

프로세스 통합도구를 활용한 용접대차프레임 피로내구해석의 자동화

Automation of Fatigue Durability Analysis of Welded Bogie Frame using Process Integration Tool

방제성* · 한승호* · 임채환* · 이광기** · 이광순** · 송시엽***

Je-Sung Bang · Seung-Ho Han · Chae-Whan Rim · Kwang-Ki Lee · Kwang-Soon Lee · See-Yeob Song

Abstract

For the design of welded bogie frame, the concept of multidisciplinary engineering activities, i.e. static, fatigue and dynamic analysis, has been applied, in which the sharing of design parameters related with each analysis and the collaboration of the working parts in charge should be fulfilled. However, in spite of these necessities, the multidisciplinary engineering activities couldn't be performed in practice due to lack of the automation of the required analysis. In this paper, an automation of fatigue durability analysis of welded bogie frame according to UIC-Code was proposed by using the ModelCenter, which enables to integrate the several tools for the fatigue durability analysis, i.e. I-DEAS, ANSYS and BFAP, and to perform iterative analysis works in relation to the geometrical change of transom support bracket. Besides, the wrapping programs to control I/O-data and interfaces of these tools were developed. The developed automation technique brings not only significant decreasing man-hour required in the durability analysis, but also providing a platform of the multidisciplinary engineering activities.

Keywords : Fatigue durability analysis(피로내구해석), Welded bogie frame(용접대차), Process Integration(프로세스통합), Multidisciplinary engineering(다분야공학)

1. 서론

대차프레임은 차륜, 차축, 각종 현수장치, 제동 및 동력 전달장치가 장착되어 차량을 지지하며 안내하는 기능을 갖는다[1-3]. 차체 자중 및 승차물에 따른 정적하중, 곡선 주행 및 제동 시 발생하는 준정적하중 그리고 불규칙한 선로와 각 구성품 간의 상대운동으로 인한 동하중이 복합적으로 대차프레임에 반복적으로 작용한다[1,2]. 철도차량의 안전성 확보를 위해서 반복되는 피로하중 조건 하에서 각 구성품의 동역학적 거동 분석과 대차프레임을 구성하는 부재의 피로강도가 충분히 확보되었는가에 대한 피로내구 해석이 수행된다

대차프레임의 경량화와 연계된 형상 최적화를 위해서는

차량동역학과 피로내구해석을 포함한 정적응력해석의 동시공학적 다분야 성능최적설계 개념[4,5]이 적용되어야 한다. 이 때, 각 성능해석 분야에 대한 자동화는 필수이며 각 성능해석에서 주목하는 설계변수에 대한 공유와 협업체제가 이루어져야 한다. 차량동역학 해석분야는 적용 CAE 툴이 정해져 있는 반면, 용접대차프레임에 대한 피로내구해석은 용접부의 불규칙한 특성과 적용방법에 대한 다양성으로 아직 확립되어 있지 못한 실정이다.

용접대차프레임의 피로내구해석법은 KIMM-Fatigue[1]가 가장 대표적이거나 이 방법에서는 용접부의 구조적 특성을 충분히 고려한 대표응력 산정이 다소 모호하며, 용접부의 특성을 경험적인 계수로서 고려하는 문제점을 갖고 있어 설계단계에서 직접 적용되지 못하고 있다.

대차프레임의 피로설계는 일반적으로 도시철도법[6]에서 정한 바를 따르고 있는데, 다양한 용접구조상세로 정의되는 피로취약부에 대하여 주어진 하중 반복수에 대한 허용응력과 응력비로 정의되는 MCJ 선도[7,8]로 구할 수 있다.

† 책임저자 : 정희원, 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부
* 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부
** (주)태성에스엔이 6시그마팀
*** (주)로템 기술연구소 응용기술연구팀

그러나, 대상 용접연결부가 어떤 구조상세에 적합한가에 대한 논란이 많으며, 연결부 형상이 복잡해지면 피로수명을 결정하는 대표응력의 선정 또한 어려운 과제로 남아 있다.

본 연구에서는 용접대차프레임에 대하여 공칭응력 및 Hot-Spot응력[9,10]을 적용한 피로내구해석법(BFAP)을 정립하고, 모델링-유한요소생성-정적응력해석-피로내구해석의 과정을 프로세스 통합도구인 ModelCenter로 자동화하여 국내 R사에서 개발하고 있는 전동차용 대차프레임의 형상변경 예제에 적용함으로써 피로내구해석의 반복 작업으로 소요되는 비용과 시간을 절감할 수 있는 자동화 시스템의 프로토타입을 개발하였다.

