

# 접착영역모델을 이용한 클린칭 접합부의 해석 모델 설계 및 적용

황빛나<sup>1</sup> · 이찬주<sup>1</sup> · 이선봉<sup>2</sup> · 김병민<sup>#</sup>

## Analysis and Application of Mechanical Clinched Joint Using Cohesive Zone Model

B. N. Hwang, C. J. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim

(Received February 3, 2010 / Revised March 11, 2010 / Accepted March 19, 2010)

### Abstract

The objective of this study is to propose the FE model for mechanical clinched joint using cohesive zone model to analyze its failure behavior under impact loading. Cohesive zone model (CZM) is two-parameter failure criteria approach, which could describe the failure behavior of joint using critical stress and fracture toughness. In this study, the relationship between failure behavior of mechanical clinched joint and fracture parameters is investigated by FE analysis with CZM. Using this relationship, the critical stress and fracture toughness for tensile and shear mode are determined by H-type tensile test and lap shear test, which were made of 5052 aluminum alloy. The fracture parameters were applied to the top-hat impact test to evaluate the crashworthiness. Compared penetration depth and energy absorption at the point where 50% of total displacement in result of FE analysis and experiment test for impact test, those has shown similar crashworthiness.

**Key Words** : Clinching, Cohesive Zone Model, Cohesive Element, Finite Element Method, Crash Box, Impact Test

### 1. 서 론

접합기술은 제품생산기술에 있어 중요한 요소 기술 중 하나이며, 접합부의 특성을 반영하기 위한 다양한 유한요소 해석기법이 개발되었다. 특히 자동차 차체 구조물의 경우, 충돌성능을 분석하기 위해 보다 정확한 유한요소 해석이 요구되고 있다. 자동차 차체 구조물에 주로 사용되고 있는 저항 점용접(resistance spot weld)의 경우, 산업계에서는 일반적으로 충돌시험 시 용접부의 파단이 없는 점과 해석시간을 고려하여 용접부 절점을 연결하는 강체요소(node to node)를 주로 채택하여 사용하고 있다[1].

최근의 차체 경량화 추세를 위해 기존 냉연-강

관 대신 저비중의 알루미늄 관재의 사용이 증가됨에 따라 저항 점용접 공정을 대체 할 수 있는 기계적 접합기술의 적용이 확대되고 있다. 클린칭(Clinching) 접합공정은 경량고속 접합기술의 하나로 박판소재를 편치와 금형으로 가압하여 국부적인 소성변형을 발생시켜 기하학적으로 구속하는 접합방법이다[2]. 이 경우 기하학적 구속에 의해 접합강도가 결정되므로 점용접과는 달리 접합부의 높은 변형을 수반하는 충돌시험에서 접합부의 파단이 발생하기 때문에 접합부의 파단을 고려한 접합부 해석기법이 요구된다.

Yujiang Xiang 등[3]은 다양한 접합모델을 사용하여 저항 점용접에 대해 분석하였다. 그 결과, 강체 바디모델(rigid body model)이 저항 점용접을 가

1. 부산대학교 정밀기계공학과

2. 계명대학교 기계자동차공학부

# 교신저자: 부산대학교 기계공학부, E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

장 잘 나타내는 것으로 평가하였으나 접합부의 파단을 수반하는 클린칭 접합에 적용하기에는 적합하지 않다. R. Porcaro 등[4]은 셀프 피어싱 리벳 (self piercing rivet, SPR) 접합에 대해 정확한 접합부 특성을 평가하기 위해 종래의 접합모델과는 달리 실제 접합점에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 이러한 연구결과는 접합부에 대한 변형 및 파단 거동을 잘 나타내지만, 접합수가 많은 실제 품에 적용하기에는 한계가 있다.

