

B-2

측벽형 스프링클러 헤드 디플렉터의 연속 성형공정에 관한 유한요소 해석

민인홍, 이준철, 손재원*

(주)스타코 기술연구소 *강원대학교 기계메카트로닉스 공학부

A Finite Element Analysis on the Progressive Forming Process of a Horizontal Side-wall Sprinkler Head Deflector

Min, In-Hong · Lee, Joon-Cheol · Son, Jae-One*

Technical Research Center, STARCO Co., Ltd., *Mechanical Engineering, Kangwon National University

1. 서론

스프링클러 헤드는 아파트나 상가 등 건물의 천장이나 벽면에 설치하며, 화재 발생시 초기에 감지하여 가압된 소화용수를 내뿜어 분산시킴으로써 화재를 진압하여 인적·물적 재산을 최소화하는 장치이다. 그 종류는 소화용수의 차단 여부에 따라 개방형과 폐쇄형으로 구분하며, 설치 방향에 따라 상향형, 하향형, 측벽형이 있고, 형태와 작동방식에 따라 매우 다양하다.

본 연구는 측벽형 스프링클러 헤드 디플렉터를 대상으로 하며, 이 부품의 연속성형 공정 (progressive forming process, Fig. 1 참조)에 대해 유한요소 해석을 수행함으로써 부식균열의 주원인으로 여겨지는 과대변형 및 잔류응력의 크기를 평가하고, 부식에 의한 균열이나 파단 위험이 큰 부분의 위치를 예측하는데 그 목적이 있다.

2. 유한요소 해석

2.1 연속성형 금형 모델링

유한요소 해석을 수행하기 위하여 우선 전체 성형공정에 대한 금형 모델링을 수행하였다. Fig. 2~10은 상용 소프트웨어인 AutoCAD[1]를 사용하여 각 공정에 대한 상하 금형과 이들에 의해서 제조되는 제품의 형상을 모델링한 결과이다. 실제 스프링클러 헤드 디플렉터는 연속성형 금형에 의해서 성형되나, 유한요소 해석에서는 각 공정을 순차적으로 시뮬레이션하게 되므로 편의상 각 공정에 사용되는 금형 세트를 따로따로 모델링하였다.

본 연속성형은 다음과 같이 모두 9 공정으로 완성된다.

- 제1 공정 : 코이닝

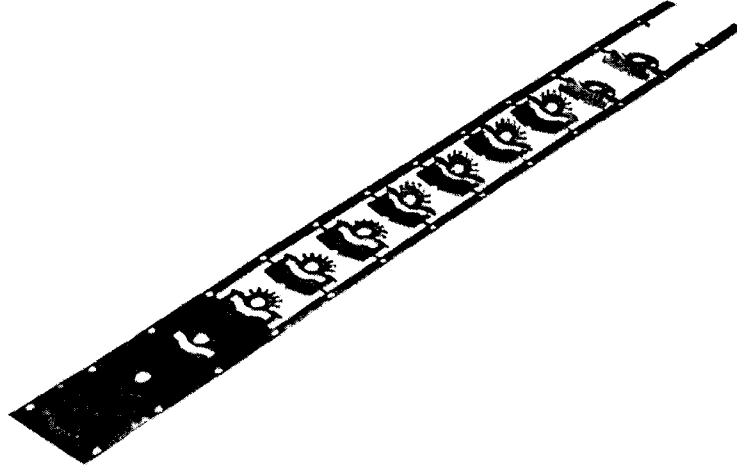


Fig. 1. 성형 중 소재 사진.

- 제 2 공정 : 1 차 펀칭
- 제 3 공정 : 2 차 펀칭
- 제 4 공정 : 3 차 펀칭
- 제 5 공정 : 1 차 성형
- 제 6 공정 : 2 차 성형
- 제 7 공정 : 전단
- 제 8 공정 : 3 차 성형
- 제 9 공정 : 4 차 성형

이들 중에서 소성변형이 일어나는 것은 제 5,6,8,9공정(1,2,3,4차 성형공정)으로서, 본 연구에서는 이들 4 개 공정에 대해서만 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 모델링을 위하여 이들 금형에 대한 'DWG' 파일 형식의 CAD 데이터를 상용 솔리드 모델링 소프트웨어인 SolidWorks[2]에서 'IGES' 파일 형식으로 변환하였다.

