

하이드로 임베딩시 체결용 연결요소의 형상 최적화 연구

김봉준¹ · 김동규¹ · 김동진² · 문영훈[#]

Studies on the Shape Optimization of Connecting Element for Hydro-Embedding

B. J. Kim, D. K. Kim, D. J. Kim, Y. H. Moon

(Received November 14, 2005)

Abstract

The applicability and productivity of hydroforming process can be increased by combining pre- and post-forming processes such as the bending, piercing and embedding process. For the fabrication of automotive parts, the hollow bodies with connecting nuts are widely used to connect parts together. Hollow body with connecting nuts has been conventionally fabricated by welding nuts or screwing in autobody screws. It requires multiple steps and devices for the welding and/or screwing. Therefore in this study, hydro-embedding process that combines the hydraulic embedding of connecting element(nut) with hydroforming process is investigated. Studies on the hydro-embedding technology have been performed to optimize the shape of the connecting element by analyzing the deformed mode of the embedded tube. The effects of the shape of the screw tip, screw thread and shape of thread on the connection force between the tube and the connecting element have been investigated to optimize the shape of connecting element. Finite element analysis has also been performed to provide deformation behaviors of the tube surrounding a hole produced by hydro-embedding.

Key Words : Hydro-Embedding, Hydroforming, Connection Element, Connection Force

1. 서 론

관재(tube) 하이드로포밍 기술은 기존의 차체를 성형하는 스탬핑 성형공정과는 완전히 다른 개념으로 차량 구조물의 폐단면 형상을 원형 강관의 내부에 압력을 가하여 확관시켜 외부 금형 형상에 따라 성형하여 원하는 모양의 차체 골격을 만드는 방식으로서 성형품이 무게에 대비하여 높은 구조강성을 가지며, 복잡한 형상의 부품을 하나의 다이로 생산이 가능하며, 소재 회수율이 높다는 장점이 있다[1~3]. 하지만 하이드로포밍 기술은 종래의 프레스 성형과는 달리 관재의 기계적 물성

평가 방법, 소재와 금형간 마찰 특성, 금형 소재 선택 및 설계 기술, 기본적인 소재의 변형 거동에 대한 종합해석이 이루어져야만 최적의 성형이 가능하므로 기술적으로 고려인자가 많은 기술이기도 하다[4~7].

실 생산라인에서 하이드로포밍공정으로 다양한 형상의 부품을 최소 공정수로 성형하기 위해서는 하이드로 포밍 이전의 예비성형공정과 후처리공정을 하이드로 포밍 기술과 병행하여 성형하면 공정수를 크게 줄일 수 있다. 따라서 하이드로포밍 기술의 생산성 제고를 위한 이러한 병행공정의 개발은 하이드로포밍 기술의 적용 개소를 증

1. 부산대학교 정밀기계공학과
2. POSCO 자동차장재가공연구센터
교신저자 : 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공 연구소, E-mail : yhmoon@pusan.ac.kr

가시키는데 필수적인 기술로 부각되고 있다[2~3]. 따라서 본 연구에서는 관재 하이드로포밍시 유압을 이용한 하이드로 임베딩 공정기술의 개발을 통해 하이드로포밍 공정의 생산성을 대폭 개선시키고자 하며, 이를 통한 적용가능 부품수의 증가는 물론, 임베딩공정 최적화를 통한 성형제품의 건전성에도 크게 기여하고자 한다. 하이드로 임베딩(hydro-embedding)공정의 기본적인 메커니즘은 관재내부의 유압이 작용하면서 체결요소가 금형의 가이드저널(guide journal)을 따라 이동하면서 관재 반경방향으로 압축하중을 가하여 체결요소 단면을 따라 소재에 전단응력과 내부압력에 따른 소성변형을 발생시켜 체결 요소와 소재를 결합시키는 것이다[8~11].

본 연구에서는 이러한 하이드로 임베딩공정의 주요 공정변수인 유체 내부압력 및 체결요소의 끝단 형상, 나선선 피치와 형상에 따른 결합력을 분석하고 이를 토대로 체결용 연결요소(connection element)의 형상을 최적화하고자 하였다.

