

◆ 특집 ◆ 양동열 교수님 헌정세션 특집

## 박판성형 공정 설계 및 해석의 발전

### Research History and Recent Trends in the Development of Sheet Metal-Forming Processes

김종봉<sup>1</sup>, 이성욱<sup>2</sup>, 양동열<sup>2</sup>, 정완진<sup>3,✉</sup>  
Jong-Bong Kim<sup>1</sup>, Sung-Uk Lee<sup>2</sup>, Dong-Yol Yang<sup>2</sup>, and Wan-Jin Chung<sup>3,✉</sup>

<sup>1</sup> 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

<sup>2</sup> 한국과학기술원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

<sup>3</sup> 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

✉ Corresponding author: wjchung@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6390

Manuscript received: 2016.2.25. / Revised: 2016.3.21. / Accepted: 2016.3.21.

*Sheet metal-forming processes such as stamping, deep drawing, bending, shearing, hydroforming, hydromechanical deep drawing, rubber forming, and incremental forming have been widely used in the automotive, aircraft, and ship-building industries. With the expansion of the automotive industry, research on these processes has been remarkably developed in Korea since the 1980s. Here, we review the history of this research as well as recent trends in sheet metal-forming processes. This overview focuses specifically on the results of research in Korea and on the works of Professor D. Y. Yang, in honor of his retirement.*

KEYWORDS: Sheet metal forming (박판성형), Process design (공정설계), Review (리뷰)

#### 1. 서론

박판성형공정은 얇은 판재를 이용하여 원하는 제품을 성형하는 공정으로 자동차, 선박, 항공 등의 산업에서 다양하게 적용되고 있다. 수작업에 의한 박판 제품의 성형은 아주 오래 전부터 수행되어 왔고, 프레스를 이용한 성형도 1600년대<sup>1</sup>에 이미 적용이 되었다. 1950년 이후 소비시장이 커지고 양산에 의한 제품 생산이 요구되면서 박판 성형 공정은 빠른 속도로 발전한다. 1967년에 현대자동차가 설립된 후, 1968년에 코티나를 처음 국내 생산하고 1974년에는 국내 최초의 고유 모

델인 포니를 생산<sup>2</sup>한 것으로 볼 때, 1960년대 말에 박판 성형 공정이 국내에서 이미 시작된 것으로 볼 수 있다. 하지만, Science Direct<sup>3</sup>를 이용한 조사 결과 국내에서 체계적인 연구가 시작되고 연구 결과가 발표된 것은 1980년대 이후로 분석된다. 본 연구에서 1980년 이후 차량 경량화 및 생산성 향상 요구와 선박 등의 여러 분야에서의 박판제품 수요에 부응하기 위해 대한민국, 특히 한국과학기술원 양동열 교수 연구실에서 수행된 박판성형 관련 연구성과를 중심으로 관련 국내 박판성형 공정설계 및 해석의 발전과정을 종합하여 정리하였다.

## 2. 박판성형 공정의 발전과정

### 2.1 연구의 시작 (-1980년대)

박판성형 공정 관련한 국제적인 연구결과를 분석하기 위해 1900년 이후 국제 저널에 발표된 논문 수를 집계하여 Fig. 1에 도시하였다. 조사는 여러 저널 데이터베이스 (DB) 중에서 Science Direct<sup>3</sup>에서만 검색을 하였고, 조사에 사용된 키워드는 Sheet Forming 이고 Engineering 및 기계 관련 저널만 대상으로 하였다. 그렇기 때문에 Science Direct에서 검색이 되지 않은 다른 논문들은 누락이 되었을 수 있다.

Fig. 1은 전 세계적으로 발표된 논문의 수와 그 중에서 대한민국 연구자가 포함된 논문의 수를 보여준다. 세계적으로는 1960년대 이전에 박판성형 공정에 대한 논문이 발표가 되고 있다. Hill<sup>4</sup>은 1950년에 디프드로잉과 네킹 등에 대해 연구하였고, 이후 1960년대에 Naziri와 Pearce<sup>5</sup>는 판재의 이방성이 플랜지 주름 발생에 미치는 영향을, Bramley와 Mellor<sup>6</sup>는 이방성 및 변형을 속도가 스트레치 성형에 미치는 영향을 연구하였다.

대한민국 연구자가 포함된 논문은 1980년대부터 발표가 되기 시작했다. Lee,<sup>7</sup> Suh,<sup>8</sup> Chung,<sup>9</sup> Kim<sup>10</sup> 그리고 Kim<sup>11</sup>이 포함된 논문은 미국이나 호주 등의 외국에서 발표되었고, 국내에서 발표한 논문은 Kim과 Kim,<sup>12</sup> 그리고 Kim과 Yang<sup>13,14</sup>에 의해서 처음 발표되었다. Kim 과 Kim<sup>12</sup>은 이방성을 고려하여 박판의 성형한계 변형율을 예측하였고, Kim과 Yang<sup>13,14</sup>은 처음으로 질점좌표계 (Convective Coordinate)에 기반한 유한요소 수식화를 통해 정수압 별칭 공정과 디프드로잉 공정에서 소재의 변형을 해석하였고 이방성을 고려하여 디프드로잉 공정에서 귀 (Earing)의 발생을 예측하였다.

