

이종재료의 결합방법에 따른 모자형 단면부재의 충돌실험

이 명 한¹⁾ · 박 영 배¹⁾ · 김 현 영²⁾ · 오 수 익³⁾

서울대학교 기계항공공학부 대학원¹⁾ · 강원대학교 기계공학과²⁾ · 서울대학교 기계항공공학부³⁾

Crushing Test of the Double Hat-shaped Members of Dissimilar Materials by Joining Methods

Myeong-Han Lee^{*1)} · Young-Bae Park¹⁾ · Heon-Young Kim²⁾ · Soo-Ik Oh³⁾

^{1,3)}School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²⁾Division of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University, Gangwon 200-701, Korea

(Received 4 January 2005 / Accepted 30 May 2005)

Abstract : There is a strong industrial demand for the development of light-weight vehicle to improve fuel efficiency and dynamic performance. The effective method of achieving the weight reduction is to use low-density materials such as aluminum and magnesium. In applying these materials to the vehicle, it is often required to join dissimilar materials such as aluminum and steel. However, conventional joining method, namely resistance spot welding cannot be used in joining dissimilar materials. Self-piercing rivet (SPR) and adhesive bonding is a good alternative to resistance spot welding. In this study, the impact test of double hat-shaped member made by resistance spot welding, SPR and adhesive bonding was performed. As a result, various parameters of crashworthiness were analyzed and evaluated. Also, the applicability of SPR and adhesive bonding as an alternative to resistance spot welding was suggested.

Key words : Dissimilar materials(이종재료), Self-piercing rivet(셀프피어싱 리벳 결합), Adhesive bonding(접착제 결합), Impact test(충돌 실험), Double hat-shape(이중모자형 단면)

1. 서 론

최근 자동차 기술의 관심은 경량화, 모듈화, 전자화의 세가지 주제에 집중되고 있으며, 특히 차량의 경량화는 연비의 향상 및 주행성능 향상 효과가 우수하여 알루미늄이나 마그네슘 등의 이용에 관한 연구가 진행되고 있다. 차체 전체에 경량재의 사용이 경량화의 가장 좋은 방법이나 결합기술 및 관련 응용기술의 부족으로 인해 차체에 부분적인 경량재 적용을 통한 경량화를 모색하고 있다. 경량재의 부분적인 적용을 위해서는 이종재료간의 결합방법의

결정이 우선되어야 한다.

기존의 스틸 모노코크 차체의 결합방법으로 이용되었던 점용접은 이종재료의 결합방법으로 적용할 수 없고, 이를 대신할 방법으로 접착제를 이용한 결합과 기계적 결합방법의 하나인 Self-piercing rivet (SPR)을 이용한 결합 등이 있다. 접착제를 이용한 결합은 이종재료의 결합이 가능하고, 결합 설계 및 결합 과정이 단순한 장점이 있다. SPR을 이용한 결합은 기존의 차체 결합에 사용되던 점용접에 비해 적용 가능한 재질에 제한이 없고, 부식이 없으며 결합성이 뛰어난 장점이 있다. 이들 새로운 결합방법을 차량 제작에 적용하기 위해서는 각 결합방법에 대한 기본적인 강도평가가 선행되어야 하며 각 결

*To whom correspondence should be addressed.
branden1@snu.ac.kr

합방법으로 이루어진 단품에 대한 충돌특성 평가 및 피로 특성 평가도 수행되어야 한다.

이미 차체 제작에 널리 사용되고 있는 점용접에 의한 결합방법의 경우 기초 강도 평가에서 단품 충돌특성 평가에 이르기까지 많은 연구가 이루어졌고, 현재에도 많은 연구가 이루어지고 있다. 점용접 결합된 단품의 압괴 및 충돌 특성 평가를 위해 많은 연구자들은 모자형 단면부재의 정적 압괴 실험이나 충돌 실험을 통해 압괴 및 충돌특성들에 관한 많은 연구를 수행하였다.¹⁻³⁾ 몇몇 연구자들은 서로 다른 종류의 스틸에 대한 모자형 단면부재를 점용접 결합으로 제작하여 굽힘 및 충돌 특성에 대하여 연구하였다.^{4,5)}

이상의 기존 연구들은 동종재료에 관한 연구 및 정적 압괴 실험에 관한 것이었다. 본 연구에서는 경량재가 적용된 차체 제작에 적용될 수 있는 접착제에 의한 결합 방법과 SPR에 의한 결합 방법을 적용한 이종재료로 구성된 단면부재를 제작하였고, 각 단면부재에 대해 충돌특성을 평가하였다. 본 연구에서는 스틸과 알루미늄으로 구성된 이중모자형 단면부재의 결합방법에 따른 충돌실험과 충돌실험 결과의 비교를 위해 스틸로만 구성된 이중모자형 단면부재의 점용접 결합에 대한 충돌실험을 병행하였다. 실험을 통해 각 결합방법의 결합부에서의 파단 양상 및 에너지 흡수량, 시험편의 변형된 길이 등의 충돌특성을 비교, 평가하였다.

