

## 초등해법을 이용한 철도차량 변형튜브 성능 예측에 관한 연구

김진모<sup>#</sup> · 이종길<sup>1</sup> · 김기남<sup>2</sup>

### Prediction of the Performance of a Deformation Tube for Railway Cars using the Slab Method

J. M. Kim, J. K. Lee, K. N. Kim

(Received November 25, 2015 / Revised March 2, 2016 / Accepted March 3, 2016)

#### Abstract

Recently, global railway car makers are competing desperately in developing high-speed railway vehicles. Ensuring passenger safety during a crash is essential. The design and the manufacturing of energy absorbing components are becoming more and more important. A deformation tube is a typical passive energy absorbing component for railway cars. In the current study the slab method was used to predict the energy absorbing capability of a deformation tube during the early design stage. The usefulness of the prediction method is verified through the comparisons between the results of FE simulations and those of the prediction method.

**Key Words** : Deformation Tube, Collision Tube, Collapse Tube, Railway Safety, Energy Absorption

#### 1. 서 론

과거 국내의 철도차량은 주로 도시 철도를 중심으로 발전을 이루어 왔다. 따라서 중고속 열차에 비하여 도시철도 차량에 대한 제작요구가 많았으며, 도시철도의 경우 영업운행 주행속도가 100km/h 이내로 운행 되는 경우가 일반적이다. 하지만 최근 들어 도시철도의 무인화 시스템 보급과 각 도시를 연결하는 간선철도의 증가로 인하여 철도안전에 대한 요구가 증가 되고 있다. 최근에는 철도안전법을 적용하여 신규 제작되는 철도차량에 대하여 유럽에서와 같이 TSI(technical specifications for interoperability)를 만족시키도록 요구하고 있으며, 그를 위하여 충돌에너지 흡수부재에 대한 설계를 필수적으로 요구하고 있다. 철도차량에서의 에너지 흡수 부재는 충돌예방을 위한 모든 수단이 기능을 하지 못하게 될

경우 최후의 수단으로 차량의 물리적인 장치를 통하여 충돌에너지를 흡수하게 되며, 이로 인하여 승무원과 승객의 안전을 제공하게 된다. 에너지 흡수 장치에 대해서는 많은 연구들이 이루어져 왔으며, 대표적으로 유압식 완충장치와 소성변형방식의 에너지 흡수장치에 대하여 연구가 활발히 진행 되어 왔다. 그 중 변형튜브의 경우 주로 원형과 사각형에 대하여 연구가 주로 진행 되었으며, 원형튜브의 경우 주로 확관에 의한 에너지 흡수가 대표적[1,2,4~8]이며, 사각형의 경우 압괴 방식의 에너지 흡수 [3,9,12]를 사용 하였다.

이러한 튜브의 소성을 이용한 에너지 흡수방식의 경우 튜브의 구조체에 대한 국부적인 응력집중을 야기 할 수도 있다. 따라서 에너지 흡수를 위한 소성발생 시 좌굴 방지를 위한 연구[1,10]에 대해서 연구 되었다. 또한 튜브의 변형을 일으키기 위한 내부

1. 한국산업기술대학교 기계공학과

2. 유진기공산업(주) 철도차량부품기술연구소

# Corresponding Author : Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Korea Polytechnic Univ., E-mail: eastfamily@kpu.ac.kr

