

피라미드형 금속 내부구조체를 가진 얇은 금속샌드위치 판재의 결함 모드

안 동 규^{*†}, 선 향 선^{*}

* 조선대학교 기계공학과

Imperfection Mode of Thin Metallic Sandwich Plate with Pyramidal Metallic Inner Structures

Dong-Gyu Ahn^{*†} and Hyang-Sun Sun^{*}

* Dept. of Mechanical Engineering, Chosun Univ.

(Received June 13, 2012 ; Revised September 3, 2012 ; Accepted January 11, 2013)

Key Words: Imperfection Mode(결함 모드), Thin Metallic Sandwich Plate(얇은 금속 샌드위치 판재), Pyramidal Metallic Inner Structures(피라미드형 금속 내부구조체), Finite Element Analysis(유한요소해석), Impact Response(충격 응답)

초록: 피라미드형 금속 내부구조체를 가진 얇은 금속 샌드위치 판재는 외판들과 내부구조체를 연속적 프로젝션 용접하여 제작한다. 이 용접공정에서 발생하는 용접압력 때문에 내부구조체의 변형에 의한 내부구조체의 결함이 발생한다. 내부구조체의 결함은 저속 충격하중이 부가된 얇은 금속 샌드위치 판재의 응답에 영향을 미친다. 이 논문에서는 피라미드형 금속 내부구조체를 가진 얇은 금속 샌드위치 판재의 지배적인 결함 모드를 도출하고자 한다. 3 차원 유한요소해석을 통하여 여러가지 결함모드에 대한 얇은 금속 샌드위치 판재의 충격 응답 변화를 고찰하였다. 또한 유한요소해석 결과와 낙하 충격시험 결과를 비교/분석 하였다. 이 결과로부터 피라미드형 금속 내부구조체를 가진 얇은 금속 샌드위치 판재의 지배적인 결함모드를 4 개 지주들에 대칭 결함이 적용된 전방형 대칭 결함모드로 선정하였다.

Abstract: Thin metallic sandwich plate with pyramidal metallic inner structures is manufactured from a continuous projection welding between face sheets and inner structures. Due to the welding pressure, imperfections of inner structures induced by the deformation of the inner structures occur. The imperfections affect the response of the thin metallic sandwich plate subjected to low-velocity impact loading. The goal of this paper is to obtain a proper dominant imperfection mode of the thin metallic sandwich plate with pyramidal metallic inner structures. The variation of impact responses of the thin metallic sandwich plate for different imperfection modes are investigated by finite element analysis. The results of the FE analysis are compared to those of drop impact experiments. From the results of the comparison, it has been shown that the dominant imperfection mode of the thin metallic sandwich plate with pyramidal metallic inner structures is all type of symmetric imperfection mode with symmetrical imperfections of four struts.

- 기호설명 -

η : 흡수된 충격에너지

- λ_s : 대칭 결함모드에서 내부구조체의 편심량
- λ_a : 비대칭 결함모드에서 내부구조체의 편심량
- F_w : 단위폭 당 접촉 하중
- δ : 충격헤드의 변위

1. 서 론

최근 자동차/선박/항공기 등 수송기계 산업군에서는 구조 경량화를 통한 CO₂ 배출 감소와 에너지 효율 증대에 관련된 연구개발에 집중하고 있다.⁽¹⁾ 구조 경량화의 한가지 방향으로 금속 외판들과 주기적 반복구조를 가지는 금속 (Periodical cellular metal: PCM) 내부구조체를 용접/접합하여

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2012. 6. 26-27., 대전컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, smart@chosun.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

