전자기 성형과 수치 해석 기술

김대용, 김지훈 재료연구소

[요약문]

전자기 성형 공정은 강한 전이 자기장을 가공하고자 하는 금속에 직접 작용시켜 금속을 변형시키는 가공 기술로 최근 난성형성 소재의 성형 및 이종 소재의 접합 등에 장점을 가지고 있어 관심이 높아지고 있다. 또한, 전자기 성형 공정을 기존의 스템핑, 하이드로포밍과 같은 성형 공정의 단점을 보완하는 공정으로 이용하여 자동차 부품에 적용하려는 연구가 시도되고 있다. 전기, 자기, 열, 변형을 포함하는 복잡한 물리 현상이 관련되어 있는 전자기 성형 공정을 모사하기 위해서 각 물리 현상들을 연계하여 수치적으로 계산해 내는 기술에 대한 연구가 다각도로 진행 중이다. 본 고에서는 전자기 성형 기술에 대한 개념과 최신 국내외 기술 동향을 소개한 후, 전자기 성형의 수치 해석 기술에 대한 연구 동향을 정리하였다.

1. 서 론

전자기 성형 기술(Electromagnetic forming)은 충격 성형(Impulse forming) 또는 고속 성형(High speed forming) 기술의 하나로 강한 전이 자기장을 가공하고자 하는 금속에 직접 작용시켜 금속을 변형시키는 가공 기술의 한 가지이다(그림 1). 전자기 성형 기술은 러시아에서 원천 기술이 개발되고 1958년 미국 특허 2976907[2]에 기술된 이래로 미국, 유럽을 중심으로 연구가 꾸준히 지속되어 왔다. 2000년대 이후로 자동차 경량화를 위해 사용되는 고강도 또는 경량 소재의 낮은 성형성과 높은 탄성복원 양에 대한 문제 해결을 위한 하나의 방편으로 전자기 성형 기술이 제시되면서 전자기 성형 기술이 재조명 되고 있으며 이에 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어 기존의 스템핑 공정이나 하이드로포밍 공정에서 발생하는 코너 미 성형 부위를 전자기 성형으로 국부적으로 성형하여 보완하는 하이브리드 개념의 성형 기술에 대한 연구가 그것이다.

그림 1. 전자기력에 의한 알루미늄 캔의 변형[3]

전자기 성형 공정에서 전하에너지와 같은 성형 조건과 코일의 형상 등을 적절히 설계하기 위해서는 전자기 성형 기구를 명확히 규정하고 성형 공정을 해석할 수 있는 수치 해석 기술이 필요하다. 그러나 전자기 성형 공정에 대한 수치 해석 기술은 자기력 분포와 유도되는 전류량, 그리고 자기력과 전류에 유도되는 힘의 분포, 힘에 의한 가공물의 기계적, 열적 변형 거동들을 모두 연계(Coupled)하여 풀어내야 하는 매우 복잡한 기술이다. 즉 전자기 성형 수치 해석은 기계, 전자기, 열을 포함하는 다양한 물리현상을 동시에 풀어 내야 하는 다중물리(Multi physics) 문제이다. 전자기 성형 공정의 물리 현상을 전주기적으로 연계하여 풀어내는 것은 계산 비용이 많이 들고, 각 물리 현상을 연계할 때 발생하는 오차로 정확도를 높이는 것이 어렵다. 많은 연구자들은 전자기 성형 공정의 수치해석 기술에 대하여 비교적 적은 비용으로 정확도를 높이기 위한 방법 등을 찾기 위해 노력을 기울이고 있으며, 많은 성과를 보이고 있다.

이에 본 고에서는 전자기 성형 기술 대한 개념과 최신 국 내외 진행되고 있는 기술의 동향을 정리한 후, 전자기 성

형 다중 물리 수치 해석 기술에 대한 연구 동향과 앞으로의 연구 전망에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 전자기 성형 공정 기술

2.1 충격 성형 기술

충격 성형 또는 고속 성형은 저장된 에너지를 변환하여 매우 짧은 시간에 소재를 성형하는 공정을 통칭한다[3]. 조금 더 자세히는 15m/s 이상의 속도로 작동되어 성형되는 공정으로 정의되기도 하는데, 충격 성형에서 변형하는 소재의 변형율 속도는 100/s 이상이 되며 성형 시간은 마이크로 또는 밀리 초 프레임(10^{-6}~10^{-3})에서 이루어진다. 그림 2과 같이 충격 성형 기술은 에너지 원에 따라 화학적, 전기적, 기계적 에너지를 조합하여 사용될 수 있으며, 이중 방전성형(Electro hydraulic forming)성형, 폭발성형(Explosive forming), 전자기 성형이 대표적이라고 할 수 있다. 통상적으로 충격 성형 기술은 전통적인 성형 기술에 비하여 성형시 변형률 속도로 인하여 성형성(Formability)이 증가하고, 탄성복원(Springback)과 주름(Wrinkle)이 줄어 드는 장점이 있는데 반하여, 성형 중 소음이 심하고 성형 측정이 난해한 단점을 가지고 있다.

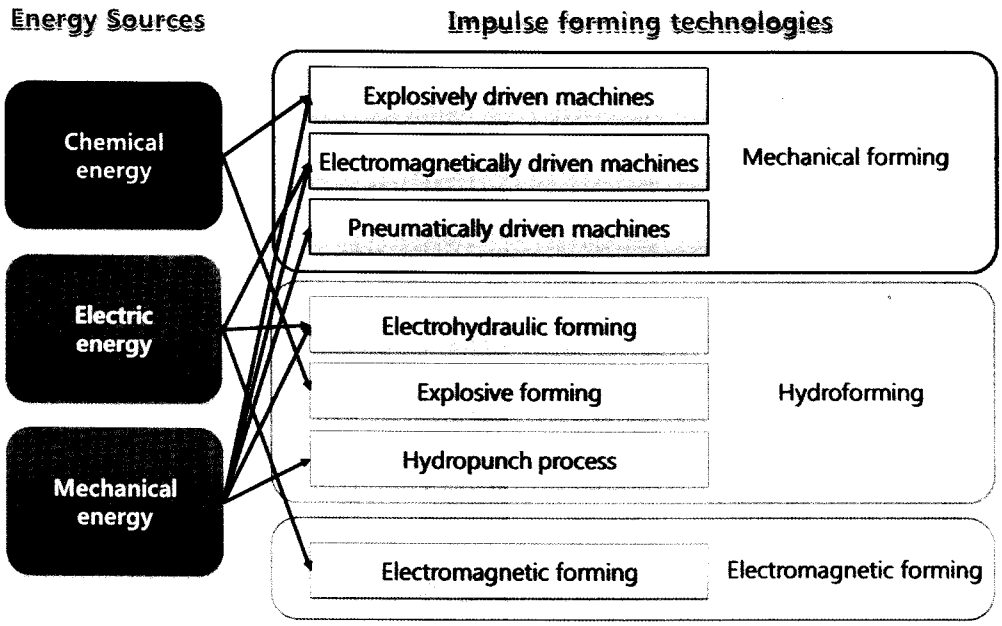


그림 2. 에너지 원에 따른 고속 성형 기술[3]

최근 일본 고 에너지 속도 가공 연구회에서는 일본 소성 가공 학회에 충격 성형에 대한 로드맵을 정리하여 발표하였다[4]. 자동차 관련 모든 분야에서 경량화, 안정성, 고정밀화, 고 기능화, 비용 저감, 에너지 절약 등의 필요에 의해 차세대 성형 기술로써 충격 성형 기술이 개발되고 있어야 함을 강조하고 있으며, 2008년부터 시작된 충격 기술에 대한 세부 기술에 대한 연구가 10년 후면 기술적 목표를 달성할 것으로 예측하였다.