2. 시험편 및 실험방법

이종재료 결합방법에 따른 충돌실험 평가를 위해 자동차 제작에 사용되고 있는 냉연강판 SPEN과 Al 5J32-T4를 이용하였다. 실험에 사용된 시험편의 두께는 1 mm이며 각각의 물성치를 Table 1에 나타내었고, 모자형 단면의 형상과 치수는 Fig. 1에 나타내었다. 충돌 시 모자형 단면의 초기 변형 유도를 위해 Fig. 1에 보이는 A 지점에 노치를 주었고, 노치의 가공은 프레스성형의 방법을 이용하였다. 결합에 사용된 SPR은 Henrob사의 리벳 꼬리지름 5 mm, 리벳 길이 5 mm인 C50541을 사용하였고, 이것은 주재료가 중탄소강(0.35% wt. C)이고 알루미늄 코팅(ALMAC: Zn-Ti-Al)이 된 것이다. 접착제의 종류는

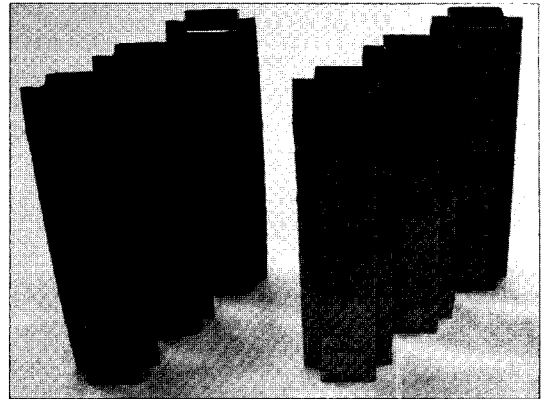


Photo. 1 Specimens for the crush test

Table 1 Mechanical properties of specimens

	E(GPa)	Y.S(MPa)	T.S(MPa)
SPEN	206	250	410
Al 5J32-T4	70	117.2	195

Table 2 Properties of Plexus MA 822

Chemical type	Two part methacrylate
Cure method	25°C, 15-20 min
Shear strength(ASTM D1002)	18.6-20.7 N/mm ²
Tensile strength(ASTM D639)	20-22.7 N/mm ²

크게 열경화 방식의 접착제와 상온경화 방식의 접착제가 있다. 본 연구에서는 실험의 편의성을 위해 상온경화 방식의 접착제인 methacrylate계의 이액형 접착제 Plexus MA 822을 사용하였고, Table 2에 접착제의 물성치를 나타내었다.

모자형 단면의 플랜지 부에 SPR과 접착제를 이용한 결합법을 이용하여 충돌실험용 이중모자형 단면부재를 제작하였고, Photo. 1에 제작된 시험편을 나타내었다. SPR 결합에서 SPR간의 거리는 Fig. 1에서와 같이 30 mm로 균일하게 하였다. 이는 시험편의 폭이 60 mm의 모자형 단면부재에서 용접 간격이 20 ~ 30 mm 일 때, 가장 많은 에너지를 흡수하기 때문에 이를 기준으로 SPR의 간격을 결정하였다.⁶⁾ 접착제를 이용한 결합에서는 접착면의 전처리 과정을 거치게 된다. 하지만 본 연구에서는 실제 생산라인을 고려하여 접착면의 전처리 과정을 거치지 않고 결합을 하였다. 접착제를 이용한 결합은 접착면에 접착제를 고르게 도포한 후 결합하여 집계를 이용

