

연성파괴에 기반한 다단 디프드로잉 및 아이어닝 공정에 의한 알루미늄 라이너 개발

윤여웅¹ · 강성훈^{2#} · 윤춘기³ · 이정환¹

Development of an Aluminum Liner using Multi-drawing and Ironing Processes based on the Ductile Fracture Criterion

Y. W. Yun¹, S. H. Kang^{2#}, C. K. Yun³, J. H. Lee¹

Abstract

In this work, finite element investigations were carried out to manufacture a seamless aluminum liner without crack generation using four-stage deep drawing followed by two-stage ironing process. In order to predict the crack generation during the liner manufacturing process, the Normalize Cockroft-Latham(NCL) which is one of ductile fracture criteria was adopted. In addition, the tensile tests were carried out to obtain the critical value of NCL by comparing the experimental and FE simulation results. From this, various case studies based on FE simulation were carried to obtain the optimum die designs which can prevent the crack generation during ironing processes. Finally, the aluminum liner was successfully made using obtained die designs so that requirements were met in terms of thickness and height of the liner.

Key Words : Aluminum Liner, Drawing and Ironing, Ductile Fracture, Optimum Die Design

1. 서 론

소형 압력용기용 알루미늄 라이너는 과거에는 우주항공분야와 군수분야에 주로 사용되었으나, 현재는 경량화와 휴대성이 유리하여 의료용, 레저용으로 사용 범위가 확대되고 있다. 따라서 제품의 대량생산이 요구되었으며, 압력용기의 제작에 있어 생산비용 및 시간을 고려하여 최근 DDI (Deep Drawing Ironing) 공정이 많이 적용되고 있다.

DDI 공정을 이용한 압력용기용 라이너를 제작하는데 있어서, 제품의 성형한계로 인한 파괴 시점 및 금형의 형상과 공정변수에 의한 제품의 결함을 예측하는 것은 중요하다. 드로잉 공정에서 제품은 블랭크 홀딩력, 윤활, 드로잉 속도 등에 의해 주름(wrinkling), 이어링(earing), 스크래치 등의 가공 결함이 발생될 수 있으며[1], 아이어닝 공정 시 금형의 입구각과 금형 간의 거리 등에 따

라 제품의 성형성에도 영향을 미칠 수 있다[2].

본 연구에서는 아이어닝 금형의 입구각을 변경하여 성형성과 라이너 두께에 미치는 영향을 고찰하였으며, 제품의 성형 도중 발생하는 파단 시점을 판단하기 위하여 Normalized Cockroft-Latham의 연성파괴 모델을 도입하였다[3].

2. 해석 방법

본 연구에서 개발하고자 하는 알루미늄 라이너 제품의 도면을 Fig. 1에 나타내었다. 적용된 DDI 공정은 4단계의 드로잉 과정과 2단계의 아이어닝 과정으로 구성되어 있으며, 드로잉 공정 중 가공경화로 인한 파단발생을 방지하고 요구되는 형상을 얻기 위하여 3차 드로잉 공정 후 한번의 소둔처리를 수행하였다. 초기 소재는 $\phi 323.85\text{mm}$, 두께 4.06mm의 판재가 사용되었다. 해석에 필요한 유동응력을 얻기 위하여 원소재는 압연방향의 0° , 45° , 90° 방향으로 채취하였고, 드로잉 3차

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 산업기술지원본부

2. 한국기계연구원 부설 재료연구소 융합공정연구본부

3. 두립

교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소

융합공정연구본부, E-mail:Kangsh@kims.re.kr

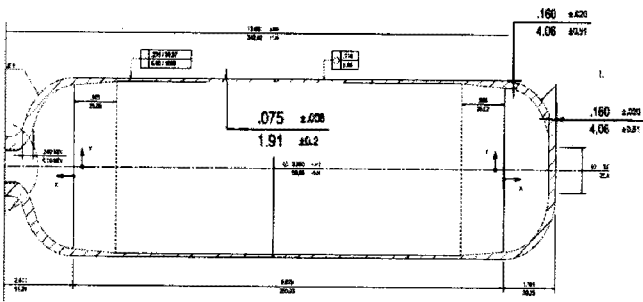


Fig. 1 Aluminum liner for oxygenator

공정 후의 제품은 길이방향으로 시편을 채취하여 소둔처리 후 인장시험을 수행하였다.