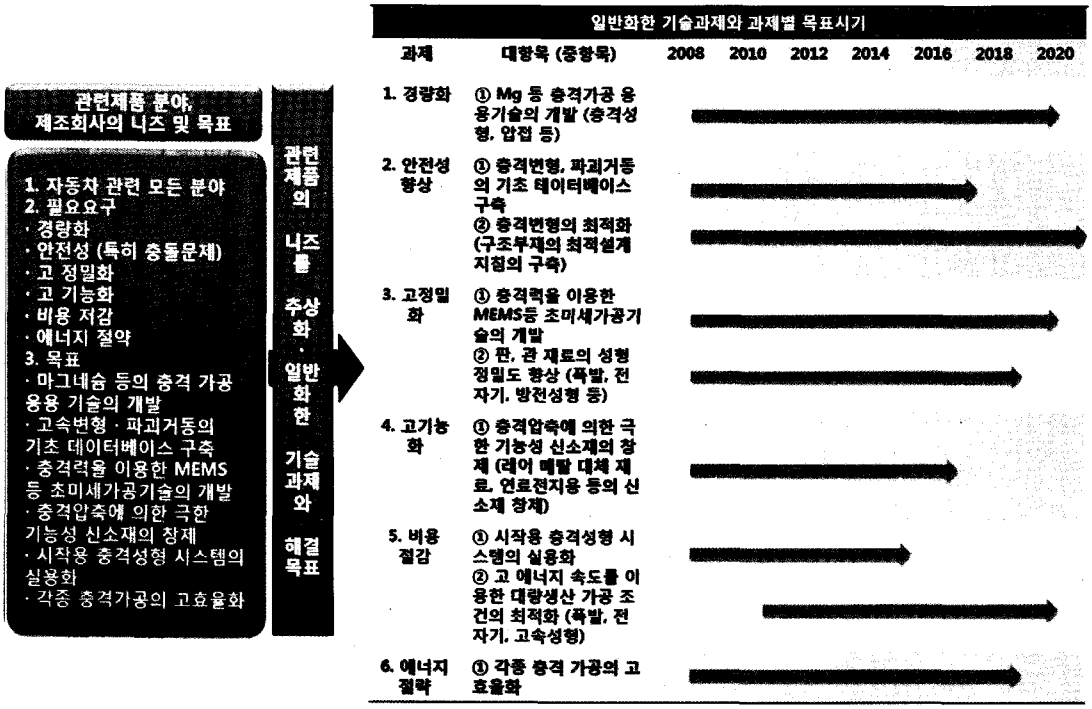


그림 3. 충격 성형 기술 로드맵[4]

2.2 전자기 성형의 원리

전자기 성형에서 성형 원리는 다음과 같다. 임의의 폐회로에서 자속이 시간에 따라 변하게 되면 자속의 시간 변화율과 같고 방향은 반대인 유도 기전력이 유도된다. 이를 패러데이 법칙(Faraday's law)이라고 한다. 커패시터를 통해 코일에 순간적으로 수백 마이크로초(μs)의 짧은 시간 이내에 감쇠하는 전류를 방전하게 되면 자속의 변화로 인해 주위의 가공물(Workpiece)에 유도 기전력이 발생하게 되는데, 이 유도 기전력에 의해 도체인 가공물에 유도 전류(Induced current)가 흐르게 된다. 자기장 내에서 전류가 흐르는 도체가 받는 힘을 로렌쯔의 힘(Lorentz's force)라고 하는데, 이 힘이 전자기 성형에서 성형력이 된다(그림 4)[5]. 전자기 성형의 대부분이 전기 펄스가 끝난 후 일어난다. 즉 압력 펄스 중 소재는 급속히 가속되어 펄스 동안 짧은 거리를 움직여 큰 운동에너지를 갖게 되고, 차후에는 이 운동에너지로서 가공물이 성형된다.

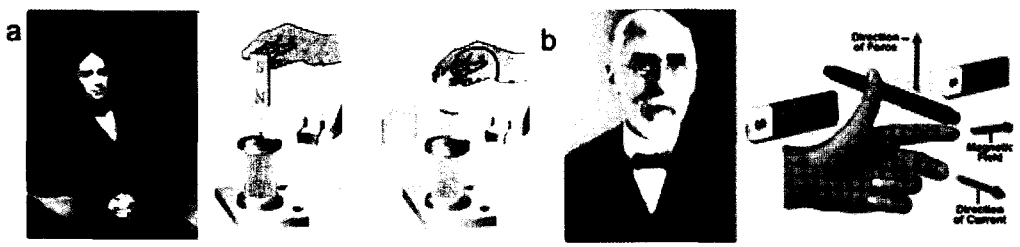
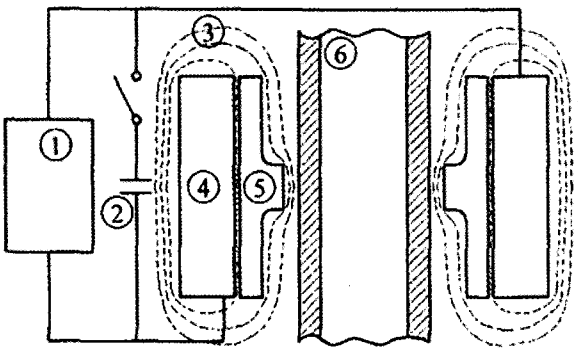


그림 4. 전자기 성형을 위한 전자기 법칙 (a) 패러데이 법칙 (b) 로렌쯔 법칙

전자기 성형 장비는 고용량의 커패시터와 성형 코일, 커패시터를 충전하기 위한 제어 회로 및 전력공급장치, 충전

및 방전 스위치와 자기장의 모양을 제어하는 자속집중기(Field shaper)로 구성되며, 기본적인 회로 구성도는 그림 5와 같다.



1: Power supply 2: Capacitor 3: Magnetic flux lines
4: Coils 5: Field shaper 6: Workpiece

그림 5. 전자기 성형 기본 회로도[6]

전자기 성형은 코일의 형상에 따라 달라지는데, 전자기 성형에서 사용되는 코일의 형상은 팽창 코일, 압축 코일, 평판 코일이 대표적이다[7]. 팽창코일은 가공물의 내측에 삽입되어 반경 외측 방향으로 가공물을 팽창시키는 데 사용된다. 헬리컬이나 웨이퍼 형태로 제작되는데 관 부품들을 확관하거나 플랜징하는데 사용된다. 압축 코일은 가공물의 외측에서 반경 내측 방향으로 가공물을 변형시키는데 사용된다. 팽창 코일 처럼 한번 또는 여러 번 감긴 헬리컬 형태의 코일로 제작되는 데 주로 원관 형태의 가공물을 대상으로 하여, 구조물의 결합, 밀봉 과 결합, 스웨이징, 관 형상 단면의 감소 등에 사용된다. 평판 코일은 가공물의 아래나 위에 위치하여 스파이럴 형태로 감겨져 있다. 때로는 보다 강력한 성형력을 내도록 2중 스파이럴로 감긴 코일을 사용하기도 한다. 평판형 코일에서는 그 중심부에 자기장이 작용하지 않는 영역(Dead zone)이 생기는데 그 영역의 크기는 그 설계조건에 따라 다르다. 평판코일은 다이와 함께 상용하여 평판의 가공물을 성형하는데 이용하거나, 아주 큰 대면적 부품에서 바람직하지 하지 않은 국부 변형을 교정하는데 이용된다.

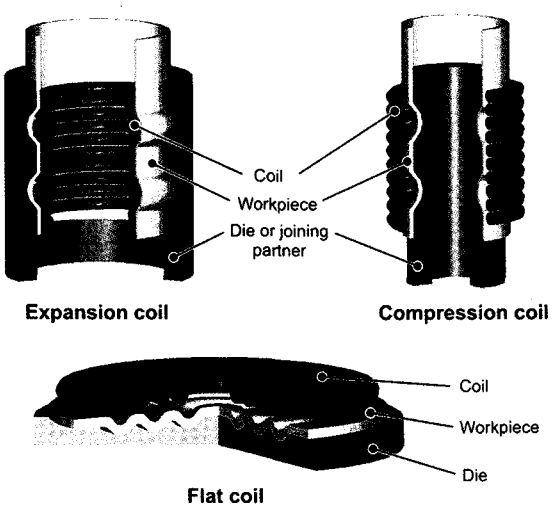


그림 6. 전자기 성형 양식에 따른 코일 구성[8]

2.3 전자기 성형의 장단점

기존의 준 정적 상태의 성형과 대비하여 전자기 성형 기술의 장단점을 표 1에 정리하였다[8, 9]. 전자기 성형 기술의 장점이 다양하게 보고되고 있고 이를 활용한 연구가 진행되고 있으나, 아직 극복해야 할 단점도 존재하므로 향후 전자기 성형 기술이 확대 적용 되기 위해서는 지속적인 연구 개발이 필요하다 하겠다.