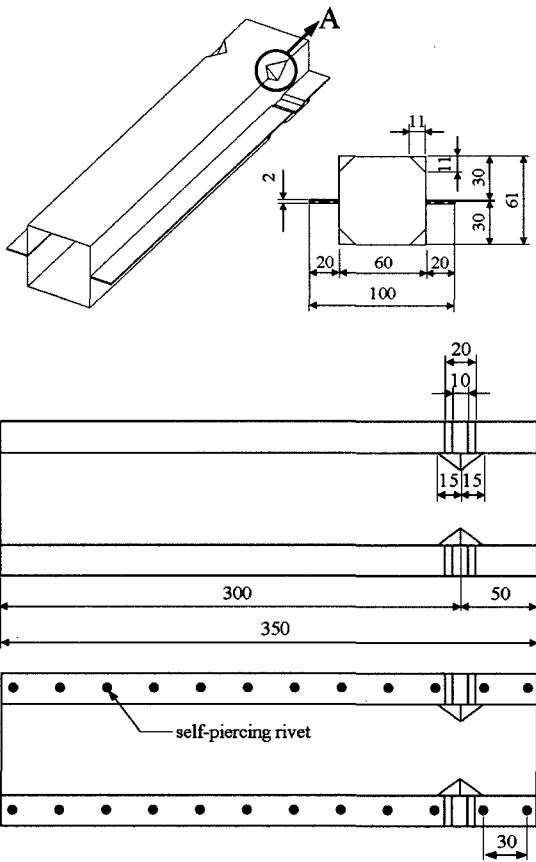


Fig. 1 Dimensions of specimens

하여 시험편 전면을 고르게 가압, 경화하였다.

본 실험에서는 스프링의 위치에너지를 이용하여 충돌체를 발사하는 원리로 제작된 포스코 자동차강 재연구소의 고속충돌시험기를 사용하였고, 충돌체 질량을 215 kg으로 충돌속도를 약 5.8 m/s(20.9 km/h)로 하여 충돌 실험을 수행하였다. 또한, 충돌에너지는 식 (1)과 같이 충돌체의 운동에너지와 동일하고, 이를 계산하면 약 3616 J이 된다.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

여기서, m은 충돌체의 질량이며, v는 충돌속도이다.

3. 결과 및 고찰

각 결합방법의 이중모자형 단면부재의 충돌특성

평가의 기준을 마련하기 위해서 두께 1 mm인 냉연 강판 SPCEN에 대한 이중모자형 단면부재를 점용 접 간격 30 mm로 결합, 제작하여 본 연구와 동일한 조건에서 충돌특성 평가를 수행하였다. 충돌실험 후의 변형 형상에 대한 충돌실험 결과를 흡수에너지, 평균 압쇄하중, 단위중량당 흡수에너지(S.E.A; specific energy absorption) 및 시험편의 변형된 길이를 중심으로 나타내었고, 이를 중심으로 각 결합방법들의 충돌 특성을 비교, 평가하였다.

SPR 결합과 접착제를 이용한 결합에 대한 충돌실험결과 얻어진 각각의 하중-변위 선도를 Fig. 2에 나타내었다. Photo. 2는 각 결합 단면부재의 충돌 후의 변형 형상이다. Table 3은 각 결합방법에 따른 충돌

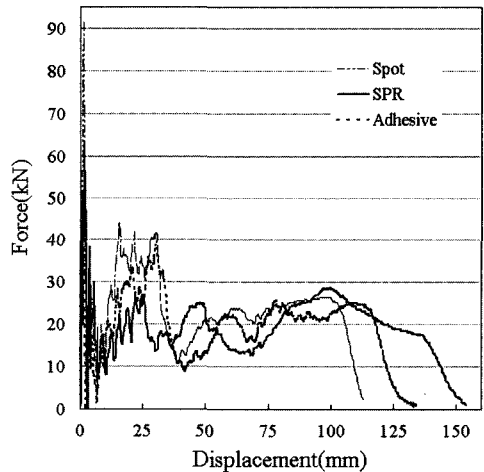


Fig. 2 Force-displacement curve of each joining method



Photo. 2 Deformed shape after the crush test

Table 3 Experiment results

Materials	Joining method	Absorbed energy(J)	Mean crush load(kN)	S.E.A(J/g)	Deformed length(mm)
SPCEN	Spot weld	2848.51	26.62	3.26	107
SPCEN					
SPCEN	SPR	2900.99	18.30	4.88	158.5
Al 5J32-T4	Bond	2541.06	18.45	4.28	137.7

실험의 결과값으로 흡수에너지, 평균 압축하중, 단위중량당 흡수에너지 및 시험편의 변형된 길이를 각 실험의 평균값으로 나타내었다.

