

## 등이축인장 모드 변형시 알루미늄 포일 접착강판의 박리한계 예측

이찬주\* · 손영기\* · 이정민\*\* · 이선봉\*\*\* · 변상덕\*\*\*\* · 김병민\*†

\* 부산대학교 기계공학부, \*\* 한국생산기술연구원, \*\*\* 계명대학교 기계자동차공학과, \*\*\*\* LG 전자

### Delamination Limit of Aluminum Foil-Laminated Sheet During Stretch Forming

Chan Joo Lee\*, Young Ki Son\*, Jung Min Lee\*\*, Seon Bong Lee\*\*\*, Sang Deog Byun\*\*\*\*  
and Byung Min Kim\*\*†

\* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

\*\* Dongnam Regional Division, Korea Institute of Industrial Technology

\*\*\* Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.

\*\*\*\* LG Electronics

(Received September 19, 2011; Revised January 11, 2012; Accepted January 25, 2012)

**Key Words** : Aluminum Foil Laminated Sheet(알루미늄 포일 접착강판), Delamination Limit (박리한계), Cohesive Zone Model(접착지역모델), Bonding Strength(접착강도)

**초록**: 알루미늄 포일 접착강판은 접착제를 이용하여 알루미늄 포일을 드로잉용 GI 강판 위에 접착시킨 강판이다. 알루미늄 포일의 박리현상은 알루미늄 포일 강판의 주된 성형불량 중의 하나이다. 본 연구에서는 가전제품의 외관에 활용되는 알루미늄 포일 접착강판의 박리한계를 규명하였다. 알루미늄 포일 접착강판의 박리는 알루미늄 포일과 강판의 접착강도에 의해 결정된다. 알루미늄 접착강판의 박리와 접착강도와의 관계를 분석하기 위해 CZM 을 활용하여 알루미늄 포일 접착강판의 계면접착력에 따른 알루미늄 포일 박리변형률의 변화를 분석하였다. 해석결과, 박리발생의 주원인은 강판의 변형 중 접착계면에서 발생하는 전단응력에 의해 박리가 발생함을 확인하였다. 또한 알루미늄 포일 접착강판의 계면접착력을 측정하여 강판의 등이축인장모드인 스트레치 변형에 따른 박리가 발생하는 한계변형률을 도출하였다. 도출된 알루미늄 포일 접착강판의 박리한계는 에릭슨 시험을 통해 검증하였다.

**Abstract**: An aluminum foil-laminated sheet is a laminated steel sheet on which aluminum foil is adhesively bonded. It is usually used on the outer panel of home appliances to provide an aluminum feeling and appearance on the surface of the product. The delamination of aluminum foil is one of the main problems during the stretch forming process. The purpose of this study is was to determine the delamination limit of an aluminum foil-laminated sheet in the stretch forming process. The delamination was dependent on the bonding strength between aluminum foil and steel sheet. The fracture behavior of the interface between the aluminum foil and the steel sheet was described by a cohesive zone model. A finite element was conducted with the cohesive zone model to analyze the relationship between the delamination limit and the bonding strength of the interface. The interface bonding strength was evaluated by lap shear and T-peel test. The delamination limit of the aluminum foil-laminated sheet was determined by using the bonding strength of the steel sheet. The delamination limit was also verified by the Erichsen test.

- 기호설명 -

$\sigma_n^0, \sigma_s^0, \sigma_t^0$  : 인장 및 전단모드 임계응력  
 $D$  : 재료의 손상거동을 나타내는 손상계수  
 $\delta_m^0, \delta_m^f$  : 재료의 손상 시작변위 및 파괴변위

$G_n^C, G_s^C, G_n^C$  : 인장 및 전단모드 파괴변위  
 $P_C, P_S$  : 코팅층 및 모재에 작용하는 하중  
 $M_C$  : 코팅층에 작용하는 굽힘모멘트  
 $\sigma, \tau$  : 계면 박리응력 및 전단응력

### 1. 서론

알루미늄 포일 접착강판은 가전제품의 외관에

† Corresponding Author, [bmkim@snu.ac.kr](mailto:bmkim@snu.ac.kr)

사용되는 강판으로 용융아연도금강판 위에 알루미늄 포일을 적층한 강판이다. 알루미늄 포일의 접착을 통해 제품의 외관에 알루미늄 느낌을 부여하는 것을 목적으로 하는 접착강판이다. 이러한 접착강판의 성형 중 발생하는 주요불량은 접착층의 박리현상이다. (1,2)

접착강판의 박리현상에 대한 연구는 주로 계면 접착력과 관련하여 많은 연구가 진행되었다. V. Bosch 등(3)은 계면의 접착력을 평가하여 폴리머 코팅강판의 딥드로잉 공정에서 폴리머 코팅의 박리현상을 유한요소법을 사용하여 나타내었으며, 공정변수가 폴리머 코팅의 박리에 미치는 영향을 평가하였다. R. Vayeda 와 J. Wang 등(4)은 접착강판의 박리현상을 분석하기 위해 벤딩시험 및 인장시험을 수행하였다. 박판소재의 소성변형에 따른 폴리머코팅층의 박리특성을 평가하여 박판소재의 변형량에 따라 폴리머 코팅층의 박리가 증가함을 밝혔다. 또한 접착강판의 코팅층 박리는 모재의 변형모드에 따라 박리경향이 달라지며, 주로 평면변형률 상태 및 이축인장에서 발생한다. 즉, 접착강판의 스트레치 성형성을 평가하기 위해서는 접착강판의 이축인장 모드에서 발생하는 박리현상에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

