

# 차체 강성해석을 위한 구조용 접착제 해석모델링 연구 Modelling of Structural Adhesives for Body Stiffness Analysis in Automobile

서성훈† · 주재갑\*  
Seonghoon Seo and Jaekap Joo

**Key Words** : Structural Adhesives(구조용 접착제), Automobile Body(차체), Stiffness Analysis(강성해석)

## ABSTRACT

In modern automobile body manufacturing, the structural adhesive bonding is recognized to one of new joining techniques for the purpose of light weight body and its application scope in the automobile body has been gradually magnified. Specially, the structural adhesives have the advantages of not only enhancing the design flexibility of automobile body, but also improving automobile performances such as stiffness, crashworthiness and durability. In order to evaluate the performance simulation of the automobile body applied with structural adhesives, it is necessary to develop modeling techniques in the structural adhesives in advance. This paper aims to investigate modeling methodology of structural adhesive junctions for body stiffness simulation. Two main modeling points are the element selection for adhesives and the connectivity between adhesives and adherends. Both of the 1D element used in classical modeling and the 3D element which are more accurate are considered for the adhesives, and the congruent and incongruent mesh models of the adherends are compared for connectivity modeling. By applying the several kinds of modeling methodology to the simple structures, the simulation results are compared and some modeling guidelines are obtained.

## 1. 서 론

최근의 차량은 다양한 원인으로 차량 중량이 꾸준히 증가하고 있다. 충돌안전 범규의 꾸준한 강화로 승객과 보행자 보호를 위한 각종 안전장치가 부가되고 있으며 안락한 승차감에 대한 요구가 커짐에 따라 차체 강성을 증대하고 소음차단을 위한 흡차음재의 사용영역도 넓어지고 있는 추세이며 특히 승객의 편의성을 도모하는 각종 메커니즘, 전자장치 등의 추가가 급등하여 불과 80년대 차량에 비해 차량의 중량은 20~40% 정도 증가되었다. 반면 연료소모가 적은 차량에 대한 소비자 요구도 계속적으로 증가하고 있으며 이산화탄소 배출규제도 강화되고 있어 차량의 경량화는 불가피한 상황에서 선진 차량개발 업체에서는 차체 중량을 줄일 수 있는 방향으로 연구를 꾸준히 해오고 있다[1].

차체 경량화 방법으로는 초고강도강판이나 알루미늄, 마그네슘 등 소재를 활용한 경량화 방법과 알루미늄 프레임 차체 등을 적용한 구조적인 경량화 방법과 하이드로포밍, 롤포밍, TWB(Tailor Welded Blanks) 등 공정기술을 통한 경량화 방법, 구조용 접착제를 활용한 접합부분의 경량화 방법으로 나눌 수 있는데, 구조용 접착제는 기존 용접이 불가능했던 이종 부재 간의 접착이 가능하며 구조상 용접처리가 불가능한 부위를 대체하여 적용할 수 있어 설

계 유연성을 높일 수 있으며 기존 용접체결과 더불어 적용할 경우 차체 강성 및 충돌, 내구 성능을 향상시킬 수가 있어 접합 부분에서는 새로운 기술로 각광을 받고 있다.

구조용 접착제의 적용에 대한 차체 성능 향상을 전산해석적으로 정량적인 평가를 수행하기 위해서는 구조용 접착제에 대한 모델링 기술 확보가 우선적으로 필요한데 지금까지는 최근의 모델링 기술 동향을 반영한 제대로 된 구조용 접착제 모델링 연구가 진행되지 못했다.

초창기 구조용 접착제가 모델링 되었던 시기인 90년대에는 전산장비의 성능부족으로 등가 물성을 활용한 단순한 모델링 기법이 차체 모델링 전반에 사용되었다. 평판요소의 크기는 20~40mm 정도가 사용되었으며 각종 필라(pillar)와 비드(bead), 포밍(forming)은 등가 물성을 갖는 보요소로 모델링되었다. 이와 유사하게 구조용 접착제도 1 차원 스프링 요소를 사용한 모델링 가이드가 제시되었다[2]. 이러한 등가방식의 단순화된 모델링은 전체적인 거동 파악에는 도움이 되나 정확도가 떨어지며 특정 부분의 정밀한 거동 파악에는 한계에 있다.

