

등가강성모델을 활용한 힌지체결부 동특성 동정[§]

원준호^{*†} · 임체규^{*} · 이두호^{**} · 최주호^{*}

* 한국항공대학교 기계공학과, ** 동의대학교 기계공학과

Dynamic Property Identification of Structural Systems with Hinge Joint Using Equivalent Stiffness

Junho Won[†], Che Kyu Lim^{*}, Doo-Ho Lee^{**} and Joo-Ho Choi^{*}

^{*} School of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.,

^{**} Dept. of Mechanical Engineering, Dong-Eui Univ.

(Received May 29, 2012 ; Revised August 27, 2012 ; Accepted August 27, 2012)

Key Words: Dynamic Property Identification(동특성 동정), Hinge Joint(힌지조인트), Equivalent Stiffness(등가강성), Finite Element Method(유한요소법), Frequency Response(주파수 응답)

초록: 어셈블리 시스템의 동적거동을 예측하기 위해서는 그 시스템의 체결에 사용된 조인트의 동특성을 정확히 아는 것이 중요하다. 그러나 이들 체결부의 동특성은 매우 큰 산포로 인하여 해석 또는 실험적인 방법으로 동특성을 동정하기 까다로우며, 때로는 불가능 한 경우도 있다. 체결부 동특성 동정 관련 선행 연구사례는 대부분이 실험과 해석을 연계한 방법이며, 그 대상은 볼트조인트에 국한되어 있다. 본 연구에서는 힌지조인트를 대상으로 체결부의 동특성을 동정하는 간단한 방법을 제시한다. 본 연구에서 제시하는 방법의 타당성을 입증하기 위해 두 개의 빔이 힌지조인트에 연결된 체결구조물을 제작하여 주파수-응답 실험을 실시하고 그 결과를 제시된 방법의 결과와 비교/검증한다. 그리고 본 연구에서 제안하는 방법을 실제 자동차에 사용되고 있는 글로브박스(Glove Box)의 힌지조인트에 적용해 보았다.

Abstract: The identification of the dynamic properties of structural joints is important for predicting the dynamic behavior of assembled systems. However, the identification of the properties using analytical or experimental approaches is extremely difficult or even impossible. Several studies have proposed hybrid or synthesis methods that simultaneously used analytical and experimental approaches to identify the dynamic properties of a joint. However, among the many types of joints, only the bolt joint was treated as a practical example in these studies. In this study, for a simple assembly system comprising two plates and one hinge joint, a simple methodology involving the use of the static-based subpart analysis method to identify the dynamic properties is proposed. Finally, the proposed method is applied to a glove box in a passenger vehicle that includes hinge joints.

1. 서론

과거 수십 년 동안, FEM(Finite Element Method)은 공학 분야의 많은 발전을 이끌어 왔으며, 현재는 하나의 표준기술로 자리 잡고 있다. 그러나 볼트+너트, 힌지, 리벳, 열융착 등과 같은 조인트로 연결된 복잡한 구조로 구성된 어셈블리 시스템의 동적 거동을 예측하기 위해서는 많은 해석

시간을 필요로 하고, 정확도 역시 높지 않을 경우가 많다. 이는 첫째 유한요소모델 생성 시 어셈블리를 구성하고 있는 조인트의 상대적인 크기로 인해 요소의 수가 증가하게 되며 그 결과 더욱 긴 해석 시간이 요구되며, 둘째, 조인트의 체결구조의 산포가 크고, 해석 수행 시 이러한 조인트의 특성을 잘 정의하지 못하기 때문이다. 그러므로 조인트를 포함한 구조물의 정확한 거동 예측을 위해서는 조인트의 특성이 실제의 값으로 잘 정의되어야 한다.