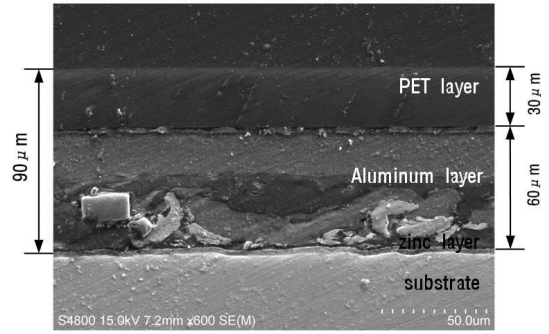
본 연구에서는 알루미늄 포일 접착강판의 이축인장 변형시 접착강판의 박리한계를 예측하였다. 유한요소해석을 통해 알루미늄 포일과 강판의 계면접착력과 박리관계를 분석하였다. 또한 인장시험 및 박리시험을 통해 알루미늄 포일과 강판의 계면접착력을 평가하였으며, 평가된 계면접착력을 이용하여 접착강판의 박리한계(delamination limit)를 예측하였다. 에릭슨 시험을 통해 박리한계까지 성형 후, 알루미늄 포일의 박리가 발생하는 변형률과 유한요소해석을 통해 예측된 박리한계를 비교하여 알루미늄 포일 접착강판의 이축인장 변형시의 박리한계조건을 검증하였다.

2. 접착강판 박리해석모델

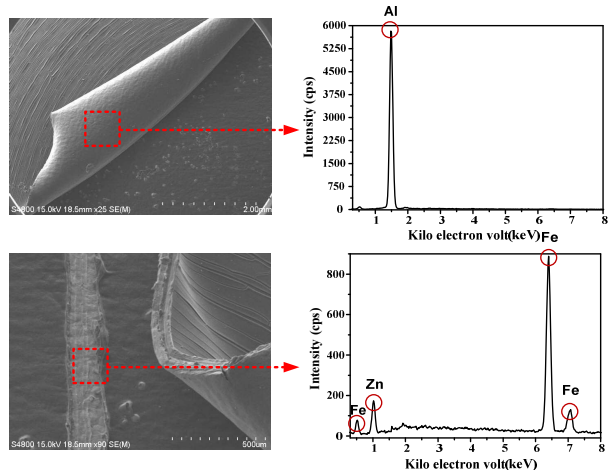
2.1 유한요소해석모델

본 연구에서 사용한 알루미늄 포일 접착강판의 단면과 박리계면을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에 나타낸 것과 같이, 알루미늄 포일 접착강판은 두께 30 μm의 PET(polyethylene)층과 두께 60 μm의 알루미늄 포일이 용융아연도금강판 위에 접착된 강판이다. Fig. 1(b)는 에릭슨 시험 후 알루미늄 포일 접착강판의 박리계면을 나타낸 것으로, 알루미늄 포일과 강판사이의 계면에서 박리가 발생한다.

박리계면은 EDS 성분분석을 통해 구분하였다. 분석결과, 박리된 코팅층에서는 알루미늄이 대부분으로 나타났으며, 탄소 등은 박리계면에 일부 남아있던 접착제이다. EDS 성분 분석결과를 바탕으로 본 연구에서는 알루미늄 포일과 강판 사이의 계



(a) Cross-section of aluminum foil laminated sheet



(b) Delamination interface of aluminum foil laminated sheet after stretch forming

Fig. 1 Structure of aluminum foil laminated sheet and its delamination after stretch forming

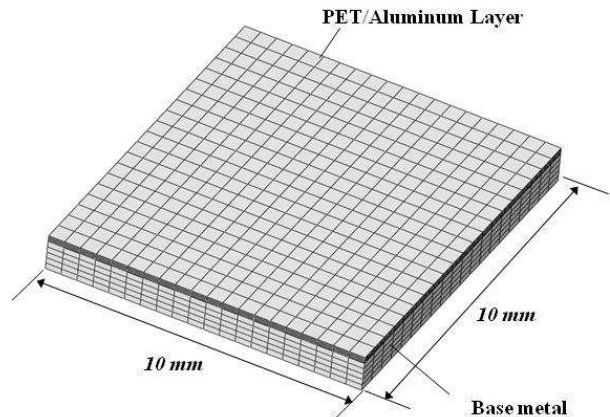
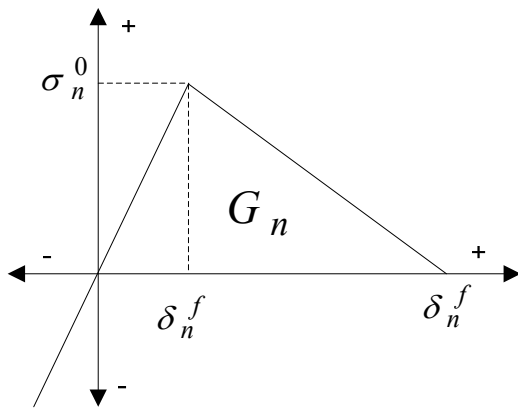