제작하는 경량 금속 샌드위치 판재 (Light-weight metallic sandwich plate) 개발에 대한 연구가 확대되고 있다.⁽²⁾

대부분의 PCM 내부구조체를 가지는 금속 샌드위치 판재의 경우 두께가 두껍고 강성이 커서, 성형공정에 의하여 제작되는 부품에는 적용하기 어렵다.⁽³⁾ PCM 내부구조체를 가지는 금속 샌드위치 판재는 외판들과 PCM 내부구조체들을 용접이나 접합공정으로 결합한다.⁽³⁾ 이때 용접 및 접합성을 향상시키기 위해서 압력이 부가 되고, 이 압력에 의하여 용접 체적 변화와 내부구조체 초기 변형이 발생한다.^(4,5) 이러한 용접부 체적과 내부구조체 변형은 PCM 심재를 가지는 금속 샌드위치 판재의 특성 변화에 영향을 미친다. 금속 샌드위치 판재의 지배적 결합모드는 기하학적으로 관찰될 수 있다. 정확한 내부구조체 기하학적 결합모드 분석을 위해서는 외판과 내부구조체를 분리하여야 한다. 외판과 내부구조체의 분리과정에서 용접부의 파손과 내부구조체의 변형이 발생하여 내부구조체의 초기 변형 결함을 고찰하기는 어렵다. 또한, 내부구조체 초기 결합이 금속 샌드위치 판재의 변형형상, 하중-처짐 선도 및 에너지 흡수-처짐 선도등 충격 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해서는 해석과 실험을 통한 분석이 필요하다.

Xue 등은 허니콤을 내부구조체로 가진 샌드위치 판재에 동적 압축조건이 부가되었을 때, 허니콤 벽의 결합에 따른 샌드위치 판재의 응력/변형을 분포 변화에 대한 연구를 수행하였다.⁽⁶⁾ Lee 등은 피라미드형 금속 트러스를 내부구조체로 가진 경량 샌드위치 판재에 고 변형률 속도의 충격하중이 부가되었을 때, 피라미드형 금속 트러스의 각 지주 (Strut) 들의 결합에 따른 판재의 응력/변형 분포 변화 및 샌드위치 판재 거동 변화를 유한요소해석을 이용하여 분석/고찰하였다.⁽⁷⁾

본 논문에서는 저속 충격조건에서 피라미드형 금속 내부구조체를 가지는 샌드위치 판재의 충격응답을 잘 묘사할 수 있는 지배적인 내부구조체 결합모드를 도출하고자 한다. 3 차원 유한요소해석을 통하여 여러가지 결합모드들에 대한 금속 샌드위치 판재의 충격응답 변화를 정량적으로 고찰하였다. 또한 결합이 고려되지 않은 경우와 결합이 고려된 경우의 해석 결과를 비교/분석 하였다.

2. 내부구조체의 결합모드

본 연구에서는 다점 전기 저항 용접으로 제작된

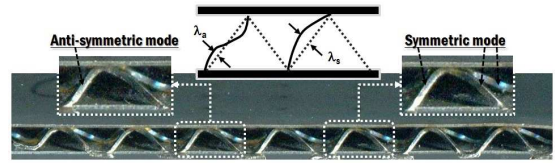


Fig. 1 Imperfections of pyramidal inner structures

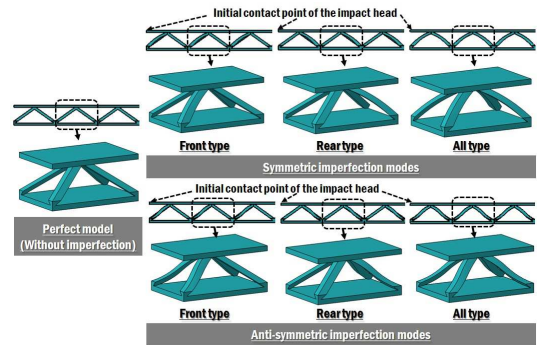


Fig. 2 Classification of imperfection modes

피라미드형 금속 내부구조체를 가진 얇은 금속 샌드위치 판재 시편을 광학현미경으로 관찰/분석하여 대표적인 내부구조체의 결합 모드를 선정하였다. 시편을 관찰한 결과 Fig. 1 과 같이 피라미드형 금속 내부구조체의 지주가 1 차 좌굴 (1st buckling) 형상과 같이 휘어지는 대칭 결합모드 (Symmetric imperfection mode) 가 가장 일반적인 내부구조체 결합모드로 나타났다. 또한 Fig. 1 과 같이 피라미드형 금속 내부구조체의 지주가 2 차 좌굴 (2nd buckling) 형상으로 휘어지는 비대칭 결합모드 (Anti-symmetric imperfection mode) 가 일부에서 나타나는 것을 알 수 있었다. 대칭 결합 모드에 대한 내부구조체 지주의 편심량 (λ_s) 을 측정된 결과 평균적으로 0.20 mm 정도였다. 그러나 비대칭 결합 모드에 대한 지주의 편심량 (λ_a) 은 0.06 mm 이하로 매우 작았다.

