

노치응력접근법을 이용한 차량구조재 용접이음부의 피로내구성 해석

김민건* · 민태국**

*강원대학교 공과대학 기계메카트로닉스공학부

**강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

Analysis of Fatigue Durability on Seam Weldment using Notch Stress Approach

Min-Gun Kim* and Tae-Gug Min**

*Division of Mechanical·Mechatronics Engineering, Kangwon University, Chunchon 200-701, Korea

**Dept. of Mechanical·Mechatronics Engineering, Kangwon Graduate School

Abstract

Fatigue life at seam weldment of thick plate was estimated using the finite element and FEM-FAT(an exclusive fatigue solver). Finite element meshing at toe and root of weldment was based on Radaj's theory. Also, the results of FE analysis were compared with experimental results in the point of Miner's Rule.

The results of FE and FEM-FAT analysis were in accord with experimental results within 60% confidence. This result reveals that above techniques is useful in assessment of seam weldment and to be an alternative method instead of an object experiment.

* Corresponding author : tgmin@kopo.or.kr

(Received September 15, 2003)

Key Words : Seam weldment, Fatigue life, Finite element analysis, Radaj's theory

1. 서 론

1.1 본 연구의 목적

차량구조재, 예를 들어 전동차의 대차 프레임은 기계요소들의 다양한 결합체이고, 기계적 효율이 우수하다는 점에서 용접을 이용한 결합방법이 널리 사용되고 있다. 용접은 용접자의 숙련도와 열처리 등의 방법에 따라 구조물의 변형이나 결함발생, 재료 자체의 야금학적 변화를 초래한다. 이로 인하여, 반복적인 하중을 받는 대차 프레임에 대하여 모재의 피로한도를 기준으로 구조설계를 수행할 경우, 예기치 않은 피로파손이 현장에서 자주 일어나고 있다.

차량개발 초기단계에서 용접부에 대한 신속하고 신뢰성 높은 피로내구성의 평가는 차량개발의 핵심적 사항이다. 그러나 대부분의 국내 제조사에서는 용접부에 대한 체계적인 설계기준과 평가방법의 부재로 인하여, 경험적인 방법 또는 시간과 비용이 많이 소요되는 실험적

인 방법으로 용접부를 설계하고 있다.

용접부의 피로특성에 관한 연구는 주로 잔류응력¹⁻³⁾ 및 용접결합⁴⁾에 대하여 오래전부터 실험적인 기법으로 이루어져 왔다. 그러나, 용접부의 피로수명을 전산기법을 이용해서 예측한 연구는 국내에서 찾아보기가 어렵다.

국외에서는 오랜 기간의 연구 성과를 바탕으로 BS, DIN 및 AWS 규격과 같은 지역 및 산업분야별 용접부의 상세 피로설계 기준⁵⁾을 마련하여 평가표준에 따른 결합 용접부의 설계를 수행하고 있다.

용접구조물에 외력이 반복해서 작용하면 형상변화부, 이음부 등에서 응력집중이 발생하고, 용접부 주변의 응력조건이 상당히 위험한 수준까지 이르게 되어 피로균열이 발생, 진전하게 된다. 그러므로 응력집중부 즉 용접부(weld joint), 특히 용접토우부(weld toe)와 용접루트부(weld root)의 국부적 상태를 고려한 적절한 피로내구성 평가방법을 강구하여야 한다. 용접에 관련된 데이터는 특성 상 분산(scattering)이 크기 때문에, 용접부의 피로특성을 정량화하기가 곤란한 것으로 알려져

왔다.

본 연구에서는, 용접부의 피로특성에 결정적 영향을 미치는 응력집중부, 즉 용접토우부와 용접루트부에서의 국부응력 상태를 파악하기 위해 Radaj의 이론⁶⁾을 적용하였다. 용접부에서의 피로특성 평가를 목적으로 유한요소해석을 위한 용접부의 모델링기법을 개발하였으며, 또한 실험적 검증을 수행하여 해석결과와 비교하였다. 그리고 Miner의 누적손상법칙을 비교 기준으로 삼아 용접부의 피로수명을 평가함으로써, 용접부의 신뢰성 향상에 기여하였다.

