

717
446 33
2
= 2

工學碩士 學位論文

有限要素法을 이용한 자동차용 PA12 튜브의 스프링백에 관한 研究

指導教授 韓圭澤



이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함

2003年 2月

釜慶大學校 大學院

精密機械工學科

文燦庸

文燦庸의 工學碩士 學位論文을 認准함

2002年 12月 26日

主 審 工學博士 吳 明 錫



委 員 工學博士 鄭 英 得



委 員 工學博士 韓 圭 澤



목 차

Abstract	iii
기 호 설 명	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 이론 해석	4
2-1 탄성범위 내의 벤딩 이론	4
2-2 튜브 가열 벤딩 이론	7
제 3 장 튜브 벤딩 해석	10
3-1 유한요소모델	10
3-2 해석 조건	11
제 4 장 인장 시험	13
4-1 폴리아미드(PA) 재료	13
4-2 고온 인장시험	21
제 5 장 튜브 벤딩 실험	26
5-1 실험 장치 및 내용	26
5-2 실험 조건	31
제 6 장 결과 및 고찰	33

6-1 해석 결과	-----	33
6-2 실험 결과	-----	40
6-2 실험 결과와 해석 결과의 관계	-----	49
제 7 장 결론	-----	50
참고 문헌	-----	52
감사의 글		

A study on the PA12 tube spring back for automobile using finite element method

Chan-Yong Moon

Dept. of Precision Mechanical Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The recent automobile industry pursue light weight. Therefore, the market share of the plastic fuel tube in automobile parts now is growing rapidly. Especially many plastic fuel tube makers have made their efforts to develop the tube module not only with dimensional accuracy and spring back but also with cost competitiveness.

In this study, steam method was used bending process. Steam bending process was used because of heat relaxation of the PA12 plastic fuel tube.

Results obtained from a simulation program show that residual stress in parts and the experimental results show that spring back

angle after tube bending.

This paper describes the relation between residual stress and spring back angle.

In conclusion computer simulation results show a good agreement with experimental results.

기 호 설 명

M_b	Bending moment ($\text{kg}_f \cdot \text{mm}$)
σ	Normal stress (kg_f/mm^2)
Z	Coefficient of cross sectional area
θ	Angle (rad)
θ_s	Spring back angle ($^\circ$)
E	Young's modulus
l	Length of the neutral axis (mm)
EI	Modulus of flexural rigidity
y	Distance from the neutral axis (mm)
$R = \rho$	Bending radius (mm)
r_m	Radius of the pipe (mm)
D_m	Diameter of the pipe (mm)
α	Deviated angle of the neutral axis during pipe bending (rad)
τ	Shearing stress (kg_f/mm^2)
t_0	Initial thickness of the pipe (mm)
σ_s	Flow stress (kg_f/mm^2)
σ_z	Axial stress (kg_f/mm^2)
σ_i	Initial stress (kg_f/mm^2)
σ_r	Residual stress (kg_f/mm^2)
F_{z0}	Axial force (kg_f)
S_0	Initial cross sectional area of the pipe (mm^2)
β	Deviated angle of the neutral axis during unloading (rad)
κ	Elastic coefficient

제 1 장 서 론

최근 들어 세계 각국에서는 자동차 업계에 안전성 향상과 더불어 환경 문제에 대한 까다로운 환경규제 조건을 제시하고 있다. 자동차에 관련된 규제로는 배기관에서 직접 배출되는 유해가스인 CO, HC, NOx, NMOG, NMHC, HCHO, PM, smoke 등과 저온 시동시의 CO를 대상으로 하여 자동차 배출 허용기준과 운행차 배출 허용기준으로 나누어 규제를 하고 있으며, 차량의 연료 공급 계통에서 증발되는 HC 증발가스 규제, 배출가스와 관련되는 주요부품의 정상작동 여부를 진단하는 OBD(On-Board Diagnostics) 규제, 주유시 증발가스 규제인 ORVR(Onboard Refueling Vapor Recovery) 연비규제 등 여러 분야에서 규제하고 있다. 더욱이 환경문제와 관련된 배기가스 및 연비규제 관련 법안이 제정되어 이에 대한 대처 여부가 향후 자동차 업계의 생존과도 직결되는 문제로 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자동차 업체들은 여러 가지 노력을 기울이고 있으며, 그중 하나가 바로 경량화이다. 자동차의 연료소비는 중량에 비례하여 증가하므로, 연비 향상과 배기가스 감소를 위해서는 경량화가 필수 불가결하게 되었다. 또한 안전기준의 강화와 편의장치 등의 적용으로 인해 과거보다 차량의 중량이 더욱 증가하게 된 것도 경량화의 필요성이 요구되는 또하나의 이유가 되었다. 자동차의 경량화를 지향하면서 스틸(steel)재료에서 가볍고 내구성이 강한 플라스틱(plastic)으로 재질이 변하는 추세이다.

자동차에서 플라스틱 재료가 차지하는 비율은 무게로는 8% 정도이나, 부피로는 40% 이상을 차지하고 있어, 이제는 플라스틱이 없는 자동차는 생각할 수 없는 단계가 된 것이다.

현재 자동차에 적용중인 플라스틱 중에서 연료 튜브의 재질은 크게 PA6,

PA11, PA12 등이 사용되고 있다.

자동차 연료 계통의 플라스틱 튜브의 기본 제조 공정은 크게 압출, 절단, 벤딩, 조립 공정으로 구성된다. 이 중에서 벤딩 공정은 자동차에 튜브를 장착하는데 있어 중요한 역할을 하는 공정이므로, 정확한 튜브 벤딩이 이루어져야 한다. 또한 벤딩후의 스프링백(spring back)에 의한 형상 및 치수 변화는 자동차의 소음이나 진동을 유발시키는 주된 요인이 된다.

현재 플라스틱 튜브의 벤딩 공정은 임의적 설비 시스템의 사용과 벤딩시 스프링백에 대한 데이터베이스의 구축이 미흡하여 제품 품질의 산포가 심하며, 그 설비의 유지 보수가 문제이다. 이에 최근 들어 플라스틱 튜브 벤딩 공정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 고주파 가열에 의한 스틸 파이프의 벤딩에 관한 연구실적은 다소 있으나 아직 플라스틱 튜브에 관한 열성형 벤딩에 관한 연구는 전무한 실정이다.

플라스틱 튜브의 벤딩 공정은 다음과 같이 크게 네 가지의 방법이 적용되고 있다. 튜브를 치공구(jig & fixture)에 삽입하여 오븐 속에서 높은 열과 물로써 성형하는 오븐방식(Oven method), 할로젠 램프를 이용하여 벤딩 부위만을 국부 가열하는 할로젠 램프 방식(Halogen lamp method), 치구에 튜브를 삽입하여 폴리에틸렌 글리콜(Polyethylene glycol)용액에 담가 성형하는 딥핑 방식(Dipping method), 마지막으로 플라스틱 튜브 내부에 고온의 가열증기와 냉각공기를 교대 주입하여 성형하는 스팀 방식(Steam method)으로 크게 나뉜다. 이상의 벤딩 공정에 있어서 공통점은 재료 굽힘 과정에서 발생하는 내부 응력을 여러 가지의 가열 수단을 통하여 열이완(thermal relaxation)하는 것이다.

본 연구는 자동차 연료 계통에 사용되는 PA12 플라스틱 튜브의 스팀 방식을 이용한 벤딩 공정시 발생하는 응력 및 스프링백 크기 등을 상용 비선형

유한요소해석 소프트웨어인 MARC™를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션과 벤딩 실험을 통하여 검증함으로서, PA12 플라스틱 튜브 벤딩에 있어서 응력 및 스프링백 크기 등의 데이터베이스를 구축하고, 그 데이터를 분석한 결과를 PA12 플라스틱 튜브 벤딩 공정의 자동화에 사용될 치공구 설계의 기초자료로 사용하고자 한다.

제 2 장 이론 해석

2.1 탄성범위 내의 벤딩 이론

PA12 플라스틱 튜브는 점탄성체이고, 벤딩 공정에서 탄소성 변형을 일으킨다. 따라서, 탄성범위 내에서의 벤딩 이론은 Fig. 1과 같이 보속의 굽힘 응력으로 나타낼 수 있다.^{1)~2)}

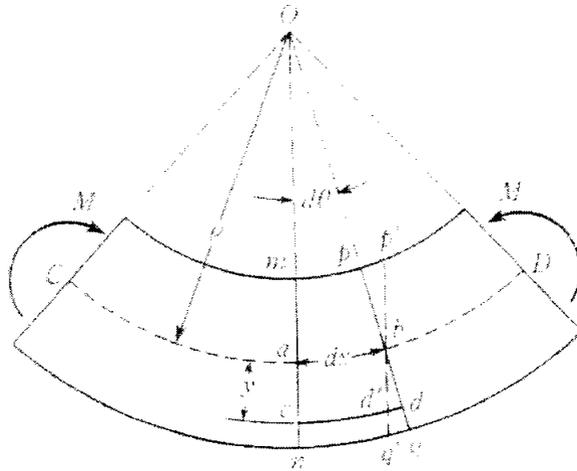


Fig. 1 Bending stress of the beam

탄성한도 범위 내에서는 후크의 법칙(Hook's law)에 따라서 순수 굽힘 (pure bending) 상태이므로 식(1)부터 (3)까지 나타낼 수 있다.

$$d\theta = \frac{dx}{\rho} \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$\varepsilon_x = \frac{y d\theta}{dx} = \frac{y}{\rho} \quad \text{-----} \quad (2)$$

$$\sigma_x = \varepsilon_x E = \frac{E}{\rho} y \quad \text{-----} \quad (3)$$

여기서, σ : 응력, M : 굽힘 모멘트, EI : 굽힘강성계수, l : 중립축의 길이
 $\gamma = \rho$: 곡률반경, θ : 각도(rad), Z : 단면계수
 y : 중립축으로부터 떨어진 임의의 위치

Fig. 2는 튜브의 굽힘 응력을 나타내는 것으로, 순수 굽힘으로 인한 σ_x 는 중립면으로부터의 거리 y 에 비례한다.

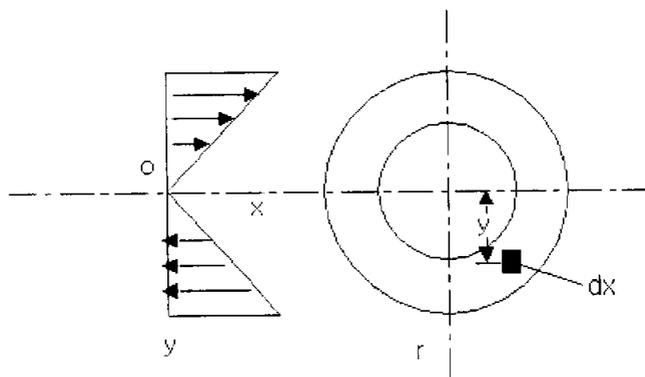


Fig. 2 Bending stress of the tube

$\sigma_x dA = \frac{E}{\rho} y dA$ 에서 순수 굽힘시 각 단면위에 법선력 N_x 는 작용하지 않으므로, 힘요소 $\sigma_x dA$ 의 그 단면의 중립축에 관한 모멘트는 $dM = y \sigma_x dA$ 와 같다. 이 모멘트 요소를 그 단면의 전면에 걸쳐 적분한 값은 그 단면에 작용하는 굽힘 모멘트(bending moment) M 과 같아야 한다.

따라서, 튜브내의 임의점에서 발생하는 벤딩 응력은 다음과 같이 식 (4)에서 식(6)처럼 나타낼 수 있다.

$$M = \int_A y \sigma_x dA = \frac{E}{\rho} \int_A y^2 dA \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad \left(M = \frac{E}{\rho} \int_A y^2 dA, I = \frac{\pi d^4}{64} \right) \text{-----} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{64 \left(\frac{E}{\rho} \int_A y^2 dA \right)}{\pi (d_o - d_i)^4} \quad \text{-----} \quad (6)$$

2.2 튜브 가열 벤딩 이론

플라스틱 튜브의 가열후 벤딩한 것에 대한 자료는 전무한 실정으로, 스틸 파이프의 고주파 가열에 의한 벤딩 이론³⁾을 참고로 하여 Fig. 3에 나타내었다.

