

# 진공회로차단기용 횡자계방식 접점의 충격 해석

박 우 진\*, 안 길 영\*, 오 일 성\*, 허 훈\*\*

## Impact Analysis of Spiral type Electrodes in Vacuum Circuit Breaker

W. J. PARK, K. Y. AHN, I. S. OH, H. HUH

**Key Words :** Vacuum Interrupter (진공 인터럽터), Dynamic characteristic(동적 특성)

Explicit Finite Element Method(외연적 유한요소법), Stress Wave(응력파)

### Abstract

It is very important for impact analysis to reflect the dynamic characteristics of materials as well as the static characteristics. As the dynamic behavior of a material is different from the static(or quasi-static) one due to the inertia effect and the stress wave propagation, an adequate experimental technique has to be developed to obtain the dynamic responses for the corresponding level of the strain rate. To determine the dynamic characteristics of materials, the Hopkinson bar (compression type) experiment is carried out. For using dynamic material properties, Johnson-Cook model is applied in impact analysis with explicit finite element method.

### 1. 서 론

최근 고도의 산업발달과 전력장비의 사용증가로 인하여 전력소모량이 많아지면서 진공회로차단기(Vacuum Circuit Breaker; VCB)의 본 목적에 대한 신뢰성이 높이 요구되고 있다. 송전시스템에서 대전류 차단용으로 꼭넓게 사용되고 있는 진공회로차단기는 점차 대형화되어가는 전력설비용량과 더불어 이에 알맞은 초고압 대용량의 차단기를 필요로 하고 있다. 진공회로차단기는 전기적인 과부하를 차단하는 송전시스템의 핵심 장비이므로 이에 대한 기술력 확보는 필수적인 요건이다. 특히 VI(Vacuum Interrupter)는 진공회로차단기내에서 사고전류 시 전류를 신속하게 차단, 소호시키는 기구로써 진공회로차단기의 핵심 부품이다.

VI가 대전류를 차단하는 원리는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 아크주에 수직으로 작용하는 자계에 의해 아크를 원주방향으로 빠르게 회전시키는 횡자계(Radial magnetic field)방식과, 아크와 평행한 자계를 인가하여 아크를 접점 표면에 고르게

확산시켜 안정화시키는 종자계(Axial magnetic field)방식이 바로 그것이다. 이와 같은 VI의 전극형상 및 재료는 진공회로차단기의 기본성능을 결정짓는 중요한 요소이며, 큰 충격력을 견뎌야 하고 접점의 소모가 작아야 하기 때문에 전극형상 및 재료의 충격특성에 관한 연구가 필요하게 된다.

VI는 보통 수 ms정도의 짧은 시간에 접점의 개폐가 이루어 지므로 접점에는 큰 충격력이 발생하게 된다. 재료의 충격에 의한 동적특성(Dynamic characteristic)은 고체내의 응력파 전파 및 물리적 특성으로 인하여 정적특성과는 크게 다른 양상을 나타내며, 재료의 동적 변형기동은 변형률 선도에 중요한 영향을 받는 것으로 알려져 있기 때문에 동적 또는 충격하중을 받는 구조물을 해석하거나 설계하려면 변형률 속도에 따른 그 재료의 여러 가지 기계적 특성을 결정하는 것이 선결되어야 한다. 따라서 보다 정확한 해석을 위해서는 재료의 동적 물성치를 추출하여 충격특성이 고려된 해석을 수행하는 것이 바람직 하다.

본 논문에서는 횡자계방식 VI의 고속 충격 특성을 평가, 이해하기 위하여 흡킨슨바를 이용한 충격실험을 통하여 소재의 동적 물성치를 추출하였고 외연적 유한요소 프로그램인 LS-DYNA를 이

\* LG 산전(주) 전력연구소

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

용하여 유한요소해석을 실시하였다. 또한 VI제품의 충돌실험을 실시하였으며 실험결과와 비교하여 동적 물성치를 이용한 해석의 타당성을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 흡킨슨바 실험장치와 기본이론