1.2 노치응력접근법(Notch Stress Approach)에 대하여

피로하중을 받는 용접구조물에서의 피로크랙 발생은, 여기에 결정적 영향을 미치는 용접루트부와 용접토우부에서의 노치응력과 변형률로써 정량적으로 나타낼 수 있다. 노치응력은 크랙의 발생과 진전 그리고 파단에 이르기까지의 피로강도에 결정적인 영향을 준다. 용접구조물의 피로강도에 큰 영향을 미치는 노치효과는 노치에 의한 응력집중과 강도저하를 의미한다. 노치가 없는 재료의 피로강도는 노치가 있는 재료의 피로강도보다. 파괴 역학적 측면에서 덜 중요시 된다. 노치효과를 고려한 피로강도 평가과정은 무한수명을 가지는 피로강도 또는 일정진폭하중 하에서 정의된 피로한도 ($N > 10^6$)와 관련되어 있다. 이런 경우에서의 Radaj의 가정은 노치루트에서의 소성변형은 발생하지 않는다는 것이다. 즉 응력형태로의 노치효과를 완전탄성으로 가정하였다.

노치응력접근법은 Neuber의 이론⁷⁾을 바탕으로 한다. Neuber는 응력집중에 영향을 주는 주요 인자로 노치 반경을 제시하였다. Radaj는, 용접부 노치반경의 분산이 크므로 Neuber의 이론을 수정하였다. 결정론적 피로강도를 산출하기 위한 기준으로, 피로노치계수의 최대 값이 응력집중계수의 값과 같을 경우를 용접부의 응력상태를 파악하는 기준으로 제시하였다. Radaj는 Neuber의 미세조직 지원설(Microstructural support hypothesis)을 바탕으로 용접부의 피로노치계수를 유도하였다. Neuber의 미세조직지원설이란, 탄성론에 의한 노치부에서의 최대응력이 크랙의 발생과 진전을 제어하는 것이 아니라, 결정구조(grain structure)와 미소항복(microyielding) 그리고 크랙발생과정을 설명할 수 있는 노치부 재료의 미소길이, 미소면적, 미소체적 등을 고려한 평균화된 최대 응력으로부터 얻어진 국부 응력에 의해 크랙발생이 제어된다는 가설이다. 미세조직 지원효과는 예리한 노치뿐만 아니라, 그 크기가 충

분히 작다면 둔한(mild) 노치에도 적용이 가능하다.

이와 같이, 피로노치계수는 노치반경과 추가적으로 응력집중계수를 제어하는 파라미터인 재료 특징적 미세조직길이(material-characteristic microstructural length)에 의존한다. 피로노치계수 K_f 는 다음 식에 의한 타원의 응력집중계수로부터 얻을 수 있다.⁶⁾

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{\sqrt{\frac{1 + s\rho^*}{\rho}}} \quad (1)$$

여기서 K_f 는 피로노치계수이고, K_t 는 응력집중계수, s 는 다축성계수, ρ^* 는 대체미세조직길이이다. 그리고 ρ 는 실제노치반경이다.

피로노치계수는 가상노치반경 (fictitious notch radius)에 의한 피로-유효노치응력, $\bar{\sigma}_k$ 로부터 직접적으로 얻을 수 있다. 즉 다시 말해서 노치응력해석은 확대된 노치반경, 즉 가상노치반경에 대해서 수행된다는 것이다.

$$K_f = \frac{\bar{\sigma}_k}{\sigma_n} \quad (2)$$

$$\rho_f = \rho + s\rho^* \quad (3)$$

여기서, K_f 는 용접토우부와 용접루트부에서의 피로노치계수이고, ρ_f 는 가상노치반경이다. Fig. 1에 나타난 것처럼, 재료상수 ρ^* 는 정적강도에 의존하는 다양한 금속재료의 노치 시편의 교번피로시험으로부터 결정된다. 계수 s 는 노치응력의 다축성(평면응력, 평면변형 또는 전단하중)에 의존하고, Neuber의 가설로부터 적용되었다. 인장이나 압축 하중시 s 는 2.0~3.0, 면

