

자기 강화형 폴리프로필렌을 이용한 섬유 금속 적층판의 성형성에 관한 수치해석적 연구

이병언¹ · 김 정¹ · 강범수¹ · 송우진[#]

Numerical Study of the Formability of Fiber Metal Laminates Based on Self-reinforced Polypropylene

B. E. Lee, J. Kim, B. S. Kang, W. J. Song

(Received March 11, 2013 / Revised April 25, 2013 / Accepted May 3, 2013)

Abstract

Fiber metal laminates (FMLs) are layered materials comprised of thin metal sheets and fiber reinforced plastic (FRP). This paper presents the numerical study of the formability enhancement of FMLs composed of an aluminum alloy and self-reinforced polypropylene (SRPP) composite. In this study, a numerical simulation based on finite element (FE) modeling is proposed to evaluate the formability of FMLs using ABAQUS/Explicit. The FE model, which included a single layer of solid and shell elements to model the blank, used discrete layers of the solid element with a contact model and shell elements with a friction based model for the aluminum alloy-composite interface conditions. This method allowed the description of each layer of FMLs and was able to simulate the interaction between the layers. It is noted through this research that the proposed numerical simulation described properly the formability enhancement of the FMLs and the simulation results showed good agreement with experimental results.

Key Words : Fiber Metal Laminates, Self-reinforced Polypropylene, Formability, Numerical Analysis

1. 서 론

환경 오염에 대한 관심이 증대되면서 온실가스 배출에 대한 규제가 강화되고 있으며, 특히 자동차의 배기 가스에 포함된 오염 물질의 최소 배출을 위해 자동차의 연비 기준이 강화되고 있다. 이에 차량의 연비 상승을 위한 연구가 다각도로 진행되고 있으며, 차체의 경량화를 통해서 차량의 연비 상승을 추구하여 화석 연료의 사용을 줄임과 동시에 배기 가스의 배출량을 감소시키는 연구에 대한 관심이 증대되고 있다[1]. 이미 차량의 내장재 및 고강도, 고강성이 요구되지 않는 부품에 대해서는 복합재료가 적용되어 차체 경량화가 이루어지고 있

으며[2], 최근에는 보다 효율적인 차체 경량화와 함께 내충격성 강화를 위하여 금속 부품 대신에 섬유 금속 적층판(Fiber Metal Laminates, FMLs)을 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다[3]. 섬유 금속 적층판은 일반적으로 Fig. 1과 같은 샌드위치 구조로서 바깥쪽의 금속과 그 사이의 복합재료로 구성되어 있다. 이러한 섬유 금속 적층판은 자동차의 각 부품에 사용되는 금속 재료와 강성은 비슷하거나 크고 무게가 가볍고 충격에 대한 저항성이 크기 때문에 금속으로 제작된 부품에 대한 대체가 가능하여 차량 경량화에 효과적일 수 있으나[4] 기존의 판재성형 가공방법인 스탬핑(Stamping) 공정의 적용 가능성에 대한 성형성 평가가 먼저 이루어져야 한다.

1. 부산대학교 항공우주공학과

Corresponding author : Industrial Liaison Innovation Center, Pusan National University. E-mail:woodysong@pusan.ac.kr

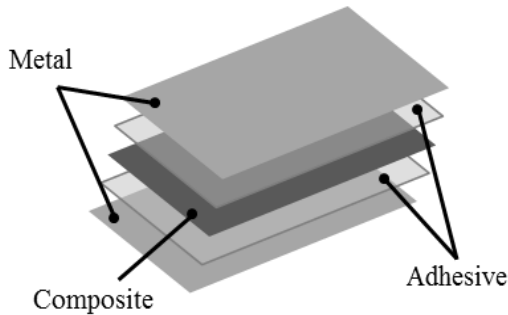


Fig. 1 Configuration of Fiber Metal Laminates

일반적으로 자동차에 광범위하게 사용되고 있는 복합재료인 폴린프로필렌은 탄소섬유(Carbon Fiber)나 유리 섬유(Glass Fiber)로 보강되어 사용되고 있으나, 재사용(Recyclability)이 불가능하기 때문에 환경 오염의 가능성이 높아 향후 발전 가능성이 높지 않다. 이를 해결하기 위해 복합재료의 환경 오염 문제 및 재사용에 관한 연구가 이루어지고 있으며[4], 최근에, 동일한 고분자 재료에서 매트릭스와 섬유를 만들어서 제작한 자기 강화형 폴리프로필렌(Self-reinforced Polypropylene, SRPP)에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이를 활용한 섬유 금속 적층판에 관한 연구 역시 다각도로 이루어지고 있다.

