

용접코팅된 연속주조 몰드의 열해석

이 종 선* · 김 세 환**

Thermal Analysis of Continuous Casting Welding-Coated Mold

Jong Sun Lee* and Sei Hwan Kim**

요약 본 연구에서는 제철소에서 활발히 사용되고 있는 연속주조 몰드에 대하여 용접코팅을 실시한 후 주조시 열적기동을 규명하는 열해석을 수행하였다. 열해석을 수행하기 위하여 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS를 활용하였으며 주조속도, 냉각조건, 막 열전도계수, 대류열부사, 하중조건 등을 고려하여 몰드 표면의 온도분포를 구하였다.

Abstract This study is object to thermal analysis of continuous casting welding-coated mold. A two-dimensional transient finite element model was developed to compute the temperature distribution for continuous casting welding-coated mold. For thermal analysis using analysis result from FEM code. This thermal analysis results, many variables such as casting speed, cooling condition, film coefficient, convection and load condition are considered.

Key Words : Continuous Casting Mold, Welding-Coat, Thermal Analysis, Broad Face, Narrow Face, Convection, Film Coefficient

1. 서 론

금속의 용해성을 이용하여 고온에서 용해된 금속을 준비된 형틀에 주입하여 형상을 만드는 주조는 역사적으로 오랜동안 이용된 광범위한 제조공정이다. 주물에 사용되는 재료들은 주조가 쉽고 충분한 강도와 경제적인 재질로서 주철, 주강, 구리합금, 알루미늄합금, 아연합금 등이 있다. 특히 주철은 가장 경제적이고 주조성이 우수하며 강도면에서 자동차, 각종 기계의 본체, 공작기계, 농업용 기계 등에 널리 사용되고 있다. 주물은 결함이 없고 설계된 기능을 충분히 발휘해야 하며 강도 및 경도 등과 같은 기계적인 성질이 요구범위에 있어야 한다.

본 논문에서 고려한 연속주조(continuous casting)[1]에 대한 연구로는 연속주조시 발생하는 열영향에 대한 많은 연구[2-4]들이 수행되었으며, Cui Xiaochao 등[5]은 냉각수 압력과 온도의 영향을 받는 구리몰드에 대하여 응력과 변형률을 해석하였고, Selaries 등[6]은 연속주조시 공정의 최적화에 대하여 연구하였다. 연속주조는 특수주조에 속하며 연속적으로 위에서 공급되는 용탕이 장편(broad face)과 단편(narrow face)으로 조립된

몰드(mold)에서 동일한 조건으로 냉각되는 균질한 잉곳(ingot)을 제품의 크기에 구애받지 않고 생산할 수 있으며 가공비용이 저렴하다. 또한 몰드에 용탕을 주입하는 도관이 항상 로보다 낮은 위치에 있어서 산화물이 생기지 않으므로 잉곳 중에 편석이 적고 수축공이 없는 미세조직을 얻을 수 있는 생산성 높은 제조방식이다. 연속주조는 높은 온도의 용탕에 직접 접촉되어 고온으로 가열되는 몰드를 내부에서 순환하는 냉각수에 의해 냉각시킨다. 몰드 표면에 용탕과 몰드의 마찰을 고려하여 니켈도금을 하였을 때 몰드 내부의 열변형 및 열응력 계산을 위하여 접촉면의 온도분포, 시간에 따른 잉곳의 이동량과 온도분포를 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS[7-8]로 해석하고 각 임계점들의 온도분포를 구해 연속주조 몰드의 기초설계에 응용하고자 하였다.

2. 열해석 이론

2.1. 열해석 이론

본 해석을 위해서는 먼저 각 요소의 행렬을 구하여 평형방정식을 구성한 후 연립방정식의 해를 구한다. 이에 사용된 기본식은 다음과 같다.

*대전대학교 기계실계공학과 **천안공대 급형과

본 논문은 1998년도 중소기업청 기술혁신개발사업 자금의 지원을 받아 (주)대현기계와 공동 개발하였으며 그 핵심내용은 연속주조 몰드상의 용접 코팅방법을 개발하였다. 이는 제철소에서 사용되는 연속주조 몰드에 관련된 공정개선 및 생산성 향상기술이다.
(Tel : 031-539-1975)

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q_a\} \quad (1)$$

여기서 [C]는 비열 행렬, [K]는 계수 행렬, {T}는 절점에서의 온도, {\dot{T}}는 자유도 값의 시간율, {Q_a}는 작용하는 열의 흐름을 나타낸다.