이 결과들로부터 본 연구에서는 피라미드형 금속 내부구조체를 가지는 얇은 금속 샌드위치 판재의 결합모드를 Fig. 2 와 같이 대칭과 비대칭 결합모드를 기준으로, 결합 발생 위치에 따라 전방 (Front), 후방 (Rear) 및 전체 (All) 형 모드로 구분하였다. 내부구조체에서 충격 헤드 (Impact head) 와 가까운 쪽에 결합 발생 지주가 위치한 경우를 전방형 모드로 정의하고, 충격헤드와 먼 쪽에 결합 발생 지주가 위치한 경우를 후방형 모드로 정의하였다. 4 개의 지주 모두에 결합이 적용된 경우를 전체형 결합모드로 정의하였다.

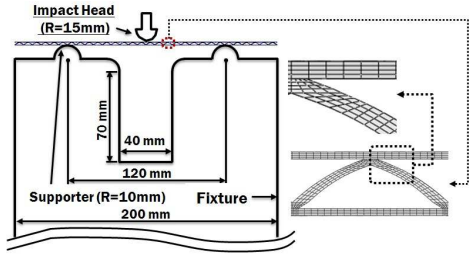


Fig. 3 Finite element modeling

내부 구조체의 4 개 지주 중 시편의 폭방향으로 동일 평면에 위치한 지주들에는 같은 결함을 적용하였다. 그러므로 전방과 후방형 결함모드들의 경우 각각 2 개의 지주들에 결함이 적용되었다.

3. 유한요소해석 및 낙하충격 실험

3 차원 유한요소해석은 Fig. 3 과 같은 평면 변형형 낙하 충격 시험 조건⁽⁵⁾에 대하여 수행하였다. 유한요소 해석시 충격헤드와 충격지지대는 강체로 가정하였다. 충격지지대를 아래에 위치한 고무판은 점탄성 특성을 고려하기 위하여 Neo-Hookean의 Hyper-elastic 모델⁽⁹⁾을 적용하였다. 피라미드형 금속 내부구조체와 상하 외판들은 두께방향 굽힘 현상을 잘 묘사하기 위하여 4 층으로 된 육면체 요소로 유한요소격자를 생성하였다. 얇은 샌드위치 판재의 두께와 길이는 각각 2.7 mm 와 200 mm 이다. 외판과 내부구조체는 각각 STS304 와 연강 재료를 사용하였다. 외판의 두께는 0.3 mm 이고, 시편내의 길이방향 내부구조체 수는 29 개 였다.

외판과 내부구조체의 정적 기계적 물성은 인장 시험을 통하여 취득하였다. 변형을 속도 영향을 고려하기 위하여 고속 인장 시험을 수행하여 변형을 속도별 진응력-진변형을 선도를 도출하였다. 유한요소해석에서는 변형을 속도가 고려된 진응력-진변형을 선도를 구간별 선형 모델 (Piecewise linear model)⁽⁸⁾로 표현하였다. ABAQUS V6.11 Explicit 을 이용하여 유한요소해석은 수행하였다.

평면 변형형 낙하 충격 시험에서 충격 높이는 유한요소해석 모델과 동일하게 200 mm 로 선정하였다. 충격 헤드의 무게와 반경은 각각 11.1 kg 과 15 mm 이다. 낙하 충격 시험중 접촉하중과 변위는 로드셀과 LVDT (Linear variable differential transformer) 를 이용하여 측정하였다. 이 측정값들을 마이크로프로세서 기반 데이터 취득장비로 실시간 측정/저장 되었다. 낙하 충격시험 결과로 취득한 단위폭 당 접촉하중-변위선도와 흡수 충격에

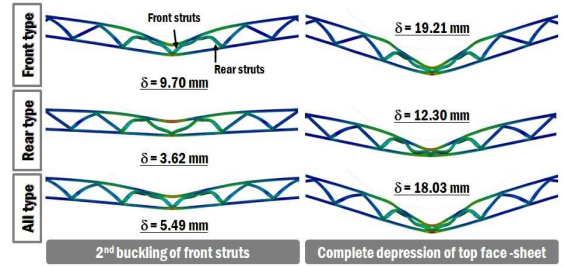


Fig. 4 Deformed shapes of thin sandwich plate for different symmetrical imperfection modes

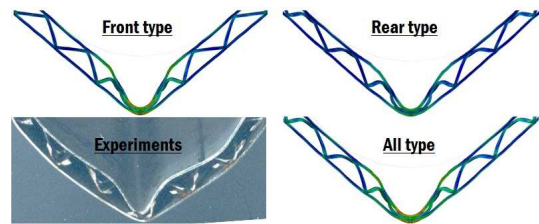


Fig. 5 Finally deformed shapes of thin sandwich plate for different symmetrical imperfection modes

