

전동식 사출기의 특성파악 및 수명예측

김 정 석* · 홍 성 원** · 정 필 중**

Characterization and Life Prediction for an Electric Molding Machine

Jung-Soek Kim, Sung-Won Hong and Phil-Joong Chung

Key Words : Electric Molding Machine (전동식 사출기), Finite Element Method (유한요소해석), Fatigue Strength Analysis (피로강도해석), Tie Bar (타이바), Thread Zone (나사부)

Abstract

For the development of an electric molding machine with low energy, high performance, and high reliability, characterization, finite element analysis and fatigue strength analyses were performed. Strain was measured by strain gages bonded on electric molding machine and compared with stress analysis results using I-DEAS. The analyses showed good agreement with test results. By means of the comparison, we could draw an adequate boundary condition for the stress analysis of the components of electric molding machine. Additionally, we could verify the load distribution mechanism among the parts. The life prediction results for tie bar and thread zone showed infinite life.

1. 서 론

최근의 플라스틱 산업은 친환경적이면서도 고부가가치를 추구하는 방향으로 변화되고 있어 고품질 저비용을 위한 신기술의 개발, 생산성 향상, 품질개선 활동에 끊임없는 노력을 경주하고 있다. 또한 정보통신분야의 급속한 성장에 따른 초정밀 제품의 수요 등 시장의 요구는 갈수록 보다 다양화 되고 있다. 이에 부응하여 플라스틱재료, 금형, 성형기술 및 성형가공기 (molding machine)의 개발도 획기적으로 이루어 지고 있어 이러한 추세를 더욱 뒷받침하고 있다. 최근 국내 수요도 고급성형 제품에 대한 수요가 점점 확대되고 있어 경쟁력이 떨어지는 범용 사출기보다 초고속정밀, 친환경적, 저온전비의 전동식 사출성형기 (electric molding machine)의 개발에 집중하고 있다. 따라서 성형품의 고부가가치화와 이를 위한 고속, 고정밀

사출성형기에 대한 요구에 부응할 수 있는 전동식 사출성형기의 개발은 필수적이며 이를 바탕으로 수입억제 및 수출증대의 효과와 선진업체와의 경쟁력 확보를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 본사에서 개발중인 50톤급 전동식 사출기의 특성규명 및 강도해석을 위해 변형률 게이지를 부착하여 변형률을 측정하고 이를 해석결과와 비교하였다. 또한 tie bar 에 대한 피로수명해석을 수행하였다.

2. 변형률 측정

2.1 변형률 게이지 부착 및 장치구성

본 연구에서는 전동식 사출기의 형판과 tie bar 가 받는 하중분포를 규명하기 위해 변형률 게이지를 부착하고 변형률을 측정하였다. 본 시험에서 변형률 측정은 실제 사출과정은 수행하지 않는 dry cycle 조건하에서 수행하였고, 본 시험에서 dry cycle 의 한 주기는 2.34 초였다. 그리고 본 사출기의 최대 형체력인 50 ton 에 대해 시험을 수행하였다.

* 정희원, LG 전선 기계연구소

E-mail : kjs2000@cable.lg.co.kr

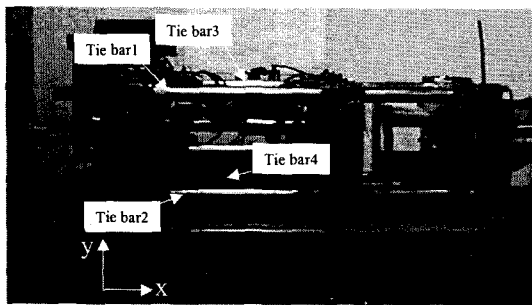
Tel : (031)-450-8357 Fax : (031)-450-8361

** LG 전선 기계연구소

2.2 Tie bar 에서의 변형을 측정결과

본 사출기에는 이동형판의 가이드 역할을 하는 tie bar 가 4 개이고 tie bar 에 총 8 개의 변형률 게이지를 부착하였다. Tie bar 에 부착된 변형률 게이지의 목적은 개개의 tie bar 가 받는 하중측정, 굽힘량 측정 및 4 개의 tie bar 에서의 하중분배 메커니즘을 파악하기 위한 것이다. 이렇게 측정된 변형률은 추후 tie bar 의 피로해석의 입력 데이터로 사용 된다.