표 1. 전자기 성형 공정의 장 · 단점

구분	내용
장점	전자기 성형은 코일과 가공물 사이에 기계적인 접촉이 없이 성형하므로 가공물의 표면에 불순물이 없음
	윤활제 사용 없이 성형이 가능하므로 친환경 공정임. 가공물 표면의 윤활제를 제거 공정이 필요 없으므로 마무리 작업 후에 성형이나 조립 작업을 할 수 있음.
	자기장은 비전도체를 통과하기 때문에 비금속 피복이나 용기를 투과하여 성형할 수 있음.
	이종 금속 간 또는 금속과 타 소재(유리, 플라스틱, 복합재료)등의 이종 소재간의 접합이 가능함.
	판재 성형의 경우 주로 범용으로 사용되는 코일과 한쪽 금형만 사용하므로 금형비용이 절감됨.
	성형성과 탄성복원이 획기적으로 저감됨. 따라서 금형 설계를 단순화 시킬 수 있음.
	공정 속도가 매우 빠름. 장비는 분당 수백번의 반복 속도로 작동하도록 만들 수 있음.
	자기력은 진공이나 유리, 세라믹, 고분자 등 전기전도도가 낮은 환경에 민감한 소재의 성형을 가능하게 함.
	원격 제어가 가능한 공정이므로 밀폐된 핵연료 폐기물 저장고 등과 같은 방사능환경에서 이용할 수 있음.
	성형 속도는 약 250m/s, 가공물의 변형률 속도는 10^4/s의 고속으로 성형이 되므로 기계적 특성을 증가됨.
	같은 코일로 여러 형상의 부품을 성형할 수 있는 유연성을 가지고 있음.
	성형 코일이 유연한 버스 바(bus bar)에 의해서 축전기와 연결 가능하므로 전자기 성형은 접근이 어려운 위치에서도 성형 공정을 이용할 수 있음.
	자기 충격의 타이밍을 10^{-6}s의 정확도로 제어할 수 있으며, 압력 충격의 크기를 매우 정확히 제어할 수 있음.
	자기 충격에 의한 압력은 기존의 성형 작업에서의 평균 압력에 비해 훨씬 큼.
	자기장은 압축된 가스와 같이 작용함. 가공물과 성형 코일 사이의 간격 변화에 비교적 무관한 균일한 압력이 얻어짐.
단점	전기 전도도가 높은 가공물(예로 구리, 알루미늄, 황동, 저탄소강)일수록 큰 전류가 유도되어 큰 힘이 발생하므로 성형이 용이함. 전자기 성형은 전기전도도가 크고 항복 강도가 작은 소재에 대해서 적합하며, 통상적인 전자기 성형에 적합한 실용상 가공물의 비저항은 15$\mu\Omega$cm 이하임.
	스테인레스강이나 고강도강과 같은 전기 전도성이 낮은 재료는 알루미늄이나 구리 슬리브(sleeve) 같은 고 전도성 드라이버(driver)를 이용하거나 고주파 방전(60–100khz) 전자기 성형 장비를 이용하여야만 성형 가능함.
	가공물은 링, 관, 평편한 형태로 폐회로를 형성하여 유도전류가 연속적으로 흐를수 있도록 해야 하며, 전류의 흐름이 방해되는 흠이 존재할 경우 성형력이 감소하고 고르지 않게 되어 성형이 불가능함.
	전자기성형의 성형 효율은 매우 낮기 때문에 충전 에너지의 극히 일부분만이 소성변형으로 사용됨. 충전 에너지와 변형 에너지의 비율이 20%이하이며, 전기전도도가 낮은 고강도 소재의 경우 2% 정도임.
	강한 자기력을 위한 고전류 고전압이 발생하므로 안전을 위한 각별한 주의가 필요함.
	성형 코일이 작동시 기계적, 열적 손상을 받으므로, 성형 코일의 수명을 향상시키기 위한 성형 코일 형상 설계에 대한 주의가 필요함.
	신장 변형 모드를 구현하기는 쉬우나 딥 드로잉 모드를 구현하기는 어려움. 딥 드로잉 모드를 구현하기 위해서는 여러 개의 성형 코일을 사용해야 함.

2.4 전자기 성형의 응용

전자기 성형은 성형 코일의 형태 및 코일과 가공물과의 위치 관계에 따라 축관 성형, 확관 성형, 평판 성형의 세가

지 형태로 나누어 지는데, 전가기 성형의 응용 예들은 그러한 성형 형태에 따라 분류하게 된다. 주로 금속 관재와 판재의 접합, 성형, 절단 등의 작업에 이용되어 자동차 산업, 항공 산업, 전기 산업과 군수 산업 등에 적용하기 위한 노력이 진행 중이다. 전자기 성형에서 사용되는 코일 형태와 성형 형태, 그리고 응용 예(선행개발 사례 포함)를 표 2에 정리하였다. 아울러 대표적인 개발 사례를 그림 7에 나타내었다. 전자기 성형 중에서 압축 코일을 사용하여 축관 성형하거나 두 관재를 접합하는 공정은 크기가 작은 부품에 응용하기 쉬워 상용화 사례가 많으나, 팽창 코일을 이용하거나 평판 코일을 이용하는 기술은 아직 상용화 보다는 선행 개발 단계에서 개발이 주로 이루어지고 있다.

표 2. 전자기 성형 형태별 응용 사례

코일 형태	성형 형태	응용 예
팽창	확관 성형, 구멍 절단	샤시 부품의 프로파일 성형, 확 관품 관벽의 구멍 뚫기, 항공기의 덕트 성형, 범퍼빔과 스테이의 조립
압축	축관 접합	알루미늄 차체 구조물 조립, 유니버설 조인트의 요크 접합, 모터 회전자의 조립, 치차와 축의 접합, 핵 연료 폐기통의 밀봉, 미사일 부품과 포탄의 조립, 압력 및 진공 조인트 접합
평판	신장 성형, 구멍 절단	연료전지분리판 성형, 3C 부품 케이스 성형 자동차 부품의 비드 및 홀 성형, 라이트 리플렉터 성형

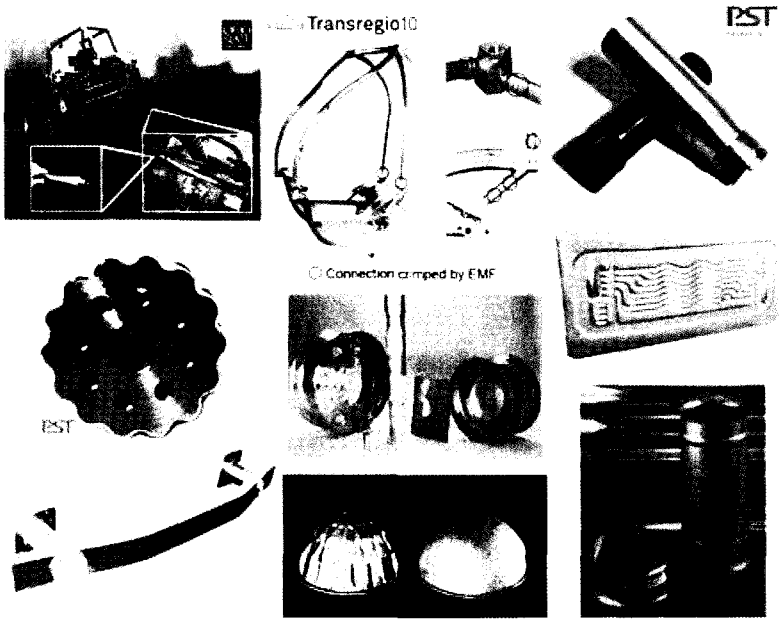


그림 7. 전자기 성형 적용 부품들[8, 11-13]

2.5 국내외 연구 현황

전자기 성형에 관한 연구 논문을 통하여 정보적 측면에서 최근 연구 현황을 살펴보기 위하여 Scopus데이터베이스에 등록된 문헌에 편찬된 연구 논문 대상으로 "electromagnetic forming" 단일 키워드 검색을 수행하였다. 1968년부터 발표된 240편의 연구 논문이 검색되었으며 년도 별 연구 논문 수의 추이는 그림 8과 같다. 1960년대 말부터 1990년대 까지 소수로 발표되는 연구 논문의 수가 2000년부터 갑자기 증가하기 시작하여 2005년부터 최근 7년간 발표된 논문의 수가 전체의 51%에 달하며, 추이로 본다면 향후에도 발표될 논문 수가 지속적으로 증가하리라고 판

단된다. 이는 1950년대 말부터 시작된 전자기 성형 연구가 1960년대 반짝 유행하다가 지난 40년간 침체되어 기술의 진보가 더뎠으나 최근에 다시 각광을 받고 있음을 의미한다.

