

알루미늄 판재 적용 십자형 액압성형 공정의 해석 및 실험적 고찰

신동우 † · 윤영식** · 김동욱* · 유용문** · 한범석* · 강대건

The Study of Sheet Hydro-Mechanical Forming Process for Aluminum Alloy Sheets by Experiment and Finite Element Analysis

Dongwoo Shin, Dongok Kim, Yongmun Ryu, Beomsuck Han, Youngsik Yoon

Key Words: Hydromechanical Forming, Finite Element Analysis

Abstract

Hydro-mechanical forming process has numerous advantages compared to those of a conventional deep drawing process such as an excellent surface quality and low costs of dies. In fact, Hydro-mechanical forming is a desirable forming process for producing complex parts in automotive body components, and it is an excellent candidate for the forming process of aluminum panels. In this research, Hydro-mechanical forming process with a cross shape punch has been studied for Al-Si-Mg alloy sheets. Finite element analysis by LS-Dyna has predicted the deep drawing depth of the aluminum sheets, and the experiment has confirmed that result. Put Abstract text here.

1. 서 론

† 신동우, 건양대학교

E-mail : zeroa1@nate.com

TEL : (041)730-5282 FAX : (401)736-0205

* 김동욱, 자동차 부품 연구원

E-mail : dokim@katech.re.kr

TEL : (041)559-3134 FAX : (041)559-3288

* 한범석, 자동차 부품 연구원

E-mail : bshan@katech.re.kr

TEL : (041)559-3134 FAX : (041)559-3288

** 윤영식, 건양대학교

E-mail : ysyoon@konyang.ac.kr

TEL : (041)730-5282 FAX : (401)736-0205

** 유용문, 자동차 부품 연구원

E-mail : ymryu@katech.re.kr

TEL : (041)559-3134 FAX : (041)559-3288

강대건, 탈리스테크

E-mail : dkkang@tallistech.com

TEL : (041)559-3134 FAX : (041)559-3288

최근 자동차 설계는 차량의 성능향상과 더불어 운전자 및 승객의 안전성과 편의성 등의 다양한 요구들을 만족시키는 방향으로 행해지고 있다. 하지만 차량의 지능화 및 고안전화, 하이브리드 및 전기자동차 등의 개발로 인한 부품들의 추가로 차량의 무게를 증가시키는 요인이 되어왔다. 따라서 차량의 고효율화 및 차체 경량화는 전 세계적인 온난화 문제와 이로 인한 각종 환경규제를 만족시키기 위해 중요한 연구분야로 떠오르고 있다.

이와 같이 자동차 시장에 있어 환경적 문제는 여러 연구활동 중 차체 경량화를 위한 연구들을 활발하게 하였으며 이에 따라 기존 스틸 차체를 알루미늄 차체로 대체하고 있는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

액압성형 공정은 복잡한 형상의 자동차 부품을 만들 때 여러 형태의 프레스로 따로 가공한

후 용접하지 않고, 판재에 강한 액압을 주어 가공하는 방법이다. 이 공법은 형태가 복잡하더라도 액압이 고르게 작용하기 때문에 두께와 강도가 균일한 자동차 부품을 생산할 수 있는 장점이 있으며 특히 기존 스틸소재보다 성형성이 낮은 알루미늄 판재 부품생산에 적합한 공법이라 할 수 있다.

2. 본 론

2.1 판재 액압성형 공정의 이론

Fig. 1은 판재 액압 성형 공정의 도식적인 모습을 보여주고 있다. 액압 성형될 판재는 금형(die)에 놓여지게 되고 이 판재는 Blank Holding Force에 의해 고정되며 축방향으로 하강하는 Main Ram Punch에 의해 판재가 성형되어진다. 이때 성형되는 판재 하부에서는 액체에 의한 Internal (or Counter) Pressure가 작용하여 판재에 균일한 압력을 가하게 되고 금형 주위에는 O-ring에 의한 Sealing 처리가 되어있어 액압이 새어나가지 않도록 완전 밀폐가 된다. 액압 성형 공정에 있어 Blank Holding Force 및 Internal Pressure는 제어 가능하며 특히 Blank Holding Force의 크기에 따라 판재 성형시 소재 유입량이 결정되므로 본 실험에서는 각 부위별로 독립적으로 제어 가능한 Blank Holding Force 실린더를 사용하였다. 식 (1)과 (2)는 액압성형시 작용하는 힘과 압력간의 관계를 나타내고 있으며 F_{DC} 는 Die Closing Force를 나타내며 F_P 는 펀치힘, P_i 는 Die 내부 압력, A_P 는 판재 접촉부 펀치 면적, F_{BH} 는 Blank Holding Force를 나타낸다.

$$F_{DC} = F_P + F_{BH} \quad (1)$$

$$F_P = P_i \cdot A_P \quad (2)$$

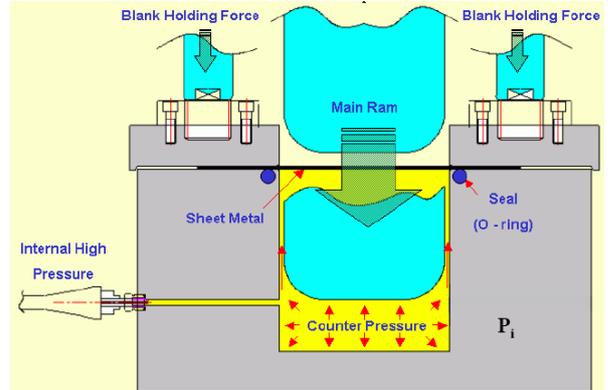


Fig. 1 Principle of Sheet Hydroforming

2.2 판재 액압성형 공정 실험방법

Fig. 2에서 나타나 있듯이 Punch는 십자형 형상을 가지고 있으며 S45C로 제작이 되었다. 각 모서리부의 곡률 반경은 3mm(3R)부터 17mm(17R)까지 다양하게 가지고 있고 이는 각 곡률부의 성형 한계를 분석하기 위함이었다.

