

# 다이캐스팅 머신의 구조 해석

윤 승 원(한국생산기술연구원)

## Structural Analysis of Die Casting Machine

Seungwon Youn(Korea Institute of Industrial Technology)

### ABSTRACT

Structural analysis of horizontal cold chamber die casting machine is performed by the FEM. The analyzed model is made up of stationary die platen, movable die platen, link housing platen, C-frame, and tie bar which mainly undertake die locking force and injection force. In modelling, compression gap elements are used for to simulate contacting condition between tie bar and movable die platen, movable die platen and base frame, and link housing and base frame. Unbalanced die locking force imposed on four tie bars are considered. As the results, the deformed shape and the stresses of the die casting machine are given.

**Key Words:** Die Casting Machine(다이캐스팅 머신), Die Locking Force(금형체결력), Tie Bar(타이바), Stationary Die Platen(고정반), Movable Die Platen(이동반), Link Housing Platen(연결반), Toggle Link Mechanism(토글 기구)

### 1. 서 론

다이캐스팅 머신(die casting machine)은 산업용 부품들을 저렴한 비용으로 대량 생산할 수 있는 생산 장비의 일종이다. 경량화가 요구되는 부품 특히 자동차와 관련된 부품들은 연료비를 절감시키기 위한 경량화 설계 및 생산이 절실히 요구되고 있는 한편, 부품의 모듈화 성향으로 부품이 대형화해감에 따라 큰 용량의 다이캐스팅 머신에 대한 요구가 증가하고 있다. 다이캐스팅 머신은 금형체결부, 사출부, 압출부, 코아폴로 구동부, 유압장치, 전기제어장치 및 윤활 장치 등으로 구성되어 있으며, 이 중 금형체결부는 고정반(stationary die platen), 이동반(movable die platen), 연결반(link housing platen)과 이들을 연결해 주는 타이바(tie bar) 및 토글 기구로(toggle link mechanism) 구성되어 있다. 고정반과 이동반 사이에 위치한 금형은 토글 기구에 의한 배력 장치로 체결되며(die locking), 용융된 알루미늄 등이 금형 내로 가압 사출되어 제품이 성형 제조된다<sup>(1)</sup>. 사출압력이 가해질 때, 다이캐스팅 머신이나 사출 성형기의 금형에 발생하는 형개력(die opening force)은 제품의 투영 면적에 비례하여 커지며, 금형이 열리는 것을 방지하기 위하여는 큰 금형체결력이

(die locking force) 필요하다. 250ton급 이하의 소용량 다이캐스팅 머신에서는 형개력이 크지 않고 설계시 안전계수를 충분히 크게 설계하는 경향이 있어 구조 해석을 수행하지 않고 머신을 설계 제작하더라도 구조물의 안정성이나 사출 작업시의 안전성 등에서 큰 문제가 되고 있지 않으나, 대용량의 다이캐스팅 머신에 있어서는 각 부품에 상당히 큰 하중이 가해져 구조물의 안정성 검토 측면에서 각 부품의 변형과 응력 분포 해석이 요구된다.

다이캐스팅 머신 구조물에는 금형이 체결된 상태에서는 금형체결력만, 사출시 짧은 시간 동안(보통 0.3-0.7초)에는 순간적으로 금형체결력에 형개력이 추가된 하중이 가해진다. 실제 주조 작업시에는 여러 가지 원인에 의하여 네 개의 타이바에 가해지는 금형체결력이나 형개력이 균일하지 않아, 타이바 또는 이동반의 특정 부위에 하중이 집중되기도 한다. 이러한 불균등 하중은 특정 부위에서의 응력 집중 현상을 발생시키며, 강도적인 측면에서는 일부 부품이 조기에 파손되고, 강성적인 측면에서는 구조물의 이상 휨 변형이 생겨 금형의 상·하형 사이에서 주물이 비산되는 등의 안전 문제가 발생되기도 한다.

본 연구는 태성공업사의 350ton급 횡형 콜드 챔버 다이캐스팅 머신(horizontal cold chamber die casting machine)을 대상으로 구조의 안전성을 검토하고, 향후 대용량 다이캐스팅 머신의 설계 기준 및 작업 조건에 대한 환경 설정을 위하여 수행되었다.

