

멀티 롤 포밍 공정의 품질 안정성에 대한 해석 및 실험적 연구

손재환¹, 한창우^{2*}, 류경진², 강해동¹, 김철홍³
¹대구기계부품연구원, ²영남이공대학교 자동차계열, ³(주)한독하이테크

Analytical and Experimental Study on the Quality Stability of Multi Roll Forming Process

Jae-Hwan Son¹, Chang-Woo Han^{2*}, Kyung-Jin Ryu², Hae-Dong Kang¹, Chul-Hong Kim³

¹Daegu Mechatronics & Materials Institute(DMI)

²Division of Automobile, Yeungnam University College

³Handock Hi-Tech Co., Ltd.

요약 품질 향상을 위해 연속적인 소성 변형을 이용한 롤 포밍 공정에 피어싱, 벤딩, 트리밍 등 별도의 가공공정을 통합한 볼 슬라이드 레일의 멀티 롤 포밍 공정의 필요성이 대두되고 있다. 하지만 프레스기의 진동 및 소음은 이 공정에서 생산되는 슬라이드 레일의 품질 저하를 유발한다. 본 연구에서는 롤 포밍 유한요소 프로그램으로 최적 변형률을 고려하여 롤을 설계하였다. 그리고 멀티 공정의 정적 안정성을 예측하기 위해 구조해석 프로그램으로 프레스기에 대한 응력 및 변형량을 계산하였다. 또한 공진영역에서의 장치들의 운전을 회피하기 위해 Modal 해석을 통해 1, 2차 모드에서의 고유진동수를 계산하였다. 그 결과 공정의 동적 안정성 개선을 확인하기 위해 마이크로폰과 가속도계를 이용하여 기존 및 연구 공정들의 소음, 진동의 크기를 비교하였다. 그리고 기존 및 연구 공정으로 생산되어진 레일의 폭 치수와 표면거칠기를 측정하였다. 따라서 해석 및 실험적 연구를 통해 멀티 롤 포밍 공정이 안정하다는 것을 알 수 있었다.

Abstract It is faced with the necessity of multi roll forming process of the ball slide rail which is made by adding the separate manufacturing processes, piercing, bending, trimming, to the roll forming process of a continuous plastic deformation, to improve the quality. However, the vibration and noise of the press machine in this process leads to the quality degradation of slide rail manufactured in this process. In this study, the roll was designed considering the optimal strain rates by the roll forming program with finite element method. And to estimate the static stability of the multi process the Von-Mises stress and deformation on the press was calculated with a structural analysis program. Also, to avoid driving systems in the resonance region their natural frequencies in the 1st and 2nd mode were calculated through the modal analysis. To verify its dynamic stability improvement the magnitudes of noise and vibration in the existing and studied system were compared using a microphone and accelerometers. And the widths and surface roughnesses of the rails which had been produced in the existing and studied process were measured. Therefore, it is known that multi roll forming process is stable in the analytical and experimental study.

Keywords : Ball slide rail, Structural analysis, Modal analysis, Multi roll forming, Noise and vibration test

1. 서론

롤 포밍(Roll forming) 공정은 연속으로 배치된 다단

의 성형 롤 스탠드 사이로 박판소재를 통과시키면서 점진적인 소성 변형을 유도하여 길이방향으로 일정한 단면의 형상을 가지는 제품을 생산하는 공정이다. 이 공정은

*Corresponding Author : Chang-Woo Han(Yeungnam University College)