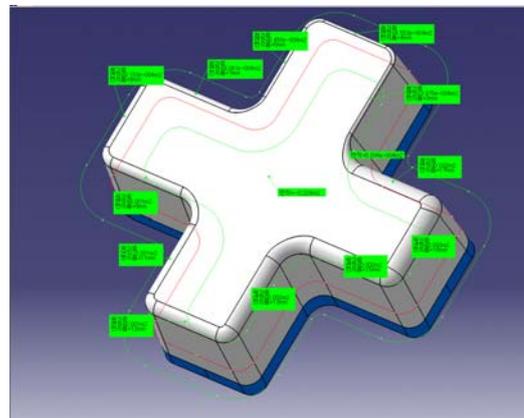


Fig. 2 Punch 형상

Fig. 3은 제작된 금형의 모습을 보여주고 있으며 금형 주위에는 Sealing을 위한 O-ring이 삽입되어 있고 내압을 공급하기 위한 액체는 방청유와 물을 혼합한 액체를 사용하였다.



Fig. 3 금형 형상 사진

Blank Holding Force는 각 부위별로 독립적인 제어를 위해 총 4개의 실린더가 Blank Holding Force를 가해주며 Fig. 4에서 나타내듯이 B1~B4는 각각의 실린더의 압력이 작용하는 위치를 나타내주고 있다. 따라서 액압 성형 중 모서리부의 곡률이 작은 부분은 모서리부 곡률이 큰 부분보다 낮은 Blank Holding Force를 가함으로서 액압 성형시 소재가 좀 더 Feed-in 되도록 하였다. 금형의 대략적인 크기는 가로 세로가 각각 600mm이며 사용된 프레스는 1000톤 유압프레스를 사용하였고 성형에 사용된 소재는 Kobe-Alcoa에서 공급받은 Al-1%Si-0.5Mg 합금 판재를 사용하였다.

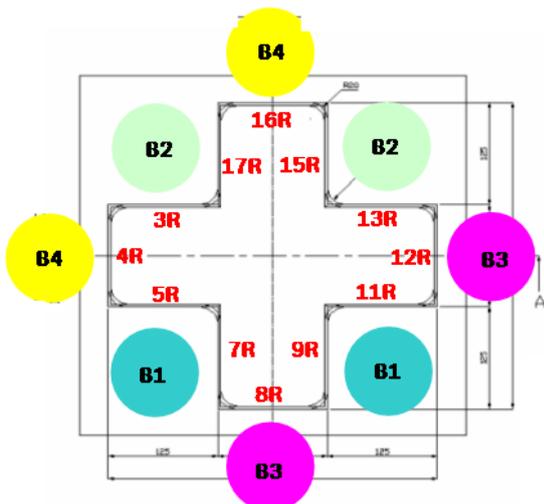


Fig. 4 Blank Holding Force 실린더 위치

3. 해석 및 실험적 고찰

3.1 실험적 고찰

Fig. 5는 Hydroforming 공정에 사용된 내압의 프로그램 Input 값과 실제 Press에서 작용하는 내압값의 그래프를 보여주고 있다. 프로그램상의 내압과 실제 작용하는 내압에 있어 약간의 차이는 있으나 가압력을 담당하는 Intensifier의 기계적인 한계를 고려한다면 대체적으로 일치한다고 볼 수 있다. 내압은 초기 Punch가 판재와 접촉하기 시작하는 시점에서 1.6MPa로 시작하여 완전히 성형이 이루어지는 시점에 4.0MPa까지 증가시켰으며 제품의 Drawing깊이를 결정하는 Punch Stroke는 Punch가 판재에 접촉하는 순간의 높이가 100mm이며 이후 약 75mm까지 하강하도록 프로그램을 작성하였다.

Fig. 6은 Hydroforming 공정 중 1번과 4번 Blank Holding Pressure를 1.5MPa, 2번, 3번 Blank Holding Pressure를 2.5MPa로 고정시킨 후 작업을 하는 그래프를 보여주고 있다.