조인트의 동특성은 일반적으로 강성, 댐핑계수 등의 조합으로 표현될 수 있는데, 조인트의 정확

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계 학술대회(2012. 5. 10.-12., 제주 휘닉스아일랜드) 발표논문임

† Corresponding Author, openworldsm@gmail.com

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

한 동특성을 동정하기 위한 연구사례는 다음과 같다. Yang과 Park⁽¹⁾의 경우 조인트의 동특성을 동정하기 위하여 모달인자(modal parameter)를 사용하였다. 이 방법은 정확한 모달 데이터가 필요하지만 일반적으로 모달 데이터를 측정하기란 쉽지 않으며, 밀결합(closely coupled)된 구조나 댐핑이 큰 모드인 경우 모달 데이터를 측정하기는 더욱 어렵다. 모달 데이터 측정의 어려움을 극복하기 위한 방법으로 조인트를 제외한 부분구조물의 주파수-응답(frequency-response)과 조인트를 포함한 전체구조물의 주파수-응답 데이터에 최소자승법(least square method)을 적용함으로써 조인트의 동특성을 동정하는 방법도 제시되었다. Tsai와 Chou⁽²⁾는 하나의 볼트로 구성된 체결구조를 이용하여 볼트 조인트의 동특성을 동정하는 방법을 제시하였으며, Ren과 Beards⁽³⁾는 다수의 강체와 유연한 조인트로 구성된 구조를 제안하고 이를 활용하여 주파수-응답기반 조인트의 동특성 동정 기술을 일반화 하였다. 이 방법은 실험데이터를 기초로 하여 동강성 행렬과 질량행렬 그리고 댐핑행렬 구성하는 방법이다. Liu⁽⁴⁾는 앞서 언급한 Ren⁽³⁾의 방법에 기초하여 선형 조인트 모델을 제시하였다.

조인트의 동특성 동정에 대한 연구사례를 자유도(degree of freedom)의 측면에서 살펴보면 초기 연구의 경우 조인트가 가지는 회전방향 자유도(rotational DOFs)를 제외한 병진방향 자유도(translational DOFs)만을 고려해 주었다.^(5,6) 그러나 이러한 방법은 실제 조인트부의 특성을 잘 반영하지 못하였다. 조인트의 회전방향 자유도를 포함하기 위한 방법으로 조인트를 병진스프링 및 회전스프링의 조합으로 구성하는 연구사례도 있었지만 이는 병진과 회전방향의 상호결합항(cross coupled term)이 반영되지 못하였다. Yang 등⁽⁷⁾에 의해 coupled stiffness matrix가 제시되었으며 기존 연구의 문제점을 해결하였다.

앞서 언급한 대부분의 연구사례들이 모달데이터 혹은 주파수-응답 데이터와 같은 실험을 바탕으로 조인트의 동특성을 동정한 것이다. 본 연구에서는 실험이 아닌 유한요소해석에 기반을 둔 조인트 동특성 동정 방법을 제시한다. 이 방법의 장점은 조인트가 포함된 서브파트(subpart)의 상세 모델링을 통해 해석적으로 조인트의 동특성을 동정함으로써 실험을 실시하지 않고서도 쉽게 동특

성을 동정할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서 제시하는 방법의 타당성을 입증하기 위해 힌지조인트로 연결된 단순 체결구조물을 제작하고 주파수-응답실험을 실시, 본 방법에서 제시한 동특성 동정 방법의 결과와 비교/분석 한다. 그리고 동일한 방법론에 입각하여 실제 자동차의 IP(Instrument Panel)에 적용되고 있는 글로브박스(Glove box)에 적용해 보았다.

2. 서브파트 해석을 통한 힌지 조인트의 동특성 동정

앞서 살펴본바와 같이 체결부의 동특성을 동정하기 위한 많은 연구사례들이 존재하지만 실험을 바탕으로 체결부의 동특성을 추출하는 기존의 방법을 실제 현장에서는 제대로 반영하지 못하고 있으며, 스프링, 댐 요소와 같은 간단한 요소들의 조합으로 체결부의 동특성을 대체하고 있다. 그 결과 실제 체결부의 특성과는 다른 정보를 입력하게 되며 결국 구조물의 거동을 예측하는데 많은 오차를 수반하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 실제 현장에서도 적용하기 쉬운 조인트 동특성 동정방법이 필요한데 본 논문에서는 정역학에 기반을 둔 조인트의 등가강성을 추출함으로써 조인트의 동특성을 대체하는 방법을 제시한다.