본 논문에서는 기존의 탄소 섬유나 유리 섬유 보강 복합재료를 이용한 섬유 금속 적층판의 성형성에 관한 연구[5, 6]와는 달리 자기 강화 폴리프로필렌과 알루미늄 합금을 적층한 섬유 금속 적층판에 대한 기존의 실험[3]을 토대로 하여 성형성 향상을 위한 수치적 해석을 수행하였다. 기존의 연구는 반구형 펀치를 이용하여 섬유 금속 적층판의 성형성을 평가하기 위해 진행된 실험적 연구이며, 알루미늄의 성형과 비교하여 섬유 금속 적층판은 국부적으로 변형률이 크게 증가하지 않고 소재 전반에 걸쳐 변형이 이루어졌음을 보여주었다. 본 연구에서는 자기 강화형 폴리프로필렌과 알루미늄 합금으로 이루어진 섬유 금속 적층판의 스탬핑 공정 적용을 위한 기초 연구를 수행하였다. 이를 위해서 성형 공정시 성형 결과에 영향을 끼칠 수 있는 인자를 파악하고 그에 따른 유한요소 모델링을 통한 성형 해석을 수행하여야 한다. 따라서, 본 논문에서는 성형성 시험장치를 포함하여 블랭크 모델의 요소(Element), 블랭크 홀더력(Blank Holder Force, BHF), 다이 및 펀치와 소

Table 1 Material properties of the FMLs

Material property	Al 5005	SRPP
Young's modulus(GPa)	68.9	5
Poisson's ratio	0.33	0.15
Yield strength(MPa)	159	180
Density(g/cm ³)	2.7	0.92

재 사이의 마찰력 그리고 섬유 금속 적층판의 내부 마찰력 등의 수치적 모사를 통해 성형성 평가를 위한 수치 해석을 수행하였다. 또한, 해석 결과를 기존의 성형성 시험 결과와 비교 및 확인하여 섬유 금속 적층판에 적합한 유한요소 모델을 제안하였다.

2. 2축 인장 성형성 평가 시험의 수치적 모사

정확한 유한요소 해석을 위해 0.6mm의 초기 두께를 가지는 알루미늄 합금 소재 Al 5005-O는 기존 논문[7]에서 단축인장실험을 통해 측정된 응력 변형률값을 적용하였고, 1mm의 초기 두께를 가지는 자기 강화형 폴리프로필렌은 복합재 제작 업체인 Curv(社)에서 제공된 응력 변형률 선도를 적용하였으며, 각 소재의 기본 물성치는 Table 1에 나타내었다. 효율적인 해석 수행을 위하여 1/4 모델링을 사용하였으며, 본 연구의 2축 인장 한계 돌 성형성 평가 시험에 관한 유한요소 해석을 위해 상용 해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit를 사용하였다.

2.1 성형 시험 장치의 유한요소 모델링

섬유 금속 적층판의 성형성을 평가하기 위해 구성된 성형 시험 장치는 50mm 반지름을 가지는 반구형 펀치와 다이 그리고, 블랭크 홀더로 구성되어 있다. 본 논문에서는 ABAQUS의 강체 요소(Rigid body)로 정의하여 해석을 수행하였으며, 완성된 유한요소 모델은 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 섬유 금속 적층판의 유한요소 모델링

실험과 해석에 사용된 섬유 금속 적층판은 0.6 mm 두께를 가지는 알루미늄 합금을 바깥쪽에 두고 그 사이에 1mm의 두께를 가지는 자기 강화형 폴리프로필렌으로 구성되어 있으며, 섬유와 금속 사이의 접착제에 관한 물성은 무시하고 모델링하였다. 본 논문에서는 섬유 금속 적층판의 각 층을