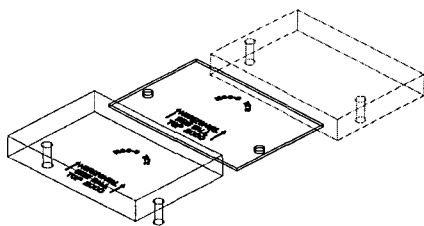


Fig. 2. 제 1 공정 : 코이닝.

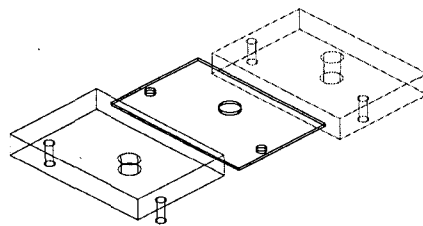


Fig. 3. 제 2 공정 : 1차 펀칭.

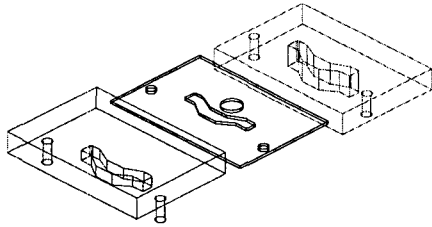


Fig. 4. 제 3 공정 : 2차 편칭.

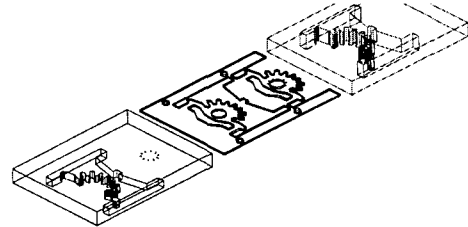


Fig. 5. 제 4 공정 : 3차 편칭.

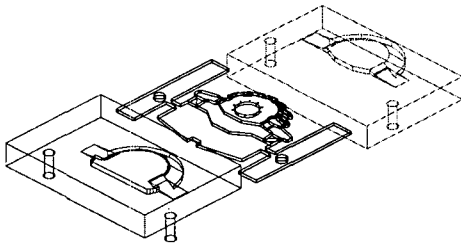


Fig. 6. 제 5 공정 : 1차 성형.

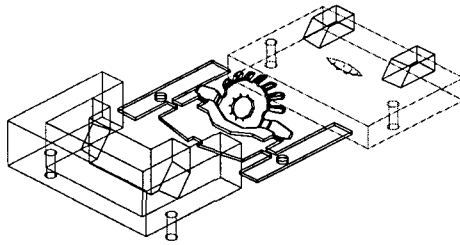


Fig. 7. 제 6 공정 : 2차 성형.

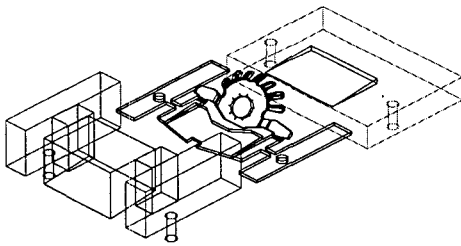


Fig. 8. 제 7 공정 : 전단.

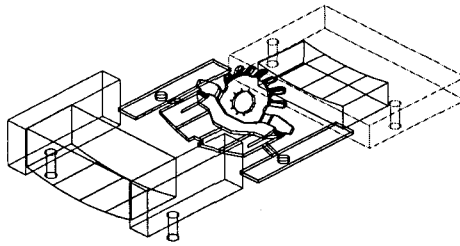


Fig. 9. 제 8 공정 : 3차 성형.

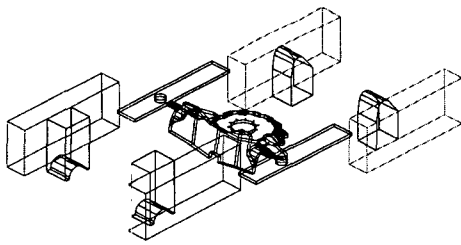


Fig. 10. 제 9 공정 : 4차 성형.

