

유한요소법에 의한 레일의 압연공정 해석

The Analysis of Rail Rolling by Finite Element Method

구병춘* 윤용식**
Goo, Byeong-Choon Yoon, Yong-Suk

ABSTRACT

Rails are produced by several rolling processes. These processes play an important role on the performance of rails. We analysed the rolling processes by finite element code, DEFORM. The distributions of temperatures and effective strains are obtained. After the rolling processes, the rails are sent to the cooling bed. During the cooling, the rails are bended and twisted. These bending and twisting should be minimized to produce a high quality rail. The analyses of cooling processes and residual stresses produced through the rolling processes will be presented in the next paper.

1. 서론

압연가공은 서로 반대 방향으로 회전하는 두개의 롤 사이에 재료를 통과시켜 판재, 형재, 관재 등 원하는 형상으로 성형하는 소성 가공법이다. 이 방법은 연속가공이 가능하므로 작업이 신속하고 생산비가 저렴하여 균일한 단면형상을 갖는 긴 강재의 생산에 가장 적합한 방법일 뿐만 아니라 대형 강재에서 박판에 이르기까지 다양한 제품을 제조할 수 있다. 또한 가장 오래된 소성가공의 하나로서 매년 생산되는 압연제품의 막대한 양과 그 다양성으로 볼 때 매우 중요한 분야이다. 이와 같은 중요성에 비추어 압연문제에 대한 많은 연구가 실험, 해석적으로 반세기 이상 수행되어 왔다.

최근에는 유한요소법을 이용한 해석기술을 제품생산에 도입하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 생산공정을 다양하게 해석하고 분석함으로써 제품 생산과정에서 발생할 수 있는 문제점을 설계과정에서 최소화할 수 있다는 점과 비전문가도 설계과정에 쉽게 참여할 수 있다는 점에서 이제는 반드시 필요한 설계기술로 정착되어 가고 있다.

본 연구는 소성가공 전용 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 레일 압연공정에서 발생되는 문제점을 사전에 파악하고 그 개선점을 찾는 것으로 압연성형공정과 성형후 공냉시 열변형에 대하여 해석을 수행하였다. 피압연재의 3차원 변형 해석, 롤과 소재접점의 접촉 처리, 압연롤과 피압연재의 열유동 예측을 위한 열전달, 압연롤과 소재의 열전달을 고려한 접촉문제 등의 내용이 포함된다. 열전달 해석은 시간증분에 따른 변형해석이 완료된 후 해석 결과를 바탕으로 계산이 수행되며, 그 결과는 다음 단계의 변형해석과정에 사용된다. 열전달 해석에는 열의 생성, 전도, 복사, 대류 등의 계산과 롤과 소재 사이의 열전달 계산을 위한 요소간의 접촉 처리 기능 등이 포함된다. 각 공정에서 레일의 온도, 변형률, 응력 분포 등을 해석하며 그 결과를 바탕으로 성형후 공냉시 발생하는 열변형을 예측하여 레일의 휨이 최소가 되는 공정조건을 결정한다.

