

“Ring생산 Control System의 퍼지 적응제어”

(An Adaptive Fuzzy Control for Closed-Die Ring-Rolling Process)

이 용 현 (Young-Hyun Lee)*

*포항제철 기술연구소 계측제어연구팀, 책임연구원

Tel: +82-562-279-6535; FAX: +82-562-279-6509; E-Mail: pc551162@smail.posco.co.kr

논문요약: 발전설비나 자동차 그리고 항공우주분야에 사용되는 각종 bearing, 원형부품들에 사용되는 ring을 생산하는 방법중, 가장효과적이고 경제적인 방법은 ring rolling (ring 압연)이다. 이 방법은 직경 50cm에서 2m이상의 원형 ring을 연속적으로 짧은 시간내에 (한 ring당 약 1분) 생산가능 하다.

이제까지의 수학적모델을 사용한 제어시스템은 ring의 단면적이 사각형인 제품에는 최소한의 오차로 생산 가능하였으나, plant의 생산성과 제품의 다양성을 위하여 ring의 단면적이 복잡한 것을 생산시에는 문제점이 노출되었다. 왜냐하면 기존의 수학적모델이 roll gap 또는 metal forming zone에 근거하여 modelling하였기 때문이다.

본 논문에서는, 이러한 문제점을 고전적인 수학적모델을 기초로한 adaptive control system의 방법대신에, 축적된 control system설계와 운용 경험을 이용하여 설계한 퍼지제어기 및 그것의 실적용 그리고 그 결과를 소개한다.

실적용 결과는, 제조된 단면적이 상대적으로 복잡한 bearing의 형상이 (filling grad) 이 제어기의 제어정도 판단기준이었는데, 99.5%의 형상도를 보임으로서 industry에서 요구하는 제품기준을 만족시켰다. 또한 짧은 제어기 설계 및 on-line optimization 기간 또한 이 제어기의 장점이었다.

Abstract: The ring rolling process is one of the best known ring production method. The present model based control system was designed for rings with rectangle cross-section yet. An Adaptive Fuzzy Control for Closed-Die Ring-Rolling was developed in order to enhance the flexibility of the radial-axial ring rolling machine and to produce the rings with highly complex cross-section profile, roller bearing rings.

A fuzzy method was implemented because of its simple application and to utilize the known process knowledge. The quality of the control system was estimated by die filling grad, which is strong dependent on the rising time of the controller. The rolling process parameters were also varied to determine their influence on filling of the ring profile.

Die filling met the requirement of the industry.

Keywords: Production Process, Fuzzy Control, Closed-Die Ring Rolling

1. Ring Rolling Process

발전설비나 자동차 그리고 항공우주분야에 사용되는 각종 bearing, 원형부품들에 사용되는 ring을 생산하는 방법중, 가장효과적이고 경제적인 방법은 ring rolling (ring 압연)이다. 이 방법은 직경 50cm에서 2m이상의 원형 ring을 연속적으로 짧은 시간내에 (한 ring당 약 1분) 생산가능 하다.

이 프로세스는 가열로에서 가열된 초기 직경을 가진 ring이 ring rolling machine의 중앙에 위치한 mandrel - 그림 1 참조 - 에 얹혀진후 (또는 끼워진후) 시작된다. 그림 1에서와 같이 axial 과 radial roll gap에서 동시에 그리고 연속적으로 forming이 되어 ring의 직경이 증가하면서 형상error없이 원하는 직경, 두께 및 폭이 될때까지 압연된다. 여러 형상error들중에 소위 dog-bone-error와 fish-mouth-error가 특히 소재의 절삭면에서 문제가 된다. 이런error가 발생할것을 예상하여 생산현장에서는 10%내지 20%의 소재를 원소재에 더하여 rolling한후, 절삭을 하여 제품출하를 한다. 이러한 형상error는 주로 두gap에서 일어나는 소성적인특성, 즉 $\phi (= \ln h_1/h_0, = \ln s_1/s_0)$ 가

0.1보다 작기때문에 ring단면 중앙부까지 소성변형이 일어나지않기 때문이다.