3.1 흡수에너지

Fig. 3은 각 실험의 흡수에너지에 대한 결과를 점용접으로 결합된 시험편의 충돌 실험 결과와 비교한 것이다. 흡수에너지는 하중-변위 선도의 면적으로 계산되며, Fig. 2의 선도를 통하여 흡수에너지의 크기를 계산할 수 있다. SPR 결합과 접착제 결합의 흡수에너지는 각각 식 (1)의 충돌에너지의 약 80, 70%이고, SPR 결합의 흡수에너지가 접착제 결합의 흡수에너지보다 큰 것을 알 수 있다. 두 결합의 하중-변위 선도는 Fig. 2에서 보여지는 것과 같이 큰 차이를 나타내지는 않지만 Table 3의 결과와 같이 SPR 결합이 접착제 결합에 비해 약 20 mm 정도 더 변형됨으로써 두 결합의 흡수에너지 차이가 발생한 것으로 판단된다. 이종재료의 SPR 결합 단면부재와 동종재료의 점용접 결합 단면부재의 흡수에너지양

은 서로 비슷한 결과임을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 이종재료 자체 제작의 결합방법으로 동종재료의 결합방법으로 사용되어온 점용접을 대체하여 SPR 결합이 적용될 수 있을 것이라 판단된다.

3.2 단위중량당 흡수에너지

구조물의 중량에 따른 충돌 효율을 나타내는 S.E.A는 식 (2)와 같이 단면부재의 총 중량에 대한 총 흡수에너지양의 비로 산출된다.³⁾ 각 결합에 따른 S.E.A에 대한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

$$S.E.A = \frac{\text{Absorbed energy}}{\text{Structure weight}} \quad (2)$$

Fig. 4에서 S.E.A는 동종재료의 점용접 결합부재보다 이종재료의 SPR과 접착제 결합부재가 각각 약 25, 45% 높은 것을 알 수 있다. 일반적으로 알루미늄의 밀도는 스틸 밀도의 약 1/3 정도이므로, 같은 형상의 단면부재일 경우 이종재료로 제작된 것이 동종재료로 제작된 것보다 같은 충돌에너지를 흡수

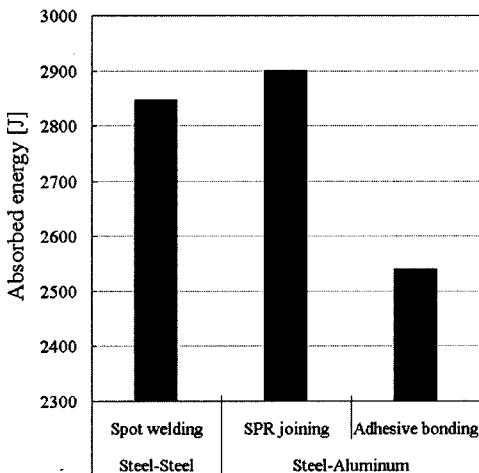


Fig. 3 Absorbed energy vs. joining method

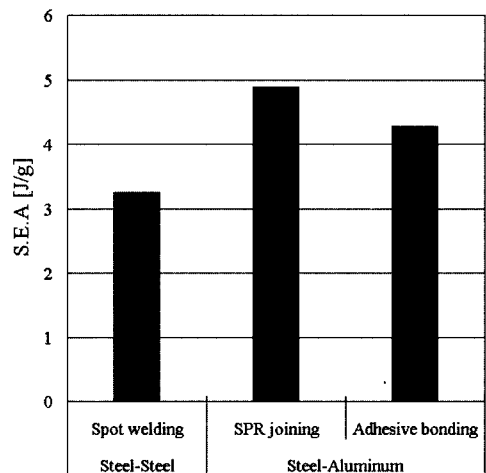


Fig. 4 S.E.A vs. joining method

하더라도 S.E.A는 이종재료 결합부재가 높은 것을 알 수 있다. 본 연구와 같은 실험조건에서 이종재료 사용에 의한 중량감소 효과는 약 33 %가 된다. 즉, 같은 에너지 흡수량을 갖기 위한 이종재료의 결합 중량은 동종재료 결합중량의 약 67 %가 된다는 것을 알 수 있다.

