

## 論文

## 기계 가공된 복합재료 키 조인트의 강도 연구

정강우\*, 박용빈\*, 최진호\*\*+, 권진희\*\*

## A Study on Strength of the Machined Composite Key Joint

Kang-Woo Jeong\*, Yong-Bin Park\*, Jin-Ho Choi\*\*+, and Jin-Hwe Kweon\*\*

## ABSTRACT

The comparison of the numerical results with those measured by the experiment showed good agreement. The design of composite joint which is the weakest part in the composite structures has become a very important research area since the composite materials are widely used in the aircraft and machine structure. In this paper, the new composite key joints that minimize the fiber discontinuity and strength degradation of adherend were proposed and their failure loads were evaluated. The failure index and damage area method were used for the failure prediction of the composite key joint. From the tests, the failure load of the composite key joint was 93% larger than that of a mechanical joint and the key joint whose slot depth and edge length were 0.88mm and 20mm had the largest failure load. Also, the analytic failure modes by the failure index and damage area were compared with experimental failure modes.

## 초 록

복합재료가 기계부품, 항공기 구조물에 폭 넓게 적용됨에 따라, 복합재료 구조물에서 가장 취약한 복합재료 체결부의 설계는 매우 중요한 연구 분야로 대두되고 있다. 본 논문에서는 기계적 체결방법의 문제점으로 발생하는 원공주위의 높은 응력집중현상을 감소시키기 위하여, 복합재료 키 조인트(composite key joint)를 제안하였고 파손강도를 평가하였다. 제안된 복합재료 키 조인트 체결부의 파손 판정을 위해서 파손지수(failure index)와 파손영역법(damage area theory)이 각각 적용되었다. 실험 결과로부터 복합재료 키 조인트는 기계적 체결부의 파손강도보다 93% 높은 값을 가짐을 볼 수 있었고, 복합재료 키 홈 깊이(key slot depth)가 0.88 mm이고 끝단 길이(edge length)가 20 mm일 때 가장 높은 파손하중 나타내었다.

**Key Words :** 복합재료 키 조인트(composite key joint), 파손모드(failure mode), 파손강도(failure strength), 파손지수(failure index), 파손영역법(damage area theory)

## 1. 서 론

복합재료는 등방성 재료에 비해 비강성, 비강도가 높은 기계적 특성으로 인해 항공기, 방산, 민간사업을 비롯한 각종 구조물에 광범위하게 사용되고 있다. 복합재료가 복잡한 기계 구조에 사용될 때는 복합재료간의 체결 또는 이종재료간

의 체결은 매우 중요하다[1]. 복합재료 구조의 체결방법은 크게 접착에 의한 방법과 기계적 체결에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 접착에 의한 체결방법은 복합재료 구조물에 원공을 가공하지 않으므로 기계적 체결방법에 비해 넓은 면적에 하중을 분포시킬 수 있다. 그러나 표면처리가 어렵고, 온도, 습도 및 주위환경에 의한 영향을 쉽게 받는다[2]. 기계적 체결

접수: 2012년 1월 26일, 수정: 2012년 4월 19일, 게재승인: 2012년 4월 19일

\* 경상대학교 기계항공공학부 대학원

\*\*+ 경상대학교 기계공학부 항공기부품기술연구소, 교신저자(E-mail:choi@gnu.ac.kr)

\*\* 경상대학교 항공우주시스템공학과 항공기부품기술연구소

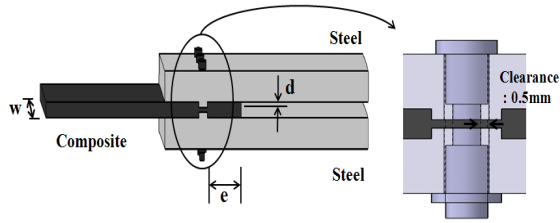


Fig. 1 Shape of a key joint.

Table 1 Dimensions of the test specimens

Specimen ID	Width (mm)	Edge length (mm)	Depth (mm)
K1	38	10	0.38
K2	38	10	0.88
K3	38	10	1.19
K4	38	20	0.38
K5	38	20	0.88
K6	38	20	1.19

방법은 피접합물에 원공을 가공한 후, 볼트나 핀 혹은 리벳을 사용하여 체결된다. 기계적 체결법은 분해가 쉽고 파손점검 및 수리가 용이하여, 접합 상태를 쉽게 확인 할 수 있는 장점이 있다[3,4]. 그러나 원공을 가공 할 때 복합재료의 섬유가 손상 되므로 체결부의 강도가 감소하는 원인이 될 수 있다[5].