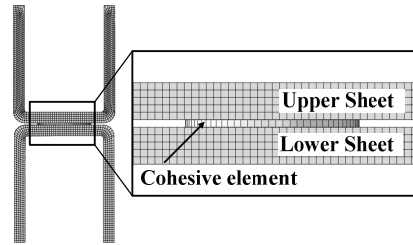
본 연구에서는 접착영역모델(cohesive zone model, CZM)을 사용하여 클린칭 접합부의 변형 및 파단 거동을 해석하였다. CZM에 요구되는 접합부 물성치인 파괴인성  $G_C$  와 임계응력  $\sigma_{max}$  는 H형 인장시험(H-type tensile test) 및 인장전단시험(single lap shear test)을 통해 평가하였다. 또한 CZM을 클린칭 다점접합이 사용되는 실제품에 Top-hat 타입의 충돌시험편에 대한 충돌해석을 수행하였다. 그 결과를 실제 충돌시험 결과와 비교하여 본 연구에서 제시한 CZM을 이용한 클린칭 접합부 해석 기법의 타당성을 검증하였다.

## 2. CZM 기반 클린칭 접합모델

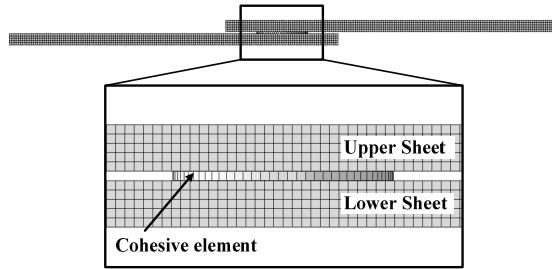
### 2.1 Cohesive Zone Model

CZM은 두 개의 파괴역학 인자인 파괴인성  $G_C$  (fracture toughness)와 균열선단부의 임계응력  $\sigma_{max}$  (critical stress for crack tip region)를 사용하여 균열부의 파괴거동을 해석한다. Hillerborg et al.[5]와 Blackman et al.[6] 등에 의하면, 균열선단의 응력이  $\sigma_{max}$  에 도달하게 되면 파괴가 시작되는 데미지(damage) 시작점을 의미한다.  $\sigma < \sigma_{max}$  일 경우에는 탄성상태와 같이 하중 제거 시 회복이 가능하며,  $\sigma > \sigma_{max}$  일 경우에는 더 이상 변형부의 응력이 증가하지 못하고, 균열이 발생하는 변위  $\delta_C$  에 도달하여 응력이 0이 될 때까지 감소하며, 이때 소요되는 에너지가  $G_C$  이다.

본 연구에서는 상용해석 s/w인 ABAQUS에서 지원하는 접착요소(cohesive element)를 활용하여 Fig. 1과 같이 인장 및 전단 모드에 대한 클린칭 접합을 해석하였다. 먼저 CZM의 파괴거동을 나타내는 파괴인자인  $\sigma_{max}$  와  $G_C$  및 탄성계수 E의 영향도를 파악하기 위해 Table1과 같이 Case1을 기준으로 각 인자들의 값에 변화를 준 4가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. 각 경우에 대한 해석 결과는 Fig. 2에서 제시하였다. 각 경우를 비교



(a) Tensile mode (H-type tensile test)



(b) Shear mode (Lap shear test)

Fig. 1 FE model with CZM for mechanical clinching

Table 1 Case of variable of cohesive element

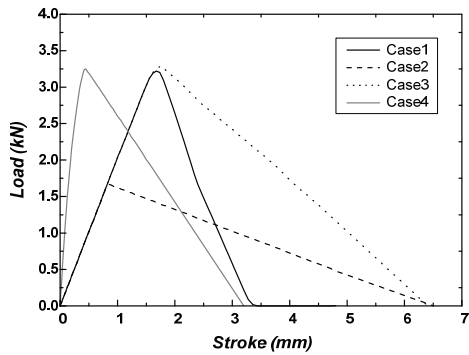
	$\sigma_{max}$		$G_C$		E	
	Normal	Shear	Normal	Shear	Normal	Shear
Case1	29.59	35.40	47.21	54.85	22	100
Case2	14.80	17.70	47.21	54.85	22	100
Case3	29.59	35.40	94.42	109.7	22	100
Case4	29.59	35.40	47.21	54.85	2200	10000

