

페라이트계 스테인리스 판재 적용을 위한 세탁기 회전날개의 전산 해석기반 성형공정설계

Simulation-based Stamping Process Design for a Pulsator Cover of a Washing Machine with Ferritic Stainless Steel Sheet

김세호¹, 김기풍^{2,✉}
Se-Ho Kim¹ and Kee-Poong Kim^{2,✉}

¹ 대구대학교 자동차·산업·기계공학부 (School of Automotive, Industrial and Mechanical Engineering, Daegu University)

² 한국생산기술연구원 동력부품센터 (Automotive Components Center, Korea Institute of Industrial Technology)

✉ Corresponding author: keepkim@kitech.re.kr, Tel: 062-600-6340

Manuscript received: 2010.10.4 / Accepted: 2010.11.18

This paper replaces a conventional austenitic stainless steel sheet to a ferritic stainless steel for the cost reduction of a pulsator cover of a washing machine. However, ferritic stainless steel has poor formability in comparison with austenitic one. The low formability of ferritic steel results in problems during stamping such as fracture, wrinkling, shape inaccuracy and so on. Design modification of the stamping tool is carried out with the aid of the finite element analysis for multi-stage stamping process of the pulsator cover. The simulation results show that fracture occurs on top of the product while wrinkles are generated by the excess metal near the wing part. Modification of the initial stamping die is performed to improve metal flow and to eliminate problems during the stamping process. Simulation with the modified design fully demonstrates that safe forming is possible without inferiorities.

Key Words: Process Design (공정설계), Ferritic Stainless Steel (400 계열 스테인리스강), CAE (전산원용해석)

1. 서론

스테인리스 판재는 우수한 내식성 및 기존 강판 대비 동등한 강도 수준 등으로 머플러 등의 차량 부품, 싱크대 등의 주방용품, 전자부품 등에 널리 사용되고 있다. 특히 전자 및 자동차 등의 산업에서 성형성이 우수한 오스테나이트(austenite)계인 300 계열 스테인리스 판재가 많이 사용되고 있다. 그러나, 원소재인 니켈 가격의 상승으로 원가 부담이 가중되어 원소재로 니켈을 사용하지 않는 400 계열인 페라이트(ferrite)계 스테인리스 판재의 사용이 점점 증가하고 있는 추세이다. 주방기기

및 가전 분야에서는 기존의 300 계열 소재를 대체하여 원가를 절감하거나, 내식성이 낮은 소재를 스테인리스강으로 대체하여 고급화를 추구하고 있다. 자동차 분야에서는 환경 규제에 대처하고 내식성 확보를 위하여 배기계 부품 등에 적용이 확대되고 있다. 400 계열 판재의 원가는 300 계열 대비 1/3 수준이나 성형성이 떨어지는 문제가 있다. 기존의 300 계열 스테인리스 판재를 적용한 부품을 400 계열 스테인리스 판재로 대체하는 경우에 기존 금형설계 기법을 동일하게 적용한다면 성형성이 낮은 문제로 인하여 제품에 파단, 주름 및 형상 정밀도 저하 등의 불량 발생으로 예

상된다.^{1,4}

본 논문의 목적은 300 계열 스테인리스 판재를 적용하여 현재 생산중인 세탁기 부품인 회전날개(pulsator cover)에 관하여 400 계열 판재로 대체하는 성형공정 설계를 수행하는 것이다. 300 계열 강판을 400 계열 강판으로 대체할 경우 생기는 파단 및 주름발생 등의 문제점을 유한요소 성형해석을 통해 파악하였고, 낮은 성형성의 문제점을 해결하기 위하여 다단 금형설계안을 제시하고 해석을 통하여 설계안을 검증하였다.

2. 회전날개 모델의 성형성 분석

2.1 모델 형상 및 성형 해석 조건

대상 제품은 와류식 세탁기의 세탁조 하부에 있는 회전날개이다. 대상제품의 실제형상과 역공학을 통해 추출된 3 차원 CAD 형상을 Fig. 1 에 도시하였다. 부품의 성형 공정은 ① 블랭킹, ② 드로잉, ③ 트리밍, ④ 피어싱, ⑤ 버링, ⑥ 컬링과 플랜징으로 크게 6 단계로 나누어지지만 성형불량이 주로 발생하는 드로우 성형공정만을 대상으로 해석을 실시하였다.