따라서 본 논문에서는 원공 가공으로 인한 섬유의 손상과 체결부의 강도저하를 최소화할 수 있는 키와 키 홈 형상을 가진 새로운 복합재료 키 조인트를 제안하였고, 파손 모드와 파손 강도를 평가하였다. 서로 다른 3종류의 키 홈 깊이와 서로 다른 2종류의 끝단 길이를 가진 새로운 복합재료 키 조인트를 제작하고 실험하여 파손 강도를 비교하였다. 또한, 유한요소해석을 수행하여 키 홈 주위의 응력을 계산하였으며, 실험값과 유한요소해석 결과를 상호 비교하였다.

## 2. 시편제작 및 시험결과

키 조인트 시편은 각 변수에 따라 5개씩 총 30개의 시편을 제작하여 시험을 수행하였다. Fig. 1은 복합재료 키 조인트의 기하학적 형상을 나타내었으며, 복합재와 금속 시편의 수직방향으로 3개의 볼트를 체결하여 수직방향의 변위를 억제하였다. 볼트에 의한 기계적 체결 효과를 제거하기 위하여 볼트와 원공 사이의 간격을 0.5 mm로 고정하였다. 각 시편의 치수는 Table 1에 나타나 있다.

시편 제작에 사용된 재료는 SK 케미컬사의 USN125B 탄소/에폭시 일방향 프리프레그와 HFG사의 평직(fabric)이다. 시편의 적층 순서는  $\pm 45_3/90/\pm 45_2/0_4/90/0_4/\pm 45_2/90/\pm 45_3$ 이며, “±”는 평직층을 말한다.

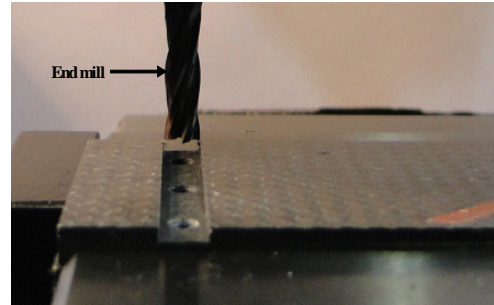


Fig. 2 Photograph of the key slot machining by the end mill.

Table 2 Material properties of SK carbon/epoxy material

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	$E_1$	131GPa
Elastic moduli in transverse directions	$E_2, E_3$	8.20GPa
Shear moduli in 1-2 and 1-3 planes	$G_{12}, G_{13}$	4.50GPa
Shear modulus in 2-3 plane	$G_{23}$	3.50GPa
Poisson's ratios	$\nu_{12}, \nu_{13}$	0.281
	$\nu_{23}$	0.470
Tensile strength in fiber-direction	$X_T$	2000MPa
Compressive strength in fiber-direction	$X_C$	1400MPa
Tensile strength in transverse direction	$Y_T$	61MPa
Compressive strength in transverse direction	$Y_C$	130MPa
Shear strengths in 1-2 and 1-3 planes	$S_{12}, S_{13}$	70MPa
Shear strength in 2-3 plane	$S_{23}$	40MPa

Table 3 Material properties of HFG carbon/epoxy fabric material

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	$E_1$	65.4GPa
Elastic modulus in transverse directions	$E_2$	65.4GPa
Shear modulus in 1-2 planes	$G_{12}$	3.59GPa
Poisson's ratios	$\nu_{12}$	0.058
Tensile strength in fiber-direction	$X_T$	959.1MPa
Compressive strength in fiber-direction	$X_C$	692.9MPa
Tensile strength in transverse direction	$Y_T$	959.1MPa
Compressive strength in transverse direction	$Y_C$	692.9MPa
Shear strength	$S$	64.9MPa

재료 물성치(material properties)는 Table 2와 Table 3에 나타내었으며[5], 시편의 키 홈은 밀링기계로 엔드밀(end mill) 공구를 이용하여 키 홈 깊이를 각각 0.38 mm, 0.88 mm, 1.19 mm로 가공하였으며, 키 홈을 가공하는 모습은 Fig. 2와 같다.