* 한국철도기술연구원 차량연구부 선임연구원

** A.T.E.S Ltd, 기술연구소 연구원

2. 레일의 압연공정

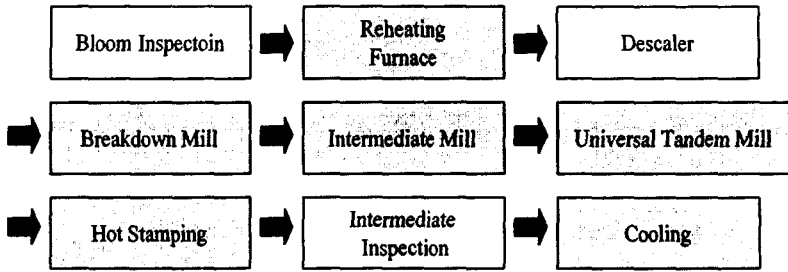


Fig. 1. 레일의 압연 공정

Fig. 1에 레일 압연 공정을 도시하였다. 먼저 $1100^{\circ}\text{C}\sim 1150^{\circ}\text{C}$ 로 가열된 Bloom이 재가열로에서 나오게 된다. 그 후 표면의 산화막을 벗겨내는 Descaler과정을 거치고 본격적으로 성형과정에 들어간다. Breakdown Mill에서 6개의 압연성형과정을 지나게 되고, Intermediate Mill에서 3개의 압연성형과정을 지나며 점차 레일형상으로 만들어 간다. 마지막으로 Universal Tandem Mill에 들어가서 4개 압연롤의 조합을 거쳐서 최종형상이 성형된다. 그리고 마크를 찍는 Hot Stamping 공정과 중간 검사단계인 Intermediate Inspection을 거친다. 이런 과정을 거친 Bloom은 Cooling Bed에 놓여서 식게 된다. 마지막 공냉과정에서 Bloom은 성형중 불균일한 온도분포를 갖게 되고, 따라서 온도 차이에 의해 휘어지게 된다. 휘어진 레일은 롤러에 의해 교정작업을 받게 되는데 이 교정작업 중에 레일은 소성변형을 받아 잔류응력을 발생한다. 따라서 잔류응력을 줄이기 위해서는 교정작업 전에 레일에 발생하는 변형량을 최소로 할 필요가 있다.

3. 유한요소 해석 이론

압연에 관한 해석적 연구를 살펴보면 초기에는 대부분이 평면변형 하에서 금속의 유동현상보다는 압연하중 및 토오크 등을 계산하는 것이었다. 그러나 점차 컴퓨터의 계산능력이 크게 향상되면서 금속유동양상에 관한 자세한 연구가 이루어지게 되었으며 근래에는 근사화한 3차원 해석법 또는 3차원 유한요소법을 사용하여 평압연 후 소재의 폭퍼짐, 단면형상에 관한 입체형상에 관한 연구도 시작되었다. 한편 압연에 관한 중요한 연구로서는 1980년대 이후로 활발히 연구되고 있는 소재와 압연롤의 열전달 문제가 있다. 공정중 온도의 변화는 소재의 가공 경화성과 결정구조, 압연롤의 열변형에 영향을 주게 되어 제품의 품질과 롤의 수명상태를 결정하는 중요한 요소가 된다. 그 밖에도 롤의 탄성변형이 소재변형에 미치는 영향, 압연공정중 소재의 결정구조 변화에 관한 연구들이 진행되고 있다.

해석적 연구방법으로는 슬래브법(slab method), 미끄럼 선장법(slip line method), 상계해법(upper bound method), 유한요소법(finite element method)이 있다. Oh와 Kobayashi[1]는 완전 강소성 재질에 극치정리를 사용하여 압연공정을 3차원으로 해석하였다. 한편 Gokyu[2]는 최소일을 가정하여 평압연에서의 폭퍼짐을 해석하였으며, Lahoti와 Kobayashi[3]는 Hill의 방법을 사용하여 롤과 소재 사이의 마찰을 무시한 폭퍼짐을 계산하였다. 이와 같은 방법들은 해석방법이 간단한 장점이 있으나 과도한 단순화, 이상화로 인해 소재의 변형에 관하여 얻을 수 있는 자료가 극히 제한적이라는 단점이 있다.

유한요소해석법은 문제를 실제에 가깝게 해석할 수 있으며 다양한 문제에 적용할 수 있는 장점이 있으나, 다른 방법에 비해 계산용량과 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있었다. 그러나 최근 컴퓨터의 성능이 급속도로 발전하면서 이제는 가장 일반적으로 사용되는 해석법으로 자리잡아 가

고 있다. 압연문제에 유한요소법을 적용한 예를 살펴보면 Tamano등[4] 등은 롤과 소재사이에 미끄러짐이 없다고 가정하고 탄소성 유한요소법으로 평면변형조건의 압연공정을 해석하였으며, Dawson[5]은 온도까지 고려하여 점소성 재료의 변형을 다루었다. Li와 Kobayashi[6]는 미소소성 변형이론(infinitesimal deformation theory)에 기초를 둔 강소성 유한요소법을 수식화하여 정상상태와 비정상 상태의 압연공정을 해석하였다. 그 결과 속도장, 소재의 유동변형, 응력, 변형률, 롤에 걸리는 회전력(torque), 압하력 등에 대한 다양한 정보를 구하였으며, 또한 실험과 해석결과를 비교하였다.

