

고장물리 기반 자동차 서스펜션 모듈 내구설계

한승호[†]·이재경^{*}·이태희^{**}·장광섭^{***}

PoF based Fatigue Durability Analysis of Automobile Suspension Module

Seung Ho Han, Jai Kyung Lee, Tae Hee Lee, Kwang Sub Jang

Key Words: PoF based fatigue durability analysis(고장물리 기반 피로내구해석), Integrated design system(통합설계시스템), Automobile suspension module(자동차 서스펜션 모듈)

Abstract

In the manufacture of automobile suspension modules at a company as parts supplier, the design process includes the detail design and the design modification via structural and fatigue durability analyses considering PoF(physics of failure) of their weldments that are repeated more than four times sequentially. The approval of the design and the release of final drawings follows. For the suspension modules, e.g. control arms and cross member, the man-hours per worker required in the process outlined above can reach as high as 1,414hours. Application of the developed integrated design system can reduce the man-hours of 1,004. In comparison with the conventional design process, this integrated design system reduces the required time by about 40%. If expense is taken into account, a savings of approximately \$192,000 is estimated, assuming the design process accounts for 1.5% of total sales for the parts supplier

1. 서 론

국내 완성차 업체의 경쟁력 강화 목적으로 요소부품 또는 부품모듈의 품질향상은 물론 가격 경쟁력 확보를 위하여 부품 납품업체에게 제품설계를 모두 이관하려는 전략을 펼치고 있다. 이러한 국내 완성차업체의 전략에 맞추어 부품업체에서도 단순히 부품만을 생산, 공급하던 방식을 탈피하여 제품 개발기간 단축 및 품질향상을 위하

여 가상시제기술^(1,2)을 적극적으로 적용하고 있으며, 이를 통해 각 부품모듈 단위의 성능 시뮬레이션을 효율적으로 수행할 기술력과 시스템을 구축하고 있다. 제품 개발기간의 단축 및 품질향상을 위하여 제품 개발에 필요한 엔지니어링 프로세스를 자동화하고 통합하는 것이 필수적이며 이를 바탕으로 동시공학을 통한 협업, 설계-해석 프로세스 및 시스템 통합, 데이터의 체계적인 관리가 가능하게 된다.

최근, Lin⁽³⁾과 Tseng⁽⁴⁾ 등은 자동차부품 협업설계를 위한 통합시스템을 개발하였는데, 동시공학 개념을 구현하기 위하여 CAD-CAE-CAM을 하나로 통합하는 방식을 따르고 있다. 이는 초기 개념설계 단계에서 부품생산에 소요되는 시간과 비용을 절감할 수 있는 좋은 사례로 여겨지고 있으며, 이와 유사한 연구사례⁽⁵⁾도 발표된 바 있다. 그러나, 대부분 CATIA의 Knowledge-based design

[†] 회원, 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

E-mail : seungho@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7433 FAX : (042)868-7418

^{*} 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

^{**} 라온엑스솔루션즈(주)

^{***} PartDB(주)

module을 사용하는 방식을 따르고 있어, 중소기업에서 사용하기 위해서 고비용을 지불해야 하는 문제를 앓고 있다. 또한, 자동차 서스펜션 부품 중 파손이 가장 빈번히 발생하는 용접부의 경우 피로해석 수행이 필요한데, 이를 위해서는 파손원인 분석과 이를 바탕으로 한 고장물리 기반 내구해석이 제품 맞춤형으로 수행되어야 하고, 이러한 기능이 통합설계시스템에 반영되어야 한다.

본 연구에서는 CATIA 기반 모델의 형상 파라메트릭 모델화가 용이한 PSG(Parametric Set Generator)와 용접부 고장물리를 기반으로 한 CAE 모델링이 원활히 이루어지는 FE-모델링 보조시스템을 멀티 에이전트 기반 엔지니어링 통합 프레임워크⁽⁶⁾에 임베디드하였다. 자동차 서스펜션 중 FR 및 RR Control Arm과 Cross Member에 대하여 내구설계를 수행하였으며, 공수 및 비용 절감 분석을 통한 통합설계시스템의 효율을 분석하였다.