1990년대 이후 국내의 연구도 세계적인 연구 흐름과 같이 급속하게 발전한다. 최근 국제적인 저널의 수와 DB가 많아지는 추세를 감안하면 더 많은 연구 결과가 발표되고 있는 것으로 사료된다. Fig. 1에서 발표된 논문의 수가 10년 단위로 2 배 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 국내 연구자가 포함된 연구 결과는 전세계적으로 발표되는 논문의 약 5.5-8.5% 이다. 국내에서도 박판성형 공정에 대한 연구가 활발하게 진행 되고 왔고, 2010년 이후에는 다소 비중이 줄어드는 것을 알 수 있다.

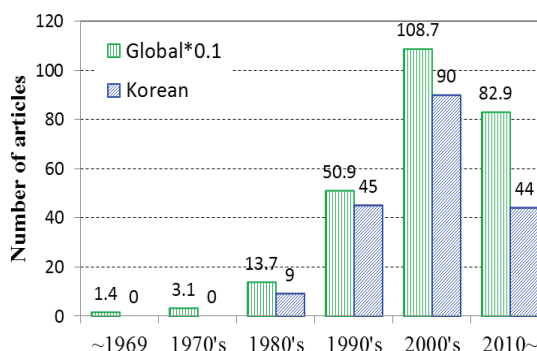


Fig. 1 Number of international journal articles written by global and Korean researchers (Searched DB: Science Direct, Keywords for title and abstract: Sheet forming, Category: Engineering)

### 2.2 연구의 확장 및 다양화 (1990-2009)

1990년대와 2000년대에는 박판성형 공정에 관한 연구가 크게 확장되고 다양화 되는 시기라고 볼 수 있다. 가장 큰 연구 방향은 박판성형 공정 해석을 위한 유한요소법 프로그램 개발<sup>15-24</sup>과 유한요소법을 이용한 공정 해석<sup>15-25</sup>이었고, 그 외에도 주름 (Wrinkling)의 발생 해석,<sup>25-30</sup> 상계해법을 이용한 해석,<sup>31</sup> 성형성 분석,<sup>32-37</sup> 항복함수<sup>38-40</sup> 등의 분야에 대한 연구도 활발하게 진행되었다. 용접판재 (Tailor Welded Blank) 적용,<sup>41-44</sup> 하이드로포밍,<sup>36,45-48</sup> 하이드로메카니컬 디프드로잉,<sup>49-50</sup> 롤포밍,<sup>51-54</sup> 블랭크 최적설계<sup>55-57</sup>와 같은 다양한 공정에 대한 연구도 활발하게 수행되었다. Kim과 Yang<sup>13,14</sup>에 의해 개발된 프로그램을 기반으로 Yang, Chung, Shim,<sup>15</sup> Yoon 등,<sup>16,20</sup> 그리고 Jung과 Yang<sup>17</sup>은 수렴성 개선 및 접촉처리 추가,<sup>15</sup> 탄소성 쉘 요소의 개발,<sup>16,20</sup> 외연적 (Explicit) 시간 적분방법<sup>17</sup>적용, 그리고 연속체 요소 (Solid Element)<sup>23</sup>를 개발하여 적용하였다. Fig. 2는 개발된 코드를 이용하여 정사각형 컵 성형을 해석한 결과를 보여준다.<sup>20</sup> 또한 Huh 등<sup>18</sup>은 굽힘이 고려된 멤브레인 요소를 개발하여 박판성형 공정을 해석하였다. Kim 등은 분기이론 (Bifurcation Theory)을 탄소성 유한요소법에 적용하여 내연적 방법으로는 처음으로 Fig. 3에 보인 박판성형 공정에서 발생하는 주름을 해석하였고,<sup>30</sup> Chung 등,<sup>55</sup> Lee와 Huh,<sup>56</sup> 그리고 Park 등<sup>57</sup>은 이상성형 (Ideal Forming) 이론과 유한요소법으로 초기 블랭크 형상을 최적화 하였다. Fig. 4는 Lee와 Huh<sup>56</sup>가 설계한 최적 블랭크 형상을 보여준다.