이 plant의 기존control system은 이 두roll gap들의 변형상태를 최적조정하여 형상error를 최대한 줄이고, 또한 이 기계의 power를 최대한 이용하기위해 수학적인 모델을 사용함과 동시에 모델 파라미터를 on-line적용 시켰다. 이 모델에서 계산되는 주된 값은 ring의 반회전후의 예상 압하력(F), 모멘트(M)와 ring의 직경증가속도(\dot{D}) 로서, 이렇게 계산된 값에서 다음주기의 radial과 axial roll의 진행속도(\dot{s}, \dot{h})를 output값으로 내어준다^[1]. 이외에도 기계적특성 그리고 소성가공적인 특성이 고려되어 다음과 같은 control system design concept가 정해졌다, 즉 제어방법의 선택, control variable, 최적화 목표치, 제어의 안정도, 제어주기 등 을 결정하는 것이다. :

- 적응제어: 이 프로세스는 비안정적 (instationary)이고 정확한 물성을 파악 할수없어서 이 기법을 사용하였다.

- 형상error를 최대한 줄일수있는 technology적인 방법을 고려한 control variable은 roll gap의 geometry이지만, 이 값은 측정하기도 제어하기도 어려우므로, 수학적인 관계를 이끌어낼수있는 대체값인

radial과 axial roll의 진행속도(\dot{s} , \dot{h})를 control variable로 선택했다.

- control방법의 선택: 일단은 ring의 형상이 가장중요한 목표치이므로 position control을 선택하였고, 또한 이 기계의 다양성을 고려해 간단한 force control의 기능도 첨가 설계했다.
- control system의 최적화 목표치들은 최소rolling시간과 형상의 정확도이다.
- 제어의 안정도를 확보하기위하여 기계의 최대 power한계의 근방에서 제어하게하였다.
- 동적인 이 프로세스성질과 복잡한model계산을 제어주기에 맞추기위해 realtime control system을 또한 priority가 다른 3개의 job으로 system을 나누어 사용하였음. 제어주기는 20ms - 100ms로 결정되었다.

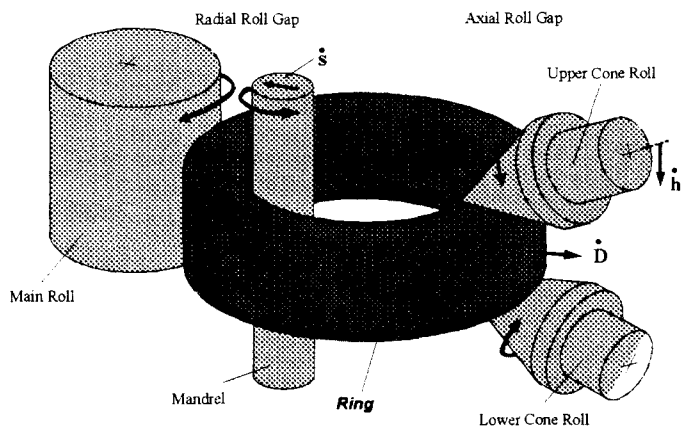


그림 1: ring rolling의 개략도

이 제어 시스템은 위의 요구사항을 충족시키기 위해 PLC와 process computer로 분산해서 구성하였고, multitasking과 realtime processing을 위해 Multibus II-System을 택했다 (그림 2).