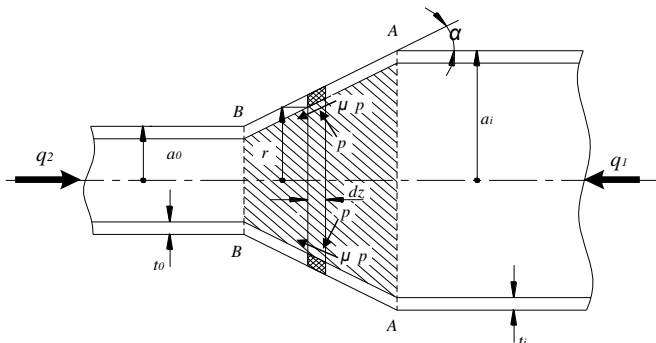


Fig. 1 Essentials for a slab force balance

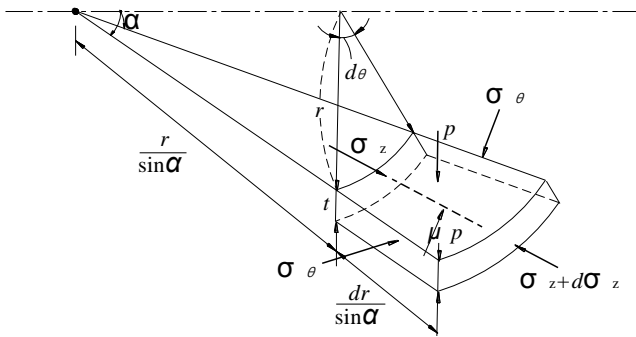


Fig. 2 Enlarged view of the slab for a force balance analysis during tube deformation

펀치에 대한 변수는 튜브와의 마찰을 일으킴과 동시에 변형에 의한 소성에너지를 발생 시키게 되는데 이 소성에너지는 내부 펀치의 반력을 통하여 확인되며, 이 반력과 변위 량은 에너지 흡수용량에 대한 측정기준이 될 수 있다.

이러한 반력에 대하여 이론 식을 도출하여 검토하는 연구[6,10]가 진행 되었다. 본 연구에서는 철도 차량에 적용하기 위한 원형튜브 확장 방식 에너지 흡수 장치의 요구조건에 맞는 에너지 흡수용량 설계를 위하여 필수적으로 예측이 필요한 반력을 이론적으로 접근하기 위하여 초등해법을 적용한 이론 해석과 이를 검증하기 위하여 동일한 모델에 대하여 유한요소해석의 결과를 상호 비교하였다.

## 2. 모델 분석

### 2.1 슬래브법(slab method) 모델 분석

변형튜브의 이론해석을 위하여 초등해법이라고도 불리는 슬래브 법(slab method)는 소성영역에서의 미소체적요소를 취하여 이를 자유물체로서 보고 이에

대한 평형방정식을 얻는다[13].

얇은 원관이 내부 펀치를 통하여 확장하는 과정을 축대칭 튜브의 변형으로 간주하고, 이를 슬래브 법으로 해석하고자 한다. 이를 위하여 슬래브법에 일반적으로 적용되는 가정인 작용하는 외력의 방향과 이에 수직한 면을 주 방향으로 보고 이들 평면 상에서 주 응력들은 일정, 또 표면마찰력의 영향은 평형방정식에서만 고려하고, 평면은 변형 중에도 평면을 유지, 균일변형 등의 가정을 그대로 적용한다. Fig. 1 과 Fig. 2 는 슬래브 법에 필요한 평형방정식을 도출하기 위해 변형영역에 설정한 미소물체에 작용하는 힘을 모두 도시한 것 이다[13].

Fig. 1 을 변형튜브가 튜브의 반경  $\sigma_0$  을  $\sigma_i$  까지 지름을 넓히는 가공을 수행하는 일종의 압출작용으로 볼 경우 펀치의 관외에 작용하는 응력은  $\sigma_z$ , 펀치 면부터 관에 작용하는 수직응력  $\sigma_r$  및 원주응력  $\sigma_\theta$  이다. 변형이 정상상태에 달하였다고 할 경우 Fig. 2 의 미소요소 힘의 평형을 고려하면 펀치에 수직 한 방향의 평형은 식 (1)과 같으며 펀치 벽에 평행 한 방향의 평형은 식 (2)과 같이 성립된다[13].