너지-변위선도 및 시편 충격부 변형형상을 기준으로 결함모드별 유한요소해석 결과와 실험결과를 비교하여 지배적인 결함모드를 선정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 대칭 결함모드에 따른 얇은 샌드위치 판재 충격 응답 변화

Fig. 4 와 5 는 유한요소해석결과로 얻어진 대칭 결함모드가 전방, 후방 및 4 개 지주들 전체에 적용된 경우에 대한 피라미드형 금속 내부구조체를 가진 얇은 금속 샌드위치 판재의 변형 형상이다.

Fig. 4 에서 전방형 대칭 결함모드의 경우 전방부 지주의 결함이 지주들의 2 차 좌굴 발생 방향과 반대방향으로 위치하여, 시편 중앙에 위치한 전방부 지주들의 2 차 좌굴을 지연시키는 것을 알 수 있었다. 이로 인하여 상부 외판이 내부구조체와 접촉하는 상부 외판 완전 함몰 발생 변위가 다른 2 가지 대칭 결함모드보다 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4 에서 후방형 대칭 결함모드가 내부구조체에 적용된 경우는 후방부 지주들의 1 차 좌굴을 빨리 발생시켜, 상부 외판의 국부 회전 변위를 증가시키는 것을 알 수 있었다. 그러므로, 후방형 후방부 지주들의 1 차 좌굴 발생 변위가 감소하며, 외판의 완전 함몰 발생 변위도 현저히 감소하는

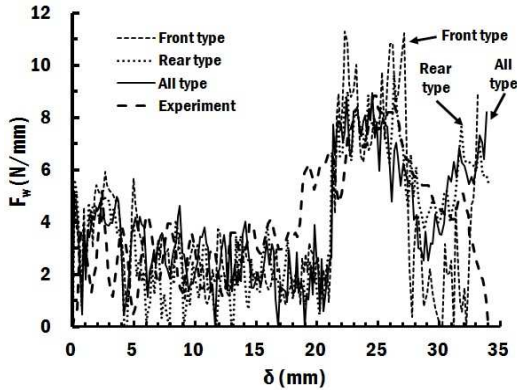


Fig. 6 Contact force per width-displacement curves for different symmetrical imperfection modes

것을 알 수 있었다.

내부구조체 지주들 모두에 대칭 결함이 적용된 경우는 전방부와 후방부 지주들에 각각 결함이 적용된 경우의 평균 보다 조금 작은 변위에서 전방부 지주들의 2 차 좌굴이 발생하였다. 이 현상은 후방부 지주들에 적용된 대칭 결함에 의한 용접부 회전 변위 증가가 상부 외판의 회전 변위를 증가시켜, 전방부 지주들의 2 차 좌굴을 가속화 시키기 때문으로 사료된다. 이로 인하여 상부 외판의 완전 함몰이 발생하는 충격 헤드 변위도 전방부 지주들에 결함이 적용된 경우보다 조금 적게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 5 는 낙하 충격시험 결과 최종 변위인 충격 헤드 변위 34 mm 에서의 해석 및 실험 결과 취득된 변형 형상들을 비교한 결과이다. Fig. 5 에서 전방부 지주들에만 대칭 결함이 적용된 경우는 중앙부로부터 첫번째 내부구조체와 용접된 하부 외판의 국부 주름 현상과 내부구조체의 후방부 지주들의 변위가 거의 묘사 되지 않는 것을 알 수 있었다. 후방부 지주들에만 대칭 결함이 적용된 경우는 Fig. 5 와 같이 중앙부 첫번째 내부구조체의 전방부 지주들의 변형 형상이 실험 결과보다 다소 과도하게 표현되며, 첫번째 내부구조체와 상부 외판의 용접점 부근의 외판 회전각이 다소 적게 예측 되는 것을 알 수 있었다. 전/후방부 지주들 모두에 대칭결함이 적용된 경우는 하부 외판 국부 주름 발생, 전방부 지주들의 2 차 좌굴, 후방부 지주들의 1 차 좌굴, 첫번째 내부구조체와 상부 외판의 용접점 부근의 외판 회전각 측면에서 해석에서 얻어진 변형형상과 실험에서 취득된 변형형상이 거의 유사함을 알 수 있었다.