3.3 시험편의 변형된 길이

Table 3에서 단면부재의 변형된 길이를 살펴보면 이종재료 SPR 결합부재의 변형된 길이가 동종재료 점용접 결합 부재의 변형된 길이보다 약 48 % 크다. 또한, 이종재료 접착제 결합부재의 변형된 길이는 동종재료 점용접 결합부재의 변형된 길이보다 약 28 % 큰 것을 알 수 있다. 이는 스틸과 알루미늄의 사용에 의한 단면부재 강성의 감소로 인해 발생한 것으로 판단된다. SPR 결합 단면부재의 변형된 길이가 접착제 결합 단면부재의 변형된 길이보다 큰 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 Photo. 2에서 보여지는 것과 같이 두 결합의 충돌 후의 변형 형상을 통해 설명될 수 있다. SPR 결합은 플랜지부에 일정한 간격으로 결합되므로, 결합이 되지 않는 부분에서 변형이 발생할 수 있다. 하지만 접착제 결합은 플랜지부 전체에서 결합되므로, SPR 결합에서와 같은 변형 요인이 제거된다. 이러한 두 결합 방법의 차이로 인해서 SPR 결합과 접착제 결합의 변형된 길이의 차이가 발생된 것으로 판단된다.

3.4 평균 압쇄하중

단면부재의 에너지 흡수능력을 나타내는 평균 압쇄하중은 단면부재의 흡수에너지에 대한 변형량의 비로 산출된다. 본 연구에서 점용접 결합의 동종재료 단면부재의 평균 압쇄하중이 SPR 결합과 접착제 결합의 이종재료 단면부재의 평균 압쇄하중보다 약 45 % 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 충돌 변형량이 동종재료로 구성된 단면부재가 이종재료로 구성된 단면부재보다 작지만 흡수에너지는 비슷하거나 많기 때문이다.

3.5 결합부의 파단 형상

Photo. 3에는 각 결합방법의 충돌실험에 의해 파

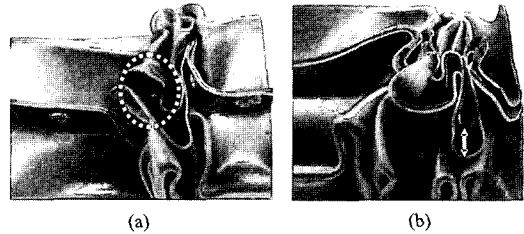


Photo. 3 Collapse mode; (a) self-piercing rivet, (b) adhesive bonding

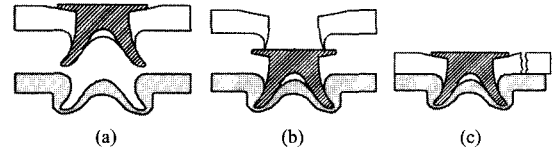


Fig. 5 Typical failure modes of SPR joint; (a) rivet tail pull-out, (b) rivet head pull-out, (c) substrate failure

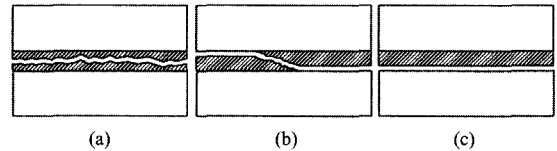


Fig. 6 Typical failure modes of adhesive joint; (a) bulk failure, (b) transition failure, (c) interfacial failure

단된 형상을 결합부 중심으로 나타내었다. 일반적으로 SPR 결합의 파단형상은 Fig. 5에서 보이듯이 리벳 꼬리 분리(rivet tail pull-out), 리벳 머리 분리(rivet head pull-out), 모재 파단(substrate failure)의 세 가지가 있다. 본 충돌실험에서 SPR 결합의 파단은 리벳과 하부 부재가 분리되는 리벳 꼬리 분리가 가장 많이 발생되었다. 이러한 파단 형상은 리벳 꼬리부와 결합되는 하부 부재의 강성이 작을 때와 리벳 꼬리부의 벌어짐 부족으로 인해 발생된 것으로 판단된다. 일반적으로 접착제 결합의 파단형상은 Fig. 6에서 보이듯이 벌크파괴(bulk failure), 전이파괴(transition failure), 계면파괴(interfacial failure)의 세 가지가 있다. 본 충돌실험에서 접착제 결합의 파단은 상부 부재와 하부 부재가 떨어지면서 접착제의 박리 하중이 작용된 접착제의 벌크파괴가 발생되었다. 벌크파괴는 접착제에 작용되는 전단력보다 상하부재의 변형에 의해 발생하는 인장력에 의해 발생된다.