해석에 사용된 스테인리스 판재는 300 계열의 경우 STS304 이고, 400 계열의 경우 STS430J1 이며, 판재의 두께는 0.4 mm 이다. 각 판재의 기계적 물성치는 Table 1 에 도시하였다. 재료는 평면이방성을 고려한 3-Parameter Barlat 항복식⁵을 사용하였다. 성형은 단동형 프레스를 이용하여 수행하였으며, 상형의 하강 속도는 2m/s 로 가정하였다. 형상이 대칭이므로 형상의 1/4 만을 사용하여 해석하였다. 제품생산 시 우수한 면품질을 위해 표면에 비닐을 부착하므로 금형과 판재사이의 쿨롱 마찰계수는 0.05 로 가정하였다. 초기 블랭크 홀딩력은 STS304 와 STS430J1 의 경우에 대하여 각각 80 kN 및 60

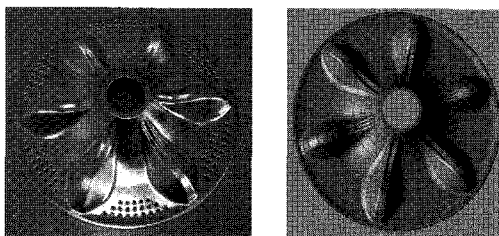


Fig. 1 Shape of the pulsator cover: (a) product; (b) CAD model

Table 1 Mechanical properties of STS304 and STS430J1 obtained from tensile tests

Properties	STS304	STS430J1
Yield Strength	305.4 MPa	324.5 MPa
Tensile Strength	712.2 MPa	478.9 MPa
Elongation	64.5%	29.3%
FLD ₀	32%	22%
R ₀ /R ₄₅ /R ₉₀	0.897/1.417/0.741	1.588/1.597/1.842

Table 2 Section shape dimensions of drawbeads for forming analysis with STS304 and STS430J1

Material	R1	R2	L	D
STS304	3.0 mm	2.0 mm	6.2 mm	3.0 mm
STS430J1	3.0 mm	2.0 mm	5.0 mm	2.0 mm

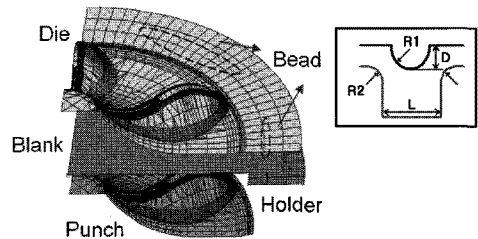


Fig. 2 Initial setting of tools and the blank and shape of draw-beads for analysis

kN을 부과하였다. 해석 시 주름 및 여욕을 방지하기 위해 블랭크홀더에 Fig. 2 에 나타낸 형상의 드로우비드를 설치하였다. 적용 판재에 따른 드로우비드의 형상 치수는 Table 2 에 나타내었다. 해석의 효율성을 위하여 드로우비드의 중심선 형상을 이용하는 등가 드로우비드로 적용하였다.⁶ 등가 드로우비드의 구속력은 2 차원 해석을 통하여 계산하였고, 구속력은 STS 304 와 STS340J1 의 경우에 대하여 각각 143 N/mm 및 40 N/mm 를 부과하였다. 보다 정밀한 형상의 모사를 위하여 적응형 격자분할법(adaptive remeshing)을 사용하였다. 성형공정해석은 상용프로그램인 LS-DYNA⁷을 사용하였다. 해석에 사용된 금형 및 블랭크의 유한요소모델은 Fig. 2 에 도시하였다. 이상의 조건으로 300 계열과 400 계열 스테인리스 판재에 대한 유한요소 성형해석을 수행하였으며, 변형형상, 주름, 파단 등 성형성에 관련된 해석결과를 비교 및 검토하였고, 300 계열의 성형에 사용된 금형 및 공정변수가 400 계열 판재의 성형에 이용될 경우의 영향에 대하여 검토하였다.