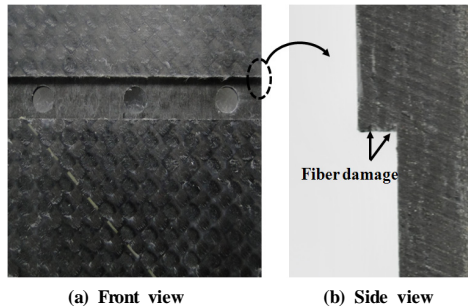


Fig. 3 Composite specimen with a machined key slot.



Fig. 4 Double lap key joint.

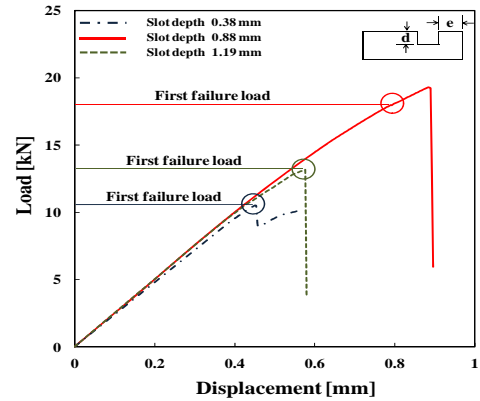
Fig. 3(a)는 가공된 복합재료 시편의 정면도이며, Fig. 3(b)는 측면도를 나타낸 사진이다. 사진에서 보는 바와 같이 시편의 끝 단 주위에서 작은 섬유 손상이 관찰되었으나, 키 홈의 직각도는 우수한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 복합재료 키 조인트 체결부의 파손하중을 평가하는 시험치구로서 이중 겹치기 이음(double lap Joint Jig)의 형상이다. 시험에 사용한 재료시험기는 Instron 5582이며, 1 mm/min의 속도로 인장시험을 수행하였다.

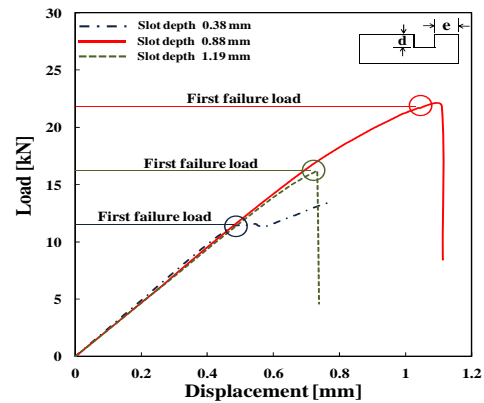
Fig. 5(a)는 복합재료 키 조인트의 끝단 거리가 10 mm일 때 전형적인 하중-변위곡선(typical load-displacement)이며, Fig. 5(b)는 복합재료 키 조인트의 끝단 거리가 20 mm일 때의 전형적인 하중-변위곡선이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 키 홈 깊이가 0.38 mm와 0.88 mm일 때는 첫 번째 파손이 발생한 후 다시 하중이 증가하여 최대 하중값을 가짐을 볼 수 있다. 또한, 키 홈 깊이가 1.19 mm일 때는 첫 번째 파손에서 전체 복합재료 키 조인트의 파손이 발생되었다. 원공내면과 볼트 사이의 접촉(contact)이 발생하면 볼트에 의하여 부가적인 하중이 전달되므로 원공내면과 볼트 사이의 접촉여부를 판단하기 위하여, 원공내면에 흰색 페인트를 도포하고 볼트에 빨간색 인주를 도포하였다.

Fig. 6은 키 홈 깊이가 0.38 mm일 때 키 조인트의 파손형상을 나타낸 사진이다. Fig. 6(a)는 첫 번째 파손하중에서의



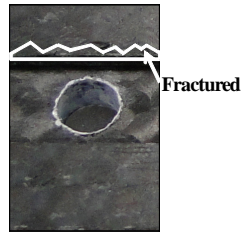
(a) Edge length = 10mm



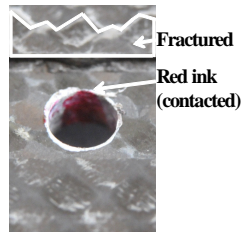
(b) Edge length = 20mm

Fig. 5 Load-displacement curves of the composite key joint whose key slot was made by machining.