2.2 연속성형공정의 유한요소해석

2.2.1 유한요소 모델링

연속성형 금형 모델링 작업으로 생성된 IGES 파일들을 범용 유한요소 모델링 소프트웨어

Table 1. 황동의 기본 물성치

Young's Modulus E (GPa)	110
Density ρ (GPa)	8.39
Yield Stress Y (MPa)	145
Tensile Strength UTS (MPa)	372
Elongation(%)	23.0

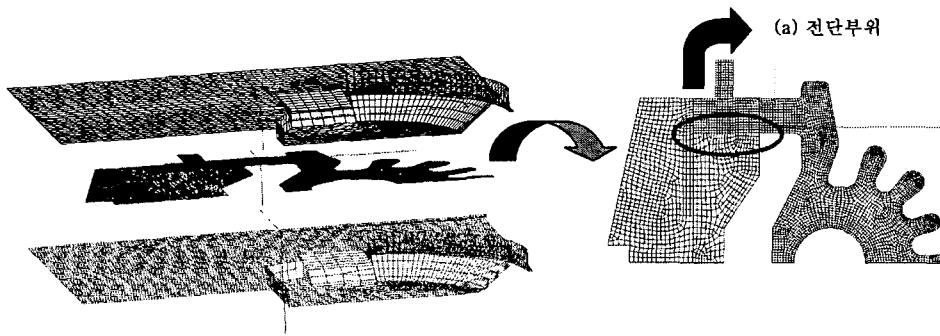


Fig. 11. 1 차 성형 금형 및 초기소재의 유한요소 모델.

인 HyperMesh[3]에서 읽어들이어 각 공정별로 초기 소재, 펀치 그리고 다이를 모델링하였다.

Fig. 11 ~ 14는 4 가지 성형공정에 대한 유한요소 모델링의 결과이다. 대칭성을 고려하여 전체의 1/2부분만 모델링 하였으며, 중심선을 따른 절점들에 대칭조건을 부여하였다. Fig. 11에 도시된 바와 같이 디플렉터 소재는 제 4 공정까지의 전단작업으로 윤곽선이 결정된 형상에 대하여 두께 1.2 mm의 셸(shell) 요소로 모델링 하였으며, 절점 수는 4,037 개, 요소 수는 3,735 개이다. 재료 물성치는 웹사이트[4]에서 참조하였으며, 그 주요 내역은 Table 1과 같다. 펀치와 다이는 역시 셸 요소로 모델링하였다.

소재와 접촉하는 펀치 및 다이와의 경계면에 대한 접촉 알고리즘으로는 Lagrange 승수법을 적용하였고, Coulomb 마찰계수는 각각 0.15로 가정하였다. 펀치속도는 5 mm/ms로 설정하였으며, 두께 방향의 적분점은 스프링백(springback) 해석에 적합한 9개로 하였다.

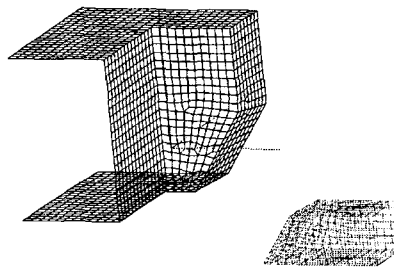


Fig. 12. 2 차 성형 금형의 유한요소 모델.

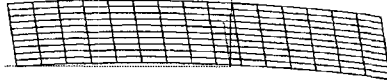


Fig. 13. 3 차 성형 금형의 유한요소 모델.

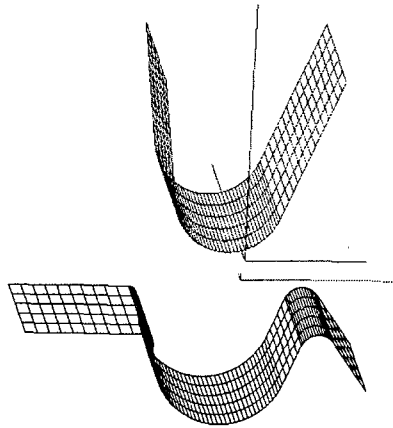


Fig. 14. 4 차 성형 금형의 유한요소 모델.

