

롤 형상 이상진단 및 이상극복 장력제어에 관한 연구

이창우*(건국대학교 기계설계학과), 신기현(건국대학교 기계항공공학부), 강현규,
김광용(건국대학교 기계설계학과), 최승갑(POSCO), 박철재(POSCO)

A Study on the Fault Diagnosis of Roll-shape and Fault Tolerant Tension Control in a Continuous Process Systems

C. W. Lee*(Mechanical Eng. Dept. KKU), K. H. Shin(Mechanical Aerospace Eng. Dept. KKU), H. K. Kang,
K. Y. Kim(Mechanical Eng. Dept. KKU), C. J. Park(POSCO)

ABSTRACT

The continuous process systems usually consists of various components: driven rollers, idle rolls, load-cell and so on. Even a simple fault in a single component in the line may cause a catastrophic damage on the final products. Therefore it is absolutely necessary to diagnosis the components of the continuous systems. In this paper, an adaptive eccentricity compensation method is presented. And a new diagnosis method for transverse roll shape defects on rolling process is developed. The new method was induced from analyzing the rolling mechanism by using rolling force model, tension model, Hitchcock's equation, and measured delivery thickness of materials etc. Computer simulation results also show that the proposed diagnosis methods is very effective in the diagnosis of 3-D roll shape

Key Words : 이상(Fault), 편심(Eccentricity), 폭 방향 형상 에러(Transverse shape error), 이상극복 장력제어(Fault tolerant tension control), 압연(Rolling), 스탠드(Stand), 이상정도(Threshold)

1. 서론

압연시스템과 같은 연속 공정 시스템은 일반적으로 풀림롤, 감김롤, 압연롤 및 여러 개의 아이들 롤 및 드리븐 롤등의 많은 부품으로 구성되어 있으며, 스펀의 장력값을 측정하기 위한 로드셀을 비롯한 각종 센서들이 설치되어 있다. 이와 같이 많고 다양한 부품으로 구성된 연속공정시스템에서 단 한개의 부품결함이 존재할 경우, 이송 혹은 가공되는 웹 제품에 직접적이고 치명적인 영향을 미친다. 그러므로 시스템의 부품 상태를 항상 감시하여 그 이상(Fault) 여부를 진단하고, 이상정도(Threshold)를 규명하여 부품 이상으로 제품에 발생하는 악영향을 제거하는 방안을 강구하거나, 이상의 정도가 일정 수준이 넘는 부품에 대한 교체 및 수리 지침을 마련하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는, 시스템 내의 각 부품을 통한 소재 가공원리의 규명을 통하여, 소재 가공 중에 측

정되는 소재 형상(두께, 장력 등) 및 시스템 운용(속도 등)에 관한 신호를 역 추적하여, 롤 편심 및 폭 방향 형상에러와 같은 롤 형상 이상을 진단해 내는 기법을 개발하였다. 이러한 진단 기법을 통하여 측정된 신호에 내재된 부품이상 관련 신호의 추출과정을 규명하고, 제품의 품질 규격과 관련된 부품 이상의 정도(Threshold)를 정의하며, 이에 따른 이상 극복 제어 및 이상 부품에 대한 교체 및 수리 가이드라인을 제시할 수 있다.

소재의 장력과 롤의 기계적 상호작용을 분석함으로써 특히 속도, 장력 신호에 내재된 롤 편심 및 롤의 형상 관련신호의 역 추정을 통하여, 롤의 형상을 진단하고 이러한 롤 형상 이상(Eccentricity)에 대한 이상극복 장력 제어기법을 통하여 연속공정 시스템의 부품 이상진단 및 이상극복 제어를 위한 접근 방법을 제시하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험장치를 통하여 제안된 이상 진단기법 및 이상극복 장력제어기법을 증명하였다.

또한 소재의 두께제어를 위해 여러 개의 스탠드로 구성된 압연시스템에서는 롤 편심 뿐만 아니라, 롤의 폭 방향 형상에러가 존재하는 경우 소재 두께 불량 의 원인이 된다.

