

초소성 블로우포밍을 이용한 연소기 외피 성형해석 Superplastic Blow Forming Simulation of Combustion Chamber Outer Case

*#윤종훈¹, 이영무², 이호성¹

*# J. H. Yoon(yjh@kari.re.kr)¹, Y. M. Yi², H. S. Lee¹

¹ 한국항공우주연구원 발사체미래기술연구소, ² 한국항공우주연구원 발사체기술실

Key words : blow forming, combustion chamber, mould cavity, forming time, thickness distribution

1. 서론

위성 발사체 엔진시스템을 구성하는 연소기챔버는 냉각채널을 갖는 재킷(jacket) 형태로 되어있다. 즉, 냉각편을 가지면서 열전달 특성이 좋은 크롬동합금 재질의 내피와 냉각유로의 유동압력으로 인한 구조강도를 담당하면서 용접성이 좋은 듀플렉스강 재질의 외피로 구성된다. 기존의 연소기챔버 외피는 내피와의 조립성으로 인해 3부분으로 분할 제작한 뒤 용접으로 전체조립체를 구성하였으나 본 연구에서는 듀플렉스강이 갖는 초소성 성질을 이용하여 초소성 블로우포밍 공정으로 제작하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 초소성 블로우포밍 성형시 요구되는 최소 두께 이상을 가지면서 성형시간을 최적화 하고자 3가지 형태의 금형형상에 대해 유한요소해석을 수행하였다.

2. 해석대상 금형형상

본 연구에서 고려한 해석대상 금형의 종류는 3가지로서 처음부터 3가지 형상을 고려한 것은 아니고 초기 형상에서 2회의 수정을 실시한 것으로서, 다만 결과정리의 편의상 3가지 형상을 고려한 것으로 하고자 한다.

우선 초기 설계에 해당하는 금형형상중 하부 금형형상은 아래에 나타낸 그림과 같다. 상부 금형형상은 하부와 동일하므로 생략하기로 한다. 여기서 제품구간은 그림에 나타낸바와 같이 노즐목을 기준으로하여 좌측으로 좌측으로 101.3mm, 우측으로 35.6mm의 길이를 가지며 그 이외의 구간은 성형을 원활히 하면서 제품 트리밍 여유를 준 것이다.

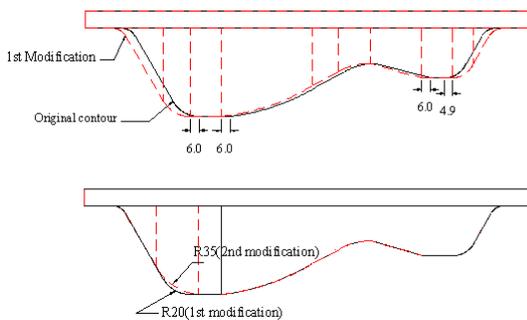


그림 1. 금형형상 비교

3. 해석조건

3.1 해석대상의 유한요소 모델링

연소기 외피의 초소성 성형해석을 위한 초기 모델형상은 전체 모델의 상하, 좌우 대칭성을 고려하여 실제 해석에서는 1/4 형상만을 고려하였다. 여기서 면 ABCD는 초기 판재를, 금형형상은 Pro/E에서 solid modeling한 후 IGES 포맷으로 변환하여 MSC MARC의 전용 전후처리기인 MANTAT에서 읽어 들었다.

초기 판재는 두께 11.0mm를 갖는 4절점 선형 사각형 membrane 요소를 이용하여 이산화 시켰으며 full integration type (element type number 18)을 적용하였다.

3.2 경계조건 및 물성값

위에서 나타낸 초기 해석모델에서 초기 판재에 대해서 변위 및 압력 경계조건을 부여하였으며 구체적으로는 다음과 같다.

- 변 AB : 대칭경계조건 ($U_z=0$)
- 변 AD, BC, CD : 구속경계조건 ($U_x=U_y=U_z=0$)
- 면적 ABCD : 압력경계조건

여기서 세 번째 경계조건의 압력값은 해석을 통해서 시간의 함수로 구해야 할 값이다.

한편, 본 해석에 사용된 물성값은 UNS31803의 Free bulging test를 통해서 구한 유동응력식[1]을 사용하였으며 최적 변형률 속도 및 마찰상수 값은 가정하여 해석에 사용하였다. 구체적인 값들은 아래에 정리한 바와 같다.