전동식 사출기의 형상과 tie bar 의 위치는 그림 1(a)와 같고 각 tie bar 에 부착된 변형률 게이지의 위치는 그림 1(b)와 같다.



(a) Location of tie bars.

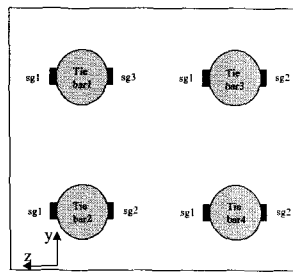


Fig. 1 (b) Location of strain gages on tie bars.

본 사출기의 최대 형체력인 50 톤을 부과했을 경우 측정된 변형률은 그림 2 와 같다. 최대 응력은 tie bar 3 번의 게이지 2 번에서 발생하였고 약 7.31 kgf/mm²였다. 이 값은 tie bar 의 항복강도의 약 17.3% 이다.

Tie bar 의 각 변형률 게이지에서 측정된 값들을 평균하여 각 tie bar 의 대표 값으로 표현하면 표 1 과 같다. 이 대표 값을 하중으로 환산하여 실제 tie bar 가 부담하는 하중을 계산하면 표 1 에서 알 수 있듯이 약 45.5 톤 정도이다. 본 시험에서 50 톤의 형체력을 가했으므로 형체력의 약 91%가 tie bar 에 가해지고 있음을 알 수 있다. 각 tie bar 가

형체력을 담당하는 비율은 tie bar 3 번이 약 27%로 가장 높았고 tie bar 1 번이 약 24.0%로 가장 낮았다.

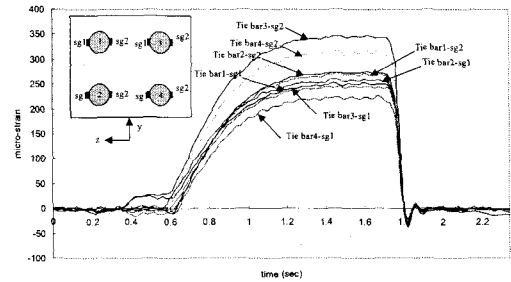


Fig. 2 Strain history of each tie bar for 50tons loading.

Table 1 Average stresses and forces of each tie bar.

Tie bar name	Tie bar 1	Tie bar 2	Tie bar 3	Tie bar 4	SUM
Max. ave. stress (kgf/mm ²)	5.55	5.64	6.24	5.73	
Force (kgf)	10890.1	11071.9	12256.8	11240.8	45459.6
Force (%)	24.0%	24.3%	27.0%	24.7%	100.0%

각 tie bar 의 평균응력은 약 5.79kgf/mm² 이다.

2.3 고정형판과 이동형판에서의 변형률

여기서는 고정형판과 이동형판에서 변형률의 측정하였다. 사출기 형판의 변형은 사출 성형 시 성형의 정밀도를 좌우하는 중요한 인자이다.

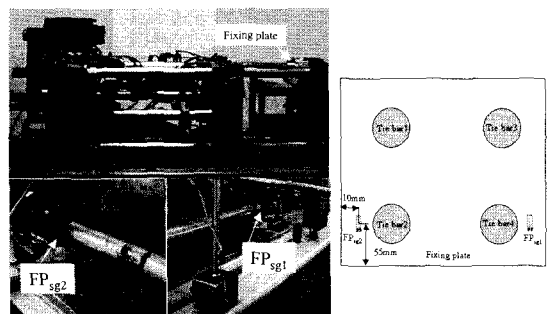


Fig. 3 Location of strain gages in a fixing plate.

변형률을 측정하기 위해 고정형판에 부착한 게이지의 위치는 그림 3 과 같다. 그림 3 에서 알 수 있듯이 고정형판 하단 Tie bar 에 부근에 sg 1 및 sg 2 를 부착하였다.

그리고 이동형판의 경우 형판의 중앙에서의 변형을 측정하기 위해서 형판중앙에 존재하는 원공에 sg 1 을 부착하였다. 이동형판에서의 게이지의 부착위치는 그림 4 와 같다.