압연공정에 대한 3차원 해석은 과도한 계산시간과 계산용량 때문에 최근까지도 사용이 제한되었으나 소재의 변형상태를 보다 실제와 가깝게 볼 수 있다는 장점 때문에 특히 관심을 끌고 있는 분야이다. 압연에서 소재의 두께와 폭의 비가 10이상이면 거의 폭방향으로의 변형이 없는 것으로 생각할 수 있으며 2차원 해석이 가능하다. Mori와 Osakada[7]는 미소 압축성을 가정한 다공질 재료(porous material)의 항복 조건식을 바탕으로 강소성 유한요소 방정식을 수식화하고 단순화된 3차원 요소를 사용하여 판재압연과 테두리압연 해석을 하였다. Liu[8] 등은 탄소성 유한요소법을 이용하여 강재료의 냉간압연을 완전 3차원으로 해석하여 폭변화, 변형상태 및 소재의 변형 속도장 등을 구하고 기존의 시험결과와 비교하였다. Park과 Oh[9]는 완전 3차원 강소성 유한요소법을 사용하여 평압연 및 형압연에 대한 비정상 해석을 수행하였으며 압연하중, 소재의 변형 경향, 소재의 변형률 분포 등을 연구한 바 있다.

온도는 소재의 기계적 성질과 금속조직에 변화시키므로 소성가공에서 매우 중요한 요소가 된다. 특히 고온에서 공정이 이루어지는 열간압연의 경우 소재는 복사, 전도, 대류 등 다양한 열전달에 의해 온도의 변화가 심하다. 이에 따라 온도에 의해 결정되는 변형저항도 변하게 되므로 변형해석과 함께 열전달 해석은 반드시 함께 이루어져야 한다. Bishop[10]은 변형열의 발생(deformation heat generation)과 열전도(heat conduction)을 고려하여 온도장을 계산하고 이 온도장 하에서 소재의 유동 속도장을 구하는 방법을 제안하였다. 이 방법을 사용하여 Altan과 Kobayashi[11]는 압출공정을 해석하였다.

Kobayashi와 Rebelo[12]는 열역학이론(thermodynamic theory)으로부터 비정상 열전달 해석(nonsteady state heat transfer analysis)을 위한 구성방정식을 유도하여 유한요소해석을 위한 열 에너지 평형식을 구성하였으며, 이 식을 사용하여 변형해석과 연계한 열전달 해석을 수행하였다. 압연공정에서 열전달 해석이 이루어진 경우는 1981년 Zienkiewicz, Onate, Heinrich[13] 등이 열간 정상압연에서 온도 효과를 고려한 예가 있으며, Karagiozis와 Lenard[14]는 대류(convection)를 고려하여 정상상태(steady state)의 열전달 구성식을 유도하고 냉간 및 열간 압연 공정을 유한 요소법으로 해석하였다.

4. 레일압연공정의 3차원 유한요소해석

앞에서도 언급되었지만 레일압연공정은 먼저 Breakdown Mill에서 6개의 성형과정과 Intermediate Mill에서 3개의 성형과정 그리고 Universal Tandem Mill(UTM or RTM)에서 4개 압연롤의 조합을 거쳐 성형된다. 본 연구에서는 RTM 진입전 Bloom의 표면 측정온도를 초기조건으로 입력하여 RTM의 6개 공정과 공냉과정에 대하여 수행하였다.

