

論文

접착 조인트의 전단 충격특성에 관한 연구

김용하*, 박상근*, 김동옥**, 유용문**, 전성식**

A Study on the Shear Impact Characteristics of Adhesively Bonded Tubular Joints

Yongha Kim*, Sangkun Park*, Dongok Kim**, Yong-Moon Ryu**, and Seong Sik Cheon**

ABSTRACT

The structural adhesives have the advantage of improving automobile performances and are being applied to joining light weight materials like aluminium and composite. In order to characterize the impact behavior of structural adhesive, instrumented impact tests were performed with respect to pin-ring adhesively bonded joint specimens. Also dynamic FE analysis was carried out using LS-DYNA to compare the results with experiments.

초 록

구조용 접착제는 알루미늄이나 복합재료 같은 가벼운 재질의 접합에 적용함으로써 자동차의 경량화를 이루어 연비 및 승차감등 성능향상에 큰 효과를 얻을 수 있다. 자동차와 같이 충돌환경에 노출이 되어있는 기계 구조물에 접착제를 적용하기 위해서는 접착제의 충격특성에 관한 연구가 필수적이다. 본 연구에서는 pin-ring 타입의 접착조인트를 이용하여 접착제의 전단 충격특성에 관한 연구를 수행하였으며, 충돌해석을 하기 위해 LS-DYNA를 사용하였다.

Key Words : 구조용 접착제(structural adhesive), 충격시험(impact test), 충격해석(impact analysis)

1. 서론

현재 자동차 차체의 체결방법은 주로 점용접(Spot welding)이 이용되고 있지만, 용접부의 강도, 내구 성능에 많은 한계를 보이고 있고, 최근 각 자동차 회사에서는 차체 경량화를 위해 기존의 철강재료 보다 무게가 가벼운 비철금속재료 즉 알루미늄 합금이나 복합재료와 같은 용접하기 까다로운 재질의 적용이 늘고 있으며, 이로 인해 차체 결합에 구조용 접착제의 요구가 대두되고 있다. 차체 구조용 접착제는 용접 불가 부위 및 소음 또는 구조취약부위에 적용되어 차체의 결합 강성을 증대시키고 정숙성, 수밀성 및 승차감을 극대화한 고강성 차체구조를 만들기에 적합하다고 알려져 있다. 또한 접착제를 이용한 결합 방법은 기계적 결합에 비해 무게를 감소시킬 수 있고, 접합면 전체에 응력이 고르게 분포되기 때문

에 응력집중 현상을 방지할 수 있으며, 최근 차체 제작 공정에서 사용되는 이종 재료간의 결합에서 발생할 수 있는 화학적 부식을 예방할 수 있고, 뛰어난 피로 저항과 진동이나 소음을 줄이는 효과도 우수하다고 알려져 있다[1]. 하지만, 이 같이 많은 장점에도 불구하고 신차개발 적용의 현실화가 늦어지는 이유로는 접합 및 파단 특성에 대한 기초 데이터베이스의 부족과 해석에 대한 신뢰도가 낮기 때문이다[2]. 본 연구에서는 자동차 구조용 접착제 접합의 전단 충격 강도 특성을 파악하고자 시험과 컴퓨터 시뮬레이션을 병행하여 수행하고 그 결과를 비교하였다. 충격시험을 위하여, 기존의 규격(ASTM D950-03)[3] 대신 전단 충격 시험에 용이한 형상의 시편과 지그를 설계 및 제작하였으며, 낙하식 계장화 충격 시험기를 사용하였다. 충격시험은 다양한 속도를 적용하여 시험을 실시하였으며, 구조용 접착제는 현재, 자동차 구조에

접수: 2011년 3월 10일, 수정: 2011년 11월 30일, 게재승인: 2012년 1월 31일

* 국립공주대학교 기계공학과

** 자동차부품연구원

*+ 국립공주대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:sscheon@kongju.ac.kr)

적용되어, 도장 및 용접등 고온에 노출되는 환경에도 견딜 수 있는 (주) 유니테크의 c-type 에폭시 접착제[4]를 사용하였다. 상용 유한요소 해석프로그램인 LS-DYNA Ver. 971 (Livermore Software Technology Co.)로 충격해석이 수행되었다.