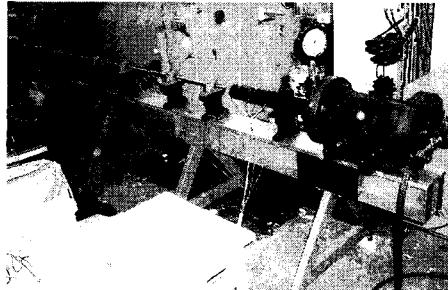


Fig. 1 Hopkinson bar apparatus(compression type)

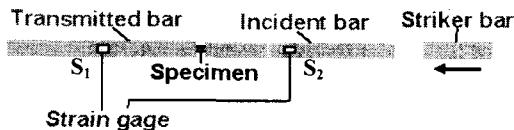


Fig. 2 Basic components of Hopkinson bar apparatus

압축형 흡킨슨바 시험기는 두개의 긴 봉 사이에 시험하고자 하는 시편을 위치시키고, 충격봉을 이용하여 시편에 압축 하중을 가한 후 긴 봉에 발생하는 변형률을 측정하여 시편의 응력-변형률 관계를 구하는 시험 장치이다(Fig. 1, 2 참조). 이 장치는 일반적으로 수백-수천/sec 의 변형률 속도범위에서 재료의 물성치를 구하는데 이용되고 있으며 Fig. 2 과 같이 충격봉(striker bar), 입력봉(incident bar), 출력봉(transmitted bar) 등으로 구성되어 있다.

흡킨슨바 시험장치에서 충격봉이 발사되어 입력봉에 충격을 가하게 되면, 입력봉내에 변형률  $\varepsilon_i$ 를 갖는 압축파가 발생한다. 이 압축파가 입력봉의 다른 끝에 도달하면 임피던스의 차이에 의하여 압축파의 일부는 변형률  $\varepsilon_r$ 을 갖는 인장파로 반사되고 다른 일부분은 시편을 소성변형 시키고 출력봉으로 변형률  $\varepsilon_t$ 를 갖는 압축파로 전파된다. 이러한 입력파, 반사파, 투파파의 시간에 대한 변화는 스트레이인게이지  $S_1$ 과  $S_2$ 에 의하여 측정된다.

시편이 균일하게 변형할 때 시편내의 변형률 속도는 반사파의 크기에 비례하며, 시편내에 가해진 응력의 크기는 투파파의 크기에 비례한다. 시

편내의 변형률속도는 다음과 같이 식 (1)로 표현 할 수 있다.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_{input}(t) - V_{output}(t)}{L} \quad (1)$$

$V_{input}(t)$ 과  $V_{output}(t)$ 는 각각 응력파가 시편의 양 끝 단으로 도달할 때와 나갈 때의 시편 양 끝 단에서의 속도이고  $L$ 은 시편의 길이이다. 봉에서 응력 및 변형률 분포가 일 차원이라 가정할 때, 탄성파의 전파이론에 의한 특성선(Characteristic line)에서는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$C_o \varepsilon(t) \pm V(t) = const \quad (2)$$

여기서  $C_0$ 는 봉 내의 탄성파의 전파속도이며, 위의 관계식을 이용하면 다음과 같은 관계를 구할 수 있다.

$$V_{input}(t) = C_0 \{ \varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) \} \quad (3)$$

$$V_{output}(t) = C_0 \varepsilon_t(t) \quad (4)$$

식 (1) 및 식(3), 식(4)를 이용하면 변형률 속도  $\dot{\varepsilon}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{L} \{ \varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t) \} \quad (5)$$

또한 시편의 양 끝에 걸리는 힘은 각각 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{input}(t) = EA_o \{ \varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) \} \quad (6)$$

$$P_{output}(t) = EA_o \varepsilon_t(t) \quad (7)$$

여기서  $A_o$ 는 입력봉 및 출력봉의 단면적이다. 시편에 응력파가 처음 도달하게 되면 응력파가 처음 도달한 쪽은 충격력이 걸리게 되나 반대편은 아직 충격력이 작용하고 있지 않다. 그러나 응력파가 시편의 반대편에 도달한 후 다시 반사되어 시편 내를 3 회 정도 왕복하게 되면 시편의 하중 상태는 균일하다고 볼 수 있으며, 시편 내부의 응력은 다음의 식(8)과 같이 평균적인 값을 취할 수 있게 된다.