해 본 결과,  $\sigma_{max}$  의 변화에 따라 접합부의 최대 하중이 결정되며,  $G_C$  의 변화에 따라 접합부의 파괴변위가 결정됨을 알 수 있다. 이러한  $\sigma_{max}$  와  $G_C$  의 영향은 하중모드에 관계없이 인장(Fig. 1(a))과 전단(Fig. 1(b)) 모드에서 동일한 경향을 나타내었다. 클린칭 접합의 파괴거동을 나타내기 위한  $\sigma_{max}$  와  $G_C$  는 식 (1)과 (2)와 같이 계산된다.

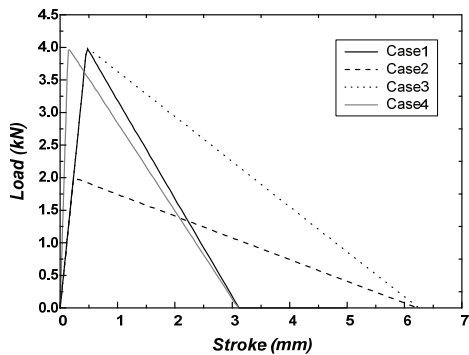
$$(\sigma_{max})_i = (F_{max})_i / A \quad (1)$$

$$G_C)_i = \int_0^{\delta_c} \frac{F_i}{A} d\delta \quad (2)$$

여기서, F는 접합부의 파괴하중을 의미하며, i는 접합부에 작용하는 하중모드이다. A는 클린칭 접합부의 투영면적이다. 또한 탄성계수 E는 접합부의 초기 변형의 기울기와 같다.