본 연구에서는 압연시스템에서 압연정보, 소재 두께 정보 및 장력정보 등을 이용하여 롤 편심 뿐만 아니라, 소재의 폭 방향으로의 형상 이상 진단 기법을 개발하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 압연시스템에서의 롤 형상 이상진단 기법에 대한 효용성을 증명하였다.

2. 롤 편심 수학적 모델 및 추정기 설계

2.1 롤 편심 수학적 모델

일반적으로 롤은 완벽한 원으로 간주되지만 많은 경우에 롤은 편심을 갖게 된다. 롤의 회전 중심이 롤 형상의 중심에서 벗어 나게 될 때, 롤의 형상을 Fig. 1 같이 가정 할 수 있다^[1].

$$R = R_{mean} + R_{ecc} = R_{mean} + e \sin(\alpha\theta + \phi) \quad (1)$$

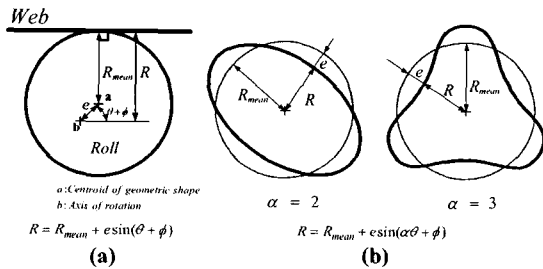


Fig. 1 Mathematical model for roll shape

식(1)의 α 는 무차원 형상계수로서 편심롤의 형상을 나타낸다. (Fig. 1(b) 참고)

다음의 Fig. 2 와 같은 시스템에 대한 운동방정식은 식(2)와 같다.

$$J\dot{\omega} = u - R\Delta T \quad (2)$$

(이때, u = Input torque, $\Delta T = T_n - T_{n-1}$ 이다.)

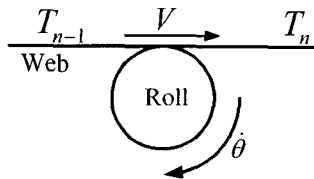


Fig. 2 A free web span

위의 식(2)의 양변에 \dot{R} 을 곱한 후,

$R\dot{\omega} = \dot{v} - \dot{R}\omega$ 을 대입하여 정리하면 다음의 식(3)을 얻는다.

$$J\dot{v} = Ru - R^2\Delta T + J\dot{R}\omega \quad (3)$$

여기서 \dot{v} 은 편심에 의한 접선속도의 변화를 의미하며, 이 값을 0 으로 만드는 모터 입력을 구하면 편심으로 인한 속도 변화를 상쇄할 수 있다. \dot{v} 을 0 으로 만드는 모터 입력은 다음과 같다.

$$u = R\Delta T - \frac{J\dot{R}\omega}{R} \quad (4)$$

식(4)의 모터입력 u 를 구하기 위해서는 반드시 R 과 \dot{R} 에 대한 값이 필요하다. R 은 엔코더를 통한 선속도와 각속도의 관계로부터 결정할 수 있으나 \dot{R} 은 직접적인 측정이 어려우므로 추정기를 설계하여 \dot{R} 을 계산한다.

2.2 추정기 설계

Internal model for roll shape: 상태변수 $z = [z_1, z_2]^T$ 를 다음과 같이 정의한다^[2].

$$z_1 = R = R_{mean} + e \sin(\alpha\theta + \phi) \quad (5)$$

$$z_2 = \frac{e}{\alpha} \cos(\alpha\theta + \phi) \quad (6)$$

상태변수들의 미분치는 다음과 같다.

$$\dot{z}_1 = \dot{\theta}\alpha^2 z_2 = \dot{\theta}\beta z_2 \quad (7)$$

$$\dot{z}_2 = -\dot{\theta}(z_1 - R_{mean}) \quad (8)$$

Observer structure: 관측기는 식(9), (10)으로 구성된다.