$$\sigma(t) = \frac{P_{input}(t) + P_{output}(t)}{2A} \quad (8)$$

여기서  $A$ 는 시편의 단면적이다. 시편 양단에 걸리는 힘이 같다고 가정하면 식(6) 및 식(7)에 의하여 아래와 같이 입사파, 반사파 및 투파파 사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon_I(t) + \varepsilon_R(t) \cong \varepsilon_T(t) \quad (9)$$

식(9)를 이용하여 시편의 응력 및 변형률을 구하면 아래와 같다.

$$\sigma(t) = E \frac{A_o}{A} \varepsilon_T(t) \quad (10)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_o}{L} \varepsilon_R(t) \quad (11)$$

식(11)을 적분하게 되면 다음과 같이 시편에서의 변형률을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) d\tau \quad (12)$$

재료의 동적 물성치를 표현하는 식은 여러 가지가 있지만 변형률 속도에 의한 경화효과와 접점에서 발생하는 열에 의한 연화효과를 잘 나타낼 수 있는 Johnson-Cook 구성방정식을 사용하였다. 구성방정식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = [A + B\bar{\varepsilon}^n][1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}] [1 - T^{*m}]$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{meth} - T_{room}} \quad \dot{\varepsilon}_0 = 1/\text{sec}$$

1st term : strain hardening  
2nd term : strain rate hardening  
3rd term : thermal softening (13)

여기서  $A$ 는 재료의 항복 응력이고  $B, n$ 은 변형률 경화에 따른 계수이며  $C, m$ 은 변형률 속도와 온도에 의한 계수이다. 위의 계수값들은 재료의 정직실험과 흡킨슨바 압축실험을 통하여 얻어진 응력-변형률 관계로부터 얻어낼 수 있으며 이를 이용하여 LS-DYNA를 이용한 충격해석을 시행하게 된다.

## 2.2 VI 충격실험

유한요소해석결과의 신뢰성을 검토하기 위하여 Fig. 3과 같은 VI의 충격실험장치를 이용하여 실제 충격하중을 발생시켜 변형률을 측정하여 그 결과를 비교하여 보았다.

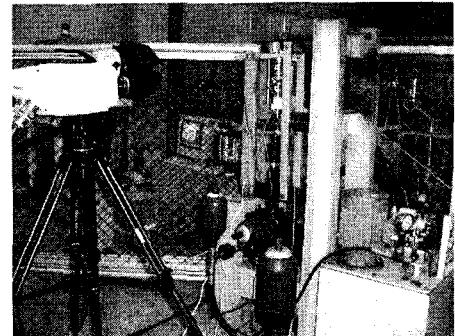


Fig. 3 Experiment setup for impact test

Fig. 3에서 우측부분은 유압을 이용한 충격실험 장치이며 여기에 VI가 설치되어 하부접점을 상승 운동시켜 충격이 발생하는 투입동작을 수행하게 된다. 이때 충격이 발생하는 순간을 좌측부분의 고속촬영장치(4500frames/s)를 이용하여 촬영하였다. 아래의 Fig. 4에서 좌측그림과 같이 고정접점과 가동접점에 마커(Marker)를 부착시켜 가동접점의 속도와 가속도를 구해내게 된다. 또한 아래의 우측그림과 같이 응력이 집중되는 접점의 주요부위에는 strain-gage를 부착하여 변형률을 측정하도록 하였다.

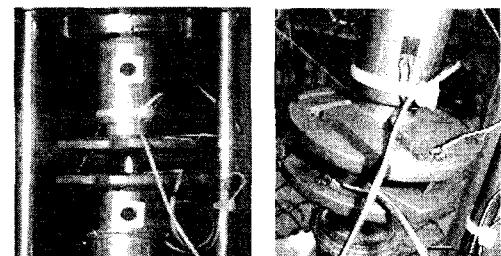


Fig. 4 Marker and strain-gage setup

위의 실험을 통하여 측정된 가동접점의 시간에 따른 변위는 Fig. 5와 같다. 그림에서 가동접점부가 동작되는 10~18ms 범위의 구간중 충돌 근접부위인 최종 10%구간의 데이터를 이용하여 충돌시 속도와 가속도를 계산하였다. 또한 이때 얻어진 충돌속도와 변형률값을 이용하여 동일한 조건에서 유한요소해석을 수행하였고 그 결과와 비교하여 해석결과의 타당성을 검토하였다.