2.2 300 계열 및 400 계열 강의 성형성 분석

300 계열과 400 계열 판재의 성형성 비교를 위하여 Fig. 3 에 STS304 와 STS430J1 의 성형 후 주 변형을 분포를 성형한계도를 이용하여 도시하였다. Fig. 4 에 성형 진행 중인 STS430J1 판재의 블랭크 변형형상을 도시하였다. 300 계열의 경우 파단 등의 불량 없는 성형이 가능한 것으로 확인되며, 400 계열의 경우 날개 최상부의 벽면에서 파단이 발생됨을 확인할 수 있었다. 다이 어깨부 주변에서 주름이 발생되었고 날개 위쪽 포밍부에 주름 및 미성형 등 다수의 불량이 발생되었다. 해석에서 얻은 결과로 볼 때 400 계열 스테인리스 강관으로 소재를 대체할 경우 기존 금형의 형상 및 공정조건으로는 1 단계만의 드로잉 공정으로 성형이 불

가능하며, 설계변경 및 공정변수의 수정이 필요하다는 결론을 내릴 수 있다. 본 논문에서는 400 계열 성형을 위해 다단성형 공정을 도입하였으며, 이에 상응하는 다단 금형설계를 실시하였다.

3. 성형해석을 이용한 금형 설계 최적화

3.1 1 차 수정설계안 (Case1)

3.1.1 개요

본 절에서는 소재를 400 계열 판재로 대체할 경우 발생하는 성형성 저하의 문제를 해결하기 위하여 드로잉 공정을 제 1 단계 및 제 2 단계의 2 개 공정으로 분할하고, 제 1 단계 금형을 설계하였다. 제 2 단계 드로잉 공정의 금형형상은 제품의 최종 형상을 얻는 공정이므로, 300 계열 판재를 성형하는 금형형상과 동일하다. Fig. 5 에 제 1 단계 금형과 제 2 단계(최종) 금형을 비교 도시하였다. 제 1 단계 금형에 국부파단을 억제하기 위하여 플랜지부에 비드를 제거하였으며, 비드 안쪽구간의 재료유입이 원활하도록 다이 어깨부 형상을 변경하였다. 날개 상단부 벽면 파단을 예방하기 위해 날개주변 라운드반경을 증대하였다.

3.1.2 1 차 수정설계안 해석 결과

최초 설계된 1 차 수정설계안(Case1)을 이용하여 제 1 단계 해석을 진행하였으며, 이 때 사용된 블랭크 홀딩력은 60 kN 이다. Case1 의 해석결과에서 얻은 변형중 금형 및 블랭크의 형상은 Fig. 6 과

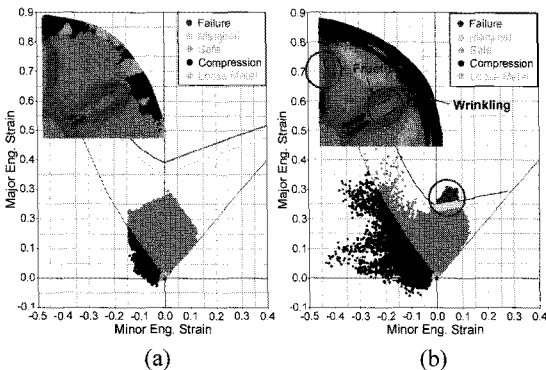


Fig. 3 Comparison of deformed shape and principal strain distribution on FLD: (a) STS304; (b) STS430J1

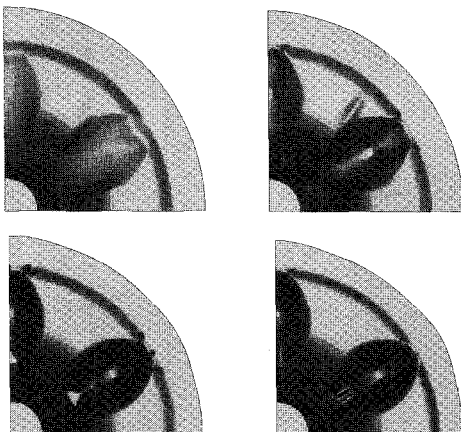


Fig. 4 Subsequent deformed shapes of the blank during the stamping analysis of the pulsator cover with STS430J1