Tel: +82-53-650-9238 email: cwhan@ync.ac.kr

Received July 7, 2015

Revised August 3, 2015

Accepted October 8, 2015

Published October 31, 2015

생산성이 매우 높지만 제품 형상이 복잡해짐에 따라 자르기(trim-ing), 구멍 뚫기(piercing), 굽힘(bending) 후가공을 필요로 하고 이로 인해 공정의 끊임이 발생한다. 하지만 후가공을 위해 롤 성형기를 정지하지 않고 롤 포밍 속도와 동기하여 후가공 프레스기를 이송하며 작동시킨다면 더 높은 생산성을 유지할 수 있다. 현재 생산성 품질 향상을 위해 롤 포밍 공정에 자르기, 구멍 뚫기, 굽힘 작업 등 후가공 공정을 통합한 멀티(Multi) 롤 포밍 공정의 필요성이 대두되고 있다. 관련연구로서 유한요소 해석을 통하여 롤 마모[1], 스프링백[2], 버클링[3], 스크래칭[4]과 함께 롤 포밍의 주 결함을 예방하기 위한 연구들이 있었고, 단순히 경험에 의존한 단수 늘리기를 방지한 연구 또한 있었다[5], 그리고 프레스기의 진동 및 소음에 의한 구조 진단과 원활한 작동이 될 수 있도록 구조해석 및 소음·진동 실험을 수행하였다[6].

본 연구에서는 볼 슬라이드 레일의 롤 포밍, 프레스, 커팅 공정들을 통합한 멀티 롤 포밍 공정 개선으로 품질 안정성이 향상됨을 증명하고자 한다. 이를 위해 롤 포밍 유한요소 프로그램을 사용하여 공정 설계 및 제품 변형률 계산 등을 수행하고[7-8], 설계된 멀티 롤 포밍 공정에서 유압프레스의 구조 및 모달 해석을 통하여 정적 및 동적 안정성 향상을 평가하고자 한다. 그리고 해석 결과를 바탕으로 공정의 소음·진동 측정시험과 생산된 슬라이드 롤에 대한 폭 치수 및 표면 거칠기 측정시험을 통하여 작업품질 개선을 확인하고자 한다.

2. 유한요소해석

2.1 롤 포밍 해석모델

롤 포밍 공정 장치의 크기는 길이 8000 mm, 폭 1100 mm, 높이 1600 mm이다. 그리고 제품과 롤 포밍 최종단면 프로파일은 Fig.1과 같다. 굽힘 공정에서 볼 수 없는 사프한 반경을 가지며, 공급소재 두께도 1.35mm로 두꺼워 보통의 롤 포밍 공정으로는 내면 모서리를 성형하기 어렵다. 소재는 복합단조공정을 통해 경도 및 정밀도를 향상시킨 CR skelp steel를 사용하였으며, 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1. Physical Properties of material

Items	CR skelp steel
Young's modulus	210 GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield strength	235 MPa

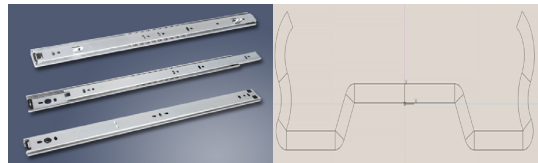


Fig. 1. Ball slide rail and its section

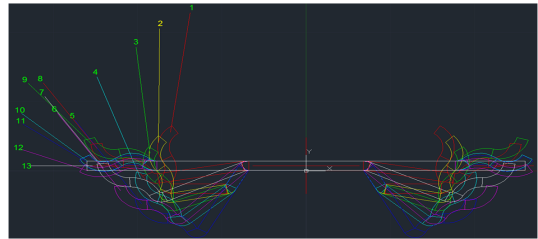


Fig. 2. Flow design of Ball slide rail

Fig. 2는 최종 제품의 단면 플로파일의 굽힘 순차도(Bending sequences)이다. 이 단면의 플로우 디자인(Flow design) 작업은 롤 포밍 단계에서 가장 선행되어야 하며, 상당히 중요한 프로세스에 해당한다. 플로우 디자인 작업 시 각 단계에 있어 앞, 뒤 롤셋의 연결성이 제대로 반영되어야 한다.