#### 4. 실험 및 해석 결과

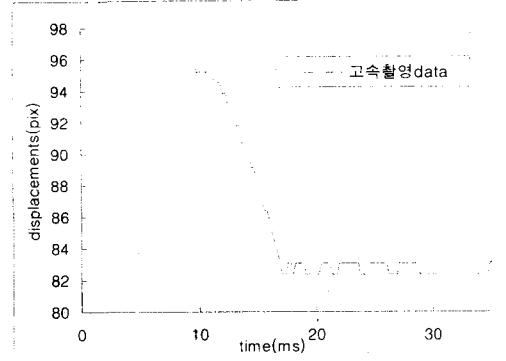


Fig. 5 Displacements result of experiment at closing

#### 3. 유한요소 모델링

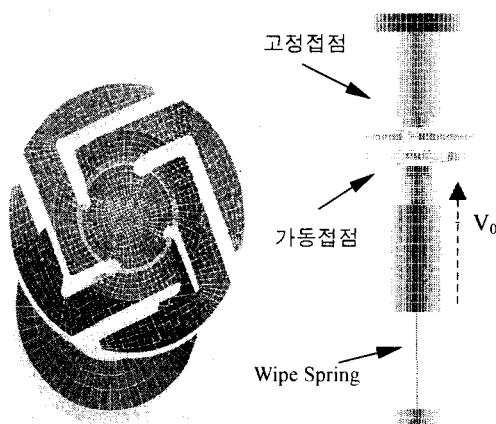


Fig. 6 Finite element model of VI(spiral type)

Fig. 6 은 접점의 유한요소모델링 내용을 보여주고 있다. 횡자계방식 접점의 구성은 위의 우측 그림과 같으며 크게 상부의 고정접점과 하부의 가동접점으로 분류할 수 있다. 전류가 차단되어진 상태에서는 상, 하부의 접점은 떨어져 있으며 전류 투입시 하부의 가동접점이 상승 운동하여 고정 접점에 붙으면서 충격하중이 발생하게 된다. 초기 상태의 양 접점사이의 거리는 일정한 간격을 유지하고 있으며 가동 접점이 초기속도( $V_0$ )를 가지고 상승하여 고정 접점과 충돌하게 된다. 충돌직후 가동접점의 반발을 방지하기 위한 와이프 스프링(Wipe spring)은 초기 압축량(Initial-offset)을 가지고 고정되어있다. 충돌 후에도 Wipe-spring 은 추가 압축량(Additional-offset)을 가지며 이는 가동접점의 충돌 후 반발을 막기위한 것이다.

Fig. 7 는 흡킨슨바 압축실험을 통하여 얻어진 접점재료의 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도를 보여주고 있다. 여기서 변형률 속도가 커질수록 재료의 강성이 크게 증가하고 있음을 볼 수 있으며 이를 통해 정적인 상태나 준 정적 상태에서의 응력-변형률 선도는 변형률 속도가 수백, 수천에서의 형태와 크게 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 재료의 정적인 물성치를 이용하여 변형률 속도가 크게 나타나는 충격해석을 수행하였을 때 문제가 나타날 수 있음을 예시하고 있다. 이러한 경우 충격하중의 정도와 변형률 속도의 범위를 고려하여 재료의 동적 물성치를 고려한 해석이 이루어져야 함을 알 수 있다.

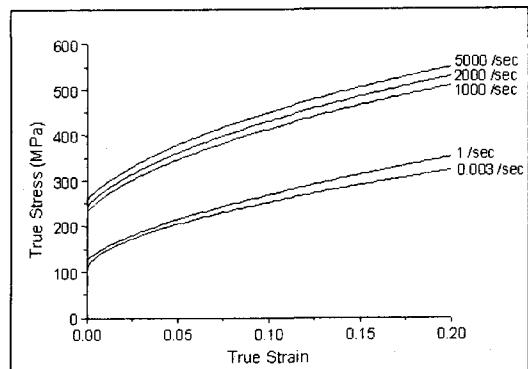


Fig. 7 Stress-strain curve

압축형 흡킨슨바 실험을 통하여 얻어진 동적 물성치를 바탕으로 Johnson-Cook 구성방정식을 적용하여 외연적 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하여 충격해석을 수행하였다.

