

## 자동차용 휠 디스크 스탬핑 해석

### Stamping Analysis of Automotive Wheel Disc

김 주 성 , 민 홍 기  
J. S. Kim H. K. Min



김 주 성

- 1960. 2월생
- 피로해석 및 탄소성해석 연구
- 쌍용자동차 제 1연구소 연구분석실



민 홍 기

- 1963. 1월생
- 자동차 구조와 부품등의 최적 설계 및 응력해석 연구
- 쌍용자동차 제 1연구소 연구분석실

#### 1. 서 론

근래 냉간가공의 급속한 발전과 함께 박판 Deep Drawing 가공의 성형성에 대한 관심이 높아지고 있다.

Deep Drawing은 박판 프레스 가공의 대표적인 작업의 하나로 자동차 산업의 B. I. W, Frame 및 각 Chassis Component, 그리고 기계 부품등의 외형작업에 널리 이용되고 있다. 실제 금형을 만들어 제품을 생산했던 과거와는 달리, Computer Aided Engineering에 종사하는 연구원들은 복잡한 형상의 제품까지도 CAE를 이용하여 제품의 변형상태를 사전에 파악하고 제품의 설계 및 프레스 금형 설계에 이르기까지 충분한 검토를 해왔다.

최근에 와서 컴퓨터의 성능이 향상됨에 따라 유한요소법에 의한 구조해석이 여러 산업 분야에 이용되어 왔고, 자동차 산업에서도 각종 설계분야에서 시스템 개발을 시도해 차량 개발 기간의 단축과 차량 경량화를 이룩하였으며 차량 안전성 향상 및 Stamping 분야로의 접근을 시도하게 되었다.

특히, 자동차 산업에서 금형이 차지하는 비중은 매우 크며 신차종 개발시 신속하고 정확한 제품 성형성 검토는 개발기간 단축에 가장 큰 요인으로 작용하므로 현재 선진각국에서는 자동차 부품개발에 있어 CAD / CAM System을 개발 접목시켜, 스타일링에서 금형제작에 이르는 공정을 일관된 CAD/CAE/CAM System화 하여 제품 개발에 적용하고 있다.

본 연구에서는 ABAQUS/EXPLICIT CODE를 이용하여 자동차용 휠 디스크의 성형성을 파악하기 위한 모델링 방식과 컴퓨터 시뮬레이션의 결과인 스프링백, 잔류응력, 두께 변화, 변형을 등을 소개하기로 한다.

#### 2. Wheel Stamping 개요

자동차의 Wheel은 차륜의 수직하중과 횡하중, 구동 및 제동 토크 등 주행시 발생하는 여러하중을 동시에 받으므로 충분한 강성과

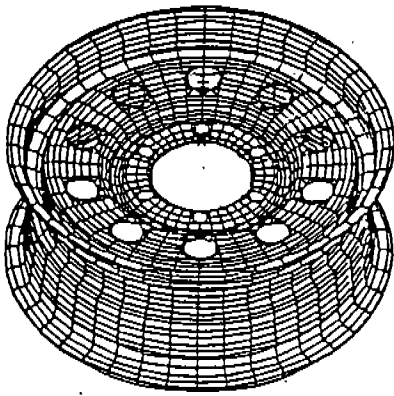


그림 1. Wheel의 유한요소모델

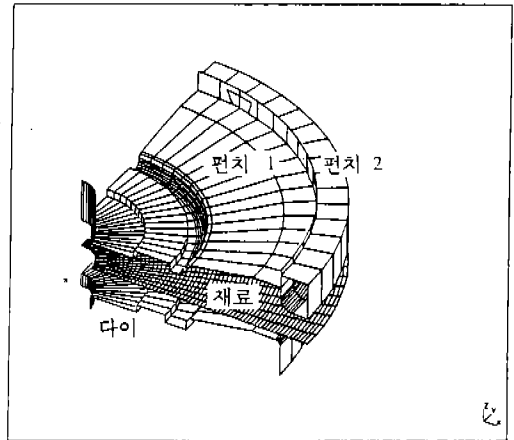


그림 2. 1/4 Shell Model

강도를 갖도록 안전설계를 하여야 하며 미적 외관과 경량화의 조건도 만족시켜야 한다. 그림 1은 본 연구에 이용된 WHEEL의 유한요소 모델로 Stamping 해석은 림을 제외한 디스크에 대해서만 수행하였다.