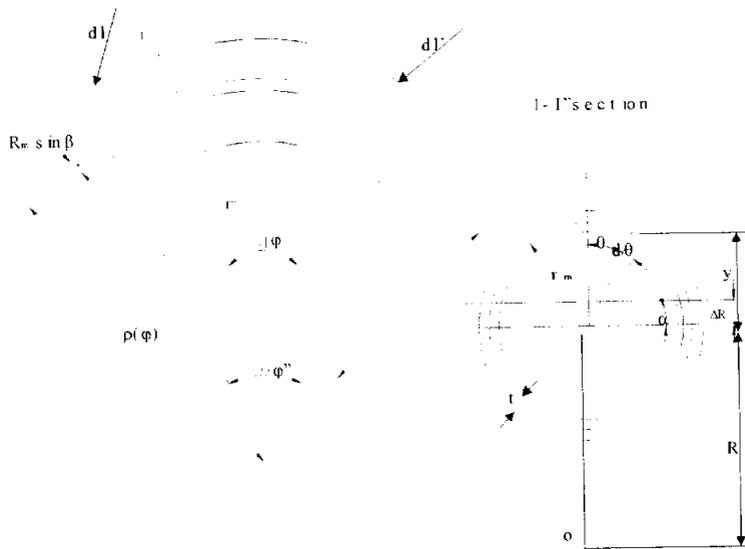


Fig. 3 Spring back analysis for the tube

스틸 파이프를 고주파 가열 등의 방법에 의해 벤딩 가공하여 적용되는 스프링백과 형상치수와의 관계식을 식 (7)에서 (14)까지 나타내었다.

$$d(\Delta\phi') = d\phi - d\phi' \text{ ----- (7)}$$

여기서, $d\phi$ 와 $d\phi'$ 는 스프링백 전후의 파이프의 부분적 미소 변형 굽힘 각을 말한다. 스프링백에 대한 바깥쪽의 외측 인장은 다음과 같다.

$$\varepsilon'_z = \frac{dl' - dl}{dl} = \frac{[\rho(\varphi) + r_m(1 - \sin\beta)] d\varphi - (R + r_m)d\varphi}{(R + r_m)d\varphi} \quad (8)$$

$$\varepsilon'_z = \frac{\sigma'_z}{E} = \frac{kr_m}{E}(1 - \sin\beta) \quad (9)$$

여기서, E 는 영계수(Young's modulus)이다. 그러므로,

$$d(\Delta\varphi') = \left[1 - \frac{R + r_m \sin\beta}{\rho(\varphi)} \right] d\varphi = \frac{k}{E}(R + r_m)d\varphi \quad (10)$$

(가) 굽힘 부분의 스프링백의 각 $\Delta\varphi'_\phi$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi'_\phi &= \frac{(R + r_m)}{E} \int_0^\phi k(\varphi) d\varphi \\ &= \frac{4\sigma_s}{E} \frac{(1 + R/r_m)(\sin\alpha + R/r_m)}{\sqrt{(\pi R/r_m)^2 - 16}} \times \left\{ \arccos \left[\frac{\cos(\Phi + \Phi_0) \sqrt{(\pi R/r_m)^2 - 16}}{\pi R/r_m} \right] \right. \\ &\quad \left. - \arccos \left[\frac{\cos \Phi_0 \sqrt{(\pi R/r_m)^2 - 16}}{\pi R/r_m} \right] \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

(나) 소성 변형 부분으로 롤러가이드 앞으로부터 파이프의 곧은 부분의 스프링백의 각 $\Delta\varphi'_L$

$$\Delta\varphi'_L = \frac{1}{E} \int_0^L k(l) dl = \frac{4\sigma_s RL}{Er_m^2} \frac{[1 + (L/2R) \cot(\Phi + \Phi_0)]}{\sqrt{(\pi R/r_m)^2 + [4 \cot(\Phi + \Phi_0)]^2}} \quad (12)$$

(다) 굽혀진 쪽에서 굽은 쪽으로 파이프의 끝은 부분의 스프링백 각 $\Delta\phi'_A$

$$\Delta\phi'_A = \frac{1}{E} \int_0^A k(l) dl = \frac{4\sigma_s RA}{Er_m^2} \frac{(1 - (A/2R) \cot \Phi_0)}{\sqrt{(\pi R/r_m)^2 + (4 \cot \Phi_0)^2}} \quad \text{--- (13)}$$

따라서, 총 스프링백 각은 다음과 같이 얻어진다.

$$\Delta\phi' = \Delta\phi'_\phi + \Delta\phi'_L + \Delta\phi'_A \quad \text{----- (14)}$$

여기서, 영계수 $E = 210(\text{GPa})$, D_m 은 파이프의 직경을 의미하며, 스프링백은 각과 관계가 있는 것을 알 수 있다.

제 3 장 튜브 벤딩 해석

3.1 유한요소모델

Fig. 4는 플라스틱 튜브의 벤딩 해석을 위한 전처리 과정(pre-process)중의 유한요소모델을 나타낸다. 범용 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC™의 전-후처리 프로그램 MENTAT™를 이용하여 형상은 외경 $\text{Ø}8\text{mm}$, 내경 $\text{Ø}6\text{mm}$, 길이는 230mm 로 나타내었고, node의 수는 7560개, element 수는 5625개로 하였다.

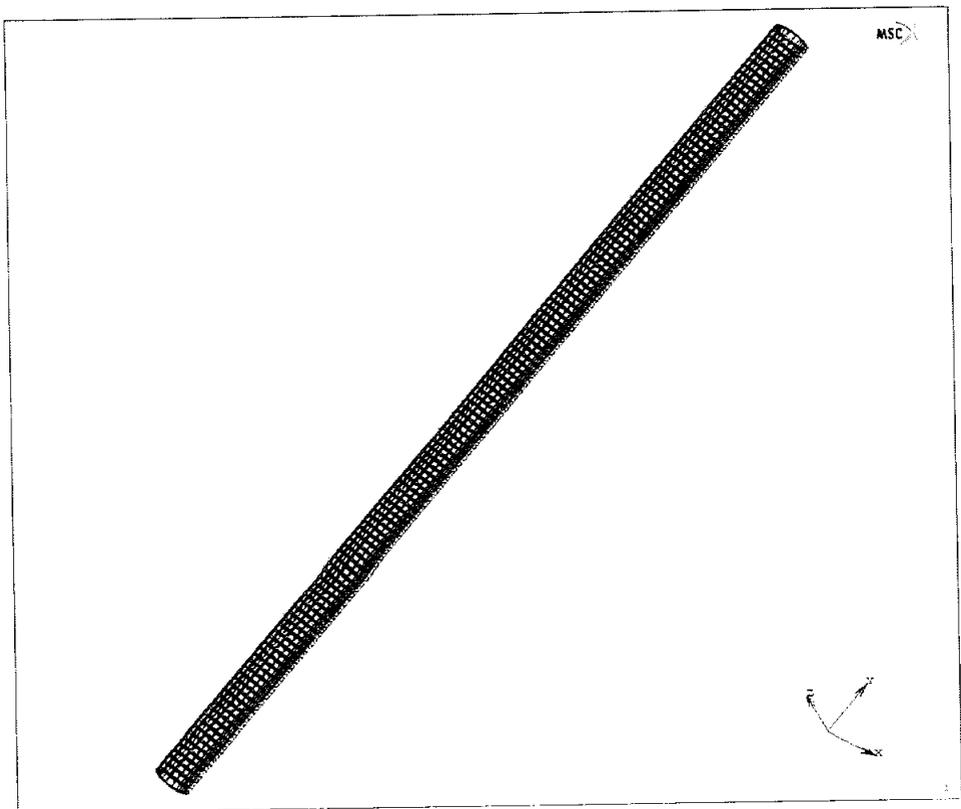


Fig. 4 Finite element model of the tube

3.2 해석 조건

Table 1에서 Table 3까지는 PA12 플라스틱 튜브의 기계적, 물리적 등의 각종 물성치를 나타낸다. 선행 실험한 상온 및 고온 인장시험 결과의 스트레스-스트레인 곡선에서 온도별 항복점을 시작점으로 하여 curve-fitting한 값을 나타내었다.

컴퓨터 시뮬레이션을 수행하기 위한 기초 물성치에는 진응력(true stress) 및 진변형률(true strain)의 값이 요구되나, 인장시험에서는 그 값이 나타나지 않으므로 30℃일 때의 공칭응력을 진응력으로 가정하여 나타내었다. true strain 및 true plastic strain 값은 식 (15), (16)을 이용하여 도출하였다.^{1)~5)}

$$\text{True strain} = \text{Ln} (1 + \text{nominal strain}) \quad \text{-----} \quad (15)$$

$$\text{True plastic strain} = \text{true strain} - \text{true stress}/E \quad \text{-----} \quad (16)$$

Table 1 Mechanical properties of the PA12

Temperature (℃)	Yield stress (N/mm ²)	Strain (dimensionless)	E ¹⁾ (N/mm ²)	E _t /E ₂₀ ²⁾ (℃)
20	116.4	0.08	1455.0000	1.0000
30	105.3	0.08	1316.2500	0.9046
60	74.1	0.08	926.2500	0.6366
90	43.2	0.08	540.0000	0.3711
120	29.4	0.08	367.5000	0.2526
150	16.1	0.08	201.2500	0.1383

주1) E : Young's modulus (N/mm²)

주2) E_t/E₂₀ : 20℃일 때의 E값을 기준으로 각 온도별 E값의 비

Table 2 True stresses and true strains of the PA12

Nominal strain (30°C)	Nominal stress (30°C)	True strain (30°C)	True Plastic strain (30°C)	True stress (30°C)	True stress (20°C)
0	0	0	0	0	0
0.08	105.3	0.08	0	105.3	116.41
0.24	117.7	0.22	0.13	117.7	130.11
0.515	127.5	0.42	0.32	127.5	140.95
0.8	133.1	0.59	0.49	133.1	147.14
1.13	135.6	0.76	0.65	135.6	149.90

Table 3 Physical and thermal properties of the PA12

Property	Unit	Value
Specific heat	N · mm/kg · K	1×10^3
Mass density	kg/mm ³	1.02×10^{-6}
Thermal conductivity	N · mm/mm · K	0.21
Coefficient of linear expansion	mm/mm/°C	1.5×10^{-5}
Modulus of thermal convection	N/mm · K · sec	0.02

제 4 장 인장 시험

4.1 폴리아미드(PA, polyamide) 재료

폴리아미드 재료는 1938년 미국의 듀폰(Dupont)사가 세계 최초로 개발하여 시판하였다.^{6~7)} 이 고분자는 산 아미드(Amide) 결합에 의해 합성되기 때문에 폴리아미드라 불리어지고 일반적으로 나일론이라는 이름으로 알려져 있다. 원래 폴리아미드는 섬유로서 개발된 것이고 현재도 대부분은 섬유로서 사용되어지고 있으나, 각종 물성이 우수하기 때문에 성형품, 특히 엔지니어링 플라스틱(engineering plastics)으로서의 수요 또한 증가하고 있다.

4.1.1 폴리아미드의 제법

PA6는 페놀(Phenol)이나 사이클로헥산(Cyclohexane)에서 얻어진 ϵ -카프로락탐(ϵ -Caprolactam)에 중합 개시제로 AH염이나 물을 가해 중합탕에서 연속적으로 가열, 중합시킨다.

생성 폴리머(polymer)는 보통 10% 정도의 모노머(monomer)나 폴리머가 포함되어 있기 때문에 열수에 의해 그것들을 추출한 후, 감압·건조시킨다.

사이클로헥산에서 만들어진 아디핀(Adipine) 산과 아디핀 산이나 부타디엔(Butadiene)에서 아디포니트릴(Adiponitrile)을 거쳐서 얻어지는 헥사메틸렌디아민(Hexamethylene diamine)과의 당량을 혼합하여 AH염이 얻어진다. 이 AH염의 수용액을 산소를 제거한 가압솥 중에서 가압하에서 탈수중 축합시키면 PA66이 된다. 또한, PA610의 원료인 세바스틴(Sebastine) 산이나 PA11의 원료인 ω -아미노운데칸(ω -Aminoundecane) 산은 PA610에서, PA12

의 원료인 라우로락탐(Lauro lactam)은 부타디엔으로부터 얻어진다.

4.1.2 폴리아미드의 물리적 성질

폴리아미드는 강인성, 윤활성, 내마모성과 내약품성이 우수하지만, 흡수성을 갖고 있기 때문에 치수안정성이나 전기적 성질 면에서 우수하지 못하다. 또한, 이들 제성질은 결정화도, 결정구조, 흡수량과 온도에 의해 변화하는 것에 주의해야 한다. 주요한 폴리아미드의 성질을 Table 4에 나타내었다.

폴리아미드 분자 중에는 일반적으로 아미드기가 일정간격으로 존재하여 이 아미드기가 인접분자의 아미드기와 수소결합을 형성하기 때문에 결정화되기 쉽다. 결정화도는 용융체의 냉각속도나 분자량에 의해 다르지만, 보통의 성형조건에서는 PA66가 30~35%, PA6와 PA610이 20~25%로 되고, 결정의 용이도는 PA66, PA610, PA6, PA12의 순으로 크게 나타난다. 성형품의 조직은 표면에서는 급냉시키면 무정형에 가깝지만, 내부에서는 냉각속도가 느리기 때문에 하나의 중심 핵부터 그 주위에 결정이 성장하여 구정(spherulite)으로 불리는 결정구조를 갖는다. 결정화도(crystallinity)와 구정의 크기가 기계적 성질에 끼치는 영향은 정상적으로는 Table 5와 같다.

일반적으로 결정화도의 상승은 강도나 강성의 증가, 내마모성이나 윤활성 향상, 열팽창계수나 흡수율의 저하 등 바람직한 효과를 갖는다. 또한, 충격 강도는 결정화도의 상승과 더불어 저하하는 경향이 있는데 오히려 구정의 크기나 분포가 더욱 강한 영향을 미친다. 그러므로 미세한 결정이 성형품 전체에 균일하게 분포하고 있는 것이 물성상 바람직한 경우가 많다.

Table 4 Properties of the polyamide

Property	Unit	PA6			PA66		PA610	PA11	PA12
		Dry	Absorptance (3.5%)	G/F30 %	Dry	Absorptance (3.5%)			
Gravity	-	1.14	-	1.37	1.14	-	1.08	1.04	1.02
Tensile strength	kg/cm ²	780	350	1900	830	550	600	500	430
Elongation	%	200	250	5.8	60	200	85	230	230
Bending strength	kg/cm ²	1250	385	2550	1300	650	950	500	590
Impact strength (Izord)	kg.cm/cm	8	>56	8.8	4	14	5.6	5	5
Hardness (Rockwell)	R-scale	114	85	120	118	100	113	100	105
Melting point	°C	220	-	220	260	-	213	187	178
Coefficient of linear expansion	mm/mm/°C (x10 ⁻⁵)	0.8	-	-	1.0	-	1.2	1.5	1.5
Thermal conductivity	W/m-K	1.18	-	-	0.21	-	0.19	0.25	0.21
Dielectric breakdown strength	kg/cm ²	31	-	27	15.4	-	28	17	33
Absorptance	%	2.9	-	1.2	1.5	-	0.5	0.5	-

Table 5 Relations between crystallization and mechanical properties

Properties	Yield point	Tensile strength	Impact strength	Elongation	Bending strength
Increase of crystallinity	Increase	Increase	Decrease	Decrease	Increase
Increase of spherulite	Decrease	-	Decrease	Increase	Decrease

4.1.3 폴리아미드의 흡수율과 열적성질

아미드기가 친수성이기 때문에, 폴리아미드는 흡수성을 갖고 분위기에 대응한 평형량까지 흡수한다. 흡수량은 분자중의 $(-CH_2-)/-(NHCO)$ 비가 큰 만큼 또한, 결정화도가 높은 만큼 작게 된다. 사출성형품의 20°C, 65% RH에서의 평형수분량은 PA6에서 3.5%, PA66에서 2.5%, PA610에서 1.5%, PA11에서 1.1%, PA12에서 0.8% 정도로 사용시에 평형수분시의 물성을 고려할 필요가 있다. Fig. 5에서는 PA6의 흡수량에 따른 강도변화를 나타내고 있다.