- 유동응력식 : $\bar{\sigma} = K\dot{\epsilon}^m$, $K=2600\text{MPa}$, $m=0.55$
- 최적 변형률속도 : 0.0002 /sec
- 마찰모델 및 마찰상수 : Coulomb friction, 0.15
- 최대 성형압력 제한 : 7.0MPa

4. 해석결과

4.1 초기 설계모델의 해석결과

다음의 그림 2는 초기 설계모델에 대한 해석결과를 나타내는 것으로서 그림 2(a)는 판재의 성형 후 두께분포를 그림 2(b)는 판재-금형간의 접촉상태를 나타낸 것이다. 여기서 해석의 종료 시점은 제품구간과 트리밍 여유구간이 형성된 시점을 의미한다.

판재-금형간의 접촉상태 변화를 나타내는 그림에서 알 수 있듯이 금형과의 접촉은 노즐목에서 접촉이 먼저 일어난 다음 점진적으로 노즐목의 왼쪽부분부터 판재와 금형간의 접촉이 진전되는 형태를 나타내었다. 또한 성형시간이 약 5910sec에 도달하였을 때 판재는 제품 및 트리밍 여유구간까지는 충분히 성형이 되었음을 알 수 있고 단지 금형 오른쪽 필렛반경 근처에서 국소적으로 완전한 접촉을 이루지 못함을 알 수 있다. 하지만 전술한 바와 같은 이유로 인해 성형은 본 시점에서 종료하는 것이 금형수명 및 판재 산화측면에서 유리할 것으로 판단된다.

한편, 판재의 두께는 초기 11.0mm에서 시작하여 성형종료 시점인 5910sec에서 약 5.59mm까지 감소하였으며, 목표로 하는 5.0mm보다는 다소 가공여유를 가짐을 알 수 있다. 하지만 연소기 외피의 형상이 축대칭임을 감안한다면 원주방향 용접부의 두께가 약 9.4mm에서 5.59mm까지 불균일하게 변하므로 상대품과의 용접이 문제가 될 수 있을 것으로 판단된다. 이를 개선하기 위해서는 초기 판재의 두께 분포를 조절하거나 내면 가공을 통해서 해결해야 할 것이다.

4.2 1차 설계수정 모델의 해석결과

초기 설계모델에 대한 해석을 수행한 후 성형시간의 단축과 최소 두께 값의 개선을 위해서 1차 설계수정을 하였으며 이에 대한 해석을 수행해 보았다. 설계변경 내역에 대한 서술은 앞 절에서 하였기 때문에 생략하기로 한다.

다음의 그림 3 역시 해석시간에 따른 판재두께분포와 판재-금형간 접촉상태를 각각 나타내는 그림인데, 성형시간 단축과 최소 두께의 개선을 목적으로 1차 설계수정을 하였으나 6000sec에 도달하여도 판재-금형간의 비접촉구간이 초기 설계에 비해 더 크며, 최소 두께 또한 약 5.02mm로 초기 설계에 비해 더 얇아지는 결과를 나타내었다.

따라서 본 설계 수정 모델은 초기 모델에 비해 상대적으로 부적합한 것으로 판단된다.

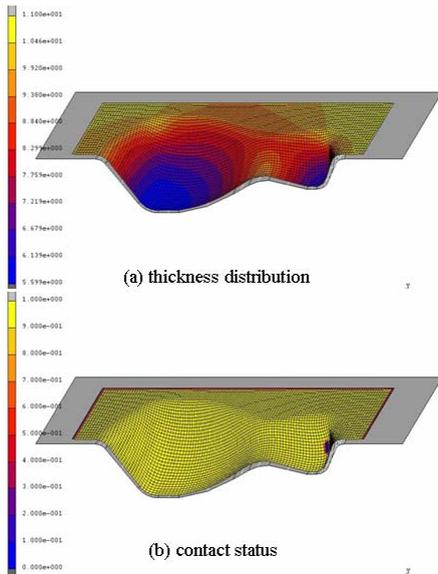


그림 2. 초기 설계모델 해석결과(t=5910sec)

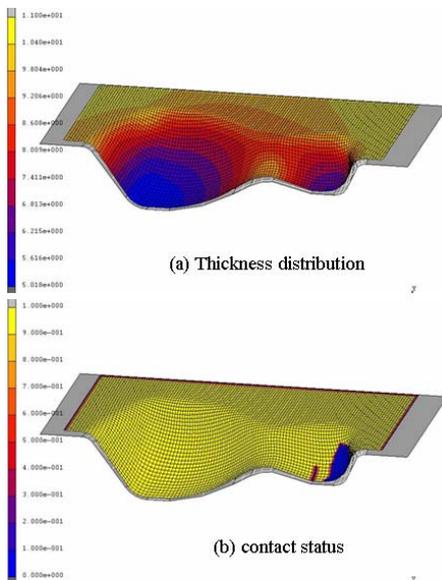


그림 3. 1차 설계수정 해석결과 t=6000sec)

4.3 2차 설계수정 모델의 해석결과

1차 설계수정을 통해서 개선된 결과를 얻을 수 없었기에 추가적인 설계수정을 하였으며 트리밍 여유구간과 금형 경사면이 만나는 곳의 필렛반경을 더 증가시켜 성형시간 단축과 두께분포의 개선을 시도하였다.