휠 디스크의 실제 작업공정은 재료가 로울러를 통과하면서부터 Shearing, Blanking & Drawing #1, Drawing #2, Bolt Hole Piercing, 그리고 Coining의 총 5 단계로 수행되고 있으나, 본 연구에서는 결과에 미소한 영향을 미치는 Shearing과 휠 디스크의 볼트홀 Piercing, Coining은 제외하고 Drawing #1, #2만의 작업을 3단계로 나누어 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

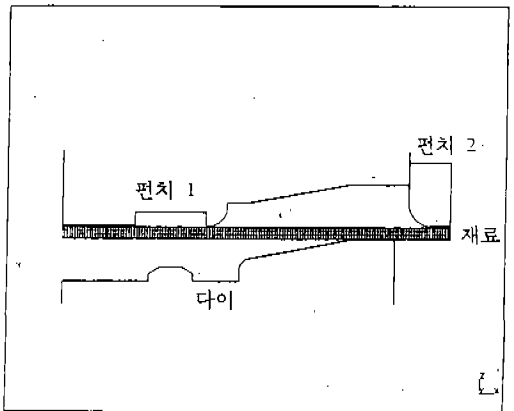


그림 3. Axisymmetric Solid Model

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 모델링

Stamping 해석 모델로는 Shell 요소 모델과 Solid 요소 모델 등 2가지로 구성하였으며, Shell 모델의 해석결과로부터는 전반적인 변형거동을, Solid 모델로부터는 변형 거동에 따른 상세한 데이터를 얻고자 하였다(그림 2, 3).

Shell 모델은 XZ 평면과 YZ 평면의 대칭성을 고려하여 1/4 모델로 만들었으며, 디스크 재료는 1500개의 4-Node Thin Shell

Element(S 4RF)로 구성하였고 펀치, 다이, 홀더는 Rigid Surface Element(RIGID4)로 구성하였다. Solid 모델은 디스크의 축대칭성을 고려하여 460개의 Axisymmetric Solid Element(CAX4R)를 사용하여 디스크 단면을 묘사하였고 펀치, 다이, 홀더는 Rigid Surface Element(RIGID2)로 구성하였다.

#### 3.2 경계조건

위의 2가지 모델에서 다이와 홀더는 고정시켰고, 펀치는 Z 방향의 이동만 고려하였으며 재료는 Free 상태로 놓았다. 펀치 1이 이동시 홀더의 역할은 펀치 2에 해당되며 펀치 2가 이동시 홀더의 역할은 펀치 1에 해당된다. 펀치와 재료 사이의 마찰계수는 0.25, 다

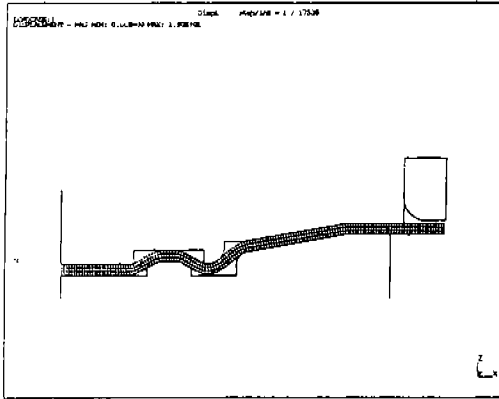


그림 4. 펀치 1의 -Z 방향 이동 (1 단계)

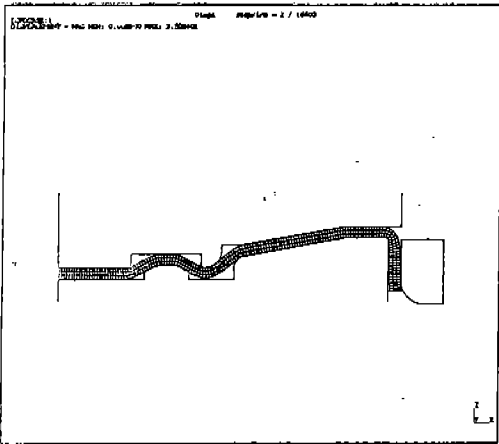


그림 5. 펀치 2의 -Z 방향 이동 (2 단계)