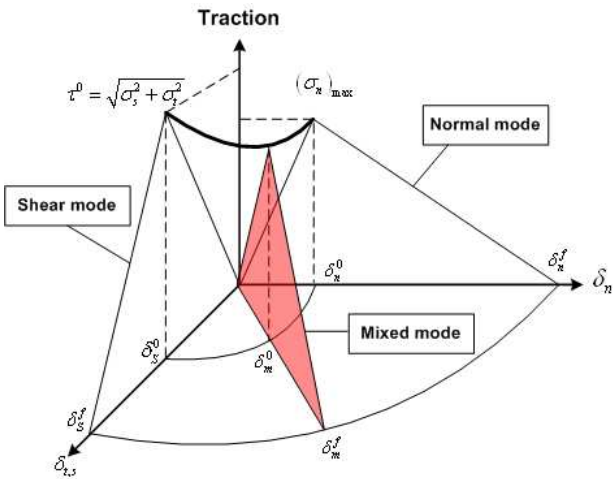
Fig. 2 FE-model for delamination of aluminum foil laminated sheet during the equal biaxial stretching

**Table 1** Initial conditions of hole clinching process

Material	PET	Al foil	GI sheet
Elastic modulus (GPa)	2.3	70	200
Yield stress (MPa)	81.7	22.3	125.2
Tensile stress (MPa)	149.3	31.7	288.1
Elongation (%)	123.6	2.7	41.06



**Fig. 3** Pure normal mode traction-separation law in CZM



**Fig. 4** Mixed mode traction-separation law in CZM

면접착력과 박리한계를 분석하였다.

본 연구에서 사용한 유한요소해석모델을 Fig. 2에 나타내었다. 스트레치 성형시 알루미늄 포일 접착강판의 계면접착력과 박리한계를 규명하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 접착강판의 박리현상은 크로스 해칭 그리드(cross-hatched grid)를 활용하여 평가한다.<sup>(5,6)</sup> 본 연구에서는 해석시간을 단축하기 위해 크로스 해칭된 알루미늄 포일의 한 요소만을 고려하여 계면접착력과 박리한계의 관계를 분석하였다. 크로스 해칭의 크기는 10×10 mm

이며, PET 및 알루미늄 포일의 두께는 Fig. 1(a)에서 실측한 값을 사용하였다. 각 층의 기계적 물성은 인장시험을 통해 평가하였으며, Table 1에 그 결과를 나타내었다.

알루미늄 포일 접착강판의 경계조건은 등이축인장모드 변형이 되도록 동일한 변위량을 부여하였다. 동일한 변위량을 부여할 경우, 주방향 및 부방향의 변형률비가 결정되기 때문에 알루미늄 포일 접착강판의 이방성은 고려하지 않았다.

2.2 계면 변형 및 파괴모델

알루미늄 포일과 강판 사이의 계면변형 및 계면 파괴거동은 cohesive zone model(CZM)을 사용하여 나타내었다. CZM은 임계응력과 파괴인성으로 재료 또는 계면의 파괴거동을 나타낸다.<sup>(7,8)</sup> 본 연구에서는 인장 및 전단모드에 대한 임계응력과 파괴인성의 변화에 따라 강판의 변형률에 따른 계면 파괴거동을 분석하였다.

Fig. 3과 4는 CZM에서 변형거동은 도식적으로 나타낸 것이다. 계면의 변형은 탄성변형으로 가정하였으며, 임계응력에 도달하면 파괴거동이 시작된다. CZM에서 인장 및 전단모드에 대한 임계응력은 다음의 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\left( \frac{\langle \sigma_n \rangle}{\sigma_n^0} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_s}{\sigma_s^0} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_t}{\sigma_t^0} \right)^2 = 1 \tag{1}$$

여기서,  $\sigma_t^0$ 는 인장 및 전단모드 재료의 임계응력이다.  $\langle \rangle$ 는 Macaulay brackets으로, 압축응력상태에서  $\sigma_n = 0$ 이다. 즉, 압축응력은 계면파괴거동에 영향을 미치지 않는다. 계면의 응력상태가 식 (1)에 의해 1에 도달하면 계면파괴거동이 시작된다. 계면파괴거동은 다음의 식 (2)와 같다.

$$\sigma_n = \begin{cases} (1-D)\bar{\sigma}_n, & \bar{\sigma}_n > 0 \\ \bar{\sigma}_n, & \bar{\sigma}_n \leq 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$\sigma_s = (1-D)\bar{\sigma}_s, \quad t_t = (1-D)\bar{\sigma}_t$$

여기서,  $D$ 는 손상계수(Scalar damage variable)로 이 값이 1에 도달하면 파괴가 발생한다.  $\bar{\sigma}_i$ 는 파괴거동을 고려하지 않았을 때의 응력값이다.  $D$ 는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \tag{3}$$

여기서,  $\delta_m^{\max}$  는 계면의 변위량이며,  $\delta_m^0$  과  $\delta_m^f$  는 계면파괴 시작변위 및 파괴변위이다. 계면의 시작변위와 파괴변위는 CZM 의 변형거동 조건으로부터 계산된다.  $\delta_m^0$  는 초기 탄성변형관계로부터 계산되며,  $\delta_m^f$  는 파괴인성으로부터 계산된다. 파괴인성은 Fig. 3 에 나타낸 것과 같이 변형곡선이 이루는 면적과 같다. 인장 및 전단모드가 혼합된 응력상태에서는 파괴인성은 다음의 식 (4)에 나타낸 것과 같이 Benzeggagh-Kenane(BK) 법칙으로 계산하였다.<sup>(9)</sup> BK 법칙은 다음의 식 (4)와 같다.