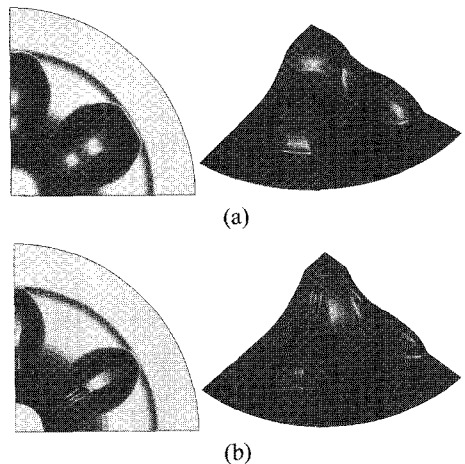


Fig. 5 Comparison of the tool shapes used for the two-stage forming process: (a) stage 1; (b) stage 2

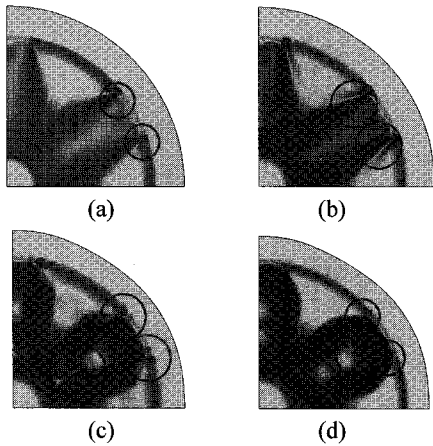


Fig. 6 Deformed shapes of the tools and the blank during the stamping analysis of the pulsator cover with stage 1 of Case1 at the stroke of : (a) 22.57 mm; (b) 34.35 mm; (c) 48.1 mm; (d) 56.17 mm

같다. 그림에 표시한 것과 같이 날개 외곽 곡률부 및 안쪽 영역에서 심한 주름이 발생하고 있다. 주름발생 문제를 해결하기 위해서는 블랭크 홀딩력을 증가시켜야 하나, 변형 중 플랜지부의 두께가 불균일하므로 플랜지부에 과도한 홀딩력이 부과될 경우 일부 집중하중으로 인한 조기 파단이 예상된다. 이러한 문제점으로 인하여 초기 금형형상 (Case1)은 사용이 불가능하다는 결론을 얻었으며, 문제해결을 위해 수정금형설계(Case2)를 실시하고, 공정변수의 추가적인 수정을 실시하였다.

3.2.2 차 수정설계안 (Case2)

3.2.1 개요

1 차 수정설계안(Case1)에서는 플랜지의 단비드 설치로 인하여 블랭크 홀딩력 부과 시 파단 등의 문제점이 발생할 가능성이 높아 공정변수를 추가적으로 변경하고 해석을 통하여 영향을 검증하였다. 주름발생 방지를 위한 단비드(step bead)를 플랜지부에 설치하였고, 플랜지부에 균일한 블랭크 홀딩력의 부과를 위해 블랭크 홀더의 운동을 변위로 제어하는 방법을 사용하였다. 시간에 따른 다이와 블랭크 홀더의 변위제어는 Fig. 7 과 같이 부과하였으며, Fig. 8 에 시간에 따른 금형 및 블랭크의 형상을 도시하였다. 초기에는 블랭크 홀더를 고정하고 홀딩력을 부과하며, 다이가 블랭크에 닿는 순간부터 다이와 동일한 운동을 하여 다이와 블랭크 홀더간의 간격을 일정하게 유지하게 하였다. 일정한

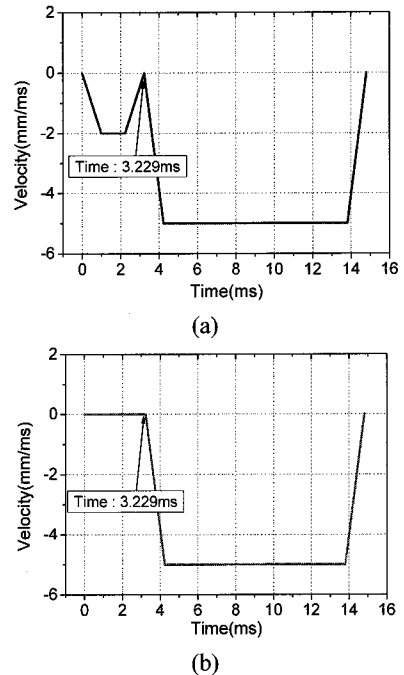


Fig. 7 Movement of the tools during simulation: (a) die movement; (b) holder movement