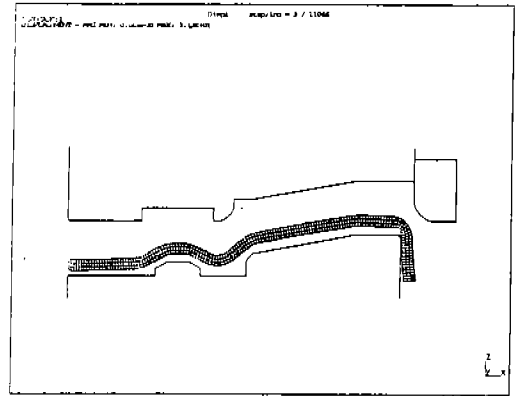


그림 6. 펀치 1, 2의 +Z 방향 이동 (3 단계)

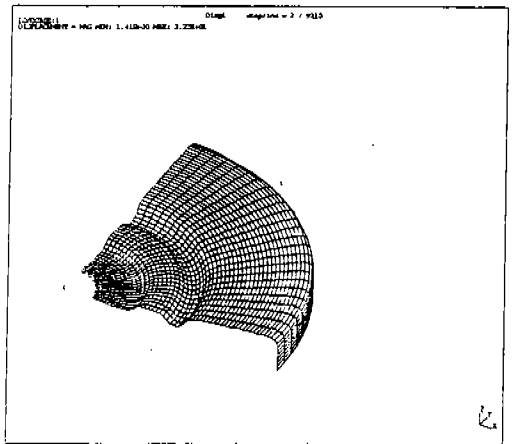


그림 7. Sheet모델의 Deformed Shape

이와 재료사이의 마찰계수는 0.125를 적용하였다.

1 단계에서는 펀치 1의 초기속도를  $V_z = -500\text{mm/sec}$ , 최종속도를  $V_z = 0$ 로 주어 0.0076초 동안 19mm를 이동시켰고(그림 4), 2 단계에서는 펀치 2의 속도를 1 단계에서의 속도와 동일조건으로 하여 0.088초 동안 22mm를 이동시켰으며(그림 5), 3 단계에서는 펀치 1과 펀치 2를 가속도  $a_z = 20000\text{mm/sec}^2$ 로 0.047초 동안 22mm를 이동시켰다(그림 6). 그림 7은 최종적으로 성형된 Shell 모델의 변형 양상을 나타낸다.

### 3.3 재질특성

Wheel 디스크의 재질은 SAPH 38로서 기계적 성질은 표 1과 같다.

표 1 SAPH 38의 기계적 특성

재질명	인장강도	항복응력	두께
SAPH38	419.4N/mm <sup>2</sup>	289.1N/mm <sup>2</sup>	5.0mm

소성 변형시 응력과 변형률의 관계는

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p = (\sigma/E) + (\sigma/K)^{\frac{1}{n}}$$

로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서는 SAPH38의 실험결과치가 없는 관계로 표 1의 기계적 특성 값으로부터 Strength Coefficient K 값 및 Strain Hardening Coefficient n값을 유도하여 이용하였다.

SAPH38 재질에 대한 유도값은 각각  $K = 764.2\text{N/mm}^2$ ,  $n = 0.171$ 이며 그림 8에 진응력 변형률 선도를 나타내었다.

STRESS - STRAIN CURVE (SAPH38)