2. 접착부 유한요소해석

2.1 접착부 형상 설계

접착제의 충격시험에 관한 대표적인 규격으로는 ASTM D950-03이 있으나, 펜듈럼 형 충격시험기를 이용한 시험기에 적합하기 때문에, 본 연구에서는 Bezemer 등이 제안한 접착제 충격 시험[3,5]을 수정하여, 낙하식 계장화 충격시험을 수행하였다. 수정된 시험은 Fig. 1에서 보여지고 있다. 접착제 접합시, 적절한 접착층의 두께, 즉 피착제 (Adherend) 사이의 거리는 0.1~1.0mm 정도로 알려져 있다[6,7]. 본 연구에서는 접착층의 두께를 0.5mm를 유지하도록 하였으며, 접착면적의 경우에는 낙하식 충격시험기의 허용하중 및 시험시 안전등을 고려하여 ASTM D950-03 규격 접착면적의 50%가 되도록 설계하였다.

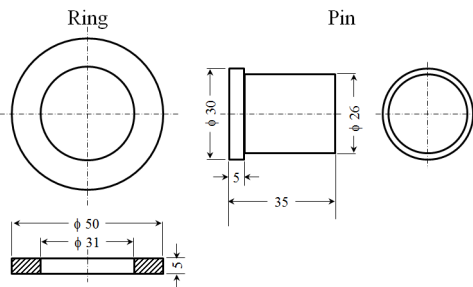


Fig. 1 The shape and size of the impact test specimen.

2.2 유한요소모델링

본 연구에서는 접착 조인트의 전단 충격해석을 위해 Fig. 2와 같이 유한요소 모델을 구성하였다. 해석시간을 적절하게 줄이면서도 해석의 정도를 높이기 위해, 솔리드 요소를 접착제 및 피착제에 적용하였다. 접착제는 조밀하게, 피착제는 상대적으로 요소가 큰 강체요소로 모델링하였다.

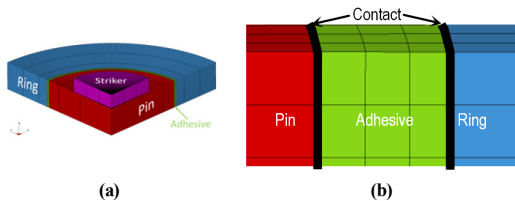


Fig. 2 FE model: (a) Oblique view, (b) magnified view of the adhesive part.

본 연구에서는 접착 조인트의 전단 충격해석을 위해 Fig. 2와 같이 유한요소 모델을 구성하였다. 해석시간을 적절하게 줄이면서도 해석의 정도를 높이기 위해, 솔리드 요소를 접착제 및 피착제에 적용하였다. 접착제는 조밀하게, 피착제는 상대적으로 요소가 큰 강체요소로 모델링하였다.

또한, 단면대칭을 이용하여, 1/4 모델로 해석을 진행하였고, 상용 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA 971을 이용하였다. 접착제는 비선형 소성물성을 표현할 수 있고, 요소의 삭제 및 변형률 속도를 고려할 수 있는 물성으로 모델링 되었으며, 충격체 (Striker)는 피착제인 핀과 링처럼 강체로 모델링 되었다. 식 (1)은 변형률 속도가 고려된 동적 항복강도식을 보여주고 있다.

$$\sigma_y(\dot{\epsilon}_{eff}^p, \dot{\epsilon}_{eff}^p) = \sigma^S(\dot{\epsilon}_{eff}^p) + \sigma_y^i \left(\frac{\dot{\epsilon}_{eff}^p}{c} \right)^{1/p} \quad (1)$$

여기서, σ_y 는 항복응력, $\dot{\epsilon}_{eff}^p$ 는 소성 변형률, $\dot{\epsilon}_{eff}^p$ 는 소성 변형률 속도, σ^S 는 정적 응력, σ_y^i 는 초기 항복응력, c 와 p 는 변형률 속도와 관련된 변수들이다[8,9].