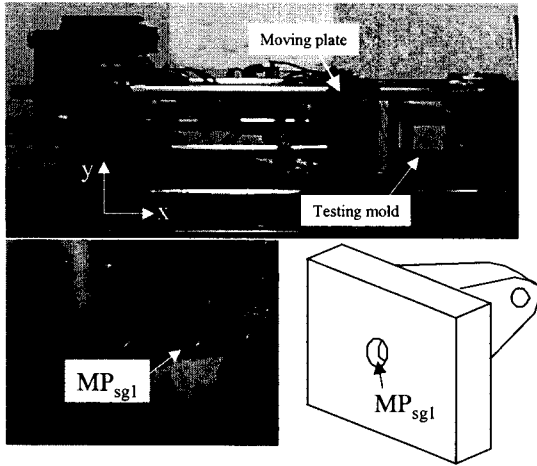


Fig. 4 Location of strain gages in a moving plate.

고정형판의 경우 50 톤 하중조건하에서 변형률 선도는 그림 5 와 같다.

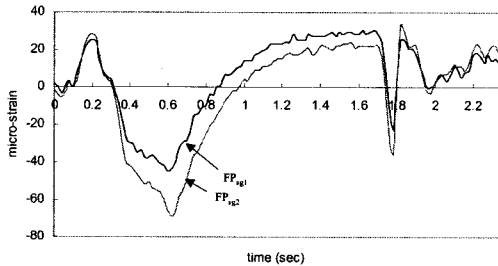


Fig. 5 Strain histories of the fixing plate under 50tons loading condition.

그림 5 에서 알 수 있듯이 하중이 증가함에 따라 압축변형을 하던 sg 1 과 2 부분이 인장변형으로 변하고 있음을 알 수 있다. 고정형판의 각 부위에서 측정된 변형률과 응력을 요약하면 표 2 와 같다.

그림 6 은 이동형판에서 측정된 변형률을 나타낸다. 이동형판의 각 부위에서 측정된 변형률과 응력은 약 $-28.4\mu\epsilon$ 이고 응력값은 -0.6kgf/mm^2 이다.

Table 2 Strain and stress in the fixing plate

Gages	FP _{sg1}		FP _{sg2}	
	Max. Tensil.	Max. Comp.	Max. Tensil.	Max. Comp.
Strain ($\mu\epsilon$)	30.6	-44.8	33	-69.2
Stress (kgf/mm^2)	0.64	-0.94	0.69	-1.45

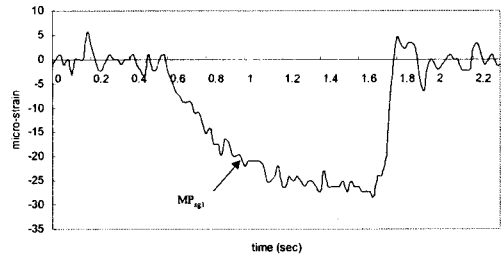


Fig. 6 Strain history of the moving plate under 50tons loading condition.

3. 해석결과와 비교

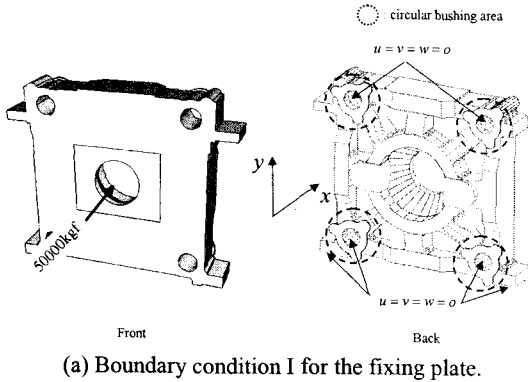
본 연구에서는 이전 2 절에서 스트레인 게이지를 이용해서 얻어진 전동식 사출기 주요부위의 응력 및 변위를 유한요소해석 상용프로그램인 IDEAS 를 이용한 정적인 유한요소해석을 수행하고 이를 통해서 얻어진 결과와 비교하여 해석에 적용된 경계조건의 타당성을 검증하였다. 이를 통해 사출기 주요부위의 정적인 해석을 위한 경계조건을 정립해둘 경우 추후 새로운 모델 개발 시 설계단계이전에 사출기 주요부위에 대한 정적 해석을 통해 모델의 형상을 결정하는데 중요한 자료로 적용가능하다.