$$\dot{\hat{z}}_1 = \dot{\theta}\hat{\beta}\hat{z}_2 - k(\hat{z}_1 - z_1) \quad (9)$$

$$\dot{\hat{z}}_2 = -\dot{\theta}(\hat{z}_1 - R_{mean}) \quad (10)$$

Error equation: 다음과 같이 오차를 정의한다.

$$\tilde{z}_1 = \hat{z}_1 - z_1 = \dot{\theta}\tilde{\beta}\tilde{z}_2 + \dot{\theta}\beta\tilde{z}_2 - k\tilde{z}_1 \quad (11)$$

$$\tilde{z}_2 = \hat{z}_2 - z_2 = -\dot{\theta}\tilde{z}_1 \quad (12)$$

(단, $\tilde{z}_1 = \hat{z}_1 - z_1, \tilde{z}_2 = \hat{z}_2 - z_2, \tilde{\beta} = \hat{\beta} - \beta$ 이다.)

Adaptation law: 오차방정식에 대한 양의한정인 Liapunov 함수를 식(13)과 같이 정의할 때 그 미분은 식(14)와 같다.

$$V = \frac{1}{2}(\hat{z}_1^2 + \alpha^2 \hat{z}_2^2 + \gamma^{-1} \hat{\beta}^2) \quad (13)$$

(단 $\gamma > 0$ 이다.)

$$\dot{V} = -k\hat{z}_1^2 + \hat{\beta}(\hat{\theta}\hat{z}_1\hat{z}_2 + \gamma^{-1}\dot{\hat{\beta}}) \quad (14)$$

이때 식 (15)와 같이 결정하면 $\dot{V} \leq 0$ 되어 음의 한정성을 만족하게 된다.

$$\dot{\hat{\beta}} = -\gamma\hat{\theta}\hat{z}_1\hat{z}_2 \quad (15)$$

결국 이 시스템은 Liapunov direct method에 의하여 점근 안정하므로 적응규칙은 식(15)와 같이 결정하고, 최종적인 추정기의 구조는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{z}}_1 = \hat{\theta}\hat{\beta}\hat{z}_2 - k(\hat{z}_1 - z_1) \quad (16)$$

$$\dot{\hat{z}}_2 = -\hat{\theta}(\hat{z}_1 - R_{mean}) \quad (17)$$

$$\dot{\hat{\beta}} = -\gamma\hat{\theta}\hat{z}_1\hat{z}_2 \quad (18)$$

추정하고자 하는 반경 \hat{R} 과 반경의 미분 $\dot{\hat{R}}$ 은 식(19), (20)와 같다.

$$\dot{\hat{R}} = \hat{z}_1 \quad (19)$$

$$\dot{\hat{\beta}} = \hat{\theta}\hat{\beta}\hat{z}_2 \quad (20)$$

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1 시뮬레이션 결과

롤 편심보상에 대한 시뮬레이션을 위하여 Fig. 3 과 같은 모델을 가정하였다.

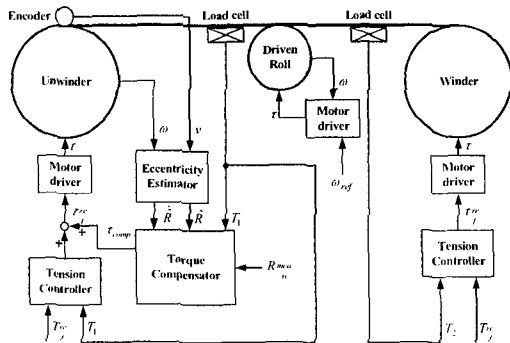


Fig. 3 Simulation model

편심은 Unwinder roll 에 존재하고, 편심량은

0.01 m 로 가정한다. 시뮬레이션 시작 후 5 초부터 편심 보상을 할 때, $\pm 0.15\text{kgf}$ 정도의 장력 변동을 보상해줌을 Fig. 4 를 통해 알 수 있다.