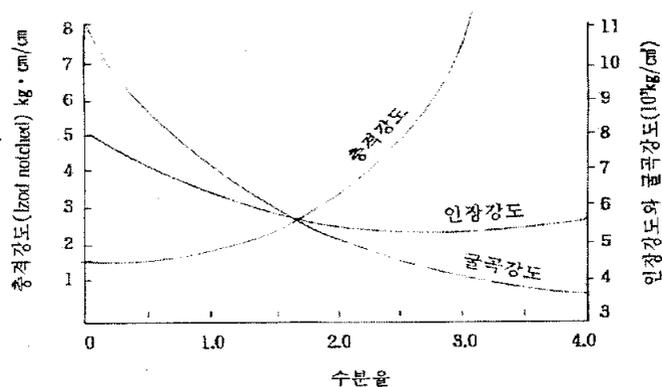


Fig. 5 Relations between moisture content and strength of the PA6

폴리아미드중의 수분은 가소제와 같은 작용을 하여 수지의 강도와 강성을 저하시켜 성형품의 치수변화를 일으킨다. 흡수율이 1% 증가함에 따라 PA6에서 0.2%, PA66에서 0.25%의 치수증가를 일으킨다.

폴리아미드는 연화온도가 높기 때문에 비교적 고온에서도 각종 물성은 양호하다. 온도상승은 수분량의 증가와 같은 효과를 각종 물성에 끼친다. 또한 60~70℃의 유리전이온도(Tg)를 경계로 하여 급격한 물성변화를 나타내므로, 비강화 폴리아미드의 사용온도는 무하중에서는 120℃정도까지 하중하에서는 PA66에서는 100℃, PA6과 PA610에서는 70℃이하가 바람직하다.

4.1.4 폴리아미드의 기계적 성질

폴리아미드의 인장강도와 충격강도는 플라스틱 중에서도 우수하다. 충격강도는 공중합물이 특히 크게 나타나고, 다음으로 PA6, PA610, PA66의 순이다. 또한 이들의 성질은 결정화도, 결정구조, 흡수량과 사용온도에 의해 크게 변화한다.

폴리아미드의 최대 특징의 하나는 내마모성과 윤활성이 우수하다는 것이다. 폴리아미드의 마모에 의한 중량감소를 1로 한 때의 각종 수지의 중량감소율을 Table 6에 나타내었다. 윤활성은 사용조건에 따라 다른데, 일반적으로 폴리테트라플로오르에틸렌(PTFE, Polytetra Fluoro Ethylene) 다음으로 좋다. 폴리아미드에 이산화몰리브덴(MoS_2), 흑연이나 PTFE의 분말을 첨가하면 윤활성이 개선될 뿐만 아니라 내마모성도 향상한다.

폴리아미드의 부하한계치(PV)는 $560kg/cm^2 \cdot m/mm$ 인데, PTFE를 첨가함에 따라 1800까지 증가한다.

Table 6 Weight loss of plastic's wear

Polymer	Polyamide	Polyacetal	Polystyrene	ABS	PMMA	Phenol
Rate of weighth loss	1	2~5	9~26	9	2~5	4~12

4.1.5 폴리아미드의 화학적 성질과 가스(gas) 투과성

폴리아미드는 일반적으로 화학 약품에 대한 강한 저항성이 있고, 보통 사용 조건에서는 알카리(Alkali), 에테르(Ether), 탄화수소, 케톤(Ketone), 기름, 세제 등에 침투되지 않는다. 그러나 페놀(Phenol)류나 기산에는 가열시 용해한다. 폴리아미드는 내산성이 나쁘고 무기산에 의해 비교적 간단히 가수분해를 일으킨다.

필름(film)의 수증기 투과율은 높지만 산소, 질소 그리고 탄산가스 등의 투과성은 극히 낮다.

4.1.6 폴리아미드의 용도

폴리아미드는 원래 섬유로 개발되었기 때문에 현재도 섬유로의 사용이 많다. 의류, 가정용 섬유로의 용도는 아는 바와 같고, 산업용으로는 로프, 타이어, 코드, 어망, 자동차 분야 등에 이용되고 있다. 아미드 섬유와 종이는 내열용 재료로 이용되고 있다.

폴리아미드는 흡습에 의한 기계적 강도나 치수안정성 변화는 크지만 강인성, 내마모성, 윤활성, 내열·내한성, 내약품성 등 엔지니어링 플라스틱으로 요구되는 성능을 구비하고 있고 공중합, 변성 그리고 각종 충전제 및 첨가

제에 의해 용도, 목적에 따르는 것을 만들 수 있으므로, 주로 엔지니어링 플라스틱으로 이용되고 있다. 각 사용 분야별의 대표적 예를 Table 7에 나타내었다.

Table 7 Applications of polyamide

적용 분야	적용 부품
자동차 부품	카브레이터부품, 연료펌프부품, 오일배관용 튜브와 파이프, 각종 보조탱크, 기어, 롤러, 부시(bush), 가솔린 탱크 등
일반기계부품	기어, 부시, 캠(cam), 롤러, 하우징, 내압호스, 체인 등
전기·통신부품	코일보빈, 스위치 부품, 기어, 부시, 캠, 전지케이스 등
건축 부품	샤워부품, 롤러, 커튼부품, 가스터 등
방직기계부품	각종 기어, 롤러, 캠, 부시류, 가이드(guide)부품
잡화 부품	매직 잉크용기, 야산부품 등
운동 부품	헬멧, 스파이크, 낚시 기어, 테니스 라켓의 요크(yoke) 등

이들 중에서도 가장 최근에 사용되기 시작한 것이 방직기계 부품으로 내마모성, 윤활성이 우수하고 윤활제에 의한 오염이 없으므로 상용되고 있다. 최근은 자동차와 전기, 전자부품으로의 신장이 상당하며 제각기 약 35% 정도가 이들의 분야에 적용되고 있다.

PA610, PA12는 유연성, 내저온 충격성 그리고 내유성 등이 우수하여 튜브, 호스, 필름, 전선피복 등에 이용되고 있다. 특히 접착성, 내후성, 내약품성, 무독성 등의 우수한 성질로 PA11, PA12는 코팅제로 이용이 높아지고 있다.

필름이나 내유성이 요구되는 분야의 포장재로서 이용되어 왔는데, 수증기 이외의 기체 투과성이 낮고 내열·내한성과 heat-seal성이 좋고, 무독성이므로

로 식품의 포장재로서 이용되고 있다. PA12와 PA6, PA66과의 다원공중합체는 순수한 내약품성을 유지하고 저융점이기 때문에 각종 핫멜트(hot melt) 접착제로 이용되고 있다. 튜브나 호스는 자동차를 시작으로 각종 기계장치의 공압, 유압용 배관, 급유관 등에 이용되고 있다. PA11은 SAE의 자동차용 에어 브레이크 튜브(air brake tube) 규격에 합격하고 있다. 또한 폴리아미드는 내프레온(Freon)성이 극히 우수하고, 냉난방기용 호스로서 우수한 특성을 갖는다.

폴리아미드계열은 여러 산업분야 계열중에서도 자동차 산업의 경량화에 중요한 부분을 차지하고 있다. 그중에서도 자동차의 연료 계통에 적용중인 플라스틱 튜브 성형품은 점차 강화되고 있는 환경 규제 분야에서 연구가 시급한 분야이며, 이 분야의 데이터베이스 구축은 설비 개발과 더불어 제조원가 절감, 자동차 부품산업의 발전을 위해 체계적인 연구가 선행되어야 할 것으로 여겨진다.

4.2 고온 인장시험

4.2.1 실험내용 및 조건

본 실험은 PA12 플라스틱 튜브의 온도별 스트레스-스트레인 곡선(stress-strain curve : SS curve)을 구하여 재료 거동 및 플라스틱 튜브 벤딩의 실험식을 도출하기 위한 선행 실험이다.

PA12 플라스틱 튜브의 재료가 가지는 특성을 유지하기 위해 시편을 변형하지 않고, 튜브 자체로 쓸 수 있도록 치구를 제작하여 인장시험을 하였다.

인장시험은 온도가 30℃, 60℃, 90℃, 120℃인 상태에서 각각 3회씩 실시하였다. 고온 인장시험은 재료가 열평형 상태에 도달하도록 치구를 고정시킨 후 약 30분 후에 시험을 하였다. 인장 스피드는 6mm/min으로 하여 수행하였다.

4.2.2 실험장치

Photo 1은 고온 인장시험을 하기 위한 인장시험기를 나타낸 것으로, 중앙 원통형의 챔버 내에 시편을 넣고 열을 가하여 고온의 인장시험을 할 수 있는 구조로 되어있다.

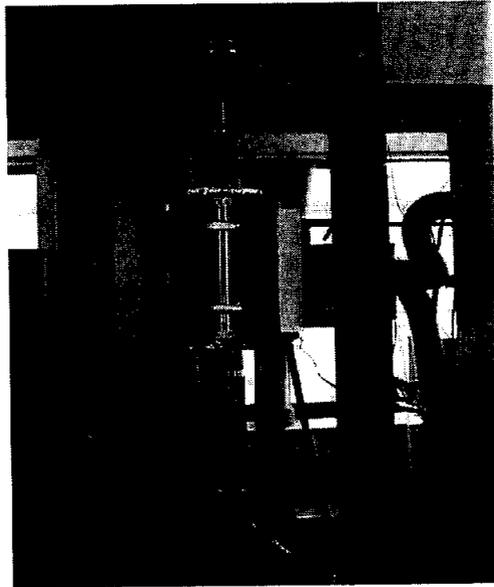


Photo 1 Universal testing machine

Photo 2는 고온 인장시험을 하기 위해 제작된 치구를 나타내며, 튜브 자체로 시험을 할 수 있도록 제작하였다.

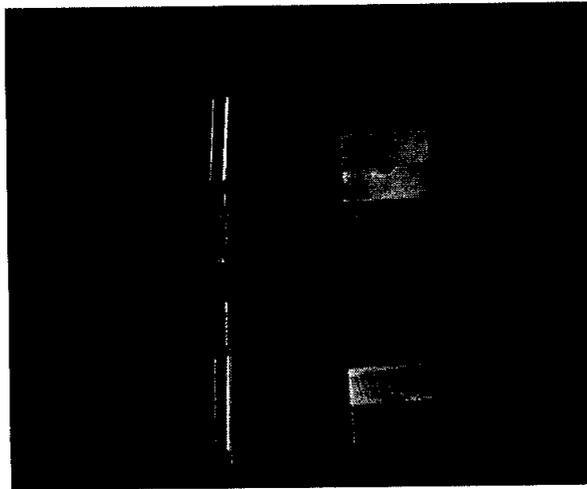


Photo 2 Fixtures for the tension test

Photo 3은 시편을 치구에 고정시켜 시험중인 상태를 나타내고 있다.

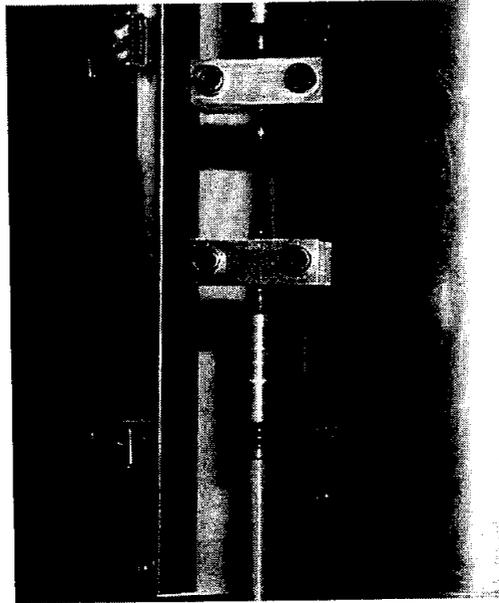


Photo 3 Tension test

4.2.3 실험 결과

PA12 플라스틱 튜브를 고온 인장시험한 결과 Fig. 6과 같은 스트레스-스트레인 곡선을 얻을 수 있었다. 온도가 높을수록 열이완으로 인한 재료가 연화되어 내부의 응력이 작게 발생하는 양상을 알 수 있으며, 이 결과를 컴퓨터 시뮬레이션을 하기 위한 기초 물성 자료로 활용하였다.

온도별 스트레스-스트레인 관계식은 식(17)에서 식(20)과 같이 나타냈다.