초기 RTM 진입전 Bloom의 표면온도를 990℃로 가정하고, 내부는 Bloom이 재가열로에서의 추출온도가 1100~1150℃이므로 변형에 따른 변형열을 고려하여 1150℃로 가정하였다. 롤의 회전속도는 4.6m/sec를 기준으로 하였으며 롤의 온도는 100℃로 일정하다고 보았다. 마찰계수는 일정전단 마찰로 0.6을 적용하였고 열전달 해석에 필요한 열물성치들은 참고문헌[15]의 값을 이용하였다. 유동응력은 온도, 변형률, 변형률 속도의 영향을 받게되며 DEFORM의 Database에 있는 AISI1070을 사용하였다.

또한 각 패스에서 Bloom의 온도가 재결정 온도이상을 유지하므로 각 패스 성형전에 유효변형률을 0으로 가정하였다.

RTM공정은 4개 압연롤의 조합을 이루며, Bloom은 총 6패스를 거치게 된다. 각 패스의 단면 형상은 Fig. 2에 도시하였다. 단면 형상이 상하 대칭이므로 아래부분만을 해석에 이용하였다. RTM 진입전 Bloom에 초기조건은 표면의 중간위치(웹)가 약 990℃정도이고 두부(Head) 및 저부(Base)의 모서리가 920℃정도로 가장 낮게 분포하였으며 내부는 1145℃정도로 가장 높게 적용하였다.

먼저 1패스의 Bloom 및 롤의 초기형상을 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3에서 가운데 롤의 회전으로 인해 압연되며, 양 옆의 롤은 idle상태로 해석에서는 마찰계수 0의 조건으로 고려하였다. Fig. 4에는 1패스에서 Bloom의 온도분포를 나타내었다. 변형은 두부(Head) 및 저부(Base)의 양 옆면과 웹에서 진행되며, 롤에 의해 압연되면서 변형되는 부분은 약간의 온도가 상승하였다. 최저 924℃에서 최고 1149℃의 온도분포를 보이고 있다. 최저 및 최고 온도가 약간씩 상승한 것을 알 수 있다. 또한 1패스에서의 유효변형률과 유효 응력분포는 Fig. 5와 6에 나타내었다.

2패스에서의 Bloom 및 롤의 초기형상을 Fig. 7에 도시하였다. 변형은 두부(Head) 및 저부(Base)의 윗부분에서 주로 진행된다. 2패스에서 Bloom의 온도분포는 Fig. 8에 나타내었다. 최저 933℃에서 최고 1149℃의 온도분포를 보이고 있으며 최저온도가 1패스에 비해 약 10℃ 상승하였다. 2패스에서의 유효변형률과 유효 응력분포는 Fig. 9와 10에 나타내었다.

3패스에서의 Bloom 및 롤의 초기형상은 Fig. 11에 도시하였다. 1패스와 같은 롤이지만 압하율이 변하게 된다. Fig. 12, 13에서 온도분포를 보면 최저온도는 2패스에 비해 약간 떨어졌으며, 최고온도는 약간 상승하였다. 3패스에서의 유효변형률은 Fig. 14에 나타내었다.