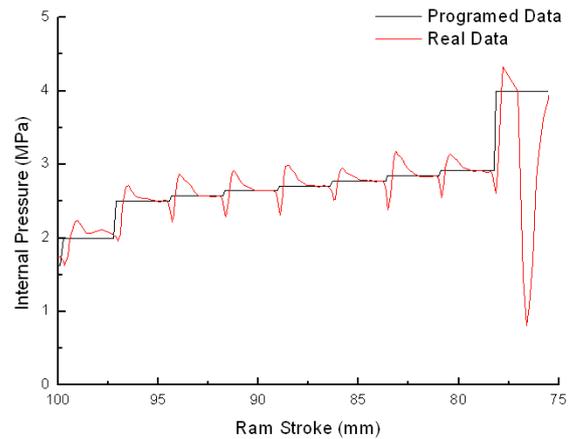


Fig. 5 Internal Pressure 그래프

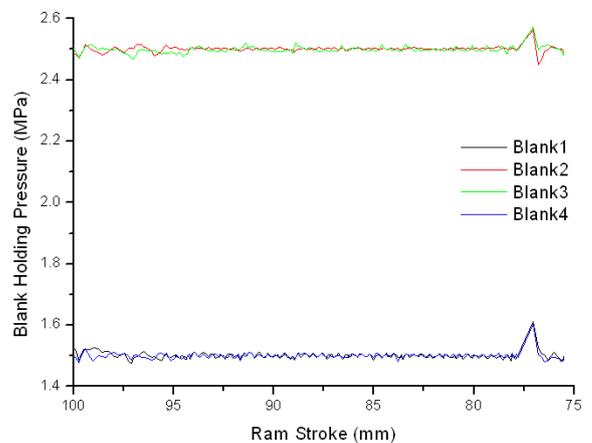


Fig. 6 Blank Holding Pressure 그래프

Fig. 7은 Hydroforming 성형된 판재와 그 파단부 모습을 보여주고 있다. 파단은 가장 예리한 모서리부인 3R부위에서 발생하였으며 Ram Stroke가 25mm를 도달하기 전에 시편에 파단이 발생한 것으로 추측된다. 이는 Fig. 5의 내압 그래프 Ram Stroke 77mm 부위에서 나타나고 있는 내압의 급격한 감소에서 알 수 있으며 파단부의 판재가 안쪽으로 들어간 형상은 내압에 의해 발생된 것으로 예측된다.



Fig. 7 성형된 판재 및 파단부 모습



Fig. 8 성형된 판재 및 파단부 모습

Fig. 8은 1번과 3번 Blank Holding Pressure를 2.5MPa, 2번, 4번 Blank Holding Pressure를 1.5MPa로 고정시킨 후 내압을 1.6MPa에서 4.0MPa까지 증가시키며 제작한 시편이다. 이는 2번과 4번의 Blank Holding Pressure를 감소시킴으로서 가장 예리한 모서리부에서 재료의 Feed-in을

용이하게 하기 위함이었다. Punch Stroke는 22mm로 감소시켰으나 22mm Deep drawing 전에 시편은 3R 모서리부에서 파단이 일어났다. Fig. 9의 내압 그래프에서 알 수 있듯이 Punch Stroke가 95mm정도에 이르렀을 때 급격한 내압의 감소가 나타나는데 이는 소재에 파단이 발생함으로 나타나는 현상으로 추측된다.

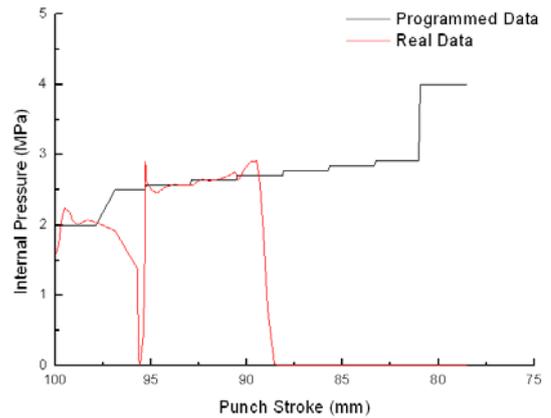


Fig. 9 Internal Pressure 그래프

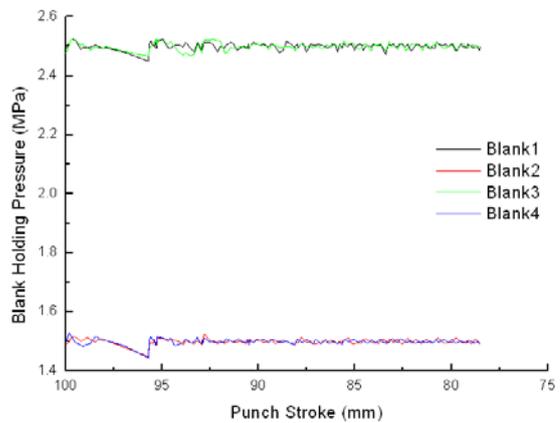


Fig. 10 Blank Holding Pressure 그래프

Fig. 11은 1번과 3번 Blank Holding Pressure를 2.5MPa, 2번, 4번 Blank Holding Pressure를 1.5MPa로 고정시킨 후 내압을 이전 시편들보다 감소시킨 1.2MPa에서 3.5MPa까지 가했으며 제작한 시편이다. 마찬가지로 Punch Stroke는 22mm를 주었는데 Fig. 12에서 보듯이 시편은 3R 모서리부에서 다시 같은 파단이 일어났다. 그러나 내압의 급격한 변화가 나타나지 않았으며 이는 파단이 서서히 일어났고 내압이 빠지지 않을 정도의 적은 파단량 때문이라 추측된다.