$$-\sigma_r \left( r d\theta \frac{dr}{\sin \alpha} \right) + \sigma_\theta \left( t \frac{dr}{\sin \alpha} \right) d\theta \cos \alpha = 0 \quad (1)$$

$$-(\sigma_z + d\sigma_z)(r+dr)d\theta(t+dt) + \sigma_z t r d\theta + \sigma_\theta \left( t \frac{dr}{\sin \alpha} \right) d\theta \sin \alpha + \mu \sigma_r \left( r d\theta \frac{dr}{\sin \alpha} \right) = 0 \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에 대해 간략화 하여 Lévy-Mises 의 식을 사용하여 정리하면  $r=r_0$  에서  $\sigma_z=0$  의 경계 조건을 사용하여 식 (3)과 같이 된다.

$$\sigma_z = mY \left( 1 + \frac{1}{B} \right) \left\{ 1 - \left( \frac{r_0}{r} \right)^B \right\} \quad (B = \mu \cot \alpha) \quad (3)$$

$q_i=0$  의 조건과  $r=r_i$  에서의  $\sigma_z$  을 구하게 되면 최종 출구에서의 반력  $P$  는 식 (4)와 같이 유도할 수 있다[13].

$$P = \pi(r_i + a_i) t_i \cdot \frac{(\sigma_z)_{r=r_i}}{\cos \alpha} \quad (4)$$

### 2.2 변형튜브 유한요소해석 모델 검토

변형튜브의 작동 시 튜브와 펀치의 상호작용에

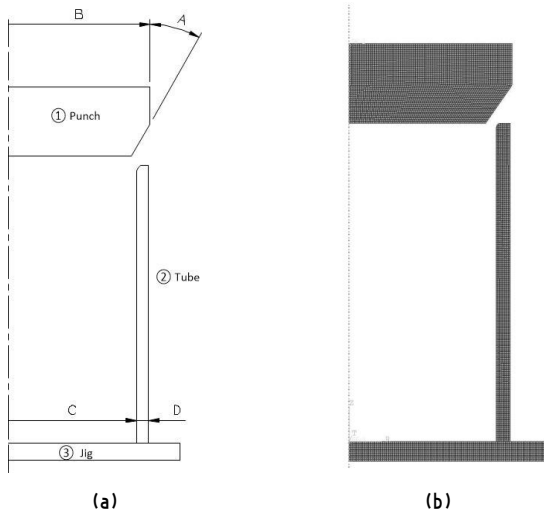


Fig. 3 Simulation model (a) Schematic diagram of model (b) FE model

의한 반력을 계산하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 변형튜브의 형상은 축 대칭 모델로서 Fig. 5와 같이 모델링을 선정하였다. 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS Standard / Implicit 코드를 사용하였으며 튜브의 요소 형태(shape)은 Quad 를 적용하였다. 요소 수는 튜브 두께 5mm 기준으로 2582 개 부터 두께 증가 모델 별 요소의 개수는 약 1000 개씩 증가 하였으며, 연관성 비교분석을 위한 주요 변수로서 펀치 인입 각인 “A”와 튜브의 두께인 “D”의 변수에 따라서 반력은 증감을 나타낼 것으로 예상되므로 Fig. 3 에서 주요 변수로서 채택 하였으며, 확관 비의 경우 단순히 예상 하더라도 전체 반력으로서 증감을 표현 할 수 있는 큰 변화 요소이지만 동일한 조건 하에서 세부 변수의 영향을 관찰 및 예측하고자 하는 것이 본 논문에서의 목표이므로 “B”와 “C”는 고정 값으로 두었다.

2.3 Simulation model 소재분석

산업 현장에서 수배가 쉬운 튜브재질인 STKM18B에 대하여 인장시험을 통하여 Fig. 4와 같이 응력-변형률 곡선을 취득하였다.

인장시험은 총 5개의 시편에 대하여 수행하였으며 실험데이터를 n승 경화형 곡선으로 근사화 하였다.