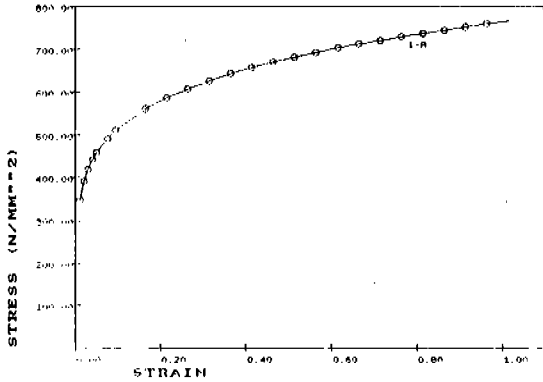


그림 8. 인장력 변형률 선도

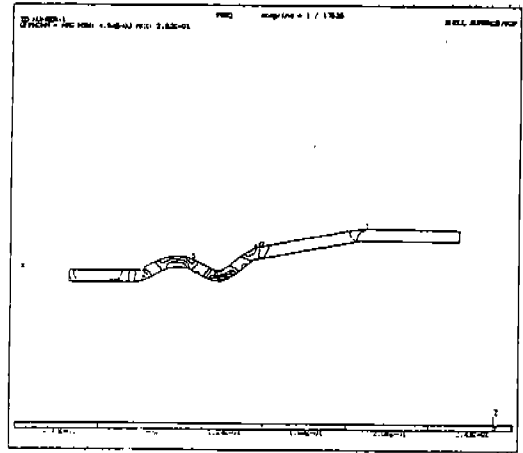


그림 9. Axisymmetric 모델의 변형률 분포 (1 단계)

4. 해석결과 및 고찰

4.1 Drawing시 발생하는 응력 및 변형률 비교

소성 거동시 발생하는 응력 및 변형률은 Equivalent Mises Stress 및 Equivalent Plastic Strain으로 정리하였다.

그림 9는 1 단계가 마지막까지 진행되었을 때 발생하는 변형률 분포를 나타내며 그림 10은 Disc가 금형내에서 최종적으로 성형된 상태 (2 단계)에서의 변형률 분포를 나타낸다.

그림에서와 같이 각 단계에서 변형률이 최대인 영역은 굽힘을 가장 많이 받는 부위로서, 굽힘 각도에 따라 변형률이 비례함을 알 수 있다. 이때 발생하는 최대 변형률은 SAPH38의 진파단 변형률  $\epsilon_f = 1.10$ 의 40%에 해당하는 값으로 국부적인 Necking 현상이 발생할 가능성이 있음을 보여준다.

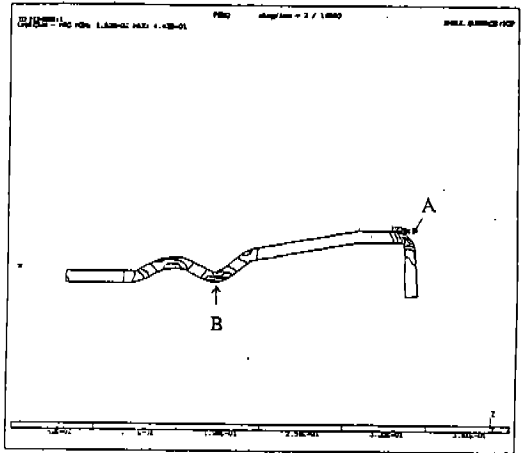


그림 10. Axisymmetric 모델의 변형률 분포 (2 단계)

그림 11은 Drawing시 최종적으로 발생하는 응력분포를 보여주며 최대응력이 발생하는 부위는 최대 변형률이 발생하는 위치와 일치한다. 표 2에 각 단계별로 발생하는 최대응력 및 변형률 값을 정리하였다.

표 2 각 단계별 발생하는 최대응력 및 변형률 비교

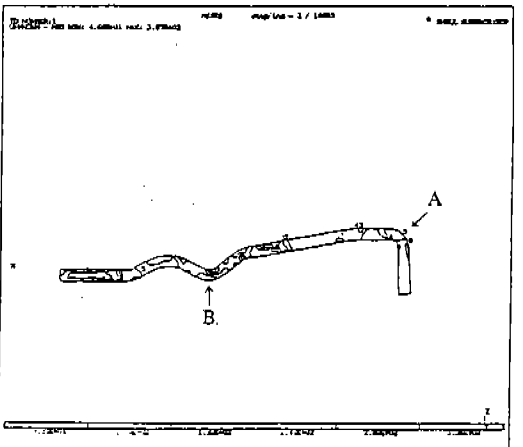


그림 11. Axisymmetric 모델의 응력분포 (2 단계)

	1 단계	2 단계
Mises Equivalent Stress (N/mm <sup>2</sup> )	574	610
Plastic Equivalent Strain	0.290	0.421