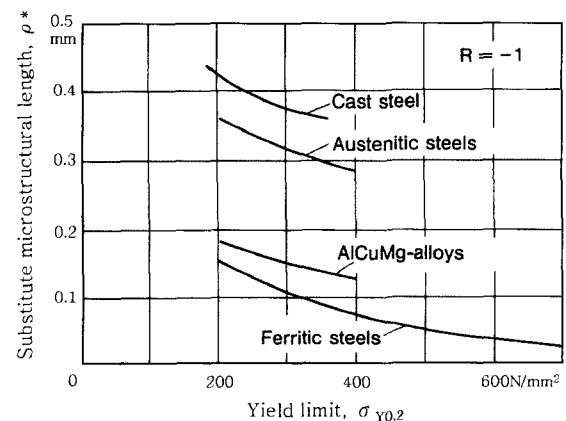


Fig. 1 Substitute microstructural length dependent on yield limit for different materials⁶⁾

내 전단 하중일 경우에는 0.074, 0.5의 값을 나타낸다. 용접부로 연결되어 있는 대부분의 경우 재료상수 s 의 값은 2.5로 일정하게 사용된다.

$$K_{f \max} = K_t \quad (\rho_f = 1) \quad (4)$$

$$K_f = \frac{\bar{\sigma}_{k \max}}{\sigma_n} \quad (5)$$

식(5)에서 공칭응력 σ_n 는 노치효과와 영향을 받지 않는 단면의 응력이다.

용접부의 문제점은, 응력집중계수에 대한 가장 중요한 영향을 미치는 노치반경의 분산이 너무 크다는 것이다. Radaj는 용접부의 피로강도를 평가함에 있어서 보수적인 추정을 $\rho^* = 0.4mm$, $s = 2.5$, 그리고 $\rho = 0$ (즉, $\rho_f = 1.0mm$)로 하여, 구조용강의 용접토우부와 용접루트부에서의 크랙발생에 대해 실제적으로 적용됨을 증명하였다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 피로시험

본 시험의 목적은 철도차량용 SM490A 용접재의 피로내구성을 평가하기 위한 것이다. SM490A의 기계적 성질, 화학적 성분은 Table 1, 2와 같다. 전동차의 프레임용 재료인 SM490A 용접재의 피로한도를 JSME S 002에서 제안하고 있는 피로시험법으로 구한 값과 노치응력접근법을 기초로 하여 구한 값을 서로 비교하여, 그 값이 적은 피로한도를 SM490A 용접부의 피로한도로 설정함으로써 대차프레임의 안전성 향상에 필요한 기준을 제시하려 한다.

시험편은 대차 프레임의 형상과 하중 형식이 평면 굽힘 상태이므로 평면 굽힘 피로 시험편을 사용하며, 그 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 시험편의 중앙부분에 용

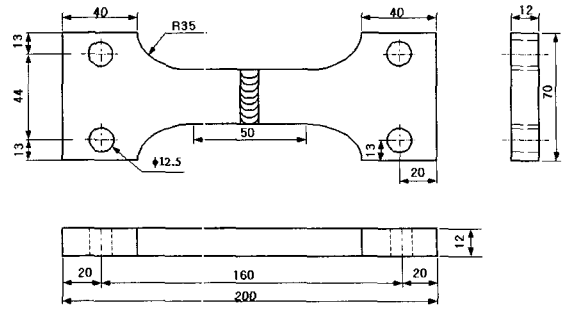


Fig. 2 Geometry and dimension of bending fatigue test specimen

접봉(electrode)을 사용하여 아크용접(그루브 형상, 루트간격 등은 Fig. 4 참조)을 행하였다.

피로시험은 유압 서어보식 피로 시험기를 사용하여 하중제어방식, 응력비=0, 20Hz로 수행하였다.

3. 시험, 해석의 결과 및 고찰

3.1 피로시험의 결과

SM490A에 대하여 평면굽힘 피로시험을 수행한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이 S-N 결과는 후술하는 전산시물레이션 결과의 신뢰성검증에 사용된다.