수식에서는 소성곡선에 대하여 소성 조건에 따라서 여러 소성 곡선의 적합성을 검토하여 채용하게 된다. 변형튜브의 경우는 확관 비율에 따른 변형률이

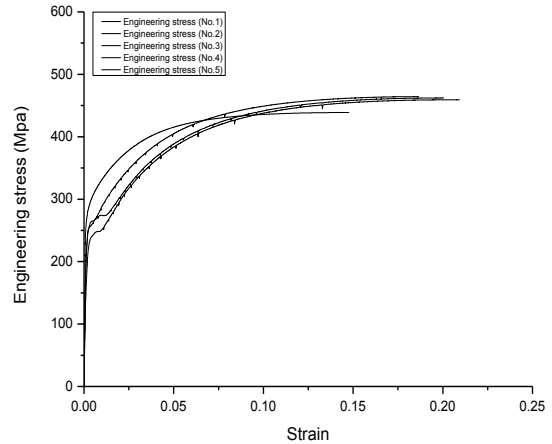


Fig. 4 Strain - Stress curves of tube materials

Table 1 Parametric study models

A (Degree)	D (mm)					B (mm)	C (mm)
	5t	6t	7t	8t	9t		
No.1	30°	30°	30°	30°	30°	165	149
No.2	32.5°	32.5°	32.5°	32.5°	32.5°	165	149
No.3	35°	35°	35°	35°	35°	165	149
No.4	37.5°	37.5°	37.5°	37.5°	37.5°	165	149
No.5	40°	40°	40°	40°	40°	165	149

(A: Punch angle, B: Punch diameter, C: Tube diameter D: Tube thickness)

반력에 영향을 미치며 수식에서는 변형과정에 대한 경화 곡선을 수식화 하지 않게 되므로 극한강도 값을 적용하여 강-완전소성곡선을 채용하고자 하며 유한요소해석에서는 응력-변형률 곡선을 필요하게 되므로 인장시험 시험 결과로부터 각 시편의 평균값을 사용하여 도출된 가공경화지수로서 나타내면  $n=0.24, K=847.7$ 로 나타났다.

3. 해석 및 결과

3.1 초등해법 해석 및 결과

튜브내 펀치의 인입 작용에 의한 튜브 확관 현상을 수식으로 검토하기 위하여 슬래브 법을 이용하여 유도 하였으며, 유도한 수식을 적용하여 반력 P에 대하여 계산을 통한 경향성을 분석하였다. 수식모델은 Fig. 3에 대응하는 각 치수를 대입 하였으며, 모든 계산 모델의 조건은 Table 1과 같다. 펀치 진입각의 영향, 튜브두께의 영향을 평가하기 위해

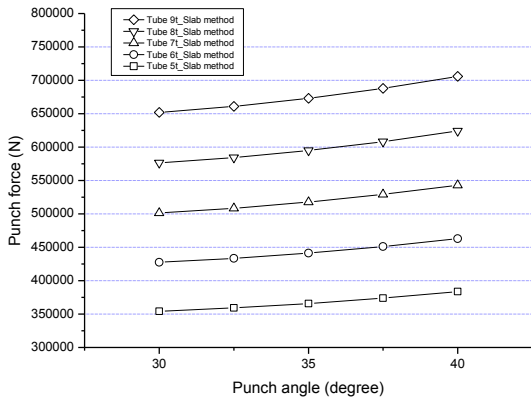


Fig. 5 The influence of punch angle on the punch force predicted by slab method

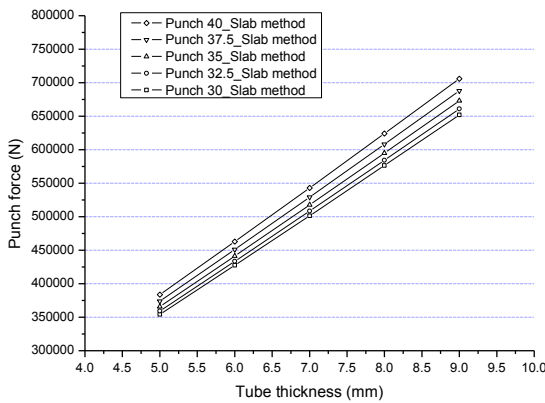


Fig. 6 The influence of tube thickness on the punch force predicted by slab method

두께 5mm~9mm, 진입 각 30°~40° 까지 2.5° 간격으로 매개변수 연구(parametric study)모형을 설정하고, 초등해법을 통하여 펀치의 반력을 계산 하였다.