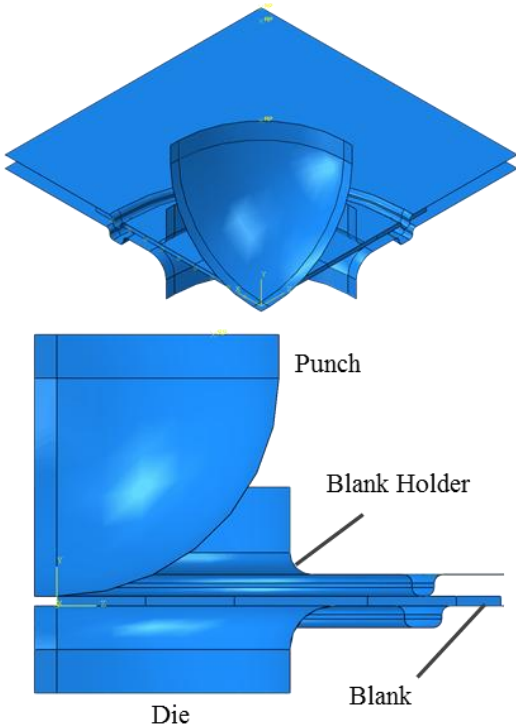


Fig. 2 Finite element model of forming test device

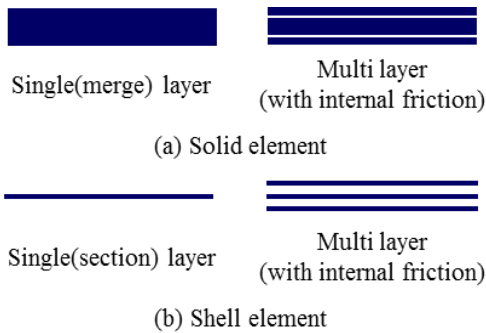


Fig. 3 Solid and Shell element

개별적으로 분리하여 각 층간의 상호 작용을 모사하기 위하여 3층으로 구성된 솔리드 요소 (Solid element) 및 셸 요소(Shell element)로 모델링하였다. 또한, 적용된 소재를 하나의 요소층으로 구성하여 생성한 솔리드 요소(Merged solid element) 및 각 층을 하나의 요소 단면(Section)으로 모델링하여 각각의 물성치를 적용한 셸 요소(Single section shell element) 등 총 4가지 유한요소 모델을 적용하였으며, 적용된 블랭크 모델의 유한 요소 형상은 Fig. 3에 나타내었다. 또한, 대변형이 발생하는 성

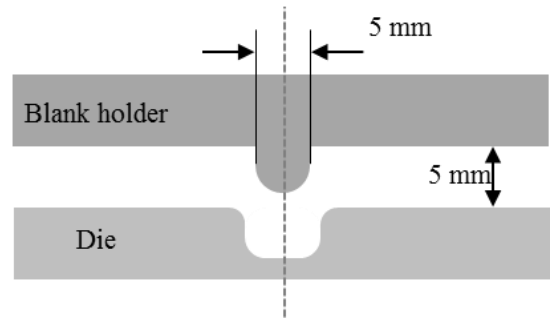


Fig. 4 Geometry of blank holder and die

형임을 고려하여 대변형 발생시 보다 정 확하고 빠른 해석이 가능하도록 요소를 선택하였다. 이를 위해 솔리드 요소는 ABAQUS의 C3D8R을, 셸 요소는 S4R을 적용하였으며, 가장 작은 요소의 길이는 1mm이고, 변형이 집중되는 형상을 고려하여 블랭크 모델 영역별로 요소의 크기를 달리하였다.

2.3 유한요소 해석 변수 도출

일반적으로 성형 공정에서의 가장 큰 변수는 것은 다이 및 펀치와 소재 사이에서 발생하는 마찰력과 블랭크 홀더력(BHF)이다. 일반적으로 금속 소재의 경우, 마찰계수가 0.05~0.1이라고 알려져 있으나, 윤활제의 사용 여부 및 성형 수행시 환경에 따라 달라지므로 정확한 측정값을 얻기 어렵다. 또한, 섬유 금속 적층판의 경우, 금속과 복합 재료간의 접착(Adhesive)을 통해 제작이 이루어지지만, 성형이 진행되면서 성형 환경에 따라 층간 분리 현상(Delamination)이 발생할 수 있으므로[8] 본 논문에서는 층간 내부의 마찰 계수를 인위적으로 적용하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 다이 및 펀치와 소재 사이에서 발생하는 외부 마찰 계수의 크기를 0.1~0.4로 적용하였다. 또한, 과도하거나 부족하지 않은 소재의 유입을 통해 성형성에 큰 영향을 미치는 블랭크 홀더력을 또 하나의 변수로 두었다. 다만, 본 논문에서는 효율적인 해석 수행을 위해 Fig. 4의 블랭크 홀더 및 다이의 형상 모델을 참고하여 블랭크 홀더력을 블랭크 홀더의 움직인 거리로 변환하여 해석을 수행하였으며 그 크기는 2-5mm로 한정하였다.