(1) 인장시험 온도가 30℃일 때

$$y = 2.2049\ln(x) + 3.8568 \text{ ----- (17)}$$

(2) 인장시험 온도가 60℃일 때

$$y = 1.9418\ln(x)+2.3246 \text{ ----- (18)}$$

(3) 인장시험 온도가 90℃일 때

$$y = 1.5773\ln(x)+0.514 \text{ ----- (19)}$$

(4) 인장시험 온도가 120℃일 때

$$y = 1.1464\ln(x)+0.0186 \text{ ----- (20)}$$

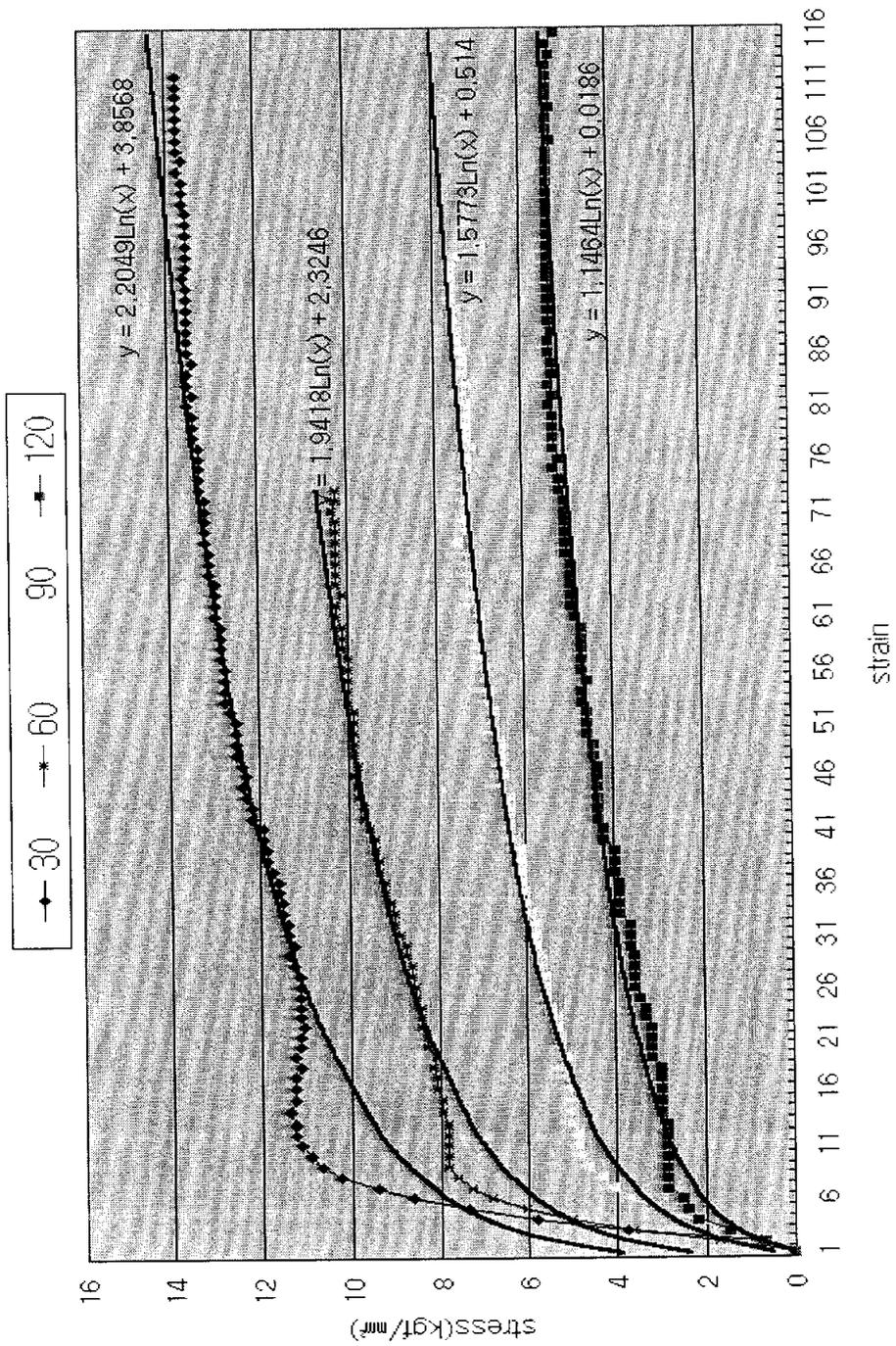


Fig. 6 Stress-strain curve of the PA12 tube

제 5 장 튜브 벤딩 실험

5.1 실험 장치 및 내용

Fig. 7과 Photo 4는 실험 장치의 구성도 및 실제 구성된 장치의 사진을 나타낸 것이다. 사용된 가열 장치는 최대 압력 20kgf/cm^2 의 보일러를 사용하였으며, 설정 압력을 제어하여 가동하였다. 균일한 압력의 스팀(steam)을 시편에 통과시키기 위하여 감압 밸브(reducing valve)를 사용하여 압력을 제어하였으며, 냉각은 에어 컴프레셔(air-compressor)를 이용하였다. 고온의 증기와 냉각 공기는 제어 박스(control box)를 이용하여 타임 밸브에 의해 제어하였다. 타임 밸브는 제어 박스의 타임 리미트 스위치로 제어되며, 최대 시간은 30sec 이다.

실험 절차는 PA12 플라스틱 튜브 소재를 치구에 장착하고 튜브의 양 끝단을 원터치 커넥터로 각각 연결하여 보일러를 통한 고온의 증기와 에어 컴프레셔를 통한 냉각 공기를 실험 조건에 따라 1회씩 각각 교대하여 주입한 후, 치구에서 벤딩 성형된 플라스틱 튜브를 꺼낸다.

보일러를 통한 고온의 증기는 열성형을 위하여 압력과 시간에 변수를 두어 선주입하며, 에어 컴프레셔를 통한 압축 공기는 냉각 작용을 위함으로 그 압력과 시간을 일정하게 두어 후주입한다.

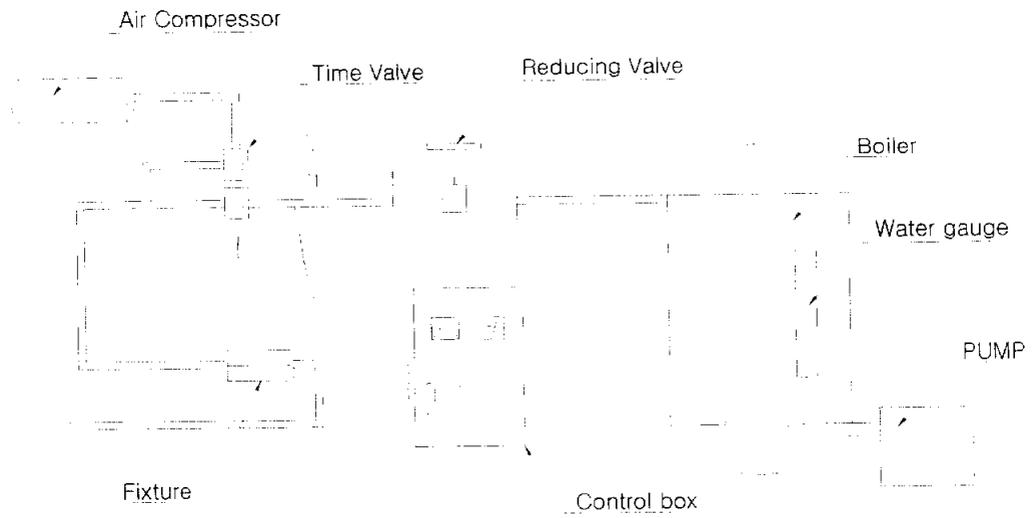


Fig. 7 Schematic diagram of the bending system using steam method

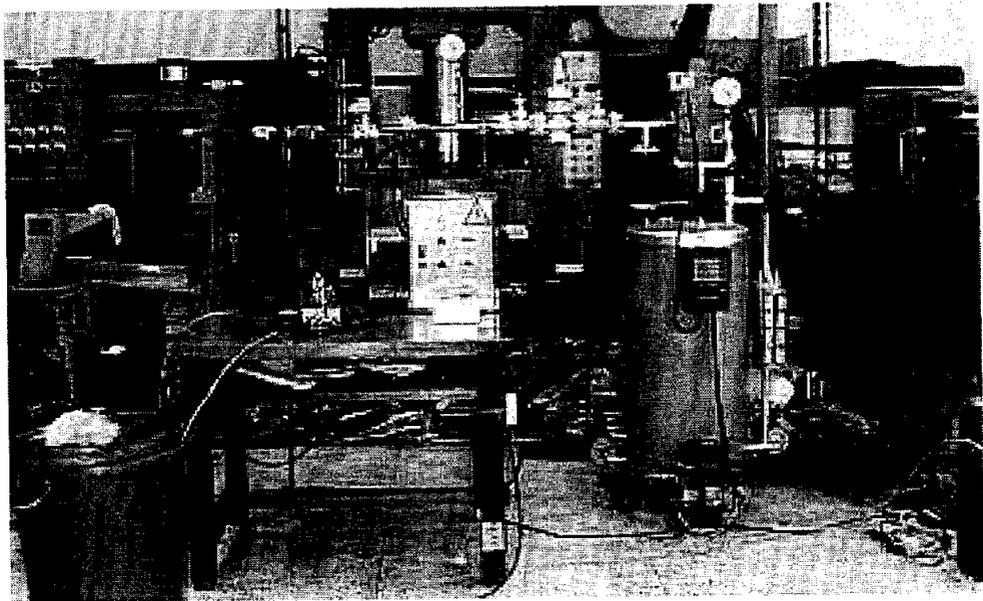


Photo 4 Bending system using steam method

Photo 5는 실험 치구를 나타낸 것으로, 치구 형상은 생산 현장에서 적용되고 있는 벤딩 각도와 벤딩 반경을 기준으로 하여 제작하였다. 알루미늄을 재료로 하여 만들었으며, 총 8개의 세트로 구성하였다.

벤딩 반경은 R20mm, R15mm 두 종류가 현재 주류를 이루고 있는 것으로 조사되어, 반경에 차이를 두고 R20mm, R15mm로 분류하여 각각 60°, 90°, 120°, 150°의 벤딩 각도를 주었다.

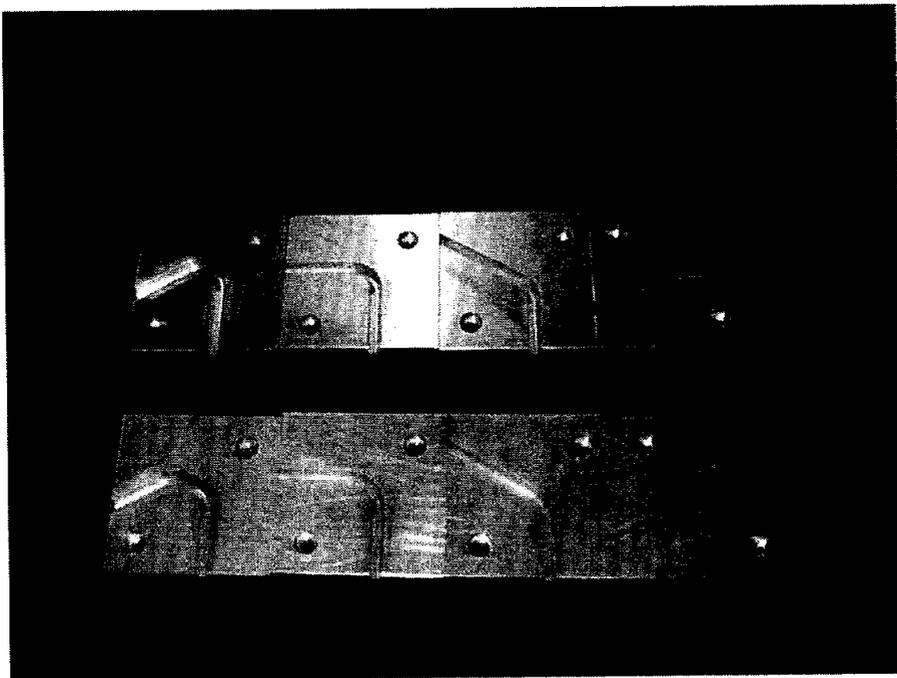


Photo 5 Fixtures of the experiment (R-15mm, R-20mm)

Photo 6은 시편인 PA12 플라스틱 튜브를 나타내는 것으로, 형상은 외경 $\text{Ø}8\text{mm}$, 내경 $\text{Ø}6\text{mm}$ 이며, 230mm의 길이로 절단한 후, 사진에서 보이듯이 재료사이의 스프링을 재료 내부에 삽입 하였다. 이는 실험에 사용된 PA12 플라스틱 튜브가 60°와 90° 벤딩시 꺾이는 현상을 보이기 때문에, 이를 방

지하고자 내부에 스프링을 넣어 시편이 형상을 유지하도록 가이드 하였다.

Photo 7은 시편을 치구에 장착한 것을 나타내고, Photo 8은 치구에 장착된 시편 양 끝단부에 윈터치 커넥터를 연결하여 고온의 증기가 통과하고 있는 것을 나타내었다.