이 관계식을 해석에 적용하기 위해서 시간의 증감을 고려하여 일반화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{T_{n+1}\} \\ = \{T_n\} + (1-\theta)\Delta t\{\dot{T}_n\} + \theta\Delta t\{\dot{T}_{n+1}\} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 과도적분 변수 θ 는 Crank-Nicolson의 방법에 따라 보통 1/2값을 취한다.

그리고 식 (1)은 시간 t_{n+1} 에서 다음과 같다.

$$[C]\{\dot{T}_{n+1}\} + [K]\{T_{n+1}\} = \{Q_a\} \quad (3)$$

식 (3)의 {\dot{T}_{n+1}}를 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\theta\Delta t}[C] + [K]\right)\{T_{n+1}\} \\ = \{Q_a\} + [C]\left(\frac{1}{\theta\Delta t}\{T_n\} + \frac{1-\theta}{\theta}\{\dot{T}_n\}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

온도에 의존하는 물성치는 요소별로 상승한다. 이 때의 온도는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$T_c = \{N_0\}^T \{T\} \quad (5)$$

여기서 T_c는 물성치 값의 증감이 끝난 상태의 온도, {N₀}는 요소의 좌표에서 증가된 형상계수, {T}는 절점의 온도이다.

3. 몰드설계 및 해석

해석시 사용되는 몰드는 해석의 간소화를 위하여 몰드 윗부분에서 100 mm 떨어진 곳의 1/2 단면을 취하였 으며 연속주조시 응고된 용탕과 몰드표면의 마찰을 고려하여 접촉부에 두께 0.5 mm의 니켈도금층과 니켈도금층 상부에 두께 1 mm의 용접코팅층을 고려하여 모델링하였다.

몰드 내부에는 40℃(313K)의 냉각수가 총 44개의 냉각수관에 흐르고 있으며 실제 현장에서 이용되고 있는 작업환경을 고려하여 주조속도는 0.8 m/min, 용탕의 온도는 1,555℃(1,828K)를 택하였다.

3.1. 몰드의 모델링

Figure 1은 유한요소 해석을 위한 모델의 실제 치수를 나타내고 해석을 위하여 Thermal Solid Quad 8Node (Plane55), 4,557개의 요소와 4,816개의 절점을 사용하였다. 그리고 이 절점들 가운데 해석결과로 사용될 몰드 표면의 절점을 1~28까지 표시하였다.

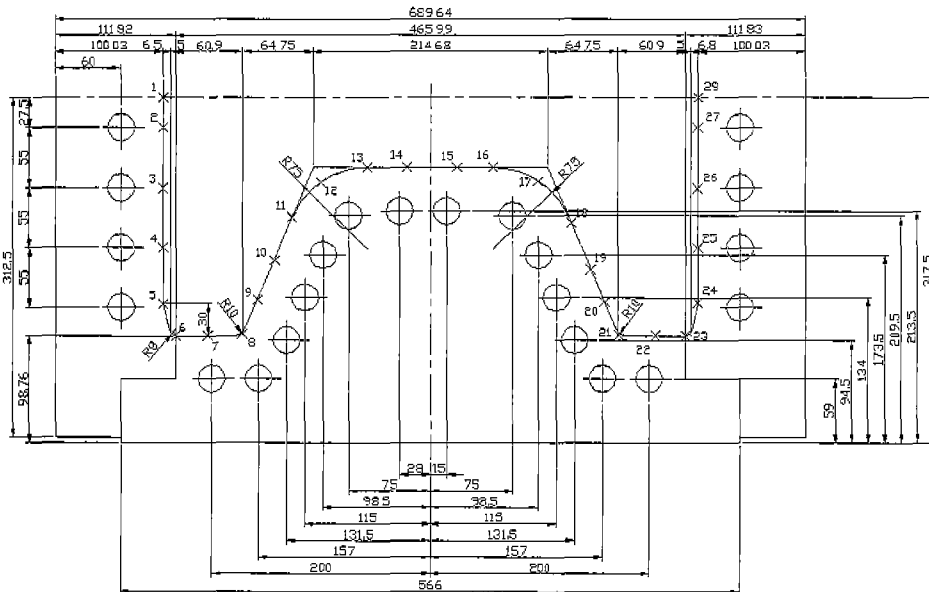


Figure 1. Simple model for thermal analysis of continuous casting mold.