접착제의 기계적 물성은 (주)유니테크에서 제공받은 인장시험결과인 항복응력 40MPa, 인장강도 45MPa 및 파괴변형률은 7%를 이용하였다[4]. 접착제와 피착제 사이는 접촉이 일어나면 다시 분리되지 않고 있다가, 일정한 하중하에서 분리가 일어날 수 있는 타이브레이크 (Tie-break) 계열의 접촉으로 정의하여, 전단충격하중이 가해질 때, 식 (2)와 같은 파손기준 [8]에 의하여, 접착제와 피착제가 분리 가능하게 모델링 되었다.

$$\left(\frac{\sigma_n}{S_n} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{S_s} \right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

여기서, σ_n 은 수직응력 (Normal stress), σ_s 는 전단응력 (Shear stress), S_n 은 수직파괴강도 (Normal strength), S_s 는 전단파괴강도 (Shear strength)를 나타낸다.

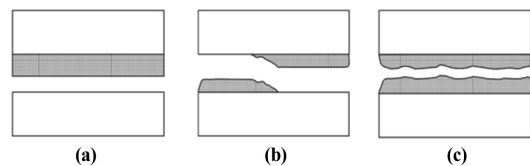


Fig. 3 Failure modes of the adhesively bonded joint: (a) Interfacial failure, (b) transient failure, (c) cohesive failure.

접착제 접합부의 파괴는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 계면 파괴 (Interfacial failure)와 응집 파괴 (Cohesive failure) 및 이 두 파괴모드의 혼합인 천이파괴 (Transient failure)로 나뉘어질 수 있다[1,6].

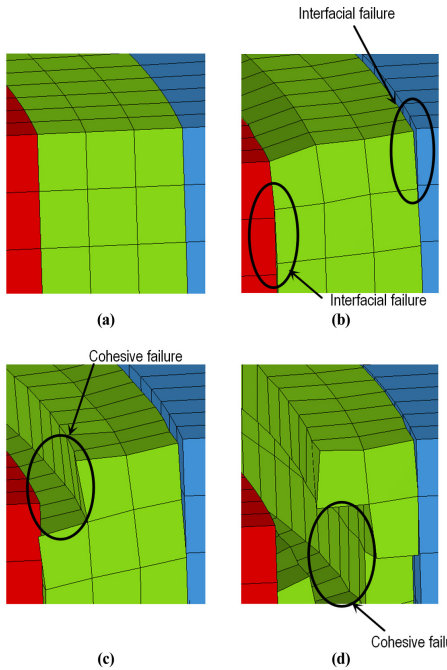


Fig. 4 Deformation (5m/s case): (a) Initial state, $t=0\text{msec}$, (b) $t=0.35\text{msec}$, (c) $t=0.06\text{msec}$, (d) $t=0.075\text{msec}$.

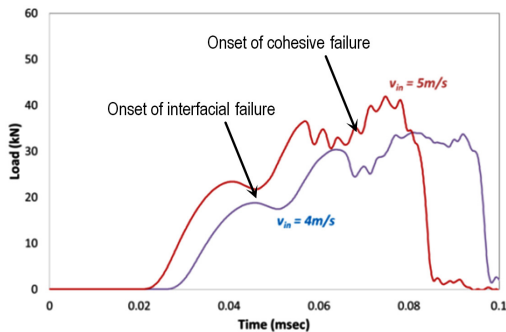


Fig. 5 Load versus time curves.

시간에 따른 접착 조인트의 전단충격 변형거동이 Fig. 4에 나타나있다.

응집파괴를 구현하기 위하여, 최대 변형률 (0.07, 인장실험을 통하여 구해진 값)을 넘어가는 접착제 요소는 제거될 수 있도록 하였다.

유한요소해석 결과, 접착부에서 계면 파괴가 먼저 일어난 후, 응집파괴가 일어나는 것을 볼 수 있었으며, 이는 향후, 접착면의 접합강도를 높이게 되면, 응집파괴가 먼저 생길 수 있을 것으로 사료되며, 이는 접착부 구조의 건전성을 높일 수 있다. Fig. 5에서는 초기 충격속도 (v_{in})가 4m/s 또한 5m/s일 때 충격전단파손시 시간에 따른 충격하중 선도를 보여주고 있다.