2.2.2. 공정별 해석 결과

성형공정 이후의 정확한 잔류응력 분석을 위해서는 정적-내연적(static-implicit) 프로그램을 이용하여 대변형 해석을 수행해야 하지만, 해석에 소요되는 방대한 계산시간, 기억용량 및 접촉처리문제 등 여러 가지 장애 요인으로 인해서 아직까지는 비현실적인 것으로 이해되고 있으므로, 본 연구에서는 판재 성형공정의 해석에 많이 사용되고 있는 상용 동적-외연적(dynamic-explicit) 프로그램 'PAM-STAMP'[5]를 사용하여 성형공정을 해석하였다. 그러나 성형공정 이후의 탄성회복, 즉 스프링백 해석에는 역시 PAM-STAMP에 내장되어 있는 정적-내연적 코드를 이용하였다.

(1) 1 차 성형(제5 공정) : 디플렉터의 가장 중요한 역할은 정해진 공간에 일정하고 균등하게 물을 분사시키는데 있다. 이러한 역할을 하는데 있어서 7 개로 갈라진 가지 부분의 형상과 굽힘각도는 매우 중요하다. 형상은 제4 공정(3 차 편칭)에서 이미 결정되고 제5 공정(1 차 성형)에서는 각도를 위한 성형을 하는 것이다.

Fig. 15는 스프링백이 일어난 후의 소재표면(upper shell)에서의 주변형률(1st principal strain)의 분포를 도시한 것이다. 굽힘부의 최대 두께감소율은 24.8%, 최대 주변형률은 36.5%에 달하고 있음을 알 수 있다.

(2) 2 차 성형(제6 공정) : 역시 디플렉터가 제 역할을 하기 위한 형상을 결정짓는 공정이다.

Fig. 16은 스프링백이 일어난 후의 소재표면(lower shell)에서의 주변형률의 분포를 도시한 것이다. 그림에 표시된 바와 같이 굽힘부의 최대 주변형률은 22.0% 정도로 나타났다.

(3) 3 차 성형(제8 공정) : 2 차 성형공정이 끝난 후에는 연결부의 길이를 확보하기 위한

전단(slitting) 작업이 필요하다. 유한요소해석을 수행함에 있어서 1 개의 절점을 2 개로 분리시키는 과정에서 직선을 유지하기가 힘들고, 2 차 성형공정 해석결과를 'remeshing' 및 'mapping' 작업을 통해 3 차 성형공정으로 넘기는 과정이 수작업으로 이루어져야 하므로, 이를 효율적으로 수행하기 위하여 초기소재를 모델링 할 때부터 이 전단선 부분을 따른 절점들을 미리 2 개의 절점으로 분리시킨 후에 강체로 묶어주었다가 2 차 성형공정이 끝난 후 이 절점들의 강체 구속을 풀어줌으로써 전단공정을 구현하는 데 따르는 어려움을 해결하였다.

Fig. 17은 스프링백 이후의 소재표면(upper shell)에서의 주변형률 분포를 나타낸 것이다. 이 공정에서의 변형은 타 공정에 비하여 상당히 작은 수준이므로 부식균열과 관련한 특별한 문제는 없을 것으로 판단된다.

(4) 4 차 성형(제 9 공정) : Fig. 18로부터 스프링백 후 굽힘부의 최대 주변형률이 36.7% 정도임을 알 수 있다.

한편, 스프링백 해석으로부터 최종 성형제품에 남아있는 잔류응력의 유무와 크기를 평가하였다. Fig. 19에서 굽힘부 바깥쪽 가장자리와 화살표로 표시한 방향으로 상당한 인장 잔류응력이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이 위치와 방향은 실제 부식시험에서 많은 시편들에 공통된 파단면의 위치 및 방향과 일치하는 사실을 발견할 수 있다(Fig. 20 사진 참조). 이러한 결과로부터 당초 예측한 바와 같이 인장 잔류응력이 부식파괴를 일으키는 주요인자이며, 따라서 잔류응력의 제거 또는 감소가 부식파괴의 예방에 중요한 해결책임을 알 수 있다. 또한, 유한요소해석으로 잔류응력의 존재 위치와 크기를 계산함으로써 부식파괴의 발생 여부와 위치를 예측하는 것이 가능함을 확인할 수 있다.