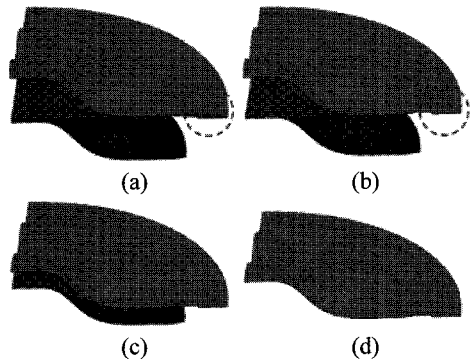


Fig. 8 shapes of the blank and the tools with stage 1 of Case2: (a) 0 ms; (b) 3.229 ms; (c) 10 ms; (d) 14.8 ms

금형 간격 제어에 의하여 블랭크에 국부적으로 과도한 홀딩력이 부과되는 것을 방지할 수 있으며, 단비드의 조합으로 다이 어깨부의 주름발생을 사전에 방지할 수 있다. 단비드를 사용할 경우 시제품 생산 시 비드의 곡률값을 유동적으로 변경하여 파단 및 주름불량 해결을 쉽게 할 수 있는 장점도 가지고 있다. 이외의 성형조건은 Case1 의 경우와 동일하게 진행하였다.

3.2.2 2 차 수정설계안 해석 결과

Case2 의 금형 및 공정설계안을 이용하여 성형 공정의 유한요소해석을 실시하였다. 제 1 단계 금형을 이용한 해석결과중 변형형상과 성형한계도 상의 주변형률 분포를 Fig. 9 에 도시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 성형 시 파단 및 기타 불량은 발생되지 않았으며, 변형형상 확인 시 다이 어깨부 주름 또한 발생되지 않았다. 이는 단비드와 홀더를 변위로 제어한 결과로 판단된다.

수정금형설계(Case2)의 제 1 단계 해석결과를 이용하여 제 2 단계 성형해석을 진행하였으며 그 결과중 변형형상과 성형한계도 상의 주변형률 분포를 Fig. 10 에 도시하였다. 제 2 단계 해석결과에서 날개 상단부 벽면에서 조기 파단이 발생되었다. 블랭크 순차적 변형형상을 Fig. 11 에 도시하였다.

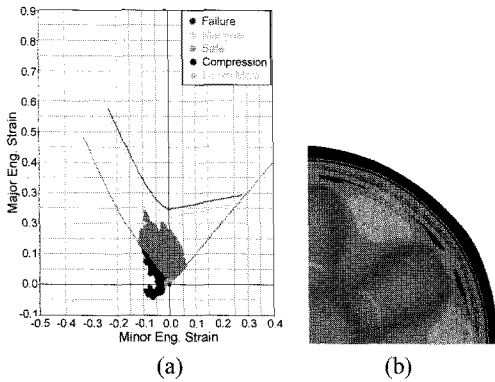


Fig. 9 Analysis results with stage 1 of Case2: (a) principal strain distribution; (b) deformed shape

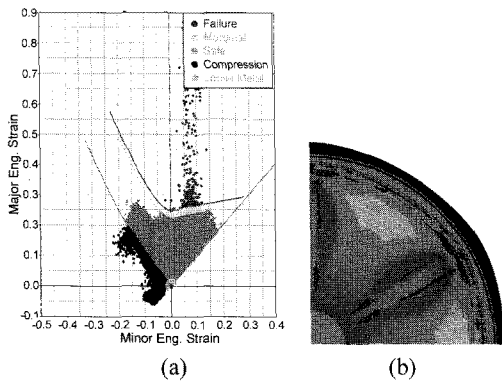


Fig. 10 Analysis results with stage 2 of Case2: (a) principal strain distribution; (b) deformed shape