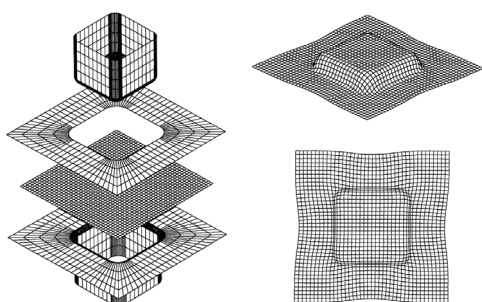


Fig. 2 Tool surfaces and initial blank (left) for the analysis of square cup drawing and analysis results (right) at the punch stroke of 15 mm<sup>20</sup>

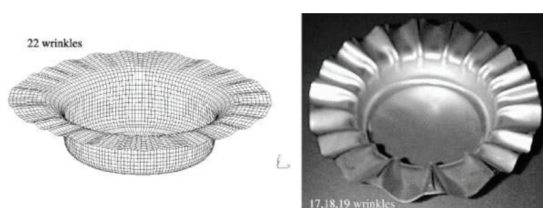


Fig. 3 Predicted wrinkling shape (left) and experimental results (right) at the stroke of 20 mm and 5 kN of blank holding force<sup>30</sup>

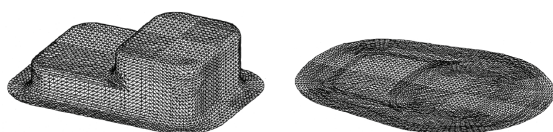


Fig. 4 Calculated initial blank shape (right) from the desired mesh geometry (left)<sup>56</sup>

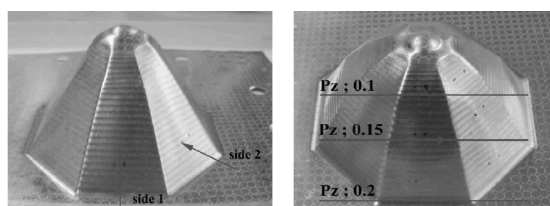


Fig. 5 Octagonal cones with flat (left) and convex (right) surface formed by incremental sheet forming<sup>60</sup>

레이저 포밍,<sup>58</sup> 점진성형 (Incremental Forming)<sup>52,53,59-61</sup>에 대한 연구도 1990년대 이후 시작이 되었다. Fig. 5는 Park과 Kim<sup>60</sup>이 일점 점진성형으로 성형한 제품을, Fig. 6은 Shim 등<sup>61</sup>이 제안한 점진적 롤링 성형으로 선박용 판재를 성형하는 모습을 보여준다. 적용 재료 측면에서도 경량화 요구로 인해 알루미늄

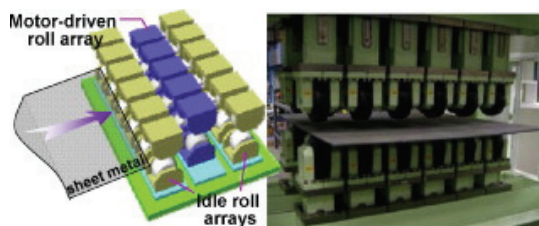


Fig. 6 The line array roll set for incremental rolling of doubly curved plates<sup>61</sup>



Fig. 7 Emboss patterns formed using an electromagnetic force<sup>71</sup>

늄,<sup>36-39,49,50,62,63</sup> 타이타늄,<sup>64</sup> 마그네슘<sup>64-66</sup>과 같은 경량화 소재의 성형과 관련된 연구도 시작이 되었고, 결정소성 (Crystal Plasticity)<sup>67-69</sup>에 대한 연구도 시작되었다. Lee 등<sup>66</sup>은 마그네슘 판재의 비대칭 가공경화 (Anisotropic/Asymmetric Hardening) 를 고려하여 탄성회복을 해석하였다.

### 2.3 최근의 연구 (2010-)

2010년 이후에는 이전에 검토가 되었던 전자기 성형,<sup>70-73</sup> 점진 성형,<sup>74-77</sup> 레이저 성형,<sup>78</sup> 고속 물성,<sup>79</sup> 국부 가열 성형,<sup>80</sup> 샌드위치 판재 개발 및 성형,<sup>81,82</sup> 고온 성형<sup>83</sup> 등의 공정에 대한 심화 연구, 결정소성학<sup>84,85</sup> 적용의 심화연구 등이 진행이 된다. Fig. 7은 Noh 등<sup>71</sup>이 전자기 성형으로 성형한 판재의 형상이고, Fig. 8은 Kim 등<sup>79</sup>이 성형 속도를 변화시키면서 구한 성형한계도이고, Fig. 9는 Seong 등<sup>81</sup>이 개발한 샌드위치 판재를 굽힘 성형한 시편이다.

그리고, 자동차가 고급화함에 따라 박판 성형 제품의 급격한 곡률부에서 발생하는 약 0.5 mm 이하의 미세굴곡<sup>86-88</sup>에 대한 관심도 커지고 있다. Chung 등<sup>86</sup>은 유한요소법 결과에서 미세굴곡을 정확하게 예측하기 위한 방법을 제시하고 실험 결과와 비교하여 제안한 방법의 신뢰성을 검증하였다. Fig. 10은 미세굴곡을 예측하고 측정된 결과를 보여준다.