도출된 유동응력식은 식 (1)과 (2) 같다. 다만 원소재의 방향별 유동응력은 큰 차이가 없어 평균값을 사용하였다.

$$\text{원소재: } \sigma = 205.12 \varepsilon^{0.204} \quad (1)$$

$$\text{소둔처리한 3차 드로잉품: } \sigma = 218.91 \varepsilon^{0.18} \quad (2)$$

DDI 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 Deform 3D를 이용하였다. 소재의 파단발생의 기준이 되는 Normalized Cockcroft-Latham (NCL) 상수 C_0 는 인장시험 해석과 실험을 비교하여 von-Mises 항복조건 하에서 도출되었으며, 이를 식 (3)과 (4)에 나타내었다.

$$\text{원소재: } \int \frac{\sigma}{\sigma} d\bar{\varepsilon} = 2.21 \quad (3)$$

$$\text{소둔처리한 3차 드로잉품: } \int \frac{\sigma}{\sigma} d\bar{\varepsilon} \approx 2.01$$

해석에 사용된 형상은 1/8 형상이며, 해석조건은 사면체 요소 약 70,000개를 이용하여 상온 조건에서 편치속도 25mm/s로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 드로잉 공정해석 및 결과 비교

블랭크 홀딩력(BHF)은 제품이 형상 및 주름 발생에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 BHF에 따른 1차 드로잉 해석(드로잉비=1.8)을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 1에 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 0~800 N을 부가한 경우에는 주름

이 발생한 반면, 2400N~8000 N에서는 주름이 발생하지 않았다. 예측된 연성파괴지수는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 최대 1.31로 파단발생없이 성형이 이루어짐을 확인하였다. 또한, Fig. 2와 같이 BHF에 따른 1차 드로잉 성형품의 두께 분포는 거의 동일하여, 본 연구에서는 최대 1000 N의 BHF를 적용하여 1차 드로잉 해석을 수행하였다.