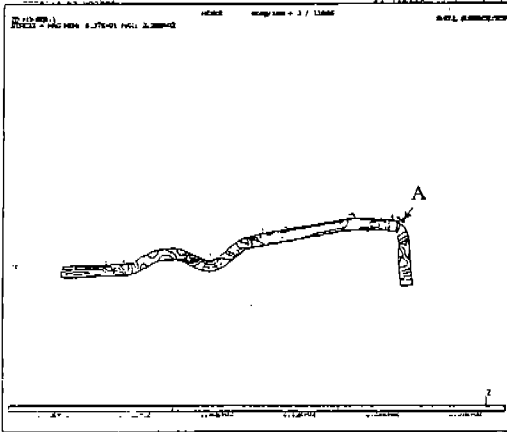


그림 12. Axisymmetric 모델의 잔류응력 분포 (3 단계)

#### 4.2 잔류응력 분포

그림 12는 디스크를 금형으로부터 완전히 탈거하였을 때, 과도한 소성 변형에 의해 디스크 내부에 존재하는 잔류응력 분포를 나타낸다. 잔류응력은 제품의 기계적 특성을 결정하는 요소로서 특히 피로수명에 결정적 영향을 미친다. 따라서 잔류응력이 과도하게 클 경우 열처리를 하여 제거할 필요가 있다.

본 모델에서의 최대 잔류응력은 재료의 두께 변화 및 변형률이 가장 큰 부위(그림 12의 A 부위)에서 발생하였으며, 그 값은  $550 \text{ N/mm}^2$ 로 항복응력의 190%에 해당한다.

#### 4.3 스프링 백

스텝핑시 스프링 백은 피할 수 없는 요소로서 주로 펀치와 다이의 Geometry와 재료의 기계적 특성에 의해 결정된다. 일반적으로 스프링백은 금형의 Geometry가 결정되었을 경우 재료의 탄성계수가 적고 항복응력이 높은 재질일수록 크게 나타나며, 금형의 Geometry는 이 스프링 백을 고려하여 설계되어야 한다. 본 디스크 금형에 대한 스프링 백의 크기는 그림 13에 나타난 바와 같이  $\delta_2 = -1.67\text{mm}$ , 우측끝단에서  $\delta_2 = 0.6\text{mm}$ 로 주위의 구속력이 상대적으로 작은 끝단(Edge)부위에서 크게 발생함을 알 수 있다.

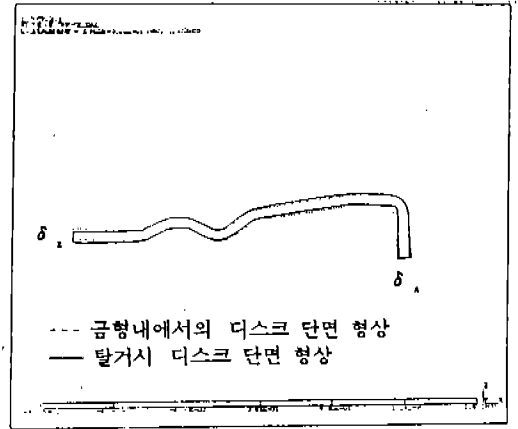


그림 13. 재료의 스프링 백

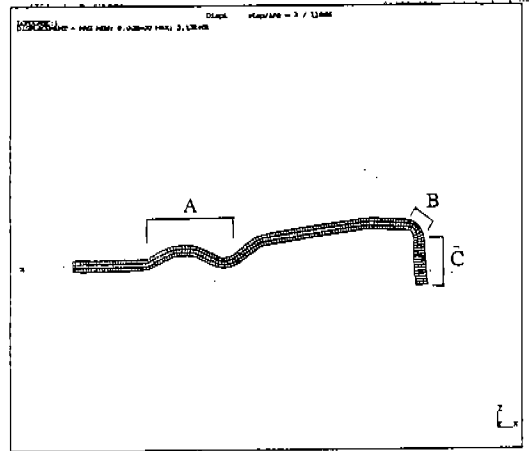


그림 14-a 금형에서 탈거후 재료의 두께변화 (3 단계)

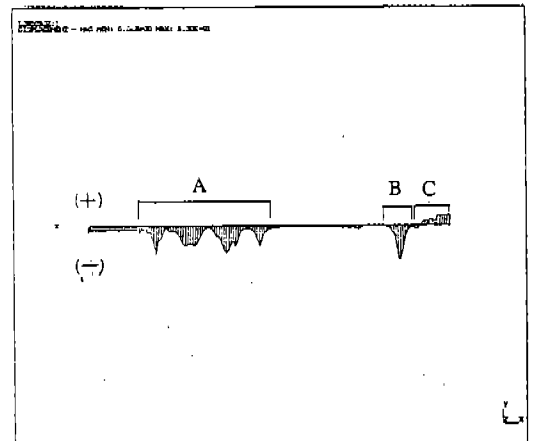


그림 14-b 재료 두께 변화의 20 배 확대 (3 단계)