2. 대상체 및 내구해석 절차

2.1 대상체

본 연구의 대상체는 자동차 서스펜션 모듈의 중요한 부품인 컨트롤 암과 크로스멤버로서 Fig. 1과 같은 전(FR)·후(RR) 서스펜션 모듈의 Lower arm과 RR Cross member이다. Lower arm은 스프링, 크로스멤버 및 캐리어 등과 조립된다. 주행중 발생하는 진동을 흡수, 완화하는 역할을 함은 물론 휠얼라이먼트에 영향을 주는 부품 중의 하나이다. RR Lower arm은 FB540 복합조각강으로 성형가공된 상, 하부 판넬의 용접조립 작업으로 제작된다. 이에 반해 FR Lower arm은 Curling, Burring, Forming 공정으로 분리하여 성형작업을 수행하였으며 G-Bush를 용접작업으로 조립한다. Cross member의 경우 상기한 컨트롤 암과 다른 DP590을 적용하였다.

2.2 내구해석 절차

초기설계 단계에서 주요설계변수의 선정을 통한 형상최적화 작업이 이루어진다. PSG를 이용한 CATIA 기반의 파라메트릭 모델링 작업과 순쉬운 형상변경을 통해 형상 데이터가 제공되고, 이를 통해 내구해석이 이루어진다. Fig. 2와 같이 총

10단계의 절차가 순차적으로 또는 상호 보완적으로 실행된다. 첫 번째 단계에서 형상정보를 포함하고 있는 CAD 파일이 CAE 전처리 도구로 입력되고 유한요소해석을 위한 메쉬작업이 이루어진다. 이때, 용접부에 대하여 서스펜션 모듈에 적합한 모델링 작업이 이루어진다. 이때 메쉬는 셀요소로서, 3차원 솔리드 CAD 형상의 중립면에 위치하게 되고, 용접 연결부는 용접요소를 생성시킨다. 하중 및 경계조건은 MPC(Multi-Point Constraint) 기능을 활용하여 구현하며, 다음 단계에서 구조해석과 피로해석을 수행하여 피로내구지수를 계산하게 된다.

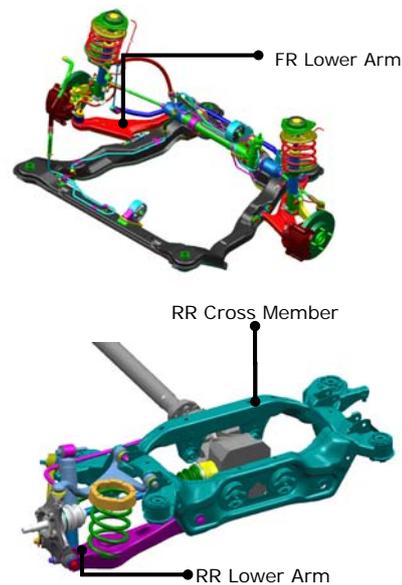


Fig. 1 Feature of automobile suspension parts

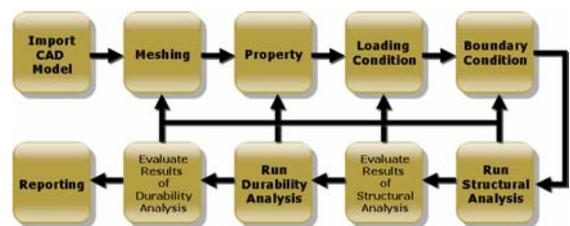


Fig. 2 Work process for durability analysis

3. 고장물리 기반 서스펜션 모듈 모델링

3.1 고장메커니즘

서스펜션 모듈은 전절에서 설명하였듯이 컨트롤 암, 크로스멤버, 캐리어부, 현가스프링 장착부 및 스톱퍼 등 다양한 부품으로 조립되어 있고 차량의 움직임(Braking, Cornering, Bumping)에 의한

Table. 1 Material coefficients of SWT's equation

	σ'_f (MPa)	b	c	ϵ'_f
SAPH38	720.5	-0.1049	-0.4948	0.1952
FB540	1102	-0.1049	-0.4489	0.1297
FB590	999	-0.091	-0.5377	0.2399
DP590	1117	-0.1058	-0.6821	1.267

σ'_f : Fatigue strength coefficient, ϵ'_f : Fatigue ductility coefficient,

b : Fatigue strength exponent, c : Fatigue ductility exponent

정하중과 GVW(Gross Vehicle Weight) 가속도 변화에 따른 피로하중 진폭이 끊임없이 부과된다. 특히, 컨트롤 암과 크로스멤버는 경량화를 목적으로 여러 판넬을 용접으로 접합하여 제작하는데, 이는 필연적으로 용접부의 높은 피로민감도로 인해 대부분의 고장 발생 원인을 제공한다. 용접부의 불규칙한 기하학적인 불연속부에 작용하는 노치응력 또는 변형률과 이들의 반복 응답 특성을 고려한 노치변형률법이 적용되어 용접부에 발생하는 피로균열발생 수명을 평가한다. Smith 등⁽⁷⁾이 제안한 이론식으로 산출된 피로수명은 식(1)과 같이 피로내구지수로 표현되며, 1 이상의 값을 갖게 형상 설계변수를 변화시킨다.