(a) Result of H-type tensile test in FEM



(b) Result of single lap-shear test in FEM

Fig. 2 Fracture load of clinching by  $\sigma_{max}$  and  $G_C$

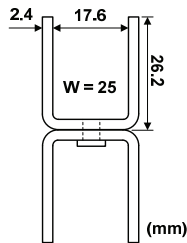


Fig. 3 Configuration of H-type tensile test specimen

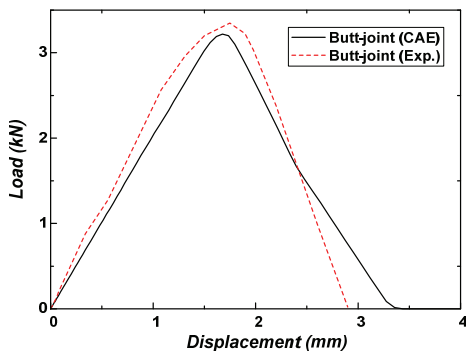


Fig. 4 Load-displacement curve of H-type tensile test

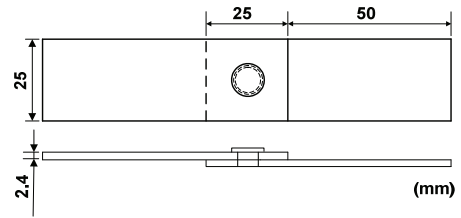


Fig. 5 Configuration of single lap-shear test specimen

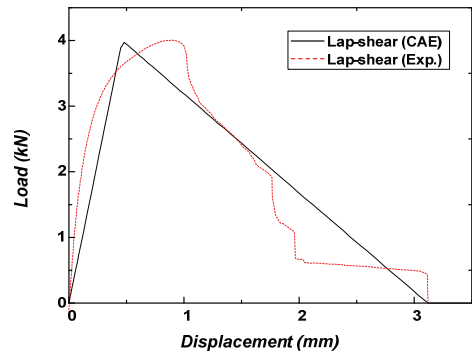


Fig. 6 Load-displacement curve of single lap-shear test

### 2.2 인장모드 물성평가

인장모드에 대한 클린칭 접합의 파괴거동을 평가하기 위해 H형 인장시험을 수행하였으며, 시험편 규격은 Fig. 3에 나타내었다. 접합소재는 2.4mm의 두께를 가지는 Al5052 합금소재를 사용하였으며, 클린칭 접합의 직경은 12mm이며, 클린칭 접합부 면적은 113.10mm<sup>2</sup>이다. H형 인장시험에 대한 실험 결과, Fig. 4에 나타낸 것과 같이 최대접합강도는 3,633N, 파괴에너지는 5,590J으로 측정되었고, 식 (1)과 (2)에 의해 계산된 클린칭 접합부의 인장모드에 대한 CZM 물성치는  $\sigma_{max} = 29.59\text{MPa}$ ,  $G_C = 47.21\text{MPa}$ ,  $E = 22\text{GPa}$ 이다.

Fig. 1(a)에 나타낸 것과 같이 계산된 CZM 물성치를 이용하여 H형 인장시험과 동일한 조건에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 결과, 최대접합강도는 3,220kN, 파괴에너지는 5,429J로 확인되었으며, Fig. 4에 나타낸 것과 같이 실험결과와 유사한 하중-변위 곡선을 나타내었다.

### 2.3 전단모드 물성평가

전단모드에 대한 클린칭 접합의 파괴거동을 평가하기 위해 인장전단시험을 수행하였으며, 시험

편 규격은 Fig. 5에 나타내었다. 실험 결과, Fig. 6에 나타낸 것과 같이 최대접합강도는 4,004N, 파괴에너지는 6,204J으로 측정되었고, 식 (1)과 (2)에 의해 계산된 클린칭 접합부의 전단모드에 대한 CZM 물성치는  $\sigma_{max} = 35.40\text{MPa}$ ,  $G_C = 54.85\text{MPa}$ ,  $E=100\text{GPa}$ 이다.

Fig. 1(b)에 나타낸 것과 같이 계산된 CZM 물성치를 이용하여 인장전단시험과 동일한 조건에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 결과, 최대접합강도는 3,970kN, 파괴에너지는 6,221J로 확인되었으며, Fig. 6에 나타낸 것과 같이 실험결과와 유사한 하중-변위 곡선을 나타내었다.

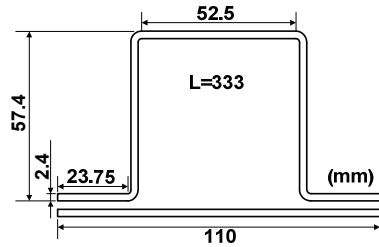
### 3. 클린칭 다점 접합모델

#### 3.1 클린칭 다점 접합의 유한요소 충돌해석

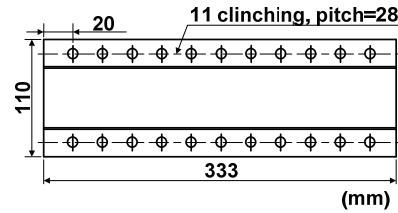
실제 차체 구조물은 다수의 클린칭 접합이 적용되기 때문에 다점 접합모델에 대한 타당성이 요구된다. 본 연구에서 제안한 CZM 기반 클린칭 접합모델의 다점 접합구조물에 대한 타당성을 검증하기 위해 클린칭 접합이 다수 사용된 Top-hat 타입의 충돌시험편에 적용하였다.