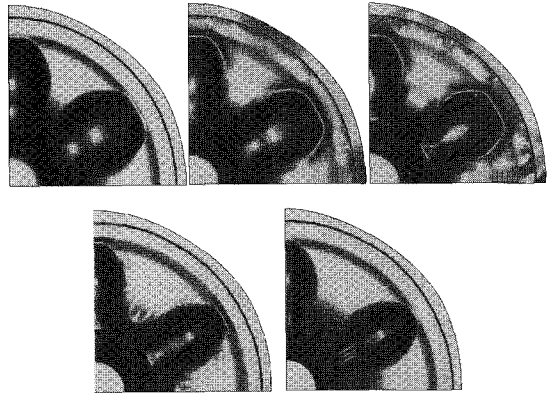


Fig. 11 Subsequent deformed shapes of the blank with stage 2 of Case2

제 2 단계 성형 시 불량률의 원인은 제 1, 2 단계 금형의 형상차로 기인된 결과라 판단된다. 제 1 단계 금형의 완전한 형상과 제 2 단계의 최종형상의 형상차이로 인하여 제 2 단계 성형 시 여러 영역에서 주름 및 접촉불량에 의한 불균일 변형이 발생된다. 이에 따라 블랭크는 원활한 유동을 갖지 못하며, 결과적으로 여유 주름 및 국부적 파단이 발생하게 된다. 이러한 불량률의 해결을 위해 금형형상 재설계를 실시하였다. 제 1 단계 금형형상의 수정을 위해서 제 1 단계와 제 2 단계 금형의 형상의 차이를 줄여 유사하게 설계하여야 하며, 파단을 막기 위한 날개부 및 주요 곡률부의 치수를 변경하여야 한다.

3.3 3 차 수정설계안 (Case3)

3.3.1 개요

해석에서 얻은 2 차 수정설계안(Case2)의 문제점을 바탕으로 하여 수정 금형설계를 수행하였으며, 공정변수 데이터 구축을 위해 단비드 형상비교 및 마찰계수에 따른 영향 분석을 실시하였다. 수정 금형설계(Case3) 시 제 1 단계 형상은 높이와 주요 곡률부를 변경하여 이전 설계에 비하여 최종형상과 유사하게 수정하였다. 수정전후의 금형형상을 Fig. 12 에 비교하였으며, 단비드 치수에 따라 Fig. 13 과 Table 3 에 도시한 Type1 과 Type2 의 두 가지 설계안을 비교 대상으로 선정하였다. 윤활조건 변화에 따른 마찰계수 변화의 영향을 분석하기 위해 Type2 의 형상을 이용하여 마찰계수를 변화시켜가며 해석을 수행하고, 성형성에 미치는 영향을 비교하였다.

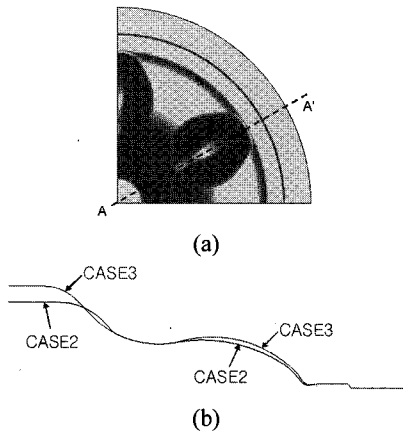


Fig. 12 Comparison of the punch shapes for stage 1 with Case 2 and Case3: (a) location of the cross-section; (b) cross-section shape of Case2 and Case3

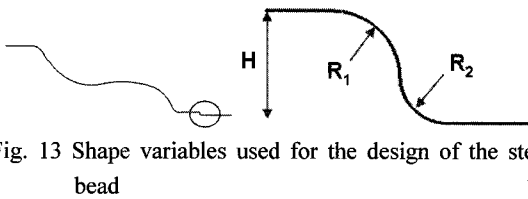


Fig. 13 Shape variables used for the design of the step bead

Table 3 Shape variables of step-beads used in the simulation (Type1 and Type2)

Type No.	Type1	Type2
R ₁	1.4 mm	1.7 mm
R ₂	1.0 mm	1.3 mm
H	2.4 mm	3.0 mm

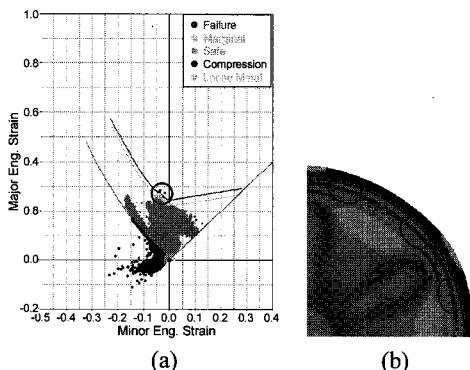


Fig. 14 Analysis results with stage 1 of Case3-Type1: (a) principal strain distribution; (b) deformed shape