2. 용접대차프레임의 피로내구해석

2.1 대표응력 산정법

구조적 불연속부를 갖는 판요소에 하중이 가해지는 경우, 단면에 작용하는 응력은 일정크기의 공칭응력과 상하 표면부에 서로 다른 크기의 응력성분으로 야기되어 선형분포 특성을 갖는 Hot-Spot응력으로 나눌 수 있다[10]. 그러나, 용접비드 또는 언더컷과 같은 국부적인 불연속부가 존재하게 되면 응력분포는 비선형적으로 변하여 용접비드 선단에 작용하는 공칭응력과 노치응력을 구하는 것이 매우 어려워진다. 따라서, 구조적 불연속부에서 나타나는 선형적 분포만을 고려한 Hot-Spot응력 개념을 적용하면 용접비드 형상을 배제한 용접부 피로설계 대표응력의 산정이 가능해진다.

공칭응력을 대표응력으로 피로수명을 평가하는 경우 용접구조상세별로 실험적으로 구해진 많은 수의 S-N선도가 필요하게 된다. 반면, 용접연결부의 구조적 응력집중계수 K_s 만을 고려한 Hot-Spot응력을 적용하면 용접비드 형상에 무관한 하나의 통일된 S-N선도를 도출할 수 있어 피로수명 평가가 보다 효율적으로 수행될 수 있다. Hot-Spot응력을 구하는 방법은 K_s 를 산정하는 방법에 따라 다양하나 본 연구에서는 실무에서 광범위하게 적용되고 있는 Fig. 1과 같은 2점 외삽법[9,10]을 적용하였다.

2.2 용접연결부 형상별 피로내구선도

공칭응력을 적용한 용접부 피로수명평가를 위해서 노치 클래스 등급으로 정의된 용접구조상세별 S-N선도 및 평균 응력 효과를 고려하기 위한 Haigh 선도가 필요하다. ERRI B 12/RP 17[8]에 의하면, 용접대차프레임의 피로안전도 평가를 위해 대표적으로 모재, 맞대기 및 필렛용접 이음부에 대하여 2×10^6 회의 일정진폭 피로하중 반복수에서 파괴가 발생하지 않는 최대허용응력 σ_{max} 를 응력비 $R(=\sigma_{min}/\sigma_{max})$ 의

관계로 나타낸 MCJ(Moore-Commers-Jasper) 선도가 사용된다. 용접대차프레임의 상세구조는 이보다 매우 다양한 형상을 갖고 있으므로 철도차량의 노치등급별 용접구조상세에 대한 MCJ 선도를 제안하고 있는 DV952 규격[7]의 자료가 활용된다. Fig. 2는 DV952 규격에서 제안하고 있는 St52($\sigma_y=360\text{MPa}$, $UTS=520\text{MPa}$) 강재에 대한 MCJ 선도 및 이를 평균응력과 응력진폭의 관계로 변환시킨 Haigh 선도이다.

공칭응력의 정의가 모호한 경우 전 절에서 설명한 바와 같이 Hot-Spot응력을 대표응력으로 적용할 수 있다. 평균응

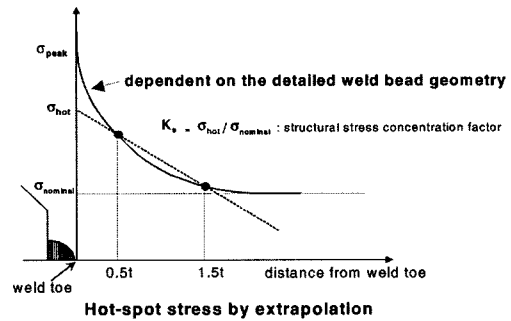
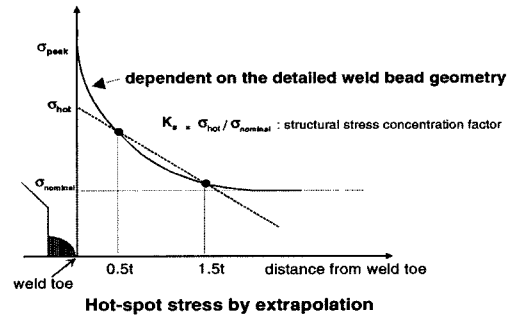
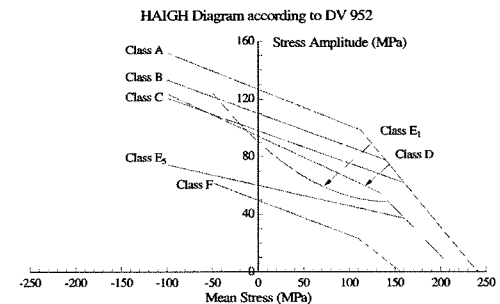