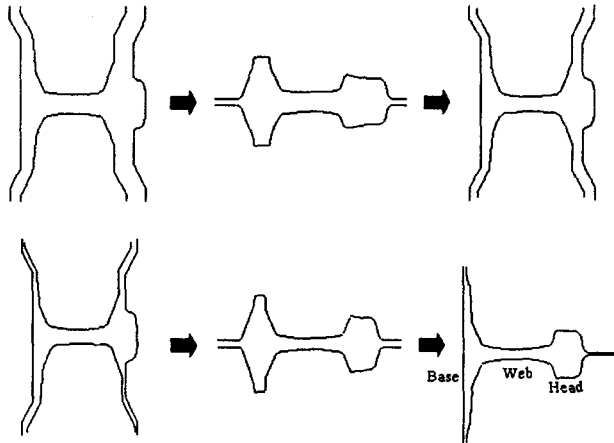


Fig. 2. RTM 공정에서 각 패스의 롤 단면형상

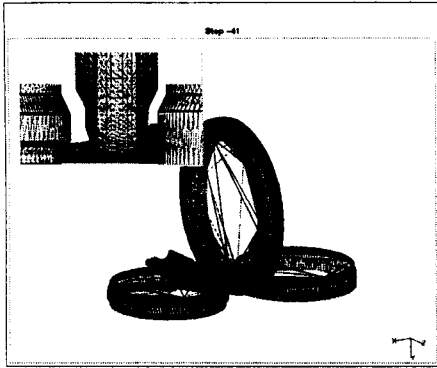


Fig. 3. RTM공정 1패스에서의 초기형상

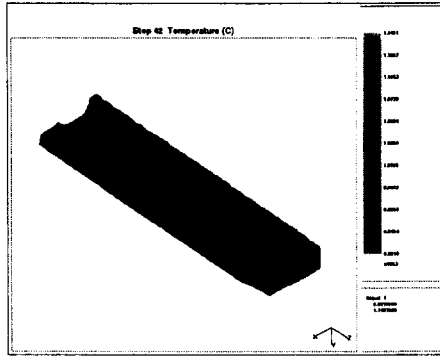


Fig. 4. RTM공정 1패스에서의 온도분포

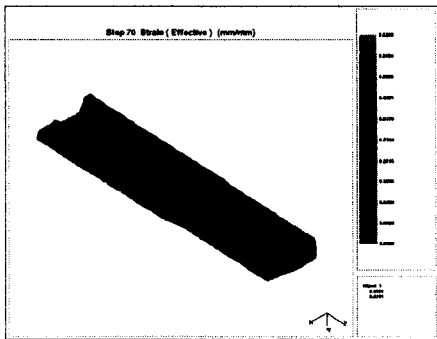


Fig. 5. RTM공정 1패스에서의 유효변형률 분포(step 70)

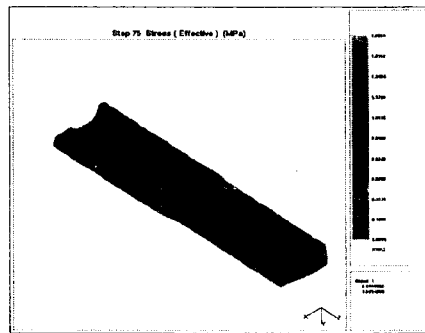


Fig. 6. RTM공정 1패스에서의 유효응력 분포(step 75)