파손모습으로, 키 홈의 상단부(top)에 베어링 파손이 발생되었지만, 원공내면과 볼트와의 접촉은 발생하지 않았다. Fig. 6(b)는 최대 하중에서의 파손모습으로, 빨간색 인주가 원공내면에 묻어 있으므로 볼트가 원공과 접촉되었다고 볼 수 있으며, 이로 인해 키 홈뿐만 아니라 볼트에서도 부가적인 하중이 전달되었다고 판단되어진다. 또한, 키 홈 상단부의 넓은 영역에서 급속 키와의 마찰로 인한 복합재 손상을 발견할 수 있었다. 이러한 마찰 손상은 Fig. 5의 하중-변위 곡선에서 키 홈 깊이가 0.38 mm일 때 첫 번째 파손 이후 파손 하중이 재상승하는 원인이 된 것으로 판단되어진다. Fig. 7은 키 조인트의 키 홈 깊이가 0.88 mm일 때 키 조인트의 파손형상을 나타낸 사진이다. Fig. 7(a)는 첫 번째 파손하중에서의 파손모습으로, 키 홈의 상단부에 베어링 파손과 키 홈 모서리에 크랙(crack)이 발생되었지만, 원공내면과 볼트와의 접촉은 발생하지 않았다. Fig. 7(b)는 최대 하중에서의 파손모습으로, 키 홈 상단부의 베어링 파손 및 키 홈 모서리의 전단파손이 발생

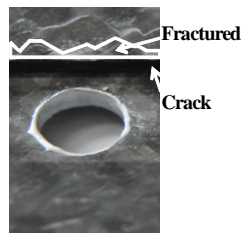


(a) First failure load

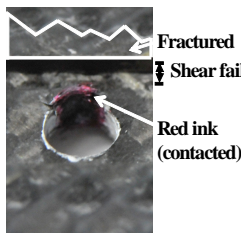


(b) Maximum failure load

Fig. 6 Fractured composite key joint whose slot depth is 0.38 mm.



(a) First failure load



(b) Maximum failure load

Fig. 7 Fractured composite key joint whose slot depth is 0.88 mm.

되었으며, 원공내면과 볼트의 접촉을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 키 조인트의 키 홈 깊이가 1.19 mm 일 때 키 조인트의 파손형상을 나타낸 사진이다. 첫 번째 파손 하중에서 키 홈 상단부의 베어링 파손, 키 홈 모서리의 전단파손, 시편 중앙부 파손 등이 동시에 관찰되었으며, 복합재의 층간 전단 분리 현상으로 전체 구조물이 일시에 파손된 것으로 보인다.

복합재료 키 조인트의 파손 하중은 원공내면과 볼트 사이의 접촉이 없는 첫 번째 파손하중으로 정의하였다.

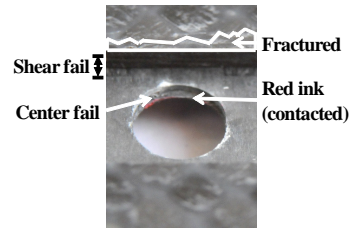


Fig. 8 Fractured composite key joint whose slot depth is 1.19 mm.

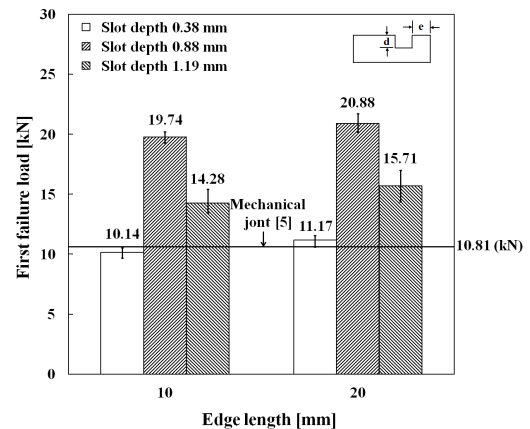


Fig. 9 Failure load of key joint.

각 모델에 대하여 5개의 시편을 제작하고 인장시험을 수행하여 산술평균값을 계산하였다. Fig. 9는 복합재료 키 조인트의 파손하중을 나타낸 그림이다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 끝단 길이가 10 mm일 때 보다 20 mm일 때 파손하중이 높은 값을 나타내었으며, 키 홈 깊이가 0.88 mm이고, 끝단 길이가 20 mm인 키 조인트의 파손 하중이 가장 높은 값을 가짐을 볼 수 있다. 또한, 키 홈 깊이가 0.88 mm인 키 조인트는 동일한 형상을 가진 기계적 조인트[5] 보다 파손하중이 약 93% 향상된 우수한 특성을 나타내었다.