해석 대상 구조는 거시적인 측면(macroscopic)에서 금형체결력과 형개력에 직접적으로 관계되면서 가해지는 하중을 변형에너지로 흡수 및 복원시키는 단성체인 (1)고정반, (2)이동반, (3)연결반, (4)타이바, 및 (5)C-프레임으로 구성되어 있다. 고정반과 이동반 사이에 최대 크기의 금형에 해당되는 지지 조건을 준 후 불균형 상태의 금형체결력을 부과하여, 구조물이 변형되는 모습과 각 부품에 발생하는 응력 분포를 해석하는 것이다. 해석의 주안점은 구조물 전체에 대한 힘의 역학적 분포에 있으며, 나사 체결 부위나 슬라이딩 접촉 부위 등의 국소적인 위치에서 발생하는 문제 즉, 미시적인 측면(microscopic)에서의 응력 집중 현상 등은 고려되지 않았다.

## 2. 다이캐스팅 머신의 변형 및 응력 해석

그림 1은 해석 대상인 350ton급 다이캐스팅 머신의 평면도와 측면도이며 각부 명칭을 보여 주고 있다.

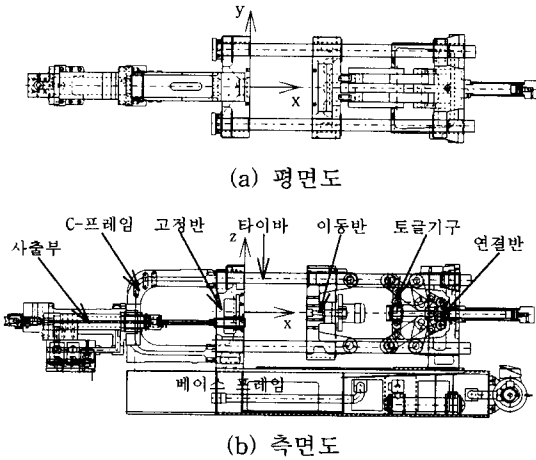


그림 1: 350ton급 다이캐스팅 머신

사출 압력이 가해질 때 금형이 벌어지지 않으려는 조건은 다음과 같다.

$$F_L > F_o \quad (1)$$

여기서  $F_L$ 은 금형체결력,  $F_o$ 은 형개력을 나타낸다.

사출구 직경이  $d_s$ , 사출력이  $F_i$ 일 때, 주조압력  $P_m$ 은

$$P_m = \frac{F_i}{\left(\frac{\pi}{4} \cdot d_s^2\right)} \quad (2)$$

이며, 형개력은 다음식으로도 표현된다.

$$F_o = P_m \cdot A_p \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)으로부터, 식 (1)은

$$F_L > (P_m \cdot A_p) \quad (4)$$

아래의 그림 2는 사출력  $F_i$  및 형개력  $F_o$ 과 금형체결력  $F_L$  간의 관계를 간략하게 나타낸 것이다.

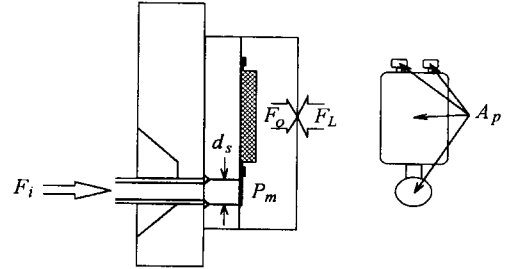


그림 2: 금형체결력과 형개력 간의 관계

### 2.1 해석적 방법에 의한 해석

금형체결력은 고정반과 연결반에 체결되어 있는 타이바에 인장력으로 작용되며, 금형체결력이 모든 타이바에 고르게 작용할 경우 타이바 신장량은 다음과 같다<sup>(1)</sup>.

$$\Delta L = \frac{4 \cdot F_L \cdot L}{n \cdot \pi \cdot d^2 \cdot E} \quad (5)$$