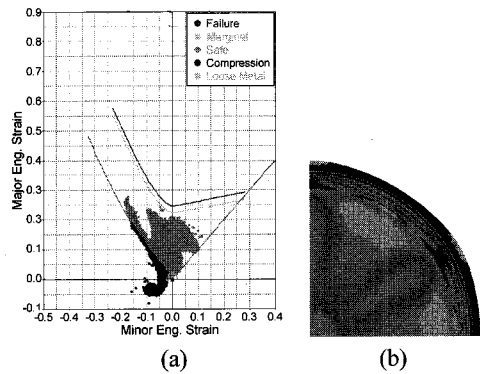


Fig. 15 Analysis results with stage 1 of Case3-Type2: (a) principal strain distribution; (b) deformed shape

3.3.2.2 차 수정설계안 해석 결과

Type1 의 제 1 단계 해석결과중 블랭크 변형형상 및 성형한계도 상의 주변형률 분포를 Fig. 14 에 도시하였다. 제 1 단계 해석에서 블랭크가 플랜지 비드부에 유입 시 파단이 발생하였다. Type2 를 이용한 제 1 단계 해석결과중 블랭크 형상 및 주변형률 분포는 Fig. 15 에 도시하였다. 해석결과 제 1 단계 성형공정에서 파단이 발생되지 않았음을 확인하였다.

회전날개부의 표면 미려는 소재품질과 직결되므로 윤활조건설정이 매우 중요하며, 성형성에 미치는 영향 역시 크다. 블랭크와 금형간의 마찰계수 변화에 따른 성형성 비교를 위해 안정된 성형이 이루어진 Type2 의 제 1 단계 형상을 모델로 하여 진행하였다. 마찰계수 변화에 따른 블랭크 형상 및 주변형률 분포 변화를 Fig. 16 에 비교하였다.

해석결과 마찰계수가 0.1 보다 클 경우 파단이 발생함을 확인하였고, 윤활조건이 성형성에 큰 영향을 미치는 변수임을 확인할 수 있었다. 금형과 소재의 윤활조건에 따라 소재의 파단 유무가 결정되므로 제품생산 시 윤활제 선택이 성형에 큰 영향을 미치리라 판단되며, 실제 시제품 제작 시 윤활제는 비닐제를 사용한 윤활 등 최대 마찰계수 0.1 이하가 되는 제품을 선정해야 할 것이다.

공정변수 설계에서 얻은 안정적 성형조건인 마찰계수 0.05, 단비드 곡률부 반경 R₁=1.7, R₂=1.3 을 이용하여 Type2 의 제 2 단계 성형해석을 실시하였다. 해석결과를 Fig. 17 에 도시하였으며, 주름 및 파단이 발생되지 않으며, 안정적인 제품을 얻을 수 있는 것으로 예측되었다.

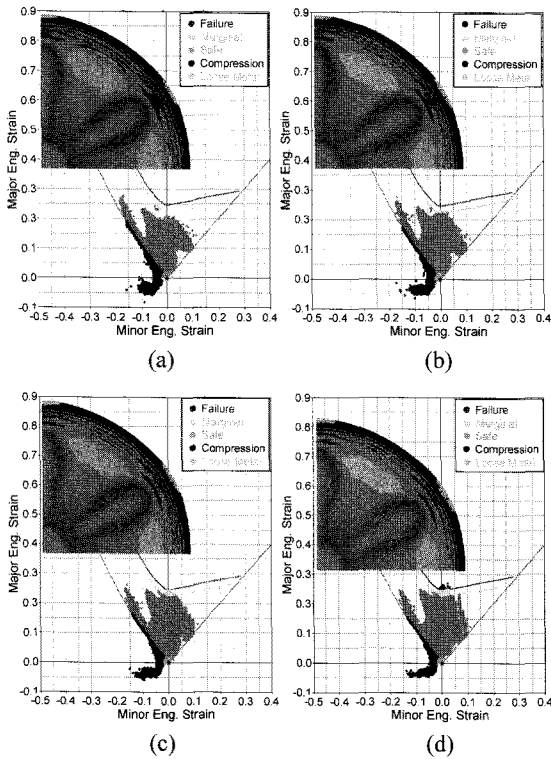


Fig. 16 Comparison of strain distributions on FLD with respect to the friction coefficient: (a) $\mu=0.05$; (b) $\mu=0.08$; (c) $\mu=0.1$; (d) $\mu=0.12$