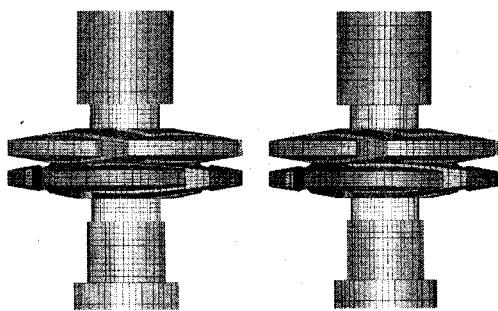
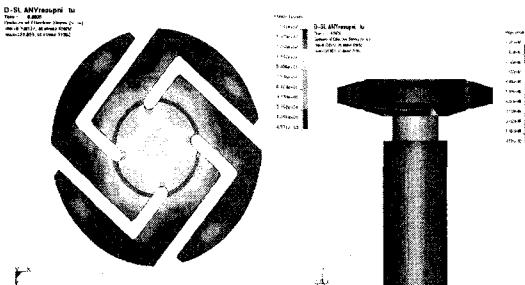


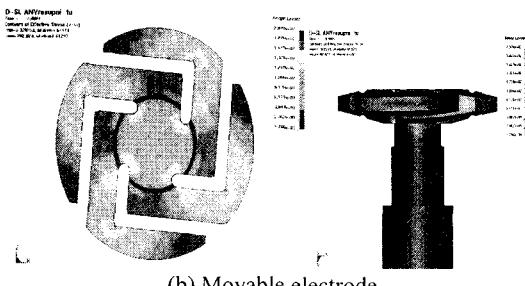
Fig. 8 Deformation shapes of VI

Fig. 8 은 충돌직후 가동접점의 날개부위가 출렁이며 변형되어지고 있는 형상을 보여주고 있다.

이 변형부위는 수 차례에 걸쳐 상하운동을 반복하며 출렁거리는 현상을 나타내고 있었으며 이러한 현상은 실제 VI의 충격실험에서도 발견되어짐을 확인하였다. 이처럼 가동접점과 고정접점의 변형 형태가 달랐으며 이것은 각 접점에서의 응력분포에서도 차이를 나타내게 되는 원인을 제공함을 알 수 있다.



(a) Fixed electrode



(b) Movable electrode

Fig. 9 Stress distribution of electrodes

위의 그림은 LS-DYNA의 Post-processor인 ls-post를 이용하여 응력분포도(Von-Misses stress distribution)를 나타낸 것이다.

고정접점의 경우(Fig. 9(a)) 충돌직후 접촉이 일어나는 부위에 응력이 집중되며 최대응력이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 가동접점의 경우(Fig. 9(b)) 시간이 지남에 따라 응력파가 날개 끝 부위로 전파되면서 응력집중부가 날개의 껍임부위로 옮겨지며 최대응력은 충돌 후 날개의 끝부위가 출렁이는 구간에서 발생하고 있다. 따라서 가동접점과 고정접점은 최대응력 발생부위와 발생시간에서 서로 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 최대 응력값은 가동접점부에서 나타나고 있었다.

해석결과로 보여진 가동접점부의 응력상태의 신뢰성을 검토하기 위하여 최대응력이 발생하는 부분인 날개의 껍임부에 Strain-gage를 부착하여 접점의 충돌실험을 수행하였으며 얻어진 변형률을 이용하여 시간에 따른 응력변화를 구해 해석결과

와 비교하여 보았다.