2. 연구 내용

2.1 하이드로임베딩 유한요소해석

하이드로 임베딩 공정의 기본적인 메커니즘은 Fig. 1에서 보이듯이 금형 내에 안착된 관재 양단에 축방향 가압을 위한 펀치가 안착되고 그 끝단을 막아 관재 내부에 오일을 채우고 펀치로 유체의 누수를 막은 후 설정 압력까지 유체 압력을 높여 관재를 금형 형상대로 성형시킨다. 이에 병행하여 유압 실린더를 이용하여 체결요소를 관재 벽면에 가압하여 전단력을 통해 피어싱이 일어남과 동시에 Fig. 2에서 처럼 체결요소의 나선부로 관재 두께 단면의 소재가 유입되면서 체결되는 것이다.

본 연구에 사용된 유한요소해석 프로그램은 DEFORM3D 로 하이드로 임베딩 공정시 체결요소의 끝단 형상에 따른 최종단계에서의 체결부 형상과 플랜지(flange) 깊이의 관계를 예측하기 위하여 유한요소 해석을 시행하였다.

유한요소해석은 Table 1의 해석조건을 적용시켜 최종 체결부 형상과 체결요소의 형상에 따른 플랜지 깊이 및 체결력(하중값)을 평가하였다. 평가대상 체결요소의 기본 형상으로 Fig. 3에 보인 4가지 형상을 선정하여 분석을 하였다. 나선부의 피치는 1.5mm, 외경 8mm 그리고 끝단 각도는 112° 로 하

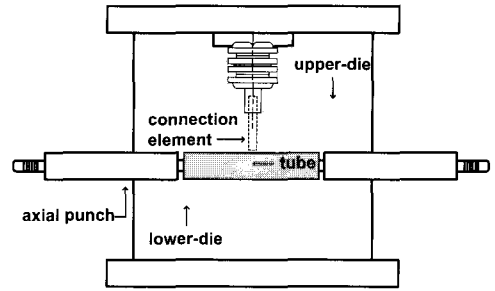


Fig. 1 Schematic drawing of hydro-embedding process

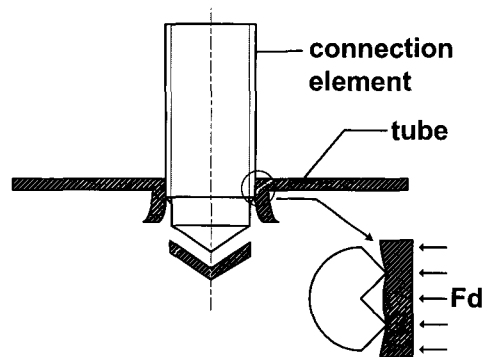


Fig. 2 Flange formation during hydro-embedding process

Table 1 Process condition of FE analysis

Contents	Conditions
Punch velocity	50mm/sec
Material	STKM11A
Elements size	0.02mm
Nodes	15736
Punch displacement	15mm
Iteration method	Newton-Rapson

였다. 유한요소해석을 통해 4 가지 체결요소의 체결부에서의 변형거동을 분석하여 실제 성형실험을 통한 체결요소 형상 최적화에 대한 이론적 근거를 부여하였다. 해석 결과에 따른 플랜지 깊이와 하중값은 Table 2에 나타내었으며, 체결부 형상과 플랜지 형상을 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다.