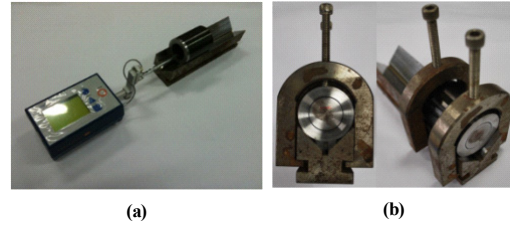


Fig. 6 Specimen preparation: (a) Measurement of the surface roughness, (b) V-block for aligning adherends.

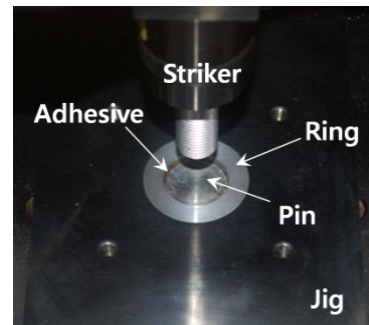


Fig. 7 Experiment setup.

해석데이터는 SAE J211계열의 필터[10]를 이용하여, 고주파 성분을 필터링하였다. 해석에서는 접착부가 두께방향으로 0.2-0.3mm변형하는 동안 Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 계면 파괴에 의하여 하중이 감소했다가 증가하며, 이후 응집파괴가 발생하여 다시 하중이 감소했다가 증가하는 것을 반복하며, 파괴가 완료되면, 급진적으로 하중이 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

3. 접착제 충격 시험 및 분석

피착제인 핀과 링의 재질은 범용 기계구조용 탄소강인 SM 45C를 이용하였다. 일반적으로 접착제의 접착 강도는 시편의 표면조도에 영향을 받기 때문에, 본 연구에서는 핀과 링의 접착제가 도포되는 부위의 평균 표면조도(Ra)가 1.5 μm [5,6]가 될 수 있도록 샌드페이퍼(#80)로 표면처리를 하고, 아세톤에 20분 정도 담가두어서, 불순물을 제거하였다. 또한, Fig. 6에서 보이는 바와 같이 접촉식 표면조도 측정기 (Surtronic 25, Taylor Hobson, Co. Ltd.)를 이용하여, 평균 표면조도값이 1.5 μm 가 되는 것을 확인하였다. 피착제 및 접착부의 표면처리가 완료된 후, 접착부에 시편을 도포하고, 체결한 다음, Fig. 6과 같이 V-블록에 올려 U클램프로 고정함으로 핀과 링의 중심이 일치하도록 한 후 노 (Furnace)안에서 180°C 기준으로 20분 이상 경화시켰다.

Fig. 7에는 전단충격시험의 시편장착사진이 나타나 있다. 계장화 충격시험기는 Dynatup 9250HV (Instron, Co. Ltd.)를 이용

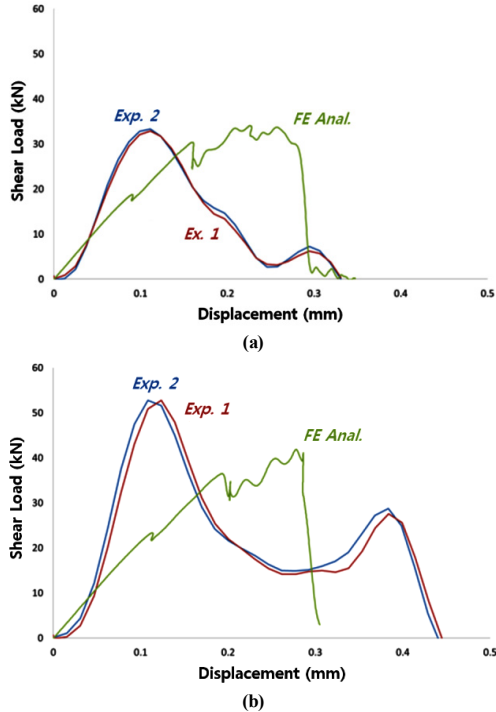


Fig. 8 Comparison between experiment and FE analysis: (a) Incident velocity: 4m/s, (b) 5m/s.