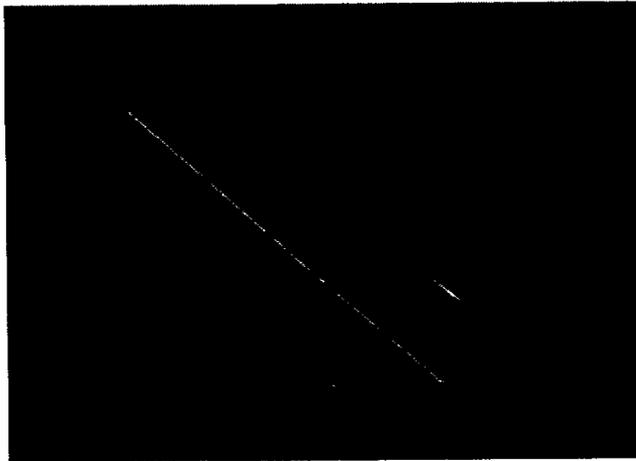


Photo 6 Specimens of the experiment

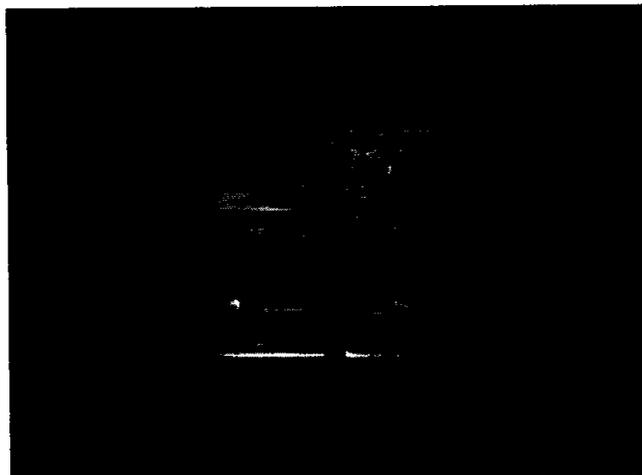


Photo 7 Fixture and specimen
of the experiment

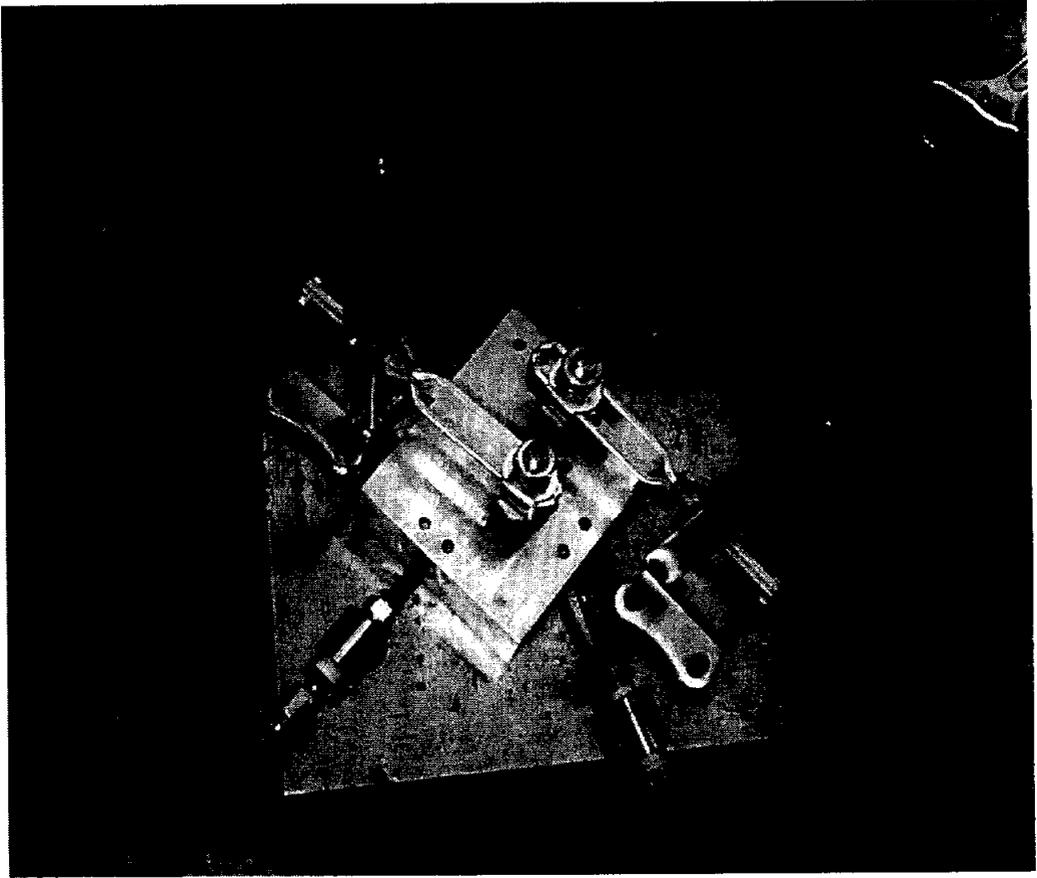


Photo 8 Bending experiment of the PA12 plastic tube

5.2 실험조건

Table 8은 PA12 플라스틱 튜브 벤딩의 실험 조건표를 나타낸다.

냉각 시간은 30sec, 압력은 5kgf/cm² 그리고 온도는 10℃로 일정하게 하였고, 가열 시간 및 압력을 주된 변수로 두었다. 가열 시간은 5sec 간격으로 4단계로 나누고, 압력에서는 포화증기압을 기준으로 증기 압력 4단계로 나누었다.

벤딩 반경은 R15mm와 R20mm로 하였고, 벤딩 각도는 60° , 90° , 120° , 150° 로 하여, 총 128 조건으로 각 조건당 3회씩 반복 실험하여 그 평균값을 도출하였다.

Table 8 Conditions of the experiment

Constant conditions	Cooling time (sec)	30			
	Cooling pressure (kg _f /cm ²)	5			
	Cooling temp. (°C)	10			
	Tube diameter (mm)	Ø8			
Variable conditions	Heating time (sec)	10	15	20	25
	Heating pressure (kg _f /cm ²)	4	5	6	7
	Steam temp. (°C)	142.92	151.11	158.08	164.17
	Bending radius (mm)	R15		R20	
	Bending angle (°)	60	90	120	150

제 6 장 결과 및 고찰

6.1 해석 결과

Fig. 8에서 11까지는 단계별 응력 분포를 나타내고 있다. 상용 비선형 유한요소해석 소프트웨어인 MARC™를 이용하여 순수벤딩(pure bending), 가열(heating), 냉각(cooling) 그리고 스프링백(spring back) 순으로 해석을 수행하였다.

순수벤딩 공정에서 PA12 플라스틱 튜브의 내부에 굽힘 응력이 최고로 나타나며, 가열 공정에서 열을 가하면 열이완으로 재료가 연화되면서 내부에 발생한 굽힘 응력이 급격히 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 PA12 플라스틱 튜브 벤딩에서 인장과 압축을 가장 크게 받는 부분으로 예상되는 node를 선택하여 단계별 응력 분포를 선도로 나타낸 것이다.

해석 결과는 총 199 스텝으로 이루어졌으며, 5 스텝씩 저장하여 나타내었다. 스텝 1에서 50까지는 튜브를 90° 로 순수벤딩 시켰을 때의 응력 분포 곡선을 나타내며, 스텝 81까지는 지그(jig)에 튜브를 고정시키는 단계에서의 응력 분포를 나타낸다. 벤딩시킨 튜브를 지그에 고정시키면서 내부 응력이 작아지는 양상을 보이며, 지그에 고정시킨 뒤의 응력은 일정하게 나타남을 알 수 있다.

그리고, 스텝이 82에서 103까지의 다음 단계인 가열 공정에서는 재료에 고온의 스팀을 이용하여 열을 가하는 부분으로, 내부에 발생한 응력이 더욱 작아지는 양상을 볼 수 있다. 이는 순수벤딩에서 발생하였던 내부 응력이 가열 공정을 거치면서 열이완으로 인하여 재료가 연화점까지 도달하였다고 사료된다.

냉각 공정은 스텝 104에서 142로 열이완된 재료를 압축공기를 이용해 냉각 시킴으로서 잔류 응력이 발생하고, 이 잔류 응력으로 인하여 내부 응력이 다소 증가한 것을 알 수 있다.

지그를 제거하는 스프링백 공정에서는 벤딩된 튜브가 스프링백 현상을 보 이면서 잔류 응력으로 인한 내부 응력이 최저치로 작아지면서 미소의 잔류 응력만 남게 되는 것을 알 수 있다.

해석 종료후의 90° 벤딩한 PA12 플라스틱 튜브의 스프링백 크기는 25° ~ 30° 가량 나타난 115° ~ 120° 의 튜브 벤딩 형상을 나타내었다.

튜브 벤딩 해석에서 순수벤딩시 발생한 내부 응력의 약 70% 정도가 가열 공정에서 재료의 열이완으로 인하여 제거됨을 알 수 있으며, 스프링백이 발생한 후 초기 발생한 응력의 약 30% 정도가 잔류 응력으로 남게 되는 것을 알 수 있었다.

또한, 튜브 벤딩 해석에서 나타난 스프링백의 크기와 실험에서 나타난 스프링백 크기의 비교시 그 크기가 유사하게 나타났다.

해석 결과에서 나타난 잔류 응력과 벤딩 실험 후 나타난 스프링백 크기의 비교시 스프링백이 발생하는 크기는 잔류 응력의 크기와 관계되며, 이는 비례 관계로 나타난다고 사료되어지며, 비례 관계에 있어 구체적인 내용은 벤딩 실험 결과에서 서술하겠다.

아울러, 스텝 방식을 이용한 PA12 플라스틱 튜브 벤딩시 공정별 발생하는 응력의 분포 및 변형에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 병행하여 각 공정에서 나타나는 애로사항을 사전에 예측하여 수정 및 보완하는 것이 필요하다고 여겨진다.