충돌시험편은 Fig. 7(a)와 같이 단면이 모자 형태로 제작된 판재에 평판을 갖다 대어 접합한 Top-hat 타입[7]으로 제작하였다. 또한 Fig. 7(b)에 나타낸 것과 같이 플랜지부 양 끝단 20mm의 위치에서 시작하여 28mm의 피치(pitch)를 가지도록 11점의 다점접합을 수행하였다[8]. 접합소재는 CZM 파괴물성을 평가하기 위해 사용된 소재와 동일한 A15052 합금소재를 사용하였다. 일반적으로 알루미늄 합금소재는 상온에서 변형률속도(strain rate)에 대해 큰 차이가 없는 것으로 알려져 있다[9]. 따라서 본 연구에서는 충돌해석 시 변형률 속도에 대한 A15052 합금소재의 소성변형거동의 변화는 고려하지 않았다.

충돌해석 조건은 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 질량이 200kg인 충돌체에 초기속도 5.48m/s를 부여하여, 총 3,000J의 충돌에너지를 부과하는 충돌해석을 수행하였다. 클린칭 접합부의 물성치는 CMZ 기반 클린칭 접합모델에서 평가된 인장 및 전단모드 CZM 물성을 적용하였다. 또한 충돌해석은 상용해석 s/w인 ABAQUS를 사용하였다. 클린칭 접합의 충돌성능은 충돌 후 시험편의 압입깊이, 최대하중 및 총 압입깊이의 50% 지점에서의 충돌에너지를 평가하였다. 충돌해석에서 평가된 11점



(a) Cross-section of the top-hat type specimen



(b) Top view of the top-hat specimen

Fig. 7 Dimensions of the top-hat specimen

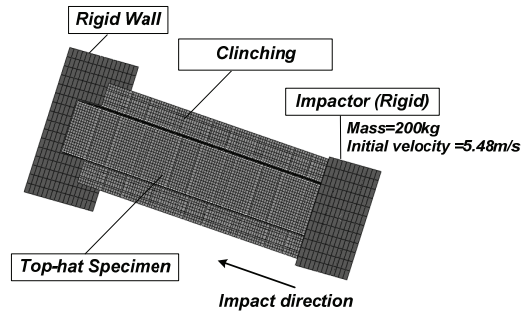


Fig. 8 FE model for impact simulation

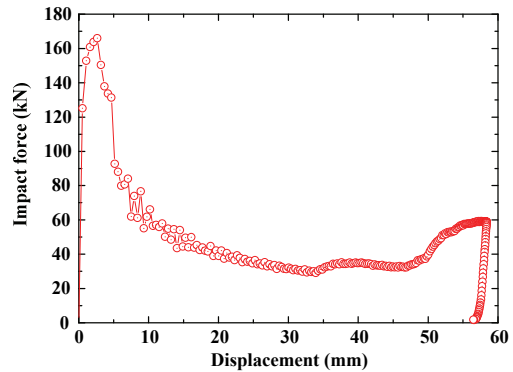


Fig. 9 Result of impact simulation with 11-points of mechanical clinched joint

클린칭 접합 충돌시험편의 하중-변위 곡선을 Fig. 9에 나타내었다.

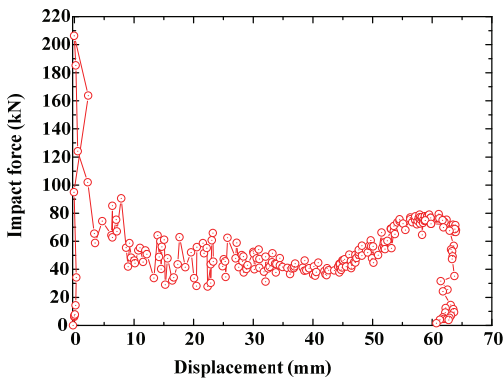
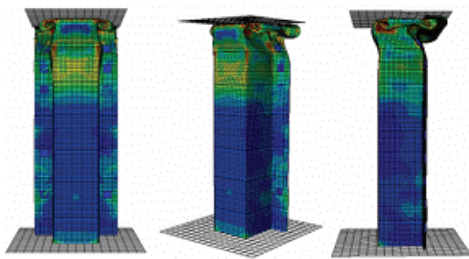
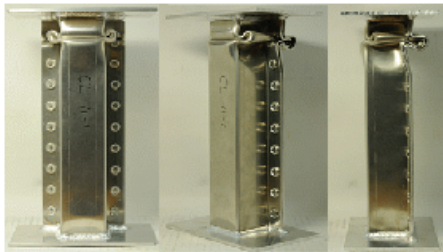