### 3. 유한요소해석

복합재료 키 조인트의 응력 분포와 파손 지수를 계산하기 위해서 상용 프로그램인 ANSYS 10.0 소프트웨어를 사용하였다. Fig 10은 복합재료 키 조인트의 해석 시간을 줄이기 위하여 대칭성을 이용하여 1/2 모델링 한 그림이며, 3-D 고체요소와 접촉요소를 사용하여 비선형 해석을 수행하였다.

Fig. 11은 복합재료 키 조인트의 경계조건을 나타낸 그림으로, 키 조인트의 끝단면에 20 kN의 하중을 가하였다. 또한, 볼트의 위치와 같은 절점(node)에 Z-방향의 변위를 고정 시켰다. Tsai-Wu 파손 기준식[6]을 사용하였으며, 계산식은 다음과 같다.

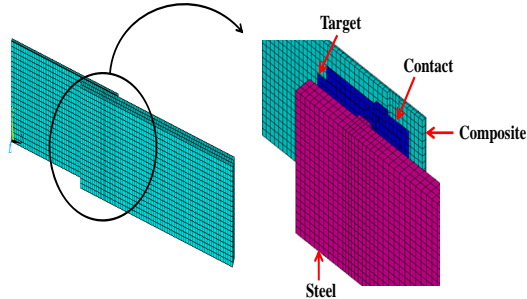


Fig. 10 A half finite element model of the composite key joint(3-D).

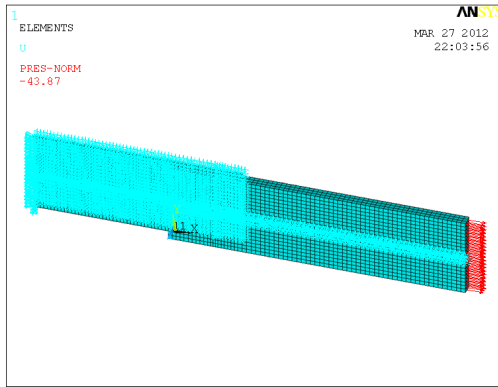


Fig. 11 Boundary condition.

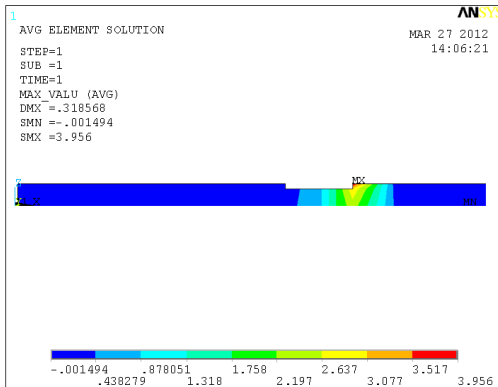


Fig. 12 Failure index when the slot depth and edge length were 0.38 mm and 10 mm.

Tsai-Wu 파손 판정식

$$F = F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}; F_2 = \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}; F_{11} = \frac{1}{X_T Y_C}$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_T Y_C}; F_{33} = 0; F_{44} = \frac{1}{R^2}; F_{55} = \frac{1}{s^2}$$

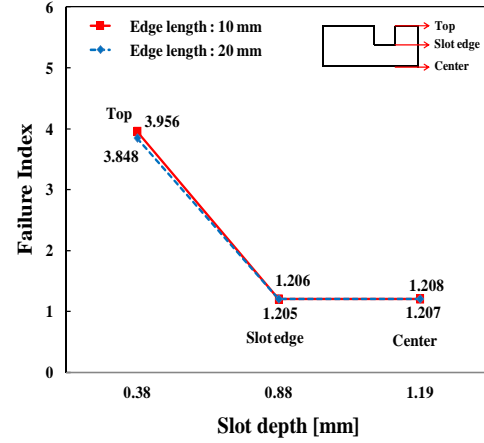


Fig. 13 Maximum failure index.

$$F_{66} = \frac{1}{T^2}; F_{12} = -\frac{1}{2\sqrt{X_T X_C Y_T Y_C}}$$

 $X_T$  : Longitudinal tensile strength $X_C$  : Longitudinal compressive strength $Y_T$  : Transverse tensile strength $Y_C$  : Transverse compressive strength $S$  : Shear strength

Fig. 12는 키 홈의 깊이가 0.38 mm이고 끝단 길이가 10 mm 인 키 조인트의 파손지수 분포를 나타낸 그림으로 키 홈의 상단 부에서 파손 지수가 가장 높은 값 3.956을 가짐을 볼 수 있다.