$$Index\ of\ fatigue\ durability = \left(\frac{SWT_{target}}{SWT_{analysis}} \right)^{0.5} \quad (1)$$

여기서, SWT는 식(2)와 같이 정의되며, 각각의 실험상수는 Table 1과 같이 실험을 통해 얻어진다.

$$\sigma_{max} \cdot \frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma'_f \cdot 2N_i^{2b} + E \cdot \sigma'_f \cdot \epsilon'_f \cdot 2N_i^{b+c} \quad (2)$$

3.2 서스펜션 모듈 모델링

각 구성품들은 Seam Welding에 의하여 연결된다. 용접부를 표현하기 위해서는 Base가 되는 구성품의 모서리에서 대상이 되는 구성품의 면(Target Surface)으로 사각형요소를 생성하고 용접요소와 연결된 요소도 반드시 사각형요소가 되도록 해야 한다. 용접 부위에 사각형요소를 생성하면서, 연결부위의 메쉬를 수정하는 과정은 반복적이고 많은 시간이 소요된다. 이 과정은 용접요

소 생성 유틸리티를 적용하여 반복적인 작업을 최소화하였다. 사용자는 용접으로 연결되는 모서리와 면, 그리고 용접요소 생성시 리메쉬를 수행할 영역을 Mesh Layer로 지정하면 된다. Fig. 3은 용접요소를 생성하고 용접부위를 리메쉬한 결과이다.

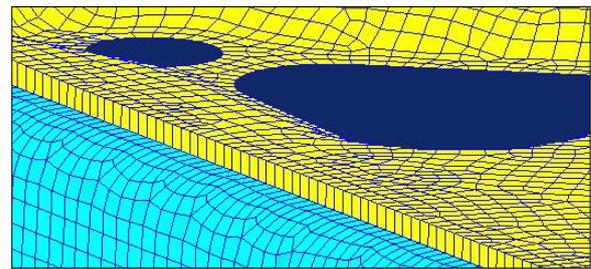


Fig. 3 Creation of welding elements

4. PSG와 FE-모델링 보조시스템

4.1 PSG(Parametric Set Generator)

PSG는 CAD 모델의 형상 파라미터를 자동으로 변경하는 기능을 갖고 있다. 파라메트릭 모델을 생성하기 위하여 부품의 주요 치수와 같은 기하학적 정보는 물론, 설계의도, 사양 및 기능과 같은 비기하학적 정보를 이용한다. 모델 생성시 반드시 형상 간의 모자관계와 독립 또는 종속변수에 대한 구속을 명확히 정의한다. 사용된 S/W는 CATIA V5를 기반으로 작동하며, CATIA 모델의 제한조건을 변경하고 갱신하는 작업을 수행한다. CAE 모델링의 자동 메쉬작업을 위한 각 멤버 외곽 면정보, 외곽 면을 구성하는 에지들 중에서 중요 에지(Feature Line), 용접요소 및 구조해석시 요구되는 경계조건 구현을 위한 각종 정보는 CATPart 파일 형태로 FE-모델링 보조시스템에 공급된다. Fig. 4는 PSG의 구성도이다.