Fig. 1. Calculation of hot-spot stress by extrapolation



(a) MCJ-diagram



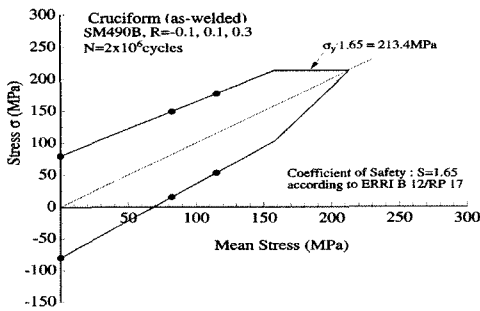
(b) Haigh-diagram

Fig. 2. MCJ and Haigh-diagram according to DV952

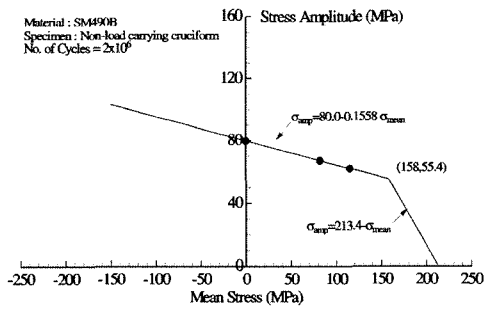
력 효과는 고속전철기술개발사업의 결과[11] 중 R= -1, 0.1 및 0.3에 대한 Hot-Spot응력 기준 S-N 선도로부터 2×10^6 회의 일정 진폭을 갖는 피로하중 하에서 파괴가 발생하지 않는 허용응력 σ 와 평균응력 σ_m 으로 표현되는 Smith 선도를 활용하였다. Fig. 3은 Smith 선도와 이를 Haigh 선도로 변환한 결과이다.

2.3 피로하중의 정의와 피로내구도 기준

대차프레임 피로설계를 위한 피로하중의 정의는 UIC Code 615-4[12]에 따른다. 하중 성분은 Fig. 4와 같이 2차



(a) Smith-diagram based on Hot-Spot stress



(b) Haigh-diagram converted from Smith-diagram

Fig. 3. Smith and Haigh-diagram based on Hot-Spot stress

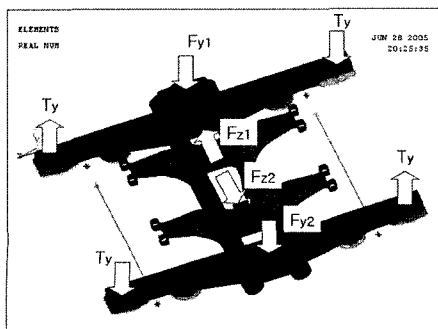
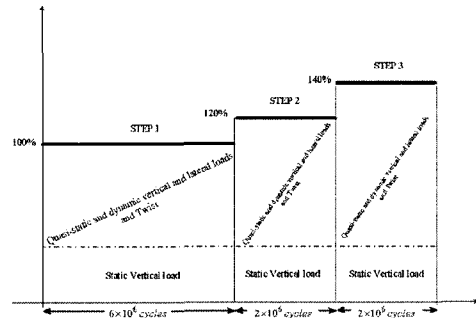


Fig. 4. Component of load

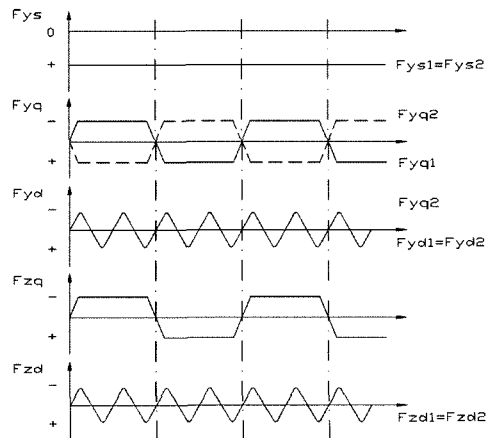
현수장치에 수직방향으로 작용하는 2개의 F_y 및 transom support bracket에 작용하는 좌우방향의 F_z 로 구성되며, 여기에 대차대각선 방향으로 차축의 비틀림 성분 T_y 가 추가된다. 이때, 1차 스프링의 x, y 및 z 방향의 스프링상수를 고려한다.

피로하중 조건은 Fig. 5와 같이 F_y 및 F_z 성분에 대하여 준정적하중(q 로 표기)인 경우와 동하중(d 로 표기)인 경우로 나누고, 이것에 동적계수 α 및 β 의 100%, 120% 및 140%를 반영한 3 step으로 나누어 적용하였으며, Step 당 가해지는 하중 반복수는 $6 \times 10^6, 2 \times 10^6$ 및 2×10^6 으로 총 1×10^7 회이다. 비틀림하중 T_y 는 차축(Wheel Base) 길이에 대한 0.5% 대칭변위에 준하는 성분으로 관련한 하중반복수는 각 Step 당 10%를 차지한다.

피로내구 기준은 UIC Code 615-4에서 주어진 8×10^6 회까지 상기한 피로하중 조건에서 대차프레임에 균열이 발생되지 않아야 하며, 추가적인 2×10^6 회에 대하여 실균열(보수 가능한)은 허용한다. 본 규정을 만족하는 대차프레임의 경량



(a) Definition of fatigue test step



(b) Forces applied during fatigue test

Fig. 5. Fatigue loads according to UIC Code 615-4

설계를 위해서는 피로내구 기준을 만족하는지 여부의 평가 이외에 형상변화에 따른 누적피로손상도를 고려해야 한다. 이를 위해서 다양한 하중·경계조건을 고려한 정적응력해석 및 이와 연계된 피로내구해석의 반복 작업이 요구되므로, 작업공수 절감을 위한 모델링-유한요소생성-정적응력해석-피로내구해석 프로세스의 자동화가 필요하다.