$$G^C = G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left\{ \frac{G_s}{G_T} \right\}^\eta \quad (4)$$

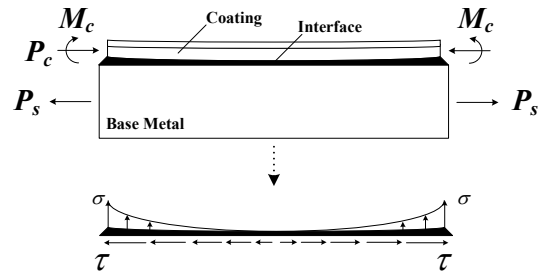
여기서,  $G_i^C$  는 인장 및 전단모드 파괴인성이며,  $G_s = G_s + G_t$ ,  $G_s = G_n + G_s$  이다.  $\eta$  는 파괴모드와 관련된 재료상수로 1 을 사용하였다.

### 3. 계면특성과 박리한계 관계

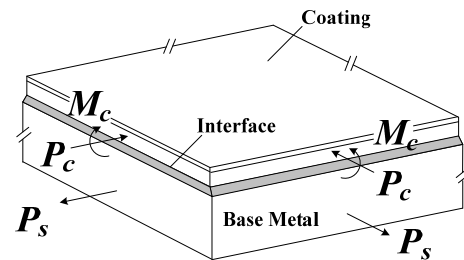
Fig. 5(a)는 모재의 변형에 따른 알루미늄 포일의 응력상태를 도식적으로 나타낸 것이다. 모재의 변형시 알루미늄 포일과 모재의 서로 다른 변형거동에 의해 계면에서는 전단력에 의한 전단응력이 발생하며, 알루미늄 포일에 굽힘모멘트로 인해 수직응력이 발생하게 된다. 계면에 작용하는 응력에 의해 계면의 변형에너지가 한계점에 도달하면 파괴가 발생한다. Fig. 5(b)와 (c)는 알루미늄 포일강판의 이축 및 단축 변형모드에서 강판에 작용하는 하중상태를 도식적으로 나타낸 것이다. 이축인장 모드에서는 코팅층에 발생하는 굽힘모멘트의 방향이 같기 때문에 박리응력은 이축인장모드에서 가장 크며, 이로 인해 이축인장 모드의 모재 변형시 알루미늄 포일의 박리는 가장 낮은 주변형률에서 발생한다. 즉, 알루미늄 포일 접착강판의 스트레칭형성을 평가하기 위해서는 이축인장 모드 변형에 박리한계를 우선적으로 평가해야 한다.

#### 3.1 인장모드 파괴인성과 박리한계

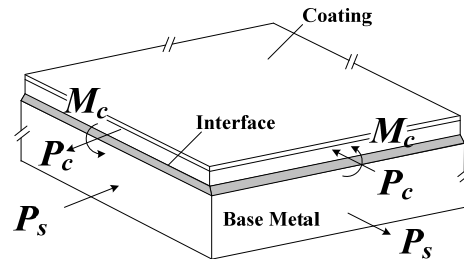
본 연구에서는 CZM 을 활용하여 인장 및 전단 모드 접착력과 박리한계의 관계를 분석하였다. Fig. 6 은 모재의 이축인장 변형상태에서 인장 모드 파괴인성에 따른 알루미늄 포일 접착강판의 박리 변형률의 변화를 나타낸 것이다. 계면의 인장모드 파괴인성이 증가함에 따라 박리 변형률이 증가하는 경향을 나타내었다. 인장모드 파괴인성의 증가



(a) Stress state at interface of aluminum foil and GI sheet



(b) Free body diagram in biaxial tension



(c) Free body diagram in uniaxial tension

Fig. 5 Schematic drawings of free body diagram and stress state for aluminum foil laminated sheet

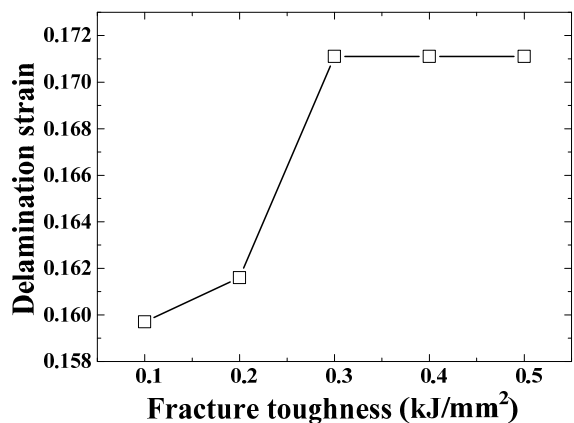


Fig. 6 Variation of delamination strain with increasing of normal mode fracture toughness

는 코팅층에 작용하는 굽힘모멘트로 인해 계면에서 발생하는 박리응력에 의한 계면파괴에 대한 저항성이 증가함을 의미한다.