Figure 2~Figure 6은 해석의 기본이 되는 면적, 요소, 절점의 생성을 나타낸 것이고, Figure 7과 같은 실제와 유사한 하중조건을 입력한다. 냉각수 관에는 40℃의 냉각수가 항상 일정한 온도를 유지하면서 순환한다고 생각하여 일반 온도하중조건을 적용시켜 하중조건이 표시된 것이고, 내부 열복사(convection)하중조건으로 일반 대기온도인 25℃와 막 열전도계수(film coefficient) 0.014를 적용시킨다.

그리고 몰드부분과 초기 용탕의 온도를 절점에 각각 25℃와 1,555℃를 작용시켜 용탕이 주입되어 초기 냉각되는 해석을 위해 주조속도인 0.8 m/min을 시간으로 분석하는 몰드 윗부분을 0초로 하고 최종 몰드 밑부분까지 도달하는 52.5초까지를 각각 7.5초로 나누어 해석하였다.

3.2. 재료의 물성치

과도해석을 수행하기 위한 기본적인 물성치[9]로는 Table 1과 같이 밀도, 비열이 고려되었으며 열전도 계

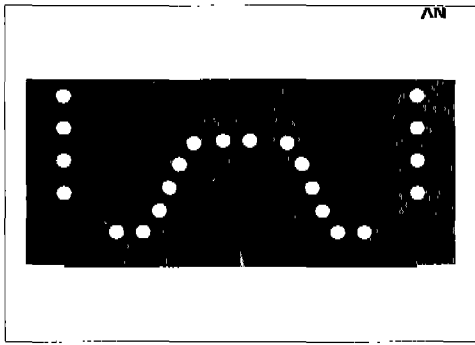


Figure 2. Section area of molten steel and mold.

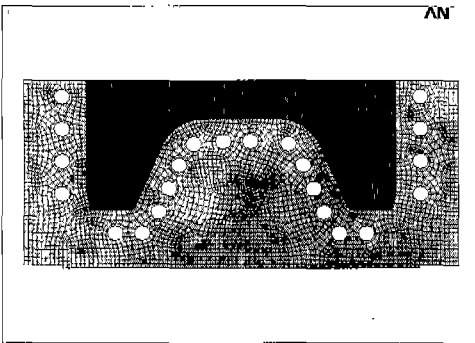


Figure 3. Element of molten steel and mold by mesh generation.

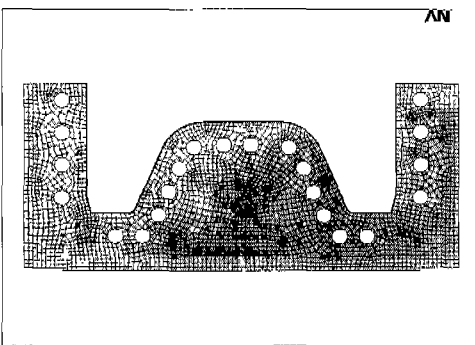


Figure 4. Element of welding-coated mold section by mesh generation.

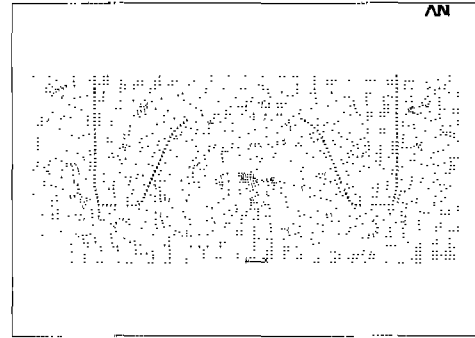


Figure 5. Node point of molten steel and mold.