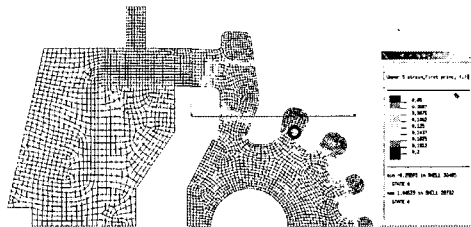


Fig. 15. 1 차 성형 스프링백 후의 주변형률(ϵ_1) 분포.

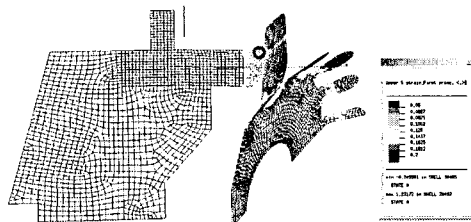


Fig. 16. 2 차 성형 스프링백 후의 주변형률(ϵ_1) 분포.

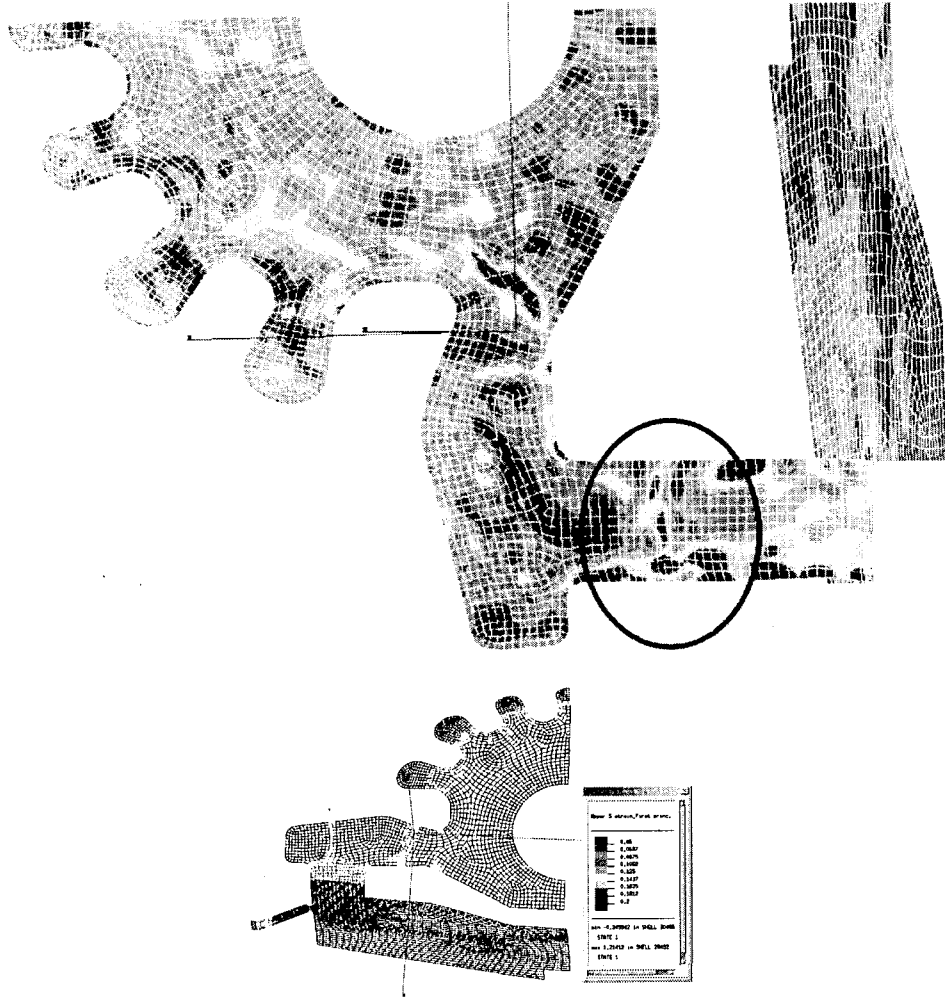


Fig. 17. 3차 성형 스프링백 후의 주변형률(ϵ_1) 분포.