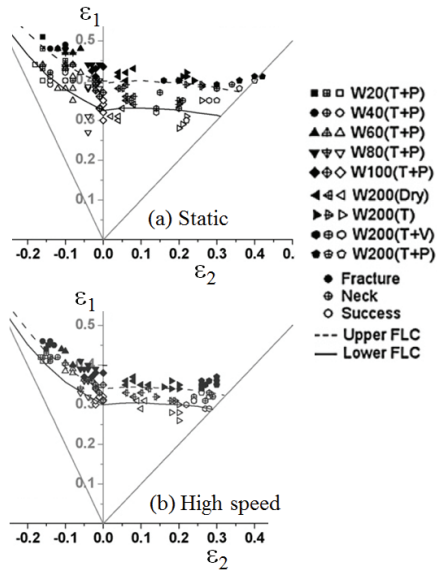


Fig. 8 Comparison of the static (0.0008-0.0017/s) FLC with the high speed (68-118/s) FLC of DP590<sup>79</sup>

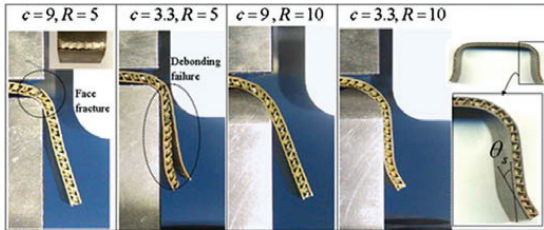


Fig. 9 U-Bending experiments of the sandwich plate with sheared dimple cores<sup>81</sup>

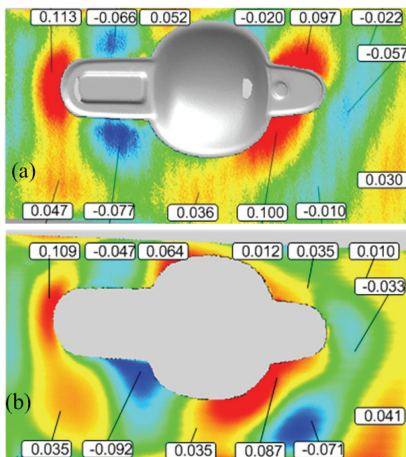


Fig. 10 (a) Measured, (b) Predicted surface deflections in an automobile exterior panel

### 3. 결론

자동차, 선박, 항공기 산업에 매우 중요한 공정의 하나인 박판성형 공정의 국내에서의 연구 발전 과정을 정리하였다. 국내에서는 산업발전과 연구 기반의 확충에 따라 1980년대에 연구가 시작되었고, 1990년부터 2010년까지 대한민국의 산업 발전과 함께 다양한 분야에서 많은 연구가 수행되었고 연구 논문의 수나 질이 세계적인 수준으로 발전되었다. 초기에는 유한요소법을 이용한 연구가 주를 이루었으나 점차 공정 및 재료에 대한 연구로 저변이 확장되었다. 2010년 이후에는 경량화, 고부가가치 공정, 그리고 재료 물성 등으로 연구의 흐름이 전환되는 것을 알 수 있었다.

### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

### REFERENCES

1. Esteves, A., "The Long History of the Pressing of Metals, Interempresas.net," <https://www.interempresas.net/Metalforming/Articles/10544-The-long-history-of-the-pressing-of-metals.html> (Accessed 23 March 2016)
2. Naver, "Hyundai Motor Group," <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=652864&cid=43167&categoryId=43167> (Accessed 29 March 2016)
3. Science Direct, "ScienceDirect," <http://www.sciencedirect.com> (Accessed 29 March 2016)
4. Hill, R., "The Mathematical Theory of Plasticity," Oxford University Press, pp. 272-286, 1950.
5. Naziri, H. and Pearce, R., "The Effect of Plastic Anisotropy on Flange-Wrinkling Behaviour during Sheet Metal Forming," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 10, No. 9, pp. 681-694, 1968.
6. Bramley, A. N. and Mellor, P. B., "Some Strain-Rate and Anisotropy Effects in the Stretch-Forming of Steel Sheet," International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 5, No. 1-2, pp. 43-55, 1965.
7. Lee, D. and Zaverl Jr., F., "Neck Growth and Forming Limits in Sheet Metals," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 24, No. 3, pp. 157-173, 1982.