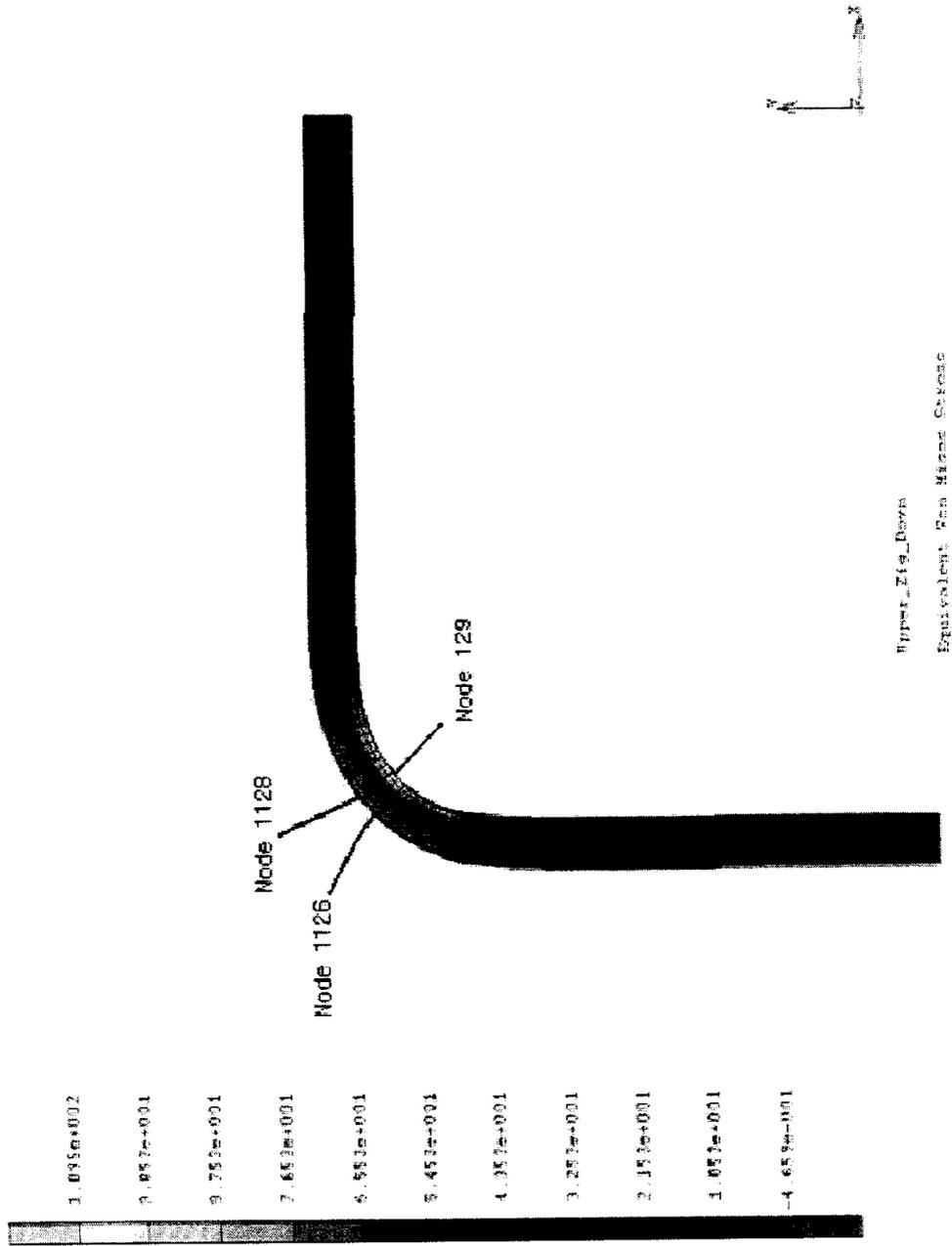


Fig. 8 Stress distribution on pure bending process

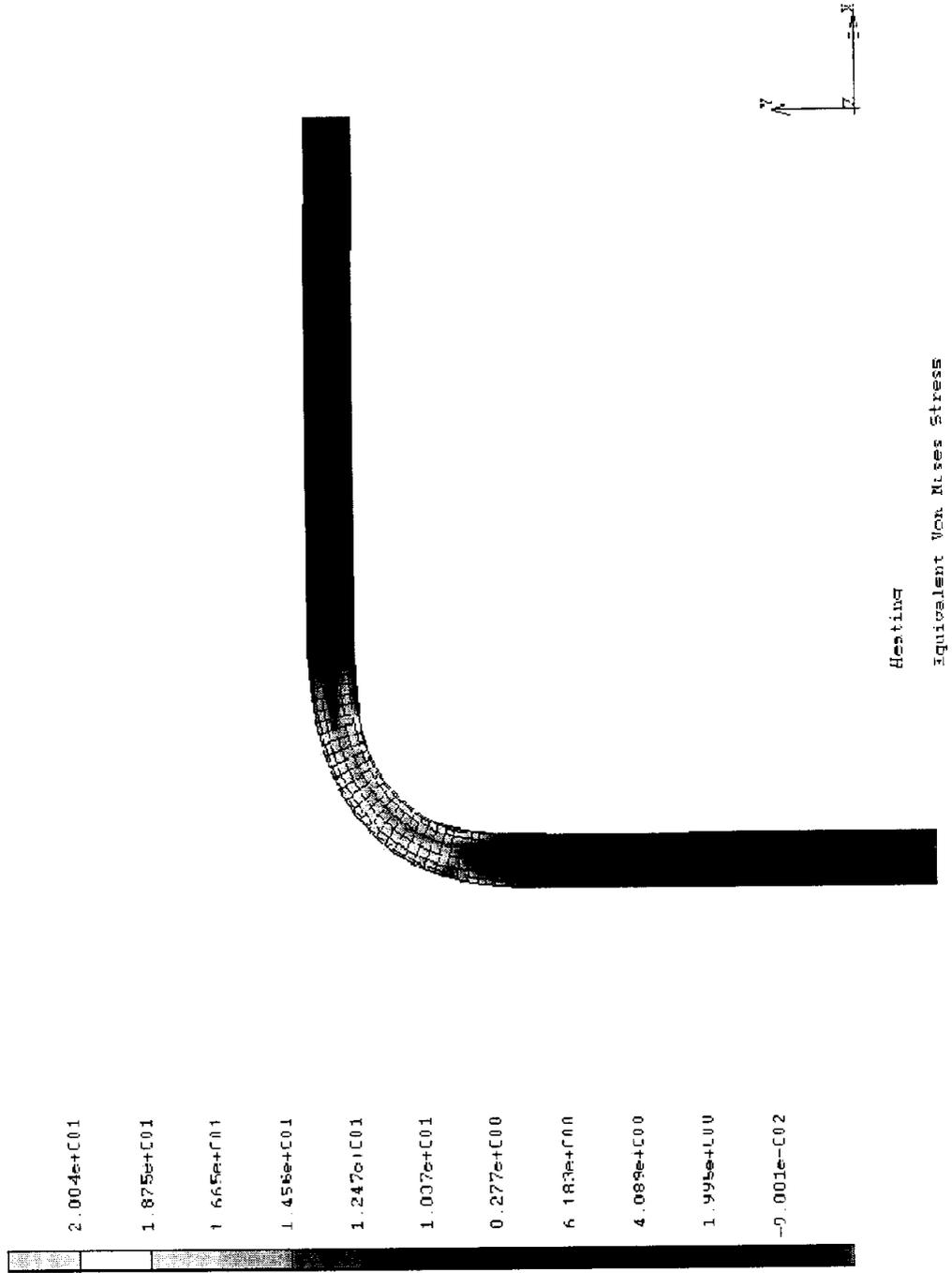


Fig. 9 Stress distribution on heating process

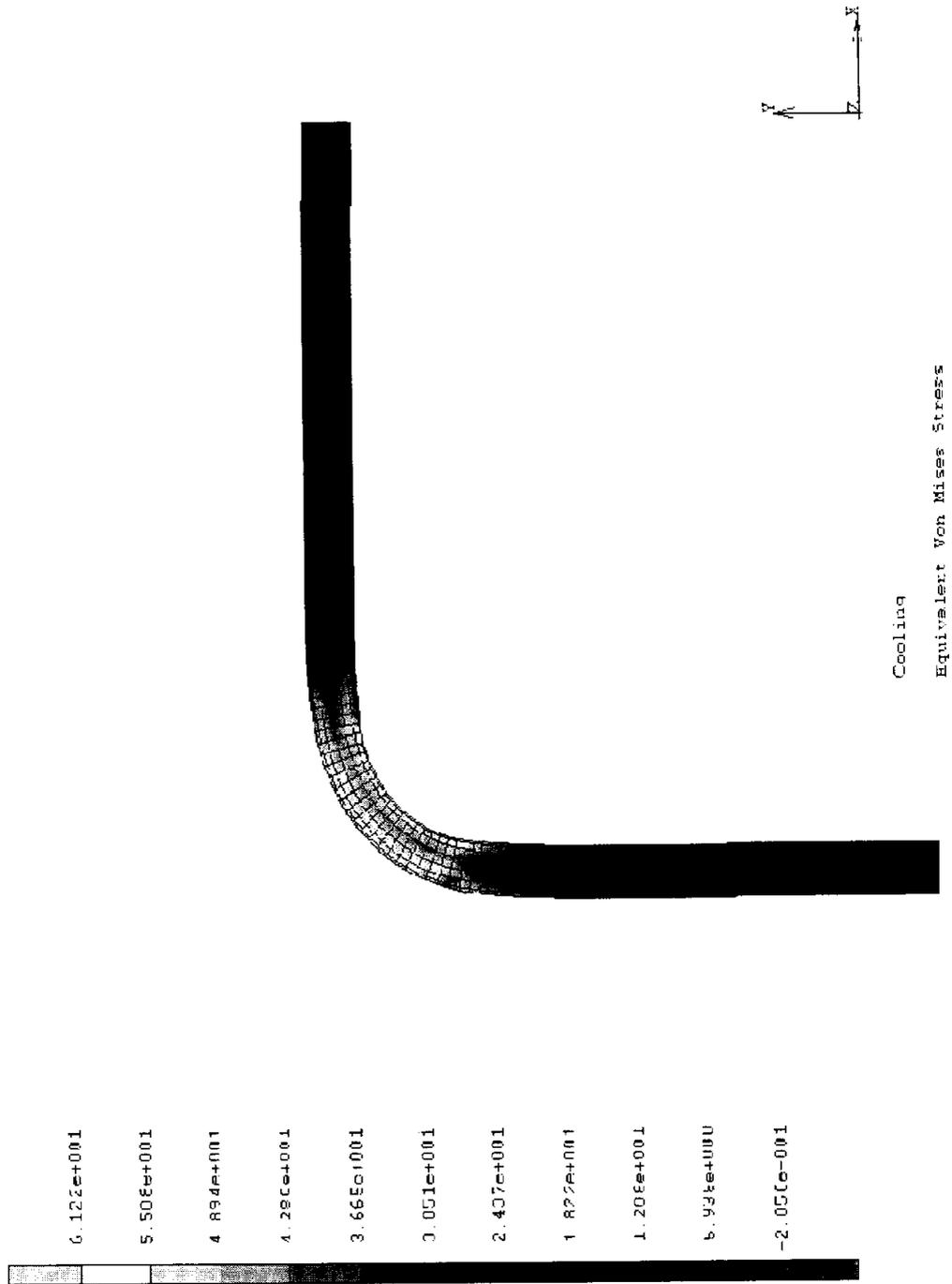


Fig. 10 Stress distribution on cooling process

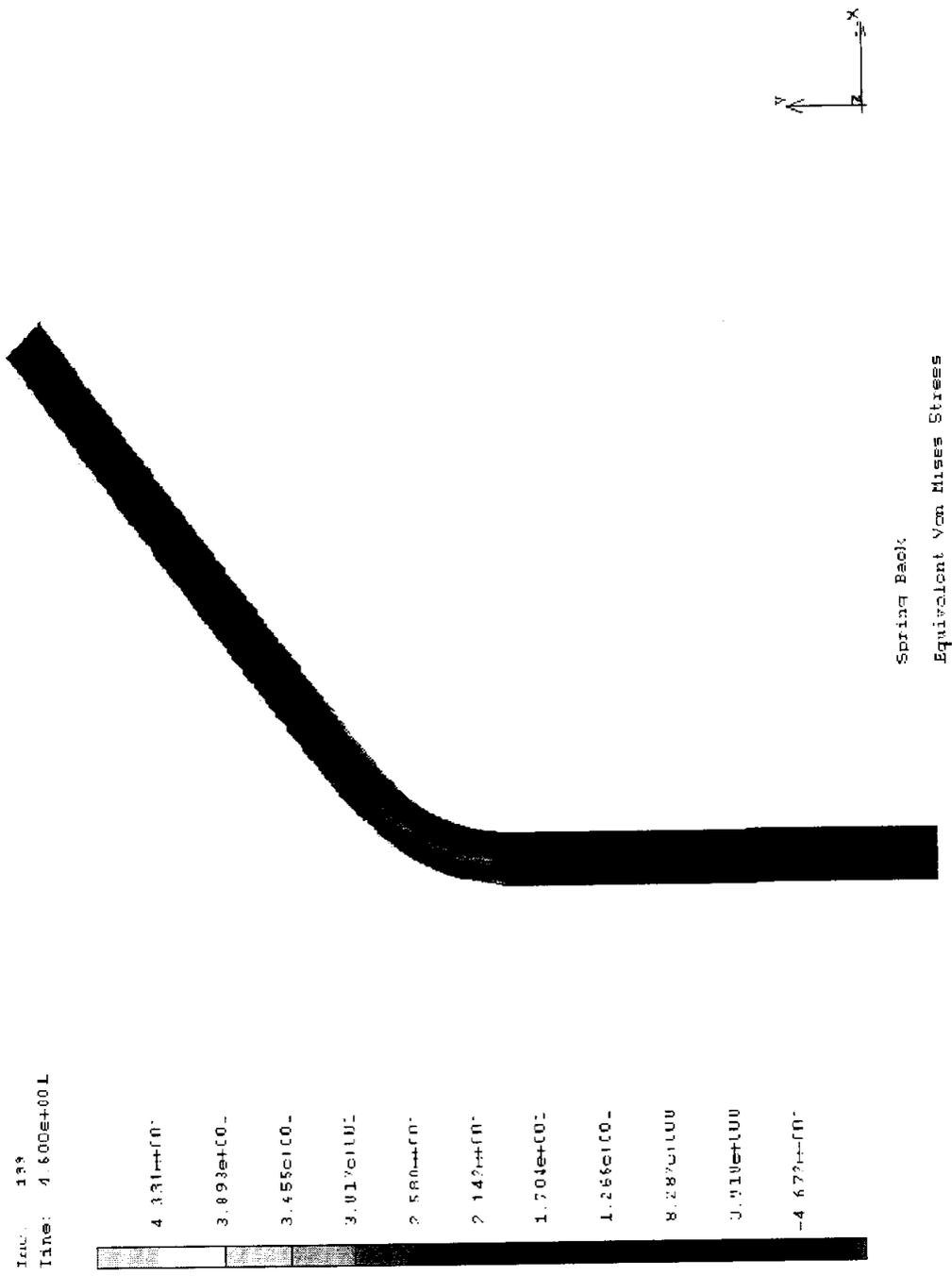


Fig. 11 Stress distribution on spring back process

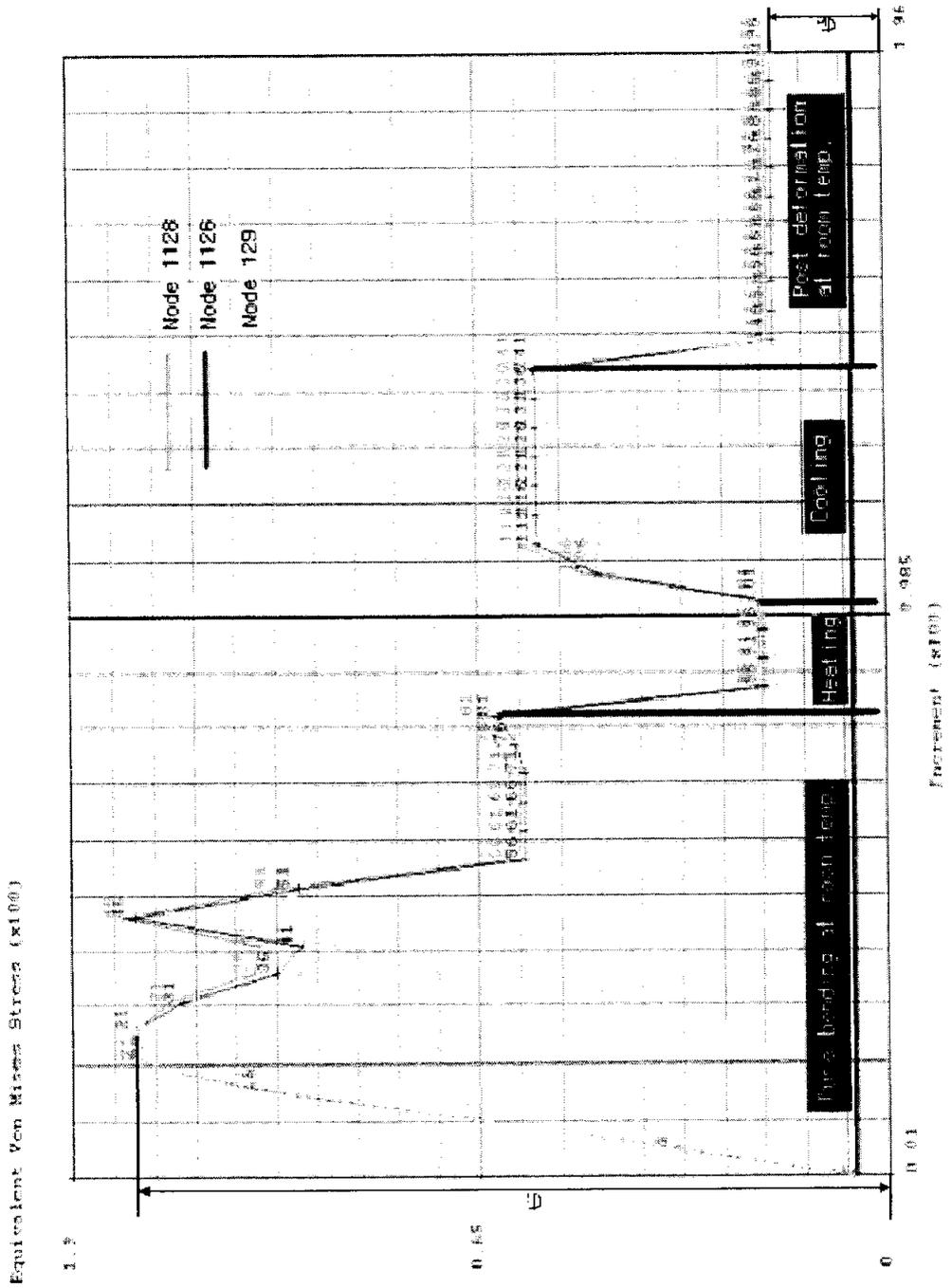


Fig. 12 Stress distribution curve of nodes

6.2 실험 결과

Photo 9는 PA12 플라스틱 튜브를 스팀 방식을 이용하여 벤딩 실험한 제품을 나타낸다.

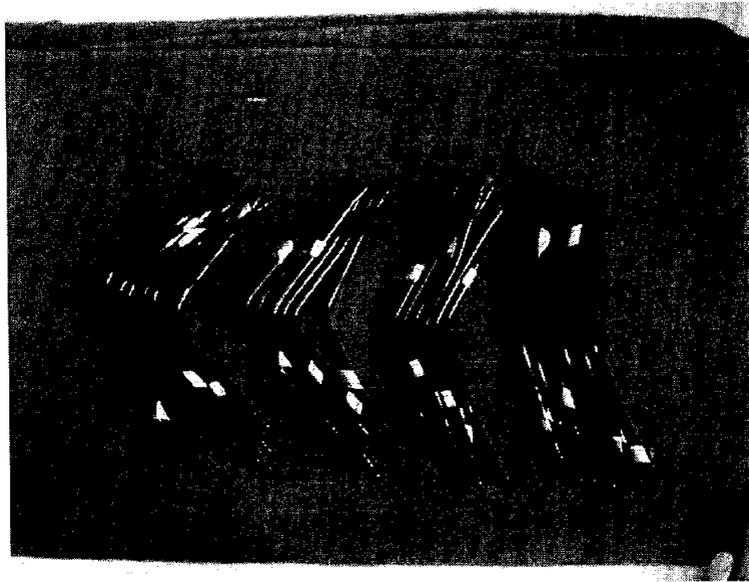


Photo 9 Bent PA12 plastic tubes using steam method

6.2.1 벤딩반경 R20mm의 각도별 가열 시간에 따른 스프링백 크기

R20mm의 가열 시간에 따른 스프링백의 크기는 Fig. 13에서 16과 같이 나타났다. 모든 그래프는 가열 압력과 가열 시간을 실험 조건에서 변수로 두었으며, 가열 압력이 낮을수록 스프링백 크기가 크게 나타났으며, 가열 시간이 길수록 스프링백의 크기가 줄어들었다. 특히, 20sec 이후 그 줄어듦이

둔화되었다.