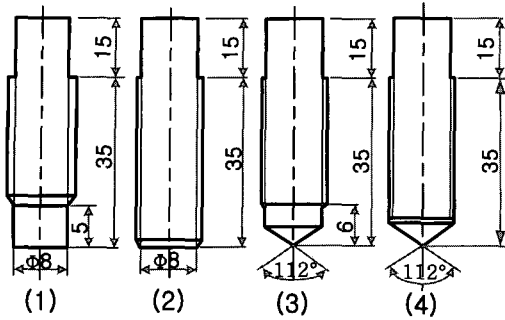


Fig. 3 The shape of the connecting elements

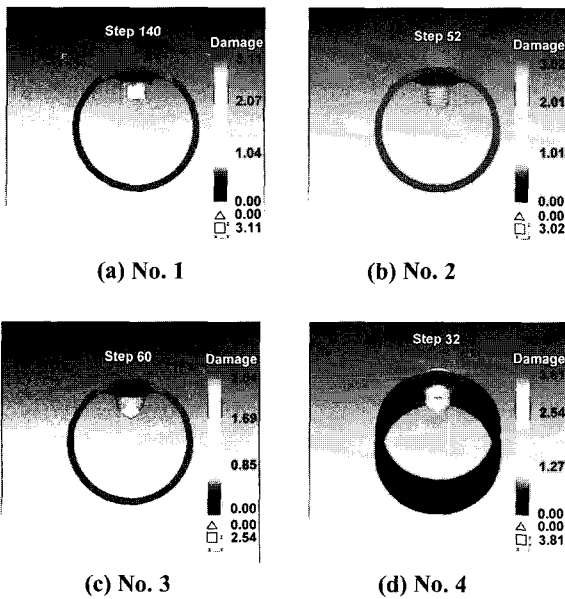
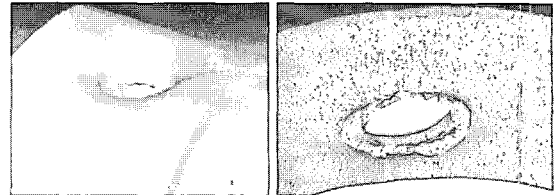


Fig. 4 Deformation mode of the hydro-embedding

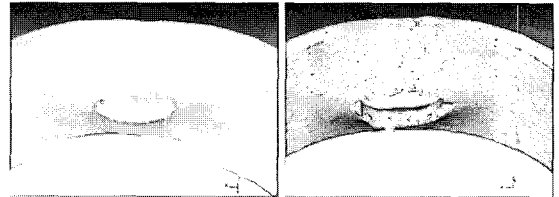
Table 2 Relationship between the flange depth and connection load

connecting element	flange depth (mm)	connection load(kN)
(1)	5.21	1.25
(2)	3.75	0.35
(3)	6.23	1.67
(4)	2.63	0.3

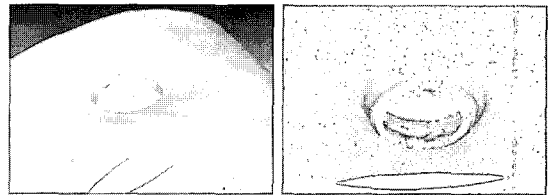
No. 1 형상에서는 체결요소의 앞부분에 6mm 정도의 펀치 형상으로 돌출되게 설계를 하였으며, No. 2 형상은 나사형상으로 일상에서 많이 사용하는 형태이며 쉽게 가공이 가능하다는 장점을 가



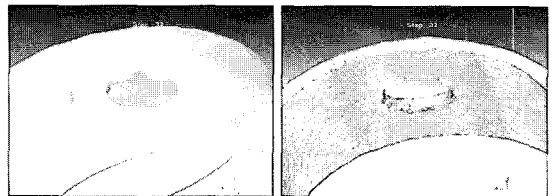
(a) No. 1(flange height : 5.21mm)



(b) No. 2(flange depth : 3.75mm)



(c) No. 3(flange depth : 6.23mm)



(d) No. 4(flange depth : 2.63mm)

Fig. 5 Shape of pierced hole during hydro-embedding simulation

지고 있다. No. 3 형상은 체결요소의 앞부분 6mm 정도를 펀치형상으로 돌출시켰으며 돌출부분에 각도를 112° 로 설계하였다. 이는 딥드로잉에서 다이 계단부에 라운딩이나 테이퍼를 줌으로 성형성을 높이는데 이를 체결요소에 적용을 시켜 더욱 깊은 플랜지깊이를 얻을 수 있었다.