3.1 고정형판과 이동형판

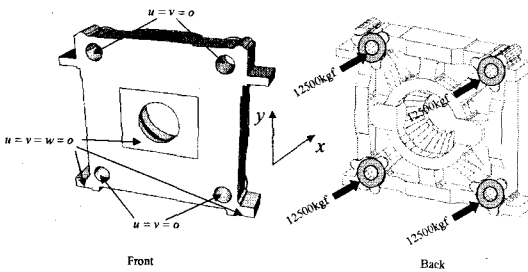
3.1.1 고정형판

고정형판의 경우 base frame 에 고정되고, 원형 부싱부 (circular bushing)부에는 tie bar 가 고정되며, 금형장착위치에서는 승압 시 사출압력을 받는 상당히 복잡한 조건을 갖는 구조물이다. 따라서 실제 조건과 유사한 유한요소해석상의 경계조건을 도출하기 위해서는 상당한 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 사출기의 작동사이클 동안 고정형판의 힘 평형의 관점에서 유추할 수 있는 2 가지 경계조건을 설정하고 이것들에 대한 해석을 수행

하였다. 해석결과 시험결과와 유사한 값을 갖는 조건을 고정형판의 해석 시 타당한 조건으로 설정하였다. 응력해석을 위한 경계조건은 Fig. 7(a)-(b)와 같다. Fig. 7(a)의 조건은 base plate에 고정되는 부분과 tie bar가 고정되는 부분의 모든 자유도를 구속하고 금형과 접촉하는 부분에 최대 하중인 50000kgf를 부과하는 것이다.



(a) Boundary condition I for the fixing plate.



(b) Boundary condition II for the fixing plate.

Fig. 7 Boundary condition for the fixing plate.

Fig. 7(b)의 조건은 base plate에 고정되는 부분과 금형과 접촉하는 부분의 모든 자유도를 구속하고 tie bar가 고정되는 부분에 최대하중인 50000kgf를 부과하는 것이다.

이상의 두가지 경계조건에 대한 해석결과는 그림 8과 같다.

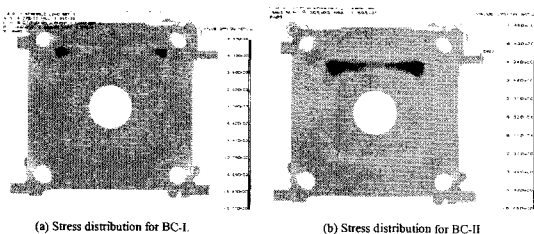


Fig. 8 Stress distribution of the fixing plate.

Table 2의 결과에서 알 수 있듯이 이동형판에 부착된 변형률 게이지 FP_{sg1} 와 FP_{sg2} 에서 측정된 응력값은 각각 0.64와 0.69kgf/mm²이다. 해석을 통해서 얻어진 응력값은 경계조건 I의 경우 약 0.84kgf/mm²이고 경계조건 II의 경우 약 0.77kgf/mm²이었다. 따라서 시험결과와 보다 잘 일치하는 경계조건 II를 고정형판의 해석경계조건으로 설정하였다.

3.1.2 이동형판

이동형판의 3차원 응력해석을 위해 이동형판의 모델링과 경계조건은 Fig. 9와 같다. 이동형판은 링크에 연결되어 형개폐시 tie bar를 따라 이동하게 된다. 그리고 Fig. 9에서 알 수 있듯이 형개폐시 고정형판에 장착된 시험용 금형(testing mold)과 접촉하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 9와 같이 금형과 접촉하는 부분 (빗금친 영역)의 변위를 모두 고정하고 tie bar가 삽입되는 원형 부상부는 y, z 방향 변위를 고정하는 변위경계조건을 부과하였다. 또한 하중경계조건은 링크와 연결되는 원형 슬롯에 최대 하중인 50000kgf를 부과하였다.

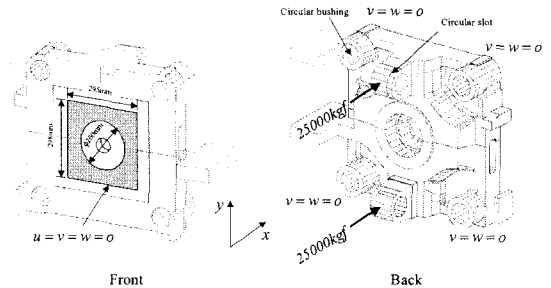


Fig. 9 Boundary condition for the moving plate.