Fig. 6 에서 전방부 지주들에 대칭 결함이 적용된 경우, 단위폭 당 접촉하중이 크게 예측되는

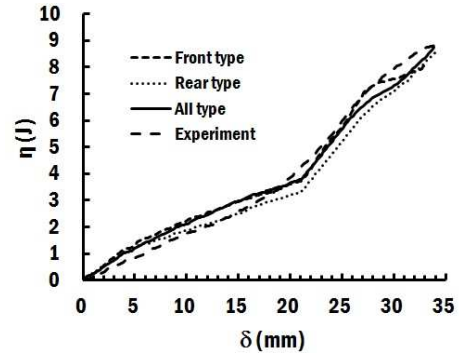


Fig. 7 Absorbed impact energy-displacement curves for different symmetrical imperfection modes

것을 알 수 있었다. 이 현상은 전방향 대칭 결함 모드가 내부구조체의 좌굴을 지연시켜 판재의 변형 저항과 강성을 증가시켰기 때문으로 사료된다. 충격헤드 변위가 27 mm 이상에서, Fig. 6 과 같이 전방향 대칭 결함모드가 적용된 해석에서 예측된 단위폭 당 접촉하중-변위선도가 실험결과와 현저한 차이를 나타내었다. 이 차이에 의하여 Fig. 7 의 전방향 대칭 결함모드가 적용된 해석으로 계산된 흡수 충격에너지-변위 선도가 변위 27 mm 이상에서 실험 결과와 다르게 예측됨을 알 수 있었다.

Fig. 6 에서 후방부 지주들에 대칭 결함이 적용된 경우, 변위 22 mm 이상에서는 해석 결과 얻어진 단위폭 당 접촉하중-변위 선도가 실험 결과와 거의 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 변위 22 mm 미만에서는 단위폭 당 접촉하중이 적게 예측됨을 알 수 있었다. 이 현상에 따라 Fig. 7 과 같이 후방향 대칭 결함모드가 적용된 해석 결과 얻어진 흡수 충격에너지-변위 선도가 약 4 mm 의 변위부터 기울기가 감소하면 전체적으로 에너지 흡수 측면에서 실험결과와 해석결과의 차이를 나타나게 하였다.

4 개의 내부구조체 지주들 모두에 대칭 결함이 적용된 경우의 단위폭 당 접촉하중-변위 선도는 Fig. 6 과 같이 3 가지 대칭 결함모드가 적용된 경우중 가장 실험 결과와 유사하였다. 또한 전체 지주들에 대칭 결함이 적용된 경우의 흡수 충격에너지-변위 선도는 3 가지 경우중 실험 결과 취득된 흡수 충격에너지-변위 선도와 가장 유사하였다. 특히 최종 변위에서의 대칭 결함모드가 적용된 경우의 흡수 충격에너지는 실험결과와 0.27 J 정도 밖에 차이가 나지 않았다.

위 결과들로부터 4 개 지주에 대칭 결함이 적용된 전체형 대칭 결함모드를 적합한 대칭 결함 모드로 선정하였다.

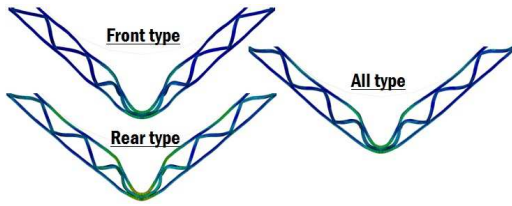


Fig. 8 Finally deformed shapes of thin sandwich plate for different anti-symmetrical imperfection modes

4.2 비대칭 결함모드에 따른 얇은 샌드위치 판재 충격 응답 변화

전방, 후방 및 전체 지주들에 비대칭 결함모드가 적용된 경우들에 대한 유한요소해석 결과, 3 가지 비대칭 결함 모드가 내부구조체에 적용된 샌드위치 판재의 변형 거동이 모두 거의 유사하게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 비대칭 결함이 후방부 지주들에만 적용된 경우 상부 외판의 다른 2 가지 경우 보다 완전 함몰 변위가 감소하는 것을 알 수 있었다. 이 현상은 후방형 대칭 결함모드가 적용된 경우와 유사하게 결함이 후방부 지주들의 좌굴을 빨리 발생시켜 상부 외판의 국부 회전 변위를 증가시켰기 때문으로 사료된다.