라운딩의 경우에는 이를 체결요소에 적용시키기 어렵기 때문에 테이퍼를 적용하였다. 테이퍼는 이론상 보통 50~60° 정도를 주는데 성형해석 결과 약 56° 씩 112° 를 주는 것이 가장 최적의 결과로

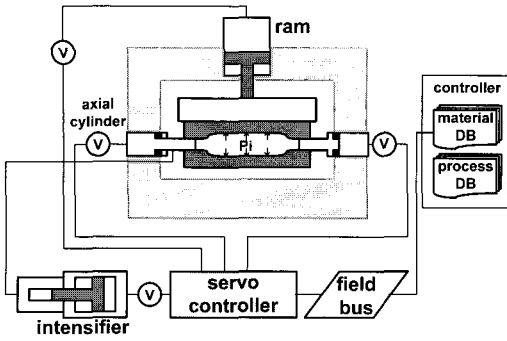


Fig. 6 Schematic drawing of the hydroforming machine

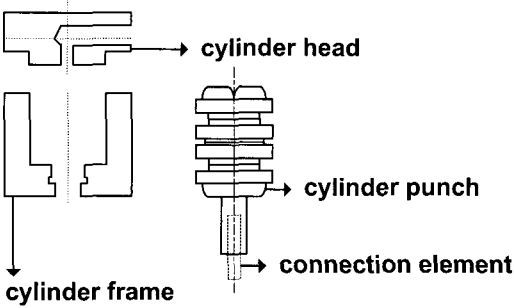


Fig. 7 Schematic drawing of the hydraulic cylinder

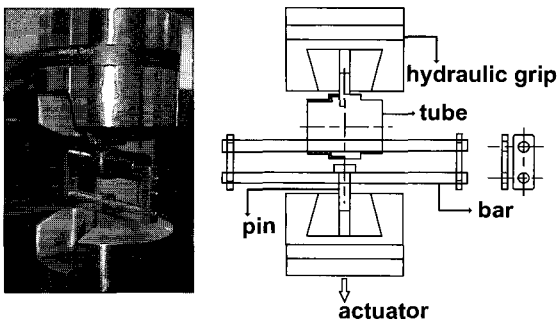


Fig. 8 Connection force measuring device

이를 적용시켰다. No. 4 형상은 일반 나사형상의 체결요소에 112°의 각도를 적용시킨 것이다. 유한요소 해석 결과 3번 형상의 체결요소에서 플랜지 값과 하중 값이 가장 깊고 크게 나왔다. 이는 성형해석에서 체결요소가 압입되면서 Fig. 2에서 보는 것과 같이 1차적으로 높은 하중이 발생한

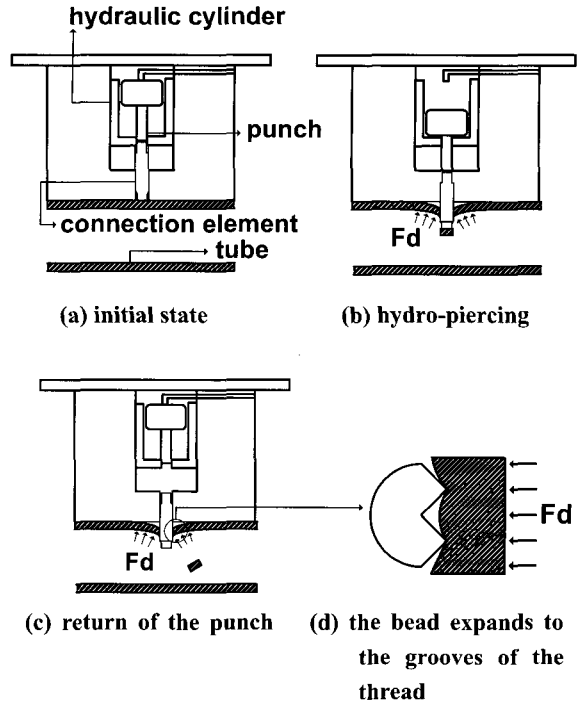
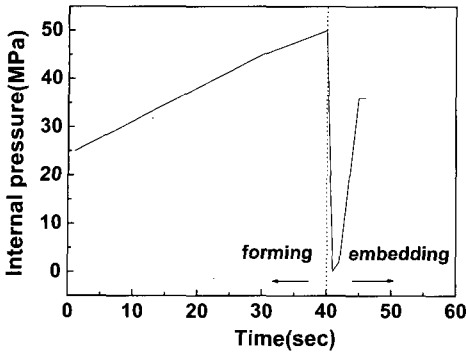