여기서  $L$ 은 유효 타이바 길이,  $d$ 는 타이바 지름,  $n$ 은 타이바 갯수, 그리고  $E$ 는 타이바의 종탄성계수이다. 또한 타이바에 걸리는 평균 응력은

$$\sigma = \frac{4 \cdot F_L}{n \cdot \pi \cdot d^2} \quad (6)$$

타이바 직경이  $d=125mm$ , 갯수가  $n=4$ , 유효길이  $L=1,975mm$ (최대 크기의 금형 두께  $700mm$  장차시), 타이바의 종탄성계수  $E=22,000kgf/mm^2$ 인 다이캐스팅 머신에 금형체결력  $F_L=350ton$ 이 작용하는 경우, 타이바의 평균 신장량은

$$\begin{aligned} \Delta L &= \frac{4 \cdot 350,000(kgf) \cdot 1,975(mm)}{4 \cdot \pi \cdot 125^2(mm^2) \cdot 22,000\left(\frac{kgf}{mm^2}\right)} \\ &= 0.640(mm) \end{aligned} \quad (7)$$

이며, 타이바에 걸리는 평균 응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{4 \cdot 350,000(kgf)}{4 \cdot \pi \cdot 125^2(mm^2)} \\ &= 7.13\left(\frac{kgf}{mm^2}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

## 2.2 유한요소법에 의한 해석

다이캐스팅 머신 구조는 x-z평면을 대칭면으로 한 대칭 형상이며 반쪽 부분이 거울에 비추어져 있는 모습이다(그림 1(a)). 이러한 대칭 조건은 x-z평면을 기준으로 좌·우측에 대한 하중 불균형을 고려하지 않고 z축의 상·하부분에 대한 하중 불균형만을 고려한 해석시에는, 고정반, 이동반, 연결반, 타이바, 및 C-프레임 등의 모든 부품에 있어서 대칭되는 반쪽 부분만을 모델링하여 해석한다하더라도 전체 구조물을 해석한 것과 같은 결과를 얻을 수 있다. 대칭되는 반쪽에 해당되는 부분은 대칭면에서의 경계 조건 즉, x축과 z축으로는 변위가 가능하고, y축으로는 변위가 제한된 경계 조건으로 해석된다.

해석에 사용한 하드웨어는 펜티엄 586급의 개인용 컴퓨터로 CPU 속도가 166MHz, RAM 96MB, HDD 용량은 1GB+2GB였다. 해석 대상인 실물의 구조가 복잡한 관계로 다소 많은 수의 절점과 요소가 소요되었고(huge number of nodes and elements), 계산 시 많은 양의 자료 처리 공간(swapping area)이 요구되었으며, 하나의 문제를 해석하는 데 약 1.6GB의 HDD 메모리가 사용되었다.

해석용 유한요소 프로그램은 미국의 ALGOR, Inc.에서 개발한 ALGOR Windows Version<sup>(2,3,4)</sup>이 사용되었다. ALGOR 프로그램은 전처리(pre-processor), 해석(solver), 및 후처리(post-processor) 기능이 모두 있으며, 본 해석에서 사용한 선형 탄성학 정적인 접촉 문제(linear elastic static contact problem)의 해석 기능을 비롯하여, 비선형 탄성학 문제, 열응력 문제, 진동 문제, 좌굴 문제, 복합재료 해석, 유체역학 문제, 열전달 문제, 전자기장 문제 등의 여러가지 해석 기능을 갖고 있는 범용 프로그램이다.

해석 모델링에는 6절점과 8절점의 선형 브릭 요소(linear type 6-nodes wedge element and 8-nodes brick element)가 혼합 사용되었으며, 각 부품 모델링에 소요된 절점수와 요소수는 표 1에서와 같다.

표 1: 다이캐스팅 머신의 유한요소 해석 모델

부품 \ 구분	No. of Node	No. of Element
고정반	8,327	11,778
이동반	11,815	17,160
연결반	8,317	11,170
타이바(2개)	5,908	7,488
C-프레임	2,700	3,246

전체 구조물은 표 1의 부품들이 조립된 후에, 고정반, 이동반 및 연결반을 지지하고 있는 베이스 프레임(base frame)을 대체하는 밀판 대응으로 약 1,000여개의 요소가 추가되어 모두 51,525개의 요소로 모델링되었다(그림 3).