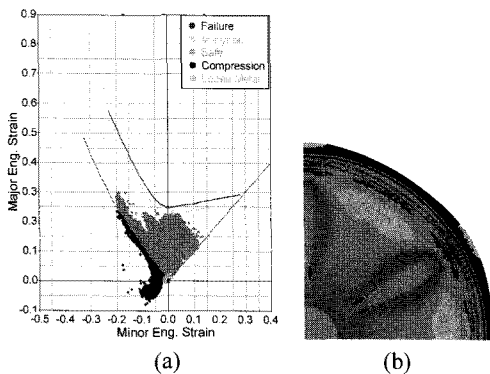


Fig. 17 Forming analysis results with stage 2 of Case3: (a) principal strain distribution on FLD; (b) deformed shape

4. 결론

본 논문에서는 기존의 300 계열 스테인리스판 재료 생산되던 세탁조 회전날개를 400 계열 강판으로 대체하기 위하여 공정 데이터 구축 및 최적 성

형 해석 진행 후 설계안을 도출하였다. 300 계열 대비 성형성이 열위인 400 계열 스테인리스판재는 1 단계 드로잉성형이 불가능하며 문제해결을 위하여 2 단계로 공정을 분리하여 중간단계 금형을 설계하였다.

1 차 수정안에서는 파단 및 주름발생 억제를 위하여 플랜지부에 비드를 삭제하고, 플랜지부 및 날개 상면부에 라운드 반경을 증대하였다. 2 차 수정안에서는 단비드를 설치하고 불균일한 블랭크 홀딩력 부과에 따른 파단을 억제하기 위하여 다이와 블랭크 홀더의 운동방식을 수정하였다. 3 차 수정안에서는 제품면의 파단방지를 위하여 단비드 치수를 수정하여 재료 유동을 원활하게 하였으며, 마찰계수에 대한 변수연구를 통하여 성형 시 필요한 윤활조건을 구하였다. 이상의 금형 및 공정설계에서 얻은 공정변수를 활용하여 400 계열 스테인리스강판을 적용한 세탁조 회전날개의 다단 성형해석을 수행하였으며, 제시된 조건들로부터 성공적으로 제품이 성형될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원에서 시행한 첨단부품 소재산업 육성사업의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Korhonen, A. S. and Manninen, T., "Forming and Fracture Limits of Austenitic Stainless Steel Sheets," Materials Science and Engineering A, Vol. 488, No. 1-2, pp. 157-166, 2008.
2. Bae, W. B., Heo, B. W., Kim, H. Y. and Han, J. Y., "A Study on the Improvement of Formability of Stainless Steel Sheets," J. of the Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 7, No. 5, pp. 446-449, 1998.
3. Kim, S. H. and Kim, K. P., "A Simulation-based Comparative Study of Formability of the Stainless Steel Sheet according to the Steel Grade," Proc. KSTP Spring Conference, p. 331, 2007.
4. Park, D. H., So, B. S., Bae, W. R., Cho, Y., Kim, T. J. and Ko, T. J., "Forming Technology of Stainless Steel Sheet for Automotive Muffler Part," Proc. KSTP Fall Conference, pp. 230-233, 2008.

5. Barlat, F. and Lian, J., "Plastic Behavior and Stretchability of Sheet Metals Part I: A Yield Function for Orthotropic Sheet under Plane Stress Conditions," *Int. J. Plasticity*, Vol. 5, No. 1, pp. 51-66, 1989.
6. Park, J. S., Kim, S. H. and Huh, H., "Elasto-plastic finite element analysis of drawbead forming for evaluation of equivalent boundary conditions in sheet metal forming - part II : application to the front door panel forming process," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 11, No. 6, pp. 513-518, 2002.
7. LSTC, "LS-DYNA3D Keyword User's Manual Version 971," 2007.