2000년대 들어 전산장비의 성능향상으로 점차 상세화되어 차체 모델링은 실제와 유사한 형태로 점차 모델링 되고 있다. 차체 요소의 크기는 8~10mm 정도로 작은 크기의 메쉬가 적용되고 있어 실제의 차체 형상이 대부분 모델링 되고 있다. 용접부에서도 기존에 스프링 요소 사용에서 1 차원 구조요소나 3 차원 구조요소를 사용하는 형태로 해석 모델링 기술이 발전해 오고 있다.

논문에서는 차체 강성해석을 위한 구조용 접착제 1410의 모델링 방법론에 대해 연구하였다. 접착부분의

† 교신저자; 현대자동차 차량해석팀

E-mail : s.h.seo@paran.com

Tel : (031) 368-5819

\* 현대자동차 차량해석팀

적용요소와 접착제와 구조의 연결부분 모델링으로 나뉠 수 있는데, 접착제 적용요소로는 기존에 주로 사용되어 오던 1 차원 요소와 좀 더 정확한 모델링이 가능한 3 차원 요소를 검토하였으며 연결부분 모델링은 절점의 일치 유무에 따른 비교를 살펴보았다.

## 2. 구조용 접착제 모델링 비교

### 2.1 기준 모델링

우선 본 연구에서 사용한 전산해석용 소프트웨어는 선형코드로 구조 및 진동소음 분야에서 가장 활발히 사용하는 NASTRAN 2005 버전임[3]을 알려준다.

구조용 접착제가 적용되지 않은 경우 차체의 판재는 용접에 의해 면착되어 있으나 구조용 접착제가 적용된 차체는 판재 사이에 0.2~ 1.0mm 정도의 공간에 접착제가 채워져 있다. 이러한 구조를 가장 정확하게 모델링하기 위해서는 표 1의 기준모델과 같이 차체와 구조용 접착제를 3 차원 요소인 CHEXA로 모델링하고 절점 공유(common node)을 통해 차체와 구조용 접착제를 연성시키는 방식이다. 본 연구에서는 이 모델을 비교 해석을 위한 기준 모델링으로 사용하여 간단한 모델에 대하여 비교를 진행한다.

기준 모델링은 실제 차량개발에서 활용하기에는 어려움이 있다. 판재의 3 차원 요소 적용으로 인한 자유도 수 증가와 판재와 접착제 사이의 절점을 공유시켜야 하는 모델링 작업의 한계로 차체 전체를 구성하는 차량개발 현업에서는 활용도가 떨어진다.

기준 모델링에서는 판재 모델링도 해석 정확도를 위해 6 면체 요소로 모델링하였으나 그 외 비교 모델링에서는 실제 차체 판재 모델링에 많이 사용되는 2 차원 요소인 CQUAD4를 적용하였다.

### 2.2 3차원 요소를 활용한 모델링

구조용 접착제 모델링으로 판재는 2 차원 요소로 모델링 하는 반면 접착제는 3 차원 요소인 CHEXA를 사용하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 접착제를 3 차원 요소를 적용할 경우 형상이 일치하기에 등가된 물성치를 적용할 필요가 없고 이방성 재질을 부여하는 방식으로 간단하게 접착제의 특성을 반영할 수 있다.

판재는 2 차원 요소 CQUAD를 판재 중심에 위치시켜 모델링하기 때문에 접착제 3 차원 요소 CHEXA 사이는 판재 두께만큼 공간이 발생하여 판재와 접착제를 연결해 줄 필요가 있다.

접착제와 판재의 연결은 접착제와 판재의 메쉬 정렬에 따라 다음 3 가지 형태로 모델링이 가능하다.

#### (1) SOLID-RBE2 모델링

판재와 접착제의 메쉬가 수직으로 잘 정렬된 경우, 판재와 접착제를 표 1의 Solid-RBE2와 같이 RBE2 요소로 연결할 수 있다.