제시한 바와 같이 총 마찰 계수에 의한 4가지 경우와 블랭크 홀더의 이동 거리에 의한 4가지에 관한 경향성을 확인하기 위하여 ABAQUS의 질량 보정(Mass scaling) 기법을 이용하여 해석을 수행

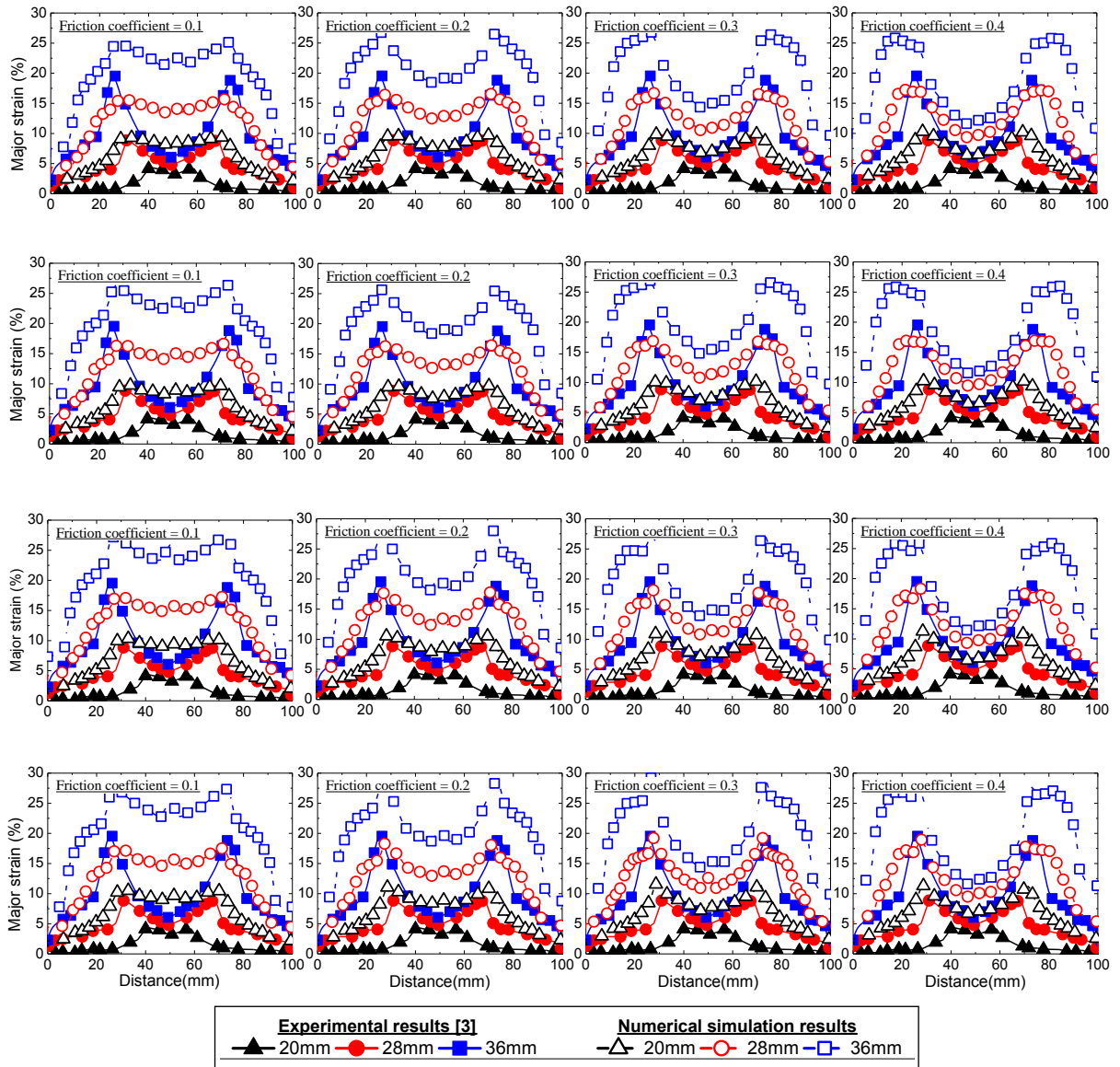


Fig. 5 Numerical simulation results with respect to BHF and friction coefficient

하였다. 해석 결과는 기존의 실험 결과와 비교하였으며, 편차가 20, 28 그리고 36mm 아래쪽으로 움직인 순간의 결과를 비교하였다. 이러한 경향성 확인을 통해 각 인자가 해석에 미치는 효과에 대하여 확인하고 실험 결과와 유사한 경향을 가지는 경우에 대하여 보다 정확한 해석 결과를 도출하기 위하여 블랭크 요소와 섬유 금속 적층판 내부의 층간 마찰력까지 고려하여 추가로 해석을 수행하였다.