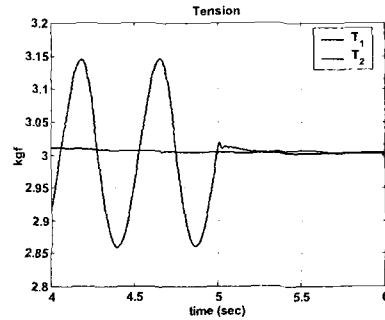


Fig. 4 Tension variation

3.2 실험결과

제안된 추정기와 보상기의 성능 평가를 위해 Fig. 5 와 같은 실험장치를 구성하였다. 이 시스템은 풀림롤(Unwinder), 감김롤(Winder), 구동롤(Driven roller), 로드셀 및 아이들롤로 이루어져있다.

실험은 구동속도 2 m/s 에서 운전장력 2 kgf , 풀림롤 편심량 0.0025 m 인 상태에서 진행하였고, 실험시작 후 22 초부터 추정기가 동작하며, 30 초 후부터 편심보상을 실시하여 보상전과 후를 비교하였다.

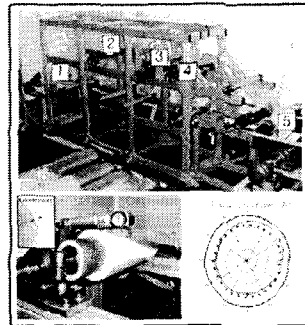


Fig. 5 Experimental setup

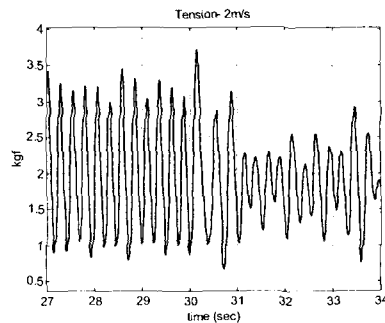


Fig. 6 Tension variation (compensation starts at 30sec)

Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 편심 보상을 통하여 장력 변화량이 약 50% 감소하였다. 편심보상 후에도 남아있는 장력 변화량은 실험 시 시간 딜레이와 같은 시스템의 비선형성이 원인인 것으로 사료된다.

3. 압연시스템의 수학적 모델

3.1 소재두께-변형률-속도-장력 간의 관계

Fig. 7 은 두 개의 스탠드에서 두께가 h_0 에서 h_2 로 압연되고 있는 소재를 나타내고 있다.

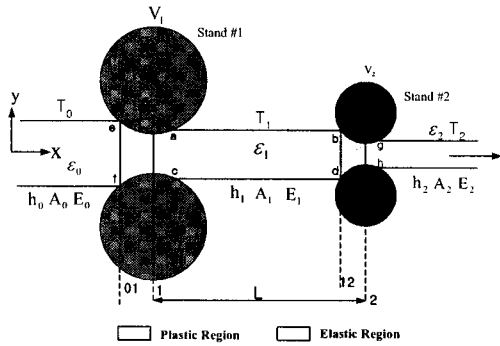


Fig. 7 Rolling of a strip between two stands

Fig. 7 에서 스탠드의 입측과 출측에 대해 질량 보존법칙으로부터 장력전달현상^[4]이 고려된 수학적 모델을 유도할 수 있다^[5].

$$\frac{d}{dt}[T_1(t)] = -\frac{v_{20}}{L}T_1(t) + \frac{v_{10}}{L}\frac{A_1E_1}{A_0E_0}T_0(t) + \frac{A_1E_1}{L}\left(\frac{V_2(t)h_{20} + v_{20}H_2 - v_{120}H_1}{h_{10}} - V_1(t)\right) \quad (21)$$

식(21)은 두 개의 롤 사이의 소재에서, 장력의 변화와 소재 양단 롤의 접선 속도 변화 및 소재 두께 변화에 대한 관계를 나타내는 선형화된 동적 모델이다.