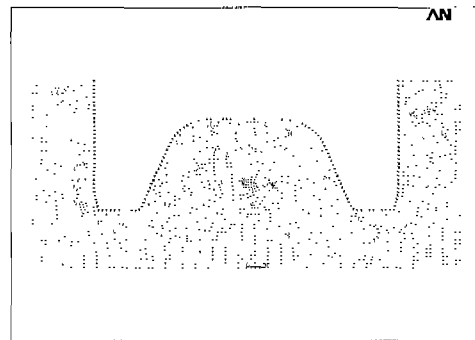


Figure 6. Node point of welding-coated mold section.

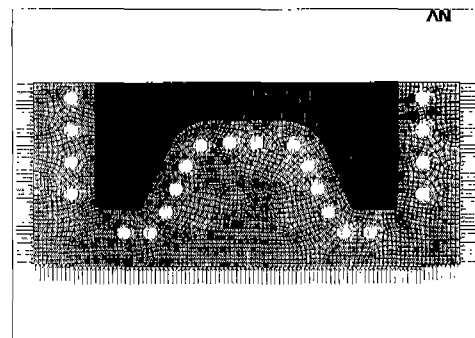


Figure 7. Load condition of thermal analysis.

수는 Figure 8의 온도변화와 같이 온도에 따른 편차가 심하여 Table 2의 정확한 값을 입력하였다. 용접코팅층의 해석을 위해서 물성치는 주성분인 니켈의 물성치를 활용하였으며 플라즈마아크용접시 용가제의 역할을 하는 금속분말(metal powder)의 성분은 Table 3과 같다.

Table 1. Material properties of Cu, Fe & Ni

	properties	units	values
Cu	density ρ	kg/m ³	8,933
	specific heat C_p	J/kg·K	385
Fe	density ρ	kg/m ³	7,870
	specific heat C_p	J/kg·K	447
Ni	density ρ	kg/m ³	8,900
	specific heat C_p	J/kg·K	439.6

Table 2. Thermal coefficient of Cu, Fe & Ni

Material	Temp (K)	W/m·K	Temp (K)	W/m·K
Cu	273 K	401	300 K	398
	400 K	392	500 K	388
	600 K	383	700 K	377
	800 K	371	900 K	364
	1000 K	357	1200 K	342
Fe	273 K	83.5	300 K	80.3
	400 K	69.4	500 K	61.3
	600 K	54.7	700 K	48.7
	800 K	43.3	900 K	38.0
	1000 K	32.6	1200 K	28.2
Ni	273 K	94.0	300 K	65.3
	400 K	90.5	500 K	67.4
	600 K	80.1	700 K	69.6
	800 K	72.1	900 K	71.8
	1000 K	65.5	1200 K	76.1

Table 3. Material properties of metal powder (wt%)

Ni	C	Cr	Si	B	Mo	Fe
Bal	0.25~0.75	7.5~15	3.5~4.4	1.7~3.2	0~5	0~1

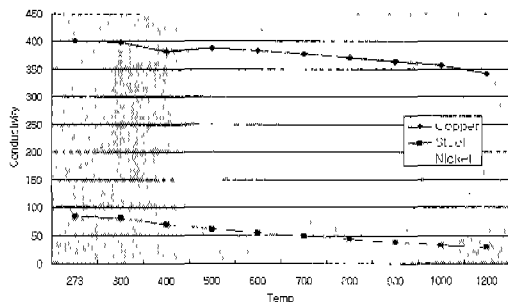


Figure 8. Thermal coefficient change by temperature.

4. 결과 및 고찰

본 논문에서 시간에 의한 몰드와 용탕의 접촉부분의 온도분포를 보면 Figure 9~Figure 15와 같다.

Figure 9~Figure 15에서 그림 왼쪽의 가장 높은 온도분포가 시간에 따라 점차적으로 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 선택된 해석절점 1~6까지는 왼쪽 단편, 7~22까지는 장편 그리드, 23~28까지는 오른쪽 단편으로서 온도변화를 나타내면 Figure 16과 같다.

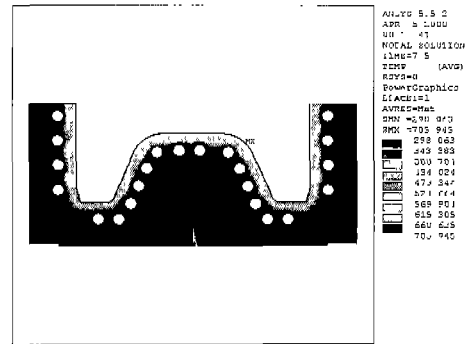


Figure 9. Temperature distribution at 7.5 sec.