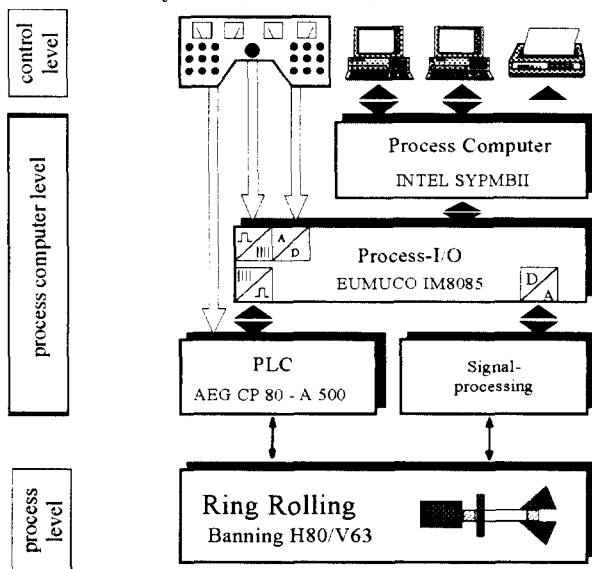


그림2: ring rolling control system의 구조

2. Bearing의 Ring 생산 시스템의 문제점 과 대안

폐쇄식 (closed-Die) ring rolling방법은 복잡한 profile을 가진 ring을 생산하기위해 이미 사용되었지만 단지 이를 위해 특별히 제작된 rolling machine으로서만 가능했다⁽²⁾. 그러나 기존의 rolling machine의 사용범위를 넓히기위해 새로 설계된 tool을 제작, 부착하여 복잡한 profile을 가진 ring을 생산할수있는 방법이 연구되어져야 했다. 이를 위해 tool이(기어, die등) 그림 3과 같이 제작되고, 이를 위한 제어가 설계되어져야 했다.

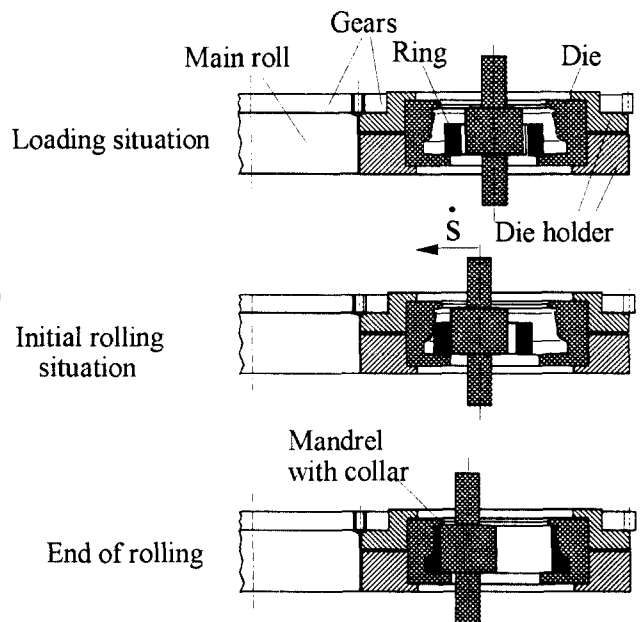


그림3: 폐쇄식 (closed-Die) ring rolling⁽³⁾

이 프로세스의 제어를 위해 이에맞는 수학적 모델의 설계와 모델 최적화를 위해 많은 시간이 필요하기도하고, 또한 설계, 운용경험을 최대한 이용하기위해, 하나는 기존의 알고리즘을 최적화함⁽³⁾과 동시에 퍼지기법을 이용하여 제어를 설계하게되었음. Technology관점에서 파악된 제어가 만족해야하는 사항은 다음과 같다:

- ring과 tool의 접촉면적이 상대적으로 크기때문에 열손실을 최소화 하기위해 짧은 rolling force 상승시간이 요구되어짐.
- main rolling phase때는 die형상을 완전히 채우기위해 constant force를 유지 (constant roll force control)
- 폐쇄식 (closed-Die) ring rolling이기 때문에 dia형상이 채워진지 측정 불가능하므로 적절한 end-of-process criterion을, 즉 대체값을 정해야함.

3. Adaptive Fuzzy Control System

3.1 퍼지이론의 의미

1956년 Zadeh 교수에 의해 제안된 퍼지이론의 제안배경은, 본인의 말을 빌면, 기존의 제어기 설계방법을 사용할때 제어대상이 복잡해질수록 제어기 자체의 복잡도는 더욱더 증가한다는 것이다. 이렇게 복잡해진 제어기는 결국 이를 설계한 엔지니어 자신도 관조(overview)할수 없게 된다는 것이다 (in-compatibility principle). 이 이유는 제어방법이나 제어대상의 modelling을 수학적으로 하기때문이라는 것인데, 즉 수학적으로 표현된 모델을 tuning하고자할때 출력error에 연관된 모델내의 파라미터를 정확히 찾아내기 어렵게 된다는 것이다. 일반적으로 어떤 엔지니어가 제어기를 설계하고자 할때 대부분은 수학적인 모델을 세우기전에 직관적(engineer sense)으로 자신의 언어로서 -linguistic model- control strategy를 결정한다. 그러나 다음 단계에서는, 불행이도, 물리적 또는 화학적관계를 수식으로 표현하고, 그다음 설계단계에서는 더이상 linguistic model을 사용하지 않고 수학적 모델을 풀어내는데 집중하게된다. 이는 결국 엔지니어 본연의 제어기설계의 역할보다는 계산과 증명의 일에 치중하게되는 반전된 상황이 되게되는 것이다⁽⁴⁾. 이러한 문제점을 인식한 Zadeh 교수는 결국 왜 linguistic model을 사용하지 않는가와, 어떻게 자연언어를 modelling할것 인가를 연구하여 퍼지이론을 제안하게된것인데, 이는 자연언어가 갖고있는 "모호성 (vagueness)"과 "주관적 성질"을 모델화 한것이 퍼지집합이론이다⁽⁵⁾. 이의 또다른 의미는 이로서 "knowledge engineering", "intelligent engineering"의 한방법이 된다는 것인데, 수식으로 표현된 지식보다는 인간이 그들의 언어로 -data나 information보다 보다 함축된 의미로서- 지식을 전달하기 때문이다⁽⁴⁾.