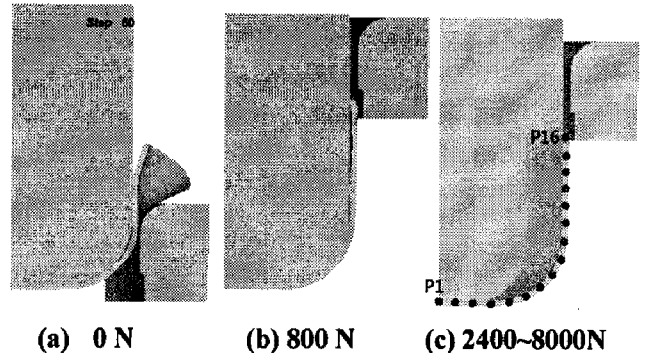


Fig. 2 Deformation pattern of material by BHF in 1st Drawing processing

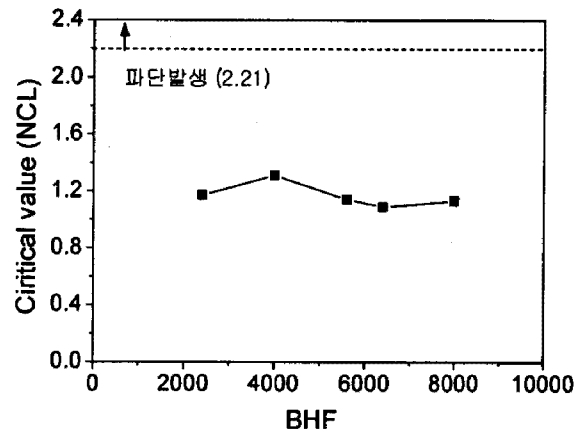


Fig. 3 Comparison of critical value about BHF of 1st drawing product

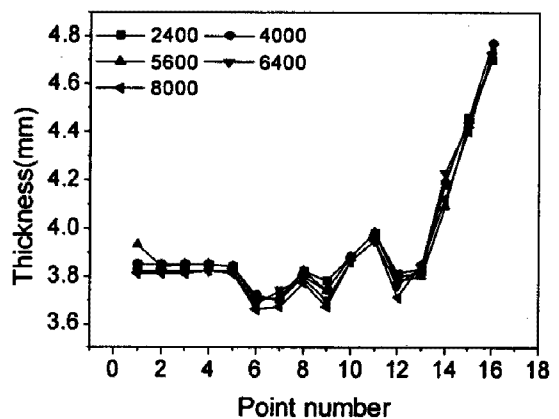
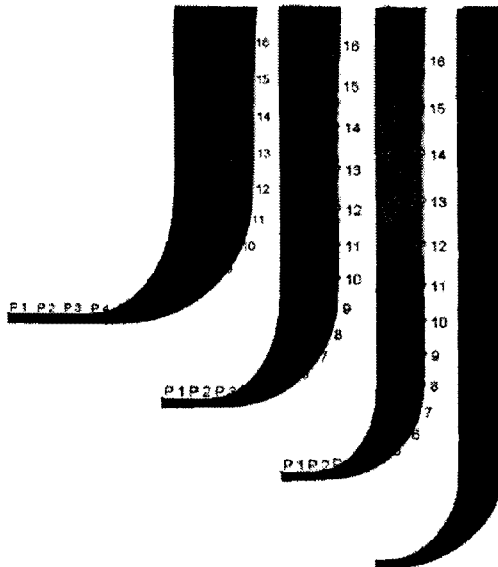


Fig. 4 Thickness distribution about BHF in 1st Drawing processing

드로잉비가 각각 1.8, 1.4, 1.3, 1.3인 1~4차 드로잉 공정에 의한 블랭크의 변형양상과 예측된 연성파괴지수를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 그러나 Fig. 6에 나타난 바와 같이 4차 드로잉 공정 시 예측된 연성파괴지수는 약 2.13으로 파단이 발생할 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 3차 드로잉 공정 후 소둔처리하여 4차 드로잉 공정을 수행하였으며, 그 결과 예측된 연성파괴지수는 0.87로 파단없이 성형이 가능함을 확인하였다.

P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16

(a) Initial material shape



(b) 1~4th Drawing products

Fig. 5 Deformation pattern of material about drawing process

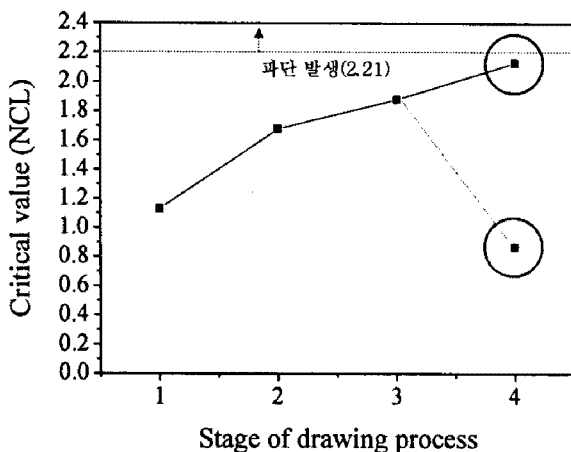


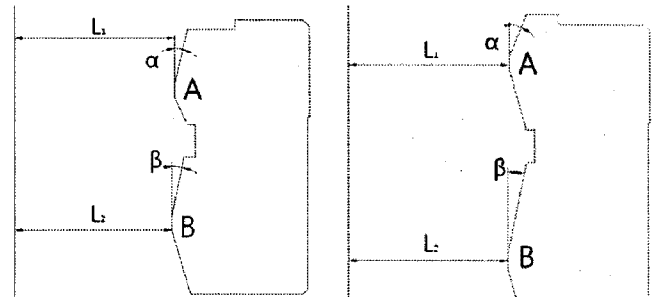
Fig. 6 Predicted critical value in drawing process

3.2 아이어닝 공정해석

요구되는 두께(1.91 ± 0.2)를 갖는 라이너를 성형하기 위해 두께감소율이 각각 47.7% 및 14.3%인 1, 2차의 아이어닝 공정을 도입하였다. 아이어닝 공정 시 가장 중요한 설계변수 중의 하나는 두께감소율과 금형 형상이다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 7의 1차 아이어닝 금형의 입구각(α)에 따른 파단발생 여부만을 분석하였다. 아이어닝 금형의 주요치수는 Table 1에 정리하였다.

Fig. 8은 Case 1의 해석 결과를 나타낸 그림이다. 예측된 연성파괴지수가 약 3.1로 파단이 발생할 것으로 판단되었다. 이는 상대적으로 큰 입구각으로 인해 소재유동이 원활하지 못하여 랜드부에서 블랭크의 두께가 급속히 감소하기 때문이다.