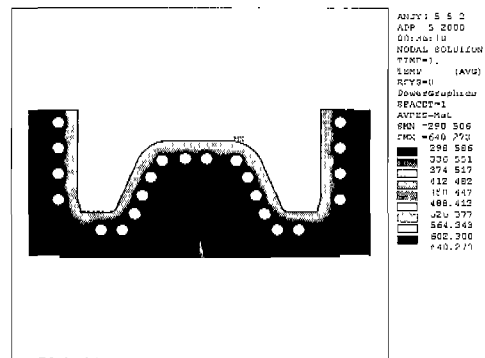


Figure 10. Temperature distribution at 15 sec.

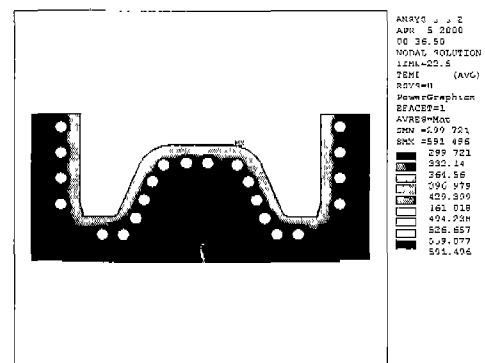


Figure 11. Temperature distribution at 22.5 sec.

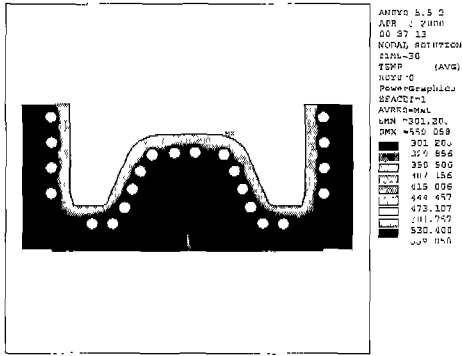


Figure 12. Temperature distribution at 30 sec.

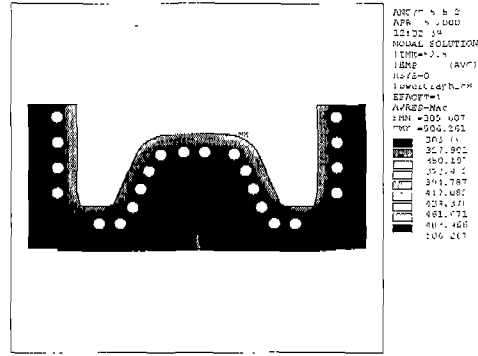


Figure 15. Temperature distribution at 52.5 sec.

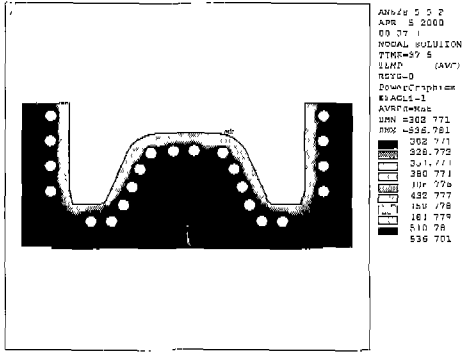


Figure 13. Temperature distribution at 37.5 sec.

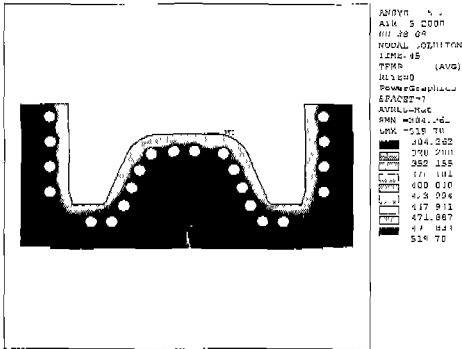


Figure 14. Temperature distribution at 45 sec.