2.1 서브파트 해석을 통한 힌지조인트의 등가 강성행렬 추출

조인트의 등가강성을 추출하기 위한 방법은 FEM S/W에서 사용자가 직접 강성, 댐핑 등의 행렬을 입력할 수 있는 ANSYS의 MATRIX27요소나 MSC/NASTRAN의 GENEL(General element) 요소의 사용법과 유사하다. 위 요소들은 대상이 되는 서브파트를 하나의 강성행렬, 댐핑행렬 그리고 질량행렬 등으로 축소시키는 방법이다. 본 연구에는 Fig. 1(a)의 글로브박스에 사용되고 있는 Fig. 1(b) 힌지조인트의 동특성을 동정하기 위한 방법으로 등가강성 추출법을 사용한다. 그 방법은 아래와 같다.

• step. 1

Fig. 2(a)와 같이 강성행렬로 구성하고자 하는(등가강성행렬로 대체되는) 대상 구조물의 상세 유한요소 모델을 생성하고, 해당 물성치를 적용한다.

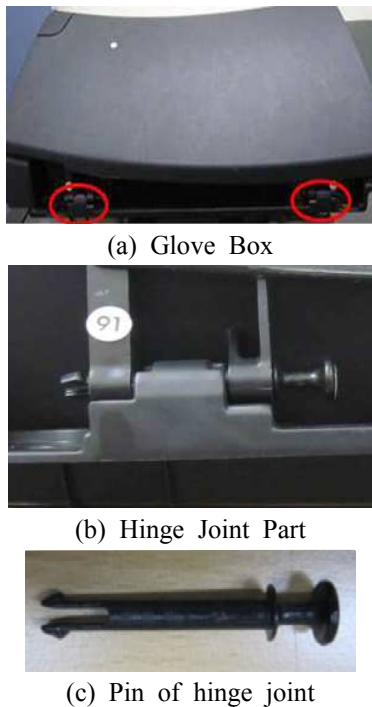


Fig. 1 Hinge joint of glove box in vehicle

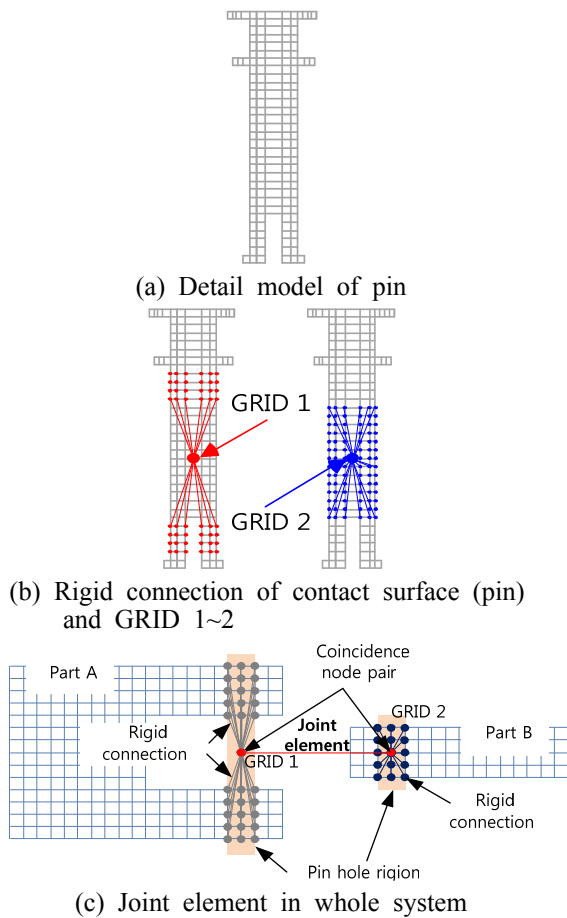


Fig. 2 Concept of the joint stiffness matrix for hinge joint

- step. 2
Fig. 2(a)의 상세유한요소 모델에 연결할 두 개의 절점을 Fig. 2(b)와 같이 생성한다. 이 두 절점에 각각 하중, 경계 조건이 적용된다. 이 두 절점의 위치는 큰 문제가 되지 않는다. 등가강성행렬에 두 절점의 위치의 효과가 반영되기 때문이다.
- step. 3
step. 2에서 생성된 두 개의 절점은 Fig. 1 (b)과 같이 핀이 다른 두 파트와 접촉하는 면과 각각 강제요소로 연결한다.
- step. 4
절점 1번의 6자유에 대한 경계조건을 부여하고, 절점 2번에 각 방향 단위하중을 인가 후 정해석 수행 시 발생하는 2번 절점의 반력을 확인한다.
- step. 5
step. 4의 과정을 통해 구한 2번 절점의 반력을 이용해 등가강성행렬을 구성한다.