8. Hardt, D. E., Webb, R. D., and Suh, N. P., "Sheet Metal Die Forming Using Closed-Loop Shape Control," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 31, No. 3, pp. 165-169, 1982.
9. Germain, T., Chung, K., and Wagoner, R. H., "A Rigid-Viscoplastic Finite Element Program for Sheet Metal Forming Analysis," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 31, No. 1, pp. 1-24, 1989.
10. Kim, Y. H. and Wagoner, R. H., "An Analytical Investigation of Deformation-Induced Heating in Tensile Testing," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 29, No. 3, pp. 179-194, 1987.
11. Kim, J.-K. and Thomson, P. F., "Springback and Side-Wall Curl of Galvanized and Galvalume Steel Sheet," *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 223-238, 1989.
12. Kim, K. H. and Kim, D. W., "The Effect of Void Growth on the Limit Strains of Steel Sheets," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 25, No. 4, pp. 293-300, 1983.
13. Kim, Y. J. and Yang, D. Y., "A Rigid-Plastic Finite-Element Formulation Considering the Effect of Geometric Change and Its Application to Hydrostatic Bulging," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 27, No. 7-8, pp. 487-495, 1985.
14. Yang, D. Y. and Kim, Y. J., "A Rigid-Plastic Finite-Element Formulation for the Analysis of General Deformation of Planar Anisotropic Sheet Metals and Its Applications," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 28, No. 12, pp. 825-840, 1986.
15. Yang, D. Y., Chung, W. J., and Shim, H. B., "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes with Initial Guess Generation," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 32, No. 8, pp. 687-708, 1990.
16. Yoon, J. W., Yang, D. Y., and Chung, K., "Elasto-Plastic Finite Element Method Based on Incremental Deformation Theory and Continuum Based Shell Elements for Planar Anisotropic Sheet Materials," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 174, No. 1-2, pp. 23-56, 1999.
17. Jung, D. W. and Yang, D. Y., "Step-Wise Combined Implicit/Explicit Finite-Element Simulation of Autobody Stamping," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 83, No. 1-3, pp. 245-260, 1998.
18. Huh, H., Han, S. S., and Yang, D. Y., "Modified Membrane Finite Element Formulation Considering Bending Effects in Sheet Metal Forming Analysis," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 36, No. 7, pp. 659-671, 1994.
19. Choi, T. H. and Huh, H., "Sheet Metal Forming Analysis of Planar Anisotropic Materials by a Modified Membrane Finite Element Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 89-90, pp. 58-64, 1999.
20. Yoon, J. W., Yang, D. Y., Chung, K., and Barlat, F., "A General Elasto-Plastic Finite Element Formulation Based on Incremental Deformation Theory for Planar Anisotropy and Its Application to Sheet Metal Forming," *International Journal of Plasticity*, Vol. 15, No. 1, pp. 35-67, 1999.
21. Kubli, W. and Reissner, J., "Optimization of Sheet-Metal Forming Processes Using the Special-Purpose Program AUTOFORM," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50, No. 1-4, pp. 292-305, 1995.
22. Galbraith, P. C. and Hallquist, J. O., "Shell-Element Formulations in LS-DYNA3D: Their Use in the Modelling of Sheet-Metal Forming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50, No. 1-4, pp. 158-167, 1995.
23. Lee, D. W. and Yang, D. Y., "Consideration of Geometric Nonlinearity in Rigid-Plastic Finite Element Formulation of Continuum Elements for Large Deformation," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 39, No. 12, pp. 1423-1440, 1997.
24. Kim, Y. H. and Wagoner, R. H., "A 3-D Finite Element Method for Non-Isothermal Sheet-Forming Processes," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 33, No. 11, pp. 911-925, 1991.
25. Kim, J.-B., Yang, D. Y., Yoon, J. W., and Barlat, F., "The Effect of Plastic Anisotropy on Compressive Instability in Sheet Metal Forming," *International Journal of Plasticity*, Vol. 16, No. 6, pp. 649-676, 2000.
26. Cao, J. and Boyce, M. C., "Wrinkling Behavior of Rectangular Plates under Lateral Constraint," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 34, No. 2, pp. 153-176, 1997.