Table 4. Temperature distribution of mold surface

1	2	3	4	5	6	7
656.521	652.359	652.701	652.773	605.373	493.762	626.620
8	9	10	11	12	13	14
521.756	628.075	645.324	681.980	700.233	683.998	656.211
15	16	17	18	19	20	21
658.343	702.966	703.726	682.616	647.083	634.169	522.320
22	23	24	25	26	27	28
628.904	493.728	606.985	652.030	652.733	652.671	656.023

또한 몰드 윗부분에서 100 mm 떨어진 부분, 즉 7.5초 표면온도는 Table 4와 같으며 Figure 16에서 가장 윗부분의 온도분포를 나타낸다.

5. 결론

용접코팅된 연속주조 몰드에 대하여 유한요소해석 방법을 이용하여 열해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 몰드 표면의 온도분포는 좌우 대칭의 온도가 분포함을 알 수 있다.
- 2) 용탕의 초기 최대온도가 작용하는 몰드의 윗부분에 접촉을 시작하여 밑부분까지 이동, 몰드로부터 이탈

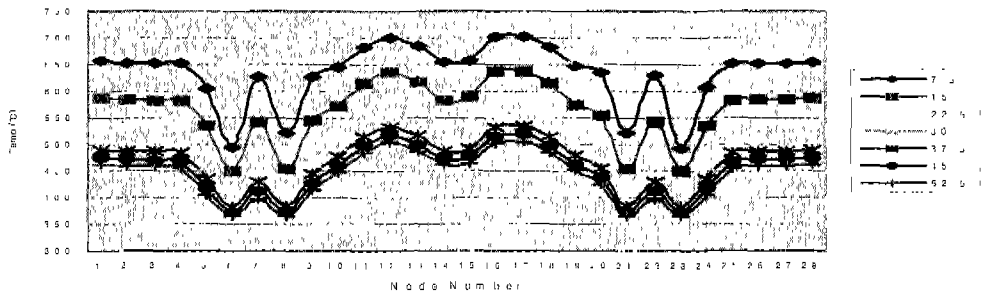


Figure 16. Temperature distribution of mold surface.

하는 52.5초 동안 비선형적 온도감소가 일어나는 것을 알 수 있다.

3) 온도분포에서 6번 절점과 17번 절점의 최대 온도 차이를 고려할 때 균일한 온도분포를 위해서 냉각수관의 위치를 재검토하여 설계를 한다면 몰드의 수명연장과 원활한 작업을 수행할 수 있다.

4) 몰드표면의 최대 온도분포를 코팅하지 않은 연속 주조 몰드와 비교하면 용접 코팅층을 고려한 해석결과가 약 50° 정도 높으며 이는 낮은 열전도계수를 갖는 용접코팅층 두께의 영향으로 판단된다.

5) 상기 결과를 온도분포하중으로 작용시켜 몰드 각 부분에 작용하는 응력과 변형률을 구하는 구조해석의 기본 자료로 활용된다.

참 고 문 헌

[1] 김동원, 기계공학법, 청문각, 1997.
[2] B. Lally et al., "Finite Difference Heat Transfer Modeling for Continuous Casting", Metal. Trans., Vol. 21, pp. 761-770, 1990.
[3] S. K. Choudhary, D. Mazumdar and A. Ghosh, "Mathematical Modeling of Heat Transfer Phenomena in Continuous Casting of Steel", ISIJ., Vol. 33, No.7, pp. 764-774, 1993.

[4] Chen Dongliang et al., "A Method of Modeling the Heat Transfer in Mushy Zone during Solidification of Steel", Steel and Iron, Vol. 36, No. 6, pp. 22, 1996.
[5] Cui Xiaochao, Wang Youhong and Suo Jingyun, "The Stress and Strain Analysis of Copper Mold in Coupling", The 2nd International Conference on Continuous Casting of Steel, Wuhan, China, pp. 451-453, 1997.
[6] J. Selaries et al., "Continuous Casting Process Optimization through an Improved thermal Modeling of the Cast Steel Products", 80th Steelmaking Conference, Chicago, pp. 272-273, 1997.
[7] ANSYS User's Manual Revision 5.3, Swanson Analysis System, Inc., 1996.
[8] ANSYS Thermal Analysis Guide Revision 5.3, Swanson Analysis System, Inc., 1994.
[9] James Shackelford and William Alexander, Material Science & Engineering Hand Book, CRC Press, 1994.