그러나 계면의 인장모드 파괴인성 0.3 kJ/mm<sup>2</sup> 이

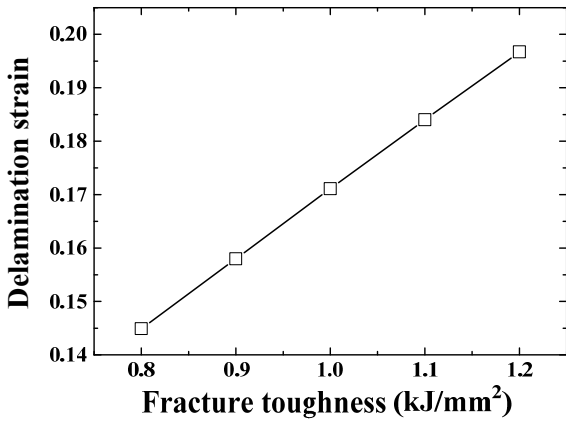


Fig. 7 Variation of delamination strain with increasing of shear mode fracture toughness

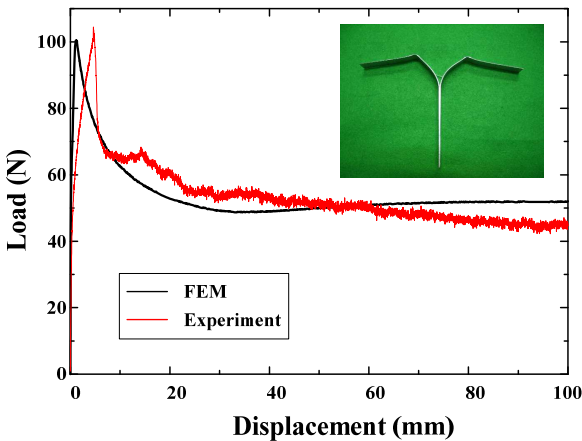


Fig. 8 Load-displacement curve in T-peel test

상에서는 박리 변형률이 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이축인장 변형상태에서 알루미늄 포일 접착강판의 계면에서는 박리응력과 전단응력이 동시에 작용한다. 즉, 모재의 변위가 증가함에 따라 계면에 작용하는 박리응력과 전단응력이 동시에 증가다. 이 때 박리응력에 대한 파괴인성이 증가하더라도 전단응력에 의해 계면이 파괴되기 때문에 일정한 인장모드 파괴인성 이상에서는 박리한계의 증가효과를 기대할 수 없다.

### 3.2 전단모드 파괴인성과 박리한계

Fig. 7 은 모재의 이축인장 변형상태에서 전단모드 파괴인성에 따른 알루미늄 포일 접착강판의 박리 변형률의 변화를 나타낸 것이다. 계면의 전단모드 파괴인성이 증가함에 따라 박리 변형률이 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 인장모드 파괴인성이 증가함에 따라 계면파괴를 위해 필요한 파괴에너지가 증가하기 때문이다.

알루미늄 포일 접착강판의 계면특성에 따른 박

리한계를 평가한 결과, 알루미늄 포일 접착강판의 박리는 인장모드 및 전단모드 계면 파괴특성에 모두 영향을 받지만 전단모드 계면 파괴특성에 의해 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 알루미늄 포일 접착강판의 박리특성을 향상시키기 위해서는 계면의 전단모드 파괴특성을 향상시키는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

## 4. 알루미늄 접착강판의 박리한계 평가

### 4.1 계면 파괴특성평가

알루미늄 포일 접착강판의 박리한계를 평가하기 위해 알루미늄 포일과 강판의 계면 파괴특성을 평가하였다. 알루미늄 포일과 강판은 접착제에 의해 접착된다. 본 연구에서는 알루미늄 포일 접착강판에 사용된 접착제에 대한 파괴특성을 T-형 박리시험(ASTM 1876<sup>(10)</sup>)과 인장전단시험(ASTM 1002<sup>(11)</sup>)을 수행하였다. T-형 박리시험을 통해 박리응력에 대한 인장모드 파괴특성을 평가하였으며, 인장전단시험을 통해 전단모드 파괴특성을 평가하였다. 시험편의 치수는 ASTM 규격과 동일하게 제작하였으며, 시험편 소재는 알루미늄 포일 접착강판의 원소재인 GI 강판을 사용하였다.

Lee 등<sup>(12)</sup>은 접착구조물에 대한 파괴특성을 CZM 을 활용하였으며, 파괴특성은 임계응력과 파괴인성을 변화시켜 T-형 박리시험과 인장전단시험에서 나타나는 하중-변위선도를 잘 모사하는 값들로 결정하였다. 본 연구에서는 이와 동일한 방법을 사용하여 파괴특성을 결정하였다.

Fig. 8 은 T-형 박리시험편과 T-형 박리시험에서의 하중-변위선도를 나타낸 것이다. T-형 박리시험에서 박리하중은 초기 최대 하중까지 증가 후 접착제의 파괴가 안정화되면서 일정한 값을 나타내었다. T-형 박리시험편의 최대하중은 102.6 N 이며, 박리하중은 2 N/mm 나타났다. 실험과 동일한 조건에 유한요소해석을 수행한 결과, 임계응력 10.2 MPa, 파괴인성 0.48 kJ/mm<sup>2</sup> 의 조건에서 T-형 박리시험의 하중-변위선도를 잘 모사하는 것으로 나타났으며, 이 값을 알루미늄 포일 접착강판의 인장모드 계면특성으로 결정하였다.