RBE2 요소는 판재 요소와 수직으로 연결되어야 강성의 왜곡 현상이 발생하지 않는 특징이 있다. 이렇게 수직으로 메쉬를 정렬하는 모델링은 모델링을 위한 노력이 많이 들어가기 때문에 차량개발 현장에서는 사용하기 어려운 모델링 기법이다.

#### (2) SOLID-RBE23 모델링

판재와 접착제를 각각 2 차원 요소와 3 차원 요소로 모델링하는 방식으로 앞선 모델링 기법과 요소의 선택은 동일하나, 한쪽 판재와 접착제는 RBE2 요소를, 다른 쪽 판재와 접착제는 RBE3 요소를 사용하여 연성시키는 모델링 기법이다. 즉 두 판재의 메쉬가 일치하지 않지만 접착제의 메쉬를 한쪽 판재의 메쉬와 일치시켜 일치시킨 쪽은 RBE2 요소가 적용되며 일치가 되지 않는 쪽은 RBE3 요소를 적용하는 모델링 방식이다. 판재 간의 메쉬를 일치시키지 않기 때문에 모델링의 수고는 SOLID-RBE2 기법에

Table 1. Modeling methodology of structural adhesives.

	Reference (Solid Model)	3D Adhesive			1D Adhesive	
		#1 Solid-RBE2	#2 Solid-RBE23	#3 CDH	#4 CBush	#5 CWeld
접착물	Solid	Solid	Solid	Solid	Bush	Weld
메쉬	Congruent	Congruent	Incongruent	Incongruent	Incongruent	Incongruent
연결	Common node	RBE2	Upper: RBE2 Lower: RBE3	RBE3	RBE3	내부적으로 RBE3요소와 Compatibility 자동적용.
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>모든 요소를 Solid로 반영하여 가장 정확한 모델링임.</li> <li>비교를 위한 참조모델임.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>절점 normal을 맞춰야 하기에 메쉬가 어려움.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Upper 판넬을 기준으로 접착제 메쉬함.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>접착제를 독립적으로 메쉬함.</li> <li>CDH Spot Weld와 유사하게 모델링함.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>스프링상수 K1,K2,K3 적용함.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CWELD 요소 적용함.</li> <li>ELEMD, ELPAT 유형 적용으로 Patch-Patch 자동 연결</li> </ul>
형상						

비해 적게 발생하지만 접착제 메쉬를 한쪽 판재의 메쉬와 일치시켜야 하는 작업이 발생한다.

### (3) SOLID-RBE3 모델링

두 판재와 접착제를 전혀 무관하게 메쉬를 구성하는 모델링 기법이다. 판재와 접착제 메쉬가 일치하지 않기 때문에 판재와 접착제는 RBE3 로 연결한다. 다만 접착제 CHEXA 요소를 이웃 요소와 분리시켜 CDH 점용접(spot weld) 요소[4]를 연속적으로 분포시킨 형상과 유사하게 구성한 모델링이다. CDH 용접요소로 적용된 접착제는 CHEXA 요소가 이웃 요소와 연결되어 있지 않기 때문에 접착제의 면내(in-plane) 방향으로 변형에너지를 전달하지 못하기 문제가 있으나 접착제의 두께가 작고 접착제 탄성계수가 판재의 탄성계수에 비해 작기 때문에 큰 영향은 없을 것으로 판단된다.

이 모델링 기법은 점용접 모델링에서 활용도가 높은 CDH 점용접 요소를 활용하기에 기존 전처리 모델링 프로그램으로 손쉽게 모델링 할 수 있는 장점이 있다. 선진업체에서는 CDH 점용접 요소의 모델링 기법을 seam 용접 모델링, sealant 모델링 등에도 활용하고 있다.