2.2 롤 포밍 DTM 해석 결과

유한요소 상용프로그램인 COPRA RF를 통해 롤 포밍의 각 단별 변형률을 계산한 결과는 Fig. 3과 같다. 총 12 단계별로 포밍을 수행하였으며, 6~9단계선 최대 변형률이 0.1로 계산되어 허용 변형률 0.36을 만족하였다. 플로우 디자인(Flow design)시 소재 물성, 롤 포밍기 축간거리, 롤 외경, 기어비, 샤프트 길이 등 실제 장비 조건들을 입력하여 DTM 시뮬레이션(Deformation Technology Module Simulation) 하였으며, 최종 공정에서 스프링-백(Spring-back)과 오버-벤딩(Over-bending) 양을 결정하여 롤 설계를 마무리하였다.

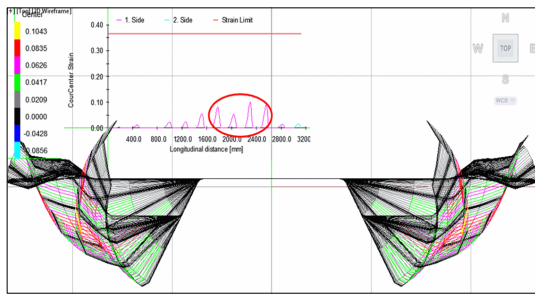


Fig. 3. Strain in the roll forming simulation

$$\frac{r_{i1}}{r_{i2}} = 1 - 1.5 \frac{r_{i1}}{r_f} + 0.5 \left[\frac{r_{i1}}{r_f} \right]^3 \quad (1)$$

$$r_{i1} = k \cdot (r_{i2} + 0.5 \cdot s) - 0.5 \cdot s \quad (2)$$

스프링-백은 Biswas 계산식을, 오버-벤딩은 Oehler 계산식을 사용하였으며, 식(1), (2)와 같다. 여기서, r_{i2} , r_{i1} 는 벤딩 및 스프링-백 후의 곡률반경, r_f 는 항복 곡률 반경을 나타내며, k 와 s 는 벤딩 각도 계수와 소재 두께를 각각 나타낸다.

2.3 유압프레스 해석모델

Fig. 4는 멀티 롤 포밍 공정 중 후처리 프레스 공정 장치를 나타내며, 길이 2050 mm, 폭 700 mm, 높이 1646 mm이다. 그리고 프레스 금형장치의 크기는 길이 800 mm, 폭 440 mm, 높이 773 mm이다. 롤 포밍과 연동된 구멍뚫기 프레스 작업을 안정적이며 논스톱으로 수행하기 위해선 롤 포밍으로 공급되는 제품의 진행속도와 동기하여 서보 모터로 프레스 금형장치를 이송해야 한다. 그리고 서보 모터의 부하를 최소화 할 수 있도록 금형 장치의 구조 안정성을 구축해야 한다. 따라서 기존의 단기 유압실린더를 좌·우 2기 변경 배치하였다.

Fig. 5(a)는 기존의 유압프레스 도면이다. 중심부분에 $\varnothing 125$ 에 50 mm 스트로크의 유압실린더 1기를 장착한 구조이며, 상판을 지지한 4개의 포스트를 고정점으로 하여 프레스 가공이 이루어진다. 이로 인해 상판의 진동 및 소음이 크며, 상판의 리브고정용 볼트가 파괴되어 38 mm 두께의 상판이 변형되는 등 작업 품질 저하를 초래한다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 5(b)에서처럼 이송형 유압 프레스는 2기의 $\varnothing 80$ 유압실린더를 포스트 지점에 가까운 좌, 우 끝 부위에 배치하여 상판의 양단 포스트로부터 거리를 축소하여 구조적 안정성을 확보하고자 하였다.

구조 변경의 적정성을 예측하고자 유한요소해석 프로그램을 활용하여 구조해석을 하였다[9].

구조해석 해석의 적응성을 위해 금형장치의 실제 치수들을 사용하였다. 그리고 프레스 작동 시 발생하는 프레스압력으로 70 kgf/cm²를 부여하여 선형해석을 수행하였다. 구조해석 수행을 위해 유한 요소 생성은 Hypermesh를, 유한요소 Tatra, Penta, Hexa 요소를 이용하여 한변의 길이를 10 mm가 기본이 되도록 설정하여 Mesh 작업을 수행하였다.