스프링백의 크기는 가열 시간에 비해 가열 압력에 의한 그 크기 변화가 현저하게 나타났다. 이는 플라스틱 튜브 벤딩시 스팀의 가열 압력이 가열 시간보다 튜브 벤딩에 있어서 더 중요한 변수임을 알 수 있다.

R20mm에선 압력의 범위가 $5\text{kgf/cm}^2 \sim 7\text{kgf/cm}^2$ 에서 스프링백이 비슷한 크기를 보이며, 생산 시간 및 효율을 고려할 때 가열 압력이 6kgf/cm^2 , 가열 시간이 20sec 내외가 PA12 플라스틱 튜브 벤딩의 최적 성형 조건이라 사료된다.

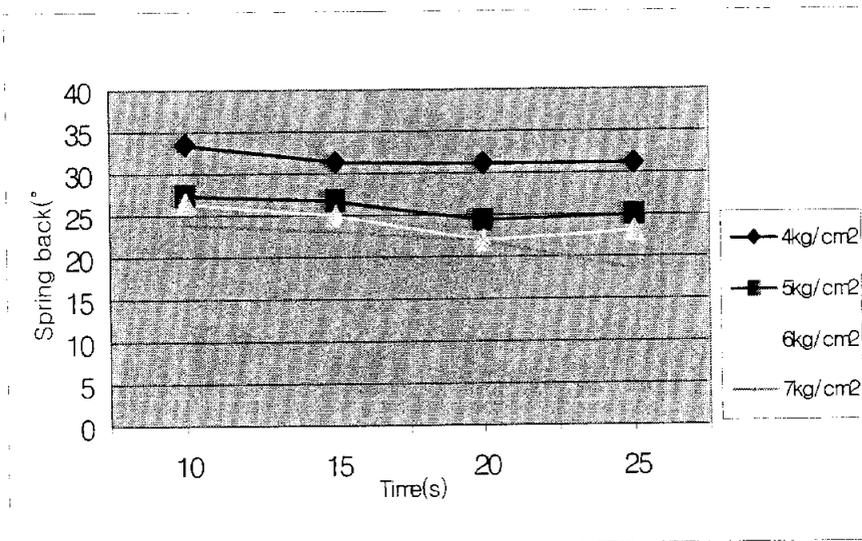


Fig. 13 Relations between heating time and spring back of the PA12 tube (R20-60°)

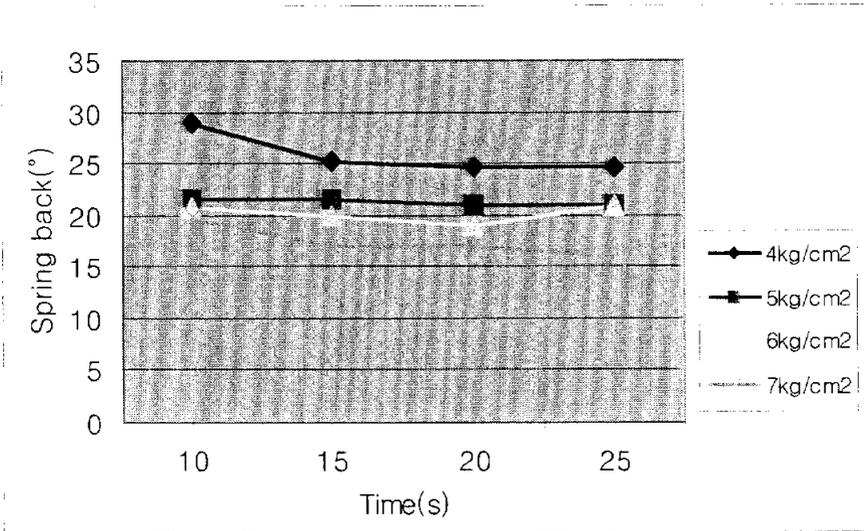


Fig. 14 Relations between heating time and spring back of the PA12 tube (R20-90°)

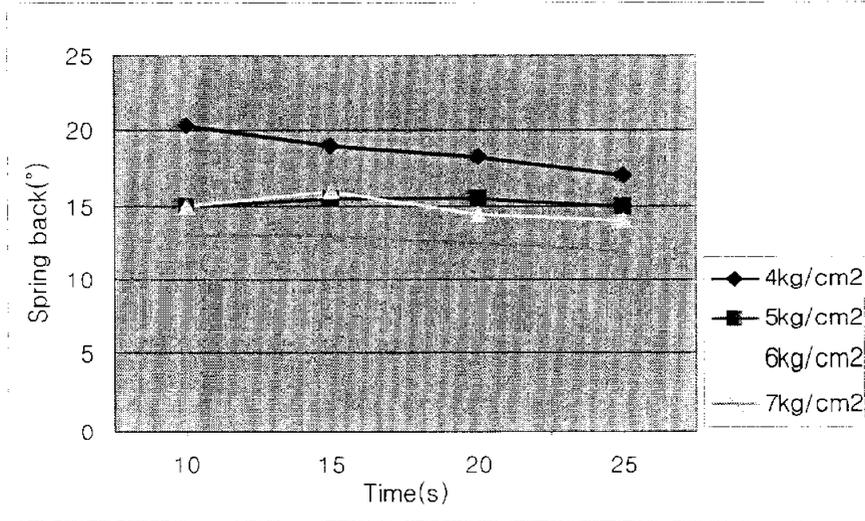


Fig. 15 Relations between heating time and spring back of the PA12 tube (R20-120°)

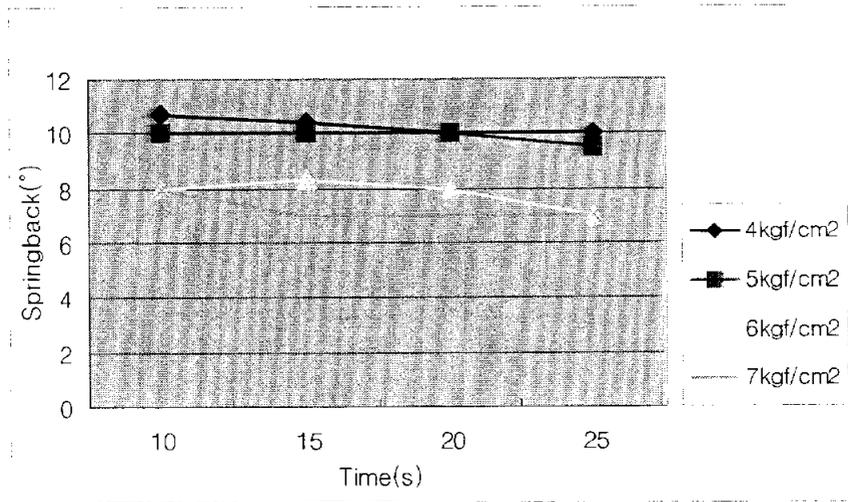


Fig. 16 Relations between heating time and spring back of the PA12 tube (R20-150°)

6.2.2 벤딩반경 R20mm의 각도별 가열 압력에 따른 스프링백 크기

Fig. 17은 가열 압력과 스프링백 크기와의 관계를 나타낸 것이다.

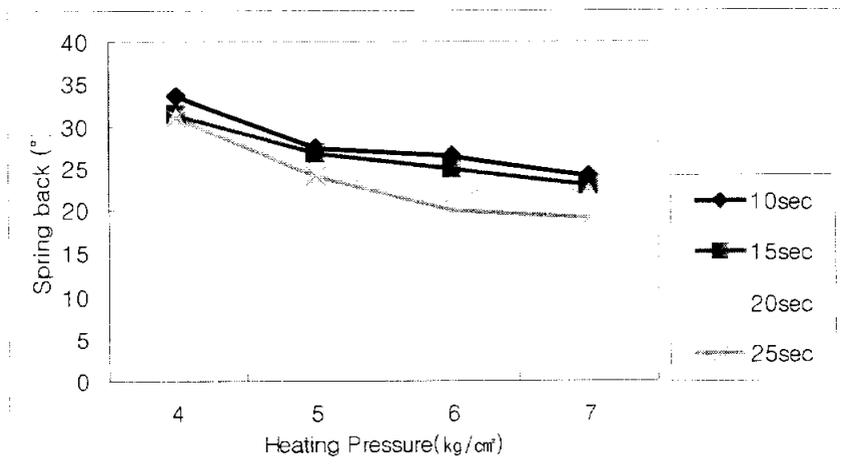


Fig. 17 Relations between heating pressure and spring back of the PA12 tube (R20-60°)

6.2.3 벤딩반경 R15mm의 각도별 가열 시간에 따른 스프링백 크기

R15mm에서의 스프링백 크기는 Fig. 18에서 Fig. 21까지 나타내었으며, R20mm와 같은 경향을 나타내었다. 특히, 압력이 6kgf/cm²에서는 그 기울기의 둔화가 현저하게 나타났다. 압력 6kgf/cm²시 과포화 증기의 온도는 158.08℃이며, 이는 PA12 플라스틱 튜브의 벤딩 반경 R15mm에서의 최적 가열 온도라 사료된다.

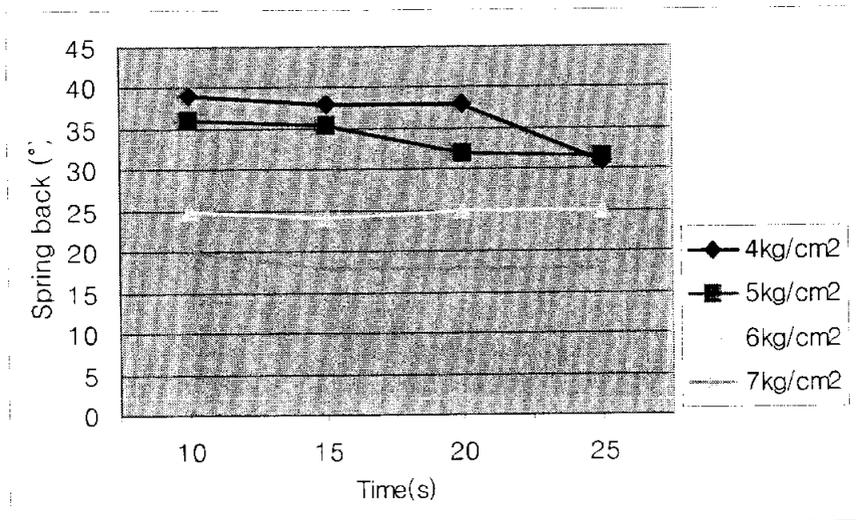


Fig. 18 Relations between heating time and spring back of the PA12 tube (R15-60°)

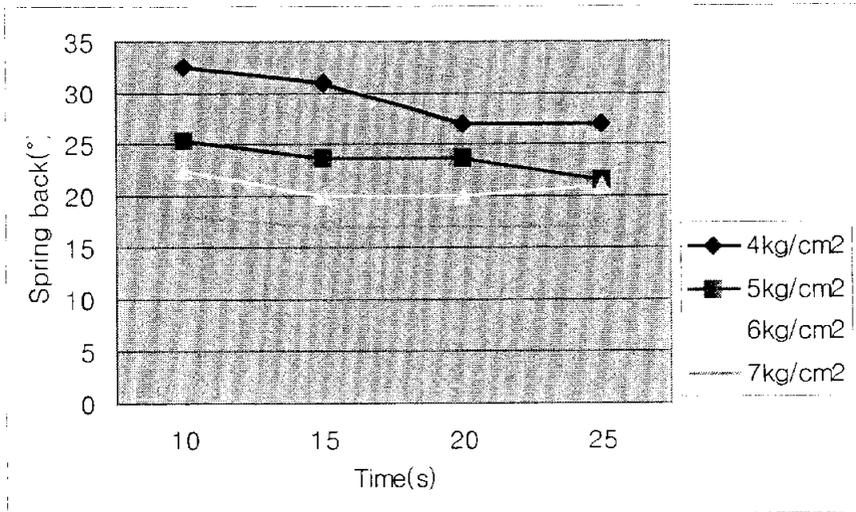


Fig. 19 Relations between heating time and spring back of the PA12 tube (R15-90°)

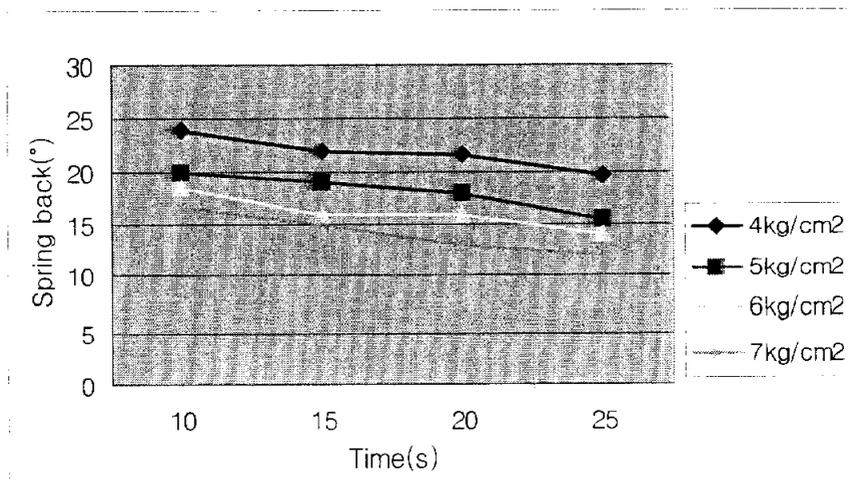


Fig. 20 Relations between heating time and spring back of the PA12 tube (R15-120°)

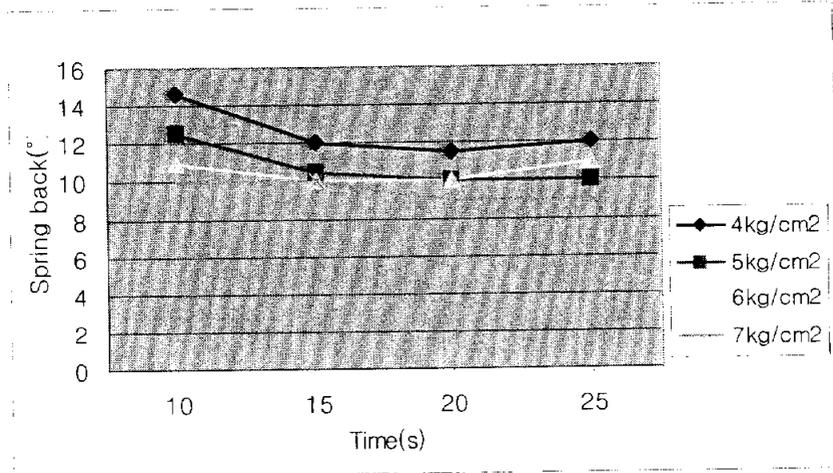


Fig. 21 Relations between heating time and spring back of the PA12 tube (R15-150°)

6.2.4 벤딩반경 R15mm의 각도별 가열 압력에 따른 스프링백 크기

Fig. 22에서는 가열 압력에 따른 스프링백 크기를 나타낸 것이다.