## 2.3 1차원 요소를 활용한 모델링

### (1) CBUSH 모델링

구조용 접착제를 모델링하는 또 다른 방법론으로는 1 차원 요소를 사용하는 것이며 이 중 고전적으로 많이 사용되어온 스프링 요소를 사용하여 접착제 특성을 나타내는 방법이 존재한다. 접착제를 CBUSH 요소를 이용하여 모델링하며 스프링 상수로 접착제 물성치를 결정한다. 판재와 스프링 요소는 RBE3 요소를 이용하여 연결하기에 판재간의 메쉬가 균일하지 않아도 된다. 스프링 요소는 불필요한 모

멘트 발생을 억제하기 위해 판재의 중심에 절점을 중첩(coincident node)시켜 길이가 0 이 되도록 한다.

스프링 상수는 Timoshenko 보이론을 통해 다음과 같이 결정된다[2].

$$K_n = EA/L \quad (1)$$

$$K_{in} = (5/6)GA/L \quad (2)$$

여기서,  $K_n$  과  $K_{in}$  는 접착제의 인장압축 방향과 전단 방향의 스프링 상수이고  $E$  와  $G$  는 접착제의 탄성계수와 전단계수를 나타내며  $A$  와  $L$  는 접착제의 유효면적과 두께를 의미한다.

### (2) CWELD 모델링

CWELD 요소[5]는 NASTRAN 에서 지원하는 Timoshenko 보이론 기반의 점용접요소로 판재의 연성을 간단한 인터페이스로 제공하여 점용접을 쉽게 구현할 수 있는 특징이 있다. 이러한 기능을 살려 구조용 접착제 모델링을 CWELD 요소를 활용하면 기존의 모델링에서 판재와 접착제를 연성하는 RBE2 나 RBE3 요소를 사용할 필요가 없기에 모델링 구현이 간단해 질 수 있다.

하지만 CWELD 요소에서 고려되는 용접 너겟(nugget) 두께는 평균 두께이기 때문에 접착제 모델링에 적용하기에는 등가될 수 있는 유효 너겟 면적

Figure 1. Hat Structure Geometry.

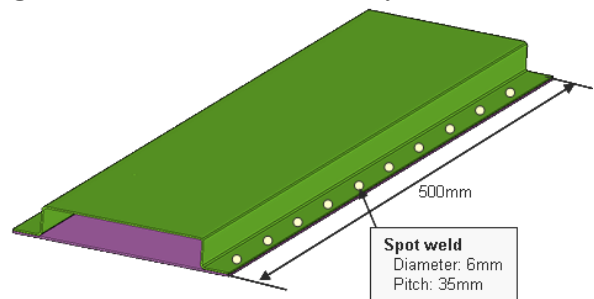
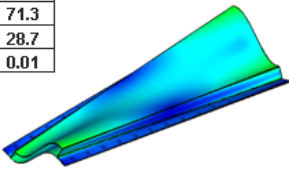
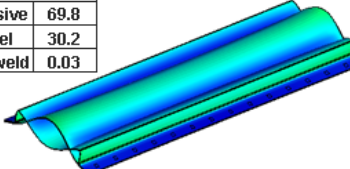
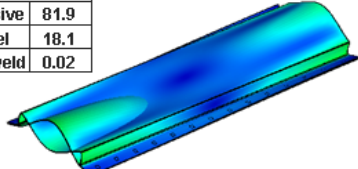
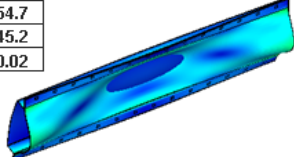
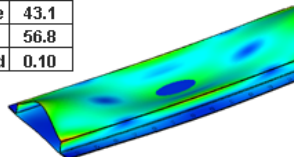
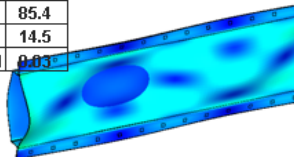


Figure 2. Eigen modes in Hat structures.