3.6 고찰

이상에서 SPR 결합과 접착제 결합으로 제작된 모자형 단면부재의 충돌특성에 대해 살펴보았다. SPR 결합의 흡수에너지는 점용접 결합의 흡수에너지와 비슷한 실험결과를 얻었고, 이를 통해 SPR 결합방법을 이종재료 차체 제작에 적용 가능하다고 판단된다. 접착제 결합의 흡수에너지는 SPR 결합에 비해 작은 결과를 얻었다. 이러한 결과는 본 연구에 사용된 접착제의 특성과 관련이 있다. 접착제는 상온경화 방식과 열경화 방식의 접착제가 있고, 상온경화 방식의 접착제는 열경화 방식의 접착제에 비해 박리하중에 약한 특성이 있다. 이러한 특성에 의해 본 연구에서와 같이 접착제 결합의 흡수에너지가 SPR 결합에 비해 작은 결과를 얻은 것으로 판단된다. 접착제 결합방법에서 흡수에너지의 향상을 위한 방법으로는 열경화 방식의 접착제를 사용하는 방법과 SPR 결합방법과 조합하는 결합방법이 있다고 판단되고, 이에 대한 연구가 필요하다.

4. 결론

스틸과 알루미늄으로 이루어진 이중모자형 단면부재의 결합방법에 따른 충돌실험을 통해 각 결합방법의 충돌특성과 파단양상에 대한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 스틸과 알루미늄으로 구성된 단면부재의 결합방법으로 SPR 결합과 접착제 결합을 이용하였다. 흡수에너지는 SPR을 이용한 결합이 접착제를 이용한 결합보다 큰 실험결과를 얻었다. 이종재료의 SPR을 이용한 결합의 에너지 흡수량은 동종재료 단면부재의 점용접 결합의 에너지 흡수량과 비슷한 결과를 얻었다.
- 2) 단위중량당 흡수에너지(S.E.A)는 스틸로 구성된 점용접 단면부재보다 스틸-알루미늄으로 구성된 SPR, 접착제 결합 단면부재가 높게 측정되었다. 이종재료 단면부재는 동종재료 단면부재에 비해 약 33 %의 중량감소 효과가 있다.
- 3) 충돌 변형량의 값은 동종재료 점용접 결합에 비해 SPR, 접착제 결합이 각각 약 45, 28 % 더 변형된 결과를 얻었다.
- 4) 평균충돌하중 값의 경우 스틸로 구성된 단면부

재의 결과가 스틸과 알루미늄으로 구성된 SPR 결합의 단면부재 결과보다 약 45 % 크다.

- 5) 각 결합방법의 충돌 파단 형상을 살펴보면, SPR 결합에서는 리벳 꼬리와 하부 부재가 떨어지는 리벳 꼬리 분리가 발생되었고, 접착제 결합에서는 상부 부재와 하부 부재가 떨어지는 벌크파괴가 발생되었다.

이상은 이종재료의 이중모자형 단면부재의 충돌 특성 연구결과를 나타낸 것이다. 스틸과 알루미늄을 혼합하여 사용한 구조물이 경량화에 효과가 있음을 알 수 있었다. 이종재료의 결합방법으로 점용접을 대신해 SPR을 이용한 결합이 적용 가능하다고 판단된다. 본 연구에서 이종재료 구조물의 충돌 변형량이 동종재료 구조물의 충돌변량보다 큰 것을 알 수 있었고, 이 같은 결과는 승객의 안전과 관련이 있다. 그러므로, 향후에는 충돌 변형량이 고려된 충돌특성을 연구하는 것이 필요할 것이다.

References

- 1) M. D. White and N. Jones, "Proc. Instn Mech. Engrs, Part D," *Journal of Automobile Engineering*, pp.259-278, 1999.
- 2) M. D. White and N. Jones, "Experimental Quasi-static Axial Crushing of Top-hat and Double-hat Thin-walled Sections," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.41, pp.179-208, 1999.
- 3) Y. Ohkubo, T. Akamatsu and K. Shirasawa, "Mean Crushing Strength of Closed-hat Section Members," SAE 740040, 1974.
- 4) B. C. Schell, M. Y. Sheh, P. H. Tran, C. L. Pan and W. W. Yu, "Proceedings of Automotive Body Design & Engineering," pp.48-55, IBEC, 1993.
- 5) C. L. Pan and W. W. Yu, "Bending Strength of Hybrid Cold-formed Steel Beams," *Thin-walled Structures*, Vol.40, pp.399-414, 2002.
- 6) H. I. Lee, B. J. Kim and B. K. Han, "Energy Absorption Characteristics and Optimal Welding Space of Square Hat Type Thin-walled Tube," *Transactions of KSME A*, Vol.26, No.12, pp.2703-2714, 2002.