Fig. 8 은 3 가지의 비대칭 결함모드가 적용된 경우에 대한 얇은 샌드위치 판재의 최종 변형 형상과 충격 실험 결과 취득된 시편의 최종 변형 형상이다. Fig. 8 에서 전방형 비대칭 결함모드가 적용된 경우는 실험결과와 달리 외판에 과도한 주름이 발생하는 것을 알 수 있었다. 그러나 후방형 비대칭 결함모드와 4 개 지주에 비대칭 결함이 적용된 경우의 샌드위치 판재 최종 변형 형상은 실험 결과와 유사함을 알 수 있었다.

Fig. 9 는 전방, 후방 및 전체형 비대칭 결함모드가 적용된 경우에 대한 해석 결과 얻어진 단위폭 당 접촉하중-변위 선도를 낙하 충격시험에 취득된 단위폭 당 접촉하중-변위 선도를 비교한 결과이다. Fig. 9 에서 3 가지 비대칭 결함모드들의 경우 충격헤드 변위가 약 26.5 mm 이하인 경우에는 단위폭당 접촉하중-변위 선도 측면에서 실험 결과와 해석 결과가 다소 비슷한 것을 알 수 있었다. 그러나, 충격헤드 변위가 약 26.5 mm 를 초과하면 해석에서 취득된 단위폭 당 접촉하중-변위 선도와 실험에서 얻어진 단위폭 당 접촉하중-변위 선도가 상당히 다르게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 이유로 Fig. 10 의 해석결과 예측된 흡수 충격에너지-변위 선도들이 충격헤드 변위 26.5 mm 부근부터 실험결과와 차이를 나타내는 것으로 사료된다.

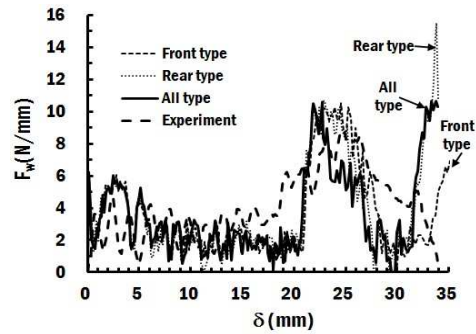


Fig. 9 Contact force per width-displacement curves for different anti-symmetrical imperfection modes

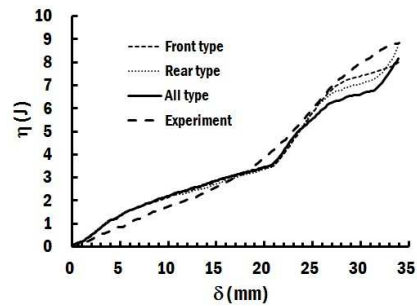


Fig. 10 Absorbed impact energy-displacement curves for different anti-symmetrical imperfection modes

위 결과들로부터 비대칭 결함모드를 적용할 경우 충격 헤드 변위 26.5 mm 이후에 대한 판재의 변형, 접촉하중-변위 선도 및 에너지 흡수 특성을 적절히 묘사하기 어려움을 알 수 있었다.

4.3 지배적인 결함모드 도출 및 결함모드 적용의 필요성

4.1 과 4.2 절의 결과로부터 피라미드형 금속 내부구조체를 가지는 얇은 금속 샌드위치 판재의 지배적인 결함모드를 내부구조체의 4 개 지주들에 대칭 결함이 적용된 전체형 대칭 결함모드로 선정하였다.

Fig. 11 과 같이 내부구조체의 결함이 고려된 경우와 고려되지 않은 경우의 단위폭 당 접촉하중-변위선도를 비교하면, 결함이 고려된 경우가 더 실험 결과에 가까운 단위폭 당 접촉하중-변위선도를 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 내부구조체의 결함이 고려된 경우에 최대 접촉 하중, 최대 접촉 하중 발생후 2 차 최대 접촉하중 발생 위치가 실험 결과와 거의 유사함을 알 수 있었다. 에너지 흡수 특성 또한 내부구조체에 결함모드가 고려되었을 때, 실험결과에 근접하는 결과를 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

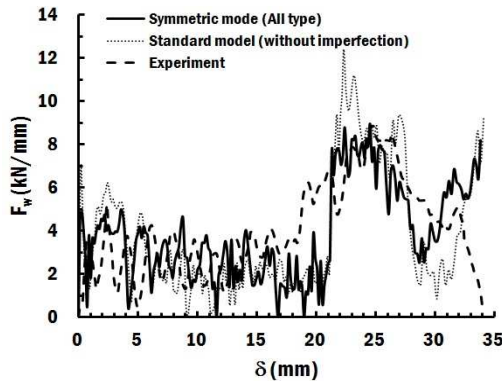


Fig. 11 Comparison of contact force per width-displacement curves of FE model with imperfection mode and that of FE model without imperfection mode

5. 결 론

본 논문에서는 피라미드형 금속 내부구조체를 가지는 얇은 샌드위치 판재의 지배적인 내부구조체 결합모드 도출에 관한 연구를 수행하였다.