3. 유한요소 해석 결과

3.1 블랭크 홀더력에 의한 효과

앞서 서술한 바와 같이 블랭크 홀더력(BHF)은 블랭크 홀더가 이동한 거리로 변환하여 해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5는 블랭크 홀더의 이동 거리와 마찰 계수를 변화시켰을 때 블랭크 각 위치에서의 주변형률에 대한 해석 결과를 실험 결과와 비교한 그림이며,

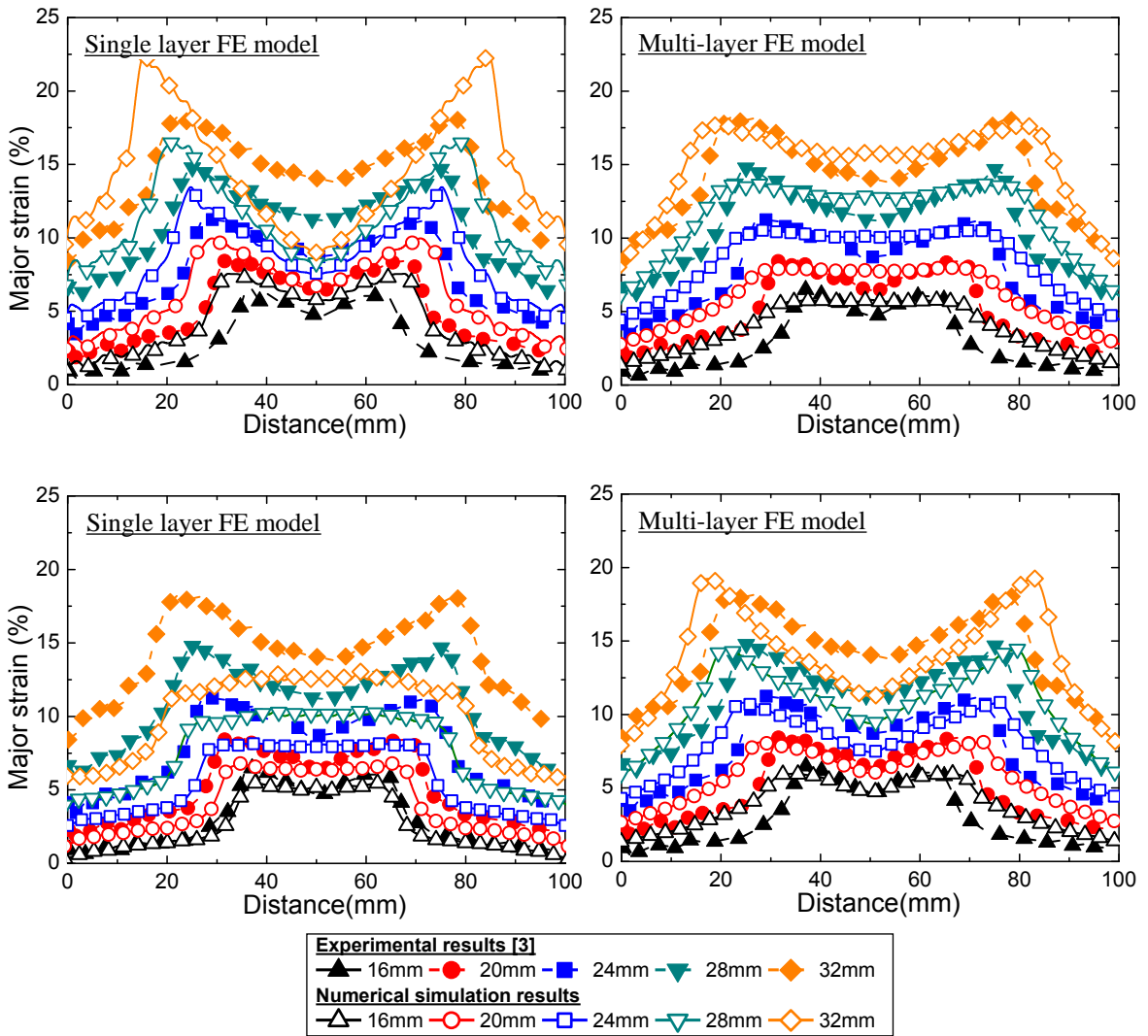


Fig. 6 Numerical simulation results between solid element and shell element

기술한 바와 같이 블랭크의 중심부는 50mm 위치에 있다. Fig. 5의 (a)-(d)를 비교해보면 블랭크 홀더력이(블랭크 홀더의 이동 거리가) 커질수록 주변부의 변형률이 급격히 변화함을 알 수 있으며, 이는 해석 수행 시 소재의 연신율과 상관없는 변형을 초래하여 실제 성형 공정과는 다른 해석 결과를 도출할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 블랭크와 펀치 사이의 마찰력에 의한 효과

Fig. 5의 (a)-(d)를 비교해 보면 마찰 계수가 커질수

록 중심부의 변형이 줄어들음을 확인할 수 있다. 앞서 기술한 대로 일반적인 금속의 경우 약 0.05~0.1 정도의 마찰 계수를 가지나, 해석 결과 4~8배가 큰 0.4를 적용하였을 경우에 중심부의 변형이 실험결과와 유사함을 확인하였다. 이러한 해석 결과는 기존 실험이 가지는 환경적 요인일 가능성이 있지만, 또한, 섬유 금속 적층판 내부의 층간 분리 현상에 기인하여 발생하는 고유의 특징일 가능성도 있으므로 향후 연구를 통해 확인하여야 할 것이다.