3.2 폐쇄식 (closed-Die) ring rolling을 위한 퍼지제어기의 설계

필자가 제안한 퍼지제어기의 설계방법은 논문 [6]에서 논의 된바 있다. 기본적인 concept는 퍼지제어기가 제안된 이래 또다시 rule갯수의 증가등에 의해 복잡해지는 경향이 있는데, 이는 원래의 퍼지이론의 의미에 반하는 것으로서, 이를 극복하기위한 한 방법으로서 phase분할방법과 설계순서를 제한 하였다.

제2절에 열거된 문제점을 해결하기위해 먼저 입출력변수를 설정하였는데, 입출변수는 mandrel의 위치(현재 소재의 두께: s_{ist})와 radial rolling force(F_r), radial rolling moment(M_r)이고, 출력변수는 mandrel의 진행속도(mandrel infeed rate: \dot{s})이다. 이 control system의 phase도는 그림 4와 같다.

"stand-by" phase에서는 퍼지제어기는 process computer에서 start flag을 기다리는데, 이 flag은 기계의 안전 -모터, 유압 밸브, 압력, 모터의 상태 등-을 점검후 setting이 된다. 이 신호를 받은후 ring rolling프로세스가 시작된다.그후 mandrel은 main roll방향으로 15mm/s의 속도로 (그림 5) ring이 main roll에 접근할때까지 진행을 하는데, 이 속도는 최대한 온도손실을 줄이기위해 빨라야 하지만, ring과

main의 접촉시 ring의 회전을 못하게하는 force impulse를 방지하기위해 기계의 최대속도 보다 낮게 정해지고 또한 slow down하기위해 그림 5와 같이 속도 profile을 정했다 ("approach"-phase).