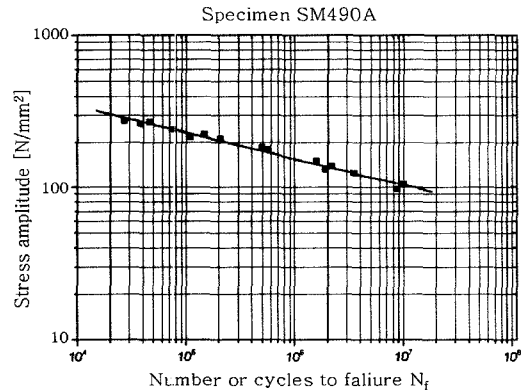


Fig. 3 Result of 4 points bending fatigue test

Table 1 Material properties of SM490A

Material properties		
Yield Strength (Mpa)	Ultimate Strength (Mpa)	Young's Modulus (Gpa)
350	510	205.3

Table 2 Chemical composition of SM490A

	C	SI	Mn	P	S
SM490A	0.20	0.53	1.60	0.35	0.035

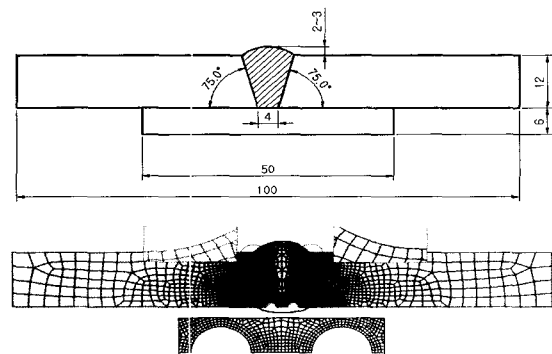


Fig. 4 Cross-section models of the welded joints

3.2 피로강도 평가의 해석적 접근

3.2.1 노치응력집근법에 의한 피로노치계수

맞대기 용접부의 단면모델 (cross-section model)로부터 용접토우부와 용접루트부의 노치응력집중계수, 즉 피로노치계수를 산정하기 위하여 유한요소법으로 선형해석을 수행하였다. 실제 용접부의 단면 형상은 Fig. 4와 같다. 대차프레임의 용접형태인 후판용접은 용접부의 완전 용입을 목적으로 모재사이에 뒷담판을 대고 용접을 한다. 해석시에는 Fig. 4와 같이 일반적인 맞대기 용접 모델로 설정하여 해석을 수행한다. 맞대기 용접부의 피로노치계수를 산정하기 위해 용접토우부와 용접루트부에 가상노치를 도입하고, 그 곡률반경 (ρ_f)은 1mm로 적용하였다.

Fig. 5는 가상노치반경 (ρ_f)을 적용한 용접부의 단면 형상과 해석결과인 응력분포를 나타낸 것이다. 피로노치계수를 산정하기 위해서 Pre/Post 프로세서는 I-DEAS를 사용하였고, 용접형태를 고려하여 일정단면을 유지하면서 길이가 긴 구조물의 해석에 사용될 수 있는 4절점 평면변형요소(plane strain element)를 사용하였다. Radaj가 제시한대로 용접토우부와 용접루트부의 메쉬(mesh) 크기는 0.1mm로 하였고 그 외의 부분은 2.5mm의 크기로 정의하였다(Fig. 4 참조). 대칭성을 고려하여 전체의 1/2 부분만 모델링 하였으며, 중심선을 따른 절점들에 대칭조건을 부여하였고 하중조건은 끝단에 굽힘모멘트를 주었다(Fig. 5-a). 인장시에는 Fig. 5(b)와 같이 단축인장의 하중조건과 X, Y방향의 변위 자유도만 가지는 경계조건을 주었다. 피로노치계수는 응력비 형태의 무차원이므로, 하중조건을 줄

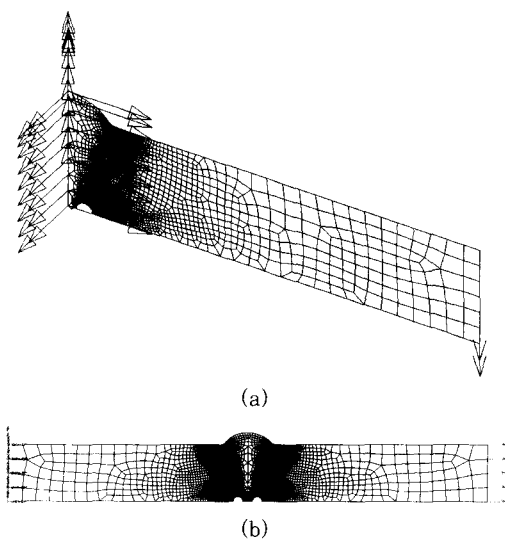


Fig. 5 Loading type, boundary condition of the structure and fictitiously notch rounded and stress analysis result

때는 각각의 조건에 대하여 임의의 값을 주면된다.