3. 자동화 시스템 개발환경 및 설계

3.1 시스템 개발환경

용접대차프레임 피로내구해석 자동화를 위해 사용된 소프트웨어와 하드웨어는 Table 1과 같다. 대차프레임의 형상 변화 및 유한요소생성을 위한 CAD 소프트웨어로 I-DEAS를 이용하였으며, 정적응력해석을 위해 ANSYS를 활용하였다. 정적응력해석을 위한 입력파일은 세 개로 나누어서 관리한다. 첫째, I-DEAS에서 생성한 요소, 절점 및 그룹 정보를 가진 파일, 둘째, 하중과 경계조건 정보를 가진 파일, 마지막으로 Dynamic Agent에서 제공하는 1차 현수장치의 탄성계수 값을 가진 파일이다. 피로내구해석을 위한 공칭 및 Hot-Spot응력을 기준으로 한 피로내구해석 프로그램(BFAP)은 in-house 코드를 활용하였다. 모델링-유한요소생성-정적응력해석-피로내구해석 프로세스의 통합 및 자동화는 Model Center Ver.6.1을 이용하여 구현하였다. 입·출력 및 인터페이스 관리를 위하여 다양한 Wrapping 프로그램을 자체적으로 개발하였으며, 반복계산이 필요한 부분은 ModelCenter에서 제공하는 Visual-Basic 기반의 Script 언어로 개발하였다.

3.2 시스템 설계

피로내구해석을 위한 전체 자동화 프로세스는 Fig. 6과 같으며, 각 단계에서 생성되는 입·출력파일과 activity들은 Table 2, 3과 같다. 모든 입출력 파일들과 activity들은 ModelCenter에 의해 관리·실행된다. 입출력 파일에서 필요한 정

Table 1. System requirements

System	Environment
Hardware Platform	higher than 600MHz Pentium, 64MB RAM
Operating System	Microsoft Windows NT4.0(SP3) Microsoft Windows 2000 SP3 Microsoft Windows XP
Engineering S/W	CAD : I-DEAS Ver.9 CAE : ANSYS Ver.9 BFAP : In-house code
Process Integration	ModelCenter Ver.6.1

보를 얻기 위해 Wrapping 기술이 사용되었다. 전체적으로 Ni 횡수 만큼의 transom support bracket의 위치변경 조건과 Nj 횡수 만큼의 하중조건에 대해 수행되므로 총 Ni×Nj 횡수 만큼의 프로세스가 진행된다.

4. 시스템 개발 및 구현

4.1 형상변화 및 유한 요소생성의 자동화

용접대차프레임 transom support bracket의 위치변화를 위해 I-DEAS의 macro 프로그래밍을 활용하였다. Fig. 7은 transom support bracket의 위치변화에 따른 대차프레임의 형상 변화이다.

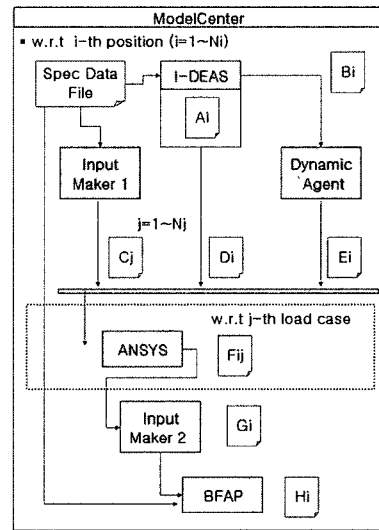


Fig. 6. Overall process based on ModelCenter

Table 2. Contents of I/O-files

Files	Contents
Ai	Modeling files in I-DEAS
Bi	Files that contain moment of inertia and mass center of bogie frame
Cj	Input files for ANSYS from Spec Data File (loading/boundary conditions, material data, etc.)
Di	Input files(grouping and meshing) for ANSYS based on Ai
Ei	Input files for ANSYS with optimal spring constants from Dynamic Agent
Fij	Result files(stresses in Cartesian coordinate or principal direction) from ANSYS using Cj, Di and Ei
Gi	Input files for BFAP from Input Maker 2 according to nominal and Hot-Spot stress concept
Hi	Output files(fatigue damages) from BFAP

Table 3. Role of activities

Activity	Role
I-DEAS	Modeling by reading the information of transom support bracket's location from Spec Data File
	Meshing and producing Di corresponding to ANSYS
	Designating design parameters and grouping Info. considered in Di and Fij
	Generating moment of inertia and mass center of bogie frame to be read in Dynamic Agent(ANSYS)
Dynamic Agent	Performing dynamic analysis and producing Ei containing optimal spring constants
Input Maker 1	Producing Cj from Spec Data Files with loading/boundary conditions and material data
ANSYS	Performing static stress analysis using Cj, Di and Ei, then making Fij
Input Maker 2	Producing Gi for BFAP by using Fij
BFAP	Performing fatigue durability analysis
Model Center	Managing the whole process and wrapping the I/O data and execution files

유한 요소는 공칭 및 Hot-Spot응력 기준에 따라 서로 다르다. 대표응력을 결정하는 위치는 Fig. 8과 같이 side frame과 transom 용접연결부 및 transom support bracket과 transom 용접연결부 상하 각 두 곳이다. 공칭응력기준의 경우 4군데마다 하나의 절점에서의 응력을 고려하였으며, 요소 크기는 구조해석과 계측실험을 통한 경험적 값으로 결정하였다.