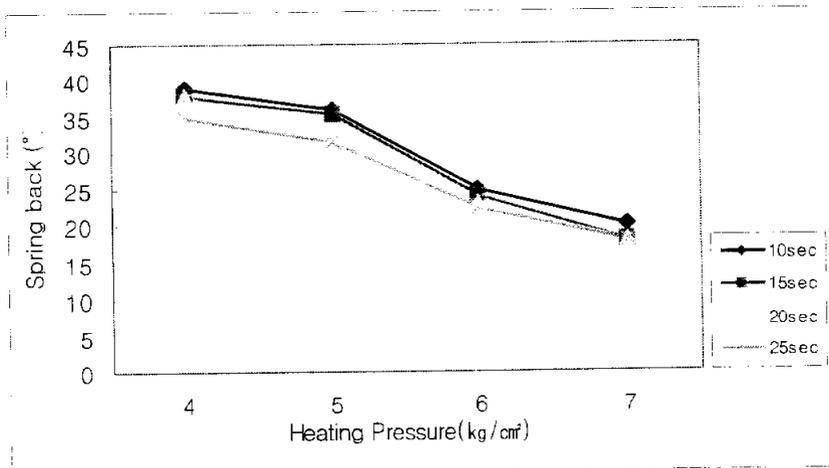


Fig. 22 Relations between heating pressure and spring back of the PA12 tube (R15-60°)

6.2.5 벤딩반경 R15mm와 R20mm의 스프링백 크기 비교

Fig. 23과 24는 벤딩 각도가 60° 와 90° 일 때, R15mm와 R20mm의 스프링백 크기를 비교한 것을 나타내고 있다.

벤딩 각도가 60° 와 90° 의 스프링백의 크기를 각각 평균을 내었을 경우, R15mm의 스프링백 크기는 41.3%, 23.3%로 나타났고, R20mm의 스프링백 크기는 39.4%, 22.4%로 나타났다. 이는 재료 내부의 굽힘 응력이 R15mm에서 더 많이 발생한다는 것을 유추할 수 있다.

또한, 압력 6kgf/cm² 내외에서 R15mm와 R20mm의 스프링백 크기가 비슷하게 나타났는데, 이는 6kgf/cm²에서의 스팀 온도가 PA12 플라스틱 튜브의 내부 굽힘 응력을 벤딩 반경에 관계없이 안정적으로 열이완 시키는 온도라고 사료된다.

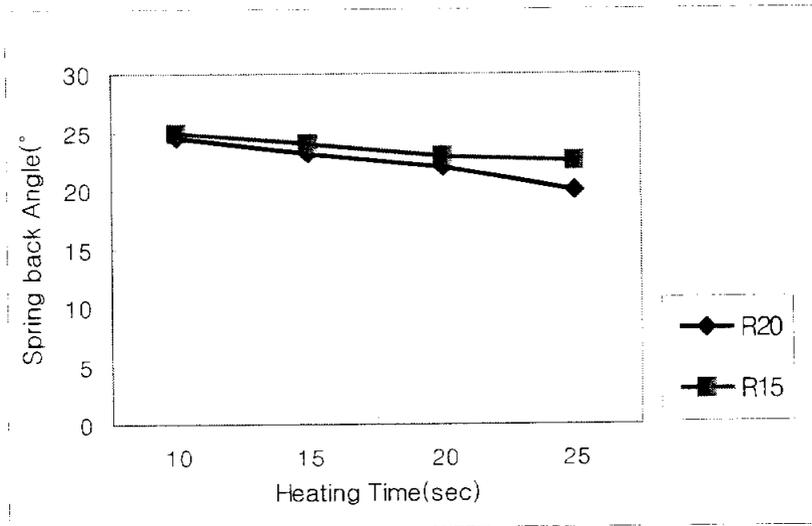


Fig. 23 Comparison of spring back angle between R15mm and R20mm (60°)

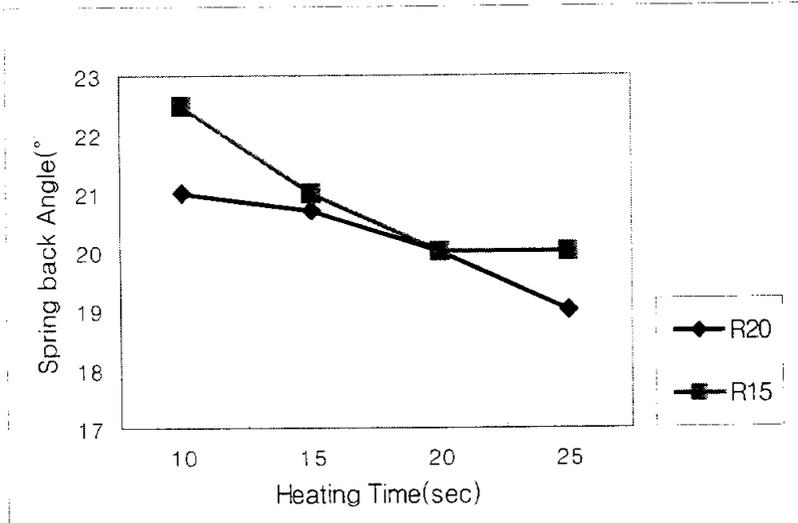


Fig. 24 Comparison of spring back angle between R15mm and R20mm (90°)

6.3 실험 결과와 해석 결과의 관계

벤딩 실험 결과와 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC™를 이용한 해석 결과의 스프링백 크기는 유사하게 나타났다. 벤딩 반경이 R20mm, 벤딩 각도가 90° 일 때 실험 결과의 스프링백 크기는 25° ~ 30° 정도의 스프링백이 발생하여 115° ~ 120° 정도의 형상을 나타내었으며, 약 30% 정도의 스프링백 현상이 일어났다. 또한 벤딩 각도가 30° 씩 증가할 때 스프링백의 크기는 반으로 감소하였다.

해석 결과에서 나타난 스프링백의 크기도 약 120° 정도로 나타났으며, Fig. 12에서 알 수 있듯이 잔류 응력이 초기 발생 응력의 약 30% 정도가 나타남을 알 수 있었다.

그러므로 초기 응력을 σ_i , 잔류 응력을 σ_r 그리고 스프링백 크기를 S_b 라고 나타내면, 잔류 응력, 초기 응력, 벤딩 각도 그리고 스프링백의 크기에 대한 관계는 다음과 같이 식(21)에서 식(23)까지로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_r = 0.3 \sigma_i \quad \text{-----} \quad (21)$$

$$\theta_b + 30 \propto 0.5 S_b \quad \text{-----} \quad (22)$$

$$\sigma_r \propto S_b \quad \text{-----} \quad (23)$$

여기에서, θ_b 는 벤딩 각도를 나타낸다.

제 7 장 결 론

본 연구에서는 자동차 연료 계통에 사용되는 PA12 플라스틱 튜브의 스팀을 이용한 벤딩 공정시 발생하는 응력 및 스프링백 크기를 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통합으로서, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 튜브 벤딩 해석에서 초기 발생 응력의 약 70% 정도가 가열 공정후 재료의 열이완으로 제거되었으며, 나머지 30% 정도는 잔류 응력으로 남아 스프링백 크기 및 후변형에 영향을 미친다.
2. 벤딩 반경 R15mm와 R20mm의 스프링백 크기는 R15mm가 R20mm보다 약 5% 정도 크게 나타났으며, 스프링백 크기는 가열 시간보다는 가열 압력(온도) 의존도가 크게 나타났다.
3. 벤딩 반경 R15mm와 R20mm에 대한 스프링백 크기의 비교시 가열 압력 6kgf/cm^2 에서 비슷한 크기로 나타났으며, PA12 플라스틱 튜브의 최적 벤딩 성형 조건은 가열 압력 6kgf/cm^2 , 가열 시간 20sec 내외임을 알 수 있었고, 가열 압력 8kgf/cm^2 에서 PA12 플라스틱 튜브의 파열이 발생하여, 이 압력은 벤딩시 성형 한계 조건으로 사료된다.
4. 튜브 벤딩 해석 결과와 실험 결과의 관계는 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있었다.

(1) 해석 결과에서 잔류 응력(σ_r)은 초기 발생 응력(σ_i)의 약 30%로 나타

났다.

$$\sigma_r = 0.3 \sigma_i \text{ ----- (I)}$$

- (2) 실험 결과에서 벤딩 각도(θ_b)가 30° 씩 증가할 때마다 스프링백의 크기는 0.5배씩 증가하는 것으로 나타났다.

$$\theta_b + 30 \propto 0.5 S_b \text{ ----- (II)}$$

- (3) 해석 결과와 실험 결과에서 잔류 응력과 스프링백의 크기(S_b)는 비례 관계에 있다고 사료된다.

$$\sigma_r \propto S_b \text{ ----- (III)}$$

참 고 문 헌

1. A. C. Ugural, S. K. Fenster, "Advanced Strength and Applied Elasticity", Prentice-Hall PTR, 1995.
2. 임상전, "材料力學", 문운당, 1997.
3. Z. Hu, "Elasto-plastic solutions for spring-back angle of pipe bending using local induction heating", Journal of Materials Processing Technology 102 (2000) pp.103~108, 1998.
4. MSCsoftware "Mentat command reference ver. 3.1", Marc Analysis Research Corporation, U. S. A., 1997.
5. MSCsoftware, "MSC. Marc 2000 User's guide", MSC.Software Corporation, U. S. A., 2000.
6. Daicel-degussa, "Synopsis of Polyamide 12 Grades and Properties", Daicel-degussa Ltd, Germany.
7. 박정기, 박오욱, "고분자 재료공학", 시그마프레스, 1998.
8. T. X. Yu, L. C. Zhang, "Plastic bending", World Scientific, 1996.
9. H.A. Al-Qureshi, "Elastic-plastic analysis of tube bending", International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) pp. 87~104, 1998.
10. 박삼진, 류갑상, 최두선, 신보성, "파이프 벤딩 제어 소프트웨어에 관한 연구(I)", 과학기술처 UCN417-1689 · C, 1991.
11. S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, "Theory of elasticity", McGraw-Hill

book company, 1987.

12. 김대식, 문찬용, 최형태, 정영득, "A study on the PA12 tube spring back", 한국정밀공학회 2001 추계학술대회 논문집, pp. 300 ~ 304.
13. 양재봉, 전병희, 오수익, "Tube Bending Analysis for Hydroforming Process", 한국소성가공학회 2000추계학술대회논문집, pp. 249 ~ 256. 2000.

후 기

본 연구에 많은 도움을 주신 (주)부국산업에 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

감 사 의 글

본 논문이 완성되기까지 연구활동을 지원해 주시고, 많은 가르침을 주신 한규택 지도 교수님께 먼저 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 끊임없는 정열과 추진력으로 아낌없는 지도와 편달을 해주시며, 친 자식처럼 보살펴 주신 존경하는 정영득 교수님께 은혜의 사상에 머리숙여 감사를 드리며, 바쁘신 연구활동중에도 본 논문의 심사를 맡아 많은 조언과 충고를 해주신 오명석 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 아울러 부족한 제게 많은 가르침을 주신 기계공학부 교수님들께 감사의 말씀을 드립니다.

본 논문에 사용된 많은 자료와 따뜻한 배려를 아끼지 않으셨던 (주)부국산업에 오현옥 과장님, 최형태기사님께 고마움을 전하며, 처절한 제게 힘과 용기를 북돋아 주셨던 경인고속공업사 이영제 사장님께 감사의 마음을 전합니다. 또한 함께 업무를 맡으며 도와준 성력이형과 제게 충고를 아끼지 않으셨던 박태원 선생님께 고마움을 전합니다.

석사과정동안 동고동락을 함께 하며, 서로에게 힘이 되어준 영석, 정식이형 그리고 원석씨 등 전산응용성형 및 금형가공 실원들에게 고마움을 전하며, 선배들 잔심부름에 정신없었던 소원이, 오빠 걱정으로 정신없었던 현정이와 실험을 함께 도와준 정남, 기진, 지한, 창훈씨 그리고 동아리 *icams* 및 *proid* 멤버들에게도 고마움을 전합니다. 때로는 멀리서 때로는 가까운 곳에서 항상 힘이 되어준 친구 상목이와 후배 경찬이 그리고 중학교 동창 호진, 용혁, 먼철, 상훈, 진익이에게도 고마움을 전합니다.

오늘의 제가 있기까지 항상 곁에서 지켜주시며 마음 고생하시는 사랑하는 나의 어머니와 동생을 자신보다도 더 아끼며 사랑해주는 형과 누나에게 고마움의 마음을 전합니다.

끝으로 항상 바른 길로 갈 수 있도록 천상에서 지켜주신 아버님과 김일선 교수님 영전에 삼가 이 논문을 바칩니다.

“더욱 열심히 주어진 삶을 살아가는 그런 사람이 되겠습니다.....”

2003年 1月

문 찬 용 拜上