2.2 힌지조인트의 체결부 강성 행렬 적용

조인트를 대체하는 2.1절에서 구한 등가강성을 포함한 전체 구조물의 동해석은 아래와 같이 진행된다.

- step. 1
조인트를 제외한 전체 부분에 대한 유한요소 모델을 구성한다.
- step. 2
체결부 강성행렬 구성 단계에서 생성했던 절점 위치와 대상 구조물의 동일한 위치에 2개의 절점을 생성한다.
- step. 3
Fig. 2(c)처럼 2)에서 생성한 두 개의 절점에 각각의 구조물을 강제 요소로 연결한다.
- step. 4
생성한 두 개의 절점을 앞서 구한 강성행렬을 적용한 MATRIX27이나 GENEL 요소로 연결한다.

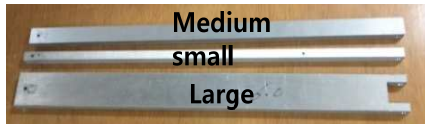
3. 힌지조인트의 동특성 검증

본 연구에서 제시한 방법론의 타당성을 살펴보기 위해 Fig. 3과 같이 힌지조인트로 구성된 단순 체결시편을 구성하였다. Fig. 3(a)의 직사각 단면 범은 힌지 체결을 위해 제작된 시편으로써 알투

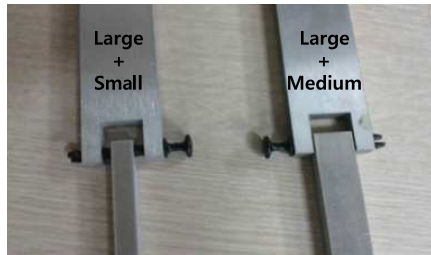
미늄 10xx 계열로 제작되었으며 탄성계수와 밀도는 각각 62~70GPa, 2700kg/m³이다. 길이와 두께는

각각 405, 10mm 이다. 폭은 36, 18, 10mm로 차이를 두었으며 편의상 Large, Small, Medium으로 명명하였다. 폭이 36mm인 Large 모델의 경우는 끝단에 19x15mm의 직사각 홀을 만들어 Small, Medium 시편과 체결이 가능하도록 하였다. 세 종류의 시편 모두 끝단에서 5mm 떨어진 지점에 반경 3mm의 홀을 만들어 Fig. 3(b)와 같이 힌지조인트로 체결하였다.

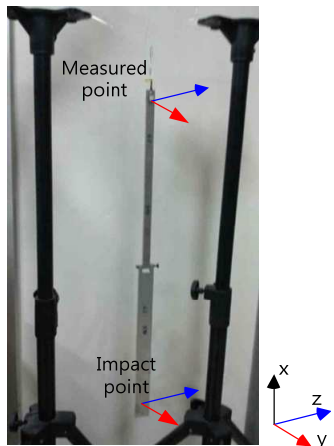
시편은 체결에 사용된 핀은 실제 글로브박스에



(a) Unit specimen



(b) Simply jointed specimen



(c) Configuration of impact test

Fig. 3 Impact test of simply jointed specimen

Table 1 Joint stiffness matrix of simply jointed specimen

LM model						
	x	y	z	rx	ry	rz
x	7.6E+06	-1.1E-01	1.1E+00	1.7E-03	6.3E-02	4.4E-04
y	-1.4E-01	7.5E+06	-1.6E-02	4.9E-02	-2.3E-03	2.2E-03
z	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
rx	3.2E-03	3.7E-02	3.8E-04	1.7E+03	5.5E-05	-3.0E-05
ry	3.6E-02	-2.8E-03	2.7E-02	4.8E-05	1.7E+03	7.8E-06
rz	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