Hot-Spot응력 산정을 위한 절점분할법[13]을 side frame과 transom이 교차하는 용접연결부에 대하여 Fig. 9와 Table



Fig. 7. Change of geometry due to location of transom support bracket

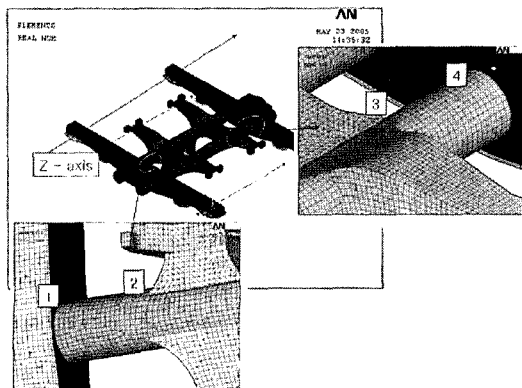


Fig. 8. Positions for fatigue durability analysis

4, 5과 같이 적용하였으며, transom과 transom support bracket이 교차하는 용접부의 경우 Fig. 10과 Table 6, 7과 같이 적용하였다. Ni 횡수의 transom support bracket의 위치변화에

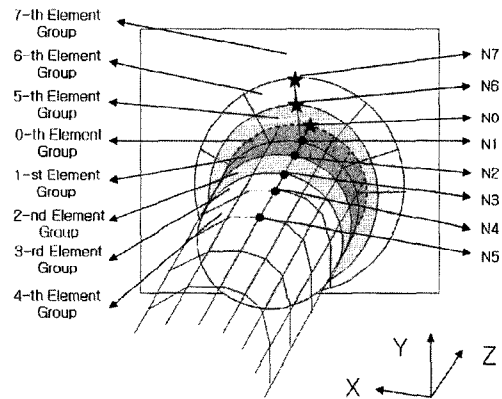


Fig. 9. Schematic illustration of meshes applied to welded joints between transom and side frame

Table 4. Position of each node(see Fig. 9)

Node	Relative position of nodes in y-dir.
N7	$0.5tt + tw1$
N6	$0.5tt$
N1	0

Node	Relative position of nodes in z-dir.
N0	$0.5ts$
N1	0
N2	$- 0.5ts$
N3	$- (0.5ts + tw1)$
N4	$- (0.5ts + 2tw1)$
N5	$- (0.5ts + 3tw1)$

Table 5. Thickness of each element group(see Fig. 9)

Element group	Thickness
0	tt + tw1
1	tt + tw1
2	tt + 0.5tw1
3	tt
4	tt
5	ts + tw1
6	ts + 0.5tw1
7	ts

tt : thickness of transom
 ts : thickness of side frame
 tw1 : leg length of weld bead = (tt + ts) / 2

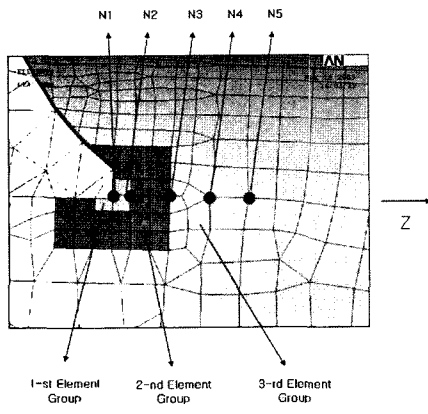


Fig. 10. Schematic illustration of meshes applied to welded joints between transom and transom support bracket

대하여 매 회 유한요소가 자동으로 수행되는 기능을 포함하고 있다. 결과를 관찰하기 위한 부위에는 모델의 형상이 변하여도 절점이 생성되어 결과를 출력할 수 있도록 모델링해야 한다. 이를 위하여 anchor point를 생성하고 유한요소를 생성하면 anchor point에 자동적으로 절점이 생성된다. 이렇게 생성된 절점들을 그룹으로 지정하면 ANSYS에서 모델을 import하여도 그 정보를 그대로 사용할 수 있다.

4.2 하중, 경계조건 부과 및 정적응력해석

Fig. 4, 5와 같은 피로하중 조건을 고려하기 위하여 총 36가지의 하중 및 경계조건을 산정하였다. 각 조건은 Fig. 6에서 설명한 Cj에 대응되는 테이블로 작성하여 ANSYS에서 이를 자동으로 불러들여 정적응력해석을 수행하였다.