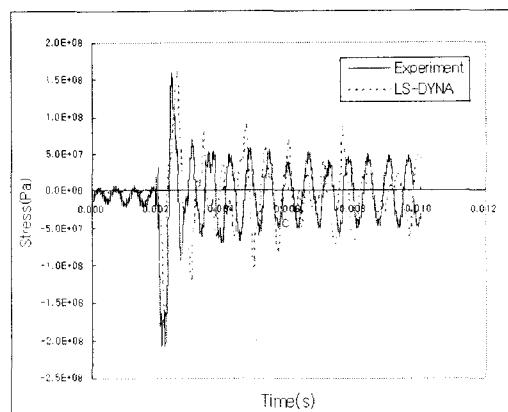


Fig. 10 Time-Stress curves (Movable electrode)

Fig. 10은 LS-DYNA를 이용하여 유한요소해석을 실시하여 얻어진 시간에 따른 응력곡선을 실제 실험을 통하여 얻어진 결과와 비교한 내용을 보여주고 있다. 충돌직후 최대응력이 발생하는 부분에서는 실험과 해석의 결과가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

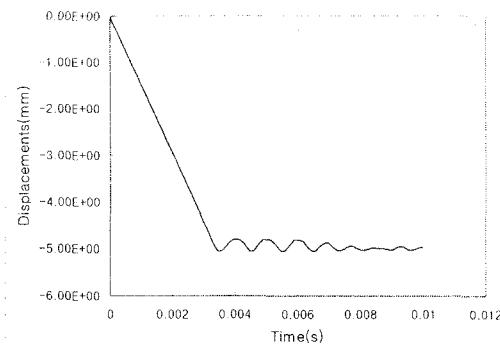


Fig. 11 Nodal displacements

Fig. 11은 접촉면 위에 있는 임의의 절점에서의 시간에 따른 변위속도를 나타낸 것이다. 충돌직후 약 5 회 정도의 되튀김(Chattering) 현상이 발생하고 있으며 그 후 되튀김 현상은 시간이 흐름에 따라 점차 감소하고 있음을 파악할 수 있다.

이러한 되튀김 현상은 전력기기 제품인 VI의 특성상 전류의 순간적인 투입에 영향을 미칠 수 있는 매우 중요한 요소이며 이를 감소시키기 위한 접점 형상의 최적설계나 구조적 설계변경이 요구된다.

## 5. 결 론

본 논문에서 재료의 동적 물성치를 추출하여 LS-DYNA 의 Johnson-Cook 구성방정식을 이용한 유한요소해석의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 재료의 정적특성과 동적특성은 응력-변형률 선도에서 변형률 속도에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있다.
- (2) 충돌현상과 같이 짧은 시간에 두 물체의 접촉이 일어날 경우 변형률 속도 경화를 고려하여 해석하는 것이 준 정적 물성치만으로 해석한 경우보다 정확한 해를 얻을 수 있다.
- (3) 외연적 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA에서 재료의 변형률 속도 경화 효과를 고려하기 위해서는 Johnson-Cook Material 과 같은 동적 특성을 고려한 물성치를 사용하는 것이 바람직하다.
- (4) 해석결과 응력집중이 일어나는 취약부위는 가동접점과 고정접점의 경우 서로 다른 부위에서 발생하고 있음을 관찰할 수 있었다.
- (5) 충돌직후 접촉부위에서 반발력에 의한 되튀김현상(Chattering)이 발생함을 알 수 있었으며 이를 방지하기 위한 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- (1) 강우종, 조상순, 허훈, 정동택, 1997, “새로운 Tension Split Hopkinson Bar 를 이용한 박관의 고속인장시험,” 대한기계학회논문집 A, Vol. 21, No.12, pp. 2209~2219
- (2) 강우종, 2000, “외연적 유한요소법을 이용한 차체 구조물의 충돌해석,” 한국과학기술원 박사학위논문.
- (3) Zukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Greszczuk, L. B. and Curran, D. R., 1982, *IMPACT DYNAMICS*, A Wiley-Interscience Publication.
- (4) 이승우, 홍성인, 2000, “홉킨슨 압축봉에서의 동적 재료특성에 관한 수치해석적 연구,” 대한기계학회논문집 A, Vol. 24, pp.1438~1445
- (5) Goldsmith, W., 1960, *Impact-The theory and physical behaviour of colliding solids*, Edward Arnold Ltd.