LS model						
	x	y	z	rx	ry	rz
x	7.6E+06	-1.1E-01	1.1E+00	1.7E-03	6.3E-02	4.4E-04
y	-1.4E-01	7.5E+06	-1.6E-02	4.9E-02	-2.3E-03	2.2E-03
z	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
rx	3.2E-03	3.7E-02	3.8E-04	1.7E+03	5.5E-05	-3.0E-05
ry	3.6E-02	-2.8E-03	2.7E-02	4.8E-05	1.7E+03	7.8E-06
rz	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

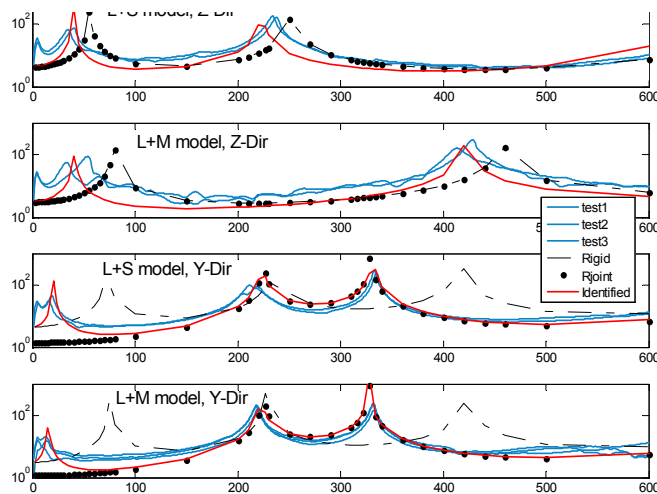
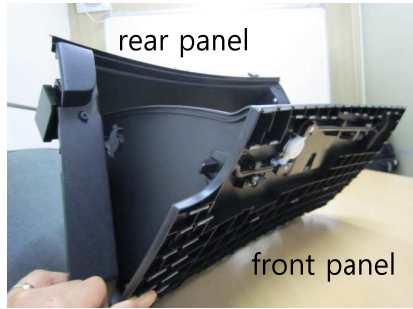
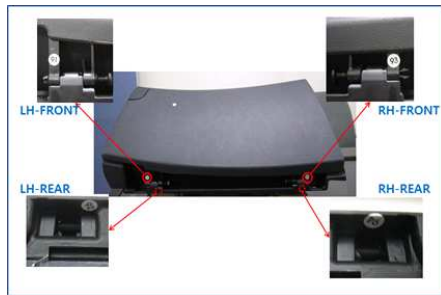


Fig. 4 Frequency response of the simply jointed specimens (translational and rotational dir. against the pin dir.)



(a) Front and rear panel of glove box



(b) Hinge joint and measured point
Fig. 5 Glove box with hinge joint

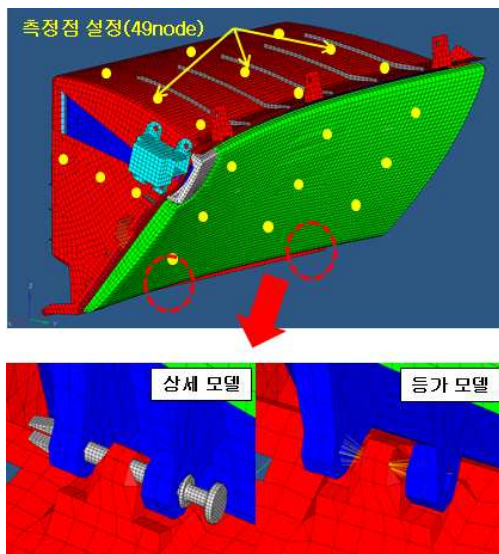


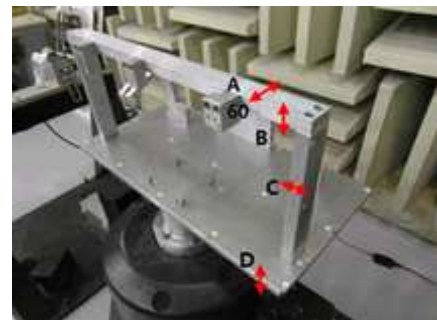
Fig. 6 FE model of glove box and hinge joint

사용되고 있는 부품으로써 Fig. 1(c)의 형상을 가지며, 유효길이 및 직경이 각각 36, 6mm 이다. 핀의 재질은 POM(Poly-Oxy-Methylene)으로 구성되어 있으며 탄성계수는 1.6~1.8GPa 정도이다.