Fig.10 Result of impact test with 11-points of mechanical clinched joint



(a) Shape of impact specimen in FEM



(b) Shape of impact specimen in experiment

Fig.11 Comparison of FE analysis and experiment

충돌해석 결과, 압입깊이가 58.66mm, 최대 하중이 171.95kN으로 나타났다. 또한 충돌에너지 흡수능을 평가하기 위해 총 압입깊이의 50% 수준인 압입깊이 30mm에서의 충돌에너지 흡수량을 평가한 결과, 1,879kJ의 에너지를 흡수하는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2 클린칭 다점 접합모델 타당성 검증

충돌해석조건과 동일한 Top-hat 타입 충돌시험편을 제작하여 충돌시험을 수행하였다. 11점의 클

린칭 접합은 인장 및 전단모드 실험과 동일한 12mm의 클린칭 금형을 사용하였다. 충돌시험편의 고정단과 충돌부에서는 7mm 두께의 A15052 합금 소재를 미그(MIG)용접하여 충돌 시 충돌에너지가 원활히 전달되도록 하였다.

충돌시험은 충돌해석과 동일한 조건인 3,000J의 에너지를 부과하여 수행하였으며, 결과를 통해 얻어진 하중-변위곡선을 Fig. 10에 나타내었다. 충돌시험 결과, 압입깊이는 62.97mm, 최대하중은 189.60kN으로 평가되었으며, 유한요소 해석과 같이 동일한 압입깊이 30mm에서의 충돌에너지 흡수량은 1,772kJ의 에너지가 흡수된 것으로 확인되었다. 충돌해석 결과와 비교한 결과, CZM 기반 클린칭 다점 접합모델은 최대 9.3%의 오차 내에서 충돌시험 결과와 유사한 충돌성능을 평가할 수 있는 것으로 평가되었다.

Fig. 11에 충돌 후 시험편의 변형형상을 나타내었다. 충돌해석(Fig. 10(a))과 충돌시험(Fig. 10(b))에서 시험편의 변형이 충돌부에 집중되는 것으로 나타났다. 그러나 충돌해석에서는 시험편의 변형이 충돌 시작점보다 약 5mm 아래에서 변형이 시작되었다. 이것은 충돌시험편의 용접부에 의해 시험편의 변형이 억제되기 때문에 발생한 오차로 판단된다. 또한 이러한 시험편의 변형양상의 차이로 인해 압입깊이를 비롯하여 최대하중, 충돌에너지 흡수량 등의 오차의 발생이 영향을 받는다.

## 4. 클린칭 접합모델을 이용한 설계

CZM 기반 클린칭 다점 접합모델을 이용하여 충돌시험편에 대한 설계를 수행하였다. Lee 등[8]에 의하면 SPR은 알루미늄 합금과 같은 경량금속의 접합에 널리 사용되고 있는 접합방법이며, 클린칭 접합을 이용하여 SPR과 유사한 충돌성능의 시험편을 제작하였다. 본 연구에서는 8점의 SPR 접합을 적용한 충돌시험편과 동일한 충돌성능을 가지도록 클린칭 접합 충돌시험편을 설계하였다. 비교대상인 SPR 8점을 적용한 충돌시험편의 실험 결과는 최대하중 189.63kN, 압입깊이 53.125mm이다. 압입깊이 30mm 지점에서의 충돌에너지 흡수량은 1849.79J이다.