3.3 블랭크 유한요소 모델링에 의한 효과

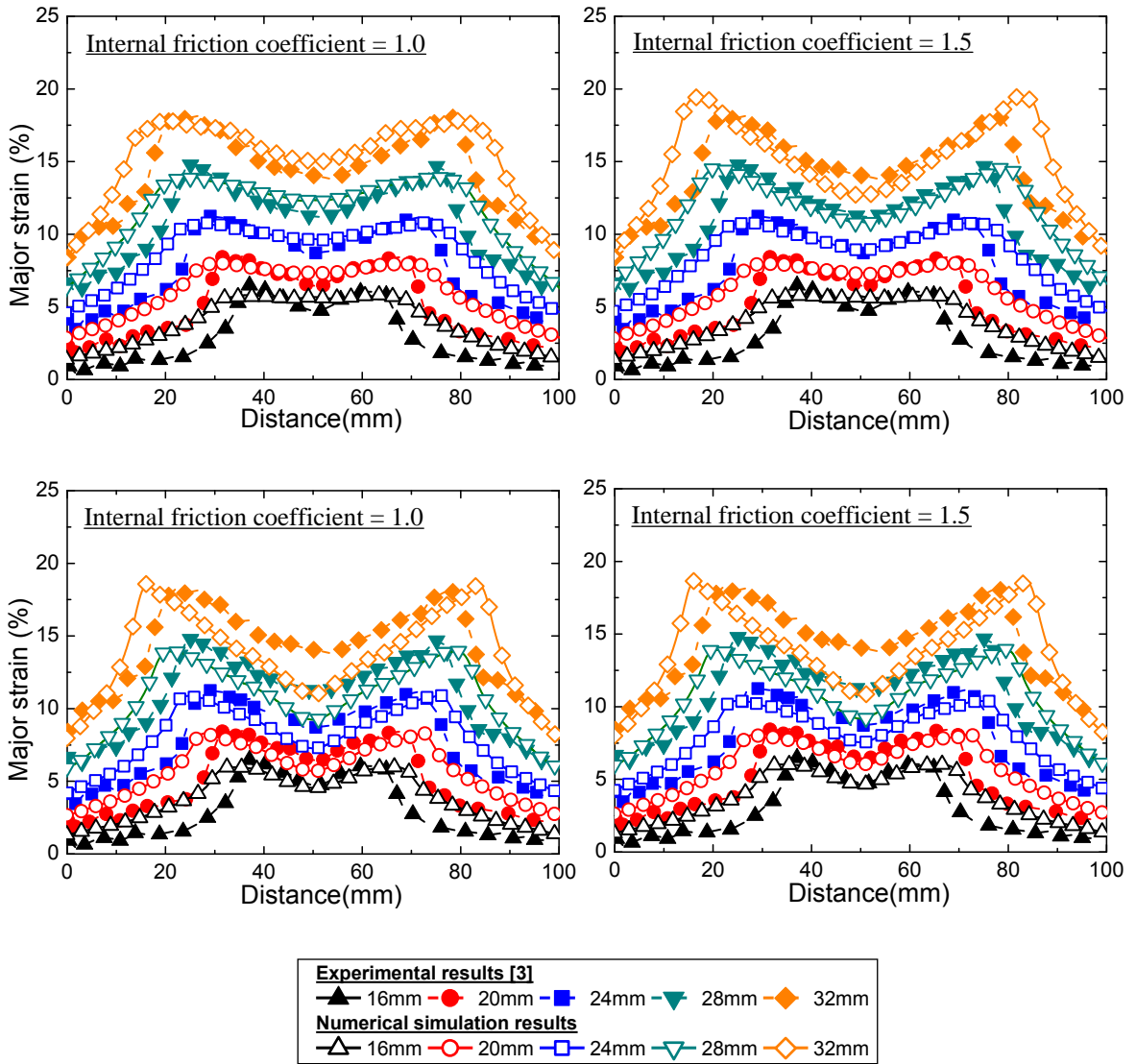


Fig. 7 Comparison of numerical simulation results with internal friction coefficient

3.1절과 3.2절에서 블랭크 홀더의 이동 거리와 마찰력에 의한 해석 결과와 실험 결과를 살펴 보았다. 본 연구에서는 블랭크 홀더의 이동 거리는 3mm, 다이 및 펀치와 소재의 마찰 계수 및 층간 내부 마찰 계수 또한 0.4인 경우에 대하여 추가적으로 해석을 수행하였다. 이를 위해 앞서 적용한 질량 보정(Mass scaling) 기법은 운동 에너지의 값이 최소한으로 작용할 수 있도록 조정하였고, Fig. 3에서 나타난 4종류의 유한요소 모델을 적용하였다. 해석 결과는 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6 (a) 솔리드 요소의 경우, 적층된 소재를 하나의 요소층으로

모델링하여 해석을 수행한 좌측의 해석 결과는 실험 결과와 비교하여 중심부 변형은 적고, 주변부 변형은 크게 나타났다. 그러나, 층간 마찰력이 주어진 우측 그림은 실험 결과와 매우 유사한 결과를 도출하였으며, 중심부의 변형이 실험값보다 크게 발생함을 확인하였다. Fig. 6(b) 쉘 요소를 적용한 해석 결과는 하나의 요소층으로 모델링된 좌측의 결과는 펀치가 조금 이동한 경우에는 정확한 모사가 가능함을 보여주지만, 이후의 결과는 전혀 맞지 않았으며, 우측의 결과 그래프는 Fig. 6 (a)의 좌측 그림과 마찬가지로 중심부 및 주변부

의 변형률이 실험과 해석 결과에서 차이가 발생함을 확인하였으며 이는 층간 마찰력을 효과적으로 모사하지 못하고 있음을 의미한다.

3.4 섬유 금속 적층판의 층간 마찰력에 의한 효과