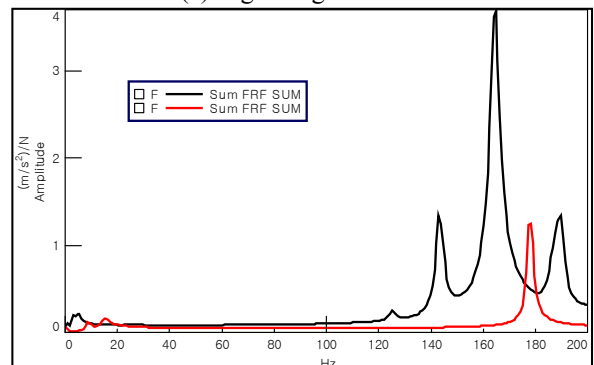
체결시편은 Large와 Medium이 체결된 시편을 LM, Small 모델이 체결된 시편을 LS 모델이라 명명하였으며, 체결 시 최종 길이는 800mm이다. 이 두 종류의 체결시편을 대상으로 Fig. 3(c)와 같이 임팩트 테스트를 준비하였으며, 하단에 y, z

Table 2 Joint stiffness matrix of hinge joint in glove box

LM model						
	x	y	z	rx	ry	rz
x	2.4E+07	1.0E-03	-7.0E-04	1.9E-05	-6.6E-06	-1.0E-06
y	1.0E-03	2.4E+07	-9.6E-04	-1.2E-07	-1.7E-05	1.8E-06
z	1.5E-02	-2.0E-03	4.7E+07	-7.9E-06	-2.7E-04	-4.5E-05
rx	7.2E-06	5.2E-08	-4.5E-06	2.0E+03	-1.1E-07	1.1E-08
ry	-3.2E-06	-1.2E-05	-1.4E-06	-1.4E-07	2.0E+03	6.7E-09
rz	3.8E-07	1.0E-07	1.2E-07	-8.3E-12	-2.8E-09	1.3E+02



(a) Jig for glove box



(b) Frequency response of the jig

Fig. 7 Jig model and its frequency response

방향으로 각각 임펄스(impulse)를 적용하였으며, 상단에서 동일방향의 주파수-응답을 측정하였다.

2장에서 제시한 방법을 통해 LM, LS 모델의 조인트 동특성을 동정하였다. 그 결과는 Table 1과 같이 나타났다. 이 결과를 바탕으로 임팩트 테스트와 동일한 조건의 주파수-응답 해석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4의 푸른색 실선은 임팩트 테스트의 결과이며 LM, LS 모델 모두 각 3EA씩 제작하여 각각의 주파수-응답을 나타낸 것이며, 일점쇄선과 검은 점, 붉은 실선은 각각 동일한 조건의 해석의 결과이다. 일점쇄선의 경우 힌지조인트에 해당하는 부위를 강제연결(rigid-connected)이라 가정

하고 주파수-응답을 구한 결과이며, 검은 점은 레볼루트 조인트(6 자유도 중 힌지조인트의 회전방향 자유도만 풀고 5 자유도의 방향을 강제로 연결)라 가정했을 때의 결과이다. 붉은 실선은 본 연구에서 제시한 방법을 통해 구한 힌지체결부의 동특성 동정 결과를 반영한 주파수-응답의 결과이다.

y방향 주파수-응답을 살펴보면 1~3번째 고유주파수는 각각 10, 220, 330hz로 나타났다. z방향에 대한 고유주파수는 LM 모델의 경우 50, 430hz, LS 모델의 경우 40, 230hz로 나타났다. 위 결과에서 강제연결과 실제 임팩트 테스트 결과를 살펴보면 초기 50hz 이하에서 발생하는 고유주파수가 나타나지 않으며, 50hz 이상에서 발생하는 고유주파수의 경우에도 확연한 차이를 보임을 알 수 있다. 레볼루트 조인트의 경우 강제연결의 결과



Fig. 8 Configuration of glove box FRF test

에 비해 더욱 실제 실험과 일치하는 경향을 보이고는 있지만, 고유주파수 부근에서 주파수-응답의 일치도가 떨어짐을 알 수 있다. 이에 반해 본 연구에서 제시하는 방법의 결과는 다른 두 경우에 비해 실험과 가장 높은 유사성을 보이고 있다. 이 결과를 바탕으로 할 때 본 연구에서 제시하고 있는 서브파트 해석을 통한 동특성 동정 방법의 타당성을 확보할 수 있다.