1 <sup>st</sup> Mode: Torsion	2 <sup>nd</sup> Mode: Transverse Bending	3 <sup>rd</sup> Mode: Longitudinal Bending																								
<table border="1"> <tr><td colspan="2">Strain energy (%)</td></tr> <tr><td>Adhesive</td><td>71.3</td></tr> <tr><td>Panel</td><td>28.7</td></tr> <tr><td>Spot weld</td><td>0.01</td></tr> </table> 	Strain energy (%)		Adhesive	71.3	Panel	28.7	Spot weld	0.01	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Strain energy (%)</td></tr> <tr><td>Adhesive</td><td>69.8</td></tr> <tr><td>Panel</td><td>30.2</td></tr> <tr><td>Spot weld</td><td>0.03</td></tr> </table> 	Strain energy (%)		Adhesive	69.8	Panel	30.2	Spot weld	0.03	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Strain energy (%)</td></tr> <tr><td>Adhesive</td><td>81.9</td></tr> <tr><td>Panel</td><td>18.1</td></tr> <tr><td>Spot weld</td><td>0.02</td></tr> </table> 	Strain energy (%)		Adhesive	81.9	Panel	18.1	Spot weld	0.02
Strain energy (%)																										
Adhesive	71.3																									
Panel	28.7																									
Spot weld	0.01																									
Strain energy (%)																										
Adhesive	69.8																									
Panel	30.2																									
Spot weld	0.03																									
Strain energy (%)																										
Adhesive	81.9																									
Panel	18.1																									
Spot weld	0.02																									
4 <sup>th</sup> Mode: 1 <sup>st</sup> bending in lower panel	5 <sup>th</sup> Mode: 1 <sup>st</sup> bending in upper panel	6 <sup>th</sup> Mode: 2 <sup>nd</sup> bending in lower panel																								
<table border="1"> <tr><td colspan="2">Strain energy (%)</td></tr> <tr><td>Adhesive</td><td>54.7</td></tr> <tr><td>Panel</td><td>45.2</td></tr> <tr><td>Spot weld</td><td>0.02</td></tr> </table> 	Strain energy (%)		Adhesive	54.7	Panel	45.2	Spot weld	0.02	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Strain energy (%)</td></tr> <tr><td>Adhesive</td><td>43.1</td></tr> <tr><td>Panel</td><td>56.8</td></tr> <tr><td>Spot weld</td><td>0.10</td></tr> </table> 	Strain energy (%)		Adhesive	43.1	Panel	56.8	Spot weld	0.10	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Strain energy (%)</td></tr> <tr><td>Adhesive</td><td>85.4</td></tr> <tr><td>Panel</td><td>14.5</td></tr> <tr><td>Spot weld</td><td>0.03</td></tr> </table> 	Strain energy (%)		Adhesive	85.4	Panel	14.5	Spot weld	0.03
Strain energy (%)																										
Adhesive	54.7																									
Panel	45.2																									
Spot weld	0.02																									
Strain energy (%)																										
Adhesive	43.1																									
Panel	56.8																									
Spot weld	0.10																									
Strain energy (%)																										
Adhesive	85.4																									
Panel	14.5																									
Spot weld	0.03																									

을 계산할 필요가 있다. CWELD 요소의 너겟 두께가  $L_m$  일 때 유효 너겟 면적은 다음과 같이 비례식을 계산된다.

$$A_m = AL_m / L \quad (3)$$

### 3. 해석 결과

#### 3.1 단순 구조물

본 연구에서는 그림 1 과 같이 모자(hat) 형상의 구조물에 대하여 앞서 언급한 6 가지 모델링 기법을 적용하여 해석결과를 비교한다. 모자 구조물의 양 끝단의 플랜지(flange)는 35mm 피치간격으로 점용 접되어 있고 동시에 플랜지 면 전체에 접착제가 도포되어 있다고 가정한다. 판재의 두께는 모두 1mm 이며 접착제 두께는 0.35mm 로 가정한다. 본 해석의 점용접 모델링은 직경이 6mm 인 CDH 용접모델링을 적용한다.