용접부의 노치응력집중계수는 식(5)에 의해 인장시에는 정미단면에 발생하는 공칭응력 σ_n 과 용접토우부와 용접루트부에서 발생하는 최대 노치응력 $\bar{\sigma}_k$ 의 비로 계산하였고, 굽힘시에는 정미단면에 발생하는 최대굽힘 응력 σ_b 과 노치응력 $\bar{\sigma}_k$ 의 비로 계산하였다.

유한요소해석결과, 인장시에는 용접루트부와 용접토우부의 피로노치계수 값이 각각 $K_{fr} = 3.40$, $K_{ft} = 1.47$, 그리고 굽힘시에는 그 값이 각각 $K_{fr} = 2.17$, $K_{ft} = 1.69$ 로 계산되었다. 피로노치계수는 모재의 피로강도에 대한 용접부의 피로강도 평가시 용접부의 응력을 산정하는 인자로서 작용한다.

3.2.2 피로시험시험편의 유한요소해석

용접피로시험편의 피로시험 결과와 앞서 구한 피로노치계수를 적용한 피로수명 해석결과를 비교하기 위하여, 용접피로시험편에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 피로해석은 FEMFAT4.3h[Finite Element Method for Fatigue Ver 4.3h, 2002]를 사용하였다.

Fig. 6과 같이, 시험편의 홀 부분은 강체요소로 연결하였으며, 나머지는 두께 12 mm의 쉘요소로 모델링 하였다. 시험편의 중앙은 용접부를 표현하기 위해 프로그램의 모델링 가이드⁸⁾에 따라 요소를 정의 하였다. 4점 굽힘 용접피로시험편 재료의 기계적 성질은 탄성계수 $E = 205.3$ GPa, 포와송비 $\nu = 0.3$ 을 적용하였고, 이때 하중은 Fig. 8과 같이 중앙을 기준으로 양쪽 25mm 떨어진 곳에 주었고, 경계조건은 X, Y, Z 변위는 구속하고 회전은 구속하지 않았다.

피로해석 전용프로그램인 FEMFAT을 이용하여, 용접 피로 시험편에 대한 유한요소해석을 수행한 결과를 Fig. 7에 제시하였다

실제 피로시험결과인 S-N선도에서의 각 응력수준에 대한 파단수명을 Miner rule에서의 누적 손상 값 $D = 1$ 로 설정하여, 이를 유한요소해석(FEMFAT해

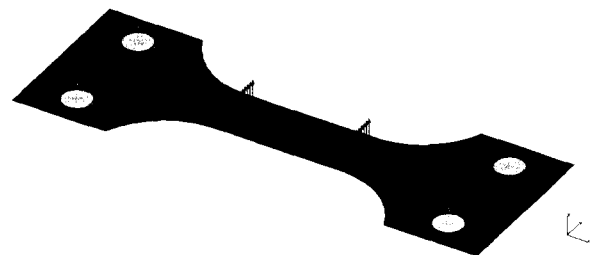


Fig. 6 Boundary condition of FE model and schematic mesh

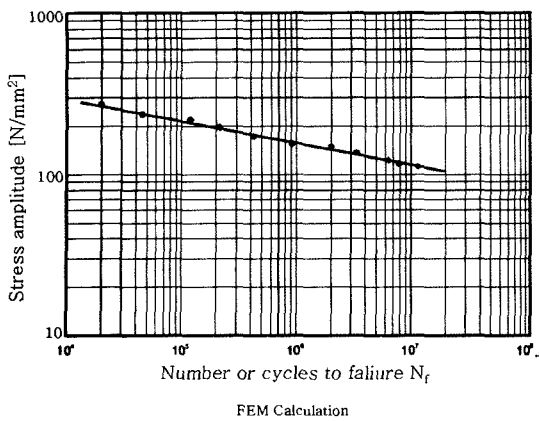


Fig. 7 Result of finite element analysis(FEMFAT)