27. Ameziane-Hassani, H. and Neale, K. W., "On the Analysis of Sheet Metal Wrinkling," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 33, No. 1, pp. 13-30, 1991.
28. Wang, C.-T., Kinzel, G., and Altan, T., "Wrinkling Criterion for an Anisotropic Shell with Compound Curvatures in Sheet Forming," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 36, No. 10, pp. 945-960, 1994.
29. Szacinski, A. M. and Thomson, P. F., "Critical Conditions for Wrinkling during the Forming of Anisotropic Sheet Metal," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 35, No. 2, pp. 213-226, 1992.
30. Kim, J.-B., Yoon, J. W., and Yang, D. Y., "Investigation into the Wrinkling Behavior of Thin Sheet in the Cylindrical Cup Deep Drawing Process Using Bifurcation Theory," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 66, No. 12, pp. 1673-1705, 2003.
31. Lee, H. S. and Yang, D. Y., "An Analysis of Hemispherical Punch Stretching by the Energy Method," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 33, No. 6, pp. 435-447, 1991.
32. Wagoner, R. H., Wang, W., and Sriram, S., "Development of OSU Formability Test and OSU Friction Test," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 45, No. 1-4, pp. 13-18, 1994.
33. Leighton, D. E. and Lee, D., "The Effect of Tooling Temperature on the Formability of Sheet Steel," *Journal of Materials Processing Technology*, No. 1-4, Vol. 45, pp. 577-582, 1994.
34. Stoughton, T. B. and Yoon, J. W., "Sheet Metal Formability Analysis for Anisotropic Materials under Non-Proportional Loading," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, No. 12, pp. 1972-2002, 2005.
35. Shim, H. B., "Improving Formability to Develop Miniature Stamping Technologies," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 10, No. 2, pp. 117-125, 2009.
36. Kim, H. Y., Lim, H. T., Kim, H. J., and Lee D. J., "The Effect of Prebending on the Formability in the Tube Hydroforming Process of an Aluminum Rear Subframe," *Metals and Materials International*, Vol. 13, No. 2, pp. 87-92, 2007.
37. Ko, Y. K., Lee, J. S., Huh, H., Kim, H. K., and Park, S. H., "Prediction of Fracture in Hub-Hole Expanding Process Using a New Ductile Fracture Criterion," *Journal Materials Processing Technology*, Vols. 187-188, pp. 358-362, 2007.
38. Yoon, J. W., Song, I. S., Yang, D. Y., Chung, K., and Barlat, F., "Finite Element Method for Sheet Forming Based on an Anisotropic Strain-Rate Potential and the Convected Coordinate System," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 37, No. 7, pp. 733-752, 1995.
39. Barlat, F., Becker, R. C., Hayashida, Y., Maeda, Y., Yanagawa, M., et al., "Yielding Description for Solution Strengthened Aluminum Alloys," *International Journal of Plasticity*, Vol. 13, No. 4, pp. 385-401, 1997.
40. Lee, M. K., Kim, D., Kim, C., Wenner, M. L., and Chung, K., "Spring-Back Evaluation of Automotive Sheets Based on Isotropic-Kinematic Hardening Laws and Non-Quadratic Anisotropic Yield Functions: Part II: Characterization of Material Properties," *International Journal of Plasticity*, Vol. 21, No. 5, pp. 883-914, 2005.
41. Itawa, N., Matsui, M., Nakagawa, N., and Ikura, S., "Improvements in Finite-Element Simulation for Stamping and Application to the Forming of Laser-Welded Blanks," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 50, No. 1-4, pp. 335-347, 1995.
42. Kim, H. J., Heo, Y. M., Kim, N. S., Kim, H. Y., and Seo, D. G., "Forming and Drawing Characteristics of Tailor Welded Sheets in a Circular Drawbead," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, No. 3, pp. 294-301, 2000.
43. Ghoo, B. Y., Keum, Y. T., and Kim, Y. S., "Evaluation of the Mechanical Properties of Welded Metal in Tailored Steel Sheet Welded by CO<sub>2</sub> Laser," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, No. 1-3, pp. 692-698, 2001.
44. Shin, Y. S., Kim, H. Y., Jeon, B. H., and Oh, S. I., "Prototype Tryout and Die Design for Automotive Parts Using Welded Blank Hydroforming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 130-131, pp. 121-127, 2002.
45. Noh, T. S. and Yang, D. Y., "An Analysis of Hydroforming of Regular Polygonal Boxes," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 29, No. 4, pp. 139-148, 1987.