Fig. 9 The sequence of the hydro-embedding process

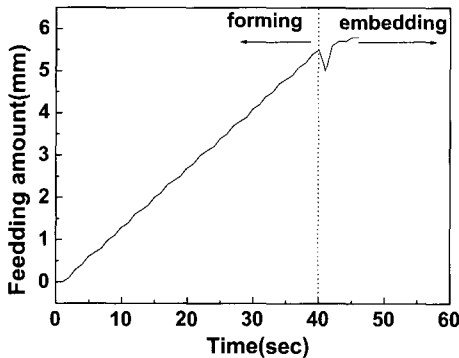
후 약 4.5mm의 플랜지가 발생하였고, 7mm 가압시 체결요소의 계단부에 2차적으로 약 1.7mm의 플랜지가 발생하여 다른 형상의 체결요소에 비해 플랜지 깊이가 상대적으로 컸다. 관재와 체결요소간의 체결력은 해석결과 초기 압입량에 의해 플랜지의 깊이가 좌우되는데, 이는 플랜지 깊이가 깊수록 체결요소의 나사면과 관재의 플랜지부의 접촉 면적이 넓어지기 때문이다.

2.2 실험장치

하이드로포밍 실험에 사용된 실험장치는 Fig.6에 보인 바와 같이, 4주형 하향식 800KN급 유압프레스의 좌우 양쪽에 800KN의 축방향 유압 실린더 2대에 축방향 펀치가 장착되어있고, 유압을 공급하는 서보 하이드로 유닛(servo hydraulic unit) 등으로 구성되었다. Fig. 7은 하이드로 임베딩 성형실험에서 체결요소를 가압하는 유압실린더의 분해도면을 나타낸 것으로 금형내에 유압실린더를 장착하도록 설계 하였다. 체결된 체결요소의 체결력(connection force)을 평가하기 위하여 MTS 인장기에 Fig. 8에 보인 하중-변위(load-displacement) 측정용 지그를 장착하여 사용하였다.



(a)



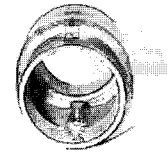
(b)

Fig.10 The loading path (a) pressure-time curve (b) feeding amount-time curve

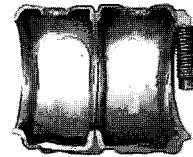
2.3 하이드로 임베딩 성형실험

본 연구에 사용된 시험 장치는 금형내에 펀치 실린더를 장착하도록 설계하였고 끝단형상(나사산 높이 피치거리 등)에 따른 성형 양상 차이를 비교 하기 위해 유한요소해석의 결과를 기초로 하여 Fig. 3 에 보인 4 가지 형상의 체결요소들을 실험에 적용하였고 금형의 표면과 펀치의 표면은 고주파 열처리를 하였다. 하이드로 임베딩의 공정 개략도는 Fig. 9 에 나타내었으며 다음의 과정을 통해 실험을 하였다.

- ① 유압 실린더에 미리 체결될 체결요소를 장착시켜 준다.
- ② 소재의 내부압력을 증가시키는 동시에 축방향 압입을 주어서 소재를 미리 예비성형을 시킨다.
- ③ 성형양상에 따라 공정변수를 변화시킨 후 최적의 성형 공정을 찾아낸다.
- ④ 예비성형 후 내부압력을 0으로 낮춘 뒤 다시



(a)



(b)

Fig.11 (a) Clamped part and (b) the cutting section of the hydro embedded specimen

내부압력을 일정 구간까지 올려 줌과 동시에 유압실린더를 작동시켜 체결요소를 가압한다.