Fig. 5 는 Table 1 모델에 대한 이론해석 결과를 종합적으로 나타내고 있으며 튜브의 각 두께 모델에 대하여 펀치의 각도 변경에 따라 반력의 증가량이 보여지고 있다. 펀치의 각도가 증가함에 따라 반력은 모든 모델이 거의 동일한 기울기를 가지며 증가함을 알 수 있다.

변형튜브의 반력 증가에 있어서 세부적인 변수로 튜브의 두께와 펀치의 진입 각 영향성에 대해서도 평가 하고자 하므로 Fig. 5의 각 모델 계산결과를 Fig. 6과 같이 펀치의 진입 각도 모델 기준으로 튜브의 두께변경에 의한 반력의 증감을 나타내었다. Fig. 6은 전체적으로 튜브의 두께가 증가함에 따라 반력의 증가량이 기존 펀치 진입 각도의 증가에 비하여 기울기가 큰 증가율을 보이고 있다.

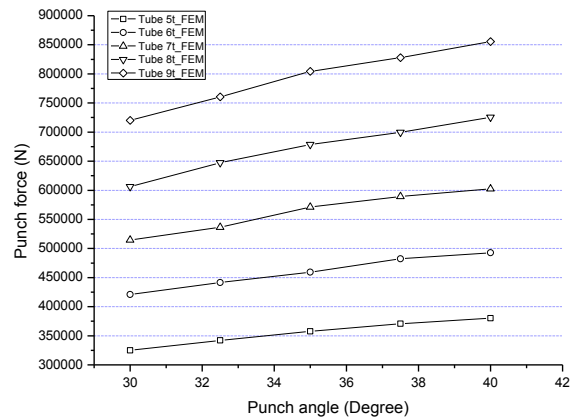


Fig. 7 The influence of punch angle on the punch force predicted by FEM

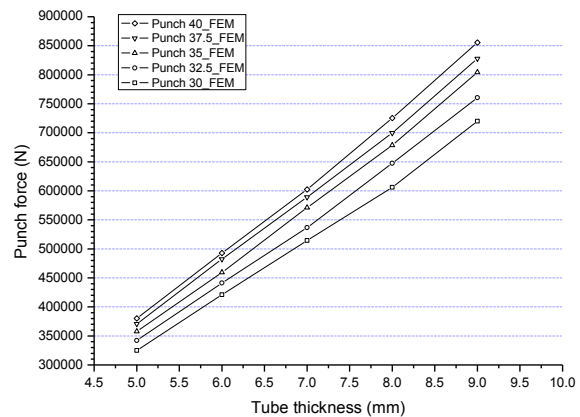


Fig. 8 The influence of tube thickness on the punch force predicted by FEM

### 3.2 유한요소해석 및 결과

Fig. 7 은 Table 1 에서 나열한 기준 모델에 대하여 유한요소해석결과를 나타내고 있으며 각 튜브 두께 모델에 대하여 펀치 진입각 증가에 따른 반력 증가 경향성을 나타내고 있다.

Fig. 8 은 Fig. 7 의 결과를 펀치의 진입 각 기준모델에 대한 튜브의 두께 변화 조건으로 재배치하여 반력의 경향성을 나타내고 있다. 유한요소해석 결과에서도 이론해석과 마찬가지로 펀치 진입 각도에 의한 반력 증가량 보다 튜브 두께에 의한 반력 증가량이 큰 것을 볼 수 있다.