해석결과 최대 변형량은 0.11mm 이고, 응력분포는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 이동형판에 부착된 변형률 게이지 MP_{sg1} 에서 측정된 응력값은 -0.60kgf/mm²이고 해석을 통해서 얻어진 응력값은 약 -0.51kgf/mm²으로 비교적 잘 일치하고 있었다. 또한 이를 통해 해석 시 적용된 경계조건 타당성을 검증할 수 있었다. 이상의 해석을 통해서 전동식 사출기 고정 및 이동형판에 대한 해석시 요구되는 하중 및 기하학적인 경계조건을 시험과 비교를 통해서 도출할 수 있었다.

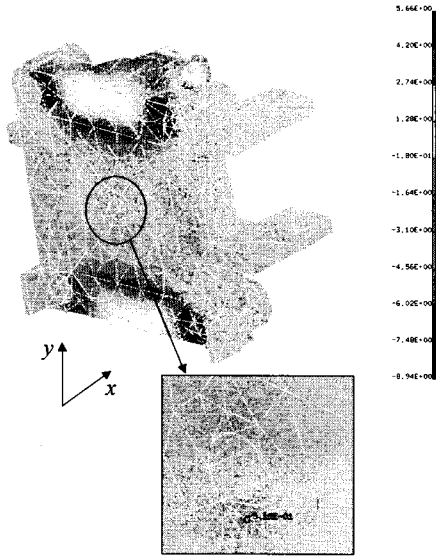


Fig. 10 Stress distribution of the moving plate.

3.2 Tie bar 와 나사부의 피로해석

본 절에서는 사출기의 시험을 통해서 측정된 변형률을 이용해서 tie bar의 피로해석을 수행하였다. 피로해석을 위해 이용된 tie bar재질에 대한 S-N선도는 그림 11 과 같고 파괴확률 30%를 기준으로 한 것이다 [3].

본 피로해석은 dry cycle주기인 2.34초로 매일 6시간씩 10년을 운전할 경우의 수명인 3.37e7사이클을 피로한도(Fatigue limit)로 가정하여 해석을 수행하였다. 그리고 피로해석에 사용된 하중조건은 tie bar에서 발생하는 최대 응력을 입력으로 하였다. 본 시험에 얻어진 최대응력은 50톤의 형체력에서 tie bar 3번의 2번 게이지에서 발생하고 7.31kgf/mm²이다.

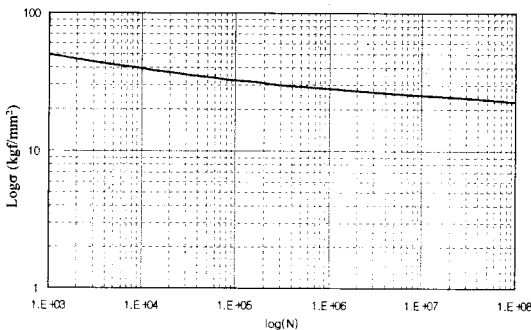


Fig. 11 S-N curve of SCM440.

이 응력값을 이용할 경우 tie bar는 무한수명 설계임을 알 수 있다. 그러나 tie bar와 같이 나사산이 존재하는 구조물의 경우 대부분의 파손이 나사산에서 발생한다. 따라서 본 연구에서는 나사산에 대한 피로해석을 수행하였다.

Tie bar에서 나사부분은 일종의 노치(notch)이므로 노치에 의한 응력집중이 발생하게 되고 이 부분에서의 응력을 구하기 위해서는 나사산에서의 응력집중계수를 구해야 한다. 본 연구에서 이용된 tie bar 나사부의 형상과 치수는 그림 12와 같다. 그리고 나사부의 응력집중계수를 구하기 위해 참고문헌 [4]를 참조하였다. 나사부의 노치로 간주되는 골의 응력집중계수를 구하기 위해 그림 12에서 식(1)과 같은 값을 구해야 한다.