3.3절에서 살펴본 바와 같이 섬유 금속 적층판의 경우는 층간 마찰 계수를 적용시키는 것이 보다 정확한 해석 결과를 도출함을 알 수 있다. Fig. 7은 솔리드 및 셸 요소를 이용하여 다층 유한요소 모델을 적용하여 층간 마찰 계수를 적용했을 때의 결과를 나타내었으며, Fig. 7의 좌측은 내부 마찰 계수가 1.0이고 우측은 1.5인 경우이다. 일반적으로 마찰 계수는 1.0 이하의 값을 해석에서 적용하고 있으나, 본 연구에서는 접착제를 이용하여 제작된 섬유 금속 적층판 성형시 층간 미끄러짐 현상을 고려하기 위하여 기존의 다층 복합재 성형의 연구 결과[9]를 참고하여, 점성력을 마찰력으로 가정하여 모델을 구축하였으며, 이에 1.0이상의 임의의 마찰 계수를 적용하여 해석을 수행하였다. 그러나, 복잡한 형상 성형의 수치 해석을 수행할 경우에는 소재의 수직방향에 대한 구속이 없으므로 해석 모델을 적절히 수정하여 해석을 수행하여야 한다. 솔리드 요소의 경우 Fig. 6 (a)의 우측(마찰 계수 0.4)과 함께 비교했을 때, 층간 내부 마찰력의 크기가 해석 결과에 큰 영향을 끼친다는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 셸 요소의 경우는 층간 내부 마찰력이 해석 결과에 큰 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 0.6mm 두께를 가지는 알루미늄 합금을 바깥쪽에 두고 그 사이에 1mm의 두께를 가지는 자기 강화형 폴리프로필렌으로 구성된 섬유 금속 적층판에 대하여 성형성 평가를 위한 수치적 해석을 수행하였다. 해석에 영향을 줄 수 있는 인자들의 유한요소 모델링을 통해 수행된 해석 결과를 선행 실험 결과와 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 섬유 금속 적층판의 해석 수행시 일반적인 성형 공정과 마찬가지로 마찰력 및 블랭크 홀더력이 성형 해석의 주요 인자임을 확인하였다. 본 연구에서는 블랭크 홀더의 이동거리가 3mm, 펀치와 소재 사이의 마찰력 계수는 0.4인 경우에 대하