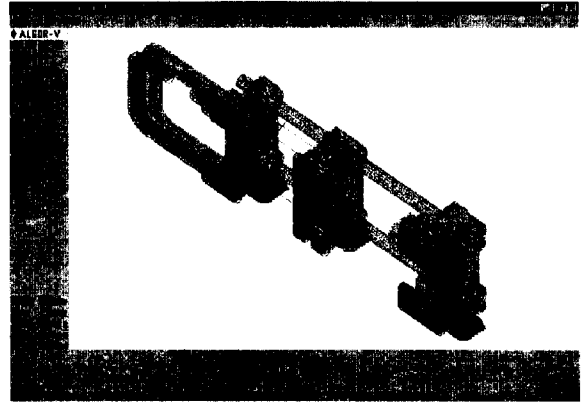


그림 3: 350ton급 다이캐스팅 머신의 유한요소 모델

구조 해석 대상이 되는 각 부품 재질의 물성치(physical properties)를 아래의 표 2에 정리하였다<sup>(5,6,7)</sup>. 재료의 종탄성계수(Young's Modulus)와 포아송비(Poisson's Ratio)는 구조물의 변형량 즉 강성(stiffness) 특성에 직접 관계되며, 응력값들은 재료의 강도(strength)와 관계되어 구조물의 허용 하중 범위를 결정하게 하는 물성치이다.

표 2: 다이캐스팅 머신 재료의 물성치

사용 재질	FCD45/GCD45	SCM4
재질 명칭	구상흑연주철	크롬몰리브덴강 4종
관련규격	JIS G5502/ KS D4302	JIS G4105/ KS D3711
관련 부품	고정반, 이동반, 연결반, C-프레임	타이바
인장/압축강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	45	82
항복강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	27	37
피로한계 (kgf/mm <sup>2</sup> )	22(비틀림/굽힘)	33(인장/압축) 300,000회에서
종탄성계수 (kgf/mm <sup>2</sup> )	16,500	22,000
포아송비	0.26	0.29
밀도(Mg/m <sup>3</sup> )	7.37	7.87

고정반 밑면의 모든 절점은 모든 방향으로의 변위가 구속되었다. 이동반이 타이바에 끼워져 z축의 상·하 방향으로의 접촉 구속되고 x축으로는 미끄럼 변위를 일으키는 것과, 이동반과 연결반이 베이스 프레임에 얹혀져 z축의 밑 방향으로의 접촉 구속되고 윗 방향으로의 자유롭게 들림 변위가 가능하면서 x축으로는 좌·우로 미끄럼 변위를 일으키는 것 등의 탄성 접촉 조건에 대하여는 12개의 압축 스프링 요소(compression gap element)가 사용되었으며, 금형 또한 고정반과 이동반에 접촉되는 부위에서 압축 스프링 요소로 대체되었다. 두 절점에 연결되어 있는 압축 스프링 요소는 두 절점 사이의 간격이 원래의 간격보다 커지면 아무런 역할을 하지 않으며, 원래의 간격보다 작아지는 변위가 발생할 때에는 상대적인 변위를 제한하는 역할을 한다. 압축 스프링 요소를 사용하여 접촉 문제를 해석할 때에는 전체 시스템의 강성 매트릭스(system stiffness matrix)를 반복 계산하여 수렴되었을 때 계산이 종료되는 비선형 반복 계산을 수행하게 된다.

토글 기구에 의한 금형체결력에 해당되는 만큼의 하중은 직접 이동반과 연결반에 서로 반대되는 방향으로 가하였다. 모델링된 반쪽 구조물의 상·하 토글 기구 연결부에 가해진 하중은 모두 175ton으로, 다음 두가지의 하중 경우가 해석되었다. (경우 1)토글 기구의 상·하 연결부에 각각 87.5ton씩 균등하게 가해진 경우, (경우 2)토글 기구의 하단 연결부에 55%, 상단 연결부에 45%가 가해진 경우 즉, 하단부에 96.3ton, 상단부에 78.7ton이 가해진 경우이다.

그림 4와 그림 5는 (경우 2)에 대한 유한요소 해석 결과로, 각각 x축 방향의 변위와 y축 방향의 변위 분포를 100배로 확대한 모습이다.