Table 2. Physical Properties of Press Device

Items	SS41	SM45C
Young's modulus	200 GPa	210 GPa
Poisson's ratio	0.3	0.3
Density	7.85 g/cm ³	7.85 g/cm ³
Yield strength	235 MPa	490 MPa



Fig. 4. Press device in existing process

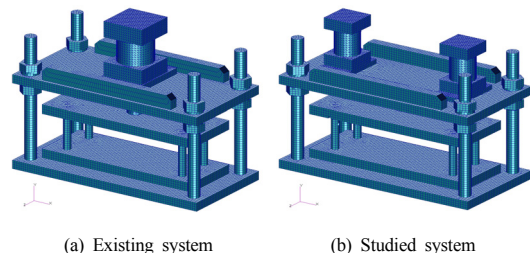
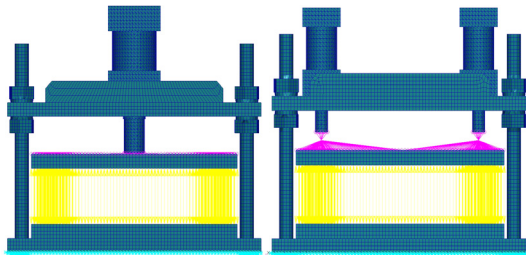


Fig. 5. Modeling of press device

Table 2는 해석에 사용된 재질 SM45C과 SS41에 대한 기계적 성질이다. 상판과 하판은 SS41재질을 사용하였고, 포스트, 너트, 카라, 금형부는 SM45C 재질을 사용하였다.

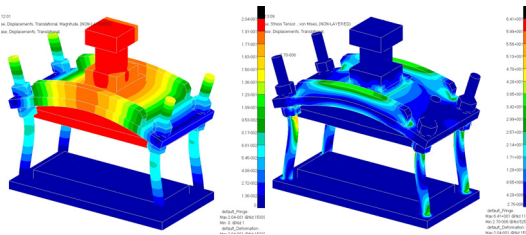
2.4 유압프레스 구조해석 결과

구조해석 수행은 그림 6에서와 같이 유압프레스의 하판을 3자유도 구속하고, 유압실린더의 프레스 압력을 금형부의 위아래에 작용하는 반발력으로 가정하여 개별 노드(Node)에 분산시켜 해석을 수행 하였다. 실린더와 금형부 상판은 MPC를 활용하여 힘이 전달되도록 하였다.



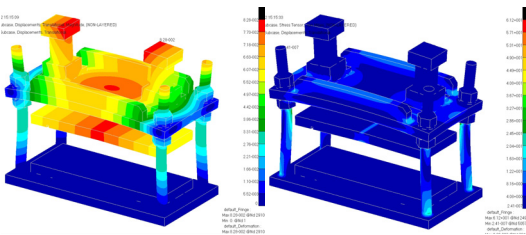
(a) Existing system (b) Studied system

Fig. 6. Boundary Conditions of press device



(a) Displacement (b) Von-Mises stress

Fig. 7. Static analysis of the existing system



(a) Displacement (b) Von-Mises stress

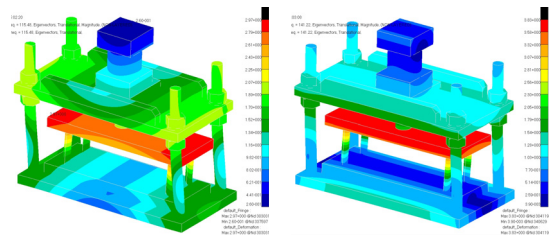
Fig. 8. Static analysis of the studied system

Table 3. Results of static analysis

Analysis object	Max. displacement	Max. stress
Existing system	0.204 mm	64.1 MPa
Studied system	0.083 mm	61.2 MPa

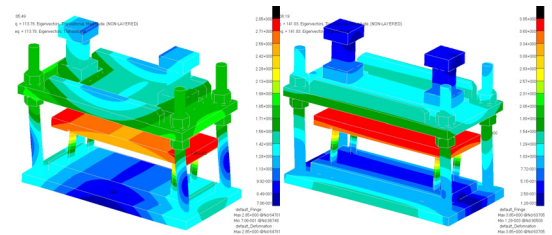
해석 결과, 각 부분품에서의 변형률은 Table 3, Fig.