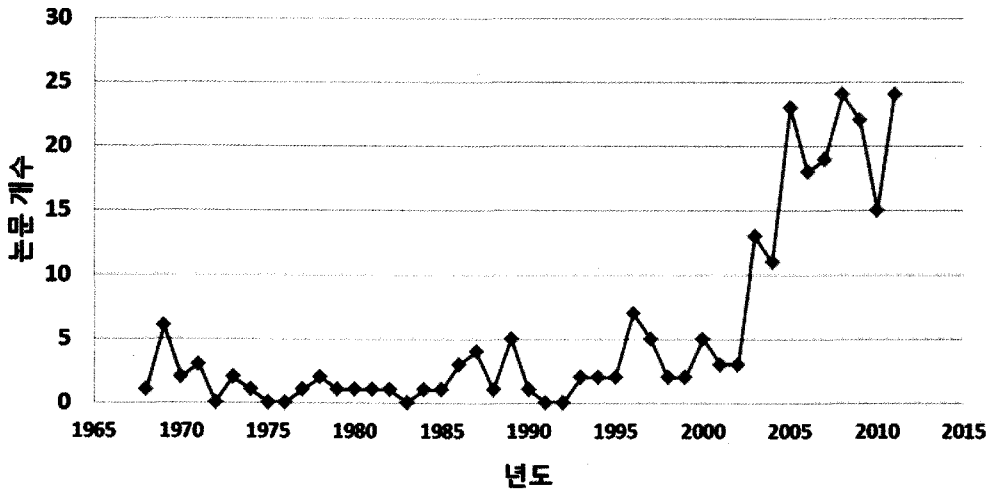
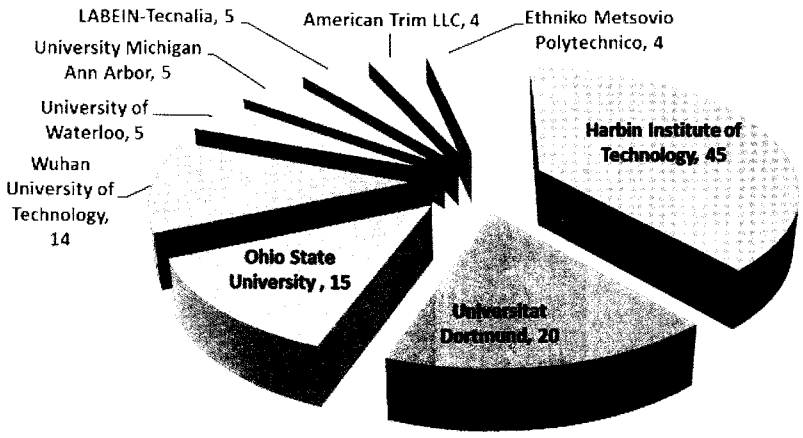
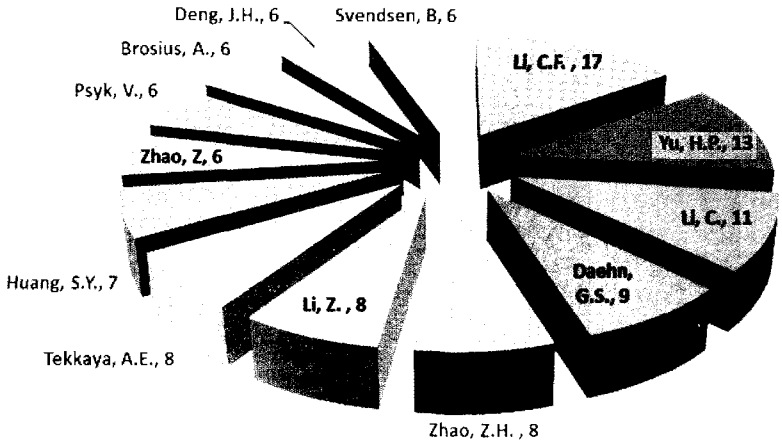


그림 8. 년도 별 전자기성형 관련 논문 발표 개수 추이

최근 전자기 성형 관련 연구 동향을 살펴보기 위하여 연구 논문의 수가 가파르게 증가하는 2000년대 논문을 소속과 저자로 정리하여 그림 9에 정리하였다. 연구 논문 수를 살펴 볼 때 최근 전자기 성형 연구를 주도적으로 수행하고 있는 국외 기관은 중국의 Harbin Institute of Technology(연)와 Wuhan University of Technology(학), 독일의 University Dortmund(학), 미국의 Ohio State University(학), American Trimm LLC(산), 캐나다의 University of Waterloo(학), 스페인의 Labein-Tecnalia(연)임을 확인할 수 있었으며, 각 기관에 소속된 연구자들에 의해 연구 논문들이 다수 발표되고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 9. 주요 (a) 기관별 및 (b) 저자별 전자기 성형 관련 논문 발표 현황

국내에서 전자기 성형에 대한 연구는 1990년대 초 서울대학교와 국방과학연구소에서 관재의 확관과 축관을 통한 접합 거동에 대한 연구가 진행되었으나, 지속적인 연구가 진행되지 못하다가 2000년 말부터 성우하이텍(산), 한국원자력연구원(연), 포항산업과학연구원(연), 한국생산기술연구원(연), 재료연구소(연), 부산대학교(학) 등을 중심으로 전자기 성형 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 연구 논문과 이외 문헌을 참고하여 국내외 주요 기관의 전자기 성형 개발 현황을 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 최근 국내외 전자기 성형 기술 연구 기관 현황

구분		기관	주요연구내용
국외	산	American Trim LLC (미)	• 연료전지분리판 성형 공정 연구(GM-OSU 협업) • 알루미늄 판재의 헤밍 공정 연구
		Pulsar (이)	• 전자기 성형 장비 제작
		Magneform (미)	• 전자기 성형 장비 제작
		Poynting (독)	• 전자기 성형 장비 제작
	학	University Dortmund (독)	• 하이브리드 전자기 성형 공정 연구(딥드로잉+전자기성형, 하이드로포밍 + 전자기 성형 등) • 전자기 성형을 통한 자동차와 차체의 접합 연구 • 전자기 성형 공정 수치해석 연구
		Ohio State University (미)	• 전자기 성형에서의 성형성 및 탄성복원 연구 • 전자기 성형을 이용한 판재의 실용화 연구(휴대폰 케이스, 연료전지분리판, 마이크로 패턴 등) • 전자기 성형 공정 수치해석 연구
		University of Waterloo (캐)	• 전자기 성형에서의 성형성 및 탄성복원 연구
		Wuhan University of Technology (중)	• 관재 확관을 위한 전자기 성형 연구 • 전자기 성형을 통한 자동차와 차체의 접합 연구
	연	Harbin Institute of Technology (중)	• 하이브리드 전자기 성형 공정 연구 • 전자기 성형 공정 분말 성형으로 확대 연구

구분		기관	주요연구내용
국외	연	Labein-Tecnalia (스)	• 롤포밍 공정과 전자기성형의 일체화 공정 연구 (차체 부품의 홀, 비드 성형)
국내	산	성우하이텍	• 전자기 성형 공법을 이용한 범퍼빔 스테이 개발
		나노기술	• 전자기 성형 장비 개발
	학	부산대학교	• 판재 성형을 위한 전자기 성형 연구 • 전자기 성형 장비 제작
		동아대학교	• 전자기 성형 기구 연구
	연	포항산업과학연구원	• 관재 접합을 위한 전자기 성형 연구
		한국생산기술연구원	• 관재, 판재의 접합, 성형을 위한 전자기 성형 연구
		재료연구소	• 판재 성형, 절삭을 위한 전자기 성형 연구 • 전자기 성형 공정 수치해석 기술 연구
		한국 원자력 연구원	• 전자기 성형 공정 기술 연구 • 전자기 성형 수치해석 기술 연구

최근, University Dortmund 대학은 국제적으로 전자기 성형 기술의 허브 역할을 수행하고 있다. 고속 성형에 관한 국제 학술 대회(International Conference High Speed Forming)가[8] 2004년부터 매 2년마다 University Dortmund에서 열려, 전자기 성형 기술을 포함한 고속 성형 기술에 대한 연구 내용을 공유하고 있으며, 충격 성형에 대한 산학연 국제 컨소시엄인 I2FG(International Impulse Forming Group)가[9] University Dortmund를 중심으로 결성되어 충격 성형에 대한 기술 상용화에 대한 논의를 지속시키고 있다.