Fig. 12는 충돌해석을 통해 클린칭 접합수에 따른 Top-hat 타입 시험편의 충돌하중의 변화를 나타낸 것이다. 클린칭 접합수가 증가함에 따라 최대하중은 거의 변화가 없는 것으로 나타난 반면,



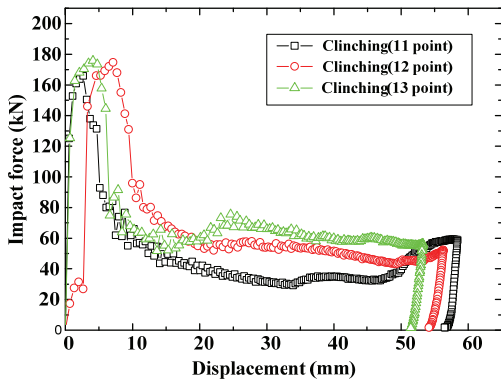


Fig.12 Result of FE analysis for multi-point clinching

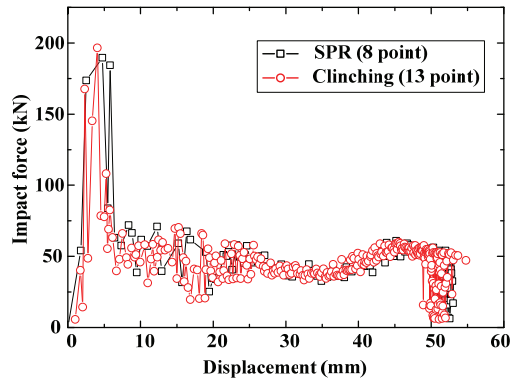
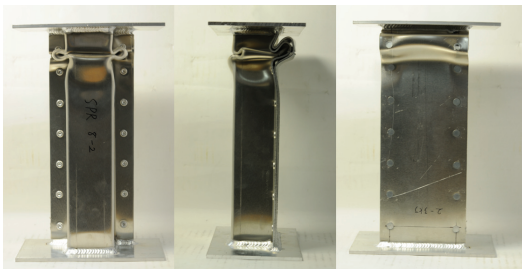
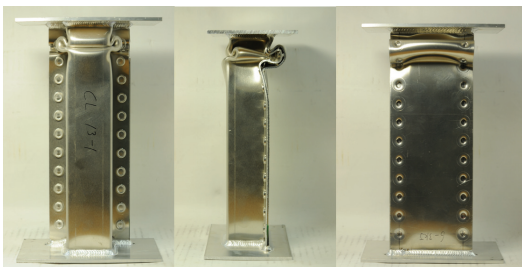


Fig.14 Result of impact test with SPR 8-points and clinching 13-points



(a) Impact specimen with SPR 8 points



(b) Impact specimen with clinching 13 points

Fig.13 Result of impact test

압입깊이는 감소하였고, 클린칭 접합수 13점을 적용한 시험편에서 압입깊이는 52.258mm로 평가되었다. 이것은 접합수가 증가함에 따라 충돌에너지 흡수량이 증가함을 의미하며, SPR 8점을 적용한 시험편의 실험결과와 유사한 충돌성능을 가지는 것으로 평가되었다.

충돌해석 결과를 바탕으로 클린칭 접합 13점을 적용한 시험편을 제작하여 충돌시험을 수행하여 SPR 시험편과 비교하였다. Fig. 13은 충돌 후 시험편의 변형형상을 비교한 결과이다. 클린칭 접합

13점을 적용한 시험편과 SPR 8점을 적용한 시험편의 시험편의 변형이 매우 유사함을 확인하였으며, 두 시험편은 유사한 충돌성능을 가진 것으로 판단된다.