46. Kim, T. J., Yang, D. Y., and Han, S. S., "Numerical Modeling of the Multi-Stage Sheet Pair Hydroforming Process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, No. 1-3, pp. 48-53, 2004.
47. Oh, S. I., Jeon, B. H., Kim, H. Y., and Yang, J. B., "Applications of Hydroforming Processes to Automobile Parts," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 174, No. 1-3, pp. 42-55, 2006.
48. Kang, B. S., Son, B. M., and Kim, J., "A Comparative Study of Stamping and Hydroforming Processes for an Automobile Fuel Tank Using FEM," *International Journal of Machine Tools Manufacture*, Vol. 44, No. 1, pp. 87-94, 2004.
49. Kim, J. B., Lee, D. W., Yang, D. Y., and Park, C. S., "Investigation into Hydromechanical Reverse Redrawing Assisted by Separate Radial Pressure-Process Development and Theoretical Verification," *Proc. of Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 211, No. 6, pp. 451-462, 1997.
50. Groche, P., Huber, R., Dorr, J., and Schmoeckel, D., "Hydromechanical Deep-Drawing of Aluminium-Alloys at Elevated Temperatures," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 1, pp. 215-218, 2002.
51. Kim, N. S. and Oh, S. I., "Analysis Tool for Roll Forming of Sheet Metal Strips by the Finite Element Method," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 1, pp. 235-238, 1999.
52. Yoon, S. J. and Yang, D. Y., "Development of a Highly Flexible Incremental Roll Forming Process for the Manufacture of a Doubly Curved Sheet Metal," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 52, No. 1, pp. 201-204, 2003.
53. Yoon, S. J. and Yang, D. Y., "An Incremental Roll Forming Process for Manufacturing Doubly Curved Sheets from General Quadrilateral Sheet," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 1, pp. 221-224, 2005.
54. Jeong, S. H., Lee, S. H., Kim, G. H., Seo, H. J., and Kim, T. H., "Computer Simulation of U-Channel for Under-Rail Roll Forming Using Rigid-Plastic Finite Element Methods," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, No. 1-3, pp. 118-122, 2008.
55. Chung, K., Barlat, F., Brem, J. C., Lege, D. J., and Richmond, O., "Blank Shape Design for a Planar Anisotropic Sheet Based on Ideal Forming Design Theory and FEM Analysis," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 39, No. 1, pp. 105-120, 1997.
56. Lee, C. H. and Huh, H., "Three Dimensional Multi-Step Inverse Analysis for the Optimum Blank Design in Sheet Metal Forming Processes," *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 80-81, pp. 76-82, 1998.
57. Park, S. H., Yoon, J. W., Yang, D. Y., and Kim, Y. H., "Optimum Blank Design in Sheet Metal Forming by the Deformation Path Iteration Method," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41, No. 10, pp. 1217-1232, 1999.
58. Geiger, M. and Vollertsen, F., "The Mechanisms of Laser Forming," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 42, No. 1, pp. 301-304, 1993.
59. Mori, K., Yamamoto, M., and Osakada, K., "Determination of Hammering Sequence in Incremental Sheet Metal Forming Using a Genetic Algorithm," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, No. 1-4, pp. 463-468, 1996.
60. Park, J. J. and Kim, Y. H., "Fundamental Studies on the Incremental Sheet Metal Forming Technique," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, No. 1-3, pp. 447-453, 2003.
61. Shim, D. S., Yang, D. Y., Kim, K. H., Han, M. S., and Chung, S. W., "Numerical and Experimental Investigation into Cold Incremental Rolling of Doubly Curved Plates for Process," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 1, pp. 239-242, 2009.
62. Yoon, J. W., Barlat, F., Chung, K., Pourboghraat, F., and Yang, D. Y., "Influence of Initial Back Stress on the Earing Prediction of Drawn Cups for Planar Anisotropic Aluminum Sheets," *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 80-81, pp. 433-437, 1998.
63. Keum, Y. T. and Lee, K. B., "Sectional Finite Element Analysis of Forming Processes for Aluminum-Alloy Sheet Metals," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, No. 10, pp. 1911-1933, 2000.
64. Yoshihara, S., MacDonald, B. J., Nishimura, H., Yamamoto, H., and Manabe, K., "Optimisation of Magnesium Alloy Stamping with Local Heating and Cooling Using the Finite Element Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. 153-154, pp. 319-322, 2004.