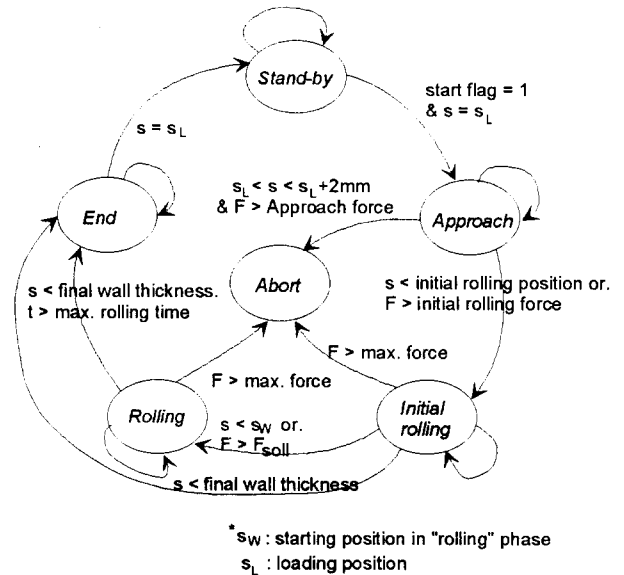


그림 4: 폐쇄식 (closed-Die) ring rolling의 퍼지제어기의 phase도

이 phase상태에서는 아직 ring의 열에너지가 큰상태 이므로 -작은 소성저항력- 가능한 최대의 두께감소를 위해 force제어가 아닌 위치제어 방법을 택했다. 왜냐하면 이 phase의 물성상태를 model이 없이는 -model의 정확도는 문제시 않는다 하더라도- force의 예측이 어렵기 때문이다 (yield stress: $k_f = (\phi, \varphi, \vartheta(\text{온도}), \dots)$). 그 이후 roll force가 일정한 값을 갖게되거나 (600kN-650kN), 두께가 일정두께 이하게되면 다음 phase("rolling")로 넘어가게된다. 이 phase에서는 제2절에서 요구되어진것과 같이 constant force를 유지하여야하기 때문에 제어방법을 force-led position제어방법을 택했다. 만약 경험치인 최대 rolling시간이 경과되거나 두께가 최소두께가되면 이 프로세스는 끝나게 된다("end"-phase). 이 phase들 중 "approach", "initial rolling", "rolling" 과 limit관찰을 위한 "monitoring" 제어기는 퍼지방법을 사용했고, 나머지는 고전적인 방법을 사용하여 설계를 했다.

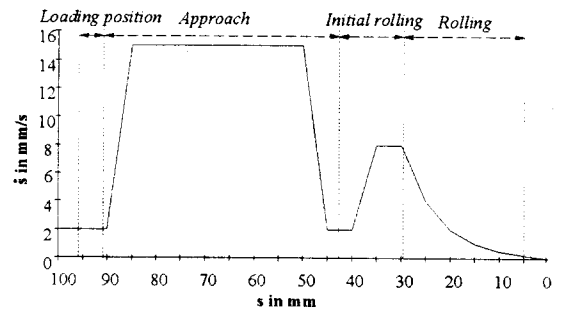


그림 5: "approach" phase의 reference 속도 profile

3.3 "rolling"-phase의 퍼지제어기

위 제어기들 중 핵심적인 "rolling"-phase의 퍼지제어기를 간략히 소개하고자 한다. 일반적으로 요구되는 rolling force와 mandrel의 진행속도의 수학적 관계는 복잡한 물성때문에 예측이 어렵거나 복잡하다 (3차원 FEM-simulation 등의 방법으로 예측가능 하기도 하겠지만). 이러한 이유로 fuzzy block 4(그림 6)에서 상수로 일단 설정하고, on-line, off-line 최적화때에 결정을 하였다. 또한 fuzzy block 3에서는 reference mandrel 진행속도(\dot{s}_{soll})를 F_{norm} 이 1이 되도록 변화를 시키기위해 연속적으로 진행속도(\dot{s}_{soll})값을 결정 한다. 단 이를 위해서는 빠른 control cycle시간과 빠른 유압servo밸브의 response가 요구 되는데 이 시스템은 약 20ms로 이것이 가능 했다.

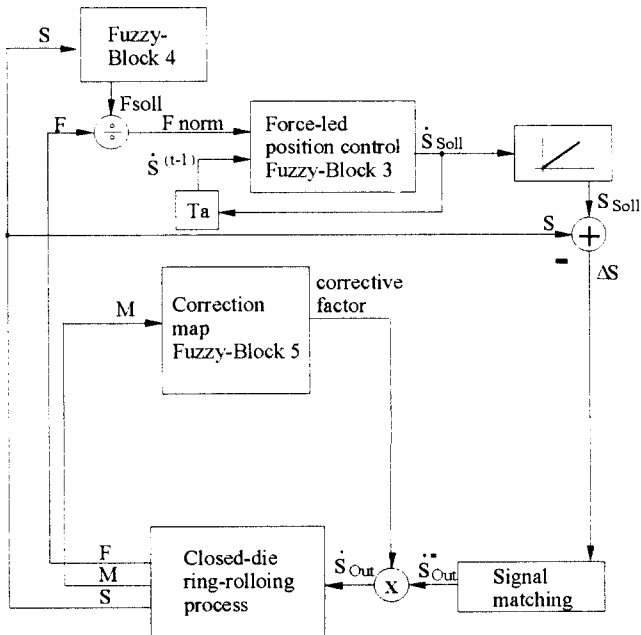


그림 6: "rolling"-phase의 퍼지제어기

이러한 개념과 concept들은 퍼지rule base에 반영되어 (IF-THEN-Rule) 퍼지제어기가 설계 되었다. 간단한 예로서,

IF F_{norm} large AND 진행속도($\dot{s}^{(t-1)}$)small, THEN 진행속도(\dot{s}_{soll})large