Fig. 9 는 인장전단 시험편과 인장전단 시험에서의 하중-변위선도를 나타낸 것이다. 인장전단 시험에서 파괴하중은 약 2,482 N 으로 나타났다. 또한 인장전단 시험조건과 동일한 조건으로 유한요소해석을 수행하여 계면의 전단모드 파괴특성을 결정하였다. 임계응력 8.2 MPa, 파괴인성 0.79 kJ/mm<sup>2</sup> 의



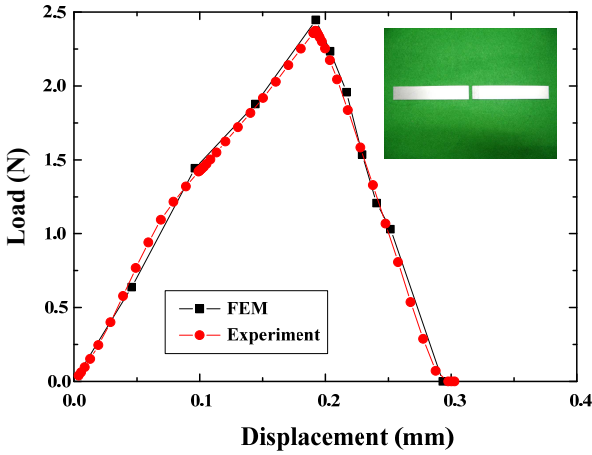
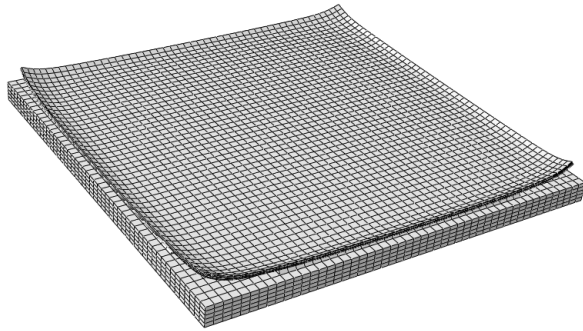
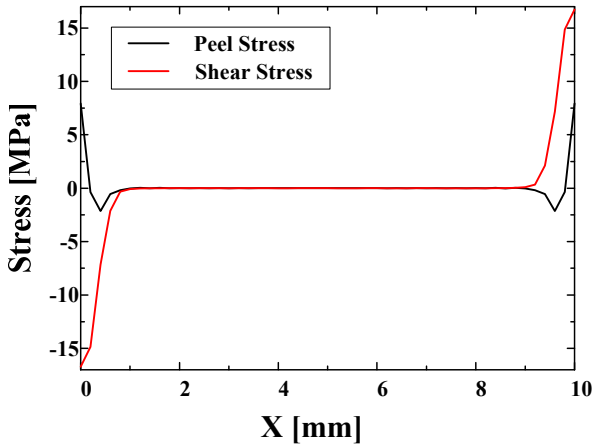


Fig. 9 Load-displacement curve in single lap shear test



(a) Delamination of aluminum foil in FE-analysis



(b) Peel and shear stress distribution at interface

Fig. 10 Result of FE-analysis with CZM for delamination of aluminum foil laminated sheet

조건에서 인장전단시험의 하중-변위선도를 잘 모사하는 것으로 나타났다.

4.2 알루미늄 포일 접착강판의 박리한계 평가

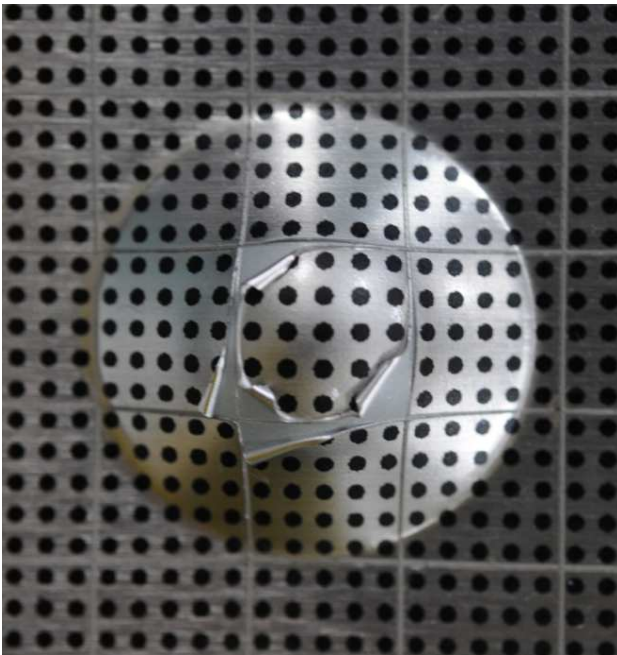
T-형 박리시험과 인장전단시험을 통해 평가된 계면파괴특성을 활용하여 이축인장 변형시 알루미늄 포일 접착강판의 박리한계를 평가하였다.