⑤ 동일한 최적의 조건에서 연결요소의 재질과 형상을 변화시키면서 실험을 한다.

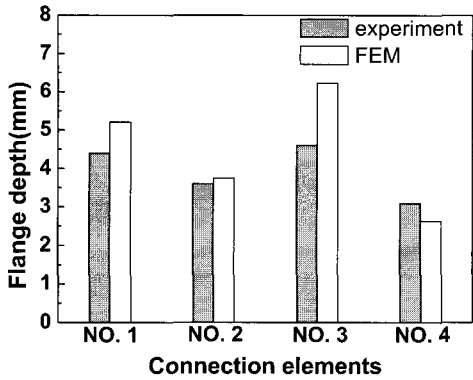
⑥ 체결요소의 체결력을 측정하기 위하여 MTS 장비로 인장실험을 한다.

SAPH370 소재를 이용하여 최대 성형압력 50Mpa 과 전체 축방향 압입량을 5.5mm로 예비성형 후 내부압력을 0으로 압력을 낮춘 뒤 다시 내부압력을 36Mpa 과 전체 축방향 압입량을 5.8mm 까지 작용을 시켜 체결요소를 체결시킨 공정곡선을 Fig. 10에 나타내었다. 체결요소가 체결된 단면 형상으로부터 내부압력과 체결요소 형상에 따른 플랜지 깊이를 측정하여 분석하였다.

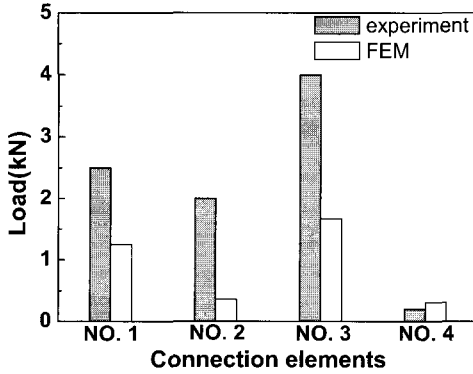
3. 실험 결과

3.1 체결 요소의 기본형상 평가

체결요소는 앞의 유한요소해석 결과를 기초로 하여 기본형상을 총 4가지로 제작 하였고(Fig. 3) 각각의 형상별 플랜지 깊이와 MTS 인장실험을 통한 체결력을 FEM 해석 결과값과 각각 비교, 분석 하였다. 임베딩 성형된 시편의 플랜지 깊이와 체결부의 나선선 생성 여부를 분석하기 위해 0.1mm 와이어를 이용하여 Fig. 11과 같이 단면을 절단하였다. Fig. 12에 보인 바와 같이, 성형해석과 실험



(a) flange depth



(b) connection load

Fig.12 Flange depth and connection load for various connecting elements

결과를 통해 각각의 체결요소 형상별 깊이 체결력을 평가한 결과 3번 형상이 가장 플랜지 깊이가 깊고 체결력이 높았으며, 4번 형상의 경우 가장 낮은 값을 보였다. 이는 하이드로 임베딩 공정시 소재에서 소성변형이 점진적으로 발생하여 결국에 전단이 일어나는데, 가압 전단 후 관재의 끝단부가 남아있게 되는데, 계속적인 가압으로 관재 끝단이 플랜지 형상으로 소성변형이 일어난다. 이로 인해 3번 형상의 플랜지 깊이가 가장 깊었다. 그리고 내부압력이 작용하여 플랜지된 소재를 체결요소 측면에 가압시켜 체결요소의 나사끝 안으로 밀어넣기 때문에 플랜지가 큰 3번 형상의 경우 관재와 체결요소의 나사부의 접촉 면적이 넓어져서 가장 높은 체결력을 보였다.