그림 4는 2차 설계변경 모델에 대한 해석결과를 나타내는 그림이다. 여기서 최소 두께는 약 5.36mm로서 1차 설계수정에 비해서 다소 개선되었으나 초기 설계안 보다는 더 얇아진 것을 알 수 있다. 따라서 금형 필렛반경의 증가는 성형시간 단축에는 도움이 되지 못하나 두께분포의 균일성에는 도움이 될 것으로 판단된다. 향후 초기 설계안에서 필렛반경을 더 증가시켜 해석을 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.4 성형압력 프로파일 비교

본 해석에서 고려한 3가지 금형 설계안에 대해서 성형압력 프로파일을 비교해 보면 다음의 그림 5와 같다. 초기 설계모델은 약 4.7MPa과 4.6MPa에서 변곡점을 가지는 형상을 나타낸 반면 1차 및 2차 설계수정의 경우는 5.5MPa과 4.9MPa에서 변곡점을 갖는 형상을 보였을 뿐만 아니라 두 경우 모두 거의 유사한 압력 프로파일을 나타내었다. 한편, 최대 제한 성형압력에 도달

하는 시간은 초기 모델이 나머지 2경우에 비해서 약 500sec 더 빠른 것으로 예측되었다. 현재 본 연구에서 압력 조절은 수동으로 하기 때문에 압력 상승 후 감소하는 형태로의 압력조절은 어려우며 따라서 변곡점의 차이가 작은 경우가 압력조절에 유리하므로 설계수정안 보다는 초기 설계안이 더 쉬울 것으로 판단된다. 또한, 실제 성형공정에서는 최대 성형압이 낮고 성형시간이 짧을수록 금형수명이 더 길어지므로 초기 설계안으로 성형공정 조건을 확립하되 최대 성형압은 해석에서 적용한 7MPa과 동일하게 하거나 이보다는 약간 낮은 수준으로 조절할 필요가 있을 것으로 판단된다.

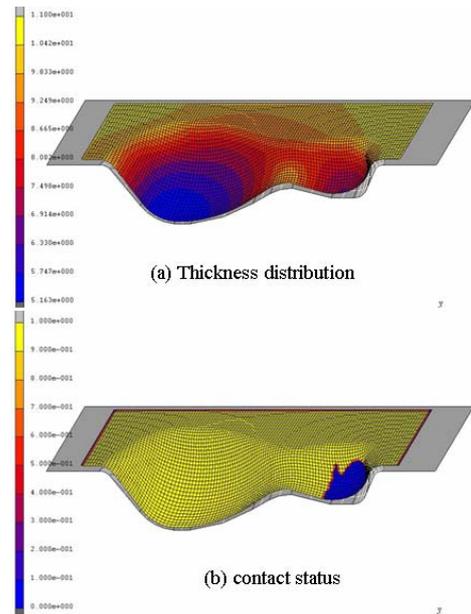


그림 4. 2차 설계변경 해석결과(t=5010sec)

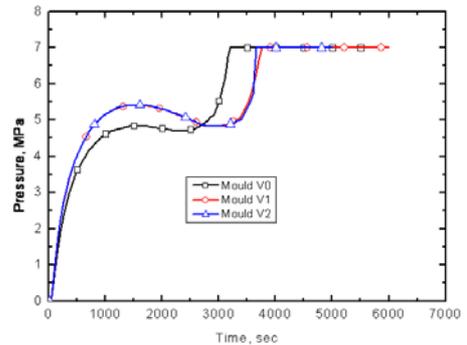


그림 5. 성형압력 프로파일 비교

5. 결론 및 향후계획

이상에서 수행한 금형설계 및 이에 대한 성형해석으로부터 초기 설계안이 설계수정안보다 최종 성형품의 두께분포 및 성형시간 측면에서 더 유리할 것으로 예측된다. 따라서 외피 성형용 금형은 초기 설계안으로 제작을 하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

향후, 정확한 성형시간 예측을 위해서는 최적 변형률속도를 정량적으로 결정할 필요가 있으며 free bulging test로부터 이를 유추할 수 있는 방법에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 윤종훈, "Free Bulging Test 시험결과 정리", KARI-TN-08-003.