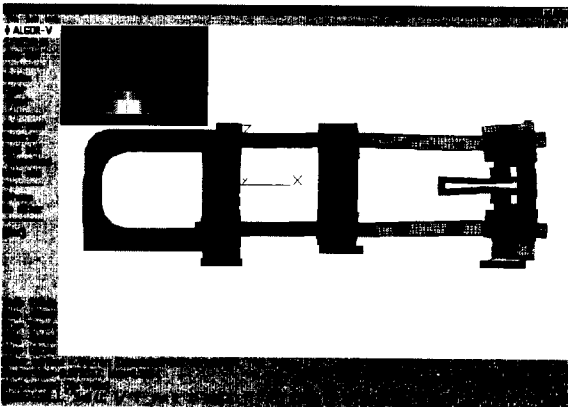


그림 4: 350ton급 다이캐스팅 머신에 금형체결력이 토글 기구 연결 하단부에 55%, 상단부에 45% 가해진 경우 x방향의 변위량(x-z plane view)

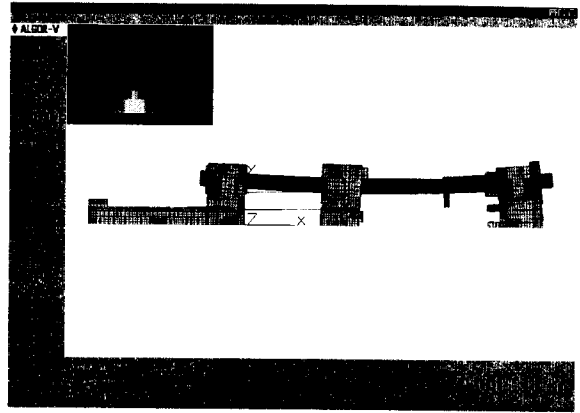


그림 5: 350ton급 다이캐스팅 머신에 금형체결력이 토글 기구 연결 하단부에 55%, 상단부에 45% 가해진 경우 y방향의 변위량(x-y plane view)

타이바의 신장량은 타이바가 고정반과 연결반에 체결된 부위에서 타이바의 x방향의 변위를 읽어 그 차이로 구했으며 표 3에 나타내었다.

표 3: 타이바 신장량(단위: mm)

하중분포 부품	상단 50% 하단 50%	상단 45% 하단 55%
상부 타이바	0.603	0.557
하부 타이바	0.665	0.715

3차원 응력 상태에 대한 설계 응력 기준(criterion)으로는 일반적으로 Von Mises 기준을 가장 많이 적용한다. Von Mises 응력은 3차원에서의 응력 상태를 일축에서의 응력에 대치되는 유효 응력으로 나타낸 것으로, 일축 항복 강도가 Von Mises 유효 응력과 같을 때 항복이 일어난다. 표 4에 각 부품에 발생된 Von Mises 응력의 최대값을 나타내었다.

표 4: 금형체결력에 의해 각 부품에 발생된 Von Mises 응력 최대값(단위: kgf/mm<sup>2</sup>)

하중분포 부품	상단 50% 하단 50%	상단 45% 하단 55%
고정반	6.9	6.7
이동반	8.3	8.4
연결반	7.0	8.1
상부 타이바	9.3	8.8
하부 타이바	8.9	9.2
C-프레임	2.6	2.5

### 3. 토 론

금형체결력이 모든 타이바에 균등하게 가해지는 (경우 1)의 타이바 신장량은 재료역학적인 해석 및 유한요소법에 의한 해석 결과가 크게 다르지 않았다. 다이캐스팅 머신 하부에 금형체결력이 상대적으로 많이 가해지는 (경우 2)에 대한 유한요소 해석 결과는 하부 타이바의 신장량이 상부 타이바에 비해 큰 것으로 나타났으며, 베이스 프레임에 얹혀져 있는 연결반이 z방향 위로 약간 들리는 변위도 있었다 (10% 상·하 하중 편차 조건에서 약 0.2mm가 위로 들림). 이 것은 금형체결력이 x-z 대칭 평면 좌·우에 대하여 불균등하게 가해질 경우에는 타이바가 측면으로 휘어, 금형의 상·하형 측면 접촉부가 벌어져 주물이 비산될 가능성이 있음을 의미한다. 그림 4와 그림 5를 살펴 보면, 네 개의 타이바가 길이 방향으로 늘어남과 동시에, 네 개 타이바의 중심 축 방향으로 휘는 모습을 보여준다. 각 부품에 걸리는 Von Mises 응력의 최대값은 (경우 1)과 (경우 2)의 하중 분포에 따른 차이가 크지 않았다.