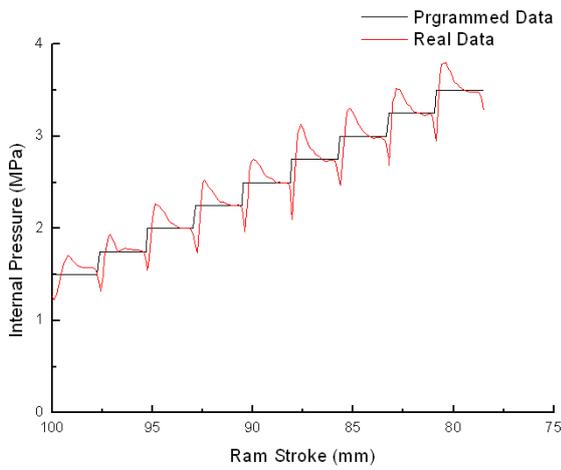


Fig. 11 Internal Pressure 그래프



Fig. 12 Drawing 22mm 일 때 판재



Fig. 13 Drawing 20mm 일 때 판재

Fig. 13은 Internal Pressure 및 Blank Holding Pressure를 이전 시편과 동일하게 유지한 채 Drawing 깊이를 20mm로 낮게 제작한 시편이다. Drawing 깊이를 20mm로 설정하였을 경우 모서리부

에서는 파단이 발생하지 않았다. 이는 액압 성형 공정 중 3R 모서리부에서 발생하는 집중응력이 Drawing 깊이 20mm 이하에서는 판재 파단을 발생 시킬 만큼 크지 않았던 것으로 판단된다.

3.2 해석

3.2.1 전처리 과정

CATIA를 이용하여 디자인된 모델을 ANSYS에서 Import하여 Mesh 생성과 구속조건을 입력하여 Fig. 14와 같은 성형 해석에 필요한 FEM Model을 완성하였다. 모델은 Hydroforming 설계금형을 기반으로 생성하였으며, 전체 적인 형상이 좌우 대칭형이기 때문에 해석상의 시간을 고려하여 1/4만을 디자인 하였다. 이중 실험상에서 가장 관심이 있었던 가장 날카로운 모서리 부분을 모델링 하였다.

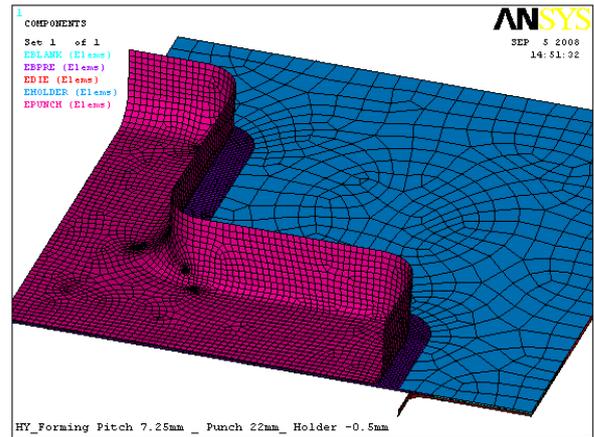


Fig. 14 FEM model

해석 방식은 ETI 축자해석 (Explicit-to-Implicit Sequential Solutions) 방법을 이용하였다. ETI 기법은 LS-DYNA를 통하여 Explicit 해석을 진행한 후 해석을 통해 얻어진 내부 응력값과 형상 값을 ANSYS로 전환하여 Implicit 해석을 진행한다. 이를 통해 스프링 백과 잔류응력을 진행함으로써 성형해석의 정밀도를 더욱 높일 수 있는 방법이다. Hydroforming은 아래의 Table 1를 참조 했을 때 비교적 오랜 시간이 걸리는 해석 문제라는 것을 알 수 있다. 이러한 오랜 시간에 걸쳐서 변형이 발생하는 문제이는 Mass scaling과 Altered tool speeds를 이용하여 계산 시간을 조절할 수 있다.

시뮬레이션에는 사용된 요소는 ANSYS에서 사용되는 판재 요소인 Shell63이며 여기에 사용된

알고리즘은 5개의 적분점을 사용하는 BWC(Belytschko-Wong-Chiang)을 사용하였다.

재질에 대한 모형은 Forming에서 일반적으로 사용되며 Strain을 기반으로 하는 Cowper-Symonds model에 기초로 한 Piecewise Linear Plasticity Model을 사용하였으며 수식으로는 아래와 같이 나타낸다.

$$\sigma_y(\epsilon_{eff}^P, \dot{\epsilon}_{eff}^P) = \sigma_y(\epsilon_{eff}^P) \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_{eff}^P}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \quad (1)$$

Table 1 Typical Values for Metallic Impacts

Impact Velocity (m/s)	Strain Rate (/s)	Effect
	<10 ⁻⁵	Creep
< 50	10 ⁻⁵ -10 ⁻¹	Elastic
50 -1000	10 ⁻¹ -10 ¹	Elastic-Plastic (material strength significant)
1000-3000	10 ⁵ -10 ⁶	Primarily Plastic (pressure equals or exceeds material strength)
3000-12000	10 ⁶ -10 ⁸	Hydrodynamic (pressure many times material strength)
> 12000	> 10 ⁸	Vaporization of colliding solids

ANSYS에서는 단위 설정이 따로 없기 때문에 재질값과 모델의 치수, 해석 시간을 모두 일치 시켜줘야 한다. Al-1%Si-0.5Mg 재질에 대한 stress-strain curve는 아래와 같이 입력 하였으며, 밀도와 탄성 값은 아래의 Table 2와 같이 입력하였다.