Fig. 13은 키 홈의 깊이에 따른 최대 파손지수의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 최대 파손지수의 위치는 키 홈의 깊이에 따라 변화되며, 키 홈 깊이가 0.38 mm일 때는 상단부, 0.88 mm일 때는 키 홈 모서리, 1.19 mm일 때는 시편 중앙부에서 파손지수가 최대값을 가짐을 볼 수 있다. 이상의 해석결과는 키 홈 깊이가 0.38 mm일 때는 상단부에서 파손이 발생되고 0.88 mm일 때는 키 홈 상단부와 모서리에서 파손이 발생한 Fig. 6과 Fig. 7의 실험 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

또한, 키 홈 깊이가 0.88 mm일 때 가장 낮은 최대 파손 지수값을 가지는 해석결과는 실험 파손하중이 가장 높게 나온 Fig. 9의 실험결과와 일치한다.

복합재료 조인트의 파손여부를 판단하는 기준은 최대 파손 지수뿐 만 아니라 파손 영역[7]도 중요한 요소가 될 수 있다. 본 논문에서 파손 영역을 파손 지수가 1보다 큰 요소의 면적으로 계산하였다. Fig. 14는 복합재료 키 조인트에 20 kN의 하중을 가하였을 때 파손영역을 나타낸다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 키 홈 깊이가 0.88 mm일 때의 파손 영역은 키 홈 깊이 1.19 mm보다 40% 더 작았으며, 끝단 거리가 20

mm일 때 파손 영역이 가장 작은 값을 가지므로 Fig. 9의 실험결과와 잘 일치한다고 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서 키와 키 홈을 가지는 새로운 기계적 키 조인트를 제안하였고 파손 모드와 강도를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 실험에 사용한 복합재료 키 조인트의 파손 하중은 동일 치수를 가진 기계 적 체결 조인트의 파손 하중보다 약 93% 향상된 우수한 특성을 나타내었다.
- 2) 복합재료 키 조인트의 키 홈 깊이가 0.88 mm이고 끝단 길이가 20 mm일 때 유한요소해석의 최대파손치수와 파손 영역이 가장 낮은 값을 보였으며, 파손하중이 가장 높게 나타난 실험결과와 일치하였다.

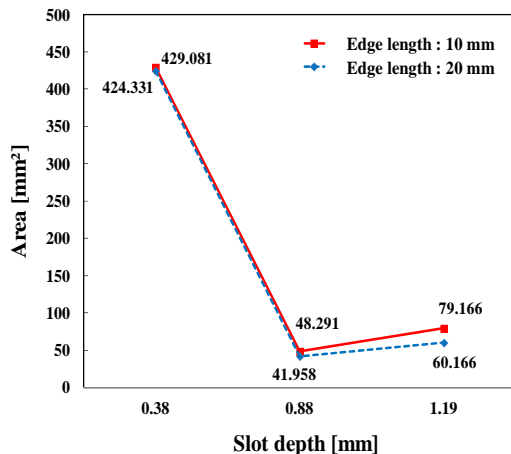


Fig. 14 Damage area.

#### 후 기

본 연구는 2011년 정부(교육과학기술부) 재원 한국연구재단의 대학중점연구소 지원 사업(2011-0031383) 및 기초기술연구회가 지원하고 한국항공우주연구원이 주관하는 DRC 사업의 지원에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

- 1) Reinhart, J.J. (Eds), ASM International, composite, Vol. 1, 1987, pp. 497-495.
- 2) Lee, D.G., Jeong, K.S., Kim, K.S., Kwak, Y.K., "Development of the Anthropomorphic Robot with Caron Fiber Epoxy," *Journal of Composite materials*, Vol. 25, 1993, pp. 313-324.
- 3) Lee, D.G., "An experimental study of the static torque capacity of the adhesively-bonded tubular single lap joint," *Int. J of Adhesion*, vol. 55, 1996, pp. 245-26.
- 4) 이대길, 최진호, 정명영, 전성식, 장승환, 오제훈, 복합재료, 홍릉과학출판사, 서울, 2007, pp. 209-221.
- 5) Lee, Y.H., Choi, J.H., Kweon, J.H., Yoon, M.K., "Failure load evaluation and prediction of hybrid composite double lap joints," *Composite Structures*, Vol. 92, No. 12, 2010, pp. 2916-2926.
- 6) Jones, R.M., *Mechanics of Composite Materials*, Mc GRAW-HILL, 1975.
- 7) Sheppard, A., Kelly, D., Tong, L., "A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints," *Int. Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 18, No. 6, pp. 385-400.