공칭응력 기준의 경우, 최대하중 하에서 계산된 주응력 성분 σ_{max} 와 최소하중 하에서 구한 주응력을 최대하중에 의한 주응력 성분 방향으로 투영시켜 변환한 응력 성분 σ_{min} 을 피로응력 성분으로 규정하고[8], 이를 피로내구해석 입력데이

Table 6. Position of each node(see Fig. 10)

Node	Relative position of nodes in z-dir.
N1	0
N2	0.5tb
N3	0.5tb + tw2
N4	0.5tb + 2tw2
N5	0.5tb + 3tw2

Table 7. Thickness of each element group(see Fig. 10)

Element group	Thickness
1	tt + tw2
2	tt + 0.5tw2
3	tt

tt : thickness of transom
 tb : thickness of transom support bracket
 tw2 : leg length of weld bead = (tt + tb) / 2

터로 이용하였다. Hot-Spot응력의 경우, 대상 용접연결점에서 떨어진 5개의 절점(Fig. 9, 10 참조)의 용접비드 수직방향(z 방향) 응력성분을 최소자승법으로 피팅하고, 이를 Fig. 1과 같은 2점 외삽법을 통하여 Hot-Spot응력 σ_{hot} 을 구하였다. 공칭응력과 마찬가지로 최대, 최소하중 조건에 대한 $\sigma_{hot,max}$ 및 $\sigma_{hot,min}$ 을 피로응력 성분 데이터로 변환하였다.

4.3 피로내구해석 프로그램 개발

본 연구에 적용한 피로내구해석법은 2.2절에서 제시한 Haigh 선도 및 선형손상누적 이론인 Palmgren-Miner 법칙을 적용하였다. 평균응력 효과는 Haigh 선도로 평가하였는데, 이는 식 (1)과 같이 다양한 하중·경계조건으로 얻어진 서로 다른 평균응력 σ_m 과 응력진폭 σ_a 를 등가응력진폭 σ_{ar} 로 변환하는 방법이다.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{m,int}} = 1, \quad \sigma_{ar} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{m,int}}} \quad (1)$$

여기서, σ_{ar} 은 R=-1 기준 등가응력진폭이며, $\sigma_{m,int}$ 는 Haigh 선도의 σ_m 축의 절편이다.

공칭응력을 기준으로 하는 경우, 누적피로손상도는 $\sigma_{n,ar} - N_{n,ar}$ 선도(첨자는 n은 공칭응력을 의미)로 구할 수 있다. 각 노치등급에 따른 선도는 하중반복수 $N_{n,ar}$ 이 1×10^7 회까지이며, S-N선도의 기울기 m이 3으로 일정하다는 BS7608 [14]을 참고하면 쉽게 얻을 수 있다. 또한, Hot-Spot응력을

적용하기 위하여 공칭응력의 경우와 마찬가지로 Fig. 3(b)의 Haigh 선도와 식 (1)을 이용해 $\sigma_{hot,ar}$ 을 구하고, 누적피로손상도 평가를 위한 $R = -1$ 에 대한 $\sigma_{hot,ar} - N_{hot,ar}$ 선도[11]를 활용하였다(첨자 *hot*는 Hot-Spot응력을 의미). 식 (2)는 대표적으로 Class D에 대한 $\sigma_{n,ar} - N_{n,ar}$ 선도이고, 식 (3)은 Hot-Spot응력 기준 $\sigma_{hot,ar} - N_{hot,ar}$ 선도이다.

$$N_{n,ar} = 1.66 \times 10^{12} \cdot \sigma_{n,ar}^{-3} \quad (2)$$

$$N_{hot,ar} = 3.48 \times 10^{14} \cdot \sigma_{hot,ar}^{-4.33} \quad (3)$$

누적피로손상도 D 는 Palmgren-Miner 법칙을 이용하여 Fig. 5와 같은 3 Step에 대한 피로하중조건(총 36 가지)에 대한 18가지의 $\sigma_{max} - \sigma_{min}$ 조합으로 구하여진다. 이상의 작업공정을 전산화하여 피로내구해석 프로그램 BFAP를 자체적으로 개발하였다.

4.4 전체 시스템 구현

ModelCenter로 구현된 전체 Process 과정은 Fig. 11과 같다. 모델링-유한요소생성-정적응력해석-피로내구해석 및 데

이터 변환 작업 등을 포함하여 공칭응력인 경우에는 총 9개, 그리고 Hot-Spot응력인 경우에는 총 10개의 모듈로 구성된다. 각 모듈은 모두 입·출력자료로 서로 연결되어 데이터를 자동으로 주고받도록 구성되어 있다.