Table 1 Summarisation of the shear impact test

Adhesive	Unitech C-type(epoxy)
Surface cleaner	Acetone
Curing process	180°C, 20min
Adherend	Steel (SM45C)
Surface roughness, R_a (μm)	1.5
Impact velocities	4, 5 m/s
Test temperature ($^{\circ}\text{C}$)	20 ± 3
Number of specimen	4

Table 2 Comparison between experiment and analysis

	v_{in}	Exp 1	Exp 2	FE Anal.
Max load (kN)	4m/s	33.4	32.9	33.1
	5m/s	52.8	52.8	43.5
Absorbed Energy (J)	4m/s	4.6	4.5	6.6
	5m/s	10.2	9.8	7.5

하였다. 본 시험기는 load cell의 최대 허용 충격하중이 222.4 kN, 충격체 질량은 3-20 kg, 시험속도는 공압 및 스프링을 이용하여, 5-20m/s까지 조절 가능하며, 충격후 다중 충격이 발생하는 것을 막기 위하여, 공압식 브레이크 (Pneumatic brake)가 장착되어있다. 시험데이터는 AD 변환기 (NI instrument, Co. Ltd.)를



Fig. 9 Surface of the adherends.

거쳐서 PC로 저장되었다. 시험속도는 저속 및 중속 물성을 알기 위한 대표적인 속도인 4m/s 및 5m/s의 두가지로 선정[11-13] 하고, 이에 대하여, 충격체의 속도를 맞추었다. 관련 시험조건은 Table 1에 정리되어있다.

충격시험결과와 해석결과가 Fig. 8에 하중-변형 선도로 비교되었다. 최대하중은 4m/s에서 33.3kN, 5m/s에서 52.8kN으로 나타났고, 하중이 작용하는 구간이 링과 핀이 접착된 폭 5mm의 1/10 이하 수준인 0.3~0.5mm이내에서 발생된 것을 볼 수 있었다. 이는 유한요소해석에서도 같은 양상을 나타내었다. 각 속도당 2번의 시험결과가 유사한 것으로 나타났기 때문에 시험의 재현성이 우수한 것으로 사료되고 있다. 시험과 해석결과의 차이는 Table 2에 나타나있다. 기본적으로 해석에서 발생된 계면 파괴와 응집파괴는 시험에서는 접착제의 고속물성에 의하여, 좀 더 늦게 그리고 좀더 높은 하중에서 발생하는 것으로 나타났다. 또한 충격속도가 높아짐에 따라, 하중이 약 20 kN 정도, 즉 37% 정도 증가하기 때문에 본 에폭시 접착제는 변형을 속도에 상당히 민감한 것으로 나타났다.

Table 2에는 실험과 해석에 대한 주요 데이터가 보여지고 있다. 시험과 해석결과는 최대하중 기준으로 약 19%이내의 오차를 보이나, 접착제의 고속 물성(식 1에서 c, p)이 정확히 밝혀지지 않은 현 상황을 고려하면, 받아들여질 만한 한 수준으로 나타난 것으로 평가되고 있다. 흡수한 에너지는 최대 하중을 적분하여 얻은 것으로, 오차값이 누적되면서 상대적으로 좀더 높은 수준의 오차가 생겼으나, 역시 해석결과와는 받아들여질 만한 수준인 것으로 나타났다.

향후 흡킨슨 바 시험 [14-17] 등을 통한 본 접착제의 변형을 속도에 따른 물성특성을 분석이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 접착조인트의 계면 파괴강도 및 응집파괴 강도의 동적 물성이 요구되며, 고속카메라 촬영 등을 포함하여, 파괴시 접착제의 변형거동에 대한 분석이 병행되어야 할 것으로 여겨지고 있다.