입구각에 따른 각 경우의 연성파괴지수를 Fig. 9에 비교하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 입구각이 큰 Case 1에서 1차 아이어닝 공정에서 파단이 발생되었으며, 입구각이 상대적으로 작은 Case 2에서는 1차 아이어닝 공정에서 파단이 발생



1st Ironing die

2nd Ironing die

Fig. 7 Shape of 1, 2th Ironing dieset

Table 1 Design parameters in 1st ironing dieset

	L1	L2	α	β
Case1	51	50.1	13.241	11.607
Case2	51	50.1	11	11.607
Case3	51	50.1	10	11.607
Case4	51	50.1	9	11.607

(unit: mm, degree)

Table 2 Design parameters in 2nd ironing dieset

	L1	L2	α	β
Case1	49.7	49.2	22.18	11.503

(unit: mm, degree)

되지 않았으나 2차 아이어닝 공정에서 파단이 발생되었다. Case 3과 4에서는 1, 2차 아이어닝 공정에서 모두 파단이 발생되지 않았다. 또한, Fig. 10에서 알 수 있듯이 입구각에 작을 수록 1, 2차 아이어닝 공정에 요구되는 최대 성형하중은 증

질수록 소재유동은 원활하나 소재와 금형의 접촉면적이 상대적으로 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 연성파괴지수 및 성형하중이 작은 Case 3의 해석 결과를 바탕으로 라이너 금형을 설계하였다.

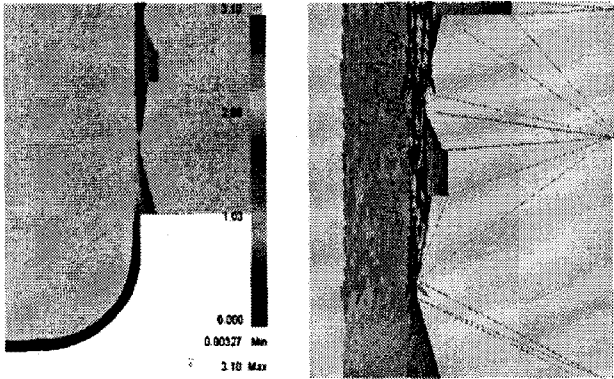


Fig. 8 Critical value and Deformation pattern in 1st ironing of case1

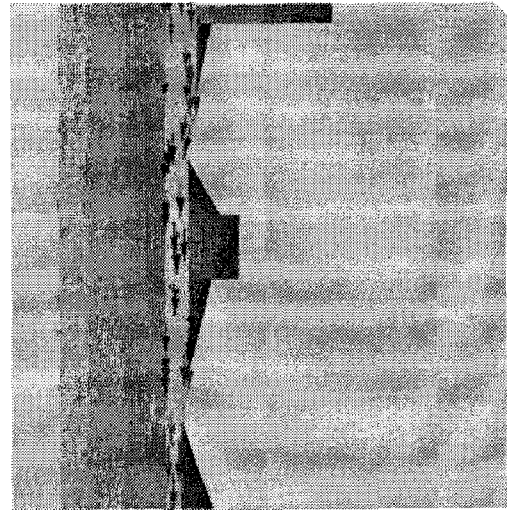


Fig. 11 Deformation pattern in 1st ironing of Case 3

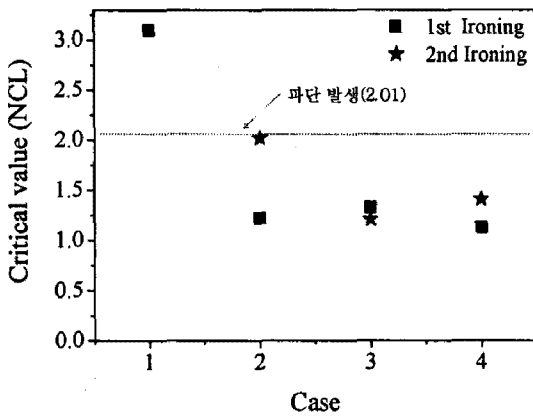


Fig. 9 Die shape predicted critical value

알루미늄 라이너 성형해석결과의 검증을 위해 실험을 수행하였으며 각 단계에서의 성형품을 Fig. 12에 도시하였다.

또한 2차 아이어닝 성형품의 두께분포를 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 편차가 닿는 곡률부위인 Point 2에서 약 0.7 mm의 오차가 발생하고 있으나, 전체적으로 해석 및 실험결과가 비슷한 값을 보이고 있다.