두 시험편의 충돌성능을 정량적으로 비교하기 위해 Fig.14에 나타낸 것과 같이 SPR 8점과 클린칭 접합 13점을 적용한 충돌시험편의 충돌성능을 비교하였다. 최대하중은 클린칭 시험편이 196.56 kN으로 높게 평가되었으나, 최대하중 이후의 하중 변화는 서로 유사한 것으로 나타났다. 압입깊이는 54.781mm로 나타났으며, 압입깊이 30mm 지점에서 충돌에너지 흡수량은 1793.54 J로 평가되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 CZM을 활용하여 클린칭 접합부를 해석하였다. 또한 제안된 CZM 기반 클린칭 접합모델을 활용하여 클린칭 다점 접합을 적용한 충돌시험편을 설계하여 타당성을 제시하였으며, SPR 적용 시험편과 비교평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) H형 인장시험과 인장전단시험을 통해 CZM의 클린칭 접합부의 인장 및 전단모드의 파괴거동을 평가하였다. 이를 통해 CZM의 특성을 결정하는 파괴인자인 클린칭 접합부 파괴 시 최대하중을 결정하는 임계응력과 접합부가 흡수하는 에너지를 결정하는 파괴인성이 결정된다.

(2) 실제품 적용을 위해 CZM기반 클린칭 접합모델을 활용하여 다점 클린칭 접합이 적용된 Top-hat 충돌시험편을 해석하고, 실험결과와 비교하여 9.3%이내의 오차범위에서 유사한 결과를 얻을 수

있었다. 이를 통해 제안된 CZM기반 클린칭 접합 모델의 실제품 적용이 타당함을 확인하였다.

(3) CZM기반 클린칭 접합모델을 활용하여 클린칭 접합 충돌시험편의 충돌성능이 SPR을 8점 적용 시험편과 동일한 충돌성능을 가지도록 설계하였다. 충돌해석결과, 클린칭 접합 13점 적용 시 SPR 적용 시험편과 유사한 성능을 가지는 것으로 평가되었다. 충돌시험결과 유한요소 해석과 유사한 변형형상을 얻을 수 있었으며, 최대 3.5% 오차 범위에서 유사한 충돌성능을 나타내었다.

## 후 기

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2006-K2060100000 4-09E0100-00410)을 받아 수행된 연구임

## 참 고 문 헌

- [1] A. Rusinek, R. Zaera, P. Forquin, J. R. Klepaczko, 2008, Effect of plastic deformation and boundary conditions combined with elastic wave propagation on the collapse site of a crash box, *Thin-walled Struct.*, Vol. 46, pp. 1143~1163.
- [2] J. Y. Kim, C. J. Lee, S. K. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim, 2009, Effect of Shape Parameters of Tool on Improvement of Joining Strength in Clinching, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 18, No. 5, pp. 392~400.
- [3] Yujiang Xiang, Qian Wang, Zijie Fan, Hongbing Fang, 2008, Optimal crashworthiness design of a spot-welded thin-walled hat section, *Finite Elem. Anal. Des.*, Vol. 42, pp. 846~855.
- [4] R. Porcaro, M. Langseth, S. Weyer, H. Hooputra, 2008, An experimental and numerical investigation on self-piercing riveting, *Int. J. Mater. Form.*, Vol. 1, pp. 1307~1310.
- [5] A. Hillerborg, M. Mod er, P.-E. Petersson, 1976, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 6, pp. 773~782.
- [6] B. R. K. Blackman, H. Hadavinia, A. J. Kinloch, J. G. Williams, 2003, The use of a cohesive zone model to study the fracture of fibre composites and adhesively-bonded joint, *Int. J. Fract.*, Vol. 119, pp. 25~46.
- [7] J. S. Yoo, S. B. Kim, M. Y. Lee, H. Huh, 2008, Development of Al crash box for high crashworthiness enhancement, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 17, No. 3, pp. 182~188.
- [8] C. J. Lee, J. Y. Kim, S. K. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim, 2010, Design of Mech., clinching tools for joining of aluminium alloy sheets, *Mater. Des.*, Vol. 31, pp. 1854~1861.
- [9] H. S. Kim, 2002, New extruded multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency, *Thin-Walled Struct.*, Vol. 40, pp. 311~327.