(만약 현재의 force가 작고 그리고 한 단계전의 mandrel진행속도가 작으면, 그러면 다음단계에서는 mandrel진행속도를 크게해라)

IF F_{norm} small AND $\dot{s}^{(t-1)}$ large, THEN \dot{s}_{soll} small

(만약 현재의 force가 크고 그리고 한 단계전의 mandrel진행속도가 크면, 그러면 다음단계에서는 mandrel진행속도를 작게해라)

4. 결과

퍼지 파라미터들은 실적용을 통하여 최적화 하였고 제2절에서 요구되어진 조건들을 만족하였다: 즉,

짧은 rolling force 상승시간은 그림 7 (Ring 6)에서 보논바와 같이 약 5초이고, 이는 고전적 제어기의

그것보다 15초정도 (Ring 5) 빨랐다. 단지 roll force의 deviation이 크게 단점으로 지적할수있는데 이는 퍼지제어기내에 적응-block을 첨가하여 해결하였는데, 한 rule을 소개하면:

IF 현 force가 크면 AND 변화가 빠르면, TEHN reference mandrel속도를 아주작게한다 (즉, 유압밸브를 빨리 닫아라)

그림 7의 Ring 1은 기존 제어기를 최적화 한것이다. 또한 형상도도 (filling grad)도 99.5%로서 다른 - 기존 제어기나 최적화된 제어기 (91%-99%)-보다 우수했다.

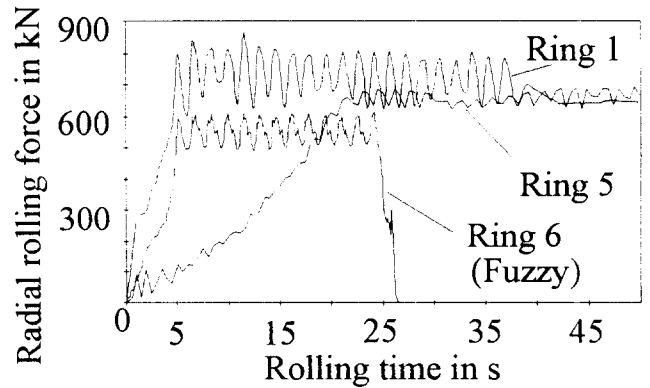


그림 7: 측정된 rolling force

이러한 결과의 실질적 의미는 기존의 open형 ring rolling을 이용한 bearing-ring을 제조할때보다 closed-die ring rolling에서는 material이 약 42%절약됨을 의미한다 (그림 8).

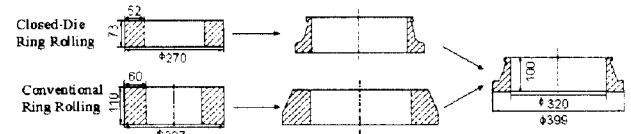


그림 8: 두 bearing ring의 제조공정 비교

(closed-die ring rolling방법: volume= $10.47 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
conventional 방법: volume= $18.15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$)

5. 참고문헌

- [1] Dreinhoff, P.: Adaptive Prozessfuehrung beim Ringwalzwerk, Dr.-Ing.-Dissertation, RWTH Aachen, 1987
- [2] Bido, W.: Walzen von ringfoemigen Koerpern aus der Sicht des Anlagenbetreibers, Berichtsband zum 11. Umformtechnisches Kolloquium, 23/24 Sept. 1982, Aachen
- [3] Kopp, R.; Lee, Y.-H.: Control Strategies for Closed-Die Ring-Rolling of Roller Bearing Rings, WGP-Annalen "Production Engineering" Vol. III/1 (1996), P. 25 -28
- [4] 이 용 현: Intelligent Control with Fuzzy Technologies in the Area of Metal Forming, 전자공학 학회지, 제 22권 제11호, 1995, P. 1301 -1314
- [5] Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets, Information and Control 8, 1965, P. 338 - 353
- [6] Lee, Y.-H.: Anwendung der Fuzzy Control in der Umformtechnik, Dr.-Ing.-Dissertation, RWTH Aachen, 1995