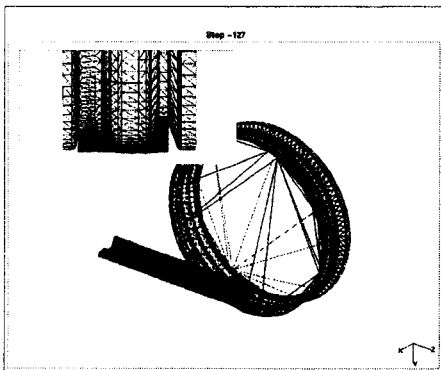


Fig. 7. RTM공정 2패스에서의 초기형상

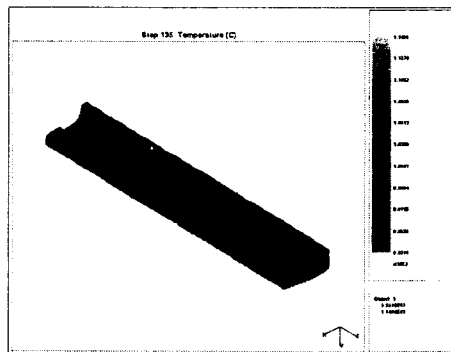


Fig. 8. RTM공정 2패스에서의 온도분포

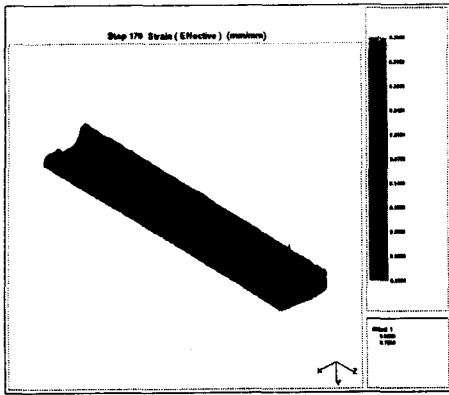


Fig. 9. RTM공정 2패스에서
유효변형률 분포

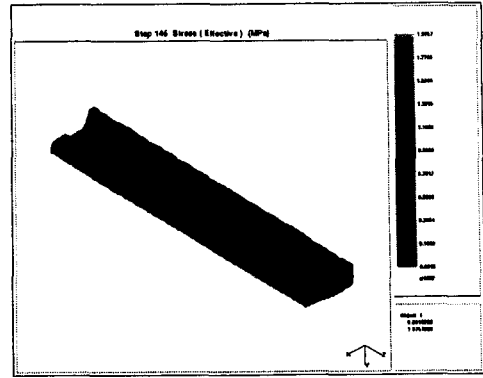


Fig. 10. RTM공정 2패스에서
유효응력 분포

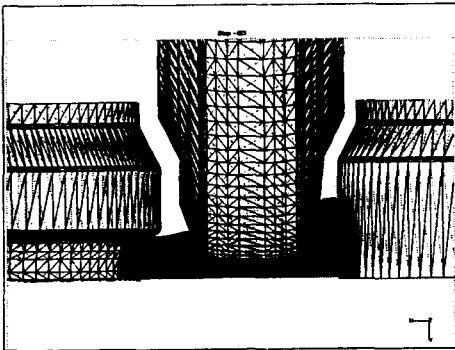


Fig. 11. RTM공정 3패스에서
초기형상

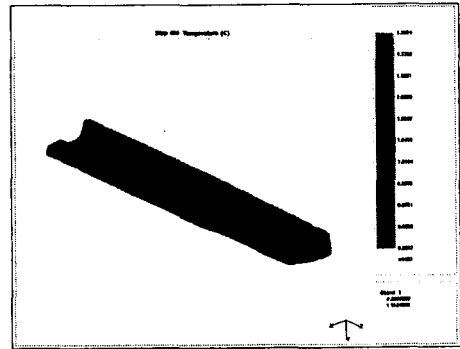


Fig. 12. RTM공정 3패스에서
온도분포

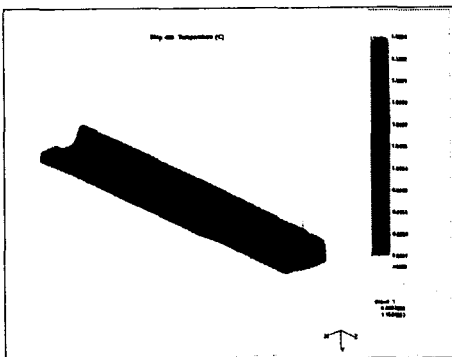


Fig. 13. RTM공정 3패스에서
온도분포

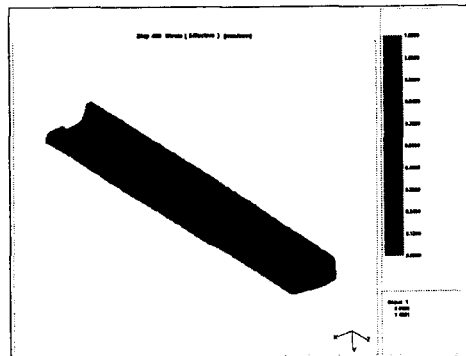


Fig. 14. RTM공정 3패스에서
유효변형률 분포

5. 결론

철도 레일의 압연 성형공정에 대하여 상용유한요소 프로그램인 DEFORM을 이용하여 성형해석 및 열변형해석을 수행하였다. 본 연구는 레일의 압연 성형공정중 Breakdown Mill(BDM), Intermediate Mill(V1)과정은 측정 데이터를 이용한 초기조건을 적용하여 생략하고 Universal Tandem Mill(UTM or RTM)과정에 대하여 압연공정의 해석을 하였다.