3. 전자기 성형 해석 기술

전자기 성형 해석에서 유용한 결과를 도출하기 위해서는 전기-자기-열-변형 간의 상호 작용을 고려한 다중물리 문제의 해결과 고속에서 변형하는 소재의 구성방정식에 대한 적절한 모델링이 중요하며 이에 대한 최근 동향은 Psyk 등[10]의 리뷰 논문에 잘 정리되어 있다. 본 고에서 본 장은 이 리뷰 논문을 참고하여 작성하였다.

3.1 전자기장 연계 해석 기술

전자기 성형 공정을 해석하기 위해서는 전기-자기-열-변형간의 상호 작용을 고려한 다중물리 문제를 풀어야 한다. 다중물리 해석을 위한 지배방정식인 맥스웰방정식(전자기), 평형방정식(구조), 에너지보존방정식(열)을 표4에 정리하였다. 그리고 각 변수와 상수에 대한 설명을 표5에 정리하였다.

표 4. 전자기-구조-열전달 지배방정식

전자기	구조	열전달
$\nabla\times E+\frac{\partial B}{\partial t}=0$ $\nabla\times H=\frac{\partial D}{\partial t}+J^f+J^0$ $\nabla\cdot D=\rho^f$ $\nabla\cdot B=0$	$\rho_0\dot{V}=\nabla\cdot S+b$	$c\dot{\theta}=-\nabla\cdot Q+R^{Ohmic}+R^{Mech}$

표 5. 지배방정식 변수와 상수의 정의

b	내력
B	자기장
c	비열
D	전기변위장
E	전기장
H	자계강도
$\mathbf{J}^0$	가해진 전류밀도
$\mathbf{J}^f$	자유전류밀도
Q	열속
R^{Mech}	변형열원
R^{Ohmic}	저항열원
S	일차 P-K응력
V	속도
ρ_0	초기밀도
ρ^f	자유전하밀도
Θ	온도

세 종류의 지배방정식은 서로 연계되어 있으며, 이 관계를 그림10에 나타내었다. 전자기해석의 결과로 얻어지는 자기압력은 구조해석에 소재의 변형을 일으키고, 소재의 변형은 자기장이 전파되는 공간을 변화시킨다. 저항과 변형에 의한 발열은 소재의 온도를 변화시키고 이는 저항, 유동응력 등의 물성을 변화시킨다.

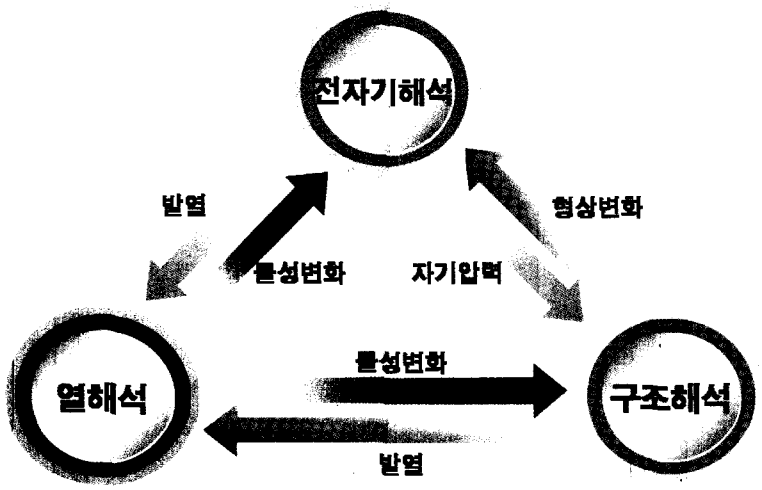


그림 10. 전자기 성형공정의 연성해석 개요

이와 같은 영향을 모두 고려하여 문제를 푸는 것은 매우 어려운 일이기 때문에 초기에는 문제를 단순화하여 해석하였다. 자기장을 이용한 공정의 물리적 효과에 대한 이론적 기반은 Furth 와 Waniek[14], Lal 과 Hiller[15] 등에 의해 확립되었고 이후에 소재의 변형을 계산하는 이론적 방법이 개발되었다[16-18]. 이 논문들에서는 관의 두께는 얇으며,

관과 코일의 길이는 무한하다는 가정을 사용하였으며, 자기압력과 관 관성력의 평형식을 사용하였다. 위의 연구들에서는 변형이 전류와 자기압력에 미치는 영향을 무시해왔다. 그러나 Fenton과 Daehn[19]은 변형거동이 전류와 이에 의한 자기압력에 상당한 영향을 미친다고 발표하였다. 전자기력에 의한 소재의 변형 때문에 유도전류가 영향을 받는다는 것이다.

소재의 변형이 자기력에 미치는 영향을 알아보기 위해 Takatsu 등[20]은 처음으로 소재의 변형을 고려한 수치해석 결과를 발표하였다. 그들은 전자기장과 구조역학 계산을 수치해석으로 수행하였으며, 수치해석결과를 고속카메라로 찍은 사진과 비교하였다. 여러 가정들이 사용되었음에도 불구하고 수치해석결과와 실험결과는 잘 일치하였다(그림11).

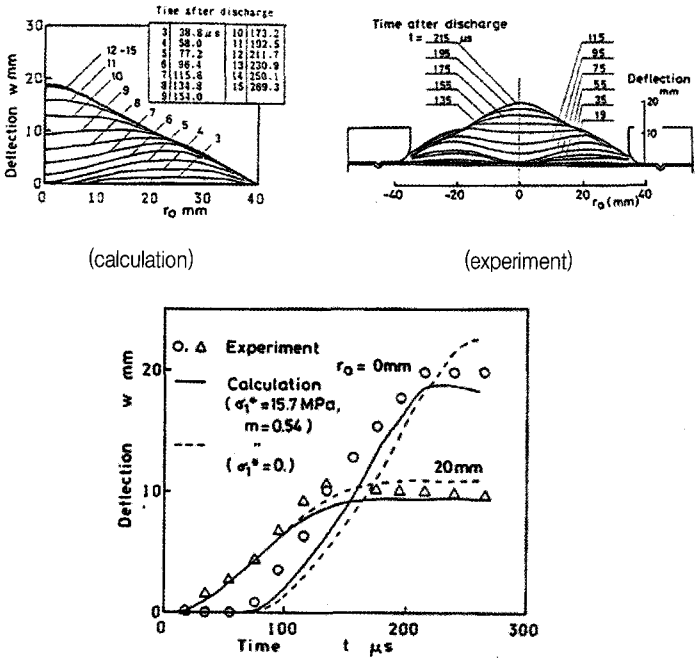


그림 11. 전자기성형에 의한 디스크 부풀림 해석 결과[20]

이후 Fenton과 Daehn[19]은 미국 로렌스 리버모어 국립연구소에서 제작한 코드 CALE를 이용하여 Takatsu등의 문제를 이차원 해석하였다. 자기장해석을 위해서 Arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE) 방법을 사용하였는데 변형이 작을때는 Lagrangian 형식이, 변형이 클때는 Eularian 형식이 사용된다.

Oliveira 등[21]은 ANSYS/EMAG의 전자기 해석과 LS-DYNA의 구조해석을 합쳐서 EMF 해석을 수행하였다. 자체 개발한 인터페이스를 이용하여 변형된 형상에 대한 전자기력 정보를 교환하였다. 알미늄 AA5182와 AA5754에 대한 연구를 수행하였으며, 삼차원 해석에 대한 가능성을 보여주었다.