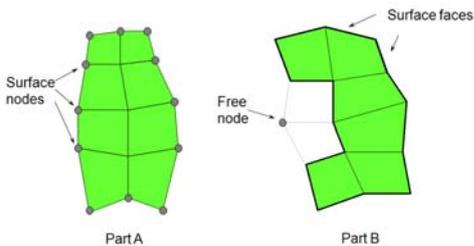


Fig. 15 Failure strain

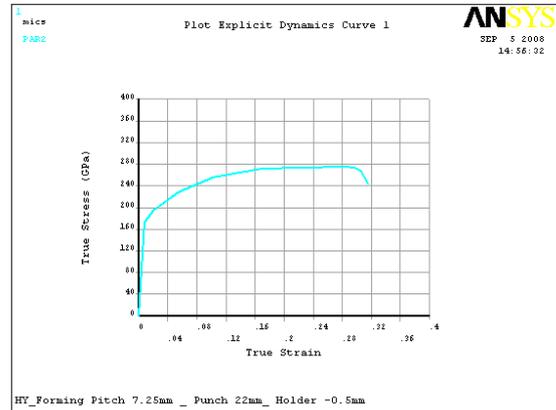


Fig. 16 stress-strain curve of Al-1%Si-0.5Mg

Table 2 material property of Al-1%Si-0.5Mg

Yield stress	28 GPa
EX	69 GPa
XY	0.66
Density	2.708 E-11 ton/mm ³

재질이 일정 이상의 Strain값을 나타내면 터진 것으로 보고 해석하기 위해 Failure Strain 값을 입력하였다. 아래의 Fig. 15에서 보는 바와 같이 일정 이상의 Strain이 발생 되는 요소는 요소간의 결속을 Free 상태로 만들고 요소를 지움 으로써 터짐, 깨짐 등을 묘사 할 수 있게 된다. 이렇게 Failure strain이 일어나도 해석은 계속 진행 되며 Failure 된 요소는 계산이 포함 되지 않는다. 하지만 스프링 백과 같은 탄성해석을 하는데 있어 Failure 요소는 형상 값을 읽어 들일 수 없기 때문에 탄성 해석은 진행 할 수 없다는 문제점이 있다. LS-DYNA를 사용함에 있어 외부 Load는 실험 데이터에 근거하여 입력하였다.

펀치와 홀더는 변위에 의해 제어되는 것으로 하였으며, 내부 액압은 Euler으로 모델링 하지 않고 Lagrange만을 이용하여 해석하기 위해서 액압의 압력만을 Press를 통해서 제어 하도록 하였다. 아래의 Fig. 17, 18 ,19는 Punch의 변위와 내부 액압, Holder의 변위에 대해 입력한 값이다.

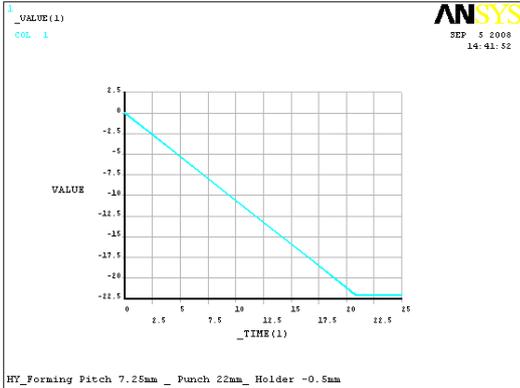


Fig. 17 Displacement of punch

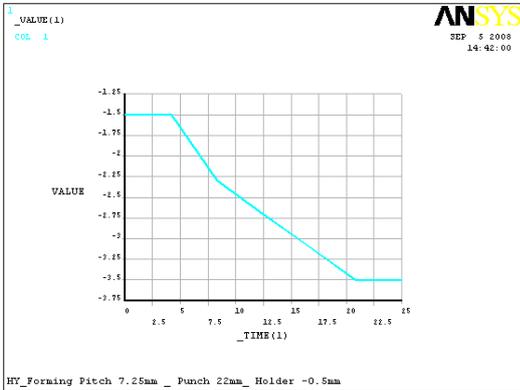


Fig. 18 Press

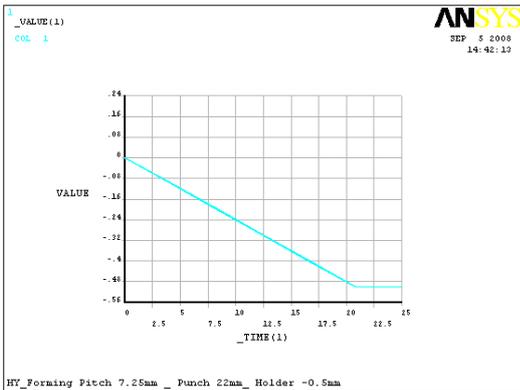


Fig. 19 Displacement of holder

또한 내압이 적용되는 부분은 고무실링에 의해 실린된 부분만을 적용하게 됨으로 고무 실링에 의해 수압이 적용 되는 부분만을 압력을 적용하였다. 아래의 Fig. 20은 수압이 적용되는 판재 부분을 나타낸 것이다.