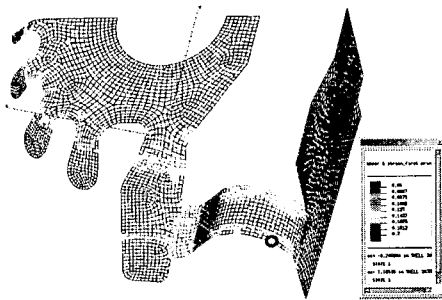


Fig. 18. 4차 성형 스프링백 후의 주변형률 분포.

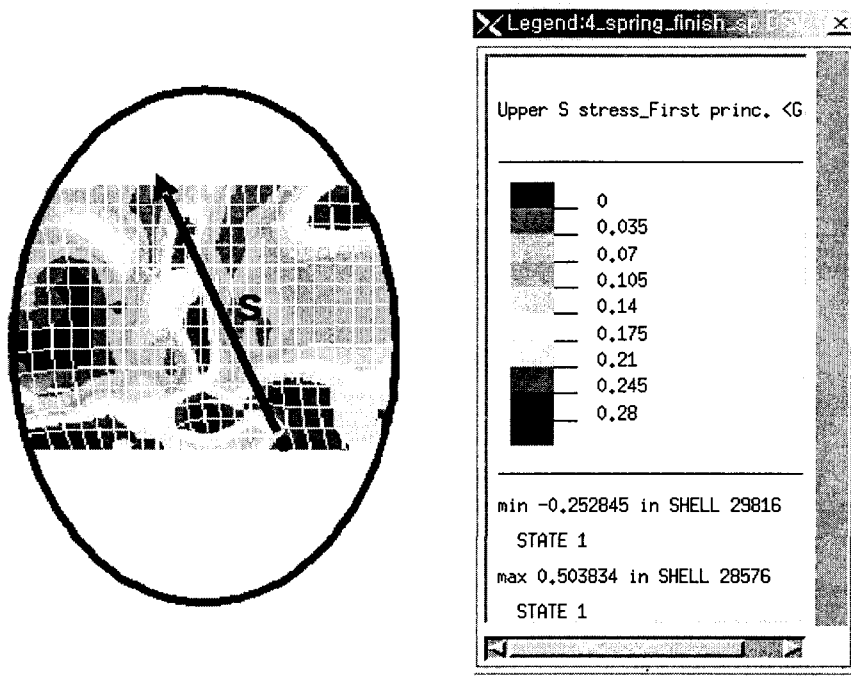


Fig. 19. 최종성형제품의 잔류응력 분포.



Fig. 20. 디플렉터에 발생한 부식파괴 사진.

3. 결론

본 연구의 목적인 측벽형 스프링클러 헤드 디플렉터의 부식파손을 유발하는 요인을 규명

하기 위하여 비선형 대변형 유한요소 해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 그 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 상용 유한요소 해석 코드 PAM-STAMP를 이용하여 디플렉터 연속성형 공정 중 전단 공정을 제외한 4 차례의 성형공정에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

(2) 각 성형공정에서의 두께감소율과 주변형률 분포를 계산하고 그 최대값과 위치를 파악함으로써 성형공정 및 금형 설계 상의 가능한 문제점을 조사하였다.

(3) 연속성형 공정의 해석에서 각 성형공정 후에는 스프링백 해석을 실시하였으며, 계산된 모든 상태변수들은 다음 공정의 입력값으로 전달되도록 하였다.

(4) 최종 성형공정을 마친 후에 잔류응력의 분포를 평가하였다. 큰 인장 잔류응력이 남아 있는 위치가 부식시험 후 많은 시편들에서 발견된 파단면의 위치와 일치한다는 사실로부터 성형공정 해석을 통하여 부식파괴에 가장 취약한 부분을 예측할 수 있음을 확인하였다.

(6) 유한요소해석의 기법과 결과는 제품의 품질, 즉 내부식성의 향상과 내구수명의 연장을 위한 성형공정의 개선과 금형설계 과정에 활용될 수 있다.

참고문헌

1. AutoCAD 2000 User Manual, 2000.
2. SolidWorks 2001 Training Manual, 2001.
3. HyperMesh 3.0 Training Manual, Altair Corporation, 1999.
4. <http://www.matweb.com>
5. PAM-STAMP User Manual, 2001.