Fig. 10(a)는 유한요소해석을 통해 이축인장변형에서 알루미늄 포일 접착강판의 박리현상을 모사한 것이다. 유한요소해석은 상용해석 s/w 인 ABAQUS 6.9를 사용하여 수행하였다. 모재의 변형률이 증가함에 따라 알루미늄 포일의 끝단부에서 박리가 시작되어 중심부로 진행되었다. 박리변형률은 계면을 나타내는 접착요소(cohesive element)가 최초로 파괴되는 시점에서의 모재 변형률로 결정하였으며, 그 값은 0.153 으로 나타났다. Fig. 5(a)에 나타낸 것과 같이, 코팅층에 작용하는 굽힘응력에 의해 박리된 알루미늄 포일의 굽힘현상이 나타났다. Fig. 10(b)는 계면에 작용하는 박리응력 및 전단응력을 나타낸 것이다. 코팅층의 양끝단부에서 발생하는 박리응력은 양의 값을 가지는 것으로 나타났으며, 이로 인해 이축인장모드에서 알루미늄 포일의 박리가 빨리 발생한다. 전단응력은 박리응력보다 크게 나타났으며, 이는 계면에서 발생하는 전단응력이 알루미늄 접착강판의 박리에 주요 원인을 의미한다.

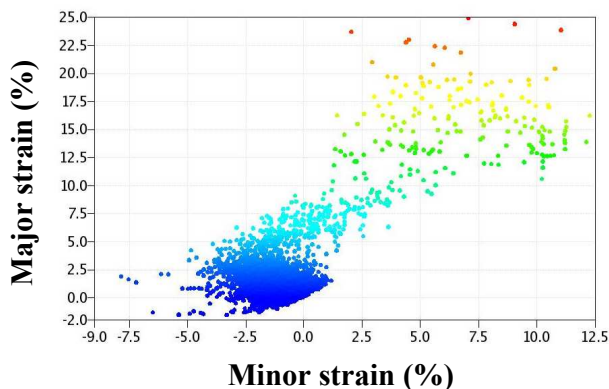
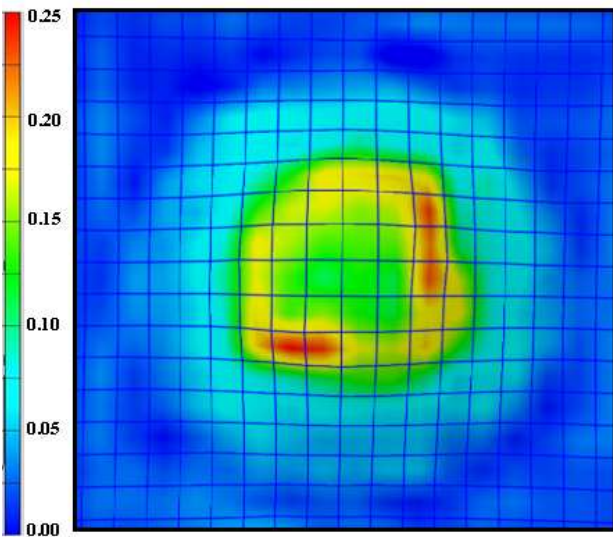
유한요소해석에 평가된 알루미늄 포일 접착강판의 박리변형률을 검증하기 위해 에릭슨 시험을 수행하였다. 알루미늄 포일의 박리변형률을 평가하기 위해 에릭슨 시험후 알루미늄 포일 접착강판의 변형률을 ARGUS 장비를 사용하여 평가하였다. 알루미늄 포일 접착강판의 표면에 직경 2 mm의 점을 마킹한 후 에릭슨 시험 후 변형된 점들의 직경변화를 측정하여 변형률을 측정하였다. 알루미늄 포일 접착강판의 박리현상을 나타내기 위해 유한요소해석과 동일한 크기인 10×10 mm 크로스해칭을 적용한 시험편을 사용하였다.

Fig. 11(a)는 알루미늄 포일 접착강판에 대한 에릭슨 시험결과를 나타낸 것이다. 에릭슨 시험결과, 모재의 파단 이전에 알루미늄 포일의 박리가 먼저 발생하였다. 이는 알루미늄 포일 접착강판의 스트레치 성형성을 평가하기 위해서는 접착강판의 박리한계를 우선적으로 평가해야 됨을 의미한다. 알루미늄 포일 접착강판의 성형높이 8.2 mm에서 발생하였으며, 유한요소해석에서 나타난 것과 같이 알루미늄 포일의 굽힘이 발생하였다.

Fig. 11(b)는 에릭슨 시험 후 알루미늄 포일 접착강판의 변형률을 측정된 결과이다. 박리부의 변형률 상태는 주변형률 및 부분변형률은 모두 동일한 양의 값을 가지는 등이축인장모드에 가까운 상태를 나타내었다. 또한 박리부의 한계변형률은 알루미늄 포일의 박리 발생부와 가까운 점들의 변형률의 평균으로 평가하였으며, 그 값은 0.165 ±0.017로 나타났다.