3.2 압하력-장력-롤반경-소재두께 간의 관계

Fig. 8 은 단일 스탠드에서 이뤄지는 압연공정을 나타내고 있다. h_{i-1} 의 두께를 지닌 소재가 압연 후 h_i 로 변화한다. 이때 소재의 반발력, 즉 롤에 미치는 힘을 압하력(P)이라 하고, 롤과 소재의 속도가 같은 점이 존재하는데 이 점을 중립점(n)이라 한다. 또한 출측의 정점으로 부터 중립점에 이르는 각을 중립각(θ_n)이라 하며, 롤과 소재가 접촉하고 있는 구간을 접촉각(θ_1)이라 한다.

Fig. 8 로부터 다음과 같은 가정 하에 식(22)와 같이 압하력식이 유도된다^[6].

- 1) 마찰계수 일정
- 2) 균일 압축
- 3) 압연중 항복응력 일정
- 4) 재료의 탄성변형 무시
- 5) 접촉각은 매우 작음($\sin\theta \cong 0, \cos\theta \cong 1$)

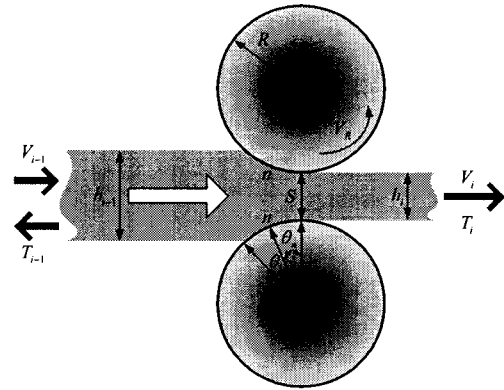


Fig. 8 Rolling of a strip in single stand

$$P = \bar{K}\left(1 - \frac{\sigma_{i-1}}{K}\right)\sqrt{R'(h_{i-1} - h_i)}f(arb) \quad (22)$$

식(22)는 압하력, 변경된 롤 반경(R'), 2 차원 평균 저항(\bar{K}), 그리고 소재의 두께변화, Rolling force function($f(arb)$) 및 응력(σ_{i-1})간의 관계에 대한 수학적 모델이다. 또한 식(23)은 압하력과 변경된 롤 반경 및 압연 롤의 반경(R)에 관한 수학적 모델이다.

$$R' = R\left(1 + \frac{cP}{W(h_{i-1} - h_i)}\right) \quad (23)$$

식(22)와 (23)에서 알 수 있듯이, 소재의 두께와 압하력 그리고 압연 롤 반경 및 변경된 롤 반경은 서로 깊은 연관성을 지니고 있기 때문에 동시에 연산되어야 함을 알 수 있다.

4. 압연시스템에서 3 차원 롤 형상 이상진단

4.1 파라미터 민감도 해석

3.2 절에서 언급된 바와 같이, 압연시스템에서 소재의 두께와 압하력, 변경된 롤 반경 등은 다양한 변수들 서로 깊은 연관성을 지니고 있다. 그리

므로, 연산시간의 단축 및 3 차원 롤 형상 이상진단을 위하여 압연시스템에서의 다양한 파라미터들에 대한 민감도 해석을 수행하였다. Fig. 9 와 Fig. 10 은 Rolling force function 과 변경된 롤 반경에 대하여 압연 후 출측 소재의 두께 변화량에 따른 변화 추이를 나타낸 것이다. 결과로부터 변화량이 매우 작음을 알 수 있다.