첫째, 제작된 피라미드형 금속 내부구조체를 가지는 얇은 샌드위치 판재를 분석/고찰하여 내부구조체에 대칭 및 비대칭 결합모드가 존재함을 알 수 있었다. 대칭 및 비대칭 결합 모드에 대하여 결합 발생 지수 위치에 따라 전방, 후방 및 전체형 모드로 구분하여 후보 결합모드를 분류하였다. 6 가지 결합 모드에 대하여 3 차원 비선형 충돌해석을 수행하였다.

둘째, 해석 결과들을 충격시험 결과와 변형형상, 단위폭 당 접촉하중-변위선도 및 흡수 충격에너지-변위선도 측면에서 비교/분석하였다. 그 결과 내부구조체 전체 지주들에 대칭 결합이 적용되는 전체형 대칭 결합모드를 지배적인 결합 모드로 선정하였다. 비 대칭 결합모드의 경우 충격 헤드 변위 26.5 mm 를 초과하는 변위에서 실제 충격 실험의 변형/하중-변위/에너지 흡수특성을 잘 묘사하지 못함을 알 수 있었다.

셋째, 전체형 대칭 결합모드가 적용된 해석 결과와 결합이 고려되지 않은 해석 결과를 비교하였다. 그 결과 결합이 고려되지 않으면 접촉하중이 크게 예측되며, 충격 변위 28 mm 이상에서 샌드위치 판재의 변형과 에너지 흡수 특성을 적절히 예측하기 어려움을 알 수 있었다.

추후 추가적인 충격조건들과 용접 결합 조건들에 대한 실험 및 유한요소해석을 수행하여, 보다 정확한 지배적인 결합 모드 선정할 예정이다.

후 기

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NRF-2011-013-D00011)

참고문헌

- (1) Park, C. W., Kwon, K. S., Kim, W. B., Min, B. K., Park, S. J., Sung, I. H. and Yoon, Y. S., 2009, "Energy Consumption Reduction Technology in Manufacturing – A Selective Review of Policies, Standards, and Research," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 5, pp. 151~171.
- (2) Wadley, H. N. G., Fleck, N. A. and Evans, A. G., 2003, "Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, Issue 16, pp. 2331~2343.
- (3) Ahn, D. G., Lee, S. H., Jung, C. G., Hahn, G. Y., and Yang, D. Y., 2007, "Mechanical Properties and Failure Characteristics of ISB Panel with Metallic Pyramidal Inner Structures," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188, Issue 1, pp. 521~525.
- (4) Hyun, S. I., Choi, J. E. and Kang, K. J., 2007, "Mechanical Behaviors under Compression in Wirewoven Bulk Kagome Truss," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 31, No. 7, pp. 792~799.
- (5) Ahn, D. G. and Sun, H. S., 2011, "Variation of Impact Characteristics of the Thin Lightweight Metallic Sandwich Plate with Truss Inner Structures According to Welding Imperfections," *Proceedings of 2011 Spring Annual Meeting of Korean Society of Precision Engineering*, pp. 821~822.
- (6) Xue, Z. and Hutchinson, J. W., 2006, "Crush Dynamics of Square Honeycomb Sandwich Cores," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 65, Issue 13, pp. 2221~2245.
- (7) Lee, S., Barthelat, F., Hutchinson J. W. and Espinosa, H. D., 2006, "Dynamic Failure of Metallic Pyramidal Truss Core Materials – Experiments and Modeling," *International Journal of Plasticity*, Vol. 22, Issue 11, pp. 2118~2145.
- (8) Ahn, D. G., Moon, G. J., Jung, C. G., Han, and G. Y., Yang, D. Y., 2008, "Impact Behavior of a STS 304 H Sheet with a Thickness of 0.7 mm," *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 34, No. 1C, pp. 57~71.