(a) Delamination of aluminum foil in experiment



(b) Strain distribution of aluminum foil laminated sheet

Fig. 11 Delamination of aluminum foil laminated sheet and its strain distribution after Erichsen test

유한요소해석에서 평가된 박리변형률보다 에릭슨 시험에 크게 평가되었으나, 이는 박리가 육안으로 관찰할 수 있을 정도로 진행되어야 알루미늄 포일 접착강판의 박리 발생여부를 판단할 수 있기 때문이다. 그러나, 유한요소해석에서의 박리변형률은 에릭슨 시험결과와 비교하여 약 7.8%의 오차내에서 예측되었으며, 실험결과와 비교하여 낮은 박리변형률을 나타내기 때문에 알루미늄 포일 접착강판의 박리한계로서 사용가능할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

유한요소해석을 통해 등이축인장 변형시 알루미늄 포일 접착강판의 박리한계를 예측하였다. 박리한계를 예측하기 위해 계면접착력과 박리한계의 관계를 분석하고, 에릭슨 시험을 통해 유한요소해석을 통해 예측된 박리변형률을 검증하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 알루미늄 포일 접착강판의 박리는 계면에서 발생하는 박리응력과 전단응력에 발생하며, 박리한계는 계면과파괴특성에 의존한다. 특히, 전단응력은 알루미늄 포일의 접착강판의 박리에 가장 큰 영향을 미치는 원인이며, 전단모드 계면과파괴특성에 선형적으로 비례한다. 인장모드 계면과파괴특성의 경우, 일정한 값 이상에서는 박리에 영향을 미치지 않으며, 이는 전단응력에 의한 계면과파괴가 먼저 발생하기 때문이다.

(2) 알루미늄 포일 접착강판의 계면과파괴특성을 T형 박리시험과 인장전단시험을 통해 평가하였다. 그 결과, 인장모드 임계응력 10.2 MPa, 파괴인성 0.48 kJ/mm<sup>2</sup>, 전단모드 임계응력 8.2 MPa, 파괴인성 0.79 kJ/mm<sup>2</sup>으로 나타났다. 계면과파괴특성을 알루미늄 포일 접착강판에 적용하여 등이축변형 모드에 대한 박리한계를 평가한 결과, 주변형률 0.153에서 박리가 발생하는 것으로 예측되었다.

(3) 유한요소해석을 통해 예측된 박리변형률을 검증하기 위해 에릭슨 시험을 수행 후 박리 발생부의 변형률을 측정하였다. 그 결과, 박리변형률은 0.165 ± 0.017로 나타났으며, 이는 유한요소해석결과와 비교하여 약 7.8%의 오차를 나타내었다. 에릭슨 시험에서 평가된 박리변형률보다 유한요소해석에서의 예측치가 낮게 나타났으며, 이는 박리한계를 규명하는데 있어 박리가 발생하지 않는 보다 안전한 성형영역을 예측하므로 알루미늄 포일 접착강판의 박리한계로서 사용가능하다.

### 후 기

이 논문은 한국연구재단을 통해 교육과학기술부

의 해외우수연구기관유치사업 및 선도연구센터 육성사업(NCRC)과 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과이며, 실험에 협조해 주신 ㈜LG 전자 관계자분들께 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) Kim, D.H. and Kim, B.M., 2001, "Formability of Non-Vinyl Pre-coated Metal Sheet," *J.of KSPE*, Vol. 18, No. 4, pp. 123~128.
- (2) Kim, C.W., Song, S.H. and Oh, D.J., 2004, "Development of the Delamination Evaluation Parameters(I) - The Delamination Aspect Ratio and the Delamination Shape Factors," *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 18, No. 11, pp. 1932~1940.
- (3) van den Bosch, M.J., Schreurs, P.J.G. and Geers, M.G.D., 2009, "On the Prediction of Delamination During Deep-Drawing of Polymer Coated Metal Sheet," *J. Mater. Proces. Technol.*, Vol. 209, pp.297~302
- (4) Vayeda, R. and Wang, J., 2007, "Adhesion of Coating to Sheet Metal Under Plastic Deformation," *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 27, pp. 480~492.
- (5) Chang, T., Sproat, E.A., Lai, Y.H., Shephard, N.E. and Dillard, D.A., 1997, "A Test Method for Accelerated Humidity Conditioning and Estimation of Adhesive Bond Durability," *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 60, pp. 153~162.
- (6) Dillard, D.A., Chen, B., Chang, T. and Lai, Y.H., 1999, "Analysis of the Notched Coating Adhesion Test," *Int. J. Adhes. Adhes.*, Vol. 69, pp. 99~120.
- (7) Choi, S.H., Ha, S.Y. and Kim, K.T., 2009, "Analysis for Fracture Characteristics of Porous Materials by Using Cohesive Zone Model," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 33, No. 6, pp.552~559.
- (8) Lee, S.C. and Kim, K.T., 2008, "Deformation of the Rubber Mold by Using the Cohesive Zone Model under Cold Isostatic Pressing," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 32, No. 5, pp. 387~395.
- (9) Benzeggagh, M.L. and Kenane, M., 1996, "Measurement of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Epoxy Composites with Mixed-Mode Bending Apparatus," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 56, pp. 439~449.
- (10) ASTM D1876, 2002, *Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesive*, American Society for Testing and Materials.
- (11) ASTM D1002, 2002, *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading*, American Society for Testing and Materials.
- (12) Lee, C.J., Lee, S.K., Ko, D.C. and Kim, B.M., 2009, Evaluation of Adhesive Properties Using Cohesive Zone Model : Mode I, *Trans. of KSME(A)*, Vol. 33, No. 5, pp. 474~481.