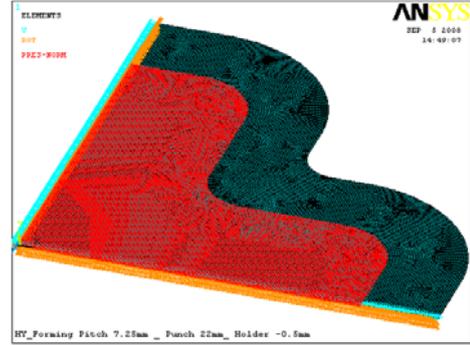


Fig. 20 Press area

위의 실험에서도 알 수 있듯이 성형한계에 이르기 까지 펀치의 하강 시간은 수십 초에 이르는 매우 긴 시간이기 때문에 Explicit로 바로 풀기에는 계산시간이 일반 PC기준으로 몇 년이 걸리기 때문에 성형 해석에서는 Mass scaling을 이용하여 해석시간을 단축 한다. 하지만 Mass scaling과 Mesh의 조밀도는 Hourglassing이 발생되어 구조물의 전체 응답 보다 높은 주파수에서 변위 진동하는 에러가 발생된다. 이러한 Hourglassing은 전체 에너지에서 3% 이내만을 허용한다. 따라서 해석상의 에러 값을 줄이기 위해서 Drawing이 22mm 일때 조건에서 메쉬의 조밀도와 Mass scaling을 조절하였다. 아래의 Fig.21과 Fig.22는 Mesh size에 따른 에너지를 나타낸 것이다.

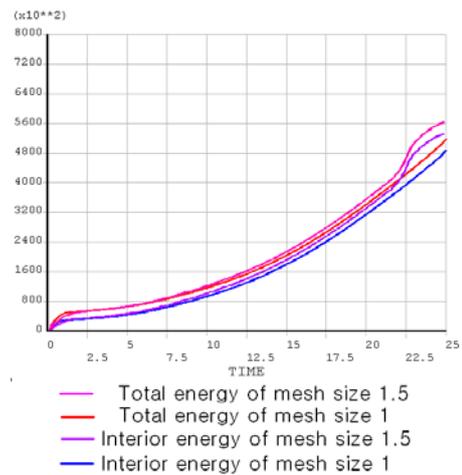


Fig. 21 Put figure 1 title here

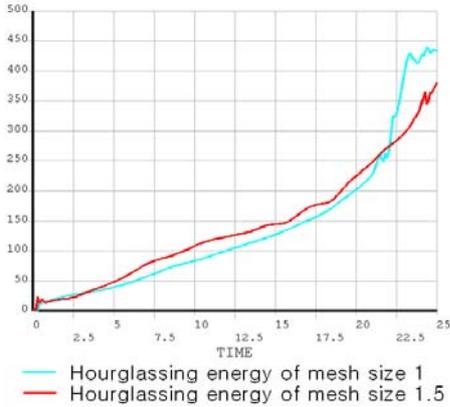
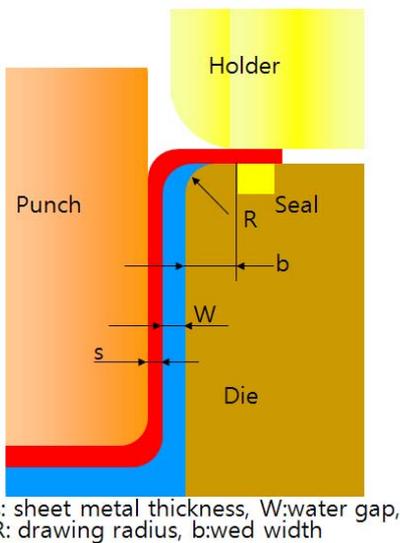


Fig. 22 Put figure 1 title here

위의 결과를 통해서 22초 이후에 에너지가 급격히 올라가는 경향을 볼 수 있었다. 이는 판재가 터짐에 따라 에너지가 올라간 것으로 예상된다. 종합적으로 볼때 메쉬의 조밀도가 떨어질수록 에너지와 Hourglassing이 줄어드는 것을 알 수 있었다. Hourglassing energy는 전체 에너지의 3% 까지를 허용함으로 1.5와 1의 큰 차이가 없으므로 판단된다. 또한 Mass scaling은 0.0008에서 부터는 시간상의 차이만 있을뿐 에너지 상의 차이는 없는 것으로 판단 되었다.

3.2.2 후처리 과정

Hydroforming에서는 아래 Fig.23과 같은 공정 변수가 있게 된다. 이중 W(Water gap)은 펀치의 하강 깊이와 판재의 형상에 큰 영향을 미치게 된다.



s: sheet metal thickness, W:water gap, R: drawing radius, b:web width

Fig. 23 hydroforming 변수

따라서 Die의 크기를 바꾸어서 W(Water gap)을 조절 하였을때 판재의 형상을 비교한 결과 아래의 Fig.24와 같이 나타났다.