7(a) 및 Fig. 8(a)에서 알 수 있듯이, 기존 및 연구 시스템의 최대 변형량은 유압실린더 상부에서 발생하였으며, 최대 변형량은 0.204 mm에서 0.083 mm로 크게 줄어들었음을 알 수 있었다. 또한, 응력은 Table 3, Fig. 7(b) 및 Fig. 8(b)에서 알 수 있듯이, 기존 공정 시스템과 연구되는 멀티 롤 포밍 시스템의 최대 응력은 상판지지 너트 연결부 포스트에서 발생하였으며, 최대 응력은 64.1 MPa에서 61.2 MPa로 줄어들었음을 알 수 있었다. 그리고 계산된 최대 응력값이 항복응력 490 MPa보다 작고 그 안전계수도 7.64에서 8.01로 향상되었음을 알 수 있었다. 유압프레스의 변형량 및 응력 해석을 통하여 공정장치는 정적 안정성이 향상되었다고 판단된다.



(a) 1st mode shape (b) 2nd mode shape

Fig. 9. Natural frequencies of press device in the existing system



(a) 1st mode shape (b) 2nd mode shape

Fig. 10. Natural frequencies of press device in the studied system

Table 4. Results of natural frequency

Analysis object	1st mode	2nd mode
Existing system	115 Hz	141 Hz
Studied system	114 Hz	141 Hz

장치 설계 시 고유 진동수는 장치의 동작 및 운전 속도를 결정하는 주요 인자이다. 구멍뚫기 프레스 작업을 수행하는 유압 프레스의 동작 주파수나 금형장치를 이송시키는 서보모터 및 포밍 공정 등의 운전 주파수가 장치

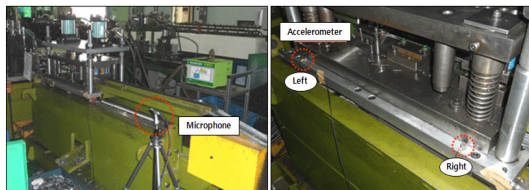
의 고유 주파수와 인접할 경우 공진(Resonance)을 유발시켜 장치들을 불안정하게 한다. 따라서 장치들의 동작 및 운전 속도를 결정하기 위해 고유진동수 해석을 수행하였다. 해석 결과, 기존 및 본 연구 장치의 1, 2차 모드 고유 진동수는 Table 4, Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. 유압 프레스의 동작 주파수 0.14 Hz와 서보 모터의 운전 주파수 30 Hz가 고유 진동수와 인접하지 않으므로 공진이 발생하지 않는 것으로 판단된다.

3. 안정성 평가 실험

3.1 소음 진동 시험

구조 해석을 통해 유압 프레스 장치를 안정성 있게 설계하였다. 본 연구에서는 기존 및 연구 장치에 대한 소음·진동 시험으로 설계로 개선된 연구 장치의 동적 안정성 향상을 확인하고자 한다[10]. 이를 위해 Fig. 11(a)처럼 마이크를 프레스로부터 1 m 거리에 설치하여 소음값을 측정하였고, Fig. 11(b)처럼 가속도계를 하판 플레이트의 좌·우 측에 각각 부착하여 장치의 좌·우 측 진동을 측정하였다. 마이크론은 GRAS의 46AE를, 가속도계는 B&K의 Type 4507을 사용하였으며, 최고주파수는 1024 Hz로 설정하였다.