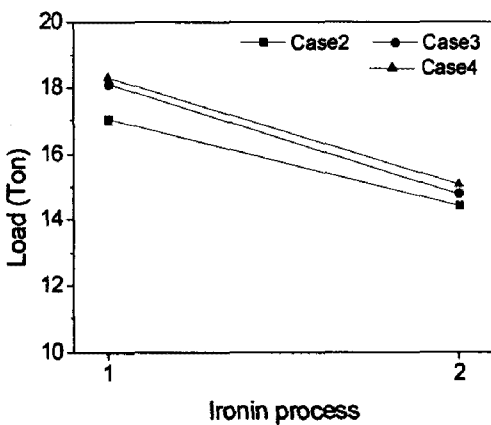


Fig. 10 Demanded load in ironing process

가하였다. 이는 Fig. 11과 같이 입구각이 작아

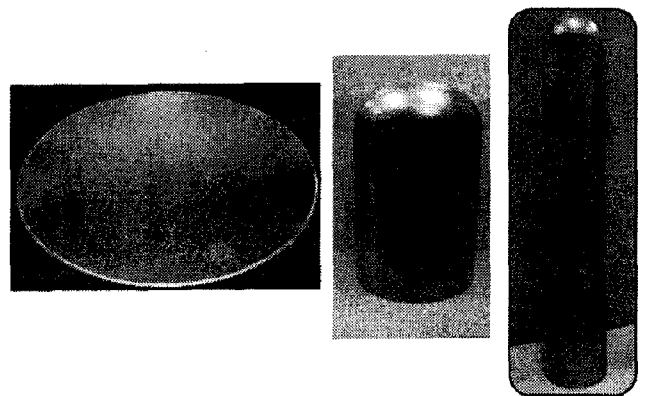


Fig. 12 Aluminum liner product

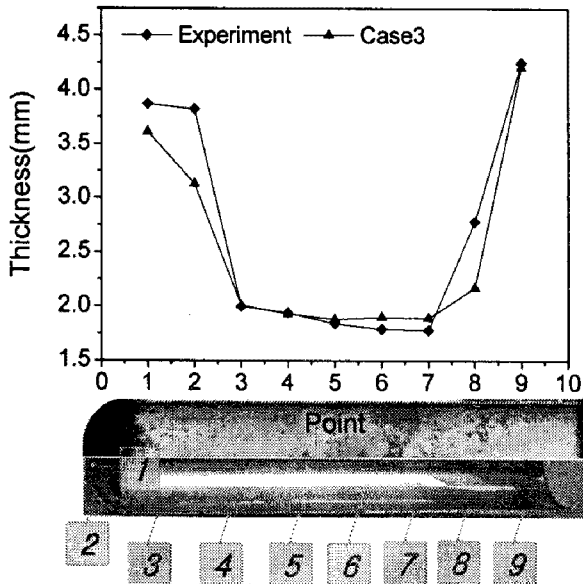


Fig.13 Thickness distribution comparison between analytic and experimental result in 2nd

4. 결론

본 연구에서는 산소호흡기용 알루미늄 라이너 성형에 요구되는 최적의 금형 형상을 결정하기 위해 연성파괴이론에 기반한 드로잉 및 아이어닝 유한요소해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 연속적인 4차 드로잉 공정에서는 파단이 발생할

확률이 크므로 3차 드로잉 공정 후에 소둔처리를 수행하는 것이 바람직하다.

- 1차 아이어닝 공정 시 입구각의 영향을 분석하였으며, 입구각이 작을수록 소재유동이 원활하여 파단발생 없이 성형이 가능함을 확인하였다.
- 해석 및 실험 결과로부터 연성파괴이론이 알루미늄 라이너 성형을 위한 드로잉 공정 및 아이어닝 공정 시 파단 발생 유무에 적용가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 2008년도 중소기업기술혁신사업(주관기관: 두림)의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 전기찬, 박관금속의 성형, 반도출판, pp141~142
- [2] 이석렬, 김경진, 홍진태, 양동열, 이동훈, 최문선, 2005, 대형압력용기의 예비성형체 제작을 위한 공정 설계 및 금형 설계, 한국소성가공학회지, 제14권, 제7호, pp613~618
- [3] 박종진, 이영석, 1997, 소성가공을 위한 연성파괴조건에 대한 고찰, 대한기계학회 논문집(A), 제21권, 제 7호, pp. 1021~1029