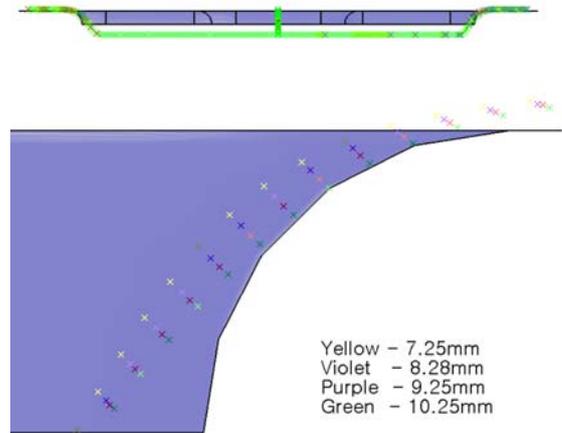


Fig. 24 Water gap and hydroforming result

Drawing이 22mm로 일정할 때 Water gap의 변화에 따라 판재의 성형 한계의 차이를 보았을때 아래의 그림과 같이 나타났다

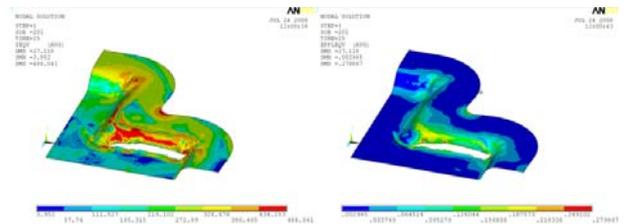


Fig. 25 Drawing 22mm, Water gap 7.25mm

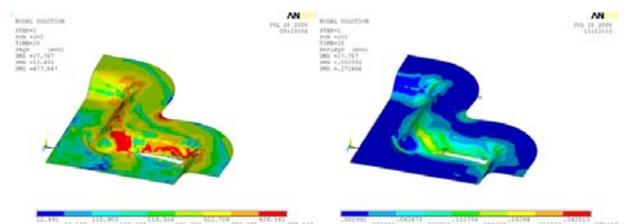


Fig. 26 Drawing 22mm, Water gap 8.25mm

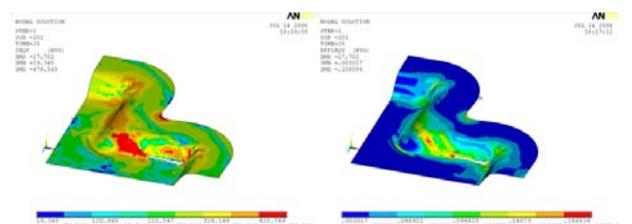


Fig. 27 Drawing 22mm, Water gap 9.25mm

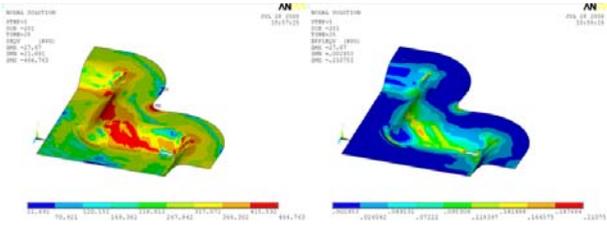


Fig. 28 Drawing 22mm, Water gap 10.25mm

위의 Fig.25, Fig.26, Fig.27, Fig.28은 Drawing을 22mm로 하고 Water gap을 변화 시켰을때 스트레스와 스트레인을 보여 준다. 시뮬레이션을 통해 위의 결과에서 Water gap이 10.25일때 실험과 거의 근사한 결과를 보여 주었다. 이를 다시 Drawing를 20mm로 한 후 forming된 판재의 strain을 관찰 하였다. 다음의 결과에서 판재의 모서리 부분에서 가장 큰 strain을 볼 수 있었다.

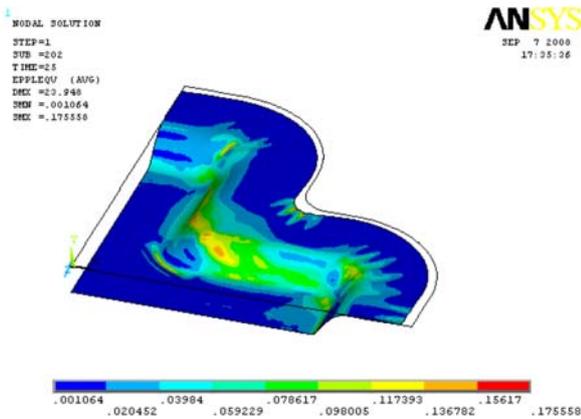


Fig. 29 Drawing 20mm, strain of forming

위의 결과값을 이용하여 model을 재설정하고 판재에 잔류 응력을 입력하고 판재의 윗면을 고정한 후 구조해석을 진행하였다.

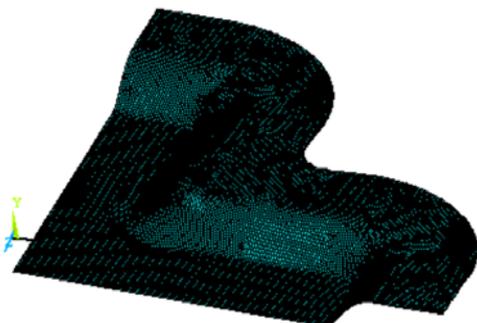


Fig. 30 Drawing 20mm model

구조해석의 진행 결과 아래의 그림과 같은 Spring back을 볼 수 있었다.