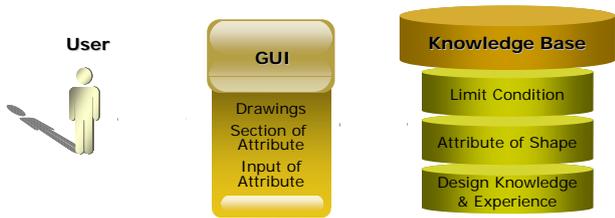


Fig. 4 Architecture of PSG

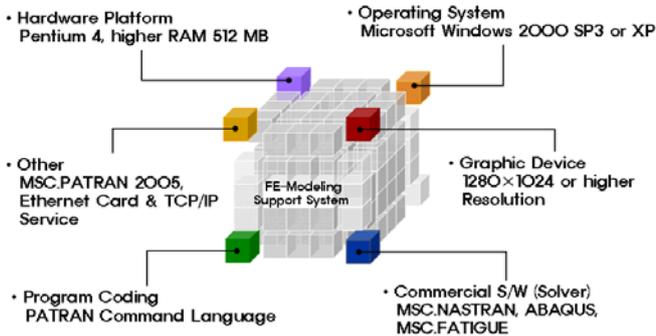


Fig. 5 System environment of FE modeling support system

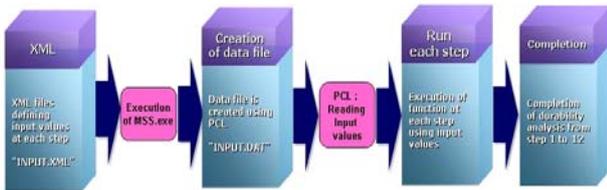


Fig. 6 Concept of data conversion technique

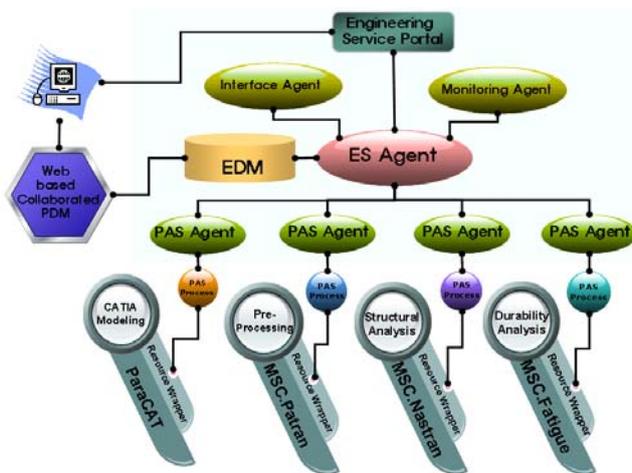


Fig. 7 Architecture of integrated design system

4.2 FE-모델링 보조시스템

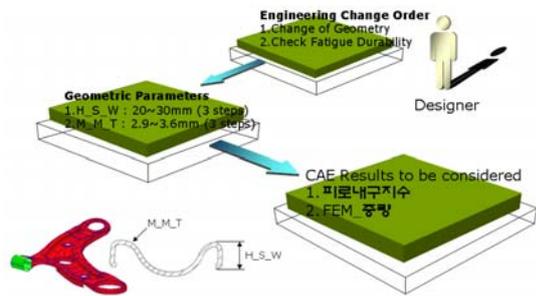
사용된 S/W는 MSC.Patran이며, 내장된 Acumen Toolkit으로 구현된 Navigation System과 PCL

(Patran Command Language)로 구성된 제어 시스템이 구현되어 있다. CAE를 수행하는 기능으로서 CATIA 파일을 입수하며, 유한요소해석을 위한 메쉬작업이 이루어진다. 다음 단계로서 요소 특성, 하중 및 경계조건을 구현을 위한 구조해석 전처리가 이루어진다. 하중, 경계조건이 MPC (Multi-Point Constraint) 기능으로 부과된다. MPC의 부과시에도 CATPart 파일에 저장된 형상정보가 이용된다. CAE를 위한 상용 S/W는 MSC.Nastran, ABAQUS 및 MSC.Fatigue이다. Fig. 5에 FE-모델링 보조시스템의 시스템 환경을 모식도로 나타내었다.

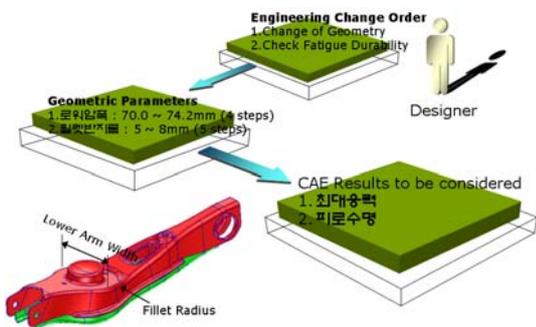
Data conversion 기술을 적용하여 Fig. 2와 같은 내구해석 절차를 자동화 하였다. Visual Basic으로 MSS.exe를 개발하여 프로세스의 입력값을 정의한 Input.xml을 해석하여 Input.dat로 변환시킨다. Input.dat는 MSC.Patran의 PCL이 번역하여 각 내구해석 절차에 소요되는 상용 S/W를 구동시킨다. Fig. 6은 이의 개념도이다.