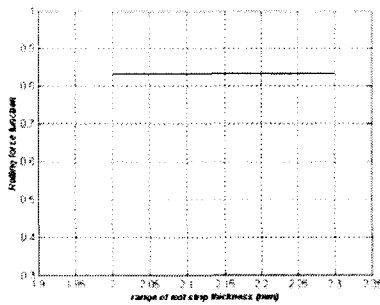


Fig. 9 Rolling force function variation

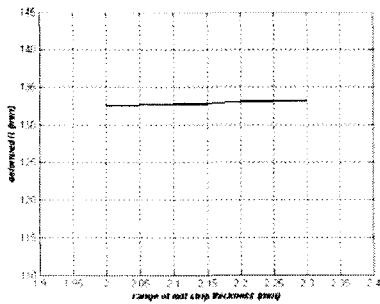


Fig. 10 Deformed roll radius variation

또한 Fig. 11 은 동일한 출측 소재 두께 변화량에 따른 압하력의 변화 추이를 나타낸 것이다.

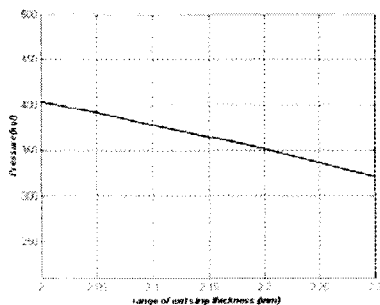


Fig. 11 Rolling pressure variation

Fig. 11 에서 알 수 있듯이 Rolling force function 과 변경된 롤 반경과의 결과와는 다르게 그 변화량이

매우 크다.

이와 같은 결과에 근거하여 서로 깊은 연관성을 지니고 있는 압연시스템 모델들의 동시 연산시에, 압연 후 출측 소재의 두께 변화량에 대하여 민감도가 작은 파라미터들은 상수로 가정하였다.

4.2 롤 형상 이상진단 알고리즘

Fig. 12 는 압연시스템에서 3 차원 롤 형상 이상진단을 위한 알고리즘을 나타내고 있다. X-ray gauge meter 를 이용하여 압연 후 출측 소재의 폭 방향에 대한 형상 정보(소재 두께)를 획득한다. 소재의 형상정보와 연속방정식, 그리고 식(21)을 이용하여 스탠드와 스탠드 사이에 위치한 소재의 폭 방향 속도 및 장력을 구한다. 식(21)에서 얻은 장력 및 속도에 대하여, 식(22)와 (23)을 이용하여 연산을 위한 변경된 롤 반경 및 압하력, 실제 롤 반경값의 초기설정치를 구한다. 이러한 초기 설정치와 주어진 조건(장력, 롤 속도, 소재의 이송속도, 압하력, 변경된 롤 반경 등)으로부터 압하력 및 실제 롤 반경값이 수렴할 때 까지 동시 연산을 반복하여, 압연시스템에서의 롤 형상 이상에 대해 진단한다.

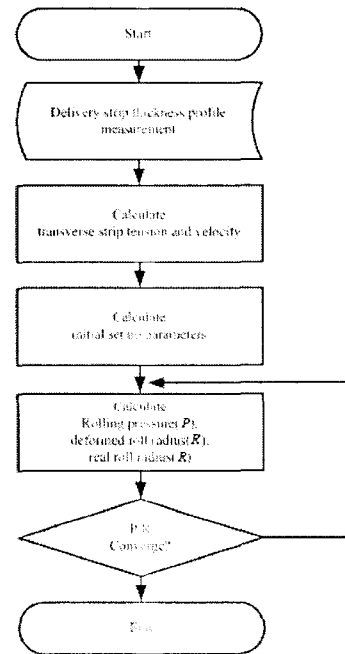


Fig. 12 The flowchart of 3-D roll shape fault diagnosis

5. 시뮬레이션

Fig. 13 은 롤 형상에러로 인해 나타나는 압연 후 출측 소재의 폭 방향 두께 분포를 나타내고 있

으며, 시간축 상에는 주기적인 두께에러가 존재하고, 소재 폭 방향으로 불 균일한 두께분포를 보이고 있다. 이러한 소재의 형상 정보와 식(21)을 이용하여 Fig. 14 와 같이 소재에 미치는 장력 분포를 구할 수 있다. 불 균일한 소재 두께 분포로 인해 시간축과 소재의 폭 방향에 대해 장력외란이 발생하고 있음을 Fig. 14 를 통하여 확인할 수 있다.