Fig. 12, 13에서와 같이 2개의 실린더를 가진 본 연구 장치가 1개의 실린더를 가진 기존 장치에 비해 소음 진폭은 약 17 % 감소, 좌측 진폭은 약 63 %, 우측 진폭은 약 59 % 감소되었음을 알 수 있었다. 따라서 소음·진동 시험을 통해 2기의 유압실린더를 좌, 우 포스트 끝 부위에 배치함으로써 동적 안정성이 향상되었음을 확인할 수 있었다.



(a) Noise test (b) Vibration test
 Fig. 11. Set-up for noise and vibration test

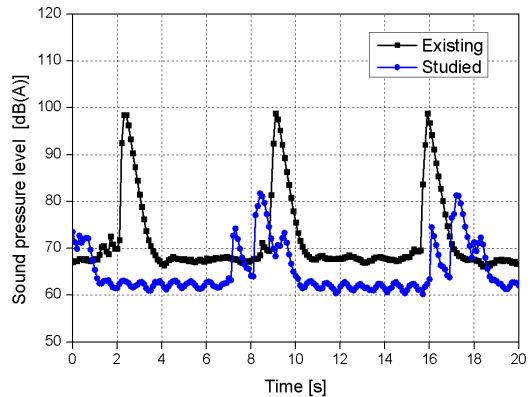
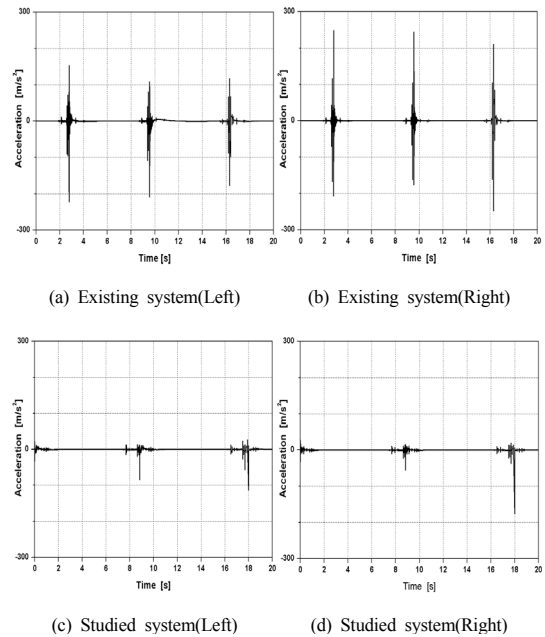


Fig. 12. Noise test of existing & studied systems



(a) Existing system(Left) (b) Existing system(Right)
 (c) Studied system(Left) (d) Studied system(Right)
 Fig. 13. Vibration test of existing & studied systems

이는 프레스 작업을 담당하는 큰 용량의 유압실린더를 작은 용량으로 좌·우 대체 배치함으로써 장치의 변형률이 큰 폭으로 감소하였고, 그 응력값 또한 감소하는 등 구조개선이 이루어졌기 때문으로 판단된다.

3.2 형상 정밀도 측정 시험

해석과 시험의 결과로 개선된 장치의 품질 안정성을 확인하기 위해 본 연구 장치로 생산되는 슬라이드 레일의 폭 치수 및 표면 거칠기 측정시험으로 형상 정밀도를 평가하였다. 시험기는 칼 자이스(Carl Zeiss)사의

PRISMO 10 S-ACC 접촉식 3차원 측정기와 테일러홀슨 (Talor Hobson)사의 Form Talysurf PGI 표면 거칠기 측정기를 각각 사용하였다.

폭 치수는 Fig. 14에서처럼 가장자리로부터 30 mm와 중심지역 A, B, C 지역을 측정하였다. 최소한의 측정 신뢰도를 확보하기 위해 측정 위치와 회수를 각각 3, 10회 수행하였다. Fig. 15에처럼 폭 치수 평균과 표준 편차는 각각 35.36, 0.016 mm로 허용 치수인 35.32 ± 0.1 mm에서 낮은 분산도를 보여주고 있다.