Bessonov 와 Golovashchenko[22]는 자체 개발한 프로그램을 이용하여 전자기와 구조해석에 에너지보존법칙을 고려한 열전달해석까지 연계하여 해석하였다. 또한 성형장비도 RLC 회로로 모델링하여 전류도 계산하였다. 그러나 실험과의 비교는 이루어지지 않았다.

Karch 와 Roll[23]은 ANSYS를 이용하여 축관 연성 해석을 수행하였다. 이 연구에서 전류, 열전달, RLC 회로, 전자기력에 의한 변형을 고려하였으며, 정성적 정량적 비교에서 실험결과와 잘 일치하였다. Kleiner와 Brosius[24]는 MSC.Marc와 자체개발한 전자기해석 유한요소코드를 사용하여 이차원 연성해석을 하였다. 모든 방정식을 동시에

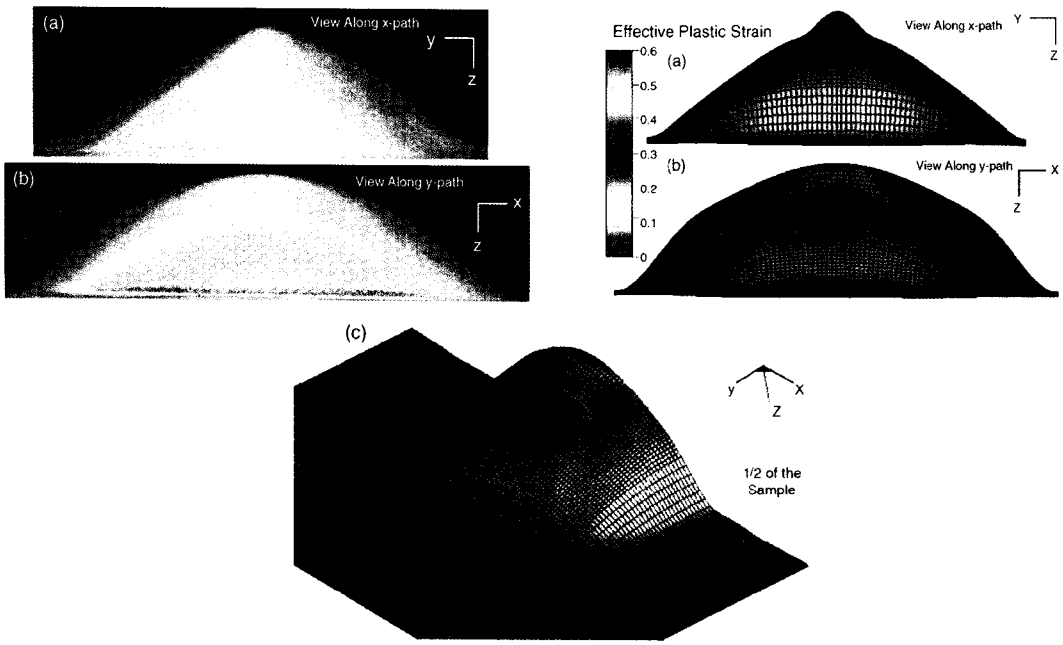


그림 12. 전자기 성형에 의한 자유성형 해석 결과[21]

푸는 완전 연성해석 방법(Fully coupled)과 달리 각각의 방정식을 서로 다른 코드에서 서로 정보를 주고 받으며 푸는 순차적 연성해석(Staggered, sequentially, or Loosely coupled) 방식을 사용하였다. 그림 13은 순차적 연성해석 방법의 개요를 보여준다.

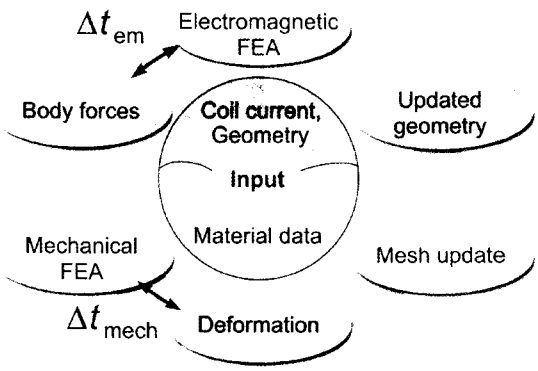


그림 13. 순차적 연성해석 방법[24]

전자기 해석은 대부분 이차원 해석에 그치는 경우가 많은데 삼차원해석의 가장 큰 문제는 계산 시간이다. 소재와 금형 뿐만 아니라 둘러싼 공기까지 고려하기 때문에 유한요소 해석 모델 크기는 상당히 커지며 정확한 결과를 위해서는 코일과 소재 사이에는 상당히 조밀한 격자가 필요하다. Schinnerl 등[25]은 구조해석의 격자크기와 전자기해석의 격자크기를 다르게 하는 내연적 다중 격자망(Multi grid) 기법을 이용하여 삼차원 해석의 시간을 단축하였지만 적용범위가 변형이 작은 경우로 국한되었다.

Stiemer 등[26]은 전자기장은 고정된 격자에서 Eulerian 식으로, 구조해석은 소재와 같이 변형되는 격자에서 Lagrangian 식으로 계산하는 방식을 발표하였다. 여기서 구조해석 격자는 전자기 격자사이를 자유롭게 움직인다. 이런 방법으로 연성된 방정식을 빠른 시간에 풀 수 있었으며 변형도 정확히 계산되었지만 전자기력에서 진동이 발생하였다. 후에 Stiemer 등[27]은 ALE 식을 사용하여 전자기 격자는 구조해석격자와 같이 움직이도록 하는 방식으로 삼차원 문제를 해석하였다(그림 14).

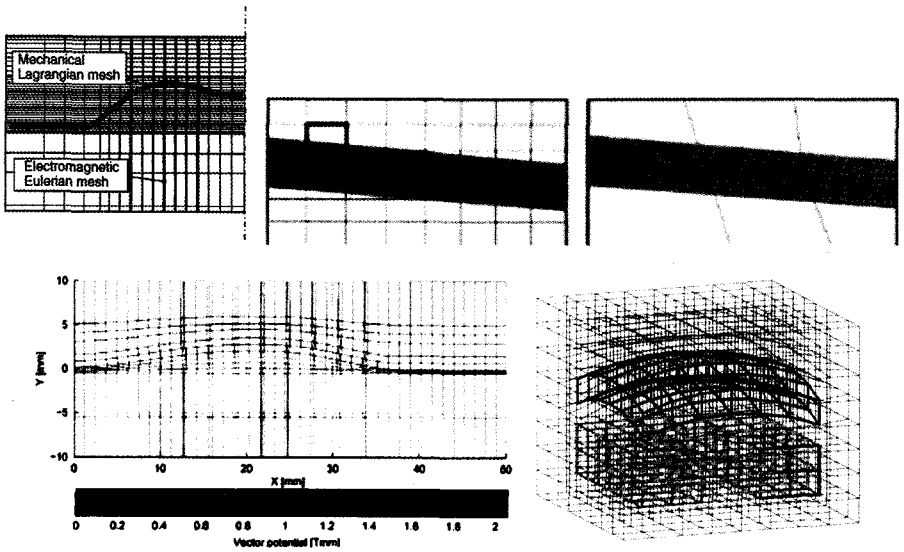


그림 14. 전자기 해석과 구조해석용 격자[27]

최근에는 상용 프로그램을 이용하여 전자기-구조 연성해석이 많이 이루어지고 있다. Conraux 등[28]은 전자기해석용 SYSMAGNA와 구조해석용 PAM-STAMP를 사용하여 축관과 박판성형 해석을 하였다(그림 15). 또한, L' Eplattenier등[29]은 LS-DYNA에 도체내의 전자기장은 유한요소로, 주위의 공기내의 전파는 경계요소법으로 계산하는 새로운 모듈을 개발하였으며 계산결과는 실험과 잘 일치하였다(그림 16). Imbert 등[30]은 이 도구를 이용해서 박판성형을 해석하였다.