Table 3 Dimension of connecting elements

Thread shape		D (mm)	P (mm)	A (°)
Right-Angled	Equilateral			
A-1	C-1	8	1.2	180
A-2	C-2	8	1.2	112
A-3	C-3	8	1.5	180
A-4	C-4	8	1.5	112
A-5	C-5	8	1.8	180
A-6	C-6	8	1.8	112
B-1	D-7	9	1.2	180
B-2	D-8	9	1.2	112
B-3	D-9	9	1.5	180
B-4	D-10	9	1.5	112
B-5	D-11	9	1.8	180
B-6	D-12	9	1.8	112

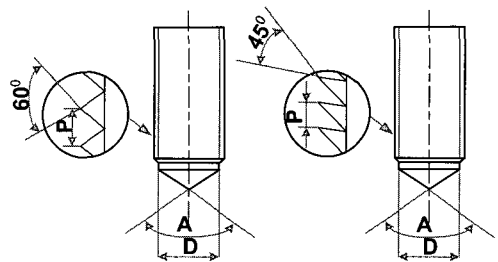


Fig.13 Terms for shape definition of connecting element: (a) equilateral triangular thread shape, (b) right-angled triangular thread shape

3.2 체결요소의 나사형상, 피치, 끝단 각도, 외경에 따른 체결력 연구

체결요소 3번 형상을 기준으로 체결요소를 4가지의 변수를 추가하여 연결요소의 형상이 체결력에 미치는 영향도를 평가하였다. Fig.13에 체결요소의 형상정의를 위한 기준을 나타내었는데, 체결요소부의 끝단 각도를 A, 피치를 P, 체결요소 끝단 반경을 D로 정의하였다. Table 3에 Fig.13에 나타난 정삼각형상(equilateral triangular) 및 직각삼각

Table 4 Summary of flange depth and connection load

clamping element	flange depth(mm)	load(kN)
A-1	4.21	3.11
A-2	4.72	3.29
A-3	4.35	3.04
A-4	4.61	4.02
B-1	4.35	2.69
B-2	4.55	2.83
B-3	4.23	2.51
B-4	4.85	3.32
C-1	4.45	2.48
C-2	4.80	2.89
D-1	4.52	2.05
D-2	4.82	2.53

* Not connected elements: A,B,C,D-5,6 and C,D-3,4

형상(right-angled triangular) 나사산 형태의 체결요소를 대상으로 시험된 대상치수를 나타내었으며 Table. 4에 각 체결요소 형상별 플랜지 깊이와 체결력을 나타내었다.

피치는 1.2mm, 1.5mm, 1.8mm 총 3 종류의 피치로 실험을 하였다. 임베딩 공정시 스트로크 과정에서 관재 외측부에 소성변형이 점진적으로 발생하여 결국 전단과 동시에 관재 내부의 내압과 플랜지 부분이 체결요소 나사 피치부에 빨려 들어가는 것을 고려하여 나사 피치의 크기와 체결요소의 지름의 비에 따른 체결력 영향도를 평가하였는데, 체결요소의 피치가 1.2mm, 1.5mm 인 체결력이 1.8mm 일때 보다 높았고 1.2 일때 보다는 1.5 일때 체결력이 근소한 차이로 높은 것을 Table 4 를 보면 알 수 있다. 이는 하이드로 임베딩공정에서 스트로크와 동시에 관재 내압이 작용시 플랜지부의 체결요소가 나사 피치부로 빨려 들어가기 때문에 피치의 크기가 1.8mm 일때 체결요소 나사산과 플랜지된 소재의 접촉길이가 상대적으로 짧을뿐만 아니라 그로 인해 피어싱된 부위에서 액체누수 현상이 심하게 발생하여 내부 유체

압력이 심하게 떨어져 내부압력을 통해 플랜지된 소재를 나사부의 골안으로 유입시키기 어렵게 만들어 정상적인 체결이 되지않았다. 그러나 1.2mm 와 1.5mm 에서는 액체 누수 현상은 발생하지 않았고, 피치거리가 너무 짧으면 나사부 골안으로 소재가 유입되기 힘들어져, 1.2mm 보다 1.5mm 가 근소한 차이이지만 높은 체결력이 나왔다.

