서의 최대 온도상승은 약 54 °C로 계산되었다. 따라서 최대운전가능 대기온도를 40 °C로 가정하면 권선의 최대온도는 약 111 °C임을 알 수 있다. 111 °C의 권선온도는 예상되는 0.3~0.4 power factor에서 F급 절연 등급에서 20년 수명을 보장하기 충분하다. 또 가장온도가 높을 것으로 예상되는 코일 내부에는 H급 절연체를 사용할 예정이고 온도가 낮을 것으로 예상되는 wedge 부근에는 수급의 문제로 F 급 절연체를 사용할 예정이다. 따라서 발전기 전체적으로는 H급 내열등급을 가진다고 보아도 좋다.

냉각수의 냉각은 Oiltech 사의 LAC-112-8-A 방열기를 사용하여 외부에서 냉각하는 것으로 가정하였다⁽⁷⁾. 냉각수요가 800 kW 와 유사하여 발전기를 충분히 냉각시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이런 수냉식을 택함으로써 발전기내부를 보다 완벽한 IP54등급으로 보호할 수 있다.

4. 결론

이 논문에서는 에너지 관리공단의 지원으로 (주)두산중공업 이 주관하여 개발 중인 3 MW급 해상풍력용 풍력발전기에 사용되는 영구자석형 RPPM 발전기의 설계의 요구조건과 기초 물리계산에 대해서 기술하였다. FEM tool들을 사용하여 전자기, 열, 구조분석을 행하였다.

후 기

이 연구는 (주) 두산중공업의 주관으로 에너지 관리공단의 지원을 받아 수행한 것이다. 발전기 제작은 (주) 보국전기에서 수행할 예정이며 제작 설계 쪽에서 보국전기쪽의 지원에 감사를 표한다.

References

- [1] A. Grauers, "Design of Direct-driven Permanent magnet Generators for Wind Turbines", Phd Thesis, Chalmers University of Technology, 1996.
- [2] Petri Lampola, "Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications", Phd Thesis, Helsinki University of Technology, 2000.5.
- [3] D.H.Kang, P.Curiac, Ju Lee, "An Axial Flux Interior PM Synchronous Machine", ICEM 2000 Vol 3, 2000.
- [4] 김동연 et al., "800 kW 급 영구자석형 동기발전기의 개념설계", 포항풍력에너지 연구소, 포항공대, 2003.11
- [5] James E. Vrancik, NASA TN D-4849, "Prediction of Windage Power Loss in Alternators, 1968
- [6] ANSYS, <http://www.ansys.com>
- [7] Oiltech, <http://www.oiltech.se>

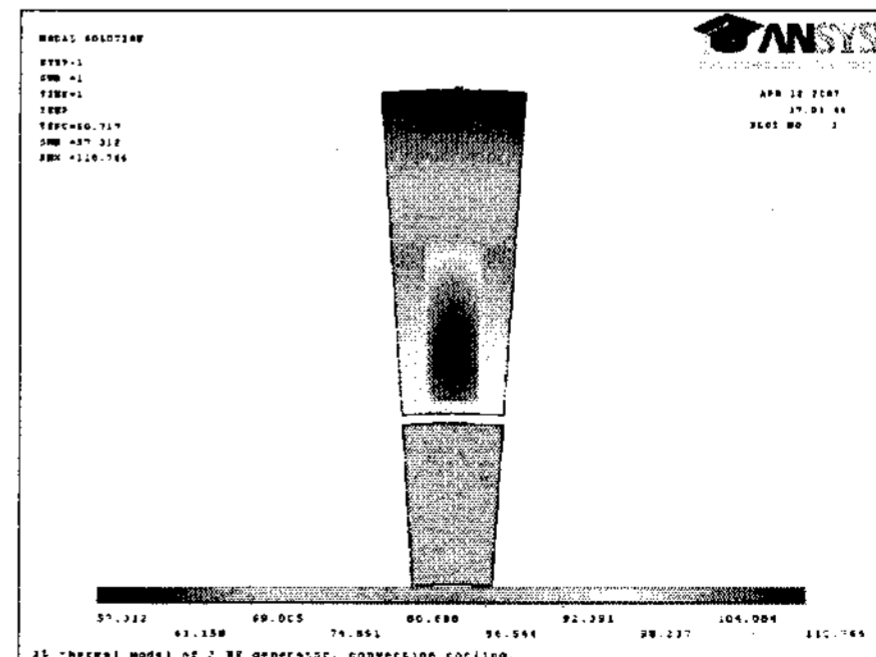


그림 4 Slot에서의 2차원 FEM 온도분포 계산결과