5. 통합설계시스템

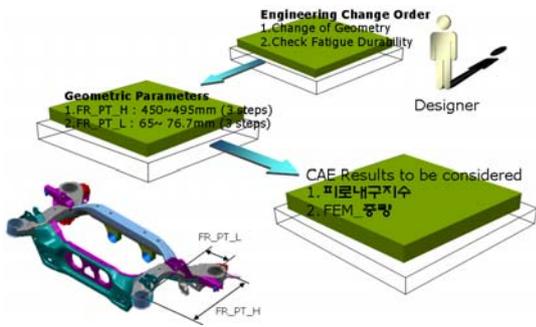
통합설계시스템은 제품개발의 엔지니어링 업무 흐름에 따라 단위 에이전트간의 협업 및 정보교환을 관리한다. 이는 멀티 에이전트 미들웨어인 JADE 환경 하에서 개발되었다. Fig. 7은 시스템 구성도이다. 시스템 구성은 자바 기반 오픈소스 개방형 구조를 따른다. 웹서비스는 Engineering Service Portal을 통해 이루어지며, 시스템의 총괄은 Engineering Server Agent를 통해 이루어진다. Interface Agent와 Monitoring Agent는 에이전트간의 연결 및 시스템 동작에 대한 모니터링 업무를 담당한다. 시스템 관리 및 운영에 필요한 데이터 관리는 관계형 데이터베이스와 FTP를 활용한 파일 시스템으로 구성된 EDM이 담당한다. 통합설계시스템에서 엔지니어링지식을 바탕으로 엔지니어링 도구를 사용하여 문제의 처리는 Process/Analysis Server(PAS) Agent가 담당한다. PAS 에이전트는 실제 엔지니어링프로그램들(CAD, CAE 등)과 연동되는 Resource Wrapper와 저장된 엔지니어링지식과 입출력 데이터를 활용하여 Resource Wrapper를 구동하는 PAS Process를 관리한다.



(a) FR Lower Arm



(b) RR Lower Arm



(c) RR Cross Member

Fig. 8 Design parameters and scenario of ECO for suspension modules

6. 피로내구설계의 실무절차

6.1 피로내구설계 시나리오

설계 초기단계에서 서스펜션 모듈 부품의 형상 최적화를 위하여 대상체의 주요 설계변수를 선정하고, 이의 변화에 따른 피로내구수명의 변화를 검토해야 한다. 대상 부품별 설계 시나리오를 모식도로 나타내면 Fig. 8과 같다.

6.2 해석결과

Fig. 9는 대표적으로 RR Cross member의 결과

로서 형상설계변수의 변화에 따라 Val_Lif와 FEM_Mass가 변화되는 것을 볼 수 있으며, FEM_Mass가 최소가 되면서 Val_Lif가 최대가 되는 형상설계를 선정할 수 있다.

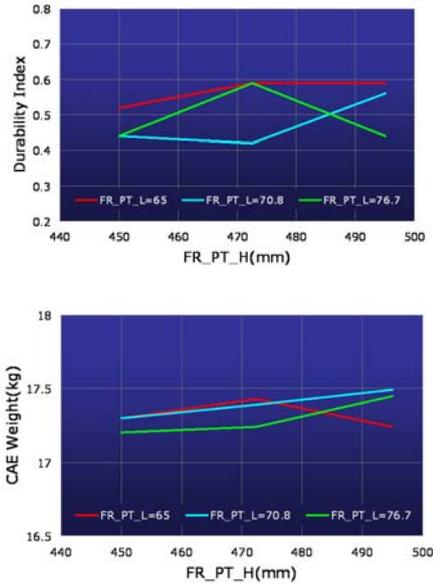


Fig. 9 Parametric study of the durability index and CAE weight for the RR Cross Member

6.3 통합설계 시스템의 효율 분석

자동차 서스펜션 모듈 단품 설계절차를 살펴보면, Table 2와 같이 구상도 및 상세설계, 설계검토와 같은 초기 설계단계가 있으며, 4차에 걸친 피로내구해석과 이에 따른 설계수정 과정이 반복된다. 이후, 설계확정과 동시에 최종 도면이 완성된다. 통합설계시스템을 적용 가능한 설계해석 업무 Flow는 상세설계, 1~4차 구조/내구해석 및 1~3차 설계수정이다. FR Lower arm, RR Lower arm 및 RR Cross member에 대하여 기존의 설계 방법으로 1인당 공수는 총 1,414시간이며, 본 연구에서 개발한 통합설계시스템을 적용할 경우 공수가 1,004시간으로 공수절감율이 40%에 달한다.