65. Ji, Y. H. and Park, J. J., "Formability of Magnesium AZ31 Sheet in the Incremental Forming at Warm Temperature," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, No. 1-3, pp. 354-358, 2008.
66. Lee, M. G., Kim, S. J., Wagoner, R. H., Chung, K., and Kim, H. Y., "Constitutive Modeling for Anisotropic /Asymmetric Hardening Behavior of Magnesium Alloy Sheets: Application to Sheet Springback," *International Journal of Plasticity*, Vol. 25, No. 1, pp. 70-104, 2009.
67. Zhou, Y. and Neale, K. W., "Predictions of Forming Limit Diagrams Using a Rate-Sensitive Crystal Plasticity Model," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 37, No. 1, pp. 1-20, 1995.
68. Chung, W. J., Yoon, J. W., and Cuitino, A., "Study on Phenomenological and Crystal Plasticity Models to Predict Anisotropic Behaviors for Aluminum Alloy Sheets," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 15, No. 8 pp. 574-580, 2006.
69. Shim, J. K. and Keum, Y. T., "Computer Simulation of Hemispherical Sheet Forming Process Using Crystal Plasticity," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 16, No. 4, pp. 276-281, 2007.
70. Oliveira, D. A. and Worswick, M. J., "Electromagnetic Forming of Aluminum Alloy Sheet," *Journal de Physique Archives IV*, Vol. 110, pp. 293-298, 2003.
71. Noh, H. G., An, W. J., Song, W. J., Kang, B. S., and Kim, J., "Experimental and Numerical Study on Patterned Emboss Forming Using Electromagnetic Forces," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 16, No. 7, pp. 1447-1454, 2015.
72. Lee, Y. H., Kim, H. K., Noh, H. G., An, W. J., and Kim, J., "Prediction of the Formability Enhancement from Electromagnetic Forming due to Interaction between Tool and Blank Sheet," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 24, No. 3, pp. 199-204, 2015.
73. Park, H. I., Kim, D. Y., Lee, J. W., Kim, J. H., Lee, M. G., et al., "Experimental Study on Electromagnetic Forming of High Strength Steel Sheets with Different Dimensions of Aluminum Driver Plate," *Proc. of the 6<sup>th</sup> International Conference on High Speed Forming*, DOI No. 10.17877/DE290R-15600, pp. 237-242, 2014.
74. Seong, D. Y., Haque, M. Z., Kim, J. B., Stoughton, T. B., and Yoon, J. W., "Suppression of Necking in Incremental Sheet Forming," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, No. 15-16, pp. 2840-2849, 2014.
75. Shim, D. S., Yang, D. Y., Kim, K. H., Chung, S. W., and Han, M. S., "Investigation into Forming Sequences for the Incremental Forming of Doubly Curved Plates Using the Line Array Roll Set (LARS) Process," *International Journal of Machine Tools Manufacture*, Vol. 50, No. 2, pp. 214-218, 2010.
76. Nguyen, D. T. and Kim Y. S., "A Numerical Study on Establishing the Forming Limit Curve and Indicating the Formability of Complex Shape in Incremental Sheet Forming Process," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 14, No. 12, pp. 2087-2093, 2013.
77. Quan, G. Z., Ku, T. W., and Kang, B. S., "Improvement of Formability for Multi-Point Bending Process of AZ31B Sheet Material Using Elastic Cushion," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 12, No. 6, pp. 1023-1030, 2011.
78. Zhang, Y. J., Kim, J. B., Song, J. H., Lee, G. A., Lee, H. J., et al., "FEM Analysis for Laser Bending Process of DP980 Steel Sheet," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 16, No. 2, pp. 315-321, 2015.
79. Kim, S. B., Huh, H., Bok, H. H., and Moon, M. B., "Forming Limit Diagram of Auto-Body Steel Sheets for High-Speed Sheet Metal Forming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 5, pp. 851-862, 2011.
80. Lee, E. H., Hwang, J. S., Lee, C. W., Yang, D. Y., and Yang, W. H., "A Local Heating Method by Near-Infrared Rays for Forming of Non-Quenchable Advanced High-Strength Steels," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 8, pp. 784-793, 2014.
81. Seong, D. Y., Jung, C. G., Yang, D. Y., Kim, J. H., Chung, W. J., et al., "Bendable Metallic Sandwich Plates with a Sheared Dimple Core," *Scripta Materialia*, Vol. 63, No. 1, pp. 81-84, 2010.
82. Ahn, D. G., "Research Trends of Metallic Sandwich Plates with Single Layer Periodically Repeated Metallic Inner Structures (PRMIS)-Focused on Design, Manufacturing and Formability," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Tech.*, Vol. 2, No. 4, pp. 377-391, 2015.
83. Kim, J. T., Jeon, Y. P., Kim, B. M., and Kang, C. G., "Die Design for a Center Pillar Part by Process Analysis of Hot Stamping and Its Experimental Verification," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 13, No. 9, pp. 1501-1507, 2012.



84. Jung, K. H., Kim, D. K., Im, Y. T., and Lee, Y. S., "Crystal Plasticity Finite Element Analysis of Texture Evolution during Rolling of FCC Polycrystalline Metal," *Materials Transactions*, Vol. 54, No. 5, pp. 769-775, 2013.
85. Kim, J. B. and Yoon, J. W., "Necking Behavior of AA 6022-T4 Based on the Crystal Plasticity and Damage Models," *International Journal of Plasticity*, Vol. 73, pp. 3-23, 2015.
86. Chung, W. J., Chung, Y. C., and Kim, W. S., "A Robust Prediction Method of Surface Deflection Using Stoning Simulation and Curvature Analysis," *Steel Research International*, Vol. 86, No. 8, pp. 886-893, 2015.
87. Kim, J. H. and Chung, W. J., "A Study on the Surface Deflection in Rectangular Embossing Considering Planar Anisotropy," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 22, No. 6, pp. 310-316, 2013.
88. Thuillier, S., Le Port, A., and Manach, P.-Y., "Surface Defects in Sheet Metal Forming: A Simulative Laboratory Device and Comparison with FE Analysis," *Proc. of American Institute of Physics Conference*, DOI No. 10.1063/1.3623693, pp. 839-846, 2011.