### 3.3 슬래브법과 유한요소해석 결과 비교

Fig. 9는 이론해석 모델과 유한요소해석 모델의 펀치 반력에 대하여 비교를 나타내고 있다. 전체적으로 얇은 튜브의 두께와 작은 펀치의 진입각 모델

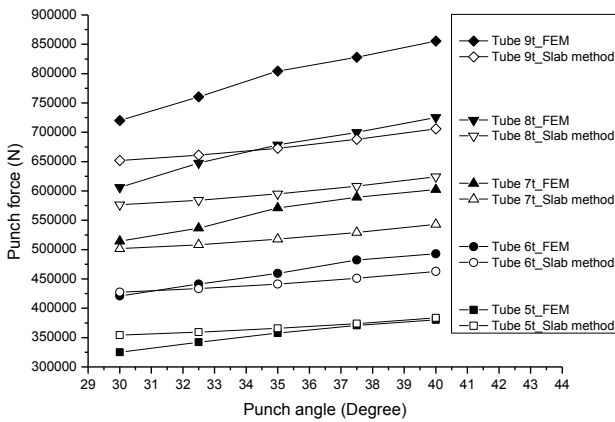


Fig. 9 Slab method-FEM models analysis result comparison

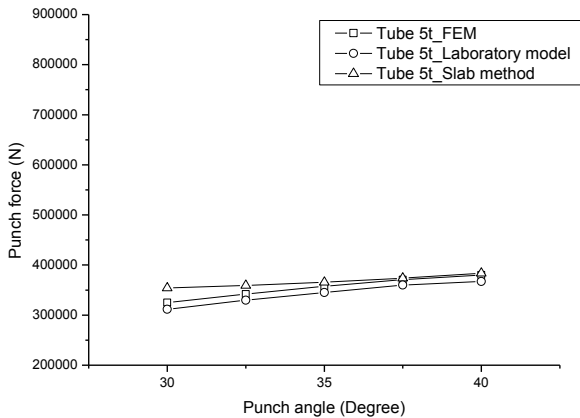


Fig.10 Slab method-FEM-Laboratory models analysis result comparison

에서는 이론 해석과 유한요소해석의 결과가 상당히 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 튜브 두께 5 mm 모델에 대하여 두 해석 결과와 실제 시험모델을 비교한 결과 Fig. 10에서와 같이 상당히 유사한 반력 변화의 경향을 확인하였다. 유한요소해석과 이론해석의 결과를 통하여 특히 튜브 두께 5mm 모델의 펀치 인입 각 32.5~40°와 튜브 두께 6mm 모델의 펀치 인입 각 30~32.5° 그리고 튜브 두께 7mm 모델의 펀치 인입 각 30°의 경우에는 거의 비슷한 반력을 서로 나타내고 있음을 알 수 있었다. 다만 펀치 인입 각의 증가에 따른 전체적인 경향성을 비교하여 보면 이론해석에서는 각도의 증가에 따라 점점 반력의 증가율이 상향되고 있으나, 유한요소해석결과에서는 점점 증가율이 감소 되는 경향을 나타내고 있다. 해당 부분은 이론해석에서 유도된 수식은

튜브의 확관 시 관두께의 변화에 대한 영향과 펀치 반력에 따른 소성 변형시 마찰계수 변화 등의 영향을 반영하지 않은 결과로 판단된다.