#### 3.2 자유지지 상태의 고유진동 해석

자유단 상태에서의 20 개 저차 고유모드를 NASTRAN 103 솔버를 사용하여 산출하였다. 6 자유도 강제모드를 제외한 14 개의 탄성모드에는 비틀림 모드와 횡방향, 종방향 굽힘모드와 판재 국부모드가 포함되어 있다. 변형에너지는 주로 접착제에 나타나며 점용접점에는 0.1%이내로 작게 나타났다.

그림 2 에서 보이는 바와 같이 첫 번째와 두 번째 탄성모드는 각각 비틀림 모드와 횡방향 굽힘모드이다. 변형에너지의 분포는 접착제에 70% 정도, 판재에 30% 정도 분포되어 접착제에 변형에너지가 많이 걸림을 알 수 있다. 변형에너지가 80%이상으로 지배적인 모드는 3, 6, 8, 11 번째 모드로 종방향 굽힘 모드이다.

접착제를 3 차원 요소로 모델링한 경우, RBE2 로 연결한 절점 의존적인(node-dependent) 모델링은 기준모델링 대비 2%정도 강성이 작게 나타났으며

RBE2 와 RBE3 를 혼용한 절점 반의존적인(node semi-dependent) 모델링이 기준모델링과 거의 일치하였으며 RBE3 만을 사용한 절점 비독립적인(node-independent) 모델링은 평균강성이 0.14% 작게 나타났다. 이는 구조 유한요소해석에서 일반적으로 발생하는 경향과 일치하는 현상이다. 절점 독립적인 모델링은 두 판재를 면과 면(patch-to-patch)으로 연결하는 반면 절점 의존적인 모델링은 점과 점(node-to-node)으로 연결되는데, 강성은 연성되는 부분이 더 넓은 절점 독립적인 모델링의 강성이 크게 나타난다.

절점 독립적인 모델링 중에서 접착제를 CHEXA, CBUSH, CWELD 를 각각 적용한 결과는 CHEXA 를 적용한 모델링의 강성이 가장 크며 다음으로 기준모델링, CBUSH, CWELD 순으로 나타났다.

전체적인 오차수준은 모델링에 따라 5% 이내로 실차 모델에 적용시 오차수준을 훨씬 작을 것으로 예상되어 구조용 접착제의 영향도를 정성적으로 판단하기에는 어떠한 모델링을 적용해도 무관할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 일정 면적에 도포되어 있는 구조용 접착제를 1 차원 요소로 모델링하는 경우 1 차원 요소의 배열 방식, 즉 3 차원 요소의 중심에 1 차원 요소를 위치시킨 모델링과 3 차원 끝단에 위치시킨 경우에 대하여 결과를 비교해 보았다(그림 1 참조). 3 차원 요소의 끝단에 위치시킨 결과가 강성이 약간

Figure 3. Boundary conditions in static analysis.

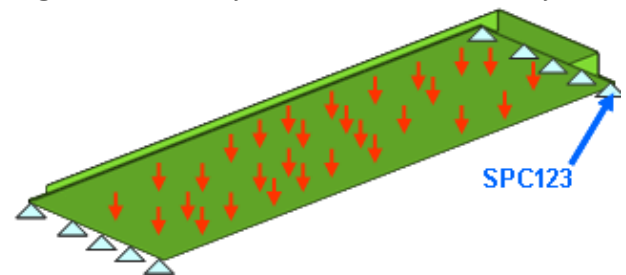
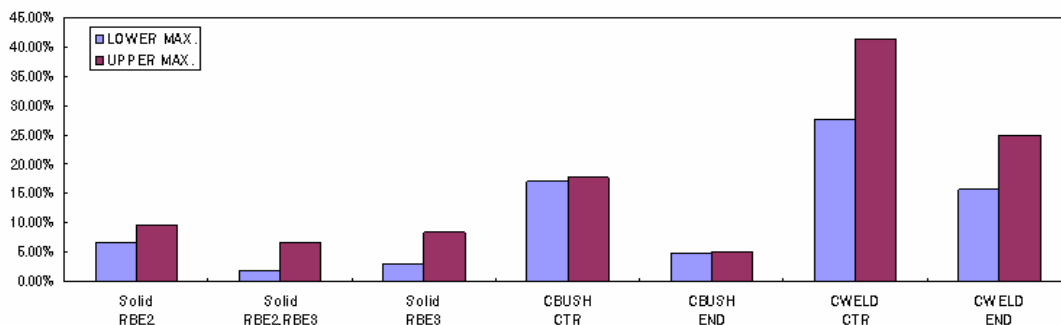


Figure 4. Result of static analysis.