4. 글로브박스 힌지조인트의 동특성 동정

본 연구에서 제안된 힌지조인트 동특성 동정 방법론을 Fig. 5(a)와 같은 실제 차량용 글로브 박스에 적용해 보았다. 힌지조인트는 글로브 박스의 전·후방 판넬을 연결해 주고 있으며 핀이 체결되는 핀홀은 PPF(Poly-Propylene-Fumarate)으로 구성되어 있다. PPF의 물성치는 탄성계수가 1.9 ~ 2.1GPa 이며, 밀도는 1050kg/m³ 으로 전체 글로브박스의 무게는 2.130kg이다.

글로브박스를 체결하고 있는 힌지조인트(Fig. 6에 해당)의 동특성을 구한 결과는 Table 2와 같다. 이 결과를 주파수-응답 해석에 힌지조인트의 상세모델 대신 사용하였다. 그리고 본 연구에서 제안한 동특성 동정 방법을 적용한 해석결과와의 비교를 위해서 실제 글로브박스의 모달 테스트를 실시하였다. Fig. 6과 같이 49개의 포인트에 대한 1차모드 MAC(modal assurance criterion) 값은 0.78로 나왔다. 다음은 글로브박스의 가진 시험을 위

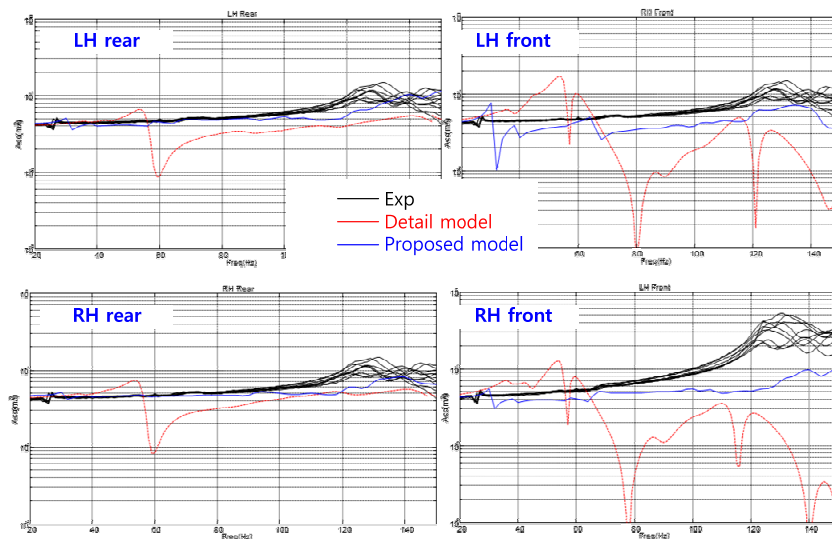


Fig. 9 Frequency response of the glove box

해 Fig. 7(a)와 같이 지그를 제작하였으며, 200hz 까지 지그의 응답을 구해 보았다. 1차로 설계된 지그의 경우 Fig. 7(b)의 검은 실선과 같이 약 125hz에서 1차 모드가 발생되었기 때문에 추가적으로 지그를 보강해 Fig. 7(b)의 붉은 실선과 같이 1차모드를 관심 주파수 150hz 이상에서 발생토록 하였다.(약 180hz에 해당)

Fig. 5(b)와 같이 힌지조인트가 위치한 부분의 전·후 판넬에 가속도 센서를 부착하고 150hz까지 사인스위프 가진(Fig. 8)을 하였으며 그 결과는 Fig. 9와 같다. 이 결과에서 검은 실선은 실제 글로벌 박스를 가진했을 때 각 위치별로 측정된 주파수-응답(가속도)이며, 붉은 실선은 힌지조인트의 상세모델을 사용한 해석 결과에 해당한다. 그리고 붉은 실선은 본 연구에서 제안한 방법을 통해 구한 조인트 동특성을 주파수-응답 해석에 사용한 결과를 나타낸 것이다.