5. 결론

자동차 서스펜션 모듈의 피로파손의 PoF를 고려한 피로내구지수의 계산법을 통하여 주요 부품인 FR Lower arm, RR Lower arm 및 RR Cross member의 형상설계의 실무절차를 분석하였다. 또한, 멀티 에이전트 기반 엔지니어링 통합 프레임

Table. 2 Efficiency analysis of the integrated design system

설계 해석 업무 FLOW	설계 해석 투입 MAN-HOUR								
	기존 기법 적용시				통합설계시스템 적용				
	RR L/Arm (hr)	RR C/MBR (hr)	FR L/Arm (hr)	계 (hr)	RR L/Arm (hr)	RR C/MBR (hr)	FR L/Arm (hr)	계 (hr)	
구상도 설계	50	80	40	170	50	80	40	170	
↓									
상세 설계	Task1	130	180	70	380	160	220	90	470
↓									
설계 검토		40	60	30	130	40	60	30	130
↓									
1차 구조/ 내구 해석	Task2	8	80	4	92	0.2	1	0.1	1.3
	Task3	0.2	1	0.2	1.4	0.1	1	0.1	1.2
	Task4	1.3	2	1.2	4.5	0.1	0.5	0.1	0.7
↓									
설계수정(1차)	Task1	30	60	30	120	0.1	0.2	0.1	0.4
↓									
2차 구조/ 내구 해석	Task2	4	8	1	13	0.2	1	0.1	1.3
	Task3	0.2	1	0.2	1.4	0.1	1	0.1	1.2
	Task4	1.3	2	1.2	4.5	0.1	0.5	0.1	0.7
↓									
설계수정(2차)	Task1	30	60	30	120	0.1	0.2	0.1	0.4
↓									
3차 구조/ 내구 해석	Task2	4	8	1	13	0.2	1	0.1	1.3
	Task3	0.2	1	0.2	1.4	0.1	1	0.1	1.2
	Task4	1.3	2	1.2	4.5	0.1	0.5	0.1	0.7
↓									
설계수정(3차)	Task1	30	60	30	120	0.1	0.2	0.1	0.4
↓									
4차 구조/ 내구 해석	Task2	4	8	1	13	0.2	1	0.1	1.3
	Task3	0.2	1	0.2	1.4	0.1	1	0.1	1.2
	Task4	1.3	2	1.2	4.5	0.1	0.5	0.1	0.7
↓									
설계 확정		10	20	10	40	10	20	10	40
↓									
도면 작성		50	80	50	180	50	80	50	180
전체 공수		396	716	302.6	1414.6	311.9	470.6	221.5	1004
통합설계시스템 적용 공수		246	476	172.6	894.6	161.9	230.6	91.5	484
									29%
									46%

워크를 이용한 통합설계시스템을 개발하여 실무적인 설계 시나리오를 적용하여 통합설계 시스템의 효율분석을 실시한 결과 일인당 공수절감 효과가 40% 이상임을 확인 하였다.

참고문헌

(1) Lee, S. H., 2002, "Design Technology of Automobile based on Virtual Design", *J. of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol.8, No.1, pp. 19-26

(2) Han S. H., Jang K. S., Shin S. Y., Lee T. H, Kwon T. W. and Suh B. K., 2006, "Automation of Fatigue Durability Analysis of Welded Bogie Frame by performing Work Flow Analysis", *Proceedings of the KSME 2006 Spring Annual Meeting*

(3) Lin B.T. and Kuo C.C. : Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for stamping dies for automobiles, *The International Journal of*

Advanced Manufacturing Technology, Vol.35, No.9-10 (2008) 1000-1013

(4) Tseng K.C., Abdalla H. and Shehab E.M. : A Web-based integrated design system: its application on conceptual design stage, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.35, No.9-10 (2008) 1028-1040

(5) Skarka W. : Application of MOKA methodology in generative model creation using CATIA, *Engineering Application of Artificial Intelligence*, Vol.20 (2007) 677-690

(6) Park S. W., Lee J. K., Bang J. S. and Shin B. C., 2006, "Development of an e-Engineering Environment for automotive Module Design", *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Supported Collaborative Work in Design*, pp. 264-273

(7) Smith K., Watson P., Topper, T. : A Stress-Strain Function for the Fatigue Damage, *J. Mater.*, Vol. 5, No. 4 (1970) 767-778