금형체결력에 형개력이 추가되어 가해지는 조건은 선형 탄성 해석 조건에서 볼 때 금형체결력을 2배로 가하여 해석하는 것과 같다. 유한요소법에 의한 Von Mises 응력의 최대값과 부품 재료의 피로 한계를 기준으로 한 안전계수는, 타이바의 경우 약 1.8, 고정반, 이동반, 및 연결반의 경우에는 약 1.3이며, C-프레임의 경우는 약 4.2이다. C-프레임의 경우는 다른 부품에 비해 2배 정도 큰 값이나, 금형체결력이 가해진 상태에서 사출 압력에 의한 충격력이 가해지는 것을 고려한다면 적당한 값으로 판단된다.

금형체결력이 타이바에 불균등하게 가해지는 원인은 (1)토글 기구 치수에 차이가 있어 금형 체결시 이동반이 고정반에 평행하지 않게 가압되거나, (2)금형의 상·하형 평면이 평행하지 않아 상·하부의 두께가 다르게 장착되는 경우, (3)금형 장착시 제품 투영 면적의 도심이 네개의 타이바 중심축과 어긋나게 금형이 장착되는 경우, (4)다이캐스팅 머신이 수평하지 않게 설치되어 있는 경우 등 여러 가지가 있을 수 있다. 이를 방지하기 위하여는 (1)다이캐스팅 머신을 수평으로 설치하고, (2)주조 제품 투영면의 도심이 네 개의 타이바 중심 축과 일치되도록 금형을 설계 및 제작하며, (3)금형의 외형면이 평행이 되게 가공 및 장착하는 등의 조치를 하여, 금형체결력과 형개력이 모든 타이바에 균등하게 가해지도록 해주어야 한다. 금형체결력과 형개력을 모든 타이바에 균등하게 가하기가 어려운 경우에는, (4)하부 타이바 보다는 상부 타이바에 가해지는 금형체결력을 약간

크게 하여, 상부 타이바의 신장량이 하부 타이바의 신장량보다 상대적으로 커서 이동반 및 연결반이 베이스 프레임 위로 들리지는 것을 방지하고, (5)하부 타이바를 베이스 프레임에 구속시키는 구조로 보장한다(tie bar tie-down). 이 경우에는 베이스 프레임이 휘어 타이바를 구속해 주는 부분이 들리지는 않도록 베이스 프레임의 굽힘 강성을 크게 해야 한다.

### 4. 결 론

다이캐스팅 머신에 부과되는 금형체결력이 네 개의 타이바에 균등하게 가해지지 않고 이동반 하부에 더 많이 가해지는 경우에는 연결반이 위로 들리는 변형이 발생되며, 이에 따라 타이바가 체결되어 있는 부분에 응력 집중이 발생되어 조기에 파단될 가능성이 있다. 이러한 불균형 하중 분포로 인한 부품의 조기 파단을 방지하기 위하여는 (1)타이바 끝단에 타이바 신장량을 측정하는 센서를 부착하여 타이바에 가해지는 금형체결력이 다이캐스팅 머신의 최대 하중 용량을 초과하지 않도록 제한하고, (2)금형체결력이 네 개의 타이바에 가급적 균등하게 분포되도록 작업 조건을 관리하거나, (3)상부 타이바 보다는 하부 타이바에 상대적으로 큰 금형체결력이 가해지도록 하여 주조 작업시 다이캐스팅 머신의 연결반 부위가 위로 들리지 않도록 하중 조건을 설정해 주어야 한다.

### 참 고 문 헌

1. 이지환, 황선광, 이두면 편저, 다이캐스팅 머신 매뉴얼, 원창출판사, 1995. 5.
2. Linear Stress Analysis Release Notes, Algor, Inc., July, 1992.
3. Gap/Cable Stress Analysis Release Notes, Algor, Inc., July, 1992.
4. ViziCad Plus, Linear Stress and Vibration Analysis Release Notes, Algor, Inc., April, 1994.
5. 기계설계편람편집회, 機械設計便覽(上卷), 대광서림, 1974.
6. 한국자동차공학회, 자동차 기술 핸드북(제4권: 생산, 품질, 정비편), 1996.
7. William F. Riley and Loren Zachary, Introduction to Mechanics of Materials, John Wiley & Sons, Inc., 1989.