체결요소 끝단 각도 변화에 따른 체결력 영향도 평가를 위해 각도를 180°와 112°로 실험하였다 실험 결과 피치거리가 1.5mm 인 경우 각도가 완만한 112°가 전반적으로 180°보다 높게 나온 것을 알 수 있을 것이다. 이는 체결요소가 임베딩 공정시 스트로크 과정에서 각도의 차이로 인해 플랜지의 형상 변화가 나타나는데 여기서 각도가 완만한 112°가 180°보다 플랜지 깊이가 깊고 체결력이 높게 나왔다. 또한 체결요소의 끝단 외경이 8mm 이고, 피치가 1.5mm, 끝단 각도가 112°(connecting element A-4)일 때 가장 높은 체결력이 나타났다.

체결요소 외측부의 나사형상에 따른 체결력의 영향도를 볼 때 전반적으로 직각삼각형상의 나사산의 경우가 정삼각형상의 나사산에 비해 플랜지 깊이는 작은 반면 체결력은 높게 나왔는데, 이는 체결요소가 임베딩 공정시 피어싱과 동시에 관재 내부의 압력으로 인해 체결부에서 체결요소의 나사산으로 플랜지된 소재가 쉽게 밀려들어가 나사부 골안으로 플랜지된 소재가 원활하게 밀려들어가게 되어 정삼각형상보다는 직각삼각형상나사의 체결력이 높게 나왔다.

4. 결론

하이드로 임베딩시 체결용 연결요소의 형상 최적화 연구결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 하이드로 임베딩시 체결력은 임베딩부에 형성되는 플랜지의 깊이가 클수록 증가하였다.
- (2) 플랜지 깊이에 영향을 미치는 것은 주로 체결요소의 끝단 형상으로 플랜지가 깊이 생성되는 형상이 상대적으로 다른 형상들에 비해 체결력이 높았다.
- (3) 하이드로 임베딩시 체결력의 영향인자인 체결요소 끝단 형상, 끝단 각도, 외측나사부 피치, 체결요소 끝단 반경 및 체결요소 나사부의 형상 등의 상대적인 영향도는 사용되는 관재의 치수 및 체결요소와의 접촉 면적 등에 따라 평가되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] F. Dohmann and C. Hardt, 1996, Hydroforming-A method to manufacture lightweight parts, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, pp. 669~676.
- [2] 김봉준, 김정운, 문영훈, 2002, 하이드로포밍 성형성에 미치는 공정인자 영향도 해석, *한국소성가공학회지*, Vol.11, pp. 54~60.
- [3] K. Brewster, K. Sutter, M. Ahmetoglu, T. Altan, 1996, Hydroforming tube, *The Tube and Pipe Quarterly*, Vol. 7, No. 4, pp. 34~40.
- [4] Muammer Koc, Yingyot A., T. Altan, 2001, On the characteristics of tubular materials for hydroforming-experimentation and analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.41, pp. 761~772.
- [5] W. Rimkus, H. Bauer, M. J. A. Mihsein, 2000, Design of load-curves for hydroforming applications, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.108, pp. 97~105.
- [6] N. Asnafi, A. Skogsgardh, 2000, Theoretical and Experimental analysis of stroke-controlled tube hydroforming, *Materials Science and Engineering*, Vol. A279, pp. 95~110.
- [7] A. Kellicut, B. Cowell, K. Kavikondala, T. Dutton, S. Iregbu, R. Sturt, 1999, Application of the results of forming simulation in crash models, *NUMISHEET'99*, 13-17 Sep, Besancon-France, pp. 509~514.
- [8] B. Schulze, Method for embedding connection elements in a wall, *US Patent, USP 6,134,767*, 2000.
- [9] D. R. Mario, G. Paolo Giuseppe, 1994, Process for fixing a tubular reinforcing insert to a tubular metal structure and apparatus for carrying out the process, *European Patent, EP0593950A1*.
- [10] D. R. Mario, G. Paolo Jiyuzetsupe, 1994, Method and device for fixing tubular reinforcing insert into a tubular metal structure, *Japanese Patent, JP6198358*.
- [11] S. Gerhard, R. Wolfgang, Joining part to second part method, *German Patent, DE19508632*.