레일은 압연중 변형과 마찰에 따른 열발생과 공기와의 대류 및 복사, 롤과의 접촉에 따른 열전달에 따라 불균일한 온도분포를 보이게 된다. 이러한 온도분포를 가진 레일은 공냉상태에서 열변형에 의하여 휘어지게된다. 이렇게 휘어진 레일은 교정작업을 거치게 된다. 교정작업에 의해 레일에는 잔류응력이 발생하게 되므로 이 잔류응력을 최소로 하기 위해서는 냉각과정이 끝난 레일의 휨을 최소한으로 하여야 한다. 이 냉각과정에서의 휨에 대한 결과는 다음에 발표될 것이다.

참고 문헌

1. Oh, S. I & Kobayashi, S., "An Approximate Method for A Three-Dimensional Analysis of a Rolling", Int. J. Mech Sci, Vol. 17, p. 293, 1975.
2. Gokyu, I., Kiharai, J., Mal, Y., "Steady on the Width Spread in Flat Rolling," J. Japan. Soc. Tech. Plast, Vol. 11, p. 11, 1970.
3. Lahoti, G. D. and Kobayashi, S., "On Hill's General Method of Analysis for Metal-working Processes", Int. J. Mech. Sci., Vol. 16, p. 521, 1974.
4. Tamano, T. and Yanagimoto, S., "Finite Element Analysis of Steady Metal Flow Problems", Trans. JSME, Vol. 41, p. 1130, 1975.
5. Dawson, P. R., "Viscoplastic Finite Element Analysis of Steady-state Forming Processes Including Strain History and Stress Flux Dependence Application of Numerical Methods to Forming Processes," ASME, AMD, Vol. 28, p. 55, 1978.
6. Li, G. J. and Kobayashi S., "Rigid Plastic Finite Element Analysis of Plane Strain Rolling," Trans, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, p. 55, 1982.
7. Mori, K. and Osakada, K., "Simulation of Three-Dimensional Deformation in Rolling by The Finite Element Method", Int. J. Mech. Sci, Vol. 26, p. 515, 1984.
8. Liu, C., Hartley, P., Sturgess, C. E. N. and Rowe, G. W., "Finite Element Modelling of Deformation and Spread in Slab Rolling ", Int. J. Mech. Sci., Vol. 29., p. 271, 1987.
9. Park, J. J., Oh, S. I., "Application of Three Dimensional Finite Element Analysis to Shape Rolling Processes" Transactions of the ASME, Vol. 112. p.36-45 1991.
10. Bishop, J. F. W., "An Approximate Method for Determining the Temperature Reached in Steady State Motion Problems of Plane Plastic Strain ", Q. J. Mech. Appl. Math., Vol .9, p. 236, 1956.
11. Altan, T. and Kobayashi, S., "A Numerical Method for Estimating the Temperature Distributions in Extrusion through Conical Dies", Trans. ASME, J. Engr. Ind., Vol. 90, p. 107, 1968.
12. Rebelo, N., and Kobayashi, S., "A Coupled Analysis of Viscoplastic Deformation and Heat Transfer-I. Theoretical Consideration", Int. J. Mech. Sci., Vol. 22, p. 699, 1980.
13. Zienkiewicz, O. C., Jain, P. C. and Onate., and Heinrich, J. C., "Plastic Flow in Metal Forming -I. Coupled Thermal Behavior in Extrusion - II. Thin Sheet Forming", Applications of Numerical Methods to Forming Processes, ASME, AMD, Vol. 28, p. 107, 1978.
14. Karagiozis, A. N., and Lenard, J. G., "Temperature Distribution in a Slab During Hot Rolling," ASME J. Eng. Material and Tech., Vol. 110, p. 17, 1988.
15. 구병춘 외3명, 레일 제조공정에서 비금속 개재물에 의한 레일의 잔류 응력 해석, 춘계학술대회, 한국철도학회, 1999.