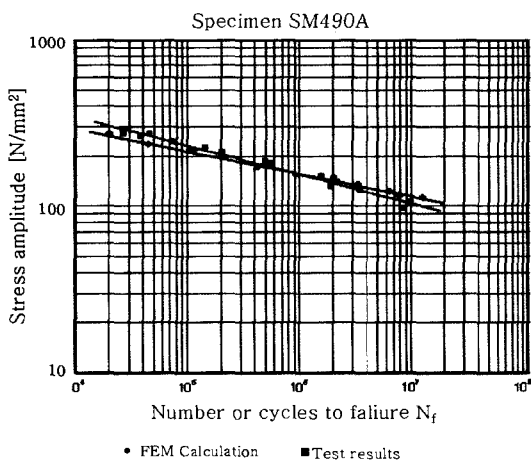


Fig. 8 Comparisons of results between FEM calculation and fatigue Test

석)결과의 손상값과 비교한 결과, 손상 값의 분포는 0.6~1.4 사이로 나타났다. 이는 $D=1$ 를 기준으로 하여 대소 0.4씩의 편차이다. 즉, 피로시험결과와 노치 응력접근법 및 유한요소해석에 의한 결과가 오차범위 40% 이내에서 존재하였다. 오차범위 40%는 전산해석을 이용한 피로수명예측에 있어서 신뢰할만한 결과이다. 따라서 본 연구의 결과는, 대차프레임의 용접부 피로강도 평가 시 실물실험을 대체할 수 있는 대안이 될 수 있으며, 향후 다른 용접형태에 대한 피로강도평가와 모델링 기법의 기초 자료로 활용될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 용접부, 특히 대차프레임에 적용되는 후판 용접부의 피로수명을 평가함에 있어서 Radaj의 이론을 바탕으로 한 유한요소해석을 수행하고, 그 해석 결과를 실험적으로 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접부에서의 피로특성 평가를 목적으로 유한요소 해석을 위한 용접부의 모델링기법을 제시하였다.

2) 용접부의 피로수명을 평가함에 있어서 가상노치반경의 개념을 도입하고, 피로노치계수에 의하여 피로수명을 평가하였다.

3) 유한요소해석결과를 바탕으로 피로수명을 구하는 데는 피로해석 전용프로그램인 FEM-FAT4.3h를 사용하였으며, 두 결과의 비교에는 Miner의 누적손상법칙을 바탕으로 하였다.

그 결과, 노치응력접근법 및 유한요소해석에 의한 결과가 실제 피로시험의 결과와 오차범위 40%이내에서 존재하였다. 오차범위 40%는 전산해석을 이용한 피로수명예측에 있어서 신뢰할만한 결과이다. 따라서 본 연구에서 제안한 전산기법은, 대차프레임의 용접부 피로강도 평가 시 실물실험을 대체할 수 있는 대안이 될 수 있으며, 향후 다른 용접형태에 대한 피로강도평가와 모델링 기법의 기초 자료로 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 2002년도 한양대학교 신뢰성분석연구센터의 분석기반구축사업연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. T. R. Gurney : The Influence of Residual Stresses on the Fatigue Strength of Plates with Fillet Welded Attachments, Br. Weld. J. 7-9, 1960, 415-431
2. T. R. Gurney : The Influence of Artificially Induced Residual Stresses on the Fatigue Strength of Load Carrying Fillet-Welded Joints in Mild Steel, Br. Weld. J. 8-11, 1961, 541-553
3. Seung Ho Han : Residual Stress Relaxation of Welded Steel Components under Cyclic Load, Steel Research 73, No.9, 2002, 414-420
4. W. L. Green, M. F. Hamad and R. B. Mccauley : The Effect of Porosity on Mild Steel Welds, Weld. Res. Suppl. 38-5, 1958, 206-209
5. D. Radaj : Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures, ABINGTON PUBLISHING, 1990
6. D. Radaj and C. M. Sonsino : Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches, ABINGTON PUBLISHING, Woodhead Publishing Limited, Cambridge CB16AH, England, 1998, 117-198
7. H. Neuber : Theory of Notch Stresses, Ann Arbor Mi, Edwards, 1946
8. FEMFAT 4.1 User's Manual : WELD Modelling Guideline, STEYR-DAIMLER-PUCH ENGINEERING CENTER STEYR, 2000