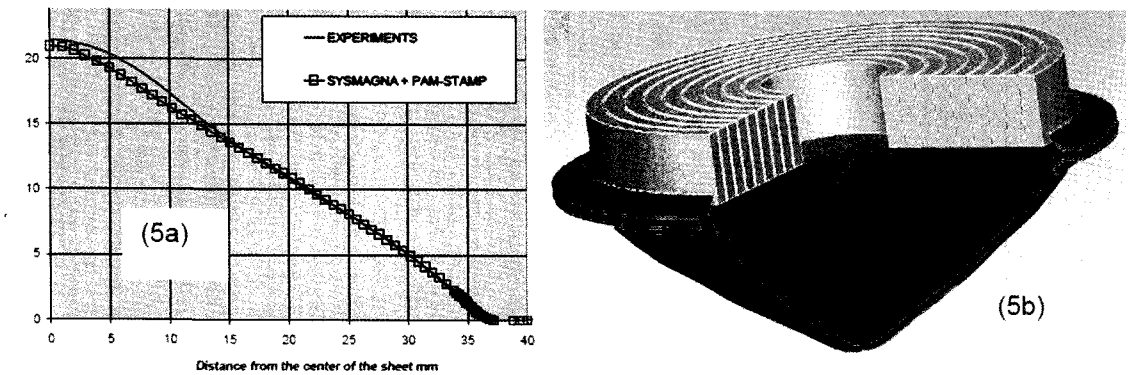


그림 15. SYSMAGNA와 PAM-STAMP를 이용한 전자기 부풀림 성형 해석[28]

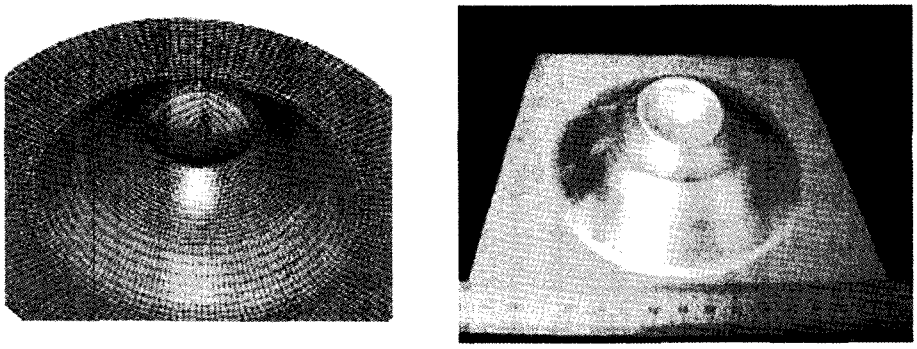


그림 16. 유한요소법과 경계요소법을 동시에 적용한 전자기 해석 결과[29]

Demir 등[31]은 ANSYS를 이용하여 삼차원 자기장 해석을 하고 LS-DYNA와 연계하여 축관시 주름생성을 계산하였다. 특히 소재 형상의 미세한 흠집이 주름생성에 미치는 영향을 계산하였다(그림 17).

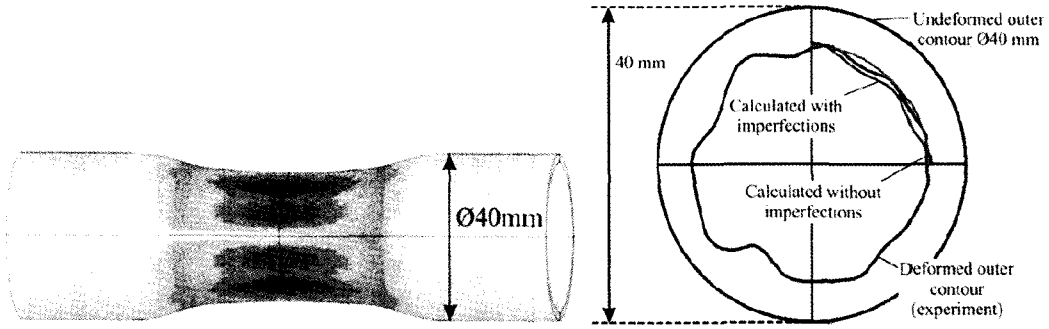


그림 17. 전자기 축관 성형시 흠집의 영향 해석[31]

위에 언급한 여러 해석방법들을 표6에 정리하였다. 전자기해석의 경우 자체 개발한 코드를 사용한 경우가 가장 많으며 그 다음으로 ANSYS가 많이 사용되었다. 구조해석의 경우에도 자체 코드가 LS-DYNA와 함께 많이 사용되었는데, 코드를 자체 개발하는 경우 인터페이스 구현이 쉽거나 필요 없기 때문에 선호하는 것으로 보인다. LS-DYNA의 경우 사용자서브루틴을 통한 다른 해석프로그램과의 연계가 장점으로 작용하여 많이 사용되는 것으로 생각된다. 그리고 프로그램을 자체 개발하는 경우 완전 연성기법이 많이 사용되며, 서로 다른 두개의 프로그램을 이용하는 경우 순차적 연성기법이 선호된다. 해석의 차원에 대해서는 컴퓨터 성능의 향상에 따라 최근에는 삼차원 해석결과가 많이 발표되고 있다.

표 6. 전자기 해석 현황

전자기	구조	열전달	연성기법	차원	참고문헌
CALE	CALE	–	완전	2D	Fenton and Daehn[18]
자체	자체	–	완전	3D	Schinnerl 등[25]
ANSYS	LS-DYNA	–	순차	3D	Oliveira 등[21]
자체	자체	자체	완전	2D	Bessonov and Golovashchenko[22]
ANSYS	ANSYS	ANSYS	완전	2D	Karch and Roll[23]
자체	MSC.Marc	–	순차	2D	Kleiner and Brosius[24]

전자기	구조	열전달	연성기법	차원	참고문헌
SYSMAGNA	PAM-STAMP	–	순차	3D	Conraux 등[28]
자체	자체	–	완전	3D	Stiemer 등[27]
LS-DYNA	LS-DYNA	–	순차	3D	L' Eplattenier 등[29]
ANSYS	LS-DYNA	–	순차	3D	Demir 등[31]

3.2 고속 변형 구성방정식

전자기 성형 때 소재는 고속으로 변형하며 온도가 올라가게 된다. 그러므로 소재의 물성은 변형 뿐만 아니라 변형속도와 온도의 영향을 고려하여 측정하여야 한다. 일반적으로 변형속도가 커지면 자료의 강도도 커진다고 알려져 있다. 이를 표현하기 위해서 지수형태의 함수가 도입되었다. 변형 속도 뿐만 아니라, 온도도 물성에 큰 영향을 미친다. 전자기성형과 같은 고속성형공정의 경우 변형에 의한 열이 미쳐 빠져나가지 못하는 단열가열에 가까운 현상이 나타난다. 이에 따른 연화를 고려하기 위해서 Johnson-Cook(J-C) 과 같은 식이 개발되었다. J-C식은 특정 구간에서만 잘 맞는 단점이 있는데 이를 개선하기위해서 El-Magd와 Abouridouane[32]는 고속변형에 적합한 구성방정식을 제안하였다. 또한 미세구조의 영향을 고려할 수 있는 Zerilli와 Armstrong[33]의 식 등이 있다. 고속 변형 모사에 사용되는 구성방정식들을 표 7에 정리하였다.