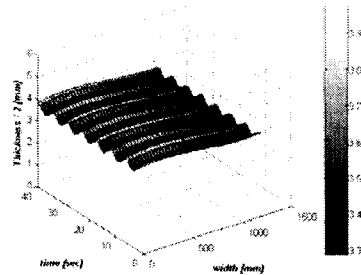


Fig. 13 Delivery strip thickness profile

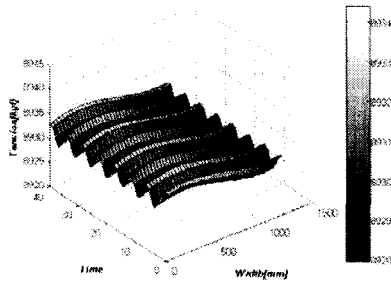


Fig. 14 Transverse tension profile

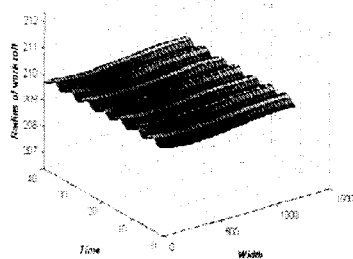


Fig. 15 Work roll radius

Fig. 15 는 본 연구에서 새롭게 제안된 3 차원 롤 형상 이상진단 기법을 적용하여 얻은 롤 반경에 대한 결과이다. 시간축에 대해서 롤 편심이 존재함을 알 수 있으며, 롤의 폭 방향에 대해서도 형상에러 있음을 확인 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 3 차원 롤 형상 이상진단을 위한 새로운 기법이 제안되었으며, 롤 단면 편심에 대해 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다. 또한 압연 시스템에서 롤 단면 편심 및 롤 폭 방향 형상에러가 동시에 존재하는 경우에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 새롭게 제안된 3 차원 롤 형상 이상진단 기법의 효용성을 검증하였다. 특히, 소재의 두께 제어가 목적인 압연 시스템에서 롤 단면 편심 이나 롤 폭 방향 형상에러가 존재할 경우, 압연 후 소재는 소재 이송방향에 대해 주기적인 두께 에러를 지니고 소재의 폭 방향에 대해서도 불 균일한 두께 분포를 지니는 심각한 문제점이 발생하게 된다. 그러므로 본 연구에서 새롭게 제안된 이상진단 기법을 통하여, 롤 형상 이상 여부를 진단하고 또한 이상의 정도(Threshold)를 규명하여 롤 형상 이상으로 인한 악영향을 방지하며, 적절한 롤 교체 시기를 결정함으로써 생산 제품의 품질향상 및 압연 시스템의 최적화가 가능할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 POSCO 에 의해 지원되었으며, 이에 관계자 제위께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Ginzberg and Vladmir B, "High-quality steel rolling:theory and practice,"MARCEL DEKKER,1993
2. C.C.de Wit, L.Praly, "Compensation of disturbance in the web force caused by a non-circular running winder," *American Control Conference*, Vol.3,pp2904-2908,1994.
3. Kee-Huyn Shin, Jeung-In Jang, Hyun-Kyoo Kang, Seung-Ho Song, "Compensation Method for Tension Disturbance due to an Unknown Roll Shape in a Web Transport System," 2002 IEEE Industry Applications Conference.
4. Kee-Huyn Shin, "Tension Control", TAPPI press, 2000.
5. Kee-Huyn Shin, Wan-Kee Hong, "Real-Time Tension Control in a Multi-Stand Rolling System", *KSME International Journal*, Vol.12, No.1, pp.12~21, 1998.
6. William L. Robert, "Cold Rolling of Steel", Marcel Dekker, Inc., pp.511~598.