공칭 및 Hot-Spot응력 경우 모두 Bogie_ANSYS_run 모듈에서 36회의 정적응력해석을 반복한다. 이를 위하여 Model-Center에서 제공하는 Reference variables[15]을 이용하여 반복 작업을 수행하였다. 이후, Bogie_Nominal_Post 및 Bogie_HotSpot_Post에 각 하중 조건에 해당하는 정적응력 해석 결과가 정리된다. 공칭응력의 경우, Bogie_Nominal_DCosine모듈이 주응력 σ_{max} 와 이 성분 방향으로 투영시킨 σ_{min} 을 ANSYS 해석 결과인 방향여현(Direction Cosine)을 이용하여 Bogie_BFAP_Nominal 모듈의 입력자료로 변환한다. Hot-Spot응력의 경우, 5개 절점에서 얻어진 z-방향 응력 성분을 Bogie_HotSpot_SLS를 통해 최소사승법으로 피팅하고, 2점 외삽법을 적용하여 Bogie_BFAP_HotSpot 모듈의 입력자료를 생성한다. 모든 일련의 작업(입·출력 및 인터페이스 관리)은 ModelCenter를 이용한 Wrapping 프로그램과 Visual-Basic 기반의 Script 언어로 이루어졌다.

Fig. 12는 공칭 및 Hot-Spot응력 기준 하에 transom support bracket 위치변화에 따른 4군데(Fig. 8에서 언급) 용접 부위에서의 누적피로손상도 D 의 변화를 보여주고 있다. Position 1, 2 및 4에서의 D 는 0.08 이하로 매우 낮아 주어진 피로하중 조건에서 피로파손의 발생확률은 매우 낮은 것으로 판단된다. 또한, Position 3의 경우 공칭 및 Hot-Spot응력 기준의 경우 D 는 각각 0.25~0.5 그리고 0.2~0.3 정도의 크기를 보여, 피로강도 측면에서 적절히 설계되었다고 판단된다. 그리고, transom support bracket 간의 간격 변화에 따른 D 의 변화를 살펴보면, 간격이 커짐에 따라 D 는 초기에 일정하다가 이후 감소하는 경향을 보인다. 이는 transom support bracket 위치가 side frame 쪽으로 접근함에 따라 비틀림 하중성분에 대한 대차 프레임의 비틀림 거동을 transom support bracket이 잡아주기 때문으로 판단된다. 하지만, transom support bracket의 기능은 transom 하단에 장착된 mono-link bracket에 가해지는 전·후방향의 하중을 분담하기 위한 기능도 갖고 있으므로 두 가지 거동을 만족하는 최적의 위치를 결정해야 한다. 이와 같이 형상변화를 포함한 최적설계가 요구되는 실무작업에서 본 연구에서 구축한 프로토타입 시스템이 적용되면, 피로내구해석의 반복작업으로 소요되는 비용과 시간을 대폭 절감할 수 있을 것으로 사료된다.

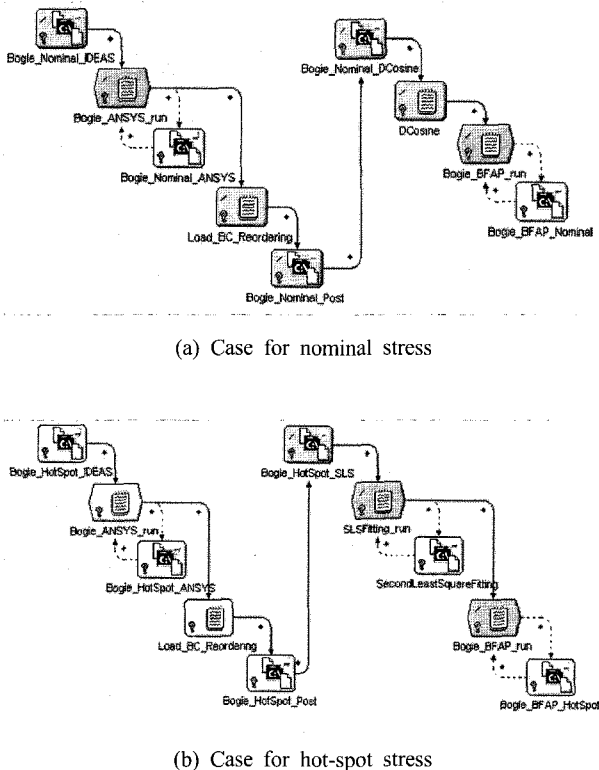
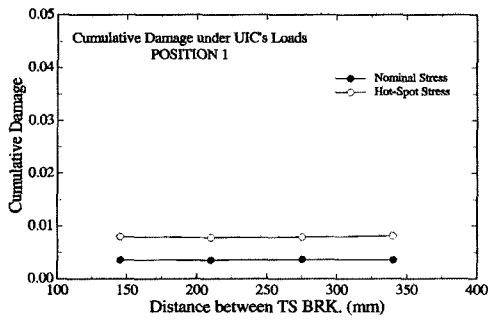
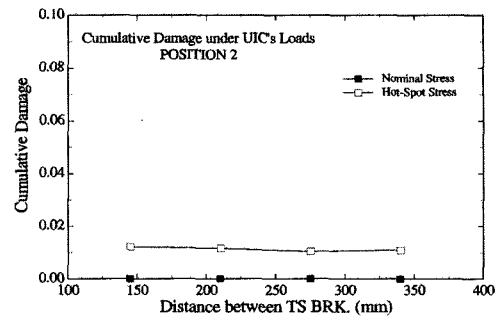