### 4. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 논문은 슬래브법을 통하여 에너지 흡수능력평가의 핵심요소인 변형튜브의 반력을 예측하기 위한 수식을 제시 하였다.
- (2) 슬래브법에서 제시한 수식을 이용해 펀치의 진입 각과 튜브 두께에 따른 펀치 반력의 변화 형태를 계산하고, 그 결과를 유한요소해석결과와 비교 분석 하였다.
- (3) 슬래브법을 통한 이론해석과 유한요소 해석에 대한 상호비교를 통하여 튜브 두께 7mm 이하 모델에서 각 변수에 따른 반력이 상당히 유사함을 확인 하였고 그 변화가 동일한 경향성을 나타내어 본 연구의 타당성을 확인 하였다.
- (4) 수식에서 관 두께의 변화 및 추가 소성학적 현상에 대하여 고려하도록 보강이 이루어 진다면 7 mm 이상의 튜브에서도 상당히 유사한 예측결과를 나타낼 수 있을 것으로 판단 된다.

### 후 기

본 연구는 국토교통부의 철도기술연구사업(15 RTRP-B082459-02-000000) “철도 핵심 부품/장치 기술 개발 2 단계”의 “대용량 에너지흡수장치가 적용된 TSI 표준형 연결기 시스템 개발”의 지원으로 수행 되었습니다.

### REFERENCES

[1] K. H. Ahn, 2008, Study on the Crash Energy Absorption and Dynamic Local Buckling of the Expansion Tubes, Master Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon.

[2] J. Yang, M. Luo, Y. Hua, G. Lu, 2010, Energy Absorption of Expansion Tubes using a Conical-cylindrical Die: Experiments and Numerical Simulation, Int. J. Mech. Sci., Vol. 52, No. 5, pp. 716~725.

- [3] J. H. Lim, Y. I. Chung, 2009, Development of Automotive Crash Box with Tube Expansion Type, KSAE, KSAE09-A0413, pp. 2427~2432.
- [4] J. MD, M. J. Davidson, G Venkateswarlu, L. Venugopal, 2011, A Study on Effect of Process Parameters on the Expansion of Thin Walled Aluminium 7075 Tubes, Int. J. Adv. Sci. Tech., Vol. 36, pp. 88~94.
- [5] W. M. Choi, T. S Kwon, 2009, Experimental Investigation on Effect of Conical Angle of Punch on Energy Absorbing Characteristic of Expansion Tubes, KSAE 09-B0287, pp. 1712~1717.
- [6] S. J. Heo, J. H. Lee, J. S. Koo, 1998, Design of Impact Energy Absorber for High Speed Railway Vehicles, J. Kor. Soc. Rail., pp. 377~384.
- [7] W. M. Choi, T. S. Kwon, H. S. Jung, J. S. Kim, 2011, Study on Rupture of Tube Type Crash Energy Absorber using Finite Element Method, W. Aca. Sci. Eng. Tech., Vol. 5, pp. 538~543.
- [8] X. M. Qiu, L. H. Hea, J. Gub, X. H. Yua, 2013, A Three-Dimensional Model of Circular Tube Under Quasi-Static External Free Inversion, Int. J. Mech. Sci., Vol. 75, pp. 87~93.
- [9] R. Velmurugan, R. Muralikannan, 2009, Energy Absorption Characteristics of Annealed Steel Tubes of Various Cross Sections in Static and Dynamic Loading, Lat. Am. J. Solids Struct., Vol. 6, No. 4, pp. 385~412.
- [10] W. M. Choi, H. S. Jung, T. S. Kwon, 2007, Proc. Kor. Soc. Mech. Eng. 2007 spring annual meeting, Kor. Soc. Mech. Eng., Seoul Korea, pp. 2773~2778.
- [11] R. Azizi, S. Salehghaffari, 2009, Energy Absorption in Plastic Expansion of Circular Metal Tubes, Int. Confer. on Comput. Plast., CIMNE, Barcelona.
- [12] C. W. Kim, B. K. Han, J. J. Won, C. H. Lim, 1996, The Energy Absorption Characteristics of Thin-walled Rectangular Tubes, SAE, Vol. 4 No. 3, pp. 83~91.
- [13] D. W. Kim, 1998, Plasticity, Cheongmungak, 116 Munbal-ro, Paju-si, Gyeonggi-do, Korea, pp.133~162.