표 7. 고속 변형 모사를 위한 구성방정식

구성방정식	참고문헌
$\sigma = K\sigma^{n}\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{m}$	Power law
$\sigma = (A+B\varepsilon^{n})(1+C\ln\dot{\varepsilon})\left(1-\left(\frac{T-T_0}{T_m-T_0}\right)^{m}\right)$	Johnson-Cook
$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\varepsilon}^{**}}{\exp\left[-\frac{\nabla G_0}{\kappa T}\left(\beta_0 T+\ln\left(\frac{\sigma^{*}}{\dot{\sigma}_0^{*}}\right)\right)\right]+\frac{\xi}{\sigma-\sigma_h}}$	El-Magd and Abouridouane[32]
$\sigma = \sigma_g+c_2\varepsilon^{0.5}\exp(-c_3T+c_4T\ln\dot{\varepsilon})+\kappa d^{-0.5}$	Zerilli and Armstrong[33]

4. 결 언

전자기 성형 기술은 난성형성 소재의 성형성을 높이고 탄성복원을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 친환경, 고 생산성, 저 비용 등의 장점 들을 가지고 있어, 1950년대 말 개발된 기술임에도 불구하고 차세대 성형 기술 로드맵이 작성되는 곳에서는 빠지지 않고 꼭 한번씩은 언급되는 기술이다. 아이러니하게도 차세대 성형 기술로 언급 되는 이유 중 하나는 상용화를 위하여 걸림돌이 되는 전자기 성형 기술의 단점들이 존재하고, 이를 위하여 앞으로 해결(Breakthrough)할 연구 개발 과제가 남아 있기 때문이다. 전자기 성형 기술은 소형 부품들의 제조에 접합에 적용되어 상용화가 진행되었을 뿐 그 이상의 상용화가 더딘 게 사실이다. 1990년대 말까지 주춤하던 전자기 성형 기술에 대한 연구가 유럽, 미국을 중심으로 2000년대부터 활기를 띄고 있다. 기존 성형 공정의 단점을 극복 하기 위한 보조 공정으로 전자기 성형 공정을 이용하는 하이브리드 성형 기술의 예에서 보듯 전자기 성형 기술의 상용화를 위한 다양한 아이디어가 도출되고 있고 이러한 기술에 대한 연구가 활발 진행되고 있다. 차세대 성형 기술로서 전자기 성형의 보다 신속한 상용화를 위한 기술의 진보를 이루기 위해서는 전자기 성형에 대한 수치 해석 기술의 정립과 사용자가 사용하기 편리한 전자기 성형 해석 소프트웨어의 개발이 선행되어야 한다. 전자기 성형 시 복합적으로 작용하는

물리 현상 즉, 전기-자기-열-변형 간의 상호 작용을 연계한 수치 해석 기술의 개발이 그리 녹녹하지 않은 일이나, 전자기 전용 소프트웨어와 열변형 전용 소프트웨어를 순차적으로 연계하여 예측하는 연구들이 보고 되고 있고, 더 나아가 물리 현상을 완전히 연계하여 예측하는 소프트웨어 직접 개발하려는 노력도 진행 중이므로, 앞으로 전자기 성형 기술은 더욱 더 발전할 수 있으리라 기대된다.

후기

본 연구는 지식경제부의 산업융합원천사업과제(과제번호: 10040078)의 지원을 받아 수행하였습니다.

⚜ 참고 문헌

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_forming
[2] G.W. Harvey, D.F. Brower, Metal forming device and method, US Patent Nr. 2976907 (1958)
[3] http://www.i2fg.org/impulseforming.php
[4] Committee of High Energy Rate Forming, Technology road map on high energy rate forming, Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 49 (574), 1052-1053 (2008)
[5] 이현민, 강범수, 김정, 전자기 로렌쯔력을 이용한 박판성형 장비 개발, 한국소성가공학회지, 19 (1), 38-43, (2010).
[6] Y. - B. Park, H.-Y. Kim, S.-I. Oh, Joining of thin-walled aluminum tube by electromagnetic forming (EMF), International Journal of Automotive Technology, 6(5), 519-527 (2005).
[7] 이종수, 전자기 성형법에 대하여, 대한기계학회, 28 (5), 476-486, (1988).
[8] http://ichsf2012.com/topics.php
[9] 이동녕, 전자기 성형의 원리와 응용, 기계와 재료, 3 (4), 17~29, (1991).
[10] V. Psyk, D. Risch, B.L. Kinsey, A.E. Tekkaya, M. Kleiner, Electromagnetic forming—A review, Journal of Materials Processing Technology, 211, 787 - 829 (2011).
[11] http://www.magneform.com/
[12] http://www.iap.com/magnetic-compaction.html
[13] http://www.kobelco.co.jp/english/environment/2008/1180558_9629.html
[14] H.P. Furth, R.W. Waniek, Production and use of high transient magnetic fields I. The Review of Scientific Instruments 27 (4), 195 - 203 (1956).
[15] G.K. Lal, M.J. Hiller, The electrodynamics of electromagnetic forming, International Journal of Mechanical Science., Pergamon Press, 10, 491 - 500 (1968).
[16] H. Lippmann, H. Schreiner, Zur Physik der Metallumformung mit hohen Magnetfeld impulsen. Zeitschrift fur Metallkunde 55 (100), 737 - 740 (1964).
[17] D. Birdsall, F. Ford, H.P. Furth, R. Riley, Magnetic Forming! American Machinist/Metalworking Manufacturing 105 (6), 117 - 121 (1961).
[18] H. Dietz, H.J. Lippmann, H. Schenk, Theorie des Magneform-Verfahrens: Die Bewegung des Werkstucks. Elektronische Zeitschrift ETZ-A 89 (12), 274 - 278 (1968).
[19] G.K. Fenton, G.S. Daehn, Modeling of electromagnetically formed sheet metal. Journal of Materials

Processing Technology 75, 6 - 16 (1998).
[20] N. Takatsu, M. Kato, K. Sato, T. Tobe, High-speed forming of metal sheets by electromagnetic force. Japan Society Mechanical Engineering International Journal (JSME) Series III 31 (1), 142 - 148 (1988).
[21] D.A. Oliveira, M.J. Worswick, M. Finn, D. Newman, Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: free-form and cavity fill experiments and model. Journal of Materials Processing Technology 170, 350 - 362 (2005).
[22] N. Bessonov, S. Golovashchenko, Numerical simulation of pulsed electromagnetic stamping process. In: Proceedings of the 1st International Conference on High Speed Forming ICHSF 2004, Dortmund, 83 - 91 (2004).
[23] C. Karch, K. Roll, Transient simulation of electromagnetic forming of aluminium tubes. Advanced Materials Research 6 - 8, 639 - 646 (2005).
[24] M. Kleiner, A. Brosius, Determination of flow curves at high strain rates using the electromagnetic forming process and an iterative finite element simulation scheme. Annals of the CIRP, 55/1/2006 (2006).
[25] M. Schinnerl, J. Schoberl, M. Kaltenbacher, R. Lerch, Multigrid methods for the 3D simulation of nonlinear magneto-mechanical systems. IEEE Transaction of Magnetics 38, 1497 - 1511 (2002)
[26] M. Stiemer, J. Unger, B. Svendsen, H. Blum, Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming. International Journal for Numerical Methods in Engineering 68, 1301 - 1328 (2006)
[27] M. Stiemer, J. Unger, B. Svendsen, H. Blum, An arbitrary Lagrangian Eulerian approach to the three-dimensional simulation of electromagnetic forming. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 198 (17 - 20), 1535 - 1547 (2009)
[28] Ph. Conraux, M. Pignol, V. Robin, J.M. Berghau, 3D finite element modeling of electromagnetic forming processes. In: Proceedings of the 2nd International Conference on High speed Forming—ICHSF 2006, Dortmund, 73 - 82. (2006)
[29] P. L'Eplattenier, G. Cook, C. Ashcraft, Introduction of an electromagnetism module in LS-DYNA for coupled mechanical thermal electromagnetic simulation. In: Proceedings of the 3rd International Conference on High Speed Forming—ICHSF 2008, Dortmund, 85 - 96 (2008)
[30] J. Imbert, M. Worswick, P. L'Epplattenier, Effects of force distribution and rebound on electromagnetically formed sheet metal. In: Proceedings of the 4th International Conference on High Speed Forming—ICHSF 2010, Columbus, 169 - 180 (2010)
[31] O.K. Demir, V. Psyk, A.E. Tekkaya, Simulation of tube wrinkling in electromagnetic compression. Production Engineering 4 (4), 421 - 426, doi:10.1007/s11740-010-0243-4 (2010)
[32] E. El-Magd, M. Abouridouane, Characterization, modelling and simulation of deformation and fracture behaviour of the light-weight wrought alloys under high strain rate loading. International Journal of Impact Engineering 32 (5), 741 - 758 (2006).
[33] F.J. Zerilli, R.W. Armstrong, Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamic calculations. Journal of Applied Physics 61 (5), 1816 - 1825 (1987)

김 대 용

· 재료연구소 변형제어 연구그룹 선임연구원
· 관심분야 : 소성역학, 판재성형, 성형해석
· E-mail : daeyong@kims.re.kr

김 지 훈

· 재료연구소 변형제어 연구그룹 선임연구원
· 관심분야 : 멀티스케일 해석
· E-mail : kimjh@kims.re.kr