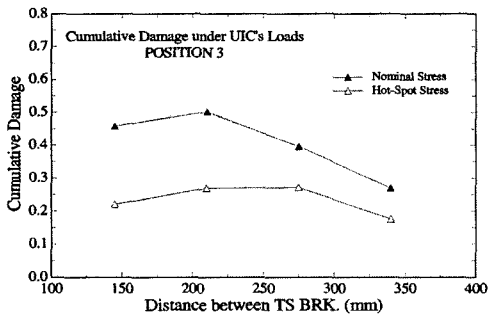
Fig. 11. Process integration using ModelCenter



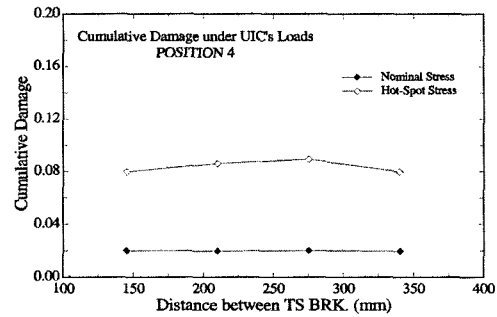
(a) Position 1



(b) Position 2



(c) Position 3



(d) Position 4

Fig. 12. Cumulative fatigue damages at position 1~4

5. 결론

본 연구에서는 용접대차프레임의 피로내구해석 자동화 시스템의 프로토타입을 프로세스 통합도구인 ModelCenter를 이용하여 개발하였다. 개발된 프로토타입을 국내 R사에서 개발하고 있는 전동차용 대차프레임의 형상변경 예제에 적용하여 그 특성을 분석하였다. 이를 통해 설계변경 시 빈번히 발생하는 모델링-유한요소생성-정적응력해석-피로내구해석의 반복 작업을 자동화 할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 공칭 및 Hot-Spot응력기준 피로내구해석의 자동화를 통하여 실무작업시 형상변경에 따른 반복적인 정적응력해석과 피로내구해석에 소요되는 시간과 비용을 대폭 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 향후, 본 프로토타입은 동역학해석 등을 포함한 동시공학적 다분야 성능최적설계 프레임워크로 활용될 것이다.

후 기

본 연구내용은 한국기계연구원 기본사업 과제인 “구조강도평가 시뮬레이션 기술개발”의 일부임을 밝히는 바이며, 연구수행에 지원을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 이상록, 이학주, 한승우, 김정엽, 차정환, 강재운, 박찬경, “대차프레임의 피로설계 및 피로강도 평가”, 한국철도학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp.234-241, 2000.
2. 박기준, 이호영, 이관섭, 김원경, “표준전동차 대차틀 피로강도 평가(I)”, 한국철도학회논문집, 제3권, 제3호, pp.170-176, 2000.
3. 구정서, 한형석, 조현직, 송달호, “경량전철 대차 선회프레임의 정적강도와 피로특성의 분석”, 한국철도학회논문집, 제5권, 제4호, pp.222-230, 2002.
4. 이재경, 박성환, 이종원, 한승호, 한형석, “멀티 에이전트 기반의 통합설계 시스템 개발”, 한국정밀공학회지, 제22권, 제1호, pp. 14-18, 2005.
5. 김현, 명재형, 이재열, 김형선, 한성배, “가상공학을 위한 분산협동설계”, “99 한국CAD/CAM 학회 학술발표회 논문집”, pp.61-66, 1999.
6. 도시철도차량표준사항, 건설교통부고시, 제1998-53호('98. 2. 26 제정).
7. DV952, Vorschrift für das Schweißen metallischer Werkstoffe in Privatwerken, Deutsche Bundesbahn, 1977.
8. ERII B 12/RP 17, (8th Edition), Wagons, European Rail Research Institute, 1997.
9. 한승호, 신병천, 한정우, “Hot-Spot응력에 의한 용접부의 피로강도평가 및 피로설계기준의 도출”, 대한기계학회논문집, 제22권, 제11호, pp.2072-2083, 1998.

10. Han, S.H. and Shin, B.C., "The use of hot spot stress for estimating the fatigue strength of welded components", Steel Research, Vol.71, No.11, pp.466-473, 2000.
11. 고속전철기술개발사업 연구보고서, 98-2-1-5, 대차개발, 1999.
12. UIC Code 615-4, Motive Power Units-Bogies and Running Gear-Bogie Frame Structure Strength Tests, International Union of Railways, 1994.
13. Machida, S., Matoba, M, Yoshinara, H. and Nishimura, R., "Definition of Hot Spot Stress in Welded Structure for Fatigue Assessment(3rd Report-FEM)", J. of SNAJ, Vol.171, pp.477-484, 1992.
14. BS7608, Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures, British Standard, 1993.
15. ModelCenter Ver.6.1 Help Library, Phoenix Integration, Inc.