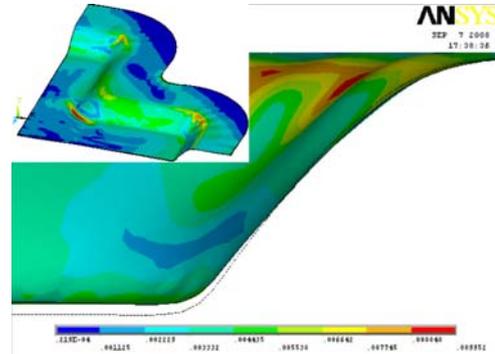


Fig. 31 Drawing 20mm, spring back

3.2.3 해석값과 실험 값의 비교

실험과 시뮬레이션의 정확도를 알아 보기 위해 Drawing이 20mm일때 hydroforming 판재를 아래의 그림과 같이 3차원 측정하였다. 그 결과를 아래의 Fig, 33과 같이 CAD에서 시뮬레이션 값을 비교 한 결과 Table 4과 같은 결과를 확인 할 수 있었다.

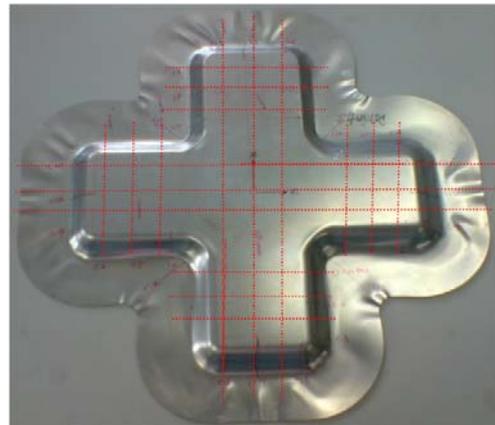


Fig. 32 Drawing 20mm일때 3차원 측정

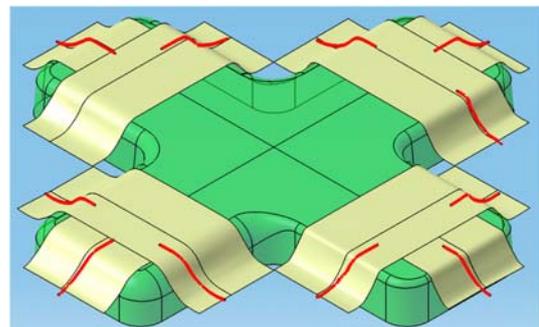


Fig. 33 시험과 시뮬레이션 비교

Table 4 Spring back

금형 곡률	시뮬레이션 각도	실험시편 각도	스프링 백
R03	150.507 °	150.932 °	0.425 °
R04	145.95 °	145.202 °	-0.7566 °
R05	127.534 °	128.215 °	0.681 °
R07	138.956 °	139.816 °	0.23 °
R08	133.146 °	133.414 °	0.268 °
R09	135.726 °	135.816 °	0.09 °
R11	141.54 °	142.1 °	0.56 °
R12	122.659 °	123.643 °	0.984 °
R13	141.519 °	142.033 °	0.514 °
R15	136.29 °	137.29 °	1 °
R16	134.403 °	134.781 °	0.378 °
R17	140.482 °	140.817 °	0.335 °

측정 결과 스프링 백은 1° 이하의 값을 나타냈다.

4. 결 론

본 연구에서 Principle of Sheet Hydroforming의 실험과 시뮬레이션을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험을 통해 얻어진 결과 값과 시뮬레이션을 비교한 결과 Drawing 깊이 20mm에서 파단하는 것을 확인 할 수 있었다.

(1) 실제 시뮬레이션에서 필요한 Mass scaling과 Mesh의 조밀도를 검증 할 수 있었으며 Hourglassing 검증 결과 결과 값에 큰 영향을 미치지 않았음을 알 수 있었다.

(2) 실험과 시뮬레이션을 통해서 얻어진 결과를 통해서 비용과 시간 때문에 실험을 통해서 하기 힘든 Water gap이 관재의 성형에 미치는 영향을 분석 할 수 있었다.

(3) 관재 하이드로포밍 시편의 파단 발생 부위는 가장 예리한 모서리인 3R 부위에서 발생하였으며, 이는 모서리부의 응력집중에 의한 것으로 판단된다.

(4) 실험과 시뮬레이션의 병행을 통해서 신뢰성을 검증 할 수 있었다.

참고문헌

- (1) LSTC, 1999, "LS-DYNA USER'S MANUAL Nonlinear Dynamic Analysis of Structures"
- (2) TSNE, 2004, "EXPLICIT DYNAMICS WITH ANSYS/LS-DYNA USER'S MANUAL"
- (3) ANSYS, 2007, "ANSYS® AUTODYN® USER'S MANUAL", Vol. 1, No. 2~6, Page 7~10
- (4) Jeong Kom, Li-Ping Lei, and Beom-Soo kang, 2000, "Preformdesign in Hydroforming of Automobile Lower Arm by FEM", Pusan National University
- (5) M.H.Parsa, P.Darbandi, 2007, "Experimental and Numerical Analyses of Sheet Hydroforming Process for Production of an Automobile Body part", *Jouranl of Materials processing Technology*
- (6) H. Markstaedter, B. Oberpriller, K. Siegert, "Die concepts for hydro-mechanical deep drawing", *Sheet/Hydro/Gas Forming Technology and Modeling*, SAE International, 2004, pp. 1-8.