Fig. 9에서는 시험후 피착제의 모습을 보여주고 있다. 핀과 링의 접착면에 각각 붙어있는 접착제의 형상으로부터, 계면 파괴 및 응집파괴가 복합적으로 일어난, 천이파괴가 발생하였음을 확인하였다. 향후에는 접착부의 표면거칠기에 따른 충돌시 접착조인트의 강도변화에 대해서도 연구가 필요한 것으로 사료되고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석과 충격시험을 통하여 서로 다른 속도환경(4, 5m/s)에서의 구조용 접착제의 전단 충격특성 연구를 수행하였다. 최대하중은 4m/s에서 33.3kN, 5m/s에서 52.8kN으로 나타났고, 하중이 작용하는 구간이 링과 핀이 접착된 폭 5mm의 1/10 이하 수준인 0.3~0.5mm 이내에서 발생된 것을 볼 수 있었다. 이는 유한요소해석에서도 같은 양상을 나타내었다. 본 접착부 조인트 시편의 경우, 4m/s의 경우 4.5J, 5m/s에서는 약 10J 정도의 에너지를 흡수할 수 있는 것으로 나타났다. 향후, 향후 흡킨슨 바 시험을 통한 본 접착제의 변형률 속도에 따른 물성특성 분석이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 접착조인트의 계면 파괴강도 및 응집파괴 강도의 동적 물성이 요구되며, 고속카메라 촬영 등을 포함하여, 파괴시 접착제의 변형거동에 대한 분석이 병행되어야 할 것으로 여겨지고 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 산업원천기술개발사업의 위탁과제(10028421-2010-22)로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Lee, D.G., Suh, N.P., *Axiomatic design and fabrication of composite structures*, Oxford, New York, 2006.
- 2) 이태현, 신성기, “자동차 충돌해석을 위한 구조용 접착제 유한 요소 해석모델 개발,” 한국자동차공학회 창립 30주년 기념 학술대회 논문집, 2008, pp. 1141-1146.
- 3) ASTM Designation D950-03, Standard Test Method for Impact Strength of Adhesive bonds.
- 4) 고안전 경량 Front Under Body의 기반기술 및 평가기술 개발, 산업원천기술개발사업 보고서, 지식경제부, 2010.
- 5) Bezemer, A.A., Guyt, C.B., Vlot, A., “New impact specimen for adhesive: optimization of high-speed-loaded adhesive joints,” *Int. J. Adhesion & Adhesives*, Vol. 18, 1998, pp. 255-260.
- 6) Lee, S.J., Lee, D.G., “Optimal Design of the Adhesively-Bonded Tubular Single Lap Joint,” *J. Adhesion*, Vol. 50, 1995, pp. 165-180.
- 7) Arenas, J.M., Narbón, J.J., Alía, C., “Optimum adhesive thickness in structural adhesives joints using statistical techniques based on Weibull distribution,” *Int. J. Adhesion and Adhesives*, Vol. 30, 2010, pp. 160-165.
- 8) LS-DYNA Version 971 Keyword User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2009.
- 9) G.R. Cowper, P.S. Symonds, Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams, Brown University, Applied Mathematics, Report, 1958.
- 10) M. Huang, *Vehicle crash mechanics*, CRC Press, Boca Raton, 2002.
- 11) Norman, T.L., Sun, C.T., “Delamination growth in composite laminates with adhesive strips subjected to static and impact loading,” *Composites Science and Technology*, Vol. 46, 1993, pp. 203-211.
- 12) Casas-Rodriguez, J.P., Ashcroft, I.A., Silberschmidt, V.V., “Damage evolution in adhesive joints subjected to impact fatigue,” *J. Sound and Vibration*, Vol. 308, 2007, pp. 467-478.
- 13) Yu, J., Wang, E., Li, J., Zheng, Z., “Static and low-velocity impact behavior of sandwich beams with closed-cell aluminum-foam core in three-point bending,” *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 35, 2008, pp. 885-894.
- 14) Kang, W.J., Cho, S.S., Huh, H., D.T. Chung, “Modified Johnson-Cook Model for Vehicle Body Crashworthiness Simulation,” *Int. J. Vehicle Design*, Vol. 21, 1999, pp. 424-435.
- 15) Kang, W.J., Huh, H., “Crash Analysis of Auto-Body Structures Considering the Strain-Rate Hardening Effect,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol. 1, 2000, pp. 35-41.
- 16) Huh, H., Kang, W.J., Han, S.S., “A Tension Split Hopkinson Bar for Investigating the Dynamic Behavior of Sheet Metals,” *Experimental Mechanics*, Vol. 42, 2002, pp. 8-17.
- 17) Yang, L.M., Shim, V.P.W., “An analysis of stress uniformity in split Hopkinson bar test specimens,” *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 31, 2005, pp. 129-150.