표면 거칠기는 레일의 중심지역 4 mm 구간에서 측정 한 데이터를 유효한 것으로 평가하였다. 시편갯수와 측정횟수를 각각 3, 5회로 설정하여 측정한 결과 평균과 표준편차는 각각 0.61, 0.182 μm 로 허용 표면거칠기 Ra 10 μm 보다 미소하였다.

따라서 해석 및 시험을 통해 정적 및 동적 안정성이 개선된 멀티 롤 포밍 공정으로 생산된 슬라이드 레일은 형상 정밀도 측정시험을 통해 기존 공정에 비해 그 품질이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

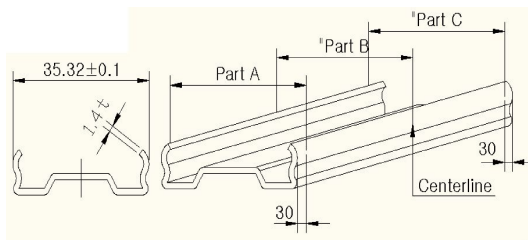


Fig. 14. Width test method of the slide rail

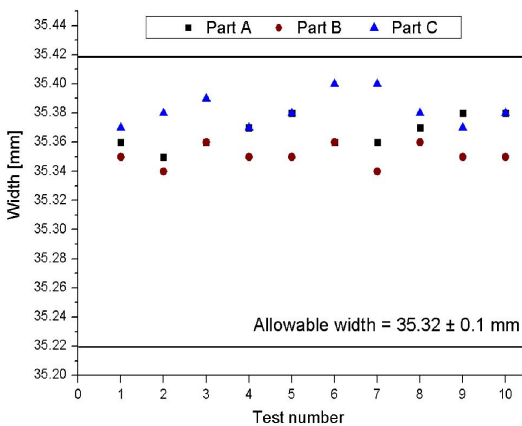


Fig. 15. Width test results

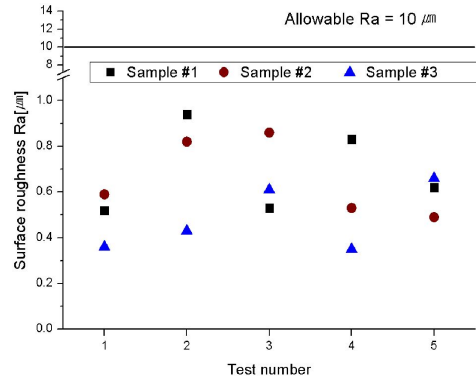


Fig. 16. Surface roughness test results

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석 및 실험적 방법을 이용하여 롤 포밍, 프레스, 커팅 공정으로 구성된 공정통합용 멀티 롤 포밍 공정의 품질 안정성이 향상됨을 증명하였다.

- 1) 롤 포밍 유한요소 프로그램을 사용하여 12개 단을 가지는 Flow Design을 할 수 있었다. DTM Simulation을 통하여 각 단에서 확인한 최대 변형률이 허용 변형률보다 작음을 알 수 있었다. 그리고 스프링백과 오버 밴딩을 고려한 안정된 롤 포밍 공정설계를 할 수 있었다.
- 2) 구조해석 결과 멀티 롤 포밍 공정의 유압 프레스의 최대 변형량 및 응력은 미소하고 항복응력보다 매우 작으므로 정적으로 안전하다고 판단된다. 그리고 기존의 롤 포밍 공정보다 최대 변형량 및 응력 값이 개선되어 정적 안정성이 향상되었다 판단된다.
- 3) Modal 해석을 통해서 계산되어진 유압 프레스의 1, 2차 모드 고유진동수는 공정의 작동 및 운전 주파수와 인접하지 않으므로 공정 장치들을 불안정하게 하는 공진이 발생되지 않는다.
- 4) 구조해석을 통해 설계되어진 공정에 대해 소음·진동 시험을 수행한 결과 기존 공정보다 소음 및 진동이 감소되어 동적 안정성이 개선되었음을 확인할 수 있었다.
- 5) 개선 공정의 슬라이드 롤에 대한 폭 치수 및 표면 거칠기 측정시험을 통해 기존 공정보다 품질 안정성이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

References

[1] B. S. Kang, N. S. Kim, "A Study on Roll Wear in the Roll Forming Process", KSME, Vol. 27, No. 11, pp.1881-1888, 2003.