위 결과에서 상세모델을 사용한 해석의 주파수-응답 결과를 살펴보면 하부(rear) 판넬의 경우 저주파대역에서 응답수준이 실제 실험과 유사하지만, 60hz에서 큰 차이를 보임을 알 수 있고, 고주파에서는 일정수준의 응답수준의 차이를 유지하고 있음을 알 수 있다. 상부(front) 판넬의 경우 실험치와 비교 시 거동이 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 본 연구에서 제시한 방법의 경우 하부판넬의 경우 유사한 거동을 보이며, 상부판넬의 경우 상세모델의 결과보다 크게 향상된 결과를 보이지만 실제 실험에서 나타나지 않은 피크와 고주파영역의 응답에 차이를 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 해석에 기반한 힌지조인트의 동특성 동정방법을 제시하고 있다. 단순 체결 시편의 시험을 통해 해석기반 힌지조인트의 동특성 동정방법의 가능성을 보였다.

본 방법의 경우 실험이 아닌 해석만으로도 조인트의 동특성을 동정함으로써 실험을 실시하지 않더라도 실제와 유사한 조인트의 동특성을 도출할 수 있다는 가능성을 제시하며, 상세모델을 이용한 해석기반 동특성 동정 및 실험을 통한 조인트의 동특성 동정보다 더욱 효율성을 가진다.

개발된 방법을 차량용 글로벌박스에 적용하였으며, 실제 가진시험을 통해 본 연구에서 제시하는 방법의 결과와 실험 결과를 비교해 보았다.

기존의 방법에 해당하는 상세모델을 적용한 해석의 결과 역시 비교하였다. 그 결과는 일반적인 상세모델의 결과보다 본 연구에서 제시한 방법이 더욱 실제 실험과 가까운 경향을 보이고 있으나 본 방법 역시 고주파 영역에서의 차이가 발생했다. 이 부분에 대해서는 앞으로 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서 제시하는 방법의 경우 실제 조인트에서 발생하는 감쇠효과를 전혀 고려하지 않았다. 이로 인해 감쇠가 큰 조인트의 경우는 큰 오차를 유발하게 될 것이다. 이 부분에 대해서는 이 방법의 적용 가능한 범위를 제시해 주는 단계가 필수적이며, 본 방법을 확장 발전시켜 마찰, 간극 등의 비선형적 특성이 부과될 경우에 대해서도 해석적으로 조인트부의 동특성을 동정하는 방법 연구가 진행 될 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부(MKE, Korea)가 지원하는 산업원천기술개발사업(과제번호: 10037360)에 의해 수행되었고 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) Yang, K. T. and Park, Y. S., 1993, "Joint Structural Parameter Identification Using a Subset of Frequency Response Function Measurements," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 7, pp. 509~530.
- (2) Tsai, J. S. and Chou, Y. F., 1988, "The Identification of Dynamic Characteristics of a Single Bolt Joint," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 125, pp. 487~502.
- (3) Ren, Y. and Beards, C. F., 1995, "Identification of Joint Properties of a Structure Using FRF Data," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 186, pp. 567~587.
- (4) Liu, W., 2000, "Structural Dynamic Analysis and Testing of Coupled Structures," PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- (5) Ren, Y. and Beards, C. F., 1998, "Identification of Effective Linear Joints Using Coupling and Joint Identification Techniques," *Journal of Vibration and*

Acoustics, Vol. 120, pp. 331~338.

- (6) Ren, Y. and Beards, C.F., 1993, "On the Nature of FRF Joint Identification Technique," *Proceedings of the 11th International Modal Analysis Conference*,

Florida, USA, 1-4 February.

- (7) Yang, T., Fan, S. H. and Lin, C. S., 2003, "Joint Stiffness Identification Using FRF Measurements," *Computers and Structures*, Vol. 81, pp. 2549~2556.