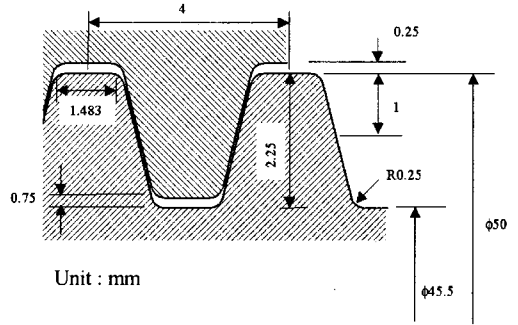


Fig. 12 Schematic diagram of tie bar thread zone.

$$\frac{r}{w} = 0.099, \frac{t}{w} = 0.893 \quad (1)$$

여기서 r, w, t 는 각각 나사 홈의 모서리 반경, 나사골의 폭 및 나사산의 높이를 의미한다. 식(1)의 값으로 구해진 나사부의 응력집중계수는 약 2.09이다.

Tie bar의 나사산이 받는 응력의 계산은 그림 13과 같은 조건을 이용하여 계산할 수 있다. Tie bar의 나사산이 motor base plate에 체결될 경우 나사산에 가해지는 하중은 힘의 평형식에 의해 간단히 계산할 수 있다.

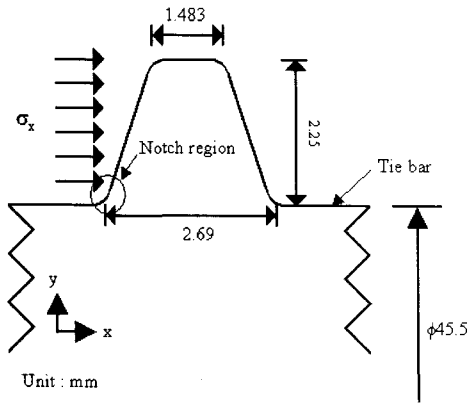


Fig. 13 Notch region of the tie bar thread zone.

먼저 motor base plate 에 체결된 나사산의 길이는 45mm 일 경우 체결된 각 나사산에 작용하는 면압력은 식(2)을 이용해서 구할 수 있다.

$$\sum F_x = -P + \frac{\pi}{4}(D_{out}^2 - D_{in}^2)N\sigma_x = 0 \quad (2)$$

여기서 P , D , N 은 tie bar 가 받는 압력, tie bar 의 직경 및 체결된 나사산의 수를 의미한다. 이식을 통해서 얻어진 면 압력 $\sigma_x = 3.29\text{kgf/mm}^2$ 이다. 모멘트에 의해 발생하는 응력 σ_y 는 아래 식에서 구할 수 있다.

$$M = \int \sigma_x y dA, \quad \sigma_y = \frac{My}{I} \quad (3)$$

이식을 이용해서 계산된 모멘트에 의한 응력은 $\sigma_y = 7.37\text{kgf/mm}^2$ 이다. 그리고 나사뿌리에서의 전단응력성분은 $\tau_{xy} = 7.37\text{kgf/mm}^2$ 이다. 이러한 응력 조건하에서 나사산의 노치에서의 최대주응력, $\sigma_t = 8.677\text{kgf/mm}^2$ 이었다. 이 값에 나사산의 노치의 응력집중계수 값을 곱하면 나사산 끝에서의 최대응력은 약 18.13kgf/mm^2 이다. 이 값을 이용해서 피로수명을 예측한 결과 무한 수명을 나타내었다.

4. 결론

이상의 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 사출기 tie bar 의 경우 순수 인장을 받는 것이 아니라 굽힘변형도 동시에 받고 있었다.

2. 4개의 tie bar 가 모두 균일하게 형체력을 담당하고 있지 않고 3번 tie bar 가 가장 많은 형체력을, 1번 tie bar 가 가장 적은 형체력을 담당하고 있었다.
3. 고정 및 이동형판에 대한 해석 시 요구되는 하중 및 기하학적인 경계조건을 시험과 비교를 통해서 도출할 수 있었다.
4. Tie bar 의 나사부에 대한 피로수명해석결과 tie bar 는 무한수명으로 안전 설계되어 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) LG전선, 1999, "고속, 고정밀 형체력 50톤급 전동식 사출기 개발에 관한 연구," 산업자원부 연구보고서.
- (2) CIC, 1998, "User s Manual for CardCorder Plus".
- (3) 김상열, 박수홍, 유병주, 김석남, 1995, "사출성형기의 tie bar 및 plate 재질에 대한 피로시험 및 수명평가," 생산기술연구원 연구보고서.
- (4) R. E Peterson, Stress Concentration Factors, Wiley-Interscience Publication.