[2] H. S. Park and T. V. Anh, "Optimization of Process Parameters for Minimizaing Spring Back Angle in Roll Forming", KSME Manufacturing and design engineering division, pp.105-107, 2010.

[3] Y. I Kim, J.H Kim, Y.C Jeoung, N.S Kim, "Buckling Analysis of Roll Forming Process using Finite element method", KSME, Vol. 27, No. 9, pp.1451-1456, 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/ksme-a.2003.27.9.1451>

[4] S. M. Hong, N. S Kim, "Study on Scratch Defect of Roll Forming Process", A of KSME, Vol. 25, No. 8, pp.1213-1219, 2001.

[5] D. K Kim, Y. S Kim, K. H Lee, M. Y Lee, "Analysis of effects of the roll forming process parameters of bumper rail", KSME, pp.19-23, 2006.

[6] H. W. Lee and C. W. Park, "Development of Reducer for Generating Facility of Electric Power for Low Nois/vibration", Journal of the Korean for Precision Engineering, Vol. 25, No. 11, pp.73-82, 2008.

[7] S. S Kim, K. H Na, S. U Choi, H. J Park, S. J Lim, D. J Yoon, "A Study on the Flow Forming Process to Develop the Main Part of Auto Transmission of Automobile", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 1, No. 2, pp.21-26, 2000.

[8] S. H. Jeong, S. H. Lee, "A Study on Simulation and of Straightness Prediction of Roll Forming Process," Journal of the Korean for Precision Engineering, pp. 585-586, 2007.

[9] C. W. Han, J. H. Son, K. J. Park, E. S. Jang, S. M. Woo, "A Study on Stability Estimation of a Orchard Vehicle using Multi-Body Dynamic and Finite Element Analysis," Journal of the Korean Academia-Industrial, Vol. 14, No. 9, pp. 4142-4148, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.9.4142>

[10] J. H Jeong, C. I. Lim, H. J Kim, B. G Choi, "Snubber Analyzation and Vibration Measurement Estimation of Reciprocating Type Hydrogen Compressor", KSME Autumn Conference, pp.932-937, 2008.

손 재 환(Jae-Hwan Son) [정회원]



- 2009년 2월 : 경북대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2001년 11월 ~ 현재 : 대구기계부품연구원 중소기업지원본부 책임연구원

<관심분야>

기계설계 안정성 평가, 정밀가공시스템, 융합제조기술개발

한 창 우(Chang-Woo Han) [정회원]



- 2010년 8월 : 경북대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2001년 9월 ~ 현재 : 영남이공대학교 자동차계열 교수

<관심분야>

기계공학, 자동차 제어 시스템, 안정성 해석과 진단, 센서 및 활용, 하이브리드카 및 전기차

류 경 진(Kyung-Jin Ryu) [정회원]



- 2012년 2월 : 영남대학교 일반대학원 기계공학과 (공학박사 수료)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 자동차계열 교수

<관심분야>

공기역학, 유체역학, 자동차 정비기술, 친환경 자동차, 자동차 공기조화, 자동차 전기전자, 자동차 세시

강 해 동(Hae-Dong Kang) [정회원]



- 2014년 2월 : 경일대학교 기계공학과 (공학사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 대구기계부품연구원 중소기업지원본부 연구원

<관심분야>

정밀측정공학, 안전신뢰성평가, 구조해석 및 사출해석

김 철 흥(Chul-Hong Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 경일대학교 기계공학과 (공학사)
- 2003년 5월 ~ 현재 : (주)한독하이테크 기업부설연구소 소장

<관심분야>

공장자동화(FA), 프레스 금형, 소성가공, 설계해석