여 추가적인 성형 해석을 수행하였다.

(2) 특히, 섬유 금속 적층판의 경우, 적층된 소재를 하나의 요소층으로 구성하여 모델링하는 것보다 각각의 소재층을 각각의 요소층으로 구성하고 인위적인 층간 내부 마찰 계수를 부여한 모델링 방식이 실험과 유사한 해석 결과를 도출함을 확인하였다.

(3) 또한, 셸 요소보다 솔리드 요소를 적용하여 해석을 수행하였을 때 실험 결과와 유사한 해석 결과를 도출함을 알 수 있었다.

(4) 솔리드 요소의 경우, 층간 마찰 계수가 성형 해석에 큰 영향을 끼침을 알 수 있었고, 본 연구에서는 층간 마찰 계수를 1.0으로 적용했을 때 매우 유사한 해석 결과를 도출할 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(2012R1A5A1048294)의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한, 지식경제부/한국에너지기술평가원(KETEP)의 부분 지원(No. 20124030200020)에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

- [1] C. Berggren, T. Magnusson, 2011, Reducing Automotive Emissions-The Potentials of Combustion Engine Technologies and the Power of Policy, *Energ. Policy*, Vol. 41, pp. 636~643.
- [2] K. S. Kim, K. M. Bae, S. Y. Oh, M. K. Seo, C. G. Kang, S. J. Park, 2012, Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Lightweight Vehicles, *Elast. Compos.*, Vol. 47, No. 1, pp. 65~74.
- [3] A. Sexton, W. Cantwell, S. Kalyanasundaram, 2011, Stretch Forming Studies on a Fibre Metal Laminate Based on a Self-reinforcing Polypropylene Composite, *Compos. Struct.*, Vol. 94, No. 2, pp. 431~437.
- [4] J. Gresham, W. Cantwell, M. J. Cardew-Hall, S. Kalyanasundaram, 2006, Drawing Behavior of Metal-composite Sandwich Structures, *Compos. Struct.*, Vol. 75, No. 1-4, pp. 305~312.
- [5] L. Mosse, P. Compston, W. J. Cantwell, M. Cardew-Hall, S. Kalyanasundaram, 2006, Stamp Forming of Polypropylene Based Fiber-metal Laminates: The

- Effect of Process Variables on Formability, J. Mater. Process. Technol., Vol. 172, No. 2, pp. 163~168.
- [6] L. Mosse, P. Compston, W. J. Cantwell, M. Cardew-Hall, S. Kalyanasundaram, 2006, The Development of a Finite Element Model for Simulating the Stamp Forming of Fibre-metal Laminates, Compos. Struct., Vol. 75, No. 1-4, pp. 298~304.
- [7] P. B. Trivedi, R. S. Yassar, D. P. Field, R. Alldredge, 2006, Microstructural Evolution and Observed Stress Response during Hot Deformation of 5005 and 6022 Al Alloys, Mater. Sci. Eng., A, Vol. 425, No. 1-2, pp. 205~212.
- [8] T. J. de Vries, A. Vlot, F. Hashagen, 1999, Delamination Behavior of Spliced Fiber Metal Laminates. Part 1. Experimental Results, Compos. Struct., Vol. 46, No. 2, pp. 131~145.
- [9] K. Vanclooster1, S. V. Lomov, I. Verpoest, 2010, Simulation of Multi-layered Composites Forming, Int. J. Mater. Form., Vol. 3, No. 1, pp. 695~ 698.