#### 4.4 디스크 단면의 두께 변화

재료의 두께변화는 변형률과 밀접한 관계에 있으며 변형률이 최대인 부위에서 재료의 두께변화도 가장 크다. 그림 14-a는 디스크를 금형에서 탈거한 후의 두께 변화를 보여주며, 그림 14-b는 재료의 두께변화를 원래의 두께 5mm를 기준으로 20배 확대하여 도식적으로 나타낸 그림이다.

성형된 후의 두께는 원래의 재료 두께 5mm보다 전반적으로 감소한다. 특히 요철이 심한 부위(그림 14의 A, B 부위)에서의 두께가 상대적으로 얇으며, 변형률이 최대인 부위(B 부위)에서의 두께는 4.27mm로 0.73mm나 감소한다. 원래의 Blank 반경이 스탬핑에 의해 줄어든 부위(C 부위)는 반지름 감소에 따라 두께가 늘어났음을 알 수 있으며, 최대 두께는 5.3mm이다.

#### 4.5 디스크 재료 및 금형간의 마찰에 의한 영향

제품의 형상 및 재질이 결정되었을 때 제품의 성형성을 좌우하는 가장 중요한 항목은 디스크 재료가 다이 또는 홀더와의 접촉시 접촉면에서 발생하는 마찰로 보여진다. 마찰력은 앞에서 언급한 최종 두께 변화 및 변형률을 결정하는 중요한 요소로서, 판재와 각 금형간의 마찰력이 너무 클 경우 국부적인 Necking 현상을 유발하여 과도한 두께 변화 및 Stretch Mark가 발생할 수 있으며, 심한 경우는 찢어지기도 한다. 또한 마찰력이 너무 작을 경우에는 Blank 재료가 너무 과도하게 금형내로 유입되어 Wrinkling 현상이 발생할 수도 있으므로 적당한 수준의 마찰력을 찾는 것이 중요하다. 마찰력을 조정하는 방법으로는 펀치 및 다이 표면의 요철이 심한 부위에 윤활유를 공급하여 마찰력을 감소시키거나 홀더의 힘을 조절하여 Blank 재료가 금형내로 적절하게 유입되게 하여야 할 것이다. 본 해석은 기존의 양산 제품에 대하여 실시한 것으로서 해석결과로 미루어 볼 때 적용된 마찰계수 및 펀치의 작용하중은 적당한 것으로 보여진다.

#### 5. 결론 및 향후계획

앞에서 언급한 바와 같이 컴퓨터 시뮬레이션을 필 디스크 스탬핑에 이용한 경우 스탬핑시 발생하는 여러 현상을 쉽게 예측할 수 있으며, 또한 금형의 Geometry 결정 및 홀더와 펀치의 작용하중 등 금형 설계시 요구되는 데이터 확보가 매우 용이하다. 따라서 경험 및 축적 데이터에 의해 설계되는 기존의 금형설계방식에 유한요소해석을 도입할 경우 설계기간을 대폭 단축시킬 수 있고 설계경비도 절감할 수 있을 것으로 보여진다.

앞으로 연구가 진행되어야 할 항목으로는 정확한 해석결과를 얻기위한 기본 데이터인 Material Property, Lubrication 등에 관하여 성형성 실험이 병행된 폭넓고 체계화된 데이터 축적이 필요하다.

#### 참 고 문 헌

1. Medhat Karima, "A Methodology for Computer Aided Stamping Engineering", SAE 890502.
2. R. Stevenosn, "Modeling of Sheet Forming - A Status Report", SAE 880523.
3. Mary K. Mickalich and Michael L. Wenner, "Calculation of Springback and its Variation in Channel Forming Operations", SAE 880526.
4. Garth Lawrence and Patricia A. Miller, "Wheel Materials", SAE 880697.
5. Robin Stevenosn, "Metal Forming and Die Design - Systems, Process and Materials", SAE 890500.
6. Donald R. Allen, "Process Control in Stamping Lines", SAE 890343.