크게 발생하였는데, 이는 RBE3 요소의 적용범위가 넓어져 연성범위가 커지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 기준모델과도 더 일치하는 결과를 보였는데 이는 접착제를 3 차원 요소로 모델링한 경우와 연성범위가 유사하기 때문으로 판단된다.

### 3.3 면압하중시 정적 변형 해석

그림 3 과 같이 모자 구조물의 양 끝단을 고정단으로 고정하고 하부 판재에 단일 압력의 분포하중을 부여할 때 상부 판재와 하부 판재에서의 최대 변형을 살펴보았다. 하부 판재에서는 판재 중심에 최대 변형이 발생하였고 상부 판재에서는 플랜지면 중심에서 최대 변형이 발생하였다.

기준모델링 대비 1.7%에서 최대 40%까지 변형이 크게 발생하였고, 하중이 부여되는 하부 판재의 변형오차가 상부 판재보다 작게 발생하였다. 강성의 크기는 기준모델링, 3 차원 요소 적용 모델링, CBUSH 요소 모델링, CWELD 요소 모델링 순으로 변형이 작게 발생하였다.

절점의 메쉬 의존성에 따른 3 차원 요소의 모델링은 10%이내로 비교적 강성차이가 크게 발생하지 않은 반면에, 접착제를 1 차원 요소로 모델링하는 경우는 비교적 오차의 범위가 크게 발생하였다.

## 4. 결 론

차체 강성해석을 위한 구조용 접착제 모델링은 3 차원요소로 접착제를 모델링하고 판재와 접착제를 절점 독립적인 방식으로 연결하는 것이 판재의 집합 방식에서의 최근의 추세이며 본 연구 결과를 통해서도 여러 가지 모델링 기법 중 가장 우수한 것으로 나타났다.

3 차원 요소를 접착제 모델링에 사용하여 해석 결과의 정확도 향상되고 일관성이 유지됨을 확인할 수 있었다. 기존에 사용해온 스프링과 같은 1 차원 요소는 재료의 물성을 통해 등가스프링 상수를 얻어야 하지만 3 차원 요소의 사용은 실제 구조를 모사할 수 있는 방식이기 때문에 실제 거동을 좀 더 정확히 표현할 수 있다. 또한 판재와 접착제를 RBE3 요소로 연결함으로써 해석모델의 강건성을 확보할 수 있다. 메쉬와 상관없이 즉 절점을 정렬할 필요 없이 사용할 수 있기 때문에 해석모델을 구성하기도 편할 뿐만 아니라 메쉬에 따른 결과차이도 크게 발생하지 않는다.

본 연구 이후에 진행할 추천 과제로는 강성해석뿐만 아니라 충돌성능, 강도성능을 동시에 해석호환이 가능한 모델링 기법에 대한 연구와 적용 구조물을 실제 차체에 반영한 현실적인 모델에 대한 결과의 연구 등을 추천한다.

## 참 고 문 헌

- (1) Structural Bonding in Automobile Manufacturing, 2007, Dow Automotive.
- (2) Wagner, D.A., FEA Modeling for Body-in-White Adhesives, SAE Paper No. 960784, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA, 1996.
- (3) MSC. NASTRAN 2005-Quick Reference Manual, MSC.Software Corporation.
- (4) Palmonella, Matteo et al., 2004, " Guidelines for the implementation of the CWELD and ACM2 spot weld models in structural dynamics", Finite Elements in Analysis and Design, Vol41, pp193~210.
- Fang, J. et al., Weld Modeling with MSC.Nastran
- (5) Fang, J., 2005 " Weld Modeling with MSC.Nastran", MSC Conference.